

## **3. OTURUM**

# MERKEZİ VE DIŞMERKEZ ÇELİK ÇAPRAZLARIN YAPININ SÜNEKLİLİK DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİ

**Ahmet Necati YELGİN \* , Cihat ÇUKUR\*\***

\* Doç.Dr. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı  
Sakarya-Türkiye

\*\* İnşaat Yüksek Mühendisi  
Sakarya-Türkiye

## Özet

Bu çalışmada çelik yapı taşıyıcı sistemlerinde sıkça kullanılan merkezi ve dışmerkez çaprazların süneklik oranları irdelenmiştir. Çözümlemelerde nonlineer şekil değiştirmeler sistem boyunca yayılı olduğu ve ikinci merteye etkileri de göz önünde bulundurularak ANSYS sonlu elemanlar programıyla nonlineer analiz yapılarak davranışlar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik, Sünek Davranış, Merkezi Çaprazlar, Dış Merkez Çaprazlar

## 1. Giriş

Çelik yapılar son yıllarda ülkemizde de sıkça kullanılmaya başlanmıştır özellikle son yıllarda yaşanan şiddetli depremlerden sonra kullanımı artmıştır. Bilindiği gibi çelik malzeme iyi bir sünek davranışa sahiptir fakat her türlü taşıyıcı sistem için aynı derecede sünek davranmamaktadır. Sistem türünün süneklik üzerine önemli etkileri vardır. Çelik yapı taşıyıcı sistemlerinde sıkça çaprazlar kullanılmaktadır, bunlar merkezi ve dışmerkez olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Çapraz türü taşıyıcı sistem sünekliğini etkilemektedir. Dışmerkez çaprazlar merkezi çaprazlara oranla daha sünek bir davranış sergilemektedirler.

Bu çalışmada sıkça kullanılan merkezi ve dışmerkez çaprazların sünekliği araştırılmıştır.

## 2. Süneklik Kavramı

Yapı taşıyıcı sistemlerinde, göçme sırasındaki toplam deplasmanların taşıyıcı sistem lineer deplasmanlarına oranı süneklik oranı ( $\mu$ ) olarak bilinmektedir. Taşıyıcı sistemler sahip oldukları süneklik oranı düzeyine göre göçme durumlarında enerji yutarlar. Sünek sistemler gösterdikleri elastoplastik davranış sayesinde göçme anında büyük enerji yutarlar. Bu sayede ani göçmeler, gevrek kırılmalar ve büyük hasarlar azaltılmış olur.

Çelik taşıyıcı sistemlerde yatay yüklerin taşıtırılmasında merkezi ve dış merkezi çaprazlar çok sıklıkla kullanılmaktadır. Çaprazlar deprem etkilerini üzerlerine gelen normal kuvvetlerle karşılarlar. Çaprazların dış merkez olması durumunda bağlandıkları kiriş veya kolon gibi elemanlarda eğilmelere sebep olarak enerji yutulmasına katkıda bulunurlar. Bu sayede dış merkez çaprazlar merkezi çaprazlara oranla taşıyıcı sistemin daha sünek davranmasını sağlarlar.

## 2.1. Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, merkezi ve dışmerkez çaprazların süneklik oranları irdelenmiştir. Bu oranların belirlenmesinde kullanılan yöntem; göçme anındaki şekil değiştirmelerin sistemin göçme yükünün %70' ine karşı gelen deplasmana oranı olarak belirlenmiştir. Toplam şekil değiştirme yönetmeliklerce taşıyıcı sistem tipine bağlı olarak çeşitli oranlarla sınırlandırılmaktadır. Bu büyüklük yapı yüksekliğinin %2' si olarak çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada sünekliğin belirlenmesinde kullanılan bu oran FEMA 356 yönetmeliğinden alınmıştır. Değerler aşağıda Tablo.1' de verilmiştir.

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta / H)_{0,7P_{L2}}}$$

Tablo.1 Performans Seviyeleri ve Yatay Öteleme Oranları (%)

Yapı Sistemini Oluşturan Elemanlar	Göçme Güvenliği		Can Güvenliği		Hemen Kullanım	
	Kalıcı Olmayan Yatay Yük Durumu	Kalıcı Olan Yatay Yük Durumu	Kalıcı Olmayan Yatay Yük Durumu	Kalıcı Olan Yatay Yük Durumu	Kalıcı Olmayan Yatay Yük Durumu	Kalıcı Olan Yatay Yük Durumu
Beton Çerçeve	4,00	4,00	2,00	1,00	1,00	Önemsiz
Moment Alan Çerçeve	5,00	5,00	2,50	1,00	0,70	Önemsiz
Çaprazlı Çelik Çerçeve	2,00	2,00	1,50	0,50	0,50	Önemsiz
Beton Duvar	2,00	2,00	1,00	0,50	0,50	Önemsiz
Güçlendirilmemiş Taş Duvar(Dolu)	0,60	0,60	0,50	0,30	0,10	Önemsiz
Güçlendirilmemiş Taş Duvar	1,00	1,00	0,60	0,60	0,30	0,30
Güçlendirilmiş Taş Duvar	1,50	1,50	0,60	0,60	0,20	0,20
Ahşapla Güçlendirilmiş Duvar	3,00	3,00	2,00	1,00	1,00	0,25

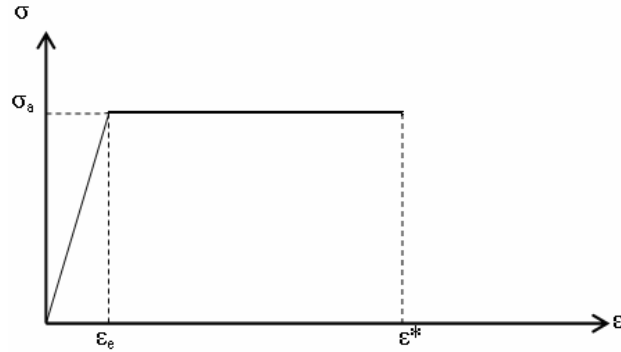
### 3. Sayısal İnceleme

Bu çalışmada iki adet dışmerkez bir adet merkezi çaprazlı çerçeve TS 648 ve deprem yönetmeliğimizde bulunan boyutlama kriterlerine bağlı olarak boyutlandırılmıştır. Dışmerkezliğin belirlenmesinde esas sınırlar kullanılan kirişlerin plastik moment ve kesme kuvveti kapasiteleri ile sistemlerde kullanılan dış merkezlik değerleri Tablo.2' de verilmektedir.

Tablo.2. Kirişlerin Plastik Moment ve Kesme Kuvveti Kapasiteleri İle Sistemlerde Kullanılan Dış Merkezlik Değerleri

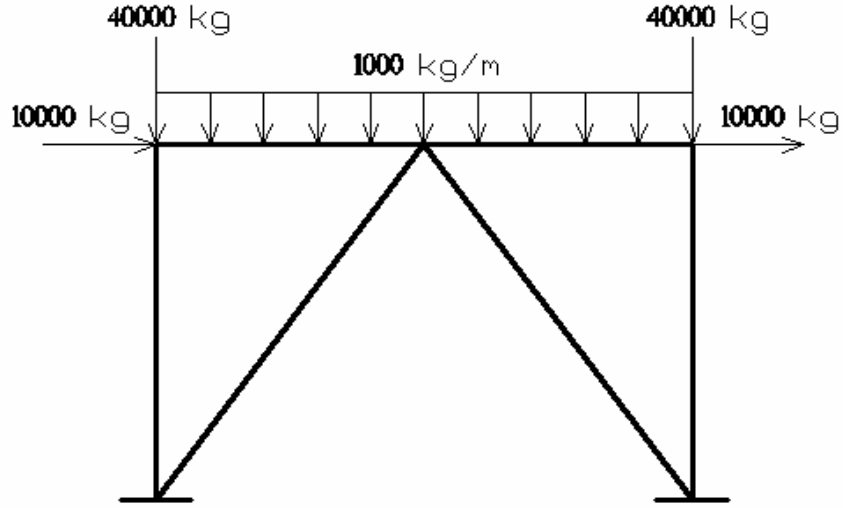
Sistem Tipi	Sistem Kiriş Kesiti	Mp (tm)	Vp (t)	Mp/Vp (m)	1.6Mp/Vp (m)	2.6Mp/Vp (m)	Kullanılan Dışmerkezlik (m)
Sistem 1	IPE300	16.33	30.86	0.53	0.85	1.38	0.6
Sistem 2	IPE360	26.52	39.16	0.68	1.08	1.76	1.4

Boyutlama için gerekli analizler SAP2000 paket programıyla yapılmıştır. Sistemlerin süneklik oranlarının belirlenmesi için nonlinear analiz ANSYS sonlu elemanlar programıyla yapılmıştır. Nonlinear analizde malzeme modeli olarak elastoplastik malzeme (Şekil.1) kabulü yapılmıştır.



Şekil.1 İdeal - Elasto Plastik Malzeme

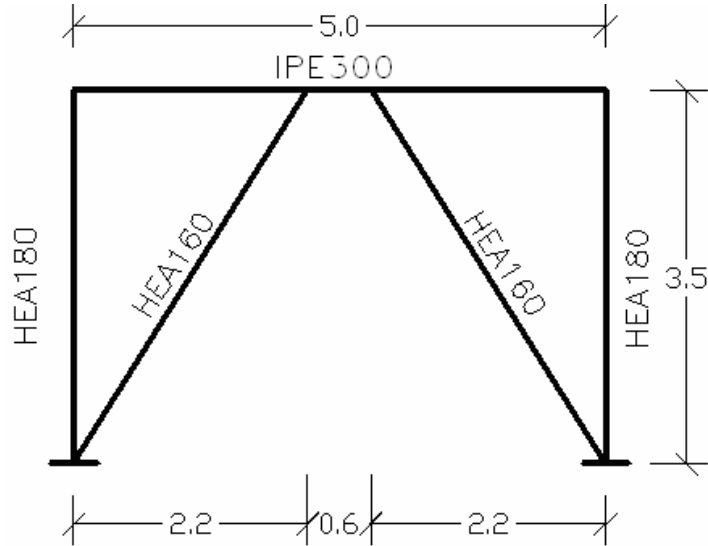
Ayrıca nonlinear şekildeğıştirmelerin sistem boyunca sürekli olduğu ve ikinci mertebe etkileri (geometrik nonlinearlık) dikkate alınarak çözülmüştür. Sistemlerin boyutlandırılmasında yatay ve düşey yükler sabit tutularak gerekli kesitler belirlenmiştir. Sistemlere etkiyen yükler Şekil.2' de şematik olarak verilmiştir.



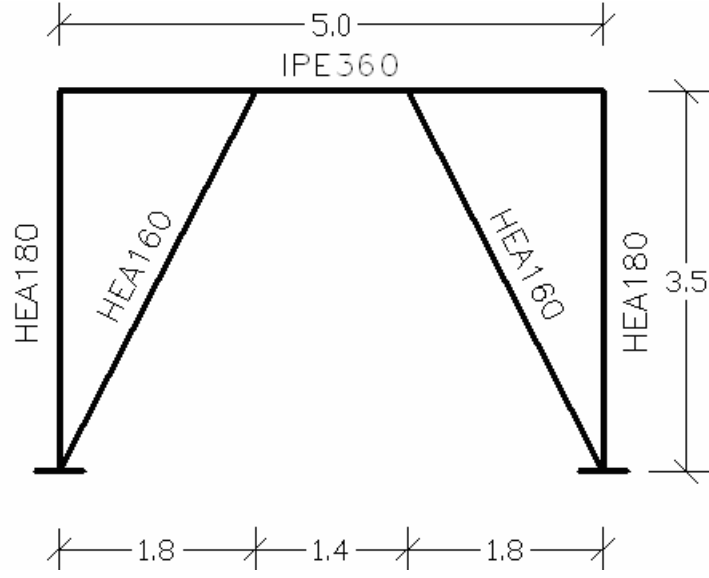
Şekil.2 Sistemlere Etkiyen Yükler

Sistemlerde yapı çeliği olarak **ST 42** ( $\sigma_a = 26.10^6 \text{ kg/m}^2$ ) kullanılmıştır. Sistem geometrileri ve kullanılan kesitler aşağıdaki Şekil.3, Şekil.4 ve Şekil.5' de gösterilmiştir. Kullanılan birimler **kg-m** olarak verilmektedir.

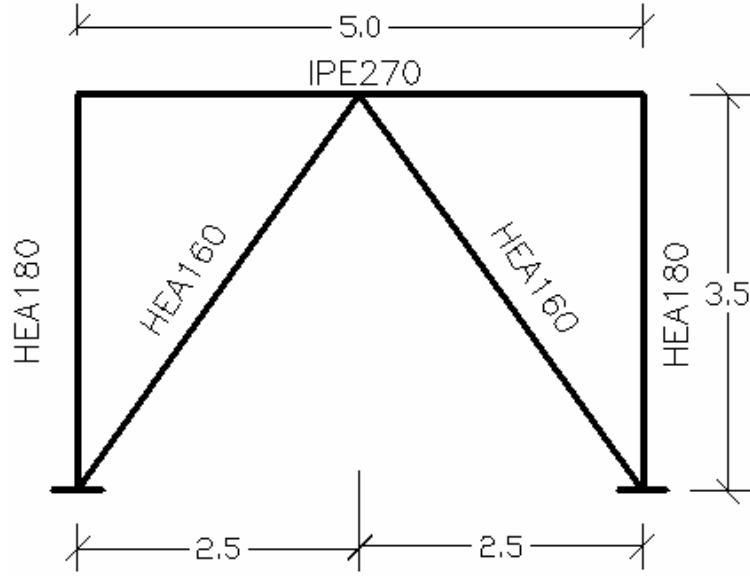
Sistemlere ait kesit bilgileri ve eleman uzunlukları aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil.3 Sistem 1

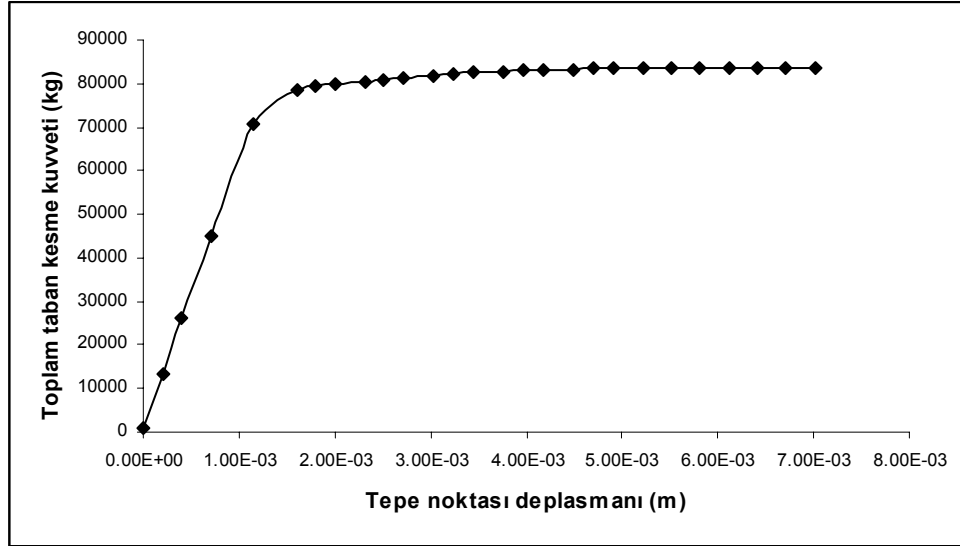


Şekil.4 Sistem 2



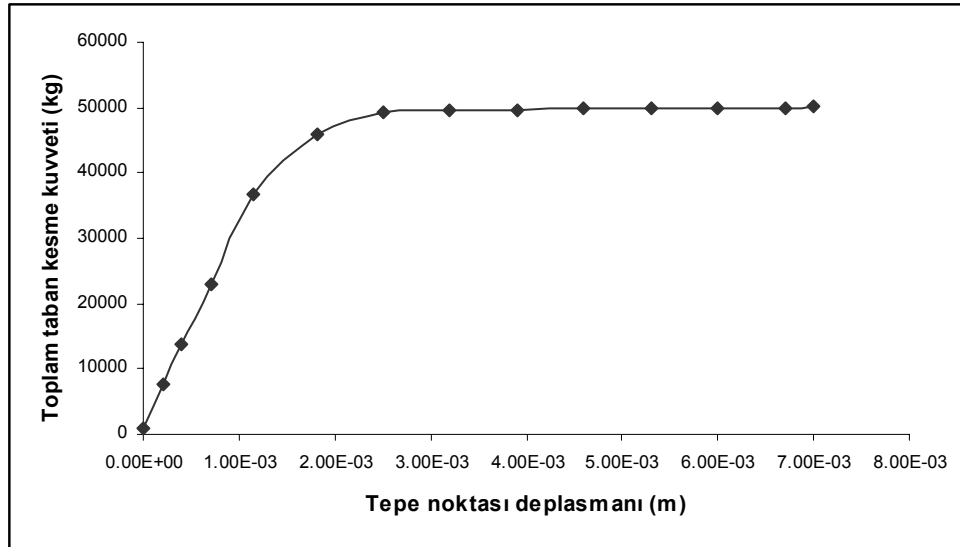
Şekil.5 Sistem 3

Sistemlere ait toplam Taban Kesme Kuvveti - Tepe Noktası Deplasmanı grafikleri ve süneklik oranları aşağıda sırasıyla verilmektedir.



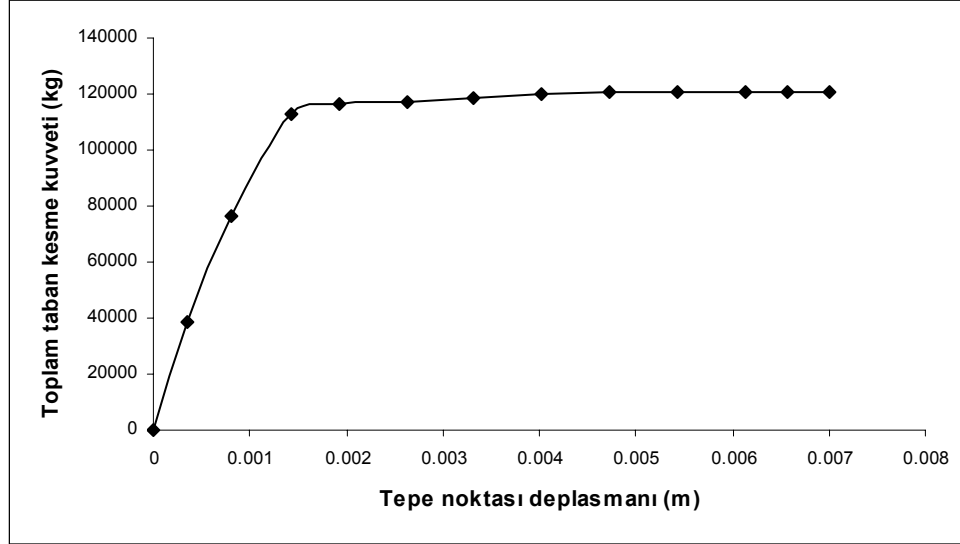
Şekil.6 Sistem 1 Statik İtme Eğrisi

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta/H)_{0,7P_{L2}}} = \frac{0,02}{(0,0097/3,5)} = 7,2$$



Şekil.7 Sistem 2 Statik İtme Eğrisi

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta/H)_{0,7P_{L2}}} = \frac{0,02}{(0,0102/3,5)} = 6,86$$



Şekil.8 Sistem 3 Statik İtme Eğrisi

$$\mu = \frac{0,02}{(\delta/H)_{0,7P_{L2}}} = \frac{0,02}{(0,0135/3,5)} = 5,19$$

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan çözümler sonucunda sistemlere ait süneklik oranları belirlenmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi bulunan değerler yönetmeliğimizce önerilen değerlere oldukça yakın çıkmaktadır. Bu tür sistemlerin boyutlandırılmasında yönetmeliğimizce önerilen çapraz narinlik oranları, yanal öteleme, dönme sınırları belirtilen değerler arasında olmalı ve dış merkez sistemlerde çaprazlar plastikleşmeyi kontrol eden kesme kuvvetini taşıyacak şekilde boyutlandırılmalıdır.

Sonuçlardan görüldüğü gibi dış merkez çerçeveler merkezi çerçevelere oranla daha sünek davranış göstermektedir. Bunun en önemli nedeni bağlandığı taşıyıcı sistem elemanında dış merkezlikten dolayı eğilmeler oluşturmakta ve sistemin fazladan enerji yutmasını sağlamaktadır. Sistemlere ait süneklik oranları Tablo.3' de verilmektedir.

Tablo.3 Sistemlere ait süneklik oranları

Sistem	Çapraz Tipi	Süneklik Oranı	Yönetmelikteki Süneklik Oranı
Sistem 1	Dışmerkez	7,20	7
Sistem 2	Dışmerkez	6,89	7
Sistem 3	Merkezi	5,19	5



## 5. Kaynaklar

- [1] FEMA 273, 1997. NEHRP Guidelines Fort the Seismic Rehabilitation of Buildings, Applied Technology Council, Washington.
- [2] Özcihan, B., 2002. Merkezi ve Dışmerkez Çaprazlı Çelik Yapı Sistemlerinde Lineer Olmayan Davranışın İncelenmesi ve Süneklik Düzeyinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] TS 648, 1998. Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [4] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007
- [5] Deren, H., Uzgider, E. ve Piroğlu, F., 2003. Çelik Yapılar, Çağlayan Yayınevi, İstanbul.

# ÇELİK BİR BİNANIN DEPREM PERFORMANSI BELİRLENEREK 2007 TÜRK DEPREM YÖNETMELİĞİ PERFORMANS HEDEFLERİNİN İRDELENMESİ

**Erdal İRTEM, Kaan TÜRKER, Umut HASGÜL**

Balıkesir Üniversitesi, MMF İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

## ÖZET

2007 Türk Deprem Yönetmeliği'nde (TDY 2007) bina türü betonarme yapılar için doğrusal ve doğrusal olmayan performans esaslı değerlendirme yöntemlerine yer verilmiş, ancak çelik binaların değerlendirilmesinin, yeni yapılacak binalar için tanımlanan esaslar çerçevesinde yapılabileceği belirtilmiştir. Performans esaslı değerlendirme yöntemlerinin çelik binalara da uygulanabilmesi amacıyla çalışmalar halen sürdürülmektedir. Bu çalışmada boyutlandırılması Türk Standart ve Yönetmeliklerine göre daha önce yapılan tipik bir çelik bina ele alınmış ve farklı deprem seviyeleri için performans düzeyleri belirlenerek TDY 2007'nin ana ilkesi olarak belirtilen performans hedeflerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında öncelikle, FEMA 356'da yer alan performans düzeylerine ait hasar sınır değerlerinden ve TDY 2007'de betonarme binaların değerlendirilebilmesi için öngörülen deprem seviyelerinden yararlanılarak, çelik binalar için hasar düzeyleri ve TDY 2007'deki deprem seviyeleri tanımlanmıştır. Daha sonra, TDY 2007'nin açıklamalı uygulaması amacıyla Türk Standart ve Yönetmeliklerine göre daha önceden boyutlandırılmış tipik bir çelik bina ele alınarak TDY'2007'de belirtilen üç deprem seviyesi için bina performans seviyelerinin belirlenmiştir. Bina performansının belirlenmesinde FEMA 356'da yer alan ve FEMA 440 projesi kapsamında geliştirilen Yerdeğiştirme Katsayıları Yönteminden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen çelik binanın iki asal doğrultusundaki taşıyıcı sistemlerinden birinin çerçeve ve diğerinin dış merkez çaprazlı perde çevre sistem olması nedeniyle, her iki doğrultu için oldukça farklı performans düzeyleri elde edilmiştir. Ancak, çalışmada yapılan kabuller altında, her iki doğrultuda da TDY2007'nin ana ilkesi olarak öngörülen performans hedeflerinin sağlandığı belirlenmiştir. Performans düzeyi tanımlamalarına bağlı olarak bina performanslarının değişebileceği bilinmekle birlikte, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, TDY 2007'de öngörülen performans hedefleri ile bu performansların sağlanması amacıyla öngörülen tasarım ilkelerinin uyumunda önemli farklılıklar olabildiğini göstermektedir. Ayrıca, incelenen düzenli binanın iki asal doğrultusunda önemli oranda farklı performans düzeylerinin elde edilmesi, performans esaslı tasarım yaklaşımlarında en elverişsiz doğrultunun belirlenmesi ve iki doğrultulu doğrusal olmayan analiz sonuçları ile performans değerlendirmesinin, farklı özellikteki örnekler üzerinde incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çelik binalar, performans değerlendirmesi, elastik ötesi statik itme (pushover) analizi, yerdeğiştirme katsayıları yöntemi.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda özellikle kentsel alanlarda meydana gelen depremlerde yapılardaki hasarların çok büyük ekonomik kayıplara neden olması, yürürlükteki mevcut ülke yönetmeliklerin sorgulanmasına neden olmuştur. Bu nedenle, mevcut ülke

yönetmeliklerini irdelemek ve geleneksel dayanım esaslı tasarıma alternatif yaklaşımlar oluşturma fikri zorunlu hale gelmiştir. Bu amaçla başta A.B.D. olmak üzere bir çok ülkede yapıların performans dayalı tasarım ve değerlendirmesini içine alan yönetmelik revizyon çalışmaları başlatılmış ve bu çalışmalar halen sürdürülmektedir.

Performans kriterini esas alan yöntemlerin geliştirilmesine yönelik olarak, Structural Engineers Association of California (SEAOC) tarafından yayımlanan Bluebook (SEAOC, 1999) ve Vision 2000 (SEAOC, 1995), Applied Technology Council (ATC) tarafından ATC 40 (ATC, 1996) ve Federal Emergency Management Agency (FEMA) tarafından FEMA 273 (FEMA, 1997), FEMA 356 (FEMA, 2000) ve FEMA 440 (FEMA, 2005) projeleri başlatılmıştır. Bunun yanı sıra, başta Building Seismic Safety Council (BSSC), American Society of Civil Engineers (ASCE) ve Earthquake Engineering Research Center of University of California (EERC-UCB), Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) ve Earthquake Engineering Research Institute (EERI) olmak üzere pek çok organizasyon tarafından yürütülen diğer projeler de bu alandaki araştırmalara katkı sağlamaktadır.

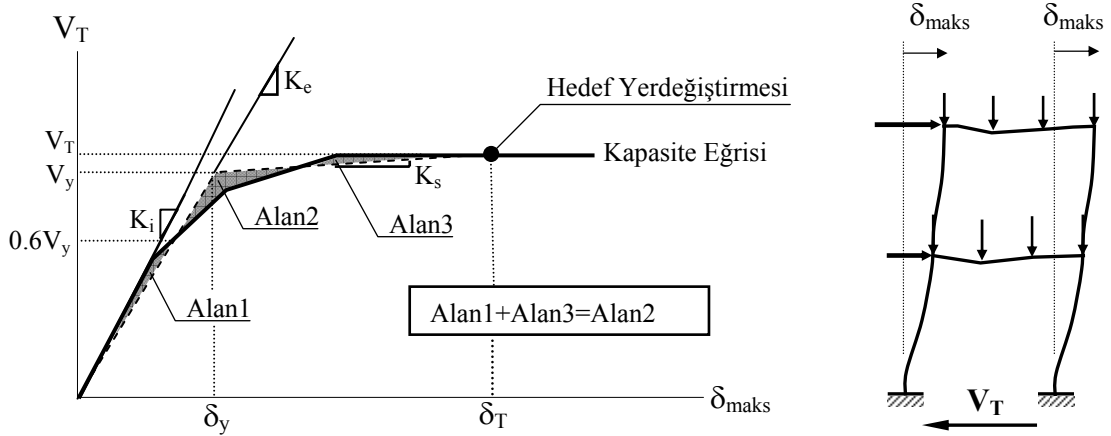
Çağdaş ülke yönetmeliklerinde yapılan çalışmalara paralel olarak benzer bilimsel çalışmalar Türkiye’de de başlatılmış ve 1998 Türk Deprem Yönetmeliği’nin (TDY 1998) (ABYYHY, 1998) güncellenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bunun için hazırlanan “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” (DBYBHY, 2007) Mart 2007’de resmen yürürlüğe girmiştir. 2007 Türk Deprem Yönetmeliği’nde (TDY 2007), performansa dayalı değerlendirme yapılabilmesi amacıyla, bina türü betonarme yapılar için doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlere yer verilmiş, ancak çelik yapıların değerlendirilmesinin yeni yapılacak binalar için tanımlanan esaslar çerçevesinde yapılabileceği belirtilmiştir. Geleneksel deprem tasarımı esasları ile TDY 2007’de ana ilkeler olarak öngörülen performans hedeflerinin kontrolü yapılamamaktadır.

Bu çalışmada, TDY 2007’nin açıklanmalı uygulaması amacıyla daha önce boyutlandırılmış tipik bir çelik binanın (Özer, 2007) üç farklı deprem seviyesi için performans düzeyleri elde edilerek TDY 2007’deki performans hedefleri irdelenmeye çalışılmıştır. İncelenen çelik binanın performans düzeyleri, FEMA 356’da yeralan ve daha sonra FEMA 440 projesi ile geliştirilen Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi (YKY) ile belirlenmiştir. Yapı sistemindeki elemanlara ve bina performans düzeylerine ait hasar sınır değerleri için FEMA 356’dan (FEMA, 2000) yararlanılmıştır. Deprem seviyeleri olarak, TDY 2007’nin ana ilkesinde belirtilen orta şiddette deprem, şiddetli deprem (tasarım depremi) ve önemli binaların tasarımında bina önem katsayısı ile göz önüne alınan çok şiddetli deprem esas alınmıştır.

## **2. YERDEĞİŞTİRME KATSAYILARI YÖNTEMİ (YKY)**

Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi (YKY) diğer doğrusal olmayan statik analiz yöntemlerinde olduğu gibi temel olarak, yapının yatay kuvvet taşıma kapasitesini ifade eden kapasite eğrisinin belirlenmesini, bu kapasite eğrisinden yararlanarak göz önüne alınan deprem seviyesi için yapının elastik olmayan maksimum

yerdeşistirmesinin (yerdeşistirme talebinin) hesaplanmasını ve bu yerdeşistirme talebine kadar statik olarak itilmiş yapının performansının (deprem güvenliğinin) belirlenmesini içermektedir. YKY’de, yerdeşistirme talebi direkt olarak sayısal bir yöntemle hesaplanmaktadır. Bunun için taşıyıcı sisteminin özelliklerine bağlı olarak belirlenen, yapının periyodu, histeretik davranışın yapı üzerindeki etkisi vb. özellikleri temsil eden katsayılar kullanılmaktadır (FEMA, 2000). YKY ile analizde öncelikle yapı sisteminin kapasite eğrisi elde edilir. Kapasite eğrisi elastik rijitlik ( $K_e$ ) ve elastik sonrası rijitlik ( $K_s$ ) olmak üzere iki doğru parçası ile idealleştirilerek (1) bağıntısı ile ( $T_e$ ) efektif periyot ve (2) bağıntısı ile ( $\delta_T$ ) yerdeşistirme talebi (hedef yerdeşistirme) hesaplanır (Şekil 1). Daha sonra, yerdeşistirme talebine kadar itilen sistemin kritik kesitlerindeki *iç kuvvet-şekildeğistirme* bağıntıları ile yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki hasar seviyesini ifade eden sınır değerler karşılaştırılarak elemanların ve yapının performans düzeyleri belirlenir (FEMA, 2000).



Şekil 1. Kapasite eğrisinin iki doğru parçası ile idealleştirilmesi

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (1)$$

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 S_a T_e^2 / (4\pi^2) \quad (2)$$

(1) ve (2)'de;

$T_i$  : yapının serbest titreşim analizi ile hesaplanan birinci doğal titreşim periyodu,

$K_i$  : yapının elastik başlangıç rijitliği,

$K_e$  : yapının elastik etkin rijitliği,

$C_0$  : iki doğru parçası ile idealleştirilmiş eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin spektral yerdeşistirmesini, çok serbestlik dereceli bir sistemin tepe yerdeşistirmesi ile ilişkilendiren katsayı,

- $C_1$  : doğrusal–elastik davranış için hesaplanmış yerdeğiştirmeler ile beklenen maksimum elastik olmayan yerdeğiştirmeleri ilişkilendiren katsayı,  
 $C_2$  : histeresis şeklin maksimum yerdeğiştirme davranışı üzerindeki etkisini temsil eden katsayı,  
 $S_a$  : yapının birinci doğal periyoduna karşılık gelen spektral ivme

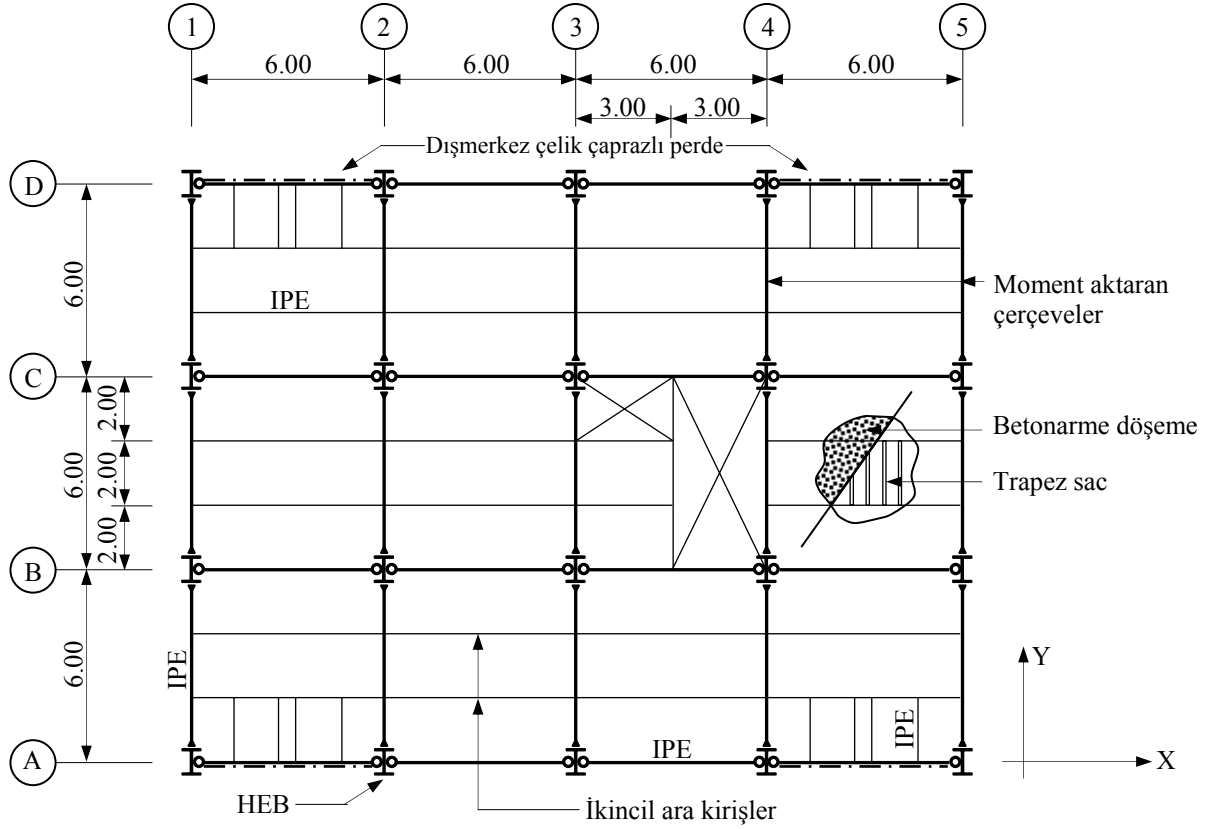
olarak tanımlanmaktadır (FEMA, 2000 ve 2005).

### 3. SAYISAL İNCELEME

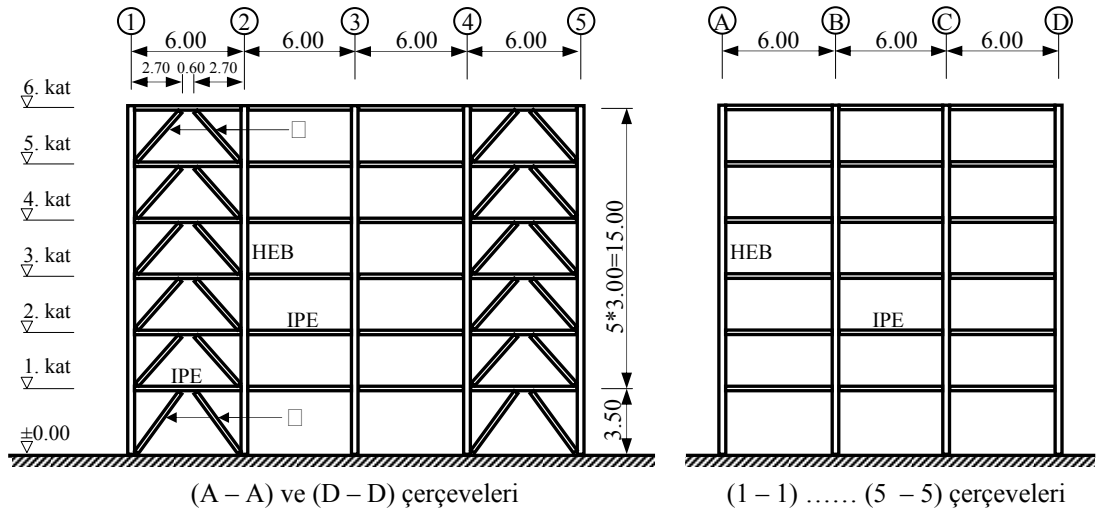
#### 3.1 elik Binanın Özellikleri

TDY 2007’de öngörülen performans hedeflerini irdelemek üzere, Özer 2007’de TS 648 (TSE, 1980) ve TDY 2007’ye göre boyutlandırılan, altı katlı düzenli karma taşıyıcı sistemli tipik bir elik bina ele alınmıştır (şekil 2, 3) (Tablo 1). Binanın X doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sistemi; süneklik düzeyi yüksek ereve ve dışmerkez aprazlı elik perdelerden, Y doğrultusundaki yatay yük taşıyıcı sistemi; süneklik düzeyi yüksek çerçevelerden oluşmaktadır (şekil 2, 3). Kat dōřemeleri, elik kirişlere mesnetlenen ve trapez profilli sac levhalar üzerinde, yerinde dökme betonarme olarak inşa edilen kompozit dōřeme sisteminden meydana gelmektedir. 2.00m aralıklarla teşkil edilen ikincil ara kirişlerin uçları ana kirişlere mafsalı olarak bağlanmaktadır. Ana ereve kirişlerin kolonlara bağlantısı ise kolonların zayıf eksenleri doğrultusunda mafsalı, kuvvetli eksenleri doğrultusunda rijit olarak teşkil edilmiştir (şekil 2).

Konut veya işyeri olarak planlanan elik binanın boyutlandırılmasında deprem karakteristikleri; etkin yer ivme katsayısı (birinci derece deprem bölgesi)  $A_0=0.40$ , bina önem katsayısı  $I=1$ , yerel zemin sınıfı Z2 ( $T_A=0.15$  sn,  $T_B=0.40$  sn) olarak alınmıştır. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), X doğrultusunda  $R_x=7$ , Y doğrultusunda  $R_y=8$  alınmıştır.



Şekil 2. Altı katlı çelik binanın normal kat sistem planı



Şekil 3. Çelik binanın X ve Y doğrultusunda tipik sistem enkesiti

Tablo 1. Çelik binanın taşıyıcı sistem elemanlarının enkesit boyutları

Taşıyıcı Sistem Elemanı	Enkesit Profili
İkincil kirişler (Tüm katlarda)	IPE 270
A, ..., D Aksları ana kirişleri (Tüm katlarda)	IPE 270
1, ..., 5 Aksları ana kirişleri (1., 2. ve 3. katlarda)	IPE 400
1, ..., 5 Aksları ana kirişleri (4., 5. ve 6. katlarda)	IPE 360
±0.00 / +9.50 Kotları arasındaki tüm kolonlar	HE 400 B
+9.50 / +18.50 Kotları arasındaki tüm kolonlar	HE 360 B
Çelik çapraz elemanlar (tüm katlarda)	□ 140x140x8

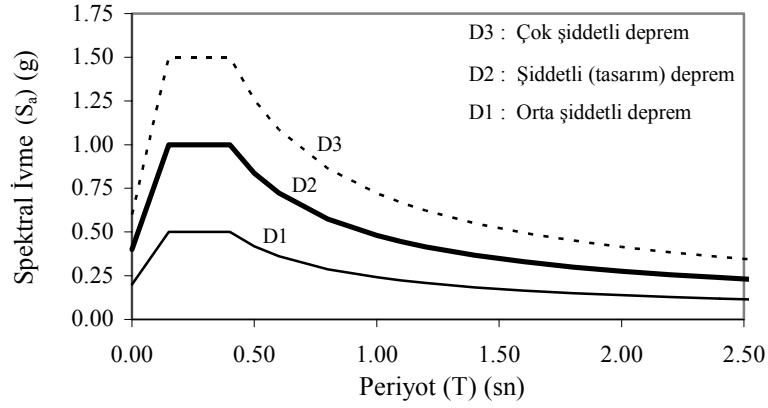
### 3.2 Varsayımlar

Binanın elastik ötesi statik itme (pushover) analizinde plastik şekildeğiştirmelerin plastik kesit adı verilen belirli bölgelerde toplandığı bunun dışındaki bölgelerde malzeme davranışının doğrusal-elastik olduğu kabul edilmiştir. Plastikleşmenin kirişlerde basit eğilme ile, kolonlarda iki eksenli eğilme momenti ve normal kuvvetin etkileşimi ile, elik çapraz elemanlarında ise normal kuvvet etkisi ile oluştuğu kabul edilmiştir. Kolon ve kirişlerin moment-plastik dönme davranış modeli pekleşen-rijit-plastik olarak kabul edilmiş ve buna ait karakteristik değerler (plastikleşme momentleri ve maksimum plastik dönme değerleri) FEMA 356'dan (FEMA, 2000) alınmıştır. elik binanın X doğrultusunda bulunan dışmerkez elik çaprazlar, iki ucu mafsallı çubuk elemanlarla modellenmiş ve bu elemanların eksenel kuvvet-plastik şekildeğiştirme ( $N-\Delta_p$ ) bağıntısına ait karakteristik değerler FEMA 356'dan alınmıştır. elik aprazların kirişle birleştiği bölgelerde kiriş uçlarındaki potansiyel plastik kesitlerde eğilme etkisi göz önüne alınmış ancak, kesme etkisi altında yeterli dayanımına sahip olduğu kabul edilmiştir.

### 3.3 Performans Hedeflerinin Tanımlanması

TDY 2007'de, depreme dayanıklı yapı tasarımıının ana ilkesi; "hafif şiddetdeki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetdeki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlanması" olarak tanımlanmıştır (DBYBHY, 2007). Performans hedefleri olarak kabul edilebilecek olan bu ilkelerde, orta şiddetli deprem, çok şiddetli deprem ve ayrıca elik binalar için yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki hasarlara karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri tanımlanmamıştır.

İncelenen elik binanın performansının belirlenebilmesi ve buna bağlı olarak TDY 2007'nin performans hedeflerinin irdelenebilmesi için deprem seviyeleri ve şekildeğiştirmeye bağlı hasar sınır değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. Çalışmada, TDY 2007'de betonarme binaların değerlendirilmesi kapsamında tanımlanan orta şiddetli deprem, şiddetli deprem (tasarım depremi) ve ayrıca, önemli binaların tasarımında ve değerlendirilmesinde esas alınan çok şiddetli deprem seviyesi kullanılmıştır. Göz önüne alınan deprem seviyeleri için 50 yılda aşılma olasılıkları sırasıyla % 50, %10 ve %2 olarak tanımlanmıştır. Bu depremlere ait ivme spektrumları, tasarım spektrumundan türetilmiştir. Buna göre, orta şiddetli deprem (D1), tasarım depreminin (D2) ivme spektrumunun % 50'si, çok şiddetli deprem ivme spektrumu (D3) ise tasarım depremi (D2) ivme spektrumunun 1.5 katı olarak tanımlanmıştır (şekil 4).

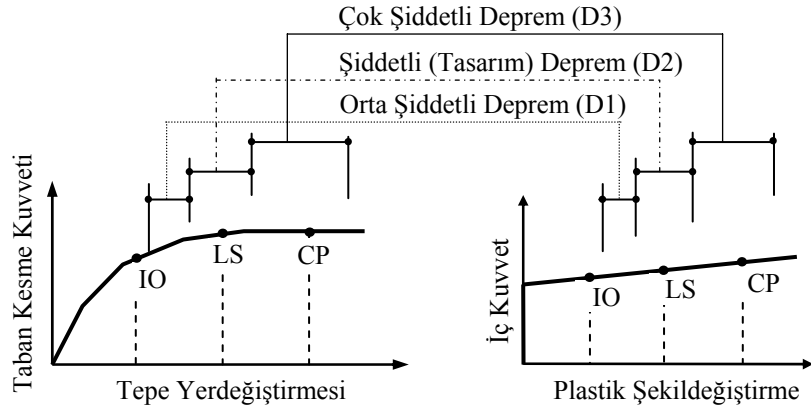


Şekil 4. Deprem seviyelerine ait talep spektrumları

Çalışmada, göz önüne alınan deprem seviyeleri için yapıda oluşması beklenen hasar düzeyi sınırları bakımından FEMA 356'daki (FEMA, 2000) performans düzeylerinden yararlanılmıştır. Buna göre, TDY 2007'de her bir deprem seviyesi için sözle ifade edilen performans tanımlarının, FEMA 356'daki performans düzeylerinden yararlanarak aşağıdaki bölgelerle ifade edilebileceği kabul edilmiştir (Şekil 5).

- Orta şiddetteki depremlerde binanın, hemen kullanım performans düzeyi ile (IO) ile yaşam güvenliği performans düzeyi (LS) arasında {IO~LS} ancak hemen kullanım performans düzeyine (IO) yakın olduğu,
- Şiddetli (tasarım) depremlerde ise binanın, yaşam güvenliği performans düzeyinde (LS) veya ona yakın olduğu,
- Çok şiddetli depremlerde ise binanın, göçme önleme performans düzeyinde (CP) veya onu aştığı

kabul edilmiştir (TDY 2007'nin ana ilkeleri arasında konut veya büro amaçlı binalarda, bu deprem seviyesi için herhangi bir öngörü bulunmamasına rağmen, karşılaştırma amacıyla bu çalışmada sözkonusu deprem seviyesi de göz önüne alınmıştır).

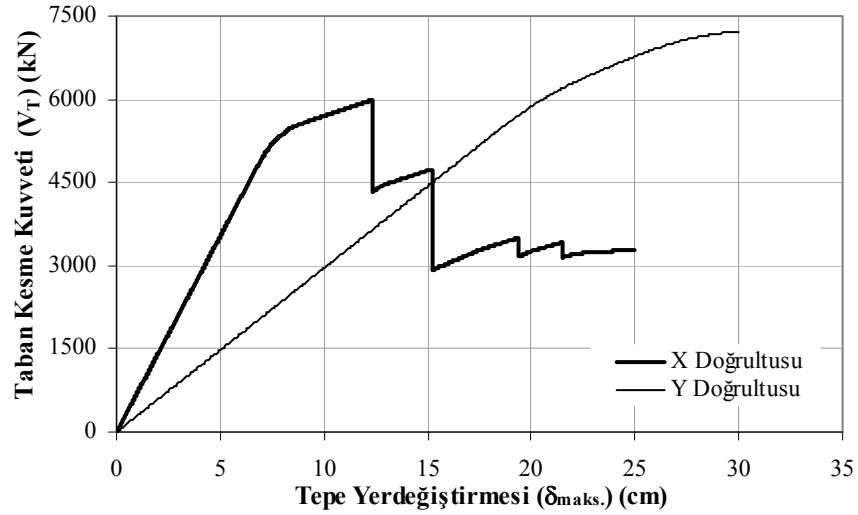


Şekil 5. Deprem seviyelerinin performans düzeyleri ile eşleştirilmesi



### 3.4 Çelik Binanın Kapasite Eğrilerinin Elde Edilmesi

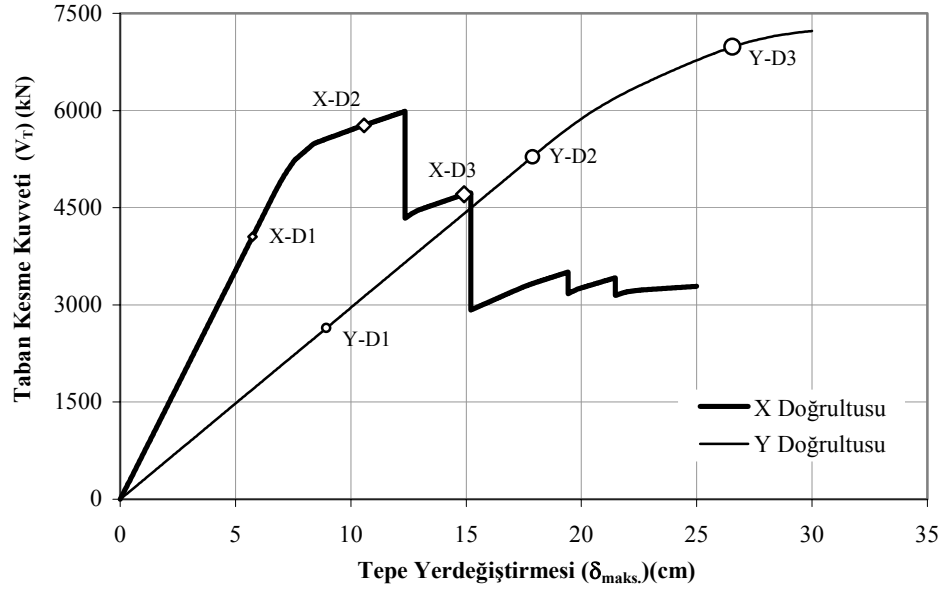
İncelenen çelik binanın yatay kuvvet taşıma kapasitesini ifade eden kapasite eğrilerini elde etmek için, binanın X ve Y doğrultularında sabit düşey yükler ve monoton artan yatay deprem yükleri altında malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan teoriye göre elastik ötesi statik itme (pushover) analizleri yapılmıştır (Şekil 6). Depremi temsil eden yatay yük dağılımı olarak, TDY 2007’de verilen eşdeğer deprem yükü dağılımı kullanılmıştır. Çelik binanın kapasite eğrilerinin belirlenmesinde *SAP2000 Yapı Analiz Programı*’ndan yararlanılmıştır (CSI, 2002).



Şekil 6. Çelik binanın X ve Y doğrultularında elde edilen kapasite eğrileri

### 3.5 Çelik Binanın YKY ile Yerdeğiştirme ve Dayanım Taleplerinin Belirlenmesi

İncelenen çelik binanın X ve Y doğrultusunda elde edilen kapasite eğrilerinden yararlanarak, orta şiddetli, şiddetli (tasarım) ve çok şiddetli deprem seviyeleri için YKY ile yerdeğiştirme ve dayanım talepleri belirlenmiş (Şekil 7) ve elde edilen analiz sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. YKY ile yerdeğiştirme talebinin belirlenmesinde, histeretik davranışın maksimum yerdeğiştirme davranışı üzerindeki etkisini temsil eden  $C_2$  katsayısı, incelenen çelik binanın gerçekleşen performans düzeyine bağlı olarak belirlenmiştir. Binanın performansı başlangıçta bilinmediğinden  $C_2$  katsayısı ardışık yaklaşım ile elde edilmiştir.



Şekil 7. Çelik binanın her bir deprem için elde edilen yerdeğiştirme ve dayanım talepleri

Tablo 2. Çelik Binanın X ve Y doğrultularındaki YKY ile elde edilen analiz sonuçları

Deprem Seviyesi	$S_a$ (g)	$C_0$	sonuçları		$T_1 = T_e$ (sn)	$K_i = K_e$ (kN/m)	$\delta_{maks}$ (cm)	$V_T$ (kN)
			$C_1$	$C_2$				
X Doğrultusu								
D1	0.3115	1.342	1.058				5.739	4053
D2	0.6223	1.289	1.016	1.00	0.723	70624	10.576	5772
D3	0.9345	1.199	1.026				14.910	4706
Y Doğrultusu								
D1	0.2238	1.348					8.938	2643
D2	0.4476	1.348	1.00	1.00	1.092	29572	17.876	5286
D3	0.6714	1.335					26.556	6982

### 3.6 Çelik Binanın Performans Düzeylerinin Belirlenmesi

İncelenen çelik bina, TDY 2007'deki üç farklı deprem seviyesi için de YKY ile belirlenen maksimum yerdeğiştirme talebine kadar statik olarak itilmiş ve kritik kesitlerdeki plastik dönme değerleri ile binanın görelî kat ötelemeleri hesaplanmıştır. Plastik dönme değerleri ve görelî kat ötelemeleri FEMA 356'da (FEMA, 2000) tanımlanan performans düzeylerine (hemen kullanım düzeyi {IO}, yaşam güvenliği düzeyi {LS} ve göçme önleme düzeyi {CP}) ait sınır değerler ile karşılaştırılarak incelenen çelik binanın performans düzeyleri belirlenmiştir (Şekil 8).

Buna göre, Tablo 3 ve 4'de verilen kiriş ve kolon elemanlarındaki plastik dönme talepleri, ilgili performans düzeylerine ait sınır değerler ile karşılaştırıldığında;

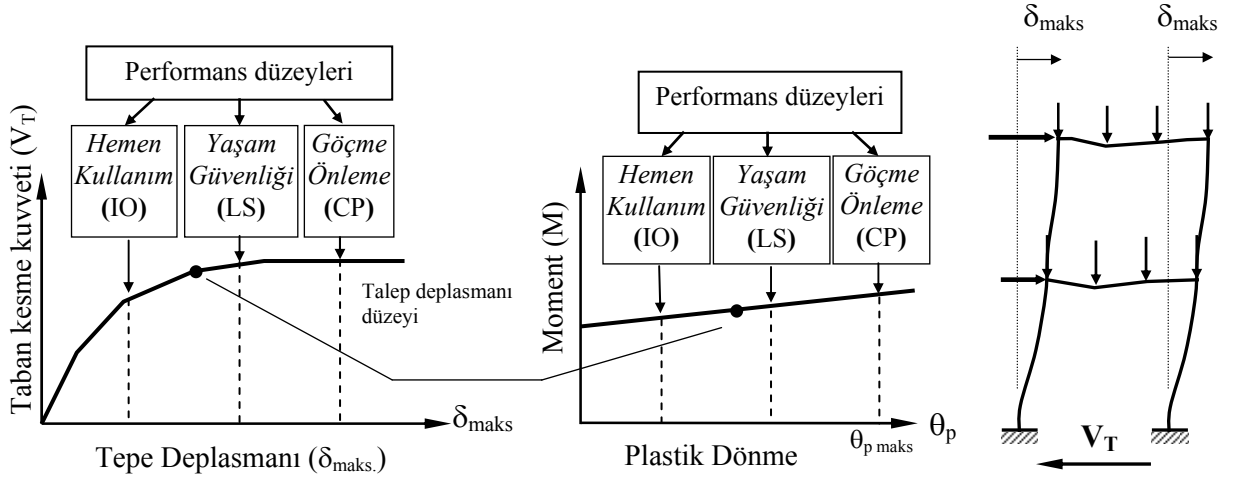
- X doğrultusunda, D1 depreminde kiriş ve kolonların hiçbirinde plastik şekildeğiştirmenin meydana gelmediği, D2 depreminde en büyük plastik dönmenin IO ile LS arasında {IO~LS} olduğu, D3 depreminde ise en büyük plastik dönmenin LS ile CP arasında {LS~CP} olduğu belirlenmiştir (Tablo 3) (şekil 8).
- Y doğrultusunda, D1 ve D2 depremi için kiriş ve kolonların hiçbirinde plastik şekildeğiştirmenin meydana gelmediği, D3 depremi için ise en büyük plastik dönmenin IO'nun altında {<IO} olduğu belirlenmiştir (Tablo 4) (şekil 8).

Tablo 3'de verilen, çelik çaprazlı perdelerdeki çapraz elemanlara ait plastik şekildeğiştirme (kısalma) talepleri ilgili performans düzeylerine ait sınır değerler ile karşılaştırıldığında;

- D1 depreminde çelik çapraz elemanların hiçbirinde plastik şekildeğiştirmenin oluşmadığı; D2 depreminde, 1. ve 2. kattaki çelik çapraz elemanların  $N_b$  burkulma yüküne ulaşmadığı ve en büyük şekildeğiştirmenin IO ve LS arasında {IO~LS} olduğu; D3 depreminde ise, 1. kattaki çelik çapraz elemanların  $N_b$  burkulma yükünü aşarak çok daha fazla plastik şekildeğiştirme yaptığı ve en büyük şekildeğiştirmenin (kısalma) göçme bölgesine {CP<} ulaştığı, buna karşın, 2. kattaki çelik çapraz elemanların  $N_b$  burkulma yüküne ulaşmadığı belirlenmiştir (Tablo 3).

Tablo 5'de, çelik binanın X ve Y doğrultularında belirlenen görelî kat öteleme talepleri, ilgili performans düzeylerine ait sınır değerler ile karşılaştırıldığında;

- X doğrultusunda, D1 ve D2 depremlerinde en büyük görelî ötelemenin IO'nun altında olduğu {<IO}, D3 depreminde ise en büyük görelî ötelemenin LS ile CP arasında {LS~CP} olduğu belirlenmiştir (Tablo 5) (şekil 8).
- Y doğrultusunda, D1 depreminde en büyük görelî ötelemenin IO'nun altında olduğu {<IO}, D2 ve D3 depremlerinde ise en büyük görelî ötelemenin IO ile LS arasında {IO~LS} olduğu belirlenmiştir (Tablo 5) (şekil 8).



Şekil 8. İncelenen bina için performans düzeylerinin belirlenmesi

Çelik binanın kiriş, kolon ve çelik çaprazlı perdelerindeki çapraz elemanlar, görelî kat ötelemeleri için elde edilen performans düzeylerinin en elverişsiz olanları esas alınarak, binanın her iki doğrultusu ve gözönüne alınan her üç deprem seviyesi için, bina performans düzeyleri değerlendirildiğinde;

- X doğrultusunda, D1 depremi için hemen kullanım düzeyinin altında {<IO} olduğu, D2 depremi için yaşam güvenliği ile göçme önleme düzeyleri arasında {LS~CP} olduğu, D3 depreminde ise göçme önleme düzeyini aştığı {CP<} belirlenmiştir.
- Y doğrultusunda, D1 depremi için hemen kullanım düzeyinin altında {<IO} olduğu, D2 ve D3 depremlerinde ise hemen kullanım ile yaşam güvenliği düzeyleri arasında {IO~LS} olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Çelik Binanın X doğrultusundaki elemanların plastik dönme ve kısalma taleplerine göre performans düzeyleri

Deprem Seviyesi	Kat No	Kat Plastik			Performans Düzeyine göre Plastikleşen Kesit Sayısı												
		Dönme (rad)	Kısalma (cm)		Kiriş				Kolon				Çapraz				
			Kiriş	Kolon	Çapraz	<IO	IO-LS	LS-CP	CP<	<IO	IO-LS	LS-CP	CP<	<IO	IO-LS	LS-CP	CP<
D1	1-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	4-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
D2	3	0.00172	---	---	6	2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	2	<b>0.00846</b>	---	1.184	---	8	---	---	---	---	---	---	---	4	---	---	---
D3	1	0.00745	---	<b>1.448</b>	---	8	---	---	---	---	---	---	---	---	4	---	---
	4-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
D3	3	0.00516	---	---	---	8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	2	<b>0.01161</b>	---	2.111	---	4	4	---	---	---	---	---	---	---	4	---	---
	1	0.00983	<b>0.00881</b>	<b>7.779</b>	---	4	4	---	16	4	---	---	---	---	---	---	4

Tablo 4. Çelik Binanın Y doğrultusundaki elemanların plastik dönme taleplerine göre performans düzeyleri

Deprem Seviyesi	Kat No	Kat Plastik Dönme (rad)		Performans düzeyine göre plastikleşen kesit sayısı								
		Kiriş	Kolon	Kiriş				Kolon				
				< IO	IO-LS	LS-CP	CP <	< IO	IO-LS	LS-CP	CP <	
D1	1-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
D2	1-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
D3	5-6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	4	0.00439	---	15	---	---	---	---	---	---	---	---
	3	0.00782	---	17	---	---	---	---	---	---	---	---
	2	<b>0.00903</b>	---	24	---	---	---	---	---	---	---	---
	1	0.00521	<b>0.00023</b>	15	---	---	---	---	6	---	---	---

Tablo 5. Çelik Binanın X ve Y doğrultularındaki görel kat ötelemelerine göre performans düzeyleri

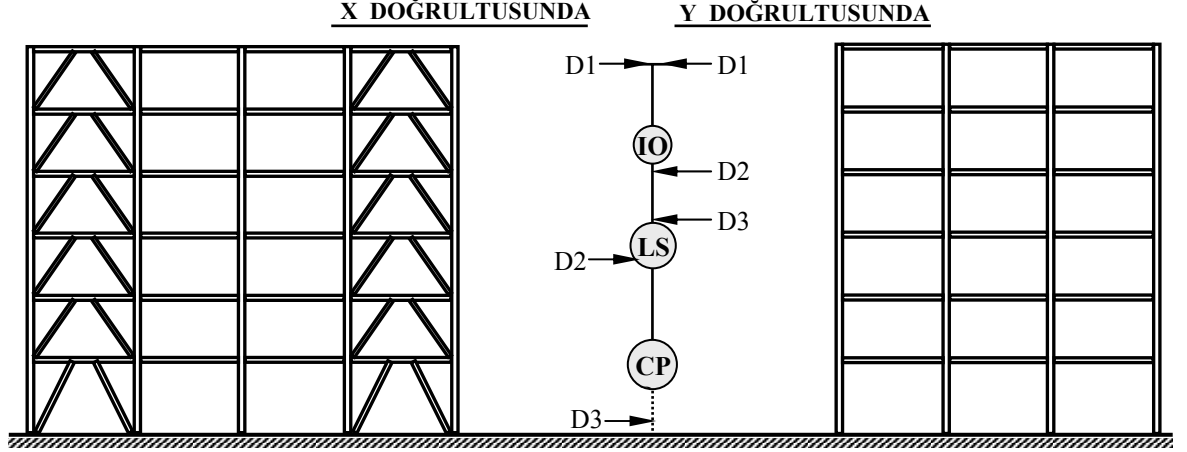
Deprem Doğrultusu	Kat No	Görel Kat Ötelemeleri (%)					
		D1	Performans Düzeyi	D2	Performans Düzeyi	D3	Performans Düzeyi
X	6	0.194	< IO	0.277	< IO	0.243	< IO
	5	0.267	< IO	0.382	< IO	0.328	< IO
	4	0.325	< IO	0.461	< IO	0.395	< IO
	3	0.356	< IO	0.540	< IO	0.484	< IO
	2	<b>0.376</b>	< IO	<b>0.889</b>	< IO	1.141	IO-LS
	1	0.339	< IO	0.837	< IO	<b>2.039</b>	<b>LS-CP</b>
Y	6	0.308	< IO	0.615	< IO	0.846	< IO
	5	0.472	< IO	0.943	< IO	1.347	IO-LS
	4	0.577	< IO	1.154	IO-LS	1.738	IO-LS
	3	<b>0.595</b>	< IO	<b>1.190</b>	<b>IO-LS</b>	<b>1.858</b>	<b>IO-LS</b>
	2	0.592	< IO	1.184	IO-LS	1.802	IO-LS
	1	0.374	< IO	0.748	< IO	1.080	IO-LS

### 3.7 TDY 2007 Performans Hedeflerinin Değerlendirilmesi

2007 Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) ana ilkeleri arasında yer alan performans hedefleri, her iki doğrultu için ayrı ayrı elde edilen bina performans düzeyleri ve Bölüm 3.3’de yapılan kabuller çerçevesinde değerlendirildiğinde;

- Orta şiddetli deprem (D1) için, binanın, her iki doğrultuda da aynı performansı gösterdiği ve bu performansların öngörülenin üzerinde (daha iyi) olduğu,
- Şiddetli deprem (tasarım depremi) için, binanın, X ve Y doğrultularındaki performanslarının oldukça farklı olduğu, X doğrultusunda öngörülen performansı sağladığı, buna karşılık Y doğrultusunda ise öngörülenin oldukça üzerinde (daha iyi) bir performans gösterdiği,

- Konut ve büro amaçlı binalar için herhangi bir öngörünün bulunmadığı, ancak bu çalışma kapsamında karşılaştırma amacıyla göz önüne alınan çok şiddetli depremde ise, binanın, X doğrultusunda göçme bölgesine geçerek bu çalışmada öngörülen performansı yaklaşık olarak sağladığı, Y doğrultusunda ise öngörülenin çok fazla üzerinde (daha iyi) bir performans gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Çelik Binanın X ve Y doğrultularındaki performans düzeyleri

#### 4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Türk Standart ve Yönetmeliklerine göre önceden tasarlanmış tipik bir çelik bina, bu çalışmada ele alınarak TDY 2007'deki üç farklı deprem seviyesi için performans düzeyleri belirlenmiş ve TDY 2007'deki ana ilkeler arasında yeralan performans hedefleri irdelenmiştir. Bunun için öncelikle, TDY 2007'de üç deprem seviyesi için belirtilen performans hedefleri, FEMA 356'daki performans düzeylerine ait hasar sınır değerlerinden ve TDY 2007'de betonarme binaların değerlendirilmesi için öngörülen deprem seviyelerinden yararlanarak tanımlanmıştır. Çalışmada, TDY 2007'nin açıklamalı uygulaması amacıyla daha önce boyutlandırılmış tipik bir çelik bina ele alınarak, TDY 2007'de belirtilen üç farklı deprem seviyesi için Yerdeğiştirme Katsayıları Yöntemi (YKY) ile binanın performans düzeyleri belirlenmiştir.

İncelenen çelik binanın, orta şiddetli deprem seviyesi için; binanın birbirine dik her iki doğrultuda da aynı performansı gösterdiği ve bu performansların öngörülenin üzerinde (daha iyi) olduğu, şiddetli deprem (tasarım depremi) seviyesi için; her iki doğrultudaki performanslarının birbirinden oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Buna göre; incelenen çelik bina süneklik düzeyi yüksek çerçeve ve dışmerkez çaprazlı çelik perdelerin bulunduğu (X) doğrultusunda öngörülen performansı sağladığı, buna karşılık süneklik düzeyi yüksek çerçevelerden oluşan (Y) doğrultusunda ise öngörülenin oldukça üzerinde (daha iyi) bir performans gösterdiği belirlenmiştir. TDY 2007'de çok şiddetli deprem seviyesinde konut ve büro amaçlı binalar için bina performansı ile ilgili herhangi bir öngörünün bulunmadığı, ancak bu çalışma kapsamında karşılaştırma amacıyla çelik binanın göz önüne alınan X doğrultusunda göçme bölgesine geçerek bu çalışmada öngörülen performansı yaklaşık olarak sağladığı, Y doğrultusunda ise öngörülenin çok fazla üzerinde (daha iyi) bir performans gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, incelenen çelik binanın birbirine dik her iki doğrultuda taşıyıcı sistemlerinin farklı olması nedeniyle, iki doğrultu için oldukça farklı performans düzeyleri elde edilmiştir. Ancak, çalışmada yapılan kabuller çerçevesinde, her iki doğrultuda da TDY2007'nin ana ilkesi olarak öngörülen performans hedeflerinin sağlandığı belirlenmiştir. Performans düzeyi tanımlamalarına bağlı olarak bina performanslarının değişebileceği bilinmekle birlikte, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, TDY 2007'de öngörülen performans hedefleri ile bu performansların sağlanması amacıyla öngörülen tasarım ilkelerinin uyumunda önemli farklılıklar olabildiğini göstermektedir. Ancak, TDY 2007'nin bu konuda ayrıntılı olarak değerlendirilebilmesi için farklı özelliklerde ve çok sayıda çelik bina üzerinde çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılacak benzer çalışmaların, son dönemde geleneksel deprem tasarımına bir alternatif olarak geliştirilmekte olan performansa dayalı tasarım yaklaşımlarına katkısı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, incelenen düzenli çelik binanın iki asal doğrultusunda önemli oranda farklı performans düzeylerinin elde edilmesi, performans esaslı tasarım yaklaşımlarında en elverişsiz doğrultunun belirlenmesi ve iki doğrultulu doğrusal olmayan analiz sonuçları ile performans değerlendirme konularının, çeşitli örnekler üzerinde incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] ABYYHY, 1998, “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik”, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- [2] ATC, 1996, “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings”, ATC 40, Applied Technology Council, Washington, DC., USA, Vol. 1.
- [3] Özer, E., 2007, “Çelik Binalar İçin Depreme Dayanıklı Tasarım Kuralları”, Yeni Deprem Yönetmeliği ve Uygulamalı Çözümler, Meslek İçi Eğitim Dizisi, TMMOB İMO İzmir Şubesi, Yayın No: 51.
- [4] CSI, 2002, “Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual”, SAP2000 V.8., CSI.
- [5] DBYBHY, 2007, “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- [6] FEMA, 1997, “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C..
- [7] FEMA, 2000, “Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C..
- [8] FEMA, 2005, “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures”, FEMA 440, ATC-55 Project, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C..
- [9] SEAOC, 1995, “Performance Based Seismic Engineering of Buildings”, Vision 2000, Structural Engineers Association of California.
- [10] SEAOC, 1999, “Recommended Lateral Force Requirements and Commentary”, Blue Book, Seventh Edition, Structural Engineers Association of California, C.A.
- [11] TSE, 1980, “Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, TS 648, Türk Standartları Enstitüsü.



# BETONARME ÇERÇEVELERİN ÇELİK ÇAPRAZLI SİSTEMLERLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Kıvanç TAŞKIN, Nesrin YARDIMCI, Faruk KARADOĞAN

Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı, İnşaat Mühendisliği Fakültesi  
İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak-İstanbul

## ÖZET

Yapıların yatay yük etkisindeki davranışında ana parametreler yapının yatay dayanımı ve yatay rijitliğidir. Ülkemizde sıklıkla karşılaşılan, sadece düşey yükler için boyutlandırılmış, ya da düşük yatay yük etkisi öngörülerek tasarlanmış betonarme çerçeve yapı sistemlerinin güçlendirilmesinde hedef yapının davranışını tanımlayan bu iki parametrenin iyileştirilmesidir. Bu araştırma, zayıf betonarme çerçevelerin yatay yük etkisindeki davranışının çelik çaprazlı sistemler yardımı ile iyileştirilmesi amaçlı yapılacak tasarımlara ışık tutabilmek amacı ile yapılmış bir grup parametrik çözümün derlenmesi ile oluşturulmuştur. Farklı geometrik karakteristiklerin ve çapraz eleman tiplerinin sistem davranışı üzerine etkilerinin incelenmiştir. Burada alışlagelmiş çapraz sistem yerine son yıllarda ortaya çıkmış yeni bir konsept denenmiş ve diğer sistemlerle karşılaştırılmıştır. “Enerji Yutma Kapasitesi Büyük, Değiştirilebilir Çaprazlı Sistem (Disposable Knee Bracing)” olarak adlandırılan bu yaklaşım parametrik çalışmada başarılı sonuçlar vererek, beklenildiği gibi yatay yük taşıma kapasitesini artırmış bununla beraber enerji yutma kapasitesi artmış ve en önemlisi yapının taşıyıcı elemanlarında oluşacak hasar miktarını azaltmıştır.

## 1. GİRİŞ

Doğal afetlerin en önemlilerinden biri olan depremin, meydana getirdiği etkiler yönünden de dikkate değer pek çok özelliği vardır. Deprem; toprak kaymaları, yapılarda hasar ve göçmeler meydana getirerek can kaybına neden olur. Deprem etkisinin en önemli özelliği, meydana gelen can kayıplarının hemen hemen hepsinin, insanlar tarafından inşa edilen yapıların davranışıyla ilgili olmasıdır. Bu nedenle bu etkinin incelenmesi ve depreme dayanıklı bina tasarımı da, özel bir mühendislik yaklaşımı gerektirir.

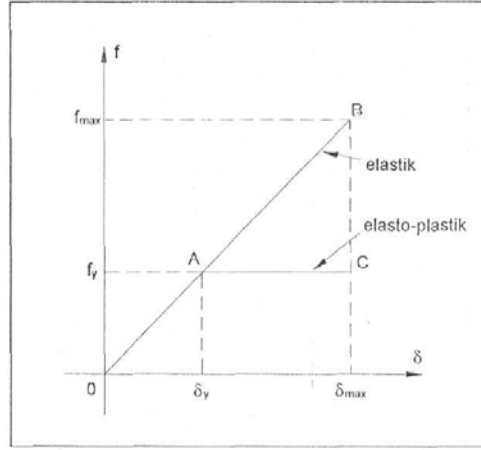
Depremi diğer bir özelliği de önceden bir uyarı gelmeden meydana gelmesidir. Deprem meydana gelmeden önce bazı ön işaretler görülebilirse de, günümüzde depremin önceden tahmin edilmesi konusunda güvenilir sonuçlar henüz mevcut değildir. Gerçekte, depremin oluş zamanı yeter doğrulukta tahmin edilerek haber verilebilse ve böylece insanların hayatı kurtarılabilse bile, yapılarda meydana gelen hasar ve göçmeler toplumun ekonomisinde önemli kayıplara neden olacağından, yapıların yine deprem etkisine dayanıklı inşa edilmesi gerekir.

Öngörülen bir deprem etkisine karşı taşıyıcı sistemin gerekli **rijitliğe** sahip olması, yatay ve düşey yükler altında, yapının yer değiştirmelerinin doğrusal elastik bölgede kalması ve sınırlı olmasıyla karşılanır.

Öngörülen bir deprem etkisine karşı taşıyıcı sistemin gerekli dayanıma sahip olması boyutlamanın esasını teşkil eder. Yapının göçme yükü yeterince büyük olmalı tasarıma esas olan yatay ve düşey hesap yükleri altında bölgesel ve ani göçmeler meydana gelmemelidir.

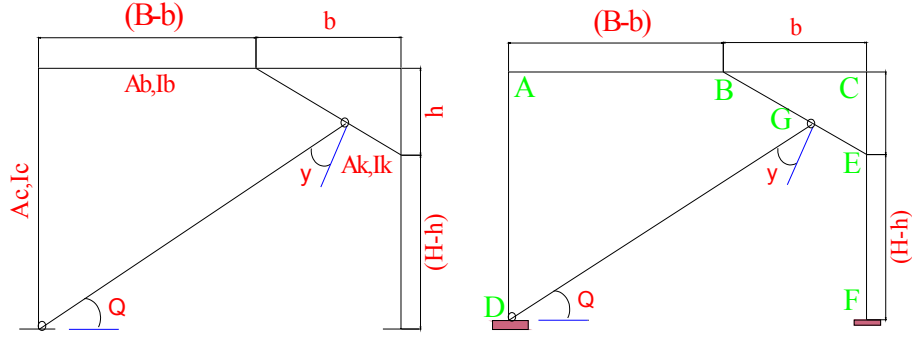
Yapı, yanal rijitlik ve dayanım yanında, yeterli burulma rıntliği ve dayanımına *da* sahip olmalıdır.

Süneklik, bir kesitin veya bir elemanın veya bir taşıyıcı sistemin, dış yükte önemi bir değişme olmaksızın, elastik sınırın ötesinde şekil değiştirme, dolayısıyla yer değiştirme yapma özelliğinin ölçüsüdür. Sayısal tanım olarak sistem süneklik oranı, göçme sırasındaki toplam şekil değiştirmelerin doğrusal şekil değiştirmelere oranıdır.



**Şekil 1 Süneklik Tanımının Şekilsel Gösterimi**

*Massodd Mofid, Peyman Khasnani (1999)*, bu konu ile ilgili yaptıkları çalışmada yukarıda bahsedilen yeni konseptle ilgili analitik çalışmalar yapmışlardır. Bunun için sistemdeki bilinmeyenleri ve sistem davranışına etkili olabilecek parametreleri Şekil 2 deki gibi belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada aldıkları modelin genişliğinin yüksekliğine oranına bağlı olarak modeller üzerinde analizler yapmışlardır. Sonuç olarak, bilineer davranış modeli böyle sistemlerin analizinde iyi sonuçlar vermiştir. "Knee" elemanın yerleşimi ve ona bağlanacak olana çaprazın geometrik konumu sistem davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 2 Değiştirilebilir Çelik Çaprazlı Sistem Özellikleri

*Mahmoud R Maheri, R. Akbari (2003)*, bu çalışmalarında “Değiştirilebilir Çelik Çaprazlı Sistem” kullanılarak oluşturulan yapıların davranış katsayısı ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu katsayının hesabı için değişik yükseklik ve çaprazlı sistem modelleri ile oluşturulan model sistemler üzerinde inelastik itme analizleri uygulanmıştır. Model yapılar Şekil 3 te gösterilmiştir.

Davranış katsayısı parametreleri;

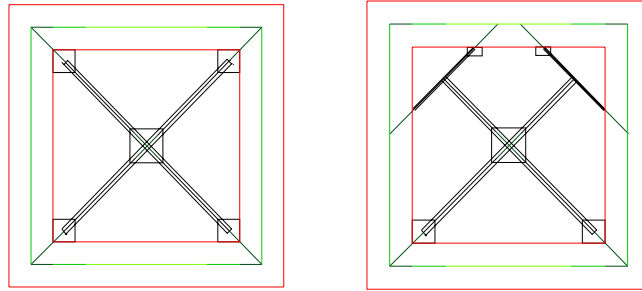
$$R = R_{\mu} \cdot R_s \cdot Y$$

$$R_{\mu} = V_e / V_y \quad R_s = V_y / V_s \quad Y = V_s / V_w \quad \text{buradan} \quad R = V_e / V_w$$

Yapı sünekliği  $\mu = \Delta_{\max} / \Delta_y$  olarak alınmıştır.

R katsayısı belirlenirken göz önüne alınan parametreler;

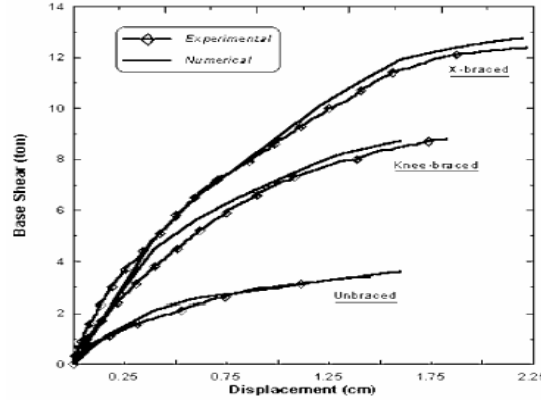
- Binadaki kat sayısı
- Çaprazlı sistem tipi
- Taban kesme kuvvetinin çaprazlarla paylaşımı (% 0, 50, 100 olmak üzere 3 tip)



Şekil 3 Betonarme Çerçeves İçine Yerleştirilen Çaprazlı Sistemler

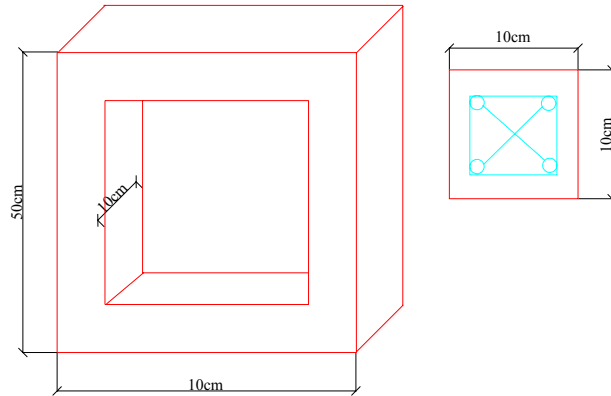
Deneyler çıplak çerçeve, “X” çaprazlı çerçeve ve “knee braced” çerçeve olarak 3 adet numune üzerinde yapılmıştır. Deneylerde inelastik itme analiz, tasarım kapasitesinin %2 sine karşılık gelen yatay yük altında yapılmıştır ve her bir çerçevenin maksimum taşıma kapasitesi maksimum yatay deplasman yüksekliğinin %1.5 una eşit olduğu durum olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak; “R” katsayısı üzerinde etkili olan değişken parametreler, a)taban kesme kuvvetinin çaprazlar tarafından paylaşım oranı, b)yapıdaki kat sayısı, c)çaprazlı sistem tipi olarak belirlenmiştir. Çaprazlı sistemler çıplak çerçeveye göre daha fazla sünek

davranmışlardır. Kısa sistemlerde “knee” li sistem “X” li sisteme göre yüksek R katsayısı ve yüksek süneklik seviyesi göstermiştir. Aynı şeyi yüksek yapılar için söylemek zordur. “X” çaprazlı sistemler, çaprazların ve betonarme sistem arasındaki taban kesme kuvveti paylaşımında daha etkili olduğu görülmüş, bununla beraber “knee” çerçevelerde yüksek taban kesme kuvvetinin çaprazlarla taşınması daha uygundur. Betonarme çerçevelerin sünekliği yükseklik arttıkça azalmıştır. Değişik sistemler için süneklik seviyeleri karşılaştırılmaları yapılmış ve R faktörünün değişik sistemler için önemli olduğu görülmüştür.



Şekil 4 Deneysel ve Analitik Çalışmaların Karşılaştırılması

*M. R. Maheri, A. Sahebi (1996)*, bu çalışmada çelik çaprazlarla güçlendirilen betonarme çerçeve deneyleri yapılmıştır, Şekil 5. Araştırma bir kaç modelden oluşan testler üzerinde yapılmıştır. Değişik tipteki çapraz elemanların çerçevenin düzlemindeki kayma gerilmelerinin artışındaki verimliliği ve çekme ve basınç çubuklarında oluşan etkiler araştırılmıştır. Bunların yanı sıra çaprazlar ile betonarme elemanlar arasındaki bağlantı detayları da incelenmiştir. Dört adet deney numunesi üzerinde yapılan deneyler sonucunda şu sonuçlar bulunmuştur.

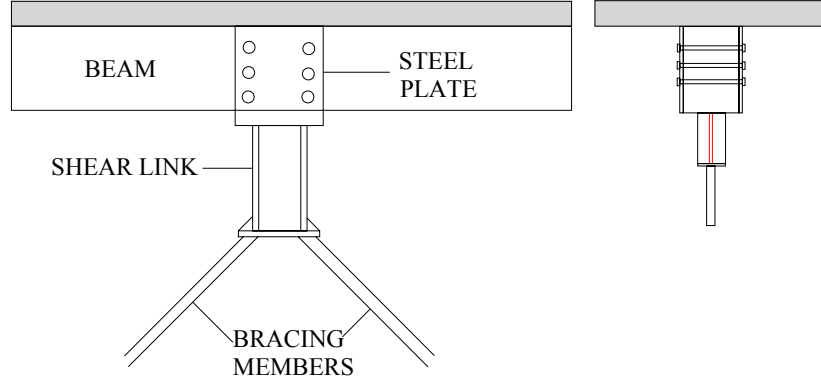


Şekil 5 Betonarme Çerçeve Modeli Geometrik Özellikleri

Çerçeve düzlemindeki kayma mukavemeti önemli ölçüde artmıştır. Bir diyagonal sistemde beton çerçeve eğilmeden dolayı oluşan düzlem gerilmelerin büyük miktarını taşımıştır. “X” li deney numunesi göstermiştir ki çekme çubuğu yükün büyük bir bölümünü karşılamakta, göçme modu ise çekme çubuğu çekme gerilme değerini aştıktan sonra basınç çubuğunun burkulmasıyla oluşmaktadır. “X” li numunede çekme ve basınç çubukları farklı oranlarda yük taşımışlardır. Diyagonal

çerçeve birleşim detayları tam kapasiteden yararlanılması açısından önemli olduğu anlaşılmıştır.

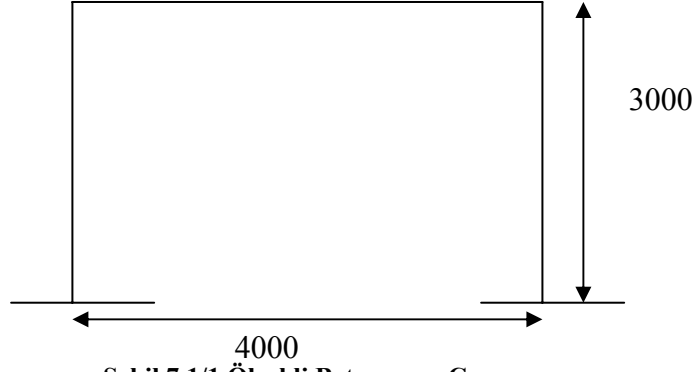
*A.Ghoborah, H. Abou Elfath (2000)*, Bu çalışmada, az katlı dışmerkez çelik çaprazlarla güçlendirilmiş bir betonarme yapının sismik performansı araştırılmıştır. Üç katlı bir yapının çeşitli deprem kayıtlarına göre analizleri yapılmıştır. Dışmerkez güçlendirilmiş çerçevenin yapı üzerindeki verimi araştırılmıştır. Sünek olmayan betonarme yapının elamanlarının davranışını daha iyi yakalamak için elemanlar kolon-kiriş elemanı olarak tasarlanmıştır. Bağlantı elemanı ise 3 ayrı lineer doğrudan oluşan moment ve kayma modeline göre tasarlanmıştır. Seçilen binada dış çerçeveler “V” ve “Y” tipi güçlendirme uygulanmıştır Şekil 6.



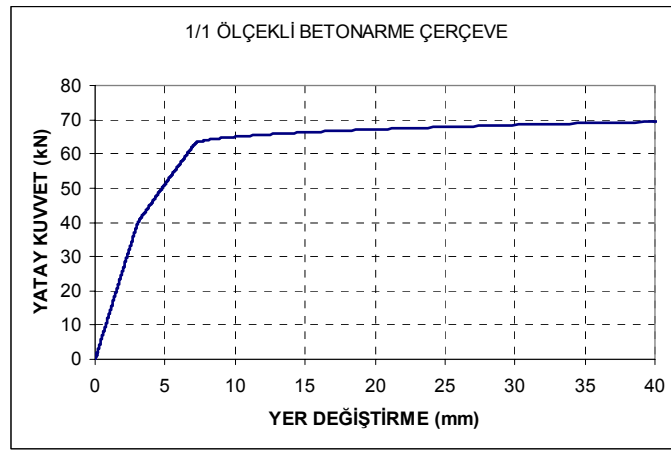
Şekil 6 Güçlendirme İçin Seçilen Sitemin Betonarme Çerçeveye Bağlantı Detayı

## 2. PARAMETRİK ÇALIŞMA

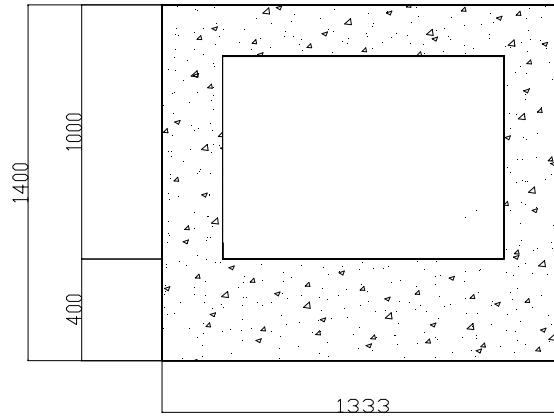
Değiştirilebilir çelik çaprazlı sistemle güçlendirilmiş betonarme çerçeveye ait parametreler aşağıda verilmiştir, Şekil 7. Numune gerçek yapıya yakın kesit değerleri verecek şekilde 1/3 ölçekli olarak boyutlandırılmıştır. Kolon ve kirişte boyuna donatı olarak Ø 8-BÇİ ve etriye olarak da Ø 4-BÇİ kullanılmıştır. Beton sınıfı BS 20 olarak alınmıştır. Boyutları küçük olduğundan analizler sırasında, çaprazlarda Çelik Kutu ve Boru profiller kullanılmışlardır. Analizlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi ve karşılaştırmaların oluşturulabilmesi için belirli parametreler göz önüne alınmıştır. Aşağıda gösterilen şekilde tipik bir değiştirilebilir çelik çaprazlı sistemin temel parametreleri gösterilmektedir, Şekil 1.5. Mofid ve Khosravi (1999) böyle bir yapının maksimum deprem kuvvetini karşılayabilmesi için kullanılacak çaprazların sistemin diyagonallerine paralel olması gerektiğini göstermiştir. Bu da  $x=b/B=h/H$  olması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada “x” parametresinin 0.15-0.30 arasında olmasının sistem üzerinde daha büyük bir etki yarattığını göstermiştir. Aristizabal-Ochoa (1986) “knee” elemanın kesitinin belirlenmesinde kolonun akma mukavemetinin %50 sine denk gelecek şekilde seçilmesinin sistem davranışına en büyük katkıyı yaptığını belirtmiştir. Fakat bu oran ile ilgili herhangi bir detay ve açıklama mevcut değildir. Bu nedenle yapılan analizlerde bu oran ele alınmıştır. Eğer “knee” elemanın kesiti kolon kesitine yakın alınırsa plastik mafsalsın ilk önce “knee” elamanda mı yoksa kolonda mı oluştuğu tam olarak gözlenemeyeceğinden  $I_K/I_C = \%20-\%40$  arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Laboratuarda fiziksel kapasitenin yetersizliği ayrıca 1/1 ölçekli bir yapının testlerinin ekonomik olmaması nedeniyle çok katlı hem betonarme hem de çelik bir yapı seçilerek ölçeklendirme yapılmıştır.



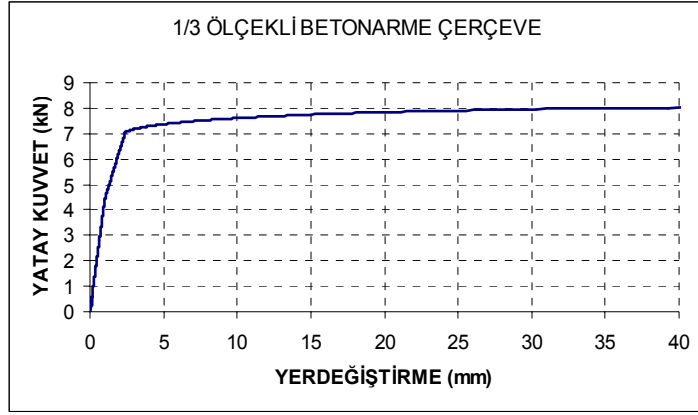
**Şekil 7 1/1 Ölçekli Betonarme Çerçeve**



**Şekil 8 1/1 Ölçekli Betonarme Yapıya Ait Yatay Kuvvet-Yerdeğiştirme Grafiği**



**Şekil 9 1/3 Ölçekli Betonarme Çerçeve**



Şekil 10 1/3Ölçekli Betonarme Yapıya Ait Yatay Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği

Analizlerde beş değişik tip çaprazlı sistem denenmiştir. Burada adlandırma çapraz sayısı ve “knee” eleman sayısına bağlı olarak değişmektedir. Analizler sırasında Mofid ve Khosravi (1999) ve Aristizabal-Ochoa (1986) önerileri baz alınarak “knee” elemanın kolon ve kiriş üzerindeki yeri ve “knee” elemanın kesit tipi değişken parametreler seçilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda hem boru hem de kutu kesit için değişken “knee” uzaklıkları belirlenmiştir, Tablo 1.1. Bunlar sırasıyla tek doğrultulu “knee” değiştirilebilir çaprazlı sistem (SKNEE), Çift doğrultulu “knee” değiştirilebilir çaprazlı sistem (DKNEE), dört taraflı “knee” değiştirilebilir çaprazlı sistem (FULLKNEE), orta bölgede kutu şeklinde oluşturulmuş merkezi güçlendirilmiş çaprazlı sistem (BOX) ve orta bölgesinde dairesel bir kesitle oluşturulmuş merkezi güçlendirilmiş (RING) olarak adlandırılmıştır. İlk üç sistemde yukarıda belirtilen parametrelere bağlı olarak bir “x” ve kolonun atalet momentine göre de belirlenmiş kutu ve boru profiller belirlenmiş ve birer adetleri için analizler yapılmıştır.

Tablo 1 Değişken “x” Parametresinin Kolon-Kiriş Birleşiminden Uzaklıkları

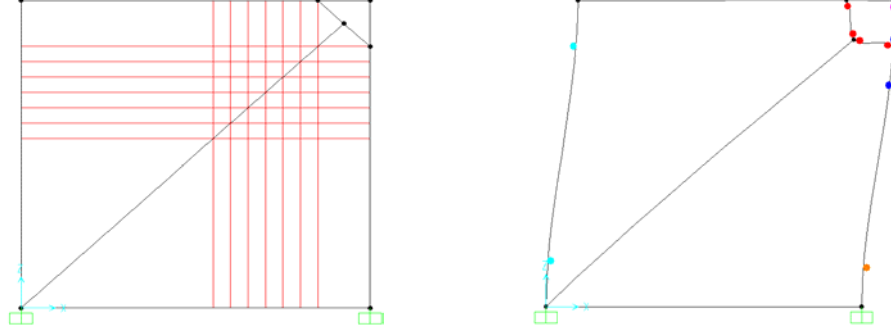
	x= b/B=h/H (cm)						
	0.15	0.20 (1)	0.25 (2)	0.30 (3)	0.35 (4)	0.40 (5)	0.45 (6)
b	16.95	22.6	28.25	33.9	39.55	45.2	50.85
h	16.5	22	27.5	33	38.5	44	49.5

Kolonun atalet momentini  $6666 \text{ cm}^4$  olduğundan seçilecek çaprazların kesitlerine ait atalet momentleri  $1332 \text{ cm}^4$  ile  $2666 \text{ cm}^4$  arasında olmalıdır. Bu nedenle boru kesit olarak çapı 26.9 mm et kalınlığı 2 mm , kutu kesit olarak da 25 mm x 25 mm ebatlarında et kalınlığı 2 mm olan profiller seçilmiştir.

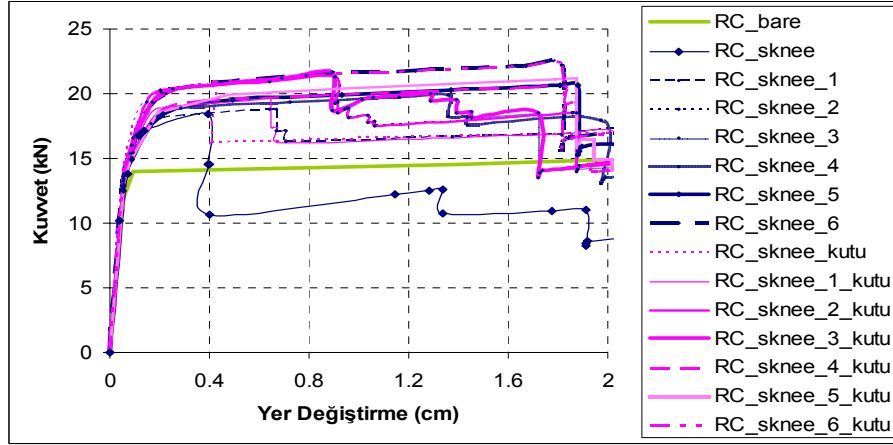
#### **TEK DOĞRULTULU DEĞİŞTİRİLEBİLİR ÇAPRAZLI SİSTEM (SKNEE)**

Tek bir köşegen doğrultusunda bir çapraz ve bir tane “knee” elemandan oluşan sistemdir, Şekil 11. Sistemde kullanılan kesitler kutu ve boru profilleridir. Sistemin çözümünde çapraz eleman ve “knee” eleman iki ucu mafsallı çubuk olarak analiz edilmiştir. Çapraz sadece orta noktasından burkulacak şekilde eksen doğrultusunda yük aktaran, “knee” elemanın çaprazla bağlantı noktası ise hem eksen doğrultusunda

yük hem de moment aktaran şekilde analiz programına girilmiştir. Analizler sonucunda Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği Şekil 12 de gösterilmiştir.



**Şekil 11 Tek Doğrultulu Değiştirilebilir Çaprazlı Sistem (SKNEE) Analiz Sonucunda Oluşan Mafsal Yerleri**

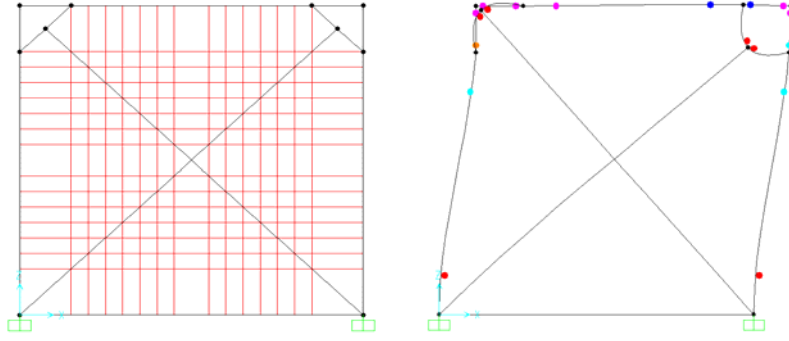


**Şekil 12 Tek Doğrultulu Değiştirilebilir Çaprazlı Sistemlerin (SKNEE) Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri**

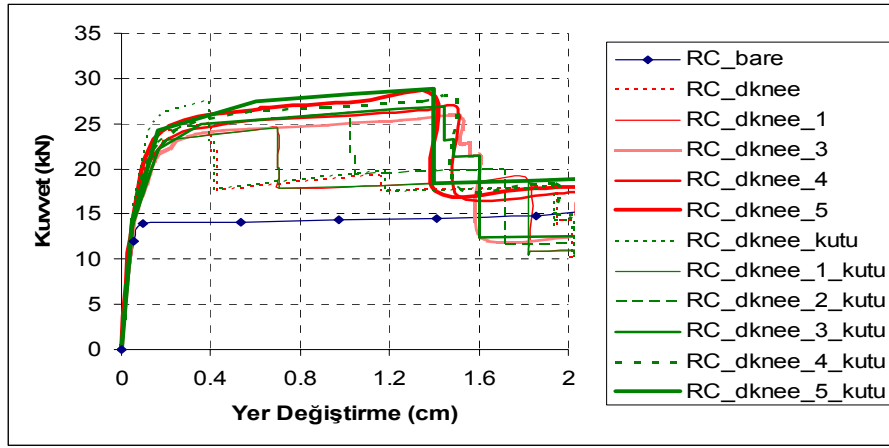
### **ÇİFT DOĞRULTULU DEĞİŞTİRİLEBİLİR ÇAPRAZLI SİSTEM (DKNEE)**

İki köşegen doğrultusunda birer çapraz ve iki tane “knee” elemandan oluşan sistemdir, Şekil 13. Sistemde kullanılan kesitler kutu ve boru profilleridir. Sistemin çözümünde çapraz eleman ve “knee” eleman iki ucu mafsalı çubuk olarak analiz edilmiştir. Çapraz sadece orta noktasından burkulacak şekilde eksenî doğrultusunda yük aktaran, “knee” elemanın çaprazla bağlantı noktası ise hem eksenî doğrultusunda yük hem de moment aktaran şekilde analiz programına girilmiştir. Çaprazlar ortadan tutulu değildir. Analizler sonucunda Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği Şekil 14 de gösterilmiştir.





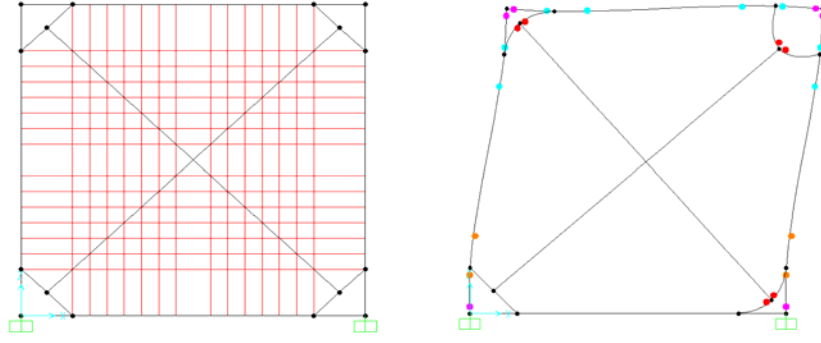
**Şekil 13 Çift Doğrultulu Değiştirilebilir Çaprazlı Sistem (SKNEE) ve Analiz Sonucunda Oluşan Mafsal Yerleri**



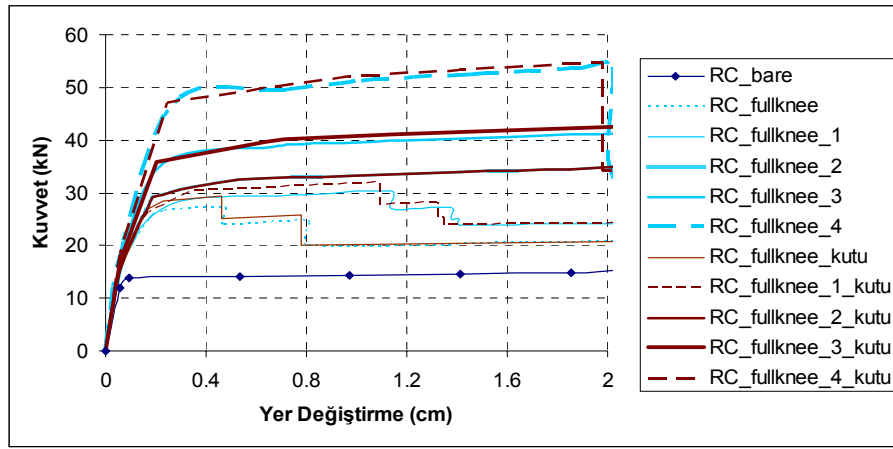
**Şekil 14 Çift Doğrultulu Değiştirilebilir Çaprazlı Sistemlerin (DKNEE) Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri**

### **DÖRT TARAFLI DEĞİŞTİRİLEBİLİR ÇAPRAZLI SİSTEM (FULLKNEE)**

İki köşegen doğrultusunda birer çapraz ve dört tane “knee” elemandan oluşan sistemdir, Şekil 15. Sistemde kullanılan kesitler kutu ve boru profilleridir. Sistemin çözümünde çapraz eleman ve “knee” eleman iki ucu mafsalı çubuk olarak analiz edilmiştir. Çapraz sadece orta noktasından burkulacak şekilde eksenini doğrultusunda yük aktaran, “knee” elemanın çaprazla bağlantı noktası ise hem eksenini doğrultusunda yük hem de moment aktaran şekilde analiz programına girilmiştir. Çaprazlar ortadan tutulu değildir. Analizler sonucunda Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği Şekil 16 da gösterilmiştir.



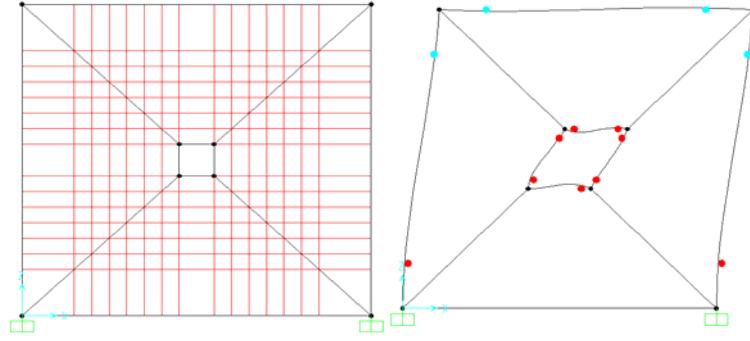
Şekil 15 Dört Taraflı Değiştirilebilir Çaprazlı Sistem (FULLKNEE) ve Analiz Sonucunda Oluşan Mafsallı Yerleri



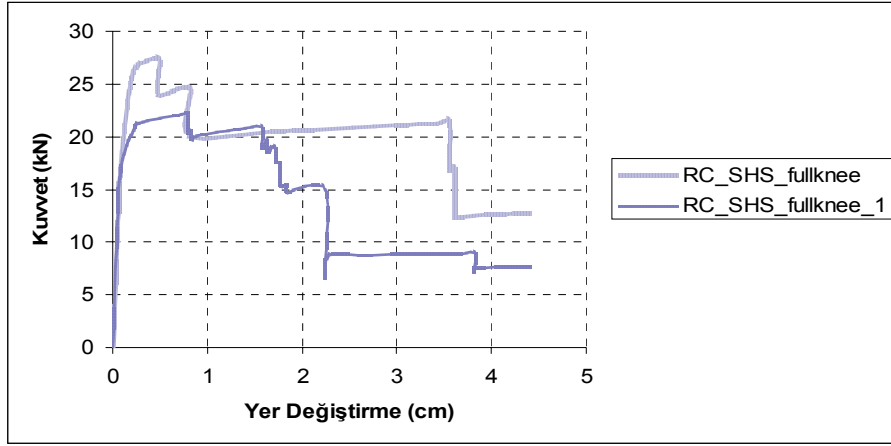
Şekil 16 Dört Taraflı Değiştirilebilir Çaprazlı Sistem (FULLKNEE) Kuvvet-Yer Değiştirme Grafikleri

### **ORTA BÖLGEDE KUTU ŞEKLİNDE OLUŞTURULMUŞ MERKEZİ GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇAPRAZLI SİSTEM**

İki köşegen doğrultusunda birer çapraz ve çaprazların orasında kutu şeklinde dört elemandan oluşturulmuş sistemdir, Şekil 17. Sistemde kullanılan kesit kutu profildir. Sistemin çözümünde çapraz ve kutu kesiti oluşturan elemanlar iki ucu mafsallı çubuk olarak analiz sisteme girilmiştir. Çaprazlar sadece orta noktasından burkulacak şekilde eksenini doğrultusunda yük aktaran çubuk eleman olarak ortadaki kesit ise iki ucu mafsallı ve hem moment hem de aksiyel kuvvet aktaran çubuk eleman olarak girilmiştir. Şekilde analiz programına girilmiştir. Çaprazlar ortadan tutulu değildir. Analizler sonucunda Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği Şekil 18 de gösterilmiştir.



**Şekil 17 Orta Bölgede Kutu Şeklinde Güçlendirilmiş Merkezi Çaprazlı Sistem (BOX) ve Analiz Sonucunda Oluşan Mafsalları**



**Şekil 18 Orta Bölgede Kutu Şeklinde Güçlendirilmiş Merkezi Çaprazlı Sistem (BOX) Kuvvet-Yer Değişirme Grafiği**

### 3. SONUÇLAR

Tek doğrultulu değiştirilebilir yerleştirilmiş dışmerkez çaprazlı sistem (SKNEE) uygulandığında model betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi 1.91 kat artmıştır. Buna bağlı olarak da enerji yutma kapasitesi de artmıştır. Her iki durum için kullanılan kesitlerdeki farklılık yatay yük taşıma kapasitesinde bir farklılık meydana getirmemiştir. “knee” elemanın sistem üzerinde yerleştirildiği “x” mesafesinin değişimi ile seçilen kesitlerdeki burkulma ve plastik mafsalları oluşumu değişmektedir. Sistemden beklediğimiz gibi plastik mafsalları oluşumları çerçeve üzerinden bizim tayin ettiğimiz kesitlerde oluşmuştur. Yapı sistemindeki hasar durumu çok azdır.

Çift doğrultulu değiştirilebilir yerleştirilmiş dışmerkez çaprazlı sistem (DKNEE) uygulandığında model betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi 2.50 kat artmıştır. Her iki durum için kullanılan kesitlerdeki farklılık yatay yük taşıma kapasitesinde bir farklılık meydana getirmemiştir. Fakat SKNEE durumuna göre

burkulmadan dolayı yapıda ilk mafsallaşmanın görülmesi ötelenmiştir. “knee” elemanın sistem üzerinde yerleştirildiği “x” mesafesinin değişimi ile seçilen kesitlerdeki burkulma ve plastik mafsal oluşumu değişmektedir. Sistemden beklediğimiz gibi plastik mafsal oluşumları çerçeve üzerinden bizim tayin ettiğimiz kesitlerde oluşmuştur. Yapı sistemindeki hasar durumu çok azdır. Sistem üzerine koyduğumuz “knee” elemanlar tamamen plastikleşmişlerdir.

Dört doğrultulu değiştirilebilir yerleştirilmiş dışmerkez çaprazlı sistem (FULLKNEE) uygulandığında model betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi 4.3 kat artmıştır. Her iki durum için kullanılan kesitlerdeki farklılık yatay yük taşıma kapasitesinde bir farklılık meydana getirmemiştir. Fakat diğer durumlara göre burkulmadan dolayı yapıda ilk mafsallaşmanın görülmesi ötelenmiştir. “knee” elemanın sistem üzerinde yerleştirildiği “x” mesafesinin değişimi ile seçilen kesitlerdeki burkulma ve plastik mafsal oluşumu değişmektedir. Sistemden beklediğimiz gibi plastik mafsal oluşumları çerçeve üzerinden bizim tayin ettiğimiz kesitlerde oluşmuştur. Yapı sistemindeki hasar durumu çok azdır. Sistem üzerine koyduğumuz “knee” elemanlar tamamen plastikleşmişlerdir.

Bu analizler ölçekli numune üzerinde yapıldığından gerçek boyut analizlerinde görebileceğimiz “x” mesafesinin değişimi nedeni ile sistemin yatay yük taşıma kapasitesinde daha belirgin olacak değişimler görülmemiştir.

Çelik çapraz sisteminin içerisine yerleştirildiği betonarme sistemin oluşan kuvvet çiftini karşılayacak dayanım ve dönme kapasitesine sahip olması tasarımı yapılan güçlendirmenin etkinliği açısından çok önemlidir. Zayıf betonarme çerçeveler, yetersiz bindirme boyları sebebi ile ne yazık ki özellikle de çekme çubuğu olarak güvenilir taşıyıcı sistemler değildir.

Çelik çapraz sisteminin betonarme çerçeveye yük aktarışının sağlanması için gerekli tasarımın yapılmasındaki zorluklardır. Bu konudaki zorluk, lokal olarak yatay yükler altında zorlanmakta olan birleşim bölgesine, çelik çapraz bağlantılarından dolayı etki eden ek dış kuvvetlerdir.

#### 4. KAYNAKLAR

Shahin, T., Sadek, A.W. “**Seismic upgrading of gravity designed concrete frames using steel bracing**”, 11th European Conference on Earthquake Engineering, 1998, Rotterdam

Bai, J.W., “**Seismic retrofit for reinforced concrete building structures**”, **Final Report for Consequence-Based Engineering Institute**, 2003, Texas

ASCE (2000), “**Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, (FEMA 356)**,” prepared by American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Badoux, M. and Jirsa, J.O. (1990), “**Steel Bracing of RC Frame for Seismic Retrofitting**,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, No. 1, pp. 55-74.

Bush, T.D., Jones, E.A., and Jirsa, J.O. (1991), “**Behavior of RC Frame Strengthened Using Structural Steel Bracing**,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 1115-1126.

Elnashai, A.S. and Salama, A.I. (1992), “**Selective Repair and Retrofitting Techniques for RC Structures in Seismic Regions**,” *Research Report ESEE/92-2*, Engineering Seismology and Earthquake Engineering Section, Imperial College, London.

Goel, S.C., Masri, A.C. (1996), “**Seismic Strengthening of an RC Slab-Column Frames with Ductile Steel Bracing**,” *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 506.

Pincheira, J.A. and Jirsa, J.O. (1995), “**Seismic Response of RC Frames Retrofitted with Steel Braces or Walls**,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 8, pp. 1225-1235.

Thermou, G. and Elnashai, A.S. (2002), “**Performance Parameters and Criteria for Assessment and Rehabilitation**,” *Seismic Performance Evaluation and Retrofit of Structures (SPEAR)*, European Earthquake Engineering Research Network Report, Imperial College, UK.

Massood Mofid and Peyman Khosravi “**Non-linear analysis of disposable knee bracing**,” *Computers & Structures, Volume 75, Issue 1, 1 March 2000, Pages 65-72*

Mahmoud R. Maheri and R. Akbari “**Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings**” *Engineering Structures, Volume 25, Issue 12, October 2003, Pages 1505-1513*

M. R. Maheri, R. Kousari and M. Razazan “**Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames**” *Engineering Structures, Volume 25, Issue 13, November 2003, Pages 1697-1705*

M. R. Maheri and A. Sahebi “**Use of steel bracing in reinforced concrete frames**” *Engineering Structures, Volume 19, Issue 12, December 1997, Pages 1018-1024*

A. Ghobarah and H. Abou Elfath “**Rehabilitation of a reinforced concrete frame using eccentric steel bracing**” *Engineering Structures, Volume 23, Issue 7, July 2001, Pages 745-755*

# KAYNAKLI YAPILARDA YORULMA DAVRANIŞININ EUROCODE 3 İLE İNCELENMESİ

Mutlu Seçer

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Tınaztepe Kampüsü 35160 Buca – İzmir

## Özet

Bu çalışmada kaynaklı birleşimlerin yorulma davranışlarının incelenmesi için geliştirilmiş çeşitli yöntemler sunulmuş ve Eurocode 3 yönetmeliğinde verilen yorulma davranışı ve yorulma ömrünün tespiti için kullanılan ifadeler irdelenmiştir. Sayısal uygulama olarak kaynaklı birleşimin kullanıldığı kren kirişi incelenmiş ve kaynaklı birleşim detayları için yıllık hasar miktarı ile kaynaklı birleşimin yorulma ömrü Eurocode 3 yönetmeliğinde öngörülen yöntem ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yorulma, Kaynaklı Yapılar, Eurocode 3

## 1. Giriş

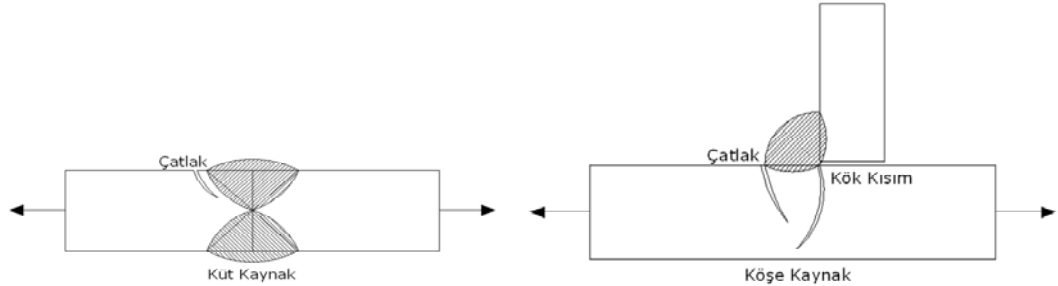
Malzeme yavaşça artan yükler altında incelendiği zaman, belirli bir sınır gerilme değerinde son dayanımına ulaşıp kopmaktadır. Elde edilen bu gerilme değerine malzemenin statik dayanımı adı verilir. Ancak aynı malzemeyi, yükü belirli iki sınır arasında tutarak, periyodik olarak yeter derecede değiştirmek suretiyle bu sınırların çok altında da göçmesini sağlamak mümkündür. Yükleme ve boşaltmanın periyodik olarak çok sayıda tekrarı sonucunda cisim içinde oluşan karmaşık termik ve mekanik olaylar nedeniyle, cisimde çözülme, yıpranma ve ayrışmalar meydana gelir. Bu olayın nedeni yükün şiddetinden çok onun, periyodik olarak uzun bir süre değişmesidir. İç mekanizması çok karışık olan ve malzemenin tekrarlı yükler etkisi altında hasar ve göçmesi ile sonuçlanan bu olaya kısaca malzemenin yorulması denir [1].

Yorulma davranışının gözlemlendiği malzemelerde göçme genel olarak malzemenin maksimum dayanımına erişmesine fırsat vermeden gerçekleşmektedir. Özellikle metalik malzemelerin göçmesinin en önde gelen etkeni olması nedeniyle yorulma olayı oldukça önemlidir [2]. Yorulma olayı malzemede önemli bir plastik şekil değişimi yapmadığından ve uyarı vermeden elastik limitin altındaki gerilmelerde ani olarak gerçekleşebilmesi nedeniyle oldukça tehlikelidir. Yorulma kopması olarak adlandırılan bu gevrek kırılma olayına miller, bağlantı çubukları, dişliler gibi hareketli makine parçaları ile çelik köprüler, krenler, uçak kanatları gibi dinamik tesirlere maruz yapı sistemlerinde rastlanabilir [3]. Yorulma olayını, cismin iç bünyesiyle ilgili fizik yasalarıyla açıklamak olanağı bulunmadığından, olaya olgusal açıdan bakmak gereklidir.

## 2. Kaynaklı Yapılarda Yorulma Davranışı

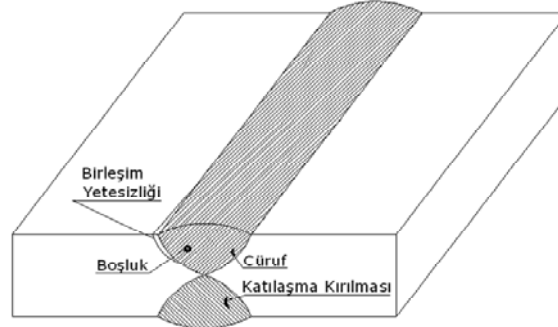
Kaynaklı yapılarda yorulma nedeni ile oluşan çatlaklar genel olarak diğer detaylardan ziyade kaynaklı birleşimlerden başlar [4]. Bunun temel nedeni olarak; birçok kaynak yönteminde ortaya çıkan metalürjik süreksizlikler gösterilebilir.

Çatlaklar, doğal yapıları gereği gelişerek diğer bir deyişle ilerleyerek büyürler. Kaynaklı birleşimler için bir diğer önemli faktör, çelik yapılarda kullanılan kaynak yüzeylerinin genelde pürüzlü olmasıdır. Şekil 1.'de gösterildiği gibi küt kaynakların kenar kısımları ile köşe kaynakların kök kısımlarına yakın kısımlarda bölgesel gerilme yığılmalarının olduğu bilinmektedir [5]. Bu noktalara yakın yerlerde olan küçük süreksizlikler büyük gerilme altında oluşmakta ve bu sayede çatlakların büyümesi hız kazanmaktadır.



Şekil 1. Kaynaklı Birleşimler ve Çatlak Oluşumu

Kaynaklı birleşimlerde yorulma davranışını etkileyen birçok parametre mevcuttur. Malzeme boyutu, gerilme yığılmaları, yüzey işleme kalitesi, yüzey durumu, korozyon, sıcaklık, kesit değişiklikleri vb. gibi genel yorulma davranışını etkileyen faktörlerin yanında kaynaklı birleşimlerin yorulma davranışına etki eden birtakım özel etkenler de bulunmaktadır. Şekil 2.'de bir kısmı gösterilen bu etkenler; hava kabarcıkları, gözenek, cüruf, çentik gibi hacimsel kaynak süreksizlikleri ve boyut, şekil, açısız, aksel kaynak hataları, aşırı kaynak takviyesi gibi geometrik kaynak süreksizlikleri olarak ifade edilebilir. Bunların yanında kaynak yorulma dayanımına; kaynaklanan elemanların kalınlıkları, kaynaklanan elemanlardaki dış yük tesirlerden bağımsız olan artık gerilmelerin bulunması, kaynak işlemi sonrasında yapılan ısıtma işlemleri gibi çok sayıda ve çeşitte farklı faktör de etki etmektedir [5].



Şekil 2. Kaynak Süreksizlikleri

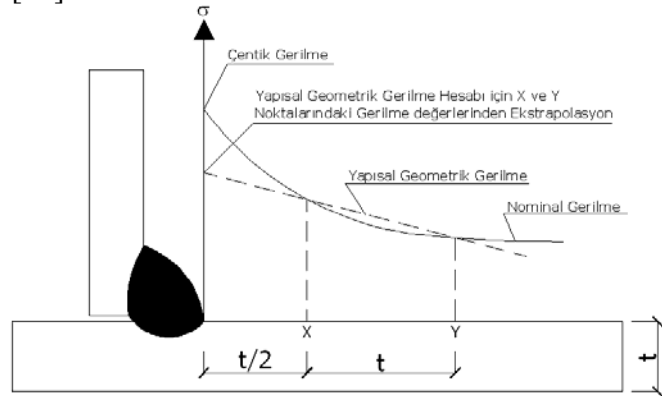
### 3. Kaynaklı Yapılarda Yorulma Davranışının İncelenmesi için Geliştirilen Yöntemler

Kaynaklı çelik yapıların statik yükleme durumu için yapılan hesaplarda, malzemenin akma dayanımı çekme testlerinden elde edilir ve yapı elemanları için öngörülen emniyet faktörleri de dikkate alınarak bu değerlere göre boyutlandırılırlar. Belirli bir sayıda tekrarlı yük etkisi altındaki yapılar ise yorulma hesapları ile incelenmeli ve dinamik tesirlerin olduğu durumlar için yorulma davranışının mutlaka dikkate alınması gerekir. Yorulma davranışının oldukça pratik bir biçimde incelenmesine imkan veren yöntemlerden en önemlisi S-N eğrileri olup, bu eğriler

uygulanan tekrarlı yük döngüsü sayısı (N) ile gerilme (S) arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir [6]. S-N eğrileri kullanarak farklı gerilme yöntemleri ile kaynaklı elemanların yorulma ömürlerini hesaplamak mümkündür. Bu yöntemlerden en sık kullanım alanı bulanlar; nominal gerilme yöntemi, yapısal geometrik gerilme yöntemi, çentik gerilme yöntemidir [7].

Nominal gerilme yöntemi, çatlak oluşma potansiyeli bulunan bölge civarındaki gerilme yığılmalarını dikkate almadan temel olarak mukavemet prensiplerine dayanılarak hesaplanan gerilmedir [8]. Nominal gerilme yönteminde; yorulma davranışı incelenecek olan kaynaklı birleşim için mukavemet temeline dayanan basit kiriş modelleri veya genel sonlu eleman modelleri kullanılabilir. Nominal gerilme yönteminde, kesitteki gerilme dağılımının kesin olmaması ve gerilme yığılmalarının etkisinin tam olarak yöntemin içerisinde dikkate alınmaması yöntemin dezavantajlarından biridir.

Yapısal geometrik gerilme yönteminde, nominal gerilme ile birlikte birleşim detayının geometrisinden kaynaklanan gerilmeler hesaba dahil edilirken kaynak süreksizliklerinden ve kaynak geometrisinden kaynaklanan gerilme etkileri dikkate alınmamaktadır [9]. Yapısal geometrik gerilme yöntemi ilk olarak kıyı yapılarındaki yorulma davranışının incelenmesi için geliştirilmiştir [10]. Yapısal geometrik gerilme yöntemi ile gerilme kaynak bölgesinden belirli bir uzaklıktan ekstrapolasyon yapılarak elde edilir. Ekstrapolasyon işlemi genelde Şekil 3.'de gösterildiği gibi kaynak uç kısmından  $t/2$  ve  $3t/2$  mesafelerindeki referans gerilme değerleri kullanılarak yapılır [11].



Şekil 3. Kaynaklı Birleşimlerin Yorulma Hesaplarında Kullanılan Gerilmeler

Çentik gerilme yönteminde ise, yapıya etkileyen dış tesirlerden dolayı yapı elemanında oluşan gerilme ile birleşimin kaynaklı yapılması nedeniyle oluşan gerilmelerin birlikte dikkate alınması ile elde edilen toplam gerilme kullanılır [12]. Çentik gerilme yöntemi ile hesap yapabilmek için kaynak civarındaki gerilme dağılımının oldukça iyi bilinmesini gereklidir. Kaynak bölgesi civarındaki oluşan gerilme dağılımının hesaplanmasında sonlu elemanlar yöntemi olarak iki boyutlu kabuk veya üç boyutlu katı elemanlar kullanılabilir. Sonlu elemanlar ile yapılan hesaplarda kaynak bölgesi oldukça hassas alt bölgelere ayrılarak incelenmelidir. Ayrıca, bu yöntemin nominal ve yapısal geometrik gerilme yöntemlerine göre en önemli avantajı kaynak dikişinin lokal geometrisinin etkisinin dikkate alınabilmesidir. Ayrıca, bu yöntemde kaynak kalınlığı, kaynak yarıçapı gibi faktörler de dikkate alınabilir. Ancak yapılan sonlu elemanlar hesapları sırasında küçük

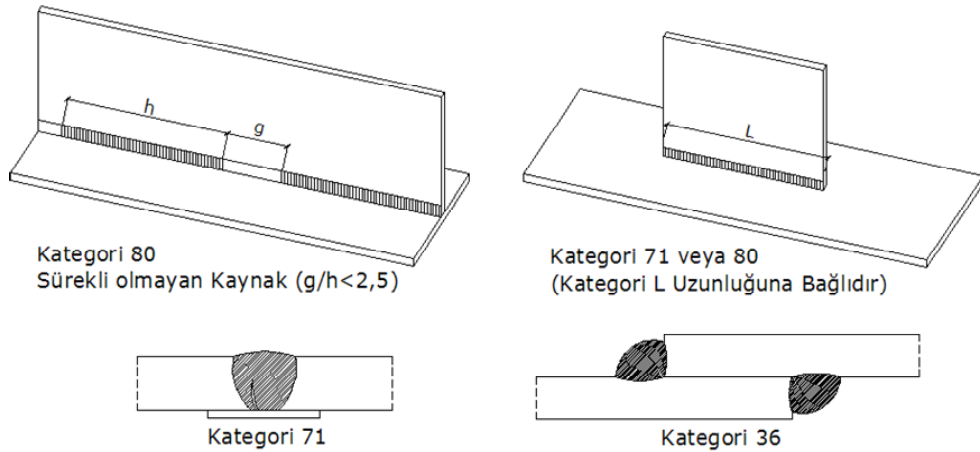


yarıçaplar ve eğimli yüzeylerin bulunduğu bölgelerin sonlu elemanlar çözümlerinde hassas alt bölgelere ayırma işlemi yapılmaması durumunda hatalı sonuçlar elde edilebilir. Bu yöntemin en önemli avantajı olan gerilme değerlerinin oldukça hassas elde edilmesinden yararlanılmak istenirse, kaynak profili de mutlaka hassas bir şekilde çeşitli kalite kontrol yöntemleri ile kontrol edilmelidir. Bu kalite kontrol işlemleri genelde yüksek maliyetli ve zahmetli olduğundan uygulamada diğer yöntemler daha sık tercih edilmektedir.

#### 4. Kaynaklı Yapıların Eurocode 3'e göre Yorulma Hesabı

Kaynaklı yapıların yorulma limitine göre boyutlandırılmasında amaç; belirli bir olasılık dahilinde boyutlandırma ömrü esnasında yorulmadan kaynaklanan göçme veya yorulmadan kaynaklanan hasar onarımı gerektirmemesinin sağlanmasıdır. Bu konudaki güvenlik seviyesi uygun kısmi güvenlik faktörlerinin hesaplarda kullanılması ile elde edilir. Kaldırma aparatları, kren yükleri, titreşimden ötürü oluşan tekrarlı gerilme durumları, rüzgar sebepli titreşim, insan veya araç sebebiyle oluşan titreşimler ve benzeri titreşimin yapı davranışa tesir ettiği durumlar dışında bina türü yapılar için yorulma hesabının yapılması zorunlu değildir [13].

Bu çalışmada, kaynaklı birleşimlerin yorulma ömrü hesaplarında oldukça yaygın olarak kullanılan ve Eurocode 3 yorulma hesaplarının da temelini oluşturan nominal gerilme yöntemi kullanılmıştır. Eurocode 3 yönetmeliğinde yorulma hesaplarının yapılması amacıyla uygulamada sık rastlanan bazı birleşim tipleri için çeşitli birleşim detayı yorulma kategorileri tespit edilmiştir [13]. Birleşim detayı yorulma kategorileri Eurocode yönetmeliğinde yorulma bölümünün son kısmında birleşimler için hazırlanmış, detaylı açıklamalar ile birlikte tablolar halinde verilmiş ve bu çalışmada temel birkaç birleşim detayı için Şekil 4.'de sunulmuştur.

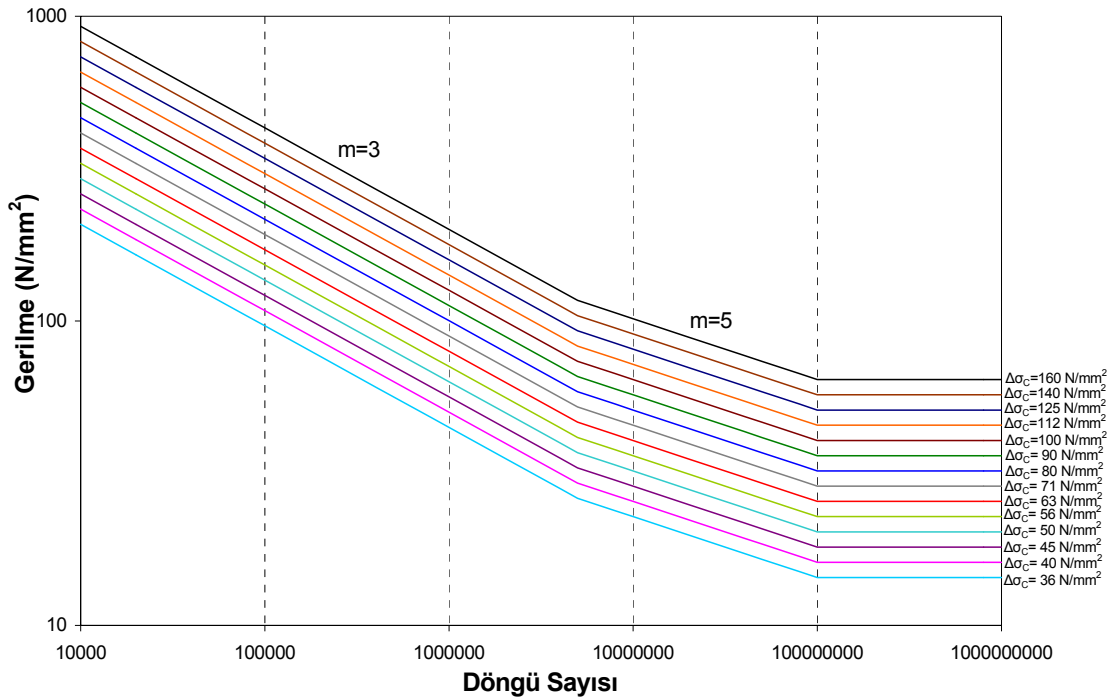


Şekil 4. Bazı Birleşim Tipleri için Yorulma Davranışı Kaynak Detay Kategorileri

Eurocode 3'de verilen birleşim detayı yorulma kategorisi dışında kalan bir birleşim şeklinin yorulma hesabı yapılması gerektiğinde ise gerilme hesabı için yapısal geometrik gerilme yöntemi kullanılmalıdır. Maksimum geometrik gerilme kaynak çevresindeki birçok bölgenin ve gerilme yığılması oluşabilecek bölgelerin incelenmesi ile ancak bulunabilir. Eurocode 3 yönetmeliğinde verilen ifadelerde nominal gerilmeler yerine yapısal geometrik gerilme yöntemi ile elde edilen

gerilmeler konarak yorulma hesabı aynı şekilde yapılabilir [13]. Bunun yanında, konstrüksiyonda bulunması düşünülen süreksizlik ve delikler dışındaki geometrik süreksizlikler ve deliklerin her biri için ayrı ayrı özel analizler yapılarak incelenmeli veya gerilme konsantrasyon faktörleri hesaplarında dikkate alınmalıdır.

Yorulma dayanımının incelenmesi için Eurocode 3 yönetmeliğinde her biri farklı kategoriye temsil eden  $\log(\Delta\sigma) - \log(N)$  eğrileri tanımlanmaktadır [13]. Her kategori referans değeri temsil eden 2 milyon yorulma döngüsüne ( $N=2 \times 10^6$ ) karşılık gelen  $\Delta\sigma_c$  ifadeleri ile temsil edilmektedir. Yorulma davranışının incelenmesi amacıyla geliştirilmiş olan ve çeşitli gerilme yöntemlerinin kullanıldığı S-N eğrileri Şekil 5.'de verilmiştir.



Şekil 5. Kaynaklı Birleşimler için Gerilme ile Döngü Sayısı İlişkisi

Yorulma hesaplarının Eurocode 3'e göre yapılabilmesi için iki kavramın daha tanımlanması gerekmektedir. Bunlardan birincisi sabit yorulma limiti büyüklüğü,  $\Delta\sigma_D$  olup yorulma analizinin yapılması gereken gerilme aralığının sınırlarını göstermektedir. Sabit genlikte yorulma için döngü sayısı limiti  $N_D = 5 \times 10^6$ 'dır. Bir diğeri önemli kavram ise, kesme sınır değeridir.  $\Delta\sigma_L$  tasarım spektrumundaki gerilme aralığı için alt sınır olup toplam zarara katkıda bulunmayan kısmı temsil eder. Bu değere karşılık gelen döngü sayısı  $N_L = 10^8$ 'dir. Kesme sınır değerinin ileride olmasının nedeni değişken genlikte yükleme olması durumunda yorulma limitinin altındaki gerilmeler ile zarara sebep olabileceği ihtimalinin bulunmasıdır. Ayrıca, daha büyük genlikteki döngülerin çatlakın gelişimine yardımcı olacağı unutulmamalıdır. Nominal gerilme için yorulma dayanımı eğrileri aşağıdaki gibi tanımlanabilir [13]:

$$\log N = \log a - m \log(\Delta\sigma_R) \quad (1)$$

Burada;  $\Delta\sigma_R$  yorulma dayanımını, N gerilme döngüsü sayısını, m yorulma eğrisi eğimini vermektedir. Denklem (1)'de bulunan loga ifadesi ise sabit bir değer olup ilgili eğim değerlerine göre değişmekte ve Tablo 1.'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Yorulma Dayanımı Eğrileri için Nümerik Değerler

Detay Kategorisi	loga N < 10 <sup>8</sup>		Sabit Yorulma Limiti için Gerilme Aralığı	Kesme Limiti için Gerilme Aralığı
	N ≤ 5*10 <sup>6</sup> (m=3)	N > 5*10 <sup>6</sup> (m=5)		
$\Delta\sigma_C$ (N/mm <sup>2</sup> )			$\Delta\sigma_D$ (N/mm <sup>2</sup> ) N= 5*10 <sup>6</sup>	$\Delta\sigma_L$ (N/mm <sup>2</sup> ) N= 10 <sup>8</sup>
160	12,901	17,036	117	64
140	17,751	16,786	104	57
125	12,601	16,536	93	51
112	12,451	16,286	83	45
100	12,301	16,036	74	40
90	12,151	15,786	66	36
80	12,001	15,536	59	32
71	11,851	15,286	52	29
63	11,701	15,036	46	26
56	11,551	14,786	41	23
50	11,401	14,536	37	20
45	11,251	14,286	33	18
40	11,101	14,036	29	16
36	10,951	13,786	26	14

Gerilme yönü, artık gerilme miktarı ve bazı hallerde kaynak işlemi ve kaynak sonrası iyileştirme yöntemleri yorulma davranışını etkilemektedir.

Eurocode 3 yönetmeliğinin yorulma hesabı kısmına göre; kaynaklı birleşimin aşağıda verilen denklem (2-4) koşullarından herhangi birini sağlaması durumunda yorulma tahkiki yapmaya gerek kalmamaktadır [13]. Denklem (2) ile en büyük nominal gerilme aralığı  $\Delta\sigma$ , denklem (3) ile ise toplam döngü sayısı N için sınırlar belirtilmiştir. Sabit genlikli eşdeğer yorulma limiti  $\Delta\sigma_D$  verilen bir detay için ise en büyük gerilme aralığı  $\Delta\sigma$  denklem (4) sınırı ile verilmiştir.

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma \leq 26/\gamma_{Mf} \quad \text{N/mm}^2 \quad (2)$$

$$N \leq 2 \times 10^6 \left[ \frac{36/\gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}} \right]^3 \quad (3)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma \leq \Delta\sigma/\gamma_{Mf} \quad (4)$$

Burada;  $\Delta\sigma_{E,2}$  denk sabit genlikli gerilme aralığını (N/mm<sup>2</sup>),  $\gamma_{Ff}$  uygulanan yük seviyeleri ile yüklerin oluşturduğu gerilmeler için öngörölmüş kısmi yük güvenlik faktörünü,  $\gamma_{Mf}$  ise yorulma dayanımı için verilmiş olan ve Tablo 2.'de sunulan kısmi dayanım güvenlik faktörünü ifade etmektedir.

Tablo 2. Yorulma Dayanımı için Kısmi Dayanım Güvenlik Faktörü  $\gamma_{Mf}$

Denetim ve Ulaşılabilirlik	Göçme Açısından Güvenli Elemanlar	Göçme Açısından Güvenli Olmayan Elemanlar
Ulaşılabilir Birleşim Detayları	1,00	1,25
Ulaşılabilirliği Zayıf Birleşim Detayları	1,15	1,35

Diğer durumlarda yorulma belirleme kriteri olarak sabit gerilme durumu için genel prensibi denklem (5) ile verilen hesap yapılmalıdır.

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma = \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf} \quad (5)$$

Denklem (5) ifadesinde;  $\Delta\sigma$  nominal gerilme aralığını ve  $\Delta\sigma_R$  ilgili detay için toplam N gerilme döngüsü için gerekli yorulma dayanımını ifade etmektedir.

Değişken genlikli yükleme durumları için yorulma hesabı Palgren – Miner kuralına göre toplam hasar üzerinden yapılır [14]. Eğer değişken gerilmenin sebep olduğu maksimum gerilme aralığı sabit yorulma genliğinden daha yüksek olursa kümülatif hasar incelemesi yapılması gerekmektedir [14].

$$D_d \leq 1 \quad (6)$$

$$D_d = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (7)$$

Burada;  $n_i$  tasarım ömrü içerisindeki  $\Delta\sigma_i$  gerilme aralığındaki döngü sayısını,  $N_i$  ise bahsedilen kaynak detayı için  $\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} \Delta\sigma_i$  gerilme aralığındaki ömrü için döngü sayısını gösterir. Kümülatif zarar hesapları [13];

- i- Tek sabit eğimli (m=3) yorulma dayanımı eğrisi,
- ii- Sabit yorulma genliğinde eğimi değişen çift eğim sabitli (m=3 ve m=5) yorulma dayanımı eğrileri,
- iii- Kesim yeri  $N_L = 1000$  milyon döngü olan çift eğim sabitli (m=3 ve m=5) yorulma dayanımı eğrileri,
- iv- Kesim yeri  $N_L = 100$  milyon döngü olan tek eğim sabitli (m=5) yorulma dayanımı eğrilerinden birisi kullanılarak yapılır.

Bu ifadelerden en geniş kullanım alanı bulan ve aynı zamanda Eurocode 3 yorulma hesapları için de verilen yöntem iii. maddesinde gösterilen ve sabit genlikli yorulma limiti  $\Delta\sigma_D = 5$  milyon döngü olan yöntemdir [13]. Burada;

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \text{ ise denklem (8),}$$

$$N_i = 5 \times 10^6 \left[ \frac{(\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf})}{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i} \right]^3 \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} > \gamma_{Ff} \Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf} \text{ ise denklem (9),}$$

$$N_i = 5 \times 10^6 \left[ \frac{(\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf})}{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i} \right]^5 \quad (9)$$

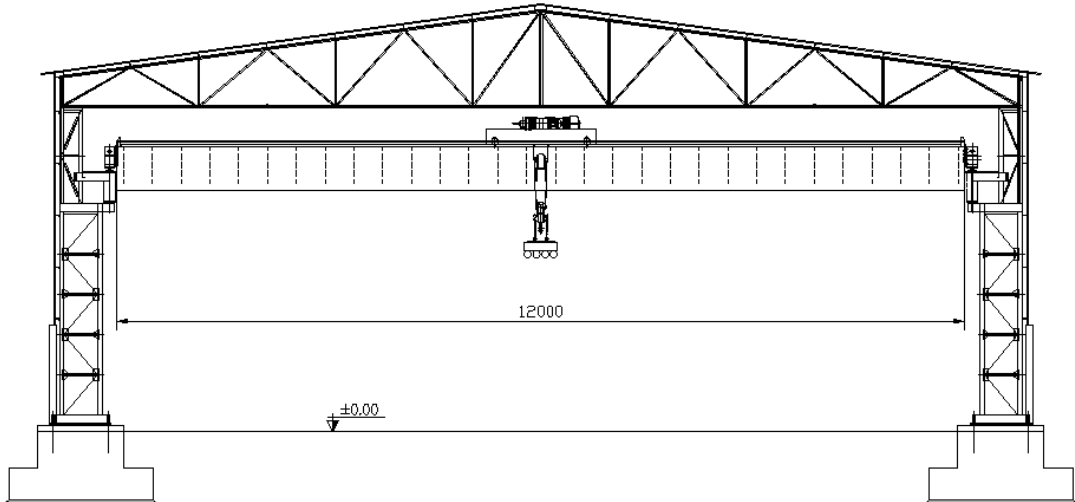
$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i < \Delta\sigma_L / \gamma_{Mf}$  ise denklem (10),

$$N_i = \infty \quad (10)$$

döngü sayısı  $N_i$  hesaplarında kullanılır. Denklem (10)'dan anlaşılacağı üzere kesme limiti altındaki gerilme değerleri için yorulma davranışı ihmal edilmektedir.

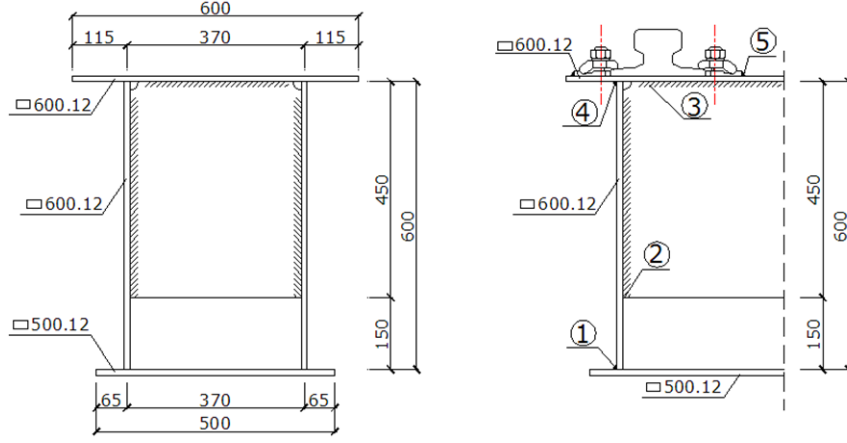
## 5. Sayısal Uygulama

Sayısal uygulama kısmında, kaynaklı yapılarda yorulma davranışını sayısal olarak incelemek amacıyla açıklığı 12,00 m. olan sandık kesitli bir kren kirişi seçilmiş ve Şekil 6.'da sunulmuştur. Kren arabası iki sandık kesit ile taşınan raylar üzerinde çalışmaktadır. Sandık kesitler, TS4561'de verilen en kesit koşullarını sağlayacak şekilde seçilmiş ve ayrıca diyafram görevi gören rijitleştirici levhalar kirişin uzunluğu boyunca ara kısımlara yerleştirilmiştir [15]. Sandık kesitte kullanılan tüm kaynakların kaynak kalınlıkları 5 mm. olup, yorulma davranışı açısından incelenecek olan kaynaklar Şekil 7.'de kesit üzerinde numaralandırılarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Kren Kirişi

Kren'in yorulma davranışını incelemek amacıyla krenin yıllık kullanımı verilmiştir. Buna göre kren, günde 30 sefer yapmakta ve yıl içerisinde toplam 180 gün kullanılmaktadır. Kren arabasının boş ağırlığı 30 kN olarak seçilmiştir. Gidiş yönündeki yük taşıma işlemi esnasındaki ağırlığı kren arabası ile üzerindeki zati yükler ve dolayısıyla oluşan dinamik etkiler de dikkate alındığında toplam ağırlık yaklaşık 220 kN olarak hesaplanmıştır. Kren, günde yaptığı 30 dönüş seferinden yarısını boş ve kalan diğer yarısını ise toplam ağırlık ve dinamik tesirler de dahil olarak 140 kN olarak tamamlamaktadır.



Şekil 7. Kren Kirişi ve Kaynak Detayları

Kaynakların yorulma davranışının incelenmesi amacıyla sandık kesit üzerinde gösterilmiş olan kaynaklar Eurocode 3'e göre yorulma detay kategorilerine ayrılmış ve kaynak numaralarına göre Tablo 3.'de gösterilmiştir. Referans yorulma döngüsüne ( $N=2 \times 10^6$ ) karşılık gelen referans yorulma gerilmesi  $\Delta\sigma_c$ , sabit yorulma limiti büyüklüğü  $\Delta\sigma_D$ , kesme sınır gerilme değeri  $\Delta\sigma_L$  ve diğer bazı işlemler için kullanılacak çeşitli değerler bu kategoriler dikkate alınarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Sayısal Uygulamada Seçilen Kaynakların Eurocode 3 Kaynak Kategorisi

Birleşim Kaynak Numarası	Eurocode 3 Kaynak Kategorisi
1	EC3 Kategori 100
2	EC3 Kategori 80
3	EC3 Kategori 80
4	EC3 Kategori 112
5	EC3 Kategori 80

Kaynaklı birleşimin  $\Delta\sigma_i$  gerilme değerleri temel mukavemet prensipleri dikkate alınarak hesaplanmıştır ve yorulma davranışı incelenecek olan kaynakların gerilme değerleri aşağıda sunulmuştur:

$$\{\Delta\sigma_{i,220}\} = \{72,60 \quad 38,35 \quad 64,38 \quad 64,38 \quad 67,12\} \text{MPa}$$

Kaynak kategorisi ve karakteristik özelliklerine göre Eurocode 3'de verilen kategoriler kullanılarak elde edilen gerilme değerleri aşağıda verilmiştir:

$$\{\Delta\sigma_C\} = \{100 \quad 80 \quad 80 \quad 112 \quad 80\} \text{MPa}$$

$$\{\Delta\sigma_D\} = \{74 \quad 59 \quad 59 \quad 83 \quad 59\} \text{MPa}$$

$$\{\Delta\sigma_L\} = \{40 \quad 32 \quad 32 \quad 45 \quad 32\} \text{MPa}$$

Yorulma ömrü incelenen kaynaklar için yorulmadan kaynaklanan göçmenin oluşabilmesi için gerekli olan toplam gerilme döngüsü sayısı denklem (8-10) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\{N_{i,220}(\Delta\sigma_i, \Delta\sigma_D, \Delta\sigma_L)\} = \{2,152 \quad 9,547 \quad 1,563 \quad 4,351 \quad 1,382\} * 10^6$$

Kren, gidiş esnasında günde 30 kez ve yıl içerisinde 180 gün kullanılmaktadır.

$$\{n_{220}\} = \{5400 \quad 5400 \quad 5400 \quad 5400 \quad 5400\}$$

Yorulma davranışı incelenen kaynaklı birleşimlerin yıllık hasar miktarı denklem (7) ile hesaplanmıştır.

$$\{D_{220}\} = \{2,509 \quad 0,566 \quad 3,434 \quad 1,241 \quad 3,907\} * 10^{-3}$$

Kren, dönüş seferlerinde günde 30 kez ve yıl içerisinde toplam 180 gün kullanılmaktadır. Dönüş seferlerinin yarısını boş yapmakta ve kren boş olarak dönerken gidiş seferlerindeki gerilmelerin 3/22 katı kadar kren kirişi üzerinde bir gerilme yaratmaktadır. Bu gerilme değeri kesme limiti olarak tanımlanan limitin yorulma dayanımı güvenlik faktörüne bölümü ile elde edilen  $\Delta\sigma_L/\gamma_{Mf}$  değerden küçük olduğundan yorulma nedeni ile oluşturacağı hasar ihmal edilebilir. Ancak dönüş seferlerinin kalan diğer yarısını toplam ağırlık ve dinamik tesirler de dahil olarak 140 kN ile tamamladığı durumlar için hesap yapılmalıdır.

$$\{\Delta\sigma_{i,140}\} = \{46,20 \quad 24,40 \quad 40,97 \quad 40,97 \quad 42,71\} \text{MPa}$$

Yorulma ömrü incelenen kaynaklar için yorulmadan kaynaklanan göçmenin oluşabilmesi için gerekli olan toplam gerilme döngüsü sayısı denklem (8-10) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\{N_{i,140}(\Delta\sigma_i, \Delta\sigma_D, \Delta\sigma_L)\} = \{1,175 \quad 9,214 \quad 0,690 \quad 3,805 \quad 0,561\} * 10^7$$

Kren, dönüş seferlerinde günde 15 kez, yıl içerisinde 180 gün kullanılmaktadır.

$$\{n_{140}\} = \{2700 \quad 2700 \quad 2700 \quad 2700 \quad 2700\}$$

Yorulma davranışı incelenen kaynaklı birleşimlerin yıllık hasar miktarı denklem (7) ile hesaplanmıştır.

$$\{D_{140}\} = \{2,298 \quad 0,293 \quad 3,911 \quad 0,710 \quad 4,815\} * 10^{-4}$$

Değişken genlikli yükleme durumları için yorulma hesabı Palgren – Miner kuralına göre toplam hasar üzerinden yapılabilir.

$$\{D_{Sistem}\} = \{D_{220}\} + \{D_{140}\} = \{2,739 \quad 0,595 \quad 3,825 \quad 1,312 \quad 4,389\} * 10^{-4}$$

Toplam hasarın bilinmesi ile incelenen tüm kaynak detayları için yorulma ömrü aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\{\text{Kaynak Detayları Yorulma Ömrü}\} = \{365,12 \quad 1679,83 \quad 261,43 \quad 762,20 \quad 227,87\}$$

## 6. Sonuç

Bu çalışmada; kaynaklı yapıların yorulma davranışı, yorulma davranışını inceleme yöntemleri ve kaynaklı birleşimlerin yorulma davranışı hesapları Eurocode 3 yönetmeliğine göre incelenmiştir. Sayısal uygulama kısmında ise kaynaklı birleşimin kullanıldığı kren kirişi birleşim detayları için yıllık hasar miktarı ile kaynaklı birleşimin yorulma ömrü Eurocode 3 yönetmeliğine hesaplanmıştır. Yapılan yorulma hesapları sonucu; sayısal uygulamada belirtilen kullanım durumuna göre incelenen tüm kaynaklarda oluşacak hasar miktarları ve yorulma davranışından dolayı hangi kaynağın muhtemelen en çok etkileneceği bu şekilde tespit edilmiş ve birleşimin kaynak detaylarının yorulma ömrü belirlenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Baradan, B.,Yapı Malzemesi 1,D.E.Ü. Müh. Fak. Matbaası, İzmir,1994.
- [2] İnan, M., Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ Vakfı, Yayın No.25, İstanbul,1988.
- [3] Kayan, İ., Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ Vakfı, 1992.
- [4] Poutiainen, I., Marquis, G., A Fatigue Assessment Method Based on Weld Stress, International Journal of Fatigue, 28, 1037–1046, 2006.
- [5] Xiao, Z.G., Yamada, K., A Method of Determining Geometric Stress for Fatigue Strength, International Journal of Fatigue, 26, 1277–1293, 2004.
- [6] Lassen, T., Sorensen, J.D., A Probabilistic Damage Tolerance Concept for Welded Joints Part 2: A Supplement to the Rule Based S–N Approach, Marine Structures 15 (2002) 615–626
- [7] Crupi, G., Crupi, V., Guglielmino, E.,Taylor, D., Fatigue Assessment of Welded Joints using Critical Distance and Other Methods, Engineering Failure Analysis, 12, 129 – 142, 2005.
- [8] Lahti, K.E.,Hanninen, H., Niemi, E., Nominal Stress Range Fatigue of Stainless Steel Fillet Welds — The Effect of Weld Size, Journal of Constructional Steel Research, 54, 161–172, 2000.
- [9] Tovo, R., Lazzarin, P., Relationships Between Local and Structural Stress in the Evaluation of the Weld Toe Stress Distribution, International Journal of Fatigue, 21, 1063–1078, 1999.
- [10] Maddox, S.J., Hot-Spot Stress Design Curves for Fatigue Assessment of Welded Structures, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 12, 2, 2002.
- [11] Wang, X., Sun, H. & Cheng, Z., Methods For Fatigue Assessment of Critical Ship Details, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2004 – 51630, Vancouver, Canada, 2004.
- [12] Taylor, D., Barret, N., Lucano, G., Some New Methods for Predicting Fatigue in Welded Joints, International Journal of Fatigue, 24, 509–518, 2002.
- [13] ENV 1993-1-1, Eurocode 3, Design of Steel Structures: Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings, 1992.
- [14] Svensson T., Johannesson, P., Mare, J., Fatigue Life Prediction Based on Variable Amplitude Tests – Specific Applications, International Journal of Fatigue, 27, 966–973, 2005.
- [15] Çelik Yapıların Plastik Teoriye göre Hesap Kuralları, TS4561, Türk Standartları Enstitüsü, 1985.