

Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

Cem AYDEMİR*

ÖZ

Bu çalışmada, tablalı betonarme iç aks kirişlerinde plastik moment kapasitesinin gerçeğe yakın olarak moment-eğrilik analizi yardımıyla belirlenebilmesi amacıyla bir hesap yöntemi tanıtılmıştır. Deneysel sonuçlarla karşılaştırılan ve gerçekçi malzeme modellerine dayanan hesap yöntemi yardımıyla, sargılı ve sargısız betonun basınç etkisi altında doğrusal olmayan davranışı, çekme donatısındaki pekleşme etkisi, basınç donatılarında burkulma etkisi ve tabla donatılarında değişken birim şekil değiştirme dağılımı göz önüne alınarak, çeşitli tasarım değişkenlerinin kiriş moment kapasitesi üzerine etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İncelemelerde, negatif eğilme etkisindeki tablalı kirişlerin plastik moment kapasitelerinin, dikdörtgen kesit kabulü ya da TS500-2000'e göre belirlenen tablalı kesit varsayımıyla yaklaşık olarak belirlenmesi durumunda, kapasite tasarımı bağlamında güvensiz sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Çalışmada, pratik amaçlar için negatif eğilme etkisinde tablalı kiriş moment kapasitesinin belirlenmesi amacıyla iki basit yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımlar ile belirlenen eğilme momenti kapasiteleri, analitik olarak ve literatürdeki deney sonuçlarından elde edilmiş eğilme momenti kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tablalı kirişler, tabla donatısı, etkili tabla genişliği, moment-eğrilik, pekleşme etkisi, sargılı beton

ABSTRACT

Effect of Slab Reinforcement on Negative Moment Capacity for R/C Beams at Interior Connections

In this study, a procedure to obtain interior R/C T-beam plastic hinge moment capacity, as accurate as possible, from moment curvature analyses is introduced. The procedure which is based on realistic material models and compared with experimental results considers nonlinear behavior of confined and unconfined concrete, steel strain hardening, reinforcement buckling and varying strain distribution of slab reinforcement. Analytical and experimental comparisons show that plastic hinge moment capacities of T-beams in negative bending is almost always underestimated using rectangular section (beam web) assumption or T-beam approach with effective beam width based on TS500-2000. In this

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 03.05.2011 günü ulaşmıştır.
- 31 Mart 2013 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - cemaydemir@aydin.edu.tr

study, two simple approaches have been derived to obtain the plastic hinge moment capacity of R/C T-beams in negative bending in a practical way. Plastic hinge moment capacities of T-beams in negative bending calculated with the proposed equations are compared to the capacity extracted from moment-curvature analyses and experimental results.

Keywords: T-beams, slab reinforcement, effective slab width, moment-curvature, strain hardening, confined concrete

1. GİRİŞ

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikteki kapasite tasarımı gereği, kiriş ve kolonların enine donatı hesabında temel alınacak kesme kuvveti, elemanın uçlarındaki eğilme kapasiteleri temel alınarak belirlenmelidir [1]. Bu nedenle, kiriş tasarım kesme kuvveti ve kuvvetli kolon zayıf kiriş prensibinin sağlandığı birleşimlerde kolon tasarım kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde, kiriş mesnet bölgelerinde oluşabilecek en büyük eğilme momenti kapasitesi olan M_p 'nin mümkün olduğunca gerçeğe yakın belirlenmesi gerekir.

Bilindiği gibi, sünek betonarme yapı elemanlarının yönetmeliklerde tanımlanan taşıma gücü yöntemine göre hesaplanan eğilme momenti taşıma güçleri M_r [2] ve M_n [3], hesaplarda benimsenen basitleştirici kabuller (betondaki sargı etkisinin ihmal, donatı çeliğindeki pekleşme etkisinin ihmal vb.) ve tasarımda kullanılan katsayılar (malzeme katsayıları vb.) gibi nedenlerle plastik moment kapasitesinden (bu çalışmada moment kapasitesi olarak isimlendirilmiştir) küçük olmaktadır. Sözü edilen basitleştirmeler ve tasarım katsayılarının, kiriş moment kapasitesinde neden olacağı artışın belirlenmesine yönelik Ersoy [4] tarafından yapılan çalışmada, moment kapasitesinin çift donatılı dikdörtgen kesit dönüşümüyle belirlenebileceği kabulü ile çeşitli incelemeler yapılmıştır. Bu incelemelerde, taşıma gücü hesaplarında ihmal edilen donatı pekleşmesinin kiriş moment kapasitesini arttırdığı ve tasarım parametrelerinin pekleşme etkisini belirginleştirici şekilde değişimleriyle (çekme donatısı oranının azalması, basınç donatısı oranının artması vb.), moment kapasitesinin M_r taşıma gücü momentine oranının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca Ersoy, basınç donatılı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerde mekanik donatı indeksinin ($\rho \times f_{yk}/f_{ck}$) 0.2 ve altındaki değerleri için, $M_p \approx 1.4M_{yr}$ [4] yaklaşımının moment eğrilik analizi ile elde edilen kiriş moment kapasitesine oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir ($\pm\%15$).

Betonarme kirişlerin mesnet kesitlerinde bir başka ifade ile olası plastik mafsallık bölgelerinde, kiriş kesiti üst bölgesindeki boyuna donatı oranının alt bölgedeki boyuna donatı oranına eşit ya da büyük olacağı kabulüyle, pozitif eğilme etkisinde $\rho'/\rho \geq 1$ olur. Pozitif eğilme etkisinde kiriş mesnet kesitlerinin çift donatılı dikdörtgen kesit varsayımıyla farklı basınç donatısı oranlarına ($\rho'/\rho \geq 1$ olmak üzere) göre yapılacak kesit analizlerinden [4], basınç donatısındaki değişimin kiriş moment kapasitesi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olacağı söylenebilir. Bu durum, pozitif eğilme etkisinde basınca çalışacak tabla donatılarının ihmal edilmesinin moment kapasitesi üzerinde sınırlı miktarda değişime neden olacağını gösterir. Bununla birlikte, betonarme çerçevelerin iç ve dış aks kolon-kiriş birleşimlerinde, döşeme donatısının davranışa etkisinin belirlenmesine yönelik

yapılan deneysel çalışmalar, negatif eğilme etkisinde döşeme donatısının varlığının kiriş moment kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Ma vd. [6] tarafından yapılan ve salt kiriş davranışının incelendiği çalışmada, negatif eğilme altında döşeme donatılarının kiriş moment kapasitesi üzerinde belirgin bir arttırıcı etkisi olduğu, dikdörtgen ve tablalı kirişlerin deneysel ölçümleriyle karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Cheung vd. [6] tarafından iç ve dış aks kolon-kiriş birleşimlerinin incelendiği deneysel çalışmada, negatif eğilme etkisinde, döşeme donatısının kiriş moment kapasitesini ve/veya kolon kesme kuvvetini artan süneklik talebiyle birlikte belirgin derecede etkilediği belirlenmiştir. Çalışmada, iç aks birleşimlerinde, dış aks birleşimlerinden farklı olarak, birleşimde eğilme doğrultusuna dik kirişin davranış üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği ve ayrıca, iki doğrultulu (eğik) yükleme durumunda, tek yönlü yüklemeye kıyasla, dik doğrultudaki kirişlerde meydana gelen rijitlik kaybına bağlı olarak döşeme katkısının azaldığı belirlenmiştir. French and Borojerdi [7] tarafından iç aks kolon kiriş birleşiminin incelendiği deneysel çalışmada, yanal kirişi (eğilme doğrultusuna dik kiriş) arttırılmış burulma rijitliğe sahip birleşimin, artan süneklik talebiyle belirginleşen bir biçimde daha etkili bir döşeme katılımına (negatif eğilmede etkili tabla genişliği) sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, tabla donatılarının kiriş moment kapasitesini artan süneklik talebiyle birlikte önemli derecede etkilediği ve bu etkinin incelenen kirişlerde tabla donatısının ihmal edilerek karakteristik malzeme dayanımlarıyla belirlenen taşıma gücü momentinin (M_n) 1.89~1.91 katı olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Kurose vd. [8] tarafından yapılan deneysel çalışmada, negatif eğilme etkisinde etkili tabla genişliğinin (döşeme üst ve alt donatılarında deneysel olarak belirlenen toplam çekme kuvvetinin, donatı akıyor kabulüyle belirlenen toplam çekme kuvvetine oranı olarak belirlenmiştir) artan süneklik talebiyle büyüdüğü ve iç aks birleşimi deney elemanında kiriş tabla genişliğinin (iç aks birleşimindeki dik kiriş aks açıklığının) %80'ine kadar ulaştığı bildirilmiştir.

Negatif eğilme etkisinde tabla donatılarının kiriş moment kapasitesine katkısının modellenmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Pantazopolous vd. [12] iç aks kolon-kiriş birleşimlerinde eğilme doğrultusuna dik doğrultudaki kirişin rijit olduğu kabulüyle, negatif eğilme etkisinde tabla donatılarındaki doğrusal olmayan şekil değiştirme dağılımının belirlenebilmesi için analitik bir model geliştirmişlerdir. Pantazopolous vd. [12] sözü edilen model yardımıyla deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı analizlere dayanarak, etkili tabla genişliğinin -kiriş etkili derinliğine bağlı biçimde- analitik olarak belirlenebildiği bağıntılar türetmişlerdir. Shahrooz vd. [13] dış aks kolon-kiriş birleşimlerinde, eğilme doğrultusuna dik doğrultudaki kirişin davranış üzerindeki etkilerini gözleterek, tabla donatılarındaki doğrusal olmayan şekil değiştirme dağılımının belirlenebilmesi amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Pantazopolous and Moehle [14, 15] iç aks kolon-kiriş birleşimleri için revize edilmiş bir model ve dış aks birleşimleri için üç boyutlu kiriş modeli geliştirmişlerdir.

Çeşitli tasarım yönetmeliklerinde negatif eğilme etkisinde kiriş moment kapasitesinin belirlenmesinde, tabla donatılarının kiriş moment kapasiteleri üzerindeki arttırıcı etkisinin göz önüne alınması önerilmektedir. Örnek olarak ACI-318'de [16] güçlü kolon zayıf kiriş prensibinin denetiminde, bir döküm birleşimlerde negatif eğilme etkisinde tabla donatılarının kiriş nominal taşıma gücü momentine (M_n) etkisinin yönetmelikçe verilen etkili tabla genişliği esas alınarak belirlenmektedir. ACI-352'de [17], kiriş tasarım kesme kuvvetinin, kuvvetli kolon zayıf kiriş prensibinin kontrolü ve bu kontrolün sağlandığı

birleşimlerde kolon tasarım kesme kuvvetinin belirlenmesinde, kirişin negatif eğilme momenti kapasitesinin tabla donatıları hesaba katılarak belirlenmesi önerilmiştir (ACI-318'de verilen etkili tabla genişliği esas alınarak). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikte [1] ise yapısal elemanların kapasite tasarımı ve kuvvetli kolon-zayıf kiriş prensibinin denetimi kontrollerinde belirtilmemekle birlikte, mevcut yapıların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi bölümünde, betonarme tablalı kirişlerin plastik moment kapasitesinin belirlenmesinde tabla betonu ve içindeki donatının hesaba katılabileceği belirtilmektedir.

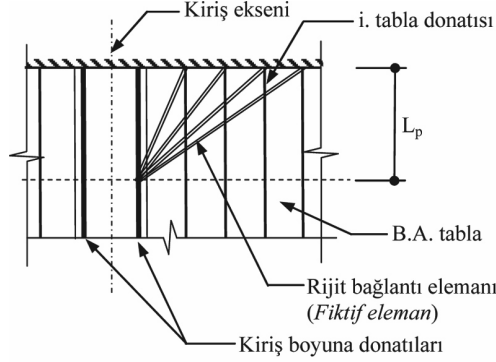
Negatif eğilme durumda döşeme donatılarının kiriş moment kapasitesini arttırıcı etkisinin dikkate alınmaması, sünek betonarme çerçeve kirişlerinin tasarım kesme kuvvetinin hesaplanması, kolon-kiriş birleşimlerinde güçlü kolon zayıf kiriş prensibinin denetimi ve bu denetimin sağlandığı birleşimlerde kolon kesme kuvvetinin hesaplanması üzerinde belirsizlikler yaratır. Bu çalışmada, pozitif veya negatif eğilme etkisindeki betonarme iç aks kirişlerinin mesnet kesitlerindeki M_p moment kapasitesinin gerçeğe yakın olarak belirlenebilmesi için bir hesap yöntemi tanıtılacaktır. Sözü edilen hesap yöntemi yardımıyla elde edilen kiriş moment kapasiteleri, dikdörtgen kesit kabulü ve TS500-2000'de [2] verilen etkili tabla genişliği göz önüne alınarak belirlenen moment taşıma güçleriyle karşılaştırılmalı olarak irdelenecektir.

2. NEGATİF EĞİLME ETKİSİNDEKİ İÇ AKS KİRİŞLERİNİN MOMENT KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

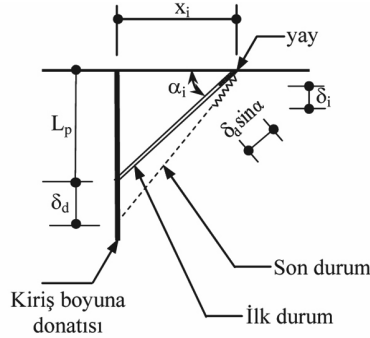
Betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesinin sabit bir etkili beton birim kısalması (ϵ_{cu}) varsayımıyla belirlenmesi, temel tasarım değişkenlerinin davranış ve moment kapasitesi üzerine etkilerinin izlenmesini güçleştirir (pekleşme etkisiyle artan donatı dayanımı, sargı etkisiyle artan beton basınç dayanımı, basınç donatısında burkulma etkisiyle değişen basınç dayanımı, tabla donatılarının etkilerinin süneklik istemiyle belirginleşmesi vb.). Bu durum, kiriş moment kapasitesinin moment-eğrilik analizleri yardımıyla belirlenmesi gereğini doğurur. Bu çalışmada, negatif eğilme etkisindeki tablalı betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesinde, kiriş gövde kesitinin çubuk eleman davranışı, kiriş tabla kesitlerinin ise düzlemsel eleman davranışı gösterdiği kabul edilen bir model kullanılmıştır [12]. Bir başka ifade ile belirli bir düzeydeki kiriş boyuna donatılarının birim şekil değiştirmeleri sabitken, belirli bir düzeydeki tabla donatılarının birim şekil değiştirmeleri değişken olarak kabul edilmiştir. Bir döküm kolon-kiriş-döşeme birleşimlerinde sözü edilen mekanik model Şekil 1' de şematik olarak gösterilmiştir. Rijit yanal kiriş varsayımıyla geliştirilen bu basit model, özellikle kenar (dış) aks kolon-kiriş birleşimlerinde görülen yanal kirişin davranış üzerindeki etkilerini yansıtamamaktadır [12, 13]. Buna karşın model, yanal kirişle bir döküm olan tabliye betonunun sürekli olduğu durumlarda (örneğin döşemenin sürekli olduğu iç aks kolon-kiriş birleşimleri vb.) -yanal kirişteki burulma merkezinin tabliyeye doğru kaymasıyla- yanal kirişteki burulmaya bağlı gelişen yerdeğiştirme bileşeninin ihmal edilebilecek düzeyde olması nedeniyle kullanılabilir [13].

Şekil 1'de gösterilen birleşim modelinde, negatif eğilme etkisindeki kirişin eksenî doğrultusundaki yerdeğiştirme, δ_d , kiriş gövde kesitindeki çekme donatısı birim şekil değiştirmesine (ϵ_{maks}) bağlı bir biçimde ifade edilebilir. Kiriş gövde kesitinde belirli bir

yerdeğiştirmeyle birlikte, birleşim modelinde dik kirişe yay ile birleştirilen rijit bağlantı elemanının (fiktif eleman) eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme, $\delta_d \sin \alpha$ olur ve bu yer değiştirme kiriş gövdesine olan mesafenin artmasıyla azalım eğilimindedir (Bkz. Şekil 1b). Kiriş gövde kesitinde oluşan bu yerdeğiştirmeye göre kiriş boyuna donatısına farklı uzaklıktaki (x_i) tabla donatılarındaki birim uzamalar (ε_i) ise, aşağıda verilen (1) bağıntısı yardımıyla belirlenebilir [12].



(a) Varsayılan mekanik model



(b) Şekil değiştirme sonrası birleşim modelinin şematik gösterimi

Şekil 1 - Negatif eğilmede tabla donatılarındaki değişken şekil değiştirme dağılımının belirlenmesinde kullanılan birleşim modeli [12]

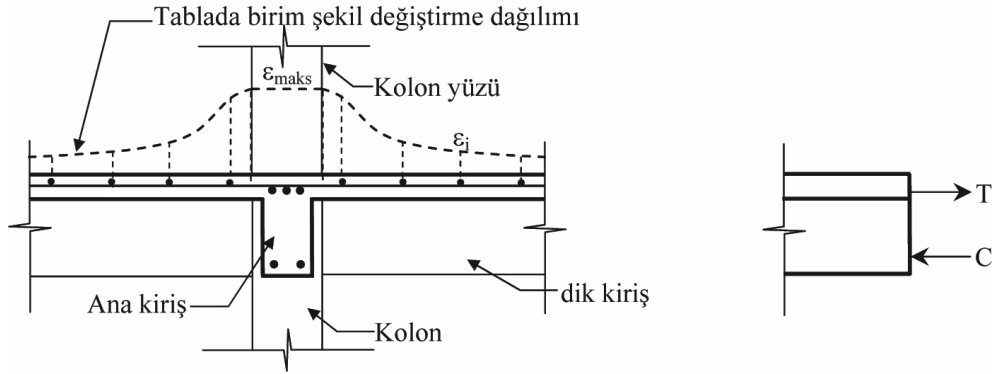
$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{maks}} \times \sin^2 \alpha_i \quad (1)$$

(1) bağıntısında, ε_i , yanal kirişe bağlı i. tabla donatısındaki eğilme doğrultusundaki birim uzama ve $\varepsilon_{\text{maks}}$ ise kiriş boyuna donatısı birim uzamasıdır. Şekil 2' de, bir iç aks kolon-kiriş birleşiminde, negatif eğilme etkisindeki tablalı betonarme kirişin (1) bağıntısı yardımıyla

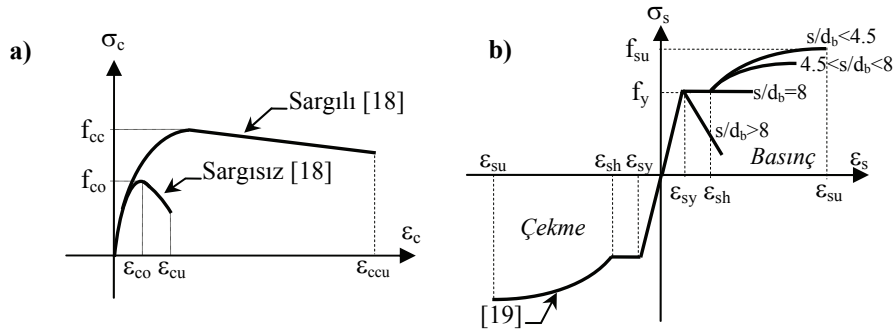
Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

belirlenecek tabla donatılarındaki birim şekil değiştirme dağılımları şematik olarak gösterilmiştir.

Kiriş moment kapasitesinin moment eğrilik analizi yardımıyla belirlenmesinde, kesit geometrisini tanımlamak amacıyla şeritli modelleme yöntemi kullanılmıştır (kesit ince şeritlere bölünerek, her bir şeritteki sargısız ve sargılı beton alanları ayrı ayrı tanımlanır). Analizlerde, betondaki sargı etkisiyle değişen gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi, sargısız betondaki ezilme, donatı çeliğindeki pekleşme etkisi ile çekme ve basınç donatıları davranış modellerindeki farklılıklar dikkate alınmıştır. Şekil 3' de moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesinde kullanılan malzeme davranış modelleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2 - Negatif eğilme etkisindeki iç aks kirişinde tabla donatılarındaki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 3 - Malzeme davranış modelleri : a) Beton gerilme-birim şekil değiştirme davranış modelleri [18], b) Donatı çeliği gerilme-birim şekil değiştirme davranış modelleri [19]

Göz önüne alınan donatı çeliği σ - ε modelinde, basınç etkisindeki donatı çeliğinin davranışı etriye aralığının boyuna donatı çapına oranına (s/d_b) göre belirlenmektedir. Sözü edilen oran 4.5'den küçük ise çekme ve basınç etkisindeki davranış özdeş; 8'e eşit ise elasto-plastik davranış esas alınmaktadır. Basınç etkisindeki donatı çeliği σ - ε ilişkileri belirlenmesinde kullanılan malzeme modelinde, s/d_b oranına göre σ - ε ilişkileri ile bu ilişkilerdeki sınır gerilme ile sınır birim kısalma değerleri ($f_{s/Du}$, $\varepsilon_{s/Du}$) aşağıda verilen bağıntılar yardımıyla belirlenebilir [19].

- $s/db < 4.5$

$$\sigma_s = f_y + (f_{su} - f_y) \times \left[2 \times \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} - \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \quad (2)$$

- $4.5 \leq s/db \leq 8$

$$\sigma_s = f_y + (f_{s/Du} - f_y) \times \left[2 \times \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{s/Du} - \varepsilon_{sh}} - \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{s/Du} - \varepsilon_{sh}} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s/Du} \quad (3)$$

$$f_{s/Du} = f_y + (f_{su} - f_y) \times \left[48 \times e^{-0.9(s/d_b)} \right], \quad (4)$$

$$\varepsilon_{s/Du} = \varepsilon_y + (\varepsilon_{su} - \varepsilon_y) \times \left[6 \times e^{-0.4(s/d_b)} \right] \quad (5)$$

- $s/db > 8$

$$\sigma_s = f_y - (\varepsilon_s - \varepsilon_y) \times \left[-23000 + 11000 \times \ln \left(\frac{s}{d_b} \right) \right], \quad \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s/Du} \quad (6)$$

$$f_{s/Du} = f_y \times 28 \times \left(\frac{s}{d_b} \right)^{-1.7}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{s/Du} = \varepsilon_y \times \left[40 - 6 \times \ln \left(\frac{s}{d_b} \right) \right] \quad (8)$$

2.1 Deneysel Karşılaştırmalar

Çalışmanın bu bölümünde, analitik olarak belirlenen çeşitli parametreler, deney sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Bu amaçla, çeşitli araştırmacılar tarafından çevrimsel kesme kuvveti altında deprem yüklerine benzeştirilerek test edilmiş ve taşıma güçlerine eğilme kırılmasıyla ulaşan kiriş deney elemanlarının sonuçlarından yararlanılacaktır. Karşılaştırmalarda kullanılan deney elemanlarının geometrik özellikleri Çizelge 1’de, malzeme özellikleri ve donatı bilgileri ise Çizelge 2’de özetlenmiştir. Çizelge 1’de verilen 1~3 numaralı kirişlerde, salt kiriş davranışının incelendiği konsol deney düzeneği, 4~9 numaralı kirişlerde ise iç aks kolon-kiriş birleşiminin incelendiği bir deney düzeneği kullanılmıştır.

Şekil 4 ~ Şekil 12 ve Çizelge 3’de analitik ve deneysel olarak belirlenen çeşitli parametrelerin karşılaştırmaları verilmiştir. Karşılaştırmalarda analitik moment-eğrilik ilişkilerinin ve/veya kiriş moment kapasitesinin belirlenmesinde yapılan kabuller şu şekilde özetlenebilir: (i) sargısız betonun etkili birim kısalmasının (ϵ_{cu}) 0.004 olduğu varsayılmıştır. (ii) negatif eğilme etkisinde tabla donatılarındaki doğrusal olmayan şekil değiştirme dağılımının belirlenmesinde, kiriş gövde kesitinin çubuk eleman davranışı, kiriş tabla kesitlerinin ise düzlemsel eleman davranışı gösterdiği kabul edilen bir model kullanılmıştır [12] (bkz. Şekil 1 ve Şekil 2) (iii) pozitif eğilme etkisinde kiriş çift donatılı dikdörtgen kesit olarak modellenmiştir ($\rho'/\rho \geq 1$ durumunda, basınç donatısındaki artışın moment kapasitesi üzerindeki etkisinin sınırlı düzeyde olacağı varsayılmıştır).

Çizelge 1 - Deney elemanlarının geometrik özellikleri

No	Referans/ Eleman ismi	b_w (mm)	b (mm)	h (mm)	d^* (mm)	h_f (mm)	L (mm)
1	[5]/T1	229	914	406	355	57	1588**
2	[5]/T2	229	914	406	355	57	1588**
3	[5]/T3	229	914	406	355	57	1588**
4	[7]/EW2	152	2870	254	221	63.5	1524***
5	[7]/EW3	152	2870	254	221	63.5	1524***
6	[6]/2D-I	400	3660	550	487	130	2030**
7	[8]/J2	406	5182	508	402	127	2439**
8	[9]/I1	150	750	250	213	60	1250**
9	[9]/I2	150	750	250	213	60	1250**

* Negatif eğilmede kiriş etkili derinliği

** Çevrimsel kesme kuvvetinin kiriş ucundan yüklendiği deney sisteminde kiriş hesap açıklığı

*** Çevrimsel kesme kuvvetinin üst kat kolon ucundan yüklendiği deney sisteminde kiriş hesap açıklığı

Çizelge 2 - Deney elemanlarının malzeme özellikleri ve donatı bilgileri

No	Referans/ Eleman ismi	Beton		Donatı çeliği		
		f_{co} (MPa)	Konum	Donatı	f_y (MPa)	f_{su} (MPa)
1	[5]/T1	33.0	Gövde üst	4 ϕ 19.05	451.6	649.4
			Gövde alt	3 ϕ 15.9	458.5	658.4
			Tabla üst	6 ϕ 6.35	413.6	572.2
			Tabla alt	6 ϕ 6.35	413.6	572.2
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/89	413.6	572.2
2	[5]/T2	31.8	Gövde üst	4 ϕ 19.05	451.6	649.4
			Gövde alt	3 ϕ 15.9	458.5	658.4
			Tabla üst	6 ϕ 6.35	413.6	572.2
			Tabla alt	6 ϕ 6.35	413.6	572.2
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/89	413.6	572.2
3	[5]/T3	30.8	Gövde üst	4 ϕ 19.05	451.6	649.4
			Gövde alt	4 ϕ 19.05	451.6	649.4
			Tabla üst	6 ϕ 6.35	413.6	572.2
			Tabla alt	6 ϕ 6.35	413.6	572.2
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/89	413.6	572.2
4	[7]/EW2	40.0	Gövde üst	3 ϕ 9.53	503.9	789.4
			Gövde alt	2 ϕ 9.53	503.9	789.4
			Tabla üst	14 ϕ 6.35	421.2	586.7
			Tabla alt	14 ϕ 6.35	421.2	586.7
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/102	421.2	586.7
5	[7]/EW3	55.3	Gövde üst	3 ϕ 9.53	503.9	789.4
			Gövde alt	2 ϕ 9.53	503.9	789.4
			Tabla üst	14 ϕ 6.35	421.2	586.7
			Tabla alt	14 ϕ 6.35	421.2	586.7
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/102	421.2	586.7
6	[6]/2D-I	37.0	Gövde üst ^(2 sıra)	4 ϕ 24	283.0	437.0
				2 ϕ 20	300.0	459.0
			Gövde alt ^(1 sıra)	2 ϕ 24	283.0	437.0
				2 ϕ 20	300.0	459.0
			Tabla üst	18 ϕ 10	315.0	432.0
			Tabla alt	12 ϕ 10	315.0	432.0
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 10/115	315.0	432.0

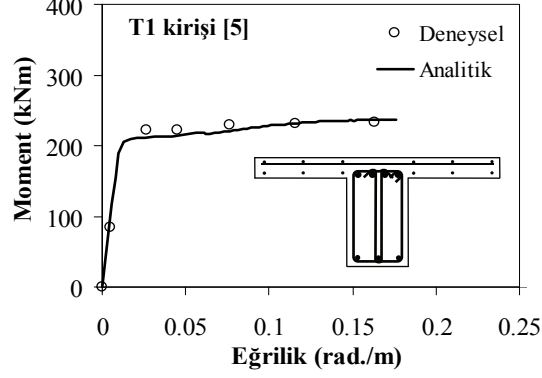
Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

Çizelge 2 - Deney elemanlarının malzeme özellikleri ve donatı bilgileri (Devamı)

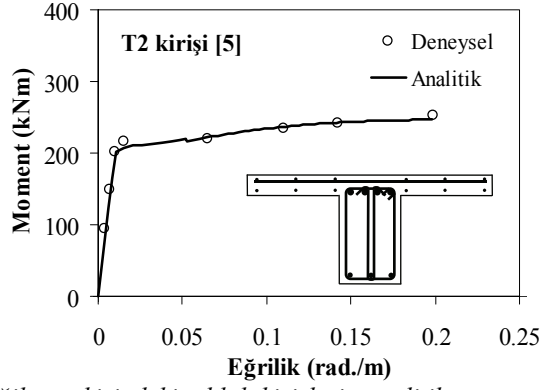
No	Referans/ Eleman ismi	Beton		Donatı çeliği		
		f_{co} (MPa)	Konum	Donatı	f_y (MPa)	f_{su} (MPa)
7	[8]/J2	27.6	Gövde üst ^(2.sıra)	4 ϕ 25.4	463.3	730.7
				2 ϕ 25.4	463.3	730.7
			Gövde alt ^(2.sıra)	2 ϕ 19.05	511.5	750.8
				4 ϕ 19.05	511.5	750.8
			Tabla üst	16 ϕ 9.53	557.0	814.9
			Tabla alt	10 ϕ 9.53	557.0	814.9
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 12.7/102	549.5	771.4
8	[9]/I1	33.0	Gövde üst	3 ϕ 9.53	375.0	532.2
			Gövde alt	2 ϕ 9.53	375.0	532.2
			Tabla	8 ϕ 6.35	377.1	496.6
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/125	377.1	496.6
9	[9]/I2	33.0	Gövde üst	3 ϕ 9.53	375.0	532.2
			Gövde alt	2 ϕ 9.53	375.0	532.2
			Tabla	8 ϕ 6.35	377.1	496.6
			Etriye(ϕ /s)	ϕ 6.35/55	377.1	496.6

Şekil 4~Şekil 6'da, negatif eğilme etkisinde analitik olarak belirlenen moment-eğrilik ilişkilerinin, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaları görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, tabla donatısının, özellikle kirişin elastik ötesi davranışı ve moment kapasitesi üzerine etkilerinin belirlenmesinde, analitik modelin verdiği sonuçlar deneysel sonuçlara yakındır.

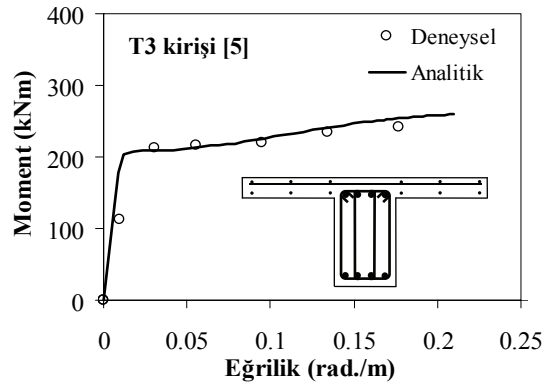
Şekil 7'de, negatif eğilme etkisindeki tablalı bir kirişin deneysel moment-eğrilik ilişkisi, dikdörtgen kesit varsayımıyla tabla donatıları ihmal edilerek ve tabla donatılarında değişken şekil değiştirme dağılımı göz önüne alınarak belirlenen analitik moment-eğrilik ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, negatif eğilme etkisinde dikdörtgen kesit varsayımıyla tabla donatılarının ihmal edilmesi, gerçekçi malzeme davranış modellerinin kullanılmasına rağmen kiriş moment kapasitesinin olduğundan küçük; kiriş yerdeğiştirme ve/veya dönme kapasitesinin ise olduğundan daha büyük belirlenmesine neden olmaktadır.



Şekil 4 - Negatif eğilme etkisindeki tablalı kirişlerin analitik moment eğrilik ilişkilerinin deneysel sonuçlarla [5] karşılaştırılması

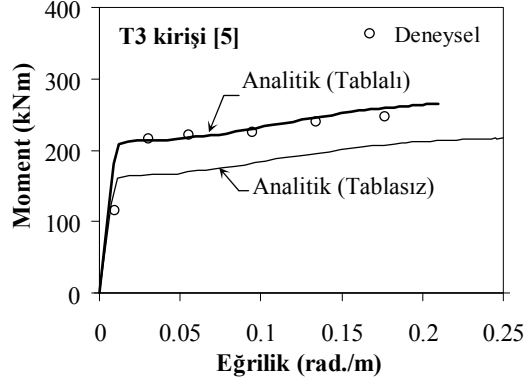


Şekil 5 - Negatif eğilme etkisindeki tablalı kirişlerin analitik moment eğrilik ilişkilerinin deneysel sonuçlarla [5] karşılaştırılması



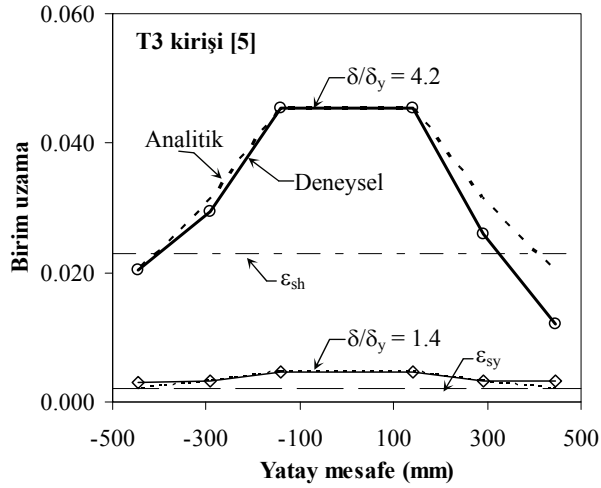
Şekil 6 - Negatif eğilme etkisindeki tablalı kirişlerin analitik moment eğrilik ilişkilerinin deneysel sonuçlarla [5] karşılaştırılması

Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi



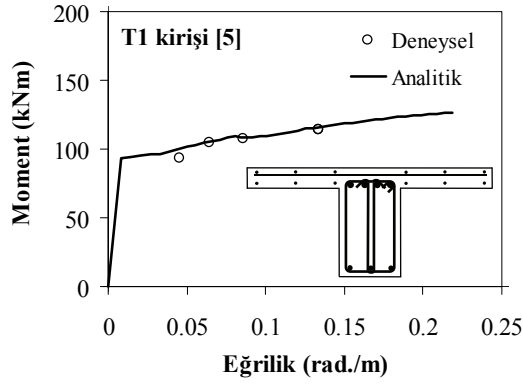
Şekil 7 - Negatif eğilme etkisindeki tablalı kirişlerde tablalı ve dikdörtgen kesit kabulleriyle belirlenen analitik moment-eğrilik ilişkilerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Şekil 8'de, iki farklı yerdeğiştirme sünekliği için deneysel olarak belirlenen tabla donatılarındaki birim uzama değerlerinin yatay aralığa göre değişimleri ile (1) bağıntısı yardımıyla belirlenen analitik şekil değiştirme dağılımları verilmiştir. Karşılaştırmadan da görüleceği üzere, negatif eğilme etkisinde artan süneklik istemiyle birlikte etkili tabla genişliğinin değiştiği, analitik yaklaşımın çalışan tabla genişliğinin belirlenmesinde kullanılabileceği söylenebilir.

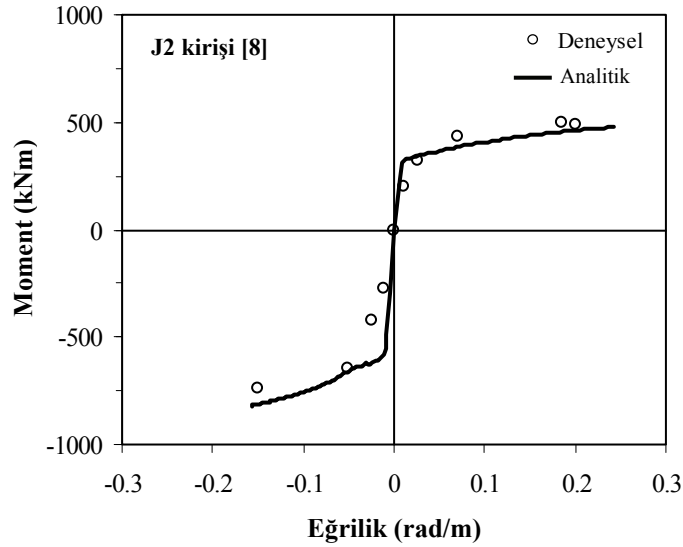


Şekil 8 - Negatif eğilme etkisinde analitik ve deneysel [5] olarak belirlenen tabla donatılarındaki boyuna birim uzama değerlerinin yatay aralığa göre değişimi

Şekil 9'da, pozitif eğilme etkisindeki tablalı bir kirişin mesnet kesitinde deneysel olarak belirlenen moment-eğrilik ilişkisinin, dikdörtgen kesit varsayımıyla elde edilen analitik moment-eğrilik ilişkisi ile bir karşılaştırması verilmiştir. Karşılaştırmadan da görüleceği gibi, pozitif eğilme durumunda ρ'/ρ oranının birin üzerinde olması nedeniyle, tabla donatılarının ihmalinin kiriş moment kapasitesi üzerine etkisi sınırlı olmaktadır.



Şekil 9 - Pozitif eğilme etkisinde (tablanın basınca çalışması durumu) dikdörtgen kesit kabulüyle belirlenen analitik moment eğrilik ilişkilerinin deneysel sonuçlarla [5] karşılaştırılması



Şekil 10 - Analitik moment eğrilik ilişkilerinin deneysel sonuçlarla [8] karşılaştırılması

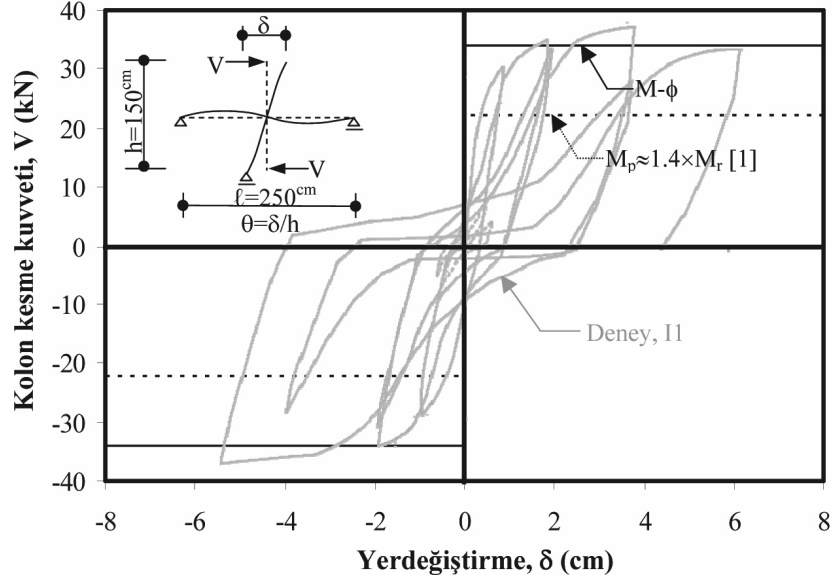
Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

Şekil 10'da, çevrimsel yük etkisindeki bir iç aks kirişinde analitik ve deneysel moment-eğrilik ilişkileri karşılaştırılmıştır. Analitik moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesinde, negatif eğilmede tabla donatılarında değişken şekil değiştirme dağılımı göz önüne alınmış, pozitif eğilmede ise dikdörtgen kesit varsayımı kullanılmıştır. Karşılaştırmadan da görüleceği üzere, analitik yaklaşımın sonuçları deneysel sonuçlara yakındır.

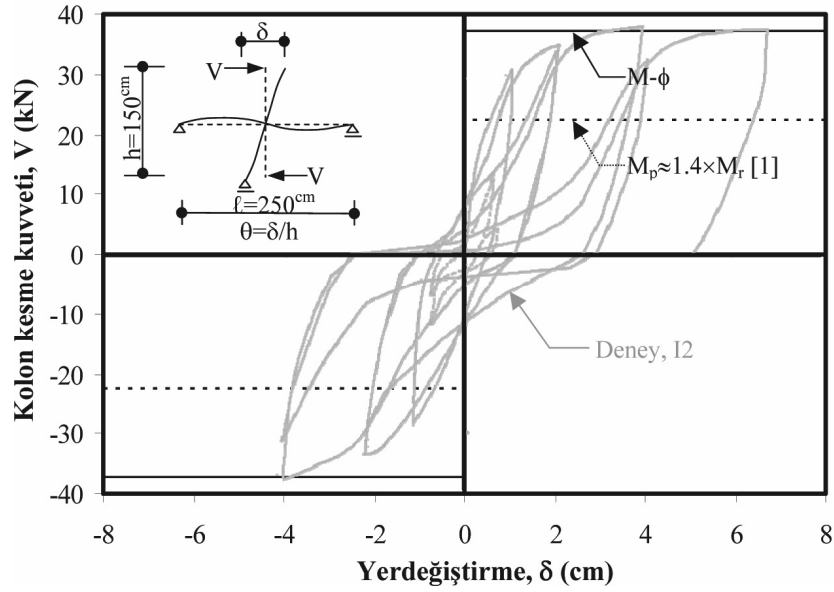
Çizelge 1 ve Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarının, negatif eğilme durumunda elde edilen moment kapasitelerinin, çeşitli yaklaşımlarla belirlenmiş olan analitik moment kapasiteleri ile karşılaştırılmaları Çizelge 3'de verilmiştir. Karşılaştırmalarda kullanılan analitik moment kapasiteleri şu şekilde sıralanabilir: $M_{M-\phi}$, tabla donatısında değişken birim şekil değiştirme dağılımı yardımıyla moment-eğrilik ilişkisinden belirlenen kiriş moment kapasitesi, M_r , dikdörtgen kesit kabulüyle TS500-2000'e [2] göre belirlenen moment taşıma gücü, M_{r*} , TS500-2000'de [2] verilmiş olan etkili tabla genişliği ($b_{TS500-2000}$) esas alınan tablalı kesit için belirlenen moment taşıma gücüdür (tabla donatılarında sabit birim şekil değiştirme dağılımı yardımıyla). Karşılaştırmalardan da görüleceği gibi, analitik moment eğrilik ilişkisi ile belirlenen moment kapasiteleri ile deneysel sonuçlar birbirine yakındır. Deneysel moment kapasitelerinin, dikdörtgen kesit kabulüyle belirlenen kiriş taşıma gücü momentlerine oranları 1.62~3.78 arasında; tablalı kiriş taşıma gücü momentine oranları ise 1.35~2.57 arasında değişmektedir. Söz konusu oranlar, kiriş çekme donatısı oranının azalması ile artış eğilimindedir. Bu bağlamda, bu oranlarda, kiriş çekme donatısının azalan değerleri ve/veya kiriş tabla donatısının artan değerleri için daha büyük artış (*ihmal edilen tabla çekme donatısının kiriş gövde kesiti çekme donatısına göre mertebesinin belirginleşmesi, çekme donatısı oranının azalmasıyla kiriş sünekliğinin artarak tabla donatısının etkisinin belirginleşmesi vb.*), tersi durumlarda ise daha küçük artış oranları beklenebilir.

Çizelge 3 - Negatif eğilmede (tablanın çekmeye çalışması durumu) deneysel moment kapasitelerinin analitik moment kapasitelerine oranları

Referans/ Eleman ismi	Deneysel $M_{deneyel}$ (kNm)	Analitik Yöntem		
		Moment-Eğrilik	Taşıma Gücü (Tablasız)	Taşıma Gücü (Tablalı)
			$M_{deneyel}/M_{M-\phi}$	$M_{deneyel}/M_r$
[5]/T1	237	0.95	1.62	1.35
[5]/T2	265	1.03	1.82	1.51
[5]/T3	249	0.96	1.74	1.45
[7]/EW2	70.6	1.07	3.60	2.44
[7]/EW3	75.7	1.07	3.78	2.57
[6]/2D-I	529	0.90	1.96	1.73
[8]/J2	733	0.91	1.78	1.61
[9]/I1	37.7	1.05	2.67	1.73
[9]/I2	37.6	0.93	2.67	1.72



Şekil 11 - Kiriş moment kapasiteleri yardımıyla elde edilen kolon kesme kuvvetinin deneysel sonuçlarla [9] karşılaştırılması



Şekil 12 - Kiriş moment kapasiteleri yardımıyla elde edilen kolon kesme kuvvetinin deneysel sonuçlarla [9] karşılaştırılması

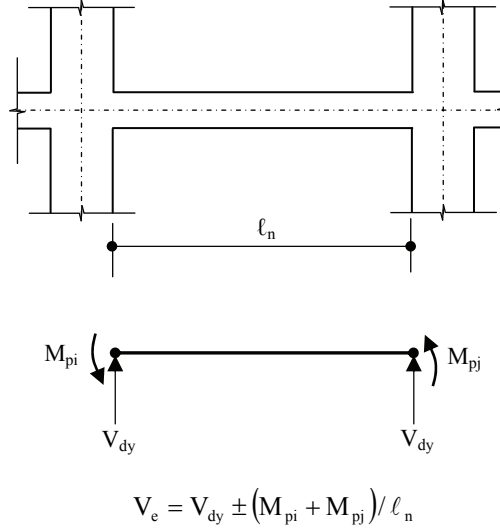
Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

Şekil 11 ve Şekil 12’de, ele alınan iç aks kolon-kiriş birleşimlerinde, deneysel olarak belirlenen kolon kesme kuvvetinin, kiriş moment eğrilik ilişkilerinden saptanan moment kapasitesi ve kiriş $1.4 \times M_r$ [1] moment kapasitesi yardımıyla belirlenen kolon kesme kuvvetleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Kiriş moment eğrilik ilişkilerinin belirlenmesinde, negatif eğilmede tabla donatıları göz önüne alınmış, pozitif eğilmede ise ihmal edilmiştir ($\rho'/\rho \geq 1$). Kiriş M_r moment taşıma gücünün belirlenmesinde ise dikdörtgen kesit varsayımı kullanılmıştır.

Karşılaştırmalardan da görüleceği gibi, tabla donatılarının ihmalinin kiriş moment kapasitesi üzerindeki etkisi, dolaylı olarak kolon kesme kuvvetinin tahmini üzerinde de etkilidir. Ele alınan deneysel elemanlarda, kolon kesme kuvvetinin, dikdörtgen kiriş kesit varsayımı ile ($1.4 \times M_r$) belirlenmesi durumunda, deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki fark %60 mertebesine kadar çıkabilmektedir.

3. ANALİTİK İNCELEMELER

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelikteki kapasite tasarımı gereği [1], kirişlerin enine donatı hesabında temel alınacak kesme kuvveti, elemanın uçlarındaki eğilme kapasiteleri temel alınarak belirlenir. Şekil 13’de, yatay deprem yükünün belirli bir doğrultuda etkimesi durumu için sözü edilen tasarım kesme kuvvetlerinin belirlenmesi şematik olarak gösterilmiştir.

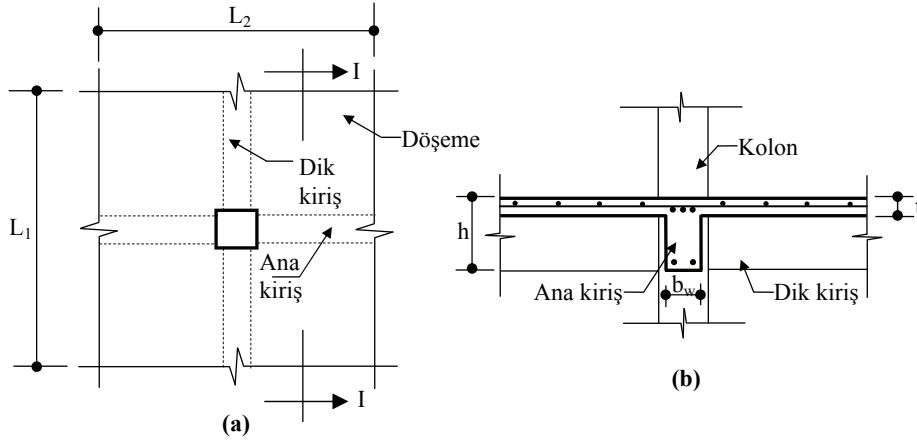


Şekil 13 - Kiriş enine donatı hesabında esas alınacak tasarım kesme kuvveti V_e 'nin belirlenmesi

Bu bölümde, negatif ya da pozitif eğilme etkisindeki betonarme iç aks kirişlerinin moment kapasiteleri; çift donatılı dikdörtgen kesit varsayımı veya TS500-2000’de verilen etkili tabla genişliği varsayımıyla hesaplanan taşıma gücü momentleri (M_r , M_{r*}) ile karşılaştırılacaktır. İncelemelerde, analitik moment-eğrilik ilişkileri, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik’te verilen Göçme Sınırı (GÇ) için tanımlanan birim şekil değiştirme üst sınırları ($\epsilon_{cL}=0.018$; $\epsilon_{sL}=0.06$) esas alınarak sınırlandırılmıştır [1].

3.1 Analizler

İncelemelerde, Şekil 14’de plan ve en kesit detayı görülen bir iç aks kolon-kiriş birleşimi ele alınmıştır. Kolon-kiriş birleşiminde, eğilme doğrultusundaki kirişler “ana kiriş”, bu doğrultuya dik kirişler ise “dik kiriş” olarak isimlendirilmiştir. Söz konusu birleşimde, kuvvetli kolon zayıf kiriş prensibinin sağlandığı varsayımıyla, gövde kesiti çekme ve basınç donatısı oranlarının değişken değerleri için eğilme doğrultusundaki kirişlerde kesit analizleri yapılacaktır. Analizlerde, net beton örtüsü kalınlığı kirişler için 2cm, döşemeler için ise 1.5cm olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4’te, analizlerde göz önüne alınan geometrik kesit özellikleri, malzeme özellikleri ve ana kiriş mesnet kesitlerindeki döşeme donatılarına ilişkin bilgiler özetlenmiştir. Tabla donatılarının belirlenmesinde döşeme hareketli yükü 3.5 kN/m^2 , sıva ve kaplama yükü toplamı ise 1.5 kN/m^2 olarak alınmıştır. Analizlerde kiriş gövde kesiti donatıları (ρ ve ρ'), alt sınırı minimum donatı oranı [2], üst sınırı 0.02 olmak üzere 8 farklı düzeyde; ρ'/ρ oranları ise, negatif eğilmede 0.25~1.0 aralığında; pozitif eğilme de ise 1.0~2.0 aralığında incelenmiştir. Ayrıca, örnek kirişlerin enine donatıları, $V_c=0$ varsayımıyla kapasite tasarımına göre [1] belirlenmiştir.



Şekil 14 - İç aks kolon-kiriş birleşimi (a) Plan; (b) I-I kesiti

Çizelge 4 -Kesit analizlerinde kullanılan çeşitli değişkenler ve inceleme aralıkları

L_1/L_2 (m/m)	t (cm)	b_w/h (cm/cm)	f_{ck} (MPa)	f_{yk} (MPa)	Tabla donatıları (üst) (alt)	
4/4	11	25/50 30/60	20, 25~40	420	$\phi 8/33$	$\phi 8/33$
5/5	13	25/50 30/60	20, 25~40	420	$\phi 8/22$	$\phi 8/39$
6/6	14	25/50 30/60	20, 25~40	420	$\phi 8/16$	$\phi 8/42$
3/6	14	25/50 30/60	20, 25~40	420	$\phi 8/26$	$\phi 8/42$
6/3	14	25/50 30/60	20, 25~40	420	$\phi 8/30$	$\phi 8/42$

3.2 Analiz Sonuçları

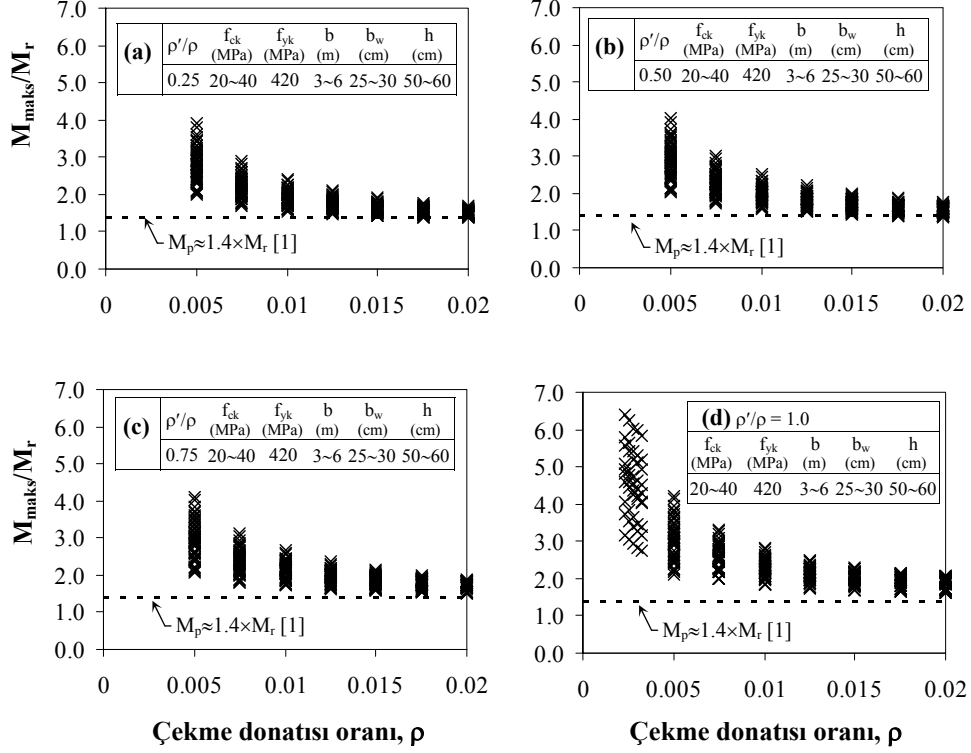
3.2.1 Negatif Eğilmede Moment Kapasitesi

Şekil 15’de, Çizelge 4’te özellikleri verilmiş olan örnek kirişlerin, mesnet kesitlerinde negatif eğilme durumunda (tabla ve tabla donatısının çekmeye çalışması durumu), dikdörtgen kesit kabulüyle belirlenen moment taşıma gücü (M_r) [2] ile tabla donatısında değişken birim şekil değiştirme dağılımı yardımıyla, moment eğrilik analizlerinden elde edilen moment kapasiteleri (M_{maks}) karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda, analiz sonucu elde edilen M_{maks}/M_r oranlarının kiriş gövde kesiti çekme donatısı oranlarına (ρ) göre değişimleri, farklı ρ'/ρ oranları için ayrı ayrı diyagramlar halinde sunulmuştur.

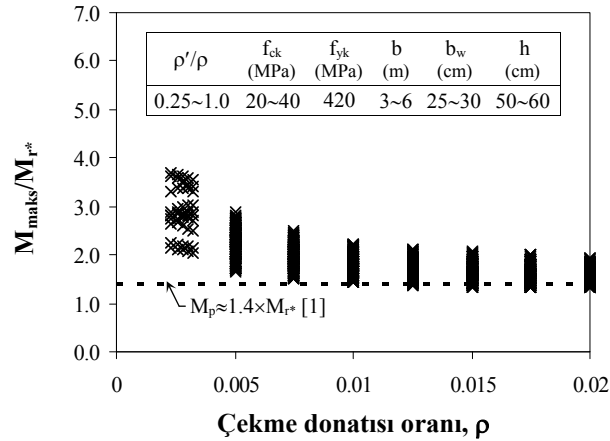
Şekil 15’de M_{maks}/M_r oranlarının kiriş gövde kesiti çekme ve basınç donatısı oranlarına göre sergiledikleri değişimler incelendiğinde, söz konusu oranların 1.37~6.39 aralığında değiştiği ve çekme donatısındaki azalma ve basınç donatısındaki artış ile $1.4 \times M_r$ [1,4] yaklaşımındaki hata aralığının arttığı söylenebilir.

Şekil 16’da, negatif eğilme durumunda, TS500-2000’de [2] verilmiş olan etkili tabla genişliği ($b_e=b_{TS500}$) esas alınarak belirlenen moment taşıma gücüyle (M_{r*}), tabla donatısında değişken birim şekil değiştirme dağılımı yardımıyla moment-eğrilik analizlerinden elde edilen moment kapasiteleri (M_{maks}) karşılaştırılmıştır.

Şekil 16’dan da görüleceği üzere, TS500-2000’de [2] önerilen tablalı kesitin moment taşıma gücünün (M_{r*}), kiriş moment kapasitesini (M_{maks}) yansıtmakta yetersiz kaldığı ve özellikle çekme donatısı oranındaki azalma ile $1.4 \times M_{r*}$ [1] yaklaşımındaki hata oranlarının, tasarım bağlamında kabul edilebilir seviyelerin üzerine çıktığı söylenebilir.



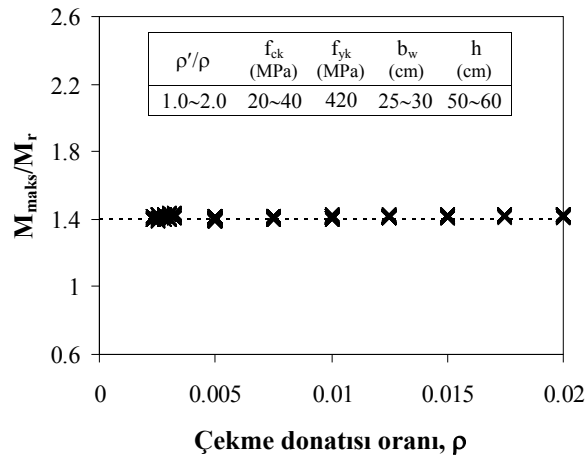
Şekil 15 - Örnek kiriş kesitlerinde negatif eğilme etkisinde moment kapasitesinin (M_{maks}) dikdörtgen kesit taşıma gücü momenti (M_r) ile karşılaştırılması



Şekil 16 - Örnek kiriş kesitlerinde negatif eğilme etkisinde moment kapasitesinin (M_{maks}) tablalı kesit ($b_e=b_{TS500}$) taşıma gücü momenti (M_{r*}) ile karşılaştırılması

3.2.2 Pozitif Eğilmede Moment Kapasitesi

Şekil 17'de, çalışmada göz önüne alınan örnek kirişlerin mesnet kesitlerinde pozitif eğilme olması durumunda (tabla ve tabla donatısının basınca çalışması durumu), dikdörtgen kesit kabulüyle TS500-2000'e göre belirlenen moment taşıma gücü (M_r) ile moment eğrilik analizlerinden elde edilen moment kapasiteleri (M_{maks}) karşılaştırılmıştır. Şekil 17'den de görüleceği üzere, pozitif eğilme etkisinde M_{maks}/M_r oranlarının 1.39~1.44 aralığında değiştiği ve kiriş gövde kesitindeki çekme ve basınç donatısı yüzdelерinden pek etkilenmediği söylenebilir.



Şekil 17 - Örnek kiriş kesitlerinde pozitif eğilme etkisinde moment kapasitesinin (M_{maks}) dikdörtgen kesit taşıma gücü momenti (M_r) ile karşılaştırılması

3.3 Önerilen Basit Yöntemler

Bir önceki bölümde yapılan deneysel ve analitik karşılaştırmalardan da görüleceği üzere, negatif eğilme etkisindeki kiriş moment kapasitesinin, dikdörtgen ya da TS500-2000'de verilen etkili tabla genişliğine göre belirlenen tablalı kesit taşıma gücü momentleri kullanılarak, $1.4 \times M_r$ [1] yaklaşımıyla belirlenmesi, kiriş mesnet kesitlerindeki tasarım kesme kuvvetinin, gerçek değerinin altında tahminine neden olmaktadır. Negatif eğilme etkisinde, döşeme donatılarının ihmal edilmesi ve/veya katkısının yansıtılmamasından kaynaklanan söz konusu durum, benzer bir biçimde, kolon kesme kuvvetinin tahmininde de etkili olacaktır. Tabla donatılarının kiriş moment kapasitesi üzerindeki etkileri, çalışmanın ikinci bölümünde açıklanan analitik moment eğrilik ilişkileri yardımıyla gerçekçi olarak modellenebilir.

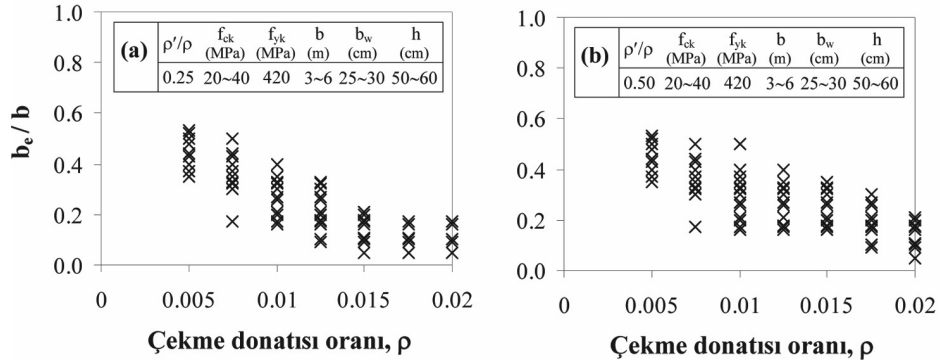
Bu bölümde, negatif eğilme etkisinde kiriş moment kapasitesinin belirlenmesine yönelik iki basit yöntem önerilecektir. Önerilecek birinci yöntemde kiriş moment kapasitesi dikdörtgen kesit kabulüyle belirlenen taşıma gücü momenti yardımıyla, ikinci yöntemde ise etkili tabla genişliği ve arttırılmış taşıma gücü momentine göre belirlenen moment kapasitesi yardımıyla belirlenecektir.

Bir önceki bölümde yapılan analiz sonuçları yardımıyla, negatif eğilme etkisinde kiriş moment kapasitesi (M_{maks}), dikdörtgen kesit kabulüyle belirlenen kiriş taşıma gücü momentine (M_r) bağlı olarak yaklaşık bir biçimde belirlenebilir. Bu amaçla, Statistica programı [20] yardımıyla doğrusal olmayan regresyon analizi yapılarak, M_{maks}/M_r oranları, etkin tasarım değişkenlerine bağlı bir biçimde aşağıdaki (9) bağıntısı ile ifade edilmiştir.

$$\frac{M_{maks}}{M_r} = 0.9 + 0.5 \cdot \frac{\rho'}{\rho} + \frac{0.011}{\rho^{0.95}} \quad (9)$$

(9) bağıntısında, ρ gövde kesiti çekme donatısı oranı, ρ' ise gövde kesiti basınç donatısı oranıdır. Bağıntının korelasyon katsayısı 0.90 olarak hesaplanmıştır.

Negatif eğilme etkisinde kiriş moment kapasitesi, döşeme donatılarının kapasite üzerindeki etkisini yansıtacak etkili tabla genişliği tanımı (etkili tabla genişliği içindeki tabla donatılarında sabit şekil değiştirme dağılımı varsayımıyla) yardımıyla da belirlenebilir. Şekil 18'de, etkili tabla genişliğinin çeşitli tasarım değişkenleriyle olan etkileşiminin incelenmesi amacıyla iki örnek diyagram verilmiştir. Diyagramlarda, negatif eğilme etkisindeki tabla donatılarında değişken birim şekil değiştirme dağılımının dikkate alındığı moment-eğrilik analizlerinden elde edilen maksimum çekme kuvveti bileşkesine eşit yada yakın etkili tabla genişliğinin, çeşitli tasarım parametreleriyle etkileşimi gösterilmektedir. Sözü edilen diyagramların eldesinde çekme donatısı artırılmış akma dayanımı $1.25f_{yk}$ [1] olarak alınmıştır.



Şekil 18 - Örnek kirişlerin mesnet kesitlerinin negatif eğilme etkisinde, çekme donatısı artırılmış akma dayanımı $1.25f_{yk}$ alınarak belirlenen etkili tabla genişlikleri

Şekil 18'den de görüleceği üzere, çekme donatısı akma dayanımı $1.25f_{yk}$ alınarak belirlenen etkili tabla genişliği, gövde kesiti çekme donatısı oranındaki azalma ve basınç donatısı oranındaki artış ile büyümektedir. Çekme donatısının sabit değerlerinin söz konusu olduğu durumda etkili tabla genişliği değerleri arasındaki farklılıklar -başta plan boyutları olmak üzere- çeşitli tasarım parametrelerinden etkilenmektedir. Çekme donatısının görece küçük değerlerinin söz konusu olduğu durumlarda, etkili tabla genişliğinin olduğundan küçük

Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

alınması hesaplar üzerinde belirgin hata oluşturması beklenebilir. Çekme donatısı oranının görece büyük değerlerinin söz konusu olduğu durumlarda etkili tabla genişliğinin olduğundan büyük alınması ise hesaplar üzerinde görece daha küçük hatalar doğurur (kiriş çekme donatısı oranının tabla donatısı oranına göre büyümesi durumu). Etkili tabla genişliğinin pratik amaçlar için donatı oranından bağımsız olarak belirlenmesi durumunda, bu değer, Şekil 18'de görülen etkili tabla genişliklerinin ortalama değerinin üzerinde olabilir. Bu nedenle, etkili tabla genişliğinin saptanması için aşağıda maddeler halinde açıklanan aşamalı değerlendirme yöntemi kullanılmıştır.

- i. Göz önüne alınan iç aks kolon kiriş sisteminde, ana kiriş ve dik kiriş aks açıklıklarına bağlı olarak (10) bağıntısıyla ifade edilen belirli bir etkili tabla genişliği (b_e) esas alınarak kirişin arttırılmış moment taşıma gücü ($M_{i,be}=1.4 \times M_r$) hesaplanır (M_r , etkili tabla genişliği içinde kalan döşeme donatıları dikkate alınarak, malzeme hesap dayanımlarına göre hesaplanan moment taşıma gücüdür).

$$b_e = \text{Min}(\alpha \times L_1, \beta \times L_2) \quad (10)$$

- ii. Belirlenen eğilme momenti, moment eğrilik analizi sonucu ile karşılaştırılarak, standart hata (SH) ve korelasyon katsayısı (R) belirlenir. Standart hata ve korelasyon katsayısı ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$SH(b_e) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{ri,be} - M_{maks,i,M-\phi})^2}{n-1}} \quad (11)$$

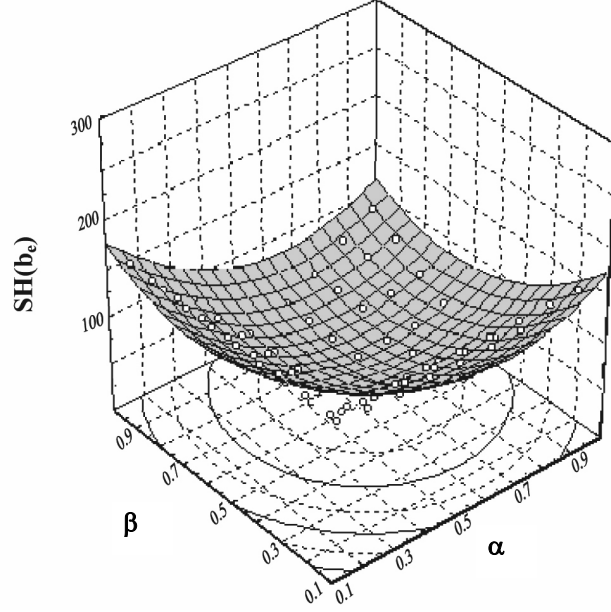
$$R(b_e) = \frac{\text{Var}(M_{i,be}, M_{maks,i,M-\phi})}{\sigma_{M_{i,be}} \cdot \sigma_{M_{maks,i,M-\phi}}} \quad (12)$$

(11) ve (12) bağıntılarında, n örnek kiriş sayısı, $M_{ri,be}$ efektif tabla genişliği içindeki döşeme donatıları dikkate alınarak hesaplanan taşıma gücü momentinin %40 arttırılmasıyla belirlenen moment kapasitesi, $M_{maks,i,M-\phi}$ tabla donatılarında değişken birim şekil değiştirme dağılımı modelinin kullanıldığı moment eğrilik analizlerinden belirlenen moment kapasitesi, Var() varyans, $\sigma()$ ise standart sapmadır.

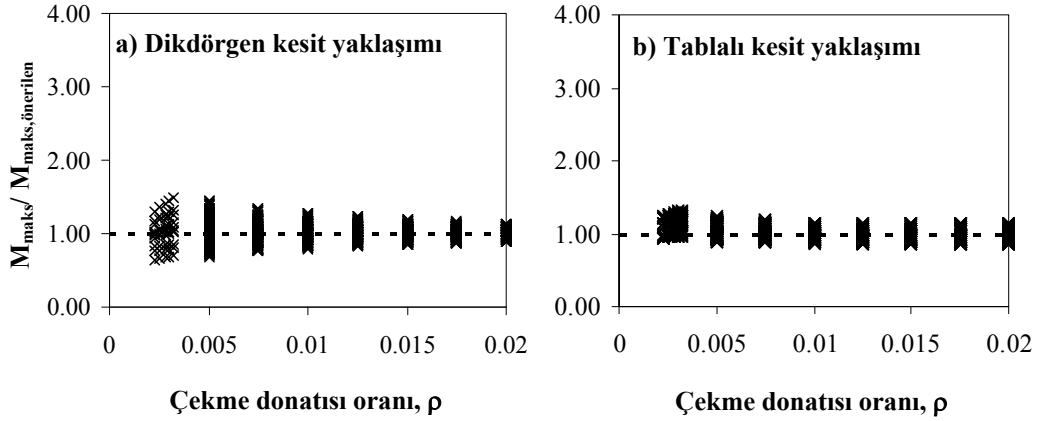
- iii. Etkili tabla genişliği varsayımı değiştirerek, süreç i. adımdan itibaren tekrarlanır.

Şekil 19'da, yukarıda verilen aşamalı değerlendirme yöntemiyle elde edilen standart hataların, (10) bağıntısındaki katsayılarla ilişkileri üç boyutlu diyagram üzerinde verilmiştir. Ayrıca diyagramda, standart hata değerleri için ortalama bir yüzey ve yatay düzlemde standart hataların belirli aralıklarla gruplandırılmasıyla çizilen eş hata eğrileri de gösterilmiştir. Şekilde, standart hatanın (10) bağıntısındaki katsayılarına göre değişim ilişkisinde, hatanın minimize olduğu bölgede, (12) bağıntısıyla belirlenen korelasyonu en yüksek olan α ve β değerleri sırasıyla 0.8 ve 0.5'dir. Negatif eğilme altında, $\alpha=0.8$ ve $\beta=0.5$ alınarak (10) bağıntısıyla belirlenen etkili tabla genişliği (tabla genişliği

doğrultusundaki kiriş aks açıklığının %80'i ve dik doğrultudaki kiriş aks açıklığının %50'si alınarak belirlenen minimum genişlik) esas alınarak hesaplanan kiriş moment kapasitelerinin ($1.4 \times M_r$), analitik moment-eğrilik analizi sonuçlarının karşılaştırılmasıyla, yaklaşımın korelasyon katsayısı (R) 0.98 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 19 - (10) bağıntısındaki katsayılarının belirlenmesi



Şekil 20 - Negatif eğilme etkisindeki tablalı betonarme kirişlerde, önerilen basit yaklaşımların analitik moment-eğrilik analizi sonuçları ile karşılaştırılması

Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

Şekil 20'de, negatif eğilme etkisindeki örnek kirişlerin moment eğrilik analizlerinden belirlenen eğilme momenti kapasiteleri (M_{maks}), önerilen iki basit yöntemin sonuçlarıyla ($M_{maks,önerilen}$) karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, Şekil 20(a) 'da kiriş moment kapasitesinin dikdörtgen kesit varsayımıyla belirlenen M_r taşıma gücü momentine bağlı olarak (9) bağıntısı yardımıyla belirlenmesi durumu; Şekil 20(b)'de ise kiriş moment kapasitesinin önerilen tabla genişliği yardımıyla ($b_e = \text{Min}(0.8 \times L_1, 0.5 \times L_2)$) taşıma gücü momentine ($1.4 \times M_r$) göre belirlenmesi durumu için ayrı ayrı verilmiştir. Dikdörtgen kesit yaklaşımında maksimum hata 0.64~1.47 aralığında, tablalı kesit yaklaşımında ise 0.86~1.32 aralığındadır.

Çizelge 1 ve Çizelge 2'de özellikleri verilmiş olan deney elemanlarının, negatif eğilme durumunda elde edilen moment kapasitelerinin, önerilen basit yaklaşımlar ile karşılaştırılmaları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5 - Negatif eğilmede deneysel moment kapasitelerinin önerilen yöntemlerle belirlenen moment kapasitelerine oranları

Referans/ Eleman ismi	Deneysel $M_{deneysel}$ (kNm)	Analitik Yöntem		
		Moment-Eğrilik	Dikdörtgen kesit yaklaşımı *	Tablalı kesit yaklaşımı **
		$M_{deneysel}/M_{M-\phi}$	$M_{deneysel}/M_{maks,önerilen}$	$M_{deneysel}/M_{maks,önerilen}$
[5]/T1	237	0.95	1.04	1.01
[5]/T2	265	1.03	1.17	1.12
[5]/T3	249	0.96	0.91	1.03
[7]/EW2	70.6	1.07	1.40	1.10
[7]/EW3	75.7	1.07	1.47	1.15
[6]/2D-I	529	0.90	1.02	1.06
[8]/J2	733	0.91	1.07	0.93
[9]/I1	37.7	1.05	1.06	0.93
[9]/I2	37.6	0.93	1.06	0.92

* Önerilen (9) bağıntısıyla, dikdörtgen kesit eğilme momenti taşıma gücüne göre belirlenen moment kapasitesi

** Negatif eğilme etkisi için önerilen etkili tabla genişliği ($b_e = \text{Min}(0.8 \times L_1, 0.5 \times L_2)$) dikkate alınarak belirlenen artırılmış taşıma gücü ($1.4 \times M_r$)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, negatif eğilme etkisindeki bir döküm betonarme iç aks kirişlerinin doğrusal olmayan davranışı ve moment kapasitelerinin gerçeğe yakın olarak moment-eğrilik ilişkileri yardımıyla belirlenebilmesi amacıyla, sargılı ve sargısız betonun basınç etkisi altında doğrusal olmayan davranışı, çekme donatısındaki pekleşme etkisi, basınç donatılarında burkulma etkisi ve tabla donatılarında değişken birim şekil değiştirme dağılımını göz önüne

alan bir hesap yöntemi tanıtılmıştır. Tablalı iç aks kirişleri mesnet kesitlerinde, Göçme Sınırı hasar seviyesi için tanımlı beton ve/veya donatı çeliği sınır şekil değiştirmelerine göre sınırlandırılan moment-eğrilik ilişkileri yardımıyla belirlenen kiriş moment kapasiteleri üzerinde çeşitli tasarım değişkenlerinin etkileri dikkate alınarak, negatif eğilme etkisinde tabla donatılarının kapasite üzerindeki etkisinin gözetilebilmesi amacıyla iki basit yöntem önerilmiştir. Önerilen basit yöntemlerle kiriş moment kapasitesinin belirlenmesi durumunda, çalışmada sınırlı sayıda değişkenliğin dikkate alındığı gözetilerek, analizlerde belirtilen hata aralığının aşılabileceği beklenebilir. Buna karşın önerilen yöntemler, kapasite tasarımı gereği belirlenmesi gereken kiriş kesme kuvvetlerinin hesaplanması ya da kuvvetli kolon-zayıf kiriş durumu kontrollerinin yaklaşık hesabında -mevcut yaklaşımlara göre ($1.4M_r$) daha güvenilir sonuçlar vermesi nedeniyle- kullanılabilir.

Çalışmada önerilen birinci yöntemle kiriş moment kapasitesi, dikdörtgen kesit varsayımıyla belirlenen taşıma gücü momenti ve kiriş gövde kesiti boyuna donatı oranlarının bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Daha açık bir anlatımla, Türk Deprem Yönetmeliğinde sabit bir katsayıyla (1.4) ifade edilen M_p/M_r oranı, negatif eğilme döşeme donatılarının kirişin moment kapasitesini artırıcı etkisiyle (9) bağımtısı yardımıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılan yaklaşımın hata oranları 0.64~1.47 aralığında değişmektedir.

Çalışmada önerilen ikinci yaklaşık yöntemle, döşeme donatılarının negatif eğilme etkisinde kiriş moment kapasitesini artırıcı etkisinin etkili tabla genişliği yardımıyla ($b_c = \text{Min}(0.8 \times L_1, 0.5 \times L_2)$) belirlenmesine çalışılmıştır. Yaklaşık yöntemde kiriş moment kapasitesi, negatif eğilme etkisi için önerilen etkili tabla genişliği içinde kalan döşeme donatıları da dikkate alınarak, TS500-2000'de verilen taşıma gücü yöntemindeki kabullerle belirlenen M_r moment taşıma gücünün %40 artırılmasıyla belirlenmektedir. Bilindiği üzere, T500-2000'de etkili tabla genişliği -betonun çekme dayanımı ihmal edildiğinden- tabla betonunun basınca çalışması durumu dikkate alınarak ifade edilmektedir. Böylece yapısal çözümleme ve şekil değiştirme hesapları için gerekli eylemsizlik momentlerinin belirlenmesinde göz önüne alınacak kesit, tabladaki basınç gerilmelerinin düzgün yayılmadığı ve dağılımın kesit boyutlarına, kiriş açıklığına ve mesnet koşullarına bağlı olarak değişeceği gözetilerek, basınç gerilmesi için eşdeğer düzgün dağılımın varsayıldığı etkili tabla genişliği ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla önerilen etkili tabla genişliğiyle, T500-2000'de verilen tabla genişliği, kavramsal olarak birbirinden farklıdır. (örneğin önerilen tabla genişliği, yapısal çözümlemede eylemsizlik momentlerinin belirlenmesinde kullanılmamalıdır). Önerilen yaklaşım, analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, hata oranlarının 0.86~1.32 aralığında değiştiği gözlenmiştir.

Negatif eğilme etkisinde tabla donatılarının kiriş moment kapasitesi ve bu kapasiteye göre belirlenen kolon kesme kuvveti (kuvvetli kolon zayıf kiriş prensibi gereği) üzerinde, gövde kesiti çekme donatısının azalması ve gövde kesiti basınç donatısının artması durumunda belirgin bir etkisi vardır. Betonarme bir kirişin doğrusal olmayan davranışının gözlemlendiği moment-eğrilik analizlerinde, dikdörtgen kesit varsayımıyla tabla donatılarının ihmal edilmesi, gerçekçi malzeme davranış modellerinin kullanılmasına rağmen kiriş moment kapasitesinin olduğundan küçük; kiriş yerdeğiştirme ve/veya dönme kapasitesinin ise olduğundan daha büyük belirlenmesine neden olmaktadır. Belirgin süneklik istemine maruz bir iç aks kirişinin, negatif ve pozitif eğilme etkisindeki moment kapasitesinin belirlenmesi

Döşeme Donatılarının İç Aks Kirişlerinin Negatif Moment Kapasitesi Üzerine Etkisi

amacıyla çeşitli varsayımlar esas alınarak yapılan analitik ve deneysel karşılaştırmalardan aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

- Negatif eğilme etkisindeki tablalı kirişler için yapılan sınırlı sayıda deneysel karşılaştırmada, deneysel moment kapasitesi ile dikdörtgen kesit varsayımıyla, tabla donatıları ihmal edilerek belirlenen taşıma gücü momenti oranları 1.62~3.78 arasında değişmektedir. Daha geniş bir inceleme aralığında, deneysel sonuçlara yakın sonuç veren analitik moment-eğrilik analizleri yardımıyla belirlenen kiriş moment kapasitesi ile dikdörtgen kesit varsayımıyla belirlenen moment taşıma gücü arasındaki oranların ise 1.37~6.39 arasında değiştiği belirlenmiştir.
- TS500-2000'de -tabla betonunun basınca çalışması durumu için- tanımlanan etkili tabla genişliği esas alınarak belirlenen tablalı kirişlerde, negatif eğilme altında $1.4 \times M_r$ yaklaşımının, kiriş moment kapasitesini yansıtmakta yetersiz kaldığı ve özellikle kiriş çekme donatısı oranındaki azalma ile söz konusu yaklaşımdaki hata oranlarının, tasarım bağlamında kabul edilebilir seviyelerin üzerine çıktığı söylenebilir.
- Pozitif eğilme etkisinde, kiriş mesnet kesitlerinde $\rho'/\rho \geq 1.0$ olacağı varsayımıyla, tabla donatılarının kapasite üzerindeki etkilerinin sınırlı olacağı söylenebilir. Bu varsayımla yapılan kesit analizlerinde, moment eğrilik analizlerinden belirlenen kiriş moment kapasitesinin, dikdörtgen kesit varsayımıyla belirlenen $1.4 \times M_r$ kapasitesine oldukça yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Semboller

- b : Kiriş kesiti tabla genişliği
b_e : Negatif eğilmede etkili tabla genişliği
b_w : Kiriş gövde genişliği
b_{TS500} : Tablanın basınca çalışması durumu için TS500-2000'de verilen etkili tabla genişliği
d : Kiriş etkili derinliği
d_b : Basınç donatısı çapı
f_{cc} : Sargılı beton basınç dayanımı
f_{ck} : Karakteristik beton basınç dayanımı
f_{co} : Sargısız beton basınç dayanımı
f_{yk} : Boyuna donatının karakteristik akma dayanımı
f_{su} : Donatı çeliği kopma dayanımı
f_{s/Du} : Basınç etkisindeki donatı çeliği sınırlı gerilmesi
h : Kiriş yüksekliği
L₁ : Kolon-kiriş birleşiminde eğilme doğrultusuna dik kiriş açıklığı
L₂ : Kolon-kiriş birleşiminde eğilme doğrultusundaki kiriş açıklığı
ℓ_n : Kiriş temiz açıklığı (kolon yüzünden kolon yüzüne)
L_p : Plastik mafsallık boyu

M_{maks}	: Moment-eğrilik analizinden belirlenen moment kapasitesi
M_n	: Kiriş gövde kesiti esas alınarak belirlenen karakteristik taşıma gücü momenti
M_p	: Eğilme momenti kapasitesi
M_r	: Kiriş gövde kesiti esas alınarak belirlenen taşıma gücü momenti
M_{r*}	: TS500-2000'e göre tablalı kesit esas alınarak belirlenen taşıma gücü momenti
M_{yr}	: Dikdörtgen kesitli çift donatılı kirişin yaklaşık taşıma gücü momenti [$A_s f_{yd}(d-d')$]
s	: Kiriş mesnet kesitindeki enine donatı aralığı
V	: Kesme kuvveti
V_e	: Kiriş uç bölgelerinde enine donatı hesabında esas alınacak kesme kuvveti
x_i	: i. tabla donatısının döşeme yüzüne en yakın kiriş boyuna donatısına göre yatay mesafesi
δ_d	: Negatif eğilme etkisinde kirişin eksenini doğrultusundaki uzama miktarı
δ_i	: i. tabla donatısının eksenini doğrultusundaki toplam uzama miktarı
ϵ_{cu}	: Sargısız betonun maksimum birim kısalması
ϵ_i	: i. tabla donatısının eğilme doğrultusundaki birim şekil uzaması
ϵ_{maks}	: Kiriş gövde kesiti çekme donatısı birim şekil değiştirmesi
ϵ_{sh}	: Donatı çeliği pekleşme başlangıç birim şekil değiştirmesi
ϵ_{su}	: Donatı çeliği kopma birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_{s/Du}$: Basınç etkisindeki donatı çeliği sınır şekil değiştirmesi
ϕ	: Eğrilik
γ_c	: Beton hesap basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan malzeme katsayısı
γ_s	: Donatı çeliği hesap dayanımının belirlenmesinde kullanılan malzeme katsayısı
ρ	: Kiriş gövde kesiti çekme donatısı oranı
ρ'	: Kiriş gövde kesiti basınç donatısı oranı

Kaynaklar

- [1] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Mart 2007.
- [2] Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TS-500, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [3] Building Codes Requirements for Reinforced Concrete, ACI-318-02, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [4] Ersoy, U., Betonarme Kiriş ve Kolonların Moment Kapasitelerinin Saptanması, İMO Teknik Dergi, 1998, Cilt 9, Sayı 4, Sayfa 1781-1797.
- [5] Ma, S.Y.M., Bertore, V.V, and Popov, E.P., Experimental and Analytical Studies On Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Rectangular and T-Beams, Report EERC 76-2, University of California, Berkeley, May 1976, 241 pages.

- [6] Cheung, P.C., Poulay T., Park, R., Interior and Exterior Concrete Beam-Column Joints of a Prototype Two-Way With Floor Slab Designed For Eartquake Resistance, Report 89-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, March 1989, 80 pages.
- [7] French, C.W., and Boroojerdi, A., Concribution of R/C Floor Slabs in Resisting Lateral Loads, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 115 No.1, January, 1988, pp. 1-18.
- [8] Kurose, Y., Guimaraes, G.N., Liu, Z., Kreger, M.E., and Jirsa, J.O., Studi of Reinforced Beam-Column Joints Under Uniaxial and Biaxial Loading, PMFSEL Report 88-02, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, U.S.A., December 1988.
- [9] Nakata, S., Test of Reinforced Concrete Beam Column Assemblages, BRI Research Papaer No 99, U.S. – Japan Cooperative Researh Program, Building Research Institute Ministry of Construction, March 1983.
- [10] Durani, A.J., and Wight J.K., Experimental Analytical Study of Internal Beam to Column Connections Subjected to Reversed Cyclic Loadings, *Report* No. UMEE 82R3, Department of Civil Engineering, University of Michigan, July, 1982.
- [11] Durani, A.J., and Zerbe H.E., Seismic Resistance of R/C Exterior Connections With Floor Slab, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113 No.8, August, 1987, pp. 1850-64.
- [12] Pantazopolous, S. J., Moehle, J. P., and Shahrooz, B. M., Simple analytical model for T-beams in flexure, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114 No.7, 1988, pp. 1507-1523.
- [13] Shahrooz, B. M., Pantazopolous, S. J., and Chern, S.P., Modeling Slab Contribution in Frame Connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118 No.9, 1992, pp. 2475-2494.
- [14] Pantazopolous, S. J., and Moehle, J. P., Identification of effects of slabs on tlexural behavior of beams, Journal of Eng. Mech., ASCE, Vol. 116 No.1, 1990, pp. 91-106.
- [15] Pantazopolous, S. J., and Moehle, J. P., Truss model for 3-D behavior of R/C exterior connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116 No.2, 1990, pp. 298-315.
- [16] Building Codes Requirements for Reinforced Concrete, ACI-318-05, American Concrete Institute, Detroit, 2005.
- [17] Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACI-352-02, American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [18] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Structural Journal, 1988, Vol. 114, No. 8, 1804-1826.
- [19] Yalçın, C., and Saatçioğlu, M., Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Columns, Computers and Structures, 2000, No. 8, 539-555.
- [20] StatSoft Inc. STATISTICA V.6.0 for Windows. Tulsa, OK, USA;1995.