ÇELİK YAPILARIN TASARIM, HESAP VE YAPIM ESASLARINA DAİR YÖNETMELİK

UYGULAMA KILAVUZU

2017

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik

Uygulama Kılavuzu

1. Baskı Nisan - 2017
Yayıncı Sertifika No: 20706
ISBN: 978-605-5294-63-2

Yapımcı:
Matsis Matbaa Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti.
Tevfikbey Mah. Dr. Ali Demir Cad. No: 51 Sefaköy-İSTANBUL

SUNUŞ

Bakanlığımız; gelecek nesillere sağlıklı, güvenli bir ülke emanet etmeyi şiar edinen tecrübeli kadrolarıyla yaşanabilir çevre ve marka şehirler hedefine odaklanmıştır. Bu yöndeki iradesini Türkiye'nin 2023 vizyonuyla birleştiren Bakanlığımız, çevre ve şehircilik alanında Milletimizin hayat kalitesini planlı bir biçimde artırma gayretindedir.

"İnsanı yaşat ki devlet yaşasın" düsturuyla, çalışmalarımızın tamamında insanı merkeze alan bir anlayışa sahibiz. İnsanımızın yaşam kalitesini yükseltmeyi hedeflerken, modern inşaat uygulamalarını ve tekniklerini unutmuyoruz. Çalışmalarımızı kalite, verimlilik, kalıcılık ve en önemlisi insan hayatını her meselenin üzerinde tutan bir anlayış çerçevesinde sürdürüyoruz.

Bu sağlam bakış açısından aldığımız güçle; her türlü yerleşme ve yapılaşma ile ilgili genel ilkeleri, stratejileri ve standartları belirlemeyi ve bu doğrultuda mevzuatlar hazırlayarak üretilen politikaların uygulanmasını sağlamayı öncelikli görevlerimiz arasına aldık.

Büyük bölümü deprem riski altında olan Ülkemizde geleceğimizin şehirlerini inşa ediyoruz. Amacımızı gerçekleştirebilmek için ihtiyaç duyduğumuz tüm enstrümanların doğru, sağlam ve uygun biçimde kullanılması olmazsa olmazlarımız arasındadır.

Sanayi tesisleri, yüksek katlı binalar ve özellik arz eden yapılar başta olmak üzere yapısal çeliğin kullanımında son yıllarda hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Buna karşın, 1980 yılında yayımlanan ve günümüz yapı mühendisliği gereksinimlerini karşılayamayacak düzeydeki "TS 648 Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kurallarında" bugüne kadar herhangi bir güncelleme yapılmamıştı.

Ülkemizde gelişen çelik sektörünün önünü açmak, günümüz bilimsel ve teknolojik gelişmelerine uygun ve daha dayanıklı çelik yapı tasarımını sağlamak amacıyla hazırladığımız "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" 01 Eylül 2016 tarihinde yürürlüğe girdi.

Hazırlanan "Uygulama Kılavuzu" yönetmeliğin uygulanmasında yön gösterici nitelikte bir eserdir. Uygulama Kılavuzu detaylı anlatımı ve içerdiği örnek çözümlerle çelik yapı sektöründe yer alan üreticiler, tasarımcı ve uygulayıcı mühendisler, yükleniciler ve denetçiler dâhil tüm aktörlere bir başvuru kaynağı olacak; Üniversitelerimizde konuyla ilgili meslek disiplinleri için eğitim materyali olarak kullanılabilecektir.

Bakanlığımız; inşaat sektöründe büyük önem arz eden güvenli yapı tasarımına yönelik çalışmalarına devam edecektir.

Bu çok önemli çalışmaya katkı sunan değerli bilim insanlarımıza ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür eder, çalışmalarımızın Ülkemize ve Milletimize hayırlı olmasını dilerim.

Mehmet ÖZHASEKİ
Çevre ve Şehircilik Bakanı

ÖNSÖZ

Sektörün ihtiyaçlarına yönelik hazırlanan bu çalışmanın amacı; 04/02/2016 tarih ve 29614 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak 01 Şubat 2016 tarihinde yürürlüğe giren "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" uygulamalarına yönelik yol gösterici olmasıdır.

Uygulama Kılavuzu; çelik yapı sektörünün tüm paydaşlarınca temel kaynak olmasının yanı sıra, yükseköğretim kurumlarımız için önemli bir eğitim materyali vasfını da taşımaktadır.

Uygulama Kılavuzu Bakanlığımız Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü ile İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi arasında imza edilen protokol kapsamında hazırlanmıştır.

Uygulama Kılavuzunun hazırlanmasında emeği geçen değerli akademisyenler Prof. Dr. Cavidan YORGUN, Prof. Dr. Cem TOPKAYA ve Yrd. Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER'e ve Bakanlığımız adına projenin yürütücülüğünü gerçekleştiren çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yasin KALEM
Genel Müdür

İÇİNDEKİLER

GİRİŞ **1**

BÖLÜM 1
GENEL ESASLAR **3**
Örnek 1.1 TS EN 1991-1-3 e Uygun Olarak Kar Yükü Yayılışlarının Belirlenmesi 4

BÖLÜM 2
MALZEME **11**

BÖLÜM 3
İMALAT VE MONTAJ **12**

BÖLÜM 4
KALİTE KONTROLÜ **12**

BÖLÜM 5
TASARIMDA TEMEL İLKELER **13**

BÖLÜM 6
STABİLİTE TASARIMI **17**
Örnek 6.1 İkinci Mertebe Teorisine Göre Çerçeve Tasarımı 19
Örnek 6.1.a Genel Analiz Yöntemi İle Tasarım 19
Örnek 6.1.b Burkulma Boyu Yöntemi İle Tasarım 22

BÖLÜM 7
EKSENEL ÇEKME KUVVETİ ETKİSİ **27**
Örnek 7.1 Levha Çekme Elemanı 29
Örnek 7.2 IPE 270 Enkesitli Çekme Elemanı 32
Örnek 7.3 L 70×70×7 Enkesitli Çekme Elemanı 35
Örnek 7.4 UPE 240 Enkesitli Çekme Elemanı 38
Örnek 7.5 Boru 219.1×10 Enkesitli Çekme Elemanı 41
Örnek 7.6 Kutu 150×100×8 Enkesitli Çekme Elemanı 44
Örnek 7.7 Mil Birleşimli Levha 15×150 Enkesitli Çekme Elemanı 47
Örnek 7.8 Şaşırtmalı Bulon Delikli Levha Çekme Elemanı 50

BÖLÜM 8 EKSENEL BASINÇ KUVVETİ ETKİSİ 52
Örnek 8.1 HE 450 B Enkesitli Basınç Elemanı 54
Örnek 8.2 ½ HE 280 B Enkesitli Basınç Elemanı 57
Örnek 8.3 L 150×150×15 Enkesitli Basınç Elemanı 61
Örnek 8.4 Boru 219.1×10 Enkesitli Basınç Elemanı 64
Örnek 8.5 2UPE 200 Yapma Enkesitli Çok Parçalı Basınç Elemanı 67
Örnek 8.6 2L 110×110×10 Yapma Enkesitli Çok Parçalı Basınç Elemanı 73
Örnek 8.7 L 200×150×12 Enkesitli Basınç Elemanı 77
Örnek 8.8 ½ HE 700 A Enkesitli Basınç Elemanı 80

BÖLÜM 9
EĞİLME MOMENTİ ETKİSİ 84
Örnek 9.1 Kuvvetli Ekseninde Eğilme Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş 88
Örnek 9.2 Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş 90
Örnek 9.3 Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş 93
Örnek 9.4 Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş 96
Örnek 9.5 Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde Yapma Enkesitli Kiriş 99
Örnek 9.6 Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde Yapma Enkesitli Kiriş 102
Örnek 9.7 Zayıf Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş 106
Örnek 9.8 Kutu 200×200×8 Enkesitli Kiriş 108
Örnek 9.9 Zayıf Ekseni Etrafında Eğilme Etkisinde Kutu 300×200×8 Enkesitli Kiriş 110
Örnek 9.10 Boru 219.1×10 Enkesitli Kiriş 112
Örnek 9.11 T 125×250 Enkesitli Kiriş 114
Örnek 9.12 T 200×400 Enkesitli Kiriş 116
Örnek 9.13 T 200×400 Enkesitli Kiriş 119
Örnek 9.14 L 160×160×14 Enkesitli Kiriş 122
Örnek 9.15 L 160×160×14 Enkesitli Kiriş 124
Örnek 9.16 L 160×160×14 Enkesitli Kiriş 126
Örnek 9.17 L 160×160×14 Enkesitli Kiriş 128
Örnek 9.18 L 100×100×6 Enkesitli Kiriş 130
Örnek 9.19 Dolu Kutu 200×10 Enkesitli Kiriş 135

BÖLÜM 10
KESME KUVVETİ ETKİSİ 137
Örnek 10.1 Kuvvetli Ekseninde Kesme Kuvveti Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş 139
Örnek 10.2 Kuvvetli Ekseninde Kesme Kuvveti Etkisinde UPE 220 Enkesitli Kiriş 140

Örnek 10.3 Kuvvetli Ekseninde Kesme Kuvveti Etkisinde Yapma Enkesitli Kiriş 141
Örnek 10.4 Kuvvetli Ekseninde Kesme Kuvveti Etkisinde Yapma Enkesitli Kiriş 143
Örnek 10.5 Kuvvetli Ekseninde Kesme Kuvveti Etkisinde Yapma Enkesitli Kiriş 146
Örnek 10.6 Kutu 200×200×8 Enkesitli Kiriş 154
Örnek 10.7 Boru 168.3×10 Enkesitli Kiriş..... 155
Örnek 10.8 L 200×150×10 Enkesitli Kiriş 157
Örnek 10.9 Zayıf Ekseninde Kesme Kuvveti Etkisinde HE 450 A Enkesitli Kiriş..... 158

BÖLÜM 11
BİLEŞİK ETKİLER..... 159
Örnek 11.1 Eksenel Basınç Kuvveti ve Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Eleman 160
Örnek 11.2 Eksenel Basınç Kuvveti ve Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Eleman 166
Örnek 11.3 Eksenel Basınç Kuvveti ve Asal Eksenleri Etrafında Eğilme Momenti Etkisinde HE 300 B Enkesitli Eleman..... 169
Örnek 11.4 Eksenel Basınç Kuvveti ve Asal Eksenleri Etrafında Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Eleman 175
Örnek 11.5 Eksenel Çekme Kuvveti ve Kuvveti Ekseni Etrafında Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Eleman 177
Örnek 11.6 Eksenel Basınç Kuvveti ve Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Konsol Kolonun Burkulma Boyu Yöntemi İle Tasarımı 180
Örnek 11.7 Eksenel Basınç Kuvveti ve Kuvvetli Ekseni Etrafında Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Konsol Kolonun Genel Analiz Yöntemi İle Tasarımı 185
Örnek 11.8 Burulma Momenti Etkisinde Kutu 200×200×8 Enkesitli Eleman 187
Örnek 11.9 Burulma Momenti Etkisinde Boru 127×6.3 Enkesitli Eleman..... 189
Örnek 11.10 Burulma Momenti, Eğilme Momenti ve Kesme Kuvvetinin Bileşik Etkisinde Kutu 150×100×6 Enkesitli Eleman 191
Örnek 11.11 Burulma Momenti, Eğilme Momenti ve Kesme Kuvvetinin Bileşik Etkisinde IPE 450 Enkesitli Eleman..... 195
Örnek 11.12 Eksenel Çekme Kuvveti ve Eğilme Momentinin Bileşik Etkisinde HE 300 B Enkesitli Eleman..... 201
Kaynak Yayınlar..... 203

BÖLÜM 12

KOMPOZİT ELEMANLAR 204

Örnek 12.1 Eksenel Basınç Kuvveti Etkisinde Boru Enkesitli Beton Dolgulu Kompozit Kolon 205

Örnek 12.2 Eksenel Çekme Kuvveti Etkisinde Boru Enkesitli Beton Dolgulu Kompozit Kolon 208

Örnek 12.3 Eksenel Basınç Kuvveti Etkisinde Kutu Enkesitli Beton Dolgulu Kompozit Kolonda Yük Geçiş Mekanizmaları 209

Örnek 12.4 Eksenel Basınç Kuvveti Etkisinde Çelik Gömme Kompozit Kolonda Yük Geçiş Mekanizmaları 216

Örnek 12.5 Eksenel Çekme Kuvveti Etkisinde Çelik Gömme Kompozit Kolon 227

Örnek 12.6 Kompozit Kiriş 228

Örnek 12.7 Kompozit Kiriş 231

Örnek 12.8 Kompozit Kiriş 235

Örnek 12.9 Kısmi Etkileşimli Kompozit Kiriş 244

Örnek 12.10 Eğilme Momenti, Eksenel Basınç ve Kesme Kuvvetinin Bileşik Etkisinde Beton Dolgulu Kompozit Eleman 254

Örnek 12.11 Eğilme Momenti, Eksenel Basınç ve Kesme Kuvvetinin Bileşik Etkisinde Çelik Gömme Kompozit Eleman 265

Kaynak Yayınlar 276

BÖLÜM 13

BİRLEŞİMLER VE BİRLEŞİM ARAÇLARI 277

Örnek 13.1 Tam ve Kısmi Penetrasyonlu Küt Kaynaklı Birleşim 277

Örnek 13.2 Boyuna Ekseni Doğrultusunda Yük Etkisinde Köşe Kaynaklı Uç Birleşimi 280

Örnek 13.3 Boyuna Eksenine Paralel ve Dik Ağırlık Merkezinden Geçen Yük Etkisinde Köşe Kaynaklı Birleşim 282

Örnek 13.4 Enkesiti Eğrisel Kenarlı Küt Kaynaklı Birleşim 284

Örnek 13.5 Çekme ve Kesme Kuvveti Etkisinde Köşe Kaynaklı Birleşim 286

Örnek 13.6 Ezilme Etkili Bulonlu Birleşim 288

Örnek 13.7 Çekme ve Kesme Kuvveti Etkisinde Ezilme Etkili Bulonlu Birleşim 291

Örnek 13.8 Sürtünme Etkili (Kayma Kontrollü) Bulonlu Birleşim 294

Örnek 13.9 Çekme ve Kesme Kuvveti Etkisinde Sürtünme Etkili Bulonlu Birleşim 296

Örnek 13.10 Kısa Oval Delikli Sürtünme Etkili Bulonlu Birleşim 298

Örnek 13.11 Uzun Oval Delikli Sürtünme Etkili Bulonlu Birleşim 300

Örnek 13.12 Kolon Başlığında Yerel Eğilme Sınır Durumu Kontrolü 302

Örnek 13.13 Kolon Gövdesinde Yerel Akma Sınır Durumu Kontrolü.....304
Örnek 13.14 Kolon Gövdesinde Yerel Buruşma Sınır Durumu Kontrolü.....306
Örnek 13.15 Kiriş Gövdesinde Yanal Ötelenerek Burkulma Sınır Durumu Kontrolü.....308
Örnek 13.16 Kolon Gövdesinde Yerel Burkulma Sınır Durumu Kontrolü.....310
Örnek 13.17 Kiriş-Kolon Birleşimi Panel Bölgesinde Kayma Etkisinde Akma Sınır Durumu Kontrolü.....312
Örnek 13.18 Kolon Taban Levhası Birleşimi.....314
Kaynak Yayınlar.....317

BÖLÜM 14 BORU VE KUTU ENKESİTLİ ELEMANLARIN BİRLEŞİMLERİ 318
Örnek 14.1 IPE 300 Enkesitli Kirişin Başlık Elemanlarının Boru 127×6.3 Enkesitli Kolona Birleşimi.....321
Örnek 14.2 Boru 159×6.3 Enkesitli Elemana Boyuna Levhalı T-Birleşimi.....324
Örnek 14.3 Boru 159×8 Enkesitli Elemanın Kapak Levhalı Birleşimi.....326
Örnek 14.4 Kutu 200×200×15 Enkesitli Elemana Boyuna Levhalı T-Birleşimi.....328
Örnek 14.5 Kutu 200×200×12 Enkesitli Elemana Profil Gövdesini Yararak Geçen Boyuna Levhalı T-Birleşimi.....331
Örnek 14.6 Kutu 200×200×12 Enkesitli Elemanın Kapak Levhalı Birleşimi.....334
Örnek 14.7 Boru Profilden Oluşan Kafes Sistemde Y- Birleşimi.....336
Örnek 14.8 Boru Profilden Oluşan Kafes Sistemde T- Birleşimi.....339
Örnek 14.9 Boru Profilden Oluşan Kafes Sistemde X- Birleşimi.....342
Örnek 14.10 Boru Profilden Oluşan Kafes Sistemde K- Birleşimi.....345
Örnek 14.11 Kutu Profilden Oluşan Kafes Sistemde X- Birleşimi.....349
Örnek 14.12 Kutu Profilden Oluşan Kafes Sistemde T- Birleşimi.....353
Örnek 14.13 Kutu Profilden Oluşan Kafes Sistemde Y- Birleşimi.....356
Örnek 14.14 Kutu Profilden Oluşan Kafes Sistemde K- Birleşimi.....359
Örnek 14.15 Kutu Profilden Oluşan Kafes Sistemde K-Birleşimi ve X- Birleşimi.....363
Örnek 14.16 Boru Profilden Oluşan Moment Aktaran X- Birleşimi.....371
Örnek 14.17 Boru Profilden Oluşan Moment Aktaran X- Birleşimi.....375
Örnek 14.18 Kutu Profilden Oluşan Moment Aktaran T- Birleşimi.....380
Örnek 14.19 Kutu Profilden Oluşan Moment Aktaran X- Birleşimi.....385
Örnek 14.20 Kutu Profilden Oluşan Moment Aktaran X- Birleşimi.....388

BÖLÜM 15 KULLANILABİLİRLİK SINIR DURUMLARI İÇİN TASARIM.....391
Kaynak Yayınlar.....392

BÖLÜM 16 YAPISAL ELEMANLAR İÇİN STABİLİTE BAĞLANTILARI 393
Örnek 16.1 Kolon İçin Çaprazlı Stabilite Bağlantısı 394
Örnek 16.2 Kolon İçin Noktasal Stabilite Bağlantısı 397
Örnek 16.3 Kolon İçin Noktasal Stabilite Bağlantısı 400
Örnek 16.4 Kiriş İçin Çaprazlı Stabilite Bağlantısı 405
Örnek 16.5 Kiriş İçin Noktasal Stabilite Bağlantısı 408
Örnek 16.6 Kiriş İçin Noktasal Stabilite Bağlantısı 413
ÖRNEK ÇELİK ENDÜSTRİ BİNASI 416
Kaynak Yayınlar.....448

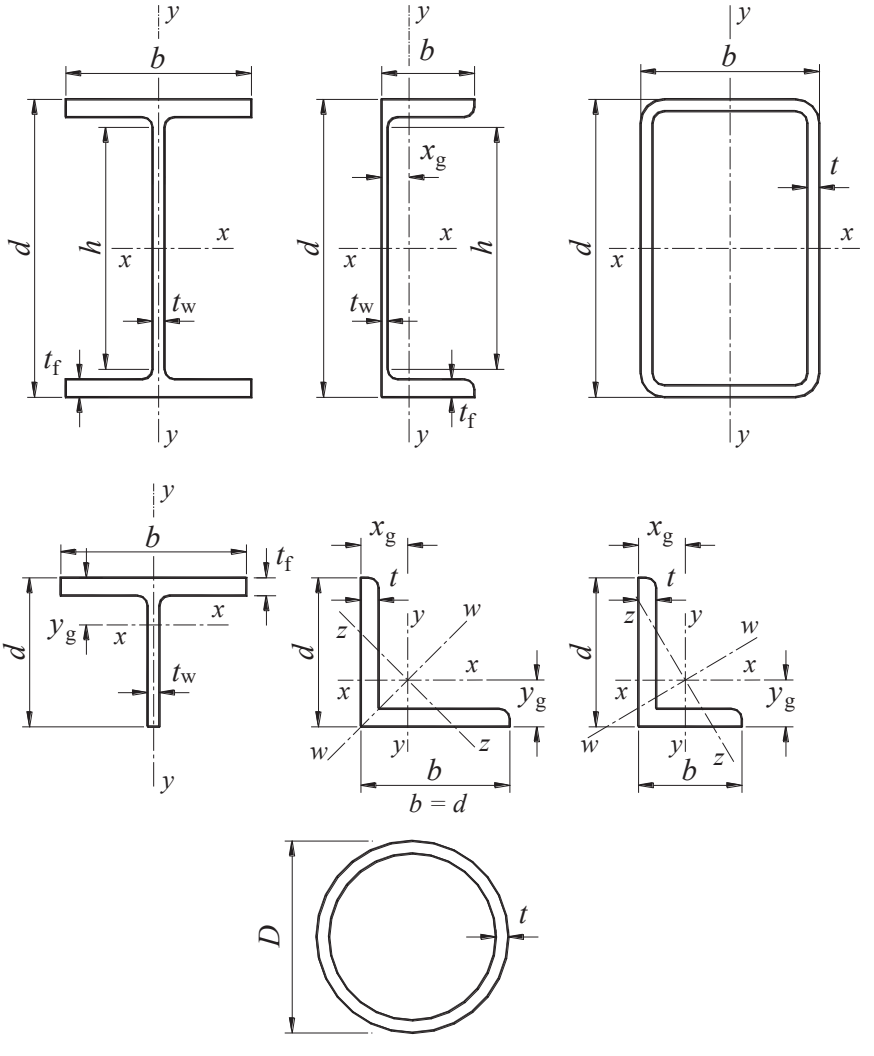
GİRİŞ

Bu kitap *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği* (bu kitapta *Yönetmelik* ismi ile belirtilecektir) kapsamında her bir bölümde belirtilen esasların ve temel uygulama prensiplerinin açıklanması amacıyla hazırlanmıştır.

Hazırlanan bu kitabın kapsamı, yapısal çelik ve çelik – betonarme kompozit yapı elemanlarının ve yapı sistemlerinin, kullanım amaçlarına uygun olarak, yeterli bir güvenlikle tasarımına ve yapımına ilişkin yöntem, kural ve koşulları içeren *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları Yönetmeliği* esaslarının uygulandığı yapı elemanları ve birleşim araçlarına ait örnek çözümlerden oluşmaktadır. Ancak boyutlandırmanın tamamlanabilmesi için yürürlükteki deprem yönetmeliğinin ilgili koşullarının da gözönüne alınması gerekmektedir.

Yönetmelik kapsamında, çelik yapı elemanlarının ve birleşimlerinin dayanım sınır durumu esas alınarak tasarımı *Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım* (YDKT) veya *Güvenlik Katsayıları ile Tasarım* (GKT) yaklaşımlarından biri uygulanarak gerçekleştirilmelidir. YDKT ve GKT yaklaşımları arasındaki benzerlik ve farklılıkların kolaylıkla görülebilmesi amacıyla, kitaptaki örneklerin çözümleri her iki yaklaşım için yan yana verilmiştir.

Bu örneklerde kullanılan enkesitlere ait geometrik büyüklüklerin tanımı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



BÖLÜM 1 GENEL ESASLAR

Yönetmelik Bölüm 1 de kapsam ve genel esaslar açıklanarak, *Yönetmelik* içinde doğrudan veya dolaylı olarak referans verilen ulusal ve uluslararası standart, yönetmelik ve normlar sıralanmaktadır.

Özellikle, TS 498 Standardı'nda yer verilmeyen kar yükü yayılışının çatı geometrisine bağlı olarak belirlenmesine ve kar birikmesini dikkate alan ilgili yükleme durumlarının tanımlanmasına yönelik esaslar, çatı sistemlerinde meydana gelen toptan veya bölgesel göçmelerin önlenmesinde oldukça önemlidir. Benzer şekilde, rüzgar yükü etkileri, TS 498 Standardı'nda oldukça basit ve yapı sistemi geometrisine bağlı yayılışı yeterince detaylı tanımlanmaksızın verilmektedir. Özellikle yüksek binalarda ve farklı geometriye sahip yapı sistemlerinde rüzgar yükü yayılışına bağlı olarak meydana gelecek etkilerin ve bu etkiler altında oluşacak iç kuvvetlerin yeteri bir yaklaşıklıkla ve uygun bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. TS 498 Standardı'nın bu konudaki yetersizliği, *Yönetmelik* 1.3 te TS EN 1991-1-3 ve TS EN 1991-1-4 ün referans verilmesi ile giderilmektedir.

TS EN 1991-1-3 e göre kar yükü yayılışlarının belirlenmesi bu bölümde verilen Örnek 1.1 de, TS EN 1991-1-4 e göre rüzgar etkilerinin hesabı ve rüzgar yükü yayılışlarının düzeni ise son bölümde yer verilen çelik endüstri binası örneği üzerinde açıklanmaktadır.

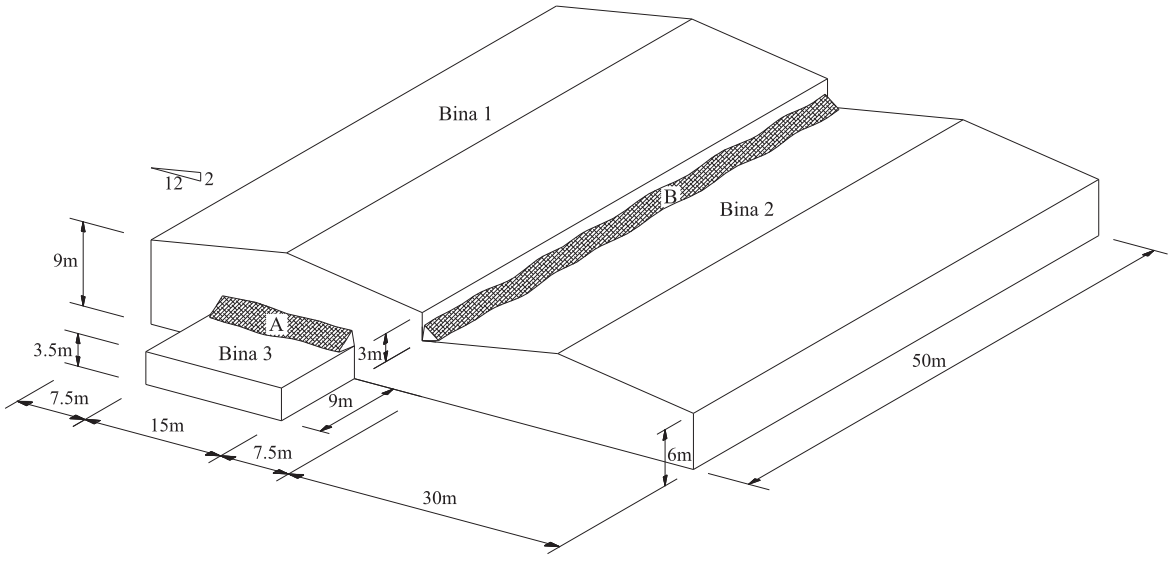
Bu kitap kapsamındaki örneklerde yer verilen çelik yapı elemanları ve birleşimlerin depreme dayanıklı olarak tasarımında, *Yönetmelik*'te verilen kural ve koşullara ek olarak, yürürlükteki deprem yönetmeliği kurallarının da uygulanması gerekmektedir.

Yapısal çelik ve çelik – betonarme kompozit yapı elemanlarının tasarımına ilişkin olarak hazırlanan *Yönetmelik*'te veya ilgili Türk standartlarında yer almayan tasarım kuralları için uluslararası geçerliliği kabul edilen eşdeğer diğer standart, yönetmelik vb. teknik kural dokümanları, *Yönetmelik*'te öngörülen ilkeleri ve asgari güvenlik seviyesini sağlayacak şekilde kullanılabilir.

Yapısal çelik ve çelik – betonarme kompozit yapı elemanları ve yapı sistemlerinin tasarımında, *Yönetmelik* 1.3 te verilen başlıca standart ve yönetmelikler referans alınacaktır.

Örnek 1.1

Aşağıdaki şekilde geometrileri ve yerleşimi görülen Bina 1, Bina 2 ve Bina 3 için A ve B taralı bölgeleri ile gösterilen kar birikmesi durumları esas alınarak her bir tipik bina çatısını kapsayan olası kar yükleme durumlarının TS EN 1991–1–3 Yapılar Üzerindeki Etkiler-Bölüm 1-3: Genel Etkiler-*Kar Yükleri* (Eurocode 1) e uygun olarak belirlenmesi.



Bina için genel bilgiler

Bina Tipi : Endüstri Binaları

Yer / Mahal Rakımı : İstanbul / 100 m

Bina Boyutları : (Kısa doğrultu×Uzun doğrultu×Mahya yüksekliği) olmak üzere,

Bina 1 : 30m × 50m × (9 + 2.5)m

Bina 2 : 30m × 50m × (6 + 2.5)m

Bina 3 : 9m × 15m × 3.5m

Çatıların Eğimi : Açı olarak verilmek üzere,

Bina 1 : $\alpha = 9.46°$

Bina 2 : $\alpha = 9.46°$

Bina 3 : $\alpha = 0.0°$

Topografik Bölge Sınıfı : Normal (TS EN 1991-1-3 Çizelge 5.1)

Kar yükü için genel bilgiler

TS EN 1991-1-3 Bölüm 1.6.1 deki tanım esas alınarak ve TS EN 1991-1-3 Bölüm 4.1 uyarınca, zemin yüzeyindeki kar ağırlığı, s_k

$$s_k = 0.75\ \mathrm{kN/m^2}$$

Zemin yüzeyindeki kar ağırlığı, s_k, TS EN 1991-1-3 Ek MA Çizelge MA.1 esas alınarak belirlenebilir. Ancak bu değerlerin güncel olmadığı gözönünde tutulmalıdır.

TS EN 1991-1-3 Bölüm 1.6.4 e göre ve TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2(3) uyarınca, çatı yüzeyindeki kar ağırlığı, s

$$s = \mu_i C_e C_t s_k$$

Maruz kalma katsayısı, C_e, TS EN 1991-1-3 Çizelge 5.1 e göre topografik bölge sınıfı normal topografik alan için, $C_e = 1.0$ olarak belirlenmiştir.

Isı katsayısı, C_t, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2(8) e göre, $C_t = 1.0$ olarak alınmıştır.

$$s = \mu_i (1.0)(1.0) s_k$$

$$s = \mu_i s_k$$

Çatı yüzeyleri kar yükleri

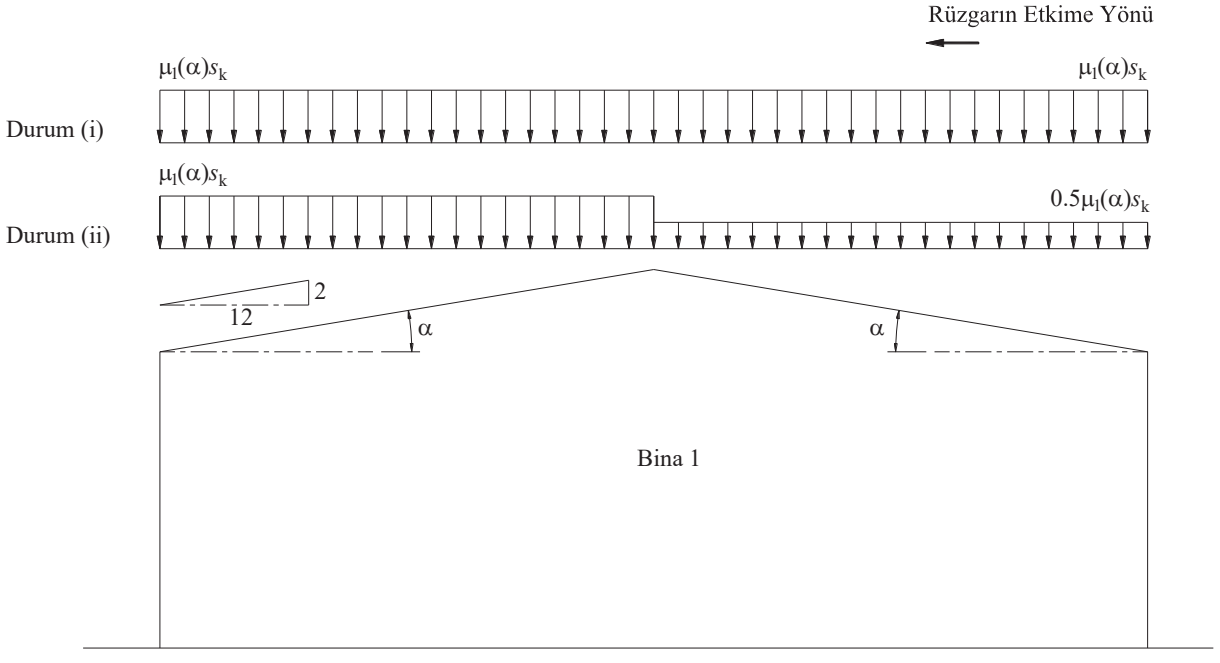
Bina 1 için çatı yüzeyi kar yükleri

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.3(2) uyarınca, çatı yüzeyindeki kar kütlesinin kaymasının önlenmediği varsayılarak TS EN 1991-1-3 Çizelge 5.2 de verilen değer ile TS EN 1991-1-3 Şekil 5.3 e göre, Bina 1 için Şekil 5.1.1 de gösterilen kar yükü yayılışları dikkate alınmalıdır.

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

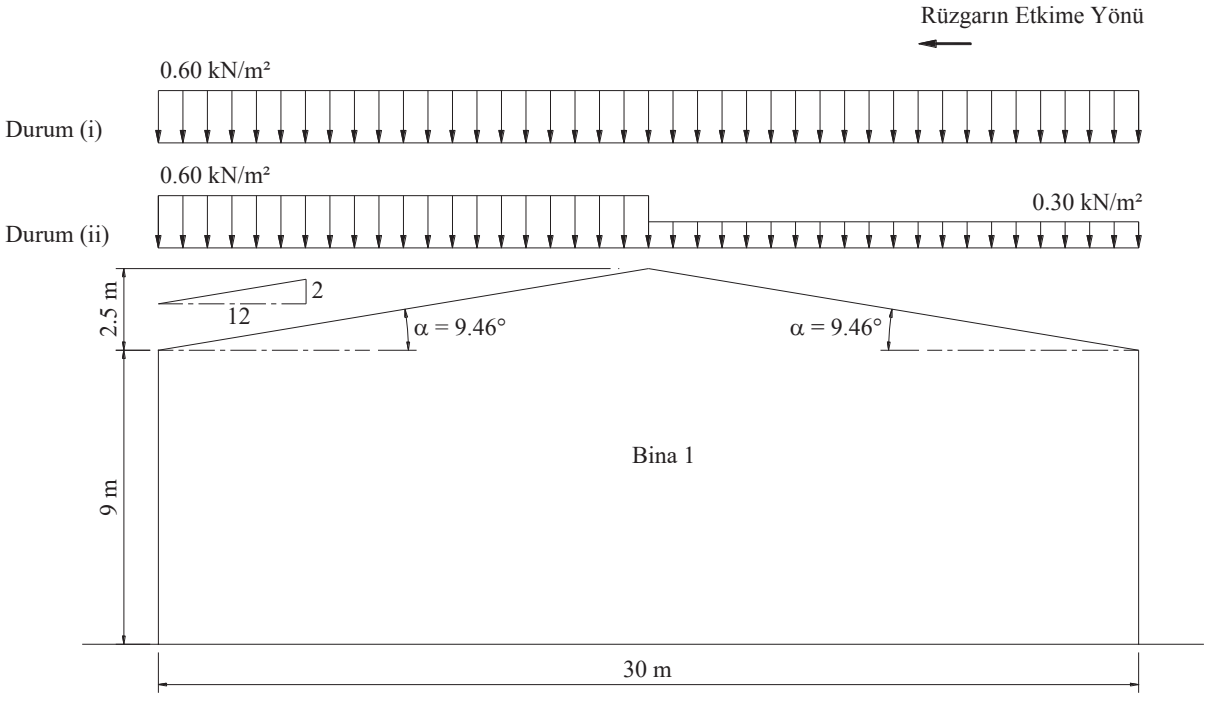
$$0^o \le \alpha = 9.46^o \le 30^o$$

$$\mu_1(\alpha) = 0.80$$



Şekil 5.1.1 Kar yükü düzenlemeleri

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.3(3) ve 5.3.3(4) uyarınca, sırasıyla, birikmemiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum (i) ve birikmiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum(ii) nin kullanılması gerekmektedir. Bu durumda, her bir yükleme durumu için yük değerleri, Şekil 5.1.2 de gösterilmektedir.



Şekil 5.1.2 Kar yükü değerleri

Bina 2 için çatı yüzeyi kar yükleri

$$s = \mu_i s_k$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) uyarınca, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) (5.6) ile tanımlanan μ_1, alttaki çatının düz olmaması nedeniyle, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.3 esas alınarak belirlenmelidir.

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

$$0^o \le \alpha = 9.46^o \le 30^o$$

$$\mu_1 = 0.80$$

μ_2 ise TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) (5.7) ile hesaplanacaktır.

$$\mu_2 = \mu_s + \mu_w$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) uyarınca, daha üstteki çatıdan kar kayması nedeniyle çatılardaki kar yükü şekil katsayısı, μ_s

$$\alpha = 9.46^o \le 15^o$$

$$\mu_s = 0.0$$

Rüzgar etkisinin mevcut olduğu çatılardaki kar yükü şekil katsayısı, μ_w, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1)(5.8) ile hesaplanacaktır.

$$\mu_w = \frac{(b_1 + b_2)}{2h} \le \frac{\gamma h}{s_k}$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) uyarınca, karın birim hacim ağırlığı, γ = 2 kN/m^3 olarak alınmaktadır.

$$\mu_w = \frac{(30+30)}{2(3)} \le \frac{(2)(3)}{(0.75)}$$

$$\mu_w = 10.0 \le 8.0 \times$$

$$\mu_w = 8.0$$

Ancak TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 1 uyarınca, Milli Ek yayımlanana kadar μ_w nin üst ve alt sınırı tavsiye edilen değerler esas alınarak belirlenebilir.

$$0.8 \le \mu_w \le 4$$

$$\mu_w = 8.0 \le 4 \times$$

$$\mu_w = 4$$

Kar birikintisinin uzunluğu, l_s, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 1 (5.9) ile hesaplanacaktır.

$$l_s = 2h$$

$$l_s = 2(3)$$

$$l_s = 6.0 \text{ m}$$

Ancak TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 2 uyarınca, Milli Ek yayımlanana kadar ls nin üst ve alt sınırı tavsiye edilen değerler esas alınarak belirlenebilir.

$$5 \text{ m} \le l_s \le 15 \text{ m}$$

$$5 \text{ m} \le l_s = 6.0 \text{ m} \le 15 \text{ m}$$

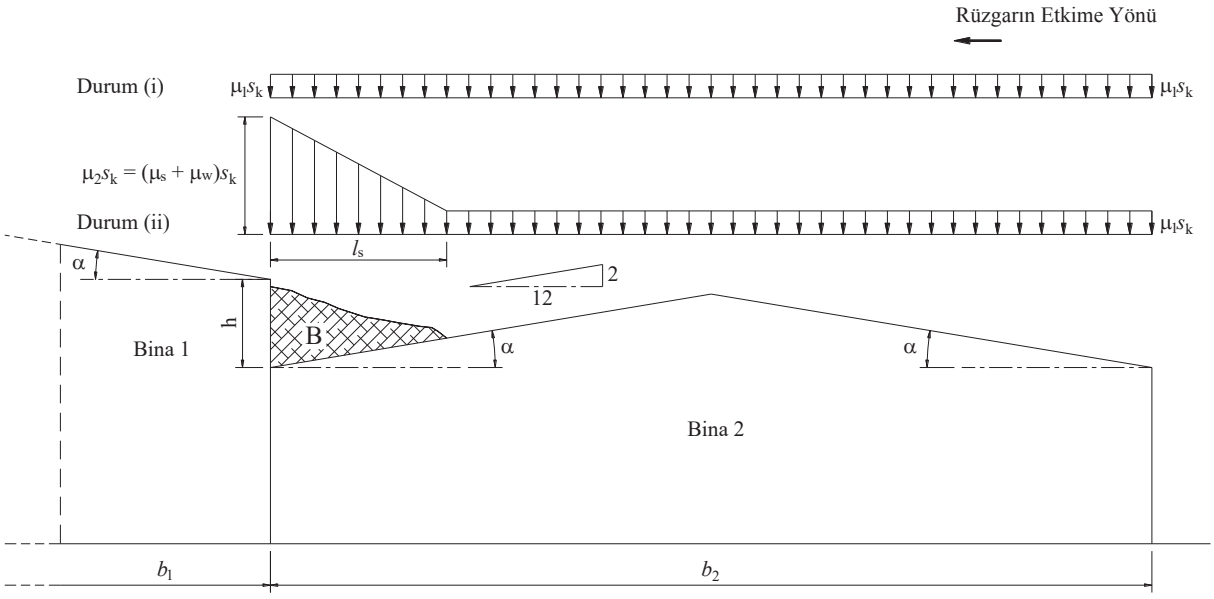
$$l_s = 6.0 \text{ m}$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 3 uyarınca, $b_2 > l_s$ olduğundan, alttaki çatı kenarındaki katsayı için μ_1 ve μ_2 arasında interpolasyon uygulanmayacaktır.

$$\mu_2 = 0.0 + 4.0$$

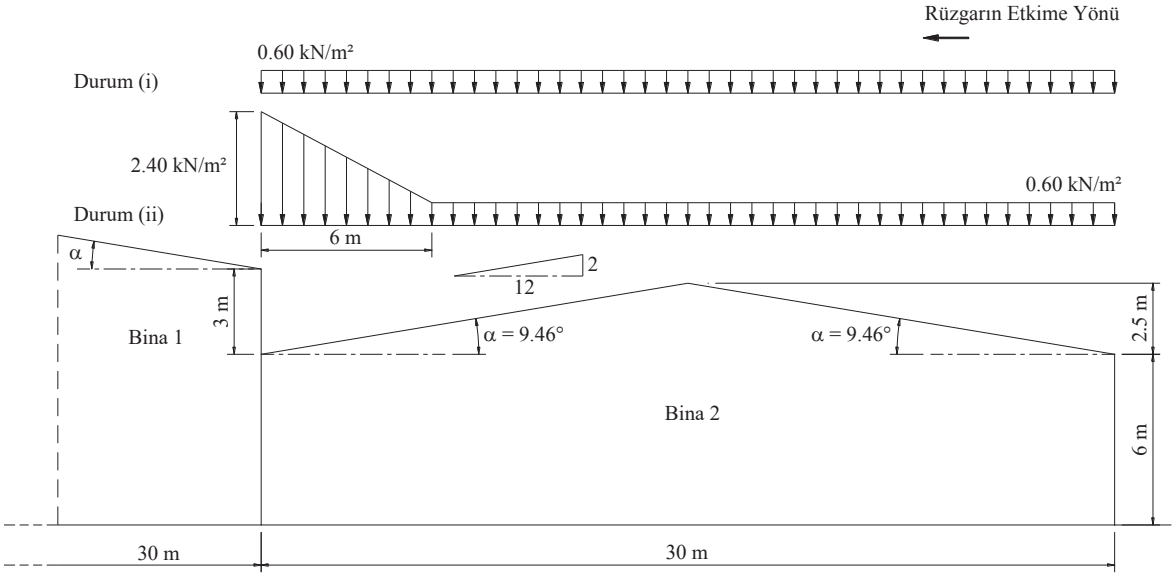
$$\mu_2 = 4$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(2) ve 5.3.6(3) uyarınca, TS EN 1991-1-3 Şekil 5.7 ye göre, Şekil 5.1.3 te gösterilen kar yükü yayılışları dikkate alınmalıdır.



Şekil 5.1.3 Kar yükü düzenlemeleri

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(2) ve 5.3.6(3) uyarınca, sırasıyla, birikmemiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum (i) ve birikmiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum(ii) nin kullanılması gerekmektedir. Bu durumda, her bir yükleme durumu için yük değerleri, Şekil 5.1.4 te gösterilmektedir.



Şekil 5.1.4 Kar yükü değerleri

Bina 3 için çatı yüzeyi kar yükü

$$s = \mu_i s_k$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) uyarınca, μ_1, alttaki çatının düz olması nedeniyle, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6 (5.6) ile belirlenmelidir.

$$\mu_1 = 0.80$$

μ_2 ise TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6 (5.7) ile hesaplanacaktır.

$$\mu_2 = \mu_s + \mu_w$$

Daha üstteki çatıdan kar kayması olasılığı bulunmadığından, daha üstteki çatıdan kar kayması nedeniyle çatılardaki kar yükü şekil katsayısı, μ_s

$$\mu_s = 0.0$$

Rüzgar etkisinin mevcut olduğu çatılardaki kar yükü şekil katsayısı, μ_w, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6 (5.8) ile hesaplanacaktır.

$$\mu_w = \frac{(b_1 + b_2)}{2h} \leq \frac{\gamma h}{s_k}$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) uyarınca, karın birim hacim ağırlığı, γ = 2 kN/m^3 olarak alınmaktadır.

$$b_1 = 50\ \text{m} \quad b_2 = 9\ \text{m}$$

Kar birikintisinin uzunluğu, l_s, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6 (5.9) ile hesaplanacaktır.

$$l_s = 2h$$

$$l_s = 2(5.5)$$

$$l_s = 11.0\ \text{m}$$

Ancak TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 2 uyarınca, Milli Ek yayımlanana kadar l_s nin üst ve alt sınırı tavsiye edilen değerler esas alınarak belirlenebilir.

$$5\ \text{m} \leq l_s \leq 15\ \text{m}$$

$$5\ \text{m} \leq l_s = 11.0\ \text{m} \leq 15\ \text{m}$$

$$l_s = 11.0\ \text{m}$$

$$b_2 = 9\ \text{m} \leq l_s = 11.0\ \text{m}$$

$$\mu_w = \frac{(50+9)}{2(5.5)} \leq \frac{(2)(3)}{(0.75)}$$

$$\mu_w = 5.4 \leq 8.0\ \checkmark$$

$$\mu_w = 5.4$$

Ancak TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 1 uyarınca, Milli Ek yayımlanana kadar μ_w nin üst ve alt sınırı tavsiye edilen değerler esas alınarak belirlenebilir.

$$0.8 \leq \mu_w \leq 4$$

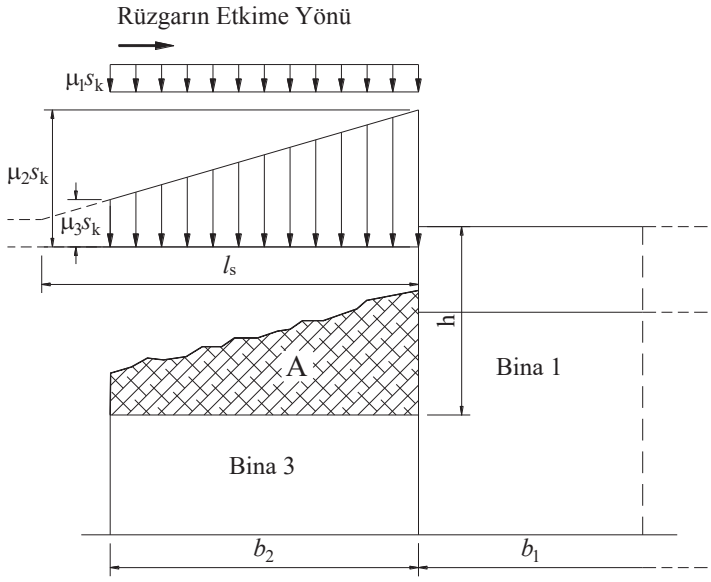
$$\mu_w = 5.4 \leq 4\ \times$$

$$\mu_w = 4$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(2) ve 5.3.6(3) uyarınca, TS EN 1991-1-3 Şekil 5.7 ye göre, Şekil 5.1.5 te gösterilen kar yükü yayılışları dikkate alınmalıdır.

$$\mu_2 = 0.0 + 4.0$$

$$\mu_2 = 4$$



Şekil 5.1.5 Kar yükü düzenlemesi

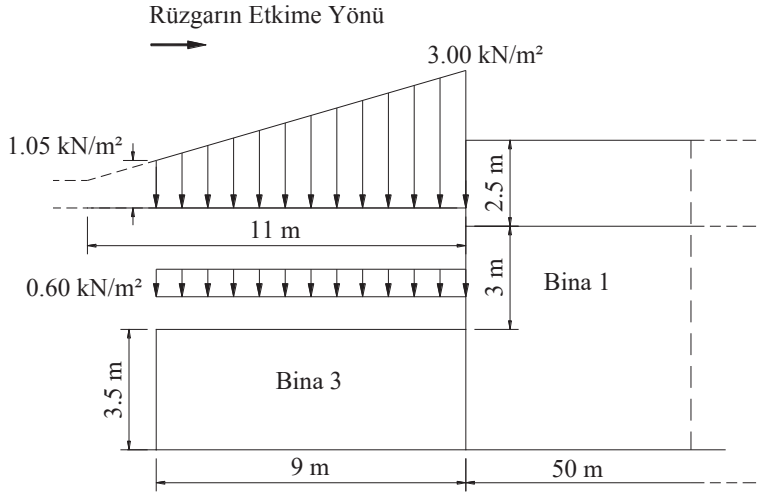
TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(1) Not 3 uyarınca, $b_2 < l_s$ olduğundan, alttaki çatı kenarındaki katsayı, μ_3, μ_1 ile μ_2 arasında interpolasyon uygulanarak belirlenecektir. Buna göre, μ_3

$$\mu_3 = \mu_1 + \frac{(\mu_2 - \mu_1)(l_s - b_2)}{l_s}$$

$$\mu_3 = 0.8 + \frac{(4.0 - 0.8)(11.0 - 9.0)}{11.0}$$

$$\mu_3 \cong 1.40$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.6(2) ve 5.3.6(3) uyarınca, sırasıyla, birikmemiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum (i) ve birikmiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum (ii) nin kullanılması gerekmektedir. Bu durumda, her bir yükleme durumu için yük değerleri, Şekil 5.1.6 da gösterilmektedir.



Şekil 5.1.6 Kar yükü değerleri

Her bir tipik binanın çatısı için oluşturulan birikmemiş ve birikmiş kar yükleme durumları, yük birleşimlerinde birbirinden bağımsız yükleme durumları olarak dikkate alınmalıdır.

BÖLÜM 2 MALZEME

Yönetmelik Bölüm 2 de yapı çeliği, birleşim araçları ve diğer çelik yapı malzemesinin özellikleri ve ilgili standart, norm ve yönetmelikler yer almaktadır. Bu bölümde verilen malzeme karakteristik değerleri üretim standartlarında verilen minimum değerlerdir.

Beton için TS 500 ve donatı çeliği için TS 708 standartlarında belirtilen ilgili malzeme özellikleri geçerlidir.

Yönetmelik, TS EN 10025 e uygun şekilde sıcak haddelenerek üretilmiş çelik profiller ve levhalar ile EN 10210 ve EN 10219 a uygun olarak üretilen yapısal boru ve kutu enkesitli elemanların oluşturduğu çelik ve çelik-betonarme kompozit yapıların tasarım esaslarını içerir. *Yönetmelik'*teki kurallar Tablo 2.1A ve Tablo 2.1B de verilen çelik sınıfları için geçerlidir. Bu doküman kapsamındaki örneklerde kullanılan çelik sınıflarının karakteristik değerleri, *Yönetmelik'*teki aynı tablo isimleriyle olmak üzere, Tablo 2.1A ve Tablo 2.1B de özetlenerek verilmiştir.

Tablo 2.1A – Sıcak Haddelenmiş Yapısal Çeliklerde Karakteristik Akma Gerilmesi, F_y ve Çekme Dayanımı, F_u

Standart ve Çelik Sınıfı	**Karakteristik Kalınlık, *t* (mm)**			
	$t \leq 40$mm		**40mm $< t \leq$ 80mm**	
	F_y (N/mm^2)	**F_u (N/mm^2)**	**F_y (N/mm^2)**	**F_u (N/mm^2)**
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

Tablo 2.1B – Yapısal Boru ve Kutu Profillerde Karakteristik Akma Gerilmesi, F_y ve Çekme Dayanımı, F_u

Standart ve Çelik Sınıfı	**Karakteristik Kalınlık, *t* (mm)**			
	$t \leq 40$mm		**40mm $< t \leq$ 80mm**	
	F_y (N/mm^2)	**F_u (N/mm^2)**	**F_y (N/mm^2)**	**F_u (N/mm^2)**
EN 10210-1				
S235 H	235	360	215	340
S275 H	275	430	255	410
S355 H	355	510	335	490
EN 10219-1				
S235 H	235	360		
S275 H	275	430		
S355 H	355	510		

Bulonlar, somunlar ve pullar, *Yönetmelik* 1.3.5 te verilen standartlara uygun olacaktır. *Yönetmelik'*teki aynı tablo ismiyle olmak üzere, Tablo 2.2 deki değerler, bulonların malzeme sınıflarına göre tasarım hesaplarında kullanılacak karakteristik değerleridir. *Yönetmelik*'teki kurallar Tablo 2.2 de verilen bulon sınıfları için geçerlidir.

Tablo 2.2 – Bulonların Karakteristik Akma Gerilmeleri, F_{yb} ve Çekme Dayanımları, F_{ub}, (MPa)

Bulon sınıfı	**4.6**	**4.8**	**5.6**	**5.8**	**6.8**	**8.8**	**10.9**
F_{yb}	240	320	300	400	480	640	900
F_{ub}	400	400	500	500	600	800	1000

Kaynak malzemesi (kaynak metali) özellikleri, *Yönetmelik* 1.3.6 da verilen standartlara uygun olacaktır.

Çelik – betonarme kompozit yapı elemanlarında kullanılacak başlıklı çelik ankraj kayma elemanlarının malzeme ve kaynak özellikleri, *Yönetmelik* 1.3.7 de verilen standartlara uygun olarak belirlenecektir.

BÖLÜM 3 İMALAT VE MONTAJ

Hesap raporu ve uygulama projeleri ile imalat ve montaj (yerinde uygulama) işlerinde *Yönetmelik* Bölüm 3 te belirtilen kurallar esas alınacaktır.

Çelik yapı sistemleri ve çelik – betonarme kompozit yapıların yapısal çelik elemanlarının imalat ve montaj aşamalarına ait genel ve teknik esasların uygulamalarında TS EN 1090 – 2 de verilen ilgili koşullara uyulması zorunludur.

Yapısal çelik elemanların imalat ve montajında uygulanması gereken genel ve teknik esaslar, kalite kontrol ve yönetim ölçütleri TS EN 1090 – 2 de tanımlanan uygulama sınıflarına göre verilmektedir. Uygulama sınıfı proje müellifi tarafından belirlenecektir. Uygulama sınıfı belirlenirken TS EN 1090 – 2 de verilen kurallara uyulacaktır.

Çelik ve çelik - betonarme kompozit yapı sistemlerinin proje hesap raporları ve uygulama projesi çizimlerinin sunumunda, imalat ve montaj aşamalarında uyulması gereken minimum kurallar *Yönetmelik'*te açıklanmıştır.

Yapı sisteminin analiz ve boyutlandırma hesapları ile stabilite (kararlılık) kontrollerinin yanında, birleşim ve ek detayları ile bunlara ait hesaplar proje hesap raporu kapsamında ayrıntılı, açık ve izlenebilir olarak verilecektir.

BÖLÜM 4 KALİTE KONTROLÜ

Yönetmelik Bölüm 4 yapısal çelik ve çelik – betonarme kompozit yapı sistemlerinin ve elemanlarının kalite kontrolü ve güvencesi için gerekli minimum kuralları içermektedir. Beton ve donatı çeliği ile ilgili kalite kontrolü ve güvencesi bu bölümün kapsamında değildir.

İmalat ve montaj aşamalarındaki işlerin kalite kontrolü, imalatçı ve yüklenici tarafından TS EN 1090 – 2 standardına uygun olarak gerçekleştirilecektir. İmalatı tamamlanmış çelik yapı elemanlarının şantiyeye sevki, tanımlanan toleranslar içinde hatasız ve kusursuz olduklarının belgelenmesinin ardından sağlanacaktır.

İmalatçı ve yüklenicinin kalite kontrol denetimcileri, aşağıdaki uygulamaların TS EN 1090 – 2 ye uygun olarak gerçekleşmesini denetleyecektir.

BÖLÜM 5 TASARIMDA TEMEL İLKELER

Yönetmelik Bölüm 5 te çelik yapıların analiz ve boyutlandırılmasında uygulanan ve yönetmeliğin tüm bölümleri için geçerli olan temel ilkeler açıklanmaktadır. Yapı sistemini oluşturan elemanların ve birleşimlerin tasarımı, yapısal analizin temel varsayımları ve yapı sisteminin öngörülen kullanım ve davranış özellikleri ile uyumlu olmalıdır.

Çelik yapı elemanları ve birleşimlerinin tasarımı, yapının işletme ömrü boyunca kendinden beklenen tüm fonksiyonları belirli bir *güvenlik* altında yerine getirebilecek düzeyde kararlılık (stabilite), dayanım ve rijitliğe sahip olacak şekilde, *dayanım* ve *kullanılabilirlik sınır durumları* esas alınarak gerçekleştirilecektir. *Dayanım sınır durumu*, dayanım veya stabilite yetersizliği nedeniyle bölgesel veya tümsel göçme oluşumunu tanımlar. Buna karşılık *kullanılabilirlik sınır durumu*, yapıdan beklenen fonksiyonları engelleyen aşırı yerdeğiştirmeler ve benzeri özellikler cinsinden tanımlanır.

Stabilite

Yapı sistemlerinin stabilite analizi, eleman bazındaki ve sistem genelindeki geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini gözönüne alan ikinci mertebe teorisine göre hesap yapılmasını öngörmektedir. Bu yönetmelik kapsamında uygulanacak stabilite analizi yöntemleri *Yönetmelik* Bölüm 6 da açıklanmıştır.

Birleşimler

Yapı sisteminin birleşim detayları *Yönetmelik* Bölüm 13 ve 14 te verilen kurallara uygun olarak tasarlanacaktır. Birleşimlerin tasarımında esas alınacak iç kuvvetler ve şekildeğiştirmeler, yapısal analizin varsayımlarına ve birleşimden beklenen performans özelliklerine bağlı olarak belirlenecektir.

Dayanım Sınır Durumları İçin Tasarım

Yönetmelik kapsamında, çelik yapı elemanlarının ve birleşimlerin dayanım sınır durumu için tasarımı aşağıda esasları verilen *Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım* (YDKT) veya *Güvenlik Katsayıları ile Tasarım* (GKT) yaklaşımlarından biri uygulanarak gerçekleştirilebilir. Elemanların ve birleşimlerin *gerekli dayanımı*, uygulanan tasarım yaklaşımı için öngörülen ve ayrıntıları *Yönetmelik* 5.3 te verilen yük birleşimleri altında hesaplanır.

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT)

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT), tüm yapısal elemanlar için, *tasarım dayanımı*, ϕR_n nin bu tasarım yöntemi için öngörülen ve *Yönetmelik* 5.3.1 de verilen YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan *gerekli dayanım*, R_u, değerine eşit veya daha büyük olması prensibine dayanmaktadır. Buna göre, tasarım *Yönetmelik* Denk.(5.1) de verilen koşula uygun olarak gerçekleştirilecektir.

$$R_u \le R_d = \phi R_n \qquad (5.1)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

R_u : YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım.

R_n : Karakteristik dayanım.

ϕ : Dayanım katsayısı.

R_d : Tasarım dayanımı (= ϕR_n)

Karakteristik dayanım, R_n, ve dayanım katsayısı, ϕ, *Yönetmelik* Bölüm 7–14 ve 16 da açıklanmaktadır.

Bu tasarım yönteminde gerekli dayanım, R_u, aşağıdaki yük birleşimleri ile belirlenecektir.

(1) $1.4G$

(2a) $1.2G + 1.6(Q_r$ veya S veya $R)$

(2b) $1.2G + 1.6Q + 0.5(Q_r$ veya S veya $R)$

(3) $1.2G + 1.6(Q_r$ veya S veya $R) + (Q$ veya $0.8W)$

(4) $1.2G + 1.0Q + 0.5(Q_r$ veya S veya $R) + 1.6W$

(5) $1.2G + 1.0Q + 0.2S + 1.0E$

(6) $0.9G + 1.6W$

(7) $0.9G + 1.0E$

Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT)

Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT), tüm yapısal elemanlar için, *güvenli dayanım*, R_n/Ω nın bu tasarım yöntemi için öngörülen ve *Yönetmelik* 5.3.2 de verilen GKT yük birleşimleri altında hesaplanan *gerekli dayanım*, R_a, değerine eşit veya daha büyük olması prensibine dayanmaktadır. Buna göre, tasarım *Yönetmelik* Denk.(5.2) de verilen koşula uygun olarak gerçekleştirilecektir.

$$R_a \le R_g = \frac{R_n}{\Omega} \qquad (5.2)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

R_a : GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım.

R_n : Karakteristik dayanım.

Ω : Güvenlik katsayısı.

R_g : Güvenli dayanım (= R_n/Ω).

Karakteristik dayanım, R_n, ve güvenlik katsayısı, Ω, *Yönetmelik* Bölüm 7 – 14 ve 16 da açıklanmaktadır.

Bu tasarım yönteminde gerekli dayanım, R_a, aşağıdaki yük birleşimleri ile belirlenecektir.

(1) G

(2) $G + Q$

(3) $G + (Q_r$ veya S veya $R)$

(4) $G + 0.75Q + 0.75(Q_r$ veya S veya $R)$

(5a) $G + 1.0W$

(5b) $G + 0.7E$

(6a) $G + 0.75Q + 0.75(Q_r$ veya S veya $R) + 0.75W$

(6b) $G + 0.75Q + 0.75S + 0.75(0.7E)$

(7) $0.6G + W$

(8) $0.6G + 0.7E$

YDKT veya GKT yük birleşimlerinde yer alan yükler aşağıda tanımlanmıştır.

G : sabit yük

Q : hareketli yük

Q_r : çatı hareketli yükü

S : kar yükü

R : yağmur yükü

W : rüzgar yükü

E : deprem etkisi

Olası farklı yük ve etkilerin (akışkan madde basınç yükü, sıcaklık değişmesi vb.) mevcut olması halinde, bu yük ve etkilerin yukarıdaki yük birleşimlerine katkısı *Yönetmelik* 5.3 te tanımlanmaktadır.

Kullanılabilirlik Sınır Durumları İçin Tasarım

Yapı sistemi, yapısal elemanlar ve birleşimler kullanılabilirlik sınır durumları için kontrol edilecektir. Kullanılabilirlik sınır durumları için tasarıma ilişkin kurallar ve koşullar *Yönetmelik* Bölüm 15 te verilmiştir.

Kullanılabilirlik sınır durumları, öngörülen belirli yük birleşimleri altında, yapı sisteminin yerdeğiştirme ve ivme gibi davranış büyüklüklerine ait sınırlar ile tanımlanır.

G sabit yükleri, Q hareketli yükleri, S kar yüklerini ve W rüzgar yüklerini göstermek üzere, kullanılabilirlik sınır durumlarının kontrol edildiği yük birleşimleri aşağıda sıralanmıştır.

(1) $G + Q$

(2) $G + 0.5\ S$

(3) $G + 0.5\ Q$

(4) $G + 0.5\ Q + W$

Yönetmelik 15.1 uyarınca,

(a) Sabit yükler ve kısa süreli hareketli yükler veya kar yükleri altındaki düşey yerdeğiştirme kontrollerinde (1) ve (2) numaralı yük birleşimleri gözönüne alınacaktır.

(b) Sabit yükler ve uzun süreli hareketli yükler altında, çelik-betonarme kompozit elemanlarda rötre ve sünme etkilerini de kapsayan düşey yerdeğiştirme kontrollerinde (3) numaralı yük birleşimi uygulanacaktır.

(c) Yapısal olmayan elemanları etkileyen düşey yerdeğiştirme kontrollerinde, G sabit yüklerinin söz konusu yapısal elemanın inşasından sonra etkiyen bölümü gözönüne alınacaktır.

(d) Yatay yerdeğiştirme kontrollerinde (4) numaralı yükleme esas alınacaktır.

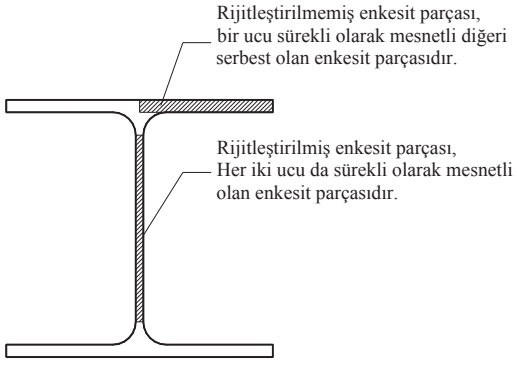
Yerel Burkulma Sınır Durumu İçin Enkesitlerin Sınıflandırılması

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, *narin ve narin olmayan enkesitler* olarak sınıflandırılır.

Eğilme momentinden oluşan basınç gerilmeleri etkisindeki enkesit parçaları, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, *kompakt, kompakt olmayan ve narin enkesit parçaları* olarak sınıflandırılır.

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitlerin sınıflandırılmasında sınır değerler *Yönetmelik* 5.4 te, eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesitler için Tablo 5.1A ve eğilme momentinden oluşan basınç gerilmeleri etkisindeki enkesit parçaları için Tablo 5.1B ile verilmektedir.

Tablo 5.1A ve Tablo 5.1B nin kullanılmasında, *rijitleştirilmemiş enkesit parçaları* ve *rijitleştirilmiş enkesit parçaları* tanımları ve genişlik olarak alınacak boyutlar Şekil 5.1 de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 – Rijitleştirilmemiş ve rijitleştirilmiş enkesit parçaları

BÖLÜM 6 STABİLİTE TASARIMI

Yönetmelik Bölüm 6 da yapı sistemlerinin stabilite tasarımının temel ilkeleri ve tasarımda uygulanan başlıca analiz yöntemlerinin esasları açıklanmaktadır.

Yapı sistemlerinin stabilite tasarımı, eleman bazındaki ve sistem genelindeki geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini gözönüne alan *ikinci mertebe teorisi'*ne göre analiz yapılmasını ve hesaplanan iç kuvvet büyüklüklerinin elemanların *mevcut dayanımları* (YDKT için tasarım dayanımı veya GKT için güvenli dayanım) ile karşılaştırılmasını öngörmektedir. Yapı sistemlerinin stabilitesini etkileyen başlıca faktörler aşağıda sıralanmıştır.

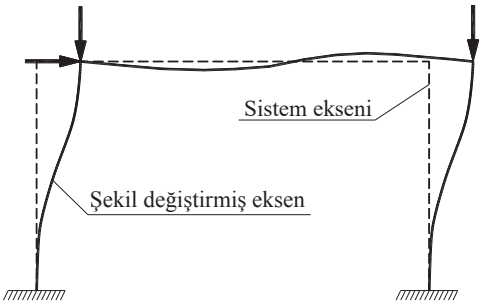
(a) Elemanların eğilme, kayma ve eksenel şekildeğiştirmeleri ile birlikte yapı sisteminin yerdeğiştirmesinde etkili olan diğer tüm şekildeğiştirmeler (kiriş – kolon birleşimi panel bölgesi şekildeğiştirmeleri, vb.).

(b) Eleman şekildeğiştirmesine ait (P – δ) ve sistem yerdeğiştirmesine ait (P – Δ) ikinci mertebe etkileri.

(c) Geometrik ön kusurlar (ilkel kusurlar).

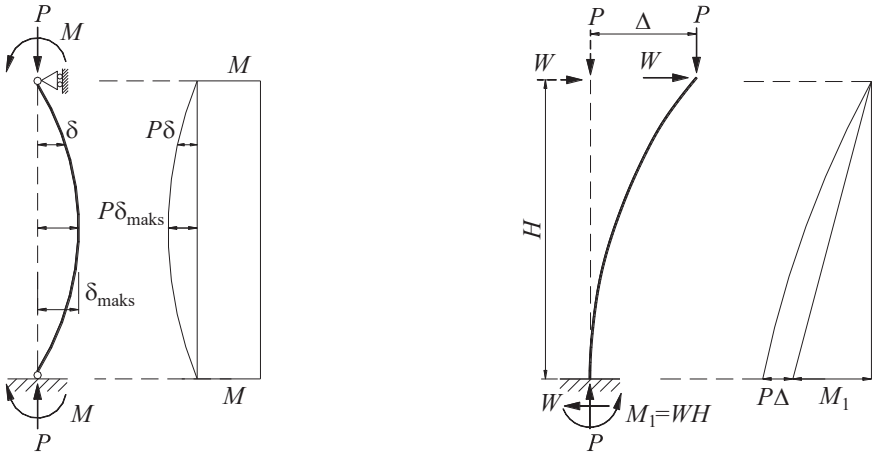
(d) Doğrusal olmayan şekildeğiştirmeler ile dayanım ve rijitliklerdeki belirsizlikler.

İkinci mertebe teorisinde denge denklemleri yapı sisteminin şekil değiştirmiş ekseni üzerinde yazılmaktadır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 – Sistem ekseni ve şekil değiştirmiş eksen

Eksenel basınç kuvvetiyle beraber eğilme momenti etkisindeki elemanlarda P – delta etkisi iki farklı şekilde ortaya çıkabilir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 – Eleman şekildeğiştirmesine ait (P – δ) ve sistem yerdeğiştirmesine ait (P – Δ) ikinci mertebe etkileri.

İkinci mertebe teorisi doğrusal olmadığından *süperpozisyon prensibi* geçerli değildir. Bu nedenle işletme (servis) yüklerinin ilgili yük birleşimleri için kendilerine ait yük katsayıları ile çarpımından oluşan toplam yükler altında, sistem ikinci mertebe teorisine göre hesaplanır. Toplam yükler, YDKT yük birleşimlerinden edilen yüklemeden veya GKT yük birleşiminin 1.6 katına eşit bir yüklemeden elde edilecektir.

Yapısal stabiliteyi etkileyen yukarıdaki faktörleri gözönüne alan *genel* (doğrudan) *analiz yöntemi* ve *burkulma boyu* (etkin uzunluk) *yöntemi* ile stabilite tasarımının esasları sırasıyla, *Yönetmelik* 6.3 ve 6.4 de açıklanmaktadır. Ayrıca, ikinci mertebe etkilerin yaklaşık olarak hesaba katıldığı *yaklaşık ikinci mertebe analizi* nin esasları da *Yönetmelik* 6.5 te verilmektedir.

Yönetmelik'te, düşey yüklerin düşey çerçeve, kolon ve perdeler tarafından taşındığı çok katlı yapı sistemlerinde düğüm noktalarının konumundaki geometrik ön kusurların aşağıda tanımlandığı şekilde belirlenen yatay *fiktif yükler* ile gözönüne alınmasına izin verilmektedir. Buna göre, fiktif yatay yük katlar arasındaki yapım toleransına bağlı olarak, her bir kat döşemesine etkiyen toplam düşey yükün 0.002 si olarak verilmektedir. Bu değer $L/500$ değerindeki bir sistem ön kusuruna karşı gelmektedir. Örneğin; P yükü etkisindeki kolon için bu durum,

$$M = P\Delta = P\left(L/500\right)$$

olarak hesaplanan eğilme momenti değerine eşdeğer bir iç kuvvet oluşturan, kolon üst ucuna $P/500 = 0.002P$ değerine eşit fiktif bir yatay yük uygulanmasına karşı gelmektedir. Bu sınır değeri aşmamak üzere, daha farklı oranda geometrik ön kusurların gözönüne alınması halinde bu katsayı uygun şekilde değiştirilebilir.

Sistem ön kusurlarını temsil eden bu fiktif yükler şekil değiştirmemiş orijinal sistem üzerine etkitilir. Her kat düzeyindeki düğüm noktalarına, bu noktalara etkiyen düşey yüklerle orantılı olarak dağıtılan fiktif yükler, yapısal stabilite açısından sistemde en elverişsiz etkileri oluşturacak doğrultu ve yönde uygulanır.

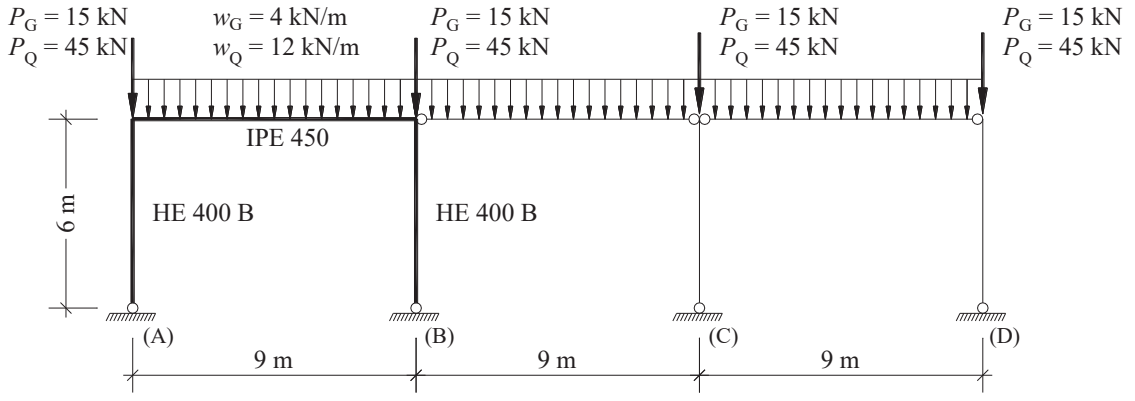
Çelik yapılarda rijit birleşimli çerçeve sistemlerine mafsallı birleşim ile bağlanmış elemanlarla (pandül) oluşturulmuş bileşik sistemler oldukça sık kullanılır. Bu sistemlerin tasarımı daha karmaşık olmasına rağmen, yapının tümü için moment çerçevelerinin sayısı azaltılarak, daha ekonomik tasarım yapılabilir. Yatay yüklerin taşınmasında hiçbir katkısı olmayan bu pandül kolonların stabilitesi moment aktaran çerçeve sistemi veya diğer yatay yük taşıyan sistemler ile sağlanır. Boyutlandırmada bu kolonlar için burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alındığından, pandül kolon uçlarının yerdeğiştirmesinin önlenmesinde yanal mesnet görevi üstlenen moment aktaran çerçevelerin analizinde, bu kolonlardaki eksenel yük mutlaka hesaba katılmalıdır.

Örnek 6. 1

Geometrisi ve servis (işletme) yükleri aşağıda verilen sistemin kiriş ve kolon elemanlarının gerekli dayanımlarının, ikinci mertebe teorisine göre

a. Genel Analiz Yöntemi ile belirlenmesi.

b. Burkulma Boyu Yöntemi ile belirlenmesi.



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 320 B
$A_g = 16130$ mm^2 $I_x = 30820$ cm^4

Çözüm

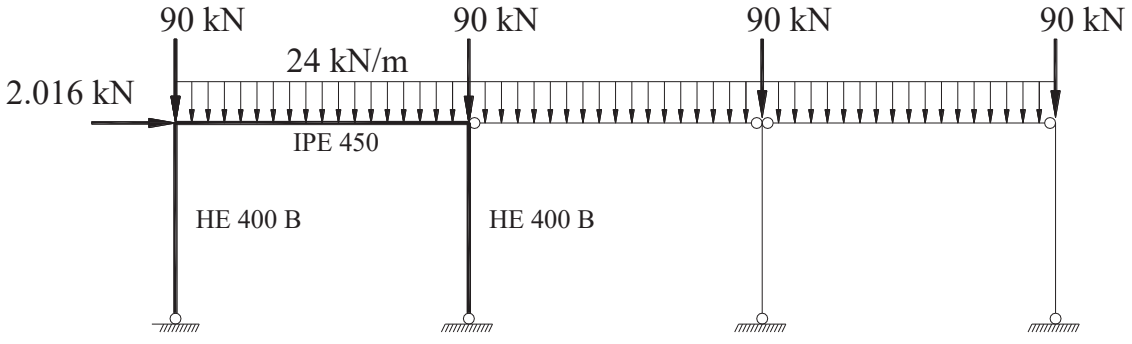
(C) ve (D) akslarındaki kolonlar ile (B) – (C) ve (C) – (D) aksları arasındaki kirişlerin iki ucu mafsallı elemanlar olduğundan sistem stabilitesine katkıları bulunmamaktadır. Bu nedenle, (C) ve (D) akslarındaki kolonların kesit hesapları, eksenel kuvvetlerine bağlı olarak ve K = 1.0 alınarak yapılır.

a. Kiriş ve kolon elemanlarının gerekli dayanımlarının Genel Analiz Yöntemi ile belirlenmesi

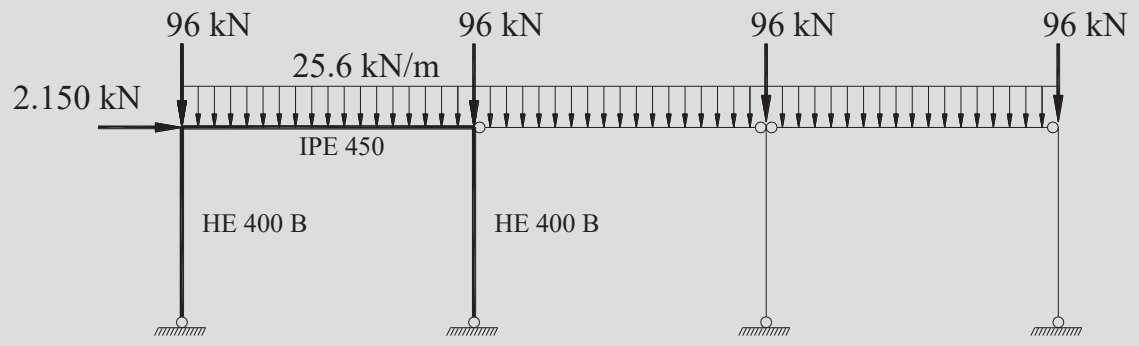
Genel analiz yöntemi, sınırlama olmaksızın, tüm çelik yapı sistemlerinin stabilite tasarımına uygulanabilmektedir.

YDKT ve GKT yüklemeleri için (A – B), (B – C) ve (C – D) kirişlerindeki yayılı yükler ile (A), (B), (C) ve (D) aksları kolonlarına etkiyen düşey yükler aşağıdaki tablolarda hesaplanmıştır.

YDKT	GKT
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(4) + 1.6(12) = 24$ kN/m (5.3.1)	$w_a = w_G + w_Q$ $= 4 + 12 = 16$ kN/m (5.3.2)
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(15) + 1.6(45) = 90$ kN (5.3.1)	$P_a = P_G + P_Q$ $= 15 + 45 = 60$ kN (5.3.2)
Bu yükler, sistem analizinde kullanılmak üzere, *Yönetmelik* 6.1 uyarınca YDKT için $\alpha = 1.0$ katsayısı ile, GKT yüklemesi için $\alpha = 1.6$ katsayısı ile çarpılacaktır.	
$\alpha = 1.0$ $w_u = 1.0(24) = 24$ kN/m $P_u = 1.0(90) = 90$ kN	$\alpha = 1.6$ $w_a = 1.6(16) = 25.6$ kN/m $P_a = 1.6(60) = 96$ kN
Yönetmelik 6.2.2.2 uyarınca, geometrik önkusurların stabiliteye etkileri fiktif kuvvetler kullanılarak hesaba katılacaktır. $N_i = 0.002\alpha Y_i$ (6.1) Sistemin düğüm noktalarının konumundaki geometrik ön kusurları temsil eden yatay fiktif yükler, YDKT ve GKT yük birleşimleri için ayrı ayrı olmak üzere, hesaplanacaktır.	
$\alpha = 1.0$ $Y_i = 24(3)(9) + 90(4) = 1008$ kN $N_i = 0.002(1.0)(1008) = 2.016$ kN	$\alpha = 1.6$ $Y_i = 16(3)(9) + 60(4) = 672$ kN $N_i = 0.002(1.6)(672) = 2.150$ kN
YDKT ve GKT yük birleşimleri için yukarıda hesaplanan düşey yükler ile yatay fiktif yükler aşağıdaki sistem şemaları üzerinde topluca gösterilmiştir.	
YDKT	



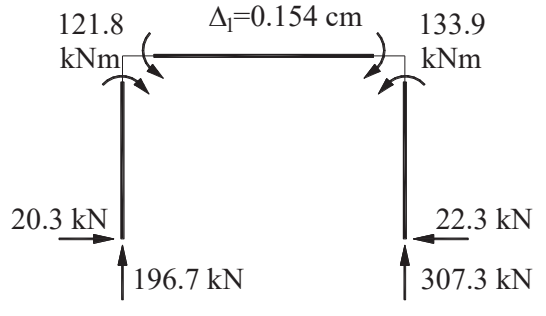
GKT



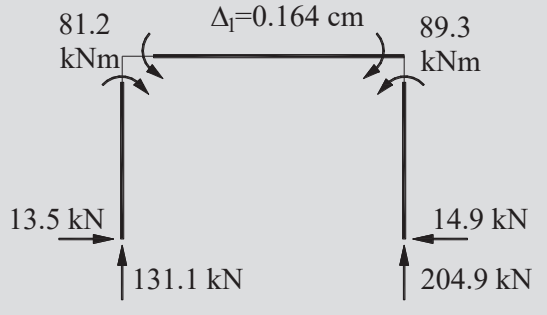
Bu sistemlerin öncelikle *birinci mertebe teorisi*ne göre analizi yapılarak eleman uç momentleri ve mesnet tepkileri ile düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri hesaplanmıştır.

YDKT ve GKT yük birleşimleri için yukarıda belirtildiği şekilde hesaplanan mesnet momentleri ve mesnet tepkileri ile düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri aşağıdaki sistem şemaları üzerinde topluca gösterilmiştir.

YDKT



GKT



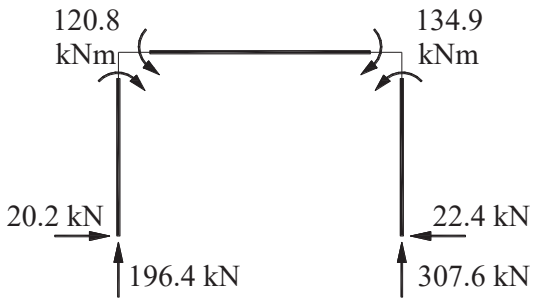
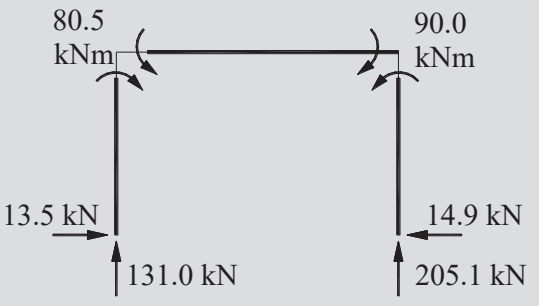
GKT yüklemesi için hesapta yüklerin 1.60 katsayısı ile arttırılması nedeniyle, elde edilen iç kuvvetler ve mesnet tepkileri diyagramda 1.60 katsayısı ile bölünerek gösterilmiştir. Buna karşılık, *birinci ve ikinci mertebe yerdeğiştirmeleri*nin karşılaştırılması amacıyla, yatay yerdeğiştirme değeri azaltılmaksızın verilmiştir.

YDKT ve GKT yük birleşimleri altındaki sistemlerin Genel Analiz Yöntemi ile sistemin ikinci mertebe teorisine göre analizinde, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin etkisini yaklaşık olarak gözönüne almak üzere, eleman rijitliklerinin azaltılması gerekmektedir.

Başlangıçta, kolon eksenel kuvvetlerinin eksenel kuvvet kapasitelerine oranlarının $\alpha P_r / P_{ns} \leq 0.5$ koşulunu sağladığı varsayımı ile, elemanların eğilme, kesme ve eksenel rijitlikleri 0.80 katsayısı ile çarpılarak azaltılmıştır.

Analizin sonunda, yukarıdaki koşulun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilecek ve gerekli olması halinde eğilme rijitlikleri *Yönetmelik* Denk.(6.3) uyarınca yeniden azaltılarak analiz tekrarlanacaktır.

Bir bilgisayar yazılımından yararlanarak, bu şekilde tanımlanan sistemin P – Δ ve P – δ etkilerini içerecek şekilde *ikinci mertebe teorisi*ne göre analizi yapılmış, YDKT ve GKT yük birleşimleri için elde edilen eğilme momentleri, mesnet tepkileri ve düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri aşağıdaki diyagramlarda verilmiştir.

YDKT	GKT
Δ_2=0.225 cm $\Delta_2/\Delta_1 = 0.225/0.154 = 1.46$  	Δ_2=0.242 cm $\Delta_2/\Delta_1 = 0.242/0.164 = 1.48$ 
GKT yüklemesi için hesapta yüklerin 1.60 katsayısı ile arttırılması nedeniyle, elde edilen iç kuvvetler ve mesnet tepkileri diyagramda 1.60 katsayısı ile bölünerek gösterilmiştir. Buna karşılık, *birinci ve ikinci mertebe yerdeğiştirmeleri*nin karşılaştırılması amacıyla, yatay yerdeğiştirme değeri azaltılmaksızın verilmiştir.	

Başlangıçta, kolon eksenel kuvvetlerinin eksenel kuvvet kapasitelerine oranlarının $\alpha P_r / P_{ns} \leq 0.5$ koşulunu sağlayıp sağlamadığı, YDKT ve GKT yük birleşimleri için aşağıda kontrol edilecektir.

HE 400 B profilinin enkesit alanı, $A_g = 19780$ mm^2

YDKT	GKT
$P_{ns} = F_y A_g$ $P_{ns} = (275)(19780)10^{-3} = 5439.5$ kN $\alpha = 1.0$ $\frac{\alpha P_r}{P_y} = \frac{(1.0)(307.6)}{5439.5} = 0.057 \leq 0.5$	$P_{ns} = F_y A_g$ $P_{ns} = (275)(19780)10^{-3} = 5439.5$ kN $\alpha = 1.6$ $\frac{\alpha P_r}{P_y} = \frac{(1.6)(205.1)}{5439.5} = 0.060 \leq 0.5$

Görüldüğü gibi, seçilen eğilme rijitliklerinin ayrıca azaltılmasına gerek olmamaktadır.

Kolon enkesitinin tasarım veya güvenli dayanımlarının kontrolü, Genel Analiz Yöntemi ile hesaplanan kolon gerekli dayanımları kullanılarak ve kolon burkulma boyu katsayısı,

K = 1.0 alınarak yapılacaktır.

b. Kiriş ve kolon elemanlarının gerekli dayanımlarının Burkulma Boyu Yöntemi ile belirlenmesi

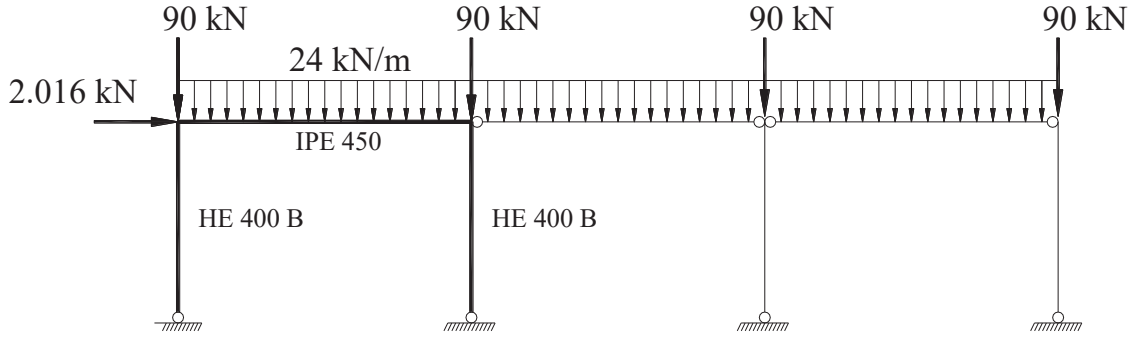
Burkulma Boyu Yöntemi aşağıdaki sınırlar içinde kullanılabilir.

(a) Yöntem, düşey yüklerin düşey çerçeveler, kolonlar ve perdeler tarafından taşındığı yapı sistemlerine uygulanabilir.

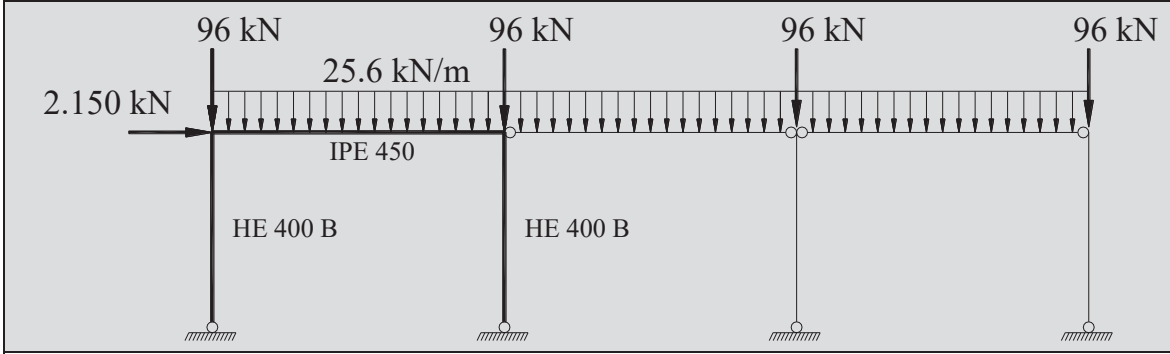
(b) Tüm katlarda, YDKT yük birleşimlerinden veya GKT yük birleşimlerinin 1.6 katına eşit yüklemelerden oluşan ikinci mertebe göreli kat ötelemelerinin birinci mertebe göreli kat ötelemelerine oranı olan $\boldsymbol{B_2}$ katsayısı 1.5 değerine eşit veya daha küçük olmalıdır.

YDKT ve GKT yüklemeleri için (A – B), (B – C) ve (C – D) kirişlerindeki yayılı yükler ile (A), (B), (C) ve (D) aksları kolonlarına etkiyen düşey yükler aşağıdaki tablolarda hesaplanmıştır.

YDKT	GKT
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(4) + 1.6(12) = 24$ kN/m (5.3.1)	$w_a = w_G + w_Q$ $= 4 + 12 = 16$ kN/m (5.3.2)
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(15) + 1.6(45) = 90$ kN (5.3.1)	$P_a = P_G + P_Q$ $= 15 + 45 = 60$ kN (5.3.2)
Bu yükler, sistem analizinde kullanılmak üzere, *Yönetmelik* 6.1 uyarınca YDKT için $\alpha = 1.0$ katsayısı ile, GKT yüklemesi için $\alpha = 1.6$ katsayısı ile çarpılacaktır.	
$\alpha = 1.0$ $w_u = 1.0(24) = 24$ kN/m $P_u = 1.0(90) = 90$ kN	$\alpha = 1.6$ $w_a = 1.6(16) = 25.6$ kN/m $P_a = 1.6(60) = 96$ kN
Yönetmelik 6.2.2.2 uyarınca, geometrik önkusurların stabiliteye etkileri fiktif kuvvetler kullanılarak hesaba katılacaktır. $N_i = 0.002\alpha Y_i$ (6.1) Sistemin düğüm noktalarının konumundaki geometrik ön kusurları temsil eden yatay fiktif yükler, YDKT ve GKT yük birleşimleri için ayrı ayrı olmak üzere, hesaplanacaktır.	
$\alpha = 1.0$ $Y_i = 24(3)(9) + 90(4) = 1008$ kN $N_i = 0.002(1.0)(1008) = 2.016$ kN	$\alpha = 1.6$ $Y_i = 16(3)(9) + 60(4) = 672$ kN $N_i = 0.002(1.6)(672) = 2.150$ kN
YDKT ve GKT yük birleşimleri için yukarıda hesaplanan düşey yükler ile yatay fiktif yükler aşağıdaki sistem şemaları üzerinde topluca gösterilmiştir.	
YDKT	

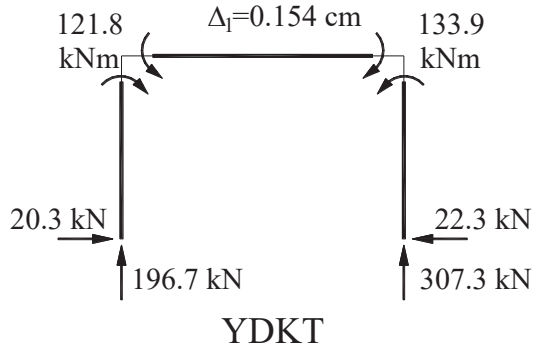
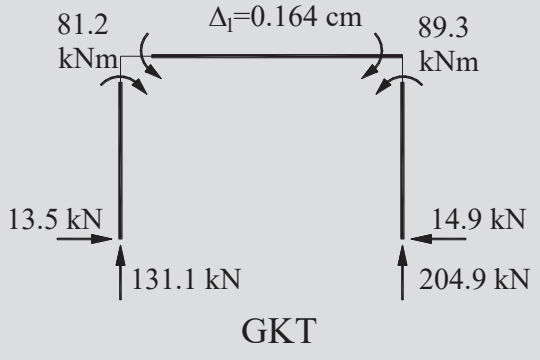


GKT



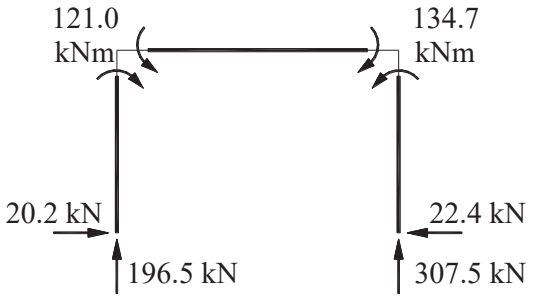
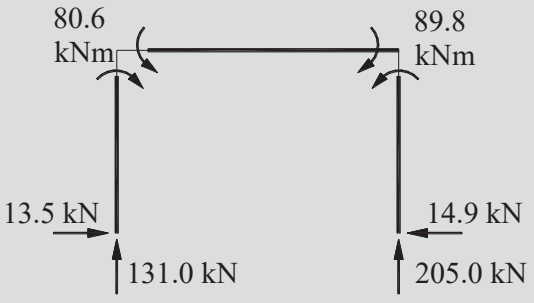
Bu sistemlerin öncelikle *birinci mertebe teorisi*ne göre analizi yapılarak eleman uç momentleri ve mesnet tepkileri ile düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri hesaplanmıştır.

YDKT ve GKT yük birleşimleri için yukarıda belirtildiği şekilde hesaplanan mesnet momentleri ve mesnet tepkileri ile düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri aşağıdaki sistem şemaları üzerinde topluca gösterilmiştir.

YDKT	GKT
	

GKT yüklemesi için hesapta yüklerin 1.60 katsayısı ile arttırılması nedeniyle, elde edilen iç kuvvetler ve mesnet tepkileri diyagramda 1.60 katsayısı ile bölünerek gösterilmiştir. Buna karşılık, *birinci ve ikinci mertebe yerdeğiştirmeleri*nin karşılaştırılması amacıyla, yatay yerdeğiştirme değeri azaltılmaksızın verilmiştir.

Bir bilgisayar yazılımından yararlanarak, bu şekilde tanımlanan sistemin P – Δ ve P – δ etkilerini içerecek şekilde *ikinci mertebe teorisi*ne göre analizi yapılmış, YDKT ve GKT yük birleşimleri için elde edilen eğilme momentleri, mesnet tepkileri ve düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri aşağıdaki diyagramlarda verilmiştir.

YDKT	GKT
Δ_2=0.175 cm $\Delta_2/\Delta_1 = 0.175/0.154 = 1.14 \le 1.50$  YDKT	Δ_2=0.188 cm $\Delta_2/\Delta_1 = 0.188/0.164 = 1.15 \le 1.50$  GKT
GKT yüklemesi için hesapta yüklerin 1.60 katsayısı ile arttırılması nedeniyle, elde edilen iç kuvvetler ve mesnet tepkileri diyagramda 1.60 katsayısı ile bölünerek gösterilmiştir. Buna karşılık, *birinci ve ikinci mertebe yerdeğiştirmeleri*nin karşılaştırılması amacıyla, yatay yerdeğiştirme değeri azaltılmaksızın verilmiştir.	

(B) aksı kolonunun, sistem stabilitesine katkısı bulunmayan iki ucu mafsallı kolonların çerçeve düzlemi içindeki yanal stabilitesi de sağlanacak şekilde boyutlandırılabilmesi amacıyla, çerçeve düzlemi içindeki burkulma boyu katsayısı, K_x, kat rijitliği yöntemi kullanılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$K_x = \sqrt{\frac{\Sigma P_r}{(0.85+0.15R_L)P_r}\left(\frac{\pi^2 EI}{L^2}\right)\left(\frac{\Delta_H}{\Sigma HL}\right)} \ge \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{L^2}\left(\frac{\Delta_H}{1.7HL}\right)}$$

YDKT	GKT
Tüm kolonlardaki toplam yük, ΣP_r $\Sigma P_r = 24(3)(9)+90(4) = 1008$ kN	Tüm kolonlardaki toplam yük, ΣP_r $\Sigma P_r = 16(3)(9)+60(4) = 672$ kN
İki ucu mafsallı kolonların toplam normal kuvvetlerinin toplam düşey yüke oranı, R_L $R_L = \dfrac{\Sigma P_r - \Sigma P_{r,\text{ mom. çerçev. kolonları}}}{\Sigma P_r}$ $R_L = \dfrac{1008-(196.5+307.5)}{1008} = 0.500$	İki ucu mafsallı kolonların toplam normal kuvvetlerinin toplam düşey yüke oranı, R_L $R_L = \dfrac{\Sigma P_r - \Sigma P_{r,\text{ mom. çerçev. kolonları}}}{\Sigma P_r}$ $R_L = \dfrac{672-(131.0+205.0)}{672} = 0.500$
(B) aksı kolonunun düzlem içindeki elastik burkulma dayanımı $\dfrac{\pi^2 EI_x}{L^2} = \dfrac{\pi^2(200000)(576800000)}{6000^2}10^{-3}$ $= 31626.60$ kN	(B) aksı kolonunun düzlem içindeki elastik burkulma dayanımı $\dfrac{\pi^2 EI_x}{L^2} = \dfrac{\pi^2(200000)(576800000)}{6000^2}10^{-3}$ $= 31626.60$ kN

Birinci mertebe analiz sonuçları ile göreli kat ötelemesi oranı	Birinci mertebe analiz sonuçları ile göreli kat ötelemesi oranı
$\frac{\Delta_H}{L}=\frac{\Delta_1}{L}=\frac{0.154}{600}=0.000257$ cm/cm	$\frac{\Delta_H}{L}=\frac{\Delta_1}{L}=\frac{0.164}{600}=0.000273$ cm/cm

YDKT

$$K_x=\sqrt{\frac{\Sigma P_r}{(0.85+0.15R_L)P_r}\left(\frac{\pi^2 EI}{L^2}\right)\left(\frac{\Delta_H}{\Sigma HL}\right)}\geq\sqrt{\frac{\pi^2 EI}{L^2}\left(\frac{\Delta_H}{1.7HL}\right)}$$

$$K_x=\sqrt{\frac{1008}{(0.85+0.15(0.500))(307.5)}(31626.60)\left(\frac{0.000257}{2.016}\right)}...$$

$$...\geq\sqrt{(31626.60)\left(\frac{0.000257}{1.7(22.4)}\right)}$$

$K_x=3.780\geq 0.462$ ✓

GKT

$$K_x=\sqrt{\frac{\Sigma P_r}{(0.85+0.15R_L)P_r}\left(\frac{\pi^2 EI}{L^2}\right)\left(\frac{\Delta_H}{\Sigma HL}\right)}\geq\sqrt{\frac{\pi^2 EI}{L^2}\left(\frac{\Delta_H}{1.7HL}\right)}$$

$$K_x=\sqrt{\frac{1.6(672)}{[0.85+0.15(0.500)](1.6)(205.0)}(31626.60)\left(\frac{0.000273}{2.150}\right)}...$$

$$...\geq\sqrt{(31626.60)\left(\frac{0.000273}{1.7(1.6)(14.9)}\right)}$$

$K_x=3.772\geq 0.462$ ✓

BÖLÜM 7 EKSENEL ÇEKME KUVVETİ ETKİSİ

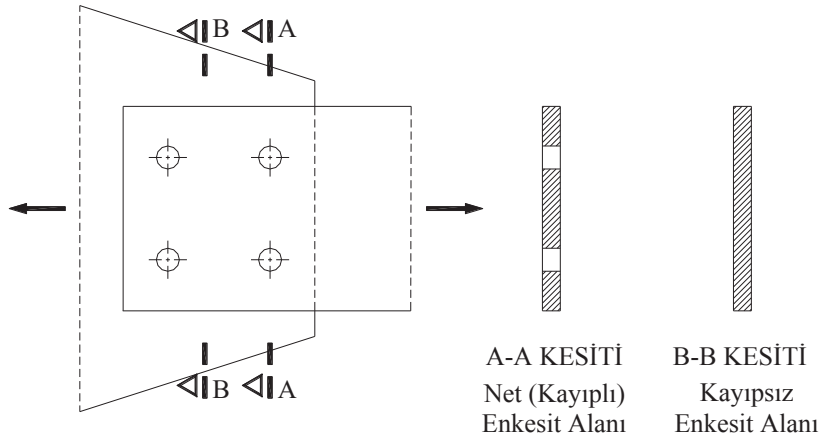
Eksenel (enkesit ağırlık merkezine uygulanan) çekme kuvveti etkisindeki elemanların tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 7 de belirtilen kurallara göre yapılacaktır.

Narinlik Oranı Sınırı

Çekme kuvveti etkisindeki elemanlarda stabilite bir tasarım kriteri olmamasına karşın, bu tür elemanlarda narinlik oranı, $L/i \leq 300$ olmalıdır. Ancak, bu sınır çelik kablolar ve miller için geçerli değildir.

Kayıpsız ve Net Enkesit Alanları

Çekme etkisi altındaki elemanların bu bölümde tanımlanacak olası göçme sınır durumları için, *kayıpsız enkesit alanı*, A_g, ve *net* (*kayıplı*) *enkesit alanı*, A_n, *Yönetmelik* 5.4.3 te verilen ilgili kurallar esas alınarak belirlenecektir (Şekil 7.1).



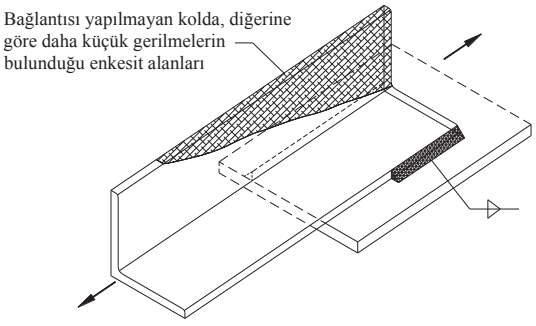
Şekil 7.1 – Net (kayıplı) enkesit alanı, A_n ve kayıpsız enkesit alanı, A_g

Etkin Net Enkesit Alanı

Çekme elemanının birleşim bölgesine tüm enkesit parçalarıyla bulonlu veya kaynaklı olarak bağlanmadığı durumda, gerilme yayılışındaki düzensizliğin hesaba katıldığı *etkin net enkesit alanı*, A_e, *Yönetmelik* 7.1.3 esas alınarak hesaplanacaktır.

$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Korniyer enkesitli çekme elemanının sadece bir kolunun kaynaklı olarak bağlandığı Şekil 7.2 deki birleşim detayında, çekme elemanının bağlantısı yapılmayan koluna ait enkesitler daha küçük gerilme etkisinde kalmaları nedeniyle, birleşim bölgesinde ortaya çıkan *düzensiz gerilme dağılımı, gerilme düzensizliği etki katsayısı*, U ile gözönüne alınmaktadır.



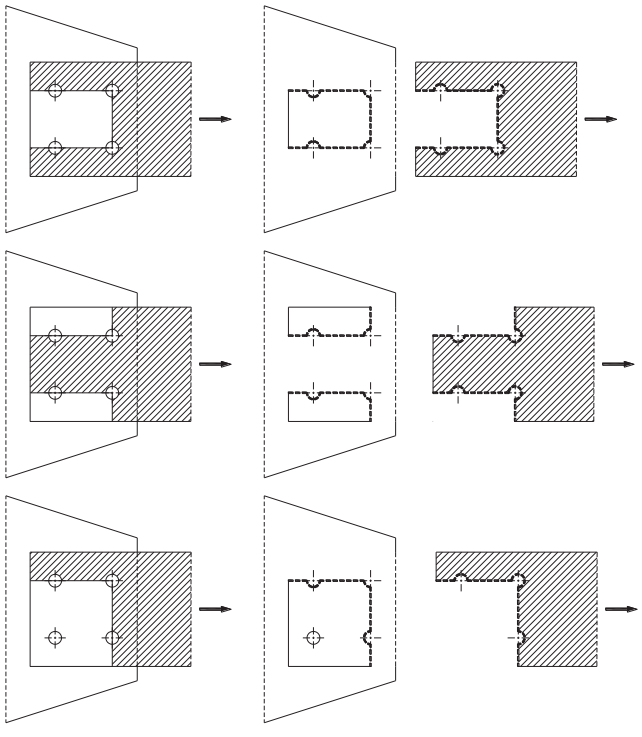
Şekil 7.2 – Düzensiz gerilme dağılımı

Burada*, gerilme düzensizliği etki katsayısı*, *U*, çekme elemanlarının tipik bulonlu ve kaynaklı birleşimleri için, *Yönetmelik* Tablo 7.1 de verilmektedir.

Çekme Kuvveti Dayanımı

Tasarım çekme kuvveti dayanımı, $\phi_t T_n$, (YDKT) veya *güvenli çekme kuvveti dayanımı*, T_n/Ω_t, (GKT), eksenel çekme kuvveti etkisindeki elemanın, *akma sınır durumu*, *kırılma sınır durumu* ve *blok kırılma sınır durumlarına* göre *Yönetmelik* 7.2 uyarınca hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır.

Çekme elemanlarının bulonlu ve kaynaklı uç birleşimlerinde blok kırılma sınır durumu için karakteristik dayanım, *Yönetmelik* 7.2 ve 13.4.3 uyarınca, gözönüne alınacaktır. Şekil 7.3 te görüldüğü gibi belirli birleşim tiplerinde kırılmanın bulon deliklerinin oluşturduğu düzlemler boyunca ortaya çıkmasıyla elemanın bu parçası blok olarak ayrılabilir ve bu göçme durumu *blok kırılma* olarak isimlendirilir. Şekil 7.3 de tipik olarak çekme elemanının bulonlu birleşimlerinde sözkonusu blok kırılmayı belirleyen olası alanlar taralı olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.3 – Elemanın belirli parçalar halinde ayrıldığı blok kırılma göçme durumları

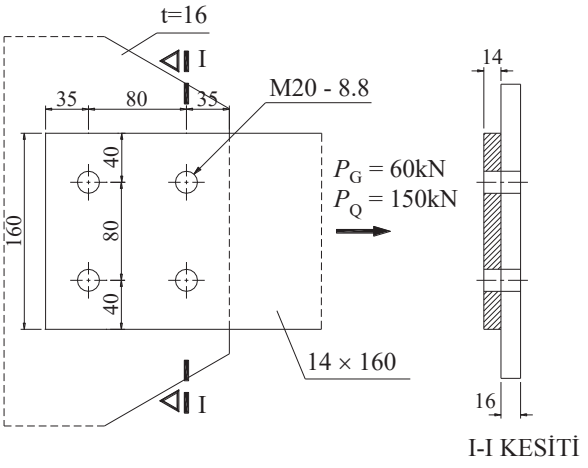
Örnek 7. 1

Aşağıdaki şekilde bulonlu birleşim detayı verilen Levha 14×160 enkesitli 1.20m uzunluğundaki eleman, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 60kN ve P_Q = 150kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 14×160	
t = 14.0 mm	b = 160 mm

Bulonlar

M20 – 8.8 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır)

Çözüm

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (235)(14\times160)10^{-3} = 526.40\ \text{kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \tag{7.3}$$

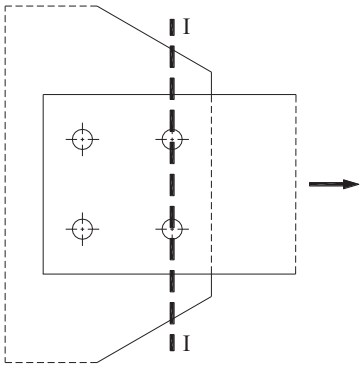
$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

Birleşim detayı incelendiğinde minimum net enkesit alanının bir adet kırılma çizgisi formu dikkate alınarak değerlendirilmesinin yeterli olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

$d_h = 20 + 2.0 = 22$ mm (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

$d_e = 22 + 2.0 = 24$ mm (*Yönetmelik* 5.4.3(b))



$$A_n = A_g - \sum d_e t + \sum \frac{s^2 t}{4g} \qquad (5.3)$$

$A_n = (14)(160) - 2(24)(14) = 1568.0 \text{ mm}^2$

$U = 1.0$ (Tablo 7.1, Durum 1)

$A_e = (1.0)(1568.0) = 1568.0 \text{ mm}^2$

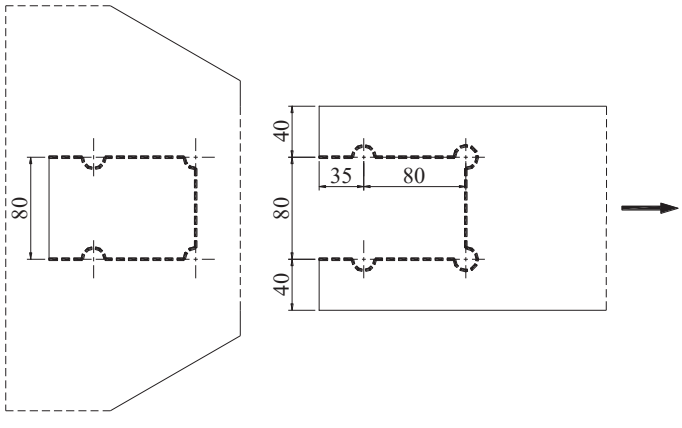
$T_n = (360)(1568.0)10^{-3} = 564.48 \text{ kN}$

Yönetmelik 7.2 ve 13.4.3 uyarınca,

Blok kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n,

Blok kırılma sınır durumunun değerlendirilmesinde aşağıdaki şekilde gösterilen olası göçme durumu öngörülebilir.

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \le 0.60 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \qquad (13.19)$$



$A_{gv} = 2(35+80)(14) = 3220.0 \text{ mm}^2$

$A_{nv} = 3220.0 - 2(24+24/2)(14) = 2212.0 \text{ mm}^2$

$A_{nt} = (80)(14) - (24/2+24/2)(14) = 784.0 \text{ mm}^2$

$U_{bs} = 1.0$ (*Yönetmelik* 13.4.3)

$R_n = 0.60(360)(2212.0)10^{-3} + (1.0)(360)(784.0)10^{-3} = 760.03 \text{ kN}$

$0.60(235)(3220.0)10^{-3} + (1.0)(360)(784.0)10^{-3} = 736.26 \text{ kN}$

$R_n = 736.26 \text{ kN} < 760.03 \text{ kN}$

$R_n = 736.26 \text{ kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(60) + 1.6(150) = 312 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 60 + 150 = 210 \text{ kN}$
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(526.40) = 473.76 \text{ kN}$ $T_d = \phi_t T_n = 0.75(564.48) = 423.36 \text{ kN}$ $T_d = \phi R_n = 0.75(736.26) = 552.20 \text{ kN}$	$T_g = T_n/\Omega_t = 526.40/1.67 = 315.21 \text{ kN}$ $T_g = T_n/\Omega_t = 564.48/2.00 = 282.24 \text{ kN}$ $T_g = R_n/\Omega = 736.26/2.00 = 368.13 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{312}{423.36} = 0.74 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{210}{282.24} = 0.74 \le 1.0$ ✓

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü, *Yönetmelik* 7.1.1 uyarınca, $L/i \le 300$

$i_{min} \cong 0.2887t \cong 4.04 \text{ mm}$ alınarak, $1200/4.04 = 297 \le 300$ ✓

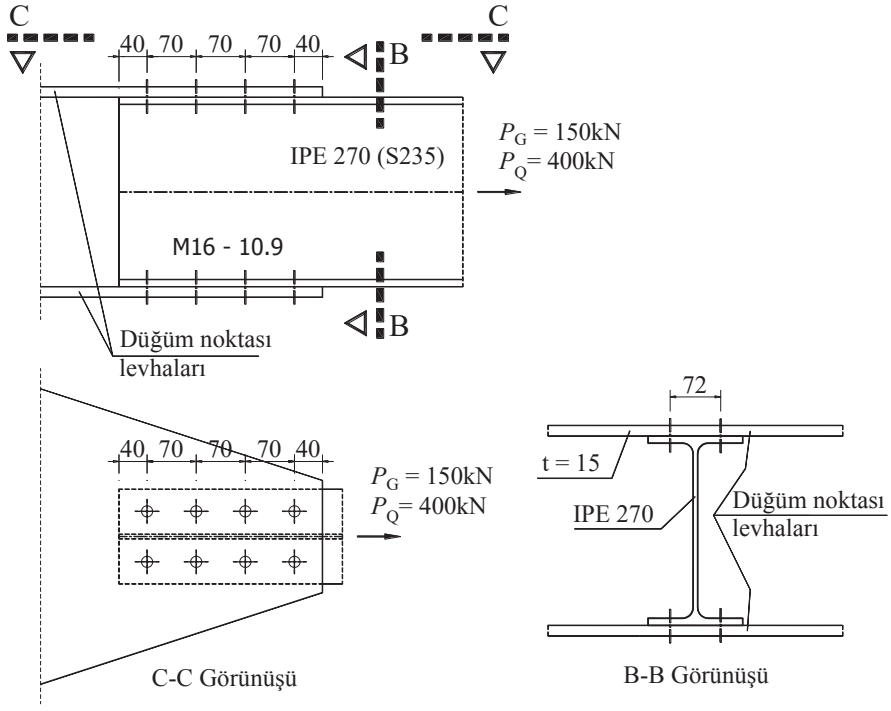
Örnek 7.2

Aşağıdaki şekilde bulonlu birleşim detayı verilen 5.0m uzunluğundaki IPE 270 profili ile boyutlandırılan eleman, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 150kN ve P_Q = 400kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

IPE 270
A_g = 4590 mm^2 d = 270 mm b_f = 135 mm t_f = 10.2 mm i_y = 30.2 mm

Bulonlar

M16 – 10.9 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır)

Çözüm

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (235)(4590)10^{-3} = 1078.65\ \text{kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \qquad (7.3)$$

$$A_e = UA_n \qquad (7.1)$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

$d_h = 16 + 2.0 = 18$ mm (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

$d_e = 18 + 2.0 = 20$ mm (*Yönetmelik* 5.4.3(b))

$A_n = A_g - 4d_e t_f$

$A_n = 4590 - 4(20)(10.2) = 3774.0 \text{ mm}^2$

$U = 1 - \dfrac{\bar{x}}{l}$ (Tablo 7.1, Durum 2) $\quad \bar{x} = y_g = 29.7$ mm $\qquad l = 3(70) = 210$ mm

Sadece başlıklarından bağlanan I-enkesitli elemanlarda, $\bar{x}$, yarım I-enkesitin (burada ½ IPE 270 profilinin) ağırlık merkezinin birleşim yüzeyine uzaklığı olarak tanımlanır.

$$U = 1 - \frac{29.7}{210} = 0.859 \geq U_{min} = \frac{2b_f t_f}{A_g} = \frac{2(135)(10.2)}{4590} = 0.60$$

Not: Gerilme düzensizliği etki katsayısının minimum değeri, U_{min}, birleşen enkesit parçalarının toplam enkesit alanının eleman kayıpsız enkesit alanına oranı olarak hesaplanacaktır.

$A_e = (0.859)(3774.0) = 3241.87 \text{ mm}^2$

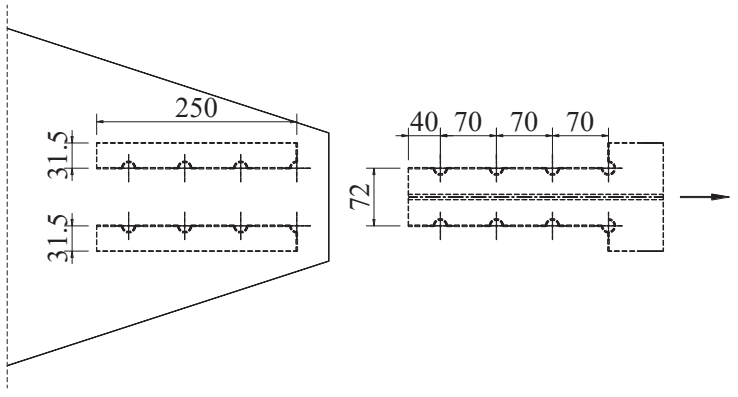
$T_n = (360)(3241.87)10^{-3} = 1167.07$ kN

Yönetmelik 7.2 ve 13.4.3 uyarınca,

Blok kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n,

Blok kırılma sınır durumunun değerlendirilmesinde aşağıdaki şekilde gösterilen olası göçme durumu öngörülebilir.

$$R_n = 0.60F_u A_{nv} + U_{bs}F_u A_{nt} \leq 0.60F_y A_{gv} + U_{bs}F_u A_{nt} \qquad (13.19)$$



$A_{gv} = 4(40+70+70+70)(10.2) = 10200.0 \text{ mm}^2$

$A_{nv} = 10200.0 - 4(3.5)(20)(10.2) = 7344.0 \text{ mm}^2$

$A_{nt} = 4(31.5)(10.2) - 4(0.5)(20)(10.2) = 877.20 \text{ mm}^2$

$U_{bs} = 1.0$

$R_n = 0.60(360)(7344.0)10^{-3} + (1.0)(360)(877.20)10^{-3} = 1902.10 \text{ kN}$

$0.60(235)(10200.0)10^{-3} + (1.0)(360)(877.20)10^{-3} = 1753.99 \text{ kN}$

$R_n = 1902.10 \text{ kN} > 1753.99 \text{ kN}$

$R_n = 1753.99 \text{ kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(150) + 1.6(400) = 820 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 150 + 400 = 550 \text{ kN}$
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(1078.65) = 970.79 \text{ kN}$ $T_d = \phi_t T_n = 0.75(1167.07) = 875.30 \text{ kN}$ $T_d = \phi R_n = 0.75(1753.99) = 1315.49 \text{ kN}$	$T_g = T_n/\Omega_t = 1078.65/1.67 = 645.90 \text{ kN}$ $T_g = T_n/\Omega_t = 1167.07/2.00 = 583.54 \text{ kN}$ $T_g = R_n/\Omega = 1753.99/2.00 = 877.00 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{820}{875.30} = 0.94 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{550}{583.54} = 0.94 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 7.1.1 uyarınca,

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü, $L/i \le 300$

$i_{min} = i_y = 30.2 \text{ mm}$ alınarak, $5000/30.2 = 166 \le 300$ ✓

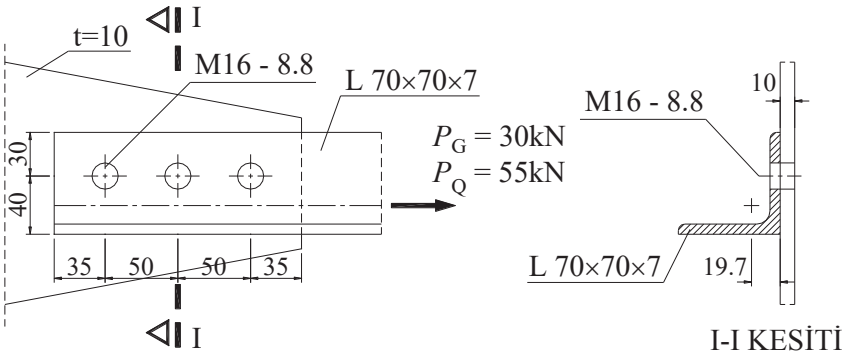
Örnek 7.3

Aşağıdaki şekilde bulonlu birleşim detayı verilen 3.5m uzunluğundaki L 70×70×7 enkesitli korniyer (köşebent) ile boyutlandırılan eleman sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 30kN ve P_Q = 55kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 70×70×7
$A_g = 940$ mm^2 $d = 70$ mm $t = 7.0$ mm $x_g = 19.7$ mm $i_z = 13.6$ mm

Bulonlar

M16 – 8.8 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır)

Çözüm

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (275)(940)10^{-3} = 258.50\,\text{kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \tag{7.3}$$

$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

$d_h = 16 + 2.0 = 18 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

$d_e = 18 + 2.0 = 20 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* 5.4.3(b))

$A_n = A_g - d_e t$

$A_n = 940 - (20)(7.0) = 800.0 \text{ mm}^2$

$U = 1 - \dfrac{\bar{x}}{l}$ (*Yönetmelik* Tablo 7.1, Durum 2) $\quad \bar{x} = x_g = 19.7 \text{ mm} \qquad l = 2(50) = 100 \text{ mm}$

$$U = 1 - \frac{19.7}{100} = 0.803 \geq U_{min} = \frac{dt}{A_g} = \frac{(70)(7.0)}{940} = 0.521$$

Gerilme düzensizliği etki katsayısı, U, *Yönetmelik* Tablo 7.1 Durum 8 esas alınarak da değerlendirilebilir. Bu durumda, *Yönetmelik* Tablo 7.1[c] uyarınca, hesaplanan daha büyük U değerinin kullanılmasına izin verilmektedir.

Not: Gerilme düzensizliği etki katsayısının minimum değeri, U_{min}, birleşen enkesit parçalarının toplam enkesit alanının eleman kayıpsız enkesit alanına oranı olarak hesaplanacaktır.

$A_e = (0.803)(800.0) = 642.40 \text{ mm}^2$

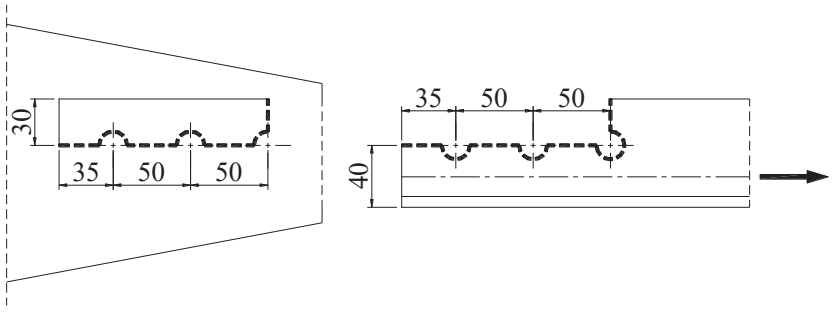
$T_n = (430)(642.40)10^{-3} = 276.23 \text{ kN}$

Yönetmelik 7.2 ve 13.4.3 uyarınca,

Blok kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n,

Blok kırılma sınır durumunun değerlendirilmesinde aşağıdaki şekilde gösterilen olası göçme durumu öngörülebilir.

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0.60 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \qquad (13.19)$$



$A_{gv} = (35 + 50 + 50)(7.0) = 945.0 \text{ mm}^2$

$A_{nv} = 945.0 - (2.5)(20)(7.0) = 595.0 \text{ mm}^2$

$A_{nt} = (30)(7.0) - (0.5)(20)(7.0) = 140.0 \text{ mm}^2$

$U_{bs} = 1.0$

$$R_n = 0.60(430)(595.0)10^{-3} + (1.0)(430)(140.0)10^{-3} = 213.71\,\text{kN}$$
$$0.60(275)(945.0)10^{-3} + (1.0)(430)(140.0)10^{-3} = 216.13\,\text{kN}$$

$$R_n = 213.71\,\text{kN} < 216.13\,\text{kN}$$

$$R_n = 213.71\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(30) + 1.6(55) = 124\,\text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 30 + 55 = 85\,\text{kN}$
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(258.50) = 232.65\,\text{kN}$ $T_d = \phi_t T_n = 0.75(276.23) = 207.17\,\text{kN}$ $T_d = \phi R_n = 0.75(213.71) = 160.28\,\text{kN}$	$T_g = T_n/\Omega_t = 258.50/1.67 = 154.79\,\text{kN}$ $T_g = T_n/\Omega_t = 276.23/2.00 = 138.12\,\text{kN}$ $T_g = R_n/\Omega = 213.71/2.00 = 106.86\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{124}{160.28} = 0.77 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{85}{106.86} = 0.80 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 7.1.1 uyarınca,

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü,

$$L/i \le 300$$

$$i_{min} = i_z = 13.6\,\text{mm}$$

$$3500/13.6 = 257 \le 300$$ ✓

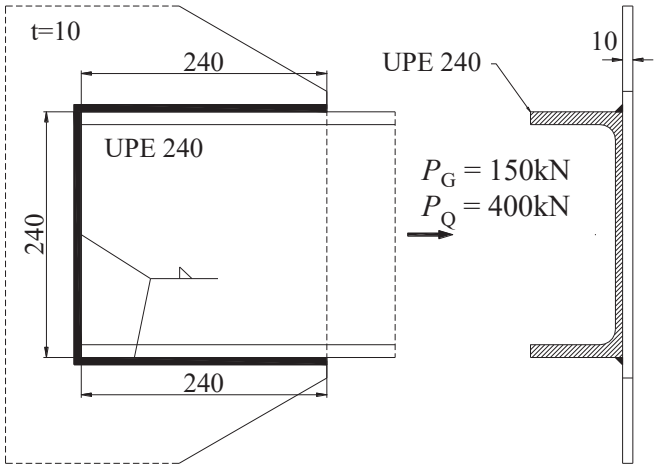
Örnek 7.4

Aşağıdaki şekilde kaynaklı birleşim detayı verilen 6.0m uzunluğundaki UPE 240 profili ile boyutlandırılan çekme elemanı sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 150kN ve P_Q = 400kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

UPE 240
$A_g = 3850$ mm^2 $d = 240$ mm $t_w = 7.0$ mm $x_g = 27.9$ mm $i_y = 28.4$ mm

Kaynaklar

Köşe kaynak

Çözüm

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (275)(3850)10^{-3} = 1058.75 \text{ kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \tag{7.3}$$

$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

$$A_e = A_n = A_g$$

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \quad \text{(Tablo 7.1, Durum 2)} \quad \bar{x} = x_g = 27.9 \text{ mm} \qquad l = 240 \text{ mm}$$

$$U = 1 - \frac{27.9}{240} = 0.884 \geq U_{min} = \frac{dt_w}{A_g} = \frac{(240)(7.0)}{3850} = 0.436$$

Not: Gerilme düzensizliği etki katsayısının minimum değeri, U_{min}, birleşen enkesit parçalarının toplam enkesit alanının eleman kayıpsız enkesit alanına oranı olarak hesaplanacaktır.

$$A_e = (0.884)(3850) = 3403.40 \text{ mm}^2$$

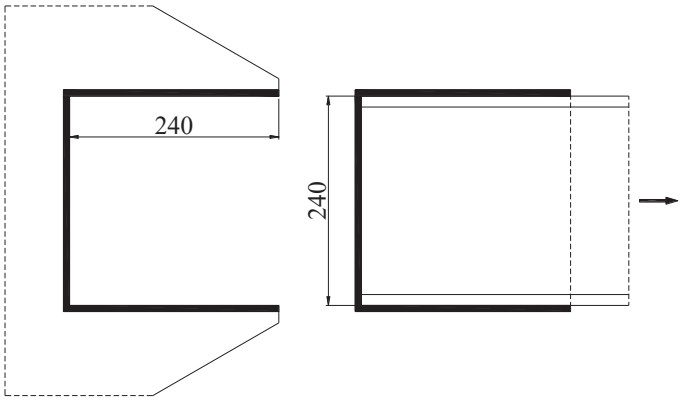
$$T_n = (430)(3403.40)10^{-3} = 1463.46 \text{ kN}$$

Yönetmelik 7.2 ve 13.4.3 uyarınca,

Blok kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n,

Blok kırılma sınır durumunun değerlendirilmesinde aşağıdaki şekilde gösterilen olası göçme durumu öngörülebilir.

$$R_n = 0.60F_u A_{nv} + U_{bs}F_u A_{nt} \leq 0.60F_y A_{gv} + U_{bs}F_u A_{nt} \qquad (13.19)$$



$$A_{gv} = 2(240)(10.0) = 4800.0 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = A_{gv} = 4800.0 \text{ mm}^2$$

$$A_{nt} = (240)(10.0) = 2400.0 \text{ mm}^2$$

$$U_{bs} = 1.0$$

$$R_n = 0.60(430)(4800.0)10^{-3} + (1.0)(430)(2400.0)10^{-3} = 2270.40 \text{ kN}$$
$$0.60(275)(4800.0)10^{-3} + (1.0)(430)(2400.0)10^{-3} = 1824.00 \text{ kN}$$

$$R_n = 2270.40 \text{ kN} > 1824.00 \text{ kN}$$

$$R_n = 1824.00 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(150) + 1.6(400) = 820$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 150 + 400 = 550$ kN
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(1058.75) = 952.88$ kN $T_d = \phi_t T_n = 0.75(1463.46) = 1097.60$ kN $T_d = \phi R_n = 0.75(1824.00) = 1368.00$ kN	$T_g = T_n/\Omega_t = 1058.75/1.67 = 633.98$ kN $T_g = T_n/\Omega_t = 1463.46/2.00 = 731.73$ kN $T_g = R_n/\Omega = 1824.00/2.00 = 912.00$ kN
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{820}{952.88} = 0.86 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{550}{633.98} = 0.87 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 7.1.1 uyarınca,

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü,

$L/i \le 300$

$i_{min} = i_y = 28.4$ mm

$6000/28.4 = 211 \le 300$ ✓

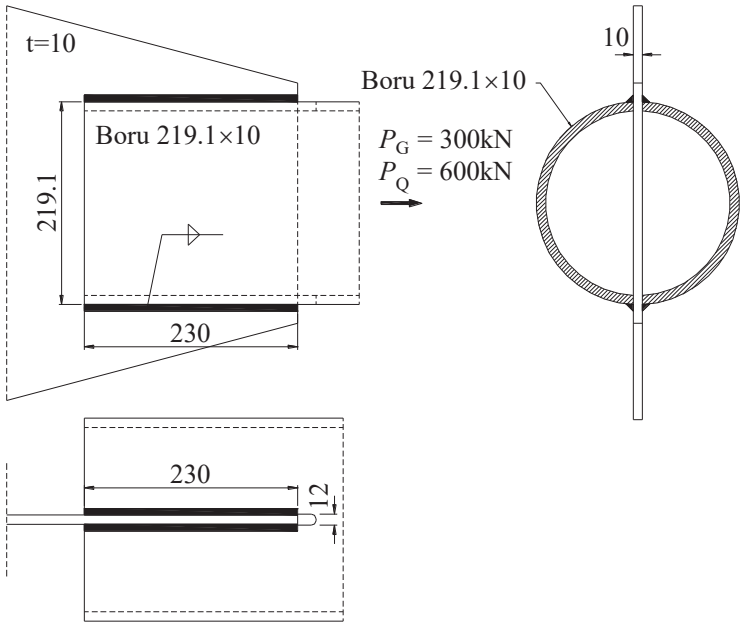
Örnek 7.5

Aşağıdaki şekilde kaynaklı birleşim detayı verilen 10m uzunluğundaki ve *elektrik direnç kaynağı* uygulanarak üretilen Boru 219.1×10 (Dış çap×cidar kalınlığı) enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 300kN ve P_Q = 600kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Boru 219.1×10
A_g = 6570 mm^2 D = 219.1 mm t = 10 mm i = 74.0 mm

Kaynaklar

Köşe kaynak

Çözüm

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, elektrik direnç kaynağı kullanılarak üretilen boru enkesitli elemanların kesit hesaplarında tasarım et (cidar) kalınlığı, karakteristik et kalınlığının 0.93 katına eşit olarak alınacaktır.

Tasarım et kalınlığına göre enkesit bilgileri,

Boru 219.1×10
A_g = 6129.69 mm^2 D = 219.1 mm t = 0.93×10 = 9.3mm i = 74.2 mm

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (355)(6129.69)10^{-3} = 2176.04 \text{ kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \tag{7.3}$$

$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

Net enkesit alanı, boru enkesitinde karşılıklı olarak oluşturulan iki adet kesim dikkate alınarak değerlendirilecektir.

$$A_n = 6129.69 - 2(9.3)(10 + 2.0) = 5906.49 \text{ mm}^2$$

Not: Boru enkesitli elemanda meydana gelen enkesit kaybının alanının hesabındaki ilave 2.0mm kalınlık, boru elemanın düğüm noktası levhasına montajını kolaylaştırmak amacıyla dikkate alınmaktadır.

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \quad \text{(Tablo 7.1, Durum 5)}$$

$$D \le l < 1.3D \quad D = 219.1 \text{ mm} \quad l = 230 \text{ mm}$$

$$219.1 \le 230 < 1.3(219.1) = 284.83$$

$$\bar{x} = D/\pi = 219.1/\pi = 69.74 \text{ mm}$$

$$U = 1 - \frac{69.74}{230} = 0.697$$

$$A_e = (0.697)(5906.49) = 4116.82 \text{ mm}^2$$

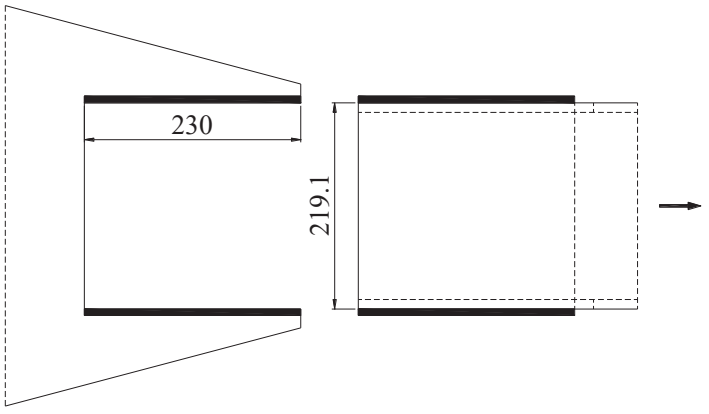
$$T_n = (510)(4116.82)10^{-3} = 2099.58 \text{ kN}$$

Yönetmelik 7.2 ve 13.4.3 uyarınca,

Blok kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n,

Blok kırılma sınır durumunun değerlendirilmesinde aşağıdaki şekilde gösterilen olası göçme durumu öngörülebilir.

$$R_n = 0.60F_u A_{nv} + U_{bs}F_u A_{nt} \le 0.60F_y A_{gv} + U_{bs}F_u A_{nt} \tag{13.19}$$



$$A_{gv} = 2(230)(10.0) = 4600.0 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = A_{gv} = 4600.0 \text{ mm}^2$$

$$A_{nt} = (219.1)(10.0) = 2191.0 \text{ mm}^2$$

$$U_{bs} = 1.0$$

$$R_n = 0.60(510)(4600.0)10^{-3} + (1.0)(510)(2191.0)10^{-3} = 2525.01 \text{ kN}$$
$$0.60(355)(4600.0)10^{-3} + (1.0)(510)(2191.0)10^{-3} = 2097.21 \text{ kN}$$

$$R_n = 2525.01 \text{ kN} > 2097.21 \text{ kN}$$

$$R_n = 2097.21 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(300) + 1.6(600) = 1320 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 300 + 600 = 900 \text{ kN}$
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(2176.04) = 1958.44 \text{ kN}$ $T_d = \phi_t T_n = 0.75(2099.58) = 1574.69 \text{ kN}$ $T_d = \phi R_n = 0.75(2097.21) = 1572.91 \text{ kN}$	$T_g = T_n/\Omega_t = 2176.04/1.67 = 1303.02 \text{ kN}$ $T_g = T_n/\Omega_t = 2099.58/2.00 = 1049.79 \text{ kN}$ $T_g = R_n/\Omega = 2097.21/2.00 = 1048.61 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{1320}{1572.91} = 0.84 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{900}{1048.61} = 0.86 \le 1.0$ ✓

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü,

Yönetmelik 7.1.1 uyarınca, $L/i \le 300$

$i_{min} = i = 74.2$ mm alınarak, $10000/74.2 = 135 \le 300$ ✓

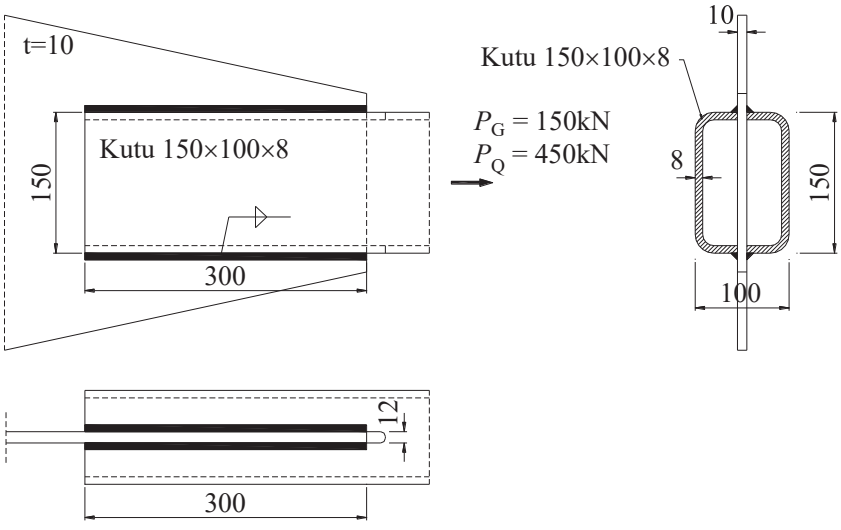
Örnek 7.6

Aşağıdaki şekilde kaynaklı birleşim detayı verilen 8.0m uzunluğundaki, *elektrik direnç kaynağı* uygulanarak üretilen Kutu 150×100×8 enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 150kN ve P_Q = 450kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kutu 150×100×8
A_g = 3524 mm^2 H = 150 mm B = 100 mm t = 8.0 mm i_{min} = 39 mm

Kaynaklar

Köşe kaynak

Çözüm

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, elektrik direnç kaynağı kullanılarak üretilen kutu enkesitli elemanların kesit hesaplarında tasarım et (cidar) kalınlığı, karakteristik et kalınlığının 0.93 katına eşit olarak alınacaktır.

Tasarım et kalınlığına göre enkesit bilgileri,

Kutu 150×100×8		
A_g = 3356 mm^2	H = 150 mm	B = 100 mm
t = 0.93×8 = 7.44 mm	i_{min} = 39.85 mm	

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (355)(3356)10^{-3} = 1191.38 \text{ kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \tag{7.3}$$

$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

Net enkesit alanı, kutu enkesitte karşılıklı olarak oluşturulan iki adet kesim dikkate alınarak değerlendirilecektir.

$$A_n = 3356 - 2(7.44)(10 + 2.0) = 3177.44 \text{ mm}^2$$

Not: Kutu enkesitli elemanda meydana gelen enkesit kaybının alanının hesabındaki ilave 2.0mm kalınlık, kutu elemanın düğüm noktası levhasına montajını kolaylaştırmak amacıyla dikkate alınmaktadır.

$$l = 300 \text{ mm} > H = 150\text{mm} \qquad U = 1 - \frac{\overline{x}}{l} \quad \text{(Tablo 7.1, Durum 6)}$$

$$\overline{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)} = \frac{(100)^2 + 2(100)(150)}{4(100 + 150)} = 40 \text{ mm}$$

$$U = 1 - \frac{40}{300} = 0.867$$

$$A_e = (0.867)(3177.44) = 2754.84 \text{ mm}^2$$

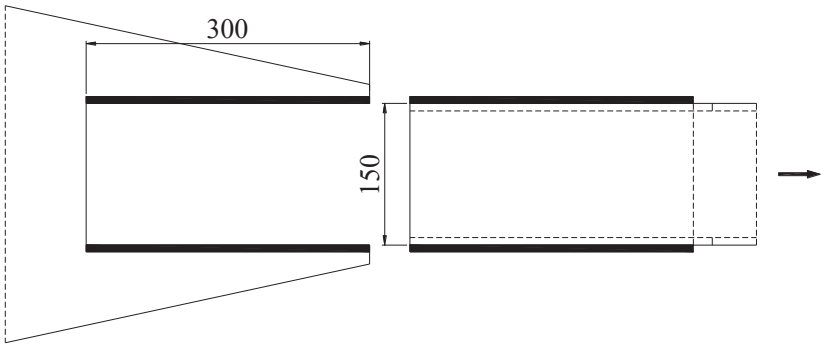
$$T_n = (510)(2754.84)10^{-3} = 1404.97 \text{ kN}$$

Yönetmelik 7.2 ve 13.4.3 uyarınca,

Blok kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n,

Blok kırılma sınır durumunun değerlendirilmesinde aşağıdaki şekilde gösterilen olası göçme durumu öngörülebilir.

$$R_n = 0.60F_u A_{nv} + U_{bs}F_u A_{nt} \le 0.60F_y A_{gv} + U_{bs}F_u A_{nt} \tag{13.19}$$



$A_{gv} = 2(300)(10.0) = 6000.0 \text{ mm}^2$

$A_{nv} = A_{gv} = 6000.0 \text{ mm}^2$

$A_{nt} = (150)(10.0) = 1500.0 \text{ mm}^2$

$U_{bs} = 1.0$

$R_n = 0.60(510)(6000.0)10^{-3} + (1.0)(510)(1500.0)10^{-3} = 2601.00 \text{ kN}$

$0.60(355)(6000.0)10^{-3} + (1.0)(510)(1500.0)10^{-3} = 2043.00 \text{ kN}$

$R_n = 2601.00 \text{ kN} > 2043.00 \text{ kN}$

$R_n = 2043.00 \text{ kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(150) + 1.6(450) = 900 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 150 + 450 = 600 \text{ kN}$
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(1191.38) = 1072.24 \text{ kN}$ $T_d = \phi_t T_n = 0.75(1404.97) = 1053.73 \text{ kN}$ $T_d = \phi R_n = 0.75(2043.00) = 1532.25 \text{ kN}$	$T_g = T_n/\Omega_t = 1191.38/1.67 = 713.40 \text{ kN}$ $T_g = T_n/\Omega_t = 1404.97/2.00 = 702.49 \text{ kN}$ $T_g = R_n/\Omega = 2043.00/2.00 = 1021.50 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{900}{1053.73} = 0.85 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{600}{702.49} = 0.85 \le 1.0$ ✓

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü,

Yönetmelik 7.1.1 uyarınca, $L/i \le 300$

$i_{min} = i_y = 39.85 \text{ mm}$ alınarak, $8000/39.85 = 201 \le 300$ ✓

Örnek 7.7

Aşağıdaki şekilde detayı verilen mil birleşimli 15×150 enkesit boyutlarına sahip çekme elemanı, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 30kN ve P_Q = 50kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir. Mil elemanı dayanımının yeterli olduğu varsayılacaktır.

a. Geometrik koşulların kontrol edilmesi

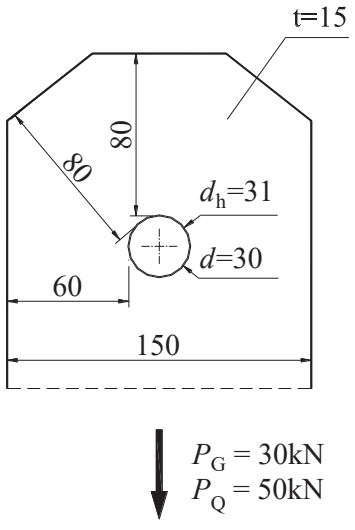
b. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

c. Elemanın karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

d. Elemanın karakteristik ezilme kuvveti dayanımının belirlenmesi

e. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

f. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 15×150	
t = 15.0 mm	b = 150 mm

Mil

ϕ30 d = 30 mm d_h = 31 mm

Çözüm

a. Mil birleşimi geometrik koşullarının kontrol edilmesi

Yönetmelik 13.10.2 uyarınca,

$b_e = 2t + 16\text{mm}$ $t = 15\text{mm}$ $b = 60\text{mm}$

$b_e = 2(15) + 16\text{mm} = 46\text{mm} \le b = 60\text{mm}$ olduğundan b_e dikkate alınacaktır.

$a \geq \frac{4}{3} b_e$ $\quad a = 80\text{mm}$ $\quad 80\text{mm} \geq 61.3\text{mm}$ ✓

$w \geq 2b_e + d$ $\quad w = 150\text{mm}$ $\quad 150\text{mm} \geq 122\text{mm}$ ✓

$c \geq a$ $\quad c = 80\text{mm}$ $\quad 80\text{mm} \geq 80\text{mm}$ ✓

b. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \qquad (7.2)$$

$A_g = wt \qquad A_g = (150)(15) = 2250\ \text{mm}^2$

$T_n = F_y A_g = (275)(2250)10^{-3} = 618.75\ \text{kN}$

Yönetmelik 13.10.1 uyarınca,

Çekme kırılması sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u (2tb_e) \qquad (13.30)$$

$T_n = 430(2)(15)(46)10^{-3} = 593.40\ \text{kN}$

c. Elemanın karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 13.10.1 uyarınca,

Kesme kırılması sınır durumunda karakteristik kesme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = 0.6 F_u A_{sf} \qquad (13.31)$$

$$A_{sf} = 2t(a + d/2) \qquad (13.32)$$

$A_{sf} = 2(15)(80 + 30/2) = 2850\ \text{mm}^2$

$T_n = 0.6(430)(2850)10^{-3} = 735.30\ \text{kN}$

d. Elemanın karakteristik ezilme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 13.6 uyarınca,

Ezilme sınır durumunda karakteristik ezilme dayanımı, R_n,

$$R_n = 1.8 F_y A_{pb} \qquad (13.21a)$$

$A_{pb} = (15)(30) = 450\ \text{mm}^2$

$R_n = 1.8(275)(450)10^{-3} = 222.75\ \text{kN}$

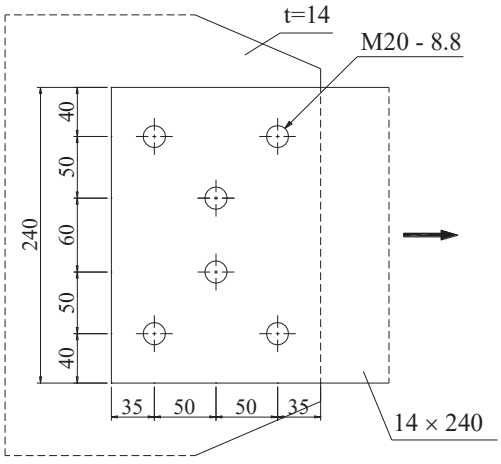
YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(30) + 1.6(50) = 116$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 30 + 50 = 80$ kN
e. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**f.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_d = \phi_t T_n = 0.90(618.75) = 556.88$ kN $T_d = \phi_t T_n = 0.75(593.40) = 445.05$ kN $T_d = \phi_t T_n = 0.75(735.30) = 551.48$ kN $T_d = \phi R_n = 0.75(222.75) = 167.06$ kN	$T_g = T_n/\Omega_t = 618.75/1.67 = 370.51$ kN $T_g = T_n/\Omega_t = 593.40/2.00 = 296.70$ kN $T_g = T_n/\Omega_t = 735.30/2.00 = 367.65$ kN $T_g = R_n/\Omega = 222.75/2.00 = 111.38$ kN
$\frac{P_u}{T_d} = \frac{116}{167.06} = 0.69 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{T_g} = \frac{80}{111.38} = 0.72 \le 1.0$ ✓

Örnek 7.8

Aşağıdaki şekilde bulonlu birleşim detayı verilen 14×240 enkesit boyutlarına sahip eleman eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Çekme elemanının olası net enkesit alanlarının hesaplanması

b. Çekme elemanının etkin net enkesit alanının hesaplanması



Enkesit

Levha 14×240	
t = 14.0 mm	b = 240 mm

Bulonlar

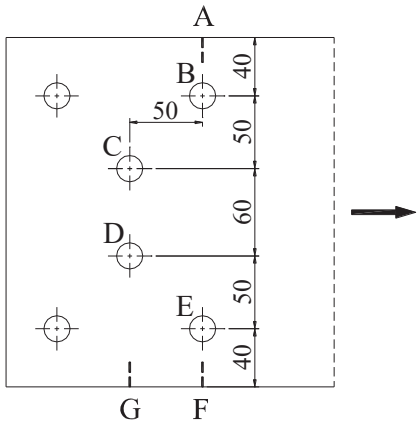
M20 – 8.8 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır)

Çözüm

a. Çekme elemanının olası net enkesit alanlarının hesaplanması

$d_h = 20 + 2.0 = 22$ mm (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

$d_e = 22 + 2.0 = 24$ mm (*Yönetmelik* 5.4.3(b))



$$A_n = A_g - \sum d_e t + \sum \frac{s^2 t}{4g} \qquad (5.3)$$

A-B-E-F kırılma çizgisi

$$A_n = (14)(240) - (2)(24)(14) = 2688.00 \text{ mm}^2$$

A-B-C-D-G kırılma çizgisi

$s = 50 \text{ mm} \qquad g = 50 \text{ mm}$

$$A_n = (14)(240) - (3)(24)(14) + \frac{(50)^2(14)}{4(50)} = 2527.00 \text{ mm}^2$$

A-B-D-E-F kırılma çizgisi

$s = 50 \text{ mm} \qquad g_1 = 50 + 60 = 110 \text{ mm} \qquad g_2 = 50 \text{ mm}$

$$A_n = (14)(240) - (3)(24)(14) + \frac{(50)^2(14)}{4(110)} + \frac{(50)^2(14)}{4(50)} = 2606.55 \text{ mm}^2$$

A-B-C-D-E-F kırılma çizgisi

$s = 50 \text{ mm} \qquad g_1 = 50 \text{ mm} \qquad g_2 = 50 \text{ mm}$

$$A_n = (14)(240) - (4)(24)(14) + \frac{(50)^2(14)}{4(50)} + \frac{(50)^2(14)}{4(50)} = 2366.00 \text{ mm}^2$$

Kırılma sınır durumunda belirleyici net enkesit alanı, A_n, minimum net enkesit alanını veren A-B-C-D-E-F kırılma çizgisi formunun belirlediği net enkesit alanıdır. Bu durumda,

$$A_n = 2366.00 \text{ mm}^2$$

b. Çekme elemanının etkin net enkesit alanının hesaplanması

$$A_e = UA_n \qquad (7.1)$$

$U = 1.0$ (Tablo 7.1, Durum 1)

$$A_e = (1.0)(2366.00) = 2366.00 \text{ mm}^2$$

BÖLÜM 8 EKSENEL BASINÇ KUVVETİ ETKİSİ

Eksenel (enkesit ağırlık merkezine uygulanan) basınç kuvveti etkisindeki elemanların tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 8 de belirtilen kurallara göre yapılacaktır.

Narinlik Oranı Sınırı

Basınç elemanlarının *Yönetmelik* Bölüm 6 veya Bölüm 16 esasları uyarınca belirlenen burkulma boyu ($L_c = KL$) kullanılarak hesaplanan narinlik oranı, $L_c / i \leq 200$ olmalıdır.

Karakteristik Basınç Kuvveti Dayanımı

Karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_n, eksenel basınç etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında *eğilmeli burkulma*, *burulmalı burkulma* ve/veya *eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumlarına* göre hesaplanan dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır.

Narin olmayan enkesitli (*Yönetmelik* Tablo 5.1A ya göre narin enkesit parçası içermeyen) elemanların eksenel basınç kuvveti altında *karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı,* P_n, *Yönetmelik* 8.2 esas alınarak hesaplanacaktır.

$$P_n = F_{cr} A_g \tag{8.1}$$

Burada, *kritik burkulma gerilmesi*, F_{cr}, basınç elemanında burkulma sınır durumuna elastik bölge aşıldıktan sonra veya elastik bölgede ulaşılması durumları için sırasıyla, *Yönetmelik* Denk.(8.2) ve (8.3) ile hesaplanmaktadır.

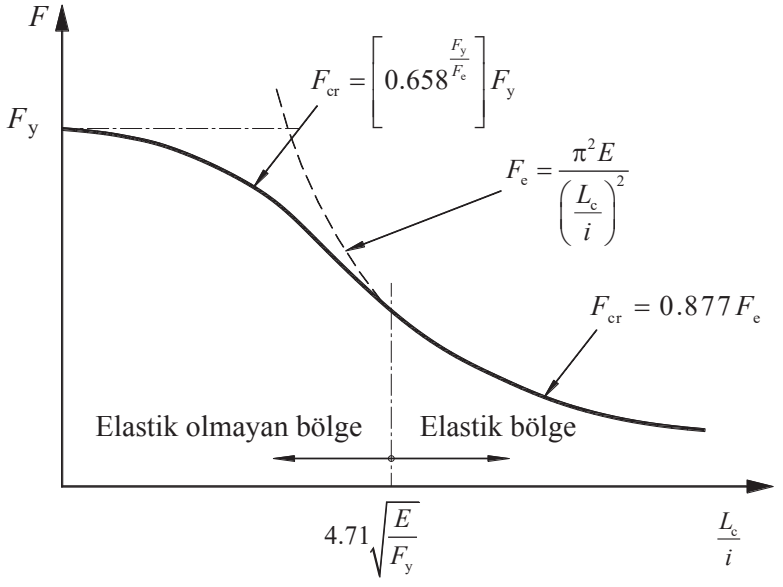
$$\frac{L_c}{i} \leq 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \qquad (\text{veya } \frac{F_y}{F_e} \leq 2.25) \text{ için}$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y \tag{8.2}$$

$$\frac{L_c}{i} > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \qquad (\text{veya } \frac{F_y}{F_e} > 2.25) \text{ için}$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \tag{8.3}$$

Basınç elemanının narinlik oranı, L_c / i, ile kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, arasındaki ilişki Şekil 8.1 de görülmektedir.



Şekil 8.1 Eksenel basınç kuvveti etkisindeki çelik eleman için dayanım eğrisi

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında eğilmeli burkulma, burulmalı burkulma ve/veya eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumları için *elastik burkulma gerilmesi*, F_e, *Yönetmelik* 8.2 de verilen esaslara göre belirlenecektir.

Yapma Enkesitli Basınç Elemanları

Çok parçalı basınç elemanlarında uç noktalar arasında en az iki adet ara bağlantı teşkil edilecek ve kayma şekildeğiştirmelerinin karakteristik basınç kuvveti dayanımına etkisi gözönüne alınacaktır. Bu etki, *etkin narinlik oranı,* $(L_c/i)_m$, ile hesaba katılacaktır. Bu durumda, elemanının karakteristik basınç kuvveti dayanımı, (L_c/i) narinlik oranı yerine, *Yönetmelik* 8.4 te tanımlanan etkin narinlik oranı kullanılarak belirlenecektir.

Narin Enkesitli Basınç Elemanları

Eksenel basınç kuvveti altında, *Yönetmelik* Tablo 5.1A ya göre *narin* enkesit parçalarına sahip basınç elemanlarında *karakteristik basınç kuvveti dayanımı,* P_n, *Yönetmelik* 8.5 te verilen esaslar doğrultusunda,

$$P_n = F_{cr} A_e \tag{8.23}$$

ile belirlenecektir.

Enkesit parçalarında yerel burkulma etkilerinin hesaba katıldığı *etkin net enkesit alanı*, A_e, *Yönetmelik* 8.5 te açıklanmaktadır.

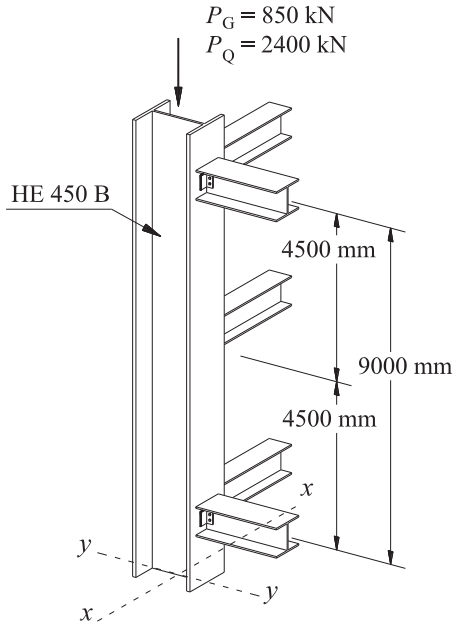
Örnek 8.1

Her iki asal ekseni etrafında iki ucu mafsallı HE 450 B enkesitli L = 9.0m boyundaki eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 850kN ve P_Q = 2400kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir. Eleman, boyunun orta noktasında, enkesitinin y-eksenine (zayıf eksenine) dik doğrultusunda yanal yerdeğiştirmeye ve burulmaya karşı desteklenmiştir.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 B			
A_g = 21800 mm^2	h = 344 mm	b = 300 mm	
t_w = 14 mm	t_f = 26 mm	i_x = 191.40 mm	i_y = 73.30 mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(26)} = 5.77 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{355}} = 13.29$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 5)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{344}{14} = 24.57 \le \lambda_r = 1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49\sqrt{\frac{200000}{355}} = 35.28$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak değerlendirilir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, x- ve y-asal eksenleri etrafında eğilmeli burkulma sınır durumları esas alınarak hesaplanan dayanımlarının küçüğü belirleyecektir.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda asal eksenlere göre eleman burkulma boyları

Yönetmelik 6.4.3(a) uyarınca, burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alınır. Buna göre,

$$L_{cx} = K_x L_x = 1.0(9000) = 9000 \text{ mm}$$

$$L_{cy} = \left[K_{y1}L_{y1} \; ; K_{y2}L_{y2} \right]_{maks} = \left[(1.0 \times 4500); (1.0 \times 4500) \right]_{maks} = 4500 \text{ mm}$$

Narinlik oranları,

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{9000}{191.40} = 47.02 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{4500}{73.30} = 61.39 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$\left(L_c/i\right)_{maks} = \left(L_{cx}/i_x; L_{cy}/i_y\right)_{maks} = \left(47.02; 61.39\right)_{maks} = 61.39$$

olduğundan, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, y-asal ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyecektir. Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(61.39)^2} = 524 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$61.39 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{355}} = 111.79$$

olduğundan,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y = \left[0.658^{\frac{355}{524}} \right] 355 = 267.35 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g = 267.35(21800)10^{-3} = 5828.23 \text{ kN} \quad (8.1)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(850) + 1.6(2400) = 4860$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 850 + 2400 = 3250$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(5828.23) = 5245.41$ kN	$P_g = P_n / \Omega_c = 5828.23 / 1.67 = 3489.96$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{4860.00}{5245.41} = 0.93 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{3250.00}{3489.96} = 0.93 \le 1.0$ ✓

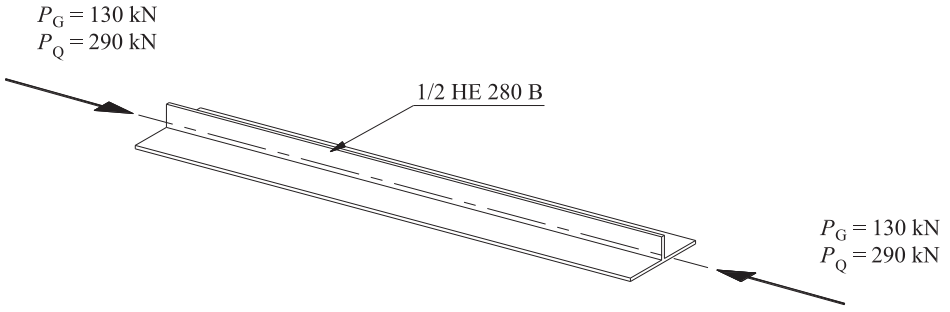
Örnek 8.2

Her iki asal ekseni etrafında iki ucu mafsallı 1/2 HE 280 B enkesitli L = 4.0m boyundaki eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 130kN ve P_Q = 290kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

½ HE 280 B			
A_g = 6570 mm^2	I_x = 673 cm^4	I_y = 3297 cm^4	
J = 71.85 cm^4	d = 140 mm	b = 280 mm	t_f = 18mm
t_w = 10.5 mm	i_x = 32 mm	i_y = 71 mm	y_g = 22.31mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{280}{2(18)} = 7.78 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{355}} = 13.29$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 4)

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{140}{10.5} = 13.33 \le \lambda_r = 0.75\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.75\sqrt{\frac{200000}{355}} = 17.80$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları λ_r sınır değerini aşmadığından $(\lambda \le \lambda_r)$ *narin olmayan enkesit* olarak tanımlanır.

Yönetmelik 8.2.2 uyarınca, basınç elemanı enkesiti tek simetri eksenine sahip olduğundan, basınç kuvveti dayanımını x- ve y-asal eksenleri etrafında eğilmeli burkulma ve simetri ekseni olan y-asal ekseni etrafında eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları için hesaplanan dayanımların küçüğü belirleyecektir.

Narinlik oranları

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{(1.0)4000}{32} = 125 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{1.0(4000)}{71} = 56.34 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$(L_c/\mathrm{i})_{maks} = \left(L_{cx}/i_x\,;\, L_{cy}/i_y\right)_{maks} = \left(125;56.34\right)_{maks} = 125$$

olduğundan, eğilmeli burkulma sınır durumunda dayanımı, x-asal ekseni belirleyecektir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2\left(200000\right)}{\left(125\right)^2} = 126.33\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (8.4)$$

$$\lambda_x = 125 > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{355}} = 111.79 \qquad \text{veya} \qquad \frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{126.33} = 2.81 > 2.25$$

olduğundan, *Yönetmelik* 8.2 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda,

$$F_{cr} = 0877F_e = 0.877(126.33) = 110.79\mathrm{N/mm^2} \qquad (8.3)$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 110.79(6570)10^{-3} = 728\mathrm{kN} \qquad (8.1)$$

Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, y-ekseni etrafında eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ey},

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2\left(200000\right)}{\left(56.34\right)^2} = 622\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (8.9)$$

½ HEB 280 enkesitin kayma merkezi, simetri ekseni üzerinde başlık kalınlığının orta noktası olduğundan, $x_o = 0$ ve $y_o = 22.31 - 18 / 2 = 13.31$mm olur.

Kayma merkezine göre hesaplanan polar atalet yarıçapı, $\bar{i}_o$,

$$\bar{i}_o^{\,2} = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} = 0 + \left(13.31\right)^2 + \frac{673\left(10\right)^4 + 3297\left(10\right)^4}{6570} = 6219\ \mathrm{mm^2} \qquad (8.12)$$

Burulmalı burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ez},

$$F_{ez} = \frac{GJ}{A_g \bar{i}_o^2} = \frac{77200(718500)}{6570(6219)} = 1358 \text{ N/mm}^2 \quad (8.14)$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{i}_o^2} = 1 - \frac{0 + (13.31)^2}{6219} = 0.971 \quad (8.11)$$

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, Denk.(8.6) ile,

y-asal ekseni etrafında eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{\left(F_{ey} + F_{ez}\right)^2}} \right]$$

$$F_e = \left(\frac{622 + 1358}{2(0.971)} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4(622)(1358)(0.971)}{(622 + 1358)^2}} \right] = 608 \text{ N/mm}^2$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{608} = 0.58 \le 2.25$$

olduğundan, eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}} \right] F_y = \left[0.658^{\frac{355}{608}} \right] 355 = 0.784(355) = 278 \text{ N/mm}^2 \quad (8.2)$$

$$P_n = F_{cr} A_g = 278(6570)10^{-3} = 1826 \text{ kN} \quad (8.1)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n

Yönetmelik 8.1.2 uyarınca,

$$P_n = (728\text{kN}; 1826\text{kN})_{min} = 728 \text{ kN}$$

olduğundan, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını x-ekseni etrafında eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyecektir.

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(130) + 1.6(290) = 620$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 130 + 290 = 420$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(728) = 655.20$ kN	$P_g = P_n / \Omega_c = 728 / 1.67 = 436$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{620}{655.20} = 0.95 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{420}{436} = 0.96 \le 1.0$ ✓

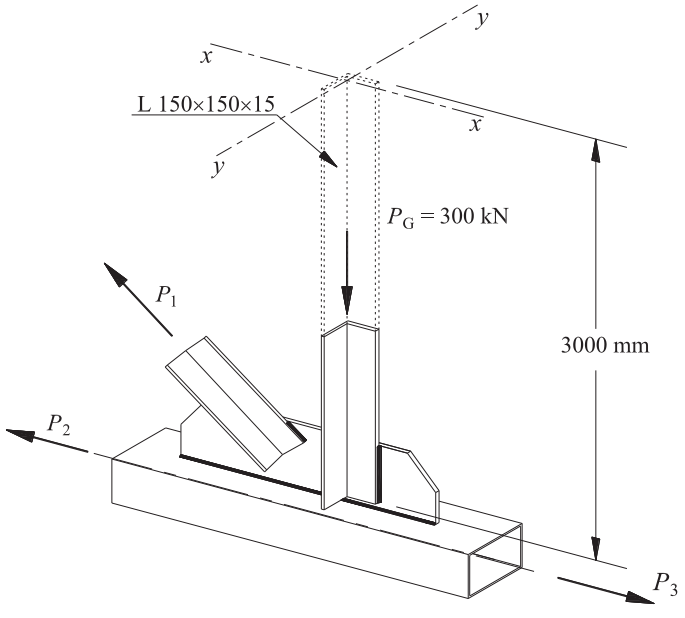
Örnek 8.3

Bir düzlem kafes sistemin örgü elemanı olarak kullanılan L 150×150×15 enkesitli ve L=3.0m boyundaki iki ucu mafsallı dikme elemanı, komşu örgü elemanıyla birlikte her iki uçtaki düğüm levhalarının aynı yüzüne kaynaklı uç birleşimi ile bağlanmaktadır. Dikme elemanı sabit yükler altında, P_G = 300 kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 150×150×15			
A_g = 4302 mm^2	$i_x = i_y$ = 45.70 mm	i_w = 57.57 mm	i_z = 29.33 mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Korniyer kolu (Tablo 5.1A, Durum 3)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{150}{15} = 10 \le \lambda_r = 0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.45\sqrt{\frac{200000}{275}} = 12.13$$

Yerel burkulma sınır durumu için korniyer kollarının genişlik/kalınlık oranları λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak tanımlanır.

Yönetmelik 8.3 uyarınca,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{150}{15} = 10 \le 0.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.71\sqrt{\frac{200000}{275}} = 19.14$$

olduğundan, tek korniyerden oluşan basınç elemanının karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n, eğilmeli burkulma sınır durumu esas alınarak *Yönetmelik* 8.2.1 uyarınca belirlenir.

Yönetmelik 8.3 uyarınca, tek korniyerden oluşan basınç elemanlarında, dışmerkezlik etkisinin ihmal edilmesine ve tanımlanan *etkin narinlik oranları* (L_c / i) kullanılarak eksenel basınç kuvveti dayanımının hesaplanmasına izin verilmektedir. Bunun için esas alınacak koşulların kontrolü aşağıda verilmiştir.

(a) Korniyer, her iki ucunda aynı kolundan basınç kuvveti etkisinde olmalıdır. ✓

(b) Korniyer uçları, en az 2 bulon ile veya kaynakla bağlanmalıdır. ✓

(c) Korniyerin boyuna eksenine dik yük bulunmamalıdır. ✓

(d) L_c/i oranı 200 sınırını aşmamalıdır.

Bu durumda etkin narinlik oranı, (L_c / i), *Yönetmelik* Denk.(8.15) ile,

$$\frac{L}{i_a} = \frac{(1.0)3000}{45.70} = 65.65 \le 80 \quad \text{için} \frac{L_c}{i} = 72 + 0.75\frac{L}{i_a} = 72 + 0.75(65.65) = 121.23 \le 200 \checkmark$$

olduğundan tek korniyerden oluşan basınç elemanı için *Yönetmelik* 8.3 te tanımlanan tüm koşullar sağlanmaktadır. Böylece, dışmerkezlik etkisi ihmal edilerek eksenel basınç kuvveti dayanımı etkin narinlik oranı, L_c / i = 121.23 ile belirlenir.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(121.23)^2} = 134 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_c}{i} = 121.23 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{275}} = 127$$

olduğundan,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{275}{134}}\right] 275 = 116.60 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g = 116.60(4302)10^{-3} = 501.61 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.4P_G$ $= 1.4(300) = 420$ kN	$P_a = P_G$ $= 300$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(501.61) = 451.45$ kN	$P_g = P_n/\Omega_c = 501.61/1.67 = 300.36$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{420}{451.45} = 0.93 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{300}{300.36} \cong 1.0 \le 1.0$ ✓

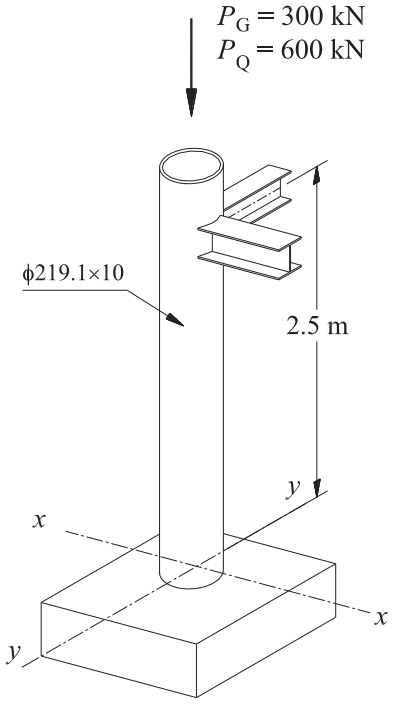
Örnek 8.4

Elektrik direnç kaynağı uygulanarak üretilen Boru 219.1×10 enkesitli L = 2.5m boyundaki iki ucu mafsallı eleman, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 300 kN ve P_Q = 700 kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

Boru 219.1×10			
A_g = 6570 mm^2	D = 219.1 mm	t = 10 mm	i = 74 mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, elektrik direnç kaynağı kullanılarak üretilen boru enkesitli elemanların kesit hesaplarında tasarım et (cidar) kalınlığı, karakteristik et kalınlığının 0.93 katına eşit olarak alınacaktır.

Tasarım et kalınlığına göre enkesit bilgileri

Boru 219.1×10			
t = 0.93×10 = 9.3 mm	A_g = 6129.69 mm^2	D = 219.1 mm	i = 74.2 mm

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

(Tablo 5.1A, Durum 9)

$$\lambda = \frac{D}{t} = \frac{219.1}{9.3} = 23.56 \le \lambda_r = 0.11\frac{E}{F_y} = 0.11\frac{200000}{275} = 80$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, çap/kalınlık oranı Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak sınıflandırılır.

Kolon burkulma boyu,

$$L_c = KL = 1.0(2500) = 2500 \text{ mm}$$

Narinlik oranı,

$$\frac{L_c}{i} = \frac{2500}{74} = 33.78 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranı $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(33.78)^2} = 1729.80 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_c}{i} = 33.78 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{355}} = 111.79$$

olduğundan,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{355}{1729.8}}\right] 355 = 0.918(355) = 325.81 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

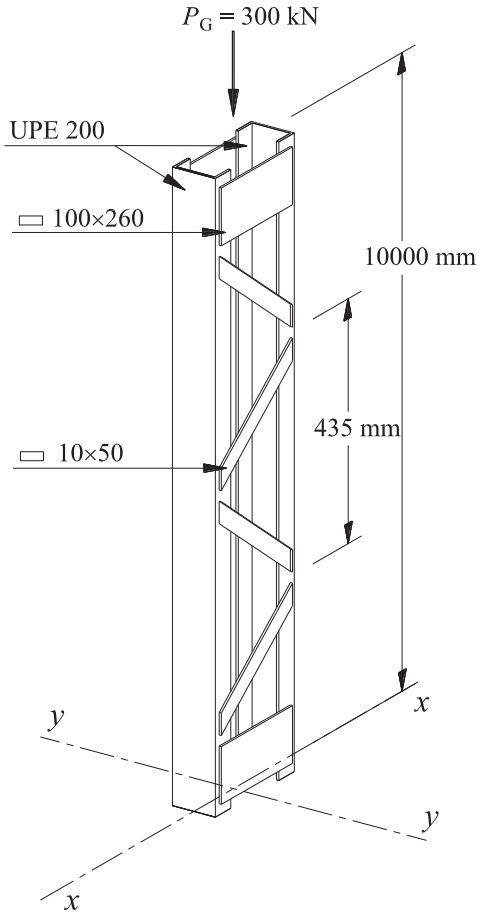
Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

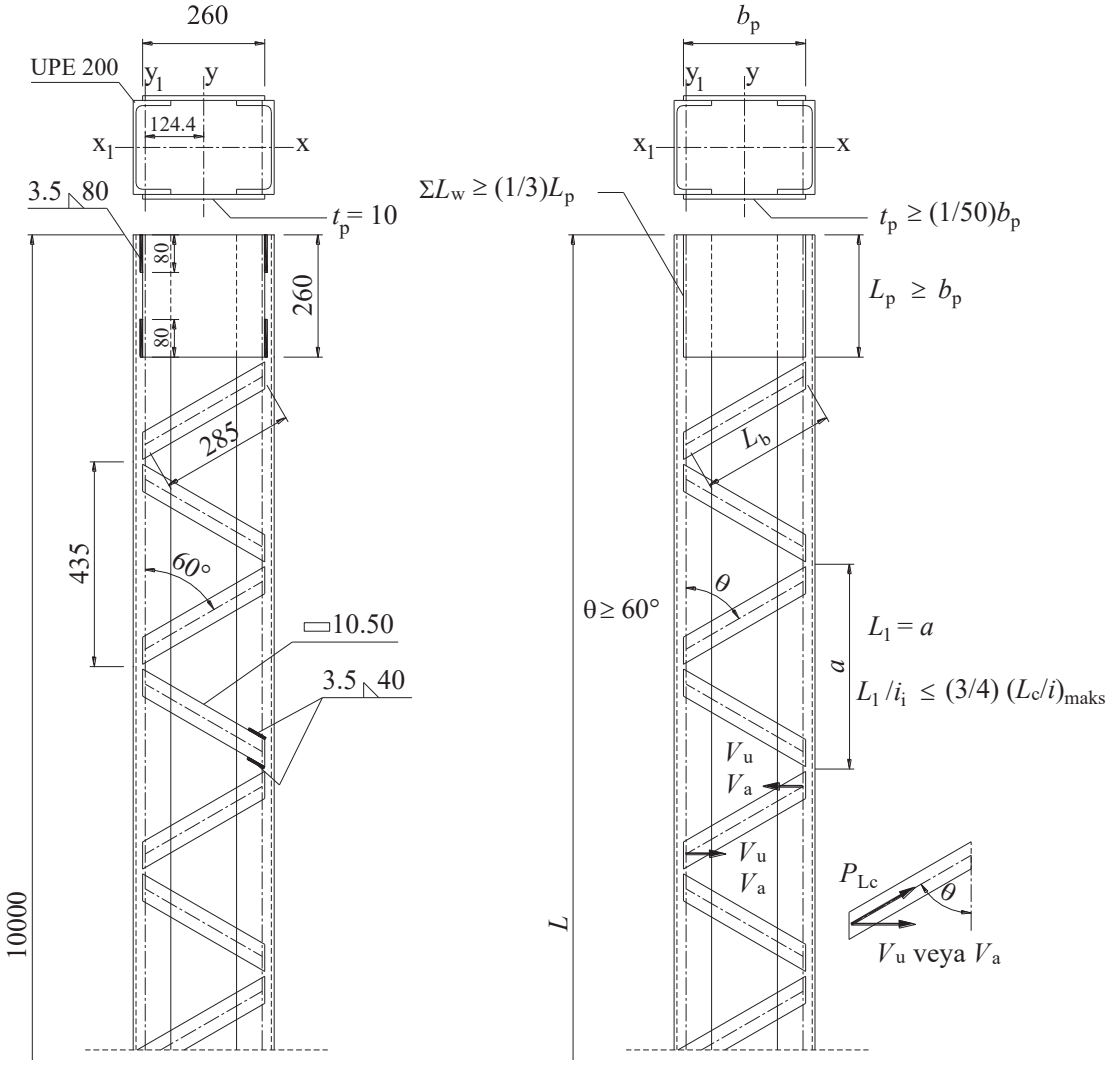
$$P_n = F_{cr} A_g = 325.81(6129.69)10^{-3} = 1997.12 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(300) + 1.6(700) = 1480$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 300 + 700 = 1000$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(1997.12) = 1797.40$ kN	$P_g = P_n/\Omega_c = 1997.12/1.67 = 1195.88$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{1480}{1797.40} = 0.82 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{1000}{1195.88} = 0.84 \le 1.0$ ✓

Örnek 8.5

İki adet UPE 200 (2UPE 200) profili ve uç bağlantı levhaları ile örgü elemanlarından oluşan, L=10m boyundaki çok parçalı yapma enkesitli eleman, sabit yükler altında, P_G = 300 kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir. Eleman uç bağlantıları, her iki asal eksen etrafında olmak üzere, mafsallı olarak teşkil edilmiştir. Uç bağlantı levhaları ▭10×260 enkesit boyutlarına, eleman boyunca a = 435mm aralıklı olarak düzenlenen örgü elemanları da ▭10×50 enkesit boyutlarına sahiptir. Ara bağlantı sistemini oluşturan örgü elemanları ile uç bağlantı levhalarının detayları aşağıdaki şekilde verilmektedir.





a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

d. Ara bağlantı elemanlarında (örgü çubukları) dayanım kontrolü (YDKT ve GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Kaynak

$F_E = 460$ N/mm^2 > $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* 2.4)

Enkesit

UPE 200			
$A_g = 2901$ mm^2	$I_x = 1909$ cm^4	$I_y = 187.3$ cm^4	C_w=1188 cm^6
$d = 200$ mm	$h = 152$ mm	$b_f = 80$ mm	$J = 8.88$ cm^4
$t_w = 6$mm	$t_f = 11$mm	$i_x = 81.13$ mm	$i_y = 25.41$ mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için sınıflandırma

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{t_f} = \frac{80}{11} = 7.27 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{275}} = 15.10$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 5)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{152}{6} = 25.33 \le \lambda_r = 1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49\sqrt{\frac{200000}{275}} = 40.18$$

Yerel burkulma sınır durumu için UPE 200 enkesitli basınç elemanı, başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tabo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak tanımlanır.

Örgü çubuğu yerleşim aralığı kontrolü,

Kolon burkulma boyları,

$$L_{cx} = L_{cy} = KL = 1.0(10000) = 10000 \text{ mm}$$

2UPE 200 den teşkil edilmiş çok parçalı yapma enkesit için,

$$i_x = 81.13 \text{ mm}$$

$$I_y = 2\left(I_{y,1} + A_1 e^2\right) = 2\left[187.3(10)^4 + 2901(124.4)^2\right] = 9353(10)^4 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{9353(10)^4}{5802}} = 127 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks} = \left[\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)_o ; \left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)_o\right]_{maks}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks} = \left[\left(\frac{10000}{81.13}\right); \left(\frac{10000}{127}\right)\right]_{maks} = [123.26; 78.74]_{maks} = 123.26 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.4(b) uyarınca,

$$\frac{a}{i_i} \le \frac{3}{4}\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks}$$

$$\frac{435}{25.41} = 17.12 \le 0.75(123.26) = 92.45 \checkmark \qquad (8.22)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}

y-ekseni etrafında eğilmeli burkulma sınır durumunda kayma şekildeğiştirmelerinin etkisini hesaba katan etkin narinlik oranı gözönüne alınacaktır.

Yönetmelik 8.4 uyarınca, etkin narinlik oranı, $(L_c/i)_m$,

$$\left(\frac{a}{i_i}\right)=\frac{435}{25.41}=17.12\le 40$$

$$\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)_m=\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)_o=\frac{10000}{127}=78.74 \qquad (8.20)$$

$$\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)_m=78.74\le\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)=123.26$$

olduğundan, eğilmeli burkulma sınır durumunda kolon dayanımını, x-asal ekseni belirleyecektir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ex},

$$F_{ex}=\frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2}=\frac{\pi^2\left(200000\right)}{\left(123.26\right)^2}=129.92\ \text{N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_c}{i}=123.26\le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}}=4.71\sqrt{\frac{200000}{275}}=127 \quad \text{veya} \quad \frac{F_y}{F_e}=\frac{275}{129.92}=2.12\le 2.25$$

olduğundan, eğilmeli burkulma sınır durumunda, F_{cr},

$$F_{cr}=\left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right]F_y=\left[0.658^{\frac{275}{129.92}}\right]275=113.39\ \text{N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Burulmalı burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}

Yönetmelik 8.2.2(a) uyarınca Denk.(8.5) ile burulmalı burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi,

$$F_e=\left[\frac{\pi^2 EC_w}{\left(L_{cz}\right)^2}+GJ\right]\frac{1}{I_x+I_y} \qquad (8.5)$$

$$F_e=\left[\frac{\pi^2\,200000\left(2\times1188\right)10^7}{\left(1.0\times10000\right)^2}+77200\left(2\times88840\right)\right]\times\ldots$$

$$\ldots\times\frac{1}{2\times1909\left(10\right)^4+9353\left(10\right)^4}=107.70\ \text{N/mm}^2$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{F_y}{F_e}=\frac{275}{107.7}=2.55>2.25$$

olduğundan, burulmalı burkulma sınır durumunda, F_{cr},

$$F_{cr} = 0.877F_e = 0.877(107.70) = 94.45 \text{ N/mm}^2 \quad (8.3)$$

olarak belirlenir.

$$F_{cr} = \left(113.39\text{N/mm}^2; 94.45\text{N/mm}^2\right)_{min} = 94.45 \text{ N/mm}^2$$

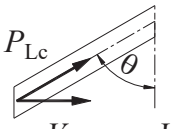
Yönetmelik 8.1.2 uyarınca, karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_n, elemanın enkesit asal eksenlerinden herhangi biri etrafında *eğilmeli burkulma*, *burulmalı burkulma* ve/veya *eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumlarına* göre hesaplanacak dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır. Bu durumda, karakteristik basınç kuvveti dayanımını burulmalı burkulma sınır durumu belirler.

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr}A_g = 94.45(2\times 2901)10^{-3} = 548 \text{ kN} \quad (8.1)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.4P_G$ $= 1.4(300) = 420$ kN	$P_a = P_G$ $= 300$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(548) = 493\text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 548/1.67 = 328.14\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{420}{493} = 0.85 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{300}{328.14} = 0.91 > 1.0$ ✓

d. X 10×50 enkesitli ara bağlantı elemanlarının (örgü çubuklarının) dayanım kontrolü



V_u veya V_a

Yönetmelik 8.4(f) uyarınca, bir tarafta tek örgü elemanı kullanılması durumunda narinlik kontrolü

$$I_{min} = \frac{t^3 b}{12} = \frac{10^3(50)}{12} = 4166.67\text{mm}^4$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = \sqrt{\frac{4166.67}{10(50)}} = 2.89\text{mm} \quad (i_{min} \approx 0.2887t)$$

$$\lambda_{maks} = \frac{L_b}{i_{min}} \le 140 \Rightarrow \lambda_{maks} = \frac{285}{2.89} = 98.62 \le 140$$ ✓

Yönetmelik 8.4(h) uyarınca, örgü elemanlarının dayanım kontrolü,

YDKT	GKT
Örgü çubukları için toplam gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 0.02P_d$ $= 0.02(493) = 9.86$ kN	$V_a = 0.02P_g$ $= 0.02(328.14) = 6.56$ kN
Bir taraftaki örgü elemanına etkiyen eksenel basınç kuvveti, P_{Lc}	
$P_{Lc} = \frac{V_u / 2}{\text{Sin}\theta} = \frac{9.86/2}{\text{Sin}60^0} = 5.69\text{kN}$	$P_{Lc} = \frac{V_a / 2}{\text{Sin}\theta} = \frac{6.56/2}{\text{Sin}60^0} = 3.79$ kN

Kafes sistemde örgü elemanlarının basınç elemanı parçalarına bağlantısı kaynaklı birleşim ile enkesit kaybı olmadan sağlandığından, dayanım kontrolünün sadece eksenel basınç kuvveti altında yapılması yeterlidir.

Örgü elemanının eksenel basınç kuvveti altında kontrolü

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_b}{i_{min}} = 98.62 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 127$$

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_{min}}\right)^2} = \frac{\pi^2(200000)}{98.62^2} = 203 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{275}{203}}\right](275) = 156 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı,

$$P_n = F_{cr} A_g = 156(10\times 50)10^{-3} = 78.0 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

Örgü elemanının mevcut basınç kuvveti dayanımının kontrolü,

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 5.69$ kN	$P_a = 3.79$ kN
Örgü elemanının tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	Örgü elemanının güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.9(78.0) = 70.2$ kN	$P_g = P_n/\Omega_c = 78.0/1.67 = 46.71$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{5.69}{70.2} = 0.08 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{3.79}{46.71} = 0.08 \le 1.0$ ✓

Ayrıca, örgü çubuğu kaynaklı uç birleşiminin dayanım kontrolü de *Yönetmelik* Bölüm 13 esas alınarak yapılmalıdır.

Örnek 8.6

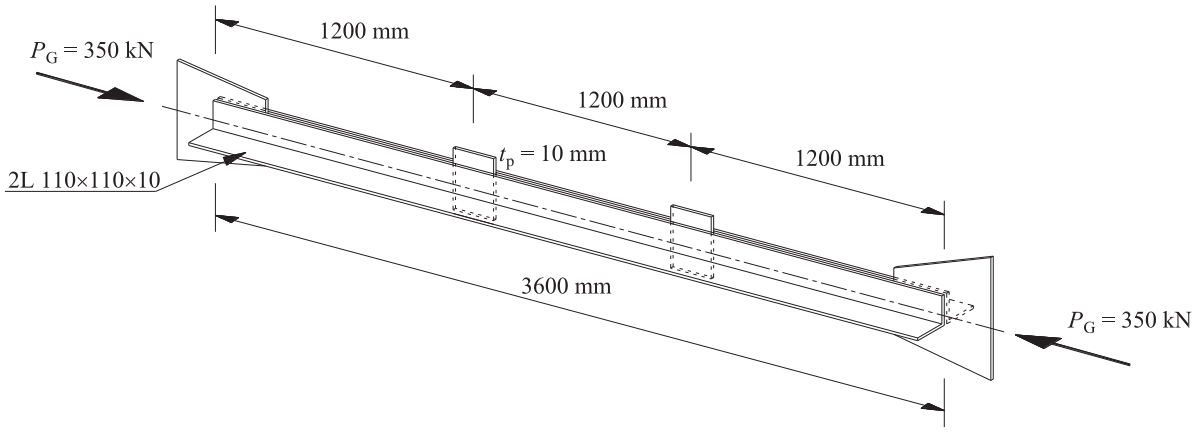
Sırt sırta yerleştirilerek 2L 110×110×10 ile teşkil edilen L=3.6m boyundaki çok parçalı yapma enkesitli eleman, sabit yükler altında, P_G = 350kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir. Eleman uç bağlantıları, her iki asal eksen etrafında olmak üzere, mafsallı olarak teşkil edilmiştir. Eleman boyunca a = 1200mm aralıklı ve kaynaklı olarak düzenlenen ara bağlantı levhaları, t_p = 10mm kalınlığındadır.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

d. Bağ levhaları için gerekli kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi, (YDKT ve GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 110×110×10			
A_g = 2120 mm^2	I_x = 238 cm^4	I_y = 238 cm^4	J = 7 cm^4
i_x = 33.5 mm	i_y = 33.5 mm	i_z = 21.5 mm	$x_g = y_g$ = 30.6 mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için sınıflandırma

Korniyer kolu, (Tablo 5.1A, Durum 3)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{110}{10} = 11 \le \lambda_r = 0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.45\sqrt{\frac{200000}{275}} = 12.13$$

Yerel burkulma sınır durumu için L 110×110×10 korniyer kolları, genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak tanımlanır.

Bağ levhası yerleşim aralığı kontrolü,

Burkulma boyları,

$$L_{cx} = L_{cy} = KL = 1.0(3600) = 3600\text{mm}$$

2L 110×110×10 ile teşkil edilmiş çok parçalı yapma enkesitli basınç elemanında,

$i_x = 33.5$ mm

$$I_y = 2\left(I_{y,1} + A_l e^2\right) = 2\left[238(10)^4 + 2120(30.6+5)^2\right] = 1013.36(10)^4 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{1013.36(10)^4}{2\times 2120}} = 48.89 \text{ mm}$$

Yönetmelik 8.4(b) uyarınca,

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks} = \left[\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)_o ; \left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)_o\right]_{maks}$$

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks} = \left[\left(\frac{3600}{33.5}\right)_o ; \left(\frac{3600}{48.89}\right)_o\right]_{maks} = [107.46; 73.63]_{maks} = 107.46 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{a}{i_i} \le \frac{3}{4}\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks}$$

$$\frac{1200}{21.50} = 55.81 \le 0.75(107.46) = 80.59 \checkmark \qquad (8.22)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}

y-ekseni etrafında eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, kayma şekildeğiştirmelerinin etkisini hesaba katan etkin narinlik oranı gözönüne alınarak belirlenir.

Yönetmelik 8.4 uyarınca, etkin narinlik oranı, $(L_c/i)_m$,

$$\left(\frac{a}{i_i}\right) = \frac{1200}{21.5} = 55.81 > 40$$

olduğundan,

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L_c}{i}\right)_o^2 + \left(\frac{K_i a}{i_i}\right)^2} = \sqrt{(73.63)^2 + \left(\frac{0.5(1200)}{21.50}\right)^2} = 78.74 \qquad (8.21)$$

$$\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)_m = 78.74 \le \left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right) = 107.46$$

eğilmeli burkulma sınır durumunda dayanımı x-asal ekseni belirleyecektir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ex},

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(107.46)^2} = 171 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{171} = 1.61 \le 2.25$$

olduğundan, eğilmeli burkulma sınır durumunda, F_{cr},

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{275}{171}}\right] 275 = 140.17 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Burulmalı burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}

Çift korniyer enkesitin kayma merkezi, simetri ekseni üzerinde başlık kalınlığının orta noktası olduğundan, x_o= 0 ve y_o= 30.60-10/2= 25.60mm olarak hesaplanır.

$$\bar{i}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + i_x^2 + i_y^2 = 0 + (25.60)^2 + (33.50)^2 + (48.89)^2 = 4167 \text{ mm}^2$$

Burulmalı burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ez},

$$F_{ez} = \frac{GJ}{A_g \bar{i}_o^2} = \frac{77200(2 \times 70000)}{(2 \times 2120)(4167)} = 612 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.14)$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{i}_o^2} = 1 - \frac{0 + (25.60)^2}{4167} = 0.843 \qquad (8.11)$$

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, Denk.(8.6) kullanılarak y-asal ekseninde eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{\left(F_{ey} + F_{ez}\right)^2}}\right] \qquad (8.6)$$

$$F_e = \left(\frac{318 + 612}{2 \times 0.843}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4(318)(612)(0.843)}{(318 + 612)^2}}\right] = 281 \text{ N/mm}^2$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{275}{281} = 0.979 \le 2.25 \text{ olduğundan,}$$

eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda, F_{cr},

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{275}{281}}\right] 275 = 182.55 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımı, P_n, hesaplanan burkulma dayanımlarının en küçüğü olarak alınacaktır.

$$F_{cr} = \left(140.17\ \text{N/mm}^2; 182.55\ \text{N/mm}^2\right)_{min} = 140.17\ \text{N/mm}^2$$

Bu durumda, karakteristik basınç kuvveti dayanımını eğilmeli burkulma sınır durumu belirler.

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g = 140.17\left(2 \times 2120\right)10^{-3} = 594.32\ \text{kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.4P_G$ $= 1.4\left(350\right) = 490\ \text{kN}$	$P_a = P_G$ $= 350\ \text{kN}$
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90\left(594.32\right) = 534.89\text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 594.32/1.67 = 355.88\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{490}{534.89} = 0.92 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{350}{355.88} = 0.98 < 1.0$ ✓

d. Bağ levhaları için gerekli kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* 8.4(h) uyarınca,

YDKT	GKT
Bağ levhaları için gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 0.02P_d$ $= 0.02\left(534.89\right) = 10.70\ \text{kN}$	$V_a = 0.02P_g$ $= 0.02\left(355.88\right) = 7.12\ \text{kN}$

Bağ levhaları ve birleşim elemanları basınç elemanı boyuna eksenine dik olarak gözönüne alınan V_u (YDKT) veya V_a (GKT) kesme kuvveti altında boyutlandırılmalıdır.

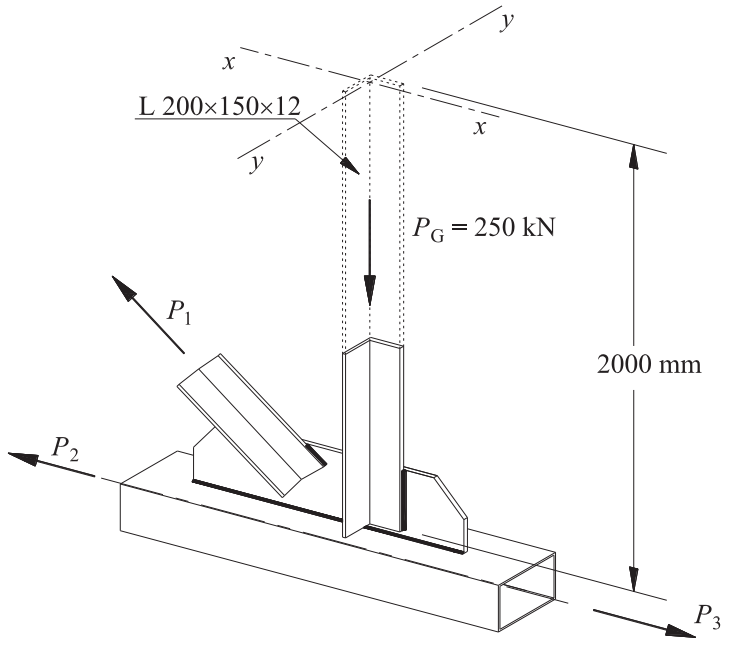
Örnek 8.7

Bir düzlem kafes sistemin örgü elemanı olarak kullanılan L 200×150×12 enkesitli ve L=2.0m boyundaki iki ucu mafsallı dikme elemanı, komşu örgü elemanıyla birlikte düğüm levhasının aynı yüzüne kısa kollarından kaynaklı uç birleşimi ile bağlanmaktadır. Dikme elemanı sabit yükler altında, P_G = 350kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 200×150×12				
A_g = 4080 mm^2	i_x =63.60mm	i_y = 44.40 mm	i_w = 70.40 mm	i_z = 32.50 mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvvetinin belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Korniyer kolları (Tablo 5.1A, Durum 3)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{200}{12} = 16.67 > \lambda_r = 0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.45\sqrt{\frac{200000}{235}} = 13.13$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{150}{12} = 12.50 \le \lambda_r = 0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.45\sqrt{\frac{200000}{235}} = 13.13$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre korniyer, uzun kolunun genişlik/kalınlık oranı λ_r sınır değerini aşması nedeniyle, *narin enkesit* olarak sınıflandırılır.

Ayrıca, *Yönetmelik* 8.3 uyarınca,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{200}{12} = 16.67 \le 0.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 20.71$$

olduğundan, karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n, *Yönetmelik* 8.5 uyarınca, *Yönetmelik* 8.2.1 ile sadece eğilmeli burkulma sınır durumu esas alınarak belirlenir.

Etkin alan hesabı,

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca,

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{maks} = \frac{L_c}{i_z} = \frac{2000}{32.50} = 61.54 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 137.40$$

olduğundan *Yönetmelik* 8.5 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i_z}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(61.54)^2} = 521.21 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{235}{521.21}}\right] 235 = 103.73 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{200}{12} = 16.67 \le \lambda_r\sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = 13.13\sqrt{\frac{235}{103.73}} = 19.76 \qquad (8.24a)$$

olduğundan etkin genişlik, b_e=b ve etkin alan, A_e=A_g olur.

Yönetmelik 8.3 uyarınca, tek korniyerden oluşan basınç elemanlarında, dışmerkezlik etkisinin ihmal edilmesine ve tanımlanan *etkin narinlik oranları* (L_c / i) kullanılarak eksenel basınç kuvveti dayanımının hesaplanmasına izin verilmektedir. Bunun için esas alınacak koşulların kontrolü aşağıda verilmiştir.

(a) Korniyer, her iki ucunda aynı kolundan basınç kuvveti etkisinde olmalıdır ✓

(b) Korniyer uçları, en az 2 bulon ile veya kaynakla bağlanmalıdır ✓

(c) Korniyerin boyuna eksenine dik yük bulunmamalıdır ✓

(d) L_c/i oranı 200 sınırını aşmamalıdır.

Farklı kollu korniyer kısa kolu ile bağlı olduğundan, etkin narinlik oranı, (L_c / i), *Yönetmelik* 8.3(1) uyarınca, $4\left[(b_l / b_s)^2 - 1\right]$ ile elde edilen değer kadar arttırılacaktır.

$$\frac{L}{i_a} = \frac{(1.0)2000}{63.60} = 31.45 \le 80 \quad \text{için,}$$

$$\frac{L_c}{i} = 72 + 0.75\frac{L}{i_a} + 4\left[(b_l / b_s)^2 - 1\right] \qquad (8.15)$$

$$\frac{L_c}{i} = 72 + 0.75(31.45) + 4\left[(200/150)^2 - 1\right] = 98.67 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_c}{i} = 98.67 \ge 0.95\frac{L}{i_z} = 0.95\frac{2000}{32.50} = 58.46 \checkmark$$

(e) $b_l / b_s = 200/150 = 1.67 \le 1.7 \checkmark$

olmak üzere tüm koşullar sağlanmaktadır. Bu durumda, tek korniyerden oluşan basınç elemanında dışmerkezlik etkisi ihmal edilerek, eksenel basınç kuvveti dayanımı, (L_c / i=98.67) olarak hesaplanan etkin narinlik oranı ile belirlenir.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n

Yönetmelik 8.5 uyarınca, tek korniyer enkesitlerde, kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, eğilmeli burkulma sınır durumuna göre hesaplanacağından, elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(98.67)^2} = 202.75 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_c}{i} = 98.67 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 137.40$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{235}{202.75}}\right] 235 = 145 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_e = 145(4080)10^{-3} = 591.60 \text{ kN} \qquad (8.23)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.4P_G$ $= 1.4(350) = 490$ kN	$P_a = P_G$ $= 350$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(591.60) = 532.44$ kN	$P_g = P_n / \Omega_c = 591.60/1.67 = 354.25$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{490}{532.44} = 0.92 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{350}{354.25} = 0.99 \le 1.0 \checkmark$

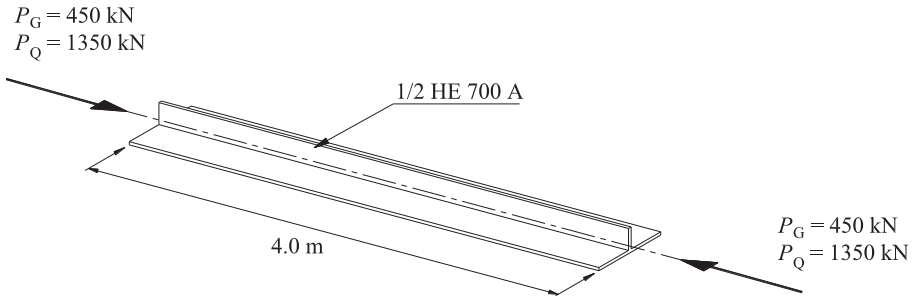
Örnek 8.8

Her iki asal ekseni etrafında da iki ucu mafsallı, L= 4.0m boyundaki 1/2 HE 700 A enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 450 kN ve P_Q = 1350 kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

½ HE 700 A			
A_g =13024 mm^2	I_x =12736 cm^4	I_y = 6089 cm^4	
J = 256.95 cm^4	d = 345 mm	b = 300 mm	t_f = 27mm
t_w = 14.5 mm	i_x = 99 mm	i_y = 68.4 mm	y_g = 76 mm

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(27)} = 5.55 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{355}} = 13.29$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 4)

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{345}{14.5} = 23.79 > \lambda_r = 0.75\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.75\sqrt{\frac{200000}{355}} = 17.80$$

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin gövde parçasının genişlik/kalınlık oranı λ_r sınır değerini aşdığından ($\lambda > \lambda_r$), basınç elemanı *narin enkesit* olarak tanımlanır.

Yönetmelik 8.2.2 uyarınca, basınç elemanı enkesiti tek simetri eksenine sahip olduğundan, basınç dayanımını x- ve y-asal eksenleri etrafında eğilmeli burkulma veya simetri ekseni olan

y-asal ekseninde eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları ile belirlenen dayanımlarının küçüğü belirleyecektir.

Narinlik oranları

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{(1.0)4000}{99} = 40.40 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{1.0(4000)}{68.4} = 58.48 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$(L_c/\mathrm{i})_{maks} = \left(L_{cx}/i_x\,;\,L_{cy}/i_y\right)_{maks} = \left(40.40;58.48\right)_{maks} = 58.48$$

olduğundan, eğilmeli burkulma sınır durumunda eksenel basınç kuvveti dayanımını y-asal ekseni etrafında hesaplanan narinlik oranı belirleyecektir. *Yönetmelik* 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2(200000)}{\left(58.48\right)^2} = 577\mathrm{N/mm^2} \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\lambda_y = 58.48 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{355}} = 111.79 \qquad \text{veya} \qquad \frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{577} = 0.61 \le 2.25$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right]F_y = \left[0.658^{\frac{355}{577}}\right]355 = 0.77(355) = 275\mathrm{N/mm^2} \qquad (8.2)$$

Etkin alanın belirlenmesi

Yönetmelik 8.5.1 uyarınca,

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{345}{14.5} = 23.79 > \lambda_r\sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = 17.80\sqrt{\frac{355}{275}} = 20.22 \qquad (8.24b)$$

olduğundan, etkin genişlik, b_e için, *Yönetmelik* Tablo 8.2 den etkin genişlik hata düzeltme katsayıları, c_1= 0.22 ve c_2=1.49 olarak belirlenir. Buna göre,

$$F_{el} = \left(c_2\frac{\lambda_r}{\lambda}\right)F_y = \left(1.49\frac{17.80}{23.79}\right)355 = 396\ \mathrm{N/mm^2} \qquad (8.25)$$

$$b_e = b\left(1 - c_1\sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}}\right)\sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} = 345\left(1 - 0.22\sqrt{\frac{396}{275}}\right)\sqrt{\frac{396}{275}} = 305\ \mathrm{mm} \qquad (8.24b)$$

Etkin alan, A_e,

$$A_e = A_g - \left(b - b_e\right)t = 13024 - \left(345 - 305\right)14.5 = 13024 - 580 = 12444\ \mathrm{mm^2}$$

$$P_n = F_{cr}A_e = 275(12444)10^{-3} = 3422\mathrm{kN} \qquad (8.1)$$

Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, y-ekseni etrafında eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ey},

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(58.48)^2} = 577 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.9)$$

½ HEA 700 enkesitin kayma merkezinin yeri, simetri ekseni üzerinde başlık kalınlığının orta noktasında olduğundan, $x_o = 0$ ve $y_o = 76 - 27 / 2 = 62.5$mm olur.

Kayma merkezine göre hesaplanan polar atalet yarıçapı, $\bar{i}_o$,

$$\bar{i}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} = 0 + (62.5)^2 + \frac{12735(10)^4 + 6089(10)^4}{13023} = 18361 \text{ mm}^2 \qquad (8.12)$$

Burulmalı burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ez},

$$F_{ez} = \frac{GJ}{A_g \bar{i}_o^2} = \frac{77200(2569500)}{13023(18361)} = 830 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.14)$$

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{\bar{i}_o^2} = 1 - \frac{0 + (62.5)^2}{18361} = 0.787 \qquad (8.11)$$

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, Denk.(8.6) ile, y-asal eksenine göre eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{\left(F_{ey} + F_{ez}\right)^2}}\right]$$

$$F_e = \left(\frac{577 + 830}{2(0.787)}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4(577)(830)(0.787)}{(577 + 830)^2}}\right] = 458 \text{ N/mm}^2$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{458} = 0.78 \le 2.25$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{355}{458}}\right] 355 = 0.72(355) = 256 \text{N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Etkin alanın belirlenmesi

Yönetmelik 8.5.1 uyarınca,

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{345}{14.5} = 23.79 > \lambda_r \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = 17.80\sqrt{\frac{355}{256}} = 20.96 \qquad (8.24b)$$

olduğundan etkin genişlik, b_e, hesabı,

$$F_{el} = \left(c_2 \frac{\lambda_r}{\lambda} \right) F_y = \left(1.49 \frac{17.80}{23.79} \right) 355 = 396 \text{ N/mm}^2 \quad (8.25)$$

$$b_e = b \left(1 - c_1 \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} \right) \sqrt{\frac{F_{el}}{F_{cr}}} = 345 \left(1 - 0.22 \sqrt{\frac{396}{256}} \right) \sqrt{\frac{396}{256}} = 312 \text{mm} \quad (8.24b)$$

Etkin alan, A_e,

$$A_e = A_g - (b - b_e)t = 13024 - (345 - 312)14.5 = 13024 - 478.5 = 12545 \text{mm}^2$$

$$P_n = F_{cr} A_e = 256(12545)10^{-3} = 3211 \text{ kN} \quad (8.23)$$

Basınç elemanının karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = (3422 \text{ kN}; 3211 \text{ kN})_{min} = 3211 \text{ kN}$$

olduğundan, *Yönetmelik* 8.1.2 uyarınca, elemanının eksenel basınç kuvveti dayanımını eğilmeli burulmalı burkulma sınır durumu belirleyecektir.

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(450) + 1.6(1350) = 2700 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 450 + 1350 = 1800 \text{ kN}$
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(3211) = 2890 \text{kN}$	$P_g = P_n / \Omega_c = 3211 / 1.67 = 1923 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{2700}{2890} = 0.93 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{1800}{1923} = 0.94 \le 1.0$ ✓

BÖLÜM 9 EĞİLME MOMENTİ ETKİSİ

Asal eksenlerinden herhangi biri etrafında basit eğilme etkisindeki elemanların tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 9 da belirtilen kurallara göre yapılacaktır. Basit eğilme etkisindeki elemanlarda, yükler kayma merkezinden geçen asal eksene paralel olan düzlemde etkimeli veya eleman, yük etkime noktalarında ve mesnetlerde burulmaya karşı desteklenmelidir. Bu bölümde verilen kurallar, elemanın asal eksenlerine paralel düzlemlerden birinde yük etkisinde olması ve boyuna eksenleri etrafında burulmasının mesnetlerde ve yük etkime noktalarında önlendiği varsayımına dayanmaktadır.

Eleman enkesit parçaları eğilme etkisi altında *Yönetmelik* Tablo 5.1B de verilen enkesit koşullarına göre *kompakt, kompakt olmayan* veya *narin* olarak sınıflandırılacaktır.

Karakteristik eğilme momenti dayanımı

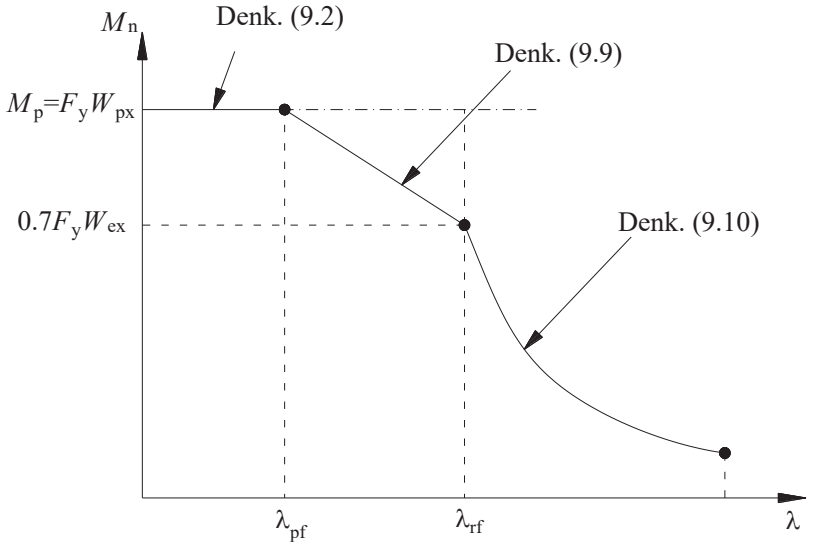
Eğilme etkisindeki elemanın *karakteristik eğilme momenti dayanımı*, M_n, olası her bir göçme sınır durumu için belirlenecek dayanımların en küçüğü olarak alınacaktır.

Eğilme etkisindeki elemanın enkesit özelliklerine bağlı olarak, *karakteristik eğilme momenti dayanımı*, M_n, için *Yönetmelikte* tanımlanan olası göçme sınır durumları aşağıda tablo halinde özetlenmiştir.

Tanım	Karakteristik eğilme momenti dayanımı için sınır durumlar
Kuvvetli asal eksenleri etrafında eğilme etkisindeki, gövde ve başlık parçaları *kompakt* sınıfında olan U-enkesitli ve çift simetri eksenli I-enkesitli elemanlar	Akma sınır durumu Yanal burulmalı burkulma sınır durumu
Kuvvetli asal eksenleri etrafında eğilme etkisindeki, enkesitin gövde parçası *kompakt* ve başlık parçaları *kompakt olmayan* veya *narin* sınıfında olan çift simetri eksenli I-enkesitli elemanlar	Yanal burulmalı burkulma sınır durumu Yerel burkulma sınır durumu
Kuvvetli asal eksenleri etrafında eğilme etkisindeki, enkesitin gövde parçası *kompakt olmayan* çift simetri eksenli I-enkesitli elemanlar ile gövde parçası *kompakt* veya *kompakt olmayan,* gövde düzlemine göre tek simetri eksenli I-enkesitli (farklı başlık enkesitine sahip) elemanlar	Yanal burulmalı burkulma sınır durumu Basınç başlığı yerel burkulma sınır durumu Basınç başlığı akma sınır durumu Çekme başlığı akma sınır durumu
Kuvvetli asal eksenleri etrafında eğilme etkisindeki, *narin* gövde parçasına sahip, çift simetri eksenli elemanlar ve gövde düzlemine göre tek simetri eksenli I-enkesitli elemanlar	Yanal burulmalı burkulma sınır durumu Basınç başlığı yerel burkulma sınır durumu Basınç başlığı akma sınır durumu Çekme başlığı akma sınır durumu
Zayıf asal eksenleri etrafında eğilme etkisindeki, U-enkesitli ve I-enkesitli elemanlar	Akma sınır durumu Yerel burkulma sınır durumu

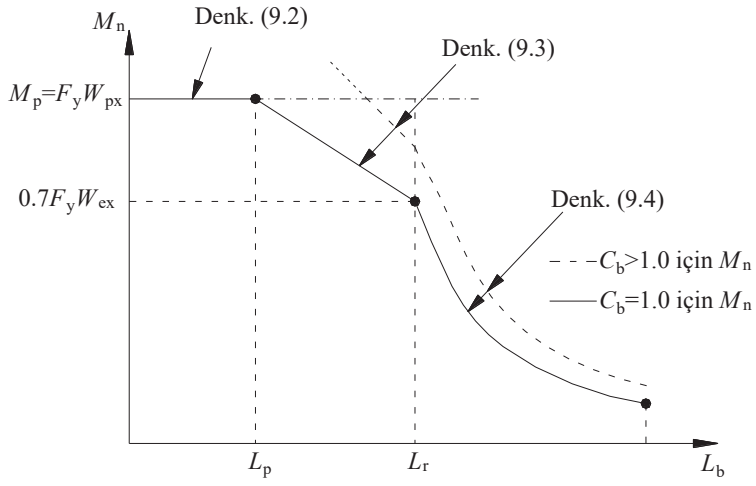
Kutu enkesitli elemanlar	Akma sınır durumu Başlığın yerel burkulma sınır durumu Gövdenin yerel burkulma sınır durumu
Boru enkesitli elemanlar	Akma sınır durumu Yerel burkulma sınır durumu
Simetri düzleminde yük etkisindeki çift korniyer ve T-enkesitli elemanlar	Akma sınır durumu Yanal burulmalı burkulma sınır durumu Başlığın yerel burkulma sınır durumu Gövdenin yerel burkulma sınır durumu
Tek korniyerler	Akma sınır durumu Yanal burulmalı burkulma sınır durumu Yerel burkulma sınır durumu
Dolu enkesitli elemanlar	Akma sınır durumu Yanal burulmalı burkulma sınır durumu
Simetri enkesiti olmayan enkesite sahip elemanlar	Akma sınır durumu Yanal burulmalı burkulma sınır durumu Yerel burkulma sınır durumu

Kuvvetli ekseni etrafında eğilme etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli elemanlar için yerel burkulma sınır durumunda, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n nin, enkesitin başlık parçası narinliği, λ_f e bağlı olarak değişimi **Şekil 9.1** de gösterilmiştir.



Şekil 9.1 – Enkesitin başlık parçası narinliği, λ_f e bağlı olarak M_n, karakteristik eğilme momenti dayanımının değişim

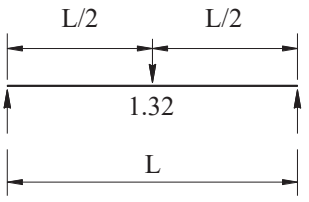
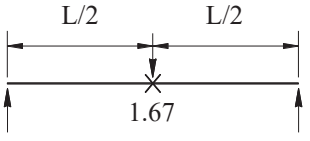
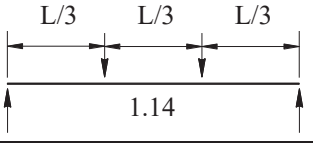
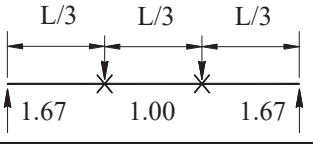
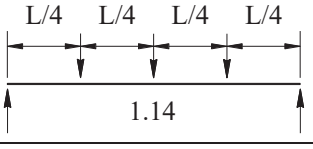
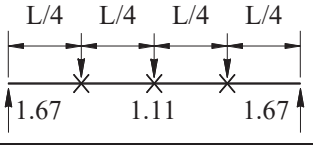
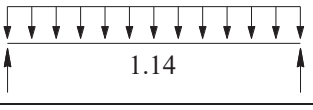
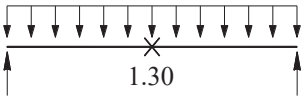
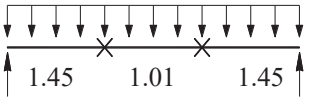
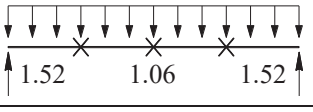
Kuvvetli ekseni etrafında eğilme etkisindeki çift simetri eksenli I-enkesitli elemanların yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, *Yönetmelikte* tanımlanan göçme sınır durumları için karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n nin, basınç başlığının yanal olarak desteklenmeyen uzunluğu, L_b ye bağlı olarak değişimi ve moment düzeltme katsayısı, C_b nin etkisi **Şekil 9.2** de gösterilmiştir.



Şekil 9.2 – Basınç başlığının yanal olarak desteklenmeyen uzunluğuna bağlı olarak karakteristik eğilme momenti dayanımı

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki uzunluk boyunca, eğilme momenti yayılışının olumlu katkısı *Yönetmelik* Denk.(9.1) ile tanımlanan *moment düzeltme katsayısı,* C_b, ile hesaba katılabilir. Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda, *moment düzeltme katsayısı,* C_b, değerleri, tipik basit kirişte çeşitli yükleme durumları ve farklı aralıklı yanal destek düzenlemelerine göre Tablo 9.1 de verilmiştir.

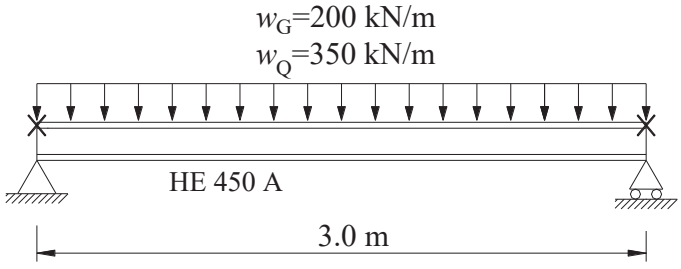
TABLO 9.1. Farklı aralıklı yanal destek düzenlemelerine göre C_b moment düzeltme katsayısı değerleri

Yükleme Durumu	Yanal Destek Düzeni	C_b
Kiriş ortasında tekil yük	Açıklıkta yanal destek yok	
Kiriş ortasında tekil yük	Açıklık ortasında yanal destek var	
Kiriş açıklığının 1/3 noktalarında tekil yük	Açıklıkta yanal destek yok	
Kiriş açıklığının 1/3 noktalarında tekil yük	Açıklığın 1/3 noktalarında yanal destek var	
Kiriş açıklığının 1/4 noktalarında tekil yük	Açıklıkta yanal destek yok	
Kiriş açıklığının 1/4 noktalarında tekil yük	Açıklığın 1/4 noktalarında yanal destek var	
Kiriş boyunca düzgün yayılı yük	Açıklıkta yanal destek yok	
Kiriş boyunca düzgün yayılı yük	Açıklık ortasında yanal destek var	
Kiriş boyunca düzgün yayılı yük	Açıklığın 1/3 noktalarında yanal destek var	
Kiriş boyunca düzgün yayılı yük	Açıklığın 1/4 noktalarında yanal destek var	

Not: Yukarıdaki tüm düzenlemelerde mesnetlerde de yanal destek sağlanmaktadır.

Örnek 9.1

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 450 A enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 200 kN/m ve w_Q = 350 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş başlıkları sadece mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 A			
$I_x = 63720$ cm^4	$W_{ex} = 2896$ cm^3	$W_{px} = 3216$ cm^3	$J = 243.8$ cm^4
$d = 440$ mm	$h = 344$ mm	$b_f = 300$ mm	$t_f = 21$mm
$t_w = 11.5$ mm	$i_y = 72.9$ mm		

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(21)} = 7.14 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{344}{11.5} = 29.91 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89.24$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit (HEA 450) *kompakt* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 355(3216)10^{-3} = 1141.68 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(72.9)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 3045.38 \text{ mm} \geq L_b = 3000 \text{ mm} \qquad (9.6a)$$

olduğundan, *Yönetmelik* 9.2.2(a) uyarınca, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

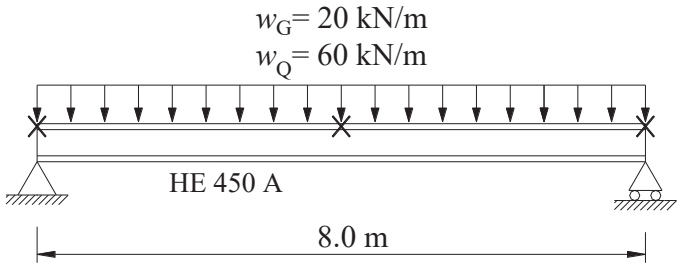
Bu durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımı akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$$M_n = M_p = 1141.68 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(200) + 1.6(350) = 800$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{800(3)^2}{8} = 900$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 200 + 350 = 550$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{550(3)^2}{8} = 618.75$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(1141.68) = 1028$kNm	$M_g = M_n / \Omega_b$ $M_g = 1141.68 / 1.67 = 683.64$kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{900}{1028} = 0.88 \leq 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{618.75}{683.64} = 0.91 < 1.0$ ✓

Örnek 9.2

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 450 A enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 60 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Basınç etkisindeki kiriş başlığı mesnetlerde ve açıklıkta yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 A			
$I_x = 63720$ cm^4	$W_{ex} = 2896$ cm^3	$W_{px} = 3216$ cm^3	J =243.8 cm^4
$d = 440$ mm	$h = 344$ mm	$b_f = 300$ mm	$t_f = 21$mm
$t_w = 11.5$ mm	$i_y = 72.9$ mm		

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(21)} = 7.14 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{344}{11.5} = 29.91 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89.24$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 355(3216)10^{-3} = 1141.68 \text{ kNm}$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı mesnet noktaları ve açıklık ortasında yanal olarak desteklendiğinden, L_b = 4000mm olarak belirlenir.

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(72.9)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 3045.38 \text{ mm} < L_b = 4000 \text{ mm} \qquad (9.6a)$$

$$c = 1.0 \qquad (9.7a)$$

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12\left(1+\frac{1}{6}\frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}} = \frac{300}{\sqrt{12\left(1+\frac{1}{6}\frac{344(11.5)}{300(21)}\right)}} = 82.40 \text{ mm} \qquad (9.8b)$$

$$h_o = d - t_f = 440 - 21 = 419 \text{ mm}$$

değerleri ile elastik olmayan yanal burkulma sınır uzunluk değeri, L_r, hesaplanır.

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7F_y}\sqrt{\frac{Jc}{W_{ex}h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex}h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \qquad (9.6b)$$

$$L_r = 1.95(82.40)\frac{200000}{0.7(355)} \times \ldots$$

$$\ldots \times \sqrt{\frac{243.8(10)^4(1.0)}{2896(10)^3(419)} + \sqrt{\left(\frac{243.8(10)^4(1.0)}{2896(10)^3(419)}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7(355)}{200000}\right)^2}} = 9860\text{mm}$$

$$L_p = 3045.38 \text{ mm} < L_b = 4000 \text{ mm} \le L_r = 9860 \text{ mm}$$

olduğundan, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2.2(b) uyarınca belirlenir.

Moment düzeltme katsayısı, C_b

Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momenti M_{maks}=1.0 olarak alındığında, M_A=0.438, M_B=0.751 M_C=0.938 olarak elde edilir. *Yönetmelik* 9.1(c) uyarınca,

$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \qquad (9.1)$$

$$C_b = \frac{12.5(1.00)}{2.5(1.00) + 3(0.438) + 4(0.751) + 3(0.938)} = 1.30$$

$$M_n = C_b\left[M_p - \left(M_p - 0.7F_yW_{ex}\right)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \le M_p \qquad (9.3)$$

$$M_n = 1.30\left[1141.68 - \left(1141.68 - 0.7(355)(2896)10^{-3}\right)\left(\frac{4000 - 3045.38}{9860 - 3045.38}\right)\right]$$

$$M_n = 1407.33\ \text{kNm} \le M_p = 1141.68\ \text{kNm}\ \times$$

olduğundan, yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik moment dayanımı, M_n

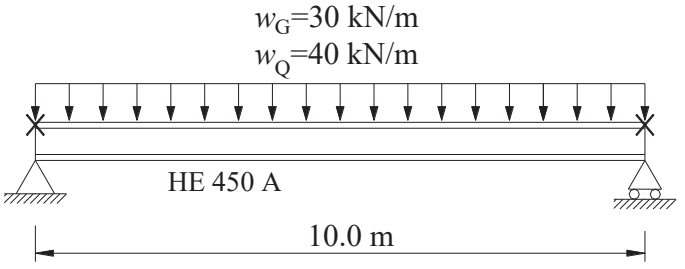
$$M_n = M_p = 1141.68\ \text{kNm}$$

Yönetmelik 9.2 uyarınca, en küçük eğilme momenti dayanımı, M_n, akma sınır durumunda elde edildiğinden, dayanım hesabında bu sınır durum belirleyicidir.

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(60) = 120$ kN/m $M_u = \frac{w_uL^2}{8} = \frac{120(8)^2}{8} = 960$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 60 = 80$ kN/m $M_a = \frac{w_aL^2}{8} = \frac{80(8)^2}{8} = 640$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(1141.68) = 1027.51$kNm	$M_g = M_n/\Omega_b$ $M_g = 1141.68/1.67 = 683.64$kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{960}{1027.51} = 0.93 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{640}{683.64} = 0.94 < 1.0$ ✓

Örnek 9.3

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 450 A enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 30 kN/m ve w_Q = 40 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Basınç etkisindeki kiriş başlığı sadece mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 A			
I_x = 63720 cm^4	W_{ex} = 2896 cm^3	W_{px} = 3216 cm^3	J =243.8 cm^4
d = 440 mm	h = 344 mm	b_f = 300 mm	t_f = 21mm
t_w = 11.5 mm	i_y = 72.9 mm		

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(21)} = 7.14 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{344}{11.5} = 29.91 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89.24$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde parçaları genişlik/kalınlık oranı Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, *kompakt* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 355(3216)10^{-3} = 1141.68 \text{ kNm} \quad (9.2)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş basınç başlığı mesnet noktalarında yanal olarak desteklendiğinden, L_b=10000mm olarak belirlenir.

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(72.9)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 3045.38 \text{ mm} < L_b = 10000 \text{ mm} \quad (9.6a)$$

$$c = 1.0 \quad (9.7a)$$

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12\left(1+\frac{1}{6}\frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}} = \frac{300}{\sqrt{12\left(1+\frac{1}{6}\frac{344(11.5)}{300(21)}\right)}} = 82.40 \text{ mm} \quad (9.8b)$$

$$h_o = d - t_f = 440 - 21 = 419 \text{ mm}$$

değerleri ile elastik olmayan yanal burkulmada sınır uzunluk, L_r

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7F_y}\sqrt{\frac{Jc}{W_{ex}h_o}+\sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex}h_o}\right)^2+6.76\left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (9.6b)$$

$$L_r = 1.95(82.40)\frac{200000}{0.7(355)}\times ...$$

$$...\times\sqrt{\frac{243.8(10)^4(1.0)}{2896(10)^3(419)}+\sqrt{\left(\frac{243.8(10)^4(1.0)}{2896(10)^3(419)}\right)^2+6.76\left(\frac{0.7(355)}{200000}\right)^2}} = 9860 \text{ mm}$$

$$L_b = 10000 \text{ mm} > L_r = 9860 \text{ mm}$$

olduğundan, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2.2(c) uyarınca hesaplanacaktır.

Moment düzeltme katsayısı, C_b

Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momenti M_{maks}=1.0 olarak alındığında, M_A=0.75, M_B=1.0 M_C=0.75 olarak elde edilir. *Yönetmelik* 9.1(c) uyarınca,

$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks}+3M_A+4M_B+3M_C}$$

$$C_b = \frac{12.5(1.00)}{2.5(1.00)+3(0.75)+4(1.0)+3(0.75)} = 1.14 \quad (9.1)$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{i_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{W_{ex} h_o} \left(\frac{L_b}{i_{ts}}\right)^2} \qquad (9.5)$$

$$F_{cr} = \frac{1.14\pi^2 (200000)}{\left(\frac{10000}{82.40}\right)^2} \times \ldots$$

$$\ldots \times \sqrt{1 + 0.078 \frac{243.8(10)^4 (1.0)}{2896(10)^3 (419)} \left(\frac{10000}{82.40}\right)^2} = 174.36(1.819) = 277.91 \text{ N/mm}^2$$

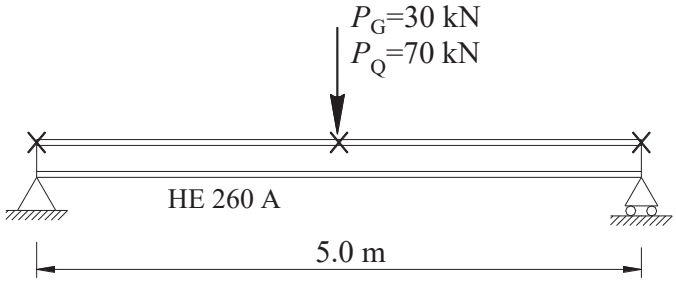
$$M_n = F_{cr} W_{ex} = 277.91(2896)(10)^{-3} = 804.83 \text{ kNm} \le M_p = 1141.68 \text{ kNm} \checkmark \qquad (9.4)$$

Yönetmelik 9.2 uyarınca, en küçük eğilme momenti dayanımı, M_n, yanal burulmalı burkulma sınır durumunda elde edildiğinden, dayanım hesabında bu sınır durum belirleyicidir.

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(30) + 1.6(40) = 100 \text{ kN/m}$ $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{100(8)^2}{8} = 800 \text{ kNm}$	$w_a = w_G + w_Q$ $= 30 + 40 = 70 \text{ kN/m}$ $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{70(8)^2}{8} = 560 \text{ kNm}$
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(804.83) = 724.35 \text{ kNm}$	$M_g = M_n / \Omega_b$ $M_g = 804.83 / 1.67 = 481.93 \text{ kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{800}{724.35} = 1.10 > 1.0$ ✗	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{560}{481.93} = 1.16 > 1.0$ ✗

Örnek 9.4

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 260 A enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, P_G = 30 kN ve P_Q = 70 kN olan tekil yüklerin etkisindedir. Basınç etkisindeki kiriş başlığı mesnetlerde ve açıklık ortasında yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 260 A			
$W_{ex} = 836.4$ cm^3	$W_{px} = 919.8$ cm^3	$d = 250$ mm	$h = 177$ mm
$b_f = 260$ mm	$t_f = 12.5$ mm	$t_w = 7.5$ mm	$i_y = 65$ mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{260}{2(12.5)} = 10.4 > \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{260}{2(12.5)} = 10.4 \le \lambda_r = 1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.0\sqrt{\frac{200000}{355}} = 23.73$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{177}{7.5} = 23.6 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89.24$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre, genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p ve λ_r sınır değeri arasında kalan başlık parçaları *kompakt olmayan* enkesit parçaları olarak,

enkesitin gövde parçasının genişlik/kalınlık oranı ise Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından *kompakt* enkesit parçası olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın başlık elemanı *kompakt olmayan*, gövde elemanı ise *kompakt* sınıfında olduğundan, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.3 uyarınca değerlendirilerek, hesaplanan değerlerin küçüğü olarak alınacaktır.

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı mesnet noktaları ve açıklık ortasında yanal olarak desteklendiğinden, L_b = 2500mm olarak belirlenir.

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(65)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 2715 \text{ mm} \geq L_b = 2500 \text{ mm} \qquad (9.6a)$$

olduğundan, *Yönetmelik* 9.2.2(a) uyarınca, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur. Bu durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımı akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 355(919.8)10^{-3} = 326.53 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

Yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

I-enkesitli elemanın başlık elemanı *kompakt olmayan*, gövde elemanı da *kompakt* sınıfında olduğundan, yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.3.2(a) uyarınca belirlenir.

$$M_n = M_p - (M_p - 0.7F_y W_{ex})\left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}}\right) \qquad (9.9)$$

$$M_n = 326.53 - \left(326.53 - 0.7(355)836.4(10)^{-3}\right)\times ...$$

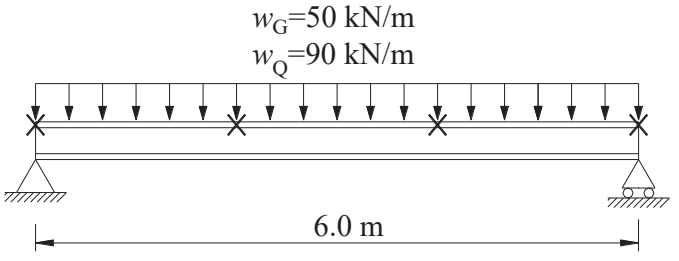
$$... \times \left(\frac{10.4 - 9.02}{23.73 - 9.02}\right) = 315.39 \text{ kNm} \leq M_p = 326.53 \text{ kNm} \checkmark$$

Yönetmelik 9.3 uyarınca, en küçük eğilme momenti dayanımı, M_n, yerel burkulma sınır durumunda elde edildiğinden, dayanım hesabında bu sınır durum belirleyicidir.

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(30) + 1.6(70) = 148$ kN $M_u = \frac{P_u L}{4} = \frac{148(5)}{4} = 185$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 30 + 70 = 100$ kN $M_a = \frac{P_a L}{4} = \frac{100(5)}{4} = 125$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(315.39) = 284$ kNm	$M_g = M_n / \Omega_b = 315.39 / 1.67 = 189$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{185}{284} = 0.65 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{125}{189} = 0.66 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.5

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen yapma enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 50 kN/m ve w_Q = 90 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Basınç etkisindeki kiriş başlığı mesnetlerde ve açıklıklığın 1/3 noktalarında yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

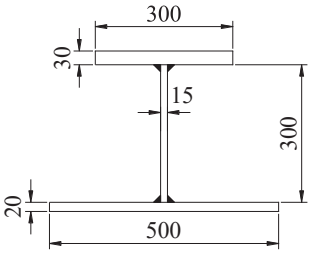
b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit



Kaynaklı yapma enkesit			
W_{exc} = 2893 cm^3	W_{ext} = 3244 cm^3	W_{px} = 3406 cm^3	I_y = 27592 cm^4
d = 350 mm	h_p = 367 mm	h_c = 310 mm	i_y = 108.35 mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 9.13.2 uyarınca,

$$I_{yc} = \frac{(30)(300)^3}{12} = 67500000 \text{ mm}^4$$

$$0.1 \le \frac{I_{yc}}{I_y} \le 0.9 \qquad (9.82)$$

$$0.1 \le \frac{6750}{27592} = 0.245 \le 0.9 \checkmark$$

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 11)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(30)} = 5.0 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 16)

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} \le \lambda_p = \frac{\frac{h_c}{h_p}\sqrt{\frac{E}{F_y}}}{\left(0.54\frac{M_p}{M_y} - 0.09\right)^2} \le \lambda_r$$

$$\lambda = \frac{310}{15} = 20.67 \le \lambda_p = \frac{\frac{310}{367}\sqrt{\frac{200000}{355}}}{\left(0.54\frac{1209}{1027} - 0.09\right)^2} = 67.34 \le \lambda_r = 5.70\sqrt{\frac{200000}{355}} = 135.29 \checkmark$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit parçaları *kompakt* enkesit parçası olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, tek simetri eksenli yapma I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.4 uyarınca belirlenecektir.

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı mesnet noktaları ve açıklığın 1/3 noktalarında yanal olarak desteklendiğinden, L_b = 2000mm olarak belirlenir.

$$i_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}}\right)}} = \frac{300}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{(310\times 15)}{(300\times 30)}\right)}} = 83.10 \text{ mm} \qquad (9.20)$$

$$L_p = 1.1 i_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.1(83.10)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 2169.67 \text{ mm} \ge L_b = 2000 \text{ mm} \qquad (9.18)$$

olduğundan, *Yönetmelik* 9.4.1(a) uyarınca, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Basınç başlığı yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı

Başlık parçaları *kompakt* olarak sınıflandırıldığından, *Yönetmelik* 9.4.2(a) uyarınca, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Basınç başlığı akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$\frac{I_{yc}}{I_y} = \frac{6750}{27592} = 0.245 > 0.23$$

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} = \frac{310}{15} = 20.67 \le \lambda_{pw} = \frac{\frac{310}{367}\sqrt{\frac{200000}{355}}}{\left(0.54\frac{1209}{1027} - 0.09\right)^2} = 67.34$$

olduğundan, *gövde plastikleşme katsayısı*, R_{pc}, gövde narinliğine bağlı olarak Denk(9.16a) ile belirlenir.

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} = \frac{F_y W_{px}}{F_y W_{exc}} = \frac{(355)3406}{(355)2893} = 1.177 \qquad (9.16a)$$

Yönetmelik 9.4.1 uyarınca,

$$M_p = F_y W_{px} \le 1.6 F_y W_{exc}$$

$$M_p = 355(3406)10^{-3} = 1209\text{kNm} \le 1.6(355)2893(10)^{-3} = 1643\text{ kNm} \checkmark \qquad (9.17)$$

olduğundan, Denk.(9.17) ile verilen koşul sağlanmaktadır. *Yönetmelik* 9.4.3 uyarınca, basınç başlığı akma sınır durumu için karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = R_{pc} M_{yc} = R_{pc} F_y W_{exc} = 1.177(355)2893(10)^{-3} = 1209\text{ kNm} \qquad (9.23)$$

Çekme başlığı akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Yönetmelik 9.4.4(a) uyarınca,

$$W_{ext} = 3244(10)^3\text{ mm}^3 \ge W_{exc} = 2893(10)^3\text{ mm}^3$$

olduğundan bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Bu durumda, *Yönetmelik* 9.4 uyarınca, basınç başlığı akma sınır durumu için

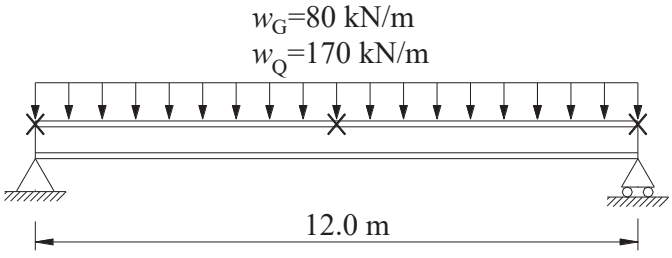
$$M_n = 1209\text{ kNm} \le M_p = 1209\text{kNm}$$

olduğundan karakteristik eğilme momenti dayanımını bu sınır durum belirler.

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(50) + 1.6(90) = 204$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{204(6)^2}{8} = 918$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 50 + 90 = 140$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{140(6)^2}{8} = 630$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(1209) = 1088.10$ kNm	$M_g = M_n / \Omega_b$ $M_g = 1209 / 1.67 = 723.95$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{918}{1088.10} = 0.84 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{630}{723.95} = 0.87 \le 1.0 \checkmark$

Örnek 9.6

Aşağıdaki şekilde taşıyıcı sistem şeması ve yükleme durumu verilen yapma enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 80 kN/m ve w_Q = 170 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Basınç etkisindeki kiriş başlığı mesnetlerde ve açıklık ortasında yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

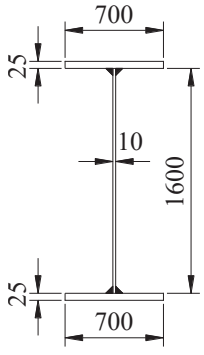
b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit



Kaynaklı yapma enkesit			
d = 1650 mm	h = 1600 mm	t_w = 10 mm	b_{fc} = 700 mm
t_{fc} = 25 mm	b_{ft} = 700 mm	t_{ft} = 25 mm	
W_{exc} = 32146 cm^3	W_{ext} = 32146 cm^3	W_{px} = 34837 cm^3	

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{1600}{10} = 160 > \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89.25$$

$$\lambda = \frac{1600}{10} = 160 > \lambda_r = 5.70\sqrt{\frac{200000}{355}} = 135.29$$

Enkesitin gövde parçasının genişlik/kalınlık oranı Tablo 5.1B de verilen λ_r sınır değerini aştığından, gövde parçası *narin* olarak değerlendirilir.

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 11)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{700}{2(25)} = 14 > \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Tablo 5.1B (a) ve (b) ile, $k_c = 4/\sqrt{h/t_w} = 4/\sqrt{1600/10} = 0.316 < 0.35$ ve gövde parçası narin olduğundan $k_c = 0.35$ ve $F_L = 0.7F_y$ alınarak,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{700}{2(25)} = 14 \le \lambda_r = 0.95\sqrt{\frac{k_c E}{F_L}} = 0.95\sqrt{\frac{0.35(200000)}{0.7(355)}} = 15.94$$

Enkesitin başlık parçasının genişlik/kalınlık oranı Tablo 5.1B de verilen λ_p ve λ_r sınır değeri arasında kaldığından başlık parçası *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırılır.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın başlık elemanı *kompakt olmayan*, gövde elemanı ise *narin* sınıfında olduğundan, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.5 uyarınca değerlendirilerek, hesaplanan değerlerin küçüğü olarak alınacaktır.

Enkesitin gövde parçası narin olarak sınıflandırıldığından ve kiriş gövdesinde rijitlik levhalarının kullanılmadığı varsayımıyla *Yönetmelik* 9.13.2 uyarınca,

$(h / t_w) = 160 \le 260$ ✓

$$A_g = ht_w = (1600)(10) = 16000 \text{ mm}^2 \le 10 b_{fc} t_{fc} = 10(700)(25) = 175000 \text{ mm}^2$$ ✓

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı mesnet noktaları ve açıklık orta noktasında yanal olarak desteklendiğinden, L_b = 6000 mm olarak belirlenir.

Yönetmelik 9.5.1 uyarınca,

$$i_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}}\right)}} = \frac{700}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{(1600\times 10)}{(700\times 25)}\right)}} = 188 \text{ mm} \qquad (9.20)$$

$$L_b = 6000 \text{ mm} > L_p = 1.1 i_t \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.1(188)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 4908.53 \text{ mm} \qquad (9.30a)$$

$$L_b = 6000 \text{ mm} \le L_r = \pi i_t \sqrt{\frac{E}{0.7F_y}} = \pi(188)\sqrt{\frac{200000}{0.7(355)}} = 16755.58 \text{ mm} \qquad (9.30b)$$

$$L_p = 4908.53 \text{ mm} < L_b = 6000 \text{ mm} \le L_r = 16755.58 \text{ mm}$$

olduğundan, yanal burulmalı burkulma sınır durumu *Yönetmelik* 9.5.1(b) uyarınca gözönüne alınır.

Moment düzeltme katsayısı, C_b

Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki kiriş uzunluğu boyunca en büyük eğilme momenti M_{maks}=1.0 olarak alındığında, M_A=0.438, M_B=0.751 M_C=0.938 olarak elde edilir. *Yönetmelik* 9.1(c) uyarınca,

$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \tag{9.1}$$

$$C_b = \frac{12.5(1.00)}{2.5(1.00) + 3(0.438) + 4(0.751) + 3(0.938)} = 1.30$$

$$F_{cr} = C_b\left[F_y - (0.3F_y)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \le F_y \tag{9.28}$$

$$F_{cr} = 1.30\left[355 - 0.3(355)\left(\frac{6000 - 4909}{16756 - 4909}\right)\right] = 448\ \text{N/mm}^2 \le 355\ \text{N/mm}^2\ \times$$

olduğundan $F_{cr} = 355\ \text{N/mm}^2$ olarak alınır.

Eğilme dayanımı azaltma katsayısı, R_{pg}

$$a_w = \frac{h_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} = \frac{1600(10)}{700(25)} = 0.91 \le 10\ \checkmark \tag{9.32}$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300a_w}\left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7\sqrt{\frac{E}{F_y}}\right) \le 1.0\ \checkmark \tag{9.31}$$

$$R_{pg} = 1 - \frac{0.91}{1200 + 300(0.91)}\left(\frac{1600}{10} - 5.7\sqrt{\frac{200000}{355}}\right) = 0.985 \le 1.0\ \checkmark$$

Basınç başlığının yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_p = R_{pg}F_{cr}W_{exc} = 0.985(355)32146(10)^{-3} = 11241\text{kNm} \tag{9.27}$$

Basınç başlığı yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı

Başlık parçası *kompakt olmayan* olarak sınıflandırıldığından, *Yönetmelik* 9.5.2(b) uyarınca,

$$F_{cr} = \left[F_y - (0.3F_y)\left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}}\right)\right] \tag{9.34}$$

$$F_{cr} = \left[355 - 0.3(355)\left(\frac{14 - 9.02}{15.94 - 9.02}\right)\right] = 268.34\ \text{N/mm}^2$$

Basınç başlığının yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = R_{pg}F_{cr}W_{exc} = 0.985(268.34)32146(10)^{-3} = 8497\text{kNm} \tag{9.33}$$

Basınç başlığı akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = R_{pg} F_y W_{exc} = 0.985(355)32146(10)^{-3} = 11241\text{kNm} \quad (9.37)$$

Çekme başlığı akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

Yönetmelik 9.5.4(a) uyarınca,

$$W_{ext} \geq W_{exc}$$

olduğundan bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Bu durumda, *Yönetmelik* 9.5 uyarınca, en küçük karakteristik eğilme momenti dayanımını basınç başlığı yerel burkulma sınır durumu belirlediğinden,

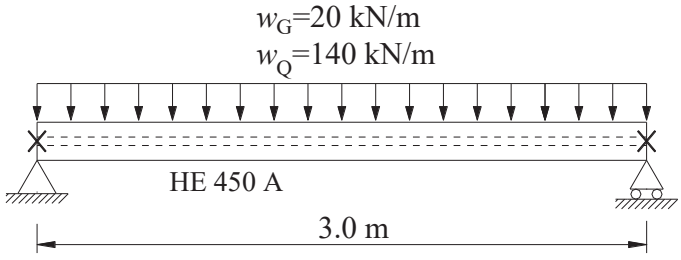
$$M_n = 8497 \text{ kNm}$$

olarak alınır.

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(80) + 1.6(170) = 368$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{368(12)^2}{8} = 6624$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 80 + 170 = 250$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{250(12)^2}{8} = 4500$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(8497) = 7647$ kNm	$M_g = M_n / \Omega_b = 8497/1.67 = 5088$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{6624}{7647} = 0.87 \leq 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{4500}{5088} = 0.88 \leq 1.0$ ✓

Örnek 9.7

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 450 A enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında zayıf eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 140 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş enkesiti mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 A			
$W_{ey} = 631$ cm^3	$W_{py} = 965.5$ cm^3	$b_f = 300$ mm	$t_f = 21$mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 13)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(21)} = 7.14 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, başlık parçaları *kompakt* olarak sınıflandırılır.

Zayıf asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.6 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = W_{py}F_y \le 1.6W_{ey}F_y \qquad (9.39)$$

$$M_n = 965.5(355)10^{-3} = 342.75 \text{ kNm} \le 1.6(631)355(10)^{-3} = 358.41 \text{ kNm} \checkmark$$

Yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Enkesitin başlık parçaları *kompakt* olarak sınıflandırıldığından, *Yönetmelik* 9.6.2(a) uyarınca, bu sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

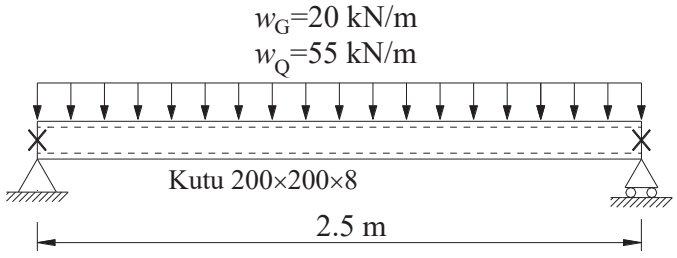
Bu durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımı akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$M_n = M_p = 342.75 \text{ kNm}$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(140) = 248 \text{ kN/m}$ $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{248(3)^2}{8} = 279 \text{ kNm}$	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 140 = 160 \text{ kN/m}$ $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{160(3)^2}{8} = 180 \text{ kNm}$
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(342.75) = 308.48 \text{ kNm}$	$M_g = M_n / \Omega_b$ $M_g = 342.75 / 1.67 = 205.24 \text{ kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{279}{308.48} = 0.90 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{180}{205.24} = 0.88 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.8

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen Kutu 200×200×8 enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 55 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş enkesiti mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Kutu 200×200×8	
W_e = 341 cm^3	W_p = 400 cm^3

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 17)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{200 - 3(0.93\times 8.0)}{(0.93\times 8.0)} = 23.88 \le \lambda_p = 1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.12\sqrt{\frac{200000}{275}} = 30.20$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 19)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{200 - 3(0.93\times 8.0)}{(0.93\times 8.0)} = 23.88 \le \lambda_p = 2.42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2.42\sqrt{\frac{200000}{275}} = 65.26$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları *Yönetmelik* Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit parçaları *kompakt* olarak değerlendirilir.

Eğilme etkisindeki, kutu enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.7 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_p = 275(400)10^{-3} = 110.0 \text{ kNm} \qquad (9.43)$$

Kutu 200×200×8 enkesitli eğilme elemanının enkesit parçaları *kompakt* olarak sınıflandırıldığından, elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesinde, *Yönetmelik* 9.7.2(a) ve 9.7.3(a) uyarınca başlık ve gövde yerel burkulma sınır durumlarının gözönüne alınmasına gerek yoktur.

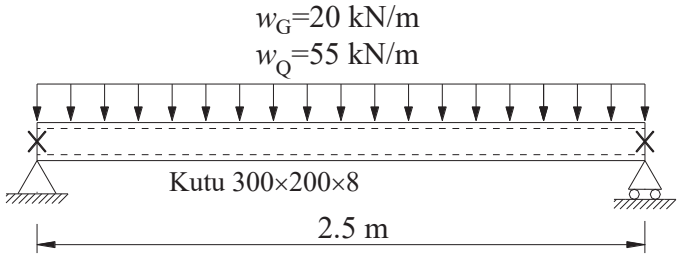
Bu durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımı akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$$M_n = M_p = 110.0 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(55) = 112$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{112(2.5)^2}{8} = 87.5$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 55 = 75$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{75(2.5)^2}{8} = 58.60$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(110.0) = 99.0$kNm	$M_g = M_n / \Omega_b$ $M_g = 110.0 / 1.67 = 65.87$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{87.50}{99.0} = 0.88 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{58.60}{65.87} = 0.89 < 1.0$ ✓

Örnek 9.9

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen Kutu 300×200×8 enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında zayıf eksenine dik doğrultuda olmak üzere sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 55 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş enkesiti mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Kutu 300×200×8	
W_{ey} = 478.8 cm^3	W_{py} = 543.2 cm^3

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 17)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{300 - 3(0.93\times 8.0)}{(0.93\times 8.0)} = 37.32 > \lambda_p = 1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.12\sqrt{\frac{200000}{235}} = 32.67$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{300 - 3(0.93\times 8.0)}{(0.93\times 8.0)} = 37.32 \le \lambda_r = 1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.40\sqrt{\frac{200000}{235}} = 40.84$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 19)

$$\lambda = \frac{h}{t} = \frac{200 - 3(0.93\times 8.0)}{(0.93\times 8.0)} = 23.88 \le \lambda_p = 2.42\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2.42\sqrt{\frac{200000}{235}} = 70.60$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p ve λ_r sınır değerleri arasında kaldığından, başlık parçaları *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırılır.

Enkesitin gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, gövde parçaları *kompakt* enkesit parçası olarak değerlendirilir.

Eğilme etkisindeki kutu enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.7 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{py} = 235(543.2)10^{-3} = 127.65 \text{ kNm} \tag{9.43}$$

Başlık yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Enkesitin başlığı *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırıldığından, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, bu sınır durum için *Yönetmelik* 9.7.2(b) uyarınca belirlenecektir.

$$M_n = M_p - \left(M_p - F_y W_{ey}\right)\left(3.57\frac{b}{t_f}\sqrt{\frac{F_y}{E}} - 4.0\right) \le M_p \tag{9.44}$$

$$M_n = 127.65 - \left(127.65 - (235)478.8(10)^{-3}\right)\left(3.57(37.32)\sqrt{\frac{235}{200000}} - 4.0\right)$$

$$M_n = 119.07 \text{ kNm} \le M_p = 127.65 \text{ kNm} \checkmark$$

Gövde yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kutu enkesitli eğilme elemanının gövde parçaları *kompakt* olarak sınıflandırıldığından, elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesinde, *Yönetmelik* 9.7.3(a) uyarınca gövde yerel burkulma sınır durumlarının gözönüne alınmasına gerek yoktur.

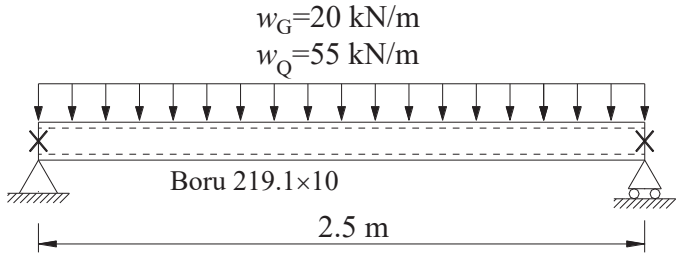
Bu durumda, *Yönetmelik* 9.7 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımı başlık yerel burkulma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$$M_n = 119.07 \text{ kNm} \le M_p = 127.65 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(55) = 112$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{112(2.5)^2}{8} = 87.5$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 55 = 75$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{75(2.5)^2}{8} = 58.60$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(119.07) = 107.16$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 119.07/1.67 = 71.30$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{87.50}{107.16} = 0.82 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{58.60}{71.30} = 0.82 < 1.0 \checkmark$

Örnek 9.10

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen Boru 219.1×10 enkesitli basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 55 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş enkesiti mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

TS EN10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(10.0) = 9.3$ mm için

Boru 219.1×10
W_p = 410 cm^3

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 9.8 uyarınca,

Boru enkesitin çap/ kalınlık oranı kontrolü

$$\frac{D}{t} = \frac{219.1}{(0.93\times 10)} = 25.56 \le 0.45\frac{E}{F_y} = 0.45\frac{200000}{275} = 327.27 \checkmark$$

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

(Tablo 5.1B, Durum 20)

$$\lambda = \frac{D}{t} = \frac{219.1}{(0.93\times 10)} = 25.56 \le \lambda_p = 0.07\frac{E}{F_y} = 0.07\frac{200000}{275} = 50.91$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin çap/kalınlık oranı Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak değerlendirilir.

Eğilme etkisindeki, boru enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.8 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_p = 275(410)10^{-3} = 112.75\text{kNm} \qquad (9.43)$$

Enkesit *kompakt* olarak sınıflandırıldığından, elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesinde, *Yönetmelik* 9.8.2(a) uyarınca yerel burkulma sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

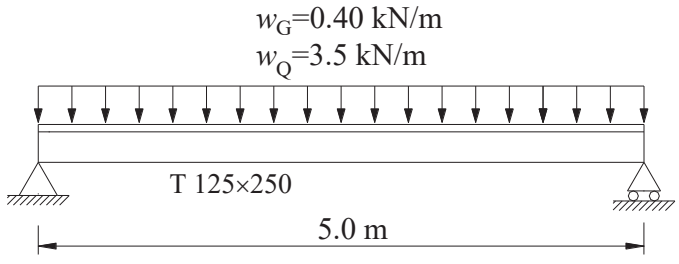
Bu durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımı akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$$M_n = M_p = 112.75\ \text{kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(55) = 112\ \text{kN/m}$ $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{112(2.5)^2}{8} = 87.5\ \text{kNm}$	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 55 = 75\ \text{kN/m}$ $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{75(2.5)^2}{8} = 58.60\ \text{kNm}$
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(112.75) = 101.47\ \text{kNm}$	$M_g = M_n / \Omega_b$ $M_g = 112.75 / 1.67 = 67.51\ \text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{87.50}{101.47} = 0.86 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{58.60}{67.51} = 0.87 < 1.0$ ✓

Örnek 9.11

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen T 125×250 enkesitli basit kiriş, simetri düzlemi içinde ve gövde parçasının serbest ucu çekme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 0.40 kN/m ve w_Q = 3.5 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş başlığı açıklıkta yanal burulmalı burkulmaya karşı sürekli olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

T 125×250				
W_{ex} = 39.6 cm^3	W_{px} = 74.3 cm^3	I_y = 1824 cm^4	J = 27.9 cm^4	i_y = 63.2 mm
d = 125 mm	b_f = 250 mm	t_f = 14 mm	t_w = 9 mm	

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{250}{2(14)} = 8.929 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık parçasının genişlik/kalınlık oranı Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, başlık parçası *kompakt* olarak değerlendirilir.

Simetri düzlemi içindeki yükleme durumu ile x-ekseni etrafında eğilme etkisindeki, tek simetri eksenli T 125×250 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.9 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Akma sınır durumu için karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.9.1 uyarınca,

$$M_n = M_p \tag{9.52}$$

T-enkesitin gövdesi çekme etkisinde olduğundan *Yönetmelik* 9.9.1(a) uyarınca,

$$M_p = F_y W_{px} \le 1.6 M_y = 1.6\left(F_y W_{ex}\right) \tag{9.53a}$$

$$M_p = F_y W_{px} = 355(74.3)10^{-3} = 26.38 \text{ kNm}$$

$$1.6M_y = 1.6\left(F_y W_{ex}\right) = 1.6(355)(39.6)(10)^{-3} = 22.49 \text{ kNm}$$

$$M_p = 26.38 \text{ kNm} > 1.6M_y = 22.49 \text{ kNm}$$

olduğundan, bu sınır durum için karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = 22.49 \text{ kNm}$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı açıklıkta yanal burulmalı burkulmaya karşı sürekli olarak desteklendiğinden, diğer bir deyişle,

$L_b \le L_p$ olduğundan, *Yönetmelik* 9.9.2(a) uyarınca**,** bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Başlığın yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlık parçası *kompakt* olarak sınıflandırıldığından, *Yönetmelik* 9.9.3(a) uyarınca, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Gövdenin yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş gövde parçası çekme etkisinde olduğundan, *Yönetmelik* 9.9.4(a) uyarınca**,** bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

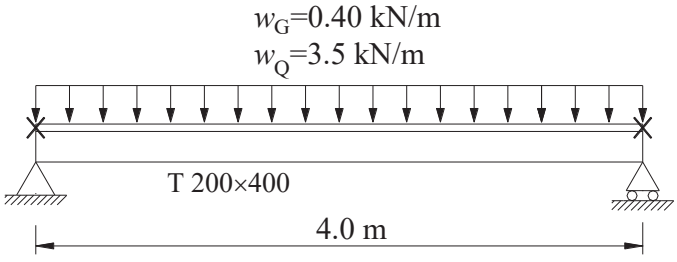
Bu durumda, *Yönetmelik* 9.9 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımı, akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$$M_n = 22.49 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.40) + 1.6(3.5) = 6.08$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{6.08(5)^2}{8} = 19$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 0.40 + 3.50 = 3.90$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{3.90(5)^2}{8} = 12.19$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(22.49) = 20.24$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 22.49/1.67 = 13.47$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{19}{20.24} = 0.94 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{12.19}{13.47} = 0.91 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.12

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen T 200×400 enkesitli basit kiriş, simetri düzlemi içinde ve gövde parçasının serbest ucu çekme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 0.40 kN/m ve w_Q = 3.5 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş başlığı mesnetlerde yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

T 200×400				
W_{ext} = 148 cm^3	W_{exc} = 772 cm^3	W_{px} = 276 cm^3	I_y = 11210 cm^4	J = 151 cm^4
i_y = 101 mm	d = 200 mm	b_f = 400 mm	t_f = 21 mm	t_w = 13 mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{400}{2(21)} = 9.52 > \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{400}{2(21)} = 9.52 < \lambda_r = 1.00\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.00\sqrt{\frac{200000}{355}} = 23.73$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık parçasının genişlik/kalınlık oranı *Yönetmelik* Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değeri ile λ_r sınır değeri arasında kaldığından, başlık parçası *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırılır.

Simetri düzlemi içindeki yükleme durumu ile x-ekseni etrafında eğilme etkisindeki, tek simetri eksenli T 200×400 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.9 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p \tag{9.52}$$

T-enkesitin gövdesi çekme etkisinde olduğundan *Yönetmelik* 9.9.1(a) uyarınca,

$$M_p = F_y W_{px} \le 1.6 M_y = 1.6\left(F_y W_{ex}\right) \tag{9.53a}$$

$$M_p = F_y W_{px} = 355(276)10^{-3} = 97.98 \text{ kNm}$$

$$1.6M_y = 1.6\left(F_y W_{ex}\right) = 1.6(355)(148)10^{-3} = 84.06 \text{ kNm}$$

$$M_p = 97.98 \text{ kNm} \le 1.6M_y = 84.06 \text{ kNm} \times$$

olduğundan, bu sınır durum için karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = 84.06 \text{ kNm}$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı mesnet noktalarından yanal olarak desteklendiğinden, L_b=4000 mm dir.

$$L_b = 4000 \text{ mm} < L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(101)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 4219 \text{ mm}$$

(9.56a)

olduğundan, *Yönetmelik* 9.9.2(a) uyarınca**,** bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Başlığın yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

T-enkesitin başlığı *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırıldığından, yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.9.3(a)(2) uyarınca,

$$M_n = M_p - \left(M_p - 0.7F_y W_{exc}\right)\left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}}\right) \le 1.6M_y \tag{9.61}$$

$$M_n = 97.98 - \left(97.98 - 0.7(355)772(10)^{-3}\right)\times ...$$

$$... \times \left(\frac{9.52 - 9.02}{23.73 - 9.02}\right) = 94.79 \text{ kNm} \le 1.6M_y = 84.06 \text{ kNm} \times$$

olduğundan, bu sınır durum için karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = 84.06 \text{ kNm}$$

Gövdenin yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

T-enkesitin gövde parçası çekme etkisinde olduğundan, *Yönetmelik* 9.9.4(a) uyarınca, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

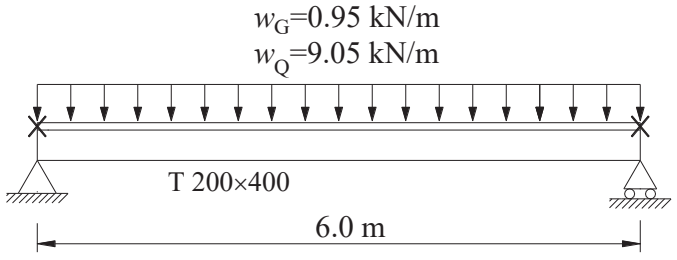
Bu durumda, *Yönetmelik* 9.9 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını akma sınır durumu belirler.

$$M_n = 84.06 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.95) + 1.6(20) = 33.14$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{33.14(4)^2}{8} = 66.28$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 0.95 + 20 = 20.95$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{20.95(4)^2}{8} = 41.90$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(84.06) = 75.65$ kNm	$M_g = M_n / \Omega_b = 84.06 / 1.67 = 50.34$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{66.28}{75.65} = 0.88 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{41.90}{50.34} = 0.83 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.13

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen T 200×400 enkesitli basit kiriş, simetri düzlemi içinde ve gövde parçasının serbest ucu çekme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 0.95 kN/m ve w_Q = 9.05 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş başlığı mesnetlerde yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

T 200×400			
W_{ext} = 148 cm^3	W_{exc} = 772 cm^3	W_{px} = 276 cm^3	I_y = 11210 cm^4
J = 151 cm^4	d = 200 mm	b_f = 400 mm	t_f = 21 mm
t_w = 13 mm	i_y = 101 mm	y_g = 32.1 mm	

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{400}{2(21)} = 9.52 > \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{400}{2(21)} = 9.52 < \lambda_r = 1.00\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.00\sqrt{\frac{200000}{355}} = 23.73$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık parçasının genişlik/kalınlık oranı *Yönetmelik* Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değeri ile λ_r sınır değeri arasında kaldığından, başlık parçası *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırılır.

Simetri düzlemi içindeki yükleme durumu ile x-ekseni etrafında eğilme etkisindeki, tek simetri eksenli T 200×400 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.9 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

T-enkesitin gövdesi çekme etkisinde olduğundan *Yönetmelik* 9.9.1(a) uyarınca,

$$M_p = F_y W_{px} \le 1.6 M_y = 1.6\left(F_y W_{ex}\right) \tag{9.53a}$$

$$M_p = F_y W_{px} = 355(276)10^{-3} = 97.98 \text{ kNm}$$

$$M_y = F_y W_{ex} = 355(148)10^{-3} = 52.54 \text{ kNm}$$

$$M_p = 97.98 \text{ kNm} \le 1.6 M_y = 1.6(52.54) = 84.06 \text{ kNm} \times$$

olduğundan, bu sınır durum için karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = 84.06 \text{ kNm} \tag{9.52}$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığı mesnet noktalarından yanal olarak desteklendiğinden, L_b=6000 mm dir.

$$L_b = 6000 \text{ mm} \ge L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(101)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 4219 \text{ mm} \tag{9.56a}$$

Yönetmelik Denk. (9.56b) ile,

$$L_r = 1.95\left(\frac{E}{F_y}\right)\frac{\sqrt{I_y J}}{W_{exc}}\sqrt{1 + 2.36\left(\frac{F_y}{E}\right)\frac{dW_{exc}}{J}} \tag{9.56b}$$

$$L_r = 1.95\left(\frac{200000}{355}\right)\frac{\sqrt{11210(10)^4\, 151(10)^4}}{772(10)^3} \times \ldots$$

$$\ldots \times \sqrt{1 + 2.36\left(\frac{355}{200000}\right)\frac{200(772)10^3}{151(10)^4}} = 22123 \text{ mm}$$

$L_p < L_b \le L_r$ olduğundan, *Yönetmelik* 9.9.2(a) (2) ile,

$$M_y = \min\left[W_{exc} 0.7 F_y ; W_{ext}\right]$$

$$M_y = \min\left[(772)0.7(355)10^{-3} ; (148)(355)10^{-3}\right]$$

$$M_y = \min\left[191.84 \text{ kNm}; 52.54 \text{ kNm}\right] = 52.54 \text{ kNm}$$

$$M_n = \left[M_p - \left(M_p - M_y\right)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \tag{9.54}$$

$$M_n = \left[97.98 - (97.98 - 52.54)\left(\frac{6000 - 4219}{22123 - 4219}\right)\right] = 93.42 \text{ kNm}$$

Başlığın yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

T-enkesitin başlığı *kompakt olmayan* enkesit parçası olarak sınıflandırıldığından, yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.9.3(a)(2) uyarınca,

$$M_n = M_p - \left(M_p - 0.7F_y W_{exc}\right)\left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}}\right) \le 1.6M_y \qquad (9.61)$$

$$M_n = 97.98 - \left(97.98 - 0.7(355)772(10)^{-3}\right)...$$

$$...\times\left(\frac{9.52 - 9.02}{23.73 - 9.02}\right) = 94.79 \text{ kNm} \le 1.6M_y = 84.06 \text{ kNm} \times$$

olduğundan, bu sınır durum için karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$M_n = 84.06$ kNm

Gövdenin yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

T-enkesitin gövde parçası çekme etkisinde olduğundan, *Yönetmelik* 9.9.4(a) uyarınca, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

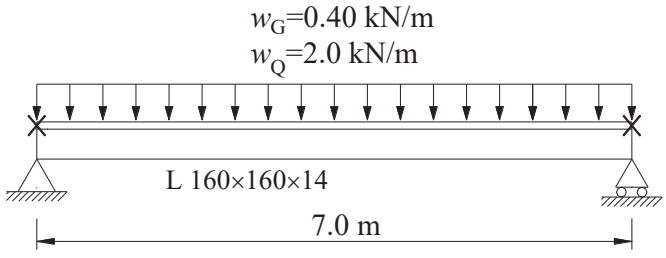
Bu durumda, *Yönetmelik* 9.9 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$M_n = 84.06$ kNm

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.95) + 1.6(9.05) = 15.62$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{15.62(6)^2}{8} = 70.29$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 0.95 + 9.05 = 10$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{10(6)^2}{8} = 45$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(84.06) = 75.65$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 84.06/1.67 = 50.34$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{70.29}{75.65} = 0.93 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{45}{50.34} = 0.89 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.14

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen L 160×160×14 enkesitli basit kiriş, x-ekseni etrafında eğilme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 0.40 kN/m ve w_Q = 2 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş mesnetlerde yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir. Korniyerin yükleme doğrultusuna paralel olan kolunun uç bölümü çekme etkisindedir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 160×160×14		
$W_{ex} = 89.50$ cm^3	$W_{ew} = 145.1$ cm^3	$W_{ez} = 67.65$ cm^3

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

L 160×160×14 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.10 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Eşit kollu korniyer x-ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğundan *Yönetmelik* 9.10.2(2) uyarınca,

$$M_y = 0.80 F_y W_{ex} = 0.80(275)(89.50)10^{-3} = 19.69 \text{ kNm}$$

$$M_n = 1.5 M_y = 1.5(19.69) = 29.54 \text{ kNm} \qquad (9.65)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Eşit kollu tek korniyer x-geometrik ekseninde eğilme etkisinde olduğundan elastik yanal burulmalı burkulma momenti, M_{cr}, *Yönetmelik* 9.10.2(2) uyarınca belirlenir. Tek korniyer açıklıkta yanal olarak desteklenmediğinden ve korniyerin eğilme düzlemine paralel doğrultudaki kolunun uç bölümü çekme etkisinde olduğundan *Yönetmelik* 9.10.2(2)(i) uygulanarak,

$$M_{cr} = \frac{0.58Eb^4tC_b}{L_b^2}\left(\sqrt{1+0.88\left(\frac{L_bt}{b^2}\right)^2}+1\right) \qquad (9.69b)$$

$$M_{cr} = \frac{0.58(200000)160^4(14)1.14}{7000^2}\left(\sqrt{1+0.88\left(\frac{7000(14)}{160^2}\right)^2}+1\right)10^{-6} = 117.06\ \text{kNm}$$

Bu durumda, akma momenti, M_y, ilgili geometrik eksene göre belirlenen akma momentinin 0.80 katı olarak alınarak,

$$\frac{M_y}{M_{cr}} = \frac{19.69}{117.06} = 0.168 \le 1.0$$

olduğundan, *Yönetmelik* 9.10.2(a) ile, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}\right]M_y \le 1.5M_y \qquad (9.66)$$

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{0.168}\right](19.69) = 28.36\ \text{kNm} \le 1.5(19.69) = 29.53\ \text{kNm}\ \checkmark$$

$$M_n = 28.36\ \text{kNm}$$

Korniyer kolunun yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

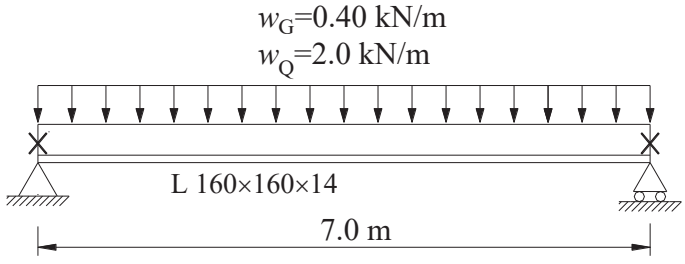
Korniyerin eğilme düzlemine paralel doğrultudaki kolunun uç bölümü çekme etkisinde olduğundan, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur. Bu durumda, *Yönetmelik* 9.10 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını yanal burulmalı burkulma sınır durumu belirler.

M_n =28.36 kNm

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.40) + 1.6(2.0) = 3.68$ kN/m $M_u = \frac{w_uL^2}{8} = \frac{3.68(7)^2}{8} = 22.54$kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 0.40 + 2.0 = 2.40$ kN/m $M_a = \frac{w_aL^2}{8} = \frac{1.40(7)^2}{8} = 14.70$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_bM_n = 0.90(28.36) = 25.52$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 28.36/1.67 = 16.98$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{22.54}{25.52} = 0.88 \le 1.0\ \checkmark$	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{14.70}{16.98} = 0.87 \le 1.0\ \checkmark$

Örnek 9.15

Aşağıdaki şekilde yükleme durumu verilen L 160×160×14 enkesitli basit kiriş, x-ekseni etrafında eğilme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 0.40 kN/m ve w_Q = 2 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş mesnetlerde yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir. Korniyerin yükleme doğrultusuna paralel olan kolunun uç bölümü basınç etkisindedir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 160×160×14
$W_{ex} = 89.50$ cm^3

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 9.10 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Eşit kollu korniyer x-ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğundan, *Yönetmelik* 9.10.2(2) uyarınca,

$$M_y = 0.80 F_y W_{ex} = 0.80(275)(89.50)10^{-3} = 19.69 \text{ kNm}$$

Karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = 1.5 M_y = 1.5(19.69) = 29.54 \text{ kNm} \qquad (9.65)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Tek korniyer açıklıkta yanal olarak desteklenmediğinden ve korniyerin eğilme düzlemine paralel olan kolunun uç bölümü basınç etkisinde olduğundan *Yönetmelik* 9.10.2(2)(i) uygulanarak,

$$M_{cr} = \frac{0.58 E b^4 t C_b}{L_b^2}\left(\sqrt{1 + 0.88\left(\frac{L_b t}{b^2}\right)^2} - 1\right) \qquad (9.69a)$$

$$M_{cr} = \frac{0.58(200000)160^4(14)1.14}{7000^2}\left(\sqrt{1+0.88\left(\frac{7000(14)}{160^2}\right)^2}-1\right)10^{-6} = 92.31\,\text{kNm}$$

$$\frac{M_y}{M_{cr}} = \frac{19.69}{92.31} = 0.213 \le 1.0$$

olduğundan,*Yönetmelik* 9.10.2(a) ile, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}\right]M_y \le 1.5M_y \qquad (9.66)$$

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{0.213}\right](19.69) = 27.16\text{kNm} \le 1.5(19.69) = 29.54\,\text{kNm}\ \checkmark$$

$$M_n = 27.16\,\text{kNm}$$

Korniyer kolunun yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Korniyer kolunun korniyerin eğilme düzlemine paralel olan kolunun uç bölümü basınç etkisinde olduğundan, *Yönetmelik* 5.4 uyarınca,

Korniyer kolu (Tablo 5.1B, Durum 12)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{160}{14} = 11.43 \le \lambda_p = 0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.54\sqrt{\frac{200000}{275}} = 14.56$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre korniyer kolunun genişlik/kalınlık oranı Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak sınıflandırılır. Bu durumda, Yönetmelik 9.10.3(a) uyarınca, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

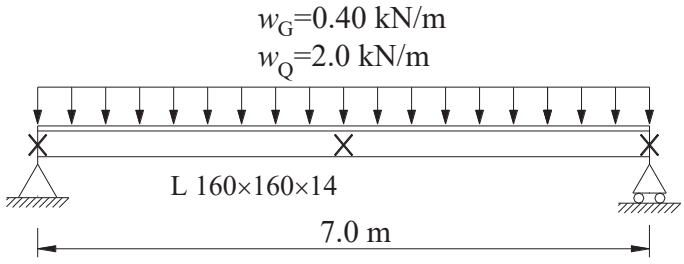
Yönetmelik 9.10 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını yanal burulmalı burkulma sınır durumu belirler.

M_n =27.16 kNm

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.40) + 1.6(2.0) = 3.68$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{3.68(7)^2}{8} = 22.54$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 0.40 + 2.0 = 2.40$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{1.40(7)^2}{8} = 14.70$ kNm
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(27.16) = 24.45$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 27.16/1.67 = 16.26$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{22.54}{24.45} = 0.92 \le 1.0\ \checkmark$	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{14.70}{16.26} = 0.90 \le 1.0\ \checkmark$

Örnek 9.16

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen L 160×160×14 enkesitli basit kiriş, x-ekseni etrafında eğilme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 0.40 kN/m ve w_Q = 2 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş mesnetlerde ve açıklık ortasında yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir. Korniyerin yükleme doğrultusuna paralel olan kolunun uç bölümü çekme etkisindedir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 160×160×14
$W_{ex} = 89.50$ cm^3

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Eğilme etkisindeki, L 160×160×14 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.10 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Eşit kollu korniyer x-ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğundan, *Yönetmelik* 9.10.2(2)(ii) uyarınca,

$$M_y = F_y W_{ex} = 275(89.50)10^{-3} = 24.61\,\text{kNm}$$

Akma sınır durumu için karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = 1.5M_y = 1.5(24.61) = 36.92\,\text{kNm} \qquad (9.65)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Eşit kollu tek korniyer x-geometrik ekseni etrafında eğilme etkisinde ve eğilme düzlemine paralel doğrultudaki kolunun uç bölümü çekme etkisinde olduğundan elastik yanal burulmalı burkulma momenti, M_{cr}, *Yönetmelik* 9.10.2(2) uyarınca belirlenir.

$$M_{cr} = \frac{0.58Eb^4tC_b}{L_b^2}\left(\sqrt{1+0.88\left(\frac{L_bt}{b^2}\right)^2}+1\right) \qquad (9.69b)$$

$$M_{cr} = \frac{0.58(200000)160^4(14)1.30}{3500^2}\left(\sqrt{1+0.88\left(\frac{3500(14)}{160^2}\right)^2}+1\right)10^{-6} = 345.09\ \text{kNm}$$

Korniyer, en büyük eğilme momenti etkisindeki enkesit hizasında (açıklık ortasında) yanal olarak desteklendiğinden, *Yönetmelik* 9.10.2(2)(ii) uyarınca $1.25M_{cr}$ alınabilir. Bu durumda, akma momenti, M_y, ilgili geometrik eksene göre belirlenen akma momenti olarak alınarak,

$$\frac{M_y}{1.25M_{cr}} = \frac{24.61}{1.25(345.09)} = 0.057 \le 1.0$$

olduğundan, *Yönetmelik* 9.10.2(2)(ii) esas alınarak karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}\right]M_y \le 1.5M_y \qquad (9.66)$$

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{0.057}\right](24.61) = 40.37\text{kNm} \le 1.5(24.61) = 36.92\ \text{kNm}\ \times$$

$$M_n = 36.92\ \text{kNm}$$

Korniyer kolunun yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Korniyerin eğilme düzlemine paralel doğrultudaki kolunun uç bölümü çekme etkisinde olduğundan, bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

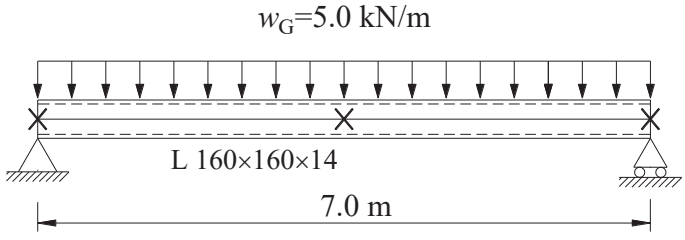
Bu durumda, *Yönetmelik* 9.10 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını akma sınır durumu belirler.

M_n =36.92 kNm

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.40) + 1.6(2.5) = 4.48$ kN/m $M_u = \frac{w_uL^2}{8} = \frac{4.48(7)^2}{8} = 27.44\text{kNm}$	$w_a = w_G + w_Q$ $= 0.40 + 2.50 = 2.90$ kN/m $M_a = \frac{w_aL^2}{8} = \frac{2.90(7)^2}{8} = 17.76\text{kNm}$
b. Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_bM_n = 0.90(36.92) = 33.23$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 36.92/1.67 = 22.11$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{27.44}{33.23} = 0.83 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{17.76}{22.11} = 0.80 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.17

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen L 160×160×14 enkesitli basit kiriş, w-asal ekseni (kuvvetli asal ekseni) etrafında eğilme etkisinde olacak şekilde, w_G = 5.0 kN/m üniform yayılı sabit yük etkisindedir. Kiriş başlıkları mesnetlerde ve açıklık ortasında yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir.



a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 160×160×14		
$W_{ex} = 89.50$ cm^3	$W_{ew} = 145.1$ cm^3	$W_{ez} = 67.65$ cm^3
$A = 4320$ mm^2	$i_z = 31.30$ mm	$i_w = 61.70$ mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Eğilme etkisindeki, L 160×160×14 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.10 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Korniyer w-kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğundan,

$$M_y = F_y W_{ew} = 275(145.10)10^{-3} = 39.90 \text{ kNm}$$

Karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = 1.5M_y = 1.5(39.90) = 59.85 \text{ kNm} \qquad (9.65)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Eşit kollu tek korniyer w-kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğundan elastik yanal burulmalı burkulma momenti, M_{cr}, *Yönetmelik* 9.10.2(1) uyarınca belirlenir.

$$M_{cr} = \frac{9Ai_z tC_b}{8L_b}\left(\sqrt{1+\left(4.4\frac{\beta_w i_z}{L_b t}\right)^2}+4.4\frac{\beta_w i_z}{L_b t}\right) \qquad (9.68)$$

Üniform yayılı yük altında kiriş mesnetlerde ve açıklık ortasında yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklendiğinden, $C_b = 1.30$ olarak alınır. Eşit kollu korniyerler için $\beta_w = 0$ olduğundan,

$$M_{cr} = \frac{9Ai_z tC_b}{8L_b} = \frac{9(4320)31.30(14)1.30}{8(3500)} = 791\,\text{kNm}$$

$$\frac{M_y}{M_{cr}} = \frac{39.90}{791} = 0.05 \le 1.0$$

Yönetmelik 9.10.2(2)(ii) esas alınarak, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}\right] M_y \le 1.5M_y \qquad (9.66)$$

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{0.05}\right](39.90) = 66.17\text{kNm} \le 1.5(39.90) = 59.85\,\text{kNm}\ \times$$

$$M_n = 59.85\ \text{kNm}$$

Korniyer kolunun yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için sınıflandırma

Korniyer kolu, (Tablo 5.1B, Durum 12)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{160}{14} = 11.42 \le \lambda_p = 0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.54\sqrt{\frac{200000}{275}} = 14.55$$

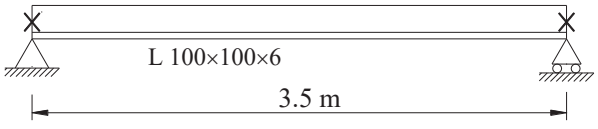
Yerel burkulma sınır durumuna göre L 160×160×14 enkesitli korniyer, kollarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından *kompakt* enkesit olarak sınıflandırılır. Bu durumda, *Yönetmelik* 9.10.3(a) uyarınca, bu sınır durum gözönüne alınmaz.

Korniyerin karakteristik eğilme momenti dayanımını *Yönetmelik* 9.10. uyarınca, akma sınır durumu belirlediğinden, $M_n = 59.85\,\text{kNm}$ olarak elde edilir.

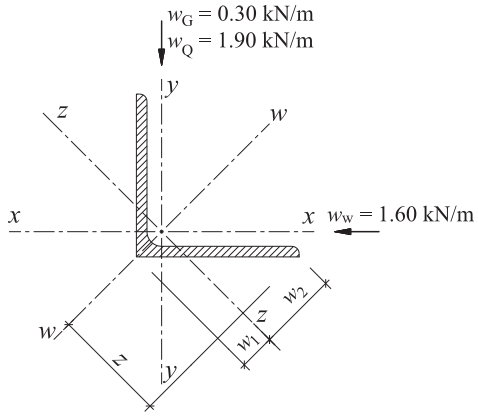
YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.4w_G$ $= 1.4(5) = 7\ \text{kN/m}$ $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{7(7)^2}{8} = 42.88\,\text{kNm}$	$w_a = w_G$ $= 5\ \text{kN/m}$ $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{5(7)^2}{8} = 30.63\,\text{kNm}$
b. Tasarım eğilme momenti dayanımı	**c.** Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(59.85) = 53.87\ \text{kNm}$	$M_g = M_n/\Omega_b = 59.85/1.67 = 35.83\ \text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{42.88}{53.87} = 0.80 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{30.63}{35.83} = 0.86 \le 1.0$ ✓

Örnek 9.18

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen L 100×100×6 enkesitli basit kirişte, üniform yayılı sabit ve hareketli düşey yükler sırasıyla, w_G = 0.30 kN/m ve w_Q = 1.90 kN/m, üniform yayılı yatay rüzgar yükü ise w_W = 1.60 kN/m olarak verilmektedir. Kiriş mesnetlerde yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir.



Taşıyıcı sistem



Yükleme durumu

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

L 100×100×6		
W_{ex} = 15.09 cm^3	W_{ew} = 24.94 cm^3	$W_{ez,1}$ = 12.25 cm^3
$W_{ez,2}$ = 13.05 cm^3	A = 1180 mm^2	i_z = 19.70 mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

L 100×100×6 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.10 uyarınca belirlenecektir.

Eşit kollu korniyer x- ve y- geometrik eksenleri etrafındaki eğilme momentlerinin ortak etkisinde olduğundan, eğilme momenti dayanımı, *Yönetmelik* 11.2 uyarınca değerlendirilecektir.

z- *asal ekseninde karakteristik eğilme momenti dayanımı,* M_{nz}

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı

Korniyer z-ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğunda, *Yönetmelik* 9.10.1 uyarınca,

$$M_y = F_y W_{ez} = 275(12.25)10^{-3} = 3.37 \text{ kNm}$$

$$M_{nz} = 1.5 M_y = 1.5(3.37) = 5.05 \text{ kNm} \qquad (9.65)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı

Yönetmelik 9.10.2 uyarınca, tek korniyerlerde zayıf asal eksen etrafında eğilme etkisi için yanal burulmalı burkulma sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Korniyer kolunun yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı

Korniyer kolu (Tablo 5.1B, Durum 12)

$$\lambda_p = 0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.54\sqrt{\frac{200000}{275}} = 14.56$$

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{100}{6} = 16.67$$

$$\lambda_r = 0.91\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.91\sqrt{\frac{200000}{275}} = 24.54$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre korniyer kolunun genişlik/kalınlık oranı

$$\lambda_p = 14.56 < \lambda = 16.67 < \lambda_r = 24.54$$

olduğundan, korniyer kolu *kompakt olmayan* olarak sınıflandırılır. Bu durumda, Yönetmelik 9.10.3(b) uyarınca,

$$M_n = F_y W_{ec}\left(2.43 - 1.72\left(\frac{b}{t}\right)\sqrt{\frac{F_y}{E}}\right) \qquad (9.71)$$

zayıf asal ekseninde eğilmede korniyer kolunun uç bölgesi basınçta olduğundan, $W_{ec} = W_{ez,2} = 13.05\text{cm}^3$ alınarak,

$$M_{nz} = 275(13.05)10^{-3}\left(2.43 - 1.72\left(\frac{100}{6}\right)\sqrt{\frac{275}{200000}}\right) = 4.91\text{kNm}$$

Yönetmelik 9.10 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını yerel burkulma sınır durumu belirler.

$$M_{nz} = 4.91\ \text{kNm}$$

w- *asal ekseninde karakteristik eğilme momenti dayanımı,* M_{nw}

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı,

Korniyer w-asal ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğunda, *Yönetmelik* 9.10.1 uyarınca,

$$M_y = F_y W_{ew} = 275(24.94)10^{-3} = 6.86\ \text{kNm}$$

$$M_{nw} = 1.5M_y = 1.5(6.86) = 10.29\ \text{kNm} \qquad (9.65)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı

Eşit kollu tek korniyer w-asal ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğunda, açıklıkta yanal olarak sürekli desteklenmediğinden *Yönetmelik* 9.10.2(1)uygulanarak,

$$M_{cr} = \frac{9Ai_z tC_b}{8L_b}\left(\sqrt{1 + \left(4.4\frac{\beta_w i_z}{L_b t}\right)^2} + 4.4\frac{\beta_w i_z}{L_b t}\right) \qquad (9.68)$$

Üniform yayılı yük altında kiriş mesnetlerde yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklendiğinden, C_b=1.14 olarak alınır. Eşit kollu korniyerler için $\beta_w = 0$ olduğundan,

$$M_{cr} = \frac{9Ai_z tC_b}{8L_b} = \frac{9(1180)19.70(6)1.14}{8(3500)} = 51.11\,\text{kNm}$$

$$\frac{M_y}{M_{cr}} = \frac{6.86}{51.11} = 0.134 \le 1.0$$

Yönetmelik 9.10.2(2)(ii) esas alınarak, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n,

$$M_n = \left[1.92 - 1.17\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}}\right] M_y \le 1.5M_y \qquad (9.66)$$

$$M_{nw} = \left[1.92 - 1.17\sqrt{0.134}\right](6.86) = 10.23\text{kNm} \le 1.5(6.86) = 10.29\,\text{kNm}\checkmark$$

$$M_{nw} = 10.23\ \text{kNm}$$

Korniyer kolunun yerel burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı,

Yerel burkulma sınır durumuna göre korniyer kolunun genişlik/kalınlık oranı (Tablo 5.1B, Durum 12)

$$\lambda_p = 14.56 < \lambda = 16.67 < \lambda_r = 24.54$$

olduğundan, korniyer kolu *kompakt olmayan* olarak sınıflandırılır. Bu durumda, Yönetmelik 9.10.3(b) uyarınca,

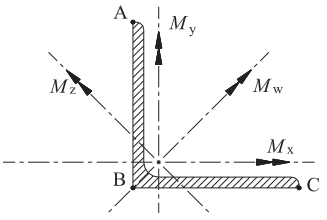
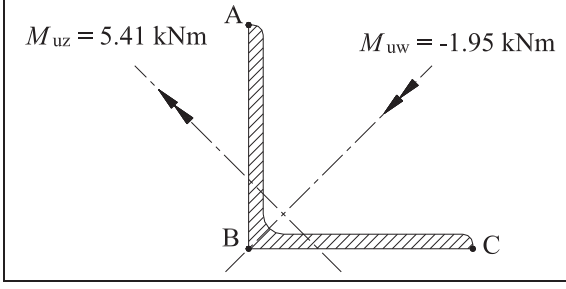
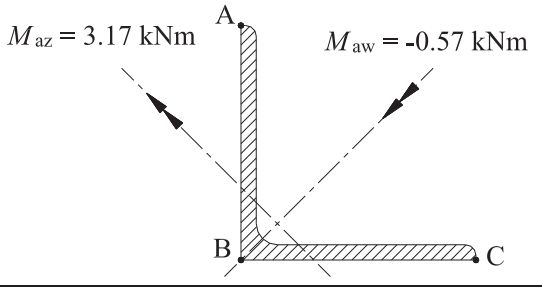
$$M_n = F_y W_{ec}\left(2.43 - 1.72\left(\frac{b}{t}\right)\sqrt{\frac{F_y}{E}}\right) \qquad (9.71)$$

zayıf asal ekseninde eğilmede korniyer kolunun uç bölgesi basınçta olduğundan, $W_{ec} = W_{ew} = 24.94\,\text{cm}^3$ alınarak,

$$M_{nw} = 275(24.94)10^{-3}\left(2.43 - 1.72\left(\frac{100}{6}\right)\sqrt{\frac{275}{200000}}\right) = 9.38\,\text{kNm}$$

Yönetmelik 9.10 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını yerel burkulma sınır durumu belirler.

$$M_{nw} = 9.38\,\text{kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_{ux} = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(0.30) + 1.6(1.90) = 3.40$ kN/m $w_{uy} = 1.0w_W$ $= 1.0(1.6) = 1.60$ kN/m $M_{ux} = \frac{w_{ux}L^2}{8} = \frac{3.40(3.5)^2}{8} = 5.20$kNm $M_{uy} = \frac{w_{uy}L^2}{8} = \frac{1.6(3.5)^2}{8} = 2.45$kNm	$w_{ax} = 1.0w_G + 0.75w_Q$ $= 1.0(0.30) + 0.75(1.90) = 1.73$ kN/m $w_{ay} = 0.75w_W$ $= 0.75(1.6) = 1.20$ kN/m $M_{ax} = \frac{w_{ax}L^2}{8} = \frac{1.73(3.5)^2}{8} = 2.65$kNm $M_{ay} = \frac{w_{ay}L^2}{8} = \frac{1.2(3.5)^2}{8} = 1.84$kNm
Geometrik eksen ve asal eksen momentlerinin pozitif yönleri  	
Geometrik eksen momentlerinin işaretleri	
$M_{ux} = -5.20$kNm $M_{uy} = 2.45$kNm	$M_{ax} = -2.65$kNm $M_{ay} = 1.84$kNm
Asal eksen momentleri	
$M_{uw} = M_{ux}\cos\alpha + M_{uy}\sin\alpha$ $= (-5.20)\cos 45^o + (2.45)\sin 45^o$ $= -1.95$kNm	$M_{aw} = M_{ax}\cos\alpha + M_{ay}\sin\alpha$ $= (-2.65)\cos 45^o + (1.84)\sin 45^o$ $= -0.57$kNm
$M_{uz} = M_{ux}\sin\alpha + M_{uy}\cos\alpha$ $= -(-5.20)\cos 45^o + (2.45)\sin 45^o$ $= 5.41$kNm	$M_{az} = M_{ax}\sin\alpha + M_{ay}\cos\alpha$ $= -(-2.65)\cos 45^o + (1.84)\sin 45^o$ $= 3.17$kNm
 	

Bileşik eğik eğilme etkisi altında dayanım kontrolü

Her iki asal eksen etrafındaki eğilme momentlerinden oluşan gerilmelerin etkileşimi *Yönetmelik* 11.2 uyarınca Denk. (11.3) ile sınırlandırılmalıdır. Ancak, gözönüne alınan noktada, YDKT da tasarım eğilme gerilmesi ($=\phi M_n/W_e$) veya GKT da eğilme güvenlik gerilmesi ($=M_n/\Omega_b W_e$) olarak gözönüne alındığında, etkileşim ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

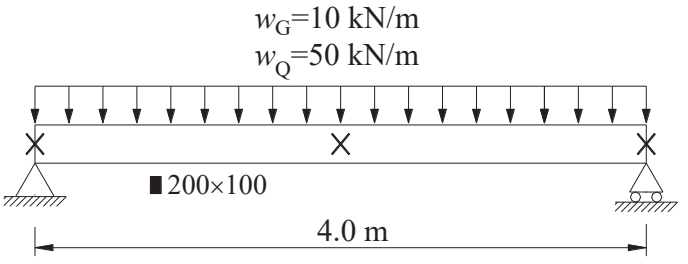
$$\frac{M_{rw}}{M_{cw}}+\frac{M_{rz}}{M_{cz}}\le 1.0$$

Korniyer enkesitin kritik noktalarında asal eksenler etrafındaki eğilme gerilmelerinin yönleri gözönünde tutularak kontrollar yapılmıştır.

Gerekli ve mevcut eğilme momenti dayanımlarının özeti	
YDKT	GKT
$M_{uw}=-1.95\,\text{kNm}$ $M_{dw}=\phi_b M_{nw}=0.90(9.38)=8.442\,\text{kNm}$ $M_{uz}=5.41\,\text{kNm}$ $M_{dz}=\phi_b M_{nz}=0.90(4.91)=4.419\,\text{kNm}$	$M_{aw}=-0.57\,\text{kNm}$ $M_{gw}=\frac{M_{nw}}{\Omega_b}=\frac{9.38}{1.67}=5.62\,\text{kNm}$ $M_{az}=3.17\,\text{kNm}$ $M_{gz}=\frac{M_{nz}}{\Omega_b}=\frac{4.91}{1.67}=2.94\,\text{kNm}$
b. Bileşik etkiler altında tasarım eğilme dayanımının kontrolü	**c.** Bileşik etkiler altında güvenli eğilme dayanımının kontrolü
A noktasında	
$\left\lvert-\frac{1.95}{8.442}-\frac{5.41}{4.419}\right\rvert=1.46\le 1.0$ ✗	$\left\lvert-\frac{0.57}{5.52}-\frac{3.17}{2.94}\right\rvert=1.18\le 1.0$ ✗
B noktasında	
$\left\lvert 0+\frac{5.41}{4.419}\right\rvert=1.22\le 1.0$ ✗	$\left\lvert 0+\frac{3.17}{2.94}\right\rvert=1.08\le 1.0$ ✗
C noktasında	
$\left\lvert\frac{1.95}{8.442}-\frac{5.41}{4.419}\right\rvert=0.99\le 1.0$ ✓	$\left\lvert\frac{0.57}{5.62}-\frac{3.17}{2.94}\right\rvert=0.97\le 1.0$ ✓

Örnek 9.19

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen 200×100 boyutlarındaki dolu enkesitli basit kiriş, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisinde olacak şekilde, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, w_G = 10 kN/m ve w_Q = 50 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir. Kiriş mesnetlerde ve açıklık ortasında yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmiştir.



a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Dolu enkesit			
$d = 200$ mm	$t = 100$ mm	$W_{ex} = 667$ cm^3	$W_{px} = 1000$ cm^3

Çözüm

a. Karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Eğilme etkisindeki, 200×100 enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.11 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_p \tag{9.74}$$

Eleman x-ekseni (kuvvetli ekseni) etrafında eğilme etkisinde olduğundan,

$$M_p = F_y W_{px} = 235(1000)10^{-3} = 235 \text{ kNm}$$

$$1.6M_y = 1.6F_y W_{ex} = 1.6(235)667(10)^{-3} = 250.79 \text{ kNm}$$

$$M_n = M_p = 235 \text{kNm} \le 1.6M_y = 250.79 \text{ kNm}$$

$$M_n = 235 \text{ kNm}$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Dikdörtgen enkesitli eleman kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisinde olduğundan ve *Yönetmelik* 9.11.2(a) uyarınca,

$$L_b d / t^2 \le 0.08(E / F_y) = 2000\left(200\right) / 100^2 = 40 \le 0.08\left(200000 / 235\right) = 68.09$$

olduğundan bu sınır durumun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Bu durumda, *Yönetmelik* 9.11 uyarınca, karakteristik eğilme momenti dayanımını akma sınır durumu belirler.

$M_n = 235$ kNm

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2\left(10\right) + 1.6(50) = 92$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{92(4)^2}{8} = 184$kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 10 + 50 = 60$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{60(4)^2}{8} = 120$kNm
b. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90\left(235\right) = 211.50$ kNm	$M_g = M_n / \Omega_b = 235 / 1.67 = 140.72$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{184}{211.50} = 0.87 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{120}{140.72} = 0.85 \le 1.0$ ✓

BÖLÜM 10 KESME KUVVETİ ETKİSİ

Gövde düzlemi içinde kesme kuvveti etkisinde olan çift simetri eksenli I-enkesitli, tek simetri eksenli I- ve U-enkesitli elemanların, kesme kuvveti etkisinde olan boru ve kutu enkesitli elemanların, tek korniyerlerin, T-enkesitli elemanların ve başlıklarına paralel düzlemde kesme kuvveti etkisinde olan tek veya çift simetri eksenli elemanların tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 10 da belirtilen kurallara göre yapılacaktır.

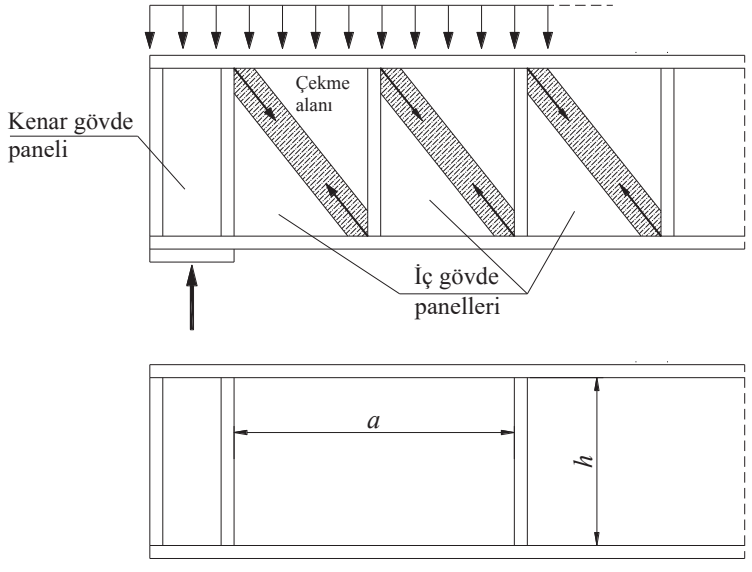
Kesme kuvveti dayanımı

Kesme kuvveti etkisindeki elemanının *tasarım kesme kuvveti dayanımı*, $\phi_v V_n$, (YDKT) veya *güvenli kesme kuvveti dayanımı*, V_n/Ω_v, (GKT), *Yönetmelik* 10.1 e göre belirlenecektir. *Karakteristik kesme kuvveti dayanımı*, V_n ilgili bölümlerde açıklandığı gibi hesaplanacaktır.

Tek ve çift simetri eksenli I-kirişlerin karakteristik kesme kuvveti dayanımı

Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki tek ve çift simetri eksenli I-kirişlerin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesinde *Yönetmelik* Bölüm 10 uyarınca iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlar,

(a) Gövdede düşey ara rijitlik levhalarının bulunmasından bağımsız olarak, gövde levhasının kesme etkisinde akma veya burkulma sınır durumları ile kesme kuvveti dayanımının *Yönetmelik* 10.2 uyarınca belirlendiği *genel yöntem*.
(b) Gövdede düşey ara rijitlik levhaları ile oluşturulan paneller ile gövdenin burkulma sonrası dayanımı gözönüne alınarak, *Yönetmelik* 10.3 uyarınca ç*ekme alanı katkısının* kesme kuvveti dayanımının belirlenmesinde dikkate alındığı yöntem.
Gövde düzleminde kesme kuvveti etkisinde olan I- ve U-enkesitlerde çekme alanı katkısı, $a / h \leq 3$ olacak şekilde rijitlik levhaları kullanılarak gövde panellerinin oluşturulması koşulu ile sadece iç gövde panellerinde gözönüne alınacaktır (Şekil 10.1).



Şekil 10.1 – Gövde düzlemi içinde yük etkisinde çekme alanları ve rijitlik levhaları ile oluşturulan panel bölgeleri

Eğilme momenti ile kesme kuvvetinin etkileşimi

Eğilme etkisindeki bir elemanın eleman boyunca herhangi bir enkesitine ait bir noktada genellikle, kesme ve eğilme etkileri nedeniyle oluşan gerilmeler aynı anda bulunmaktadır. Çekme alanı katkısının tasarımda gözönüne alınmaması halinde, karakteristik eğilme dayanımı ile karakteristik kesme kuvveti dayanımının hesabında etkileşim ihmal edilebilir. Ancak, çekme alanı katkısının gözönüne alındığı kesme kuvveti dayanımı hesabında, diyagonal çekme gerilmeleri daha büyük değerlere ulaşacağından, eğilme etkisi nedeniyle oluşan gerilmelerin diyagonal çekme gerilmeleriyle olan etkileşimi gözönüne alınmalıdır.

Örnek 10.1

Enkesiti HE 450 A olarak belirlenen L = 3.0 m açıklığa sahip basit kiriş, gövde düzleminde etkiyen sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 200 kN/m ve w_Q = 350 kN/m üniform yayılı yük etkisindedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 A		
d = 440 mm	h = 344 mm	t_w = 11.5mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Çift simetri eksenli I-enkesitte *Yönetmelik* 10.2.1(a) uyarınca,

$h/t_w = 344/11.5 = 29.91 \le 2.24\sqrt{E/F_y} = 2.24\sqrt{200000/355} = 53.17$ olduğundan,

ϕ_v = 1.00 (YDKT) veya Ω_v=1.50 (GKT) ve C_{v1}=1.0 olarak alınacaktır.

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_yA_wC_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(355)(440\times11.5)1.0(10)^{-3} = 1077.78\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(200) + 1.6(350) = 800$ kN/m $V_u = \frac{w_uL}{2} = \frac{800(3)}{2} = 1200$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 200 + 350 = 550$ kN/m $V_a = \frac{w_aL}{2} = \frac{550(3)}{2} = 825$ kN
b. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_vV_n = 1.0(1078) = 1078$kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 1078/1.50 = 719$kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1200}{1078} = 1.11 > 1.0$ ✗	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{825}{719} = 1.15 > 1.0$ ✗

Örnek 10.2

Enkesiti UPE 220 olarak belirlenen L = 3.0 m açıklığa sahip basit kiriş için mesnet tepkisi, V_u = 240 kN (YDKT) veya V_a = 165 kN (GKT) olarak verilmektedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

UPE 220				
d = 220 mm	h = 170 mm	b_f = 85 mm	t_f = 12 mm	t_w = 6.5mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 10.2.1 uyarınca, gövde düzleminde kesme kuvveti etkisindeki U-enkesitte, düşey ara rijitlik levhaları kullanılmadığı durum için Denk.(10.3a) ile gövde levhası burkulma katsayısı, k_v = 5.34 alınarak,

$$h/t_w = 170/6.5 = 26.15 \le 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{5.34(200000)/355} = 60.33$$

$$C_{v1} = 1.0 \qquad (10.2a)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(355)(220\times 6.5)1.0(10)^{-3} = 304.59 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 240$ kN	$V_a = 165$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(304.59) = 274$kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 304.59/1.67 = 182$kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{240}{274} = 0.88 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{165}{182} = 0.91 \le 1.0$ ✓

Örnek 10.3

Aşağıdaki şekilde yapma enkesit detayı verilen L = 6.0 m açıklığa sahip basit kiriş, gövde düzleminde etkiyen sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 80 kN/m ve w_Q = 170 kN/m uniform yayılı yük etkisindedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

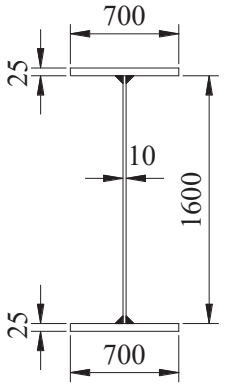
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit



Kaynaklı yapma enkesit			
d = 1650 mm	h = 1600 mm	t_w = 10 mm	b_{fc} = 700 mm
t_{fc} = 25 mm	b_{ft} = 700 mm	t_{ft} = 25 mm	

Çözüm

Gövdede düşey ara rijitlik levhaları kullanılmadığı durum için, *Yönetmelik* 10.2.1 uyarınca, Denk.(10.3a) ile gövde levhası burkulma katsayısı, k_v = 5.34 alınarak,

$$h/t_w = 1600/10 = 160 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{5.34(200000)/355} = 60.33$$

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} = \frac{1.10\sqrt{5.34(200000/355)}}{1600/10} = 0.377 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$= 0.6(355)(1650\times 10)0.377(10)^{-3} = 1352 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(80) + 1.6(170) = 368$ kN/m $V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{368(6)}{2} = 1104$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 80 + 170 = 250$ kN/m $V_a = \frac{w_a L}{2} = \frac{250(6)}{2} = 750$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(1352) = 1217$kN	$V_g = V_n / \Omega_v = 1352 / 1.67 = 810$kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1104}{1217} = 0.91 \le 1.0$✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{750}{810} = 0.93 \le 1.0$ ✓

Örnek 10.4

Aşağıdaki şekilde yapma enkesit detayı verilen L = 6.0 m açıklığa sahip basit kiriş, gövde düzleminde etkiyen sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 80 kN/m ve w_Q = 206 kN/m uniform yayılı yük etkisindedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

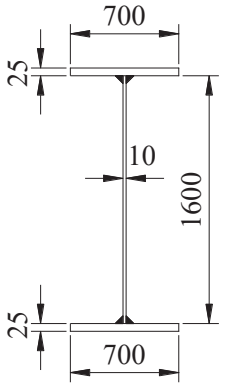
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit



Kaynaklı yapma enkesit			
d = 1650 mm	h = 1600 mm	t_w = 10 mm	b_{fc} = 700 mm
t_{fc} = 25 mm	b_{ft} = 700 mm	t_{ft} = 25 mm	

Çözüm

Gövdede düşey ara rijitlik levhaları kullanılmadığı durum için, *Yönetmelik* 10.2.1 uyarınca, Denk.(10.3a) ile gövde levhası burkulma katsayısı, k_v = 5.34 alınarak,

$$h/t_w = 1600/10 = 160 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{5.34(200000)/355} = 60.33$$

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} = \frac{1.10\sqrt{5.34(200000/355)}}{1600/10} = 0.377 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(355)(1650\times 10)0.377(10)^{-3} = 1352 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(80) + 1.6(206) = 426$ kN/m $V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{426(6)}{2} = 1280$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 80 + 206 = 286$ kN/m $V_a = \frac{w_a L}{2} = \frac{286(6)}{2} = 858$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(1352) = 1217$kN	$V_g = V_n / \Omega_v = 1352/1.67 = 810$kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1280}{1217} = 1.05 > 1.0$ ✖	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{858}{810} = 1.06 > 1.0$ ✖

Çekme alanı katkısı gözönüne alınmadan, düşey ara rijitlik levhaları kullanılarak gövdenin kayma dayanımı arttırılabilir. Bunun için, gövdede, a = 3m net uzaklık ile düşey ara rijitlik levhaları kullanıldığında, *Yönetmelik* 10.2.1 uyarınca, gövde levhası burkulma katsayısı, k_v,

$$a/h = 3000/1600 = 1.875 \le 3$$

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} = 5 + \frac{5}{(1.875)^2} = 6.42 \qquad (10.3b)$$

$$h/t_w = 1600/10 = 160 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{6.42(200000)/355} = 66.16$$

olduğundan, gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, C_{v1},

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} = \frac{1.10\sqrt{6.42(200000/355)}}{1600/10} = 0.413 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

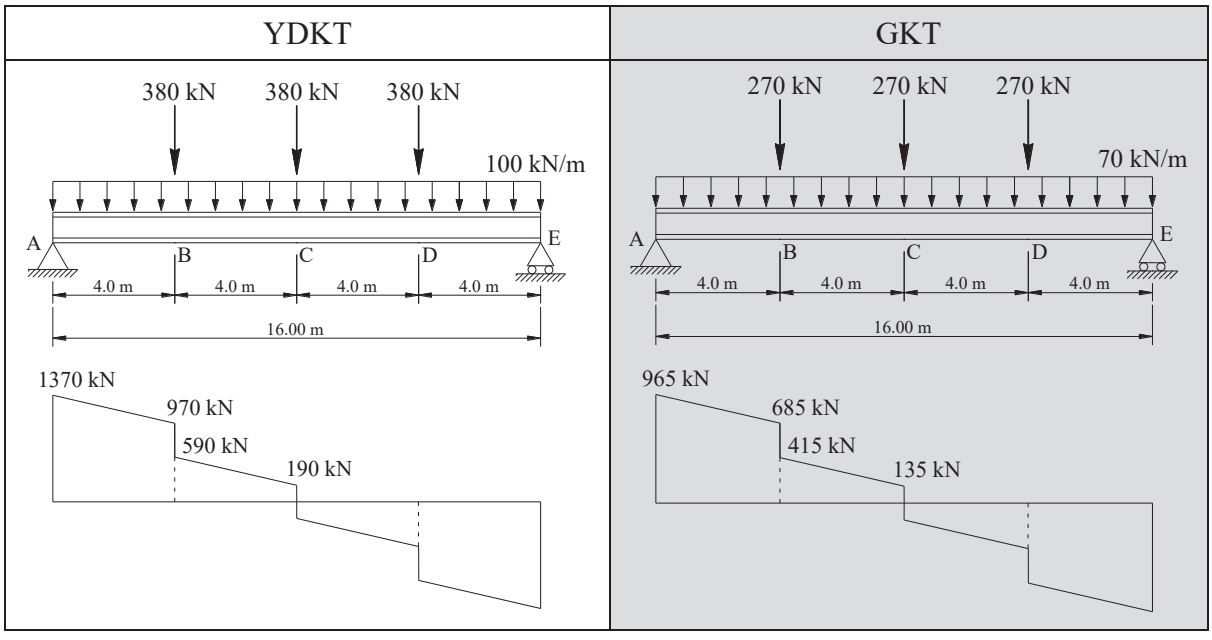
$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(355)(1650\times10)0.413(10)^{-3} = 1453 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(80) + 1.6(206) = 426$ kN/m $V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{426(6)}{2} = 1280$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 80 + 206 = 286$ kN/m $V_a = \frac{w_a L}{2} = \frac{286(6)}{2} = 858$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(1453) = 1308$kN	$V_g = V_n / \Omega_v = 1453/1.67 = 870$kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1280}{1308} = 0.98 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{858}{870} = 0.99 \le 1.0$ ✓

Örnek 10.5

Aşağıdaki şekillerde açıklığı, L = 16 m olan bir basit kirişin, gövde düzleminde etkiyen sabit yükler altında yükleme durumu ve kesme kuvveti diyagramı ile yapma enkesitinin uygulama detayları verilmektedir. Basınç etkisindeki kiriş başlığı, yanal ötelenmeye ve burulmaya karşı sürekli olarak desteklenmiştir.



a. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

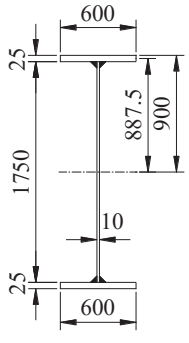
b. Kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

c. Mesnet ve ara rijitlik levhaları için gerekli koşulların kontrolü

Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit



Kaynaklı yapma enkesit			
$d = 1800$ mm	$h = 1750$ mm	$t_w = 10$ mm	$t_{fc} = 25$ mm
$b_{fc} = 600$ mm	$b_{ft} = 600$ mm	$t_{ft} = 25$ mm	

Çözüm

Gövdede düşey ara rijitlik levhaları kullanılmadığı durum için, *Yönetmelik* 10.2.1(b) uyarınca, Denk.(10.3a) ile gövde levhası burkulma katsayısı, $k_v = 5.34$ alınarak,

$$h/t_w = 1750/10 = 175 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{5.34(200000)/235} = 74.15$$

olduğundan, gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, C_{v1},

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} = \frac{1.10\sqrt{5.34(200000/235)}}{1750/10} = 0.424 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

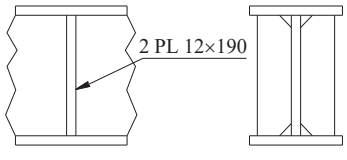
Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(235)(1800\times10)0.424(10)^{-3} = 1076\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı (1.4*G*)	Gerekli kesme kuvveti dayanımı (*G*)
$V_u = 1370$ kN	$V_a = 965$ kN
a. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(1076) = 968.40$ kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 1076/1.67 = 644.31$ kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1370}{968.4} = 1.41 > 1.0$ ✗	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{965}{644.31} = 1.50 > 1.0$ ✗

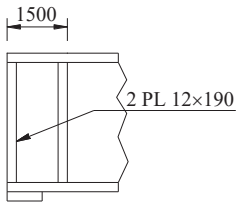
Bu durumda, mesnetlerde ve tekil yüklerin altında uygulama detayları aşağıdaki şekillerde verilen düşey doğrultudaki mesnet ve ara rijitlik levhaları teşkil edilecektir.



B,C,D detayı Kiriş enkesiti

Kenar gövde panelinde kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Kenar panellerde çekme alanı etkisinin kullanılmasına izin verilmediğinden, kesme kuvveti dayanımını arttırmak için iki yöntem izlenebilir. Bunlardan birincisi, gövde kalınlığı arttırılarak gövde narinliğinin azaltılması, diğeri de ara rijitlik levhası sayısının arttırılarak kenar panellerin *a*/*h* oranının azaltılmasıdır. Bu iki yöntemden ikincisi esas alındığında, mesnette gerekli dayanımın sağlanabilmesi amacıyla ilave edilecek rijitlik levhasının kirişin kenarına olan uzaklığı, *a* = 1500mm olarak seçilmiştir.



A ve E detayı

Gövdede düşey ara rijitlik levhaları kullanıldığında, *Yönetmelik* 10.2.1(b) uyarınca, mesnet bölgesinde $a/h = 1500/1750 = 0.86 \le 3.0$ olduğundan

$$k_v = 5 + \frac{5}{(0.86)^2} = 11.76 \qquad (10.3b)$$

$$h/t_w = 1750/10 = 175 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{11.76(200000)/235} = 110$$

gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, C_{v1} ,

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} = \frac{1.10\sqrt{11.76(200000/235)}}{1750/10} = 0.63 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} = 0.6(235)(1800\times10)0.63(10)^{-3} = 1599\ \text{kN} \qquad (10.1)$$

YDKT	GKT
$V_u = 1370$ kN	$V_a = 965$ kN
a. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(1599) = 1439.10$ kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 1599/1.67 = 957.48$ kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1370}{1439.10} = 0.95 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{965}{957.48} = 1.0 \cong 1.0$ ✓

Gövdede düşey ara rijitlik levhaları kullanıldığı durumda, ikinci panelde,

a = 4000 – 1500 = 2500mm için

Yönetmelik 10.2.1 uyarınca, Denk.(10.3b) ile gövde levhası burkulma katsayısı,

$a/h = 2500/1750 = 1.429 \le 3.0$ olduğundan

$$k_v = 5 + \frac{5}{(1.429)^2} = 7.45 \qquad (10.3b)$$

$$h/t_w = 1750/10 = 175 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{7.45(200000)/235} = 87.6$$

gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, C_{v1} ,

$$C_{v1} = \frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w} = \frac{1.10\sqrt{7.45(200000/235)}}{1750/10} = 0.50 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} = 0.6(235)(1800\times10)0.50(10)^{-3} = 1269\ \text{kN} \qquad (10.1)$$

Mesnetten x = 1.5m uzakta mevcut kesme kuvveti dayanımı kontrol edilmelidir.

YDKT	GKT
$V_u = 1370 - (1.5\times100) = 1220\text{kN}$	$V_a = 965 - (1.5\times70) = 860\,\text{kN}$
a. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(1269) = 1142\ \text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 1318/1.67 = 789.2\ \text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1220}{1142} = 1.07 \le 1.0$ ✗	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{860}{789.2} = 1.09 \le 1.0$ ✗

Bu durumda, *Yönetmelik* 10.3 e uygun olarak çekme alanı katkısı gözönüne alınabilir. *Yönetmelik* 10.3.1(b) uyarınca,

$$h/t_w = 1750/10 = 175 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{7.45(200000)/235} = 87.6$$

olması halinde,

(i) $2A_w/(A_{fc} + A_{ft}) = 2(1750\times10)/(600\times25 + 600\times25) = 1.16 \le 2.5$ ✓

(ii) $h/b_{fc} = 1750/600 = 2.91 \le 6.0$ ✓

(iii) $h/b_{ft} = 1750/600 = 2.91 \le 6.0$ ✓

koşullarının tümü sağlandığından, iç gövde panellerinde çekme alanı katkısı heasaba katılabilir. Bu durumda, kayma etkisinde gövde burkulma katsayısı, C_{v2}

$$h/t_w = 1750/10 = 175 > 1.37\sqrt{k_v E/F_y} = 1.37\sqrt{7.45(200000)/235} = 109$$

olduğundan, *Yönetmelik* 10.3.1(b)(2)(iii) uyarınca,

$$C_{v2} = \frac{1.51k_v E}{(h/t_w)^2 F_y} = \frac{1.51(7.45)(200000)}{(1750/10)^2 235} = 0.313 \qquad (10.7c)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n

Yönetmelik 10.3.1(1) uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w \left(C_{v2} + \frac{1 - C_{v2}}{1.15\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \qquad (10.6b)$$

$$V_n = 0.6(235)(1800\times10)(10)^{-3}\left(0.313+\frac{1-0.313}{1.15\sqrt{1+(1.429)^2}}\right)=1666\text{kN}$$

YDKT	GKT
$V_u = 1370-(1.5\times100)=1220\text{kN}$	$V_a = 965-(1.5\times70)=860\,\text{kN}$
a. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d=\phi_v V_n = 0.90(1666)=1500\text{ kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 1666/1.67 = 997.60\text{ kN}$
$\frac{V_u}{V_d}=\frac{1220}{1500}=0.81\le1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g}=\frac{860}{997.60}=0.86\le1.0$ ✓

(B-C) ve (C-D) gövde panellerinde kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

a = 4000 mm olduğundan *Yönetmelik* 10.2.1 uyarınca,

$a/h = 4000/1750 = 2.29 \le 3.0$ için

$$k_v = 5+\frac{5}{(a/h)^2}=5+\frac{5}{(2.29)^2}=5.95 \qquad (10.3b)$$

$$h/t_w = 1750/10 = 175 > 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{5.95(200000)/235} = 78.3$$

olduğundan, gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, C_{v1},

$$C_{v1}=\frac{1.10\sqrt{k_v E/F_y}}{h/t_w}=\frac{1.10\sqrt{5.95(200000/235)}}{1750/10}=0.447 \qquad (10.2b)$$

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} = 0.6(235)(1800\times10)0.447(10)^{-3}=1135\text{ kN} \qquad (10.1)$$

YDKT	GKT
$V_u = 590\text{kN}$	$V_a = 415\,\text{kN}$
a. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d=\phi_v V_n = 0.90(1135)=1022\text{ kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 1135/1.67 = 679.64\text{ kN}$
$\frac{V_u}{V_d}=\frac{590}{1022}=0.58\le1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g}=\frac{415}{679.64}=0.61\le1.0$ ✓

c. Mesnet ve ara rijitlik levhaları için gerekli koşulların kontrolü

Mesnet düşey ara rijitlik levhaları, *Yönetmelik* 10.2.2 de verilen koşulları sağlayacaktır.

Yönetmelik 10.2.2(b) uyarınca,

$$I_{st} = 2\left[\frac{12(190)^3}{12} + 12(190)\left(\frac{190}{2} + \frac{10}{2}\right)^2\right] = 5931.8(10)^4\,\text{mm}^4$$

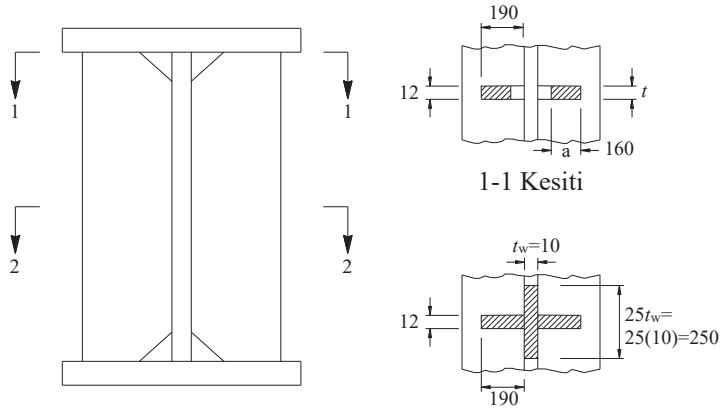
$$b = (a;h)_{min} = (1500\text{mm};1750\text{mm})_{min} = 1500\ \text{mm} \qquad (10.5)$$

$$I_{st} \geq \left(\frac{2.5}{(a/h)^2} - 2\right) bt_w^3 \qquad (10.4)$$

$$\left(\frac{2.5}{(1500/1750)^2} - 2\right) = 1.40 \geq 0.5\ \checkmark$$

$$5931.8(10)^4\,\text{mm}^4 \geq (1.40)(1500)(10)^3 = 210(10)^4\,\text{mm}^4\ \checkmark$$

Tekil kuvvetlerin altında teşkil edilen düşey rijitlik levhaları için ezilme dayanımı ve basınç dayanımı aşağıdaki şekilde gösterilen uygulama detayı esas alınarak kontrol edilecektir.



Uygulama detayı

Başlık elemanı ile temas yüzeyinde rijitlik levhası ezilme dayanımı, *Yönetmelik* 13.6 uyarınca,

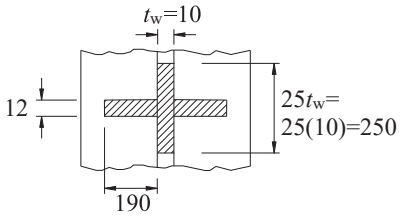
$$A_{pb} = 2at = 2(160 \times 12) = 3840\ \text{mm}^2$$

$$R_n = 1.8F_y A_{pb} = 1.8(235)(3840)10^{-3} = 1624\ \text{kN} \qquad (13.21a)$$

YDKT	GKT
Tasarım ezilme dayanımının kontrolü	Güvenli ezilme dayanımın kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.75 \times 1624 = 1218\ \text{kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{1624}{2.0} = 812\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{380}{1218} = 0.31 \leq 1.0\ \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{270}{812} = 0.33 \leq 1.0\ \checkmark$

Basınç etkisinde rijitlik levhası dayanımı,

Yönetmelik 13.9.7 uyarınca, tekil kuvvetlerin altındaki ara rijitlik levhalarının basınç etkisi altında dayanımı, iki adet rijitlik levhası ve $25t_w$ genişliğinde kiriş gövde şeridinden oluşan bir eleman enkesiti ile kirişin gövde düzleminden geçen asal eksen etrafındaki atalet yarıçapı esas alınarak belirlenir. Böylece *Yönetmelik* 13.4.4 esasları ile,



$$A = 2(12)190 + 10(250) = 7060 \text{ mm}^2$$

$$I = \frac{250(10)^3}{12} + 2\left[\frac{12(190)^3}{12} + 12(190)\left(\frac{190}{2} + \frac{10}{2}\right)^2\right] = 5934(10)^4 \text{ mm}^4$$

$$i = \sqrt{\frac{5934(10)^4}{7060}} = 84.0 \text{ mm}$$

Yönetmelik 13.4.4(a) ve 13.9.7 uyarınca,

$\frac{L_c}{i} = \frac{Kh}{i} = \frac{0.75(1750)}{84.0} = 15.6 < 25$ için karakteristik basınç kuvveti dayanımı,

$$P_n = F_y A_g = (235)(7060)10^{-3} = 1659 \text{ kN} \qquad (13.20)$$

YDKT	GKT
Tasarım basınç dayanımının kontrolü	Güvenli basınç dayanımın kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.9 \times 1659 = 1493$ kN	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{1659}{1.67} = 993$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{380}{1659} = 0.23 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{270}{993} = 0.27 \le 1.0$ ✓

Aynı kontroller mesnetlerdeki düşey rijitlik levhaları için de yapılacaktır. Bu durumda, *Yönetmelik* 13.9.7 uyarınca, iki adet rijitlik levhası ve $12t_w$ genişliğinde kiriş gövde şeridinden oluşan bir eleman enkesiti gözönüne alınarak ezilme ve basınç dayanımı kontrol edilmelidir.

Gerekli kesme kuvveti dayanımının sağlanmasında çekme alanı katkısı da hesaba katıldığından, düşey ara rijitlik levhaları *Yönetmelik* 10.3.2 de verilen koşulları da sağlamalıdır.

Yönetmelik 10.3.2 (a) uyarınca narinlik koşulu,

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{st} = \frac{190}{12} = 15.83 \le 0.56\sqrt{\frac{E}{F_{yst}}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{235}} = 16.34 \text{ ✓}$$

Yönetmelik 10.2.2(b) uyarınca düşey ara rijitlik levhalarının minimum atalet momenti,

$$I_{st} = 2\left[\frac{12(190)^3}{12} + 12(190)\left(\frac{190}{2} + \frac{10}{2}\right)^2\right] = 5931.8(10)^4 \text{ mm}^4$$

Çekme alanı katkısı gözönüne alınmadan, gövde levhasının kesme kuvveti dayanımını arttırmak için *Yönetmelik* 10.2.2 uyarınca hesaplanan ara rijitlik levhası enkesitinin gerekli atalet momenti, I_{st1},

$$I_{st1} = \left(\frac{2.5}{(1500/1750)^2} - 2\right)1500(10)^3 = 210(10)^4 \text{ mm}^4 \qquad (10.4)$$

$$\left(\frac{2.5}{(1500/1750)^2} - 2\right) = 1.40 \geq 0.5 \checkmark$$

$$I_{st} = 5931.8(10)^4 \text{ mm}^4 \geq I_{st1} = 210(10)^4 \checkmark$$

Düşey ara rijitlik levhaları ile oluşturulan panel bölgelerinde diyagonal çekme alanlarının dayanımlarının da dikkate alınabilmesi için, düşey ara rijitlik levhalarının minimum atalet momenti, I_{st2},

$$I_{st2} = \frac{h^4 \rho_{st}^{1.3}}{40}\left(\frac{F_{yw}}{E}\right)^{1.5} = \frac{1750^4(1.0)}{40}\left(\frac{235}{200000}\right)^{1.5} = 944(10)^4 \text{ mm}^4 \qquad (10.11)$$

YDKT	GKT
$V_u = V_r = 1220$ kN	$V_a = V_r = 860$ kN
Daha büyük olan panel uzunluğu daha küçük kesme kuvveti dayanımı vereceğinden, V_{c1}, gövdede düşey ara rijitlik levhaları kullanıldığı durumda ikinci panel için hesaplanan değer olacaktır.	
$V_{c1} = \phi_v V_n = 0.90(1296) = 1142$ kN	$V_{c1} = V_n/\Omega_v = 1296/1.67 = 776$ kN
$V_{c2} = \phi_v V_n = 0.90(1666) = 1500$ kN	$V_{c2} = V_n/\Omega_v = 1666/1.67 = 997$ kN
$\rho_w = \left[\frac{V_r - V_{c1}}{V_{c2} - V_{c1}}\right] \geq 0$ (10.10)	
$\rho_w = \frac{1220-1142}{1500-1142} = 0.218 \geq 0 \checkmark$	$\rho_w = \frac{860-776}{997-776} = 0.380 \geq 0 \checkmark$
$I_{st} \geq I_{st1} + (I_{st2} - I_{st1})\rho_w$ (10.9)	
$5931.8(10)^4$ mm^4... $... \geq 210(10)^4 + \left[(944-210)10^4\right]0.218...$ $.... = 370(10)^4$ mm^4 ✓	$5931.8(10)^4$ mm^4... $... \geq 210(10)^4 + \left[(944-210)10^4\right]0.380...$ $... = 489(10)^4$ mm^4 ✓

Örnek 10.6

Enkesiti Kutu 300×200×8 olarak belirlenen basit kiriş için mesnet tepkisi, V_u = 140 kN (YDKT) veya V_a = 94 kN (GKT) olarak ve kutu enkesitin h = 200 mm boyutundaki gövde enkesit parçaları tarafından aktarılacak şekilde verilmektedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.2 ve 5.4.1.2(d) uyarınca, $t = 0.93\times 8.0 = 7.44$ mm

$$h = H - 3t = 200 - 3\left(7.44\right) = 177.68\,\text{mm}$$

alınarak, kutu enkesitin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* 10.4 uyarınca hesaplanır. Bu durumda, kayma etkisinde gövde burkulma katsayısı, C_{v2}, *Yönetmelik* 10.3.1 uyarınca,

$$h/t = 177.68/7.44 = 23.88 \le 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{5\left(200000\right)/275} = 66.33$$

$$C_{v2} = 1.0 \qquad (10.7a)$$

$$A_w = 2ht = 2\left(177.78\times 7.44\right) = 2643.88\ \text{mm}^2$$

Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v2} = 0.6\left(275\right)\left(2643.88\right)1.0\left(10\right)^{-3} = 436.24\,\text{kN} \qquad (10.12)$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 140$ kN	$V_a = 94$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90\left(436.24\right) = 392.62$kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 436.24/1.67 = 261.22$kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{140}{392.62} = 0.36 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{94}{261.22} = 0.36 \le 1.0$ ✓

Örnek 10.7

Enkesiti Boru 168.3×10 olarak belirlenen basit kiriş için mesnet tepkisi, V_u = 168 kN (YDKT) veya V_a = 112 kN (GKT) verilmektedir. Kesme kuvvetinin sıfır olduğu nokta ile maksimum olduğu nokta arasındaki uzaklık, L_v = 1500mm dir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı

Boru 168.3×10
$A_g = 4970$ mm^2

Çözüm

b. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93\times10 = 9.3$ mm ve $A = 4645.50$ mm^2 alınarak, *Yönetmelik* 10.5 uyarınca,

$$F_{cr} = \frac{1.60E}{\sqrt{\frac{L_v}{D}}\left(\frac{D}{t}\right)^{5/4}} \qquad (10.14a)$$

$$F_{cr} = \frac{1.60(200000)}{\sqrt{\frac{1500}{168.3}}\left(\frac{168.3}{9.3}\right)^{5/4}} = 2871\,\text{N/mm}^2 > 0.6F_y = 0.6(235) = 141\text{N/mm}^2$$

$$F_{cr} = \frac{0.78E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{3/2}} \qquad (10.14b)$$

$$F_{cr} = \frac{0.78(200000)}{\left(\frac{168.3}{9.3}\right)^{3/2}} = 2026\text{N/mm}^2 > 0.6F_y = 0.6(235) = 141\text{N/mm}^2$$

olduğundan,

$$F_{cr} = 0.6F_y = 0.6(235) = 141\text{N/mm}^2$$

Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı,

$$V_n = \frac{F_{cr}A_g}{2} = \frac{141(4645.5)}{2}(10)^{-3} = 327.51\,\text{kN} \qquad (10.13)$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 168\ \text{kN}$	$V_a = 112\ \text{kN}$
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(327.51) = 294.76\ \text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 327.51/1.67 = 196.11\ \text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{168}{294.76} = 0.57 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{112}{196.11} = 0.57$ ✓

Örnek 10.8

Enkesiti L 200×150×10 olarak belirlenen ve L = 2.5m açıklığa sahip basit kiriş, uzun koluna paralel düzlemde sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 55 kN/m üniform yayılı sabit ve hareketli yük etkisindedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

L 200×150×10	
b = 200 mm	t = 10 mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 10.6 uyarınca, k_v=1.2 alınarak, kayma etkisinde gövde burkulma katsayısı,C_{v2}, *Yönetmelik* 10.3.1 uyarınca,

$$b/t = 200/10 = 20 \le 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{1.2(200000)/275} = 32.50 \quad \text{olduğundan}$$

$$C_{v2} = 1.0 \qquad (10.7a)$$

Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı,

$$V_n = 0.6F_y b t C_{v2} = 0.6(275)200(10)1.0(10)^{-3} = 330\ \text{kN} \qquad (10.15)$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(55) = 112$ kN/m $V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{112(2.5)}{2} = 140$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 55 = 75$ kN/m $V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{75(2.5)}{2} = 93.8$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımı	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımı
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(330) = 297$kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 330/1.67 = 197.60$ kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{140}{297} = 0.47 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{93.8}{197.60} = 0.47 \le 1.0$ ✓

Örnek 10.9

Enkesiti HE 450 A olarak belirlenen ve L = 3.0m açıklığa sahip basit kiriş, zayıf eksenine dik doğrultuda sırasıyla, w_G = 20 kN/m ve w_Q = 140 kN/m üniform yayılı sabit ve hareketli yükler etkisindedir.

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 450 A	
b_f = 300 mm	t_f = 21mm

Çözüm

a. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 10.7 uyarınca, k_v=1.2 alınarak, kayma etkisinde gövde burkulma katsayısı, C_{v2}, *Yönetmelik* 10.3.1 uyarınca,

$$h/t_f = (300/2)/21 = 7.14 \le 1.10\sqrt{k_v E/F_y} = 1.10\sqrt{1.2(200000)/355} = 28.60 \quad \text{olduğundan}$$

$$C_{v2} = 1.0 \qquad (10.7a)$$

Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı,

$$V_n = 0.6F_y b_f t_f C_{v2} = 2\times\left[0.6(355)300(21)1.0\right](10)^{-3} = 2684 \text{ kN} \qquad (10.16)$$

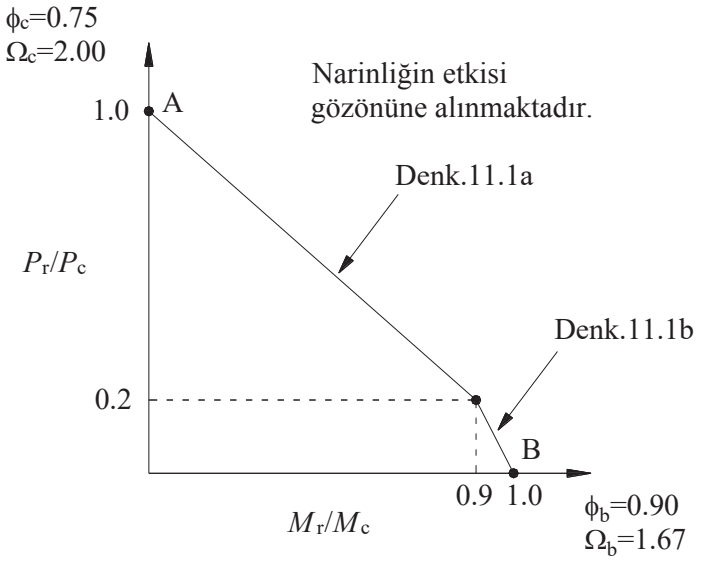
YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(20) + 1.6(140) = 248$ kN/m $V_u = \frac{w_u L}{2} = \frac{248(3.0)}{2} = 372$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 20 + 140 = 160$ kN/m $V_a = \frac{w_a L}{2} = \frac{160(3.0)}{2} = 240$ kN
b. Tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(2684) = 2416$ kN	$V_g = V_n/\Omega_v = 2684/1.67 = 1607$ kN
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{372}{2416} = 0.15 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{240}{1607} = 0.15 \le 1.0$ ✓

BÖLÜM 11 BİLEŞİK ETKİLER

Burulma etkisi altında veya burulma olmaksızın, eksenel kuvvet ve bir veya iki eksen etrafında eğilme (bileşik eğik eğilme) etkisindeki elemanlar ile sadece burulma etkisindeki elemanların tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 11 de belirtilen kurallara göre yapılacaktır.

Etkileşim denklemlerinde elemanın gerekli dayanımları, eleman bazındaki ve sistem genelindeki geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkisini gözönüne alan *ikinci mertebe analiz* ile *Yönetmelik* Bölüm 6 da belirtilen kurallara göre belirlenmelidir.

Eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisindeki çelik elemanların tasarımı için genel etkileşim diyagramı Şekil 11.1 de verilmektedir.



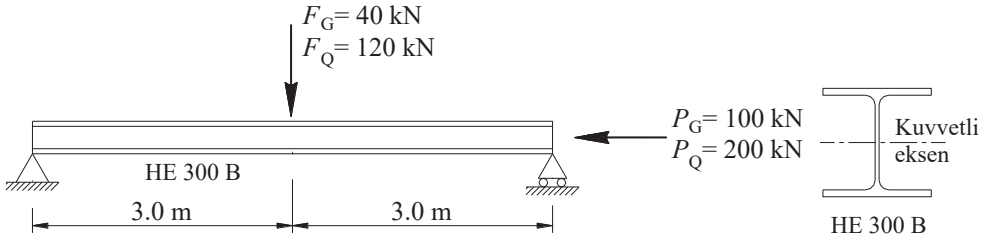
Şekil 11.1 Genel etkileşim diyagramı

Örnek 11.1

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 300 B enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 100 kN ve P_Q = 200 kN eksenel basınç kuvvetleri ile kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, F_G = 40 kN ve F_Q = 120 kN tekil yükler etkisindedir. Eleman mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 300 B		
$A = 14910$ mm^2	$I_x = 25170$ cm^4	$I_y = 8563$ cm^4
$J = 185$ cm^4	$W_{ex} = 1678$ cm^3	$W_{ey} = 570.9$ cm^3
$W_{px} = 1869$ cm^3	$W_{py} = 870.1$ cm^3	$C_w = 1688000$ cm^6
$d = 300$ mm	$b_f = 300$ mm	$h_o = 281$ mm
$h = 208$ mm	$t_f = 19$ mm	$t_w = 11$ mm
$i_x = 129.9$ mm	$i_y = 75.8$ mm	

Çözüm

Elemanın karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{2 \times t_f} = \frac{300}{2 \times 19} = 7.89 < \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{200000}{275}} = 15.1$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 5)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{208}{11} = 18.9 < \lambda_r = 1.49\sqrt{\frac{200000}{275}} = 40.2$$

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları narin değildir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca,

Eğilmeli burkulma sınır durumu

Enkesitin asal eksenlerine dik eleman burkulma boyları

$$L_{cx} = K_x L_x = 1.0 \times 6000 = 6000 \text{ mm}$$

$$L_{cy} = K_y L_y = 1.0 \times 6000 = 6000 \text{ mm}$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları

$$\lambda_x = \frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{6000}{129.9} = 46.2$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{6000}{75.8} = 79.2$$

$$\lambda_{maks} = \left(\lambda_x ; \lambda_y\right)_{maks} = \left(46.2 ; 79.2\right) = 79.2$$

Elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, (y-y) ekseni etrafında oluşan eğilmeli burkulma durumu belirleyecektir.

$$\lambda_{maks} = 79.2 \le 4.71\sqrt{\frac{200000}{275}} = 127.0 \qquad (8.2)$$

Elastik burkulma gerilmesi

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(79.2\right)^2} = 314.69 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) F_y = \left(0.658^{\frac{275}{314.69}}\right) 275 = 190.76 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı

$$P_n = F_{cr} A_g = 190.76 \times 14910 \times 10^{-3} = 2844.2 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_c = P_d = \phi_c P_n = 0.9 \times 2844.2 = 2559.8$ kN	$P_c = P_g = \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{2844.2}{1.67} = 1703.1$ kN

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{2 \times t_f} = \frac{300}{2 \times 19} = 7.89 < \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{200000}{275}} = 10.2$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{208}{11} = 18.9 < \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{200000}{275}} = 101.4$$

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları kompakt olarak sınıflandırılır.

Yönetmelik 9.2.2 uyarınca,

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = (1.76)(75.8)\sqrt{\frac{200000}{275}} = 3598 \text{ mm} \qquad (9.6a)$$

$$i_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}} = \frac{\sqrt{(8563)10^4 (1688)10^9}}{(1678)10^3} \qquad i_{ts} = 84.6 \text{ mm} \qquad (9.8a)$$

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7F_y}\sqrt{\frac{Jc}{W_{ex}h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex}h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \qquad (9.6b)$$

$$L_r = 1.95(84.6)\frac{200000}{0.7(275)}...$$

$$...\times\sqrt{\frac{185\times10^4\times1}{1678\times10^3\times281} + \sqrt{\left(\frac{185\times10^4\times1}{1678\times10^3\times281}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7\times275}{200000}\right)^2}}$$

$$L_r = 15873 \text{ mm}$$

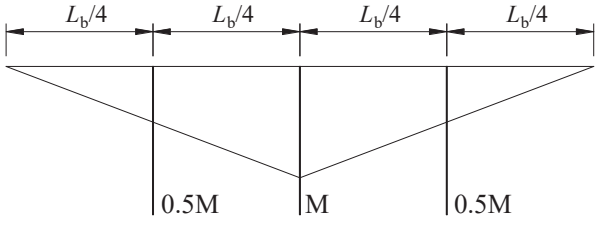
$L_p < (L_b = 6000 \text{ mm}) < L_r$ $\quad M_n$ Denk.(9.3) ile belirlenecektir

$$M_n = C_b\left[M_p - (M_p - 0.7F_y W_{ex})\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \le M_p \qquad (9.3)$$

Plastik eğilme momenti dayanımı

$$M_p = F_y W_{px} = 1869\times10^3 \times 275 \times 10^{-6} = 514 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

Moment düzeltme katsayısı C_b



$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \qquad (9.1)$$

$$C_b = \frac{12.5 \times M}{2.5 \times M + 3 \times 0.5M + 4 \times M + 3 \times 0.5M} = 1.32$$

$$M_n = 1.32\left[514 - \left(514 - 0.7 \times 275 \times 1678 \times 10^{-3}\right)\left(\frac{6 - 3.598}{15.873 - 3.598}\right)\right] = 629 \text{ kNm} \le M_p \text{ ✖}$$

$$M_n = M_p = 514 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9(514) = 462.6$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{514}{1.67} = 307.8$ kNm

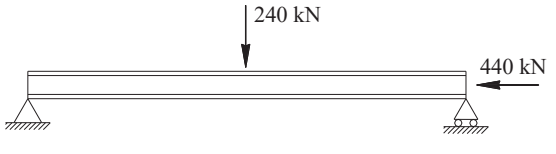
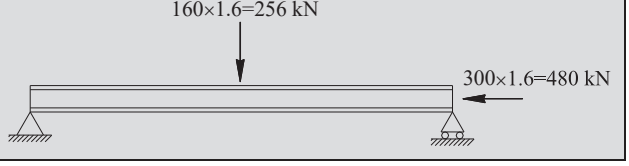
Yönetmelik 5.3 uyarınca,

Gerekli eksenel kuvvet dayanımı (P_r) ve gerekli eğilme momenti dayanımı (M_r)

YDKT	GKT
Eksenel yük (5.3.1)	Eksenel yük (5.3.2)
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 100 + 1.6 \times 200 = 440$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 100 + 200 = 300$ kN
Düşey yük (5.3.1)	Düşey yük (5.3.2)
$F_u = 1.2F_G + 1.6F_Q$ $F_u = 1.2 \times 40 + 1.6 \times 120 = 240$ kN	$F_a = F_G + F_Q$ $F_a = 40 + 120 = 160$ kN

Analizler ikinci mertebe etkilerini de içermelidir.

Yönetmelik 6.2.1(d) uyarınca ikinci mertebe hesabı GKT yük birleşiminin 1.6 katına eşit bir yükleme durumu için yapılacaktır. Ancak gerekli dayanım, analiz sonuçlarının 1.6 katsayısına bölünmesiyle elde edilecektir.

YDKT için yükleme durumu	GKT için yükleme durumu
	

İkinci mertebe etkileri gözönüne alan bilgisayar programı vasıtasıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

YDKT	GKT
İkinci Mertebe Analiz	İkinci Mertebe Analiz
M_r = 370.4 kNm	M_r = 396.1 kNm
Birinci Mertebe Analiz	Birinci Mertebe Analiz
$M = \frac{240 \times 6}{4} = 360\,\text{kNm}$	$M = \frac{256 \times 6}{4} = 384\,\text{kNm}$
İkinci mertebe etkiler nedeniyle %2.88 artış meydana gelmektedir.	İkinci mertebe etkiler nedeniyle %3.15 artış meydana gelmektedir.

Yönetmelik 6.5 esas alınarak yaklaşık ikinci mertebe analizi ile gerekli eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \qquad (6.7)$$

YDKT	GKT
$M_{nt} = \frac{240 \times 6}{4} = 360\,\text{kNm}$	$M_{nt} = \frac{256 \times 6}{4} = 384\,\text{kNm}$
$M_{lt} = 0$	$M_{lt} = 0$

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha P_r / P_{el}} \qquad (6.9)$$

$$P_{el} = \frac{\pi^2 EI^*}{(K_1 L)^2} \qquad (6.11)$$

Güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, C_m=1.0 değeri kullanılabilir.

$$P_{el} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 25170 \times 10^4}{(1 \times 6000)^2} \times 10^{-3} = 13800\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
$B_1 = \frac{1.0}{1 - 1 \times \frac{440}{13800}} = 1.033$ (6.9)	$B_1 = \frac{1.0}{1 - 1.6 \times \frac{300}{13800}} = 1.036$ (6.9)
$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$ (6.7) $M_r = 1.033 \times 360 = 371.9$ kNm	$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$ (6.7) $M_r = 1.036 \times 384 = 397.8$ kNm
Bilgisayar analizi ile M_r = 370.4 kNm	Bilgisayar analizi ile M_r = 396.1 kNm
%0.4 fark	%0.4 fark

Gerekli ve mevcut dayanımlar

YDKT	GKT
$P_r = P_u = 440$ kN	$P_r = P_a = \frac{480}{1.6} = 300$ kN
$M_r = M_u = 370.4$ kNm	$M_r = M_a = \frac{396.1}{1.6} = 247.6$ kNm
$P_c = P_d = 2559.8$ kN	$P_c = P_g = 1703.1$ kN
$M_{cx} = M_{dx} = 462.6$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = 307.8$ kNm

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

Bilgisayar analizi ile hesaplanan P_r ve M_r değerleri kullanılmıştır.

YDKT	GKT
a. Elemanın bileşik etkiler altında tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın bileşik etkiler altında güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} = \frac{440}{2559.8} = 0.17 < 0.2$	$\frac{P_r}{P_c} = \frac{300}{1703.1} = 0.18 < 0.2$
$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1b)	$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1b)
$\frac{440}{2\times 2559.8} + \left(\frac{370.4}{462.6}\right) = 0.89 \le 1.0$ ✓	$\frac{300}{2\times 1703.1} + \left(\frac{247.6}{307.8}\right) = 0.89 \le 1.0$ ✓

Örnek 11.2

Örnek 11.1'de verilen elemanın bileşik etkiler altında dayanımının *Yönetmelik* 11.1.3 kuralları ile kontrolü.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)

Çözüm

Kuvvetli asal eksen etrafındaki momentin etkin olduğu durumlarda *Yönetmelik* 11.1.3 kuralları kullanılabilir. $M_{ry} = 0$ olduğundan $M_{ry} / M_{cy} < 0.05$ koşulu sağlanmaktadır.

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları narin değildir (Bkz. Örnek 11.1).

Eğilme düzlemi içindeki mevcut eksenel basınç kuvveti dayanımı

$$L_{cx} = K_x L_x = 1.0 \times 6000 = 6000 \text{ mm}$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca narinlik oranları

$$\lambda_x = \frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{6000}{129.9} = 46.2$$

$$\lambda_x = 46.2 \le 4.71\sqrt{\frac{200000}{275}} = 127.0 \qquad (8.2)$$

Elastik burkulma gerilmesi

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(46.2)^2} = 924.80 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) F_y = \left(0.658^{\frac{275}{924.80}}\right) 275 = 242.82 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı

$$P_n = F_{cr} A_g = 242.82 \times 14910 \times 10^{-3} = 3620.4 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_{cx} = P_{dx} = \phi_c P_n = 0.9 \times 3620.4 = 3258.4 \text{ kN}$	$P_{cx} = P_{gx} = \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{3620.4}{1.67} = 2167.9 \text{ kN}$

Akma sınır durumu için eğilme düzlemindeki karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 1869\times10^3 \times 275\times10^{-6} = 514\,\text{kNm} \qquad (9.2)$$

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9\times514 = 462.6$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \dfrac{M_n}{\Omega_b} = \dfrac{514}{1.67} = 307.8$ kNm

İç kuvvetler Örnek 11.1'de verilmektedir. Bilgisayar analizi ile hesaplanan P_r ve M_r değerleri kullanılmıştır.

Yönetmelik 11.1.3(a) uyarınca, düzlem içi stabilite kontrolü

YDKT	GKT
a. Elemanın bileşik etkiler altında tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın bileşik etkiler altında güvenli dayanımının kontrolü
$\dfrac{P_r}{P_{cx}} = \dfrac{440}{3258.4} = 0.14 < 0.2$	$\dfrac{P_r}{P_{cx}} = \dfrac{300}{2167.9} = 0.14 < 0.2$
$\dfrac{P_r}{2P_{cx}} + \left(\dfrac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1b)	$\dfrac{P_r}{2P_{cx}} + \left(\dfrac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1b)
$\dfrac{440}{2\times3258.4} + \left(\dfrac{370.4}{462.6}\right) = 0.87 \le 1.0$ ✓	$\dfrac{300}{2\times2167.9} + \left(\dfrac{247.6}{307.8}\right) = 0.87 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 11.1.3(b) uyarınca, düzlemine dik burkulma ve yanal burulmalı burkulma kontrolü

$$\frac{P_r}{P_{cy}}\left(1.5 - 0.5\frac{P_r}{P_{cy}}\right) + \left(\frac{M_{rx}}{C_b M_{cx}}\right)^2 \le 1.0 \qquad (11.2)$$

Eğilme düzlemine dik doğrultuda mevcut eksenel kuvvet dayanımı Örnek 11.1'de hesaplanmıştır.

YDKT	GKT
Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_{cy} = P_d = \phi_c P_n = 0.9\times2844.2 = 2559.8$ kN	$P_{cy} = P_g = \dfrac{P_n}{\Omega_c} = \dfrac{2844.2}{1.67} = 1703.1$ kN

C_b=1.0 alınarak hesaplanan mevcut eğilme momenti dayanımı (M_{cx})

$L_p = 3598$ mm $\qquad L_r = 15873$ mm (Bkz. Örnek 11.1)

$L_p = 3598\text{ mm} < (L_b = 6000\text{ mm}) < L_r = 15873\text{ mm}$ (Bkz. Örnek 11.1)

M_n Denk.(9.3) ile belirlenecektir.

$M_p = 514$ kNm (Bkz. Örnek 11.1)

$$M_n = C_b\left[M_p - (M_p - 0.7F_yW_{ex})\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \le M_p \qquad (9.3)$$

$$M_n = \left[514 - \left(514 - 0.7\times 275\times 1678\times 10^{-3}\right)\left(\frac{6 - 3.598}{15.873 - 3.598}\right)\right] = 476.6 \text{ kNm} < M_p$$

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9\times 476.6 = 428.9$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{476.6}{1.67} = 285.4$ kNm

$C_b = 1.32$ (Bkz. Örnek 11.1)

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

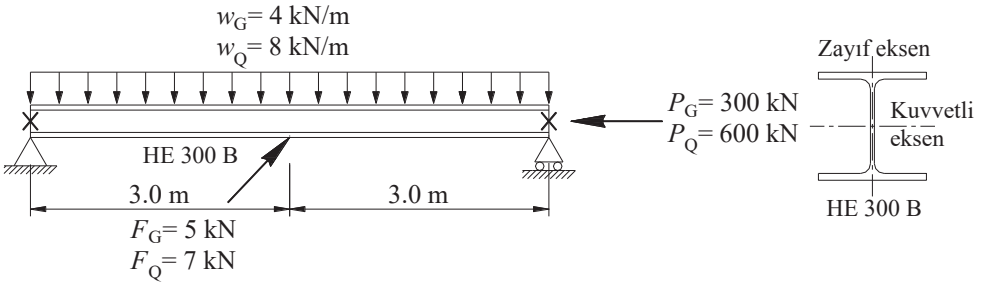
YDKT	GKT
a. Elemanın bileşik etkiler altında tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_{cy}}\left(1.5 - 0.5\frac{P_r}{P_{cy}}\right) + \left(\frac{M_{rx}}{C_bM_{cx}}\right)^2 \le 1.0$ (11.2)	$\frac{P_r}{P_{cy}}\left(1.5 - 0.5\frac{P_r}{P_{cy}}\right) + \left(\frac{M_{rx}}{C_bM_{cx}}\right)^2 \le 1.0$ (11.2)
$\frac{440}{2559.8}\left(1.5 - 0.5\frac{440}{2559.8}\right)$ $+\left(\frac{370.4}{1.32\times 428.9}\right)^2 = 0.67 \le 1.0$ ✓	$\frac{300}{1703.1}\left(1.5 - 0.5\frac{300}{1703.1}\right)$ $+\left(\frac{247.6}{1.32\times 285.4}\right)^2 = 0.68 \le 1.0$ ✓

Örnek 11.3

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 300 B enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 300 kN ve P_Q = 600 kN eksenel basınç kuvvetleri ile kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 4 kN/m ve w_Q = 8 kN/m üniform yayılı yükler ve zayıf eksenine dik doğrultudaki F_G = 5 kN ve F_Q = 7 kN tekil yüklerin etkisindedir. Eleman mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 300 B özellikleri Örnek 11.1'de verilmiştir

Çözüm

Elemanın karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımın belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları narin değildir (Bkz. Örnek 11.1).

Örnek 11.1'e göre

YDKT	GKT
Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_c = P_d = \phi_c P_n = 0.9 \times 2844.2 = 2559.8$ kN	$P_c = P_g = \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{2844.2}{1.67} = 1703.1$ kN

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (x-ekseni etrafında eğilme durumu)

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları kompakt sınıfındadır (Bkz. Örnek 11.1).

Yönetmelik 9.2.2 uyarınca,

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

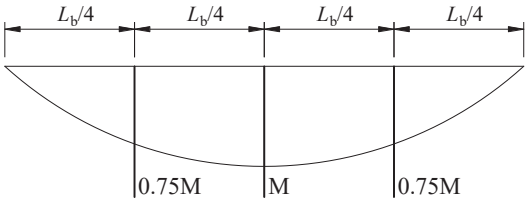
$L_p = 3598\,\text{mm}$ $L_r = 15873\,\text{mm}$ (Bkz. Örnek 11.1)

$L_p = 3598\,\text{mm} < (L_b = 6000\ \text{mm}) < L_r = 15873\,\text{mm}$ (Bkz. Örnek 11.1)

M_n Denk.(9.3) ile belirlenecektir

$M_p = 514\,\text{kNm}$ (Bkz. Örnek 11.1)

Moment düzeltme katsayısı, C_b



$$C_b = \frac{12.5 \times M}{2.5 \times M + 3 \times 0.75M + 4 \times M + 3 \times 0.75M} = 1.14 \qquad (9.1)$$

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7 F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \le M_p \qquad (9.3)$$

$$M_n = 1.14 \left[514 - \left(514 - 0.7 \times 275 \times 1678 \times 10^{-3} \right) \left(\frac{6 - 3.598}{15.873 - 3.598} \right) \right] = 543\,\text{kNm} \le M_p \quad \times$$

$$M_{nx} = M_{px} = 514\,\text{kNm}$$

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (y-ekseni etrafında eğilme durumu)

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 13)

$$\lambda = \frac{b}{2 \times t_f} = \frac{300}{2 \times 19} = 7.89 < \lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 10.2$$

Eleman enkesitinin başlık parçası kompakt sınıfı koşulunu sağlamaktadır. Gövde parçası için ayrı bir kontrole gerek yoktur.

Akma sınır durumu için *Yönetmelik* 9.6.1'e göre hesaplanan zayıf eksen etrafında eğilme momenti dayanımı

$$M_{ny} = M_{py} = W_{py} F_y \le 1.6 W_{ey} F_y \qquad (9.39)$$

$$M_{ny} = M_{py} = 870.1 \times 10^{-3} \times 275 = 239\ \text{kNm} \le 1.6 \times 570.9 \times 10^{-3} \times 275 = 251\ \text{kNm}$$

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımları	Güvenli eğilme momenti dayanımları
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9 \times 514 = 462.6$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{514}{1.67} = 307.8$ kNm
$M_{cy} = M_{dy} = \phi_b M_n = 0.9 \times 239 = 215.1$ kNm	$M_{cy} = M_{gy} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{239}{1.67} = 143.1$ kNm

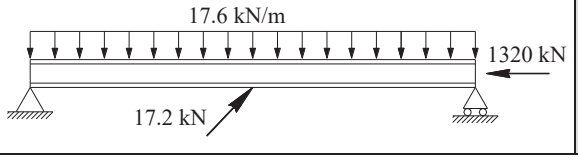
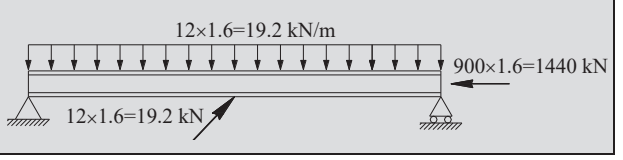
Yönetmelik 5.3 uyarınca,

Gerekli eksenel kuvvet dayanımı (P_r) ve gerekli eğilme momenti dayanımları (M_{rx}, M_{ry})

YDKT	GKT
Eksenel yük (5.3.1)	Eksenel yük (5.3.2)
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 300 + 1.6 \times 600 = 1320$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 300 + 600 = 900$ kN
Düşey yayılı yük (5.3.1)	Düşey yayılı yük (5.3.2)
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $w_u = 1.2 \times 4 + 1.6 \times 8 = 17.6$ kN/m	$w_a = w_G + w_Q$ $w_a = 4 + 8 = 12$ kN/m
Yatay yük (5.3.1)	Yatay yük (5.3.2)
$F_u = 1.2F_G + 1.6F_Q$ $F_u = 1.2 \times 5 + 1.6 \times 7 = 17.2$ kN	$F_a = F_G + F_Q$ $F_a = 5 + 7 = 12$ kN

Analizler ikinci mertebe etkilerini de içermelidir.

Yönetmelik 6.2.1(d) uyarınca ikinci mertebe hesabı GKT yük birleşiminin 1.6 katına eşit bir yükleme durumu için yapılacaktır. Ancak gerekli dayanım, analiz sonuçlarının 1.6 katsayısına bölünmesiyle elde edilecektir.

YDKT yükleme durumu	GKT yükleme durumu
	

İkinci mertebe etkileri gözönüne alan bir bilgisayar yazılımı yardımıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

x-ekseni etrafında eğilme etkisi durumunda,

YDKT	GKT
İkinci Mertebe Analiz	İkinci Mertebe Analiz
$M_{rx} = 88.3$ kNm	$M_{rx} = 97.4$ kNm
Birinci Mertebe Analiz	Birinci Mertebe Analiz
$M_x = \frac{17.6 \times 6^2}{8} = 79.2$ kNm	$M_x = \frac{19.2 \times 6^2}{8} = 86.4$ kNm
İkinci mertebe etkilerinden dolayı %11.5 artış meydana gelmektedir.	İkinci mertebe etkilerinden dolayı %12.7 artış meydana gelmektedir.

y-ekseni etrafında eğilme etkisi durumunda,

YDKT	GKT
İkinci Mertebe Analiz	İkinci Mertebe Analiz
$M_{ry} = 34.0$ kNm	$M_{ry} = 39.0$ kNm
Birinci Mertebe Analiz	Birinci Mertebe Analiz
$M_y = \frac{17.2 \times 6}{4} = 25.8$ kNm	$M_y = \frac{19.2 \times 6}{4} = 28.8$ kNm
İkinci mertebe etkilerinden dolayı %31.8 artış meydana gelmektedir.	İkinci mertebe etkilerinden dolayı %35.4 artış meydana gelmektedir.

Yönetmelik 6.5 e göre yaklaşık ikinci mertebe analizi ile gerekli eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \qquad (6.7)$$

YDKT	GKT
$M_{nt} = M_x = 79.2$ kNm	$M_{nt} = M_x = 86.4$ kNm
$M_{nt} = M_y = 25.8$ kNm	$M_{nt} = M_y = 28.8$ kNm
$M_{lt} = 0$	$M_{lt} = 0$

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha P_r / P_{el}} \qquad (6.9)$$

$$P_{el} = \frac{\pi^2 EI^*}{(K_1 L)^2} \qquad (6.11)$$

x-ekseni etrafında eğilme etkisi durumunda,

Güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, $C_m = 1.0$ değeri kullanılabilir.

$$P_{elx} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 25170 \times 10^4}{(1 \times 6000)^2} \times 10^{-3} = 13800 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
$B_{1x} = \dfrac{1.0}{1-1\times\dfrac{1320}{13800}} = 1.11$ (6.9)	$B_{1x} = \dfrac{1.0}{1-1.6\times\dfrac{900}{13800}} = 1.12$ (6.9)
$M_{rx} = B_{1x}M_{nt} + B_{2x}M_{lt}$ (6.7) $M_{rx} = 1.11\times 79.2 + 0 = 87.9$ kNm	$M_{rx} = B_{1x}M_{nt} + B_{2x}M_{lt}$ (6.7) $M_{rx} = 1.12\times 86.4 + 0 = 96.8$ kNm
Bilgisayar analizi ile M_{rx} =88.3 kNm	Bilgisayar analizi ile M_{rx} = 97.4 kNm
%0.5 fark	%0.6 fark

y-ekseni etrafında eğilme etkisi durumunda,

$$P_{ely} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 8563 \times 10^4}{(1\times 6000)^2} \times 10^{-3} = 4695 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
$B_{1y} = \dfrac{1.0}{1-1\times\dfrac{1320}{4695}} = 1.39$ (6.9)	$B_{1y} = \dfrac{1.0}{1-1.6\times\dfrac{900}{4695}} = 1.44$ (6.9)
$M_{ry} = B_{1y}M_{nt} + B_{2y}M_{lt}$ (6.7) $M_{ry} = 1.39\times 25.8 + 0 = 35.9$ kNm	$M_{ry} = B_{1y}M_{nt} + B_{2y}M_{lt}$ (6.7) $M_{ry} = 1.44\times 28.8 + 0 = 41.5$ kNm
Bilgisayar analizi ile M_{ry} = 34.0 kNm	Bilgisayar analizi ile M_{ry} = 39.0 kNm
%5.6 fark	%6.4 fark

Not: Fark C_m değerinin güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla 1.0 e eşit olarak alınmasından kaynaklanmaktadır. Bu yükleme durumu için C_m = 0.93 olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değerin kullanılması halinde, analiz sonuçları arasındaki fark azalmaktadır.

Gerekli ve mevcut dayanımlar

YDKT	GKT
$P_r = 1320$ kN	$P_r = \dfrac{1440}{1.6} = 900$ kN
$M_{rx} = 88.3$ kNm	$M_{rx} = \dfrac{97.4}{1.6} = 60.9$ kNm
$M_{ry} = 34.0$ kNm	$M_{ry} = \dfrac{39.0}{1.6} = 24.4$ kNm
$P_c = 2559.8$ kN	$P_c = 1703.1$ kN
$M_{cx} = 462.6$ kNm	$M_{cx} = 307.8$ kNm
$M_{cy} = 215.1$ kNm	$M_{cy} = 143.1$ kNm

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

Bilgisayar analizi ile hesaplanan P_r , M_{rx} ve M_{ry} değerleri kullanılmıştır.

YDKT	GKT
a. Elemanın bileşik etkiler altında tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın bileşik etkiler altında güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} = \frac{1320}{2559.8} = 0.52 \geq 0.2$	$\frac{P_r}{P_c} = \frac{900}{1703.1} = 0.53 \geq 0.2$
$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1.0$ (11.1a)	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1.0$ (11.1a)
$\frac{1320}{2559.8} + \frac{8}{9}\left(\frac{88.3}{462.6} + \frac{34}{215.1}\right) = 0.83 \leq 1.0$ ✓	$\frac{900}{1703.1} + \frac{8}{9}\left(\frac{60.9}{307.8} + \frac{24.4}{143.1}\right) = 0.86 \leq 1.0$ ✓

Örnek 11.4

Örnek 11.3'te verilen elemanın bileşik etkiler altında dayanımının *Yönetmelik* 11.2 kuralları ile kontrolü.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)

Çözüm

Elemanın karakteristik basınç kuvveti ve eğilme momenti dayanımları Örnek 11.3'te hesaplanmıştır. Eleman iç kuvvetleri de Örnek 11.3'te verilmektedir.

İç kuvvetler ve dayanımlar

YDKT	GKT
$P_r = 1320\,\text{kN}$	$P_r = 900\,\text{kN}$
$M_{rx} = 88.3\,\text{kNm}$	$M_{rx} = 60.9\,\text{kNm}$
$M_{ry} = 34.0\,\text{kNm}$	$M_{ry} = 24.4\,\text{kNm}$
$\phi_c P_n = 2559.8\ \text{kN}$	$\dfrac{P_n}{\Omega_c} = 1703.1\,\text{kN}$
$\phi_b M_{nx} = 462.6\ \text{kNm}$	$\dfrac{M_{nx}}{\Omega_b} = 307.8\,\text{kNm}$
$\phi_b M_{ny} = 215.1\ \text{kNm}$	$\dfrac{M_{ny}}{\Omega_b} = 143.1\,\text{kNm}$

Eksenel gerilme, eğilme gerilmeleri ve mevcut sınır gerilmelerin hesabı

YDKT	GKT
$f_{ra} = \dfrac{P_r}{A} = \dfrac{1320}{14910\times10^{-3}} = 88.5\ \text{N/mm}^2$	$f_{ra} = \dfrac{P_r}{A} = \dfrac{900}{14910\times10^{-3}} = 60.4\ \text{N/mm}^2$
$f_{rbw} = \dfrac{M_{rx}}{W_{ex}} = \dfrac{88.3\times10^3}{1678} = 52.6\ \text{N/mm}^2$	$f_{rbw} = \dfrac{M_{rx}}{W_{ex}} = \dfrac{60.9\times10^3}{1678} = 36.3\ \text{N/mm}^2$
$f_{rbz} = \dfrac{M_{ry}}{W_{ey}} = \dfrac{34.0\times10^3}{570.9} = 59.6\ \text{N/mm}^2$	$f_{rbz} = \dfrac{M_{ry}}{W_{ey}} = \dfrac{24.4\times10^3}{570.9} = 42.7\ \text{N/mm}^2$
$F_{ca} = \dfrac{\phi_c P_n}{A} = \dfrac{2559.8}{14910\times10^{-3}} = 171.7\ \text{N/mm}^2$	$F_{ca} = \dfrac{P_n}{\Omega_c A} = \dfrac{1703.1}{14910\times10^{-3}} = 114.2\ \text{N/mm}^2$
$F_{cbw} = \dfrac{\phi_b M_{nx}}{W_{ex}} = \dfrac{462.6\times10^3}{1678} = 275.7\ \text{N/mm}^2$	$F_{cbw} = \dfrac{M_{nx}}{\Omega_b W_{ex}} = \dfrac{307.8\times10^3}{1678} = 183.4\ \text{N/mm}^2$
$F_{cbz} = \dfrac{\phi_b M_{ny}}{W_{ey}} = \dfrac{215.1\times10^3}{570.9} = 376.8\ \text{N/mm}^2$	$F_{cbz} = \dfrac{M_{ny}}{\Omega_b W_{ey}} = \dfrac{143.1\times10^3}{570.9} = 250.7\ \text{N/mm}^2$

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

$$\left|\frac{f_{ra}}{F_{ca}}+\frac{f_{rbw}}{F_{cbw}}+\frac{f_{rbz}}{F_{cbz}}\right|\le 1.0$$

(11.3)

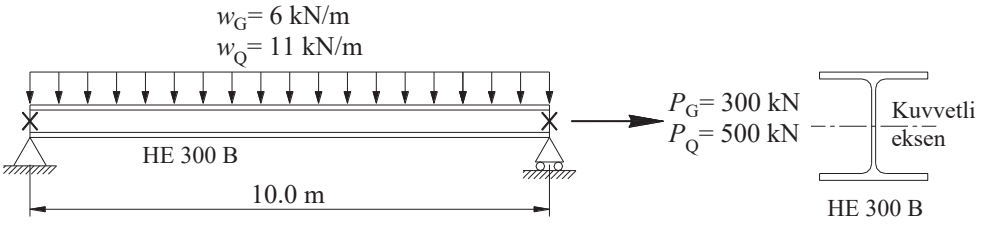
YDKT	GKT
a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\left\|\frac{88.5}{171.7}+\frac{52.6}{275.7}+\frac{59.6}{376.8}\right\|=0.86\le 1.0$ ✓	$\left\|\frac{60.4}{114.2}+\frac{36.3}{183.4}+\frac{42.7}{250.7}\right\|=0.90\le 1.0$ ✓

Örnek 11.5

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 300 B enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 300 kN ve P_Q = 500 kN eksenel çekme kuvvetleri ile kuvvetli eksenine dik olmak üzere, sırasıyla, w_G = 6 kN/m ve w_Q = 11 kN/m yayılı yükler etkisindedir. Eleman mesnetlerde yanal olarak desteklenmiştir.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 300 B profilinin özellikleri Örnek 11.1'de verilmektedir.

Çözüm

Yönetmelik 7.2 ye göre elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

$$P_n = T_n = F_y A_g = 275 \times 14910 \times 10^{-3} = 4100.3 \text{ kN} \qquad (7.2)$$

YDKT	GKT
Tasarım eksenel çekme kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel çekme kuvveti dayanımı
$P_c = \phi_t P_n = 0.9 \times 4100.3 = 3690.3$ kN	$P_c = \dfrac{P_n}{\Omega_t} = \dfrac{4100.3}{1.67} = 2455.3$ kN

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları kompakt sınıfındadır. (Bkz. Örnek 11.1)

Yönetmelik 9.2.2 uyarınca,

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

$L_p = 3598$ mm $L_r = 15873$ mm (Bkz. Örnek 11.1)

$L_p = 3598 \text{ mm} < (L_b = 10000 \text{ mm}) < L_r = 15873 \text{ mm}$ (Bkz. Örnek 11.1)

M_n Denk.(9.3) ile belirlenecektir.

$M_p = 514$ kNm (Bkz. Örnek 11.1)

$C_b = 1.14$ (Bkz. Örnek 11.3)

Yönetmelik 11.1.2 uyarınca, moment düzeltme katsayısı C_b'nin değeri $\sqrt{1+\frac{\alpha P_r}{P_{ey}}}$ katsayısı ile çarpılabilir.

$$P_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{L_b^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 8563 \times 10^4}{10000^2} \times 10^{-3} = 1690.3 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
$P_r = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_r = P_u = 1.2\times 300 + 1.6\times 500 = 1160$ kN	$P_r = P_a = P_G + P_Q$ $P_r = P_a = 300 + 500 = 800$ kN
$\sqrt{1+\frac{1\times 1160}{1690.3}} = 1.30$ (11.1.2)	$\sqrt{1+\frac{1.6\times 800}{1690.3}} = 1.33$ (11.1.2)
$C_b = 1.14\times 1.30 = 1.48$	$C_b = 1.14\times 1.33 = 1.52$

YDKT yöntemi için

$$M_n = 1.48\left[514 - \left(514 - 0.7\times 275\times 1678\times 10^{-3}\right)\left(\frac{10-3.598}{15.873-3.598}\right)\right] = 613 \text{ kNm} \le M_p \quad \text{(9.3)}$$

$M_n = M_p = 514$ kNm

GKT yöntemi için

$$M_n = 1.52\left[514 - \left(514 - 0.7\times 275\times 1678\times 10^{-3}\right)\left(\frac{10-3.598}{15.873-3.598}\right)\right] = 630 \text{ kNm} \le M_p \quad \text{(9.3)}$$

$M_n = M_p = 514$ kNm

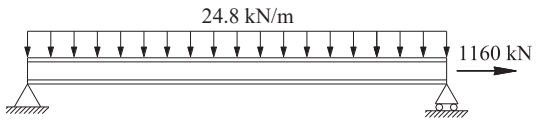
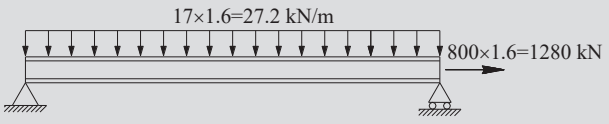
YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9\times 514 = 462.6$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{514}{1.67} = 307.8$ kNm

Gerekli eksenel çekme kuvveti dayanımı (P_r) ve gerekli eğilme momenti dayanımı (M_r)

YDKT	GKT
Eksenel yük (5.3.1)	Eksenel yük (5.3.2)
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2\times 300 + 1.6\times 500 = 1160$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 300 + 500 = 800$ kN
Düşey yayılı yük (5.3.1)	Düşey yayılı yük (5.3.2)
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $w_u = 1.2\times 6 + 1.6\times 11 = 24.8$ kN/m	$w_a = w_G + w_Q$ $w_a = 6 + 11 = 17$ kN/m

Analizler ikinci mertebe etkileri de içermelidir.

Yönetmelik 6.2.1(d) uyarınca ikinci mertebe hesabı GKT yük birleşiminin 1.6 katına eşit bir yükleme durumu için yapılacaktır. Ancak gerekli dayanım, analiz sonuçlarının 1.6 katsayısına bölünmesiyle elde edilecektir.

YDKT yöntemi için yükleme durumu	GKT yöntemi için yükleme durumu
	

İkinci mertebe etkileri gözönüne alan bir bilgisayar yazılımı yardımıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

YDKT	GKT
İkinci Mertebe Analiz	İkinci Mertebe Analiz
$M_{rx} = 248.9$ kNm	$M_{rx} = 267.5$ kNm
Birinci Mertebe Analiz	Birinci Mertebe Analiz
$M_x = \dfrac{24.8 \times 10^2}{8} = 310.0\,\text{kNm}$	$M_x = \dfrac{27.2 \times 10^2}{8} = 340.0\,\text{kNm}$
İkinci mertebe etkileri nedeniyle %19.7 azalma meydana gelmektedir.	İkinci mertebe etkileri nedeniyle %21.3 azalma meydana gelmektedir.

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

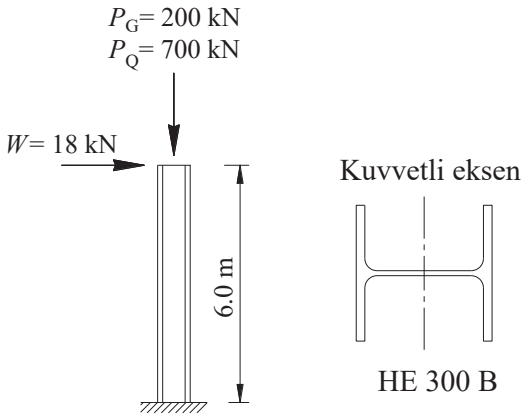
YDKT	GKT
a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\dfrac{P_r}{P_c} = \dfrac{1160}{3690.3} = 0.31 \geq 0.2$	$\dfrac{P_r}{P_c} = \dfrac{800}{2455.3} = 0.33 \geq 0.2$
$\dfrac{P_r}{P_c} + \dfrac{8}{9}\left(\dfrac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \leq 1.0$ (11.1a)	$\dfrac{P_r}{P_c} + \dfrac{8}{9}\left(\dfrac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \leq 1.0$ (11.1a)
$\dfrac{1160}{3690.3} + \dfrac{8}{9}\left(\dfrac{248.9}{462.6}\right) = 0.79 \leq 1.0$ ✓	$\dfrac{800}{2455.3} + \dfrac{8}{9}\left(\dfrac{167.2}{307.8}\right) = 0.81 \leq 1.0$ ✓

Örnek 11.6

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen HE 300 B enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 200 kN ve P_Q = 700 kN eksenel basınç kuvvetleri ile kuvvetli eksenine dik olmak üzere, W = 18 kN yatay rüzgar yükü etkisindedir. Elemanın eğilme düzlemine dik burkulması önlenmiştir. Burkulma boyu yöntemini esas alarak,

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 300 B nin enkesit özellikleri Örnek 11.1'de verilmektedir.

Çözüm

Elemanın karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde enkesit parçaları narin değildir (Bkz. Örnek 11.1).

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca,

Eğilmeli burkulma sınır durumu

Elemanın basınç kuvveti dayanımını, (x-x) ekseni etrafında oluşan eğilmeli burkulma durumu belirleyecektir. (y-y) ekseni etrafında burkulma önlenmiştir.

Yönetmelik 6.4.3(2)(a) uyarınca temel dönmesinin sıfıra eşit olduğu varsayılarak $G = 0$ olarak alınmıştır. $G_A = 0$ ve $G_B = \infty$ olması durumu nedeniyle, burkulma boyu katsayısı *Yönetmelik* Şekil 6.2'den $K = 2.0$ olarak elde edilir.

$$\lambda_{maks} = \frac{2.0 \times 6000}{129.9} = 92.4 \le 4.71\sqrt{\frac{200000}{275}} = 127.0 \qquad (8.2)$$

Elastik burkulma gerilmesi

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(92.4)^2} = 231.2 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi

$$F_{cr} = \left(0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right) F_y = \left(0.658^{\frac{275}{231.2}}\right) 275 = 167.2 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı

$$P_n = F_{cr} A_g = 167.2 \times 14910 \times 10^{-3} = 2493.0 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_c = \phi_c P_n = 0.9 \times 2493.0 = 2243.7$ kN	$P_c = \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{2493.0}{1.67} = 1492.8$ kN

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (x-ekseni etrafında eğilme durumu)

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları kompakt sınıfındadır. (Bkz. Örnek 11.1)

Yönetmelik 9.2.2 uyarınca,

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

$L_p = 3598$ mm $\qquad L_r = 15873$ mm (Bkz. Örnek 11.1)

$L_p = 3598 \text{ mm} < (L_b = 6000 \text{ mm}) < L_r = 15873 \text{ mm}$ (Bkz. Örnek 11.1)

M_n Denk.(9.3) ile belirlenecektir

$M_p = 514$ kNm (Bkz. Örnek 11.1)

Moment düzeltme katsayısı, C_b

Konsol elemanlarda Yönetmelik 9.1(e) uyarınca, Denk.(9.1) ile tanımlanan C_b ifadeleri geçerli değildir ve C_b=1.0 alınmalıdır.

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7 F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \le M_p \qquad (9.3)$$

$$M_n = 1.0 \left[514 - \left(514 - 0.7 \times 275 \times 1678 \times 10^{-3}\right) \left(\frac{6 - 3.598}{15.873 - 3.598} \right) \right] = 476.6 \text{ kNm} < M_p$$

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9 \times 476.6 = 428.9$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{476.6}{1.67} = 285.4$ kNm

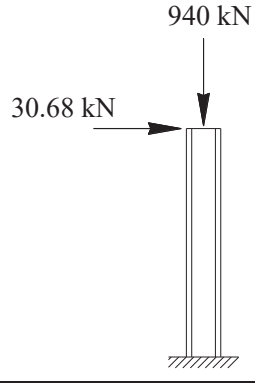
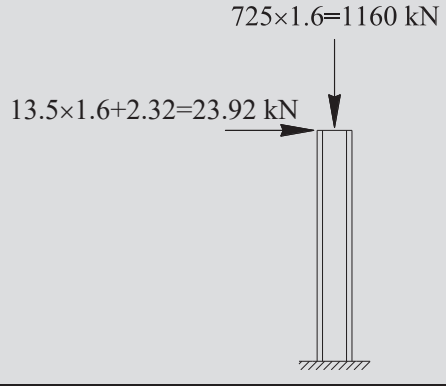
Yönetmelik 5.3 uyarınca,

Gerekli eksenel kuvvet dayanımı (P_r) ve gerekli eğilme momenti dayanımı (M_r)

YDKT	GKT
$1.2G + 1.0Q + 1.6W$ (5.3.1)	$G + 0.75Q + 0.75W$ (5.3.2)
Eksenel yük	Eksenel yük
$P_u = 1.2P_G + 1.0P_Q$ $P_u = 1.2 \times 200 + 1.0 \times 700 = 940$ kN	$P_a = P_G + 0.75P_Q$ $P_a = 200 + 0.75 \times 700 = 725$ kN
Yatay yük	Yatay yük
$W_u = 1.6W$ $W_u = 1.6 \times 18 = 28.8$ kN	$W_a = 0.75W$ $W_a = 0.75 \times 18 = 13.5$ kN
Fiktif yük (6.2.2.2)	Fiktif yük (6.2.2.2)
$N = 0.002 \times 1 \times 940 = 1.88$ kN (6.1)	$N = 0.002 \times 1.6 \times 725 = 2.32$ kN (6.1)

Analizler ikinci mertebe etkileri de içermelidir.

Yönetmelik 6.2.1(d) uyarınca ikinci mertebe hesabı GKT yük birleşiminin 1.6 katına eşit bir yükleme durumu için yapılacaktır. Ancak gerekli dayanım, analiz sonuçlarının 1.6 katsayısına bölünmesiyle elde edilecektir.

YDKT yöntemi için yükleme durumu	GKT yöntemi için yükleme durumu
	

İkinci mertebe etkileri gözönüne alan bir bilgisayar yazılımı yardımıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

YDKT	GKT
Mesnette İkinci Mertebe Eğilme Momenti	Mesnette İkinci Mertebe Eğilme Momenti
M_{rx} = 241.44 kNm	M_{rx} = 204.12 kNm
Mesnette Birinci Mertebe Eğilme Momenti	Mesnette Birinci Mertebe Eğilme Momenti
M_{rx} = 184.08 kNm	M_{rx} = 143.52 kNm
İkinci mertebe etkileri nedeniyle %31.2 artış meydana gelmektedir.	İkinci mertebe etkileri nedeniyle %42.2 artış meydana gelmektedir.

Yönetmelik 6.5 esas alınarak yaklaşık ikinci mertebe analiz ile gerekli eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \qquad (6.7)$$

YDKT	GKT
$M_{nt} = 0$	$M_{nt} = 0$
$M_{lt} = 30.68 \times 6 = 184.08\,\text{kNm}$	$M_{lt} = 23.92 \times 6 = 143.52\,\text{kNm}$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \dfrac{\alpha P_{kat}}{P_{e,kat}}} \qquad (6.12)$$

$$P_{e,kat} = R_M \frac{HL}{\Delta_H} \qquad (6.13)$$

$$R_M = 1 - 0.15\left(P_{mf}/P_{kat}\right) \qquad (6.14)$$

Tek elemandan oluşan bu sistemde P_{mf}/P_{kat} = 1.0 olarak elde edilir. Bu durumda, R_M = 0.85 olarak hesaplanır.

YDKT	GKT
İkinci mertebe etkiler terk edilerek yapılan analiz sonucunda 44.6mm tepe yerdeğiştirmesi elde edilmektedir.	İkinci mertebe etkiler terk edilerek yapılan analiz sonucunda 34.8mm tepe yerdeğiştirmesi elde edilmektedir.
$P_{e,kat} = 0.85\dfrac{30.68 \times 6000}{44.6} = 3508\,\text{kN}$ (6.13)	$P_{e,kat} = 0.85\dfrac{23.92 \times 6000}{34.8} = 3506\,\text{kN}$ (6.13)
$B_2 = \dfrac{1}{1 - \dfrac{1 \times 940}{3508}} = 1.37$ (6.12)	$B_2 = \dfrac{1}{1 - \dfrac{1.6 \times 725}{3506}} = 1.49$ (6.12)
$M_{rx} = 0 + 1.37 \times 184.08 = 252.2\,\text{kNm}$	$M_{rx} = 0 + 1.49 \times 143.52 = 213.8\,\text{kNm}$
Bilgisayar analizi ile %4.5 fark	Bilgisayar analizi ile %4.7 fark
$B_2 = 1.37 \le 1.50$ *Yönetmelik* 6.4.1(b) uyarınca, burkulma boyu yöntemi kullanılabilir	$B_2 = 1.49 \le 1.50$ *Yönetmelik* 6.4.1(b) uyarınca, burkulma boyu yöntemi kullanılabilir

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

YDKT	GKT
a. Elemanın bileşik etkiler altında tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın bileşik etkiler altında güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} = \frac{940}{2243.7} = 0.42 > 0.2$	$\frac{P_r}{P_c} = \frac{725}{1492.8} = 0.49 > 0.2$
$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1a)	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1a)
$\frac{940}{2243.7} + \frac{8}{9}\left(\frac{241.44}{428.9}\right) = 0.92 \le 1.0$ ✓	$\frac{725}{1492.8} + \frac{8}{9}\left(\frac{127.6}{285.4}\right) = 0.88 \le 1.0$ ✓

Örnek 11.7

Örnek 11.6'da verilen elemanın genel analiz yöntemi kullanılarak kontrolü.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)

Çözüm

Elemanın karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yerel burkulma kontrolü Örnek 11.6'da verilmektedir.

Eğilmeli burkulma sınır durumu

Elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, x-ekseni etrafında oluşan eğilmeli burkulma durumu belirleyecektir. y-ekseni etrafında burkulma önlenmiştir. Stabilite kontrolünde *Yönetmelik* 6.3.3 uyarınca, $K = 1.0$ olarak alınacaktır.

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{1.0 \times 6000}{129.9} = 46.2 \le 4.71\sqrt{\frac{200000}{275}} = 127.0 \qquad (8.2)$$

Elastik burkulma gerilmesi

$$F_{\text{e}} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{\text{cx}}}{i_{\text{x}}}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{(46.2)^2} = 924.8 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi

$$F_{\text{cr}} = \left(0.658^{\frac{F_{\text{y}}}{F_{\text{e}}}}\right) F_y = \left(0.658^{\frac{275}{924.8}}\right) 275 = 242.8 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı

$$P_{\text{n}} = F_{\text{cr}} A_{\text{g}} = 242.8 \times 14910 \times 10^{-3} = 3620.1 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımı
$P_{\text{c}} = \phi_{\text{c}} P_{\text{n}} = 0.9 \times 3620.1 = 3258.1 \text{ kN}$	$P_{\text{c}} = \frac{P_{\text{n}}}{\Omega_{\text{c}}} = \frac{3620.1}{1.67} = 2167.7 \text{ kN}$

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (x-ekseni etrafında eğilme durumu)

Hesap adımları Örnek 11.6 ile aynıdır.

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{\text{cx}} = M_{\text{dx}} = \phi_{\text{b}} M_{\text{n}} = 0.9 \times 476.6 = 428.9 \text{ kNm}$	$M_{\text{cx}} = M_{\text{gx}} = \frac{M_{\text{n}}}{\Omega_{\text{b}}} = \frac{476.6}{1.67} = 285.4 \text{ kNm}$

Gerekli eksenel kuvvet dayanımı, P_r ve gerekli eğilme momenti dayanımı, M_r,

Eleman yükleri Örnek 11.6'da hesaplanan yükler ile aynıdır.

Yönetmelik 6.3.2 uyarınca, genel analiz yöntemi ile tasarımda gerekli dayanımlar, rijitlik azaltılması uygulanarak hesaplanacaktır.

Yönetmelik 6.2.3(a) uyarınca, tüm yapı elemanlarının eğilme, kayma ve eksenel rijitlikleri 0.8 ile çarpılarak azaltılacaktır. Tüm yapı elemanlarının eğilme rijitlikleri ayrıca, *Yönetmelik* 6.2.3(b) uyarınca, τ_b ile çarpılacaktır.

$$P_{ns} = F_y A_g = 275 \times 14910 \times 10^{-3} = 4100 \text{ kN} \qquad (6.2)$$

YDKT	GKT
$\frac{\alpha P_r}{P_{ns}} = \frac{1.0 \times 940}{4100} = 0.23 < 0.5$	$\frac{\alpha P_r}{P_{ns}} = \frac{1.6 \times 725}{4100} = 0.28 < 0.5$
$\tau_b = 1.0$	$\tau_b = 1.0$

İkinci mertebe etkileri gözönüne alan bir bilgisayar yazılımı yardımıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmektedir.

YDKT	GKT
Mesnette İkinci Mertebe Eğilme Momenti	Mesnette İkinci Mertebe Eğilme Momenti
M_{rx} = 262.97 kNm	M_{rx} = 229.85 kNm
Mesnette Birinci Mertebe Eğilme Momenti	Mesnette Birinci Mertebe Eğilme Momenti
M_{rx} = 184.08 kNm	M_{rx} = 143.52 kNm
İkinci mertebe etkiler nedeniyle %42.9 artış meydana gelmektedir.	İkinci mertebe etkiler nedeniyle %60.2 artış meydana gelmektedir.

<u>Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü</u>

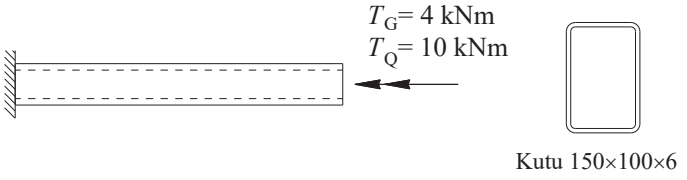
YDKT	GKT
a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} = \frac{940}{3258.1} = 0.29 > 0.2$	$\frac{P_r}{P_c} = \frac{725}{2167.7} = 0.33 > 0.2$
$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1a)	$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) \le 1.0$ (11.1a)
$\frac{940}{3258.1} + \frac{8}{9}\left(\frac{262.97}{428.9}\right) = 0.83 \le 1.0$ ✓	$\frac{725}{2167.7} + \frac{8}{9}\left(\frac{143.66}{285.4}\right) = 0.78 \le 1.0$ ✓

Örnek 11.8

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen, elektrik direnç kaynağı kullanılarak oluşturulan Kutu 150×100×6 enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, T_G = 4 kN/m ve T_Q = 10 kN/m burulma momenti etkisindedir.

a. Elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

Kutu 150×100×6

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca,

$$t = 0.93 \times 6 = 5.58 \text{ mm}$$

Çözüm

Elemanın karakteristik burulma momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 11.3.1 uyarınca,

$$T_n = F_{cr} C \qquad (11.4)$$

Yönetmelik 5.4.1.2(d) uyarınca,

$$h = H - 3t = 150 - 3 \times 5.58 = 133.3 \text{ mm}$$

Yönetmelik 11.3.1(b) uyarınca,

$$\frac{h}{t} = \frac{133.3}{5.58} = 23.9 \le 2.45\sqrt{\frac{200000}{275}} = 66.1$$

$$F_{cr} = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165 \text{ N/mm}^2 \qquad (11.7)$$

Burulma sabiti

$$C = 2(B-t)(H-t)t - 4.5(4-\pi)t^2 \qquad (11.10)$$

$$C = 2(100-5.58)(150-5.58) \times 5.58 - 4.5(4-\pi) \times 5.58^2 = 152059 \text{ mm}^3 \qquad (11.10)$$

$$T_n = F_{cr} C = 165 \times 152059 \times 10^{-6} = 25.1 \text{ kNm} \qquad (11.4)$$

YDKT	GKT
Tasarım burulma momenti dayanımı	Güvenli burulma momenti dayanımı
$T_d = \phi_T T_n = 0.9 \times 25.1 = 22.6$ kNm	$T_g = \frac{T_n}{\Omega_T} = \frac{25.1}{1.67} = 15.0$ kNm

Yönetmelik 5.3 uyarınca,

Gerekli burulma momenti dayanımı, T_r,

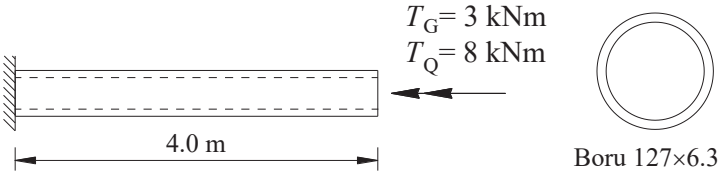
YDKT	GKT
Gerekli burulma momenti dayanımı	Gerekli burulma momenti dayanımı
$T_u = 1.2T_G + 1.6T_Q$ $T_u = 1.2 \times 4 + 1.6 \times 10 = 20.8$ kNm	$T_a = T_G + T_Q$ $T_a = 4 + 10 = 14$ kNm
a. Elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{T_u}{T_d} = \frac{20.8}{22.6} = 0.92 \le 1.0$ ✓	$\frac{T_a}{T_g} = \frac{14.0}{15.0} = 0.93 \le 1.0$ ✓

Örnek 11.9

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen, elektrik direnç kaynağı kullanılarak oluşturulan Boru 127×6.3 enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, T_G = 3 kN/m ve T_Q = 8 kN/m burulma momenti etkisindedir.

a. Elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

Boru 127×6.3

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca,

$$t = 0.93 \times 6.3 = 5.86 \text{ mm}$$

Çözüm

Elemanın karakteristik burulma momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 11.3.1 uyarınca,

$$T_n = F_{cr} C \tag{11.4}$$

Yönetmelik 11.3.1(a) uyarınca, boru enkesitli elemanlar için Denk.(11.5a) ve (11.5b) ile hesaplanan değerlerden büyüğü kritik gerilme, F_{cr}, olarak alınacaktır.

$$F_{cr} = \frac{1.23E}{\sqrt{\frac{L}{D}}\left(\frac{D}{t}\right)^{5/4}} \le 0.6F_y \tag{11.5a}$$

$$F_{cr} = \frac{1.23 \times 200000}{\sqrt{\frac{4000}{127}}\left(\frac{127}{5.86}\right)^{5/4}} = 937.4 \le 0.6 \times 275 = 165 \text{ N/mm}^2 \text{ ×} \tag{11.5a}$$

$$F_{cr} = \frac{0.6E}{\left(\frac{D}{t}\right)^{3/2}} \le 0.6F_y \tag{11.5b}$$

$$F_{cr} = \frac{0.6 \times 200000}{\left(\frac{127}{5.86}\right)^{3/2}} = 1189.4 \le 0.6 \times 275 = 165 \text{ N/mm}^2 \text{ ×} \tag{11.5b}$$

$$F_{cr} = 165 \text{ N/mm}^2$$

Burulma sabiti, C,

$$C = \frac{\pi(D-t)^2 t}{2} = \frac{\pi(127-5.86)^2 \times 5.86}{2} = 135080 \text{ mm}^3 \qquad (11.6)$$

$$T_n = F_{cr} C = 165 \times 135080 \times 10^{-6} = 22.3 \text{ kNm} \qquad (11.4)$$

YDKT	GKT
Tasarım burulma momenti dayanımı	Güvenli burulma momenti dayanımı
$T_d = \phi_T T_n = 0.9 \times 22.3 = 20.07$ kNm	$T_g = \frac{T_n}{\Omega_T} = \frac{22.3}{1.67} = 13.35$ kNm

Yönetmelik 5.3 uyarınca,

Gerekli burulma momenti dayanımı, (T_r)

YDKT	GKT
Gerekli burulma momenti dayanımı (5.3.1)	Gerekli burulma momenti dayanımı (5.3.2)
$T_u = 1.2T_G + 1.6T_Q$ $T_u = 1.2 \times 3 + 1.6 \times 8 = 16.4$ kNm	$T_a = T_G + T_Q$ $T_a = 3 + 8 = 11$ kNm
a. Elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{T_u}{T_d} = \frac{16.4}{20.07} = 0.82 \le 1.0$ ✓	$\frac{T_a}{T_g} = \frac{11.0}{13.35} = 0.82 \le 1.0$ ✓

Örnek 11.10

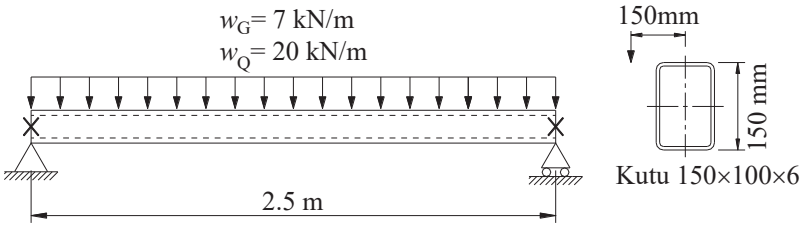
Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen, elektrik direnç kaynağı kullanılarak oluşturulan Kutu 150×100×6 enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında, kuvvetli eksenine dik olmak üzere, zayıf eksenine dik doğrultuda 150mm dışmerkezli olarak, sırasıyla, w_G = 7 kN/m ve w_Q = 20 kN/m üniform yayılı yüklerin etkisindedir. Eleman uçları burulmaya karşı ankastre olacak şekilde mesnetlenmiştir.

a. Mesnet noktalarında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Mesnet noktalarında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)

c. Mesnetten 0.5m uzaklıkta elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

d. Mesnetten 0.5m uzaklıkta elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

Kutu 150×100×6
$W_{px} = 136.7$ cm^3 $H = 150$ mm $B = 100$ mm $t = 6.0$ mm

Çözüm

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, elektrik direnç kaynağı kullanılarak üretilen kutu enkesitli elemanların kesit hesaplarında tasarım et (cidar) kalınlığı, karakteristik et kalınlığının 0.93 katına eşit olarak alınacaktır.

Tasarım et kalınlığına göre enkesit bilgileri,

Kutu 150×100×6
$W_{px} = 128.4$ cm^3 $H = 150$ mm $B = 100$ mm $t = 0.93\times6.0 = 5.58$ mm

Eğrilik yarıçapı belirtilmediğinden gövde yüksekliği *Yönetmelik* 5.4.1.2(d) kurallarına göre belirlenecektir.

$$h = H - 3t = 150 - 3\times5.58 = 133.3\,\text{mm}$$

Elemanın karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 10.4 uyarınca,

$$A_w = 2ht = 2\times133.3\times5.58 = 1487.6\ \text{mm}^2$$

$$k_v = 5$$

$$\frac{h}{t} = 23.9 \le 1.10\sqrt{\frac{5 \times 200000}{275}} = 66.3$$

$$C_{v2} = 1.0 \qquad (10.7a)$$

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v2} = 0.6 \times 275 \times 1487.6 \times 1.0 \times 10^{-3} = 245.5 \text{ kN} \qquad (10.12)$$

YDKT	GKT
Tasarım kesme kuvveti dayanımı	Güvenli kesme kuvveti dayanımı
$V_d = V_c = \phi_v V_n = 0.9 \times 245.5 = 221.0$ kN	$V_g = V_c = \frac{V_n}{\Omega_v} = \frac{245.5}{1.67} = 147.0$ kN

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Başlık enkesit parçası (Tablo 5.1B, Durum 17)

$$\frac{b}{t} = \frac{83.3}{5.58} = 14.9 \le 1.12\sqrt{\frac{200000}{275}} = 30.2$$

Gövde enkesit parçası (Tablo 5.1B, Durum 19)

$$\frac{h}{t} = \frac{133.3}{5.58} = 23.9 \le 2.42\sqrt{\frac{200000}{275}} = 65.3$$

Eleman enkesitinin başlık ve gövde enkesit parçaları kompakt olarak sınıflandırılır.

Plastik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = M_p = F_y W_p = 128.4 \times 10^3 \times 275 \times 10^{-6} = 35.3 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = \phi_b M_n = 0.9 \times 35.3 = 31.8$ kNm	$M_{cx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{35.3}{1.67} = 21.1$ kNm

Elemanın karakteristik burulma momenti dayanımının belirlenmesi (Bkz. Örnek 11.8)

YDKT	GKT
Tasarım burulma momenti dayanımı	Güvenli burulma momenti dayanımı
$T_d = T_c = \phi_T T_n = 0.9 \times 25.1 = 22.6$ kNm	$T_g = T_c = \frac{T_n}{\Omega_T} = \frac{25.1}{1.67} = 15.0$ kNm

Yönetmelik 5.3 uyarınca,

Gerekli eğilme momenti, kesme kuvveti ve burulma momenti dayanımı

YDKT	GKT
Yayılı yük (5.3.1)	Yayılı yük (5.3.2)
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $w_u = 1.2\times 7 + 1.6\times 20 = 40.4$ kN/m	$w_a = w_G + w_Q$ $w_a = 7 + 20 = 27$ kN/m
Mesnette eğilme momenti	Mesnette eğilme momenti
$M_r = M_u = 0$ kNm	$M_r = M_a = 0$ kNm
Mesnetten 0.5m uzaklıktaki eğilme momenti	Mesnetten 0.5m uzaklıktaki eğilme momenti
$M_r = M_u = 20.2$ kNm	$M_r = M_a = 13.5$ kNm
Mesnette kesme kuvveti	Mesnette kesme kuvveti
$V_r = V_u = 50.5$ kN	$V_r = V_a = 33.8$ kN
Mesnetten 0.5m uzaklıktaki kesme kuvveti	Mesnetten 0.5m uzaklıktaki kesme kuvveti
$V_r = V_u = 30.3$ kN	$V_r = V_a = 20.3$ kN
Mesnette burulma momenti	Mesnette burulma momenti
$T_r = T_u = 7.58$ kNm	$T_r = T_a = 5.06$ kNm
Mesnetten 0.5m uzaklıktaki burulma momenti	Mesnetten 0.5m uzaklıktaki burulma momenti
$T_r = T_u = 4.55$ kNm	$T_r = T_a = 3.04$ kNm

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

Yönetmelik 11.3.2 uyarınca eleman dayanımının kontrolü

YDKT	GKT
a. Mesnet noktalarında bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Mesnet noktalarında bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{T_r}{T_c} = \frac{7.58}{22.6} = 0.34 > 0.2$	$\frac{T_r}{T_c} = \frac{5.06}{15.0} = 0.34 > 0.2$
$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_r}{M_c}\right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c}\right)^2 \le 1.0$ (11.11)	$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_r}{M_c}\right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c}\right)^2 \le 1.0$ (11.11)
$(0+0) + \left(\frac{50.5}{221} + \frac{7.58}{22.6}\right)^2 = 0.32 \le 1.0$ ✓	$(0+0) + \left(\frac{33.8}{147.0} + \frac{5.06}{15.0}\right)^2 = 0.32 \le 1.0$ ✓

YDKT	GKT
c. Mesnetten 0.5m uzaklıkta bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**d.** Mesnetten 0.5m uzaklıkta bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{T_r}{T_c} = \frac{4.55}{22.6} = 0.20 \approx 0.2$	$\frac{T_r}{T_c} = \frac{3.04}{15.0} = 0.20 \approx 0.2$
$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_r}{M_c}\right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c}\right)^2 \le 1.0$ (11.11)	$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_r}{M_c}\right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c}\right)^2 \le 1.0$ (11.11)
$\left(0 + \frac{20.2}{31.8}\right) + \left(\frac{30.3}{221} + \frac{4.55}{22.6}\right)^2 = 0.75 \le 1.0$ ✓	$\left(0 + \frac{13.5}{21.1}\right) + \left(\frac{20.3}{147.0} + \frac{3.04}{15.0}\right)^2 = 0.76 \le 1.0$ ✓

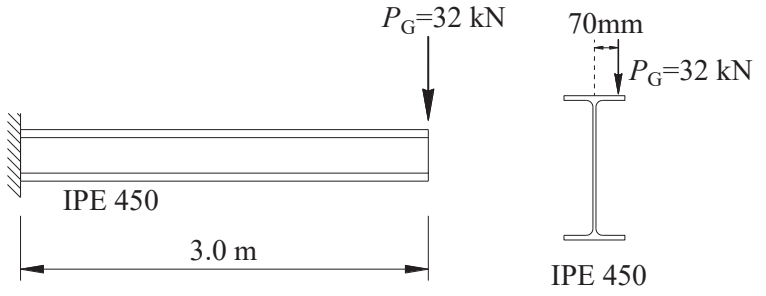
Not: T_r / T_c < 0.2 olan diğer noktalar için burulma etkileri terk edilerek tahkikler tamamlanabilir.

Örnek 11.11

Aşağıdaki şekilde sistemi ve yükleme durumu verilen IPE 450 enkesitli eleman, sabit yükler altında, kuvvetli eksenine dik olmak üzere, zayıf eksenine dik doğrultuda 70mm dışmerkezli olarak, P_G = 32 kN tekil yük etkisindedir. Mesnet noktasında enkesitin çarpılmasının önlendiği varsayılacaktır.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

IPE 450			
$A = 9882$ mm^2	$I_x = 33740$ cm^4	$I_y = 1676$ cm^4	$J = 66.87$ cm^4
$W_{ex} = 1500$ cm^3	$W_{ey} = 176.4$ cm^3	$W_{px} = 1702$ cm^3	$W_{py} = 276.4$ cm^3
$C_w = 791000$ cm^6	$d = 450$ mm	$h = 378.8$ mm	$h_o = 435.4$ mm
$b_f = 190$ mm	$t_f = 14.6$ mm	$t_w = 9.4$ mm	
$i_x = 184.8$ mm	$i_y = 41.2$ mm		

Çözüm

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca,

Yerel burkulma kontrolü

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{2\times t_f} = \frac{190}{2\times 14.6} = 6.51 < \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{200000}{275}} = 10.2$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{378.8}{9.4} = 40.3 < \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{200000}{275}} = 101.4$$

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları kompakt olarak sınıflandırılır.

Yönetmelik 9.2.2 uyarınca,

Yanal burulmalı burkulma sınır durumu

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76 \times 41.2 \times \sqrt{\frac{200000}{275}} = 1955 \text{ mm} \qquad (9.6a)$$

$$i_{ts}^2 = \frac{\sqrt{I_y C_w}}{W_{ex}} = \frac{\sqrt{1676 \times 10^4 \times 791 \times 10^9}}{1500 \times 10^3} \qquad i_{ts} = 49.3 \text{ mm} \qquad (9.8a)$$

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \qquad (9.6b)$$

$$L_r = 1.95 \times 49.3 \times \frac{200000}{0.7 \times 275} \ldots$$

$$\ldots \times \sqrt{\frac{66.87 \times 10^4 \times 1}{1500 \times 10^3 \times 435.4} + \sqrt{\left(\frac{66.87 \times 10^4 \times 1}{1500 \times 10^3 \times 435.4}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7 \times 275}{200000}\right)^2}}$$

$$L_r = 6098 \text{ mm}$$

$L_p < (L_b = 3000 \text{ mm}) < L_r$ olduğundan, M_n,

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \le M_p \qquad (9.3)$$

Plastik eğilme momenti dayanımı

$$M_p = F_y W_{px} = 275 \times 1702 \times 10^3 \times 10^{-6} = 468 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

Moment düzeltme katsayısı, C_b,

Konsol kirişlerde *Yönetmelik* 9.1(e) uyarınca, Denk.(9.1) ile tanımlanan C_b ifadeleri geçerli değildir ve C_b=1.0 alınmalıdır.

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \le M_p \qquad (9.3)$$

$$M_n = 1.0 \left[468 - \left(468 - 0.7 \times 275 \times 1500 \times 10^{-3}\right) \left(\frac{3 - 1.955}{6.098 - 1.955} \right) \right] = 422.8 \text{ kNm} < M_p$$

Burkulma sınır durumu için

$$F_n = F_{cr} = \frac{M_n}{W_{ex}} = \frac{422.8 \times 10^6}{1500 \times 10^3} = 281.87 \text{ N/mm}^2 \qquad (11.12c)$$

Eksenel gerilmeler altında akma sınır durumu için

$$F_n = F_y = 275 \text{ N/mm}^2 \qquad (11.12a)$$

Akma ve burkulma sınır durumlarından en küçük dayanımı sağlayan akma sınır durumudur.

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti gerilmesi	Güvenli eğilme momenti gerilmesi
$\phi_T F_n = 0.9 \times 275 = 247.5 \text{ N/mm}^2$	$\frac{F_n}{\Omega_T} = \frac{275}{1.67} = 164.7 \text{ N/mm}^2$

Kayma gerilmeleri altında akma sınır durumu için

$$F_n = 0.6 F_y = 165 \text{ N/mm}^2 \qquad (11.12b)$$

YDKT	GKT
Tasarım kayma gerilmesi	Güvenli kayma gerilmesi
$\phi_T F_n = 0.9 \times 165 = 148.5 \text{ N/mm}^2$	$\frac{F_n}{\Omega_T} = \frac{165}{1.67} = 98.8 \text{ N/mm}^2$

Yönetmelik 5.3 uyarınca,

YDKT ve GKT için yükleme durumları

YDKT	GKT
Tekil yük (5.3.1)	Tekil yük (5.3.2)
$P_u = 1.4 P_G$ $P_u = 1.4 \times 32 = 44.8 \text{ kN}$	$P_a = 1.0 P_G$ $P_a = 1.0 \times 32 = 32 \text{ kN}$
Tekil yükün dışmerkez olarak etkimesi nedeniyle oluşan burulma momenti	Tekil yükün dışmerkez olarak etkimesi nedeniyle oluşan burulma momenti
$T_r = T_u = 44.8 \times 0.07 = 3.136 \text{ kNm}$	$T_r = T_a = 32 \times 0.07 = 2.240 \text{ kNm}$

Konsol kirişin burulma (serbest ucundan tekil burulma momenti etkisinde olması durumunda), kesme kuvveti ve eğilme momenti etkileri altında herhangi bir enkesitinin dikkate alınan bir noktasına ait gerilme değerleri, elastik teori esas alınarak aşağıdaki ifadeler yardımıyla hesaplanabilir.

$$a = \sqrt{\frac{EC_w}{GJ}} = \sqrt{\frac{200000 \times 791 \times 10^9}{77 \times 10^3 \times 66.87 \times 10^4}} = 1752.8 \text{ mm}$$

Burulma momenti etkisinde oluşan kayma gerilmeleri ile çarpılma nedeniyle meydana gelen normal ve kayma gerilmelerinin hesabında, aşağıda ayrı başlıklar halide verilen formüller kullanılabilir. Bu formüllerin içeriğindeki burulma açısı (φ) ve türevleri de aşağıdaki ifadelerle hesaplanabilir.

$$\varphi = \frac{Ta}{GJ}\left[\frac{z}{a} - \tanh\left(\frac{L}{a}\right) + \frac{\sinh\left(\frac{L-z}{a}\right)}{\cosh\left(\frac{L}{a}\right)}\right]$$

$$\varphi' = \frac{T}{GJ}\left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{L-z}{a}\right)}{\cosh\left(\frac{L}{a}\right)}\right]$$

$$\varphi'' = \frac{T}{GJ}\left[\frac{1}{a}\frac{\sinh\left(\frac{L-z}{a}\right)}{\cosh\left(\frac{L}{a}\right)}\right]$$

$$\varphi''' = \frac{-T}{GJ}\left[\frac{1}{a^2}\frac{\cosh\left(\frac{L-z}{a}\right)}{\cosh\left(\frac{L}{a}\right)}\right]$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

T : Konsol kiriş ucuna uygulanan burulma momenti

z : Mesnet noktasından olan uzaklık

StVenant kayma gerilmeleri

$$\tau_w = Gt_w\varphi' \qquad \tau_f = Gt_f\varphi'$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

τ_w : Gövdede oluşan StVenant kayma gerilmesi

τ_f : Başlıkta oluşan StVenant kayma gerilmesi

Çarpılma etkisi nedeniyle başlıklarda oluşan kayma gerilmeleri

$$\tau_{wç} = \frac{ES_w}{t_f}\varphi'''$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

$\tau_{wç}$: Çarpılma etkileri nedeniyle başlıklarda oluşan kayma gerilmesi

$$S_w = \frac{h_o b_f^2 t_f}{16} = \frac{435.4\times 190^2 \times 14.6}{16} = 14.34\times 10^6 \text{ mm}^4$$

Çarpılma etkisi nedeniyle başlıklarda oluşan eksenel gerilmeler

$$\sigma_{eç} = EW_{no}\varphi''$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

$\sigma_{eç}$: Çarpılma etkilerinden dolayı başlıklarda oluşacak eksenel gerilme

$$W_{no} = \frac{h_o b_f}{4} = \frac{435.4 \times 190}{4} = 20682 \text{ mm}^2$$

Eğilme etkisi nedeniyle başlıklarda oluşan eksenel gerilmeler

$$\sigma_e = \frac{M}{W_e}$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M : Eğilme momenti

Gövde ve başlıklarda oluşan kayma gerilmeleri

$$\tau_{we} = \frac{VQ_w}{I_x t_w}$$

$$\tau_{fe} = \frac{VQ_f}{I_x t_f}$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

τ_{we} : Gövdede oluşan kayma gerilmesi

τ_{fe} : Başlıkta oluşan kayma gerilmesi

V : Enkesitte oluşan kesme kuvveti

I_x : Kuvvetli eksen etrafında atalet momenti

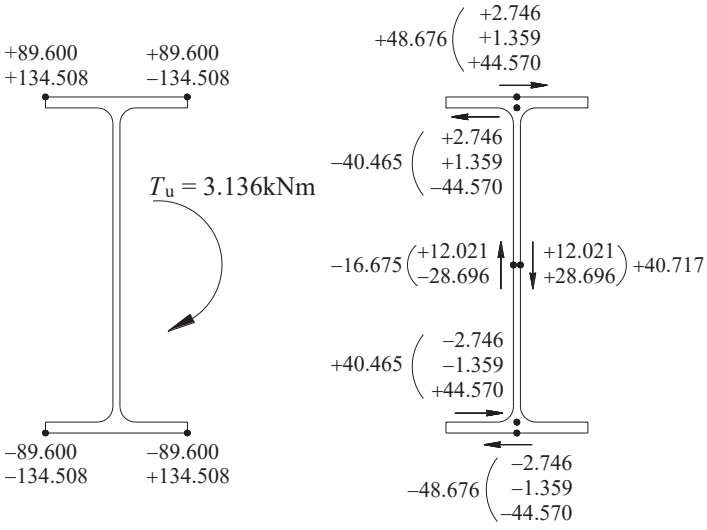
Q_f : Elemanın zayıf ekseni tarafından bölünen başlık enkesitinin yarısının kuvvetli eksene göre statik momenti

Q_w : Gövde enkesiti alanının yarısı ile başlık enkesiti alanının kuvvetli eksene göre statik momenti

Yukarıda açıklanan ifadeler kullanılarak gerçekleştirilen gerilme analizlerinin sonuçları YDKT ve GKT esaslarına göre ayrı ayrı olmak üzere aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Ayrıca en büyük gerilmelerin elde edildiği enkesitlere ait gerilme dağılımı da aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

YDKT yöntemi esasları ile elde edilen gerilme değerleri

Mesnetten Uzaklık	Burulma Açısı ve Türevleri				Normal Gerilmeler			Başlıkta Kayma Gerilmeleri				Gövdede Kayma Gerilmeleri		
z	φ	φ′	φ″	φ‴	Eğilme	Çarpılma	**Toplam**	Kayma	Çarpılma	StVenant	**Toplam**	Kayma	StVenant	**Toplam**
[mm]					[MPa]	[MPa]	**[MPa]**	[MPa]	[MPa]	[MPa]	**[MPa]**	[MPa]	[MPa]	**[MPa]**
0	0.000000	0.00E+00	3.25E-08	1.98E-11	89.600	134.508	**224.108**	2.746	3.895	0.000	**6.641**	12.021	0.000	**12.021**
300	0.001378	8.91E-06	2.70E-08	1.69E-11	80.640	111.769	**192.409**	2.746	3.324	10.042	**16.111**	12.021	6.465	**18.486**
600	0.005193	1.63E-05	2.23E-08	1.45E-11	71.680	92.321	**164.001**	2.746	2.850	18.363	**23.960**	12.021	11.823	**23.844**
900	0.011022	2.24E-05	1.83E-08	1.25E-11	62.720	75.591	**138.311**	2.746	2.461	25.210	**30.417**	12.021	16.231	**28.252**
1200	0.018500	2.73E-05	1.48E-08	1.09E-11	53.760	61.086	**114.846**	2.746	2.144	30.783	**35.673**	12.021	19.819	**31.840**
1500	0.027311	3.13E-05	1.17E-08	9.62E-12	44.800	48.380	**93.180**	2.746	1.890	35.246	**39.882**	12.021	22.693	**34.714**
1800	0.037176	3.44E-05	8.97E-09	8.61E-12	35.840	37.098	**72.938**	2.746	1.692	38.732	**43.169**	12.021	24.937	**36.958**
2100	0.047851	3.67E-05	6.51E-09	7.85E-12	26.880	26.908	**53.788**	2.746	1.543	41.341	**45.631**	12.021	26.617	**38.638**
2400	0.059113	3.83E-05	4.23E-09	7.33E-12	17.920	17.510	**35.430**	2.746	1.440	43.153	**47.339**	12.021	27.783	**39.804**
2700	0.070756	3.92E-05	2.09E-09	7.02E-12	8.960	8.628	**17.588**	2.746	1.379	44.218	**48.344**	12.021	28.469	**40.490**
3000	0.082588	3.95E-05	0.00E+00	6.92E-12	0.000	0.000	**0.000**	2.746	1.359	44.570	**48.676**	12.021	28.696	**40.717**



MESNET ENKESİTİNDEKİ NORMAL GERİLMELER

SERBEST UÇ ENKESİTİNDEKİ KAYMA GERİLMELERİ

GKT yöntemi esasları ile elde edilen gerilme değerleri

Mesnetten Uzaklık	Burulma Açısı ve Türevleri				Normal Gerilmeler			Başlıkta Kayma Gerilmeleri				Gövdede Kayma Gerilmeleri		
z	φ	φ′	φ″	φ‴	Eğilme	Çarpılma	**Toplam**	Kayma	Çarpılma	StVenant	**Toplam**	Kayma	StVenant	**Toplam**
[mm]					[MPa]	[MPa]	**[MPa]**	[MPa]	[MPa]	[MPa]	**[MPa]**	[MPa]	[MPa]	**[MPa]**
0	0.000000	0.00E+00	2.32E-08	1.42E-11	64.000	96.077	**160.077**	1.961	2.782	0.000	**4.743**	8.586	0.000	**8.586**
300	0.000984	6.36E-06	1.93E-08	1.21E-11	57.600	79.835	**137.435**	1.961	2.374	7.173	**11.508**	8.586	4.618	**13.204**
600	0.003709	1.16E-05	1.59E-08	1.04E-11	51.200	65.944	**117.144**	1.961	2.036	13.117	**17.114**	8.586	8.445	**17.031**
900	0.007873	1.60E-05	1.31E-08	8.95E-12	44.800	53.993	**98.793**	1.961	1.758	18.007	**21.726**	8.586	11.594	**20.180**
1200	0.013214	1.95E-05	1.05E-08	7.79E-12	38.400	43.633	**82.033**	1.961	1.531	21.988	**25.481**	8.586	14.157	**22.743**
1500	0.019508	2.23E-05	8.35E-09	6.87E-12	32.000	34.557	**66.557**	1.961	1.350	25.176	**28.487**	8.586	16.209	**24.795**
1800	0.026554	2.45E-05	6.41E-09	6.15E-12	25.600	26.498	**52.098**	1.961	1.208	27.665	**30.835**	8.586	17.812	**26.398**
2100	0.034179	2.62E-05	4.65E-09	5.61E-12	19.200	19.220	**38.420**	1.961	1.102	29.530	**32.593**	8.586	19.012	**27.599**
2400	0.042223	2.73E-05	3.02E-09	5.24E-12	12.800	12.507	**25.307**	1.961	1.029	30.823	**33.813**	8.586	19.845	**28.431**
2700	0.050540	2.80E-05	1.49E-09	5.02E-12	6.400	6.163	**12.563**	1.961	0.985	31.585	**34.531**	8.586	20.335	**28.922**
3000	0.058992	2.82E-05	0.00E+00	4.94E-12	0.000	0.000	**0.000**	1.961	0.971	31.836	**34.768**	8.586	20.497	**29.083**

Yönetmelik 11.3.3 teki kurallar ile eleman dayanımının kontrolü

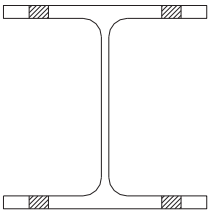
YDKT	GKT
a. Elemanın bileşik etkiler altında tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Elemanın bileşik etkiler altında güvenli dayanımının kontrolü
Eksenel gerilme kontrolü	Eksenel gerilme kontrolü
$\frac{\sigma_{toplam}}{F_n} = \frac{224.108}{247.5} = 0.91 < 1.0$ ✓	$\frac{\sigma_{toplam}}{F_n} = \frac{160.077}{164.7} = 0.97 < 1.0$ ✓
Başlıkta tasarım kayma gerilmesi kontrolü	Başlıkta güvenli kayma gerilmesi kontrolü
$\frac{\tau_{toplam}}{F_n} = \frac{48.676}{148.5} = 0.33 < 1.0$ ✓	$\frac{\tau_{toplam}}{F_n} = \frac{34.768}{98.8} = 0.35 < 1.0$ ✓
Gövdede tasarım kayma gerilmesi kontrolü	Gövdede güvenli kayma gerilmesi kontrolü
$\frac{\tau_{toplam}}{F_n} = \frac{40.717}{148.5} = 0.27 < 1.0$ ✓	$\frac{\tau_{toplam}}{F_n} = \frac{29.083}{98.8} = 0.29 < 1.0$ ✓

Örnek 11.12

HE 300 B profili ile boyutladırılan elemanın aşağıdaki şekilde verilen kayıplı enkesiti, sabit yükler altında P_G = 1400 kN eksenel çekme kuvveti ile kuvvetli ekseni etrafında olmak üzere, M_G = 100 kNm eğilme momentinin ortak etkisindedir. Her bir başlıkta ve aynı enkesitte olmak üzere 2 adet M27 bulonun yerleşimi için 30mm çapında standart dairesel delikler açılmıştır.

a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



HE 300 B

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 300 B			
$A = 14910$ mm^2	$I_x = 25170$ cm^4	$I_y = 8563$ cm^4	$J = 185$ cm^4
$W_{ex} = 1678$ cm^3	$W_{ey} = 570.9$ cm^3	$W_{px} = 1869$ cm^3	$W_{py} = 870.1$ cm^3
$C_w = 1688000$ cm^6	$d = 300$ mm	$h_o = 281$ mm	$h = 208$ mm
$b_f = 300$ mm	$t_f = 19$ mm	$t_w = 11$ mm	
$i_x = 129.9$ mm	$i_y = 75.8$ mm		

Çözüm

Elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yerel burkulma kontrolü

Eleman enkesitinin başlık ve gövde parçaları kompakt sınıfındadır (Bkz. Örnek 11.1).

Yönetmelik 9.2.2 uyarınca,

Akma sınır durumu

$M_p = 514$ kNm (Bkz. Örnek 11.1)

Yönetmelik 9.13.1 uyarınca,

Çekme başlığındaki deliklerin eğilme momenti dayanımına etkisi

$$A_{fg} = 300 \times 19 = 5700 \text{ mm}^2$$

Yönetmelik 5.4.3(b) uyarınca,

$$d_e = 30 + 2.0 = 32 \text{ mm}$$

$A_{fn} = 5700 - 2 \times 32 \times 19 = 4484 \text{ mm}^2$

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 < 0.8 \qquad Y_t = 1.0$

$F_u A_{fn} = 430 \times 4484 \times 10^{-3} = 1928 \text{ kN}$

$Y_t F_y A_{fg} = 1.0 \times 275 \times 5700 \times 10^{-3} = 1568 \text{ kN}$

$F_u A_{fn} \geq Y_t F_y A_{fg}$ olduğundan çekme kırılması sınır durumu gözönüne alınmaz

$M_n = M_p = 514$ kNm kullanılması yeterlidir.

YDKT	GKT
Tasarım eğilme momenti dayanımı	Güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_{cx} = M_{dx} = \phi_b M_n = 0.9 \times 514 = 462.6$ kNm	$M_{cx} = M_{gx} = \frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{514}{1.67} = 307.8$ kNm

Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 9.13.1 uyarınca,

Kırılma sınır durumu

$A_n = 14910 - 4 \times 32 \times 19 = 12478 \text{ mm}^2$

$U = 1.0$

$A_e = UA_n = 1.0 \times 12478 = 12478 \text{ mm}^2$ (7.1)

$P_n = T_n = F_u A_e = 430 \times 12478 \times 10^{-3} = 5365.5 \text{ kN}$ (7.3)

YDKT	GKT
Tasarım eksenel çekme kuvveti dayanımı	Güvenli eksenel çekme kuvveti dayanımı
$P_c = \phi_t P_n = 0.75 \times 5365.5 = 4024.1$ kN	$P_c = \frac{P_n}{\Omega_t} = \frac{5365.5}{2.00} = 2682.8$ kN

Gerekli eğilme momenti ve çekme kuvveti dayanımı

YDKT	GKT
Eksenel yük (5.3.1)	Eksenel yük (5.3.2)
$P_r = P_u = 1.4P_G$ $P_r = P_u = 1.4 \times 1400 = 1960$ kN	$P_r = P_a = 1.0P_G$ $P_r = P_a = 1.0 \times 1400 = 1400$ kN
Eğilme momenti	Eğilme momenti
$M_{rx} = M_u = 1.4M_G$ $M_{rx} = M_u = 1.4 \times 100 = 140$ kNm	$M_{rx} = M_a = 1.0M_G$ $M_{rx} = M_a = 1.0 \times 100 = 100$ kNm

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

YDKT	GKT
a. Bileşik etkiler altında elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c}+\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\le 1.0$ (11.3)	$\frac{P_r}{P_c}+\frac{M_{rx}}{M_{cx}}\le 1.0$ (11.3)
$\frac{1960}{4024.1}+\frac{140}{462.6}=0.79\le 1.0$ ✓	$\frac{1400}{2682.8}+\frac{100}{307.8}=0.85\le 1.0$ ✓

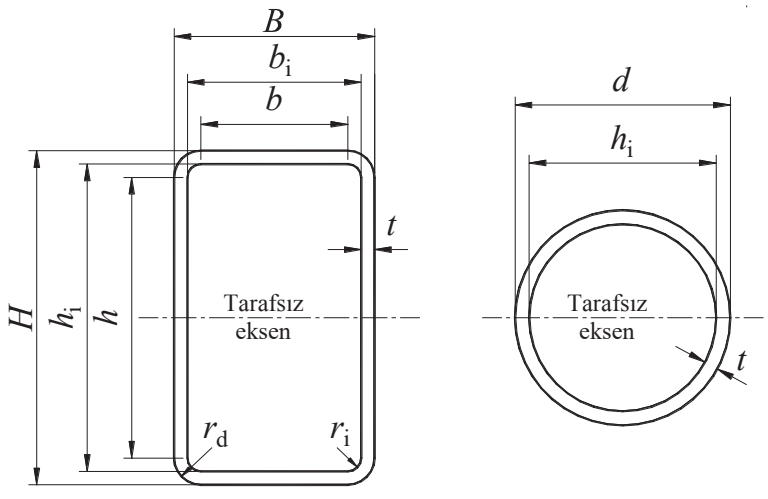
KAYNAK YAYINLAR

Design Guide 9 *Torsional Analysis of Structural Steel Members*, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois, USA.

BÖLÜM 12 KOMPOZİT ELEMANLAR

Yapısal çelik ve betonarmenin birlikte kullanılması ile oluşturulan kompozit yapı elemanlarının tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 12 de belirtilen kurallara göre yapılacaktır.

Beton dolgulu kompozit elemanların tasarım örneklerinde gözönüne alınacak enkesit boyutlarına ait simgeler ve tanımları aşağıda Şekil 12.1 de verilmektedir.



t : $0.93t_n$
t_n : Karakteristik et kalınlığı
B : Kompozit enkesitin eğilme eksenine paralel genişliği
d : Boru enkesitin dış çapı
H : Kompozit enkesitin eğilme eksenine dik yüksekliği
b_i : Kutu enkesitin iç yüzeyleri arasındaki genişlik
$= B - 2t$
h_i : Boru enkesitin iç çapı
: *Yönetmelik* Tablo 12.5 için $h = h_i$
: Kutu enkesitin iç yüzeyleri arasındaki yükseklik
$= H - 2t$
b : Kutu enkesitler için tanımlanan rijitleştirilmiş enkesit parçasının genişliği
$= B - 3t$ (*Yönetmelik* 5.4.1.2)
h : Kutu enkesitler için tanımlanan rijitleştirilmiş enkesit parçasının yüksekliği
$= H - 3t$ (*Yönetmelik* 5.4.1.2)
r_d : b / t ve h / t için $1.5t$ değerine eşit
: alan, rijitlik ve atalet momenti hesapları için $2.0t$ değerine eşit
r_i : alan, rijitlik ve atalet momenti hesapları için $1.0t$ değerine eşit

Şekil 12.1 – Beton dolgulu kompozit elemanların enkesit boyutlarına ait simgeler ve tanımları

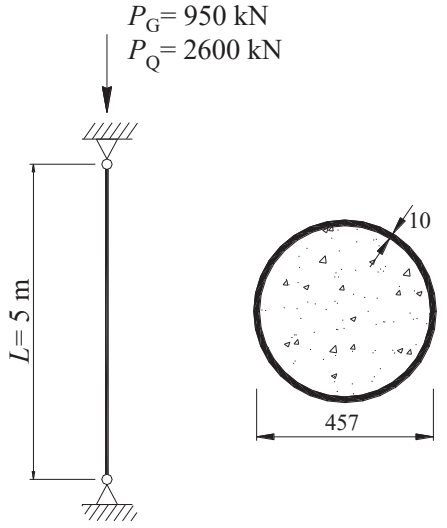
Örnek 12.1

Aşağıdaki şekilde enkesit detayı ve yükleme durumu verilen iki ucu mafsallı beton dolgulu kompozit kolon sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 950kN ve P_Q = 2600kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir.

a. Kolonun karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Kolonun tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Kolonun güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)



Beton sınıfı

C 35 f_{ck} =35 N/mm^2 w_c = 2400 kg/m^3

Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Çelik enkesit (TS EN 10219-Elektrik Direnç Kaynaklı)

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Boru 457×10
A_s = 13080 mm^2 I_s = 32786 cm^4 t = 9.3mm

Çözüm

a. Kompozit kolonun karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Beton elastisite modülü, *Yönetmelik* 12.2.1 uyarınca,

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} = 0.043(2400)^{1.5} \sqrt{35} = 30000\,\text{N/mm}^2 \qquad (12.1)$$

Beton alanı ve atalet momenti,

$$h_i = d - 2t = 457 - 2\times 9.3 = 438.4\,\text{mm}$$

$$A_c = \frac{\pi h_i^2}{4} = \frac{\pi(438.4)^2}{4} = 150949\,\text{mm}^2$$

$$I_c = \frac{\pi h_i^4}{64} = \frac{\pi(438.4)^4}{64} = 181323(10)^4 \text{ mm}^4$$

Kompozit kolonun toplam enkesit alanı,

$$A_g = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(457)^2}{4} = 164030 \text{ mm}^2$$

Beton dolgulu kompozit elemanda *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.2.3(a) uyarınca,

$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 35\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.2.3 (c) uyarınca,

$F_y = 275\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.3.2.1(a) uyarınca,

$$\frac{A_s}{A_g} = \frac{13080}{164030} = 0.08 \ge 0.01$$ ✓

Kompozit kolonun etkin eğilme rijitliği, $(EI)_{ef}$, *Yönetmelik* 12.3.2 uyarınca,

$$C_3 = 0.45 + 3\left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g}\right) = 0.45 + 3\left(\frac{13080 + 0}{164030}\right) = 0.69 \le 0.9$$ ✓

$$(EI)_{ef} = E_s I_s + E_{sr} I_{sr} + C_3 E_c I_c \qquad (12.15)$$

$$= 200000(32786)10^4 + 0 + 0.69(30000)181323(10)^4 = 10310(10)^4 \text{ Nmm}^2$$

Eğilmeli burkulma durumunda asal eksenlere göre eleman burkulma boyu, *Yönetmelik* 6.4.3(a) uyarınca, burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alınarak,

$$L_c = KL = 1.0(5000) = 5000 \text{ mm}$$

Yönetmelik 12.3.1.2 uyarınca, P_e, elastik burkulma yükü,

$$P_e = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{(L_c)^2} = \frac{\pi^2 (10310)10^4}{(5000)^2} 10^{-3} = 40705 \text{ kN}$$

Yönetmelik 12.2.4 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması,

(Tablo 12.1A, Boru enkesitli eleman için)

$$\lambda = \frac{d}{t} = \frac{457}{9.3} = 49.13 \le \lambda_p = 0.15\frac{E}{F_y} = 0.15\frac{200000}{275} = 109$$ ✓

Yerel burkulma sınır durumuna göre beton dolgulu kompozit kolonun, boru enkesitli çelik elemanının çap/kalınlık oranı *Yönetmelik* Tablo 12.1A da verilen λ_p sınır değerini aşmadığından *kompakt enkesit* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kompozit kolonun eksenel basınç kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* 12.3.2.2(a) uyarınca belirlenecektir.

$C_2 = 0.95$ (Boru enkesitler için)

$$P_p = F_y A_s + C_2 f_{ck}\left(A_c + A_{sr}\frac{E_{sr}}{E_c}\right) \quad (12.9)$$

$$P_p = 275(13080)10^{-3} + 0.95(35)(150949+0)10^{-3} = 8616\,\text{kN}$$

$$P_{no} = P_p = 8616\,\text{kN} \quad (12.8)$$

Yönetmelik 12.3.1.2 uyarınca,

$\frac{P_{no}}{P_e} = \frac{8616}{40705} = 0.211 \le 2.25$ olduğundan, karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = P_{no}\left[0.658^{\frac{P_{no}}{P_e}}\right] = 8616\left[0.658^{0.211}\right] = 7888\,\text{kN} \quad (12.3)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(950) + 1.6(2600) = 5300$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 950 + 2600 = 3550$ kN
b. Kolonun tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Kolonun güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.75(7888) = 5916$ kN	$P_g = P_n/\Omega_c = 7888/2.0 = 3944$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{5300}{5916} = 0.896 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{3550}{3944} = 0.90 \le 1.0$ ✓

Kompozit kolonda uygulanan dış yük aktarımına göre, beton ve çelik bileşenlerin ortak yüzeyleri arasındaki yük aktarımı *Yönetmelik* 12.7 uyarınca kontrol edilmelidir.

Örnek 12.2

Örnek 12.1 de verilen beton dolgulu kompozit kolon eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Kolonun karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Kolonun tasarım çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi (YDKT)

c. Kolonun güvenli çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi (GKT)

Çözüm

a. Kompozit kolonun P_n, karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 12.3.2.3 uyarınca, akma sınır durumu esas alınarak,

$$P_n = F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} = 275(13080)10^{-3} + 0 = 3597\,\text{kN} \qquad (12.16)$$

YDKT	GKT
b. Kolonun tasarım çekme kuvveti dayanımı	**c.** Kolonun güvenli çekme kuvveti dayanımı
$P_d = \phi_t P_n = 0.90(3597) = 3237.30\,\text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_t = 3597/1.67 = 2153.90\,\text{kN}$

Kompozit kolonda uygulanan dış yük aktarımına göre, beton ve çelik bileşenlerin ortak yüzeyleri arasındaki yük aktarımı *Yönetmelik* 12.7 uyarınca kontrol edilmelidir.

Örnek 12.3

Aşağıdaki şekillerde enkesit detayı, yükleme durumu ve yük geçiş mekanizması verilen her iki asal ekseni etrafında iki ucu mafsallı beton dolgulu kompozit eleman sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 150kN ve P_Q = 600kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir.

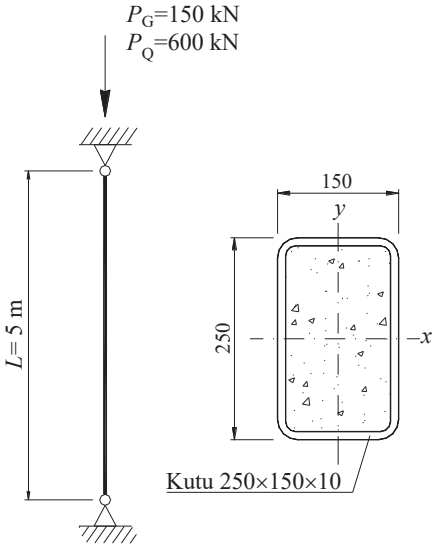
a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

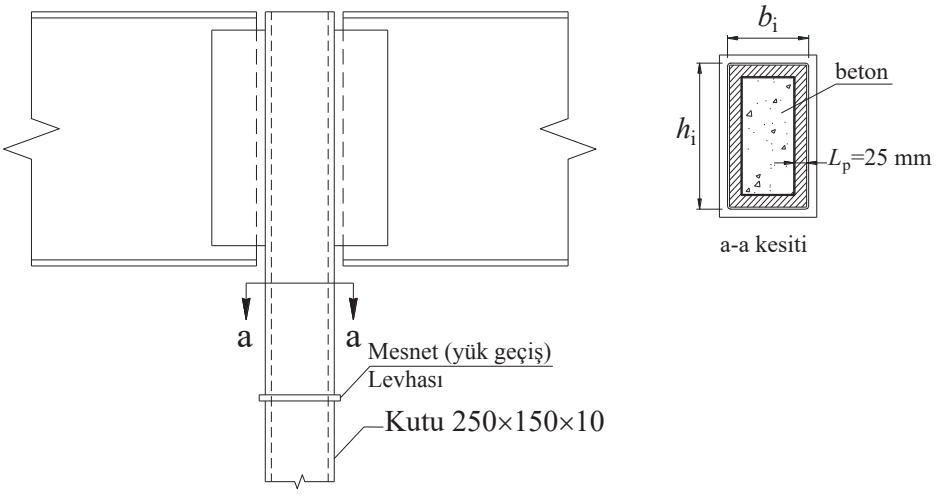
c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

d. Kompozit elemanda dış yükün tipik olarak çelik elemana, beton enkesite veya her ikisine birden uygulanması durumları için, beton ve çelik bileşenlerin ortak yüzeyleri arasında iletilmesi gerekli V_r', boyuna kayma kuvvetinin belirlenmesi

e. Kompozit elemanda dış yükün çelik elemana uygulandığı durumda, V_r' nin iletilmesinde şekilde verilen yük geçiş mekanizmasının yeterliliğinin kontrolü



Sistem ve kompozit eleman enkesiti



Yük geçiş mekanizması

Beton sınıfı

C 35 f_{ck} =35 N/mm^2 w_c = 2400 kg/m^3

Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Çelik enkesit (TS EN 10219-Elektrik Direnç Kaynaklı)

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, t=0.93t_n için

Kutu 250×150×10		
A_s = 6871 mm^2	I_{sx} = 56254349 mm^4	I_{sy} = 25370098 mm^4

Çözüm

a. Kompozit kolonun karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Beton elastisite modülü, *Yönetmelik* 12.2.1 uyarınca,

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} = 0.043(2400)^{1.5} \sqrt{35} = 30000\,\text{N/mm}^2 \qquad (12.1)$$

$$h_i = H - 2t = 250 - 2\times 9.3 = 231.40\,\text{mm}$$

$$b_i = B - 2t = 150 - 2\times 9.3 = 131.40\,\text{mm}$$

Beton alanı,

$$A_c = b_i h_i - t^2(4-\pi) = 231.40(131.40) - 9.3^2(4-\pi) = 30332\,\text{mm}^2$$

Kompozit kolonun enkesit alanı,

$$A_g = A_c + A_s = 30332 + 6871 = 37203\,\text{mm}^2$$

Beton enkesitin her iki asal eksene göre atalet momentleri,

$$I_{cx} = \frac{(B-4t)h_i^3}{12} + \frac{t(H-4t^2)}{6} + \frac{(9\pi^2-64)t^4}{36\pi} + \pi t^2\left(\frac{H-4t}{2} + \frac{4t}{3\pi}\right)^2$$

$$I_{cx} = \frac{(150-4\times 9.3)248.14^3}{12} + \frac{9.3(250-4\times 9.3^2)}{6} + \frac{(9\pi^2-64)9.3^4}{36\pi} \ldots$$

$$\ldots + \pi(9.3)^2\left(\frac{250-4\times 9.3}{2} + \frac{4\times 9.3}{3\pi}\right)^2$$

$$I_{cx} = 13472(10)^4\,\text{mm}^4$$

$$I_{cy} = \frac{(H-4t)b_i^3}{12} + \frac{t(B-4t^2)}{6} + \frac{(9\pi^2-64)t^4}{36\pi} + \pi t^2\left(\frac{B-4t}{2} + \frac{4t}{3\pi}\right)^2$$

$$I_{cy} = \frac{(250-4\times9.3)131.40^3}{12} + \frac{9.3\left(150-4\times9.3^2\right)}{6} + \frac{\left(9\pi^2-64\right)9.3^4}{36\pi} \ldots$$

$$\ldots + \pi(9.3)^2\left(\frac{150-4\times9.3}{2} + \frac{4\times9.3}{3\pi}\right)^2$$

$$I_{cy} = 4345(10)^4 \text{ mm}^4$$

Beton dolgulu kompozit elemanda *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.2.3 (a) uyarınca,

$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 35\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.2.3 (c) uyarınca,

$F_y = 275\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.3.2.1(a) uyarınca,

$$\frac{A_s}{A_g} = \frac{6871}{37203} = 0.184 \ge 0.01 \checkmark$$

Kompozit elemanın etkin eğilme rijitliği, $(EI)_{ef}$, *Yönetmelik* 12.3.2 uyarınca belirlenecektir.

Kompozit kolonda boyuna donatı kullanılmadığından,

$A_{sr} = 0$

$$C_3 = 0.45 + 3\left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g}\right) = 0.45 + 3\left(\frac{6871+0}{37203}\right) = 1.0 \le 0.9 \times$$

$C_3 = 0.9$

$$(EI)_{ef} = E_s I_s + E_{sr} I_{sr} + C_3 E_c I_c \qquad (12.15)$$

$$(EI)_{efy} = 200000(2537)10^4 + 0 + 0.90(30000)4345(10)^4 = 624715000(10)^4 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_{efx} = 200000(5625)10^4 + 0 + 0.90(30000)13472(10)^4 = 1488744000(10)^4 \text{ Nmm}^2$$

Eğilmeli burkulma durumunda asal eksenlere göre eleman burkulma boyu, *Yönetmelik* 6.4.3(a) uyarınca, burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alınarak,

$$L_c = KL = 1.0(5000) = 5000 \text{ mm}$$

Kompozit kolonun her iki asal ekseninde burkulma boyu eşit olduğundan, kolon zayıf ekseni etrafında burkulacaktır. *Yönetmelik* 12.3.1.2 uyarınca, P_e, elastik burkulma yükü,

$$P_e = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{(L_c)^2} = \frac{\pi^2 (624715000)10^4}{(5000)^2} 10^{-3} = 2466 \text{ kN}$$

Yönetmelik 12.2.4 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması,

(Tablo 12.1A, Kutu enkesitli eleman için)

$$\lambda = \frac{H-3t}{t} = \frac{250-3(9.3)}{9.3} = 23.88 \le \lambda_p = 2.26\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2.26\sqrt{\frac{200000}{275}} = 60.947 \checkmark$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre beton dolgulu kompozit kolonun, kutu enkesitli çelik elemanının genişlik/kalınlık oranı Tablo 12.1A da verilen λ_p sınır değerini aşmadığından *kompakt enkesit* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kompozit elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* 12.3.2.2(a) uyarınca belirlenecektir.

$C_2 = 0.85$ (Kutu enkesitler için)

$$P_p = F_y A_s + C_2 f_{ck}\left(A_c + A_{sr}\frac{E_{sr}}{E_c}\right) \qquad (12.9)$$

$$= 275(6871)10^{-3} + 0.85(35)(30332+0)10^{-3} = 2792\,\text{kN}$$

$$P_{no} = P_p = 2792\,\text{kN} \qquad (12.8)$$

Yönetmelik 12.3.1.2 uyarınca,

$\frac{P_{no}}{P_e} = \frac{2792}{2466} = 1.13 \le 2.25$ olduğundan, karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

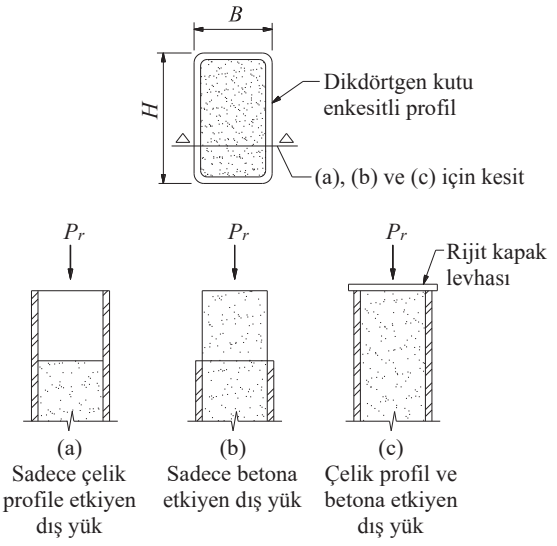
$$P_n = P_{no}\left[0.658^{\frac{P_{no}}{P_e}}\right] = 2792\left[0.658^{1.13}\right] = 1740\,\text{kN} \qquad (12.3)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(150) + 1.6(600) = 1140$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 150 + 600 = 750$ kN
b. Kolonun tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Kolonun güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.75(1740) = 1305$ kN	$P_g = P_n/\Omega_c = 1740/2.0 = 870$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{1140}{1305} = 0.87 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{750}{870} = 0.86 \le 1.0 \checkmark$

d. Kompozit kolonda Şekil (a), (b) ve (c) de verilen tipik uygulamalar için, dış yükün (basınç kuvvetinin)

(d.1) Sadece çelik profile etkimesi,
(d.2) Sadece betona etkimesi,
(d.3) Çelik profil ve betona birlikte etkimesi

durumlarında yük paylaşımı *Yönetmelik* 12.7 uyarınca incelenecektir.



Şekil 12.3.1 – Kompozit elemanda tipik dış yük etkisi

Yükün doğrudan çelik elemana etkimesi durumu, Şekil 12.3.1(a)

Yönetmelik 12.7.1.1 uyarınca, beton enkesite iletilmesi gerekli kuvvet , V_r'

$$V_r' = P_r\left(1-\frac{F_y A_s}{P_{no}}\right) \qquad (12.29)$$

$$V_r' = P_r\left(1-\frac{275(6871)10^{-3}}{2792}\right) = 0.323P_r$$

YDKT	GKT
d.1 Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.323(1140) = 368$ kN	$V_r' = 0.323(750) = 242$ kN

Yükün doğrudan betona etkimesi durumu, Şekil 12.3.1(b)

Yönetmelik 12.7.1.2 uyarınca, beton dolgulu kompozit kolonun, kutu enkesitli çelik elemanı *kompakt enkesit* olarak değerlendirildiğinden, çelik elemana iletilmesi gerekli kuvvet, V_r'

$$V_r' = P_r\left(\frac{F_y A_s}{P_{no}}\right) \qquad (12.30a)$$

$$V_r' = P_r\left(\frac{275(6871)10^{-3}}{2792}\right) = 0.677P_r$$

YDKT	GKT
d.2 Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.677(1140) = 771$ kN	$V_r' = 0.677(750) = 507$ kN

Yükün çelik profil ve betona birlikte etkimesi durumu, Şekil 12.3.1(c)

Kompozit enkesitin bileşenleri arasında iletilmesi gerekli kuvvet, V_r'

Yükün çelik enkesite doğrudan aktarılan kısmı için eksenel rijitliklerin oranına dayanan elastik dağılım kullanılabilir.

$$P_{rs} = \left(\frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_c A_c} \right) P_r$$

$$P_{rs} = \left(\frac{200000(6871)}{200000(6871) + 30000(30332)} \right) P_r = 0.60 P_r$$

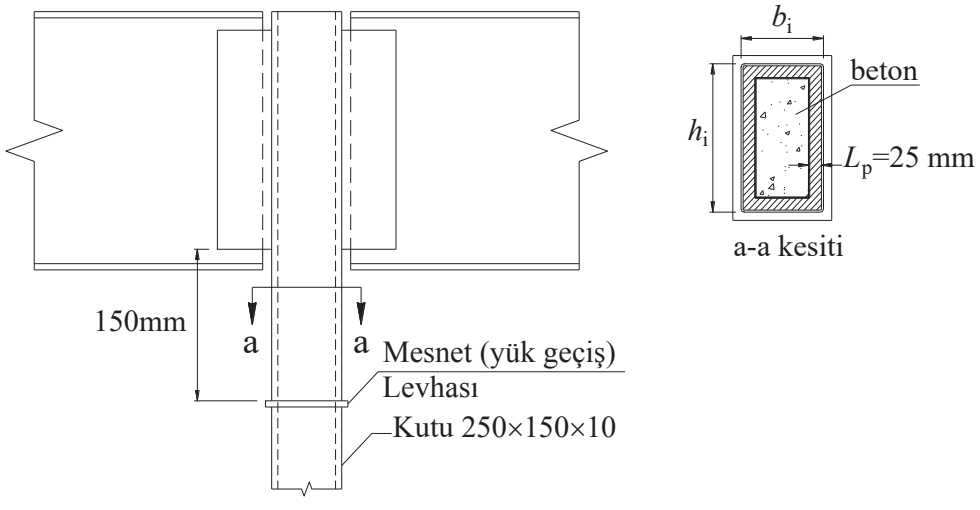
$$V_r' = \left[P_{rs} - P_r \left(\frac{F_y A_s}{P_{no}} \right) \right] \qquad (12.31)$$

$$V_r' = \left\| \left[0.60 P_r - P_r \left(\frac{(275)6871(10)^{-3}}{2792} \right) \right] \right\| = 0.077 P_r$$

YDKT	GKT
d.3 Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.077(1140) = 88$ kN	$V_r' = 0.077(750) = 58$ kN

e. Beton dolgulu kompozit elemanda yük geçişi, *Yönetmelik* 12.7.3.2 uyarınca, yük aktarım bölgesinin üstünde ve altında kutu enkesitli çelik elemanın en küçük kenar genişliğinin iki katı uzaklığı aşmayacak şekilde belirlenen *yük geçiş uzunluğu* içinde sağlanacaktır. Doğrudan mesnetlenme ile yük geçişinin sağlanmasının amaçlandığı incelenen örnekte, ezilme levhası, çelik kutu enkesite kaynaklı kayma levhasının (yük aktarım bölgesi) altından 150mm uzaklıkta uygulanmıştır.

Dolayısıyla, yük aktarım bölgesinin altında *yük geçişi* için *Yönetmelik* 12.7.3.2 uyarınca, 2*B* (=2×150 = 300mm) uzunluğu sağlanmaktadır (Şekil 12.3.2).



Şekil 12.3.2 – Çelik kutu elemanın iç yüzeyinde uygulanan ezilme levhası

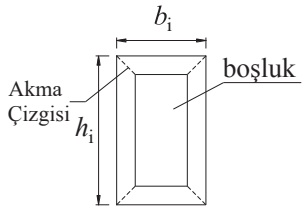
Beton yerleşim uygulaması da dikkate alınarak, kutu enkesitin iç yüzeyinde beton ve levha arasındaki temas yüzeyinde levha genişliği, L_p=25mm seçilmiştir. Bu durumda, ezilme etkisindeki beton alanı,

$$A_l = A_c - \left(h_i - 2L_p\right)\left(b_i - 2L_p\right) = 32531 - \left(248.14 - 2\times 25\right)\left(131.40 - 2\times 25\right) = 16402\text{mm}^2$$

YDKT	GKT
Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı (Bkz. (d.1))	
$V_r' = 0.323(1140) = 368\text{ kN}$	$V_r' = 0.323(750) = 242\text{ kN}$
Yönetmelik 12.7.2.1 uyarınca, beton ve yük geçiş levhası arasındaki temas yüzeyinde karakteristik ezilme dayanımı	
$R_n = 1.7 f_{ck} A_l = 1.7(35)16402(10)^{-3} = 976\text{kN}$ (12.32)	
Tasarım ezilme dayanımının kontrolü	Güvenli ezilme dayanımının kontrolü
$R_d = \phi_B R_n = 0.65\times 976 = 634.40\text{ kN}$	$R_g = \dfrac{R_n}{\Omega_B} = \dfrac{976}{2.31} = 422.51\text{ kN}$
$R_d = 634.40\text{ kN} \geq V_r' = 368\text{ kN}$ ✓	$R_g = 422.51\text{ kN} \geq V_r' = 242\text{ kN}$ ✓

Yük geçiş levhasının kalınlığının belirlenmesi

Yük geçiş levhasının kalınlığı farklı yöntemler ile belirlenebilir. Bu örnekte, levhanın plastik göçme mekanizmasını belirleyen akma çizgisi teorisi kullanılarak gerekli levha kalınlığı hesaplanmıştır (Şekil 12.3.3) (Bkz. *Kaynak Yayınlar*).



Şekil 12.3.3 – Akma çizgileri

Yük geçiş levhasının gerekli kalınlığının belirlenmesi (Çelik sınıfı : S235)	
YDKT	GKT
$t_p = \sqrt{\dfrac{V_r'/A_l}{2\phi F_y}\left[L_p\left(b_i + h_i\right) - \dfrac{8L_p^2}{3}\right]}$ $= \sqrt{\dfrac{386(10)^3/16402}{2(0.9)235}\left[25(131.40 + 248.14) - \dfrac{8(25)^2}{3}\right]}$ $= 20.86\text{mm}$	$t_p = \sqrt{\dfrac{\Omega V_r'/A_l}{2F_y}\left[L_p\left(b_i + h_i\right) - \dfrac{8L_p^2}{3}\right]}$ $= \sqrt{\dfrac{1.67(254)10^3/16402}{2(235)}\left[25(131.40 + 248.14) - \dfrac{8(25)^2}{3}\right]}$ $= 20.62\text{mm}$

Not: Kompozit kolon basınç kuvveti etkisinde olduğundan, yük geçiş levhasının kaynak boyutlarının *Yönetmelik* Bölüm 13 koşulları uyarınca değerlendirilmesi yeterlidir. Ancak, kolonun çekme veya eğilme etkisinde olması durumunda birleşim dayanımları *Yönetmelik* Bölüm 13 ve Bölüm 14 koşulları uyarınca kontrol edilmelidir.

Örnek 12.4

Aşağıdaki şekilde enkesit detayı ve yükleme durumu verilen her iki asal ekseni etrafında iki ucu mafsallı çelik gömme kompozit eleman sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 1750kN ve P_Q = 8600kN eksenel basınç kuvveti etkisindedir.

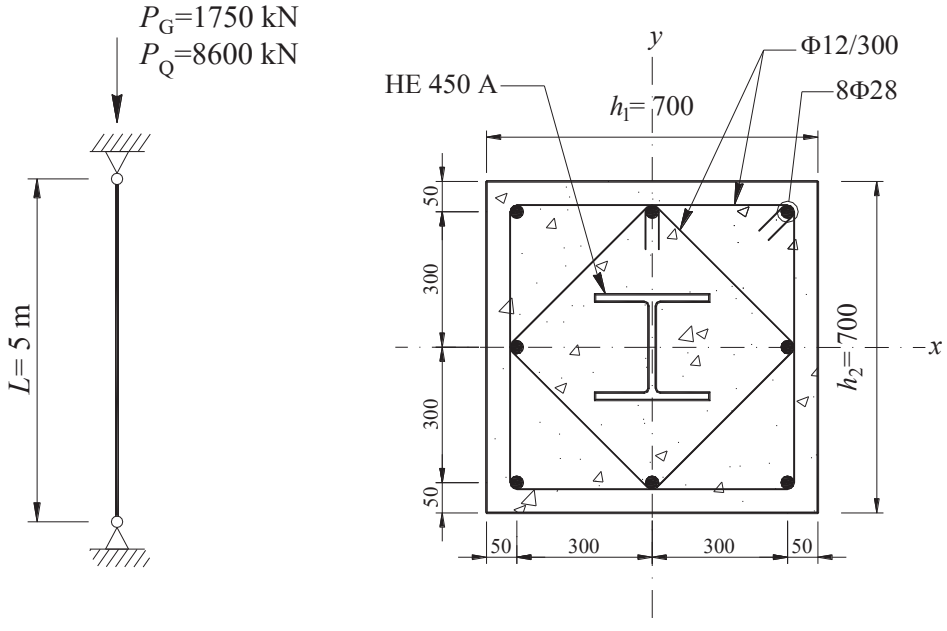
a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

d. Kompozit elemanda tipik olarak, dış yükün çelik elemana, beton enkesite ve her ikisine birden uygulanması durumlarında beton ve çelik bileşenlerin ortak yüzeyleri arasında iletilmesi gerekli V_r', boyuna kayma kuvvetinin belirlenmesi

e. Kompozit kolonda dış yükün beton elemana uygulandığı durumda V_r', boyuna kayma kuvvetinin iletilmesinde yük geçiş mekanizmalarının yeterliliğinin kontrolü



Beton sınıfı

C 40 f_{ck} =40 N/mm^2 w_c = 2400 kg/m^3

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Beton çeliği sınıfı

F_{ysr} = 500 N/mm^2

Çelik enkesit

HE 450 A			
A = 17800 mm^2	d = 440 mm	h = 344 mm	t_w = 11.5 mm
b_f = 300 mm	t_f = 21 mm	I_x = 63720 cm^4	I_y = 9465 cm^4

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Beton elastisite modülü, *Yönetmelik* 12.2.1 uyarınca,

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} = 0.043(2400)^{1.5} \sqrt{40} = 31975\,\text{N/mm}^2 \qquad (12.1)$$

Donatı alanı ve atalet momenti,

$$A_{sr,1} = \frac{\pi d_b^2}{4} = \frac{\pi(28)^2}{4} = 615\ \text{mm}^2$$

$$A_{sr} = 8 \times A_{sr,1} = 8 \times 615 = 4920\ \text{mm}^2$$

$$I_{sr,1} = \frac{\pi d_b^4}{64} = \frac{\pi(28)^4}{64} = 30172\ \text{mm}^4$$

$$I_{srx} = I_{sry} = 8(30172) + 6\left[615(300)^2\right] = 33234(10)^4\ \text{mm}^4$$

Kompozit elemanın toplam enkesit alanı,

$$A_g = 700 \times 700 = 490000\ \text{mm}^2$$

Beton alanı ve atalet momenti,

$$A_c = 490000 - 17800 - 8(615) = 467280\ \text{mm}^2$$

$$I_{cx} = \frac{700(700)^3}{12} - 63720(10)^4 - 33234(10)^4 = 19038793330\text{mm}^4$$

$$I_{cy} = \frac{700(700)^3}{12} - 9465(10)^4 - 33234(10)^4 = 19581343330\ \text{mm}^4$$

Beton dolgulu kompozit elemanda *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Karakteristik beton dayanımı, *Yönetmelik* 12.2.3 (a) uyarınca,

$$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 40\,\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2 \checkmark$$

Beton çeliğinin karakteristik akma gerilmesi, *Yönetmelik* 12.2.3 (b) uyarınca,

$$F_{ysr} = 500\,\text{N/mm}^2 \le 500\text{N/mm}^2 \checkmark$$

Yapısal çeliğin karakteristik akma gerilmesi,*Yönetmelik* 12.2.3 (c) uyarınca,

$$F_y = 355\,\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2 \checkmark$$

Yapısal çelik oranı, *Yönetmelik* 12.3.1.1(a) uyarınca,

$$\frac{A_s}{A_g} = \frac{17800}{490000} = 0.036 \ge 0.01 \checkmark$$

Etriye aralığı, *Yönetmelik* 12.3.1.1(b) uyarınca, ϕ12 etriye kullanıldığından

$$s = 300\text{mm} \le 400\,\text{mm} \checkmark$$

$$s = 300\text{mm} \le s_{\text{maks}} = 0.5\left\{\begin{matrix} h_1 = 700\text{mm} \\ h_2 = 700\text{mm} \end{matrix}\right\}_{\text{min}} = 350\text{mm} \checkmark$$

Boyuna donatı oranı, *Yönetmelik* 12.3.1.1(c) uyarınca,

$$\rho_{\text{sr}} = \frac{A_{\text{sr}}}{A_{\text{g}}} = \frac{4920}{490000} = 0.01 \ge 0.004 \checkmark$$

Yönetmelik 12.3.1.5(a) uyarınca, çelik çekirdek ile en yakın boyuna donatı arasındaki uzaklık,

$$c = \text{maks}\left\{\begin{matrix} 1.5d = 1.5(28) = 42\text{mm} \\ 40\text{mm} \end{matrix}\right\} = 42\text{mm} \le \frac{700 - 450 - 28}{2} - 50 = 61\text{mm} \checkmark$$

Yönetmelik 12.2.1 uyarınca enine donatı ve boyuna donatı detayları için TS 500 de verilen koşullar gözönüne alınacaktır.

Kompozit elemanın etkin eğilme rijitliği, $(EI)_{\text{ef}}$, *Yönetmelik* 12.3.1.2 uyarınca belirlenecektir.

$$C_1 = 0.25 + 3\left(\frac{A_{\text{s}} + A_{\text{sr}}}{A_{\text{g}}}\right) = 0.25 + 3\left(\frac{17800 + 4920}{490000}\right) = 0.389 \le 0.7 \checkmark$$

Eksenel basınç kuvveti dayanımını x ve y eksenleri ile hesaplanan etkin eğilme rijitliğinin küçüğü belirlediğinden,

$$(EI)_{\text{efy}} = E_{\text{s}} I_{\text{sy}} + E_{\text{sr}} I_{\text{sry}} + C_1 E_{\text{c}} I_{\text{cy}} \qquad (12.6)$$

$$= 200000(9465)10^4 + 200000(33234)10^4 + 0.389(31975)19581343330$$

$$= 32902002230(10)^4\ \text{Nmm}^2$$

Eğilmeli burkulma durumunda asal eksenlere göre eleman burkulma boyu, *Yönetmelik* 6.4.3(a) uyarınca, burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alınarak,

$$L_{\text{c}} = KL = 1.0(5000) = 5000\ \text{mm}$$

Yönetmelik 12.3.1.2 uyarınca, P_{e}, elastik burkulma yükü,

$$P_{\text{e}} = \frac{\pi^2 (EI)_{\text{ef}}}{(L_{\text{c}})^2} = \frac{\pi^2 (32902002230)10^4}{(5000)^2} 10^{-3} = 129892\ \text{kN}$$

Kompozit elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, *Yönetmelik* 12.3.1.2 uyarınca

$$P_{\text{no}} = F_{\text{y}} A_{\text{s}} + F_{\text{ysr}} A_{\text{sr}} + 0.85 f_{\text{ck}} A_{\text{c}} \qquad (12.5)$$

$$= 355(17800)10^{-3} + 500(4920)10^{-3} + 0.85(40)467280(10^{-3}) = 24666\,\text{kN}$$

Yönetmelik 12.3.1.2, uyarınca,

$\frac{P_{no}}{P_e} = \frac{24666}{129892} = 0.19 \le 2.25$ olduğundan, karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = P_{no}\left[0.658^{\frac{P_{no}}{P_e}}\right] = 24666\left[0.658^{0.19}\right] = 22780\,\text{kN} \qquad (12.3)$$

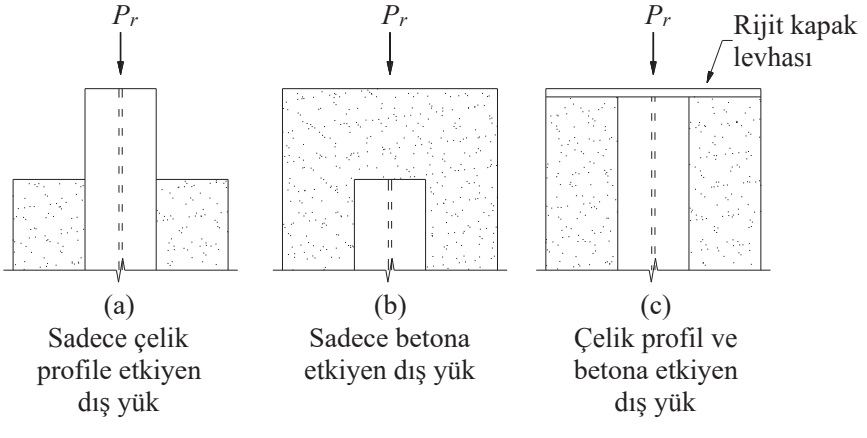
YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(1750) + 1.6(8600) = 15860$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 1750 + 8600 = 10350$ kN
b. Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**c.** Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.75(22780) = 17085\text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 22780/2.0 = 11390\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{15860}{17085} = 0.928 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{10350}{11390} = 0.909 \le 1.0$ ✓

Kompozit elemanda uygulanan dış yük aktarımına göre, beton ve çelik bileşenlerin ortak yüzeyleri arasındaki yük aktarımı *Yönetmelik* 12.7 uyarınca kontrol edilecektir.

d. Şekil 12.4.1 (a, b veya c) de verilen tipik uygulamalar için, kompozit kolonda dış yükün (basınç kuvvetinin),

(d.1) sadece çelik profile etkimesi,
(d.2) sadece betona etkimesi,
(d.3) çelik profil ve betona birlikte etkimesi,

durumları için *Yönetmelik* 12.7 uyarınca yük paylaşımı incelenecektir.



Şekil 12.4.1 – Kompozit kolonda tipik dış yük etkisi

d.1 Yükün doğrudan çelik elemana etkimesi durumu, Şekil 12.4.1(a)

Yönetmelik 12.7.1.1 uyarınca, beton enkesite iletilmesi gerekli kuvvet , V_r'	
$V_r' = P_r\left(1-\frac{F_y A_s}{P_{no}}\right)$ (12.29) $V_r' = P_r\left(1-\frac{355(17800)10^{-3}}{24666}\right) = 0.74P_r$	
YDKT	GKT
d.1 Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.74(15860) = 11736.40$ kN	$V_r' = 0.74(10350) = 7659$ kN

d.2 Yükün doğrudan betona etkimesi durumu, Şekil 12.4.1(b)

Yönetmelik 12.7.1.2 uyarınca, çelik elemana iletilmesi gerekli kuvvet, V_r'	
$V_r' = P_r\left(\frac{F_y A_s}{P_{no}}\right)$ (12.30a) $V_r' = P_r\left(\frac{355(17800)10^{-3}}{24666}\right) = 0.256P_r$	
YDKT	GKT
d.2 Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.256(15860) = 4060.16$kN	$V_r' = 0.256(10350) = 2649.50$ kN

d.3 Yükün çelik profil ve betona birlikte etkimesi durumu, Şekil 12.4.1 (c)

Kompozit enkesitin bileşenleri arasında iletilmesi gerekli kuvvet, V_r'

Yükün çelik enkesite doğrudan aktarılan kısmı, eksenel rijitliklerin oranına dayanan elastik dağılım varsayımı ile belirlenebilir.

$$P_{rs} = \left(\frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_c A_c + E_{sr} A_{sr}} \right) P_r$$

$$P_{rs} = \left(\frac{200000(17800)}{200000(17800) + 31975(467280) + 200000(4920)} \right) P_r = 0.182 P_r$$

$$V_r' = \left[P_{rs} - P_r \left(\frac{F_y A_s}{P_{no}} \right) \right] \qquad (12.31)$$

$$V_r' = \left| \left[0.182 P_r - P_r \left(\frac{(355)17800(10)^{-3}}{24666} \right) \right] \right| = 0.074 P_r$$

YDKT	GKT
d.3 Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.074(15860) = 1176$ kN	$V_r' = 0.074(10350) = 766$ kN

e. Dış yükün beton elemana uygulandığı durumda V_r', boyuna kayma kuvvetinin iletilmesinde kompozit kolonda iki yük geçiş mekanizmasının yeterliliği *Yönetmelik* 12.7.2 uyarınca, incelenmiştir.

e.1 Doğrudan mesnetlenme ile yük geçişi

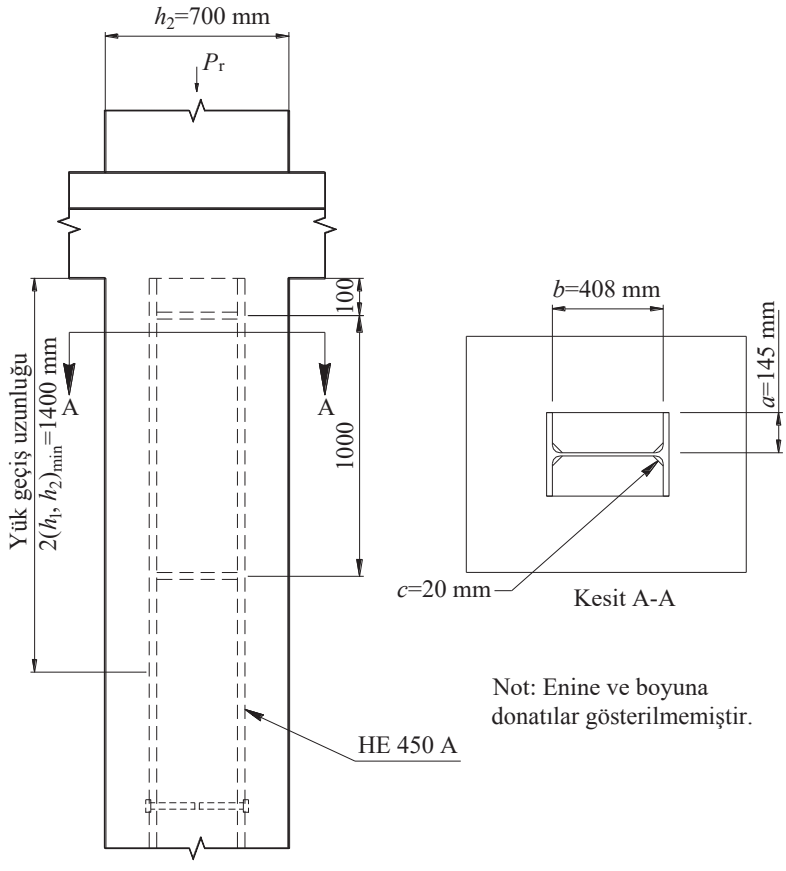
Kompozit gömme kolonda yük geçişi, çelik enkesitin başlıkları arasına kaynaklanan levhalara mesnetlenen beton yüzey alanı ile sağlanabilir (Şekil 12.4.2).

Levha aralığı ve yerleşiminin kontrolü

Yük geçiş uzunluğu içinde, birden fazla ezilme levhası kullanıldığında, betonun uygun yerleşimi için levhalar arasında çelik enkesitin yüksekliğinin en az iki katı uzaklığın sağlanması önerilmektedir.

$1000\,\text{mm} \geq 2d = 2 \times 450 = 900\,\text{mm}$ ✓

Yönetmelik 12.7.3.1 uyarınca, beton gömme kompozit elemanda yük geçişi, yük aktarım bölgesinin üstünde ve altında kutu enkesitli çelik elemanın en küçük kenar genişliğinin iki katı uzaklığı aşmayacak şekilde belirlenen *yük geçiş uzunluğu* içinde sağlanacaktır.



Şekil 12.4.2 Yük geçişinin doğrudan mesnetlenme ile sağlanması

İncelenen örnekte üstteki kolonun betonarme olduğu vasayımıyla, basınç kuvveti, P_r büyük oranda üstteki betonarme kolondan doğrudan aktarıldığı için, birleşim yüksekliği olarak tanımlanan yük aktarım bölgesinin uzunluğu sıfır olacaktır. Kompozit kolon yük aktarım bölgesi sadece alt tarafa doğru devam ettiğinden ezilme levhalarının kompozit kolonun üst ucundan itibaren aşağıya doğru $2B$ = 1400mm olarak belirlenen *yük geçiş uzunluğu* içine yerleştirilmesi yeterlidir.

Seçilen ezilme levhasının boyutları,

$a = 145\,\text{mm}$

$b = d - 2t_f = 450 - 2\times 21 = 408\,\text{mm}$

$c = 20\text{mm}$

olduğundan, ezilme etkisindeki beton alanı,

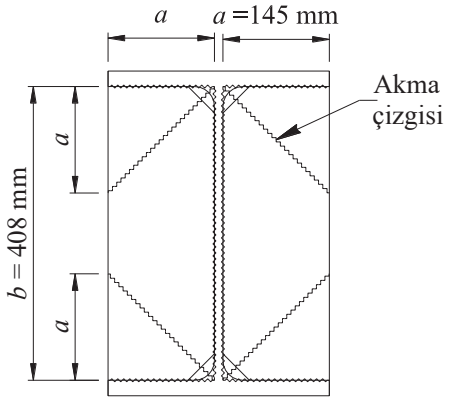
$$A_1 = \left(2ab - 2c^2\right)\left(\text{yük geçiş uzunluğundaki levha sayısı}\right)$$

$$= \left[2\left(145\times 408\right) - 2\left(20\right)^2\right]\times 2 = 235040\,\text{mm}^2$$

YDKT	GKT
Gerekli boyuna kayma kuvveti dayanımı	
$V_r' = 0.256(15860) = 4060.16\text{kN}$	$V_r' = 0.256(10350) = 2649.50\ \text{kN}$
Yönetmelik 12.7.2.1 uyarınca, beton ve yük geçiş levhası arasındaki temas yüzeyinde karakteristik ezilme dayanımı	
$R_n = 1.7 f_{ck} A_l = 1.7(40)235040(10)^{-3} = 15983\text{kN}$ (12.32)	
Tasarım ezilme dayanımının kontrolü	Güvenli ezilme dayanımının kontrolü
$R_d = \phi_B R_n = 0.65 \times 15983 = 10389\ \text{kN}$	$R_g = \frac{R_n}{\Omega_B} = \frac{15983}{2.31} = 6919\ \text{kN}$
$R_d = 10389\text{kN} \geq V_r' = 4060\ \text{kN}$ ✓	$R_g = 6919\ \text{kN} \geq V_r' = 2649.50\ \text{kN}$ ✓

Yük geçiş levhasının kalınlığının belirlenmesi

Yük geçiş levhasının kalınlığı farklı yöntemler ile belirlenebilir. Bu örnekte, gerekli levha kalınlığı levhanın plastik göçme mekanizmasını belirleyen akma çizgisi (Şekil 12.4.3) teorisi kullanılarak hesaplanmıştır (Bkz. *Kaynak Yayınlar*, Park and Gamble, 2000). Levha kalınlığının belirlenmesinde $b \geq 2a$ olması durumunda geçerli olan, şekilde verilen akma çizgileri yayılışı gözönüne alınmıştır. Levha köşelerindeki kesimler ihmal edilmiştir.



Şekil 12.4.3 – Olası akma çizgileri

Yük geçiş levhasının gerekli kalınlığının belirlenmesi (Çelik sınıfı : S235)	
YDKT	GKT
$t_p \geq t_f$ ise	$t_p \geq t_f$ ise
$t_p = \sqrt{\dfrac{2a^2 w_u (3b-2a)}{3\phi F_y (4a+b)}}$	$t_p = \sqrt{\left(\dfrac{2\Omega}{3F_y}\right)\left[\dfrac{a^2 w_a (3b-2a)}{(4a+b)}\right]}$
$t_p < t_f$ ise	$t_p < t_f$ ise
$t_p = \sqrt{\dfrac{2a^2 w_u (3b-2a)}{3\phi F_y (6a+b)}}$	$t_p = \sqrt{\left(\dfrac{2\Omega}{3F_y}\right)\left[\dfrac{a^2 w_a (3b-2a)}{(6a+b)}\right]}$
$w_u = \dfrac{V_r'}{A_l} = \dfrac{4060.16(10)^3}{235040} = 17.27\,\text{N/mm}^2$	$w_a = \dfrac{V_r'}{A_l} = \dfrac{2649.50(10)^3}{235040} = 11.27\,\text{N/mm}^2$
$t_p = \sqrt{\dfrac{2(145)^2 17.27\left[3(408)-2(145)\right]}{3(0.90)235\left[4(145)+408\right]}}$	$t_p = \sqrt{\dfrac{2(1.67)(145)^2 11.27\left[3(408)-2(145)\right]}{3(235)\left[4(145)+408\right]}}$
$= 32.89\text{mm} > t_f = 21\text{mm}$ ✓	$= 32.57\text{mm} > t_f = 21\text{mm}$ ✓
$t_p = 35\text{mm}$	$t_p = 35\text{mm}$

Not: Kompozit kolon basınç kuvveti etkisinde olduğundan, yük geçiş levhasının kaynak boyutlarının *Yönetmelik* Bölüm 13 koşulları uyarınca değerlendirilmesi yeterlidir. Ancak, kolonun çekme veya eğilme etkisinde olması durumunda birleşim dayanımları *Yönetmelik* Bölüm 13 ve Bölüm 14 uyarınca kontrol edilmelidir.

e.2 Çelik ankrajlar ile yük geçişi

d_{sa}=19mm olarak seçilen çelik ankrajın alanı,

$$A_{sa} = \frac{\pi d_{sa}^2}{4} = \frac{\pi(19)^2}{4} = 283.53\,\text{mm}^2$$

YDKT	GKT
Yönetmelik 12.8.3.1 uyarınca başlıklı çelik ankrajın karakteristik kesme kuvveti dayanımı,	
$Q_{nv} = F_u A_{sa} = 450(283.53)10^{-3} = 127.59\,\text{kN/ankraj}$ (12.37)	
Tasarım kesme kuvveti dayanımı	Güvenli kesme kuvveti dayanımı
$\phi_v Q_{nv} = 0.65(127.59) = 83\,\text{kN/ankraj}$	$\dfrac{Q_{nv}}{\Omega_v} = \dfrac{127.59}{2.31} = 55.23\,\text{kN/ankraj}$
Gerekli ankraj sayısı	
$n_{ankraj} = \dfrac{V_r'}{\phi_v Q_{nv}} = \dfrac{4060.16}{83} = 48.91\,\text{ankraj}$	$n_{ankraj} = \dfrac{V_r'}{\Omega_v Q_{nv}} = \dfrac{2649.50}{55.23} = 47.97\,\text{ankraj}$

Yönetmelik 12.7.3.1 uyarınca, beton gömme kompozit elemanda yük geçişi, yük aktarım bölgesinin üstünde ve altında kompozit elemanın en küçük kenar genişliğinin iki katı uzaklığı aşmayacak şekilde belirlenen *yük geçiş uzunluğu* içinde sağlanacaktır. Ayrıca, ankrajlar çelik elemanın en az iki yüzüne ve eksenlerine göre simetrik yerleştirilecektir.

Başlıklı çelik ankrajlarda yönetmelik koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.8.1 uyarınca,

$$d_{sa} = 19\,\text{mm} \le 2.5\left(t_w\right) = 2.5\left(11.5\right) = 28.75\,\text{mm} \checkmark$$

Kompozit kolonda başlıklı çelik ankraj sadece kayma etkisinde kalacağından, *Yönetmelik* 12.8.3 uyarınca,

$$\frac{h_{sa}}{d_{sa}} = \frac{110}{19} = 5.78 \ge 5 \checkmark$$

Yönetmelik 12.8.3.5(a) uyarınca, çelik enkesitin gövdesine yerleştirilen çelik ankrajlar için uygulananan beton örtü kalınlığı,

$$\frac{h_1}{2} - \frac{t_w}{2} - h_{sa} = \frac{700}{2} - \frac{11.5}{2} - 110 = 234.25\text{mm} \ge (\text{donatı pas payı}+10\text{mm}) \checkmark$$

Yük geçiş uzunluğu içine yerleştirilecek başlıklı çelik ankrajlarda ara uzaklık,

$$e = \frac{\text{yük geçiş uzunluğu-elemanın üst ucundan ilk ankraja uzaklık}}{\left[\text{Toplam ankraj sayısı/her bir gruptaki ankraj sayısı}\right] - 1}$$

$$e = \frac{1400\text{-}140}{\left[52/4\right] - 1} = 105\text{mm}$$

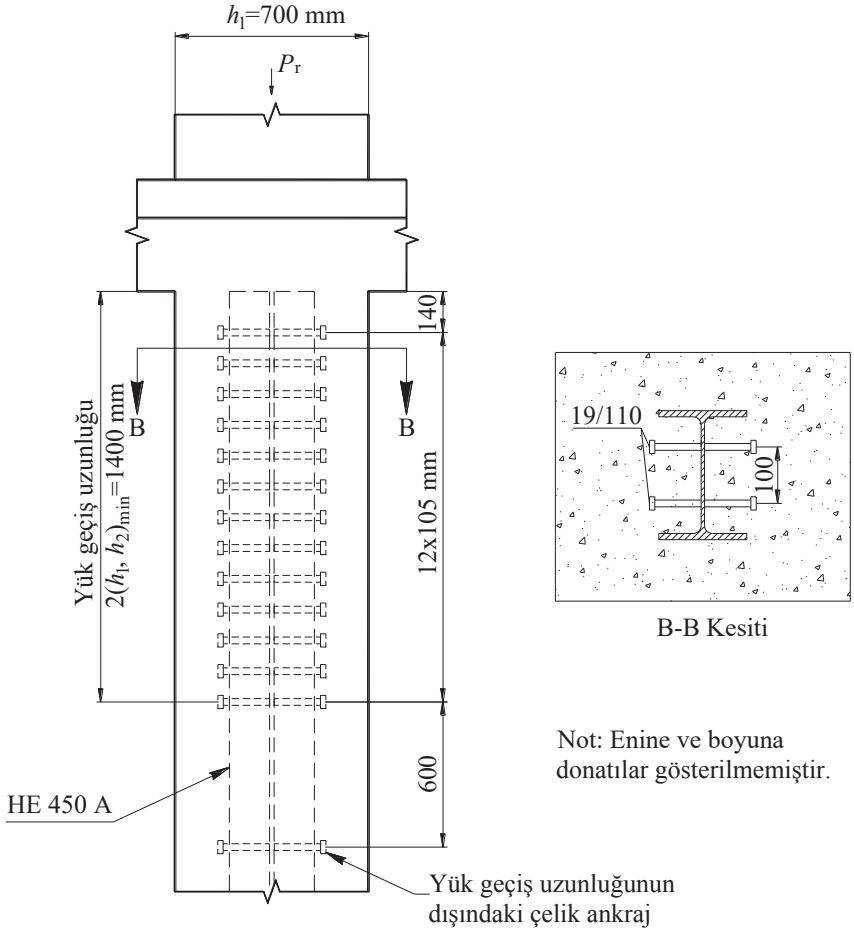
Yönetmelik 12.8.3.5(b) uyarınca, çelik enkesitin gövde genişliği içinde iki başlıklı çelik ankraj arasındaki uzaklık,

$$e_1 = 100\text{mm} \ge s_{min} = 4d_{sa} = 4\left(19\right) = 76\text{mm} \checkmark$$

Yönetmelik 12.8.3.5(c) uyarınca, başlıklı çelik ankrajların arasındaki uzaklık,

$$s_{min} = 4d_{sa} = 4\left(19\right) = 76\text{mm} \le e = 105\text{mm} \le s_{maks} = 32d_{sa} = 32\left(19\right) = 608\text{mm} \checkmark$$

Yönetmelik 12.7.3.1 uyarınca, yük geçiş uzunluğunun içinde ve dışında çelik enkesitin gövdesinin her iki yüzüne yerleştirilecek çelik ankrajların aralığı uygundur.



Şekil 12.4.4 – Çelik ankrajlar ile yük geçişinin sağlanması

Örnek 12.5

Örnek 12.4 te verilen eleman eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi (YDKT)

c. Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi (GKT)

Çözüm

a. Elemanın P_n, karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 12.3.1.3 uyarınca, akma sınır durumu esas alınarak,

$$P_{no} = F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} \tag{12.7}$$

$$P_{no} = 355(21800)10^{-3} + 500(4920)10^{-3} = 10199\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
b. Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımı	**c.** Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımı
$P_d = \phi_t P_n = 0.90(10199) = 9179\ \text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_t = 10199/1.67 = 6107\ \text{kN}$

Kompozit elemanda uygulanan dış yük aktarımına göre, beton ve çelik bileşenlerin ortak yüzeyleri arasındaki yük aktarımı *Yönetmelik* 12.7 uyarınca kontrol edilmelidir.

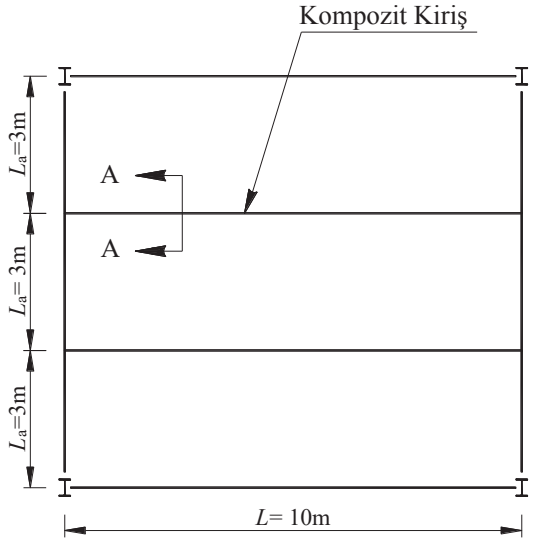
Örnek 12.6

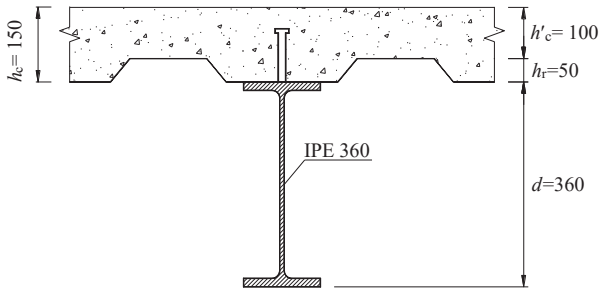
Aşağıdaki şekilde sistemi ve enkesit detayı verilen kompozit kirişin

a. Karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (GKT)





A-A Kesiti

Beton sınıfı

C 30 f_{ck} =30 N/mm^2

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Çelik enkesit

IPE 360		
A = 7270 mm^2	d = 360 mm	h = 334.6 mm
b_f = 170 mm	t_w=8 mm	t_f = 12.7 mm

Çözüm

a. Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Kompozit kirişte *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.2.3 (a) uyarınca,

$$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 30\,\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2 \checkmark$$

Yönetmelik 12.2.3 (c) uyarınca,

$$F_y = 355\,\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2 \checkmark$$

Kompozit kirişte döşeme etkin genişliği

Yönetmelik 12.4.1.1(a) ve (b) uyarınca,

$$\left.\begin{aligned} b_1^{'} &\le \frac{L}{8} = \frac{10}{8} = 1.25\,\text{m} \\ b_2^{'} &\le \frac{L_a}{2} = \frac{3}{2} = 1.50\,\text{m} \end{aligned}\right\}_{\min} = 1.25\,\text{m}$$

$$b = 2 \times 1.25 = 2.50\,\text{m}$$

Yönetmelik 12.4.2.1 (a) uyarınca,

$$\frac{h}{t_w} = \frac{334.6}{8} = 41.825 \le 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89 \checkmark$$

olduğundan, kompozit enkesitte plastik gerilme dağılımı yöntemi ile akma sınır durumu için karakteristik eğime momenti dayanımı belirlenecektir.

Yönetmelik 12.4.2.3 (f) uyarınca, çelik sac hadveleri çelik kirişin boyuna eksenine paralel yerleştirildiğinden, çelik sacın üst kotunun altında kalan betonun katkısı tasarımda hesaba katılabilir. Bu durumda, çelik sac geometrisi güvenli tarafta kalınarak gözönüne alınarak,

$$A_c = \left(2500 \times 100\right) + \left(0.5 \times 2500 \times 50\right) = 312500\,\text{mm}^2$$

Kompozit kirişin tasarımında gözönüne alınacak basınç kuvveti,

$$C_s = P_{yt} = F_y A_s = 355\left(7270\right)10^{-3} = 2580.85\,\text{kN} \qquad (12.20a)$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} A_c = 0.85\left(30\right)\left(312500\right)10^{-3} = 7968.75\,\text{kN} \qquad (12.20b)$$

Tam etkileşimli kompozit kiriş varsayımı ile betondaki basınç kuvveti,

$$C = \left(C_s; C_c\right)_{\min} = 2580.85\,\text{kN}$$

$C_s < C_c$ olduğundan, plastik tarafsız eksen betonarme döşeme içindedir.

Bu durumda, beton basınç bloğunun derinliği,

$$a = \frac{C}{0.85 f_{ck} b} = \frac{2580850}{0.85\left(30\right)2500} = 40.48\,\text{mm} \qquad (12.19)$$

Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n = C_c\left(h_c - \frac{a}{2}\right) + P_{yt}\left(\frac{d}{2}\right) \qquad (12.18)$$

$$M_n = 2580.85\left(150 - \frac{40.48}{2}\right)10^{-3} + 2580.85\left(\frac{360}{2}\right)10^{-3} = 799\,\text{kNm}$$

Yönetmelik 12.4.2 uyarınca,

YDKT	GKT
b. Kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımı	**c.** Kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(799) = 719.10$ kNm	$M_g = M_n / \Omega_b = 799 / 1.67 = 478.44$ kNm

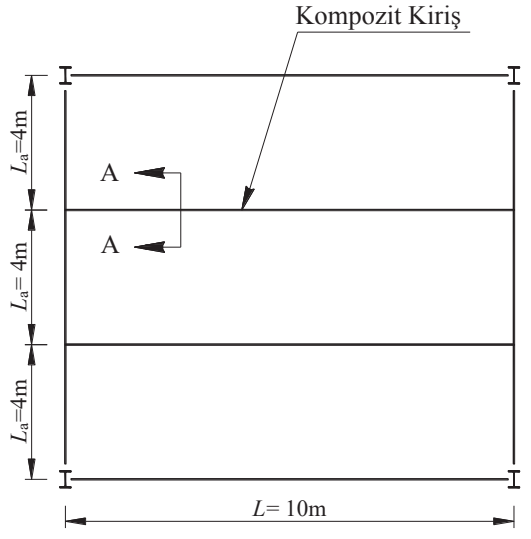
Örnek 12.7

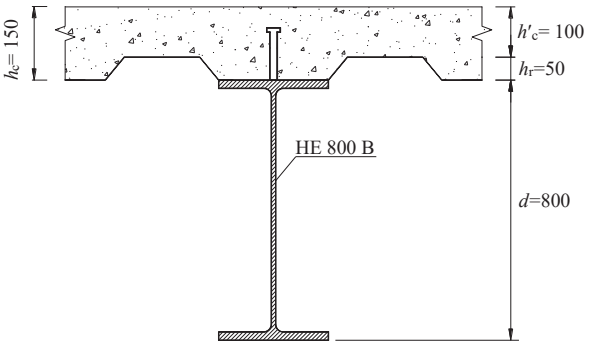
Aşağıdaki şekilde sistemi ve enkesit detayı verilen kompozit kirişin

a. Karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Tasarım eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (YDKT)

c. Güvenli eğilme momenti dayanımının belirlenmesi (GKT)





A-A Kesiti

Beton sınıfı

C 30 f_{ck} =30 N/mm^2

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Çelik enkesit

HE 800 B		
A = 33420 mm^2	d = 800 mm	h = 734 mm
b_f = 300 mm	t_f = 33 mm	t_w=17.5 mm

Çözüm

a. Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Kompozit kirişte *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.2.3(a) uyarınca,

$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 30\,\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.2.3(c) uyarınca,

$F_y = 355\,\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2$ ✓

Kompozit kirişte döşeme etkin genişliği

Yönetmelik 12.4.1.1(a) ve (b) uyarınca,

$$\left.\begin{aligned} b_1' &\le \frac{L}{8} = \frac{10}{8} = 1.25\text{m} \\ b_2' &\le \frac{L_a}{2} = \frac{4}{2} = 2.00\text{m} \end{aligned}\right\}_{\min} = 1.25\,\text{m}$$

$$b = 2\times 1.25 = 2.50\,\text{m}$$

Yönetmelik 12.4.2.1 (a) uyarınca,

$$\frac{h}{t_w} = \frac{734}{17.5} = 41.94 \le 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89 \checkmark$$

olduğundan, kompozit enkesitte plastik gerilme dağılımı yöntemi ile akma sınır durumu için karakteristik eğime momenti dayanımı belirlenecektir.

Yönetmelik 12.4.2.3 (f) uyarınca, çelik sac hadveleri çelik kirişin boyuna eksenine paralel yerleştirildiğinden, çelik sacın üst kotunun altında kalan betonun katkısı tasarımda hesaba katılabilir. Bu durumda, çelik sac geometrisi güvenli tarafta kalınarak gözönüne alınarak,

$$A_c = \left(2500\times 100\right) + \left(0.5\times 2500\times 50\right) = 312500\,\text{mm}^2$$

Kompozit kirişin tasarımında gözönüne alınacak basınç kuvveti,

$$C_s = F_y A_s = 355\left(33420\right)10^{-3} = 11864.10\,\text{kN} \qquad (12.20a)$$

$$C_c = 0.85 f_{ck} A_c = 0.85\left(30\right)\left(312500\right)10^{-3} = 7968.65\,\text{kN} \qquad (12.20b)$$

Tam etkileşimli kompozit kiriş varsayımı ile basınç kuvveti,

$$C = \left(C_s; C_c\right)_{\min} = 7968.65\,\text{kN}$$

$C_s > C_c$ olduğundan, plastik tarafsız eksen çelik enkesitten geçmektedir.

Bu durumda, basınç etkisindeki çelik alanı,

$$C_c + F_y A_{sc} = P_{yt} - F_y A_{sc}$$

$$A_{sc} = \frac{P_{yt} - C_c}{2F_y} = \frac{11864.10 - 7968.75}{2\left(355\right)10^{-3}} = 5486.41\,\text{mm}^2$$

olduğundan, plastik tarafsız eksenin çelik enkesitin başlığının üstünden uzaklığı (veya basınçta kalan başlık kalınlığı)

$$t_f' = \frac{A_{sc}}{b_f} = \frac{5486.41}{300} = 18.29\,\text{mm} < t_f = 33\,\text{mm}$$

Çekme kuvveti çelik enkesitte plastik tarafsız eksenin altındaki alanın ağırlık merkezinde etkimektedir ve yeri belirlenmelidir.

	A [mm^2]	y [mm]	Ay [mm^3]
HE 800 B	33420	$800/2=400$	13368000
$b_f t'_f$	$300(-18.29)=-5487$	$18.29/2=9.145$	–50178.62
Toplam	27933		13317821.39

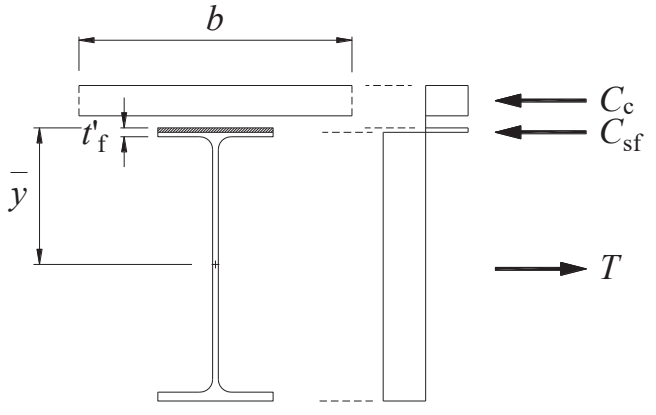
$$\bar{y}=\frac{\sum Ay}{\sum A}=\frac{13317821.39}{27933}=476.78\,\text{mm}$$

Betonda basınç bloğunun derinliği,

$$a=\frac{C}{0.85f_{ck}b}=\frac{7968.75(10)^3}{0.85(30)2500}=125\text{mm}$$

Çelik enkesitin başlık bölümündeki basınç kuvveti,

$$C_{sf}=b_f t'_f F_y=300(18.29)355(10)^{-3}=1947.89\text{kNm}$$



Şekil 12.7.1 Plastik tarafsız eksen ve iç kuvvetler

Tam etkileşimli kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n=C_c\left(\bar{y}+h_c-\frac{a}{2}\right)+C_{sf}\left(\bar{y}-\frac{t'_f}{2}\right)$$

$$M_n=7968.75\left(476.78+150-\frac{125}{2}\right)10^{-3}+1947.89\left(476.78-\frac{18.29}{2}\right)10^{-3}=5407\,\text{kNm}$$

veya kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımı, *Yönetmelik* Denk.(12.18) uygulanarak belirlenebilir.

$$M_n=C(d_1+d_2)+P_{yt}(d_3-d_2) \qquad (12.18)$$

$$M_n = 7968.75\left[\left(150-\frac{125}{2}\right)+\left(\frac{18.29}{2}\right)\right]10^{-3}+11864.10\left[\left(\frac{800}{2}\right)-\left(\frac{18.29}{2}\right)\right]10^{-3}$$

$$M_n = 5407 \text{ kNm}$$

Yönetmelik 12.4.2 uyarınca,

YDKT	GKT
b. Kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımı	**c.** Kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımı
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(5407) = 4866.30 \text{ kNm}$	$M_g = M_n/\Omega_b = 5407/1.67 = 3237.72 \text{ kNm}$

Örnek 12.8

Basit mesnetli kompozit kirişe ait sistem, yük bilgileri ve enkesit detayı aşağıdaki şekilde verilmektedir.

Betonarme döşeme, çelik kirişe mesnetlenen trapez enkesitli olarak şekil verilmiş çelik sac üzerine uygulanmıştır. Çelik sac hadveleri çelik kiriş boyuna eksenine paralel konumda yerleştirilmiştir.

Sabit ve hareketli yükler

Yapım aşaması

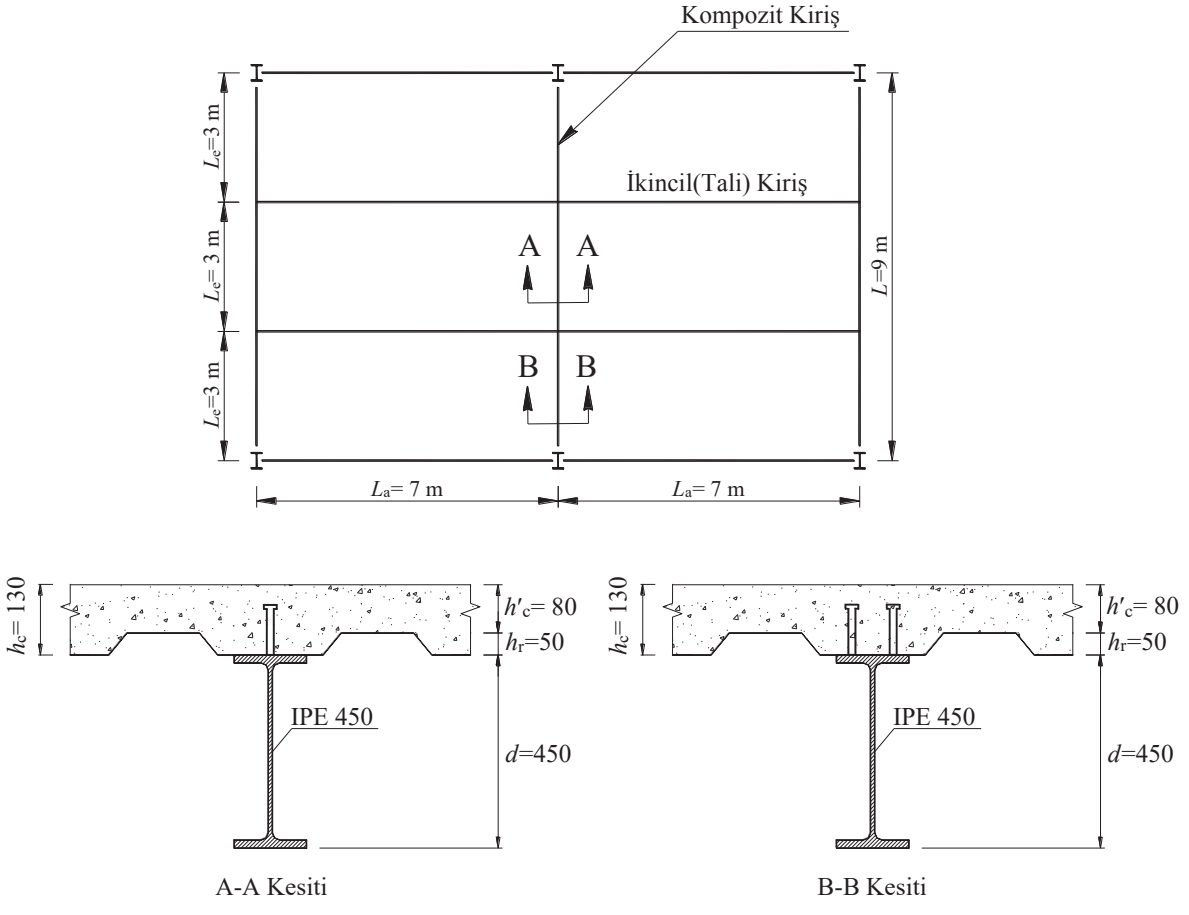
Sabit yükler (Çelik sac + beton) : 2.5 kN/m^2

Hareketli yükler (beton dökümü sırasındaki) : 1.0 kN/m^2

Kompozit çalışma aşaması

Sabit yükler (sıva + kaplama) : 2.0kN/m^2

Hareketli yükler : 5.0kN/m^2



a. Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü(GKT)

d. Başlıklı çelik ankraj sayısının belirlenmesi

e. Kompozit kirişte düşey yerdeğiştirme (sehim) kontrolü

f. Kompozit kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

g. Kompozit kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

h. Kompozit kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü(GKT)

Beton sınıfı

C 30 f_{ck} =30 N/mm^2

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Çelik enkesit

IPE 450			
A = 9880 mm^2	d = 450 mm	h = 378.8 mm	
b_f = 190 mm	t_f = 14.6 mm	t_w=9.4 mm	I_x=33740 cm^4

Çelik ankrajlar

19/100 F_u = 450 N/mm^2

Çelik döşeme sacı

$h_r = 50\,\text{mm}$ $w_r = 165\,\text{mm}$ $t_{sac} = 1.2\,\text{mm}$

Çözüm

Kompozit kiriş *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.2.3 (a) uyarınca,

$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 30\,\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.2.3 (c) uyarınca,

$F_y = 355\,\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2$ ✓

Şekil verilmiş çelik döşeme sacı ve başlıklı çelik ankraj *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.4.2.3 uyarınca,

(a) $h_r = 50\,\text{mm} \le 75\text{mm}$ ✓
$w_r = 165\,\text{mm} \ge 50\text{mm}$ ✓

(b) $h_{sa} - t_{sac} - h_r = 100 - 1.2 - 50 = 48.8\text{mm} \ge 38\text{mm}$ ✓
$h_c - t_{sac} - h_{sa} = 130 - 1.2 - 100 = 28.8\text{mm} \ge 12\text{mm}$ ✓

(c) $h_c - h_r = 130 - 50 = 80\text{mm} \ge 50\text{mm}$ ✓

Yönetmelik 12.8.1 uyarınca,

$d_{sa} = 19\,\text{mm} \le 19\text{mm}$ ✓

Ayrıca, profilin başlığına gövde hizası üzerinden kaynaklanmadığından,

$d_{sa} = 19\text{mm} \le 2.5t_f = 2.5 \times 14.6 = 36.5\ \text{mm}$ ✓

Yönetmelik 12.8.2 uyarınca,

$h_{sa} = 100\text{mm} \ge 4d_{sa} = 4 \times 19 = 76\text{mm}$ ✓

Yapım aşaması

Yapım aşamasında düşey yerdeğiştirme (sehim) kontrolü

Sabit yükler

Çelik sac +beton : 2.5 kN/m^2

Hareketli yükler (beton dökümü aşamasındaki yükler) : 1.0 kN/m^2

Sabit yükler altında ikincil kirişlerin mesnet tepkisi, kiriş ağırlığı, w_g=0.5 kN/m alınarak,

$$P_G = \left(2.5\times 3 + 0.5\right)\frac{7}{2} = 28\text{kN}$$

olmak üzere, çelik kiriş ağırlığı w_g =1.0 kN/m alınarak, IPE 450 enkesitli çelik kirişte sabit yüklerden düşey yerdeğiştirme,

$$\Delta_1 = \frac{P_G L^3}{28EI} + \frac{5w_g L^4}{384EI}$$

$$\Delta_1 = \frac{2(28)(9000)^3 (10)^3}{28(200000)33740(10)^4} + \frac{5(1)(9000)^4}{384(200000)33740(10)^4}$$

$$\Delta_1 = 21.61 + 1.266 = 22.87 \text{ mm} = L/394 \le L/360 \checkmark$$

Yapım aşamasında IPE 450 enkesitli çelik kirişte sabit yükler altında düşey yerdeğiştirmenin L/360 veya 25mm sınırını aşmaması önerilmektedir.

Bu koşulun sağlanamadığı durumda çelik kirişe ters sehim verilmesi veya yapım aşamasında geçici destek kullanımı ile çelik kirişin düşey yerdeğiştirmesi azaltılabilir. (Bkz. *Kaynak Yayınlar*, AISC Design Guide 3).

Yapım aşamasında hareketli yük etkisi için ikincil kirişlerin mesnet tepkisi,

$$P_Q = \left(1.0\times 3\right)\frac{7}{2} = 10.5\text{kN}$$

olmak üzere, yapım aşamasında IPE 450 enkesitli çelik kirişte hareketli yüklerden düşey yerdeğiştirme,

$$\Delta_2 = \frac{P_Q L^3}{28EI} = \frac{2(10.5)(9000)^3 (10)^3}{28(200000)33740(10)^4} = 8.10\text{mm}$$

Yapım aşamasında, çelik kirişte toplam düşey yerdeğiştirme,

$$\Delta_{\text{yapım}} = \Delta_1 + \Delta_2 = 22.87 + 8.10 = 30.97 \text{ mm} = L/290 \le L/300 \checkmark$$

Ayrıca, beton gerekli dayanımına ulaşıncaya kadar, çelik enkesitin yapım aşamasındaki sabit ve hareketli yükler altındaki eğilme dayanımı, *Yönetmelik* Bölüm 9 da verilen kurallar gözönüne alınarak kontrol edilmelidir.

a. Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 12.4.2.1 (a) uyarınca,

$$\frac{h}{t_w}=\frac{378.8}{9.4}=40.3\le 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}}=3.76\sqrt{\frac{200000}{355}}=89\checkmark$$

olduğundan, kompozit enkesitte plastik gerilme dağılımı yöntemi ile akma sınır durumu için karakteristik eğime momenti dayanımı belirlenecektir.

Kompozit kirişte döşeme etkin genişliği

Yönetmelik 12.4.1.1(a) ve (b) uyarınca,

$$\left.\begin{aligned} b_1' &\le \frac{L}{8}=\frac{9}{8}=1.125\text{m}\\ b_2' &\le \frac{L_a}{2}=\frac{7}{2}=3.50\text{m}\end{aligned}\right\}_{\min}=1.125\,\text{m}$$

$$b=2\times 1.125=2.25\,\text{m}$$

Yönetmelik 12.4.2.3(f) uyarınca, çelik sac hadveleri çelik kirişin boyuna eksenine paralel yerleştirildiğinden, çelik sacın üst kotunun altında kalan betonun katkısı tasarımda hesaba katılabilir. Bu durumda, çelik sac geometrisi güvenli tarafta kalınarak gözönüne alınarak,

$$A_c=(2250\times 80)+(0.5\times 2250\times 50)=236250\,\text{mm}^2$$

Kompozit döşemenin tasarımında gözönüne alınacak basınç kuvveti,

$$C_s=P_{yt}=F_yA_s=355(9880)10^{-3}=3507\,\text{kN} \qquad (12.20a)$$

$$C_c=0.85f_{ck}A_c=0.85(30)(236250)10^{-3}=6024\,\text{kN} \qquad (12.20b)$$

$$(C_s;C_c)_{\min}=3507\,\text{kN}$$

$C_s<C_c$ olduğundan, plastik tarafsız eksen betonarme döşeme içindedir.

Bu durumda, beton basınç bloğunun derinliği,

$$a=\frac{C}{0.85f_{ck}b}=\frac{3507(10)^3}{0.85(30)2250}=61\text{mm} \qquad (12.19)$$

Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n=C_c\left(h_c-\frac{a}{2}\right)+P_{yt}\left(\frac{d}{2}\right) \qquad (12.18)$$

$$M_n=3507\left(130-\frac{61}{2}\right)10^{-3}+3507\left(\frac{450}{2}\right)10^{-3}=1138\,\text{kNm}$$

veya

$$y = \frac{d}{2} + h_c - \frac{a}{2} = \frac{450}{2} + 130 - \frac{61}{2} = 324.50\text{mm}$$

$$M_n = Cy$$

$$M_n = 3507(324.5)10^{-3} = 1138\,\text{kNm}$$

Yönetmelik 12.4.2 uyarınca,

YDKT	GKT
İkincil kirişlerin mesnet tepkisi	
$w_u = 1.2(2.5+2)3 + 1.2(0.5) + 1.6(5)3$ $w_u = 40.8\,\text{kN/m}$ $P_u = \frac{w_u L_a}{2} = \frac{40.8(7)}{2} = 142.8\,\text{kN}$	$w_a = (2.5+2)3 + 0.5 + (5)3$ $w_a = 29.0\,\text{kN/m}$ $P_a = \frac{w_a L_a}{2} = \frac{29(7)}{2} = 101.50\,\text{kN}$
Kompozit kirişte gerekli eğilme momenti dayanımı	
$M_u = \sum P_u L_e + \frac{(1.2 \times w_g) L^2}{8}$ $= 2 \times 142.8(3) + \frac{(1.2 \times 1.0)9^2}{8} = 869\text{kNm}$	$M_a = \sum P_a L_e + \frac{w_g L^2}{8}$ $= 2 \times 101.50(3) + \frac{(1.0)9^2}{8} = 619\text{kNm}$
b. Kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(1138) = 1024\,\text{kNm}$	$M_g = M_n / \Omega_b = 1138/1.67 = 681\text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{869}{1024} = 0.85 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{619}{681} = 0.91 \le 1.0$ ✓

d. Başlıklı çelik ankrajların sayısı ve yerleşimi

Beton elastisite modülü, *Yönetmelik* 12.2.1 uyarınca,

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} = 0.043(2400)^{1.5} \sqrt{30} = 27690\,\text{N/mm}^2 \qquad (12.1)$$

Yönetmelik 12.4.2 uyarınca,

$$A_{sa} = \frac{\pi d_{sa}^2}{4} = \frac{\pi (19)^2}{4} = 284\text{mm}^2$$

Yönetmelik Tablo 12.6 uyarınca, hadveleri çelik kiriş boyuna eksenine paralel olarak yerleştirildiği çelik döşeme sacı üzerinden çelik ankrajların kaynaklanması durumunda,

$\frac{w_r}{h_r} = \frac{165}{50} = 3.3 \ge 1.5$ olduğundan,

$R_g = 1.0$

$R_p = 0.75$

$$Q_n = 0.5 A_{sa} \sqrt{f_{ck} E_c} \le R_g R_p A_{sa} F_u \qquad (12.35)$$

$$Q_n = 0.5(284)\sqrt{30(27690)} = 194422\ \text{N} \le 1.0(0.75)284(450) = 95850\ \text{N} \times$$

$$Q_n = 95850\text{N}$$

Tam etkileşimli kompozit kiriş varsayımı ile, karakteristik eğilme momenti dayanımını belirleyen basınç kuvveti,

$$\text{C} = (C_s; C_c)_{min} = 3507\,\text{kN}$$

Yönetmelik 12.4.2.4(a) uyarınca, çelik ankrajlar ile aktarılacak kesme kuvveti, V',

$$V' = 3507\,\text{kN}$$

Yönetmelik 12.8.2.3 uyarınca, tekil yük ile eğilme momentinin sıfır olduğu en yakın nokta (mesnet) arasında kullanılacak çelik ankraj sayısı,

$$N_{ankraj} = \frac{V'}{Q_n} = \frac{3507}{95.85} = 37\,\text{adet}$$

olur. Bu durumda, kiriş başlığında yanyana 2 adet çelik ankraj elemanı e = 125mm aralık ile kullanıldığında, ankrajlar, ($2 \times 20 = 40\,\text{adet} \ge 37\,\text{adet} \checkmark$) olmak üzere Şekil 12.8.1 de görüldüğü gibi yerleştirilmektedir.

Kompozit kirişin iki tali kiriş arasında kalan bölümünde eğilme momenti değeri, sadece kompozit kirişin kendi ağırlığı ile değiştiğinden iki tali kiriş arasındaki eğilme momenti yayılışı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu durumda, başlıklı çelik ankrajların, eğilme momentinin sıfır olduğu nokta ile en büyük olduğu nokta arasında yerleştirilmesi yeterli olacaktır. Kirişin orta $L/3$ uzunluğu boyunca da tek sıra başlıklı çelik ankraj, merkezleri arasındaki maksimum uzaklık koşulu sağlanacak şekilde eşit aralıklı olarak yerleştirilmiştir. Böylece, (2×20 + 3 + 2×20) olmak üzere, toplam 83 adet çelik ankraj kullanılacaktır (Şekil 12.8.1).

Kesme kuvveti doğrultusu boyunca, çelik ankrajın merkezi ile serbest kenar arasındaki minimum uzaklık 200mm koşuluna uygun yerleştirilmiştir, (*Yönetmelik* 12.8.2.4(c)).

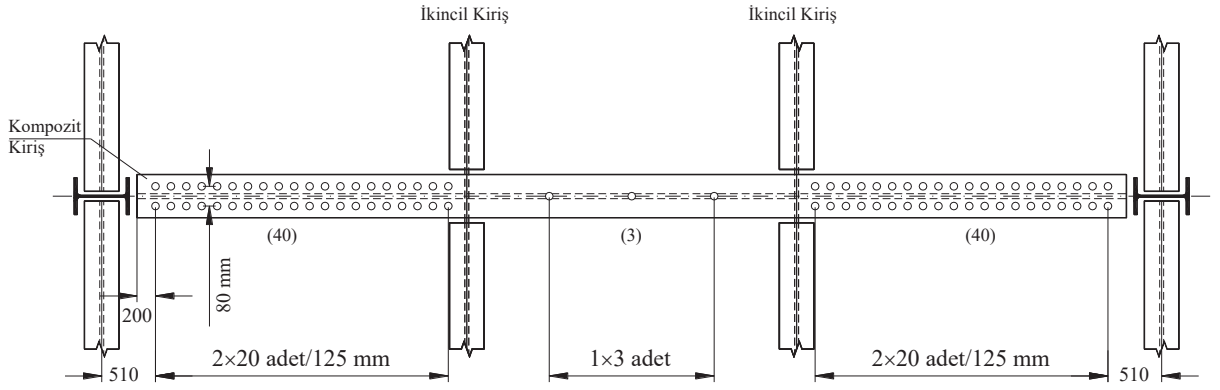
Yönetmelik 12.8.2.4(d) uyarınca, başlıklı çelik ankrajların, kiriş başlığındaki ve kiriş boyuna ekseni doğrultusundaki merkezleri arasındaki minimum uzaklık çapının 4 katı olmalıdır.

80mm ≥ $4d_{sa}$=4×19=76mm ✓

125mm ≥ $4d_{sa}$=4×19=76mm ✓

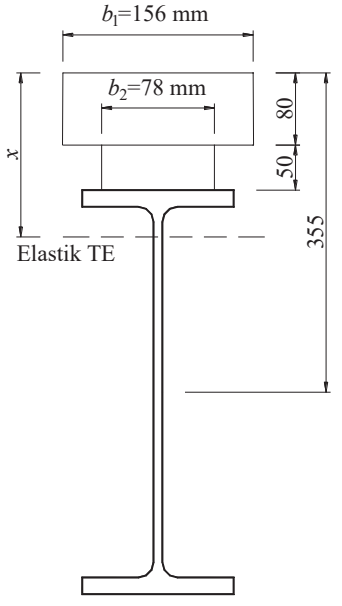
Yönetmelik 12.8.2.4(e) uyarınca, başlıklı çelik ankrajların, merkezleri arasındaki maksimum uzaklık döşeme kalınlığının 8 katını veya 900mm aşmamalıdır.

125mm ≤ ($8h_c$=8×130=1040mm veya 900mm) ✓



Şekil 12.8.1 Başlıklı çelik ankraj yerleşimi

e. Kompozit kirişte düşey yerdeğiştirme (sehim) kontrolü



Şekil 12.8.2 – Dönüştürülmüş enkesit modeli

Kompozit kirişin sehimi, dönüştürülmüş atalet momenti kullanılarak belirlenebilir. Betonun zamana bağlı deformasyonunun gözönüne alınması amacıyla, *Yönetmelik* 12.4.1.3 uyarınca, beton döşeme genişliği, 2*n* oranında azaltılarak sehim kontrolleri yapılmıştır. Çelik sacın üst kotunun altında kalan betonun katkısı da gözönüne alınmıştır.
Eşdeğer çelik enkesit için genişlik,

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{27690} = 7.22$$

$$b_1 = \frac{b}{2n} = \frac{2250}{2(7.22)} = 156\text{mm}$$

$$b_2 = \frac{0.5(2250)}{2(7.22)} = 78\text{mm}$$

Elastik tarafsız eksenin çelik enkesitte olduğu varsayımı ile,

$$9880(355-x)=(156\times80)(x-80/2)+(78\times50)(x-80-50/2)=0$$

$$x=168\text{mm}>\text{h}_\text{c}=130\text{mm}\checkmark$$

$$I_{\text{tr}}=33740(10)^4+9880(355-186)^2+\frac{156\times80^3}{12}+(156\times80)(186-80/2)+...$$

$$...+\frac{78\times50^3}{12}+(78\times50)(186-80-50/2)^2=91866(10)^4\ \text{mm}^4$$

Yönetmelik 12.4.1.3 uyarınca,

$$I=0.75I_{\text{tr}}=68900(10)^4\ \text{mm}^4 \qquad (12.17a)$$

Hareketli yük etkisinde kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi, ikincil kirişlerin mesnet tepkileri

$$P_{\text{Q}}=(5\times3)\frac{7}{2}=52.5\ \text{kN}$$

olduğundan,

$$\Delta_3=\frac{P_{\text{Q}}L^3}{28EI}=\frac{2(52.5)(9000)^3(10)^3}{28(200000)68900(10)^4}=19.84\ \text{mm}=L/454\le L/360\ \checkmark$$

Sabit yükler (sıva+kaplama) etkisinde kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi, ikincil kirişlerin mesnet tepkileri

$$P_{\text{G}}=(2\times3)\frac{7}{2}=21\ \text{kN}$$

olduğundan,

$$\Delta_4=\frac{P_{\text{G}}L^3}{28EI}=\frac{2(21)(9000)^3(10)^3}{28(200000)68900(10)^4}=7.94\ \text{mm}$$

toplam yükler altında kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi,

$$\Delta=\Delta_1+\Delta_3+\Delta_4=22.23+19.84+7.94=50\ \text{mm}=L/180>L/300\ \times$$

Bu durumda, kompozit kiriş düşey yerdeğiştirmesi tavsiye edilen sınır değeri aştığından, bu örnekte kiriş kesitinin değiştirilmesi yerine yapım aşamasında çelik enkesite ters sehim verilerek düşey yerdeğiştirmenin sınır değerin altına inmesi sağlanabilir (Bkz. *Kaynak Yayınlar*, AISC Design Guide 3). Örneğin, 25mm civarında ters sehim ile kompozit kirişin toplam yükler altında düşey yerdeğiştirmesinin, $L/300$ sınır değerinin altında kalması sağlanır.

f. Kompozit kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 12.5.2 uyarınca, betonarme döşemenin çelik kirişe mesnetlenen şekil verilmiş çelik sac üzerinden uygulandığı çelik ankrajlı kompozit kirişlerde, sadece çelik enkesit

gözönüne alınarak, *Yönetmelik* Bölüm 10 da verilen koşullar gözönüne alınır. Bu durumda, IPE 450 enkesitli kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* 10.2.1(a) uyarınca,

$h/t_w = 378.8/9.4 = 40.29 \le 2.24\sqrt{E/F_y} = 2.24\sqrt{200000/355} = 53.17$ olduğundan,

ϕ_v = 1.00 (YDKT) veya Ω_v=1.50 (GKT) ve C_{v1}=1.0 olarak alınacaktır.

Kompozit kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n, *Yönetmelik* 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_yA_wC_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(355)(450\times9.4)1.0(10)^{-3} = 901\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
İkincil kirişlerin mesnet tepkisi	
$w_u = 1.2(2.5+2)3+1.2(0.5)+1.6(5)3$ $= 40.8\text{kN/m}$ $P_u = \frac{w_uL_a}{2} = \frac{40.8(7)}{2} = 142.8\text{kN}$	$w_a = (2.5+2)3+(0.5)+(5)3$ $= 29\text{kN/m}$ $P_a = \frac{w_aL_a}{2} = \frac{29(7)}{2} = 101.50\,\text{kN}$
Kompozit kirişte gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = \sum P_u + \frac{(1.2\times w_g)L}{2}$ $= 2\times142.8 + \frac{(1.2\times1.0)9}{2} = 291\text{kN}$	$V_a = \sum P_a + \frac{(w_g)L}{2}$ $= 2\times101.50 + \frac{(1.0)9}{2} = 207.50\text{kN}$
g. Kompozit kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**h.** Kompozit kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_vV_n = 1.0(901) = 901\text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 901/1.50 = 601\text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{291}{901} = 0.33 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{207.50}{601} = 0.35 \le 1.0$ ✓

Örnek 12.9

Basit mesnetli kompozit kirişe ait sistem, yük bilgileri ve enkesit detayı aşağıdaki şekilde verilmektedir.

Betonarme döşeme, çelik kirişe mesnetlenen trapez enkesitli olarak şekil verilmiş çelik sac üzerine uygulanmıştır. Çelik sac hadveleri çelik kiriş boyuna eksenine dik konumda yerleştirilmiştir.

Sabit ve hareketli yükler

Yapım aşaması

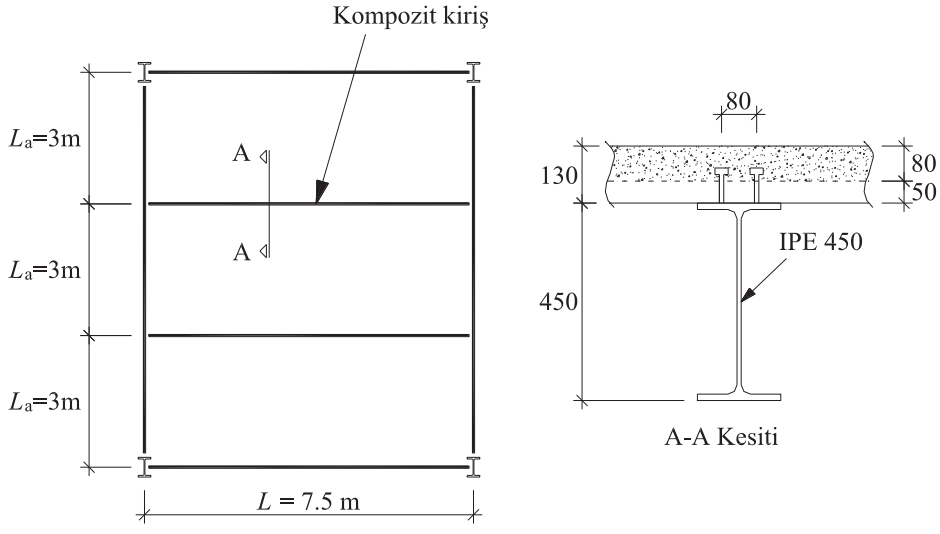
Sabit yükler (Çelik sac +beton) : 2.5 kN/m^2

Hareketli yükler (beton dökümü sırasındaki) : 1.0 kN/m^2

Kompozit çalışma aşaması

Sabit yükler (sıva+kaplama) : 2.0 kN/m^2

Hareketli yükler : 5.0 kN/m^2



a. Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

b. Kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü (GKT)

d. Başlıklı çelik ankraj sayısının belirlenmesi

e. Kompozit kirişte düşey yerdeğiştirme (sehim) kontrolü

f. Kompozit kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

g. Kompozit kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

h. Kompozit kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (GKT)

Beton sınıfı

C 30 f_{ck} =30 N/mm^2

Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Çelik enkesit

IPE 450			
A = 9880 mm^2	d = 450 mm	h = 378.8 mm	
b_f = 190 mm	t_f = 14.6 mm	t_w=9.4 mm	I_x=33740 cm^4

Çelik ankrajlar

19/100 $F_u = 450$ N/mm^2

Çelik döşeme sacı

$h_r = 50\,\text{mm}$ $w_r = 165\,\text{mm}$ $t_{sac} = 1.2\,\text{mm}$

Çözüm

Kompozit kiriş *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.2.3 (a) uyarınca,

$20\text{N/mm}^2 \le f_{ck} = 30\,\text{N/mm}^2 \le 70\text{N/mm}^2$ ✓

Yönetmelik 12.2.3 (c) uyarınca,

$F_y = 355\,\text{N/mm}^2 \le 460\text{N/mm}^2$ ✓

Şekil verilmiş çelik döşeme sacı ve başlıklı çelik ankraj *Yönetmelik* koşullarının kontrolü

Yönetmelik 12.4.2.3 uyarınca,

(d) $h_r = 50\,\text{mm} \le 75\text{mm}$ ✓

$w_r = 165\,\text{mm} \ge 50\text{mm}$ ✓

(e) $h_{sa} - t_{sac} - h_r = 100 - 1.2 - 50 = 48.8\text{mm} \ge 38\text{mm}$ ✓

$h_c - t_{sac} - h_{sa} = 130 - 1.2 - 100 = 28.8\text{mm} \ge 12\text{mm}$ ✓

(f) $h_c - h_r = 130 - 50 = 80\text{mm} \ge 50\text{mm}$ ✓

Yönetmelik 12.8.1 uyarınca,

$d_{sa} = 19\,\text{mm} \le 19\text{mm}$ ✓

Yönetmelik 12.8.2 uyarınca,

$h_{sa} = 100\text{mm} \ge 4d_{sa} = 4 \times 19 = 76\text{mm}$ ✓

Yapım aşaması

Yapım aşamasında düşey yerdeğiştirme (sehim) kontrolü

Sabit yükler

Çelik sac +beton : 2.5kN/m^2

Hareketli yükler (beton dökümü aşamasındaki yükler) : 1.0kN/m^2

Kiriş ağırlığı, w_g=1.0kN/m alınarak,

$w_G = (2.5 \times 3 + 1.0) = 8.5\text{kN/m}$

olmak üzere, IPE 450 enkesitli çelik kirişte sabit yükler altında düşey yerdeğiştirme,

$$\Delta_1 = \frac{5w_G L^4}{384EI} = \frac{5(8.5)(7500)^4}{384(200000)33740(10)^4} = 5.19\text{mm}$$

$$\Delta_1 = L/1445 \le L/360 \checkmark$$

Yapım aşamasında IPE 450 enkesitli çelik kirişte sabit yükler altında düşey yerdeğiştirmenin L/360 veya 25mm sınırını aşmaması önerilmektedir. Bu koşulun sağlanamadığı durumda çelik kirişe ters sehim verilmesi veya yapım aşamasında geçici destek kullanımı ile çelik kirişin düşey yerdeğiştirmesi azaltılabilir. (Bkz. AISC Design Guide 3).

Yapım aşamasında hareketli yük etkisi,

$$w_Q = (1.0 \times 3) = 3.0\,\text{kN/m}$$

olmak üzere, yapım aşamasında IPE 450 enkesitli çelik kirişte hareketli yüklerden düşey yerdeğiştirme,

$$\Delta_2 = \frac{5w_Q L^4}{384EI} = \frac{5(3.0)(7500)^4}{384(200000)33740(10)^4} = 1.83\text{mm}$$

Yapım aşamasında, beton yeterli dayanıma ulaşmadan önce, çelik kirişte toplam düşey yerdeğiştirme,

$$\Delta_{\text{yapım}} = \Delta_1 + \Delta_2 = 5.19 + 1.83 = 7.02\text{mm} = L/1068$$

Ayrıca, beton gerekli dayanımına ulaşıncaya kadar, çelik enkesitin yapım aşamasındaki sabit ve hareketli yükler altındaki eğilme dayanımı, *Yönetmelik* Bölüm 9 da verilen kurallar gözönüne alınarak kontrol edilmelidir.

a. Kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 12.4.2.1 (a) uyarınca,

$$\frac{h}{t_w} = \frac{378.8}{9.4} = 40.3 \le 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89 \checkmark$$

olduğundan, kompozit enkesitte plastik gerilme dağılımı yöntemi ile akma sınır durumu için karakteristik eğime momenti dayanımı belirlenecektir.

Kompozit kirişte döşeme etkin genişliği

Yönetmelik 12.4.1.1(a) ve (b) uyarınca,

$$\left.\begin{aligned} b_1' &\le \frac{L}{8} = \frac{7.5}{8} = 0.9375\text{m} \\ b_2' &\le \frac{L_a}{2} = \frac{3}{2} = 1.50\text{m} \end{aligned}\right\}_{\min} = 0.9375\,\text{m}$$

$$b = 2 \times 0.9375 = 1.875\,\text{m}$$

Yönetmelik 12.4.2.3(f) uyarınca, çelik sac hadveleri çelik kirişin boyuna eksenine dik yerleştirildiğinden, çelik sacın üst kotunun altında kalan betonun katkısı tasarımda ihmal edilecektir.

$$A_c = (1875 \times 80) = 150000\text{mm}^2$$

Kompozit kirişin tasarımında gözönüne alınacak basınç kuvveti, C,

$$C_s = P_{yt} = F_y A_s = 355(9880)10^{-3} = 3507\,\text{kN} \tag{12.20a}$$

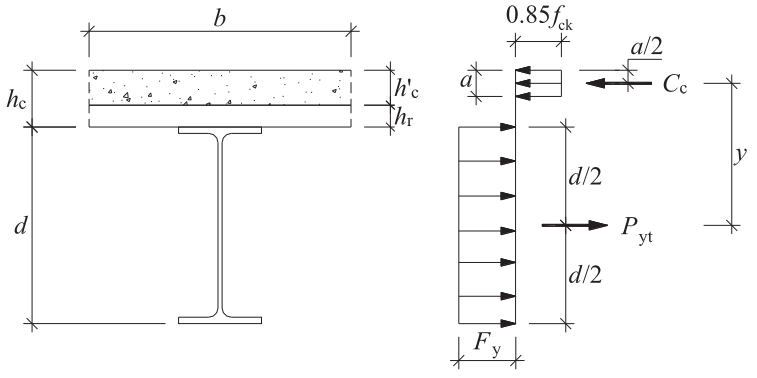
$$C_c = 0.85 f_{ck} A_c = 0.85(30)(150000)10^{-3} = 3825\,\text{kN} \tag{12.20b}$$

$$C = (C_s; C_c)_{min} = 3507\,\text{kN}$$

$C_s < C_c$ olduğundan, plastik tarafsız eksen betonarme döşeme içindedir.

Bu durumda beton basınç bloğunun derinliği,

$$a = \frac{C}{0.85 f_{ck} b} = \frac{3507(10)^3}{0.85(30)1875} = 73.35\text{mm} \tag{12.19}$$



Şekil 12.9.1 Kompozit enkesitte plastik gerilme yayılışı

$$y = \frac{d}{2} + h_c - \frac{a}{2} = \frac{450}{2} + 130 - \frac{73.35}{2} = 318.33\text{mm}$$

$$M_n = Cy$$
$$= 3507(318.33)10^{-3} = 1116\,\text{kNm}$$

veya,

$$M_n = C_c\left(h_c - \frac{a}{2}\right) + P_{yt}\left(\frac{d}{2}\right) \tag{12.18}$$

$$= 3507\left(130 - \frac{73.35}{2}\right)10^{-3} + 3507\left(\frac{450}{2}\right)10^{-3} = 1116\,\text{kNm}$$

Kompozit kiriş yükleri

Sabit yükler

Çelik sac +beton : 2.5 kN/m^2

Sıva+kaplama : 2.0 kN/m^2

Hareketli yükler : 4.0 kN/m^2

Kiriş ağırlığı, w_g=1.0 kN/m alınarak,

$$w_G = (4.5\times 3 + 1.0) = 14.5\text{kN/m}$$

$$w_Q = (4\times 3) = 12\text{kN/m}$$

Kompozit kirişte gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2(14.5) + 1.6(12) = 36.6\text{kN/m}$ $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{(36.6)7.5^2}{8} = 257.14\text{kNm}$	$w_a = 14.5 + 12 = 26.5\text{kN/m}$ $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{(26.5)7.5^2}{8} = 186.33\,\text{kNm}$
b. Kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(1116) = 1005\text{ kNm}$	$M_g = M_n/\Omega_b = 1116/1.67 = 668.26\text{ kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{257.14}{1005} = 0.26 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{186.33}{668.26} = 0.28 \le 1.0$ ✓

d. Başlıklı çelik ankrajların sayısı ve yerleşimi

Beton elastisite modülü, *Yönetmelik* 12.2.1 uyarınca,

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5}\sqrt{f_{ck}} = 0.043(2400)^{1.5}\sqrt{30} = 27690\,\text{N/mm}^2 \qquad (12.1)$$

Yönetmelik 12.4.2 uyarınca,

$$A_{sa} = \frac{\pi d_{sa}^2}{4} = \frac{\pi(19)^2}{4} = 284\text{mm}^2$$

Yönetmelik Tablo 12.6 uyarınca, hadveleri çelik kiriş boyuna eksenine dik olarak yerleştirildiği aynı hadve içinde iki adet çelik ankrajın kaynaklanması durumunda, *Yönetmelik* 12.8.2.1 uyarınca,

$e_{og} \ge 50\text{mm}$ olduğundan, (*Yönetmelik* Tablo 12.6),

$R_g = 0.85$

$R_p = 0.75$

$$Q_n = 0.5 A_{sa}\sqrt{f_{ck}E_c} \le R_g R_p A_{sa} F_u \qquad (12.35)$$

$$Q_n = 0.5(284)\sqrt{30(27690)} = 194422\ \text{N} \le 0.85(0.75)284(450) = 81472.50\ \text{N}\ \times$$

$$Q_{\text{n}} = 81472.50\text{N}$$

Tam etkileşimli durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımını belirleyen basınç kuvveti,

$$\text{C} = \left(C_{\text{s}}; C_{\text{c}}\right)_{\text{min}} = 3507\,\text{kN}$$

olduğundan, *Yönetmelik* 12.4.2.4(a) uyarınca, çelik ankrajlar ile aktarılacak kesme kuvveti, V',

$$V' = C = 3507\,\text{kN}$$

alınarak, *Yönetmelik* 12.8.2.3 uyarınca, maksimum moment ile eğilme momentinin sıfır olduğu en yakın nokta (mesnet) arasında kullanılacak çelik ankraj sayısı,

$$N_{\text{ankraj}} = \frac{V'}{Q_{\text{n}}} = \frac{3507}{81.47} = 43\,\text{adet}$$

Bu durumda, kiriş başlığında toplam kullanılması gerekli ankraj ($2 \times 43 = 86$) adet olur.

Kirişte eğilme gerekli momenti dayanımı önemli bir oranda aşıldığından, kısmi etkileşimli kompozit kiriş varsayımı ile çelik ankraj sayısı azaltılabilir. Çelik ankraj sayısının belirlenmesinde, kısmi etkileşimli dayanımın en az, tam etkileşimli dayanımın yarısına eşit olması önerilmektedir.

Kısmi etkileşim için, maksimum moment ile eğilme momentinin sıfır olduğu en yakın nokta (mesnet) arasında kullanılacak çelik ankraj sayısı,

$N_{\text{ankraj}} = 25\,\text{adet}$ olarak seçildiğinde,

$$\sum Q_{\text{n}} = 25(81.47) = 2037\text{kN} \le 3507\text{kN}$$

$$V' \ge 0.50(3507) = 1754\ \text{kN}\ \checkmark$$

$$C = V' = 2037\,\text{kN} \le \text{A}_{\text{s}} F_{\text{y}}$$

Bu durumda, plastik tarafsız eksen çelik kiriş içinde olacaktır. Tarafsız eksenin başlıkta olduğu varsayımı ile, başlıkta tarafsız eksenin derinliği,

$$P_{\text{yt}} - C_{\text{s}} = \left(A_{\text{s}} F_{\text{y}} - b_{\text{f}} t' F_{\text{y}}\right) - b_{\text{f}} t' F_{\text{y}} = V'$$

$$\left[3507 - (190) t'_{\text{f}} (355) 10^{-3}\right] - (190) t'_{\text{f}} (355) 10^{-3} = 2037$$

$$t'_{\text{f}} = 10.90\,\text{mm} < t_{\text{f}} = 14.6\,\text{mm}\ \checkmark$$

Çekme kuvveti çelik enkesitte tarafsız eksenin altındaki alanın merkezinde etkimektedir ve yeri belirlenmelidir.

	A [mm^2]	y [mm]	Ay [mm^3]
IPE 450	9880	$450/2=225$	2223000
$b_f t'_f$	$190(-10.90)=-2071$	$10.9/2=5.45$	−11287
Toplam	7809		2211713

$$\bar{y}=\frac{\sum Ay}{\sum A}=\frac{2211713}{7809}=283.23\,\text{mm}$$

Betonda basınç bloğunun derinliği,

$$a=\frac{C}{0.85f_{ck}b}=\frac{2037(10)^3}{0.85(30)1875}=42.6\text{mm}$$

Çelik enkesitin basınç etkisindeki başlık bölümünde basınç kuvveti dayanımı,

$$C_s=b_f t'_f F_y=190(10.90)355(10)^{-3}=735.21\text{kNm}$$

Kısmi etkileşimli kompozit kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımı,

$$M_n=C\left(\bar{y}+h_c-\frac{a}{2}\right)+C_s\left(\bar{y}-\frac{t'_f}{2}\right)$$

$$M_n=2037\left(283.23+130-\frac{42.6}{2}\right)10^{-3}+735.21\left(283.23-\frac{10.90}{2}\right)10^{-3}=1003\,\text{kNm}$$

YDKT	GKT
Kısmi etkileşimli kompozit kirişte gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u=1.2(14.5)+1.6(12)=36.6\text{kN/m}$ $M_u=\frac{w_u L^2}{8}=\frac{(36.6)7.5^2}{8}=257.14\text{kNm}$	$w_a=14.5+12=26.5\text{kN/m}$ $M_a=\frac{w_a L^2}{8}=\frac{(26.5)7.5^2}{8}=186.33\,\text{kNm}$
b. Kısmi etkileşimli kompozit kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**c.** Kısmi etkileşimli kompozit kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d=\phi_b M_n=0.90(1003)=902.70\text{ kNm}$	$M_g=M_n/\Omega_b=1003/1.67=600.60\text{ kNm}$
$\frac{M_u}{M_d}=\frac{257.14}{902.70}=0.28\le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g}=\frac{186.33}{600.60}=0.31\le 1.0$ ✓

Yönetmelik 12.8.2.3 uyarınca, maksimum moment ile eğilme momentinin sıfır olduğu en yakın nokta (mesnet) arasında kullanılacak çelik ankraj sayısı, 25 adet olmak üzere, kiriş açıklığında 50 adet ankraj elemanı yeterlidir.

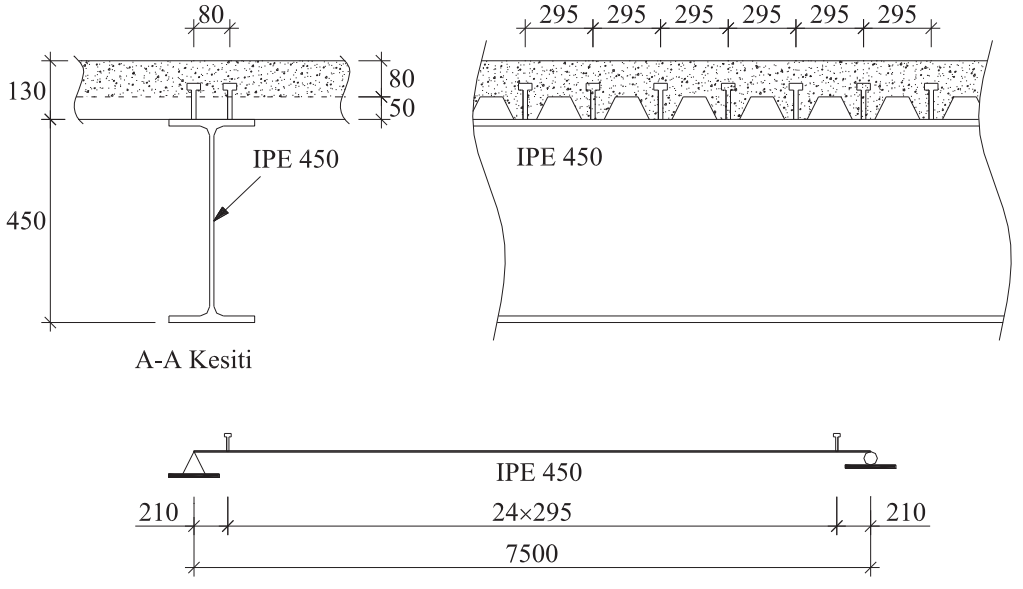
Yönetmelik 12.8.2.4(d) uyarınca, başlıklı çelik ankrajların, kiriş başlığındaki ve kiriş boyuna ekseni doğrultusundaki merkezleri arasındaki minimum uzaklık çapının 4 katı olmalıdır.

$80\text{mm}\ge 4d_{sa}=4\times 19=76\text{mm}$ ✓

300mm ≥ $4d_{sa}$=4×19=76mm ✓

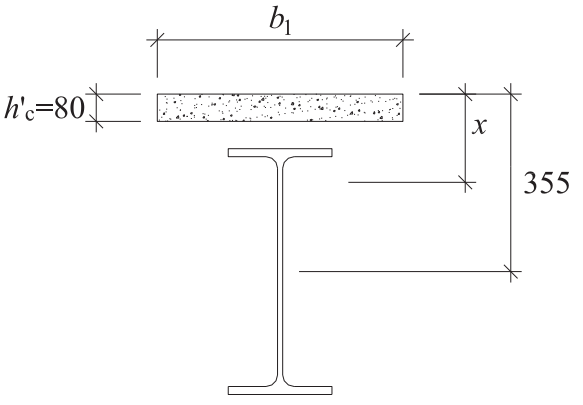
Yönetmelik 12.8.2.4(e) uyarınca, başlıklı çelik ankrajların, merkezleri arasındaki maksimum uzaklık döşeme kalınlığının 8 katını veya 900mm aşmamalıdır.

300mm ≤ ($8h_c$=8×130=1040mm veya 900mm) ✓



Şekil 12.9.2 – Başlıklı çelik ankraj yerleşimi

e. Kısmi etkileşimli kompozit kirişte düşey yerdeğiştirme (sehim) kontrolü



Şekil 12.9.3 – Dönüştürülmüş eşdeğer çelik enkesit modeli

Kompozit kirişin sehimi, dönüştürülmüş atalet momenti kullanılarak belirlenebilir. Betonun zamana bağlı deformasyonunun gözönüne alınması amacıyla, *Yönetmelik* 12.4.1.3 uyarınca, beton döşeme genişliği, 2*n* oranında azaltılarak sehim kontrolleri yapılmıştır. Eşdeğer çelik enkesit için genişlik,

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{27690} = 7.22$$

$$b_1 = \frac{b}{2n} = \frac{1875}{2(7.22)} = 130\text{mm}$$

Elastik tarafsız eksenin çelik enkesitte olduğu varsayımı ile,

$$9880(355 - x) = (130 \times 80)(x - 80/2) = 0$$

$$x = 193\text{mm} > \text{h}_\text{c} = 130\text{mm} \checkmark$$

Çatlamamış beton gözönüne alınarak, 2*n* oranı ile dönüştürülmüş tüm eşdeğer çelik kesitin atalet momenti,

$$I_{\text{tr}} = 33740(10)^4 + 9880(355 - 193)^2 + \frac{130 \times 80^3}{12} \ldots$$
$$\ldots + (130 \times 80)(193 - 80/2)^2 = 84569(10)^4\ \text{mm}^4$$

Yönetmelik 12.4.1.3 uyarınca, kısmi etkileşimli kompozit kirişlerde enkesit atalet momenti,

$$I = 0.75\left[I_\text{s} + \sqrt{\frac{\Sigma Q_n}{\min(A_\text{s}F_\text{y}, 0.85 f_\text{ck} A_\text{c})}} (I_\text{tr} - I_\text{s}) \right] \qquad (12.17\text{b})$$

$$I = 0.75\left[33740 + \sqrt{\frac{2037}{\min(3507, 3825)}} (84569 - 33740) \right] 10^4 = 54354(10)^4\ \text{mm}^4$$

Hareketli yük etkisinde kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi,

$$w_\text{Q} = (5 \times 3) = 15\text{kN/m}$$

$$\Delta_3 = \frac{5 w_\text{Q} L^4}{384 EI} = \frac{5(15)(7500)^4}{384(200000)54354(10)^4} = 25.99\text{mm}$$

=L/288

Sabit yükler (sıva+kaplama) etkisinde kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi,

$$w_G = (2 \times 3) = 6\text{kN/m}$$

$$\Delta_4 = \frac{5 w_\text{Q} L^4}{384 EI} = \frac{5(6)(7500)^4}{384(200000)54354(10)^4} = 2.39\text{mm}$$

Toplam yükler altında kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi,

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4 = 5.19 + 25.99 + 2.39 = 33.58\text{mm} = \text{L}/223 > \text{L}/300 \times$$

Bu durumda, kompozit kiriş düşey yerdeğiştirmesi tavsiye edilen sınır değeri aştığından, bu örnekte kiriş kesitinin değiştirilmesi yerine yapım aşamasında çelik enkesite ters sehim verilerek düşey yerdeğiştirmenin sınır değerin altına inmesi sağlanabilir (Bkz. AISC Design Guide 3). Örneğin, 25mm civarında ters sehim ile toplam yükler altında kompozit kirişin düşey yerdeğiştirmesi, L/300 sınır değerini aşmayacaktır.

f. Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 12.5.2 uyarınca, betonarme döşemenin çelik kirişe mesnetlenen şekil verilmiş çelik sac üzerinden uygulandığı çelik ankrajlı kompozit kirişlerde, sadece çelik enkesit gözönüne alınarak, *Yönetmelik* Bölüm 10 da verilen koşullar gözönüne alınır. Bu durumda, IPE 450 enkesitli kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* 10.2.1(a) uyarınca,

$h/t_w = 378.8/9.4 = 40.29 \le 2.24\sqrt{E/F_y} = 2.24\sqrt{200000/355} = 53.17$ olduğundan,

ϕ_v = 1.00 (YDKT) veya Ω_v=1.50 (GKT) ve C_{v1}=1.0 olarak alınacaktır.

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,
Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(355)(450\times 9.4)1.0(10)^{-3} = 901\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
Kompozit kirişte gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$w_u = 1.2(14.5)+1.6(12) = 36.6\text{kN/m}$ $P_u = \frac{w_u L_a}{2} = \frac{36.6(7.5)}{2} = 137.25\,\text{kN}$	$w_a = 14.5+12 = 26.5\text{kN/m}$ $P_a = \frac{w_a L_a}{2} = \frac{26.5(7.5)}{2} = 99.38\,\text{kN}$
g. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**h.** Kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 1.0(901) = 901\text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 901/1.50 = 601\text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{137.25}{901} = 0.15 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{99.38}{601} = 0.17 \le 1.0$ ✓

Örnek 12.10

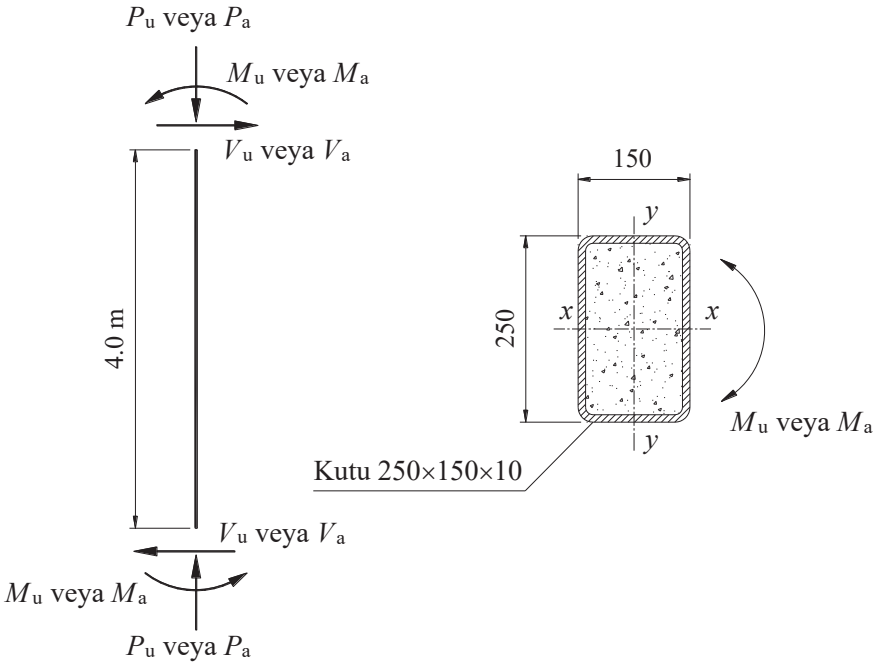
Aşağıdaki şekilde enkesit detayı ve yükleme durumu verilen beton dogulu kompozit eleman, sabit ve hareketli yükleri içeren YDKT ve GKT yük birleşimleri altında doğrudan analiz yöntemi kullanılarak elde edilen iç kuvvetlerin etkisindedir.

a. Eğilme ve eksenel kuvvetin bileşik etkisindeki elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT).

b. Eğilme ve eksenel kuvvetin bileşik etkisindeki elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT).

c. Elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

d. Elemanın güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)



Gerekli dayanımlar (iç kuvvetler)

YDKT	GKT
$P_u = 574$ kN	$P_a = 437$ kN
$M_u = 163$ kNm	$M_a = 73$ kNm
$V_u = 76$ kN	$V_a = 46$ kN

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Beton sınıfı

C35 $f_{ck} = 35$ N/mm^2 $w_c = 2400$ kg/m^3 (TS 500)

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \qquad (12.1)$$

$$E_c = 0.043(2400)^{1.5} \sqrt{35} \cong 29910 \text{ MPa}$$

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Kutu 250×150×10		
$H = 250$ mm	$B = 150$ mm	$t = 0.93\times10 = 9.3$ mm
$h = H - 3t = 222.1$ mm	$b = B - 3t = 122.1$ mm	$A_s = 6871$ mm^2
$W_{px} = 557.3$ cm^3	$I_{sx} = 5625.4$ cm^4	$I_{sy} = 2537.0$ cm^4
$r_i = t = 9.3$ mm		

Kompozit enkesit tasarımı için gerekli bilgiler		
$h_i = H - 2t = 231.4$ mm	$b_i = B - 2t = 131.4$ mm	$A_c = 30332$ mm^2
$A_g = A_s + A_c = 37203$ mm^2	$A_{sr} = 0.0$ mm^2	$I_{cx} = 13471.8$ cm^4
$I_{cy} = 4344.8$ cm^4		

Çözüm

Malzeme sınıflarına ait sınırların kontrolü,

Yönetmelik 12.2.3 uyarınca,

(a) Beton sınıfı : C35 $f_{ck} = 35$ MPa 20 MPa ≤ 35 MPa ≤ 70 MPa ✓

(b) Beton çeliği kullanılmamaktadır.

(c) Çelik sınıfı : S355 $F_y = 355$ MPa 355 MPa ≤ 460 MPa ✓

Yapısal çelik minimum enkesit alanı,

Yönetmelik 12.3.2.1 uyarınca,

$A_s \geq 0.01A_g \quad 6871\,\text{mm}^2 \geq 0.01(37203) = 372.0\,\text{mm}^2$ ✓

Eksenel basınç etkisinde yerel burkulma kontrolü,

Yönetmelik 12.2.4 uyarınca ve Tablo 12.1A kullanılarak,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{222.1}{9.3} = 23.9 \leq \lambda_p = 2.26\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2.26\sqrt{\frac{200000}{355}} = 53.6$$

Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisinde yerel burkulma kontrolü,

Yönetmelik 12.2.4 uyarınca ve Tablo 12.1B kullanılarak,

Başlık enkesit parçasında

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{122.1}{9.3} = 13.1 \leq \lambda_p = 2.26\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2.26\sqrt{\frac{200000}{355}} = 53.6$$

Gövde enkesit parçasında

$$\lambda = \frac{h}{t} = \frac{222.1}{9.3} = 23.9 \le \lambda_p = 3.00\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.00\sqrt{\frac{200000}{355}} = 71.2$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 12.1A ve Tablo 12.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak sınıflandırılır.

Kompozit enkesitin eksenel basınç kuvveti dayanımının (P_{no}) belirlenmesi

Yönetmelik 12.3.2.2(a) uyarınca kompakt enkesitler için

$$P_{no} = P_p \tag{12.8}$$

$$P_p = F_y A_s + C_2 f_{ck}\left(A_c + A_{sr}\frac{E_{sr}}{E_c}\right) \tag{12.9}$$

$C_2 = 0.85$ (Kutu enkesit) $\quad A_{sr} = 0.0$

$$P_p = (355)(6871)10^{-3} + 0.85(35)(30332)10^{-3} = 3341.58\ \text{kN}$$

$$P_{no} = 3341.58\ \text{kN}$$

Kompozit elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımının (P_n) belirlenmesi

$$C_3 = 0.45 + 3\left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g}\right) \le 0.9$$

$$C_3 = 0.45 + 3\left(\frac{6871 + 0.0}{37203}\right) \le 0.9 \qquad C_3 = 1.00 \le 0.9\ \times$$

$$C_3 = 0.90$$

$$(EI)_{ef} = E_s I_{sy} + E_{sr} I_{sr} + C_3 E_c I_{cy} \tag{12.15}$$

$$(EI)_{ef} = (200000)\left(2537\times10^4\right) + 0.90(29910)\left(4344.8\times10^4\right)$$

$$(EI)_{ef} = 6.2436\times10^{12}\ \text{Nmm}^2$$

$$P_e = \pi^2 (EI)_{ef} / (L_c)^2$$

Doğrudan analiz yönteminin kullanılması nedeniyle, burkulma boyu katsayısı, K her iki doğrultu için de K = 1.0 olarak alınacaktır. Kompozit enkesitli elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımının elde edilmesinde y-y ekseni (zayıf eksen) etrafında eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyici olacaktır. Buna göre,

$$L_c = KL \qquad L_c = (1.0)(4000) = 4000\ \text{mm}$$

$$P_e = \pi^2 \left(6.2436\times10^{12}\right) / (4000)^2\, 10^{-3}$$

$$P_e = 3851.4\ \text{kN}$$

Yönetmelik 12.3.1.2(a) uyarınca,

$$\frac{P_{no}}{P_e} = \frac{3341.58}{3851.4} = 0.87 \le 2.25$$

$$P_n = P_{no}\left[0.658^{\frac{P_{no}}{P_e}}\right] \qquad (12.3)$$

$$P_n = 3341.58\left[0.658^{\frac{3341.58}{3851.4}}\right] = 2324.0 \text{ kN}$$

Kompozit enkesitin eğilme momenti dayanımının (M_p) belirlenmesi

Kompozit enkesitin eğilme momenti dayanımı, M_p, Tablo 12.4 te B noktası için tanımlanan ifadeler kullanılarak hesaplanabilir.

$$M_B = M_D - W_{sn}F_y - \frac{1}{2}W_{cn}\left(0.85f_{ck}\right)$$

$$M_D = W_{px}F_y + \frac{W_c}{2}\left(0.85f_{ck}\right) \qquad W_c = \frac{b_i h_i^2}{4} - 0.192r_i^3$$

$$W_c = \frac{(131.4)(231.4)^2}{4} - 0.192(9.3)^3 = 1758830.3 \text{ mm}^3$$

$$M_D = \left(557.3\times10^3\right)(355)10^{-6} + \frac{(1758830.3)}{2}(0.85\times35)10^{-6} = 224.0 \text{ kNm}$$

$$W_{sn} = 2th_n^2$$

$$W_{cn} = b_i h_n^2$$

$$h_n = \frac{0.85f_{ck}A_c}{2\left[0.85f_{ck}b_i + 4tF_y\right]} \le \frac{h_i}{2}$$

$$h_n = \frac{0.85(35)(30332)}{2\left[0.85(35)(131.4) + 4(9.3)355\right]} \le \frac{h_i}{2} = \frac{231.4}{2}$$

$$h_n = 26.4 \text{ mm} \le \frac{h_i}{2} = \frac{231.4}{2} = 115.7 \text{ mm} \checkmark$$

$$W_{sn} = 2(9.3)(26.4)^2 = 12963.5 \text{ mm}^3$$

$$W_{cn} = (131.4)(26.4)^2 = 91580.5 \text{ mm}^3$$

$$M_p = M_B = 224.0 - (12963.5)(355)10^{-6} - \frac{1}{2}(91580.5)(0.85\times35)10^{-6}$$

$$M_p = 218.0 \text{ kNm}$$

Kompozit elemanın eğilme momenti dayanımının (M_n) belirlenmesi

Yönetmelik 12.4.4(a) uyarınca,

$$M_n = M_p \qquad (12.26a)$$

$$M_n = 218.0 \text{ kNm}$$

Eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkileşimi genel karşılıklı etki diyagramları ile *Yönetmelik* 12.6.1 esas alınarak değerlendirilebilir. Buna göre,

YDKT	GKT
a. Kompozit enkesitli elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Kompozit enkesitli elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.75(2287.63) = 1715.7 \text{ kN}$ $M_d = \phi_b M_n = 0.90(218.0) = 196.2 \text{ kNm}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 2287.63/2.0 = 1143.8 \text{ kN}$ $M_g = M_n/\Omega_b = 218.0/1.67 = 130.5 \text{ kNm}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{574}{1715.7} = 0.33 > 0.20$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{437}{1143.8} = 0.38 > 0.20$
$\frac{P_u}{P_d} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_u}{M_d}\right) \le 1.0$ (11.1a) $\frac{574}{1715.7} + \frac{8}{9}\left(\frac{163}{196.2}\right) = 1.07 > 1.0$ ✗	$\frac{P_a}{P_g} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_a}{M_g}\right) \le 1.0$ (11.1a) $\frac{437}{1143.8} + \frac{8}{9}\left(\frac{73}{130.5}\right) = 0.88 \le 1.0$ ✓

Yukarıda esas alınan yöntem daha büyük oranda güvenli tarafta kalan bir yaklaşım olması nedeniyle kompozit eleman, tasarım dayanımı kontrolüne göre yetersiz olarak değerlendirilebilir. Bu durumda daha hassas bir dayanım kontrolü için eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkileşimi, geliştirilmiş karşılıklı etki diyagramları ile *Yönetmelik* 12.6.2 esas alınarak incelenebilir.

Bu durumda *Yönetmelik* Şekil 12.7 de gösterilen geliştirilmiş karşılıklı etki diyagramlarının oluşturulabilmesi için *Yönetmelik* Tablo 12.4 te verilen ifadeler kullanılarak A, E, C, D ve B noktalarının koordinatlarının belirlenmesi gerekmektedir.

A Noktasının koordinatları

$$P_A = A_s F_y + 0.85 f_{ck} A_c$$

$$b_i = 150 - 2(9.3) = 131.4 \text{ mm}$$

$$h_i = 250 - 2(9.3) = 231.4 \text{ mm}$$

$$r_i = 9.3 \text{ mm}$$

$$A_c = b_i h_i - 0.8584 r_i^2 \qquad A_c = (131.4)(231.4) - 0.8584(9.3)^2 \cong 30332 \text{ mm}^2$$

$$P_A = (6871)(355)10^{-3} + 0.85(35)(30332)10^{-3}$$

$$P_A = 3341.58 \text{ kN}$$

$$M_A = 0.0 \text{ kNm}$$

D Noktasının koordinatları

$$P_D = \frac{0.85 f_{ck} A_c}{2}$$

$$P_D = \frac{0.85(35)(30332)}{2} 10^{-3}$$

$$P_D = 451.2 \text{ kN}$$

$$W_c = \frac{(131.4)(231.4)^2}{4} - 0.192(9.3)^3 = 1758830.3 \text{ mm}^3$$

$$M_D = W_{px} F_y + \frac{W_c}{2}(0.85 f_{ck})$$

$$M_D = (557.3 \times 10^3)(355)10^{-6} + \frac{(1758830.3)}{2}(0.85 \times 35)10^{-6}$$

$$M_D = 224.0 \text{ kNm}$$

B Noktasının koordinatları

$$P_B = 0$$

$$h_n = \frac{0.85 f_{ck} A_c}{2\left[0.85 f_{ck} b_i + 4 t F_y\right]} \le \frac{h_i}{2}$$

$$h_n = \frac{0.85(35)(30332)}{2\left[0.85(35)(131.4) + 4(9.3)355\right]} \le \frac{h_i}{2} = \frac{231.4}{2}$$

$$h_n = 26.4 \text{ mm} \le \frac{h_i}{2} = \frac{231.4}{2} = 115.7 \text{ mm} \checkmark$$

$$W_{sn} = 2(9.3)(26.4)^2 = 12963.5 \text{ mm}^3$$

$$W_{cn} = (131.4)(26.4)^2 = 91580.5 \text{ mm}^3$$

$$M_B = 224.0 - (12963.5)(355)10^{-6} - \frac{1}{2}(91580.5)(0.85 \times 35)10^{-6}$$

$$M_B = 218.0 \text{ kNm}$$

C Noktasının koordinatları

$$P_C = 0.85 f_{ck} A_c$$

$$P_C = 0.85(35)(30332)10^{-3}$$

$$P_C = 902.4 \text{ kN}$$

$$M_C = M_B$$

$$M_C = 218.0 \text{ kNm}$$

E Noktasının koordinatları

$$P_E = \frac{0.85 f_{ck} A_c}{2} + 0.85 f_{ck} b_i h_E + 4 F_y t h_E$$

$$h_E = \frac{h_n}{2} + \frac{H}{4}$$

$$h_E = \frac{(26.4)}{2} + \frac{250}{4} = 75.7 \text{ mm}$$

$$P_E = \frac{0.85(35)(30332)}{2}10^{-3} + 0.85(35)(131.4)(75.7)10^{-3} + 4(355)(9.3)(75.7)10^{-3}$$

$$P_E = 1746.8 \text{ kN}$$

$$W_{cE} = (131.4)(75.7)^2 = 752986.4 \text{ mm}^3$$

$$W_{sE} = 2(9.3)(75.7)^2 = 106587.1 \text{ mm}^3$$

$$M_E = M_D - F_y W_{sE} - \frac{1}{2} W_{cE} (0.85 f_{ck})$$

$$M_E = 224.0 - (355)(106587.1)10^{-6} - \frac{1}{2}(752986.4)(0.85 \times 35)10^{-6}$$

$$M_E = 175.0 \text{ kNm}$$

Bu noktanın koordinatları, etkileşim eğrisinin daha hassas olarak oluşturulmasını sağlamaktadır. Etkileşim eğrisi, güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, bu noktanın etkisi terkedilerek de oluşturulabilir.

Azaltma katsayısı, λ

Yönetmelik 12.6.2 uyarınca, kompozit enkesitte plastik gerilme yayılışı esas alınarak, eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkileşimi için hesaplanan eksenel kuvvet dayanım değerleri (A, E, C, D ve B noktalarının ordinatları), kompozit elemanın boyuna bağlı narinliği nedeniyle, azaltma katsayısı, λ ile çarpılarak azaltılmalıdır.

$$P_{no} = P_A = 3341.58 \text{ kN}$$

$$P_n = 2324.0 \text{ kN}$$

$$\lambda = \frac{P_n}{P_{no}} = \frac{2324.0}{3341.58} = 0.695$$

$$P_{A'} = \lambda P_A$$

$$P_{A'} = (0.695)(3341.58) = 2322.4 \text{ kN}$$

$$P_{B'} = \lambda P_B$$

$$P_{B'} = (0.695)(0.0) = 0.0 \text{ kN}$$

$$P_{C'} = \lambda P_C$$

$$P_{C'} = (0.695)(902.4) = 627.2 \text{ kN}$$

$$P_{D'} = \lambda P_D$$

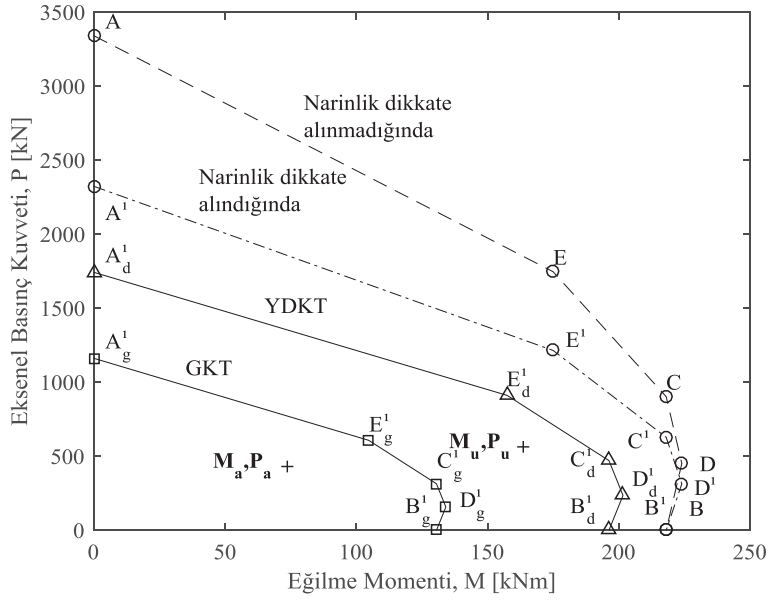
$$P_{D'} = (0.695)(451.2) = 313.6 \text{ kN}$$

$$P_{E'} = \lambda P_E$$

$$P_{E'} = (0.695)(1746.8) = 1214.0 \text{ kN}$$

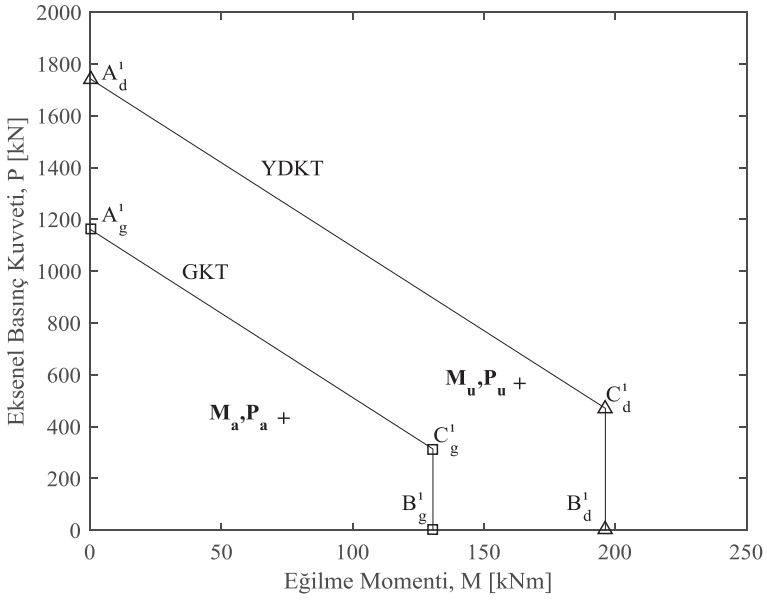
YDKT	GKT
Kompozit enkesitli elemanın tasarım etkileşim diyagramı için eksenel kuvvet dayanımları	Kompozit enkesitli elemanın güvenli etkileşim diyagramı için eksenel kuvvet dayanımları
$P_{A',d} = \phi_c P_{A'} = 0.75(2322.4) = 1741.8\ \text{kN}$ $P_{B',d} = \phi_c P_{B'} = 0.75(0.0) = 0.0\ \text{kN}$ $P_{C',d} = \phi_c P_{C'} = 0.75(627.2) = 470.4\ \text{kN}$ $P_{D',d} = \phi_c P_{D'} = 0.75(313.6) = 235.2\ \text{kN}$ $P_{E',d} = \phi_c P_{E'} = 0.75(1214.0) = 910.5\ \text{kN}$	$P_{A',g} = P_{A'}/\Omega_c = 2322.4/2.00 = 1161.2\ \text{kN}$ $P_{B',g} = P_{B'}/\Omega_c = 0.0/2.00 = 0.0\ \text{kN}$ $P_{C',g} = P_{C'}/\Omega_c = 627.2/2.00 = 313.6\ \text{kN}$ $P_{D',g} = P_{D'}/\Omega_c = 313.6/2.00 = 156.8\ \text{kN}$ $P_{E',g} = P_{E'}/\Omega_c = 1214.0/2.00 = 607.0\ \text{kN}$
Kompozit enkesitli elemanın etkileşim diyagramı için tasarım eğilme momenti dayanımları	Kompozit enkesitli elemanın etkileşim diyagramı için güvenli eğilme momenti dayanımları
$M_{A',d} = \phi_b M_{A'} = 0.90(0.0) = 0.0\ \text{kNm}$ $M_{B',d} = \phi_b M_{B'} = 0.90(218.0) = 196.2\ \text{kNm}$ $M_{C',d} = \phi_b M_{C'} = 0.90(218.0) = 196.2\ \text{kNm}$ $M_{D',d} = \phi_b M_{D'} = 0.90(224.0) = 201.6\ \text{kNm}$ $M_{E',d} = \phi_b M_{E'} = 0.90(175.0) = 157.5\ \text{kNm}$	$M_{A',g} = M_{A'}/\Omega_b = 0.0/1.67 = 0.0\ \text{kNm}$ $M_{B',g} = M_{B'}/\Omega_b = 218.0/1.67 = 130.5\ \text{kNm}$ $M_{C',g} = M_{C'}/\Omega_b = 218.0/1.67 = 130.5\ \text{kNm}$ $M_{D',g} = M_{D'}/\Omega_b = 224.0/1.67 = 134.1\ \text{kNm}$ $M_{E',g} = M_{E'}/\Omega_b = 175.0/1.67 = 104.8\ \text{kNm}$

Kompozit elemanın tasarım veya güvenli dayanımının kontrolü, Şekil 12.10.1 de gösterilen YDKT veya GKT yöntemlerinin etkileşim diyagramları esas alınarak yapılır. Buna göre gerekli dayanımların belirlediği noktaların, her iki yöntemde de etkileşim diyagramlarının içinde kaldığı görülür. Bu durumda kompozit enkesitli elemanın dayanımı yeterlidir.



Şekil 12.10.1 – Tasarım ve güvenli dayanım kontrolü için etkileşim diyagramları

Yönetmelik 12.6.2 uyarınca, YDKT veya GKT yöntemlerine göre Şekil 12.10.1 de gösterildiği gibi elde edilen etkileşim eğrileri sırasıyla, sadece A'_d, C'_d ve B'_d noktaları veya A'_g, C'_g ve B'_g noktaları gözönünde tutularak basitleştirilebilir. Bu durumda eğriler Şekil 12.10.2 de verildiği gibi elde edilir.



Şekil 12.10.2 – Tasarım ve güvenli dayanım kontrolü için basitleştirilmiş etkileşim diyagramları

YDKT	GKT
a. Kompozit enkesitli elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Kompozit enkesitli elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$P_r \geq P_C \qquad P_r = P_u \qquad P_C = P_{C',d}$ $P_u = 545\ \text{kN} \geq P_{C',d} = 470.4\ \text{kN}$ $\dfrac{P_r - P_C}{P_A - P_C} + \dfrac{M_{rx}}{M_{Cx}} \leq 1.0$ (12.28b) $\dfrac{P_u - P_{C',d}}{P_{A',d} - P_{C',d}} + \dfrac{M_u}{M_{C',d}} \leq 1.0$ $\dfrac{574 - 470.4}{1741.8 - 470.4} + \dfrac{163}{196.2} \leq 1.0$ $0.91 \leq 1.0$ ✓	$P_r \geq P_C \qquad P_r = P_a \qquad P_C = P_{C',g}$ $P_a = 437\ \text{kN} \geq P_{C',g} = 313.6\ \text{kN}$ $\dfrac{P_r - P_C}{P_A - P_C} + \dfrac{M_{rx}}{M_{Cx}} \leq 1.0$ (12.28b) $\dfrac{P_a - P_{C',g}}{P_{A',g} - P_{C',g}} + \dfrac{M_a}{M_{C',g}} \leq 1.0$ $\dfrac{437 - 313.6}{1161.2 - 313.6} + \dfrac{73}{130.5} \leq 1.0$ $0.70 \leq 1.0$ ✓

Kesme kuvveti dayanımının kontrolü

Yönetmelik 12.5.1 uyarınca, tasarım kesme kuvveti dayanımı veya güvenli kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* Bölüm 10 a göre sadece çelik kesit dikkate alınarak veya beton ve beton çeliği için malzeme katsayıları kullanmaksızın TS 500 standardına göre, beton ve enine donatı dikkate alınarak hesaplanabilir. Burada, kesme kuvveti dayanımı her iki durum da esas alınarak kontrol edilecektir.

Sadece çelik kesit ile karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n

Yönetmelik 10.4 uyarınca,

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v2} \qquad (10.12)$$

$$h = H - 3t$$

$$h = 250 - 3(9.3) = 222.1 \text{ mm}$$

$$A_w = 2ht$$

$$A_w = 2(222.1)(9.3) = 4131.1 \text{ mm}^2$$

$$\frac{h}{t} \le 1.10\sqrt{k_v E / F_y} \qquad k_v = 5.0$$

$$\frac{222.1}{9.3} \le 1.10\sqrt{5.0(200000)/(355)}$$

$$23.9 \le 58.4 \checkmark$$

Yönetmelik 10.3.1(2)(i) uyarınca,

$$C_{v2} = 1.0 \qquad (10.7a)$$

$$V_n = 0.6(355)(4131.1)(1.0)10^{-3}$$

$$V_n = 879.9 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
c. Elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**d.** Elemanın güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.90(879.9) = 791.9 \text{ kN}$	$V_g = V_n / \Omega_v = 879.9 / 1.67 = 526.9 \text{ kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{76}{791.9} = 0.10 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{46}{526.9} = 0.09 \le 1.0 \checkmark$

Sadece donatısız beton ile karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n

Kompozit enkesit enine donatı içermediğinden karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n sadece donatısız beton enkesiti dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Bu durumda, betonarme enkesitin kesme kuvveti dayanımının hesabı için TS 500 de verilen ifadelerin kullanılması uygun olmayacaktır. Sadece betondan oluşan bir enkesitin kesme kuvveti dayanımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

Tasarım kesme kuvveti dayanımının hesabında $\phi = 0.60$ alınmalıdır.

$$V_n = 0.11\lambda\sqrt{f_{ck}} b_w h \qquad (22.9, \text{ ACI } 318)$$

$f_{ck} = 35$ MPa $b_w = b_i = 131.4$ mm $h = h_i = 231.4$ mm $\lambda = 1.0$ (Normal beton için)

$$V_n = 0.11(1.0)\sqrt{35}(131.4)(231.4)10^{-3}$$

$$V_n = 19.8 \text{ kN}$$

$$V_d = \phi V_n \quad \phi = 0.60$$

$$V_d = 0.60(19.8) = 11.9 \text{ kN}$$

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{76}{11.9} >> 1.0 \times$$

Sadece donatısız betonun kesme kuvveti dayanımı, gerekli kesme kuvveti dayanımının karşılanmasında yetersizdir.

Yukarıdaki dayanım kontrollerine ilave olarak, yük aktarımı ile ilgili kontroller de *Yönetmelik* 12.7 esasları çerçevesinde Örnek 12.3 te olduğu gibi yapılmalıdır.

Örnek 12.11

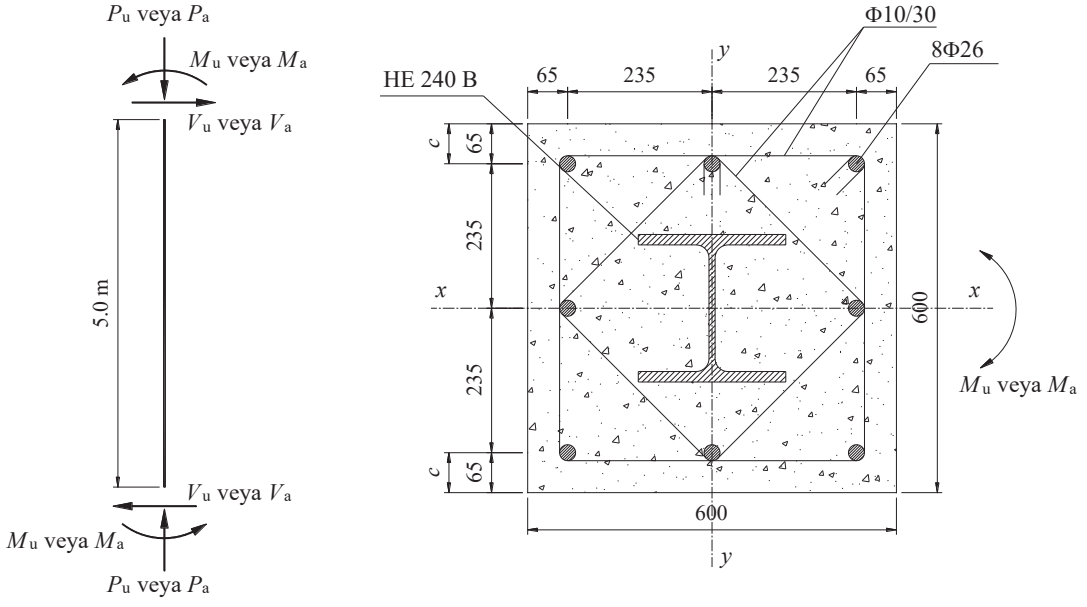
Aşağıdaki şekilde enkesit detayı ve yükleme durumu verilen çelik gömme kompozit eleman, sabit ve hareketli yükleri içeren YDKT ve GKT yük birleşimleri altında doğrudan analiz yöntemi kullanılarak elde edilen iç kuvvetlerin etkisindedir.

a. Eğilme ve eksenel kuvvetin bileşik etkisindeki elemanın tasarım dayanımının kontrolü (YDKT).

b. Eğilme ve eksenel kuvvetin bileşik etkisindeki elemanın güvenli dayanımının kontrolü (GKT).

c. Elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)

d. Elemanın güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT)



Gerekli dayanımlar (iç kuvvetler)

YDKT	GKT
$P_u = 4950$ kN	$P_a = 3720$ kN
$M_u = 812$ kNm	$M_a = 366$ kNm
$V_u = 405.7$ kN	$V_a = 243.3$ kN

Çelik sınıfı

S 355 $F_y = 355$ N/mm^2 $F_u = 510$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Beton çeliği sınıfı (TS 500, Çizelge 3.1)

S 420b $f_{ywk} = F_{ysr} = 420$ N/mm^2

Beton sınıfı

C35 $f_{ck} = 35$ N/mm^2 $w_c = 2400$ kg/m^3 (TS 500)

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \qquad (12.1)$$

$$E_c = 0.043\left(2400\right)^{1.5} \sqrt{35} \cong 29910 \text{ MPa}$$

Enkesit

Kompozit enkesit tasarımı için gerekli bilgiler

$d = 240$ mm	$b_f = 240$ mm	$t_f = 17$ mm	$t_w = 10$ mm
$I_{sx} = 11260$ cm^4	$I_{sy} = 3923$ cm^4	$W_{ex} = 938.3$ cm^3	$W_{px} = 1053$ cm^3
$A_s = 10600$ mm^2	$A_c = 345153$ mm^2	$A_{sr} = 4247$ mm^2	$A_g = 360000$ mm^2
$h_1 = 600$ mm	$h_2 = 600$ mm	$c = 65$ mm	$E_c = 29910$ MPa
$I_{cx} = 1051129.7$ cm^4	$I_{cy} = 1058466.7$ cm^4	$I_{sr} = 17610.3$ cm^4	

Simetri eksenindeki donatıların toplam alanı, A_{srs}

$$A_{srs} = 2\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) = 2\left(\frac{\pi(26)^2}{4}\right) = 1062 \text{ mm}^2$$

$$A_{srsx} = A_{srsy} = A_{srs}$$

Çözüm

Malzeme sınıflarına ait sınırların kontrolü,

Yönetmelik 12.2.3 uyarınca,

(a) Beton sınıfı : C35 $f_{ck} = 35$ MPa 20 MPa ≤ 35 MPa ≤ 70 MPa ✓

(b) Beton çeliği sınıfı : S420b $F_{ysr} = 420$ MPa 420 MPa ≤ 500 MPa

(c) Çelik sınıfı : S355 $F_y = 355$ MPa 355 MPa ≤ 460 MPa ✓

Eksenel kuvvet etkisinde sınırlamaların kontrolü,

Yönetmelik 12.3.1.1 uyarınca,

(a) $A_s \geq 0.01A_g$ $10600 \text{ mm}^2 \geq 0.01(360000) = 3600.0 \text{ mm}^2$ ✓

(b) 12mm çapında etriye, 150mm aralıkla uygulanmaktadır.

Etriye ve uygulaması : Φ12/250

$$250 \text{ mm} \leq \text{MIN}\left[\frac{\min(h_1, h_2)}{2}; 400 \text{ mm}\right] = 300 \text{ mm} \checkmark$$

(c) $\rho_{sr} = \frac{A_{sr}}{A_g} \geq 0.004$ (12.2)

$$\rho_{sr} = \frac{4247}{360000} = 0.012 \geq 0.004 \checkmark$$

Eksenel basınç ve eğilme momentinin basınç bileşeni etkisinde yerel burkulma kontrolü,

Yönetmelik 12.2.2 uyarınca çelik gömme kompozit elemanlarda yerel burkulma söz konusu değildir. Bu durumda dayanım hesapları, kompakt enkesit sınıfı esas alınarak yapılır.

Kompozit enkesitin eksenel basınç kuvveti dayanımının (P_{no}) belirlenmesi

Yönetmelik 12.3.2.2(a) uyarınca kompakt enkesitler için

$$P_{no} = F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} + 0.85 f_{ck} A_c \qquad (12.5)$$

$$P_{no} = (355)(10600)10^{-3} + (420)(4247)10^{-3} + 0.85(35)(345153)10^{-3}$$

$$P_{no} = 15815.0 \text{ kN}$$

Kompozit elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımının (P_n) belirlenmesi

$$C_1 = 0.25 + 3\left(\frac{A_s + A_{sr}}{A_g}\right) \le 0.7$$

$$C_1 = 0.25 + 3\left(\frac{10600 + 4247}{360000}\right) \le 0.7 \qquad C_1 = 0.37 \le 0.7 \checkmark$$

$$C_1 = 0.37$$

$$(EI)_{ef} = E_s I_{sy} + E_{sr} I_{sr} + C_1 E_c I_{cy} \qquad (12.6)$$

$$(EI)_{ef} = (200000)\left(3923 \times 10^4\right) + (200000)\left(17610.3 \times 10^4\right) + 0.37(29910)\left(1058466.7 \times 10^4\right)$$

$$(EI)_{ef} = 1.6020 \times 10^{14} \text{ Nmm}^2$$

$$P_e = \pi^2 (EI)_{ef} / (L_c)^2$$

Doğrudan analiz yönteminin kullanılması nedeniyle, burkulma boyu katsayısı, K her iki doğrultu için de K = 1.0 olarak alınacaktır. Kompozit enkesitli elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımının elde edilmesinde y-y ekseni (zayıf eksen) etrafında eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyici olacaktır. Buna göre,

$$L_c = KL \qquad L_c = (1.0)(5000) = 5000 \text{ mm}$$

$$P_e = \pi^2 \left(1.6020 \times 10^{14}\right) / (5000)^2 \, 10^{-3}$$

$$P_e = 63244.4 \text{ kN}$$

Yönetmelik 12.3.1.2(a) uyarınca,

$$\frac{P_{no}}{P_e} = \frac{15815.0}{63244.4} = 0.25 \le 2.25$$

$$P_n = P_{no}\left[0.658^{\frac{P_{no}}{P_e}}\right] \qquad (12.3)$$

$$P_n = 15815\left[0.658^{\frac{15815}{63244.4}}\right] = 14243.4 \text{ kN}$$

Kompozit enkesitin eğilme momenti dayanımının (M_p) belirlenmesi

Kompozit enkesitin eğilme momenti dayanımı, M_p, Tablo 12.2 de B noktası için belirlenen M_B değerine eşittir. Ancak bu değerin hesaplanabilmesi için ilk olarak M_D nin elde edilmesi gerekmektedir.

$$W_r = \left(A_{sr} - A_{srs}\right)\left(\frac{h_2}{2} - c\right)$$

$$W_r = \left(4247 - 1062\right)\left(\frac{600}{2} - 65\right)$$

$$W_r = 748475 \text{ mm}^3$$

$$W_c = \frac{h_1 h_2^2}{4} - W_{px} - W_r$$

$$W_c = \frac{(600)(600)^2}{4} - 1053 \times 10^3 - 748475$$

$$W_c = 52198525 \text{ mm}^3$$

$$M_D = W_{px} F_y + W_r F_{ysr} + \frac{W_c}{2}(0.85 f_{ck})$$

$$M_D = \left(1053 \times 10^3\right)(355)10^{-6} + (748475)(420)10^{-6} + \frac{52198525}{2}(0.85 \times 35)10^{-6}$$

$$M_D = 1464.6 \text{ kNm}$$

İlk olarak h_n nin başlığın içinde olduğu varsayılacaktır. Daha sonra bu koşul kontrol edilecektir.

$$\left(\frac{d}{2} - t_f < h_n \le \frac{d}{2}\right) \text{ için } \quad h_n = \frac{0.85 f_{ck}\left(A_c + A_s - db_f + A_{srs}\right) - 2F_y\left(A_s - db_f\right) - 2F_{ysr}A_{srs}}{2\left[0.85 f_{ck}\left(h_1 - b_f\right) + 2F_y b_f\right]}$$

$$h_n = \frac{0.85(35)(345153 + 10600 - (240)(240) + 1062) - 2(355)(10600 - (240)(240)) - 2(420)(1062)}{2\left[0.85(35)(600 - 240) + 2(355)(240)\right]}$$

$$h_n = 114.2 \text{ mm}$$

$$\frac{240}{2} - 17 = 103 \text{ mm} < h_n = 114.2 \text{ mm} \le \frac{240}{2} = 120 \text{ mm} \checkmark$$

Böylece, başlangıçta yapılan varsayımın geçerli olduğu ve h_n nin başlığın içinde yer aldığı anlaşılmaktadır.

$$W_{sn} = W_{px} - b_f\left(\frac{d}{2} - h_n\right)\left(\frac{d}{2} + h_n\right)$$

$$W_{sn} = 1053 \times 10^3 - (240)\left(\frac{240}{2} - 114.2\right)\left(\frac{240}{2} + 114.2\right)$$

$$W_{sn} = 726993.6 \text{ mm}^3$$

$$W_{cn} = h_1 h_n^2 - W_{sn}$$

$$W_{cn} = (600)(114.2)^2 - 726993.6$$

$$W_{cn} = 7097990.4 \text{ mm}^3$$

$$M_B = M_D - W_{sn}F_y - \frac{1}{2}W_{cn}\left(0.85f_{ck}\right)$$

$$M_B = 1464.6 - \left(726993.6\right)\left(355\right)10^{-6} - \frac{1}{2}\left(7097990.4\right)\left(0.85\times 35\right)10^{-6}$$

$$M_B = 1100.9 \text{ kNm}$$

$$M_p = M_B = 1100.9 \text{ kNm}$$

Kompozit elemanın eğilme momenti dayanımının (M_n) belirlenmesi

Yönetmelik 12.4.3(b) uyarınca,

$$M_n = M_p$$

$$M_n = 1100.9 \text{ kNm}$$

Eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkileşimi genel karşılıklı etki diyagramları ile *Yönetmelik* 12.6.1 esas alınarak değerlendirilebilir. Buna göre,

YDKT	GKT
a. Kompozit enkesitli elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Kompozit enkesitli elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.75\left(14243.4\right) = 10682.6 \text{ kN}$ $M_d = \phi_b M_n = 0.90\left(1100.9\right) = 990.8 \text{ kNm}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 14243.4/2.0 = 7121.7 \text{ kN}$ $M_g = M_n/\Omega_b = 1100.9/1.67 = 659.2 \text{ kNm}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{4950}{10682.6} = 0.46 > 0.20$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{3720}{7121.7} = 0.52 > 0.20$
$\frac{P_u}{P_d} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_u}{M_d}\right) \le 1.0$ (11.1a) $\frac{4950}{10682.6} + \frac{8}{9}\left(\frac{812}{990.8}\right) = 1.19 > 1.0$ ✗	$\frac{P_a}{P_g} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_a}{M_g}\right) \le 1.0$ (11.1a) $\frac{3720}{7121.7} + \frac{8}{9}\left(\frac{366}{659.2}\right) = 1.02 > 1.0$ ✗

Yukarıda esas alınan yöntem daha büyük oranda güvenli tarafta kalan bir yaklaşım olması nedeniyle, kompozit eleman, dayanım kontrolüne göre yetersiz olarak değerlendirilmektedir. Bu durumda daha hassas bir dayanım kontrolü için eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkileşimi, geliştirilmiş karşılıklı etki diyagramları ile *Yönetmelik* 12.6.2 esas alınarak incelenebilir.

Bu durumda *Yönetmelik* Şekil 12.7 de gösterilen geliştirilmiş karşılıklı etki diyagramlarının oluşturulabilmesi için *Yönetmelik* Tablo 12.2 de verilen ifadeler kullanılarak A, C, D ve B noktalarının koordinatlarının belirlenmesi gerekmektedir.

A Noktasının koordinatları

$$M_A = 0.0 \text{ kNm}$$

$$A_c = h_1 h_2 - A_s - A_{sr}$$

$$A_c = \left(600\right)\left(600\right) - 10600 - 4247$$

$$A_c = 345153 \text{ mm}^3$$

$$P_A = A_s F_y + A_{sr} F_{ysr} + 0.85 f_{ck} A_c$$

$$P_A = (10600)(355)10^{-3} + (4247)(420)10^{-3} + 0.85(35)(345153)10^{-3}$$

$$P_A = 15815.0 \text{ kN}$$

D Noktasının koordinatları

$$M_D = 1464.6 \text{ kNm}$$

$$P_D = \frac{0.85 f_{ck} A_c}{2}$$

$$P_D = \frac{0.85(35)(345153)}{2} 10^{-3}$$

$$P_D = 5134.2 \text{ kN}$$

B Noktasının koordinatları

$$M_B = 1100.9 \text{ kNm}$$

$$P_B = 0.0 \text{ kN}$$

C Noktasının koordinatları

$$P_C = 0.85 f_{ck} A_c$$

$$P_C = 0.85(35)(345153)10^{-3}$$

$$P_C = 10268.3 \text{ kN}$$

$$M_C = M_B$$

$$M_C = 1100.9 \text{ kNm}$$

Azaltma katsayısı, λ

Yönetmelik 12.6.2 uyarınca, kompozit enkesitte plastik gerilme yayılışı esas alınarak, eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkileşimi için hesaplanan eksenel kuvvet dayanım değerleri (A, E, C, D ve B noktalarının ordinatları), kompozit elemanın boyuna bağlı narinliği nedeniyle, azaltma katsayısı, λ ile çarpılarak azaltılmalıdır.

$$P_{no} = P_A = 15815.0 \text{ kN}$$

$$P_n = 14243.4 \text{ kN}$$

$$\lambda = \frac{P_n}{P_{no}} = \frac{14243.4}{15815.0} = 0.900$$

$$P_{A'} = \lambda P_A$$

$$P_{A'} = (0.900)(15815.0) = 14233.5 \text{ kN}$$

$$P_{B'} = \lambda P_B$$

$$P_{B'} = (0.900)(0.0) = 0.0 \text{ kN}$$

$$P_{C'} = \lambda P_C$$

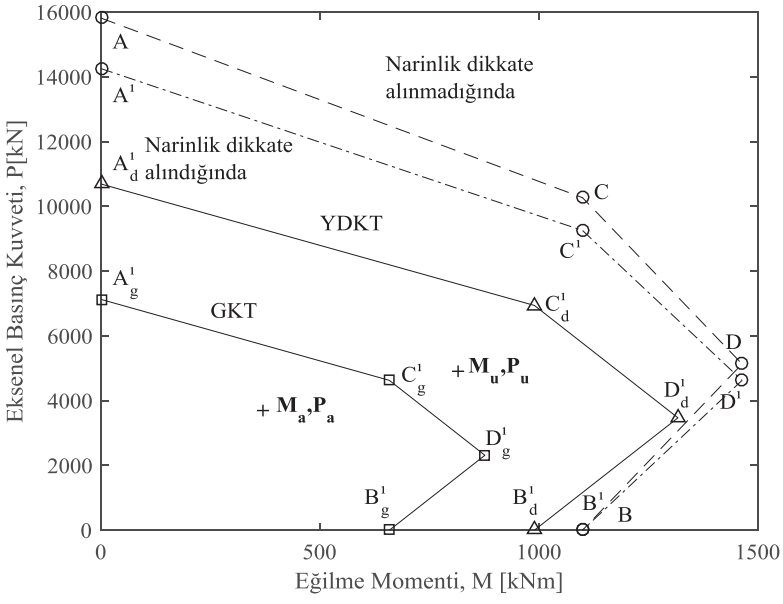
$$P_{C'} = (0.900)(10268.3) = 9241.5 \text{ kN}$$

$$P_{D'} = \lambda P_D$$

$$P_{D'} = (0.900)(5134.2) = 4620.8 \text{ kN}$$

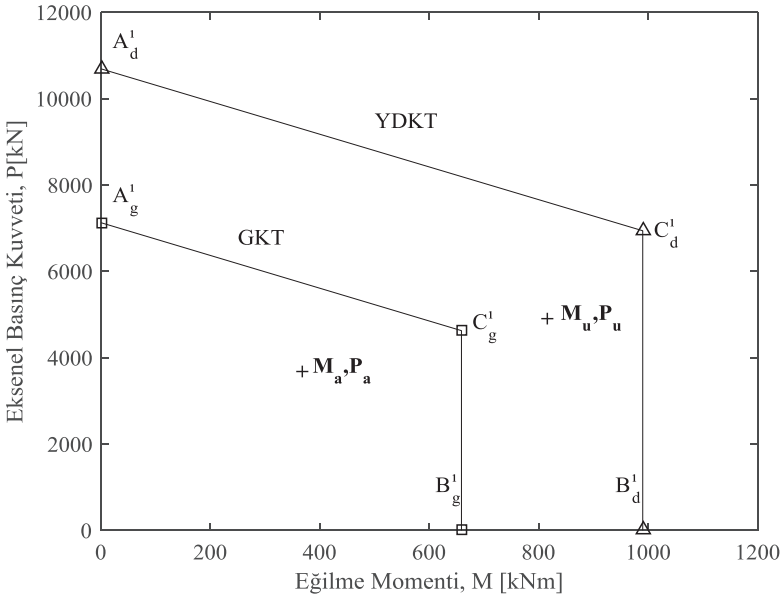
YDKT	GKT
Kompozit enkesitli elemanın tasarım etkileşim diyagramı için eksenel kuvvet dayanımları	Kompozit enkesitli elemanın güvenli etkileşim diyagramı için eksenel kuvvet dayanımları
$P_{A',d} = \phi_c P_{A'} = 0.75(14233.5) = 10675.1 \text{ kN}$ $P_{B',d} = \phi_c P_{B'} = 0.75(0.0) = 0.0 \text{ kN}$ $P_{C',d} = \phi_c P_{C'} = 0.75(9241.5) = 6931.1 \text{ kN}$ $P_{D',d} = \phi_c P_{D'} = 0.75(4620.8) = 3465.6 \text{ kN}$	$P_{A',g} = P_{A'}/\Omega_c = 14233.5/2.00 = 7116.8 \text{ kN}$ $P_{B',g} = P_{B'}/\Omega_c = 0.0/2.00 = 0.0 \text{ kN}$ $P_{C',g} = P_{C'}/\Omega_c = 9241.5/2.00 = 4620.8 \text{ kN}$ $P_{D',g} = P_{D'}/\Omega_c = 4620.8/2.00 = 2310.4 \text{ kN}$
Kompozit enkesitli elemanın etkileşim diyagramı için tasarım eğilme momenti dayanımları	Kompozit enkesitli elemanın etkileşim diyagramı için güvenli eğilme momenti dayanımları
$M_{A',d} = \phi_b M_{A'} = 0.90(0.0) = 0.0 \text{ kNm}$ $M_{B',d} = \phi_b M_{B'} = 0.90(1100.9) = 990.8 \text{ kNm}$ $M_{C',d} = \phi_b M_{C'} = 0.90(1100.9) = 990.8 \text{ kNm}$ $M_{D',d} = \phi_b M_{D'} = 0.90(1464.6) = 1318.1 \text{ kNm}$	$M_{A',g} = M_{A'}/\Omega_b = 0.0/1.67 = 0.0 \text{ kNm}$ $M_{B',g} = M_{B'}/\Omega_b = 1100.9/1.67 = 659.2 \text{ kNm}$ $M_{C',g} = M_{C'}/\Omega_b = 1100.9/1.67 = 659.2 \text{ kNm}$ $M_{D',g} = M_{D'}/\Omega_b = 1464.6/1.67 = 877.0 \text{ kNm}$

Kompozit elemanın tasarım veya güvenli dayanımının kontrolü, Şekil 12.11.1 de gösterilen YDKT veya GKT yöntemlerinin etkileşim diyagramları esas alınarak yapılır. Buna göre gerekli dayanımların belirlediği noktaların, her iki yöntemde de etkileşim diyagramlarının içinde kaldığı görülür. Bu durumda kompozit enkesitli elemanın dayanımı yeterlidir.



Şekil 12.11.1 – Tasarım ve güvenli dayanım kontrolü için etkileşim diyagramları

Yönetmelik 12.6.2 uyarınca, YDKT veya GKT yöntemlerine göre Şekil 12.11.1 de gösterildiği gibi elde edilen etkileşim eğrileri sırasıyla, sadece A'_d, C'_d ve B'_d noktaları veya A'_g, C'_g ve B'_g noktaları gözönünde tutularak basitleştirilebilir. Bu durumda eğriler Şekil 12.11.2 de verildiği gibi elde edilir.



Şekil 12.11.2 – Tasarım ve güvenli dayanım kontrolü için basitleştirilmiş etkileşim diyagramları

YDKT	GKT
a. Kompozit enkesitli elemanın tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Kompozit enkesitli elemanın güvenli dayanımının kontrolü
$P_r < P_C \qquad P_r = P_u \qquad P_C = P_{C',d}$ $P_u = 4950\ \text{kN} < P_{C',d} = 6931.1\ \text{kN}$ $\frac{M_{rx}}{M_{Cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{Cy}} \le 1.0$ (12.28a) $\frac{M_u}{M_{C',d}} \le 1.0$ $\frac{812}{990.8} \le 1.0 \qquad 0.82 \le 1.0$ ✓	$P_r < P_C \qquad P_r = P_a \qquad P_C = P_{C',g}$ $P_a = 3720\ \text{kN} < P_{C',g} = 4620.8\ \text{kN}$ $\frac{M_{rx}}{M_{Cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{Cy}} \le 1.0$ (12.28a) $\frac{M_a}{M_{C',g}} \le 1.0$ $\frac{366}{659.2} \le 1.0 \qquad 0.56 \le 1.0$ ✓

Kesme kuvveti dayanımının kontrolü

Yönetmelik 12.5.1 uyarınca, tasarım kesme kuvveti dayanımı veya güvenli kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* Bölüm 10 a göre sadece çelik kesit dikkate alınarak veya beton ve beton çeliği için malzeme katsayıları kullanmaksızın TS 500 standardına göre, beton ve enine donatı dikkate alınarak hesaplanabilir. Burada, kesme kuvveti dayanımı her iki durum da esas alınarak kontrol edilecektir.

Sadece çelik kesit ile karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n

Yönetmelik 10.2.1 uyarınca,

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$A_w = dt_w$$

$$A_w = (240)(10) = 2400\ \text{mm}^2$$

$$h = 164\ \text{mm} \qquad \frac{h}{t_w} \le 2.24\sqrt{E/F_y}$$

$$\frac{164}{10} = 16.4 \le 2.24\sqrt{200000/355} = 53.2 \checkmark$$

Yönetmelik 10.2.1(a) uyarınca,

$$C_{v1} = 1.0$$

$$V_n = 0.6(355)(2400)(1.0)10^{-3}$$

$$V_n = 511.2\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
c. Elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**d.** Elemanın güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 1.0(511.2) = 511.2\ \text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 511.2/1.5 = 340.8\ \text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{405.7}{511.2} = 0.79 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{243.3}{340.8} = 0.71 \le 1.0$ ✓

Betonarme enkesitin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n

Yönetmelik 12.5.1(b) uyarınca, betonarme enkesitin karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n, beton ve beton çeliği için malzeme katsayıları kullanmaksızın TS 500 8.1.4 esas alınarak hesaplanabilir. Bu durumda, enkesitin karakteristik kesme kuvveti dayanımı beton katkısı, V_c ve kesme donatısı katkısı V_w nun toplanması ile elde edilir.

$$V_r = V_c + V_w \qquad \text{(8.3, TS 500)}$$

$$V_n = V_r$$

$$V_c = 0.80 V_{cr} \qquad \text{(8.4, TS 500)}$$

TS 500 Denk.(8.1), betonun karakteristik eksenel çekme dayanımına bağlı olmak üzere, basınç kuvvetinin katkısı da terkedilerek aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$V_{cr} = 0.65 f_{ctk} b_w d$$

$f_{ctk} = 2.1\ \text{MPa}$ (TS 500 Çizelge 3.2) $\quad b_w = h_1 \qquad d = h_2 - c = 600 - 65 = 535\ \text{mm}$

$$V_{cr} = 0.65(2.1)(600)(535)10^{-3}$$

$$V_{cr} = 438.2\ \text{kN}$$

$$V_c = 0.80 V_{cr} = 0.80(438.2) = 350.6\ \text{kN}$$

TS 500 Denk.(8.5), beton çeliğinin karakteristik akma gerilmesine bağlı olmak üzere aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$V_w = \frac{A_{sw}}{s} f_{ywk} d$ Etriye : Φ12/250 Etriye kol sayısı : 2

$$A_{sw} = 2\left(\frac{\pi \times 12^2}{4}\right) = 226\ \text{mm}^2 \qquad s = 250\ \text{mm} \qquad f_{ywk} = 420\ \text{MPa} \qquad d = 535\ \text{mm}$$

$$V_w = \frac{226}{250}(420)(535)10^{-3}$$

$$V_w = 203.1\ \text{kN}$$

$$V_n = 350.6 + 203.1 = 553.7\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
c. Elemanın tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	**d.** Elemanın güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 0.75(553.7) = 415.3 \text{ kN}$	$V_g = V_n / \Omega_v = 553.7 / 2.0 = 276.9 \text{ kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{405.7}{415.3} = 0.98 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{243.3}{276.9} = 0.88 \le 1.0$ ✓
Tasarımın gerekli etriye aralığı belirlenerek tamamlanması istendiğinde, gerekli etriye aralığı, $s_{gerekli}$, aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.	
$s_{gerekli} = \frac{\phi_v A_{sw} f_{ywk} d}{V_u - \phi_v V_c}$ $s_{gerekli} = \frac{0.75(226)(420)(535)}{405.7\times10^3 - 0.75(350.6\times10^3)}$ $s_{gerekli} = 277 \text{ mm}$ $s = 250 \text{ mm} < 277 \text{ mm}$	$s_{gerekli} = \frac{A_{sw} f_{ywk} d/\Omega_v}{V_a - V_c/\Omega_v}$ $s_{gerekli} = \frac{(226)(420)(535)/2.0}{243.3\times10^3 - (350.6\times10^3)/2.0}$ $s_{gerekli} = 373 \text{ mm}$ $s = 300 \text{ mm} < 373 \text{ mm}$

Minimum kesme donatısı kontrolü

YDKT	GKT
Kontrol, TS 500 Denk.(8.6), betonun karakteristik eksenel çekme gerilmesi ve gövde donatısının karakteristik akma gerilmesine bağlı olmak üzere aşağıdaki şekilde yapılabilir.	
$\frac{A_{sw}}{s} \ge 0.25 \frac{f_{ctk}}{f_{ywk}} b_w$ $\frac{226}{250} \ge 0.25 \frac{2.1}{420} 600$ $0.904 \ge 0.75$ ✓	$\frac{A_{sw}}{s} \ge 0.25 \frac{f_{ctk}}{f_{ywk}} b_w$ $\frac{226}{300} \ge 0.25 \frac{2.1}{420} 600$ $0.75 \le 0.75$ ✓

Kesme kuvveti üst sınırının kontrolü

YDKT	GKT
Kontrol, TS 500 Denk.(8.7), betonun karakteristik basınç gerilmesine bağlı olmak üzere aşağıdaki şekilde yapılabilir.	
$V_u \le \phi_v 0.22 f_{ck} b_w d$ $405.7 \text{ kN} \le (0.75)0.22(35)(600)(535)10^{-3}$ $405.7 \text{ kN} \le 1853.8 \text{ kN}$ ✓	$V_u \le 0.22 f_{ck} b_w d/\Omega_v$ $243.3 \text{ kN} \le 0.22(35)(600)(535)10^{-3}/2.0$ $243.3 \text{ kN} \le 1235.9 \text{ kN}$ ✓

Yukarıdaki dayanım kontrollerine ilave olarak, yük aktarımı ile ilgili kontroller de *Yönetmelik* 12.7 esasları çerçevesinde Örnek 12.4 te olduğu gibi yapılmalıdır.

KAYNAK YAYINLAR

ACI 318-11 *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

AISC Design Guide 3 *Serviceability Design Considerations for Steel Buildings*, 2003, AISC, Chicago.

Murray, T.M., Allen, D.E. and Ungar, E.E., *Floor Vibrations due to Human Activity*, Steel Design Guide Series 11, 2003, AISC, Chicago.

Park, R., and Gamble, W.L., *Reinforced Concrete Slabs*, 2000, John Wiley&Sons, New York.

Young, W.C., and Budynas, R.C., *Roark's Formulas for Stress and Strain,* 2002, McGraw-Hill, New York, NY.

Vatansever C., Durgun Y., Aksoylu M. G. ve Darılmaz K. *İnşaat Mühendisleri için MATLAB Kullanımına Giriş*, Birsen Yayınevi, 2016, İstanbul.

BÖLÜM 13 BİRLEŞİMLER VE BİRLEŞİM ARAÇLARI

Birleşim araçları ve elemanları ile birleşim bölgeleri dikkate alınarak, birleşen elemanların tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 13 te belirtilen kurallara göre yapılacaktır.

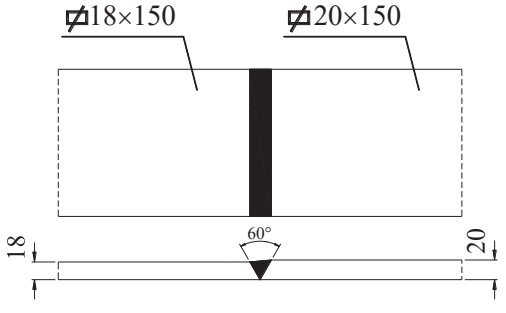
Örnek 13.1

Aşağıdaki şekilde detayı verilen Levha 18×150 ve Levha 20×150 enkesitli elemanların küt kaynaklı ek birleşimi sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 100kN ve P_Q = 250kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir. Kaynak uygulamasında, kaynağın başlatıldığı ve sonlandırıldığı yardımcı levhalar (başlangıç ve bitiş levhaları) kullanılmıştır. Ek teşkilinde

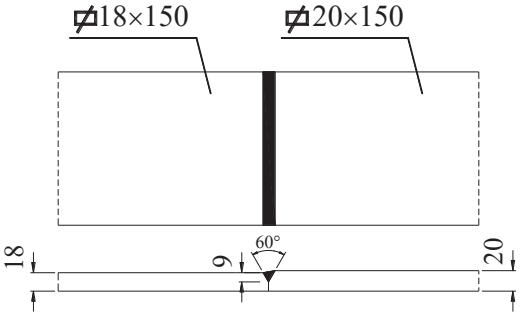
a. tam penetrasyonlu küt kaynak kullanılması veya

b. kaynak ağzı şekli V-60° ve derinliği 9mm olan kısmi penetrasyonlu küt kaynak kullanılması durumunda

birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi ve tasarım (YDKT) ve güvenli (GKT) dayanımlarının kontrolü.



a. Tam penetrasyonlu küt kaynak uygulaması



b. Kısmi penetrasyonlu küt kaynak uygulaması

Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 18×150	
t = 18.0 mm	b = 150 mm
Levha 20×150	
t = 20.0 mm	b = 150 mm

Kaynaklar

Yönetmelik 13.2.6 uyarınca, F_E = 480 N/mm^2 ≥ F_u = 430 N/mm^2

Çözüm

a. Tam penetrasyonlu küt kaynak kullanılması durumunda

Tam penetrasyonlu küt kaynağın etkin kalınlığı, a (*Yönetmelik* 13.2.1.1)

a = 18 mm

Tam penetrasyonlu küt kaynaklı birleşimin karakteristik dayanımı, R_{nw}

(*Yönetmelik* Tablo 13.5 Kaynak eksenine dik çekme)

Esas metal dayanımı belirleyicidir. *Yönetmelik* 13.4.1 uyarınca,

$$R_n = F_y A_g \qquad (13.15)$$

$$R_n = (275)(18\times150)10^{-3} = 742.50\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(100) + 1.6(250) = 520\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 100 + 250 = 350\ \text{kN}$
Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.90(742.50) = 668.25\ \text{kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 742.50/1.67 = 444.61\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{520}{668.50} = 0.78 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{350}{444.61} = 0.79 \le 1.0$ ✓

b. Kısmi penetrasyonlu küt kaynak kullanılması durumunda

Kısmi penetrasyonlu küt kaynak işlemi (*Yönetmelik* Tablo 13.1)

Örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağı, V - 60° düz kaynak.

Kısmi penetrasyonlu küt kaynağın etkin kalınlığı, a (*Yönetmelik* Tablo 13.1)

a = 9 mm (Kaynak ağzı derinliği)

19 mm ≥ t = 18 mm > 13 mm a_{min} = 6 mm < a = 9 mm ✓ (*Yönetmelik* Tablo 13.3)

Kısmi penetrasyonlu küt kaynaklı birleşimin karakteristik dayanımı

Kaynak metali karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_{nw}

(*Yönetmelik* Tablo 13.5 Kaynak eksenine dik çekme)

$$R_{nw} = F_{nw} A_{we} \qquad (13.2)$$

$$F_{nw} = 0.60F_E$$

$$F_{nw} = 0.60(480) = 288\ \text{N/mm}^2$$

$$A_{we} = (9)(150) = 1350\ \text{mm}^2 \quad (\textit{Yönetmelik}\ 13.2.1.1)$$

$$R_{nw} = (288)(1350)10^{-3} = 388.80\ \text{kN}$$

Esas metal karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_{nBM}

(*Yönetmelik* Tablo 13.5 Kaynak eksenine dik çekme)

$$R_{nBM} = F_{nBM} A_{BM} \qquad F_{nBM} = F_u \quad A_{BM} = A_e \qquad (13.1)$$

$$R_{nBM} = (430)(9\times150)10^{-3} = 580.50\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(100) + 1.6(250) = 520\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 100 + 250 = 350\ \text{kN}$
Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_{nw} = 0.80(388.80) = 311.04\ \text{kN}$ $R_d = \phi R_{nBM} = 0.75(580.50) = 435.38\ \text{kN}$	$R_g = R_{nw}/\Omega = 388.80/1.88 = 206.81\ \text{kN}$ $R_g = R_{nBM}/\Omega = 580.50/2.00 = 290.25\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{520}{311.04} = 1.67 > 1.0$ ✗	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{350}{206.81} = 1.69 > 1.0$ ✗

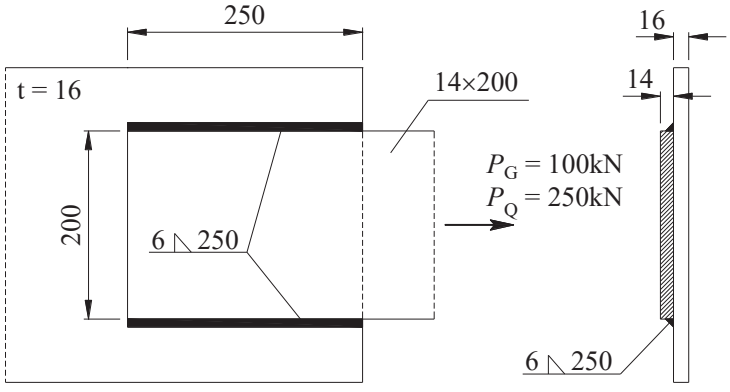
Örnek 13.2

Aşağıdaki şekilde köşe kaynaklı uç birleşim detayı verilen Levha 14×200 enkesit boyutlarına sahip eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 100kN ve P_Q = 250kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 14×200	
t = 14.0 mm	b = 200 mm

Kaynaklar

F_E = 550 N/mm^2 > F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* 2.4)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 13.2.2 uyarınca, birleşen eleman kenarı ile birleşilen yüzey arasındaki 90° lik açının uygunluğu

60° ≤ 90° ≤ 120 ✓

Köşe kaynağın etkin kalınlığı, a (13.2.2.2)

13 mm < t = 14 mm ≤ 19 mm a_{min} = 4 mm < a = 6 mm ✓ (*Yönetmelik* Tablo 13.4)

$a_{maks} = 0.7(14.0 - 2.0) = 8.4 \text{ mm} > a = 6.0 \text{ mm}$ ✓

Köşe kaynağın etkin uzunluğu, L_e (*Yönetmelik* 13.2.2.2)

$L = 250 - 2a = 250 - 2(6.0) = 238 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* 13.2.2)

L = 238 mm ≥ Maks.(6 × 6.0 = 36 mm; 40 mm) = 40 mm ✓

L = 238 mm ≥ b = 200 mm ✓

$L = 238$ mm $\le 150a = 150(6.0) = 900$ mm olduğundan $L_e = 238$ mm

Köşe kaynağın etkin alanı, A_{we} (*Yönetmelik* 13.2.2.1)

$$A_{we} = \Sigma a L_e$$

$$A_{we} = 2(6.0)(238) = 2856 \text{ mm}^2$$

Kaynak metali karakteristik dayanımı, R_{nw}

(*Yönetmelik* Tablo 13.5 Kesme)

$R_{nw} = F_{nw} a$ (Birim kaynak uzunluğu için) $\quad F_{nw} = 0.60 F_E \quad a = 6.0$ mm

$R_{nw} = F_{nw} A_{we}$ (Toplam kaynak alanı için)

$$F_{nw} = 0.60(550) = 330 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{nw} = (330)(6.0)10^{-3} = 1.980 \text{ kN/mm}$$

$$R_{nw} = 2(1.980)(238) = 942.48 \text{ kN}$$

Esas metal karakteristik dayanımı, R_{nBM} (*Yönetmelik* 13.4.2)

Kayma etkisinde kırılma sınır durumu için

$R_{nBM} = F_{nBM} t \quad F_{nBM} = 0.60 F_u$

$$R_{nBM} = 0.60(510)(14)10^{-3} = 4.284 \text{ kN/mm}$$

$$R_{nBM} = 2(4.284)(238) = 2039.18 \text{ kN}$$

Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesinde kaynak metali dayanımı belirleyicidir.

$$R_n = \text{Min.}(R_{nw}; R_{nBM}) = \text{Min.}(942.48; 2039.18)$$

$$R_n = 942.48 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(100) + 1.6(250) = 520$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 100 + 250 = 350$ kN
b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.75(942.48) = 706.86$ kN	$R_g = R_n/\Omega = 942.48/2.00 = 471.24$ kN
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{520}{706.86} = 0.74 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{350}{471.24} = 0.74 \le 1.0$ ✓

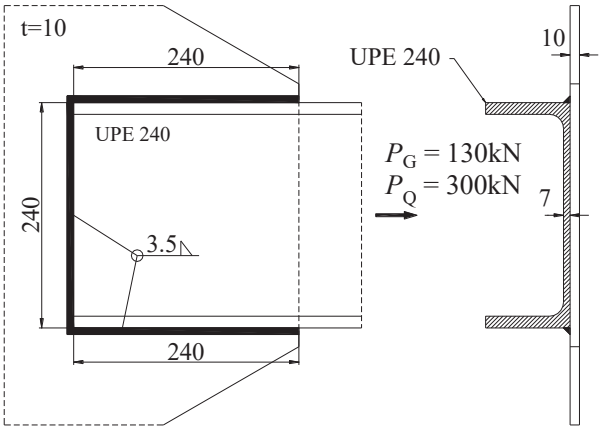
Örnek 13.3

Aşağıdaki şekilde köşe kaynaklı uç birleşim detayı verilen UPE 240 enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 130kN ve P_Q = 300kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

UPE 240
$d = 240$ mm $t_f = 12.5$ mm $t_w = 7.0$ mm

Kaynaklar

$F_E = 550$ N/mm^2 > $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* 2.4)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 13.2.2 uyarınca, birleşen eleman kenarı ile birleşilen yüzey arasındaki 90° lik açının uygunluğu

60° ≤ 90° ≤ 120 ✓

Köşe kaynağın etkin kalınlığı, a (*Yönetmelik* 13.2.2.2)

6 mm < t = 7 mm ≤ 13 mm $a_{min} = 3.5$ mm < $a = 3.5$ mm ✓ (*Yönetmelik* Tablo 13.4)

$a_{maks} = 0.7(7.0 - 2.0) = 3.5 \text{ mm} \geq a = 3.5 \text{ mm}$ ✓

Köşe kaynağın etkin uzunluğu, L_e (*Yönetmelik* 13.2.2.2)

Kuvvete paralel köşe kaynaklar için

$L = 240 - a = 240 - 3.5 = 236.5$ mm (*Yönetmelik* 13.2.2)

L = 236.5 mm ≥ Maks.(6 × 3.5 = 21 mm; 40 mm) = 40 mm ✓

$L = 236.5$ mm $\le 150a = 150(3.5) = 525$ mm olduğundan $L_e = 236.5$ mm

Kaynak metali karakteristik dayanımı, R_{nw} (*Yönetmelik* 13.2.4(b))

Yönetmelik 13.2.4(b) uyarınca, üniform kalınlıklı kaynak grubunun karakteristik dayanımı, Denk.(13.5) ve Denk.(13.6) ile hesaplanan değerlerin büyüğüne eşit alınacaktır.

$$R_{nw} = R_{nwl} + R_{nwt} \quad (13.5)$$

$$R_{nw} = 0.85R_{nwl} + 1.5R_{nwt} \quad (13.6)$$

$$R_{nwl} = F_{nw}A_{we} = \left(0.60F_E\right)\left(2\times 3.5\times 236.5\right)10^{-3} = 546.32 \text{ kN}$$

$$R_{nwt} = F_{nw}A_{we} = \left(0.60F_E\right)\left(3.5\times 240\right)10^{-3} = 277.20 \text{ kN}$$

$$R_{nw} = 546.32 + 277.20 = 823.52 \text{ kN} \quad (13.5)$$

$$R_{nw} = 0.85\left(546.32\right) + 1.5\left(277.20\right) = 880.17 \text{ kN} \quad (13.6)$$

$$R_{nw} = 880.17 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2\left(130\right) + 1.6\left(300\right) = 636$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 130 + 300 = 430$ kN
b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_{nw} = 0.75\left(880.17\right) = 660.13$ kN	$R_g = R_{nw}/\Omega = 880.17/2.00 = 440.09$ kN
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{636}{660.13} = 0.96 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{430}{440.09} = 0.98 \le 1.0$ ✓

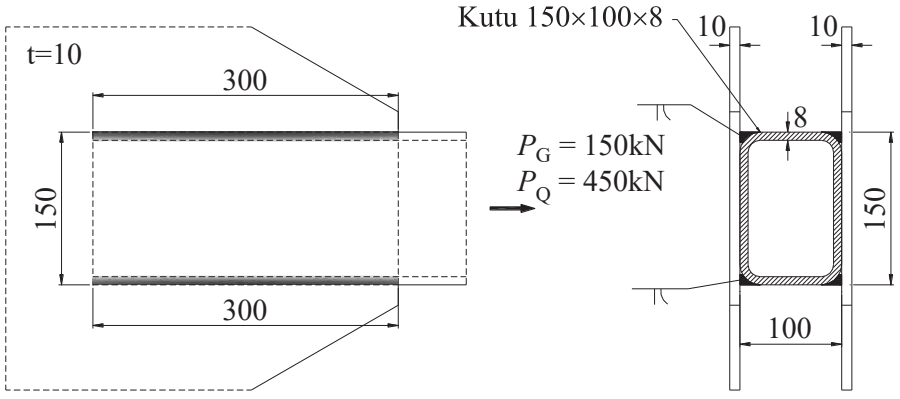
Örnek 13.4

Aşağıdaki şekilde verilen ve örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağı işlemi uygulanarak teşkil edilen uç birleşim detayına sahip Kutu 150×100×8 enkesitli eleman, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 150kN ve P_Q = 450kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

Enkesit

Kutu 150×100×8		
H = 150 mm	B = 100 mm	t = 8 mm

Kaynak

Enkesitinin bir kenarı eğrisel küt kaynak (*Yönetmelik* 13.2.1.1, Şekil 13.2)

$F_E = 550$ N/mm^2 > $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* 2.4)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Enkesitinin bir kenarı eğrisel küt kaynağın etkin kalınlığı, a (*Yönetmelik* Tablo 13.2)

Kaynak işlemi örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağı olup kaynak metali eğrisel yüzey hizasına kadar doldurulmaktadır.

$a = \frac{5}{16} R \qquad R = 2t \quad R = 2(8.0) = 16 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* Tablo 13.2)

$a = \frac{5}{16}(16) = 5.0 \text{ mm}$

Enkesitinin bir kenarı eğrisel küt kaynağın etkin uzunluğu, L_e (*Yönetmelik* 13.2.2.2)

$L = 300 - 2a = 300 - 2(5.0) = 290 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* 13.2.2)

L = 290 mm ≥ Maks.(6 × 6.0 = 36 mm; 40 mm) = 40 mm ✓

L = 290 mm ≥ b = 200 mm ✓

$L = 290$ mm $\le 150a = 150(6.0) = 900$ mm olduğundan $L_e = 290$ mm

Kaynak metali karakteristik dayanımı, R_{nw}

(*Yönetmelik* Tablo 13.5 Kesme)

$$R_{nw} = F_{nw} A_{we} \qquad (13.2)$$

$$F_{nw} = 0.60 F_E$$

$$F_{nw} = 0.60(550) = 330 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{we} = 4(5.0)(290) = 5800 \text{ mm}^2$$

$$R_{nw} = (330)(5800)10^{-3} = 1914.00 \text{ kN}$$

Esas metal karakteristik dayanımı, R_{nBM} (*Yönetmelik* 13.4.2)

Kayma etkisinde kırılma sınır durumu için

$$R_{nBM} = F_{nBM} t \qquad F_{nBM} = 0.60 F_u$$

$$R_{nBM} = 0.60(430)(8.0)10^{-3} = 2.064 \text{ kN/mm}$$

$$R_{nBM} = 4(2.064)(290) = 2394.24 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(150) + 1.6(450) = 900$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 150 + 450 = 600$ kN
b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_{nw} = 0.80(1914.00) = 1531.20$ kN $R_d = \phi R_{nBM} = 0.75(2394.24) = 1795.68$ kN	$R_g = R_{nw}/\Omega = 1914.00/1.88 = 1018.09$ kN $R_g = R_{nBM}/\Omega = 2394.24/2.00 = 1197.12$ kN
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{900}{1531.20} = 0.59 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{600}{1018.09} = 0.59 \le 1.0$ ✓

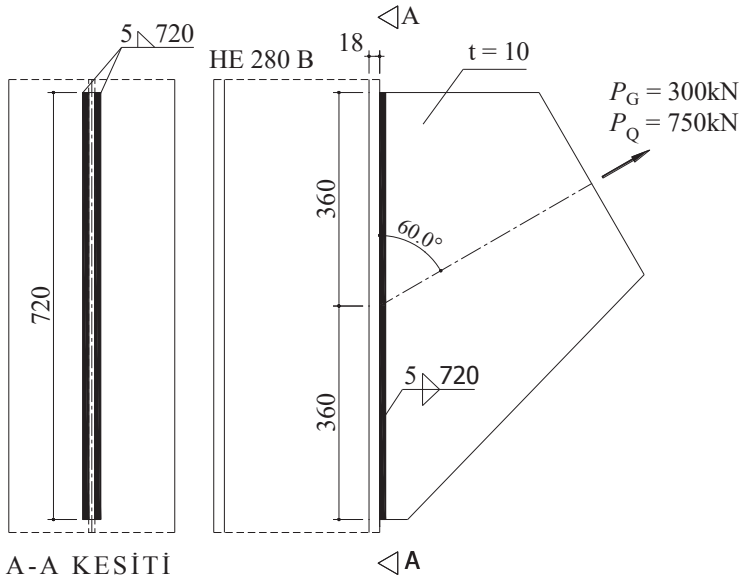
Örnek 13.5

Aşağıdaki şekilde köşe kaynaklı birleşim detayı verilen düğüm noktası levhası, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 300kN ve P_Q = 750kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 720×10	
d = 720 mm	t = 8 mm

Kaynak

F_E = 550 N/mm^2 > F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* 2.4)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Birleşen eleman kenarı ile birleşilen yüzey arasındaki 90° lik açının uygunluğu (*Yönetmelik* 13.2.2)

60° ≤ 90° ≤ 120 ✓

Köşe kaynağın etkin kalınlığı, a (*Yönetmelik* 13.2.2.2)

6 mm ≤ t = 10 mm < 13 mm a_{min} = 3.5 mm < a = 5 mm ✓ (*Yönetmelik* Tablo 13.4)

Köşe kaynağın etkin uzunluğu, L_e (*Yönetmelik* 13.2.2.2)

$L = 720 - 2a = 720 - 2(5.0) = 710 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* 13.2.2)

$L = 710 \text{ mm} \geq \text{Maks.}(6 \times 5.0 = 30 \text{ mm}; 40 \text{ mm}) = 40 \text{ mm}$ ✓

$L = 710 \text{ mm} \leq 150a = 150(5.0) = 750 \text{ mm}$ olduğundan $L_e = 710 \text{ mm}$

Köşe kaynağın etkin alanı, A_{we} (*Yönetmelik* 13.2.2.1)

$$A_{we} = \Sigma a L_e$$

$$A_{we} = 2(5.0)(710) = 7100 \text{ mm}^2$$

Kaynak metali karakteristik dayanımı, R_{nw}

(*Yönetmelik* Tablo 13.5 Kesme)

$$R_{nw} = F_{nw} A_{we} \qquad a = 5.0 \text{ mm}$$

$$F_{nw} = 0.60 F_E \left(1.0 + 0.5 \sin^{1.5} \theta\right) \tag{13.4}$$

$$F_{nw} = 0.60(550)\left(1.0 + 0.5 \sin^{1.5} 60°\right) = 462.98 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{nw} = (462.98)(5.0)10^{-3} = 2.315 \text{ kN/mm}$$

$$R_{nw} = 2(2.315)(710) = 3287.30 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(300) + 1.6(750) = 1560 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 300 + 750 = 1050 \text{ kN}$
b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_{nw} = 0.75(3287.30) = 2465.48 \text{ kN}$	$R_g = R_{nw}/\Omega = 3287.30/2.00 = 1643.65 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{1560}{2465.48} = 0.63 \leq 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{1050}{1643.65} = 0.64 \leq 1.0$ ✓

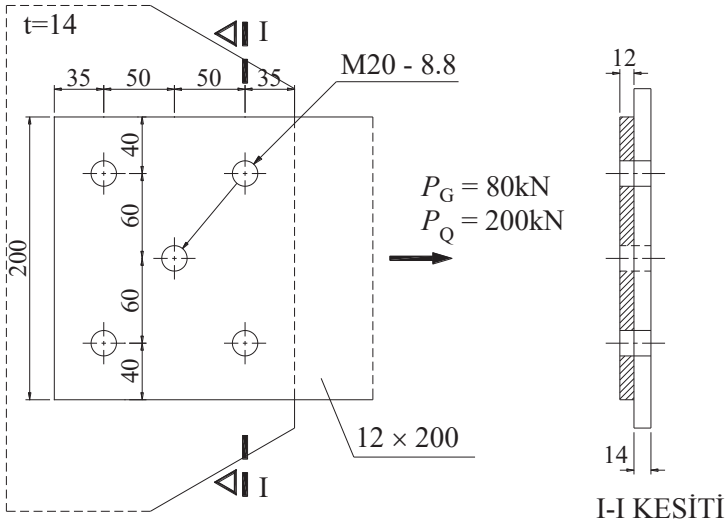
Örnek 13. 6

Aşağıdaki şekilde ezilme etkili bulonlu birleşim detayı verilen Levha 12×200 enkesit boyutlarına sahip çekme elemanı, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 80kN ve P_Q = 200kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 12×200
t = 12.0 mm b = 200 mm

Bulonlar (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

M20 – 8.8 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır ve diş açılmış bulon gövdesi bölümünün kayma düzlemi içinde olduğu varsayılacaktır)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Bulon gövdesi için kesme kırılması sınır durumu (*Yönetmelik* 13.3.9)

Bulon malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, F_{ub} (*Yönetmelik* Tablo 2.2)

$$F_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$$

Bulonun karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, F_{nv} (*Yönetmelik* 13.3.4(a) ve Tablo 13.7)

$$F_{nv} = 0.450 F_{ub} = 0.450(800) = 360.0 \text{ N/mm}^2$$

Bir bulonun karakteristik kesme kuvveti dayanımı, R_{nv}

$$A_b = \frac{\pi(20)^2}{4} = 314.16 \text{ mm}^2$$

$$R_{nv} = F_{nv} n_{sp} A_b \qquad (13.10b)$$

$$R_{nv} = (360)(1)(314.16)10^{-3} = 113.10 \text{ kN}$$

Bulon delik çevresi için ezilme sınır durumu (*Yönetmelik* 13.3.13)

Ezilme dayanımı için bulon delik çapı, d_h (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

$$d_h = 20 + 2.0 = 22 \text{ mm}$$

Ezilme etkisi altındaki etkin kalınlık, t

$t = 12$ mm (12 mm < 14 mm)

Bir bulon deliğinin karakteristik ezilme kuvveti dayanımı, R_n (*Yönetmelik* Tablo 13.3.13)

Her bir kenar bulon deliği için

$$l_{c,1} = l_{e,1} - 0.5 d_h = 35 - 0.5(22) = 24 \text{ mm}$$

$$R_n = 1.2 l_c t F_u \le 2.4 d t F_u \qquad (13.14a)$$

$$R_{ne,1} = 1.2 l_{c,1} t F_u$$

$$R_{ne,1} = 1.2(24)(12)(360)10^{-3} = 124.42 \text{ kN}$$

$$R_{ne,1} = 124.42 \text{ kN} \le 2.4(20)(12)(360)10^{-3} = 207.36 \text{ kN}$$

$$l_{c,2} = l_{e,2} - 0.5 d_h = (35 + 50) - 0.5(22) = 74 \text{ mm}$$

$$R_{ne,2} = 1.2 l_{c,2} t F_u$$

$$R_{ne,2} = 1.2(74)(12)(360)10^{-3} = 383.62 \text{ kN}$$

$$R_{ne,2} = 383.62 \text{ kN} > 2.4(20)(12)(360)10^{-3} = 207.36 \text{ kN}$$

$$R_{ne,2} = 207.36 \text{ kN}$$

Diğer her bir bulon deliği için

$$l_c = s - d_h = 100 - 22 = 78 \text{ mm}$$

$$R_{ni} = 1.2 l_c t F_u$$

$$R_{ni} = 1.2(78)(12)(360)10^{-3} = 404.35 \text{ kN}$$

$$R_{ni} = 404.35 \text{ kN} > 2.4(20)(12)(360)10^{-3} = 207.36 \text{ kN}$$

$$R_{ni} = 207.36 \text{ kN}$$

Yönetmelik 13.3.9 uyarınca, ezilme etkili birleşimin bir bulonunun karakteristik dayanımı, kayma etkisinde bulon gövdesi kırılma sınır durumu için hesaplanan karakteristik kesme kuvveti dayanımı ile bulon deliği ezilme sınır durumu için hesaplanan karakteristik ezilme kuvveti dayanımlarının küçüğü olarak alınacaktır. Buna göre,

Kenar bulonlar ve kenar bulon delikleri için

$$R_{nb} = \min\left(R_{nv}; R_{ne,1}; R_{ne,2}\right)$$

$$R_{nb} = \min\left(113.10\ \text{kN}; 124.42\ \text{kN}; 207.36\ \text{kN}\right) = 113.10\ \text{kN}$$

Diğer bulonlar ve bulon delikleri için

$$R_{nb} = \min\left(R_{nv}; R_{ni}\right)$$

$$R_{nb} = \min\left(113.10\ \text{kN}; 207.36\ \text{kN}\right) = 113.10\ \text{kN}$$

Ezilme etkili birleşimin dayanımı, R_n

Tüm bulonların karakteristik dayanımını kayma etkisinde bulon gövdesi kırılma sınır durumu belirlediğinden, toplam bulon sayısı, $n = 5$ olmak üzere, birleşimin karakteristik dayanımı,

$$R_n = nR_{nb}$$

$$R_n = 5\left(113.10\right)$$

$$R_n = 565.50\ \text{kN}$$

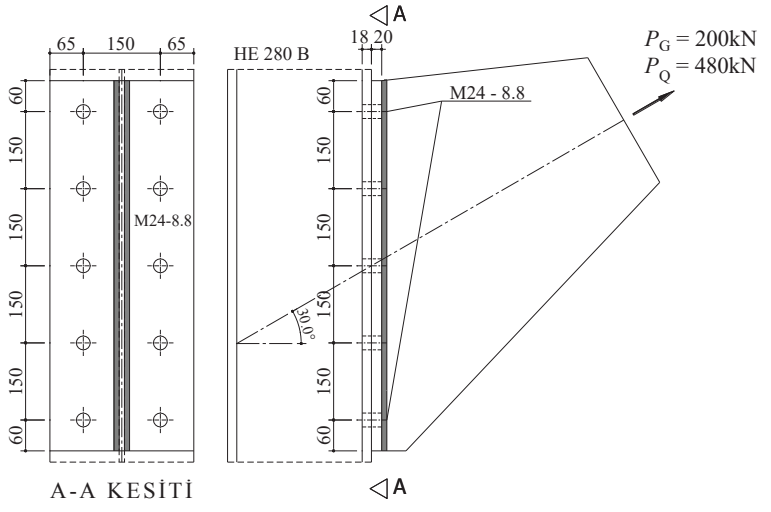
YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2\left(80\right) + 1.6\left(200\right) = 416\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 80 + 200 = 280\ \text{kN}$
b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.75\left(565.50\right) = 424.12\,\text{kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 565.50/2.0 = 282.75\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{416}{424.12} = 0.98 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{280}{282.75} = 0.98 \le 1.0$ ✓

Örnek 13. 7

Aşağıdaki şekilde detayı verilen ezilme etkili bulonlu birleşim, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 200kN ve P_Q = 480kN eğik merkezi kuvvetlerin etkisindedir. Kolon (HE 280 B) başlığına birleşen levhanın şekildeğiştirmesi nedeniyle meydana gelen bulon boyuna eksenine paralel ilave kaldırma kuvvetinin oluşmadığı varsayılacaktır.

a. Bulon grubunun tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bulon grubunun güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Birleşen elemanların kalınlıkları

$t_f = 18.0$ mm $t = 20.0$ mm

Bulonlar (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

M24 – 8.8 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır ve diş açılmış bulon gövdesi bölümünün kayma düzlemi içinde olduğu varsayılacaktır)

Çözüm

Eğik ve merkezi olarak etkiyen çekme kuvveti nedeniyle bulonlar, çekme ve kesme kuvvetinin ortak etkisi altındadır. Bu nedenle bulonlar, *Yönetmelik* 13.3.10 esas alınarak bu iki kuvvetin ortak etkisi altında değerlendirilmelidir.

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(200) + 1.6(480) = 1008$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 200 + 480 = 680$ kN
Merkezi olarak etkiyen gerekli çekme kuvvetinin yatay (H) ve düşey (V) bileşenleri	
$H_u = (1008)(\cos 30°) = 872.95$ kN $V_u = (1008)(\sin 30°) = 504.00$ kN	$H_a = (680)(\cos 30°) = 588.90$ kN $V_a = (680)(\sin 30°) = 340.00$ kN

Bir bulonun karakteristik kesme kuvveti dayanımı, R_{nv} (*Yönetmelik* 13.3.9)

$$A_b = \frac{\pi(24)^2}{4} = 452.39 \text{ mm}^2 \qquad n = 5 \text{ (bulon sayısı)}$$

$$R_{nv} = F_{nv} n_{sp} A_b \qquad (13.10b)$$

$$R_{nv} = (0.450 \times 800)(1)(452.39)10^{-3} = 162.86 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Bir bulona etkiyen kuvvetin yatay (H_1) ve düşey (V_1) bileşenleri	
$H_{u1} = 872.95/10 = 87.30$ kN $V_{u1} = 504.00/10 = 50.40$ kN	$H_{a1} = 588.90/10 = 58.89$ kN $V_{a1} = 340.00/10 = 34.00$ kN
Bir bulonun tasarım kesme kuvveti dayanımı (13.3.9)	Bir bulonun güvenli kesme kuvveti dayanımı (13.3.9)
$R_d = \phi R_{nv} = 0.75(162.86) = 122.15$ kN	$R_g = R_{nv}/\Omega = 162.86/2.00 = 81.43$ kN
Çekme ve kesme kuvveti bileşenlerinin etkileşimi	
$V_{u1}/R_d = 50.40/122.15 = 0.41 > 0.30$ olduğundan	$V_{a1}/R_g = 34.00/81.43 = 0.42 > 0.30$ olduğundan
Yönetmelik 13.3.10 esasları çerçevesinde çekme ve kesme kuvveti etkileşimi gözönüne alınmalıdır.	
$F'_{nt} = 1.3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} f_{rv} \le F_{nt}$ $F_{nt} = 0.75(800) = 600$ N/mm^2 (13.3.4) $F_{nv} = 0.45(800) = 360$ N/mm^2 $f_{rv} = (50.40 \times 10^3)/452.39 = 111.41$ N/mm^2 $f_{rv} \le 0.75(360) = 270$ N/mm^2 ✓	$F'_{nt} = 1.3F_{nt} - \frac{\Omega F_{nt}}{F_{nv}} f_{rv} \le F_{nt}$ $F_{nt} = 0.75(800) = 600$ N/mm^2 (13.3.4) $F_{nv} = 0.45(800) = 360$ N/mm^2 $f_{rv} = (34.00 \times 10^3)/452.39 = 75.16$ N/mm^2 $f_{rv} \le 360/2.00 = 180$ N/mm^2 ✓
$F'_{nt} = 1.3(600) - \frac{(600)}{0.75(360)}(111.41)$ $F'_{nt} = 532.42$ N/mm$^2 \le 600$ N/mm^2	$F'_{nt} = 1.3(600) - \frac{2.00(600)}{(360)}(75.16)$ $F'_{nt} = 529.47$ N/mm$^2 \le 600$ N/mm^2

YDKT	GKT
Bulon grubunun karakteristik çekme kuvveti dayanımı, R_n	
$R_n = nF'_{nt}A_b$ $R_n = (10)(532.42)(452.39)10^{-3}$ $R_n = 2408.61\,\text{kN}$	$R_n = nF'_{nt}A_b$ $R_n = (10)(529.47)(452.39)10^{-3}$ $R_n = 2395.27\,\text{kN}$
a. Bulon grubunun tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Bulon grubunun güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.75(2408.61) = 1806.46\,\text{kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 2395.27/2.00 = 1197.64\,\text{kN}$
$\frac{H_u}{R_d} = \frac{872.95}{1806.46} = 0.48 \le 1.0$ ✓	$\frac{H_a}{R_g} = \frac{588.90}{1197.64} = 0.49 \le 1.0$ ✓

Birleşen parçaların ezilme dayanımı kontrolü sadece kesme kuvveti (düşey bileşen) dikkate alınarak Örnek 13.6 da açıklandığı şekilde yapılabilir.

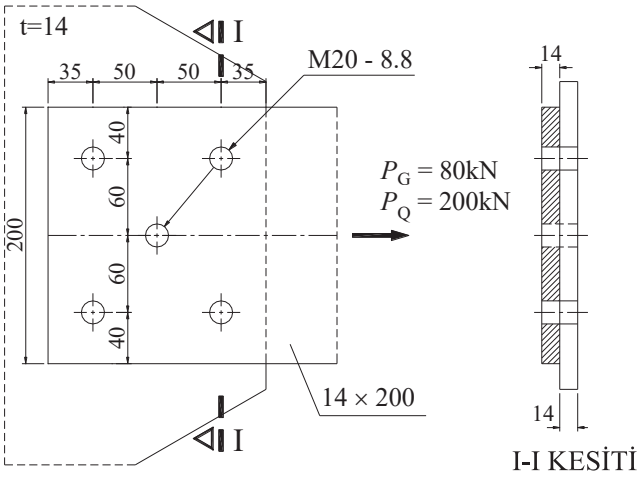
Örnek 13. 8

Aşağıdaki şekilde sürtünme etkili bulonlu birleşim detayı verilen Levha 14×200 enkesit boyutlarına sahip çekme elemanı, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 80kN ve P_Q = 200kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir. Besleme levhası kullanılmayacaktır.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 14×200	
t = 14.0 mm	b = 200 mm

Bulonlar (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

M20 – 8.8 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır ve diş açılmış bulon gövdesi bölümünün kayma düzlemi içinde olduğu varsayılacaktır)

Sürtünme katsayısı

B sürtünme yüzeyi sınıfı (*Yönetmelik* Tablo 13.11)

$\mu = 0.40$

Minimum öngerme kuvveti

T_b = 137 kN (*Yönetmelik* Tablo 13.6)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Bir bulon için sürtünme etkili karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.3.11)

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \qquad (13.12)$$

$D_u = 1.0$

$h_f = 1.0$ (Besleme levhası kullanılmadığı durum, *Yönetmelik* 13.3.11(a))

$R_n = (0.40)(1.0)(1.0)(137)(1)$

$R_n = 54.80 \text{ kN}$

Bulon grubunun karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n

$R_n = (5)(54.80) = 274.0 \text{ kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(80) + 1.6(200) = 416 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 80 + 200 = 280 \text{ kN}$
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 1.00(274.0) = 274.00 \text{ kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 274.00/1.50 = 182.67 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{416}{274.00} = 1.52 > 1.0$ ✗	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{280}{182.67} = 1.53 > 1.0$ ✗

Yönetmelik 13.3.13 uyarınca, bulon gövdesinin kesme kırılması ile bulon deliği çevresinin ezilme sınır durumları da Örnek 13.6 da açıklandığı şekilde ayrıca dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

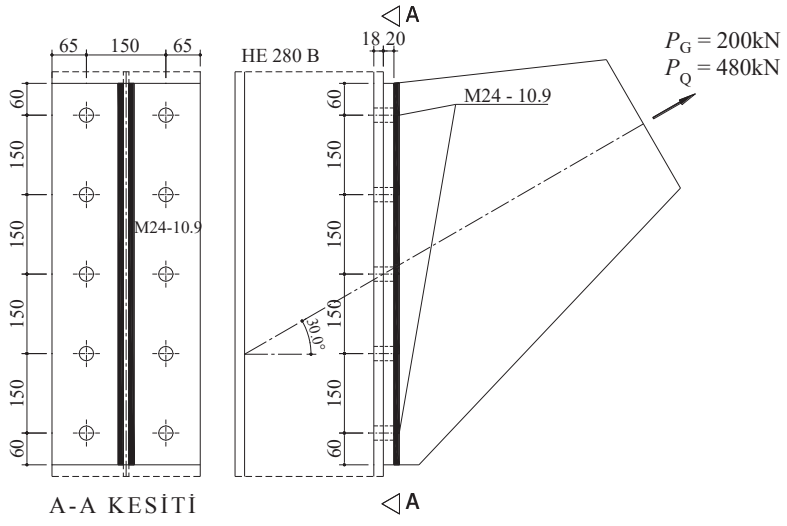
Örnek 13. 9

Aşağıdaki şekilde detayı verilen sürtünme etkili bulonlu birleşim, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 200kN ve P_Q = 450kN eğik merkezi kuvvetlerin etkisindedir. Birleşen elemanların, yük aktarımını güvenli bir şekilde sağladığı varsayılacaktır. Kolon (HE 280 B) başlığına birleşen levhanın şekildeğiştirmesi nedeniyle meydana gelen bulon boyuna eksenine paralel ilave kaldırma kuvvetinin oluşmadığı varsayılacaktır.

a. Birleşimin karakteristik kayma dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım kayma dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli kayma dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Birleşen elemanların kalınlıkları

$t_f = 18.0$ mm $t = 20.0$ mm

Bulonlar (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

M24 – 10.9 (Standart dairesel delik çapı kullanılacaktır ve diş açılmış bulon gövdesi bölümünün kayma düzlemi içinde olduğu varsayılacaktır)

Sürtünme katsayısı

B sürtünme yüzeyi sınıfı (*Yönetmelik* Tablo 13.11)

$\mu = 0.40$

Minimum öngerme kuvveti

$T_b = 247$ kN (*Yönetmelik* Tablo 13.6)

Çözüm

Eğik ve merkezi olarak etkiyen çekme kuvveti nedeniyle bulonlar, çekme ve kesme kuvvetinin ortak etkisi altındadır. Bu nedenle bulonlar, *Yönetmelik* 13.3.12 esas alınarak bu iki kuvvetin ortak etkisi altında değerlendirilmelidir.

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(200) + 1.6(450) = 960$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 200 + 450 = 650$ kN
Merkezi olarak etkiyen gerekli çekme kuvvetinin yatay (H) ve düşey (V) bileşenleri	
$H_u = (960)(\cos 30°) = 831.38$ kN $V_u = (960)(\cos 30°) = 480.00$ kN	$H_a = (650)(\cos 30°) = 562.92$ kN $V_a = (650)(\cos 30°) = 325.00$ kN

Bir bulon için sürtünme etkili karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.3.11)

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \qquad (13.12)$$

$D_u = 1.0$

$h_f = 1.0$ (Besleme levhası kullanılmadığı durum, *Yönetmelik* 13.3.11(a))

$R_n = (0.40)(1.0)(1.0)(247)(1)$

$R_n = R_{nv} = 98.80$ kN

YDKT	GKT
a. Birleşimin karakteristik kayma dayanımının belirlenmesi	
$k_{sc} = 1 - \dfrac{T_u}{D_u T_b n_b}$ (13.13) $k_{sc} = 1 - \dfrac{(831.38)}{(1.0)(247)(10)} = 0.663$ $R_{nv} k_{sc} n = 1.00(98.80)(0.663)(10)$ $= 655.04$ kN	$k_{sc} = 1 - \dfrac{1.5T_a}{D_u T_b n_b}$ (13.13) $k_{sc} = 1 - \dfrac{1.5(562.92)}{(1.0)(247)(10)} = 0.658$ $R_{nv} k_{sc} n = 1.00(98.80)(0.658)(10)$ $= 650.10$ kN
b. Birleşimin tasarım kayma dayanımının kontrolü (*Yönetmelik* 13.3.11)	**c.** Birleşimin güvenli kayma dayanımının kontrolü (*Yönetmelik* 13.3.11)
$R_d = \phi R_{nv} k_{sc} n = 1.00(655.04)$ $R_d = 655.04$ kN $\dfrac{V_u}{R_d} = \dfrac{480.00}{655.04} = 0.73 \le 1.0$ ✓	$R_g = \dfrac{R_{nv} k_{sc} n}{\Omega} = \dfrac{(650.10)}{1.50}$ $R_g = 433.40$ kN $\dfrac{V_a}{R_g} = \dfrac{325.00}{433.40} = 0.75 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 13.3.13 uyarınca, bulon gövdesinin kesme kırılması ile bulon deliği çevresinin ezilme sınır durumları da Örnek 13.6 da açıklandığı şekilde ayrıca dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

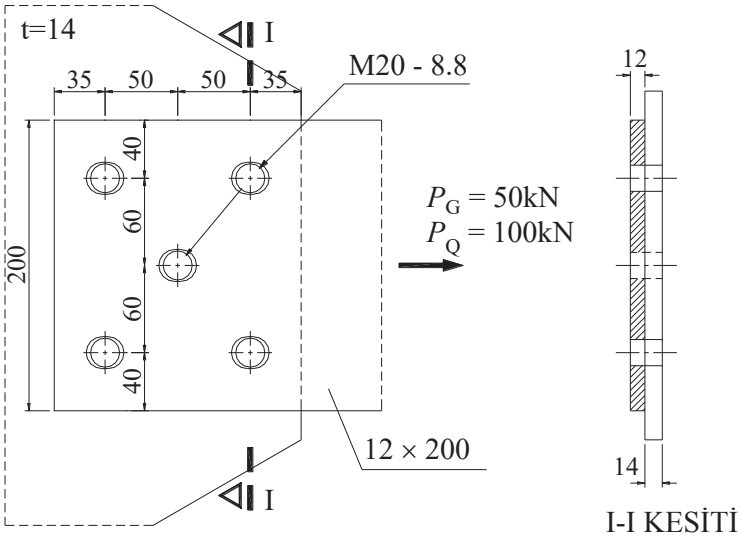
Örnek 13. 10

Aşağıdaki şekilde, kısa oval deliklerin kullanıldığı sürtünme etkili bulonlu birleşim detayı verilen Levha 12×200 enkesit boyutlarına sahip çekme elemanı, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 50kN ve P_Q = 100kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir. Besleme levhası kullanılmayacaktır.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 12×200
t = 12.0 mm b = 200 mm

Bulonlar (Tablo 13.8)

M20 – 8.8 (Kısa oval delik kullanılacaktır ve diş açılmış bulon gövdesi bölümünün kayma düzlemi içinde olduğu varsayılacaktır)

Sürtünme katsayısı

B sürtünme yüzeyi sınıfı (*Yönetmelik* Tablo 13.11)

μ = 0.40

Minimum öngerme kuvveti

T_b = 137 kN (*Yönetmelik* Tablo 13.6)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Bir bulon için sürtünme etkili karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.3.11)

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \qquad (13.12)$$

$D_u = 1.0$

$h_f = 1.0$ (Besleme levhası kullanılmadığı durum,

$R_n = (0.40)(1.0)(1.0)(137)(1)$

$R_n = 54.80\ \text{kN}$

Bulon grubunun karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n

$R_n = (5)(54.80) = 274.0\ \text{kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(50) + 1.6(100) = 220\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 50 + 100 = 150\ \text{kN}$
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.85(274.0) = 232.90\ \text{kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 274.00/1.76 = 155.68\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{220}{232.90} = 0.94 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{150}{155.68} = 0.96 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 13.3.13 uyarınca, bulon gövdesinin kesme kırılması ile bulon deliği çevresinin ezilme sınır durumları da Örnek 13.6 da açıklandığı şekilde ayrıca dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

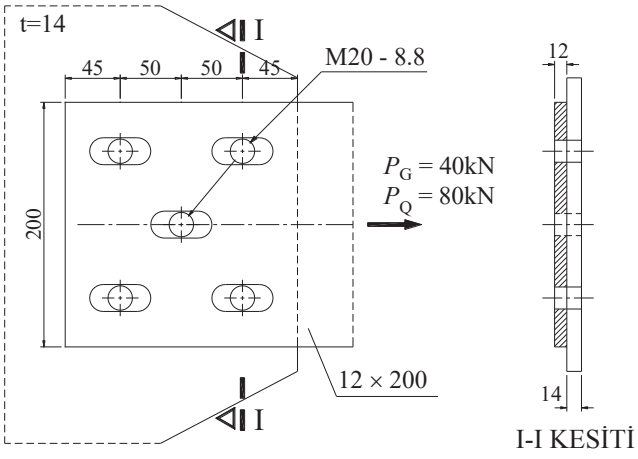
Örnek 13. 11

Aşağıdaki şekilde, uzun oval deliklerin kullanıldığı sürtünme etkili bulonlu birleşim detayı verilen Levha 12×200 enkesit boyutlarına sahip çekme elemanı, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 40kN ve P_Q = 80kN eksenel çekme kuvveti etkisindedir. Besleme levhası kullanılmayacaktır.

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 235 F_y = 235 N/mm^2 F_u = 360 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Levha 12×200
t = 12.0 mm b = 200 mm

Bulonlar (*Yönetmelik* Tablo 13.8)

M20 – 8.8 (Uzun oval delik kullanılacaktır ve diş açılmış bulon gövdesi bölümünün kayma düzlemi içinde olduğu varsayılacaktır)

Sürtünme katsayısı

B sürtünme yüzeyi sınıfı (*Yönetmelik* Tablo 13.11)

μ = 0.40

Minimum öngerme kuvveti

T_b = 137 kN (*Yönetmelik* Tablo 13.6)

Çözüm

a. Birleşimin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Bir bulon için sürtünme etkili karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.3.11)

$$R_n = \mu D_u h_f T_b n_s \qquad (13.12)$$

$D_u = 1.0$

$h_f = 1.0$ (Besleme levhası kullanılmadığı durum,

$R_n = (0.40)(1.0)(1.0)(137)(1)$

$R_n = 54.80 \text{ kN}$

Bulon grubunun karakteristik kayma kuvveti dayanımı, R_n

$R_n = (5)(54.80) = 274.0 \text{ kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(40) + 1.6(80) = 176 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 40 + 80 = 120 \text{ kN}$
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.70(274.0) = 191.80 \text{ kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 274.00/2.14 = 128.04 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{176}{191.80} = 0.92 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{120}{128.04} = 0.94 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik 13.3.13 uyarınca, bulon gövdesinin kesme kırılması ile bulon deliği çevresinin ezilme sınır durumları da Örnek 13.6 da açıklandığı şekilde ayrıca dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

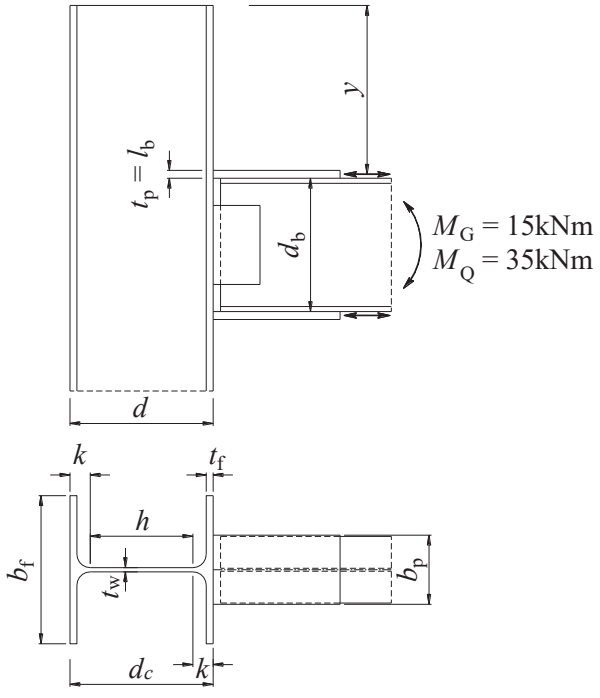
Örnek 13. 12

Aşağıdaki şekilde verilen moment aktaran tipik kiriş-kolon birleşimi, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, M_G = 15kNm ve M_Q = 35kNm eğilme momenti etkisindedir. Eğilme momentinin çekme kuvveti bileşeni etkisindeki kolon başlığı bölümünde yerel eğilme sınır durumunu esas alarak kolon başlığının

a. karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kolon (HE 300 A)			
d_c = 290 mm	b_f = 300 mm	h = 208 mm	t_f = 14 mm
t_w = 8.5 mm	$k = (d - h) / 2$ = 41 mm		y = 340 mm

Kiriş (IPE 270)
d_b = 270 mm

Başlık levhası (Levha 16×140)	
$t_p = l_b$ = 16.0 mm	b_p = 140 mm

Çözüm

a. Kolon başlığının karakteristik dayanımının belirlenmesi

Kolon başlığının karakteristik dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.9.1)

$y = 340 \text{ mm} > 10t_f = 10(14) = 140 \text{ mm}$

$b_p = 140 \text{ mm} > 0.15b_f = 0.15(300) = 45 \text{ mm}$ olduğundan *Yönetmelik* Denk.(13.24) kontrol edilmelidir.

$$R_n = 6.25F_{yf}t_f^2 \qquad (13.24)$$

$R_n = 6.25(275)(14)^2 10^{-3} = 336.88 \text{ kN}$

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $= 1.2(15) + 1.6(35) = 74 \text{ kNm}$ $P_u = M_u/d_b = 74/0.270 = 274.07 \text{ kN}$	$M_a = M_G + M_Q$ $= 15 + 35 = 50 \text{ kNm}$ $P_a = M_a/d_b = 50/0.270 = 185.19 \text{ kN}$
b. Kolon başlığının tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Kolon başlığının güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.90(336.88) = 303.19 \text{ kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 336.88/1.67 = 201.72 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{274.07}{303.19} = 0.90 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{185.19}{201.72} = 0.92 \le 1.0$ ✓

Örnek 13.13

Örnek 13.12 de verilen moment aktaran tipik kiriş-kolon birleşimi, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, M_G = 15kNm ve M_Q = 35kNm eğilme momenti etkisindedir. Eğilme momentinin her iki kuvvet bileşeni (çekme ve basınç kuvvetleri) etkisindeki kolon başlığı bölümlerinde yerel akma sınır durumunu esas alarak kolon gövdesinin

a. karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. güvenli dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kolon (HE 300 A)		
$d_c = 290$ mm	$b_f = 300$ mm	$h = 208$ mm
$t_f = 14$ mm	$t_w = 8.5$ mm	$k = (d - h) / 2 = 41$ mm

Kiriş (IPE 270)
$d_b = 270$ mm

Başlık levhası (Levha 16×140)	
$t_p = l_b = 16.0$ mm	$b_p = 140$ mm

Çözüm

a. Kolon gövdesinin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Kolon gövdesinin karakteristik dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.9.2)

$$y = 340 \text{ mm} > d_c = 290 \text{ mm} \quad (13.9.2(a))$$

$$R_n = F_{yw} t_w \left(5k + l_b\right) \qquad (13.25a)$$

$$R_n = (275)(8.5)(5 \times 41 + 16)10^{-3} = 516.59 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $= 1.2(15) + 1.6(35) = 74$ kNm $P_u = M_u / d_b = 74/0.270 = 274.07$ kN	$M_a = M_G + M_Q$ $= 15 + 35 = 50$ kNm $P_a = M_a / d_b = 50/0.270 = 185.19$ kN
b. Kolon gövdesinin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Kolon gövdesinin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 1.00(516.59) = 516.59$ kN	$R_g = R_n / \Omega = 516.59/1.50 = 344.39$ kN
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{274.07}{516.59} = 0.53 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{185.19}{344.39} = 0.54 \le 1.0$ ✓

Örnek 13.14

Örnek 13.12 de verilen moment aktaran tipik kiriş-kolon birleşimi, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, M_G = 15kNm ve M_Q = 35kNm eğilme momenti etkisindedir. Eğilme momentinin basınç kuvveti bileşeni etkisindeki kolon başlığı bölümünde yerel buruşma sınır durumunu esas alarak kolon gövdesinin

a. karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. güvenli dayanımının kontrolü (GKT)

Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kolon (HE 300 A)		
$d_c = 290$ mm	$b_f = 300$ mm	$h = 208$ mm
$t_f = 14$ mm	$t_w = 8.5$ mm	$k = (d - h) / 2 = 41$ mm

Kiriş (IPE 270)
$d_b = 270$ mm

Başlık levhası (Levha 16×140)	
$t_p = l_b = 16.0$ mm	$b_p = 140$ mm

Çözüm

a. Kolon gövdesinin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Kolon gövdesinin karakteristik dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.9.3)

$y = 340 \text{ mm} > d_c/2 = 145 \text{ mm}$ (*Yönetmelik* 13.9.3(a))

$$R_n = 0.80 t_w^2 \left[1 + 3\left(\frac{l_b}{d}\right)\left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5}\right]\sqrt{\frac{EF_{yw}t_f}{t_w}}Q_f \qquad (13.26a)$$

$$R_n = 0.80(8.5)^2 \left[1 + 3\left(\frac{16}{290}\right)\left(\frac{8.5}{14}\right)^{1.5}\right]\sqrt{\frac{(200000)(275)(14)}{(8.5)}}(1.0)10^{-3}$$

$R_n = 593.20$ kN

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $= 1.2(15) + 1.6(35) = 74$ kNm $P_u = M_u / d_b = 74/0.270 = 274.07$ kN	$M_a = M_G + M_Q$ $= 15 + 35 = 50$ kNm $P_a = M_a / d_b = 50/0.270 = 185.19$ kN
b. Kolon gövdesinin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Kolon gövdesinin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.75(593.20) = 444.90$ kN	$R_g = R_n / \Omega = 593.20/2.00 = 296.60$ kN
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{274.07}{444.90} = 0.62 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{185.19}{296.60} = 0.62 \le 1.0$ ✓

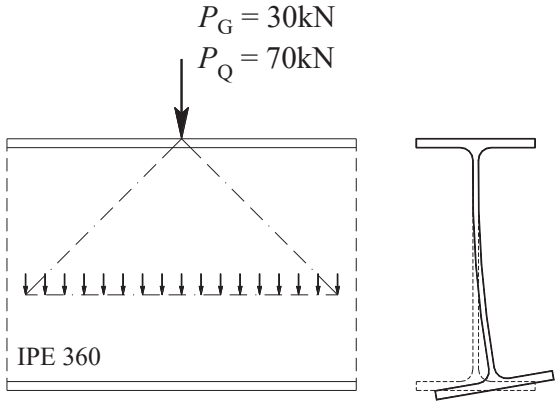
Örnek 13.15

Aşağıdaki şekilde, yükleme detayı ve yanal ötelenerek burkulma durumu verilen 6.0m açıklıklı basit kiriş, sabit ve hareketli yükler altında açıklık ortasında bulunan, sırasıyla, P_G = 30kN ve P_Q = 70kN tekil kuvvetlerin etkisindedir. Kiriş üst başlığının, uçlarda ve kiriş ortasında dönmeye ve yanal ötelenmeye karşı desteklendiği, ayrıca kuvvetin etkime noktasında, $M_u < M_y$ (YDKT) veya $1.5M_a < M_y$ (GKT) koşulunun sağlandığı varsayılacaktır. Kiriş gövdesinin yanal ötelenerek burkulma sınır durumu esas alınarak kiriş gövdesinin

a. karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kiriş (IPE 360)				
$d = 360$ mm	$b_f = 170$ mm	$h = 298.6$ mm	$t_f = 12.7$ mm	$t_w = 8.0$ mm

Çözüm

a. Kiriş gövdesinin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Basınç başlığının dönmesinin önlendiği durum için (*Yönetmelik* 13.9.4(a))

$$\frac{h/t_w}{L_b/b_f} \le 2.3 \quad (\textit{Yönetmelik}\ 13.9.4(a)(1))$$

$$\frac{(298.6)/(8.0)}{(6000)/(170)} = 1.06 \le 2.3 \checkmark \text{ olduğundan}$$

$$R_n = \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2}\left[1 + 0.4\left(\frac{h/t_w}{L_b/b_f}\right)^3\right] \qquad (13.27a)$$

$$C_r = 6.62 \times 10 \text{ MPa}$$

$$R_n = \frac{\left(6.62\times10^6\right)\left(8.0\right)^3\left(12.7\right)}{\left(298.6\right)^2}\left[1+0.4\left(\frac{\left(298.6\right)/\left(8.0\right)}{\left(6000\right)/\left(170\right)}\right)^3\right]10^{-3}$$

$R_n = 711.19\ \text{kN}$

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2\left(30\right)+1.6\left(70\right) = 148\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 30 + 70 = 100\ \text{kN}$
b. Kiriş gövdesinin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Kiriş gövdesinin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.85\left(711.19\right) = 604.51\ \text{kN}$	$R_g = R_n/\Omega = 711.19/1.76 = 404.09\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{148}{604.51} = 0.24 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{100}{404.09} = 0.25 \le 1.0$ ✓

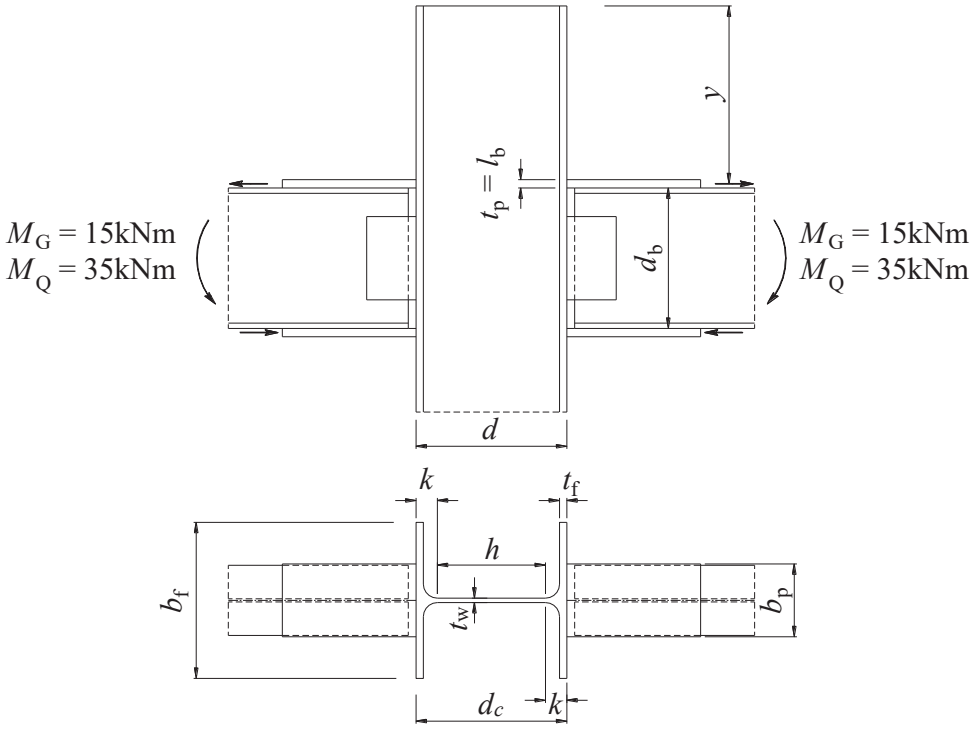
Örnek 13.16

Aşağıdaki şekilde verilen moment aktaran tipik kiriş-kolon birleşimi, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, M_G = 15kNm ve M_Q = 35kNm eğilme momenti etkisindedir. Eğilme momentinin basınç kuvveti bileşeni etkisindeki kolon başlığı bölümünde yerel burkulma sınır durumunu esas alarak kolon gövdesinin

a. karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kolon (HE 300 A)		
d_c = 290 mm	b_f = 300 mm	h = 208 mm
t_f = 14 mm	t_w = 8.5 mm	$k = (d - h) / 2$ = 41 mm

Kiriş (IPE 270)
d_b = 270 mm

Başlık levhası (Levha 16×140)	
$t_p = l_b$ = 16.0 mm	b_p = 140 mm

Çözüm

a. Kolon gövdesinin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Kolon gövdesinin karakteristik dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.9.5)

$$y = 340 \text{ mm} > d_c/2 = 145 \text{ mm}$$

$$R_n = \frac{24t_w^3\sqrt{EF_{yw}}}{h}Q_f \qquad (13.28)$$

$$R_n = \frac{24(8.5)^3\sqrt{(200000)(275)}}{(208)}(1.0)10^{-3}$$

$$R_n = 525.52 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $= 1.2(15) + 1.6(35) = 74$ kNm $P_u = M_u/d_b = 74/0.270 = 274.07$ kN	$M_a = M_G + M_Q$ $= 15 + 35 = 50$ kNm $P_a = M_a/d_b = 50/0.270 = 185.19$ kN
b. Kolon gövdesinin tasarım dayanımının kontrolü	**c.** Kolon gövdesinin güvenli dayanımının kontrolü
$R_d = \phi R_n = 0.90(525.52) = 472.97$ kN	$R_g = R_n/\Omega = 525.52/1.67 = 314.68$ kN
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{274.07}{472.97} = 0.58 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{185.19}{314.68} = 0.59 \le 1.0$ ✓

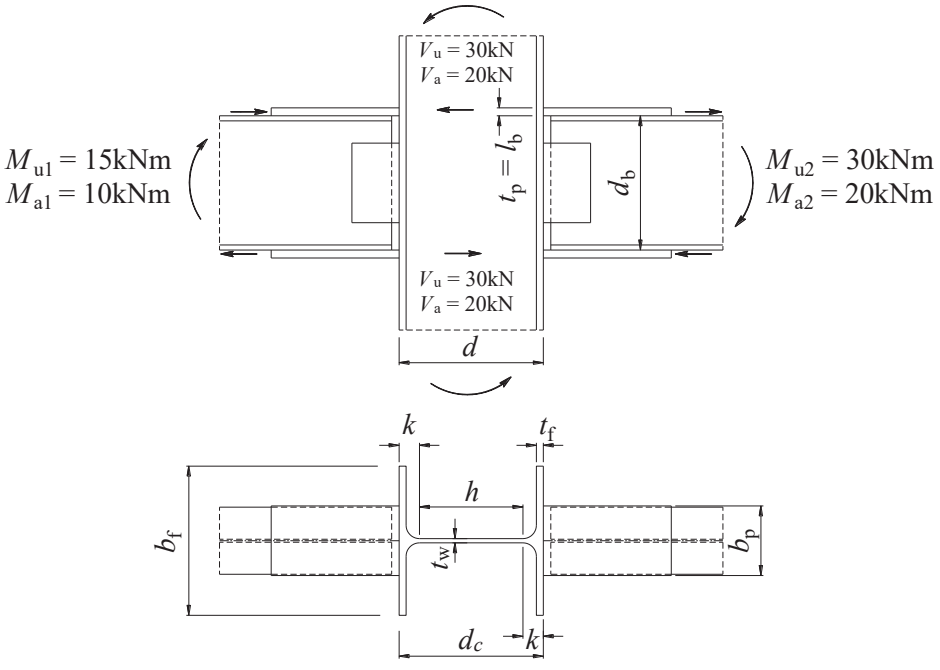
Örnek 13.17

Aşağıdaki şekilde verilen moment aktaran tipik kiriş-kolon birleşimi, kiriş uçlarındaki M_{u1} = 15kNm, M_{u2} = 30kNm veya M_{a1} = 10kNm, M_{a2} = 20kNm eğilme momentleri ile panel bölgesinin alt ve üst sınırlarındaki V_u = 30kN veya V_a = 20kN kolon kesme kuvvetleri etkisindedir. Kolon panel bölgesinde akma sınır durumunu esas alarak kolon gövdesinin

a. karakteristik dayanımının belirlenmesi

b. tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

c. güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

Kolon (HE 300 A)				
d_c = 290 mm	b_f = 300 mm	h = 208 mm	t_f = 14 mm	t_w = 8.5 mm

Kiriş (IPE 270)
d_b = 270 mm

Başlık levhası (Levha 16×140)	
$t_p = l_b$ = 16.0 mm	b_p = 140 mm

Çözüm

a. Kolon gövdesinin karakteristik dayanımının belirlenmesi

Panel bölgesinin plastik şekildeğiştirme durumunun çerçeve stabilite analizine etkisinin gözönüne alınmadığı varsayılacaktır. (*Yönetmelik* 13.9.6(a))

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$P_u = \frac{M_{u1} + M_{u2}}{d_b} - V_u$ $P_u = \frac{15+30}{0.270} - 30 = 136.67 \text{ kN}$	$P_a = \frac{M_{a1} + M_{a2}}{d_b} - V_a$ $P_a = \frac{10+20}{0.270} - 20 = 91.11 \text{ kN}$
Kolon gövdesinin karakteristik dayanımı, R_n (*Yönetmelik* 13.9.6)	
$\alpha = 1.0$ $\alpha P_r \le 0.4 P_y$ için	$\alpha = 1.6$ $\alpha P_r \le 0.4 P_y$ için
$R_n = 0.60 F_y d_c t_w$ (13.29a) $R_n = 0.60(275)(290)(8.5)10^{-3} = 406.73 \text{ kN}$	
b. Kolon gövdesinin tasarım dayanımının kontrolü (13.9.6)	**c.** Kolon gövdesinin güvenli dayanımının kontrolü (13.9.6)
$R_d = \phi R_n = 0.90(406.73) = 366.06 \text{ kN}$	$R_g = R_n / \Omega = 406.73/1.67 = 243.55 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{R_d} = \frac{136.67}{366.06} = 0.37 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{R_g} = \frac{91.11}{243.55} = 0.37 \le 1.0$ ✓

Örnek 13.18

Aşağıdaki şekilde verilen kolon taban levhasının beton elemana basit birleşimi, sabit ve hareketli yükler altında, sırasıyla, P_G = 500kN ve P_Q = 1200kN merkezi basınç kuvveti etkisindedir. Betonun ezilme sınır durumunu esas alarak

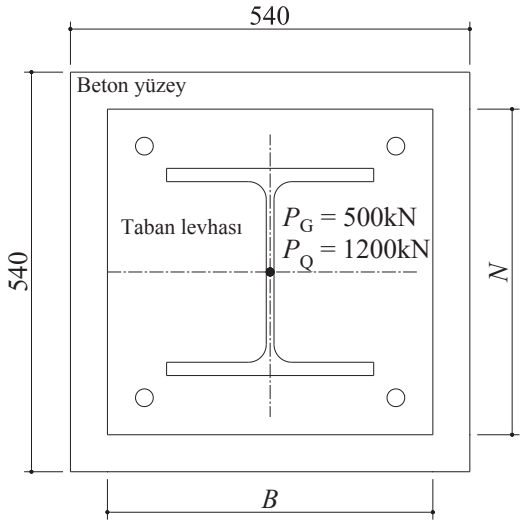
a. taban levhasının plandaki boyutlarının belirlenmesi

b. karakteristik ezilme dayanımının belirlenmesi

c. tasarım ezilme dayanımının kontrolü (YDKT)

d. güvenli ezilme dayanımının kontrolü (GKT)

e. gerekli taban levhası kalınlığının belirlenmesi



Çelik sınıfı

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Beton sınıfı

C25 $f_{ck} = 25$ N/mm^2 (TS 500)

Enkesit

Kolon (HE 280 B)			
$d = 280$ mm	$b_f = 280$ mm	$t_f = 18$ mm	$t_w = 10.5$ mm

Çözüm

a. Taban levhasının plandaki boyutlarının belirlenmesi

YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(500) + 1.6(1200) = 2520$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 500 + 1200 = 1700$ kN
$P_p = P_u$ alınarak $A_{1,g} = \dfrac{P_u}{\phi 0.85 f_{ck}}$ $A_{1,g} = \dfrac{(2520)10^3}{(0.65)0.85(25)} = 182443.44$ mm^2	$P_p = P_a$ alınarak $A_{1,g} = \dfrac{\Omega P_a}{0.85 f_{ck}}$ $A_{1,g} = \dfrac{(2.31)(1700)10^3}{0.85(25)} = 184800$ mm^2
Ankraj çubuğu yerleşiminin yukarıdaki şekilde verildiği gibi yapılabilmesi için taban levhasının plandaki boyutları $N \geq d + 2(80 \text{ mm})$ $B \geq b_f + 2(80 \text{ mm})$ şeklinde hesaplanarak öngörülebilir. $N \geq (280) + 2(80 \text{ mm}) = 440$ mm $B \geq (280) + 2(80 \text{ mm}) = 440$ mm $A_1 = BN = (440)(440) = 193600 \text{ mm}^2 \geq 184800 \text{ mm}^2$ ✓ Yukarıdaki basit kolon ayağı detayına göre beton yüzey alanı taban levhası alanından büyüktür. Bu durumda beton yüzey alanı, A_2, $A_2 = (540)(540) = 291600 \text{ mm}^2$	

b. Betonun karakteristik ezilme dayanımının belirlenmesi

$$P_p = 0.85 f_{ck} A_1 \sqrt{A_2 / A_1} \leq 1.7 f_{ck} A_1 \qquad (13.23)$$

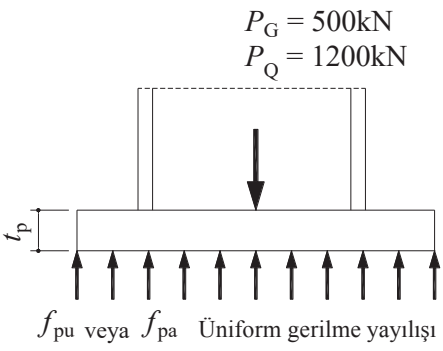
$$P_p = 0.85(25)(193600)\sqrt{(291600)/(193600)}10^{-3}$$

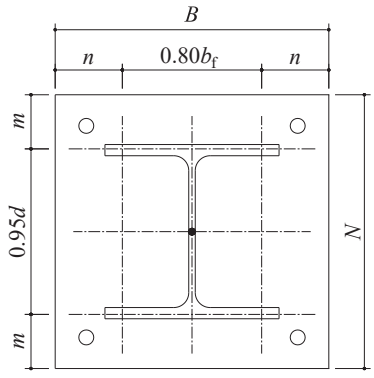
$$P_p = 5049 \text{ kN} \leq 1.7(25)(193600)10^{-3} = 8228 \text{ kN} \checkmark$$

YDKT	GKT
c. Tasarım ezilme dayanımının kontrolü (13.7)	**d.** Güvenli ezilme dayanımının kontrolü (13.7)
$P_{pd} = \phi P_p = 0.65(5049) = 3281.85$ kN	$P_{pg} = P_p / \Omega = 5049/2.31 = 2185.71$ kN
$\dfrac{P_u}{P_{pd}} = \dfrac{2520}{3281.85} = 0.77 \leq 1.0$ ✓	$\dfrac{P_a}{P_{pg}} = \dfrac{1700}{2185.71} = 0.78 \leq 1.0$ ✓

e. Gerekli taban levhası kalınlığının belirlenmesi

Gerekli taban levhası kalınlığının belirlenmesinde, taban levhası altında üniform bir gerilme yayılışı meydana geldiği varsayılacaktır. Bu gerilme yayılışı altında en elverişsiz eğilme momenti etkisindeki taban levhası enkesitlerine ait parametrelerin hesabı da aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.





$$m = \frac{N - 0.95d}{2} = \frac{(440) - 0.95(280)}{2} = 87 \text{ mm}$$

$$n = \frac{B - 0.80b_f}{2} = \frac{(440) - 0.80(280)}{2} = 108 \text{ mm}$$

$$n' = \frac{\sqrt{db_f}}{4} = \frac{\sqrt{(280)(280)}}{4} = 70 \text{ mm}$$

YDKT	GKT
$X = \left(\frac{4db_f}{(d+b_f)^2}\right)\frac{P_u}{\phi P_p}$ $X = \left(\frac{4(280)(280)}{(280+280)^2}\right)\frac{(2520)}{0.65(5049)}$ $X = 0.768$ $\lambda = \frac{2\sqrt{X}}{1+\sqrt{1-X}} \le 1.0$ $\lambda = \frac{2\sqrt{0.768}}{1+\sqrt{1-0.768}} = 1.18 \le 1.0$ ✖ $\lambda = 1.0$ λ değeri güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla doğrudan 1.0 değerine eşit olarak alınabilir. $\lambda n' = (1.0)(70) = 70 \text{ mm}$ $l = \text{maks}(m, n, \lambda n')$ $l = \text{maks}(87 \text{ mm}, 108 \text{ mm}, 70 \text{ mm})$ $l = 108 \text{ mm}$ $f_{pu} = \frac{P_u}{BN}$ $f_{pu} = \frac{(2520)10^{-3}}{(440)(440)} = 13.017 \text{ N/mm}^2$ $t_{min} = l\sqrt{\frac{2f_{pu}}{0.9F_y}}$ $t_{min} = (108)\sqrt{\frac{2(13.017)}{0.9(275)}} = 35.03 \text{ mm}$	$X = \left(\frac{4db_f}{(d+b_f)^2}\right)\frac{\Omega P_a}{P_p}$ $X = \left(\frac{4(280)(280)}{(280+280)^2}\right)\frac{2.31(1700)}{(5049)}$ $X = 0.778$ $\lambda = \frac{2\sqrt{X}}{1+\sqrt{1-X}} \le 1.0$ $\lambda = \frac{2\sqrt{0.778}}{1+\sqrt{1-0.778}} = 1.20 \le 1.0$ ✖ $\lambda = 1.0$ λ değeri güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla doğrudan 1.0 değerine eşit olarak alınabilir. $\lambda n' = (1.0)(70) = 70 \text{ mm}$ $l = \text{maks}(m, n, \lambda n')$ $l = \text{maks}(87 \text{ mm}, 108 \text{ mm}, 70 \text{ mm})$ $l = 108 \text{ mm}$ $f_{pa} = \frac{P_a}{BN}$ $f_{pa} = \frac{(1700)10^{-3}}{(440)(440)} = 8.781 \text{ N/mm}^2$ $t_{min} = l\sqrt{\frac{3.33f_{pa}}{F_y}}$ $t_{min} = (108)\sqrt{\frac{3.33(8.781)}{(275)}} = 35.22 \text{ mm}$
$t_p = 40.0 \text{ mm}$ olarak alınabilir.	

KAYNAK YAYINLAR

Design Guide 1 *Base Plate and Anchor Rod Design*, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois, USA.

BÖLÜM 14 BORU VE KUTU ENKESİTLİ ELEMANLARIN BİRLEŞİMLERİ

Sıcak haddelenmiş veya soğuk şekil verilmiş boru ve kutu enkesitli profillerin ve üniform kalınlıklı enkesit parçalarından (levhalardan) oluşan yapma kutu enkesitli elemanların birleşimlerinin tasarımında *Yönetmelik* Bölüm 13 te verilen esaslara ek olarak Bölüm 14 te belirtilen kurallar da uygulanacaktır.

Bu bölümde verilen örneklerde, sadece *Yönetmelik* Bölüm 14 kapsamındaki kural ve koşulların uygulamaları gösterilmiştir. Tasarım, elemanlarda ve birleşimlerde olası diğer göçme sınır durumlarının kontrolleri de yapılarak tamamlanmalıdır.

Levhaların Boru ve Kutu Enkesitli Elemanlarla Birleşimi

Levhaların boru enkesitli elemanlarla birleşimlerinde boru profilde yerel akma, plastikleşme ve zımbalama gibi göçme sınır durumları göz önüne alınmalıdır. Levhaların kutu enkesitli elemanlarla birleşiminde levhada yerel akma, kutu profil cidarında kayma etkisinde akma, kutu profil cidarında yerel akma, yerel buruşma, plastikleşme ve zımbalama gibi göçme sınır durumları göz önüne alınmalıdır.

Levha-boru enkesitli eleman birleşimlerinin mevcut dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.1 e göre belirlenecektir. Bu birleşimler için uygulama sınırları *Yönetmelik* Tablo 14.1.1A da verilmektedir.

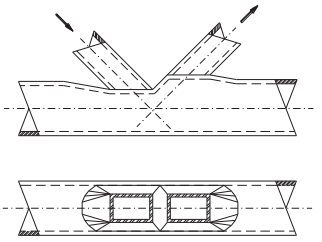
Levha-kutu enkesitli eleman birleşimlerinin mevcut dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.2 ye göre tanımlanan göçme sınır durumları için hesaplanan değerlerin en küçüğü alınarak belirlenecektir. Bu birleşimler için uygulama sınırları *Yönetmelik* Tablo 14.1.2A da verilmektedir.

Boru ve Kutu Enkesitli Elemanlardan Oluşan Kafes Sistem Birleşimleri

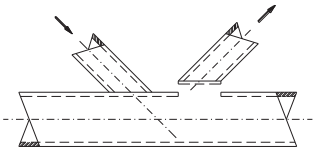
Eksenel kuvvet etkisinde olan boru veya kutu enkesitli örgü elemanlarının sürekli başlık elemanına doğrudan kaynaklandığı kafes sistem birleşimlerinde oluşabilen göçme durumları Şekil 14.1 de gösterilmektedir. Boru enkesitli elemanların kafes sistem birleşimlerinde kayma etkisinde akma, başlık elemanında plastikleşme gibi göçme sınır durumları gözönünde tutulmalıdır. Kutu enkesitli elemanların kafes sistem birleşimlerinde ise başlık elemanı cidarında plastikleşme, kayma etkisinde akma, başlık elemanı cidarında yerel akma, başlık elemanı cidarında yerel buruşma, eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma gibi göçme sınır durumları gözönüne alınmalıdır.

Boru profillerin birbirine doğrudan bağlandığı kafes sistemlerin kaynaklı düğüm noktalarında, birleşimlerin mevcut dayanımları, *Yönetmelik* Tablo 14.2.1 e göre tanımlanan göçme sınır durumları için hesaplanan değerlerin en küçüğü olarak alınacaktır. Bu birleşimler için uygulama sınırları *Yönetmelik* Tablo 14.2.1A da verilmektedir.

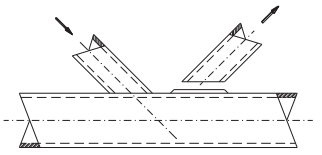
Kutu enkesitli elemanların birbirine doğrudan bağlandığı kafes sistemlerin kaynaklı düğüm noktalarında, birleşimlerin mevcut dayanımları, *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 ye göre tanımlanan göçme sınır durumları için hesaplanan değerlerin en küçüğü olarak alınacaktır. Bu birleşimler için uygulama sınırları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2A da verilmektedir.



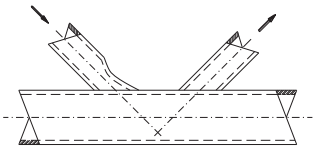
(a) Başlığın plastik şekildeğiştirmesi



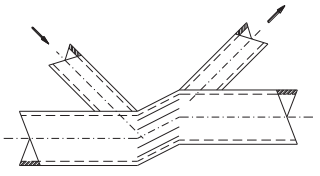
(b) Başlıkta kayma etkisinde akma (zımbalama)



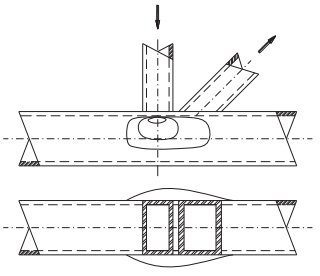
(c) Dengesiz kuvvet dağılımı nedeniyle çekme elemanında yerel akma



(d) Dengesiz kuvvet dağılımı nedeniyle basınç elemanında yerel akma



(e) Ara mesafe içindeki başlığın yan kenarlarının kayma etkisinde plastik şekildeğiştirmesi



(f) Başlığın yan kenarlarının burkularak göçmesi

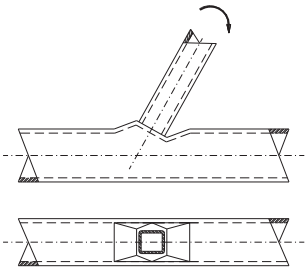
Şekil 14.1 – Kafes sistem birleşimlerinde göçme durumları

Boru ve Kutu Enkesitli Elemanların Moment Aktaran Birleşimleri

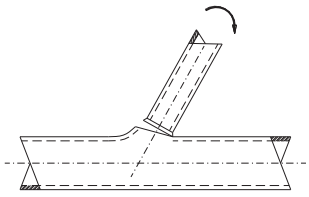
Eğilme momenti etkisinde olan bir veya iki örgü elemanının sürekli olan bir başlık elemanına kaynaklandığı, boru veya kutu enkesitli elemanların moment aktaran birleşimlerinde olası göçme durumları Şekil 14.2 de gösterilmektedir. Boru enkesitli elemanların moment aktaran birleşimlerinde başlık elemanında plastikleşme, kayma etkisinde akma gibi göçme sınır durumları gözönüne alınmalıdır. Kutu enkesitli elemanların moment aktaran birleşimlerinde ise başlık elemanı kenar enkesit parçasında plastikleşme, kutu profil cidarında yerel akma, eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma, başlık elemanı cidarında plastikleşme, kutu enkesitte yerel akma gibi göçme sınır durumlarının dikkate alınması gerekmektedir.

Boru profillerin birbirine doğrudan bağlandığı moment aktaran kaynaklı birleşimlerin mevcut dayanımları, *Yönetmelik* Tablo 14.3.1 e göre tanımlanan göçme sınır durumları için hesaplanan değerlerin en küçüğü olarak alınacaktır. Bu birleşimler için uygulama sınırları *Yönetmelik* Tablo 14.3.1A da verilmektedir.

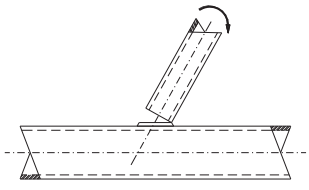
Kutu enkesitli elemanların birbirine doğrudan bağlandığı moment aktaran kaynaklı birleşimlerin mevcut dayanımları, *Yönetmelik* Tablo 14.3.2 ye ve Bölüm 13 e göre tanımlanan göçme sınır durumları için hesaplanan değerlerin en küçüğü olarak alınacaktır. Bu birleşimler için uygulama sınırları *Yönetmelik* Tablo 14.3.2A da verilmektedir.



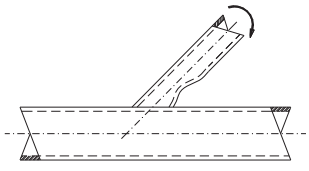
(a) Başlığın plastik şekildeğiştirmesi



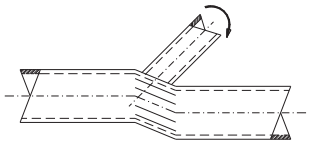
(b) Başlıkta kayma etkisinde akma (zımbalama)



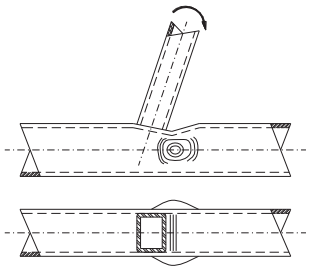
(c) Dengesiz kuvvet dağılımı nedeniyle çekme elemanında yerel akma



(d) Dengesiz kuvvet dağılımı nedeniyle basınç elemanında yerel akma



(e) Ara mesafe içindeki başlığın yan kenarlarının kayma etkisinde plastik şekildeğiştirmesi



(f) Başlığın yan kenarlarının burkularak göçmesi

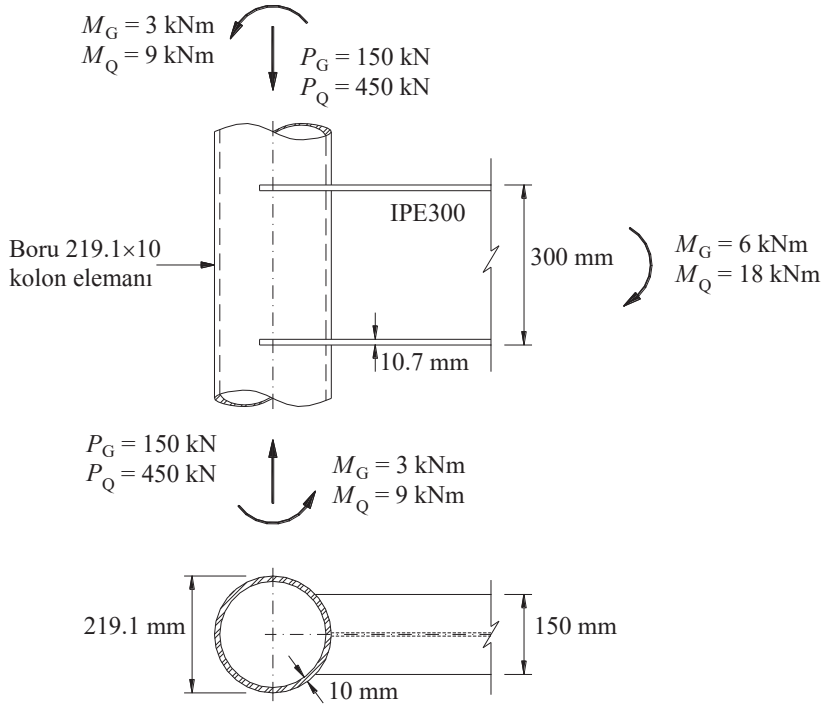
Şekil 14.2 – Moment aktaran birleşimlerde göçme durumları

Örnek 14.1

Aşağıdaki şekilde yükleme durumu verilen kiriş-kolon birleşimi, Boru 219.1×10 enkesitli bir kolon ile IPE 300 enkesitli bir kirişten oluşmaktadır. Sabit ve hareketli yükler altında kiriş, sırasıyla, M_G = 6 kNm ve M_Q = 18 kNm eğilme momentleri, kolon da M_G = 3 kNm ve M_Q = 9 kNm eğilme momentleri ile P_G = 150 kN ve P_Q = 450 kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru eleman (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2

IPE 300 (Tablo 2.1A)

S 275 F_y = 275 N/mm^2 F_u = 430 N/mm^2

Enkesit

Kiriş (IPE 300)		
d = 300 mm	$b_f = B_p$ = 150 mm	t_f = 10.7 mm

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(10.0) = 9.3$ mm için

Kolon (Boru 219.1×10)			
A_g = 6130 mm^2	W_e = 308 cm^3	D = 219.1 mm	t = 0.93×10 = 9.3 mm

Çözüm

IPE 300 kirişinin sadece başlık levhalarından oluştuğu ve kirişe etkiyen eğilme momentinin sadece boru enkesite bağlanan kiriş başlıkları (levhaları) ile kuvvet çifti şeklinde aktarıldığı varsayılacaktır.

Tablo 14.1.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^{o} \geq 30^{o}$ ✓

$\frac{D}{t} = \frac{219.1}{9.3} = 23.6 \leq 50$ ✓

$0.2 \leq \left(\frac{B_p}{D} = \frac{150}{219.1} = 0.68 \right) \leq 1.0$ ✓

$F_y = 275$ MPa $\leq$ 360 MPa ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

Eksenel kuvvet etkisindeki enine levhalı T-birleşimi uygulama sınırları içerisindedir.

YDKT	GKT
Birleşimin gerekli dayanımı	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_u = 1.2 \times 6 + 1.6 \times 18 = 36$ kNm	$M_a = M_G + M_Q$ $M_a = 6 + 18 = 24$ kNm

Enine levhalı T-birleşiminin mevcut eksenel kuvvet dayanımları, *Yönetmelik* Tablo 14.1.1 uyarınca kontrol edilebilir.

Boru profilde yerel akma sınır durumu

YDKT	GKT
Kolon elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 150 + 1.6 \times 450 = 900$ kN	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 150 + 450 = 600$ kN
$M_{ro} = M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_{ro} = M_u = 1.2 \times 3 + 1.6 \times 9 = 18$ kNm	$M_{ro} = M_a = M_G + M_Q$ $M_{ro} = M_a = 3 + 9 = 12$ kNm
$F_c = F_y = 275$ MPa	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165$ MPa
$U = \left\| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\|$ (14.1.6)	
$U = \left\| \frac{900 \times 10^3}{275 \times 6110} + \frac{18 \times 10^6}{275 \times 305 \times 10^3} \right\| = 0.75$	$U = \left\| \frac{600 \times 10^3}{165 \times 6110} + \frac{12 \times 10^6}{165 \times 305 \times 10^3} \right\| = 0.83$

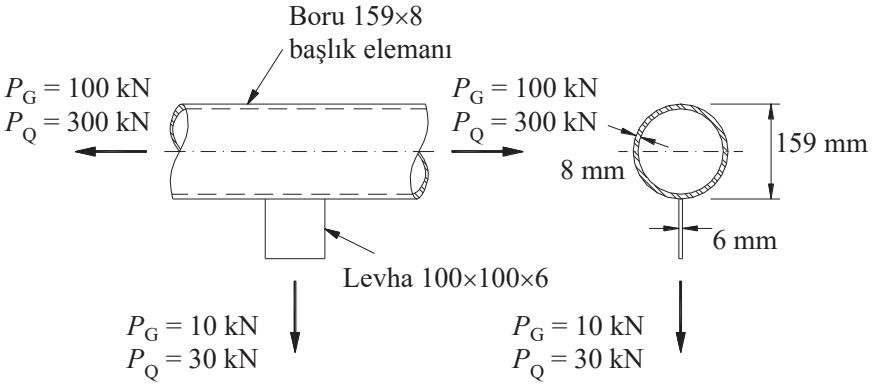
<table>
<tr><td colspan="2">$Q_f = 1.0 - 0.3U(1+U)$ (14.1.5b)</td></tr>
<tr><td>$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.75 \times (1 + 0.75) = 0.61$</td><td>$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.83 \times (1 + 0.83) = 0.54$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Boru profilde (kolon) yerel akma için karakteristik dayanım</td></tr>
<tr><td colspan="2">$R_n \sin\theta = F_y t^2 \left(\frac{5.5}{1 - 0.81 \frac{B_p}{D}} \right) Q_f$ (14.1.1)</td></tr>
<tr><td>$R_n = \frac{1}{\sin 90}(275)(9.3)^2 \left(\frac{5.5}{1 - 0.81 \times \frac{150}{219.1}} \right) ...$
$... \times (0.61) 10^{-3} = 179.1 \text{ kN}$</td><td>$R_n = \frac{1}{\sin 90}(275)(9.3)^2 \left(\frac{5.5}{1 - 0.81 \times \frac{150}{219.1}} \right) ...$
$... \times (0.54) 10^{-3} = 158.6 \text{ kN}$</td></tr>
<tr><td>Tasarım basınç kuvveti dayanımı</td><td>Güvenli basınç kuvveti dayanımı</td></tr>
<tr><td>$R_d = \phi R_n = 0.90 \times 179.1 = 161.2 \text{ kN}$</td><td>$R_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{158.6}{1.67} = 95.0 \text{ kN}$</td></tr>
<tr><td>a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü</td><td>b. Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü</td></tr>
<tr><td>$M_d = \phi M_n = \phi R_n \times (d - t_f)$
$M_d = 161.2 \times (300 - 10.7) \times 10^{-3} = 46.6 \text{ kNm}$</td><td>$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{R_n}{\Omega} \times (d - t_f)$
$M_d = 95 \times (300 - 10.7) \times 10^{-3} = 27.5 \text{ kNm}$</td></tr>
<tr><td>$\frac{M_u}{M_d} = \frac{36}{46.6} = 0.77 \le 1.0$ ✓</td><td>$\frac{M_a}{M_g} = \frac{24}{27.5} = 0.87 \le 1.0$ ✓</td></tr>
</table>

Örnek 14.2

Aşağıdaki şekilde yükleme durumu verilen levha-boru eleman birleşimi, Boru 159×8 enkesitli bir başlık elemanı ile 100×6 enkesitli bir levhadan oluşmaktadır. Sabit ve hareketli yükler altında başlık elemanı, sırasıyla, P_G = 100 kN ve P_Q = 300 kN eksenel çekme kuvvetleri, levha da P_G = 10 kN ve P_Q = 30 kN eksenel çekme kuvvetleri etkisindedir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru eleman (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Levha (Tablo 2.1A)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Kolon (Boru 159×8)	
$D = 219.1$ mm	$t = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Levha 100×6
$t_f = 6.0$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.1.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{D}{t} = \frac{159}{7.44} = 21.4 \leq 50$$ ✓

$F_y = 275$ MPa $\leq$ 360 MPa ✓

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

Eksenel kuvvet etkisindeki boyuna levhalı T-birleşimi uygulama sınırları içerisindedir.

Birleşimin gerekli dayanımı

YDKT	GKT
Birleşimin gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 10 + 1.6 \times 30 = 60\,\text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 10 + 30 = 40\,\text{kN}$

Boyuna levhalı T-birleşimi mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.1 uyarınca kontrol edilebilir.

Boru profilde plastikleşme sınır durumu

Başlık elemanına bağlanan yüzey çekme etkisinde olduğundan $Q_f = 1.0$ (14.1.5a)

$$R_n \sin\theta = 5.5 F_y t^2 \left(1 + 0.25 \frac{l_b}{D}\right) Q_f \qquad (14.1.2)$$

$$R_n = \frac{1}{\sin 90} \times 5.5 \times 275 \times 7.44^2 \times \left(1 + 0.25 \times \frac{100}{159}\right) \times 1.0 \times 10^{-3} = 96.9\,\text{kN}$$

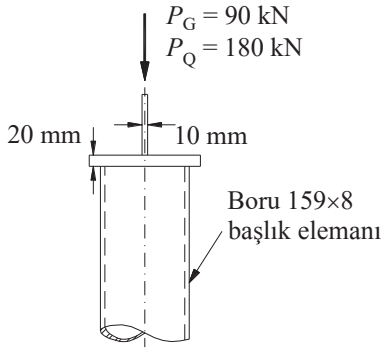
YDKT	GKT
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımın kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.90(96.9) = 87.2\,\text{kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{96.9}{1.67} = 58.0\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{60}{87.2} = 0.69 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{40}{58.0} = 0.69 \le 1.0 \checkmark$

Örnek 14.3

Aşağıdaki şekilde detayı ve yükleme durumu verilen kapak levhalı birleşim, Boru 159×8 enkesitli bir eleman ile 20mm kalınlıklı kapak levha ve 10mm kalınlıklı uç levhadan oluşmaktadır. Sabit ve hareketli yükler altında uç levha, sırasıyla, P_G = 90 kN ve P_Q = 180 kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarımın dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru eleman (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Levha (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Kolon (Boru 159×8)		
A_g= 3542 mm^2	D = 159 mm	t = 0.93×8 = 7.44 mm

Uç levha	Kapak levha
t = 10.0 mm	t = 20.0 mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.1.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$$\frac{D}{t} = \frac{159}{7.44} = 21.4 < 0.11\frac{E}{F_y} = 0.11\times\frac{200000}{275} = 80 \checkmark$$

$F_y = 275$ MPa $\leq$ 360 MPa ✓

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

Eksenel yük etkisindeki kapak levhalı birleşim uygulama sınırları içerisindedir.

Birleşimin gerekli dayanımı

YDKT	GKT
Birleşimin gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 90 + 1.6 \times 180 = 396\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 90 + 180 = 270\ \text{kN}$

Boru-kapak levha birleşiminin mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.1 uyarınca kontrol edilebilir.

Boru profilde yerel akma sınır durumu

$$R_n = 2F_y t\left(5t_p + l_b\right) \le F_y A \qquad (14.1.4)$$

$$R_n = 2 \times 275 \times 7.44 \times \left(5 \times 20 + 10\right) \times 10^{-3} = 450.1\ \text{kN} \le 275 \times 3542 \times 10^{-3} = 974\ \text{kN}$$

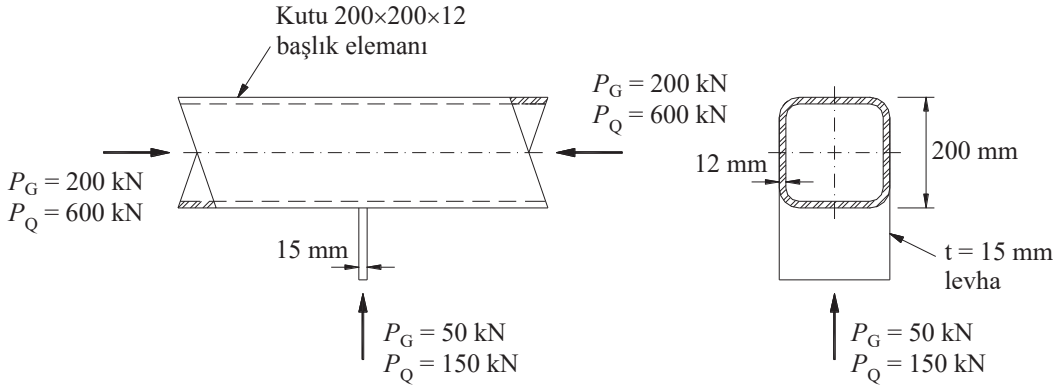
YDKT	GKT
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 1.0\left(450.1\right) = 450.1\ \text{kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{450.1}{1.5} = 300.1\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{396}{450.1} = 0.88 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{270}{300.1} = 0.90 \le 1.0 \checkmark$

Örnek 14.4

Aşağıdaki şekilde detayı ve yükleme durumu verilen levha-kutu eleman birleşimi, Kutu 200×200×12 enkesitli bir başlık elemanı ile 200×200×15 enkesitli bir levhadan oluşmaktadır. Sabit ve hareketli yükler altında başlık elemanı, sırasıyla, P_G = 200 kN ve P_Q = 600 kN eksenel basınç kuvvetleri, levha da P_G = 50 kN ve P_Q = 150 kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu 200×200×12 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Levha (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(12.0) = 11.16$ mm için

Başlık elemanı (Kutu 200×200×12)			
$A_g = 7821$ mm^2	$H = 200$ mm	$B = 200$ mm	$t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Levha 200×200×15	
$B_p = 200$ mm	$t_p = 15$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.1.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{B}{t} = \frac{H}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \leq 35 \checkmark$$

$$0.25 < \frac{B_p}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \le 1.0 \checkmark$$

$$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

Eksenel kuvvet etkisindeki enine levhalı T-birleşimi uygulama sınırları içerisindedir.

Birleşimin gerekli dayanımı

YDKT	GKT
Birleşimin gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 50 + 1.6 \times 150 = 300 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 50 + 150 = 200 \text{ kN}$

Mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.2 uyarınca kontrol edilebilir.

Levhada yerel akma sınır durumu

Levhada yerel akma için karakteristik dayanım

$$R_n = \frac{10}{B/t} F_y t B_p \le F_{yb} t_p B_p \qquad (14.1.7)$$

$$R_n = \frac{10}{200/11.16} \times 275 \times 11.16 \times 200 \times 10^{-3} = 342.5 \text{ kN} \le 275 \times 15 \times 200 \times 10^{-3} = 825 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.95(342.5) = 325.4 \text{ kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{342.5}{1.58} = 216.8 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{300}{325.4} = 0.92 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{200}{216.8} = 0.92 \le 1.0 \checkmark$

Kutu profil cidarında yerel akma sınır durumu

$$\beta = \frac{B_p}{B} = \frac{200}{200} = 1.0$$

k = kutu enkesitin dış köşe yarıçapı ≥ 1.5t = 1.5×11.16 = 16.74 mm ✓

$$R_n = 2F_y t(5k + l_b) \qquad (14.1.9)$$

$$R_n = 2 \times 275 \times 11.16 \times (5 \times 16.74 + 15) \times 10^{-3} = 605.8 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 1.0(605.8) = 605.8\ \text{kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{605.8}{1.5} = 403.9\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{300}{605.8} = 0.50 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{200}{403.9} = 0.50 \le 1.0$ ✓

Kutu profil cidarında yerel buruşma sınır durumu

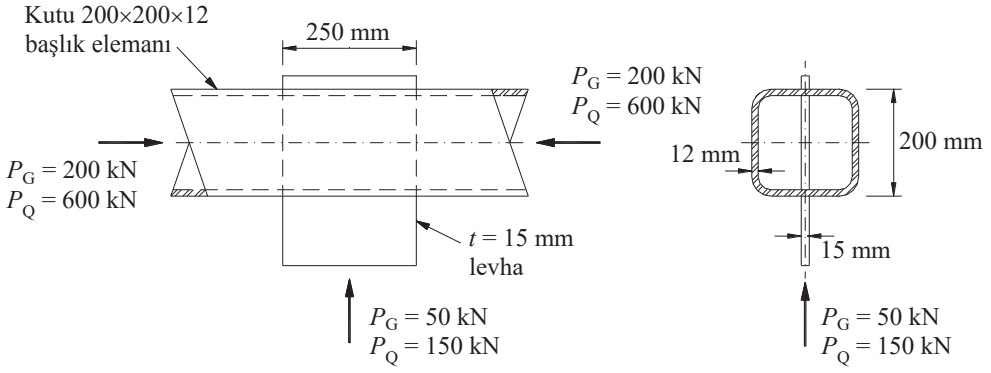
YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2\times200 + 1.6\times600 = 1200\ \text{kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 200 + 600 = 800\ \text{kN}$
$M_{ro} = 0$	$M_{ro} = 0$
$F_c = F_y = 275\ \text{MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6\times275 = 165\ \text{MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{1200\times10^3}{275\times7821} + 0 \right\rvert = 0.56$	$U = \left\lvert \frac{800\times10^3}{165\times7821} + 0 \right\rvert = 0.62$
$Q_f = 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \le 1.0$ (14.1.16)	
$Q_f = 1.3 - 0.4\times\frac{0.56}{1.0} = 1.08 > 1.0 \quad Q_f = 1.0$	$Q_f = 1.3 - 0.4\times\frac{0.62}{1.0} = 1.05 > 1.0 \quad Q_f = 1.0$
Kutu profil cidarında yerel buruşma için karakteristik dayanım	
T-birleşiminde levhanın basınç etkisinde ve β=1.0 olması durumu için $R_n = 1.6t^2\left(1 + \frac{3l_b}{H-3t}\right)\sqrt{EF_y}Q_f$ (14.1.10)	
$P_n = 1.6\times11.16^2\times\left(1+\frac{3\times15}{200-3\times11.16}\right)$ $\times\sqrt{200000\times275}\times1.0\times10^{-3} = 1877.2\ \text{kN}$	$P_n = 1.6\times11.16^2\times\left(1+\frac{3\times15}{200-3\times11.16}\right)$ $\times\sqrt{200000\times275}\times1.0\times10^{-3} = 1877.2\ \text{kN}$
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.75(1877.2) = 1407.9\ \text{kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{1877.2}{2.0} = 938.6\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{300}{1407.9} = 0.21 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{200}{938.6} = 0.21 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.5

Aşağıdaki şekilde detayı ve yükleme durumu verilen levha-kutu eleman birleşimi, Kutu 200×200×12 enkesitli bir başlık elemanı ile 500×250×15 enkesitli bir levhadan oluşmaktadır. Sabit ve hareketli yükler altında başlık elemanı, sırasıyla, P_G = 200 kN ve P_Q = 600 kN eksenel basınç kuvvetleri, levha da P_G = 50 kN ve P_Q = 150 kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu 200×200×12 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Levha (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(12.0) = 11.16$ mm için

Başlık elemanı (Kutu 200×200×12)			
$A_g = 7821$ mm^2	$H = 200$ mm	$B = 200$ mm	$t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Levha 500×250×15	
$l_b = 250$ mm	$t_p = 15$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.1.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{B}{t} = \frac{H}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \leq 40$$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8$ ✓

Eksenel kuvvet etkisindeki boyuna levhalı T-birleşimi uygulama sınırları içerisindedir.

Birleşimin gerekli dayanımı

YDKT	GKT
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 50 + 1.6 \times 150 = 300 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 50 + 150 = 200 \text{ kN}$

Eksenel kuvvet etkisindeki profil gövdesini yararak geçen boyuna levhalı T-birleşiminin mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.2 uyarınca kontrol edilebilir.

Kutu profil cidarında plastikleşme sınır durumu

Kutu enkesitli başlık elemanının gerekli dayanımlarının belirlenmesi, (P_{ro} ve M_{ro})

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 200 + 1.6 \times 600 = 1200 \text{ kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 200 + 600 = 800 \text{ kN}$
$M_{ro} = 0$	$M_{ro} = 0$
$F_c = F_y = 275 \text{ MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{1200 \times 10^3}{275 \times 7821} + 0 \right\rvert = 0.56$	$U = \left\lvert \frac{800 \times 10^3}{165 \times 7821} + 0 \right\rvert = 0.62$
$Q_f = 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \le 1.0$ (14.1.16)	
$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.56}{1.0} = 1.08 > 1.0$ $Q_f = 1.0$	$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.62}{1.0} = 1.05 > 1.0$ $Q_f = 1.0$
Kutu profil cidarında plastikleşme için karakteristik dayanım	
$R_n \sin\theta = \frac{2F_y t^2}{1 - \frac{t_p}{B}} \left(\frac{2l_b}{B} + 4\sqrt{1 - \frac{t_p}{B} Q_f} \right)$ (14.1.13) $R_n = \frac{1}{\sin 90} \times \frac{2 \times 275 \times 11.16^2}{1 - \frac{15}{200}} \times \left(\frac{2 \times 250}{200} + 4\sqrt{1 - \frac{15}{200}} \times 1.0 \right) \times 10^{-3} = 470.0 \text{ kN}$	

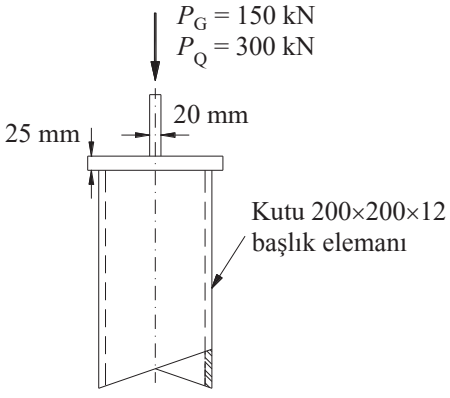
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 1.0(470.0) = 470.0\,\text{kN}$	$P_g = \frac{R_n}{\Omega} = \frac{470.0}{1.5} = 313.3\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{300}{470.0} = 0.64 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{200}{313.3} = 0.64 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.6

Aşağıdaki şekilde detayı ve yükleme durumu verilen kapak levhalı birleşim, Kutu 200×200×12 enkesitli başlık elemanı ile 25mm kalınlıklı kapak levha ve 20mm kalınlıklı uç levhadan oluşmaktadır. Sabit ve hareketli yükler altında uç levha, sırasıyla, P_G = 150 kN ve P_Q = 300 kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu 200×200×12 (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Levha (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(12.0) = 11.16$ mm için

Başlık elemanı (Kutu 200×200×12)			
$A_g = 7821$ mm^2	$H = 200$ mm	$B = 200$ mm	$t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Uç levha	Kapak levha
$t = 20.0$ mm	$t = 25.0$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.1.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$F_y = 275$ MPa $\leq$ 360 MPa ✓

$$\frac{F_y}{F_u}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

Eksenel kuvvet etkisindeki kapak levhalı birleşim uygulama sınırları içerisindedir.

Birleşimin gerekli dayanımı

YDKT	GKT
Birleşimin gerekli dayanımı	
$P_u=1.2P_G+1.6P_Q$ $P_u=1.2\times150+1.6\times300=660\ \text{kN}$	$P_a=P_G+P_Q$ $P_a=150+300=450\ \text{kN}$

Mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.1.2 uyarınca kontrol edilebilir.

Kutu profil cidarında yerel akma sınır durumu

$(5t_p+l_b)=(5\times25+20=145)<(B=200)$ için

$$R_n=2F_yt(5t_p+l_b) \qquad (14.1.14a)$$

$$R_n=2\times275\times11.16\times(5\times25+20)\times10^{-3}=890.0\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d=\phi R_n=1.0(890)=890\ \text{kN}$	$P_g=\frac{R_n}{\Omega}=\frac{890}{1.5}=593.3\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d}=\frac{660}{890}=0.74\le1.0\ \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g}=\frac{450}{593.3}=0.76\le1.0\ \checkmark$

Basınç etkisi için kutu profil cidarında yerel buruşma sınır durumu

$(5t_p+l_b)=(5\times25+20=145)<(B=200)$ için

$$R_n=1.6t^2\left[1+\frac{6l_b}{B}\left(\frac{t}{t_p}\right)^{1.5}\right]\sqrt{EF_y\frac{t_p}{t}} \qquad (14.1.15)$$

$$R_n=1.6\times11.16^2\left[1+\frac{6\times20}{200}\left(\frac{11.16}{25}\right)^{1.5}\right]\sqrt{200000\times275\times\frac{25}{11.16}}\times10^{-3}=2607.7\ \text{kN}$$

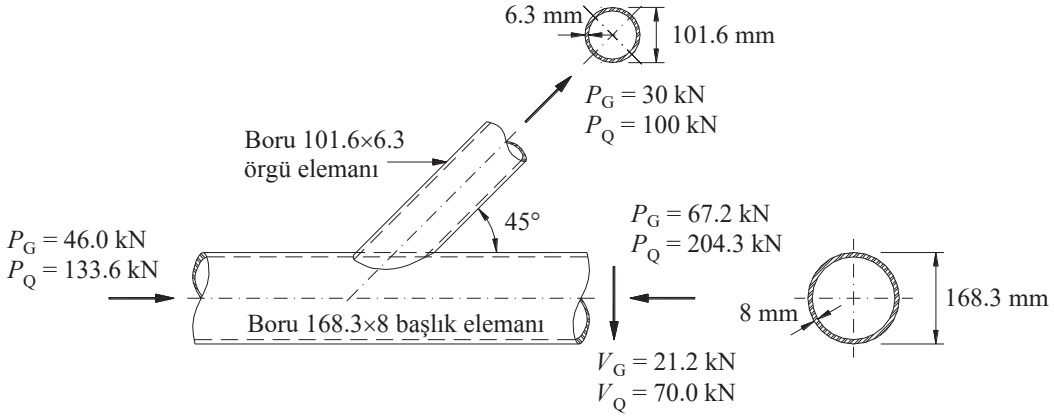
YDKT	GKT
a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$P_d=\phi R_n=0.75(2607.7)=1955.8\ \text{kN}$	$P_g=\frac{R_n}{\Omega}=\frac{2607.7}{2.0}=1303.9\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d}=\frac{660}{1955.8}=0.34\le1.0\ \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g}=\frac{450}{1303.9}=0.35\le1.0\ \checkmark$

Örnek 14.7

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen boru-boru eleman kafes sistem Y-birleşimi, Boru 168.3×8 enkesitli bir başlık elemanı ile Boru 101.6×6.3 enkesitli bir örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Başlık elemanı (Boru 168.3×8)	
$A_g = 3760$ mm^2	$D = 168.3$ mm $t = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Örgü elemanı (Boru 101.6×6.3)
$D_b = 101.6$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 45^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{D}{t} = \frac{168.3}{7.44} = 22.6 \leq 50 \checkmark$$

$$0.2 \le \left(\frac{D_b}{D} = \frac{101.6}{168.3} = 0.6 \right) \le 1.0 \checkmark$$

$$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

Birleşim uygulama sınırları içerisindedir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 100 = 196 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 30 + 100 = 130 \text{ kN}$

Mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.1 uyarınca kontrol edilebilir

Y-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

$$\beta = \frac{D_b}{D} = \frac{101.6}{168.3} = 0.6$$

$$\gamma = \frac{D}{2t} = \frac{168.3}{2 \times 7.44} = 11.3$$

Yönetmelik Tablo 14.2.1 uyarınca gerekli dayanımlar birleşimin daha küçük basınç gerilmesi etkisindeki tarafı için belirlenecektir.

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 46 + 1.6 \times 133.6 = 268.96 \text{ kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 46 + 133.6 = 179.60 \text{ kN}$
$M_{ro} = 0$	$M_{ro} = 0$
$F_c = F_y = 275 \text{ MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{268.96 \times 10^3}{275 \times 3760} + 0 \right\rvert = 0.26$	$U = \left\lvert \frac{179.60 \times 10^3}{165 \times 3760} + 0 \right\rvert = 0.29$
$Q_f = 1.0 - 0.3U(1+U)$ (14.1.5b)	
$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.26 \times (1+0.26) = 0.90$	$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.29 \times (1+0.29) = 0.89$

Başlık elemanında plastikleşme için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı	
$P_n \sin\theta = F_y t^2 \left(3.1+15.6\beta^2\right)\gamma^{0.2} Q_f$ (14.2.2)	
$P_n = \frac{1}{\sin 45} 275 \times 7.44^2 \left(3.1+15.6\times 0.6^2\right)\times$ $11.3^{0.2}\times 0.90\times 10^{-3} = 274.26\,\text{kN}$	$P_n = \frac{1}{\sin 45} 275 \times 7.44^2 \left(3.1+15.6\times 0.6^2\right)\times$ $11.3^{0.2}\times 0.89\times 10^{-3} = 271.22\,\text{kN}$
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.90\left(274.26\right) = 246.83\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{271.22}{1.67} = 162.41\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{196}{246.83} = 0.79 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{130}{162.41} = 0.80 \le 1.0$ ✓

Y-birleşimi için kayma etkisinde akma (zımbalama) sınır durumu

$D_{b(\text{çekme/basınç})} \le \left(D-2t\right)$ koşulunun sağlanması gerekmektedir.

$101.6 \le \left(168.3-2\times 7.44\right) = 153.4$ ✓

Başlık elemanında kayma etkisinde akma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

$$P_n = 0.6 F_y t \pi D_b \left(\frac{1+\sin\theta}{2\sin^2\theta}\right) \qquad (14.2.1)$$

$$P_n = 0.6\times 275\times 7.44\times \pi \times 101.6\times \left(\frac{1+\sin 45}{2\sin^2 45}\right)\times 10^{-3} = 668.9\ \text{kN}$$

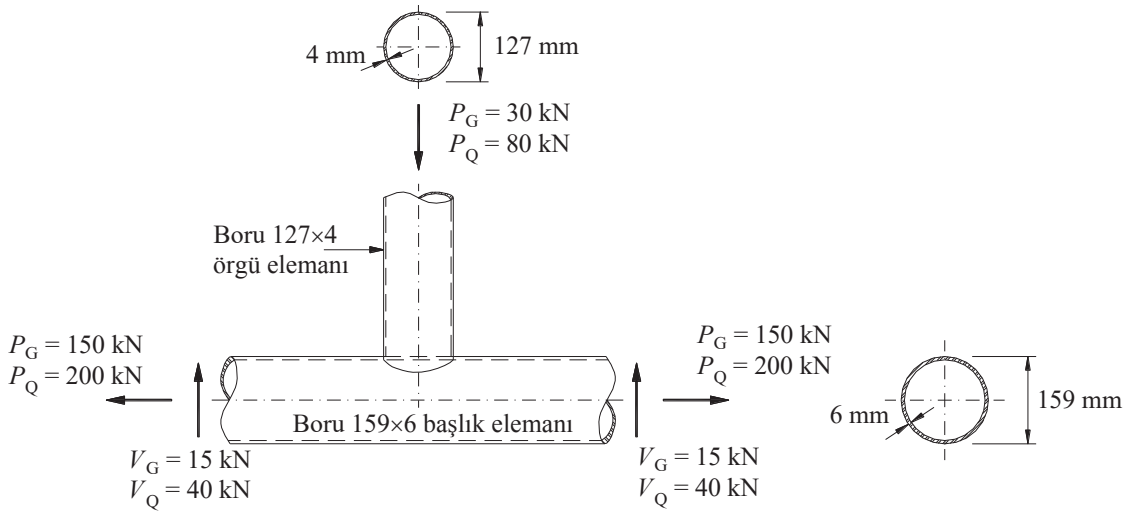
YDKT	GKT
a.Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi R_n = 0.95\left(668.9\right) = 635.5\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{668.9}{1.58} = 423.4\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{196}{635.5} = 0.31 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{130}{423.4} = 0.31 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.8

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen boru-boru eleman kafes sistem T-birleşimi, Boru 159×6 enkesitli bir başlık elemanı ile Boru 127×4 enkesitli bir örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(6.0) = 5.58$ mm için

Başlık elemanı (Boru 159×6)	
$D = 159$ mm	$t = 0.93\times6 = 5.58$ mm

Örgü elemanı (Boru 127×4)	
$D_b = 127$ mm	$t_b = 0.93\times4 = 3.72$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{D}{t} = \frac{159}{5.58} = 28.5 \leq 50 \checkmark$$

$$\frac{D_b}{t_b}=\frac{127}{3.72}=34.1\le 50\ \checkmark$$

$$\frac{D_b}{t_b}=\frac{127}{3.72}=34.1\le 0.05\frac{E}{F_y}=0.05\times\frac{200000}{275}=36.4\ \checkmark$$

$$0.2\le\left(\frac{D_b}{D}=\frac{127}{159}=0.8\right)\le 1.0\ \checkmark$$

$$F_y=275\text{ MPa}\ \le\ 360\text{ MPa}\ \checkmark$$

$$F_{yb}=275\text{ MPa}\ \le\ 360\text{ MPa}\ \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

Birleşim uygulama sınırları içerisindedir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanımı	
$P_u=1.2P_G+1.6P_Q$ $P_u=1.2\times 30+1.6\times 80=164\text{ kN}$	$P_a=P_G+P_Q$ $P_a=30+80=110\text{ kN}$

Mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.1 uyarınca kontrol edilebilir.

T-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

Başlık elemanında plastikleşme için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

Başlık elemanının bağlanan yüzeyi çekme etkisinde olduğundan,

$$Q_f=1.0 \qquad (14.1.5a)$$

$$\beta=\frac{D_b}{D}=\frac{127}{159}=0.8$$

$$\gamma=\frac{D}{2t}=\frac{159}{2\times 5.58}=14.2$$

$$P_n\sin\theta=F_y t^2\left(3.1+15.6\beta^2\right)\gamma^{0.2}Q_f \qquad (14.2.2)$$

$$P_n=\frac{1}{\sin 90}275\times 5.58^2\left(3.1+15.6\times 0.8^2\right)\times 14.2^{0.2}\times 1.0\times 10^{-3}=190.46\text{ kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvvet dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9 \times 190.46 = 171.41\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{190.46}{1.67} = 114.05\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{164}{171.41} = 0.96 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{110}{114.05} = 0.96 \le 1.0$ ✓

T-birleşimi için için kayma etkisinde akma sınır durumu

$D_{b(\text{çekme/basıınç})} \le (D - 2t)$ koşulunun sağlanması gerekmektedir

$127 \le (159 - 2 \times 5.58) = 147.8$ ✓

Başlık elemanında kayma etkisinde akma için karakteritik eksenel kuvvet dayanımı

$$P_n = 0.6 F_y t \pi D_b \left(\frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta} \right) \qquad (14.2.1)$$

$$P_n = 0.6 \times 275 \times 5.58 \times \pi \times 127 \times \left(\frac{1 + \sin 90}{2\sin^2 90} \right) \times 10^{-3} = 367.3\ \text{kN}$$

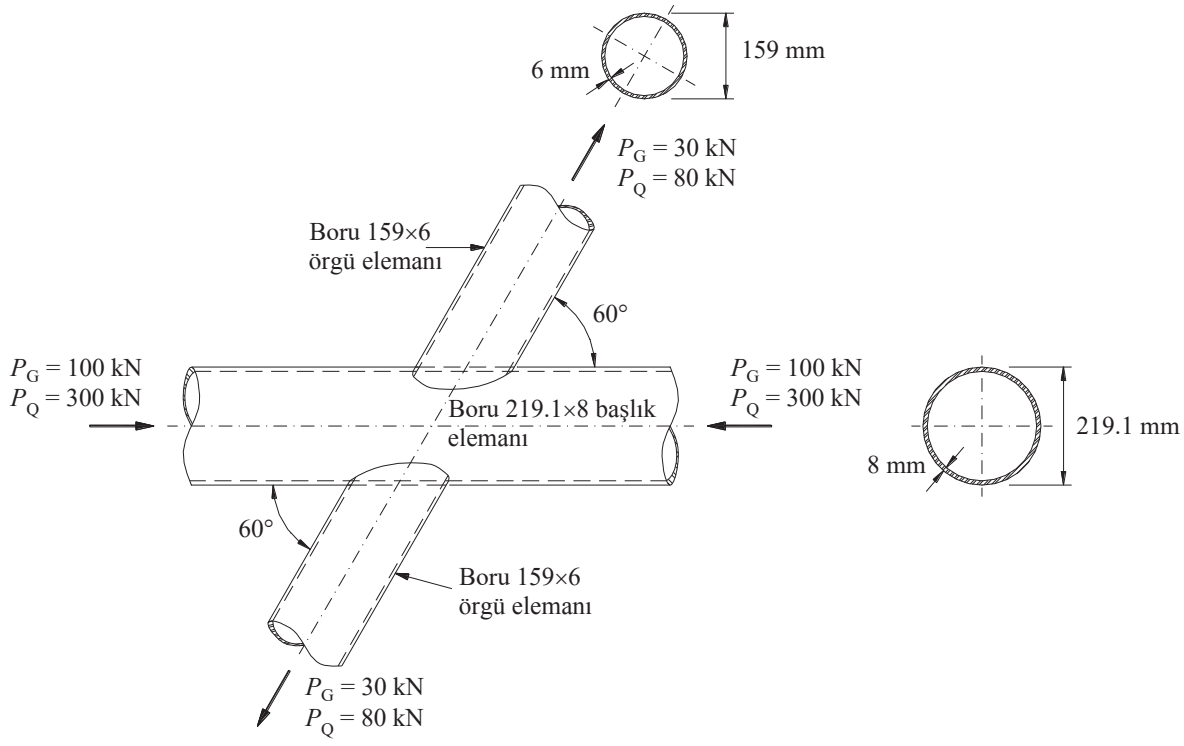
YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvvet dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95 \times 367.3 = 348.9\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{367.3}{1.58} = 232.5\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{164}{348.9} = 0.47 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{110}{232.5} = 0.47 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.9

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen boru-boru eleman kafes sistem X-birleşimi, Boru 219.1×8 enkesitli bir başlık elemanı ile Boru 159×6 enkesitli iki örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Başlık elemanı (Boru 219.1×8)
$A = 4947$ mm^2 $D = 219.1$ mm $t = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Örgü elemanı (Boru 159×6)
$D_b = 159$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 60^0 \geq 30^0$ ✓

$\frac{D}{t} = \frac{219.1}{7.44} = 29.4 \leq 40$ ✓

$0.2 \leq \left(\frac{D_b}{D} = \frac{159}{219.1} = 0.73 \right) \leq 1.0$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

Birleşim uygulama sınırları içerisindedir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 80 = 164 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 30 + 80 = 110 \text{ kN}$

Mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.1 uyarınca kontrol edilebilir.

X-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 100 + 1.6 \times 300 = 600 \text{ kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 100 + 300 = 400 \text{ kN}$
$F_c = F_y = 275 \text{ MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$
$U = \left\| \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\|$ (14.1.6)	
$U = \left\| \frac{600 \times 10^3}{275 \times 4947} + 0 \right\| = 0.44$	$U = \left\| \frac{400 \times 10^3}{165 \times 4947} + 0 \right\| = 0.49$
$Q_f = 1.0 - 0.3U(1+U)$ (14.1.5b)	
$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.44 \times (1 + 0.44) = 0.81$	$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.49 \times (1 + 0.49) = 0.78$
Başlık elemanında plastikleşme için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı	
$\beta = \frac{D_b}{D} = \frac{159}{219.1} = 0.73$	

$P_n \sin\theta = F_y t^2 \left(\frac{5.7}{1-0.81\beta}\right) Q_f$ (14.2.3)	
$P_n = \frac{1}{\sin 60} 275 \times 7.44^2 \left(\frac{5.7}{1-0.81\times 0.73}\right) \times 0.81\times 10^{-3} = 198.57\,\text{kN}$	$P_n = \frac{1}{\sin 60} 275 \times 7.44^2 \left(\frac{5.7}{1-0.81\times 0.73}\right) \times 0.78\times 10^{-3} = 191.21\,\text{kN}$
a. Tasarım eksenel kuvvet dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9\times 198.57 = 178.71\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{191.21}{1.67} = 114.50\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{164}{178.71} = 0.92 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{110}{114.5} = 0.96 \le 1.0$ ✓

X-birleşimi için için kayma etkisinde akma sınır durumu

$D_{b(\text{çekme/basınç})} \le (D - 2t)$ koşulunun sağlanması gerekmektedir

$159 \le (219.1 - 2\times 7.44) = 204.2$ ✓

Başlık elemanında kayma etkisinde akma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

$$P_n = 0.6 F_y t \pi D_b \left(\frac{1+\sin\theta}{2\sin^2\theta}\right) \quad (14.2.1)$$

$$P_n = 0.6\times 275\times 7.44\times \pi \times 159 \times \left(\frac{1+\sin 60}{2\sin^2 60}\right) \times 10^{-3} = 762.8\,\text{kN}$$

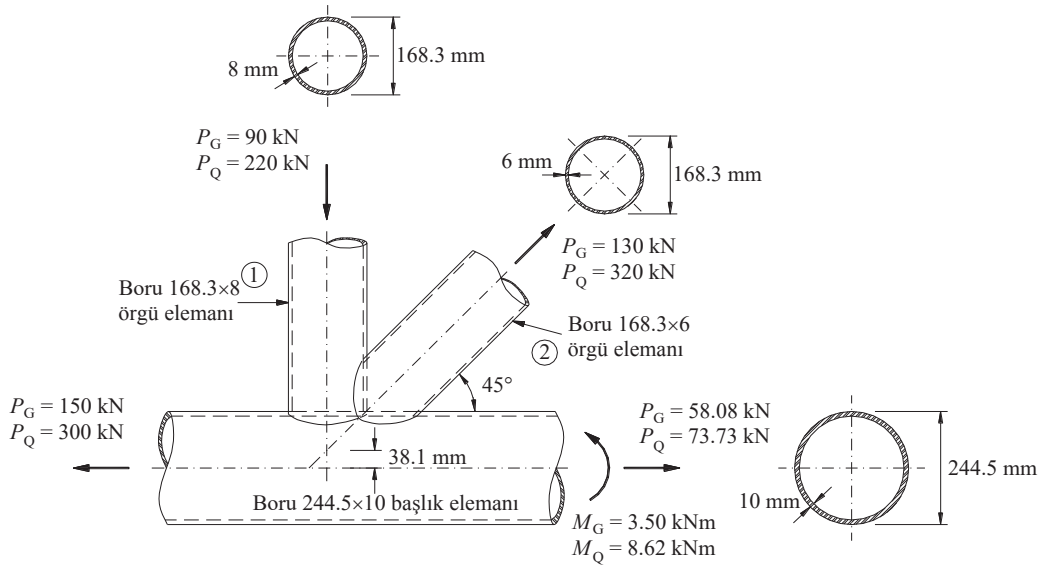
YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95\times 762.8 = 724.7\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{762.8}{1.58} = 482.8\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{164}{724.7} = 0.23 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{110}{482.8} = 0.23 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.10

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen boru-boru eleman kafes sistem K-birleşimi, Boru 244.5×10 enkesitli bir başlık elemanı ile Boru 168.3×8 ve Boru 168.3×6 enkesitli iki örgü elemanından oluşmaktadır. Basınç etkisindeki örgü elemanı kuvveti ile çekme etkisindeki örgü elemanı kuvvetinin düşey bileşenleri arasındaki fark %20 oranını aşmamaktadır. Birleşimin geometrisi nedeniyle başlık elemanı ile örgü elemanlarının eksenleri arasında meydana gelen dışmerkezlik, başlık elemanında bir eğilme momenti oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Boru 244.5×10)	
$D = 244.5$ mm	$t = 0.93\times10 = 9.3$ mm

Örgü elemanı (1) (Boru 168.3×8)	
$D_b = 168.3$ mm	$t_b = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Örgü elemanı (2) (Boru 168.3×6)	
$D_b = 168.3$ mm	$t_b = 0.93\times6 = 5.58$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta_{b1} = 90^0 \geq 30^0$ ✓ ; $\theta_{b2} = 45^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{D}{t} = \frac{244.5}{9.3} = 26.3 \leq 50 \checkmark$$

$$\frac{D_b}{t_b} = \frac{168.3}{7.44} = 22.6 \leq 50 \checkmark$$

$$\frac{D_b}{t_b} = \frac{168.3}{7.44} = 22.6 \leq 0.05\frac{E}{F_y} = 0.05 \times \frac{200000}{275} = 36.4 \checkmark$$

$$0.2 \leq \left(\frac{D_b}{D} = \frac{168.3}{244.5} = 0.69 \right) \leq 1.0 \checkmark$$

$t_{b(\text{üst eleman})} \leq t_{b(\text{alt eleman})} \quad 5.58 \leq 7.44$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8 \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8 \checkmark$$

$$-0.55 \leq \left(\frac{e}{D} = \frac{-38.1}{244.5} = -0.16 \right) \leq 0.25 \checkmark$$

$$l_{ov} = \left(\frac{D_{b1}}{2\sin\theta_{b1}} + \frac{D_{b2}}{2\sin\theta_{b2}} \right) - \left(\frac{e + D/2}{\frac{\sin\theta_{b1}\sin\theta_{b2}}{\sin(\theta_{b1} + \theta_{b2})}} \right) = \left(\frac{168.3}{2\sin 90} + \frac{168.3}{2\sin 45} \right) - \left(\frac{-38.1 + 244.5/2}{\frac{\sin 90 \times \sin 45}{\sin(90+45)}} \right) = 119 \text{ mm}$$

$$l_p = \frac{D_{b2}}{\sin\theta_{b2}} = \frac{168.3}{\sin 45} = 238 \text{ mm}$$

$$O_v = \frac{l_{ov}}{l_p} = \frac{119}{238} \times 100 = 50\%$$

$$25\% \leq (O_v = 50\%) \leq 100\% \checkmark$$

Birleşim uygulama sınırları içerisindedir.

Mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.1 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Basınç etkisindeki Boru 168.3×8 enkesitli örgü elemanı birleşimi için gerekli dayanım	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2\times 90 + 1.6\times 220 = 460\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 90 + 220 = 310\ \text{kN}$
Çekme etkisindeki Boru 168.3×6 enkesitli örgü elemanı birleşimi için gerekli dayanım	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2\times 130 + 1.6\times 320 = 668\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 130 + 320 = 450\ \text{kN}$

K-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

Başlık elemanına bağlanan yüzey çekme etkisinde olduğundan,

$$Q_f = 1.0 \qquad (14.1.5a)$$

$$\gamma = \frac{D}{2t} = \frac{244.5}{2\times 9.3} = 13.1$$

Bindirmeli birleşimi için $g = 0$ alınabilir.

$$Q_g = \gamma^{0.2}\left[1 + \frac{0.024\gamma^{1.2}}{e^{\left(\frac{0.5g}{t} - 1.33\right)} + 1}\right] = 13.1^{0.2}\times\left[1 + \frac{0.024\times 13.1^{1.2}}{e^{\left(\frac{0.5\times 0}{9.3} - 1.33\right)} + 1}\right] = 2.37 \qquad (14.2.6)$$

Basınç altındaki örgü elemanında plastikleşme için karakteristik dayanım

$$\left(P_n \sin\theta\right)_{\text{basınç}} = F_y t^2\left(2.0 + 11.33\frac{D_{\text{b basınç}}}{D}\right)Q_g Q_f \qquad (14.2.4)$$

$$P_n = \frac{1}{\sin 90}\times 275\times 9.3^2\times\left(2.0 + 11.33\times\frac{168.3}{244.5}\right)\times 2.37\times 1.0\times 10^{-3} = 552.36\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9\times 552.36 = 497.12\ \text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{552.36}{1.67} = 330.75\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{460}{497.12} = 0.93 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{310}{330.75} = 0.94 \le 1.0$ ✓

Çekme altındaki örgü elemanında plastikleşme için karakteristik dayanım

$$\left(P_n \sin\theta\right)_{\text{çekme}} = \left(P_n \sin\theta\right)_{\text{basınç}} \qquad (14.2.5)$$

$$P_n = \frac{552.36\times\sin 90}{\sin 45} = 781.16\ \text{kN}$$

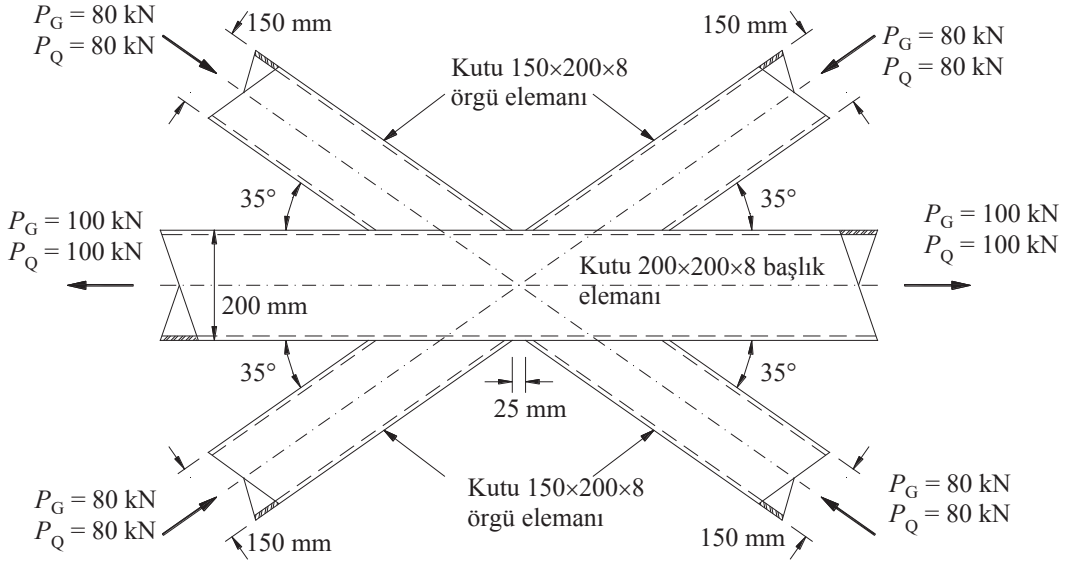
YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9 \times 781.16 = 703.04\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{781.16}{1.67} = 467.76\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{668}{703.04} = 0.95 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{450}{467.76} = 0.96 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.11

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem X-birleşimi, Kutu 200×200×8 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 150×200×8 enkesitli örgü elemanlarından oluşmaktadır. Birleşim, örgü elemanları arasındaki mesafe 25mm olacak şekilde teşkil edilmiştir. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 200×200×8)		
$H = 200$ mm	$B = 200$ mm	$t = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Örgü elemanları (Kutu 150×200×8)		
$H_b = 150$ mm	$B_b = 200$ mm	$t_b = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 35^0 \geq 30^0$ ✓

$\frac{B}{t} = \frac{200}{7.44} = 26.9 \leq 35$ ✓

$\frac{H}{t} = \frac{200}{7.44} = 26.9 \leq 35$ ✓

$\frac{B_b}{t_b} = \frac{200}{7.44} = 26.9 \leq 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \leq 35$ ✓

$\frac{B_b}{t_b} = \frac{200}{7.44} = 26.9 \leq 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \leq 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7$ ✓

$\frac{B_b}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \geq 0.25$ ✓

$\frac{H_b}{B} = \frac{150}{200} = 0.75 \geq 0.25$ ✓

$0.5 \leq \left(\frac{H}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \right) \leq 2.0$ ✓

$0.5 \leq \left(\frac{H_b}{B_b} = \frac{150}{200} = 0.75 \right) \leq 2.0$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

X-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanım	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 80 + 1.6 \times 80 = 224 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 80 + 80 = 160 \text{ kN}$

Başlık elemanı cidarında yerel akma sınır durumu, β = 1.0 için

$$\beta = \frac{B_b}{B} = \frac{200}{200} = 1.0$$

Başlık elemanı cidarında yerel akma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

k = kutu enkesitin dış köşe yarıçapı ≥ 1.5t = 1.5×7.44 = 11.16 mm ✓

$$l_b = 2\left(\frac{H_b}{\sin\theta}\right) + 25 = 2\times\left(\frac{150}{\sin 35}\right) + 25 = 548 \text{ mm}$$

$$P_n \sin\theta = 2F_y t\left(5k + l_b\right) \qquad (14.2.9)$$

$$P_n = \frac{1}{\sin 35}\times 2\times 275\times 7.44\times\left(5\times 11.16 + 548\right)\times 10^{-3} = 4307.6 \text{ kN}$$

$$P_n = \frac{4307.6}{2} = 2153.8 \text{ kN} \quad \text{(her bir örgü elemanı için)}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 1.0\times 2153.8 = 2153.8 \text{ kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{2153.8}{1.5} = 1435.9 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{224}{2153.8} = 0.10 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{160}{1435.9} = 0.11 \le 1.0$ ✓

Başlık elemanı cidarında yerel buruşma sınır durumu

β = 1.0 için ve örgü elemanı basınç etkisinde olduğu durumda

Başlık elemanı cidarında yerel buruşma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

Başlık elemanı çekme altında olduğu için $Q_f = 1.0$ (14.1.5a)

$$P_n \sin\theta = \left(\frac{48t^3}{H - 3t}\right)\sqrt{EF_y}\,Q_f \qquad (14.2.11)$$

$$P_n = \frac{1}{\sin 35}\times\left(\frac{48\times 7.44^3}{200 - 3\times 7.44}\right)\sqrt{200000\times 275}\times 1.0\times 10^{-3} = 1438.5 \text{ kN} \qquad (14.2.11)$$

$$P_n = \frac{1438.5}{2} = 719.3 \text{ kN} \quad \text{(her bir örgü elemanı için)}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9 \times 719.3 = 647.4\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{719.3}{1.67} = 430.7\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{224}{647.4} = 0.35 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{160}{430.7} = 0.37 \le 1.0$ ✓

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma sınır durumu

$\beta = 1.0 > 0.85$ için,

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında karakteristik dayanım

$$b_{eoi} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b}\right) B_b \le B_b \qquad (14.2.13)$$

$$b_{eoi} = \frac{10}{200/7.44}\left(\frac{275 \times 7.44}{275 \times 7.44}\right) \times 200 = 74.4\ \text{mm} \le 200\ \text{mm}$$ ✓

$$P_n = F_{yb} t_b \left(2H_b + 2b_{eoi} - 4t_b\right) \qquad (14.2.12)$$

$$P_n = 275 \times 7.44 \times \left(2 \times 150 + 2 \times 74.4 - 4 \times 7.44\right) \times 10^{-3} = 857.4\ \text{kN}$$

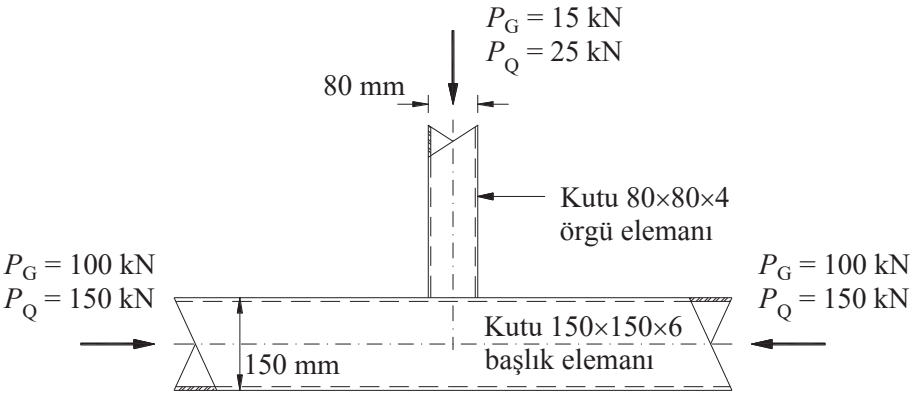
YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95 \times 857.4 = 814.5\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{857.4}{1.58} = 542.7\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{224}{814.5} = 0.28 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{160}{430.7} = 0.29 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.12

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem T-birleşimi, Kutu 150×150×6 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 80×80×4 enkesitli bir örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 150×150×6)
$A_g = 3223$ mm^2 $H = 150$ mm $B = 150$ mm $t = 0.93\times6 = 5.58$ mm

Örgü elemanları (Kutu 80×80×4)
$H_b = 80$ mm $B_b = 80$ mm $t_b = 0.93\times4 = 3.72$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{B}{t} = \frac{H}{t} = \frac{150}{5.58} = 26.9 \leq 35$$ ✓

$$\frac{B_b}{t_b}=\frac{H_b}{t_b}=\frac{80}{3.72}=21.5\le 35\ \checkmark$$

$$\frac{B_b}{t_b}=\frac{H_b}{t_b}=\frac{80}{3.72}=21.5\le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}}=33.7\ \checkmark$$

$$\frac{B_b}{B}=\frac{H_b}{B}=\frac{80}{150}=0.53\ge 0.25\ \checkmark$$

$$0.5\le\left(\frac{H}{B}=\frac{150}{150}=1.0\right)\le 2.0\ \checkmark$$

$$0.5\le\left(\frac{H_b}{B_b}=\frac{80}{80}=1.0\right)\le 2.0\ \checkmark$$

$$F_y=275\text{ MPa}\ \le\ 360\text{ MPa}\ \checkmark$$

$$F_{yb}=275\text{ MPa}\ \le\ 360\text{ MPa}\ \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

T-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanım	
$P_u=1.2P_G+1.6P_Q$ $P_u=1.2\times 15+1.6\times 25=58\text{ kN}$	$P_a=P_G+P_Q$ $P_a=15+25=40\text{ kN}$

Başlık elemanı cidarında plastikleşme sınır durumu

$$\beta=\frac{B_b}{B}=\frac{80}{150}=0.53\le\ 0.85\ \text{için,}$$

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro}=P_u=1.2P_G+1.6P_Q$ $P_{ro}=1.2\times 100+1.6\times 150=360\text{ kN}$	$P_{ro}=P_a=P_G+P_Q$ $P_{ro}=100+150=250\text{ kN}$
$F_c=F_y=275\text{ MPa}$	$F_c=0.6F_y=0.6\times 275=165\text{ MPa}$
$U=\left\lvert\frac{P_{ro}}{F_cA_g}+\frac{M_{ro}}{F_cW_e}\right\rvert$ (14.1.6)	

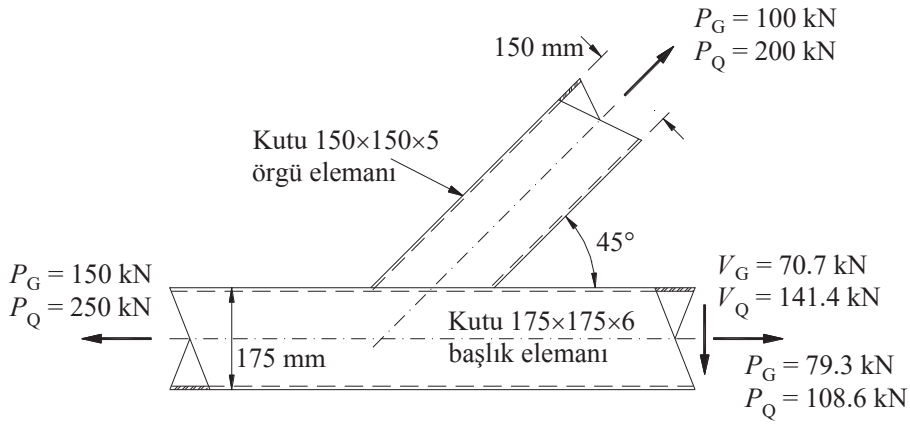
$U=\left\lvert\frac{360\times10^3}{275\times3223}+0\right\rvert=0.41$	$U=\left\lvert\frac{250\times10^3}{165\times3223}+0\right\rvert=0.47$
$Q_f=1.3-0.4\frac{U}{\beta}\le1.0$ (14.1.16)	
$Q_f=1.3-0.4\times\frac{0.41}{0.53}=0.98$	$Q_f=1.3-0.4\times\frac{0.47}{0.53}=0.94$
Başlık elemanı cidarında plastikleşme sınır durumunda karakteristik dayanım, $\beta=0.53\le0.85$ için	
$P_n\sin\theta=F_y t^2\left[\frac{2\eta}{(1-\beta)}+\frac{4}{\sqrt{1-\beta}}\right]Q_f$ (14.2.7)	
$P_n=\frac{1}{\sin90}275\times5.58^2\times0.98\times10^{-3}\times\left[\frac{2\times0.53}{(1-0.53)}+\frac{4}{\sqrt{1-0.53}}\right]=67.9$	$P_n=\frac{1}{\sin90}275\times5.58^2\times0.94\times10^{-3}\times\left[\frac{2\times0.53}{(1-0.53)}+\frac{4}{\sqrt{1-0.53}}\right]=65.1\,\text{kN}$
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d=\phi P_n=1.0\times67.9=67.9\ \text{kN}$	$P_g=\frac{P_n}{\Omega}=\frac{65.1}{1.5}=43.4\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d}=\frac{58}{67.9}=0.85\le1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g}=\frac{40}{43.4}=0.92\le1.0$ ✓

Örnek 14.13

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem Y-birleşimi, Kutu 175×175×6 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 150×150×5 enkesitli bir örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 175×175×6)		
$H = 175$ mm	$B = 175$ mm	$t = 0.93\times6 = 5.58$ mm

Örgü elemanı (Kutu 150×150×5)		
$H_b = 150$ mm	$B_b = 150$ mm	$t_b = 0.93\times5 = 4.65$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 45^0 \geq 30^0$ ✓

$$\frac{B}{t} = \frac{H}{t} = \frac{175}{5.58} = 31.4 \leq 35 \checkmark$$

$$\frac{B_b}{t_b}=\frac{H_b}{t_b}=\frac{150}{4.65}=32.3\le 35\ \checkmark$$

$$\frac{B_b}{B}=\frac{H_b}{B}=\frac{150}{175}=0.86\ge 0.25\ \checkmark$$

$$0.5\le\left(\frac{H}{B}=\frac{175}{175}=1.0\right)\le 2.0\ \checkmark$$

$$0.5\le\left(\frac{H_b}{B_b}=\frac{150}{150}=1.0\right)\le 2.0\ \checkmark$$

$$F_y=275\text{ MPa}\ \le\ 360\text{ MPa}\ \checkmark$$

$$F_{yb}=275\text{ MPa}\ \le\ 360\text{ MPa}\ \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}}=\frac{275}{430}=0.64\le 0.8\ \checkmark$$

Y-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup, mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanım	
$P_u=1.2P_G+1.6P_Q$ $P_u=1.2\times100+1.6\times200=440\text{ kN}$	$P_a=P_G+P_Q$ $P_a=100+200=300\text{ kN}$

Kayma etkisinde akma (zımbalama) sınır durumu

$$\beta=\frac{B_b}{B}=\frac{150}{175}=0.86$$

$$\gamma=\frac{B}{2t}=\frac{175}{2\times5.58}=15.7$$

$$0.85\le(\beta=0.86)\le 1-\frac{1}{\gamma}=1-\frac{1}{15.7}=0.94\ \text{ durumu için,}$$

$$l_b=\frac{H_b}{\sin\theta}=\frac{150}{\sin45}=212.1\text{ mm}$$

$$\eta=\frac{l_b}{B}=\frac{212.1}{175}=1.21$$

$$\beta_{eop}=\frac{5\beta}{\gamma}=\frac{5\times0.86}{15.7}=0.27\le\beta=0.86 \qquad (14.2.25)$$

Kayma etkisinde akma (zımbalama) sınır durumunda karakteristik dayanımı

$$P_n \sin\theta = 0.6 F_y t B \left(2\eta + 2\beta_{eop}\right) \qquad (14.2.8)$$

$$P_n = \frac{1}{\sin 45} \times 0.6 \times 275 \times 5.58 \times 175 \times \left(2 \times 1.21 + 2 \times 0.27\right) \times 10^{-3} = 674.47 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95 \times 674.47 = 640.75$ kN	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{674.47}{1.58} = 426.88$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{440}{640.75} = 0.69 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{300}{426.88} = 0.70 \le 1.0$ ✓

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma sınır durumu,

$\beta = 0.86 > 0.85$ olduğu durum için,

$$b_{eoi} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b}\right) B_b \le B_b \qquad (14.2.13)$$

$$b_{eoi} = \frac{10}{175/5.58}\left(\frac{275 \times 5.58}{275 \times 4.65}\right) \times 150 = 57.4 \text{ mm} \le 150 \text{ mm}$$

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanında yerel akma sınır durumunda karakteristik dayanım

$$P_n = F_{yb} t_b \left(2H_b + 2b_{eoi} - 4t_b\right) \qquad (14.2.12)$$

$$P_n = 275 \times 4.65 \times \left(2 \times 150 + 2 \times 57.4 - 4 \times 4.65\right) \times 10^{-3} = 506.6 \text{ kN}$$

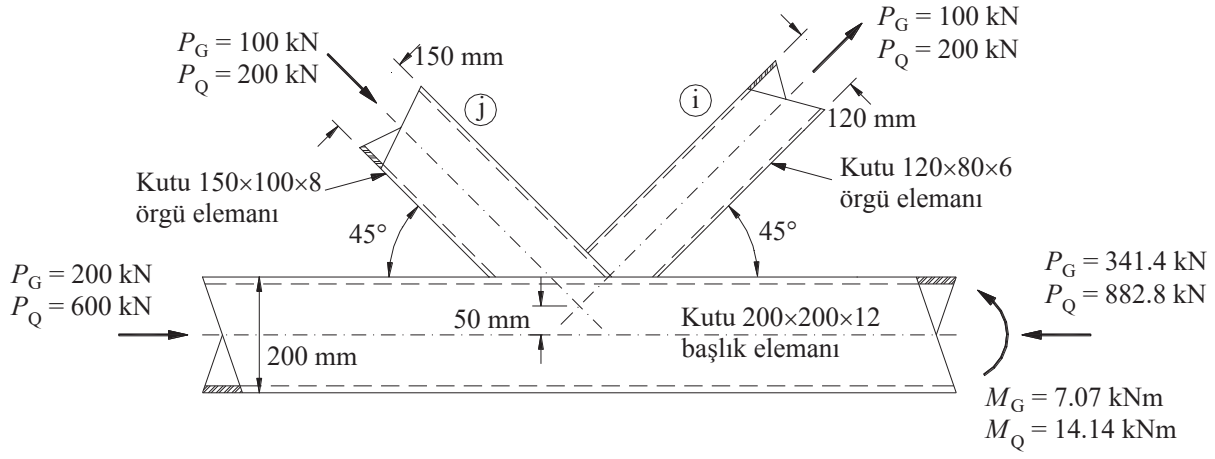
YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvvet dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95 \times 506.6 = 481.3$ kN	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{506.6}{1.58} = 320.6$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{440}{481.3} = 0.91 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{300}{320.6} = 0.94 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.14

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem K-birleşimi, Kutu 200×200×12 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 150×100×8 ve Kutu 120×80×6 enkesitli iki örgü elemanından oluşmaktadır. Basınç etkisindeki örgü elemanı kuvveti ile çekme etkisindeki örgü elemanı kuvvetinin düşey bileşenleri arasındaki fark %20 oranını aşmamaktadır. Birleşimin geometrisi nedeniyle başlık elemanı ile örgü elemanlarının eksenleri arasında meydana gelen dışmerkezlik, başlık elemanında bir eğilme momenti oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 200×200×12)
$A_g = 7821$ mm^2 $H = 200$ mm $B = 200$ mm $t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Örgü elemanı (Kutu 120×80×6)
$A_{bi} = 2009$ mm^2 $H_{bi} = 120$ mm $B_{bi} = 80$ mm $t_{bi} = 0.93\times6 = 5.58$ mm

Örgü elemanı (Kutu 150×100×8)			
$A_{bj} = 3274\ mm^2$	$H_{bj} = 150\ mm$	$B_{bj} = 100\ mm$	$t_{bj} = 0.93\times8 = 7.44\ mm$

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$e = -50\ mm$

$$l_{ov} = \left(\frac{H_{bj}}{2\sin\theta_{bj}} + \frac{H_{bi}}{2\sin\theta_{bi}}\right) - \left(\frac{e + H/2}{\frac{\sin\theta_{bj}\sin\theta_{bi}}{\sin\left(\theta_{bj} + \theta_{bi}\right)}}\right)$$

$$l_{ov} = \left(\frac{150}{2\sin45} + \frac{120}{2\sin45}\right) - \left(\frac{-50 + 200/2}{\frac{\sin45\times\sin45}{\sin\left(45+45\right)}}\right) = 90.92\ mm$$

$$l_p = \frac{120}{\sin 45} = 169.71\,mm$$

$$O_v = \frac{l_{ov}}{l_p} = \frac{90.92}{169.71}\times100 = \%54$$

$$\%25 \le \left(O_v = \%54\right) \le \%100\ \checkmark$$

$$\theta_{bi} = \theta_{bj} = 45^0 \ge 30^0\ \checkmark$$

$$\frac{B}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \le 30\ \checkmark$$

$$\frac{H}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \le 35\ \checkmark$$

Çekme etksindeki Kutu 120×80×6 enkesitli örgü elemanı

$$\frac{B_{bi}}{t_{bi}} = \frac{80}{5.58} = 14.3 \le 35\ \checkmark$$

$$\frac{H_{bi}}{t_{bi}} = \frac{120}{5.58} = 21.5 \le 35\ \checkmark$$

Basınç etkisindeki Kutu 150×100×8 enkesitli örgü elemanı

$$\frac{B_{bj}}{t_{bj}} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 1.1\sqrt{\frac{200000}{275}} = 29.7\ \checkmark$$

$$\frac{H_{bj}}{t_{bj}} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 1.1\sqrt{\frac{200000}{275}} = 29.7\ \checkmark$$

$$\frac{B_{bi}}{B} = \frac{80}{200} = 0.4 \geq 0.25 \checkmark$$

$$\frac{H_{bi}}{B} = \frac{120}{200} = 0.6 \geq 0.25 \checkmark$$

$$\frac{B_{bj}}{B} = \frac{100}{200} = 0.5 \geq 0.25 \checkmark$$

$$\frac{H_{bj}}{B} = \frac{150}{200} = 0.75 \geq 0.25 \checkmark$$

$$0.5 \leq \left(\frac{H}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \right) \leq 2.0 \checkmark$$

$$0.5 \leq \left(\frac{H_{bi}}{B_{bi}} = \frac{120}{80} = 1.5 \right) \leq 2.0 \checkmark$$

$$0.5 \leq \left(\frac{H_{bj}}{B_{bj}} = \frac{150}{100} = 1.5 \right) \leq 2.0 \checkmark$$

$$\frac{B_{bi}}{B_{bj}} = \frac{80}{100} = 0.8 \geq 0.75 \checkmark$$

$$\frac{t_{bi}}{t_{bj}} = \frac{5.58}{7.44} = 0.75 \leq 1.0 \checkmark$$

$$F_y = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8 \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8 \checkmark$$

Bindirmeli K-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanlarının birleşimleri için gerekli dayanımlar	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 100 + 1.6 \times 200 = 440 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 100 + 200 = 300 \text{ kN}$

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma sınır durumu

$$b_{\text{eoi}} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_{\text{y}}t}{F_{\text{ybi}}t_{\text{bi}}}\right)B_{\text{bi}} \le B_{\text{bi}} \qquad (14.2.20)$$

$$b_{\text{eoi}} = \frac{10}{200/11.16}\left(\frac{275\times11.16}{275\times5.58}\right)\times 80 = 89.28 \le 80\ \text{mm}$$

$$b_{\text{eov}} = \frac{10}{B_{\text{bj}}/t_{\text{bj}}}\left(\frac{F_{\text{ybj}}t_{\text{bj}}}{F_{\text{ybj}}t_{\text{bi}}}\right)B_{\text{bi}} \le B_{\text{bi}} \qquad (14.2.21)$$

$$b_{\text{eov}} = \frac{10}{100/7.44}\left(\frac{275\times7.44}{275\times5.58}\right)\times 80 = 79.36 \le 80\ \text{mm}$$

$\%50 \le (O_v = \%54) \le \%80$ olduğundan,

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında karakteristik dayanım

$$P_{\text{n,i}} = F_{\text{ybi}}t_{\text{bi}}\left[2H_{\text{bi}} - 4t_{\text{bi}} + b_{\text{eoi}} + b_{\text{eov}}\right] \qquad (14.2.18)$$

$$P_{\text{n,i}} = 275\times5.58\times\left[2\times120 - 4\times5.58 + 80 + 79.36\right]\times10^{-3} = 578.57\ \text{kN}$$

$$P_{\text{n,j}} = P_{\text{n,i}}\left(\frac{F_{\text{ybj}}A_{\text{bj}}}{F_{\text{ybi}}A_{\text{bi}}}\right) = 578.57\times\left(\frac{275\times3274}{275\times2009}\right) = 942.88\ \text{kN} \qquad (14.2.22)$$

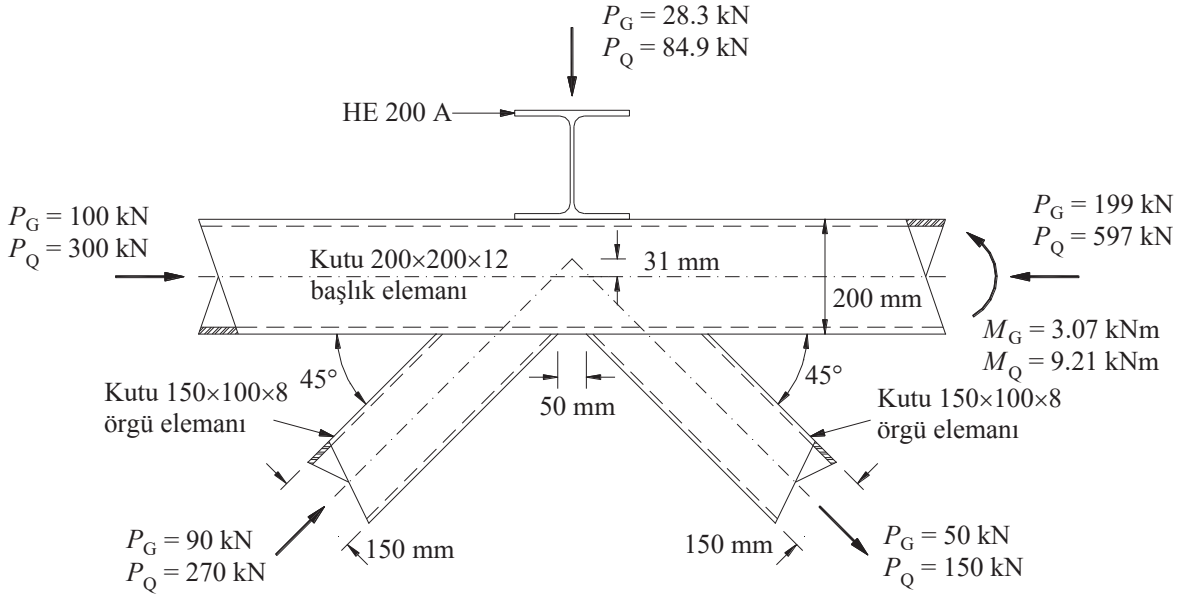
YDKT	GKT
a. Örgü elemanı, (*i*) için tasarım eksenel kuvvet dayanımını kontrolü	**b.** Örgü elemanı (*i*) için güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_{\text{d}} = P_{\text{n}} = 0.95\times578.57 = 549.64\ \text{kN}$	$P_{\text{g}} = \frac{P_{\text{n}}}{\Omega} = \frac{578.57}{1.58} = 366.18\ \text{kN}$
$\frac{P_{\text{u}}}{P_{\text{d}}} = \frac{440}{549.64} = 0.80 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_{\text{a}}}{P_{\text{g}}} = \frac{300}{366.18} = 0.82 \le 1.0$ ✓
a. Örgü elemanı, (*j*) için tasarım eksenel kuvvet dayanımının kontrolü	**b.** Örgü elemanı, (*j*) için güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_{\text{d}} = \phi P_{\text{n}} = 0.95\times942.88 = 895.74\ \text{kN}$	$P_{\text{g}} = \frac{P_{\text{n}}}{\Omega} = \frac{942.88}{1.58} = 596.76\ \text{kN}$
$\frac{P_{\text{u}}}{P_{\text{d}}} = \frac{440}{895.74} = 0.49 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_{\text{a}}}{P_{\text{g}}} = \frac{300}{596.76} = 0.50 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.15

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem birleşimi, Kutu 200×200×12 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 150×100×8 enkesitli iki örgü elemanından oluşmaktadır. Basınç etkisindeki örgü elemanı kuvveti ile çekme etkisindeki örgü elemanı kuvvetinin düşey bileşenleri arasındaki fark %20 oranını aştığından birleşim, hem ara uzaklıklı K-birleşimi hem de X-birleşimi olarak incelenmelidir. Birleşimin geometrisi nedeniyle başlık elemanı ile örgü elemanlarının eksenleri arasında meydana gelen dışmerkezlik, başlık elemanında bir eğilme momenti oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 200×200×12)			
$A_g = 7821$ mm^2	$H = 200$ mm	$B = 200$ mm	$t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Çekme örgü elemanı (Kutu 150×100×8)			
$A_b = 3274$ mm^2	$H_b = 150$ mm	$B_b = 100$ mm	$t_b = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Basınç örgü elemanı (Kutu 150×100×8)			
$A_b = 3274\ mm^2$	$H_b = 150\ mm$	$B_b = 100\ mm$	$t_b = 0.93\times8 = 7.44\ mm$

Çözüm

$$P_{\text{basınç örgü elemanı}} = 90 + 270 = 360\ \text{kN}$$

$$P_{\text{çekme örgü elemanı}} = 50 + 150 = 200\ \text{kN}$$

Birleşimin sınıflandırılması

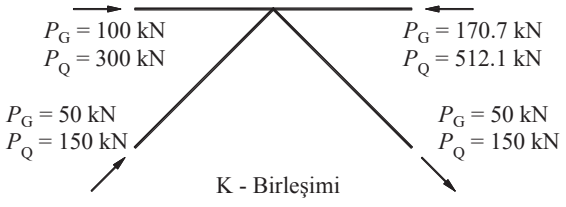
Yönetmelik 14.2(b) uyarınca,

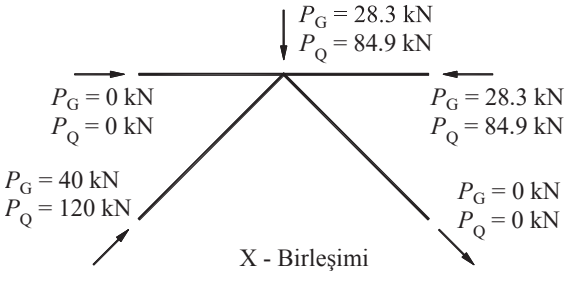
$$0.8 \le \frac{P_{\text{basınç örgü elemanı}} \sin\theta_{\text{basınç örgü elemanı}}}{P_{\text{çekme örgü elemanı}} \sin\theta_{\text{çekme örgü elemanı}}} \le 1.2$$

$$0.8 \le \frac{(360)(\sin 45)}{(200)(\sin 45)} = 1.80 \le 1.2\ \times$$

Yönetmelik 14.2(b) ve 14.2(c) uyarınca birleşim, K-birleşimi ve X-birleşiminin bir kombinasyonu olarak dikkate alınmalıdır. Böylece birleşim için verilen başlangıçtaki kuvvet dağılımı, her iki birleşim tipi (K- ve X-birleşimleri) için hesaplanan değerlerin toplamına eşittir.

Birleşime etkiyen yüklerin ara uzaklıklı K-birleşimi ve X-birleşimi için tanımlanması





Ara uzaklıklı K-birleşimi olarak inceleme

$$e = \frac{(\sin 45)^2}{\sin 90}\left(\frac{150}{2\sin 45} + \frac{150}{2\sin 45} + 50\right) - \frac{200}{2} = 31\,\text{mm}$$

$$-0.55 \le \left(\frac{e}{H} = \frac{31}{200} = 0.16\right) \le 0.25\ \checkmark$$

$$\theta_{b1} = \theta_{b2} = 45^0 \ge 30^0\ \checkmark$$

$$\frac{B}{t} = \frac{H}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \le 35\ \checkmark$$

Çekme etkisindeki örgü elemanı

$$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 35 \checkmark$$

$$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 35 \checkmark$$

Basınç etkisindeki örgü elemanı

$$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 35 \checkmark$$

$$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 35 \checkmark$$

$$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7 \checkmark$$

$$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7 \checkmark$$

$$0.5 \le \left(\frac{H}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \right) \le 2.0 \checkmark$$

$$0.5 \le \left(\frac{H_b}{B_b} = \frac{150}{100} = 1.5 \right) \le 2.0 \checkmark$$

$$\gamma = \frac{B}{2t} = \frac{200}{2 \times 11.16} = 8.96$$

$$\frac{B_b}{B} = \frac{100}{200} = 0.5 \ge 0.1 + \frac{\gamma}{50} = 0.1 + \frac{8.96}{50} = 0.28 \checkmark$$

$$\frac{H_b}{H} = \frac{150}{200} = 0.75 \ge 0.1 + \frac{\gamma}{50} = 0.1 + \frac{8.96}{50} = 0.28 \checkmark$$

$$\beta_{ef} = \left[\left(B_b + H_b \right)_{\text{basınç örgü elemanı}} + \left(B_b + H_b \right)_{\text{çekme örgü elemanı}} \right] / 4B$$

(14.2.4)

$$\beta_{ef} = \left[\left(100 + 150 \right) + \left(100 + 150 \right) \right] / \left(4 \times 200 \right) = 0.63 \ge 0.35 \checkmark$$

$$\varsigma = \frac{g}{B} = \frac{50}{200} = 0.25 \ge 0.5\left(1 - \beta_{ef} \right) = 0.5 \times \left(1 - 0.63 \right) = 0.19 \checkmark$$

$$g = 50 \ge t_{\text{b basinc}} + t_{\text{b çekme}} = 7.44 + 7.44 = 14.88 \checkmark$$

$$\left(B_b \right)_{\text{küçük eleman}} = 100 \ge 0.63 \times \left(B_b \right)_{\text{büyük eleman}} = 0.63 \times 100 = 63 \checkmark$$

$$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

Birleşim ara uzaklıklı K-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Basınç ve çekme etkisi altındaki örgü elemanları için gerekli dayanımlar	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 50 + 1.6 \times 150 = 300\,\text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 50 + 150 = 200\,\text{kN}$

Başlık elemanı cidarında plastikleşme sınır durumu

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımı, P_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 170.7 + 1.6 \times 512.1 = 1024\,\text{kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 170.7 + 512.1 = 683\,\text{kN}$
$F_c = F_y = 275\,\text{MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165\,\text{MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{1024 \times 10^3}{275 \times 7821} + 0 \right\rvert = 0.48$	$U = \left\lvert \frac{683 \times 10^3}{165 \times 7821} + 0 \right\rvert = 0.53$
$Q_f = 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta_{ef}} \le 1.0$ (14.2.23)	
$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.48}{0.63} \approx 1.0$	$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.53}{0.63} = 0.96$
Başlık elemanı cidarında plastikleşme için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı	
$P_n \sin\theta = F_y t^2 \left(9.8\beta_{ef}\gamma^{0.5}\right) Q_f$ (14.2.14)	
$P_n = \frac{1}{\sin 45} \times 275 \times 11.16^2 \times$ $\left(9.8 \times 0.63 \times 8.96^{0.5}\right) \times 1.0 \times 10^{-3} = 895.15\,\text{kN}$	$P_n = \frac{1}{\sin 45} \times 275 \times 11.16^2 \times$ $\left(9.8 \times 0.63 \times 8.96^{0.5}\right) \times 0.96 \times 10^{-3} = 859.35\,\text{kN}$
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9 \times 895.16 = 805.64\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{859.35}{1.67} = 514.58\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{300}{805.64} = 0.37 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{200}{514.58} = 0.39 \le 1.0 \checkmark$

Kayma etkisinde akma (zımbalama) sınır durumu

$B_b = 100 \le B - 2t = 200 - 2\times 11.16 = 177.68$ mm olduğundan,

$$\beta = \frac{B_b}{B} = \frac{100}{200} = 0.5$$

$$\beta_{eop} = \frac{5\beta}{\gamma} = \frac{5\times 0.5}{8.96} = 0.28 \le \beta = 0.5 \qquad (14.2.25)$$

$$l_b = \frac{H_b}{\sin\theta} = \frac{150}{\sin 45} = 212.13 \text{ mm} \qquad \eta = \frac{l_b}{B} = \frac{212.13}{200} = 1.06$$

Kayma etkisinde akma (zımbalama) için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

$$P_n \sin\theta = 0.6 F_y t B\left(2\eta + \beta + \beta_{eop}\right) \qquad (14.2.15)$$

$$P_n = \frac{1}{\sin 45}\times 0.6\times 275\times 11.16\times 200\times\left(2\times 1.06 + 0.5 + 0.28\right)\times 10^{-3} = 1510.4 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95\times 1510.4 = 1434.9$ kN	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{1510.4}{1.58} = 955.9$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{300}{1434.9} = 0.21 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{200}{955.9} = 0.21 \le 1.0$ ✓

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma sınır durumu

$\frac{B}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.92 \ge 15$ kontrole gerek yoktur

X-birleşimi olarak inceleme

$\theta_{b1} = \theta_{b2} = 45^0 \ge 30^0$ ✓

$$\frac{B}{t} = \frac{H}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \le 35$$ ✓

Çekme etkisindeki örgü elemanı

$$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 35$$ ✓

$$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 35$$ ✓

Basınç etkisindeki örgü elemanı

$$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 35$$ ✓

$$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 35 \checkmark$$

$$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{7.44} = 13.4 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7 \checkmark$$

$$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7 \checkmark$$

$$\frac{B_b}{B} = \frac{100}{200} = 0.5 \ge 0.25 \checkmark$$

$$\frac{H_b}{B} = \frac{150}{200} = 0.75 \ge 0.25 \checkmark$$

$$0.5 \le \left(\frac{H}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \right) \le 2.0 \checkmark$$

$$0.5 \le \left(\frac{H_b}{B_b} = \frac{150}{100} = 1.5 \right) \le 2.0 \checkmark$$

$$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa} \checkmark$$

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

$$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8 \checkmark$$

Birleşim, X-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanının gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 40 + 1.6 \times 120 = 240 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 40 + 120 = 160 \text{ kN}$

Başlık elemanı cidarında plastikleşme sınır durumu,

$\beta \le 0.85$ için

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımı, P_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 28.3 + 1.6 \times 84.9 = 169.8\,\text{kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 28.3 + 84.9 = 113.2\,\text{kN}$
$F_c = F_y = 275\,\text{MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165\,\text{MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{169.8 \times 10^3}{275 \times 7821} + 0 \right\rvert = 0.08$	$U = \left\lvert \frac{113.2 \times 10^3}{165 \times 7821} + 0 \right\rvert = 0.09$
$Q_f = 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \le 1.0$ (14.1.16)	
$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.08}{0.5} = 1.24 \ge 1.0$ $Q_f = 1.0$	$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.09}{0.5} = 1.23 \ge 1.0$ $Q_f = 1.0$
Başlık elemanı cidarında plastikleşme için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı	
$P_n \sin\theta = F_y t^2 \left[\frac{2\eta}{(1-\beta)} + \frac{4}{\sqrt{1-\beta}} \right] Q_f$ (14.2.7)	
$P_n \sin\theta = \frac{1}{\sin 45} \times 275 \times 11.16^2 \times$ $\left[\frac{2 \times 1.06}{(1-0.5)} + \frac{4}{\sqrt{1-0.5}} \right] \times 1.0 \times 10^{-3} = 479.4\,\text{kN}$	$P_n \sin\theta = \frac{1}{\sin 45} \times 275 \times 11.16^2 \times$ $\left[\frac{2 \times 1.06}{(1-0.5)} + \frac{4}{\sqrt{1-0.5}} \right] \times 1.0 \times 10^{-3} = 479.4\,\text{kN}$
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 1.0 \times 479.4 = 479.4\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{479.4}{1.5} = 319.6\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{240}{479.4} = 0.50 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{160}{319.6} = 0.50 \le 1.0$ ✓

Birleşimin ara uzaklıklı K-birleşimi ve X-birleşimi olarak *Yönetmelik* 14.2 uyarınca kontrolü

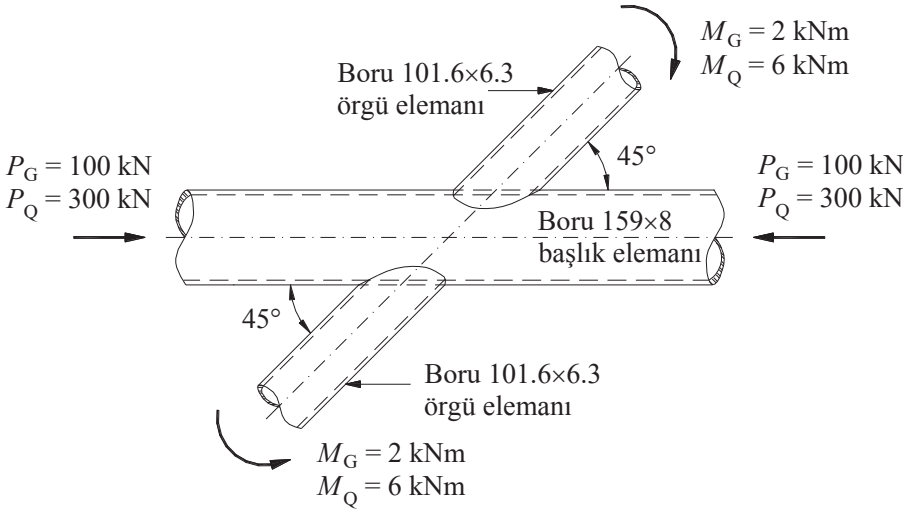
YDKT	GKT
a. Birleşimin eksenel yük etkisi altında kontrolü (basınç elemanı)	**b.** Birleşimin eksenel yük etkisi altında kontrolü (basınç elemanı)
$\left(\frac{P_u}{P_d}\right)_{\text{K-birleşimi}} + \left(\frac{P_u}{P_d}\right)_{\text{X-birleşimi}} =$ $0.37 + 0.50 = 0.87 \le 1.0$ ✓	$\left(\frac{P_a}{P_g}\right)_{\text{K-birleşimi}} + \left(\frac{P_a}{P_g}\right)_{\text{X-birleşimi}} =$ $0.37 + 0.50 = 0.87 \le 1.0$ ✓
a. Birleşimin eksenel yük etkisi altında kontrolü (çekme elemanı)	**b.** Birleşimin eksenel yük etkisi altında kontrolü (çekme elemanı)
$\left(\frac{P_u}{P_d}\right)_{\text{K-birleşimi}} + \left(\frac{P_u}{P_d}\right)_{\text{X-birleşimi}} =$ $0 + 0.50 = 0.50 \le 1.0$ ✓	$\left(\frac{P_a}{P_g}\right)_{\text{K-birleşimi}} + \left(\frac{P_a}{P_g}\right)_{\text{X-birleşimi}} =$ $0 + 0.50 = 0.50 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.16

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen boru-boru eleman kafes sistem X-birleşimi, Boru 159×8 enkesitli bir başlık elemanı ile Boru 101.6×6.3 enkesitli iki örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Eğilme momenti etkisinde birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Eğilme momenti etkisinde birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Boru 159×8)		
$A_g = 3542$ mm^2	$D = 159$ mm	$t = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Örgü elemanları (Boru 101.6×6.3)	
$D_b = 101.6$ mm	$t_b = 0.93\times6.3 = 5.86$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.3.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 45^0 \geq 30^0$ ✓

$\frac{D}{t} = \frac{159}{7.44} = 21.4 \leq 40$ ✓

$\frac{D_b}{t_b} = \frac{101.6}{5.86} = 17.3 \leq 50$ ✓

$\frac{D_b}{t_b} = \frac{101.6}{5.86} = 17.3 \leq 0.05\frac{E}{F_y} = 0.05 \times \frac{200000}{275} = 36.4$ ✓

$0.2 \leq \left(\frac{D_b}{D} = \frac{101.6}{159} = 0.64 \right) \leq 1.0$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

X-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eğilme momenti dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.3.1 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşimi için gerekli dayanım	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_u = 1.2 \times 2 + 1.6 \times 6 = 12 \text{ kNm}$	$M_a = M_G + M_Q$ $M_a = 2 + 6 = 8 \text{ kNm}$

X-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2\times100 + 1.6\times300 = 600\,\text{kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 100 + 300 = 400\,\text{kN}$
$M_{ro} = 0$	$M_{ro} = 0$
$F_c = F_y = 275\,\text{MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6\times275 = 165\,\text{MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{600\times10^3}{275\times3542} + 0 \right\rvert = 0.62$	$U = \left\lvert \frac{400\times10^3}{165\times3542} + 0 \right\rvert = 0.69$
$Q_f = 1.0 - 0.3U(1+U)$ (14.1.5b)	
$Q_f = 1.0 - 0.3\times0.62\times(1+0.62) = 0.70$	$Q_f = 1.0 - 0.3\times0.69\times(1+0.69) = 0.65$
Başlık elemanında plastikleşme için karakteristik eğilme momenti dayanımı	
$\beta = \frac{D_b}{D} = \frac{101.6}{159} = 0.64$ $\gamma = \frac{D}{2t} = \frac{159}{2\times7.44} = 10.7$ $M_n \sin\theta = 5.39F_y t^2 \gamma^{0.5} \beta D_b Q_f$ (14.3.1)	
$M_n = \frac{1}{\sin45} 5.39\times275\times7.44^2\times10.7^{0.5}\times$ $0.64\times101.6\times0.70\times10^{-6} = 17.3\,\text{kNm}$	$M_n = \frac{1}{\sin45} 5.39\times275\times7.44^2\times10.7^{0.5}\times$ $0.64\times101.6\times0.65\times10^{-6} = 16.0\,\text{kNm}$
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 0.9\times17.3 = 15.57$ kNm	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{16.0}{1.67} = 9.58\,\text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{12}{15.57} = 0.77 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{8}{9.58} = 0.84 \le 1.0$ ✓

X-birleşimi için için kayma etkisinde akma sınır durumu

$D_b \le (D - 2t)$ koşulunun sağlanması gerekmektedir

$101.6 \le (159 - 2\times7.44) = 144.1$ ✓

Başlık elemanında kayma etkisinde akma için karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = 0.6F_y t D_b^2 \left(\frac{1+3\sin\theta}{4\sin^2\theta} \right) \qquad (14.3.2)$$

$$M_n = 0.6 \times 275 \times 7.44 \times 101.6^2 \times \left(\frac{1+3\sin 45}{4\sin^2 45} \right) \times 10^{-6} = 19.8\,\text{kNm}$$

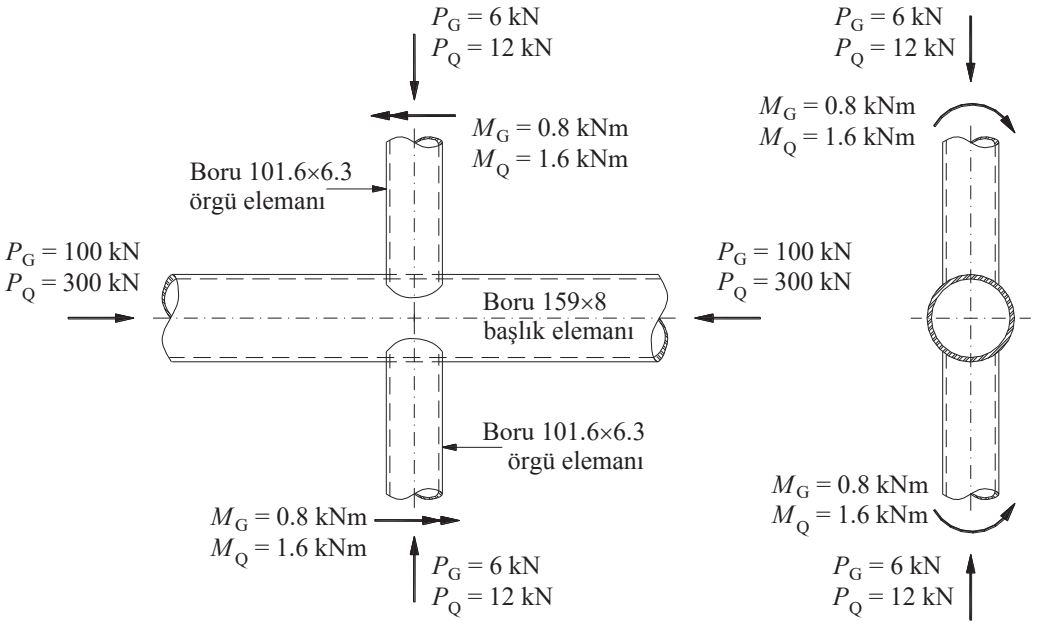
YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 0.95 \times 19.8 = 18.8\,\text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{19.8}{1.58} = 12.5\,\text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{12}{18.8} = 0.64 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{8}{12.5} = 0.64 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.17

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen boru-boru eleman kafes sistem X-birleşimi, Boru 159×8 enkesitli bir başlık elemanı ile Boru 101.6×6.3 enkesitli iki örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Eğilme momenti etkisinde birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Eğilme momenti etkisinde birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Boru elemenlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Boru 159×8)
$A_g = 3542$ mm^2 $D = 159$ mm $t = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Örgü elemanları (Boru 101.6×6.3)
$D_b = 101.6$ mm $t_b = 0.93\times6.3 = 5.86$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.1A ve Tablo 14.3.1A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0$ ✓

$\frac{D}{t} = \frac{159}{7.44} = 21.4 \leq 40$ ✓

$\frac{D_b}{t_b} = \frac{101.6}{5.86} = 17.3 \leq 50$ ✓

$\frac{D_b}{t_b} = \frac{101.6}{5.86} = 17.3 \leq 0.05\frac{E}{F_y} = 0.05 \times \frac{200000}{275} = 36.4$ ✓

$0.2 \leq \left(\frac{D_b}{D} = \frac{101.6}{159} = 0.64 \right) \leq 1.0$ ✓

$F_y = 275$ MPa $\leq$ 360 MPa ✓

$F_{yb} = 275$ MPa $\leq$ 360 MPa ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

X-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.1 ve mevcut eğilme momenti dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.3.1 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanı birleşiminin gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 6 + 1.6 \times 12 = 26.4$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 6 + 12 = 18$ kN
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_u = 1.2 \times 0.8 + 1.6 \times 1.6 = 3.52$ kNm	$M_a = M_G + M_Q$ $M_a = 0.8 + 1.6 = 2.4$ kNm

Yönetmelik Tablo 14.2.1 uyarınca mevcut eksenel kuvvet dayanımlarının kontrolü aşağıda verilmiştir.

X-birleşimi için kayma etkisinde akma sınır durumu

$D_b \leq (D - 2t)$ koşulunun sağlanması gerekmektedir

$101.6 \leq (159 - 2 \times 7.44) = 144.1$ ✓

Başlık elemanında kayma etkisinde akma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

$$P_n = 0.6F_y t \pi D_b \left(\frac{1 + \sin\theta}{2\sin^2\theta} \right) \qquad (14.2.1)$$

$$P_n = 0.6 \times 275 \times 7.44 \times \pi \times 101.6 \times \left(\frac{1 + \sin 90}{2\sin^2 90} \right) \times 10^{-3} = 391.8 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95 \times 391.8 = 372.2\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{391.8}{1.58} = 248.0\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{26.4}{372.2} = 0.07 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{18}{248.0} = 0.07 \le 1.0$ ✓

X-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 100 + 1.6 \times 300 = 600\,\text{kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 100 + 300 = 400\,\text{kN}$
$M_{ro} = 0$	$M_{ro} = 0$
$F_c = F_y = 275\,\text{MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165\,\text{MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{600 \times 10^3}{275 \times 3542} + 0 \right\rvert = 0.62$	$U = \left\lvert \frac{400 \times 10^3}{165 \times 3542} + 0 \right\rvert = 0.69$
$Q_f = 1.0 - 0.3U(1+U)$ (14.1.5b)	
$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.62 \times (1 + 0.62) = 0.70$	$Q_f = 1.0 - 0.3 \times 0.69 \times (1 + 0.69) = 0.65$
Başlık elemanında plastikleşme için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı	
$P_n = \frac{1}{\sin\theta} F_y t^2 \left(3.1 + 15.6\beta^2\right) \gamma^{0.2} Q_f$ (14.2.2) $\beta = \frac{D_b}{D} = \frac{101.6}{159} = 0.64$ $\gamma = \frac{D}{2t} = \frac{159}{2 \times 7.44} = 10.7$	
$P_n = \frac{1}{\sin 90} 275 \times 7.44^2 \left(3.1 + 15.6 \times 0.64^2\right) \times$ $10.7^{0.2} \times 0.70 \times 10^{-3} = 162.4\,\text{kN}$	$P_n = \frac{1}{\sin 90} 275 \times 7.44^2 \left(3.1 + 15.6 \times 0.64^2\right) \times$ $10.7^{0.2} \times 0.65 \times 10^{-3} = 150.8\,\text{kN}$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.9 \times 162.4 = 146.2\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{150.8}{1.67} = 90.3\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{26.4}{146.2} = 0.18 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{18}{90.3} = 0.20 \le 1.0$ ✓

Yönetmelik Tablo 14.3.1 uyarınca mevcut eğilme momenti dayanımlarının kontrolü aşağıda verilmiştir.

X-birleşimi için başlık elemanında plastikleşme sınır durumu

Başlık elemanında plastikleşme için karakteristik eğilme momenti dayanımı	
$M_n \sin\theta = F_y t^2 D_b \left(\frac{3.0}{1-0.81\beta}\right) Q_f$ (14.3.3)	
$M_n = \frac{1}{\sin 90} \times 275 \times 7.44^2 \times 101.6 \times \left(\frac{3.0}{1-0.81\times 0.64}\right) \times 0.70 \times 10^{-6} = 6.74\,\text{kNm}$	$M_n = \frac{1}{\sin 90} \times 275 \times 7.44^2 \times 101.6 \times \left(\frac{3.0}{1-0.81\times 0.64}\right) \times 0.65 \times 10^{-6} = 6.26\,\text{kNm}$
YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 0.9 \times 6.74 = 6.07\,\text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{6.26}{1.67} = 3.75\,\text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{3.52}{6.07} = 0.58 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{2.4}{3.75} = 0.64 \le 1.0$ ✓

X-birleşimi için kayma etkisinde akma kontrolü

$D_b \le (D - 2t)$ koşulunun sağlanması gerekmektedir

$101.6 \le (159 - 2 \times 7.44) = 144.1$ ✓

Başlık elemanında kayma etkisinde akma için karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = 0.6 F_y t D_b^2 \left(\frac{3 + \sin\theta}{4\sin^2\theta}\right) \quad (14.3.4)$$

$$M_n = 0.6 \times 275 \times 7.44 \times 101.6^2 \times \left(\frac{3 + \sin 90}{4\sin^2 90}\right) \times 10^{-6} = 12.67\,\text{kNm}$$

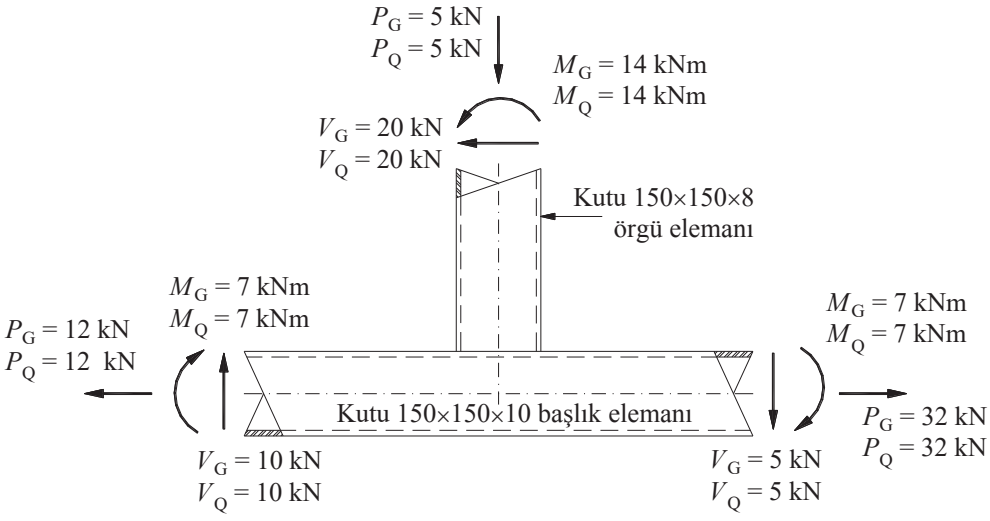
YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 0.95 \times 12.67 = 12.0\ \text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{12.67}{1.58} = 8.0\ \text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{3.52}{12.0} = 0.29 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{2.4}{8.0} = 0.30 \le 1.0$ ✓
a. Bileşik etkiler altında birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında birleşimin tasarım dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{r-ip}}{M_{c-ip}}\right)^2 + \left(\frac{M_{r-op}}{M_{c-op}}\right) \le 1.0$ (14.3.5)	$\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{r-ip}}{M_{c-ip}}\right)^2 + \left(\frac{M_{r-op}}{M_{c-op}}\right) \le 1.0$ (14.3.5)
$0.18 + (0) + (0.58) = 0.76 \le 1.0$ ✓	$0.20 + (0) + (0.64) = 0.84 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.18

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem T-birleşimi, Kutu 150×150×10 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 150×150×8 enkesitli örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Bileşik etkiler altında birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Bileşik etkiler altında birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 150×150×10)				
$A_g = 5234$ mm^2	$H = 150$ mm	$B = 150$ mm	$t = 0.93\times10 = 9.3$ mm	$W_e = 231$ cm^3

Örgü elemanı (Kutu 150×150×8)			
$W_{pb} = 227$ cm^3	$H_b = 150$ mm	$B_b = 150$ mm	$t_b = 0.93\times8 = 7.44$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.2.2A ve Tablo 14.3.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta = 90^0 \geq 30^0 \quad \theta \cong 90^0$ ✓

$\frac{H}{t} = \frac{B}{t} = \frac{150}{9.3} = 16.1 \leq 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{B_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \leq 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{B_b}{t_b} = \frac{150}{7.44} = 20.2 \leq 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7$ ✓

$\frac{B_b}{B} = \frac{H_b}{B_b} = \frac{150}{150} = 1.0 \geq 0.25$ ✓

$0.5 \leq \left(\frac{H}{B} = \frac{H_b}{B_b} = \frac{150}{150} = 1.0 \right) \leq 2.0$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \leq 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \leq 0.8$ ✓

T-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eksenel kuvvet dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.2.2 ve mevcut eğilme momenti dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.3.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanının gerekli dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_u = 1.2 \times 5 + 1.6 \times 5 = 14 \text{ kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $P_a = 5 + 5 = 10 \text{ kN}$
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_u = 1.2 \times 14 + 1.6 \times 14 = 39.2 \text{ kNm}$	$M_a = M_G + M_Q$ $M_a = 14 + 14 = 28 \text{ kNm}$

Eksenel kuvvet dayanımı

$\beta = \frac{B_b}{B} = \frac{150}{150} = 1.0$ olduğundan,

Başlık elemanı cidarında yerel akma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

$$P_n \sin\theta = 0.6F_y t\left(5k + l_b\right) \qquad (14.2.9)$$

k = kutu enkesitin dış köşe yarıçapı ≥ 1.5t = 1.5×9.3 = 13.95 mm ✓

$l_b = 150\,\text{mm}$

$$P_n = \frac{1}{\sin 90} \times 2 \times 275 \times 9.3 \times (5 \times 13.95 + 150) \times 10^{-3} = 1124.0\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 1.0 \times 1124.0 = 1124.0\,\text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{1124}{1.5} = 749.3\,\text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{14}{1124} = 0.012 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{10}{749.3} = 0.013 \le 1.0$ ✓

Başlık elemanı cidarında yerel buruşma sınır durumu, β = 1.0 ve örgü elemanı basınç etkisinde olduğu durumda,

YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımları, P_{ro} ve M_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 12 + 1.6 \times 12 = 33.6\,\text{kN}$ (çekme)	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 12 + 12 = 24\,\text{kN}$ (çekme)
$M_{ro} = M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_{ro} = M_u = 1.2 \times 7 + 1.6 \times 7 = 19.6\,\text{kNm}$	$M_{ro} = M_a = M_G + M_Q$ $M_{ro} = M_a = 7 + 7 = 14\,\text{kNm}$
$F_c = F_y = 275\,\text{MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165\,\text{MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{-33.6 \times 10^3}{275 \times 5234} + \frac{19.6 \times 10^6}{275 \times 227 \times 10^3} \right\rvert = 0.29$	$U = \left\lvert \frac{-24 \times 10^3}{165 \times 5234} + \frac{14 \times 10^6}{165 \times 231 \times 10^3} \right\rvert = 0.34$
$Q_f = 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \le 1.0$ (14.1.16)	
$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.29}{1.0} = 1.18 \ge 1.0$ $Q_f = 1.0$	$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.34}{1.0} = 1.16 \ge 1.0$ $Q_f = 1.0$

Başlık elemanı cidarında yerel buruşma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı	
$P_n \sin\theta = 1.6t^2\left(1+\frac{3l_b}{H-3t}\right)\sqrt{EF_y}Q_f$ (14.2.10)	
$P_n = \frac{1}{\sin 90}1.6\times 9.3^2\times\left(1+\frac{3\times 150}{150-3\times 9.3}\right)\times \sqrt{200000\times 275}\times 1.0\times 10^{-3} = 4809\ \text{kN}$	$P_n = \frac{1}{\sin 90}1.6\times 9.3^2\times\left(1+\frac{3\times 150}{150-3\times 9.3}\right)\times \sqrt{200000\times 275}\times 1.0\times 10^{-3} = 4809\ \text{kN}$
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.75\times 198.57 = 3607\ \text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{4809}{2.00} = 2405\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{14}{3607} = 0.004 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{10}{2405} = 0.004 \le 1.0$ ✓

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma sınır durumu,

$\beta > 0.85$ olduğu durumda,

Örgü elemanında yerel akma için karakteristik eksenel kuvvet dayanımı

$$b_{eoi} = \frac{10}{B/t}\left(\frac{F_y t}{F_{yb} t_b}\right) B_b \le B_b \qquad (14.2.13)$$

$$b_{eoi} = \frac{10}{150/9.3}\left(\frac{275\times 9.3}{275\times 7.44}\right)\times 150 = 116.3\ \text{mm} \le 150\ \text{mm}$$

$$P_n = F_{yb} t_b \left(2H_b + 2b_{eoi} - 4t_b\right) \qquad (14.2.12)$$

$$P_n = 275\times 7.44\times\left(2\times 150 + 2\times 116.3 - 4\times 7.44\right)\times 10^{-3} = 1029\ \text{kN}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eksenel kuvveti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eksenel kuvvet dayanımının kontrolü
$P_d = \phi P_n = 0.95\times 1029 = 977.6\ \text{kN}$	$P_g = \frac{P_n}{\Omega} = \frac{1029}{1.58} = 651.3\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{14}{977.6} = 0.014 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{10}{651.3} = 0.015 \le 1.0$ ✓

Eğilme momenti dayanımı

Kutu profil cidarında yerel akma sınır durumu,

$B > 0.85$ durumunda,

Yerel akma için karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = 0.5F_y^* t\left(H_b + 5t\right)^2 \qquad (14.3.7)$$

$F_y^* = F_y = 275\,\text{MPa}$ T-birleşim için

$M_n = 0.5 \times 275 \times 9.3 \times (150 + 5 \times 9.3)^2 \times 10^{-6} = 49.38\,\text{kNm}$

YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 1.0 \times 49.38 = 49.38\,\text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{49.38}{1.50} = 32.92\,\text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{39.2}{49.38} = 0.79 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{28}{32.92} = 0.85 \le 1.0$ ✓

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma,

$\beta > 0.85$ durumunda,

Örgü elemanlarında yerel akma için karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = F_{yb}\left[W_{pb} - \left(1 - \frac{b_{eoi}}{B_b}\right) B_b H_b t_b\right] \qquad (14.3.8)$$

$$M_n = 275 \times \left[227 \times 10^3 - \left(1 - \frac{116.3}{150}\right) \times 150 \times 150 \times 7.44\right] \times 10^{-6} = 52.09\ \text{kNm}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 0.95 \times 52.09 = 49.5\,\text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{52.09}{1.58} = 33\ \text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{39.2}{49.5} = 0.792 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{28}{33} = 0.848 \le 1.0$ ✓

Bileşik etkiler altında birleşimin kontrolü

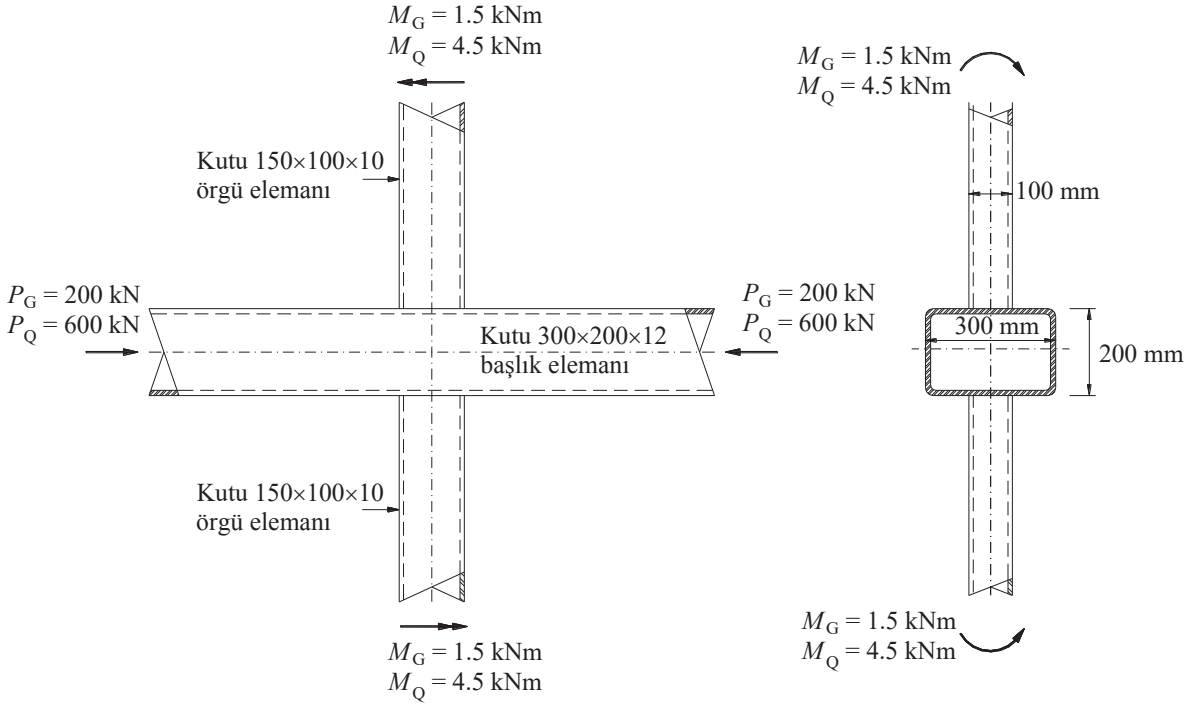
YDKT	GKT
a. Bileşik etkiler altında birleşimin tasarım dayanımının kontrolü	**b.** Bileşik etkiler altında birleşimin güvenli dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{r-ip}}{M_{c-ip}}\right) + \left(\frac{M_{r-op}}{M_{c-op}}\right) \le 1.0$ (14.3.13)	$\frac{P_r}{P_c} + \left(\frac{M_{r-ip}}{M_{c-ip}}\right) + \left(\frac{M_{r-op}}{M_{c-op}}\right) \le 1.0$ (14.3.13)
$0.014 + (0.792) + (0) = 0.806 \le 1.0$ ✓	$0.015 + (0.848) + (0) = 0.863 \le 1.0$ ✓

Örnek 14.19

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem X-birleşimi, Kutu 300×200×12 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 150×100×10 enkesitli iki adet örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Eğilme momenti etkisi altında birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Eğilme momenti etkisi altında birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 300×200×12)			
$A_g = 12894$ mm^2	$H = 300$ mm	$B = 200$ mm	$t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Örgü elemanları (Kutu 150×100×10)		
$H_b = 150$ mm	$B_b = 100$ mm	$t_b = 0.93\times10 = 9.3$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.3.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta \cong 90^0$ ✓

$\frac{H}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \le 35$ ✓

$\frac{B}{t} = \frac{300}{11.16} = 26.9 \le 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{9.3} = 16.1 \le 35$ ✓

$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{9.3} = 10.8 \le 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{150}{9.3} = 16.1 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7$ ✓

$\frac{B_b}{t_b} = \frac{100}{9.3} = 10.8 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7$ ✓

$\frac{B_b}{B} = \frac{100}{300} = 0.33 \ge 0.25$ ✓

$0.5 \le \left(\frac{H}{B} = \frac{200}{300} = 0.67 \right) \le 2.0$ ✓

$0.5 \le \left(\frac{H_b}{B_b} = \frac{150}{100} = 1.5 \right) \le 2.0$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8$ ✓

X-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup mevcut eğilme momenti dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.3.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanlarının gerekli dayanımı	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_u = 1.2 \times 1.5 + 1.6 \times 4.5 = 9 \text{ kNm}$	$M_a = M_G + M_Q$ $M_a = 1.5 + 4.5 = 6 \text{ kNm}$

Başlık elemanı cidarında plastikleşme sınır durumu,

$$\beta = \frac{B_b}{B} = \frac{100}{300} = 0.33 \leq 0.85 \text{ için,}$$

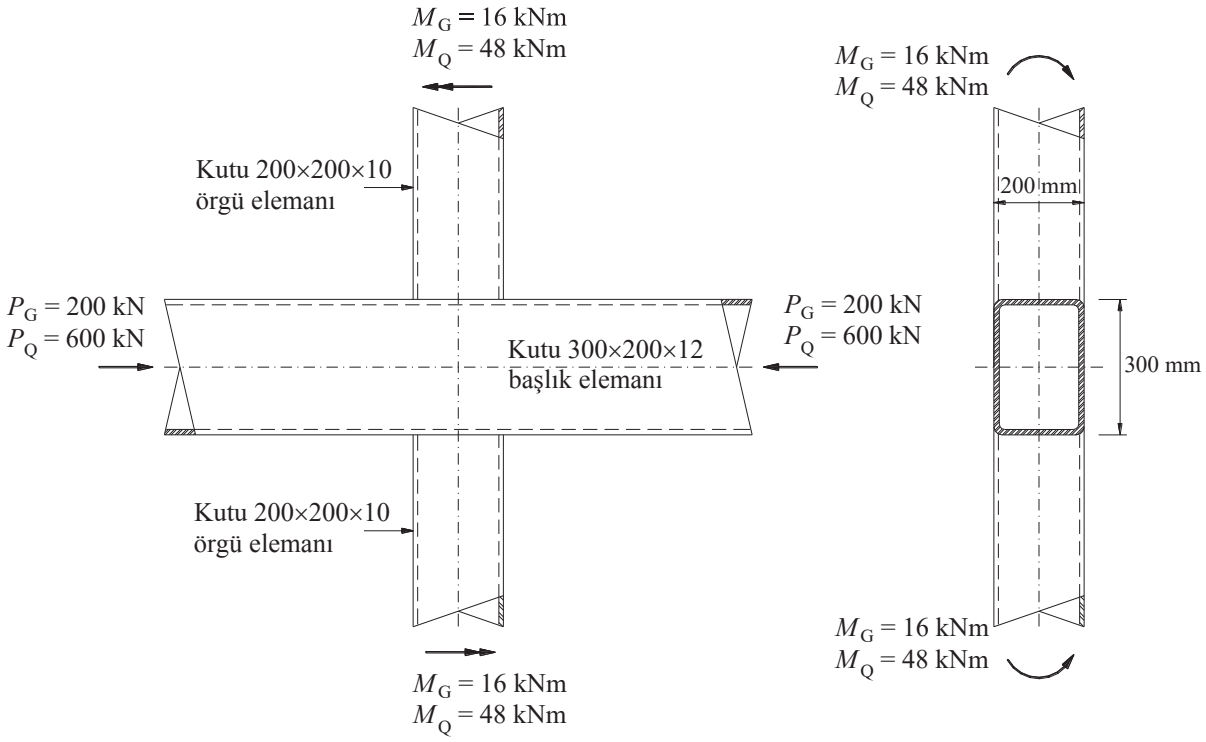
YDKT	GKT
Başlık elemanının gerekli dayanımı, P_{ro}	
$P_{ro} = P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $P_{ro} = 1.2 \times 200 + 1.6 \times 600 = 1200 \text{ kN}$	$P_{ro} = P_a = P_G + P_Q$ $P_{ro} = 200 + 600 = 800 \text{ kN}$
$F_c = F_y = 275 \text{ MPa}$	$F_c = 0.6F_y = 0.6 \times 275 = 165 \text{ MPa}$
$U = \left\lvert \frac{P_{ro}}{F_c A_g} + \frac{M_{ro}}{F_c W_e} \right\rvert$ (14.1.6)	
$U = \left\lvert \frac{1200 \times 10^3}{275 \times 12894} + 0 \right\rvert = 0.34$	$U = \left\lvert \frac{800 \times 10^3}{165 \times 12894} + 0 \right\rvert = 0.38$
$Q_f = 1.3 - 0.4\frac{U}{\beta} \leq 1.0$ (14.1.16)	
$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.34}{0.33} = 0.89$	$Q_f = 1.3 - 0.4 \times \frac{0.38}{0.33} = 0.839$
Başlık elemanı cidarında plastikleşme için karakteristik eğilme momenti dayanımı	
$M_n = F_y t^2 \left[\frac{0.5H_b(1+\beta)}{(1-\beta)} + \sqrt{\frac{2BB_b(1+\beta)}{(1-\beta)}} \right] Q_f$ (14.3.9)	
$M_n = 275 \times 11.16^2 \times$ $\left[\frac{0.5 \times 150 \times (1.33)}{(1-0.33)} + \sqrt{\frac{2 \times 300 \times 100 \times (1.33)}{(1-0.33)}} \right]$ $\times 0.89 \times 10^{-6} = 15.03 \text{ kNm}$	$M_n = 275 \times 11.16^2 \times$ $\left[\frac{0.5 \times 150 \times (1.33)}{(1-0.33)} + \sqrt{\frac{2 \times 300 \times 100 \times (1.33)}{(1-0.33)}} \right]$ $\times 0.839 \times 10^{-6} = 14.19 \text{ kNm}$
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 1.0 \times 15.03 = 15.03 \text{ kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = 14.19 = 9.46 \text{ kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{9}{15.03} = 0.60 \leq 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{6}{9.46} = 0.63 \leq 1.0$ ✓

Örnek 14.20

Aşağıdaki şekilde detayı ile sabit ve hareketli yükler altında yükleme durumu verilen kutu-kutu eleman kafes sistem X-birleşimi, Kutu 300×200×12 enkesitli bir başlık elemanı ile Kutu 200×200×10 enkesitli iki adet örgü elemanından oluşmaktadır. Birleşimin kaynaklarının yeterli dayanıma sahip olduğu varsayılacaktır.

a. Eğilme momenti etkisi altında birleşimin tasarım dayanımının kontrolü (YDKT)

b. Eğilme momenti etkisi altında birleşimin güvenli dayanımının kontrolü (GKT)



Çelik sınıfı

Kutu elemanlar (*Yönetmelik* Tablo 2.1B)

S 275 $F_y = 275$ N/mm^2 $F_u = 430$ N/mm^2

Enkesit

TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu elemanlar

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n$ için

Başlık elemanı (Kutu 300×200×12)	
$A_g = 12894$ mm^2	$H = 200$ mm $B = 300$ mm $t = 0.93\times12 = 11.16$ mm

Örgü elemanları (Kutu 200×200×10)			
$W_{pe} = 507.7$ cm^3	$H_b = 200$ mm	$B_b = 200$ mm	$t_b = 0.93\times10 = 9.3$ mm

Çözüm

Yönetmelik Tablo 14.3.2A uyarınca uygulama sınırlarının kontrolü

$\theta \cong 90^0$ ✓

$\frac{H}{t} = \frac{300}{11.16} = 26.9 \le 35$ ✓

$\frac{B}{t} = \frac{200}{11.16} = 17.9 \le 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{B_b}{t_b} = \frac{200}{9.3} = 21.5 \le 35$ ✓

$\frac{H_b}{t_b} = \frac{B_b}{t_b} = \frac{200}{9.3} = 21.5 \le 1.25\sqrt{\frac{200000}{275}} = 33.7$ ✓

$\frac{B_b}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 \ge 0.25$ ✓

$0.5 \le \left(\frac{H}{B} = \frac{300}{200} = 1.5 \right) \le 2.0$ ✓

$0.5 \le \left(\frac{H_b}{B_b} = \frac{200}{200} = 1.0 \right) \le 2.0$ ✓

$F_y = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa}$ ✓

$F_{yb} = 275 \text{ MPa} \le 360 \text{ MPa}$ ✓

$\frac{F_y}{F_u} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8$ ✓

$\frac{F_{yb}}{F_{ub}} = \frac{275}{430} = 0.64 \le 0.8$ ✓

X-birleşimi uygulama sınırları içerisinde olup, mevcut eğilme momenti dayanımları *Yönetmelik* Tablo 14.3.2 uyarınca kontrol edilebilir.

YDKT	GKT
Örgü elemanlarının gerekli dayanımı	
$M_u = 1.2M_G + 1.6M_Q$ $M_u = 1.2 \times 16 + 1.6 \times 48 = 96 \text{ kNm}$	$M_a = M_G + M_Q$ $M_a = 16 + 48 = 64 \text{ kNm}$

Kutu enkesitte yerel akma sınır durumu,

$\beta = \frac{B_b}{B} = \frac{200}{200} = 1.0 > 0.85$ durumunda,

Kutu enkesitte yerel akma için karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$M_n = F_y^* t(B - t)(H_b + 5t) \qquad (14.3.10)$$

X-birleşim için $F_y^* = 0.8F_y = 0.8 \times 275 = 220\,\text{MPa}$

$$M_n = 220 \times 11.16 \times (200 - 11.16) \times (200 + 5 \times 11.16) \times 10^{-6} = 118.6\,\text{kNm}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 1.0 \times 118.6 = 118.6\,\text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{118.6}{1.50} = 79.1\,\text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{96}{118.6} = 0.81 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{64}{79.1} = 0.81 \le 1.0$ ✓

Eşit olmayan eksenel kuvvetler nedeniyle örgü elemanlarında yerel akma sınır durumu,

$\beta > 0.85$ durumunda,

Örgü elemanlarında yerel akma için karakteristik eğilme momenti dayanımı

$$b_{eoi} = \frac{10}{200/11.16}\left(\frac{275 \times 11.16}{275 \times 9.3}\right) \times 200 = 133.9\ \text{mm} \le 200\ \text{mm} \qquad (14.2.13)$$

$$M_n = F_{yb}\left[W_{pb} - 0.5\left(1 - \frac{b_{eoi}}{B_b}\right)^2 B_b^2 t_b\right] \qquad (14.3.11)$$

$$M_n = 275 \times \left[507.7 \times 10^3 - 0.5 \times \left(1 - \frac{133.9}{200}\right)^2 \times 200^2 \times 9.3\right] \times 10^{-6} = 134\ \text{kNm}$$

YDKT	GKT
a. Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	**b.** Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi M_n = 0.95 \times 134 = 127.33\ \text{kNm}$	$M_g = \frac{M_n}{\Omega} = \frac{134}{1.58} = 84.81\ \text{kNm}$
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{96}{127.33} = 0.75 \le 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{64}{84.81} = 0.75 \le 1.0$ ✓

BÖLÜM 15 KULLANILABİLİRLİK SINIR DURUMLARI İÇİN TASARIM

Çelik yapı sistemlerinin *kullanılabilirlik sınır durumları* için tasarımı *Yönetmelik* Bölüm 15 de belirtilen kurallar esas alınarak gerçekleştirilecektir. Kullanılabilirlik sınır durumları, öngörülen belirli yük birleşimleri altında, yapı sisteminin yerdeğiştirme ve ivme gibi davranış büyüklüklerine ait sınırlar ile tanımlanır.

Kullanılabilirlik sınır durumunun esas alınmasıyla, kullanım konforunun sağlanması ve yapısal olmayan elemanların hasar görmesinin önlenmesi amaçlanmaktadır.

Düşey Yerdeğiştirme (Sehim) Kontrolleri

Düşey yerdeğiştirme için sınır değerler, kirişin kullanım amacına ve aşırı yerdeğiştirme nedeniyle ortaya çıkabilecek hasara bağlı olduğundan *Yönetmelikte* önerilen sınır değerler bu kapsamda değerlendirilerek kullanılmalıdır. Çelik kirişlere sıcak veya soğuk işlemle ters eğrilik verildiğinde, sabit yük etkisinde oluşabilecek sehim değeri azaltılabilmektedir. Bu durumda kirişin sehimi, maksimum sabit yük ve hareketli yük toplamı yerine sadece hareketli yük tarafından kontrol edilecektir.

Sabit yükler ve hareketli yükler (kar yükleri) altında, *Yönetmelik* 15.1 de verilen ilgili yük birleşimleri gözönünde tutularak hesaplanan toplam düşey yerdeğiştirmelerin açıklığa oranı 1/300 sınır değerini aşmayacaktır. *Yönetmelikte* verilen düşey yerdeğiştirme koşulları *L,* kiriş açıklığına bağlı olarak, Tablo 15.1 de özetlenmiştir.

Tablo 15.1 – Düşey Yerdeğiştirmelerin Sınır Değerleri

Eleman	$G + Q$ (veya $0.5S$)	Q (veya S)
Kat kirişi	L / 300	L / 360

Konsol elemanlarda düşey yerdeğiştirmenin konsol boyuna oranı 1/150 sınır değerini aşmamalıdır.

Yatay Yerdeğiştirme (Sehim) Kontrolleri

Cephe kaplamaları ve yapısal olmayan bölme duvarlarının hasar görmemesi ve fonksiyonlarının olumsuz etkilenmemesi için yatay yerdeğiştirmelerin sınırlandırılması gerekmektedir. Yatay yerdeğiştirmelerin sınır değeri, binanın türüne ve cephe kaplamaları ile bölme duvarlarının cinsine bağlı olarak değişebilir. Genel olarak sınır değer, kat yüksekliğinin veya bina yüksekliğinin (1 / 400 ile 1 / 600) katı olarak önerilmektedir.

Titreşim Kontrolleri

Bina veya döşeme sistemlerinin titreşim hareketlerinin bina kullanıcıları tarafından algılanmasının doğuracağı olası rahatsızlıklara karşı önlem alınması amacıyla bu konfor kontrollerinin yapılması gereklidir.

Döşeme sisteminin doğal titreşim frekansı yapının kullanım amacına bağlı olarak, olağan insan aktiviteleri için kullanımda 2 ile 6 Hz arasında değişebilmektedir.

KAYNAK YAYINLAR

West, M.A., and Fisher, J.M., *Serviceability Design Consideration for Steel Buildings*, Design Guide Series 3, 2003, AISC, Chicago.

European Commission,Technical Steel Research: Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls, RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, http://europa.eu.int

Murray, T.M., Allen, D.E. and Ungar, E.E., *Floor Vibrations due to Human Activity*, Steel Design Guide Series 11, 2003, AISC, Chicago.

Allen, D.E., Onysko, D.M.,and Murray, T.M., Minimizing Floor Vibrations, ATC Design Guide 1, 1999, Applied Techonology Council, Redwood City, CA.

BÖLÜM 16 YAPISAL ELEMANLAR İÇİN STABİLİTE BAĞLANTILARI

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki kolonların, eğilme momenti etkisindeki kirişlerin ve eksenel basınç kuvveti ve eğilme momentinin ortak etkisi altındaki elemanların olası yanal yerdeğiştirmesinin ve/veya burulmasının önlenmesi amacıyla uç ve ara noktalarına uygulanan stabilite bağlantı elemanları için gerekli minimum dayanım ve rijitlik, *Yönetmelik* Bölüm 16 da belirtilen kurallara göre belirlenecektir. Çaprazlı çerçeve sistemlerinin stabilite koşulları için *Yönetmelik* Bölüm 6 da verilen kurallar uygulanacaktır.

Eksenel basınç kuvveti, eğilme momenti veya eksenel basınç kuvveti ile eğilme momentinin ortak etkisi altındaki elemanların tasarımında burkulma boyunun (*Yönetmelik* Bölüm 8 ve Bölüm 9 da, sırasıyla, genel burkulma durumu için L_c ve yanal burulmalı burkulma durumu için L_b olarak tanımlanan) eleman uzunluğu boyunca uç ve ara stabilite bağlantıları ile desteklenen (yanal yerdeğiştirmenin ve/veya burulmanın önlendiği) noktalar arasındaki uzaklığa eşit alınmasına, (K=1.0), stabilite bağlantı elemanlarının *Yönetmelik* 16.2, 16.3 ve 16.4 de verilen kurallara uygun olarak tasarlanması koşulu ile izin verilir.

Bir stabilite bağlantısı birden fazla eleman için kullanıldığında, stabilite bağlantısı elemanlarının gerekli dayanım ve rijitliği, desteklediği tüm elemanlar için hesaplanan gerekli dayanım ve rijitliklerin toplamına eşit olarak alınacaktır. Stabilite elemanı ile sağlanan rijitlik, birleşim detaylarının rijitliği azaltıcı etkileri de gözönüne alınarak değerlendirilecektir.

Stabilite bağlantılarının, kolonların boyuna eksenleri etrafında dönmelerinin sınırlandırılması amacıyla, kolon enkesiti kayma merkezinde teşkil edilmeleri sağlanmalıdır. Bu durumun sağlanamaması halinde, kolonların tasarımı *Yönetmelik* 8.2.2 de verilen esaslar gözönüne alınarak değerlendirilecektir.

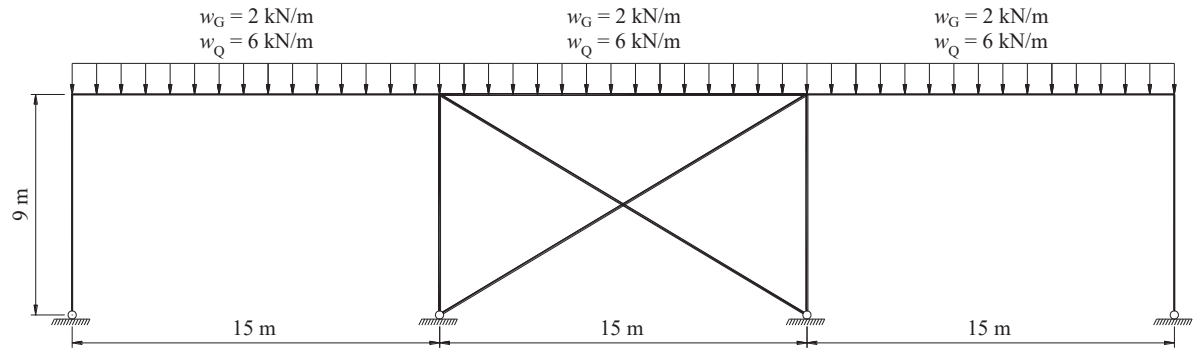
Mesnet noktalarında kirişlerin boyuna eksenleri etrafında dönmesi önlenecektir. Gerekli dayanım ve rijitliğe sahip yanal stabilite bağlantısı, burulma stabilite bağlantısı veya ikisinin birlikte kullanıldığı noktalarda, kiriş üst ve alt başlıklarının göreli yerdeğiştirmesinin (kesitin çarpılmasının) önlendiği varsayılır. Çift eğrilikli eğilme etkisindeki elemanlarda büküm noktası (moment sıfır noktası), bu noktanın yanal yerdeğiştirmesi stabilite bağlantısıyla önlenmediği sürece, desteklenen bir nokta olarak gözönüne alınamaz.

Örnek 16.1

Aşağıdaki şekilde taşıyıcı sistemi ve yükleme durumu verilen çerçeve sisteminin düzlem içindeki stabilitesi, çarprazları sadece çekme kuvveti aktaran elemanlardan oluşan orta açıklıktaki çaprazlı (panel) yanal stabilite bağlantısı ile sağlanmaktadır.

a. Çerçeve sistemi stabilitesinin sağlanabilmesi için çapraz elemanın gerekli dayanım ve rijitliğin belirlenmesi (YDKT ve GKT)

b. Çapraz elemanın sahip olması gereken en küçük enkesit alanının belirlenmesi



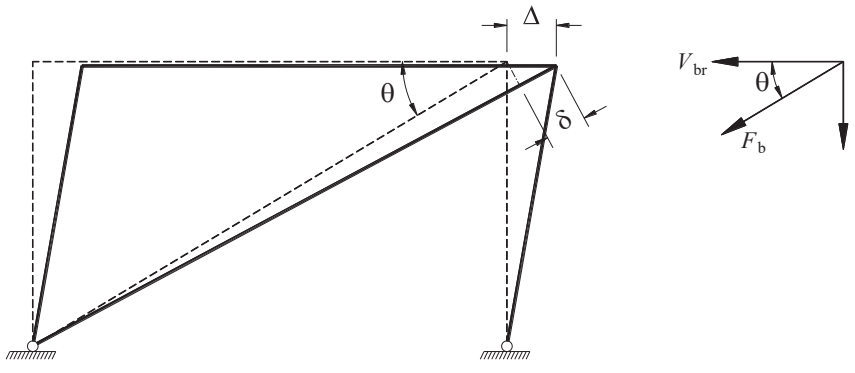
Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2

Çözüm

a. Çaprazlı (panel) yanal stabilite bağlantısının gerekli dayanımını ve rijitliğinin belirlenmesi

Yönetmelik 16.2.1 uyarınca belirlenen stabilite sisteminin gerekli kesme kuvvetinin, çekme etkisindeki çapraz eleman tarafından karşılandığı varsayılarak, çerçeve sisteminin yatay yerdeğiştirme durumu ve çapraz elemanın uzama şekildeğiştirmesinin Şekil 16.1.1 de gösterildiği şekilde oluştuğu varsayılmaktadır.



Şekil 16.1.1 – Çaprazlı (panel) yanal stabilite sisteminin yerdeğiştirme durumu ve çapraz elemanın iç kuvvet durumu

YDKT	GKT
Toplam düşey yük	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(2) + 1.6(6) = 12$ kN/m $P_r = \sum P_u = 3\times(12)15 = 540$ kN	$w_a = w_G + w_Q$ $= 2 + 6 = 8$ kN/m $P_r = \sum P_a = 3\times(8)15 = 360$ kN
Stabilite sisteminin gerekli kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* Denk.(16.1)	
$V_{br} = 0.005P_r$ $= 0.005(540) = 2.7$ kN	$V_{br} = 0.005P_r$ $= 0.005(360) = 1.8$ kN
Stabilite sisteminin çapraz elemanının gerekli eksenel kuvvet dayanımı,	
$F_b = \dfrac{V_{br}}{\cos\theta}$ $\quad \theta = \tan^{-1}\dfrac{9}{15} = 30.96^o$	
$F_b = 2.7/\cos 30.96^o = 4.5$ kN	$F_b = 1.8/\cos 30.96^o = 2.45$ kN
Stabilite sisteminin gerekli kayma rijitliği, *Yönetmelik* Denk.(16.2)	
$\beta_{br} = \dfrac{1}{\phi}\left(\dfrac{2P_r}{L_{br}}\right)$ $= \dfrac{1}{0.75}\left(\dfrac{2(540)}{9}\right) = 160$ kN/m	$\beta_{br} = \Omega\left(\dfrac{2P_r}{L_{br}}\right)$ $= 2.0\left(\dfrac{2(360)}{9}\right) = 160$ kN/m

b. Çapraz eleman için gerekli minimum enkesit alanının belirlenmesi

Çapraz elemanın gerekli minimum enkesit alanı, çaprazın sadece çekme kuvveti taşıdığı varsayımı altında akma sınır durumu ile belirlenebilir.

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

YDKT	GKT
Çapraz eleman için gerekli minimum enkesit alanı,	
$A \geq \dfrac{F_b}{\phi F_y}$ $A \geq \dfrac{4.5(10)^3}{0.9(235)} = 21.27$ mm^2	$A \geq \dfrac{F_b}{F_y/\Omega}$ $A \geq \dfrac{1.67\times 2.45(10)^3}{235} = 17.41$ mm^2

Gerekli rijitlik esas alınarak, çapraz eleman için gerekli minimum enkesit alanının belirlenmesi

Sistem geometrisi ile çapraz elemanın sistem boyu, L_b,

$$L_b = \sqrt{9.0^2 + 15^2} = 17.50 \text{ m}$$

Çapraz elemanda eksenel uzama, δ olarak alındığında, çaprazın eksenel rijitliği, F_b / δ olacaktır.

$\delta \approx \Delta \cos\theta$ (Şekil 16.1.1)

$$\frac{F_b}{\delta} = \frac{V_{br}/\cos\theta}{\Delta\cos\theta}$$

$$\frac{F_b}{\delta} = \frac{V_{br}}{\Delta} \times \frac{1}{\cos^2\theta} \qquad \text{veya} \quad \frac{F}{\delta}\cos^2\theta = \frac{V_{br}}{\Delta}$$

Bu durumda,

Eksenel rijitlik × $\cos^2\theta$ = Yanal rijitlik şeklinde yazılabilir.

Eksenel rijitlik, F_b / δ = AE / L_b olarak da elde edilebilmektedir. Böylece,

$$\frac{AE}{L_b}\cos^2\theta = \beta_{br}$$

olarak bulunur.

Yanal stabilite bağlantısının yeterli rijitliğe sahip olabilmesi için çapraz elemanın gerekli minimum enkesit alanı, A

YDKT	GKT
Çapraz eleman için gerekli minimum enkesit alanı,	
$A \geq \dfrac{\beta_{br} L_b}{E\cos^2\theta} \qquad \beta_{br} = \dfrac{1}{\phi}\left(\dfrac{2P_r}{L_{br}}\right)$	$A \geq \dfrac{\beta_{br} L_b}{E\cos^2\theta} \qquad \beta_{br} = \Omega\left(\dfrac{2P_r}{L_{br}}\right)$
$A \geq \dfrac{160(10)^{-3}(17500)}{200000(10)^{-3}\cos^2(30.96)} = 19.04\ \text{mm}^2$	$A \geq \dfrac{160(10)^{-3}(17500)}{200000(10)^{-3}\cos^2(30.96)} = 19.04\ \text{mm}^2$
$21.27\ \text{mm}^2 > 19.04\ \text{mm}^2$	$17.41\ \text{mm}^2 < 19.04\ \text{mm}^2$
$A_g = 21.27\ \text{mm}^2$	$A_g = 19.04\ \text{mm}^2$

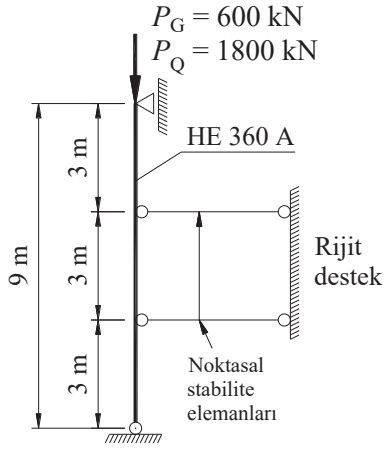
Bu durumda, çapraz elemanın enkesitini YDKT için gerekli çekme dayanımının GKT için ise gerekli rijitliğin belirlediği görülmektedir.

Örnek 16.2

Aşağıdaki şekilde sistem şeması ile yükleme durumu verilen iki ucu yanal yerdeğiştirmeye ve burulmaya karşı destekli mafsallı uç koşullarına sahip ve boyunun üçte bir noktaları da her iki asal eksenine dik doğrultuda olmak üzere, yanal yerdeğiştirmeye karşı noktasal stabilite bağlantısı ile desteklenen HE 360 A enkesitli eleman sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 600kN ve P_Q = 1800kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanının mevcut basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT ve GKT)

b. Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanım ve rijitliğinin belirlenmesi (YDKT ve GKT)



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

HE 360 A			
A = 14280 mm^2	b_f = 300 mm	h = 261 mm	t_f = 17.5 mm
t_w = 10 mm	i_x = 152.2 mm	i_y = 74.3 mm	

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık enkesit parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{300}{2(17.5)} = 8.57 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{355}} = 13.29$$

Gövde enkesit parçası (Tablo 5.1A, Durum 5)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{261}{19} = 26.10 \le \lambda_r = 1.49\sqrt{\frac{E}{F}} = 1.49\sqrt{\frac{200000}{355}} = 35.28$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak değerlendirilir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, x- ve y-asal eksenleri etrafındaki eğilmeli burkulma sınır durumları esas alınarak hesaplanan dayanımlarının küçüğü belirleyecektir.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda asal eksenlere göre eleman burkulma boyları

$$L_{cx} = L_{cy} = 1.0(3000) = 3000 \text{ mm}$$

Yönetmelik 6.4.3(a) uyarınca, burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alınmıştır.

Narinlik oranları,

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{3000}{152.20} = 19.71 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{3000}{74.30} = 40.38 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$\left(L_c/i\right)_{maks} = \left(L_{cx}/i_x ; L_{cy}/i_y\right)_{maks} = 40.38$$

Elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, y-asal ekseni etrafındaki eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyecektir.

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$40.38 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{355}} = 111.79$$

Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(40.38)^2} = 1211 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y \qquad (8.2)$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{355}{1211}}\right] 355 = 314.43 \text{ N/mm}^2$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g \qquad (8.1)$$

$$P_n = 314.43(14280)10^{-3} = 4490 \text{ kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(600) + 1.6(1800) = 3600$ kN	$P_a = P_G + P_Q$ $= 600 + 1800 = 2400$ kN
a. Tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**a.** Güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(4490) = 4040$ kN	$P_g = P_n / \Omega_c = 4490 / 1.67 = 2689$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{3600}{4040} = 0.89 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{2400}{2689} = 0.89 \le 1.0$ ✓

b. Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanımı ve rijitliğinin belirlenmesi

Yönetmelik 16.2.2 uyarınca,

YDKT	GKT
Gerekli dayanım, *Yönetmelik* Denk.(16.3)	
$P_{br} = 0.01P_u$ $= 0.01(3600) = 36$ kN	$P_{br} = 0.01P_a$ $= 0.01(2400) = 24$ kN
Gerekli rijitlik, *Yönetmelik* Denk.(16.4)	
$\beta_{br} = \frac{1}{\phi}\left(\frac{8P_u}{L_{br}}\right)$ $= \frac{1}{0.75}\left(\frac{8(3600)}{3000}\right) = 12.8$ kN/mm	$\beta_{br} = \Omega\left(\frac{8P_a}{L_{br}}\right)$ $= 2.0\left(\frac{8(2400)}{3000}\right) = 12.8$ kN/mm

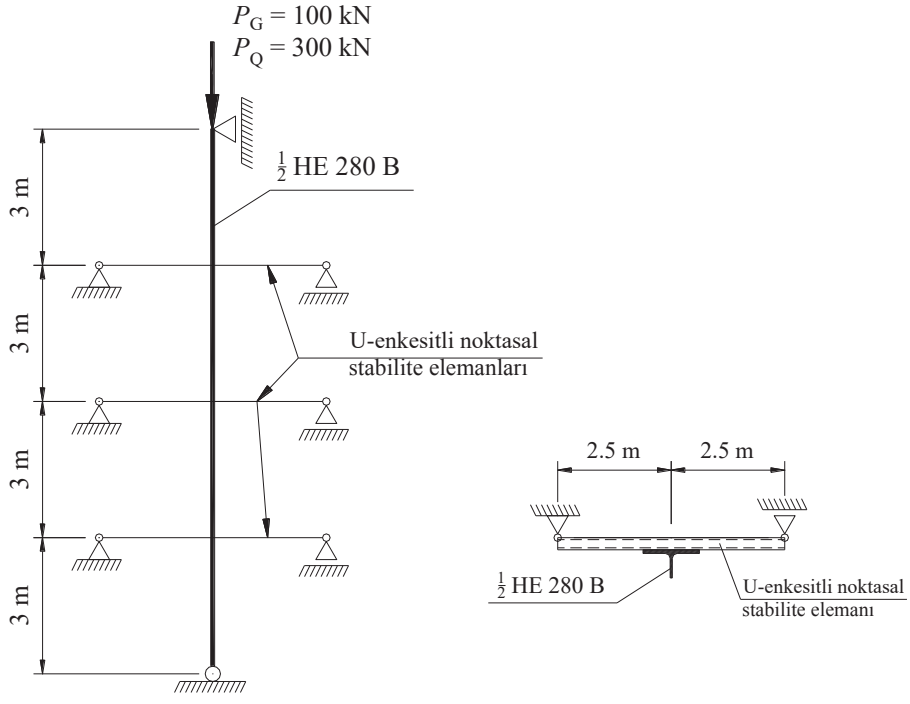
Örnek 16.3

Aşağıdaki şekilde sistem şeması ile yükleme durumu verilen iki ucu yanal yerdeğiştirmeye ve burulmaya karşı destekli mafsallı uç koşullarına sahip ve boyunun üçte bir noktaları da her iki asal eksenine dik doğrultuda olmak üzere, yanal yerdeğiştirmeye karşı noktasal stabilite bağlantısı ile desteklenen ½ HE 280 B enkesitli eleman sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, P_G = 100kN ve P_Q = 300kN eksenel basınç kuvvetleri etkisindedir.

a. Elemanının mevcut basınç kuvveti dayanımının kontrolü (YDKT ve GKT)

b. Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanım ve rijitliğinin belirlenmesi (YDKT ve GKT)

c. Elemanın x-ekseni etrafında burkulması durumunda, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi konumlandırılan U-enkesitli noktasal stabilite elemanının boyutlandırılması



Çelik sınıfı

S 355 F_y = 355 N/mm^2 F_u = 510 N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

½ HE 280 B			
A = 6570 mm^2	I_x = 673 cm^4	I_y = 3294 cm^4	J = 594869 mm^4
d = 140 mm	b_f = 280 mm	t_f = 18 mm	t_w = 10.5 mm
i_x = 32 mm	i_y = 71 mm	y_g = 22.31 mm	

Çözüm

a. Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin sınıflandırılması

Başlık enkesit parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{280}{2(18)} = 7.78 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{355}} = 13.29$$

Gövde enklkesit parçası (Tablo 5.1A, Durum 4)

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{140}{10.5} = 13.33 \le \lambda_r = 0.75\sqrt{\frac{E}{F}} = 0.75\sqrt{\frac{200000}{355}} = 17.80$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranları λ_r sınır değerini aşmadığından ($\lambda \le \lambda_r$) *narin olmayan enkesit* olarak sınıflandırılır.

Yönetmelik 8.2.2 uyarınca, basınç elemanı enkesiti tek simetri eksenine sahip olduğundan basınç kuvveti dayanımını, x- ve y-asal eksenleri etrafında eğilmeli burkulma veya simetri ekseni olan y-asal ekseninde eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumları ile hesaplanan dayanımlarının küçüğü belirleyecektir.

Narinlik oranları

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{1.0(4000)}{32} = 125 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{1.0(4000)}{71} = 56.34 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$(L_c/i)_{maks} = \left(L_{cx}/i_x ; L_{cy}/i_y\right)_{maks} = (125; 56.34)_{maks} = 125$$

olduğundan, eğilmeli burkulma sınır durumunda kolon dayanımını x-asal eksenindeki narinlik oranı belirleyecektir. *Yönetmelik* 8.2 uyarınca,

$$\lambda_x = 125 > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{355}} = 111.79$$

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{i_x}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(125)^2} = 126.33 \text{N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$F_{cr} = 0877F_e = 0.877\left(126.33\right) = 110.79 \text{ N/mm}^2 \quad (8.3)$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 110.79\left(6570\right)10^{-3} = 728 \text{ kN} \quad (8.1)$$

Eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, y-ekseni etrafında eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ey},

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2(200000)}{\left(56.34\right)^2} = 622 \text{ N/mm}^2 \quad (8.9)$$

½ HEB 280 enkesiti kayma merkezinin yeri, simetri ekseni üzerinde başlık kalınlığının orta noktasında olduğundan, kayma merkezinin enkesit ağırlık merkezine göre koordinatları, $x_o = 0$ ve $y_o = 22.31 - (18 / 2) = 13.31$mm olarak elde edilir.

Kayma merkezine göre hesaplanan polar atalet yarıçapı, $\overline{i}_o$,

$$\overline{i}_o^2 = x_o^2 + y_o^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g} = 0 + (13.31)^2 + \frac{673(10)^4 + 3297(10)^4}{6570} = 6219\text{mm}^2 \quad (8.12)$$

Burulmalı burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_{ez},

$$F_{ez} = \frac{GJ}{A_g \overline{i}_o^2} = \frac{77200(594869)}{6570(6219)} = 1124\text{N/mm}^2$$

(8.14)

$$H = 1 - \frac{x_o^2 + y_o^2}{\overline{i}_o^2} = 1 - \frac{0 + (13.31)^2}{6219} = 0.971 \quad (8.11)$$

Yönetmelik 8.2.2(b) uyarınca, y-asal ekseninde eğilmeli-burulmalı burkulma sınır durumu için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{\left(F_{ey} + F_{ez}\right)^2}}\right] \quad (8.6)$$

$$F_e = \left(\frac{622 + 1124}{2(0.971)}\right)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{4(622)(1124)(0.971)}{\left(622 + 1124\right)^2}}\right] = 601\text{N/mm}^2$$

$$\frac{F_y}{F_e} = \frac{355}{601} = 0.59 \le 2.25$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right]F_y \quad (8.2)$$

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{355}{601}}\right]355 = 0.780\left(355\right) = 277.09\text{N/mm}^2$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 277.09\left(6570\right)10^{-3} = 1820 \text{ kN} \quad (8.1)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = (728\ \text{kN}; 1820\ \text{kN})_{min} = 728\ \text{kN}$$

Kolon dayanımını x-ekseni etrafında oluşan eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyecektir.

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = 1.2P_G + 1.6P_Q$ $= 1.2(100) + 1.6(300) = 600\ \text{kN}$	$P_a = P_G + P_Q$ $= 100 + 300 = 400\ \text{kN}$
a. Tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	**a.** Güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(728) = 655.20\ \text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 728/1.67 = 436\ \text{kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{600}{655.20} = 0.92 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{400}{436} = 0.92 \le 1.0$ ✓

b. Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanım ve rijitliğinin belirlenmesi

Elemanının y-ekseni etrafında burkulması halinde stabilite elemanının eksenel dayanımının ve rijitliğinin yeterli olduğu varsayılmaktadır.

Yönetmelik 16.2.2 uyarınca,

YDKT	GKT
Gerekli dayanım, *Yönetmelik* Denk.(16.3)	
$P_{br} = 0.01P_u$ $= 0.01(600) = 6.0\ \text{kN}$	$P_{br} = 0.01P_a$ $= 0.01(400) = 4.0\ \text{kN}$
Gerekli rijitlik, *Yönetmelik* Denk.(16.4)	
$\beta_{br} = \frac{1}{\phi}\left(\frac{8P_u}{L_{br}}\right)$ $= \frac{1}{0.75}\left(\frac{8(600)}{4000}\right) = 1.60\ \text{kN/mm}$	$\beta_{br} = \Omega\left(\frac{8P_a}{L_{br}}\right)$ $= 2.0\left(\frac{8(400)}{4000}\right) = 1.60\ \text{kN/mm}$

c. Elemanın x-ekseni etrafında burkulması durumunda, U-enkesitli noktasal stabilite elemanının boyutlandırılması

Elemanının x-ekseni etrafında burkulması dikkate alındığında, ara noktalarda yanal yerdeğiştirmenin önlenmesi amacıyla kullanılan U-enkesitli eleman, açıklık ortasından tekil yük etkisindeki bir basit kiriş olarak incelenebilir. Böylece gerekli rijitlik esas alınarak, U-enkesitli eleman boyutlandırılabilir. Buna göre,

$$\Delta_{maks} = \frac{1}{48}\frac{P_{br}L_{br}^3}{EI_{br}}$$

$$P_{br} = \beta_{br}\Delta_{maks}$$

$$\beta_{br} = \frac{48EI_{br}}{L_{br}^3}$$

$$I_{br} = \frac{\beta_{br}L_{br}^3}{48E} = \frac{1.60(5000)^3}{48(200000)}(10)^3 = 2083(10)^4 \text{ mm}^4$$

Bu durumda, U-enkesitli elemanın yeterli rijitliğe sahip olabilmesi için eğilme rijitliğinin gerekli rijitlikten büyük olması gerektiğinden, noktasal stabilite elemanı olarak UPE 220 seçilebilir.

$I_{x,\,UPE220} = 2680(10)^4 > I_{br} = 2083(10)^4$

Ancak, seçilen enkesitin eğilme momenti dayanımının yeterliliğinin de kontrol edilmesi gerekir.

Stabilite elemanının eğilme dayanımının kontrolü

UPE 220 için W_{px}=281 cm^3

Kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki kompakt UPE 220 enkesitli elemanın, yanal burkulmasının önlendiği varsayımıyla, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 355(281)10^{-3} = 99.76 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

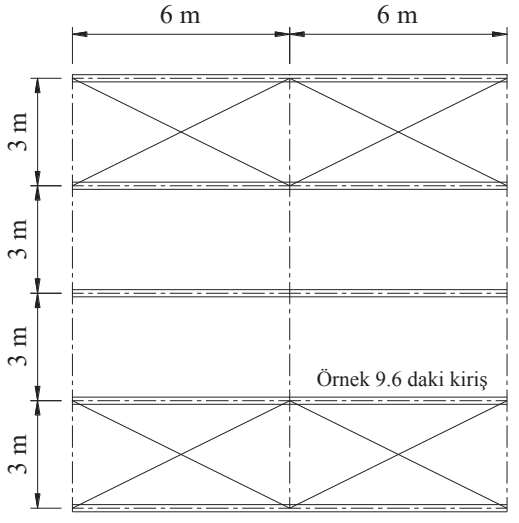
YDKT	GKT
Gerekli dayanım	
$M_{rb} = \frac{P_{br}L_{br}}{4} = \frac{6.0(5.0)}{4} = 7.5 \text{ kNm}$	$M_{rb} = \frac{P_{br}L_{br}}{4} = \frac{4.0(5.0)}{4} = 5.0 \text{ kNm}$
Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(99.76) = 88.79 \text{ kNm}$	$M_g = M_n/\Omega_b = 99.76/1.67 = 59.74 \text{ kNm}$
$M_d \geq M_{rb}$ ✓	$M_g \geq M_{rb}$ ✓

Örnek 16.4

Aşağıdaki şekilde, orta noktalarının yanal yerdeğiştirmesinin önlenmesi amacıyla oluşturulan yanal stabilite bağlantısının sistem şeması verilen Örnek 9.6 daki yapma enkesitli kirişin boyuna ekseni etrafındaki dönmesi önlenmektedir.

a. Çaprazlı stabilite bağlantısının gerekli dayanım ve rijitliğin belirlenmesi (YDKT ve GKT)

b. Çapraz elemanın, sadece çekme kuvveti aktardığı varsayımıyla, gerekli en küçük enkesit alanının belirlenmesi



Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Çözüm

a. Çaprazlı (panel) stabilite bağlantısının gerekli dayanımını ve rijitliği

h_o = 1625mm (Örnek 9.6) ve basit mesnetli yapma kiriş tek eğrilikli eğilme etkisinde olduğundan C_d =1.0 alınarak,

Yönetmelik 16.3.1 uyarınca,

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(80) + 1.6(170) = 368$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{368(12)^2}{8} = 6624$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 80 + 170 = 250$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{250(12)^2}{8} = 4500$ kNm
Gerekli kesme kuvveti dayanımı, *Yönetmelik* Denk.(16.5)	
$V_{br} = 0.01\left(\frac{M_r C_d}{h_o}\right) = 0.01\left(\frac{6624(1.0)}{1.625}\right)$ $= 40.76$ kN	$V_{br} = 0.01\left(\frac{M_r C_d}{h_o}\right) = 0.01\left(\frac{4500(1.0)}{1.625}\right)$ $= 27.69$ kN

Gerekli kayma rijitliği, *Yönetmelik* Denk.(16.6)	
$\beta_{br} = \frac{1}{\phi}\left(\frac{4M_r C_d}{L_{br} h_o}\right) = \frac{1}{0.75}\left(\frac{4(6624)1.0}{6(1.625)}\right)$ $= 3623 \text{ kN/m}$	$\beta_{br} = \Omega\left(\frac{4M_r C_d}{L_{br} h_o}\right) = 2.0\left(\frac{4(4500)1.0}{6(1.625)}\right)$ $= 3692 \text{ kN/m}$

b. Çapraz elemanın, sadece çekme kuvveti aktardığı varsayımıyla, gerekli en küçük enkesit alanının belirlenmesi

Gerekli dayanım esas alınarak, çapraz elemanın gerekli minimum enkesit alanının belirlenmesi

Çaprazlı stabilite bağlantısının 2.5 adet kiriş için kullanıldığı gözönüne alınarak, çapraz elemanının gerekli eksenel dayanımı, ($2.5 \times V_{br}$) ile belirlenmelidir. Bu durumda gerekli minimum enkesit alanı, çaprazın sadece çekme kuvveti taşıdığı varsayımı altında, akma sınır durumu ile belirlenebilir.

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

YDKT	GKT
Stabilite sistemi çapraz elemanının gerekli eksenel dayanımı, $F_b = V_{br}/\cos\theta$	
$F_b = 2.5 \times 40.76/\cos 63.43^o = 155 \text{ kN}$	$F_b = 2.5 \times 27.69/\cos 63.43^o = 155 \text{ kN}$
Çapraz eleman için gerekli minimum enkesit alanı,	
$A \geq \frac{F_b}{\phi F_y}$ $A \geq \frac{228(10)^3}{0.9(235)} = 1078 \text{ mm}^2$	$A \geq \frac{\Omega F_b}{F_y}$ $A \geq \frac{1.67 \times 155(10)^3}{235} = 1101 \text{ mm}^2$

Gerekli rijitlik esas alınarak, çapraz elemanın gerekli minimum enkesit alanının belirlenmesi

Stabilite bağlantısı 2.5 kiriş için kullanıldığından, toplam gerekli rijitlik, ($2.5 \times \beta_{br}$) olarak gözönüne alınmalıdır.

Sistem geometrisinden çapraz elemanın sistem boyu, L_b,

$$L_b = \sqrt{6.0^2 + 3.0^2} = 6.71 \text{ m}$$

YDKT	GKT
Çapraz eleman için gerekli minimum enkesit alanı, $\frac{AE}{L_b}\cos^2\theta = \beta_{br}$	
$A \geq \frac{\beta_{br} L_b}{E\cos^2\theta}$ $= \frac{2.5\times 3623(6710)10^{-3}}{200000(10)^{-3}\cos^2(63.43^o)}$ $= 1519\ \text{mm}^2$ $1519\ \text{mm}^2 > 1078\ \text{mm}^2$ $A_g = 1519\ \text{mm}^2$	$A \geq \frac{\beta_{br} L_b}{E\cos^2\theta}$ $= \frac{2.5\times 3692(6710)10^{-3}}{200000(10)^{-3}\cos^2(63.43^o)}$ $= 1548\ \text{mm}^2$ $1548\ \text{mm}^2 > 1101\ \text{mm}^2$ $A_g = 1548\ \text{mm}^2$

Bu durumda, çapraz elemanın enkesitini gerekli rijitliğin belirlediği görülmektedir.

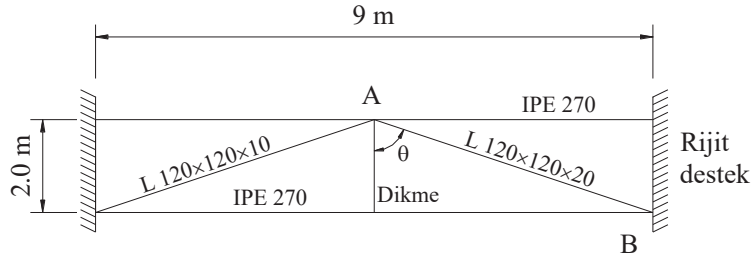
Örnek 16.5

Aşağıdaki şekilde sistem şeması verilen yürüme yolu IPE 270 enkesitli kirişler kullanılarak oluşturulmuştur. Çaprazlı stabilite sisteminin L120×120×10 enkesitli elemanları B noktasında rijit bir destek sistemine, A noktasında ise kiriş üst başlık hizasında teşkil edilen düğüm noktası levhasına birleşmektedir. Her bir kiriş, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 2.0kN/m ve w_Q = 6.0kN/m üniform yayılı yüklerin etkisindedir.

a. Kirişin mevcut eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT ve GKT)

b. Noktasal stabilite bağlantısının gerekli dayanım ve rijitliğinin belirlenmesi (YDKT ve GKT)

c. L120×120×10 enkesitli çapraz elemanın eksenel dayanımının ve rijitliğinin kontrolü



Çelik sınıfı

Yönetmelik Tablo 2.1A

IPE 270 için	S 355	F_y = 355 N/mm^2	F_u = 510 N/mm^2
L120×120×10 için	S 235	F_y = 235 N/mm^2	F_u = 360 N/mm^2

Enkesit

IPE 270			
W_{px} = 484 cm^3	i_y = 112 mm	d = 270 mm	
b_f = 135 mm	h = 219.9 mm	t_f = 10.2 mm	t_w = 6.6 mm

L120×120×10			
A = 2320 mm^2	$i_x = i_y$ =36.70 mm	i_w = 46.30 mm	i_z = 23.50 mm

Çözüm

a. Kirişin mevcut eğilme momenti dayanımının kontrolü

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin sınıflandırılması

Başlık enkesit parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{135}{2(10.2)} = 6.61 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{355}} = 9.02$$

Gövde enkesit parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{219.9}{6.6} = 33.32 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{355}} = 89.24$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 355(484)10^{-3} = 171.82 \text{ kNm} \qquad (9.2)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(112)\sqrt{\frac{200000}{355}} = 4689 \text{ mm} \geq L_b = 4500 \text{ mm} \qquad (9.6a)$$

Yönetmelik 9.2.2(a) uyarınca, yanal burulmalı burkulma sınır durumunun gözönüne alınmasına gerek yoktur.

Bu durumda, karakteristik eğilme momenti dayanımı akma sınır durumu ile belirlenen değere eşit olur.

$$M_n = M_p = 171.82 \text{ kNm}$$

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(2) + 1.6(6) = 12$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{12(9.0)^2}{8} = 121.50$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 2 + 6 = 8$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{8(9.0)^2}{8} = 81$ kNm
Tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	Güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n = 0.90(171.82) = 154.64$ kNm	$M_g = M_n/\Omega_b = 171.82/1.67 = 102.89$ kNm
$\frac{M_u}{M_d} = \frac{121.50}{154.64} = 0.80 \leq 1.0$ ✓	$\frac{M_a}{M_g} = \frac{81}{102.89} = 0.79 < 1.0$ ✓

b. Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanım ve rijitliğinin belirlenmesi

Kiriş açıklığının orta noktasında yanal yerdeğiştirmenin önlenmesi amacıyla konumlandırılan yanal stabilite bağlantısı, çapraz elemanların diğer uçları rijit bir sisteme bağlı olduğundan noktasal stabilite bağlantısı olarak değerlendirilmelidir.

$$h_o = d - t_f = 270 - 10.2 = 259.80 \text{ mm}$$

Kiriş tek eğrilikli eğilme etkisinde olduğundan, $C_d = 1.0$

Yönetmelik 16.3.1.2 uyarınca, noktasal stabilite bağlantısının kiriş açıklığına dik doğrultuda gerekli dayanımı, P_{br},

YDKT	GKT
Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanımı, *Yönetmelik* Denk.(16.7)	
$P_{br} = 0.02\left(\frac{M_r C_d}{h_o}\right)$ $= 0.02\left(\frac{121.5(1.0)}{259.80}\right)10^3 = 9.35\ \text{kN}$	$P_{br} = 0.02\left(\frac{M_r C_d}{h_o}\right)$ $= 0.02\left(\frac{81(1.0)}{259.80}\right)10^3 = 6.23\ \text{kN}$
Stabilite bağlantısı iki kiriş için kullanıldığından, toplam gerekli dayanım	
$P_{br} = 2\times 9.35 = 18.70\ \text{kN}$	$P_{br} = 2\times 6.23 = 12.47\ \text{kN}$

Noktasal stabilite elemanının gerekli rijitliğinin belirlenmesi

Yönetmelik 16.3.1.2 uyarınca,

YDKT	GKT
Noktasal stabilite elemanının gerekli rijitliği, *Yönetmelik* Denk.(16.8)	
$\beta_{br} = \frac{1}{\phi}\left(\frac{10M_r C_d}{L_{br} h_o}\right)$ $= \frac{1}{0.75}\left(\frac{10(121500)1.0}{4500(259.8)}\right) = 1.385\ \text{kN/mm}$	$\beta_{br} = \Omega\left(\frac{10M_r C_d}{L_{br} h_o}\right)$ $= 2.0\left(\frac{10(81000)1.0}{4500(259.8)}\right) = 1.385\ \text{kN/mm}$

Stabilite bağlantısı iki kiriş için kullanıldığından, toplam gerekli rijitlik,

$$\beta_{br} = 2\times 1.385 = 2.77\ \text{kN/mm}$$

c. L120×120×10 enkesitli çapraz elemanın eksenel dayanımının ve rijitliğinin kontrolü

Sistem geometrisinden çapraz elemanın sistem boyu, L_b,

$$L_b = \sqrt{2.0^2 + 4.5^2} = 4.92\ \text{m}$$

$$\cos\theta = \frac{2.0}{4.92} = 0.4065 \ \text{ veya } \left(\cos\theta = \frac{P_{br}}{F_b} = 0.4065\right)$$

Bu durumda yanal stabilite bağlantısında bir çapraz stabilite elemanına etkiyen kuvvet, F_b,

YDKT	GKT
$2F_b\cos\alpha = P_{br}$ $F_b = \frac{18.70}{2(2.0/4.92)} = 23\ \text{kN}$	$2F_b\cos\alpha = P_{br}$ $F_b = \frac{12.47}{2(2.0/4.92)} = 15.34\ \text{kN}$

Stabilite bağlantısının L120×120×10 enkesitli çapraz elemanı en elverişsiz durum olan basınç etkisi altında kontrol edilecektir.

Elemanın karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca,

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin sınıflandırılması

Korniyer kolu (Tablo 5.1A, Durum 3)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{120}{10} = 10 \le \lambda_r = 0.45\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.45\sqrt{\frac{200000}{235}} = 13.12$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre korniyer kollarının genişlik/kalınlık oranları λ_r sınır değerini aşmadığından, enkesit *narin olmayan enkesit* olarak tanımlanır.

Yönetmelik 8.3 uyarınca,

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{120}{10} = 12 \le 0.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 20.71$$

Tek korniyerden oluşan basınç elemanının karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n, eğilmeli burkulma sınır durumu esas alınarak *Yönetmelik* 8.2.1 uyarınca belirlenir.

Yönetmelik 8.3 uyarınca, tek korniyerden oluşan basınç elemanlarında, dışmerkezlik etkisinin ihmal edilmesine ve tanımlanan *etkin narinlik oranları* (L_c / i) kullanılarak eksenel basınç kuvveti dayanımının hesaplanmasına izin verilmektedir. Bunun için esas alınacak koşullar aşağıda verilmiştir.

(a) Korniyer, her iki ucunda aynı kolundan basınç kuvveti etkisinde olmalıdır ✓

(b) Korniyer uçları, en az 2 bulon ile veya kaynakla bağlanmalıdır ✓

(c) Korniyerin boyuna eksenine dik yük bulunmamalıdır ✓

(d) L_c/i oranı 200 sınırını aşmamalıdır. Etkin narinlik oranı, (L_c / i),

$$\frac{L}{i_a} = \frac{(1.0)4920}{36.70} = 134.06 > 80 \quad \text{için}$$

$$\frac{L_c}{i} = 32 + 1.25\frac{L}{i_a} \qquad (8.16)$$

$$\frac{L_c}{i} = 32 + 1.25(13.06) = 199.57 \le 200 \checkmark$$

olmak üzere tüm koşullar sağlanmaktadır. Bu durumda, tek korniyerden oluşan basınç elemanında dışmerkezlik ihmal edilerek, eksenel basınç kuvveti dayanımı (L_c / i=199.57) olarak hesaplanan etkin narinlik oranı ile belirlenir.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_c}{i} = 199.57 > 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 137.40$$

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(199.57)^2} = 50 \text{N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$F_{cr} = 0.877F_e = 0.877(50) = 43.8 \text{ N/mm}^2 \quad (8.3)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr}A_g = 43.8(2320)10^{-3} = 101.73 \text{ kN} \quad (8.1)$$

YDKT	GKT
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(101.73) = 91.56 \text{ kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 101.73/1.67 = 60.92 \text{ kN}$
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{23}{91.56} = 0.25 \le 1.0$ ✓	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{15.34}{60.92} = 0.25 \le 1.0$ ✓

Stabilite bağlantısının L120×120×10 enkesitli çapraz elemanının en elverişsiz durum olan basınç etkisi altında dayanımının yeterli olduğu görülmektedir. Ancak, gerekli rijitlik için enkesit alanının yeterli olduğu gösterilmelidir.

$$\frac{AE}{L_b}\cos^2\theta = \beta_{br}$$

Bu durumda, yanal stabilite bağlantısının yeterli rijitliğe sahip olması için çapraz elemanın sahip olması gereken minimum enkesit alanı hesaplanır.

$$A = \frac{\beta_{br}L_b}{E\cos^2\theta} = \frac{2.77(10)^3(4920)}{200000\cos^2(0.406)} = 68.16 \text{ mm}^2 < 2320 \text{ mm}^2 \text{ ✓}$$

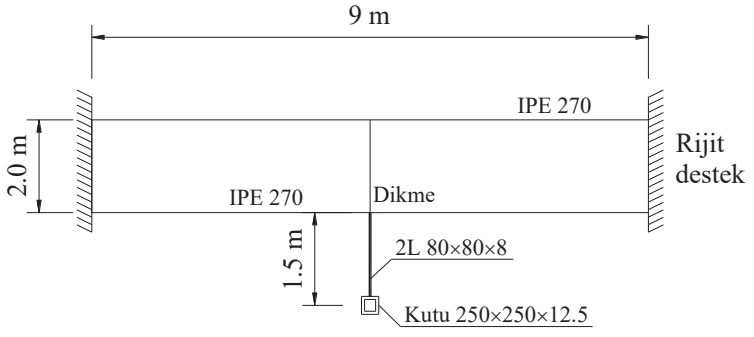
Örnek 16.6

Aşağıdaki şekilde sistem şeması verilen yürüme yolu, mesnet noktalarında boyuna eksenleri etrafında dönmelerinin önlendiği IPE 270 enkesitli kirişler kullanılarak oluşturulmuştur. Açıklıklarının ortalarından birbirine bağlanan kirişler, aynı noktada kiriş üst başlığına birleşen 2L80×80×8 enkesitli bir eleman yardımıyla 1500mm uzaklıktaki kutu enkesitli bir kolona bağlanmaktadır. Kolonun yanal yerdeğiştirmesinin, yürüme yolunun 3.5m altındaki ve üstündeki hizalarda olmak üzere, önlendiği varsayılmaktadır. Her bir kiriş, sabit ve hareketli yükler altında sırasıyla, w_G = 2.0kN/m ve w_Q = 6.0kN/m üniform yayılı yüklerin etkisindedir.

a. Kirişin mevcut eğilme momenti dayanımının kontrolü (YDKT ve GKT)

b. Stabilite elemanının gerekli dayanımının ve rijitliğinin belirlenmesi (YDKT ve GKT)

c. 2L80×80×8 enkesitli stabilite elemanının eksenel dayanımının ve rijitliğinin kontrolü



Çelik sınıfı

Yönetmelik Tablo 2.1A

IPE 270 için	S 355	F_y = 355 N/mm^2	F_u = 510 N/mm^2
L80×80×8 için	S 235	F_y = 235 N/mm^2	F_u = 360 N/mm^2

Yönetmelik Tablo 2.1B

Kutu 250×250×12.5 için	S 235	F_y = 235 N/mm^2	F_u = 360 N/mm^2

Enkesit

IPE 270			
W_{px} = 484 cm^3	i_y = 112 mm	d = 270 mm	
b_f = 135 mm	h = 219.9 mm	t_f = 10.2 mm	t_w = 6.6 mm

L80×80×8
A = 2320 mm^2

Kutu 250×250×12.5
I = 10160 cm^4

Çözüm

a. Kirişin mevcut eğilme momenti dayanımının kontrolü

YDKT	GKT
Gerekli eğilme momenti dayanımı	
$w_u = 1.2w_G + 1.6w_Q$ $= 1.2(2) + 1.6(6) = 12$ kN/m $M_u = \frac{w_u L^2}{8} = \frac{12(9.0)^2}{8} = 121.50$ kNm	$w_a = w_G + w_Q$ $= 2 + 6 = 8$ kN/m $M_a = \frac{w_a L^2}{8} = \frac{8(9.0)^2}{8} = 81$ kNm

Basınç başlığının desteklenmeyen uzunluğunun L_b = 4.5m olması durumunda, her bir kirişin öngörülen yükler altında yeterli eğilme momenti dayanımına sahip olduğu Örnek 16.5 te gösterilmiştir.

b. Noktasal stabilite elemanının gerekli dayanımının ve rijitliğinin belirlenmesi

Kiriş açıklığının orta noktasında yanal yerdeğiştirmenin önlenmesi amacıyla konumlandırılan yanal stabilite bağlantısı, noktasal stabilite bağlantısı olarak değerlendirilmelidir.

$$h_o = d - t_f = 270 - 10.2 = 259.80 \text{ mm}$$

Kiriş tek eğrilikli eğilme etkisinde olduğundan, C_d=1.0

Yönetmelik 16.3.1.2 uyarınca, noktasal stabilite bağlantısının kiriş açıklığına dik doğrultuda gerekli dayanımı, P_{br},

YDKT	GKT
Gerekli dayanım, *Yönetmelik* Denk.(16.7)	
$P_{br} = 0.02\left(\frac{M_r C_d}{h_o}\right)$ $= 0.02\left(\frac{121.5(10)^3 1.0}{259.80}\right) = 9.35$ kN	$P_{br} = 0.02\left(\frac{M_r C_d}{h_o}\right)$ $= 0.02\left(\frac{81(10)^3 1.0}{259.80}\right) = 6.23$ kN
Stabilite bağlantısı iki kiriş için kullanıldığından, toplam gerekli dayanım	
$P_{br} = 2 \times 9.35 = 18.70$ kN	$P_{br} = 2 \times 6.23 = 12.47$ kN

Noktasal stabilite elemanı için gerekli rijitliğin belirlenmesi

Yönetmelik 16.3.1.2 uyarınca,

YDKT	GKT
Gerekli rijitlik, *Yönetmelik* Denk.(16.8)	
$\beta_{br} = \frac{1}{\phi}\left(\frac{10M_r C_d}{L_{br}h_o}\right)$ $= \frac{1}{0.75}\left(\frac{10(121500)1.0}{4500(259.8)}\right) = 1.385 \text{ kN/mm}$	$\beta_{br} = \Omega\left(\frac{10M_r C_d}{L_{br}h_o}\right)$ $= 2.0\left(\frac{10(81000)1.0}{4500(259.8)}\right) = 1.385 \text{ kN/mm}$

Stabilite bağlantısı iki kiriş için kullanıldığından, toplam gerekli rijitlik,

$$\beta_{br} = 2 \times 1.385 = 2.77 \text{ kN/mm}$$

Stabilite bağlantısının rijitliği 2L80×80×8 enkesitli dikme elemanının eksenel rijitliği ile Kutu 250×250×12.5 enkesitli kolonun eğilme rijitlikleri ile belirlenecektir.

2L80×80×8 enkesitli dikme elemanının eksenel rijitliği,

$$\beta = \frac{AE}{L} = \frac{2 \times 1230(200000)}{1500} 10^{-3} = 328 \text{ kN/mm}$$

Kolon, yürüme yolu hizasında orta noktasında stabilite sisteminin kiriş açıklığına dik doğrultuda gerekli dayanımı, P_{br}, kuvveti etkisinde olduğundan, Kutu 250×250×12.5 enkesitli kolonun eğilme rijitliği,

$$\beta = \frac{48EI}{L^3} = \frac{48(200000)10160(10)^4}{(3500+3500)^3} 10^{-3} = 2.84 \text{ kN/mm}$$

Bu durumda, stabilite bağlantı sisteminin toplam rijitliği,

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_{dikme}} + \frac{1}{\beta_{kolon}} = \frac{1}{328} + \frac{1}{2.84} = 0.355 \text{ kN/mm}$$

$$\beta = 2.82 \text{ kN/mm}$$

$$\beta = 2.82 \text{ kN/mm} \geq 2.77 \text{ kN/mm} \checkmark$$

olduğundan yanal stabilite bağlantısının yeterli rijitliğe sahip olduğu görülmektedir. Ancak, gerekli dayanım, P_{br}, için dikme elemanının eksenel dayanımı ve kolonun bileşik etkiler altında dayanımının yeterliliği kontrol edilmelidir.

ÖRNEK ÇELİK ENDÜSTRİ BİNASI

Bu bölümde, tipik tek katlı tek açıklıklı çelik endüstri binasının düşey ve yatay yükler altında analizi ve seçilen elemanlarının tasarımı, "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları" Yönetmeliği'nde uygulama prensipleri verilen Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yaklaşımlarından her ikisi de uygulanarak açıklanacaktır.

Bina sistemi olarak, "*Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik* (DBYBHY) *Açıklamalar ve Örnekler*" kitabı Bölüm 4 teki "Bir doğrultuda süneklik düzeyi normal çelik çerçeveli diğer doğrultuda süneklik düzeyi normal merkezi çaprazlı çelik çerçeveli endüstri binası" örneği seçilmiştir.

Bina taşıyıcı sisteminin seçilen elemanlarının *gerekli dayanımı*, uygulanan tasarım yaklaşımı için öngörülen ve ayrıntıları *Yönetmelik* 5.3 te verilen yük birleşimleri altında ve uygulama prensipleri *Yönetmelik* 6.3 te açıklanan *Genel Analiz Yöntemi ile Tasarım* esasları kullanılarak hesaplanacaktır.

Kar ve rüzgar yükleri *Yönetmelik* 1.3 te referans verilen sırasıyla, TS EN 1991-1-3 ve TS EN 1991-1-4 standartları, deprem yükleri ise DBYBHY 2007 esas alınarak belirlenmiştir.

Örnek binanın depreme dayanıklı olarak tasarımında, *Yönetmelik*'te esas alınan kural ve koşullara ek olarak, yürürlükteki deprem yönetmeliğinin kurallarının da uygulanması sağlanmalıdır.

1 Eylül 2016 da yürürlüğe giren "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları" Yönetmeliği kuralları esas alınarak tasarımı amaçlanan tipik tek katlı endüstri binası örneğinin tasarım aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

1. Bina bilgileri, düşey yükler ve yatay yüklerin tanımlanması
2. Kar yüklerinin belirlenmesi
3. Rüzgar yüklerinin belirlenmesi
4. Deprem yüklerinin belirlenmesi
5. Sistem analizi
6. Seçilen elemanların YDKT ve GKT için en elverişsiz yük birleşimleri altında kontrolü

Bina Bilgileri

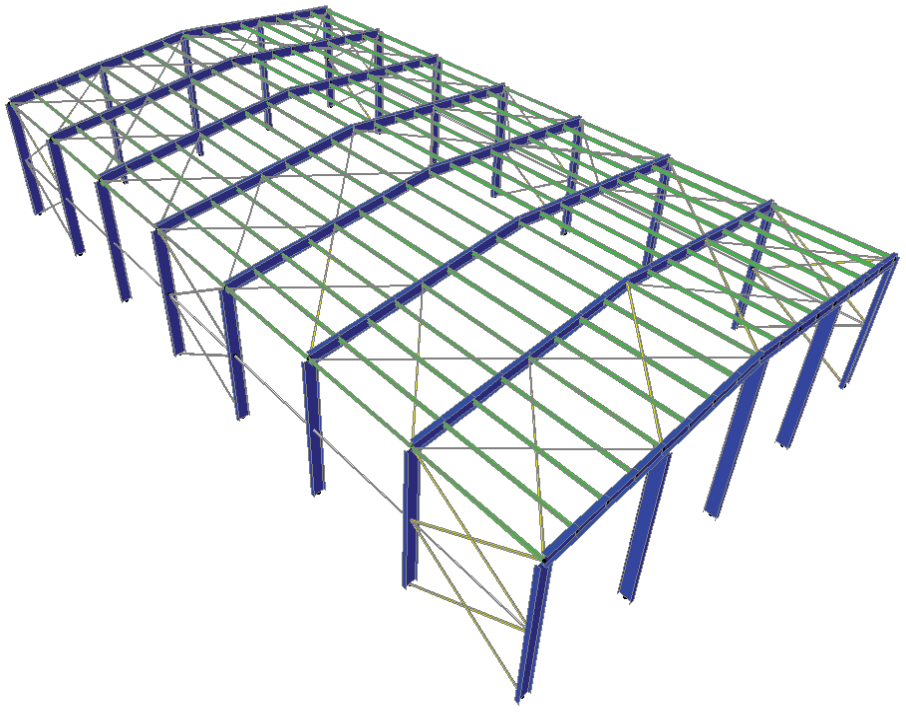
Çelik endüstri binası birinci derece deprem bölgesinde, Z3 yerel zemin sınıfı üzerinde inşa edilecek ve işyeri (fabrika) olarak kullanılacaktır.

İstanbul'da inşa edilen endüstri binasının mahal rakımı 100m olup, rüzgar etkileri için arazi kategorisi II olarak öngörülmüştür.

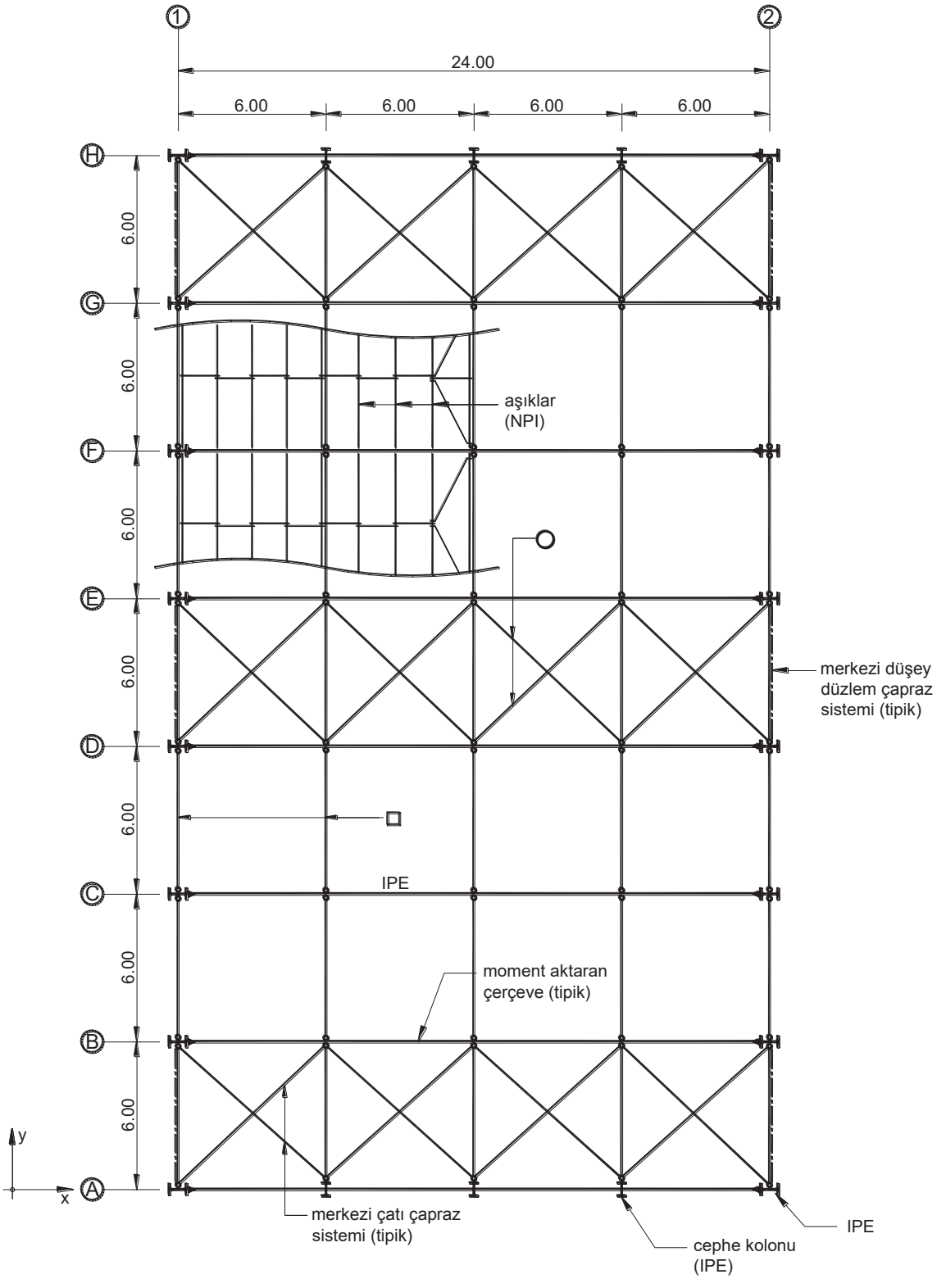
Taşıyıcı sistem bilgileri

Üç boyutlu ve genel sistem görünüşü Şekil 1 de, çatı sistem planı Şekil 2 de, tipik çerçeve enkesiti ve cephe sistem görünüşü Şekil 3 te verilen tek katlı çelik endüstri binasının analizine ait başlıca sonuçlar ile tipik elemanların (kiriş ve kolon) boyutlandırma hesapları aşağıdaki bölümlerde açıklanacaktır.

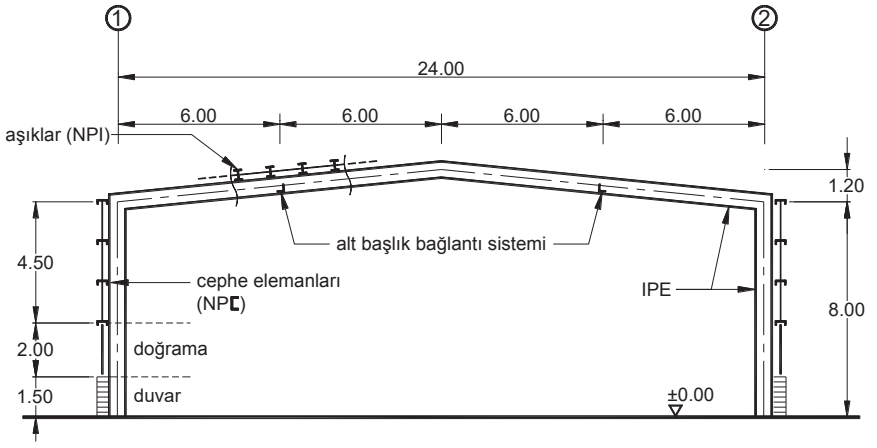
Binanın (x) doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sistemi, DBYBHY 2007 de tanımlanan süneklik düzeyi normal moment aktaran çelik çerçevelerden, (y) doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sistemi ise, süneklik düzeyi normal merkezi çaprazlı çelik çerçevelerden oluşmaktadır.



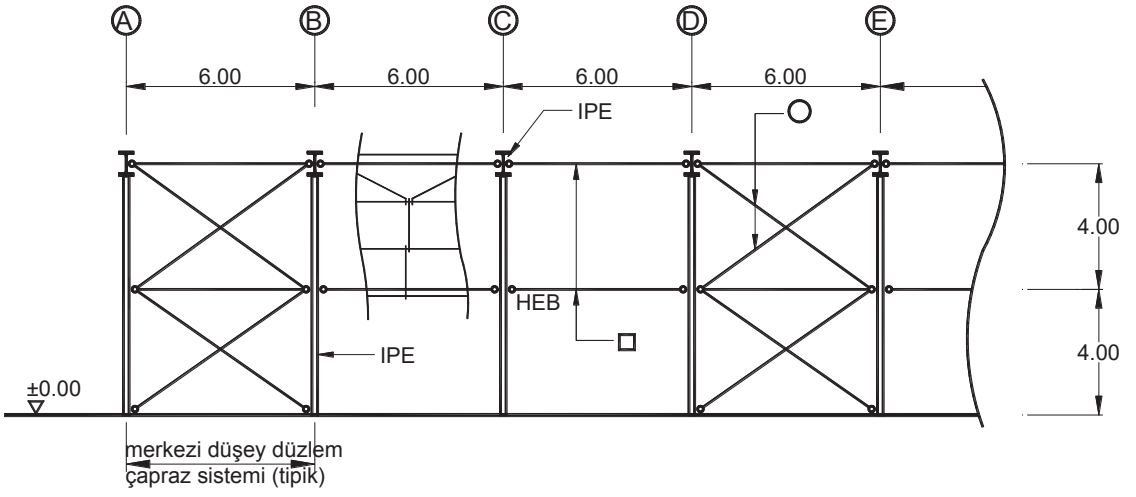
Şekil 1 Genel sistem görünüşü



Şekil 2 – Çatı sistem planı



Şekil 3a – Tipik çerçeve enkesiti (D aksı çerçevesi)



Şekil 3b – Cephe sistem görünüşü (2 aksı cephesi, bölgesel görünüş)

Yükler

Sabit yükler

Çatı döşemesi:	çatı kaplaması	: 0.1 kN/m^2
	aşıklar	: 0.1 kN/m^2
	tesisat yükü	: 0.25 kN/m^2
	çelik konstrüksiyon	: 0.3 kN/m^2
Cepheler:	cephe kaplaması	: 0.1 kN/m^2
	cephe elemanları	: 0.1 kN/m^2
	doğrama	: 0.4 kN/m^2
	bölme duvarlar	: 1.0 kN/m^2
	çelik konstrüksiyon (kolonlar)	: 1.2 kN/m^2
Dış duvar yükü		: 3.0 kN/m

Kar yüklerinin belirlenmesi

Topografik bölge sınıfının, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2 Çizelge (5.1) e göre *normal* olma koşullarını sağladığı varsayılmaktadır.

TS EN 1991-1-3 Bölüm 1.6.1 deki tanım esas alınarak ve TS EN 1991-1-3 Bölüm 4.1 uyarınca, zemin yüzeyindeki kar ağırlığı, s_k, TS EN 1991-1-3 Ek MA Çizelge MA.1 e göre

$$s_k = 0.75\,\mathrm{kN/m^2}$$

olarak belirlenebilir.

Not: TS EN 1991-1-3 Ek MA Çizelge MA.1 de verilen değerlerin güncel olmaması nedeniyle, zemin yüzeyindeki kar ağırlığının bölgedeki meteorolojik ölçümler kullanılarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

TS EN 1991-1-3 Bölüm 1.6.4 e göre ve TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2(3) uyarınca, çatı yüzeyindeki kar ağırlığı, S

$$S = \mu_i C_e C_t s_k$$

Maruz kalma katsayısı, C_e, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2(7) Çizelge (5.1) e göre topografik bölge sınıfı normal topografik alan için, $C_e = 1.0$ olarak belirlenmiştir.

Isı katsayısı, C_t, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2(8) e göre, $C_t = 1.0$ olarak alınmıştır.

$$S = \mu_i (1.0)(1.0) s_k$$

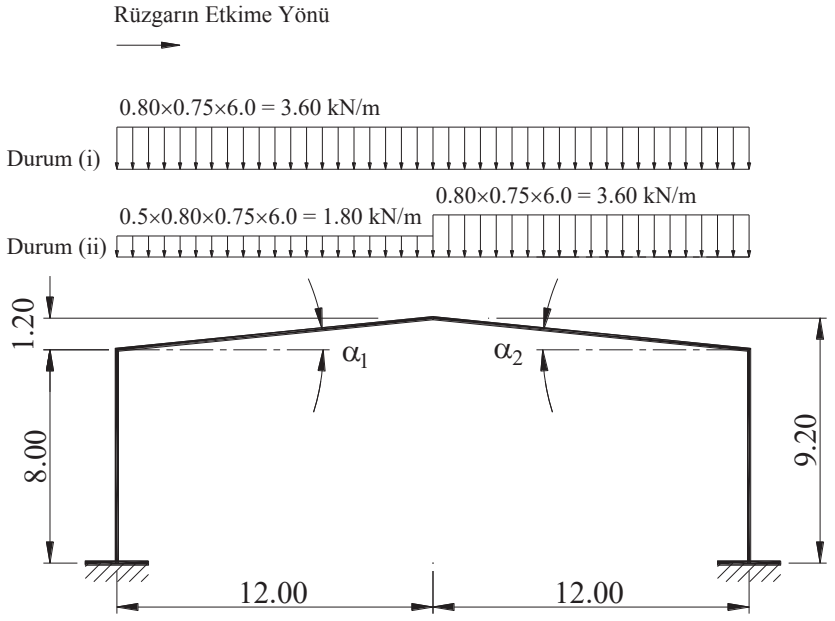
$$S = \mu_i s_k$$

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.3(2) uyarınca, çatı yüzeyindeki kar kütlesinin kaymasının önlenmediği varsayılarak, şekil katsayıları için TS EN 1991-1-3 Çizelge (5.2) de verilen değer ile TS EN 1991-1-3 Şekil (5.3) e göre, her bir çerçeve arasındaki uzaklığın 6.0m olduğu gözönünde tutularak, bina için Şekil 4 te gösterilen kar yükü yayılışları dikkate alınmalıdır.

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

$$0^\circ \le \alpha = 5.71^\circ \le 30^\circ$$

$$\mu_1(\alpha) = 0.80$$



Şekil 4 – Kar yükü yayılışı

TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.3(3) ve 5.3.3(4) uyarınca binanın analizinde, sırasıyla, birikmemiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum (i) ve birikmiş kar yükü düzenlemesi olarak Durum (ii) de gösterilen kar yükü yayılışları gözönüne alınacaktır.

Rüzgar yüklerinin belirlenmesi

Yönetmelik 5.3 e göre, rüzgar hızının temel değeri, $V_{b,o}$ = 28 m/sn (100 km/sa) den ve binanın ana taşıyıcı sistemine, dış cephe kaplamalarına ve rüzgara maruz yapısal ve yapısal olmayan elemanlarına gelen rüzgar yükleri 0.50 kN/m^2 den az olmayacaktır. Buna göre, rüzgar hızının temel değeri, $V_{b,o}$ = 28 m/sn (100 km/sa) olarak alınmıştır.

Not: Binanın bulunduğu arazi koşullarına göre gerektiğinde rüzgar hızının temel değeri bölgesel meteorolojik ölçümlerle değerlendirilmelidir.

Esas rüzgar hızı,

$$v_b = c_{dir} c_{season} V_{b,0} \qquad \text{TS EN 1991-1-4 (4.1)}$$

Doğrultu katsayısı, c_{dir} ve mevsim katsayısı, c_{season} değerleri tavsiye edilen değer olan 1.0 alındığında, esas rüzgar hızı $v_b = V_{b,0} = 28\,\text{m/sn}$ olarak elde edilir.

Bir arazide yer seviyesinden z metre yükseklikteki ortalama rüzgar hızı $v_m(z)$, o arazinin engebeliğine, orografik özelliklerine ve esas rüzgar hızı v_b değerine bağlı olarak TS EN 1991 - 1 -4 Denk.(4.3) ile hesaplanabilir.

Endüstri binasının inşa edileceği arazi kategorisi II için arazi parametreleri TS EN 1991-1-4 Çizelge (4.1) de aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$z_0 = 0.05\,\text{m}$$

$$z_{min} = 2\,\text{m}$$

İncelenen binada, z = 9.2m alınarak,

$$z_{min} = 2\,\text{m} \le z = 9.2\,\text{m} \le z_{maks} = 200\,\text{m}$$

$$k_r = 0.19\left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} = 0.19\left(\frac{0.05}{0.05}\right)^{0.07} = 0.19$$ TS EN 1991-1- 4(4.5)

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.19\ln\left(\frac{9.2}{0.05}\right) = 0.99$$ TS EN 1991-1- 4(4.4)

Arazi orografisi için TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.3.3 esas alındığında, orografinin rüzgar hızını arttırmadığı varsayımı ile orografi katsayısı, $c_o(z)$, tavsiye edilen değer olan 1.0 e eşit olarak alınmaktadır (Bkz. TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.3.1, Not 1).

Ortalama rüzgar hızı, $v_m(z)$,

$$v_m(z) = c_r(z)c_o(z)V_b$$ TS EN 1991-1- 4(4.3)

$$v_m(z) = 0.99(1.00)28 = 27.72\,\text{m/sn}$$

z metre yükseklikteki, ortalama ve kısa süreli hız değişikliklerini içeren tepe hız kaynaklı rüzgar basıncı, q_p(z) TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.5 ile hesaplanabilir.

Bunun için, z metre yükseklikteki türbülans şiddeti, $I_v(z)$

$z_{min} = 2\,\text{m} \le z = 9.2\,\text{m} \le z_{maks} = 200\,\text{m}$ olduğundan,

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z)\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1.0}{1.0\ln\left(\frac{9.2}{0.05}\right)} = 0.19$$ TS EN 1991-1- 4(4.7)

$$q_p(z) = \left[1+7I_v(z)\right]\frac{1}{2}\rho v_m^2(z) = c_e(z)q_b$$ TS EN 1991-1- 4(4.8)

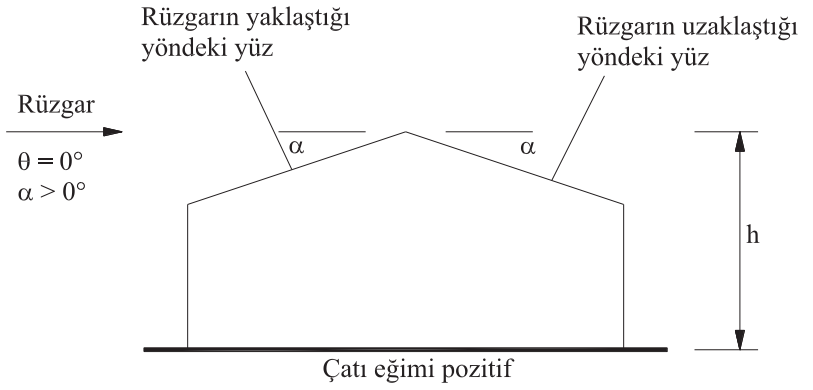
$$q_p(z) = \left[1+7(0.19)\right]\frac{1}{2}(1.25)(27.72)^2 10^{-3} = 1.12\,\text{kN/m}^2$$

veya TS EN 1991-1-4 Şekil (4.2) ile z = 9.2m yükseklik ve arazi kategorisi II için, maruz kalma katsayısı $c_e(z)$ = 2.283 olarak elde edilmektedir. Buna göre,

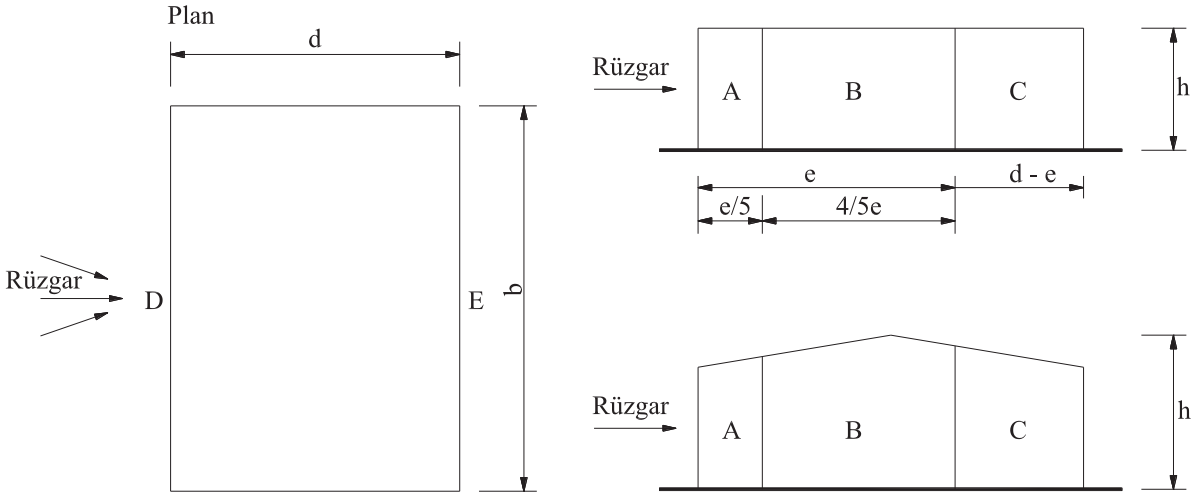
$$q_p = \frac{1}{2}\rho v_m^2 = \frac{1}{2}(1.25)28^2 = 490\,\text{N/mm}^2$$ TS EN 1991-1- 4(4.10)

$$q_p(z) = c_e(z)q_b == 2.283(490)10^{-3} = 1.12\,\text{kN/m}^2$$

Tepe kaynaklı hız basıncı, $q_p(z)$, referans yüksekliği, z_i ve dış ve iç basınç katsayılarına bağlı olarak, yüzeylere etkiyen dış ve iç rüzgar basınçları, TS EN 1991-1-4 Bölüm 5.2 de sırasıyla, Denk.(5.1) ve Denk.(5.2) ile verilmektedir. Bu durumda, binanın düşey duvarları için TS EN 1991-1-4 Bölüm 7.2.2 ve çift eğimli çatı için TS EN 1991-1-4 Bölüm 7.2.5 de verilen etki bölgelerinde kullanılması gereken dış basınç, $c_{pe,10}$ ve iç basınç, c_{pi} katsayıları hesaplanacaktır.



Şekil 5 – Çift eğimli çatı



Şekil 6 – TS EN 1991-1-4 Şekil 7.5 e göre düşey duvar (cephe) etki bölgeleri

Rüzgar yönü θ = 0° için yapının düşey duvarlarına ve çatıya etkiyen rüzgar yükünün belirlenmesi

b = 42m (rüzgar yönüne dik boyut)

d = 24m

olmaktadır. Bu durumda,

e = min (b ; 2h) = min(42.00m; 18.40m) = 18.40m

$e < d$ olduğundan düşey duvarda A, B, C etki bölgeleri için dış basınç katsayıları, c_{pe}

h/d = 9.2/24 = 0.38 > 0.25 olduğundan,

TS EN 1991-1-4 Çizelge (7.1) uyarınca, belirlenen değerler aşağıda verilmektedir.

Tablo 1. Düşey duvarlar için $c_{pe,10}$ dış basınç katsayıları

Bölge	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
c_{pe}	-1.2	-0.8	-0.5	0.8	-0.5

Not: Güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, h/d = 0.38 ≤ 1.0 olan binalar için önerilen 0.85 katsayısı kullanılmamıştır.

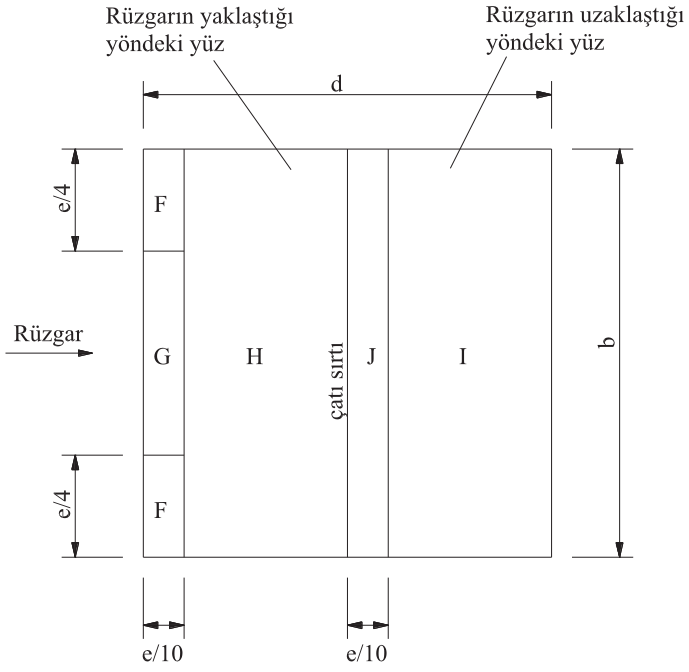
TS EN 1991-1-4 Bölüm 5.2 uyarınca, bir duvara veya çatıya etkiyen net basınç, elemanların zıt yüzeylerinde oluşan basınçların yönleri(işaretleri) de dikkate alınarak hesaplanan farkına eşittir.
İç basınç katsayısı, bina içinde açıklıkların dağılımına ve boyutuna bağlıdır. Bu örnek için açıklık oranı belli olmadığından, iç basınç katsayısı, c_{pi} değeri +0,2 veya -0,3 olmak üzere, TS EN 1991-1-4 Bölüm 7.2.9 Not (2) uyarınca, tavsiye edilen değerleri kullanılarak hesaplanan net basınç katsayıları aşağıda verilmektedir.

Tablo 2. Düşey duvarlar için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = -0.3) için

Bölge	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-0.9	-0.5	-0.2	1.1	-0.2

Tablo 3. Düşey duvarlar için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = +0.2) için

Bölge	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-1.4	-1.0	-0.7	0.6	-0.7



Şekil 7 – Rüzgâr yönü θ = 0 ° için çatı etki bölgeleri

TS EN 1991-1-4 Şekil (7.8) uyarınca çift eğimli çatılar için etki bölgeleri Şekil 7 de gösterilmiştir.

Tablo 4. Çatı için $c_{pe,10,}$ dış basınç katsayıları (TS EN 1991-1-4:Çizelge 7.4a)

Bölge	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**
c_{pe} (α=5°)	-1.7	-1.2	-0.6	-0.6	+0.2/-0.6
c_{pe} (α=5.71°)	-1.13	-0.92	-0.58	-0.59	-0.63
c_{pe} (α=15°)	-0.9	-0.8	-0.3	-0.4	-1.0

Çatı eğim açısı, α=5.71^o olduğundan 5^o ve 15^o arasında doğrusal interpolasyon yapılarak, her bölge için kullanılması gereken dış basınç katsayıları belirlenmiştir.

Tablo 5. Çatı için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = -0.3) için

Bölge	F	G	H	I	J
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-0.83	-0.62	-0.28	-0.29	-0.33

Tablo 6. Çatı için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = +0.2) için

Bölge	F	G	H	I	J
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-1.33	-1.12	-0.78	-0.79	-0.83

Rüzgar yönü θ = 90^o için binanın düşey duvarlarına ve çatıya etkiyen rüzgar yükünün belirlenmesi

b = 24.00m (rüzgar yönüne dik boyut)

e = min (b;2h) = min (24.00m; 18.40 m)=18.40m

e = 18.40 m ve d = 42.00 m için, $e < d$ olduğundan düşey duvarlarda A, B, C bölgeleri için $c_{pe,}$ dış basınç katsayıları TS EN 1991-1-4 Şekil 7.5 de verildiği gibi gözönüne alınacaktır.

h/d = 9.2/42 = 0.219 ≤ 0.25 olduğundan, TS EN 1991-1-4 Çizelge (7.1) ile belirlenen değerler aşağıda verilmektedir.

Tablo 7. Düşey duvarlar için $c_{pe,10}$ dış basınç katsayıları

Bölge	A	B	C	D	E
c_{pe}	-1.2	-0.8	-0.5	0.7	-0.3

Tablo 8. Düşey duvarlar için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = -0.3) için

Bölge	A	B	C	D	E
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-0.9	-0.5	-0.2	1.0	0.0

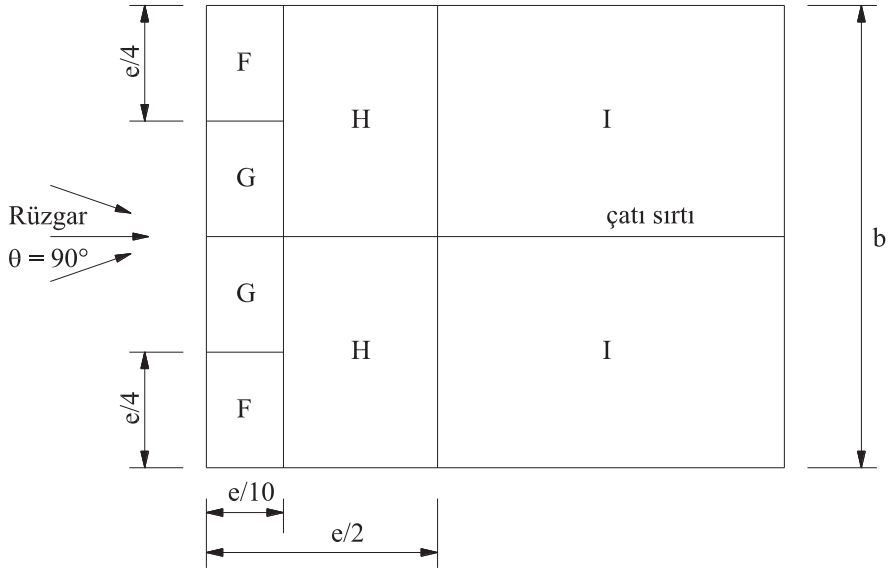
Tablo 9. Düşey duvarlar için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = +0.2) için

Bölge	A	B	C	D	E
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-1.4	-1.0	-0.7	0.5	-0.5

Tablo 10. Çatı için $c_{pe,10}$ dış basınç katsayıları

Bölge	F	G	H	I
c_{pe} (α=5^o)	-1.6	-1.3	-0.7	-0.6
c_{pe} (α=5.71^o)	-1.58	-1.3	-0.7	-0.6
c_{pe} (α=15^o)	-1.3	-1.3	-0.6	-0.5

Çatı için c_{pe} katsayıları TS EN 1991-1-4 Çizelge (7.4b) den çatı eğim açısı, α=5.71° için 5° ve 15° arasında doğrusal interpolasyon yapılarak, her bölge için kullanılması gereken dış basınç katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 8 – Rüzgâr yönü θ = 90° için etki bölgeleri

Tablo 11. Çatı için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = -0.3) için

Bölge	**F**	**G**	**H**	**I**
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-1.28	-1.0	-0.4	-0.3

Tablo 12. Çatı için c_{pnet}, net basınç katsayıları, (c_{pi} = +0.2) için

Bölge	**F**	**G**	**H**	**I**
$c_{pnet} = c_{pe} - c_{pi}$	-1.78	-1.5	-0.9	-0.8

Toplam rüzgar basıncının belirlenmesi

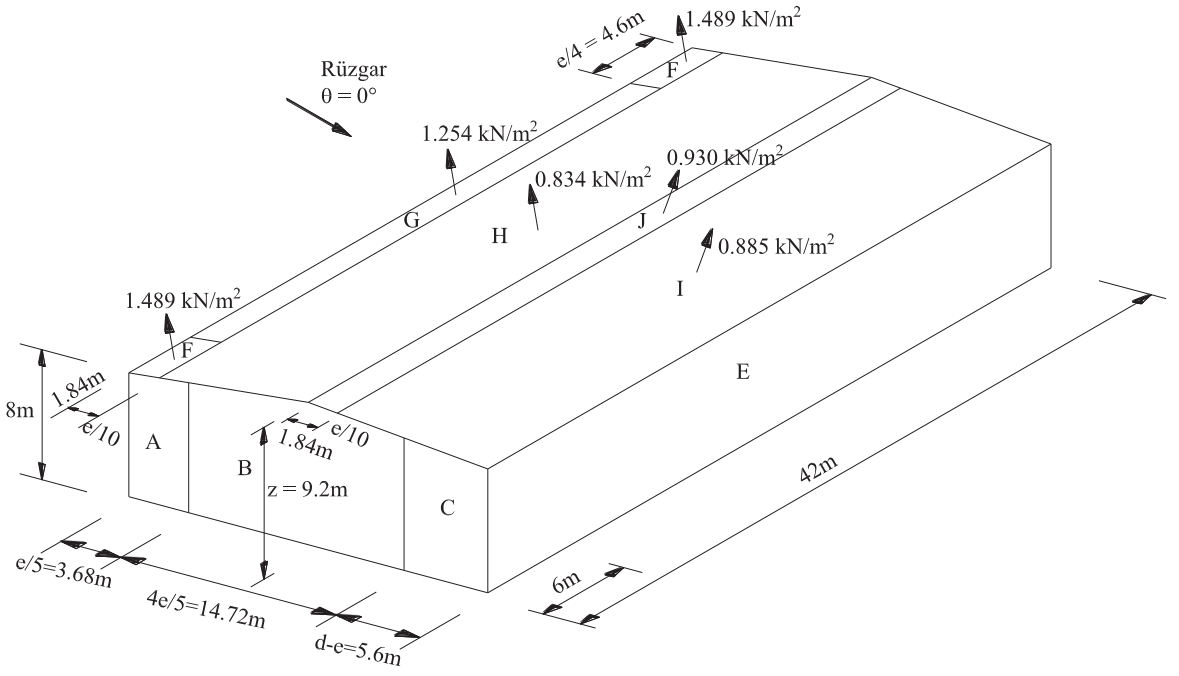
Tepe kaynaklı hız basıncı, $q_p(z)$,

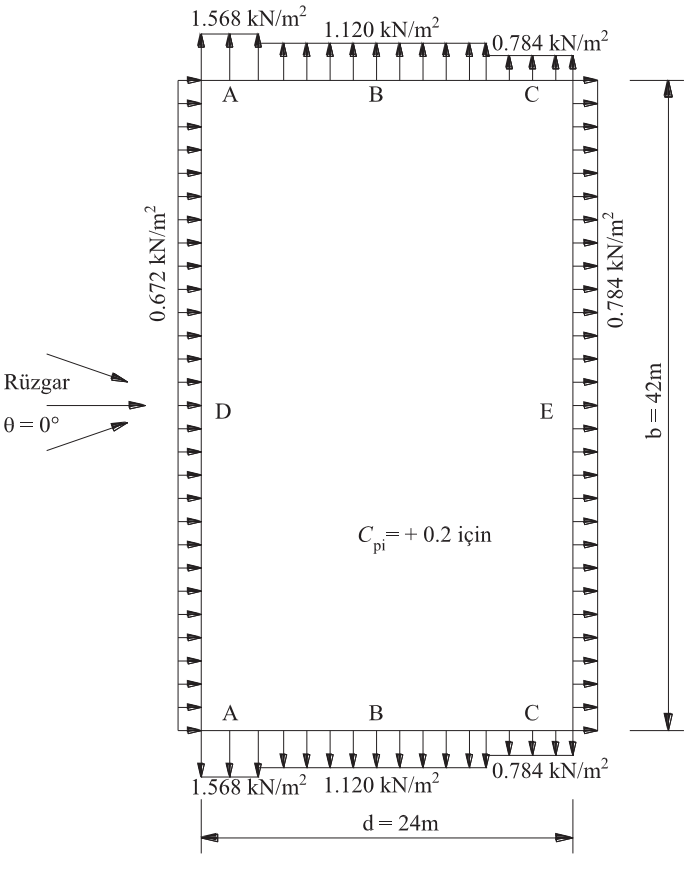
$$q_p(z) = c_e(z) q_b = 2.283(490)10^{-3} = 1.12\,\text{kN/m}^2$$

Yukarıda belirlenen yüzeylere etkiyen net rüzgar basınçları ile iç basınç ve dış basınç referans yükseklikleri, $z_i = z_e$ olduğundan, etki bölgelerindeki rüzgar basınçları

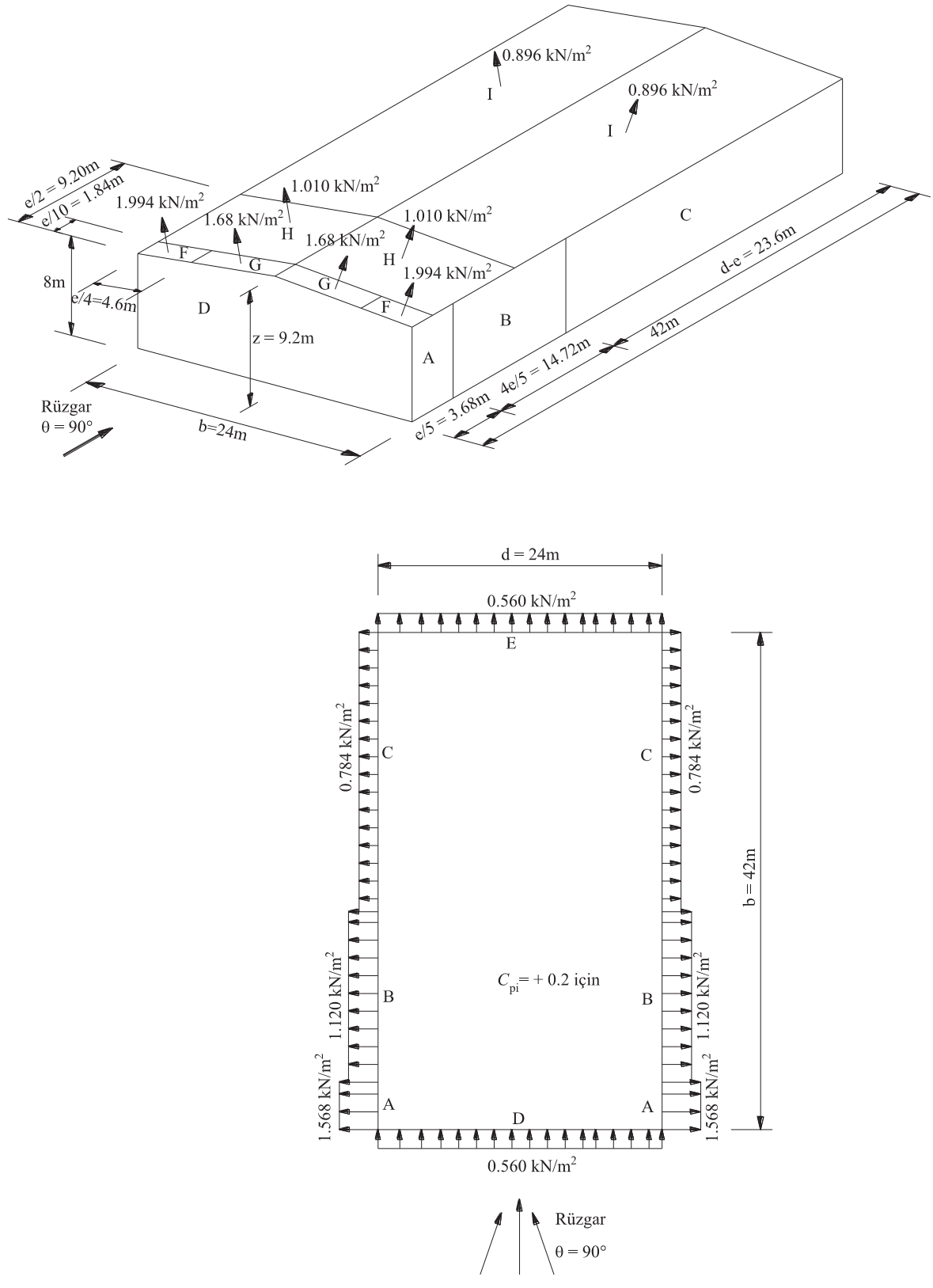
$$w(z) = c_{net} q_p(z)$$

denklemiyle hesaplanabilir. Bu şekilde hesaplanan en elverişsiz rüzgar basınçları bina geometrisi üzerinde olmak üzere, aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.





Şekil 9 – Rüzgâr yönü θ = 0° için etki bölgelerinde rüzgar basınçları



Şekil 10 – Rüzgâr yönü θ = 90 ° için etki bölgelerinde rüzgar basınçları

Deprem yüklerinin belirlenmesi

Tasarımı yapılacak olan tek katlı çelik endüstri binası birinci derece deprem bölgesinde, Z3 yerel zemin sınıfı üzerinde inşa edilecek ve işyeri (fabrika) olarak kullanılacaktır. Yapı taşıyıcı sisteminin, (x) doğrultusunda süneklik düzeyi normal moment aktaran çelik çerçevelerden, (y) doğrultusunda süneklik düzeyi normal merkezi çaprazlı çelik çerçevelerden oluşturulması öngörülmüştür. Bu parametreler esas alınarak belirlenen deprem karakteristikleri DBYBHY 2007 ye göre aşağıda verilmiştir.

- Etkin yer ivmesi katsayısı (1. Derece Deprem Bölgesi)
  $A_o = 0.4$ (DBYBHY 2007 Tablo 2.2)
- Bina önem katsayısı (işyerleri)
  $I = 1.00$ (DBYBHY 2007 Tablo 2.3)
- Spektrum karakteristik periyotları
  $T_A = 0.15$ sn, $T_B = 0.40$ sn (DBYBHY 2007 Tablo 2.4, Z3 yerel zemin sınıfı)
- Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
  (x doğrultusunda deprem yüklerinin tamamının süneklik düzeyi normal moment aktaran çelik çerçeveler ile taşındığı çelik bina)

  $R_x = 5$ (DBYBHY 2007 Tablo 2.5)
  (y doğrultusunda deprem yüklerinin tamamının süneklik düzeyi normal çerçevelerle taşındığı çelik bina)
  $R_y = 4$ (DBYBHY 2007 Tablo 2.5)
- Hareketli yük katılım katsayısı; $n = 0.30$ (DBYBHY 2007 Tablo 2.7)

Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanmasında, DBYBHY 2007 **(**2.7.4**)** e göre, çerçevenin birinci doğal titreşim periyodu, DBYBHY 2007 Denk.(2.11) ile hesaplanan değerden daha büyük alınmayacaktır.

$$T_1 = 2\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} m_i d_{fi}^2}{\sum_{i=1}^{N} F_{fi} d_{fi}} \right)^{1/2} \qquad \text{DBYBHY 2007 (2.11)}$$

Toplam eşdeğer deprem kuvveti (taban kesme kuvveti), V_t, DBYBHY 2007 Denk.(2.4) ile hesaplanacaktır.

$$V_t = \frac{WA(T_1)}{R_a(T_1)} \geq 0.10 A_o IW \qquad \text{DBYBHY 2007 (2.4)}$$

(x) doğrultusundaki moment aktaran çerçeveler özellikleri ve yükleri bakımından benzer olmaları nedeniyle, düşey yükler ve deprem etkileri, orta aks çerçevelerinden biri, örneğin (D) aksı çerçevesi, gözönüne alınarak belirlenmektedir.

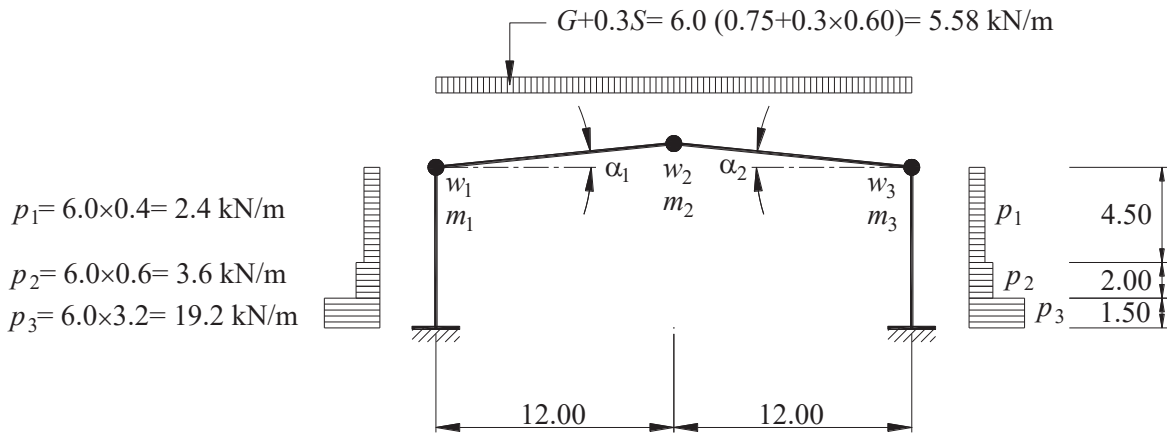
Örnek endüstri binası için (D) aksı çerçevesine etkiyen sabit yükler ve yukarıda Şekil 4 te gösterilen Durum (i) kar yükü yayılışı dikkate alınarak, hareketli yük katılım katsayısı ile çarpılmış kar yükleri Şekil 11 de gösterilmektedir.

Sistemin düğüm noktalarında toplandığı varsayılan w_i toplam ağırlıklarının ve m_i kütlelerinin bu yüklere bağlı olarak hesabı aşağıda verilmiş ve sonuçlar Tablo 13 te özetlenmiştir.

$$p_1 = 6.0 \times 0.2 + 1.2 = 2.4\ \text{kN/m}$$

$$p_2 = 6.0 \times 0.4 + 1.2 = 3.6\ \text{kN/m}$$

$$p_3 = 6.0 \times 3.0 + 1.2 = 19.2\ \text{kN/m}$$



Şekil 11 – (D) aksı çerçevesine etkiyen sabit ve hareketli yükler (n=0.30)

$$w_1 = w_3 = 19.2 \times 1.5 \times \frac{0.75}{8.0} + 3.6 \times 2.0 \times \frac{2.5}{8.0} + 2.4 \times 4.5 \times \frac{5.75}{8.0} + 5.58 \times 6.0 = 46.20\ \text{kN}$$

$$m_1 = m_3 = \frac{46.20}{9.81} = 4.71\ \text{kNs}^2/\text{m}$$

$$w_2 = 5.85 \times 12.0 = 70.20\ \text{kN}$$

$$m_2 = \frac{66.96}{9.81} = 6.83\ \text{kNs}^2/\text{m}$$

Tablo 13. Düğüm noktası ağırlıkları ve kütleleri

Düğüm Noktası	w_i	m_i
1	46.20	4.71
2	66.96	6.83
3	46.20	4.71
Toplam	159.36	16.25

DBYBHY Denk.(2.11) deki F_{fi} fiktif kuvvetleri düğüm noktalarının ağırlıkları ve ±0.00 kotundan yükseklikleri ile orantılı kuvvetlerdir ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilirler.

$$F_{fi} = \frac{w_i H_i}{\sum_{j=1}^{N} w_j H_j} F_o$$

Burada F_0 , seçilen herhangi bir yük katsayısını göstermektedir ve bu örnekte F_o = 1000 kN olarak alınacaktır. Bu şekilde hesaplanan F_{fi} fiktif kuvvetleri Tablo 14 ün ikinci kolonunda verilmişlerdir.

Ön boyutlandırma sonucunda kiriş ve kolon enkesitleri belirlenen çerçeve sistemin F_{fi} fiktif kuvvetleri altında analizi ile elde edilen d_{fix} yatay yerdeğiştirmeleri Tablo 14 ün üçüncü kolonunda görülmektedir. Bu büyüklükler DBYBHY 2007 Denk.(2.11) de yerlerine konularak (D) aksı çerçevesinin birinci doğal titreşim periyodu hesaplanır. Bu hesaplar, Tablo 14 üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 14. Fiktif yüklerden oluşan yerdeğiştirmeleri

Düğüm Noktası	F_{fi} (kN)	d_{fix} (m)	m_i	$m_i d_{fix}^2$	$F_{fi} d_{fix}$
1	272.7	0.23991	4.71	0.27109	65.423
2	454.6	0.24088	6.83	0.39630	109.504
3	272.7	0.23991	4.71	0.27109	65.423
Toplam	1000.0			0.93848	240.35

(x) doğrultusu için, örnek binanın kiriş ve kolon enkesitleri ile belirlenen F_{fi} fiktif kuvvetleri altında analizi ile elde edilen d_{fix} yatay yerdeğiştirmeleri DBYBHY 2007 Denk.(2.11) de yerlerine konularak, (D) aksı çerçevesinin birinci doğal titreşim periyodu T_{1x}=0.393s olarak bulunur.

Binanın x doğrultusundaki taban kesme kuvveti,

$$T_{1x} = 0.393 \text{ s} < 0.60 \text{ s} = T_B$$

$$S(T_{1x}) = 2.5 \qquad \text{ve} \qquad R_{ax}(T_{1x}) = R_x = 5$$

değerleri DBYBHY 2007 Denk.(2.4) te yerlerine konularak,

$$V_{tx} = 159.36 \frac{0.40 \times 1.0 \times 2.5}{5} = 31.87 \text{kN}$$

şeklinde hesaplanır.

DBYBHY 2007 Bölüm 2.7.2 uyarınca, (x) doğrultusunda, moment aktaran çelik çerçeveye etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü, düğüm noktalarına etkiyen eşdeğer deprem yüklerinin toplamı olarak ifade edilir. Binanın tek katlı olması nedeniyle, ek eşdeğer deprem yükünün hesabına gerek olmamaktadır. Bu durumda, düğüm noktalarına etkiyen eşdeğer deprem yükleri,

$$F_i = V_t \frac{w_i H_i}{\sum_{j=1}^{N} w_j H_j}$$

DBYBHY 2007 (2.9)

$$\sum_{j=1}^{N} w_j H_j = 1355.23$$

$$F_1 = F_3 = 31.87 \frac{46.20 \times 8.0}{1355.23} = 8.69 \text{kN}$$

$$F_2 = 31.87\frac{66.96\times 9.2}{1355.23} = 14.49\text{kN}$$

olarak elde edilir.

(y) doğrultusundaki deprem etkilerine karşı düzenlenen merkezi çaprazlı çelik çerçeveler özellikleri bakımından benzer olmaları nedeniyle, deprem etkileri, D-E aksları arasındaki merkezi çapraz sistemi gözönüne alınarak belirlenmektedir.

(y) doğrultusu için, tek katlı olan ve büyük bir yatay rijitliğe sahip bulunan merkezi çapraz sisteminin birinci doğal titreşim periyodunun

$$T_A \le T_{1y} \le T_B$$

olduğu, diğer bir deyişle, $S(T_{1y})$ spektrum katsayısının

$$S(T_{1y}) = 2.5$$

olarak alınabileceği varsayımı yapılmıştır

D-E aksları arasındaki çatı ve düşey düzlem çapraz sistemlerine etkiyen deprem yükleri aşağıda hesaplanmış ve Şekil 12 de gösterilmiştir.

W_i, ilgili düğüm noktasına etkiyen eşdeğer deprem yükünün hesabında esas alınan ağırlıktır ve C-F aksları arasındaki sabit yükler ve hareketli yük katılım katsayısı ile çarpılan kar yüklerinin toplamından meydana gelmektedir. Binaya (y) doğrultusunda etkiyen eşdeğer deprem yükleri,

$$S(T_{1y}) = 2.5 \qquad \text{ve} \qquad R_{yx}(T_{1y}) = R_y = 4$$

değerleri DBYBHY 2007 Denk.(2.4) te yerlerine konularak,

$$F_{iy} = W_i\frac{0.4\times 1.0\times 2.5}{4} = 0.25W_i$$

şeklinde hesaplanır.

Çatı çapraz sistemine etkiyen eşdeğer deprem yükleri,

$$F_1 = 0.25\times(0.75+0.3\times 0.60)\times 3.0\times 9.0 = 6.28\text{kN}$$

$$F_2 = 0.25\times(0.75+0.3\times 0.6)\times 6.0\times 9.0 = 12.56\text{kN}$$

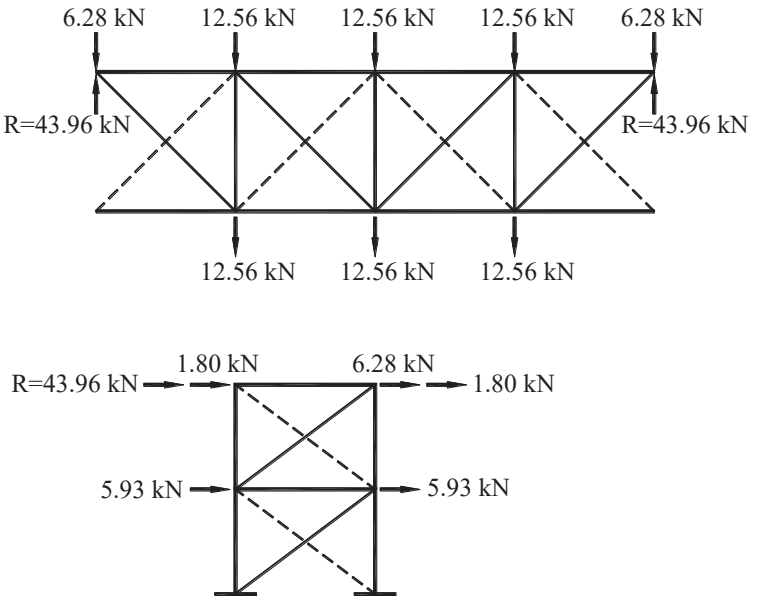
Çatı çapraz sisteminin mesnet tepkileri,

$$R = 6.28 + 3.0\times 12.56 = 43.96\text{kN}$$

(y) doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sisteme (düşey merkezi çaprazlı çelik çerçeve) etkiyen deprem yükleri,

$$F_3 = 0.25\times(2.4\times 2.0)\frac{3}{2} = 1.80\text{kN}$$

$$F_4 = 0.25\times\left(2.4\left(2.0+0.5\times\frac{3.75}{4.0}\right)+3.6\times 2.0\times\frac{2.5}{4.0}+19.2\times 1.5\times\frac{0.75}{4.0}\right)\times\frac{3}{2} = 5.93\text{kN}$$



Şekil 12 – D-E aksları arasındaki yatay yük taşıyıcı sisteme etkiyen deprem yükleri

Hesaplarda, deprem yüklerinin basınç kuvveti oluşturacağı çubuklar terkedilerek yalnız çekme kuvvetleri etkisindeki çubuklar gözönüne alınmıştır.

SİSTEM ANALİZİ

Endüstri binasının bilgisayar analizleri için analitik modeli üç boyutlu olarak hazırlanmıştır. Cephe ve çatı yüzeylerine etkiyen rüzgar yükleri, binanın üç boyutlu analitik modelinde, kolonlar ve çerçeve kirişlerine etkiyen statik olarak eşdeğer çizgisel yükler şeklinde uygulanmaktadır. Bina sistemine etkiyen deprem yükleri, (x) doğrultusunda D aksı çerçevesi için, (y) doğrultusunda ise D-E aksları arasındaki merkezi çaprazlı çelik çerçeve için hesaplanan yükler esas alınarak uygulanmaktadır.

Sistemin *Genel Analiz Yöntemi* ile gerçekleştirilen ikinci mertebe teorisine göre analizinde, binanın elemanlarının *gerekli dayanımı*, uygulanan tasarım yaklaşımı için öngörülen ve ayrıntıları *Yönetmelik* 5.3 te verilen aşağıdaki yük birleşimleri altında hesaplanacaktır. Bu yük birleşimleri ile belirlenen toplam yükler, ikinci mertebe teorisine göre sistem analizinde kullanılmak üzere, *Yönetmelik* 6.1 uyarınca YDKT için $\alpha = 1.0$ katsayısı ile, GKT yüklemesi için $\alpha = 1.6$ katsayısı ile çarpılacaktır.

Yönetmelik 6.2.2.2 uyarınca, sistemin düğüm noktalarının konumundaki geometrik ön kusurları temsil eden yatay fiktif yükler,

$$N_{\mathrm{i}} = 0.002\alpha Y_i \qquad (6.1)$$

olmak üzere, YDKT ve GKT yük birleşimleri için ayrı ayrı olarak gözönüne alınacaktır.

Genel Analiz Yöntemi ile sistemin ikinci mertebe teorisine göre analizinde, doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin etkisini yaklaşık olarak gözönüne almak üzere, eleman rijitliklerinin azaltılması gerekmektedir.

Başlangıçta, kolon eksenel kuvvetlerinin eksenel kuvvet kapasitelerine oranlarının $\alpha P_{\mathrm{r}} / P_{\mathrm{ns}} \leq 0.5$ koşulunu sağladığı varsayımı ile, elemanların eğilme, kesme ve eksenel rijitlikleri 0.80 katsayısı ile çarpılarak azaltılmıştır.

Analizin sonunda, yukarıdaki koşulun sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilecek ve gerekli olması halinde eğilme rijitlikleri *Yönetmelik* Denk.(6.3) uyarınca yeniden azaltılarak analiz tekrarlanacaktır.

Bir bilgisayar yazılımından yararlanarak, bu şekilde tanımlanan sistemin P – Δ ve P – δ etkilerini içerecek şekilde *ikinci mertebe teorisi*ne göre analizi yapılmış, YDKT ve GKT yük birleşimleri için elde edilen iç kuvvetler ve düğüm noktası yatay yerdeğiştirmeleri belirlenmiştir.

Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım için Yük Birleşimleri (*Yönetmelik* 5.3.1)

(1) $1.4G$

(2a) $1.2G + 1.6(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$

(2b) $1.2G + 1.6Q + 0.5(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$

(3) $1.2G + 1.6(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R) + (Q \text{ veya } 0.8W)$

(4) $1.2G + 1.0Q + 0.5(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R) + 1.6W$

(5) $1.2G + 1.0Q + 0.2S + 1.0E$

(6) $0.9G + 1.6W$

(7) $0.9G + 1.0E$

Güvenlik Katsayıları ile Tasarım Yük Birleşimleri (*Yönetmelik* 5.3.2)

(1) G

(2) $G + Q$

(3) $G + (Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$

(4) $G + 0.75Q + 0.75(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R)$

(5a) $G + 1.0W$

(5b) $G + 0.7E$

(6a) $G + 0.75Q + 0.75(Q_r \text{ veya } S \text{ veya } R) + 0.75W$

(6b) $G + 0.75Q + 0.75S + 0.75(0.7E)$

(7) $0.6G + W$

(8) $0.6G + 0.7E$

Not: DBYBHY 2007 ye göre deprem etkisi, E, aşağıdaki gibi gözönüne alınmıştır.

(x) doğrultusu için, $E = E_x \pm 0.30E_y$

(y) doğrultusu için, $E = E_y \pm 0.30E_x$

TASARIM

Endüstri binasının seçilen elemanlarının *gerekli dayanımı*, uygulanan tasarım yaklaşımı için öngörülen ve ayrıntıları *Yönetmelik* 5.3 te verilen yük birleşimleri altında ve uygulama prensipleri *Yönetmelik* 6.3 te açıklanan Genel Analiz Yöntemi ile Tasarım esasları kullanılarak bilgisayar yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır.

İkinci mertebe etkileri içeren en elverişsiz yük birleşimi için belirlenen iç kuvvetler gözönüne alınarak, x doğrultusundaki çerçeve sisteminin seçilen elemanları (kiriş ve kolon) ile y doğrultusundaki çapraz sisteminin seçilen elemanlarının (diyagonal ve dikme) kontrol hesapları açıklanacaktır.

Not: Örnek binanın depreme dayanıklı olarak tasarımında, *Yönetmelik*'te esas alınan kural ve koşullara ek olarak, yürürlükteki deprem yönetmeliğinin kurallarının da uygulanması sağlanmalıdır.

Çerçeve kirişleri

N_{Gx}, sadece sabit yükler ile belirlenen ve N_{Sx}, Durum(i) kar yükü yayılışı için belirlenen (x) doğrultusunda etkiyen fiktif kuvvetler olmak üzere, en elverişsiz olan yük birleşimi için D aksı çerçeve kirişinde oluşan iç kuvvetler aşağıda verilmektedir.

YDKT	GKT
$1.2G+1.6S+1.2N_{Gx}+1.6N_{Sx}$	$G+S+N_{Gx}+N_{Sx}$
$P_u=-100.98\,\text{kN}$ $M_u=436.96\,\text{kNm}$ $V_u=125.07\,\text{kN}$	$P_a=-98.55\,\text{kN}$ $M_a=314.40\,\text{kNm}$ $V_a=63.25\,\text{kN}$

Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

IPE 600		
$A = 15600$ mm^2	$I_x = 92080$ cm^4	$I_y = 3387$ cm^4
$J = 165$ cm^4	$W_{ex} = 3070$ cm^3	$W_{ey} = 308$ cm^3
$W_{px} = 3512$ cm^3	$W_{py} = 486$ cm^3	$C_w = 2846000$ cm^6
$d = 600$ mm	$b_f = 220$ mm	$h_o = 581$ mm
$h = 514$ mm	$t_f = 19$ mm	$t_w = 12$ mm
$i_x = 243$ mm	$i_y = 46.6$ mm	

Elemanın karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{220}{2(19)} = 5.79 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{235}} = 16.34$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 4)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.83 \le \lambda_r = 1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49\sqrt{\frac{200000}{235}} = 43.47$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak değerlendirilir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, x- ve y-asal eksenleri etrafında eğilmeli burkulma sınır durumları esas alınarak hesaplanan dayanımlarının küçüğü belirleyecektir.

$$\left(L_c/i\right)_{maks} = \frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{6030}{46.60} = 129.40 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

Elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, en büyük narinliğe sahip olduğu y-asal ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyecektir. Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(129.40)^2} = 118 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$118 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 137.40$$

olduğundan,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{235}{118}}\right] 235 = 102.17 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g = 102.17(15600)10^{-3} = 1594 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Kirişin tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	Kirişin güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(1594) = 1435\ \text{kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 1594/1.67 = 954\ \text{kN}$

Kirişin karakteristik eğilme momenti dayanımının x-ekseni etrafında eğilme durumunda belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{220}{2(19)} = 5.79 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{235}} = 11.09$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.83 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49\sqrt{\frac{200000}{235}} = 109.70$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 235(3512)10^{-3} = 825.32\ \text{kNm} \qquad (9.2)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kiriş başlığının yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklenmeyen uzunluğu, L_b = 6030mm olarak belirlenir (Bkz. Şekil 2 ve 3).

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(46.60)\sqrt{\frac{200000}{235}} = 2393\ \text{mm} < L_b = 6030\ \text{mm} \qquad (9.6a)$$

$$c = 1.0 \qquad (9.7a)$$

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}} = \frac{220}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{514(12)}{220(19)}\right)}} = 56.85\ \text{mm} \qquad (9.8b)$$

$$h_o = d - t_f = 600 - 19 = 581\ \text{mm}$$

değerleri ile elastik olmayan yanal burkulma sınır uzunluk değeri, L_r, hesaplanır.

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex}h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex}h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \quad (9.6b)$$

$$L_r = 1.95(56.85)\frac{200000}{0.7(235)} \times \ldots$$

$$\ldots \times \sqrt{\frac{165(10)^4(1.0)}{3070(10)^3(581)} + \sqrt{\left(\frac{165(10)^4(1.0)}{3070(10)^3(581)}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7(235)}{200000}\right)^2}} = 7683\text{mm}$$

$$L_p = 2393 \text{ mm} < L_b = 6030 \text{ mm} \le L_r = 7683 \text{ mm}$$

olduğundan, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2.2(b) uyarınca belirlenir.

Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki eleman uzunluğu, L_b=6030mm, boyunca eğilme momenti M_{maks}, M_A, M_B ve M_C momentleri ile *Yönetmelik* 9.1(c) uyarınca, moment düzeltme katsayısı, C_b belirlenir.

$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (9.1)$$

$$M_n = C_b\left[M_p - \left(M_p - 0.7F_yW_{ex}\right)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \le M_p \quad (9.3)$$

YDKT

$$C_b = \frac{12.5(436.90)}{2.5(436.90) + 3(259.76) + 4(107.20) + 3(20.47)} = 2.312$$

$$M_n = 2.312\left[825.32 - \left(825.32 - 0.7(235)(3070)10^{-3}\right)\left(\frac{6030 - 2393}{7683 - 2393}\right)\right]$$

$$M_n = 1399 \text{ kNm} \le M_p = 825.32 \text{ kNm} \times$$

GKT

$$C_b = \frac{12.5(314.40)}{2.5(314.40) + 3(186.29) + 4(76.22) + 3(15.69)} = 2.316$$

$$M_n = 2.316\left[825.32 - \left(825.32 - 0.7(235)(3070)10^{-3}\right)\left(\frac{6030 - 2393}{7683 - 2393}\right)\right]$$

$$M_n = 1401.43 \text{kNm} \le M_p = 825.32 \text{ kNm} \times$$

olduğundan, yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik moment dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = 825.32 \text{ kNm}$$

Yönetmelik 9.2 uyarınca, en küçük eğilme momenti dayanımı, M_n, akma sınır durumunda elde edildiğinden, dayanım hesabında bu sınır durum belirleyicidir.

YDKT	GKT
Kirişin tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	Kirişin güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(825.32) = 742.79\text{kNm}$	$M_g = M_n/\Omega_b$ $M_g = 825.32/1.67 = 494.20\,\text{kNm}$

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

YDKT	GKT
Bileşik etkiler altında kirişin tasarım dayanımının kontrolü	Bileşik etkiler altında kirişin tasarım dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} = \frac{P_u}{P_d} = \frac{100.97}{1435} = 0.07 < 0.2$	$\frac{P_r}{P_c} = \frac{P_a}{P_g} = \frac{72.50}{954} = 0.08 < 0.2$
$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \le 1.0$ (11.1b)	$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \le 1.0$ (11.1b)
$\frac{100.97}{2(1435)} + \frac{436.90}{742.79} = 0.62 \le 1.0$ ✓	$\frac{72.50}{2(954)} + \frac{314.40}{494.20} = 0.67 \le 1.0$ ✓

Kirişin karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Çift simetri eksenli I-enkesitte *Yönetmelik* 10.2.1(a) uyarınca,

$h/t_w = 514/12 = 42.83 \le 2.24\sqrt{E/F_y} = 2.24\sqrt{200000/235} = 65.34$ olduğundan,

ϕ_v = 1.00 (YDKT) veya Ω_v=1.50 (GKT) ve C_{v1}=1.0 olarak alınacaktır.

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \qquad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(235)(600\times12)1.0(10)^{-3} = 1015\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 125.06\,\text{kN}$	$V_a = 90.77\text{kN}$
Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	Kirişin güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 1.0(1015) = 1015\text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 1015/1.50 = 608\text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{125.06}{1015} = 0.12 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{90.77}{608} = 0.15 \le 1.0$ ✓

Kirişte sehim kontrolü

Çerçeve kirişinin sehim (düşey yerdeğiştirme) kontrolü, D aksı çerçevesi için sabit yükler ve kısa süreli hareketli yükler veya kar yükleri altında *Yönetmelik* 15.1(a) uyarınca, $G + Q$ (veya $0.5S$) ve Q (veya S) yük birleşimleri gözönüne alınarak yapılacaktır.

Buna göre, $G + 0.5S$ yük birleşimi için Durum(i) kar yükü yayılışı esas alınarak elde edilen en büyük sehim değeri, 39.6mm olmaktadır. Bu değer, *Yönetmelik* 15.2 uyarınca, $L/300$ olarak hesaplanan 80.0mm sınır değerini aşmamaktadır. Ayrıca, sadece kar yükü yayılışı altındaki en büyük sehim değeri 22.6mm olarak elde edilmetedir. Bu değer, *Yönetmelik* 15.1(a) uyarınca, S yükleme durumu için $L/360$ olarak tanımlanan 66.7mm lik sınır değeri aşmamaktadır.

Çerçeve kolonları

N_{Gx}, sadece sabit yükler ile belirlenen ve N_{Sx}, Durum(i) kar yükü yayılışı için belirlenen (x) doğrultusunda etkiyen fiktif kuvvetler olmak üzere, en elverişsiz olan yük birleşimi için D aksı çerçeve kolonunda oluşan iç kuvvetler aşağıda verilmektedir.

YDKT	GKT
$1.2G+1.6S+1.2N_{Gx}+1.6N_{Sx}$	$G+S+N_{Gx}+N_{Sx}$
$P_u = -136.55\text{kN}$ $M_u = 436.96\text{kNm}$ $V_u = 88.21\text{kN}$	$P_a = -98.55\text{kN}$ $M_a = 314.40\text{kNm}$ $V_a = 63.25\text{kN}$

Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit

IPE 600		
$A = 15600$ mm^2	$I_x = 92080$ cm^4	$I_y = 3387$ cm^4
$J = 165$ cm^4	$W_{ex} = 3070$ cm^3	$W_{ey} = 308$ cm^3
$W_{px} = 3512$ cm^3	$W_{py} = 486$ cm^3	$C_w = 2846000$ cm^6
$d = 600$ mm	$b_f = 220$ mm	$h_o = 581$ mm
$h = 514$ mm	$t_f = 19$ mm	$t_w = 12$ mm
$i_x = 243$ mm	$i_y = 46.6$ mm	

Elemanın karakteristik eksenel basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4.1 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1A, Durum 1)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{220}{2(19)} = 5.79 \le \lambda_r = 0.56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.56\sqrt{\frac{200000}{235}} = 16.34$$

Gövde parçası (Tablo 5.1A, Durum 4)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.83 \le \lambda_r = 1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.49\sqrt{\frac{200000}{235}} = 43.47$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak değerlendirilir.

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, x- ve y-asal eksenleri etrafında eğilmeli burkulma sınır durumları esas alınarak hesaplanan dayanımlarının küçüğü belirleyecektir.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda asal eksenlere göre eleman burkulma boyları

Bu örnekte, geometri değişimlerinin denge denklemlerine etkileri genel analiz yöntemi ile hesaba katıldığından, *Yönetmelik* 6.3.3 uyarınca, burkulma boyu katsayısı, K=1.0 olarak alınır. Buna göre,

$$L_{cx} = K_x L_x = 1.0(8000) = 8000 \text{ mm}$$

$$L_{cy} = \left[K_{y1}L_{y1}; K_{y1}L_{y1}\right]_{maks} = \left[1.0(4000); 1.0(4000)\right]_{maks} = 4000 \text{ mm}$$

Narinlik oranları,

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{8000}{243} = 32.92 \le 200 \checkmark$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{4000}{46.60} = 85.84 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranları $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$\left(L_c/i\right)_{maks} = \left(L_{cx}/i_x; L_{cy}/i_y\right)_{maks} = \left(32.92; 85.84\right)_{maks} = 85.84$$

olduğundan, elemanın eksenel basınç kuvveti dayanımını, y-asal ekseninde eğilmeli burkulma sınır durumu belirleyecektir. Eğilmeli burkulma sınır durumunda kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, için elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{i_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(85.84)^2} = 268 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$85.84 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 137.40$$

olduğundan,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{235}{268}}\right] 235 = 162.80 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g = 162.80(15600)10^{-3} = 2539.67 \text{ kN} \quad (8.1)$$

YDKT	GKT
Kolonun tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	Kolonun güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(2539.67) = 2285.70 \text{ kN}$	$P_g = P_n/\Omega_c = 2539.67/1.67 = 1520.76 \text{ kN}$

Kolonun karakteristik eğilme momenti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması

Başlık parçası (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{220}{2(19)} = 5.79 \le \lambda_p = 0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0.38\sqrt{\frac{200000}{235}} = 28.73$$

Gövde parçası (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.83 \le \lambda_p = 3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3.76\sqrt{\frac{200000}{235}} = 109.70$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesitin başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranları Tablo 5.1B de verilen λ_p sınır değerini aşmadığından, enkesit *kompakt* olarak değerlendirilir.

Bu durumda, kuvvetli asal ekseni etrafında eğilme etkisindeki, çift simetri eksenli I-enkesitli elemanın karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2 uyarınca belirlenecektir.

Akma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = F_y W_{px} = 235(3512)10^{-3} = 825.32 \text{ kNm} \quad (9.2)$$

Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n

Kolon başlığı mesnet noktaları ve açıklık ortasında yanal burulmalı burkulmaya karşı desteklendiğinden, L_b = 4000mm olarak belirlenir.

$$L_p = 1.76 i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.76(46.60)\sqrt{\frac{200000}{235}} = 2393 \text{ mm} < L_b = 4000 \text{ mm} \quad (9.6a)$$

$$c = 1.0 \quad (9.7a)$$

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}} = \frac{220}{\sqrt{12\left(1 + \frac{1}{6}\frac{514(12)}{220(19)}\right)}} = 56.85 \text{ mm} \quad (9.8b)$$

$$h_o = d - t_f = 600 - 19 = 581 \text{ mm}$$

değerleri ile elastik olmayan yanal burkulma sınır uzunluk değeri, L_r, hesaplanır.

$$L_r = 1.95 i_{ts} \frac{E}{0.7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7F_y}{E}\right)^2}} \qquad (9.6b)$$

$$L_r = 1.95(56.85)\frac{200000}{0.7(235)} \times ...$$

$$... \times \sqrt{\frac{165(10)^4(1.0)}{3070(10)^3(581)} + \sqrt{\left(\frac{165(10)^4(1.0)}{3070(10)^3(581)}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7(235)}{200000}\right)^2}} = 7683\text{mm}$$

$$L_p = 2393 \text{ mm} < L_b = 4000 \text{ mm} \le L_r = 7683 \text{ mm}$$

olduğundan, karakteristik eğilme momenti dayanımı, M_n, *Yönetmelik* 9.2.2(b) uyarınca belirlenir.

Yanal stabilite bağlantısı ile desteklenen noktalar arasındaki eleman uzunluğu, L_b=4000mm boyunca eğilme momentleri M_{maks}, M_A, M_B ve M_C momentleri ile *Yönetmelik* 9.1(c) uyarınca, moment düzeltme katsayısı, C_b belirlenir.

$$C_b = \frac{12.5M_{maks}}{2.5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \qquad (9.1)$$

$$C_b = \frac{12.5(436.90)}{2.5(436.90) + 3(349.23) + 4(261.14) + 3(172.73)} = 2.02 \qquad \text{(YDKT)}$$

$$C_b = \frac{12.5(314.40)}{2.5(314.40) + 3(251.34) + 4(188.13) + 3(124.82)} = 2.02 \qquad \text{(GKT)}$$

$$M_n = C_b \left[M_p - \left(M_p - 0.7F_y W_{ex}\right)\left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \le M_p \qquad (9.3)$$

$$M_n = 2.02\left[825.32 - \left(825.32 - 0.7(235)(3070)10^{-3}\right)\left(\frac{4000 - 2393}{7683 - 2393}\right)\right]$$

$$M_n = 1474 \text{ kNm} \le M_p = 825.32 \text{ kNm} \times$$

olduğundan, yanal burulmalı burkulma sınır durumunda karakteristik moment dayanımı, M_n

$$M_n = M_p = 825.32 \text{ kNm}$$

Yönetmelik 9.2 uyarınca, en küçük eğilme momenti dayanımı, M_n, akma sınır durumunda elde edildiğinden, dayanım hesabında bu sınır durum belirleyicidir.

YDKT	GKT
Kolonun tasarım eğilme momenti dayanımının kontrolü	Kolonun güvenli eğilme momenti dayanımının kontrolü
$M_d = \phi_b M_n$ $M_d = 0.90(825.32) = 742.79\text{kNm}$	$M_g = M_n/\Omega_b$ $M_g = 825.32/1.67 = 494.20\,\text{kNm}$

Bileşik etkiler altında dayanım kontrolü

YDKT	GKT
Bileşik etkiler altında kolonun tasarım dayanımının kontrolü	Bileşik etkiler altında kolonun tasarım dayanımının kontrolü
$\frac{P_r}{P_c} = \frac{P_u}{P_d} = \frac{136.55}{2285.70} = 0.06 < 0.2$	$\frac{P_r}{P_c} = \frac{P_a}{P_g} = \frac{98.55}{1520.76} = 0.06 < 0.2$
$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \le 1.0$ (11.1b)	$\frac{P_r}{2P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}} \le 1.0$ (11.1b)
$\frac{136.55}{2(2285.70)} + \frac{436.90}{742.79} = 0.62 \le 1.0$ ✓	$\frac{98.55}{2(1520.76)} + \frac{314.40}{494.20} = 0.67 \le 1.0$ ✓

Kolonun karakteristik kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Çift simetri eksenli I-enkesitte *Yönetmelik* 10.2.1(a) uyarınca,

$h/t_w = 514/12 = 42.83 \le 2.24\sqrt{E/F_y} = 2.24\sqrt{200000/235} = 65.34$ olduğundan,

ϕ_v = 1.00 (YDKT) veya Ω_v=1.50 (GKT) ve C_{v1}=1.0 olarak alınacaktır.

Karakteristik kesme kuvveti dayanımı, V_n,

Yönetmelik 10.2 uyarınca,

$$V_n = 0.6F_y A_w C_{v1} \quad (10.1)$$

$$V_n = 0.6(235)(600\times12)1.0(10)^{-3} = 1015\,\text{kN}$$

YDKT	GKT
Gerekli kesme kuvveti dayanımı	
$V_u = 88.21\,\text{kN}$	$V_a = 63.25\text{kN}$
Kolonun tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrolü	Kolonun güvenli kesme kuvveti dayanımının kontrolü
$V_d = \phi_v V_n = 1.0(1015) = 1015\text{kN}$	$V_g = V_n/\Omega_v = 1015/1.50 = 677\text{kN}$
$\frac{V_u}{V_d} = \frac{88.21}{1015} = 0.09 \le 1.0$ ✓	$\frac{V_a}{V_g} = \frac{63.25}{677} = 0.09 \le 1.0$ ✓

Merkezi çaprazlı çerçevenin diyagonal elemanı

Merkezi çaprazlı çerçevede en elverişsiz yük birleşimi için çapraz elemanda oluşan iç kuvvetler aşağıda verilmektedir.

YDKT	GKT
$0.9G+1.0E_y+0.3E_x$	$0.6G+0.7E_y+0.3(0.7E_x)$
$P_u=64.35\,\text{kN}$	$P_a=44.96\,\text{kN}$

Çelik sınıfı

S 235 $F_y = 235$ N/mm^2 $F_u = 360$ N/mm^2 (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı boru eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_n = 0.93(5.0) = 4.65$ mm için

Boru 101.6×5

$A_g = 1416.28$ mm^2 $D = 101.6$ mm $t = 4.65$ mm $i = 34.3$ mm

Elemanın karakteristik çekme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 7.2.1 uyarınca,

Akma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_y A_g \tag{7.2}$$

$$T_n = F_y A_g = (235)(1416.28)10^{-3} = 332.83\,\text{kN}$$

Yönetmelik 7.2.2 uyarınca,

Kırılma sınır durumunda karakteristik çekme kuvveti dayanımı, T_n,

$$T_n = F_u A_e \tag{7.3}$$

$$A_e = UA_n \tag{7.1}$$

Etkin net enkesit alanı, A_e,

Boru elemanın, t = 10mm kalınlığındaki düğüm noktası levhasına bağlantısının l=150mm uzunluğunda 4 adet köşe kaynak ile oluşturulduğu öngörülerek, net enkesit alanı boru enkesitinde karşılıklı olarak oluşturulan iki adet kesim dikkate alınarak değerlendirilecektir. Net enkesit alanı,

$$A_n = 1416.28 - 2(4.65)(10+2.0) = 1304.68\,\text{mm}^2$$

Not: Boru enkesitli elemanda meydana gelen enkesit kaybının alanının hesabındaki ilave 2.0mm kalınlık, boru elemanın düğüm noktası levhasına yerleşimini kolaylaştırmak amacıyla dikkate alınmaktadır.

U (Tablo 7.1, Durum 5)

$D = 101.6$ mm $l = 150$ mm

$l \geq 1.3D$

$l = 150\,\text{mm} \geq 1.3(101.6) = 132.08\,\text{mm}$

olduğundan,

$U = 1$

$A_e = (1.0)(1304.68) = 1304.68\,\text{mm}^2$

$T_\text{n} = (360)(1304.68)10^{-3} = 469.68\,\text{kN}$

YDKT	GKT
Gerekli çekme kuvveti dayanımı	
$P_\text{u} = 64.35\,\text{kN}$	$P_\text{u} = 44.96\,\text{kN}$
Elemanın tasarım çekme kuvveti dayanımının kontrolü	Elemanın güvenli çekme kuvveti dayanımının kontrolü
$T_\text{d} = \phi_\text{t} T_\text{n} = 0.90(332.83) = 299.55\,\text{kN}$ $T_\text{d} = \phi_\text{t} T_\text{n} = 0.75(469.68) = 352.26\,\text{kN}$	$T_\text{g} = T_\text{n}/\Omega_\text{t} = 332.83/1.67 = 199.30\,\text{kN}$ $T_\text{g} = T_\text{n}/\Omega_\text{t} = 469.68/2.00 = 234.84\,\text{kN}$
$\frac{P_\text{u}}{T_\text{d}} = \frac{64.35}{299.55} = 0.21 \leq 1.0$ ✓	$\frac{P_\text{a}}{T_\text{g}} = \frac{44.96}{199.30} = 0.23 \leq 1.0$ ✓

Çekme elemanı narinlik oranı kontrolü,

Yönetmelik 7.1.1 uyarınca, $L/i \leq 300$

$i_\text{min} = i = 34.3\,\text{mm}$ alınarak, $7210/34.3 = 210 \leq 300$ ✓

Merkezi çaprazlı çerçevenin dikme elemanı

Merkezi çaprazlı çerçevede en elverişsiz yük birleşimi için dikme elemanda oluşan iç kuvvetler aşağıda verilmektedir.

YDKT	GKT
$0.9G + 1.6W_\text{y}$	$G + 0.7E_\text{y} + 0.3(0.7E_\text{x})$
$P_\text{u} = -46.68\,\text{kN}$	$P_\text{a} = -31.19\,\text{kN}$

Çelik sınıfı

S 235 $F_\text{y} = 235\,\text{N/mm}^2$ $F_\text{u} = 360\,\text{N/mm}^2$ (*Yönetmelik* Tablo 2.1A)

Enkesit TS EN 10219 – Elektrik Direnç Kaynaklı kutu eleman

Yönetmelik 5.4.2 uyarınca, $t = 0.93t_\text{n} = 0.93(8.0) = 7.44$ mm için

Kutu 140×140×8
$A_\text{g} = 3802.44\,\text{mm}^2$ $t = 7.44\,\text{mm}$ $i = 53.59\,\text{mm}$

Dikme elemanının karakteristik basınç kuvveti dayanımının belirlenmesi

Yönetmelik 5.4 uyarınca, yerel burkulma sınır durumu için enkesitin sınıflandırılması (Tablo 5.1A, Durum 6)

$$\lambda = \frac{b}{t} = \frac{140 - 3\times 7.44}{7.44} = 15.81 \le \lambda_r = 1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1.40\sqrt{\frac{200000}{235}} = 40.84$$

Yerel burkulma sınır durumuna göre enkesit, çap/kalınlık oranı Tablo 5.1A da verilen λ_r sınır değerini aşmadığından *narin olmayan enkesit* olarak sınıflandırılır.

Kolon burkulma boyu,

$$L_c = KL = 1.0(6000) = 6000 \text{ mm}$$

Narinlik oranı,

$$\frac{L_c}{i} = \frac{6000}{53.59} = 111.96 \le 200 \checkmark$$

Yönetmelik 8.1.1 uyarınca, narinlik oranı $L_c/i \le 200$ koşulunu sağlamaktadır.

Eğilmeli burkulma sınır durumunda karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

Yönetmelik 8.2.1 uyarınca, eğilmeli burkulma sınır durumunda elastik burkulma gerilmesi, F_e,

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} = \frac{\pi^2 (200000)}{(111.96)^2} = 157.47 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.4)$$

Yönetmelik 8.2 uyarınca,

$$\frac{L_c}{i} = 111.96 \le 4.71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.71\sqrt{\frac{200000}{235}} = 137.40$$

olduğundan,

$$F_{cr} = \left[0.658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y = \left[0.658^{\frac{235}{157.47}}\right] 235 = 125.85 \text{ N/mm}^2 \qquad (8.2)$$

Karakteristik basınç kuvveti dayanımı, P_n,

$$P_n = F_{cr} A_g = 125.85(3802.44)10^{-3} = 478.55 \text{ kN} \qquad (8.1)$$

YDKT	GKT
Gerekli basınç kuvveti dayanımı	
$P_u = -46.68$ kN	$P_a = -31.19$ kN
Elemanın tasarım basınç kuvveti dayanımının kontrolü	Elemanın güvenli basınç kuvveti dayanımının kontrolü
$P_d = \phi_c P_n = 0.90(478.55) = 430.69$ kN	$P_g = P_n/\Omega_c = 478.55/1.67 = 286.55$ kN
$\frac{P_u}{P_d} = \frac{46.68}{430.69} = 0.108 \le 1.0 \checkmark$	$\frac{P_a}{P_g} = \frac{31.19}{286.55} = 0.109 \le 1.0 \checkmark$

KAYNAK YAYINLAR

TS EN 1991 – 1 – 3 : 2009 Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1 – 3: Genel etkiler, kar yükleri

TS EN 1991 – 1 – 4 : 2005 Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1 – 4: Genel etkiler, rüzgar etkileri

DBYBHY 2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

Notlar

Notlar

Notlar

Notlar