Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 23(3), 209-220, 2017

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarların taşıma gücü momenti hesabı için basit bir yaklaşım

A simple approach for the calculation of moment capacity of rectangular shear walls

Barış ERDİL[1*]

[1]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye.
bariserdil@yyu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.02.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 05.05.2016
doi: 10.5505/pajes.2016.98624
* Yazışılan yazar/Corresponding author
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Betonarme perde duvarlar çok fazla sayıda donatı barındırmaları nedeniyle, taşıma gücü momentlerinin hesabı zor ve zahmetli olmaktadır. Bu amaçla yazılmış bilgisayar yazılımları bulunmasına rağmen bu yazılımları edinmek de ayrı bir külfet gerektirmektedir. Bu çalışmada 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanan dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarların taşıma gücü momentlerinin (M_r) hesabı için basit bir bağıntı önerilmektedir. Önerilen bağıntı perde duvar uzunluğu ve kalınlığı, çekme bölgesinde yer alan perde uç bölgesi donatıları, eksenel yük seviyesi gibi kolayca belirlenebilecek değişkenleri içerdiğinden pratik olmaktadır. Bu bağıntı ile bulunmuş momentlerin, detaylı hesap ile bulunmuş moment değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Önerilen bağıntı kullanılarak çeşitli büyüklüklerde ve çeşitli donatı oranlarına sahip dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarlar için M_r abakları oluşturulmuş ve makale ekinde sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Betonarme perde duvar, Taşıma gücü momenti, Moment kapasitesi

Abstract

Calculation of the moment capacity of reinforced concrete (RC) shear walls is a hard and time consuming task since they have more reinforcement rows. Although there exist some software to overcome this difficulty, those software require some expense. In this study, a simple equation is proposed to calculate the moment capacity (M_r) of rectangular RC shear walls which are designed according to the 2007-Turkish Earthquake Code. The proposed equation is simple because it includes variables which are easy to determine such as length and thickness of the shear wall, reinforcements in the boundary member at the tension zone and the axial load level. Moment capacities from the proposed equation are found to be very close to the ones from the detailed analysis. Using the proposed equation, charts for the moment capacity (M_r) of rectangular RC shear walls having varying dimensions and varying reinforcement ratio were developed and given in the appendix.

Keywords: Reinforced concrete shear wall, Moment capacity, Plastic moment capacity

1 Giriş

2007 tarihli Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte betonarme perde duvarlar; uzunluk/kalınlık oranının en az yedi olduğu düşey taşıyıcı elemanlar olarak tanımlanmaktadır [1]. Kolonlar gibi düşey taşıyıcı elemanlardan olmalarına rağmen betonarme perde tasarımları ve davranışları kısmen kolonlardan farklıdır. Kolonlar çoğunlukla eğilme elemanları gibi davranmalarına karşın perdeler yüksekliklerine bağlı olarak kesme elemanı veya kesme ve eğilme elemanı gibi davranabilmektedir. Bina yüksekliği ne olursa olsun bir binada yer alan perdeler, sahip oldukları büyük rijitlikleri nedeniyle, taban kesme kuvvetinin güvenle taşınması ve kat ötelemelerinin azaltılması konusunda kolonlardan çok daha fazla etkili olmaktadır [2],[3].

Çoğunlukla kesme kuvvetlerine göre tasarlanan perdelerin bina yüksekliği arttığında eğilme momenti etkilerine göre de tasarlanması ve güvenliğin sağlanması gerekmektedir [3]-[5]. Tasarım için eleman kapasitelerinin kabul edilebilir hata payları ile hesabı, eleman üzerine etkiyen kuvvetlerin güvenli bir şekilde taşınıp taşınmamasını ve dolayısıyla binanın güvenliğini doğrudan etkilediği için önemlidir.

Perdelerin kesme kuvvetlerine göre tasarımı ve kapasitelerinin nasıl hesaplanacağı 2007-Deprem Yönetmeliği başta olmak üzere birçok kaynakta ayrıntılı bir şekilde verilmektedir [1],[6],[7]. Eğilme momentleri altında tasarım bahsi geçen kaynaklarda anlatılmakta fakat taşıma gücü momentlerinin nasıl hesaplanacağı üzerinde pek durulmamaktadır. Bunun sebebi perdelerin taşıma gücü momentlerinin kolon taşıma gücü momentleri gibi hesaplanabilmesidir. Fakat yapılacak olan hesap, perdelerin kolonlara nazaran çok fazla donatı barındırması sebebiyle zahmetli olabilmektedir. Bu amaca hizmet edecek yazılımlar mevcuttur fakat bu programlara sahip olmak da bir külfet gerektirmektedir.

Bu çalışmada çerçeveli ve perdeli sistemlerde yer alan betonarme perde duvarların taşıma gücü momentlerini etkileyen faktörler üzerinde durulmakta ve bu faktörler dikkate alınarak kritik perde yüksekliği boyunca tasarlanacak olan dikdörtgen kesitli perdelerin taşıma gücü momentlerinin (M_r) basit bir şekilde hesaplanabilmesine olanak sağlayacak bir bağıntı önerilmektedir. Önerilen bağıntı dikkate alınarak dikdörtgen kesitli perdelerin taşıma gücü momentleri için abaklar oluşturulmuş ve makale ekinde sunulmuştur.

2 2007-Deprem yönetmeliği ve TS-500'de perdeler ile ilgili verilen bilgiler

2.1 Perde kalınlığı (b_w)

2007-Deprem Yönetmeliği'nde süneklik düzeyi yüksek perdeler ile ilgili bilgilerin verildiği Bölüm 3.6'da betonarme perde duvar, perde olarak kısaltılmakta ve uzunluğunun kalınlığına oranı en az yedi olan düşey taşıyıcı elemanlar olarak nitelendirilmektedir. Çerçeveli ve perdeli sistemlerde

kullanılacak perdeler uç bölgeleri ve gövde kısımlarından oluşmaktadır. Özel durumlar dikkate alınmadığı durumda perde kalınlığı (b_w) gövde bölgesinde $h_i/20$'den ve 200 mm'den, perde uç bölgelerinde ise $h_i/15$'den ve 200 mm'den az olmamalıdır. Burada h_i kat yüksekliğini ifade etmektedir. Bununla birlikte perde kalınlığı ile ilgili bazı özel durumlar da ayrıca yönetmelikte verilmektedir. Genel olarak çerçeveli ve perdeli yapılarda kullanılan perde kalınlıkları 200 mm ile 300 mm arasında değiştiğinden bu çalışmada genel kullanım üzerinde durulmuş, özel durumlar dikkate alınmamıştır.

2.2 Kritik perde yüksekliği (H_{cr})

Kritik perde yüksekliği, kritik katlarda (genel olarak alt katlar) bulunan perdelerin tasarımına esas boyutların ve donatı miktarlarının değiştirilemeyeceği yüksekliği ifade etmektedir. 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre kritik perde yüksekliği Denklem (1)'de verilen bağıntılardan büyük fakat $2l_w$ değerinden küçük olmalıdır. Burada, l_w perdenin plandaki uzunluğunu, H_w ise toplam perde yüksekliğini göstermektedir.

$$H_{cr} \geq l_w \; ve \; H_{cr} \geq H_w/6 \qquad (1)$$

2.3 Perde uç bölgeleri

2007-Deprem Yönetmeliği'nde kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri etkileri altında tasarlanacak olan ve $H_w/l_w > 2.0$ olan perdelerde perde uç bölgeleri oluşturulacağı belirtilmekte ve perde uç bölgelerinin her birinin plandaki uzunluğunun (l_u), dikdörtgen kesitli perdelerde, kritik perde yüksekliği boyunca, $0.2l_w$'den ve $2b_w$'den daha az olmayacağı ifade edilmektedir. Kritik perde yüksekliğinin üstünde kalan perdelerde perde uç bölgesinin küçültülebileceği fakat perde uç bölge uzunluğunun $0.1l_w$'den ve b_w'den az olmayacağı yazılmaktadır.

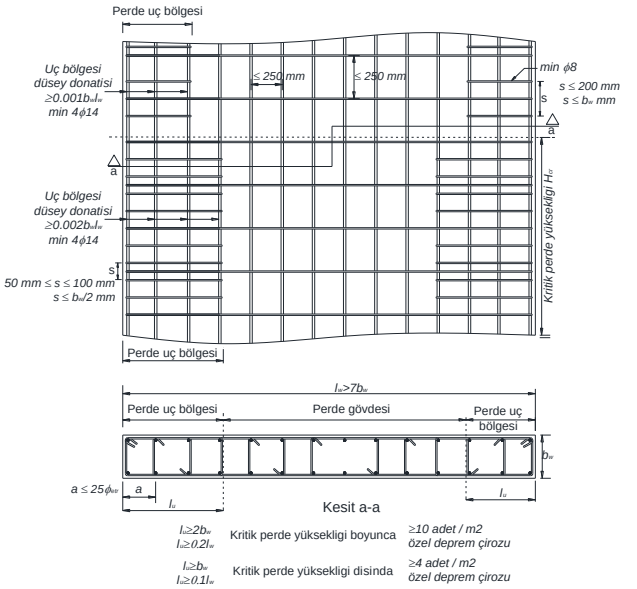
Perde uç bölgelerinin tasarımı genel olarak kolon tasarımına benzemektedir. Bu sebepledir ki uygulamada mühendisler perde uç bölgelerini koloncuk olarak tanımlamaktadırlar. 2007-Deprem Yönetmeliği'nde H_{cr} boyunca, düzenlenen her perde uç bölgesinde, boyuna donatı miktarının $0.002l_w b_w$ değerinden ve $4\phi14$'ten az olmayacağı, kritik perde yüksekliği üstünde yer alan perdelerde donatı oranının 0.001'e düşürülebileceği belirtilmektedir. Perde uç bölgelerinde bulunan boyuna donatılar enine donatılarla sarılmalı, bunun için kolonlar için verilen koşullara benzer koşullar perde uç bölgelerinde uygulanmalıdır. Enine donatı kolları arasındaki yatay uzaklığın (a), enine donatı çapının 25 katından fazla olmayacağı koşulu perde uç bölgelerinde kullanılacak boyuna donatı miktarını etkilemektedir (Şekil 1).

2.4 Perde gövdesi

Perde gövdesi, perde uç bölgeleri arasındaki bölüm olarak tanımlanmakta ve burada kullanılacak donatıların enkesit alanlarının, düşey ve yatay donatılar için ayrı ayrı olmak üzere, $0.0025b_w(l_w - 2l_u)$ değerinden az olmayacağı, boyuna ve enine donatı aralığının bu bölgede 250 mm'den fazla olmayacağı ifade edilmektedir.

2.5 Perde taşıma gücü momenti ve moment kapasitesi

2007-Deprem Yönetmeliği'nde M_r ile gösterilen perde taşıma gücü momentinin (moment capacity) f_{cd} ve f_{yd} tasarım dayanımları kullanılarak hesaplanacağı ifade edilmektedir. M_p ile gösterilen perde moment kapasitesinin (plastic moment capacity)ise f_{ck} ve f_{yk} karakteristik dayanımları ile çeliğin pekleşmesi dikkate alınarak hesaplanacağı belirtilmektedir. Daha kesin hesap yapılmadığı durumda $M_p = 1.25M_r$ (2007-Deprem Yönetmeliği'nin ilk versiyonunda $M_p = 1.4M_r$) şeklinde bir bağıntı önerilmektedir. Kurç ve diğ. [8] 1.25 katsayısı kullanılarak hesaplanacak moment kapasitesinin gerçek moment kapasitesi olmayacağı ve daha detaylı hesap yapmak isteyen mühendisleri yanıltabileceğini belirtmiş, aslında bu oranın 1.4'e yakın olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 1: 2007-Deprem Yönetmeliği'nde yer alan perde bilgileri ve tasarım kuralları.

$H_w/l_w > 2.0$ olan perdelerde her bir kat için hesaplanmak kaydıyla göz önüne alınan perdelerin taşıma gücü momentlerinin (M_r), perdenin güçlü doğrultusunda Denklem 2'de verilen koşulu sağlaması gerekmektedir. Aksi halde perde boyutları ve/veya donatıları artırılarak deprem hesabının tekrarlanması gerektiği belirtilmektedir. Perdeler eksenel yük ve eğilme etkisi altında olduklarından Denklem (2)'de gösterilen M_{ra} ve $M_{r\ddot{u}}$ momentleri (güçlü doğrultu için hesaplanan taşıma gücü momentleri) hesaplanırken kullanılacak eksenel kuvvetlerin momentleri küçük yapacak eksenel kuvvetler olması gerekmektedir.

$$(M_{ra} + M_{r\ddot{u}}) \geq 1.2\left(M_{ri} + M_{rj}\right) \qquad (2)$$

Yukarıdaki denklemde

M_{ra}; Perde alt ucunda hesaplanan taşıma gücü momentini,

$M_{r\ddot{u}}$; perde üst ucunda hesaplanan taşıma gücü momentini,

M_{ri}; Kirişin sol ucundaki perde yüzünde hesaplanan pozitif veya negatif taşıma gücü momentini,

M_{rj}; Kirişin sağ ucundaki perde yüzünde hesaplanan pozitif veya negatif taşıma gücü momentini göstermektedir.

Taşıma gücü momentlerinin hangi esaslara göre belirleneceği konusunda 2007-Deprem Yönetmeliği'nde bilgi verilmemekte ve depreme dayanıklı olarak tasarlanacak betonarme sistem elemanlarının boyutlandırılmasında ve donatı hesaplarında TS-500'de verilen "Taşıma Gücü Yöntemi"'nin kullanılmasının zorunlu olduğu belirtilmektedir [9]. TS-500'de eğilme ve eksenel yük etkisi altındaki elemanların boyutlandırılması ve donatılandırılmasında yapısal çözümlemeden elde edilen en

elverişsiz kesit zorlamalarının dikkate alınması gerektiği ifade edilmiş fakat taşıma gücü momentlerinin hesaplarının nasıl yapılacağının ayrıntıları verilmemiştir.

3 Perde taşıma gücü momenti (M_r) hesabı

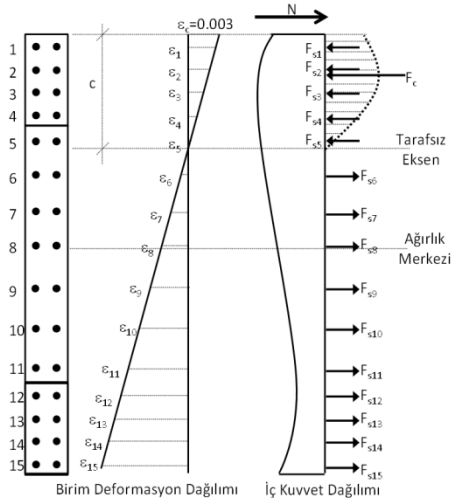
Perdeler kolonlar gibi eksenel yük ve moment etkisinde bulunmaktadır. Bu amaçla taşıma gücü momentleri hesaplanırken iç kuvvetlerin dış eksenel yük ile denge halinde olması gerekmektedir. İç kuvvetler ile dış kuvvetlerin denge durumunun belirlenmesi az donatılı elemanlarda basit olabilir fakat donatı sayısının fazla olduğu elemanlarda çok zahmetli olabilmektedir.

Şekil 2'de verilen perdede eksenel yük ile iç kuvvet dengesinin oluşturulabilmesi için aşağıdaki adımların izlenmesi gerekmektedir:

- Tarafsız eksen yüksekliği olan "c" ile ilgili bir varsayım yapılır,
- Bu varsayımla birlikte donatıların birim deformasyonları hesaplanır,
- Donatı birim deformasyonları kullanılarak donatıların gerilme değerleri hesaplanır,
- Donatıların gerilme değerleri dikkate alınarak donatı iç kuvvetleri hesaplanır,
- Betonda oluşan basınç gerilmeleri vasıtasıyla beton basınç kuvveti hesaplanır,
- İç kuvvetler ile dış kuvvet dengesi kontrol edilir,
- Kuvvet dengesi sağlanmıyorsa ilk maddeye gidilip tarafsız eksen yüksekliği ile ilgili yeni bir varsayım yapılır. Kuvvet dengesi sağlanıyorsa taşıma gücü momenti iç kuvvetlerin ağırlık merkezine olan uzaklıkları ile çarpılarak ve moment yönleri dikkate alınarak hesaplanır.

Yukarıda bahsedilen prosedür çoğu betonarme kitabında yer almaktadır [6],[7]. Prosedür, donatısı az olan elemanlarda el hesabı ile kolayca uygulanabilmesine rağmen donatısı fazla olan sistemlerde mutlaka bir yazılıma ihtiyaç duymaktadır. Bunun nedeni olarak, kuvvet dengesi oluşturacak şekilde tarafsız eksen mesafesinin doğru tahmin edilmesinin zor olması ve her yanlış tahmin bütün donatıların birim deformasyonlarının, gerilmelerinin ve kuvvetlerinin yeniden hesaplanmasını gerektirmesi gösterilebilir. Bu sebepledir ki fazla donatı içeren perdelerin taşıma gücü momentlerinin hesabı çoğunlukla bir yazılım vasıtası ile yapılmaktadır. Yazılım kullanmanın veya yazılıma her durumda ihtiyaç duymanın bir dezavantajı vardır; hesapların yapıldığı yerde yazılımın olmaması veya acil hesap gerektiren bir durumda perdelerin taşıma gücü momentlerini bulmak zahmetli bir süreç haline gelmektedir. Yazılıma her durumda ihtiyaç duyulması taşıma gücü momentinin nasıl hesaplanacağı bilgisinin de zamanla körelmesine sebep olabilmektedir. Ayrıca öntasarım yapılırken kullanılacak perdenin taşıma gücü momentinin kolay bir şekilde hesaplanabilmesi tasarımı yapan mühendise hem zaman kazandıracak hem de perde tasarımının daha bilinçli ve daha özgüvenli yapılmasını sağlayacaktır.

Cardenas ve Magura [10] yüksek katlı binalarda ACI 318-71'de belirtilen minimum donatı oranının kullanılmasının çoğu zaman eğilme dayanımı için yeterli olduğunu tespit emiş ve bahsi geçen şartnameye göre düzenli aralıklarla yerleştirilmiş düşey donatılara sahip dikdörtgen kesitli perdelerin eksenel yük ve kesme kuvveti etkisi altındaki moment kapasitelerinin hesabı için Denklem (3)'te verilen bağıntıyı önermişlerdir. Aşağıda verilen bağıntılar Amerikan Birim Sistemi kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 2: Tipik bir perdenin birim deformasyon dağılımı ile iç kuvvet dağılımı.

$$M_u = A_s f_y l_w \left[\left(1+\frac{N_u}{A_s f_y}\right)\left(\frac{1}{2}-\frac{\beta_1 c}{2l_w}\right)-\frac{c^2}{l_w^2}\left(1+\frac{\beta^2}{3}-\beta_1\right)\right] \quad (3)$$

Burada

$$\frac{c}{l_w}=\frac{q+\alpha}{2q+0.85\beta_1} \qquad q=\frac{A_s f_y}{l_w h f'_c} \qquad \alpha=\frac{N_u}{l_w h f'_c} \qquad \beta=\frac{f_y}{87000}$$

M_u = Tasarım moment kapasitesi, in.lb
A_s = Kesitteki bütün boyuna donatı alanlarının toplamı, sq.in
f_y = boyuna donatıların belirlenmiş akma dayanımı, psi
l_w = Perdenin plandaki uzunluğu, in.
c = Tarafsız eksenin en uzak basınç lifine olan mesafesi (tarafsız eksen yüksekliği), in.
h = Perde kalınlığı, in.
N_u = Tasarım eksenel yükü, lb
f'_c = Beton için belirlenmiş olan basınç dayanımı, psi

β_1=en fazla 4000 psi (281.0 kgf/cm^2) dayanıma sahip betonlar için 0.85 ve bu değer 4000 psi'nin üstündeki beton dayanımlarında her 1000 psi'lik (70 kgf/cm^2) artışta 0.05 azaltılacaktır.

PCA (Portland Cement Association) araştırma sonuçlarına göre yukarıda verilen bağıntının H_w/l_w oranı 1'e eşit ve daha fazla olan dikdörtgen kesitli perdelerin moment kapasitelerini iyi tahmin ettiği belirtilmesine rağmen nispeten karmaşık olması sebebiyle Cardenas ve diğ. [11] bağıntıyı güncellemiş ve daha basit bir bağıntı önermişlerdir (Denklem (4)).

$$M_u = 0.5 A_s f_y l_w \left(1+\frac{N_u}{A_s f_y}\right)\left(1-\frac{c}{l_w}\right) \quad (4)$$

Denklem 4 nispeten basit görünmesine rağmen içerdiği "c" değişkeni sebebiyle aslında basit değildir. Zaten tarafsız eksen mesafesi olan "c"nin doğru hesaplanabilmesi için Bölüm 3'ün başında belirtilen adımların takip edilmesi ve deneme yanılma yöntemi ile "c" mesafesinin doğruya yakın bir şekilde bulunması gerekmektedir. Hesabın zahmetli oluşu da "c"

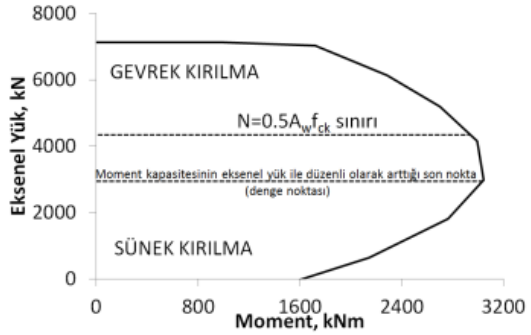
mesafesinin kolay tayin edilememesinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla "c" mesafesine ve bahsi geçen işlem adımlarına gerek duymayan bir bağıntının daha basit bir bağıntı olacağı açıktır.

4 Perde taşıma gücü momentini etkileyen faktörler

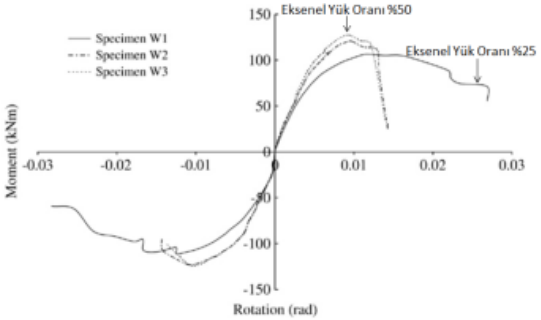
Perdelerin taşıma gücü momentlerinin hesabı için basit bir yaklaşım önerebilmek için öncelikle perde taşıma gücünü hangi faktörlerin etkilediğinin ve bu faktörlerin ne kadar etkili olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde verilen grafiklerde yer alan eksenel yük-moment etkileşim diyagramları ile taşıma gücü momentleri SAP2000 v.14 programında yer alan Section Designer modülü (kısaca Section Designer) kullanılarak elde edilmiştir [12].

4.1 Eksenel yükün taşıma gücü momentine etkisi

Eksenel yük ve moment arasındaki ilişki en iyi etkileşim diyagramları vasıtası ile gösterilebilir. Şekil 3a'dan görüleceği üzere eksenel yük seviyesi arttıkça taşıma gücü momenti belli bir noktaya (denge noktasına) kadar artmakta fakat daha sonra azalmaktadır. Eksenel yükün artıp taşıma gücü momentinin azalmaya başladığı üst bölgede gevrek kırılma görüldüğü (Şekil 3b), eksenel yükün nispeten düşük olduğu ve eksenel yük ile birlikte taşıma gücü momentinin arttığı alt kısımda ise sünek kırılma gözlendiği bilindiğinden 2007-Deprem Yönetmeliği'nde yaklaşık olarak denge durumuna karşılık gelen eksenel yük seviyesi sınır değer olarak seçilmiştir [1],[6],[7].



(a): Moment-Eksenel yük etkileşim diyagramı.

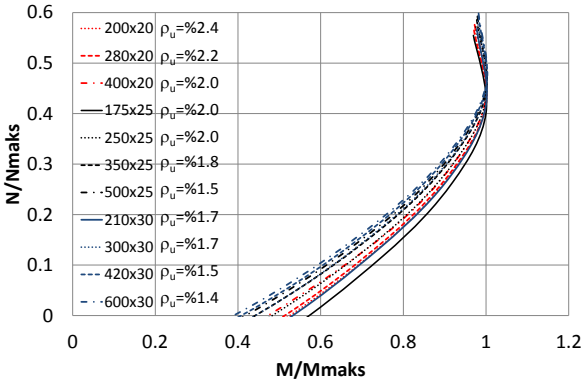


(b): Farklı eksenel yük seviyelerinin moment kapasitesine etkisi [13].

Şekil 3: Tipik bir perdenin moment-eksenel yük etkileşim diyagramı ile eksenel yük seviyesinin moment kapasitesine etkisi.

Şekil 4'te etkileşim diyagramlarının başlangıç eğimlerinin l_w/b_w oranı ile değişimi verilmektedir. Şekilde 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanmış farklı l_w/b_w oranlarına ve farklı perde uç bölgesi donatı oranlarına sahip 12 adet perde karşılaştırılmıştır. Perde uç bölgesi donatı oranı (ρ_u)çekme bölgesinde yer alan perde uç bölgesi boyuna donatıların alanları toplamının perde uç bölgesi alanına bölünmesi ile bulunmuştur. Grafikten görüldüğü üzere etkileşim diyagramının başlangıç eğimi hem l_w/b_w oranının artması hem de perde kalınlığının artması ile birlikte azalmaktadır. Dolayısıyla eksenel yük seviyesinin taşıma gücü momentine etkisinde hem b_w hem de l_w/b_w oranı birlikte değerlendirilmelidir.

Perdeler kesme kuvveti ve eğilme momentleri bakımından kolonlardan çok daha fazla kuvvete maruz kalmalarına karşın aynı durum eksenel yük için söylenemez çünkü enkesit alanları büyük olduğundan düşey yüklerin birim alana yaptığı etki kolonlardan daha az olmaktadır. Güçlü kolon-zayıf kiriş ilkesinin perdeler için de geçerli olduğu düşünüldüğünde perdelerin taşıma gücü momentleri hesaplanırken eksenel yükün ihmal edilmesi güvenli tarafta kalınmasını sağlayacaktır. Fakat 2007-Deprem Yönetmeliği'nde tasarım kesme kuvvetinin hesabında kullanılacak taşıma gücü momenti (M_r) hesaplanırken eksenel yük seviyesinin dikkate alınması moment kapasitesini (M_p) arttıracağından tasarım kesme kuvvetinin de artmasına ve kesme güvenliğinin sağlanmasına yardımcı olacaktır. Bu sebeple taşıma gücü momenti hesabında eksenel yük değeri dikkate alınmalıdır.



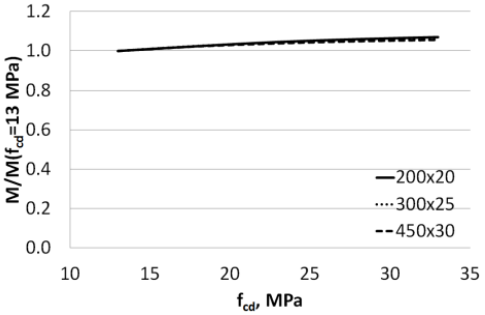
Şekil 4: Etkileşim diyagramının başlangıç eğiminin l_w/b_w oranı ile değişimi.

4.2 Beton tasarım basınç dayanımının taşıma gücü momentine etkisi

Şekil 5'te farklı uzunluk ve kalınlık değerlerine sahip perdelerin taşıma gücü momentlerinin beton dayanımı ile değişimi verilmektedir. Verilen grafikte Section Designer programı kullanılarak hesaplanmış moment değerleri 2007-Deprem Yönetmeliği'nde belirtilen minimum beton basınç dayanımı için hesaplanan taşıma gücü momentine göre normalize edilmiştir. Grafikten eksenel yükün ihmal edildiği durumda beton basınç dayanımının taşıma gücü momentine olan katkısının ihmal edilecek boyutlarda olduğu görülmektedir.

4.3 Donatı akma gerilmesinin taşıma gücü momentine etkisi

Taşıma gücü momenti hesaplanırken, donatıların her birinin alanı (A_{si}) donatı gerilmeleri (f_{si}) ile çarpılarak bulunan donatı kuvvetleri (F_{si}) ağırlık merkezine olan mesafeler (z_i) ile çarpılmaktadır ($A_{si}f_{si}z_i$). Bu çarpım doğrusal bir çarpım olduğundan donatı akma gerilmesi taşıma gücü momentini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 5: Beton basınç dayanımının taşıma gücü momentine olan etkisi.

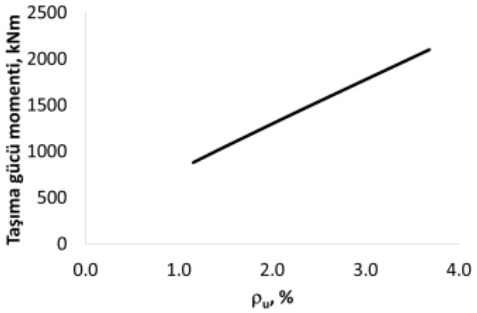
4.4 Donatı alanının taşıma gücü momentine etkisi

Bölüm 4.3'te bahsedilen çarpımdan ($A_{si}f_{si}z_i$) görüldüğü üzere donatı alanının da taşıma gücü momentine doğrudan etkisi vardır. Fakat donatının kesit ağırlık merkezine olan konumu (z_i) taşıma gücü momentine olan katkısını etkilemektedir. Bir başka deyişle donatı, kesit ağırlık merkezine ne kadar uzaksa taşıma gücüne olan etkisi o kadar artmaktadır. Perdelerin uç bölgelerinde bulunan donatılar ile gövdesinde bulunan donatıların miktarı ayrı olduğundan, hangisinin daha etkili olduğunu belirlemek önemlidir.

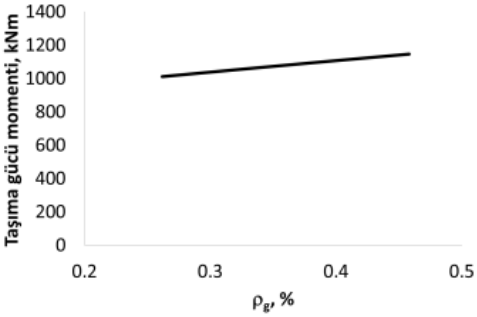
Perde uç bölgesine yerleştirilen donatıların çapı uygulamada çoğunlukla gövde bölgesine yerleştirilen donatıların çapından büyük olmaktadır. 2007-Deprem Yönetmeliği'nde de perde uç bölgesinde kullanılacak minimum donatının 4ϕ14 olduğunun belirtmesi bu bölgede nispeten daha büyük çaplı ve daha yoğun donatı kullanımına yol açmaktadır. Bunun yanında perde uç bölgesinin kesit ağırlık merkezine olan uzaklığının fazla olması taşıma gücü momentine olan etkisinin daha büyük olmasına sebep olmaktadır. Şekil 6a'da 2000x200 mm boyutlarına sahip bir perde için perde uç bölgesinde kullanılan donatıların oranlarının taşıma gücü momentine olan etkisi verilmektedir. Buradan görüldüğü üzere taşıma gücü momenti perde uç bölgesi donatı oranı ile doğrusal olarak artmakta ve artış miktarı ihmal edilemeyecek kadar büyük olmaktadır. Şekil 6b'de verilen grafikte ise 2000x200 mm ebatlarında ve ρ_u = %1.5 olan bir perde ele alınmış ve perde gövde bölgesine yerleştirilen donatıların oranlarının (ρ_g) perdenin taşıma gücü momentine olan etkisi incelenmiştir. Grafikten perde gövdesine konulan donatıların taşıma gücü momentine etkisinin olduğu fakat bu etkinin perde uç bölgesine konulan donatılar ile kıyaslandığında çok küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla taşıma gücü momenti hesaplanırken gövde donatılarının ihmal edilmesi yanlış bir varsayım olmayacaktır.

4.5 Ağırlık merkezine olan uzaklığın (perdenin plandaki uzunluğu) etkisi

Taşıma gücü momentinin hesabı için yazılan ($A_{si}f_{si}z_i$) bağıntısından görüldüğü üzere donatıların ağırlık merkezine olan uzaklıklarının taşıma gücü momentine etkilerinin olduğu ve en uzak noktada yer alan donatının en fazla etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ağırlık merkezine olan uzaklık, perdenin plandaki uzunluğu (l_w) arttıkça artacağı için, l_w'nin artması ile de taşıma gücü momenti artacaktır. Ayrıca, lw'nin artması, donatıların ağırlık merkezine olan uzaklığını arttırmasının yanında donatı sayısının da artmasına vesile olacak (Şekil 7a) ve taşıma gücü bu sebeple bir miktar daha artacaktır. Dolayısıyla l_w'nin artışının taşıma gücü momentine olan etkisinin doğrusal olmadığı aslında üssel bir etkinin olduğu Şekil 7b'den görülebilir.

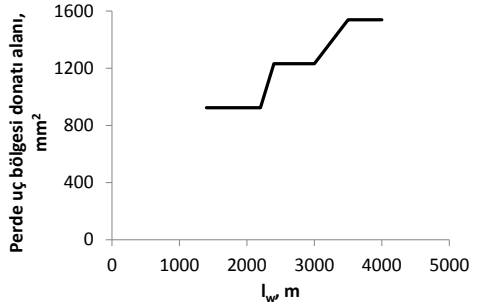


(a): Perde uç bölgesi.

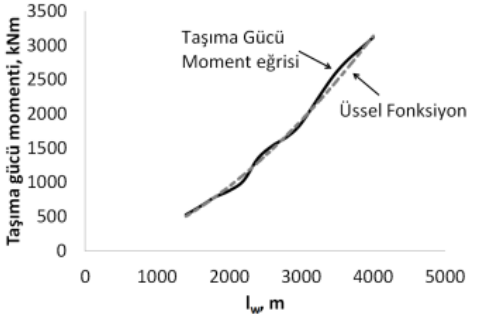


(b): Perde gövdesi.

Şekil 6: Perde uç bölgesi ve gövde bölgesi donatı oranlarının taşıma gücü momentine etkisi.



(a): l_w'nin perde uç bölgesi donatılarına etkisi.



(b): l_w'nin taşıma gücü momentine etkisi.

Şekil 7: l_w'nin perde uç bölgesi donatılarına ve taşıma gücü momentine etkisi.

5 Perde taşıma gücü momenti hesabı için basit bir yaklaşım

Mantıklı varsayımlar içeren basit bağıntılar mühendislik hesaplarına ayrılan zamanı azaltacak ve hataya müsait karmaşık hesaplardan mühendisleri kurtaracaktır. Bu amaçla karmaşık ve işlem yönünden fazla zaman isteyen perde taşıma

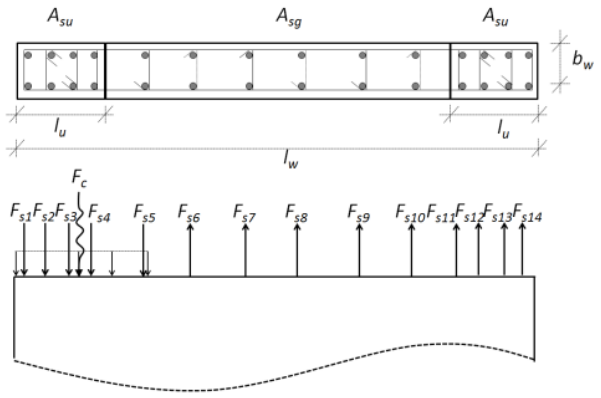
gücü momenti için basit bir bağıntı bulmanın mühendisler için faydalı olacağı düşünüldüğünden bu makaledeki çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada betonarme perdelerin taşıma gücü momentleri hesaplanırken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

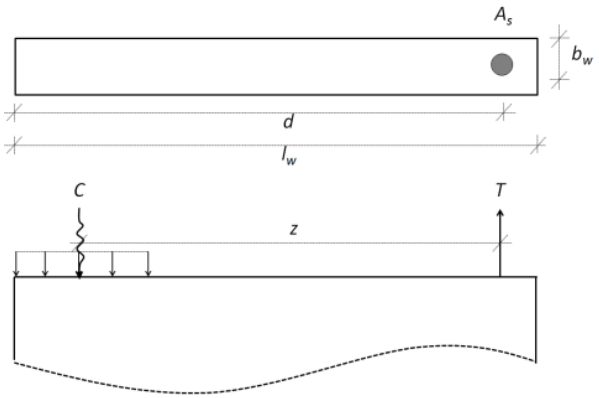
- Düzlem kesitler şekil değiştirdikten sonra düzlem kalırlar,
- Basınç bölgesindeki betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi paraboliktir,
- Betonun çekme dayanımı çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir,
- Donatı için elasto-plastik gerilme-birim şekil değiştirme grafiği kullanılmıştır,
- Sargılama etkisinin taşıma gücü momentinden ziyade şekil değiştirmeye etkisi olması sebebi ile bu çalışmada sargılama etkisi ihmal edilmiştir,
- Basınç bölgesinin en dış lifindeki beton birim şekil değiştirme değeri 0.003 alınmıştır,
- Doğrusal birim deformasyon dağılımı kabul edilmiştir.

Perde taşıma gücü momentine eksenel yükün, donatı alanının, donatı akma gerilmesinin ve perdenin plandaki uzunluğunun etki ettiği bir önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştı. Perdenin taşıma gücü momenti ile perde uç bölgesi donatısı ve donatı akma gerilmesi arasında doğrusal bir ilişki olduğu, perdenin plandaki uzunluğu ile ise üssel bir ilişki olduğu görülmüştü. Perde gövde donatısının ve betonun basınç dayanımının etkisi çok küçük olduğundan bu faktörler hesaplara ilave edilmemiştir.

Taşıma gücü momenti için bağıntı oluşturulurken 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanan gerçek perde Şekil 8'de görüldüğü gibi eşdeğer perdeye dönüştürülmüştür. Şekilde A_{su} her bir perde uç bölgesi için toplam donatı alanını, A_{sg} ise perde gövdesi toplam donatı alanını göstermektedir. Eşdeğer perdede gövde boyuna donatıları ile basınç bölgesinde yer alan perde uç bölgesi boyuna donatıları ihmal edilmiş, çekme bölgesinde bulunan perde uç bölgesi boyuna donatıları toplanıp tek bir donatı haline getirilerek perde uç bölgesi merkezine yerleştirilmiştir. Bu donatıların toplam kuvveti "T" ile gösterilmiş ve bu kuvvet boyuna donatıların alanları toplamının, boyuna donatı tasarım akma gerilmesi ile çarpımı şeklinde yazılmıştır ($T = \sum 2A_s f_{yd}$). "T" kuvveti bulunurken perdede yer alan çekme donatılarının tamamını temsil etmesi amacıyla $A_s f_{yd}$ ifadesi "2" ile çarpılmıştır. "2" sayısı aşağıda anlatılan moment koluna (z) fiziksel bir anlam katacak şekilde seçilmiştir. Eksenel yükün olmadığı durum için kuvvet dengesi düşünüldüğünde $T = C$ olmak zorundadır. Buradan hareketle taşıma gücü momenti basit donatılı dikdörtgen kesitlerdeki gibi bulunabilir ($M_r = Tz$). "T" çekme kuvvetinin "C" basınç kuvvetine olan mesafesini gösteren "z" değerinin (moment kolu) tek bilinmeyen olduğu görülmektedir. "z" değerini tespit edebilmek amacıyla farklı b_w ve l_w boyutlarına ve donatı alanlarına sahip 98 adet perde analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı yapı çözümlerinde genel olarak kullanılan perdelerin taşıma gücü momentlerinin hesabını kolaylaştırmak olduğundan, inşaat uygulamalarında sıklıkla kullanılan perde kalınlıkları ($200, 250\ ve\ 300\ mm$) ele alınmış ve buna bağlı olarak l_w/b_w için 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17 ve 20 değerleri dikkate alınarak her bir kalınlık için l_w uzunlukları hesaplanmıştır. Perde uç bölgesi donatı oranı (ρ_u) ise minimum %1, maksimum %4 seçilmiştir.



(a): Gerçek perde kesiti ve iç kuvvet dağılımı.



(b): Eşdeğer perde kesiti ve iç kuvvet dağılımı.

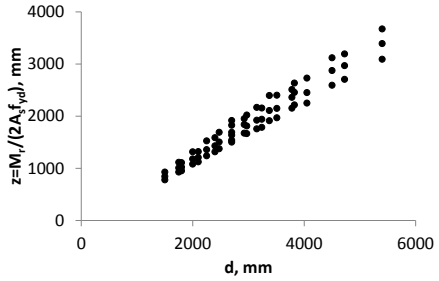
Şekil 8: Gerçek perde kesiti ve eşdeğer perde kesiti ile iç kuvvet dağılımları.

Tablo 1'de "z" bağıntısının hesabında kullanılan perdelerin özellikleri verilmektedir. Tabloda ρ_u çekme bölgesinde bulunan perde uç bölgesi donatı alanlarının perde uç bölgesi alanına oranını (perde uç bölgesi donatı oranını), l_g perde gövdesinin plandaki uzunluğunu, ρ_g ise perde gövdesi donatı oranını göstermektedir.

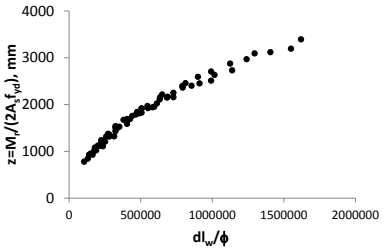
"z" değeri bulunurken öncelikle Section Designer programı kullanılarak bulunan taşıma gücü momentleri "$2A_s f_{yd}$" değerine bölünerek olması gereken "z" değerleri hesaplanmış ve bu değerlerin etkili yükseklik olan "d" ile ilişkisi Şekil 9a'da gösterildiği gibi araştırılmıştır. Burada "A_s" çekme bölgesinde bulunan perde uç bölgesi toplam donatı alanını ifade etmektedir. Şekilden "z" değerinin yalnız "d" ile ifade edilemeyeceği görüldüğünden "d" değerine ilave olarak kullanılacak olan parametreler araştırılmış ve "l_w/ϕ" ile "d"nin çarpımının "z" ile daha düzenli bir ilişki meydana getirdiği belirlenmiştir (Şekil 9b). Fakat grafikteki "dl_w/ϕ" değerleri çok büyük olduğundan ve moment kolunu ifade etmekten uzak olduğundan Şekil 9c'deki iyileştirme yapılarak "z" ile olan ilişki lineer hale getirilip fiziksel bir anlam kazandırılmaya çalışılmıştır. Şekilde "z" değerinin çok iyi korelasyon gösterdiği bağıntının ($z = 2.7325(dl_w/\phi)^{0.5} - 96.765$) karmaşık olması sebebiyle nispeten daha basit olan bir bağıntı önerilmiş ve bu bağıntının korelasyonun da iyi olduğu şekilde gösterilmiştir.

Tablo 1: "z" bağıntısı için kullanılan perdelerin özellikleri.

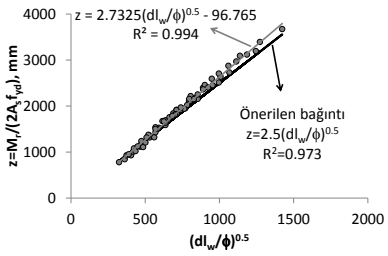
l_w mm	b_w mm	l_w/b_w	l_u mm	ρ_u %	l_g mm	ρ_g %
1400	200	7	400	1.5	600	0.25
1600	200	8	400	1.5	800	0.25
1800	200	9	400	1.5	1000	0.25
2000	200	10	400	1.5	1200	0.25
2200	200	11	440	1.4	1320	0.25
2400	200	12	480	1.7	1440	0.25
2600	200	13	520	1.6	1560	0.25
2800	200	14	560	1.4	1680	0.25
3000	200	15	600	1.3	1800	0.25
3500	200	18	700	1.4	2100	0.25
4000	200	20	800	1.3	2400	0.25
1400	200	7	400	2.4	600	0.25
1600	200	8	400	2.4	800	0.25
1800	200	9	400	2.4	1000	0.25
2000	200	10	400	2.4	1200	0.25
2200	200	11	440	2.1	1320	0.25
2400	200	12	480	2.6	1440	0.25
2600	200	13	520	2.4	1560	0.25
2800	200	14	560	2.2	1680	0.25
3000	200	15	600	2.1	1800	0.25
3500	200	18	700	2.2	2100	0.25
4000	200	20	800	2.0	2400	0.25
1400	200	7	400	3.7	600	0.25
1600	200	8	400	3.7	800	0.25
1800	200	9	400	3.7	1000	0.25
2000	200	10	400	3.7	1200	0.25
2200	200	11	440	3.4	1320	0.25
2600	200	13	520	3.8	1560	0.25
2800	200	14	560	3.5	1680	0.25
3000	200	15	600	3.3	1800	0.25
3500	200	18	700	3.5	2100	0.25
4000	200	20	800	3.1	2400	0.25
1750	250	7	500	1.3	750	0.25
2000	250	8	500	1.3	1000	0.25
2250	250	9	500	1.3	1250	0.25
2500	250	10	500	1.3	1500	0.25
2750	250	11	550	1.2	1650	0.25
3000	250	12	600	1.1	1800	0.25
3250	250	13	650	1.2	1950	0.25
3500	250	14	700	1.2	2100	0.25
3750	250	15	750	1.1	2250	0.25
4250	250	17	850	1.1	2550	0.25
5000	250	20	1000	1.1	3000	0.25
1750	250	7	500	2.0	750	0.25
2000	250	8	500	2.0	1000	0.25
2250	250	9	500	2.0	1250	0.25
2500	250	10	500	2.0	1500	0.25
2750	250	11	550	1.8	1650	0.25
3000	250	12	600	1.7	1800	0.25
3250	250	13	650	1.6	1950	0.25
3500	250	14	700	1.8	2100	0.25
3750	250	15	750	1.7	2250	0.25
4250	250	17	850	1.5	2550	0.25
5000	250	20	1000	1.5	3000	0.25
1750	250	7	500	3.1	750	0.25
2000	250	8	500	3.1	1000	0.25
2250	250	9	500	3.1	1250	0.25
2500	250	10	500	3.1	1500	0.25
2750	250	11	550	2.9	1650	0.25
3000	250	12	600	2.6	1800	0.25
3250	250	13	650	2.4	1950	0.25
3500	250	14	700	2.8	2100	0.25
3750	250	15	750	2.6	2250	0.25
4250	250	17	850	2.3	2550	0.25
5000	250	20	1000	2.4	3000	0.25
2100	300	7	600	1.1	900	0.25
2400	300	8	600	1.1	1200	0.25
2700	300	9	600	1.1	1500	0.25
3000	300	10	600	1.1	1800	0.25
3300	300	11	660	1.0	1980	0.25
3600	300	12	720	1.1	2160	0.25
3900	300	13	780	1.0	2340	0.25
4200	300	14	840	1.1	2520	0.25
4500	300	15	900	1.0	2700	0.25
5250	300	18	1050	1.0	3150	0.25
6000	300	20	1200	1.0	3600	0.25
2100	300	7	600	1.8	900	0.25
2400	300	8	600	1.8	1200	0.25
2700	300	9	600	1.8	1500	0.25
3000	300	10	600	1.8	1800	0.25
3300	300	11	660	1.6	1980	0.25
3600	300	12	720	1.6	2160	0.25
3900	300	13	780	1.6	2340	0.25
4200	300	14	840	1.5	2520	0.25
4500	300	15	900	1.6	2700	0.25
5250	300	18	1050	1.4	3150	0.25
6000	300	20	1200	1.4	3600	0.25
2100	300	7	600	2.7	900	0.25
2400	300	8	600	2.7	1200	0.25
2700	300	9	600	2.7	1500	0.25
3000	300	10	600	2.7	1800	0.25
3300	300	11	660	2.5	1980	0.25
3600	300	12	720	2.7	2160	0.25
3900	300	13	780	2.5	2340	0.25
4200	300	14	840	2.3	2520	0.25
4500	300	15	900	2.6	2700	0.25
5250	300	18	1050	2.2	3150	0.25
6000	300	20	1200	2.2	3600	0.25



(a)



(b)



(c)

Şekil 9: "z" değerinin hesap adımları.

Yapılan analizler sonucunda "z" değerinin Denklem (5)'te gösterildiği gibi alınmasının çok az hata payı ile taşıma gücü momentinin hesabına olanak verdiği görülmüştür.

$$z = 2.5\left(d\frac{l_w}{\emptyset}\right)^{0.5} \quad (5)$$

Taşıma gücü momentine eksenel yükün önemli bir etkisinin olduğu Bölüm 4'te ifade edilmişti. Bu etki de dikkate alındığında 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanan dikdörtgen kesitli bir perdenin taşıma gücü momentinin hesabı için Denklem (6)'daki bağıntı önerilmektedir. Eksenel yükün bazı durumlarda dikkate alınmaması olasılığı sebebiyle eksenel yük etkisi bir faktör ile bağıntıya eklenmiştir. Eksenel yük etkisi ihmal edildiği durumlarda bağıntı çok basit bir hal almaktadır.

Çalışmanın amacı 2007-Deprem Yönetmeliği'nin izin verdiği eksenel yük seviyeleri ile sınırlandırıldığından ve tasarıma esas taşıma gücü momentlerinin hesabını içerdiğinden Denklem (6)'da verilen bağıntı taşıma gücü momentinin eksenel yük ile birlikte düzenli olarak arttığı durumlar için geçerli olmaktadır. Şekil 4'te verilen eksenel yük-moment etkileşim diyagramlarında taşıma gücü momentinin $\frac{N_d}{A_w f_{cd}} \leq 0.4$ değerine kadar eksenel yük ile birlikte düzenli olarak arttığı, bu değerden sonra taşıma gücü momentinin azalmaya başladığı tespit edildiğinden önerilen bağıntının $\frac{N_d}{A_w f_{cd}} \leq 0.4$ durumlarında kullanılması önerilmektedir. Eksenel yük oranının 0.4'ten büyük olduğu perdelerde önerilen bağıntının geçersiz olması sebebiyle bu durumda daha ayrıntılı hesapların yapılması gerekmektedir.

$$M_r = 5A_s f_{yd}\left(d\frac{l_w}{\emptyset}\right)^{0.5}\alpha \quad (6)$$

Burada,

α = Eksenel yük faktörü, $\alpha = 1 + \frac{N_d}{A_w f_{cd}}\left(\frac{l_w}{b_w}\right)^{1.5 b_w}$ (bu bağıntıdaki birimler, kN ve m alınmalıdır),
d = Faydalı yükseklik ($d = l_w - \frac{l_u}{2}$), mm,
ϕ = Perde uç bölgesinde bulunan donatının çapı, mm
A_s = Çekme bölgesinde yer alan perde uç bölgesi boyuna donatılarının alanları toplamı, mm^2,
f_{yd} = Boyuna donatının tasarım akma dayanımı, MPa,
N_d = Tasarım eksenel yükü, N,
A_w = Perde brüt alanı, mm^2,
f_{cd} = Betonun tasarım basınç dayanımı, MPa.

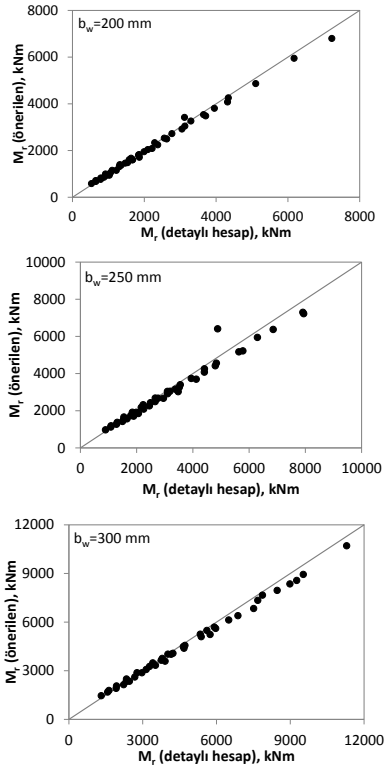
Denklem (6)'daki bağıntı oluşturulurken 2007-Deprem Yönetmeliği'nde $H_w/l_w > 2.0$ koşulunu sağlayan dikdörtgen kesitli perdeler için belirtilmiş olan kurallar esas alınmıştır. Tasarlanacak olan herhangi bir perde, enkesit özellikleri ve donatı miktarları bakımından 2007-Deprem Yönetmeliği kurallarına uymak zorunda olduğundan önerilen bağıntı ile tasarlanacak perdelerin de bu kurallara uyduğu ve uymak zorunda olduğu hatırlanmalıdır.

Önerilen taşıma gücü momenti bağıntısı iki farklı program ile Tablo 2'de gösterildiği gibi sınanmıştır. Bu tabloda farklı uzunluk ile kalınlıklara ve farklı perde uç bölgesi donatı oranlarına (çekme bölgesinde bulunan perde uç bölgesi donatı alanının ilgili perde uç bölgesi alanına oranı) sahip perdelerin önerilen bağıntı ile bulunan M_r momentlerinin Section Designer ve Response20000 programları kullanılarak bulunan momentler ile karşılaştırması verilmektedir [12],[14]. Bahsi geçen programlarda perde kesitleri 2007-Deprem Yönetmeliği kriterlerine uygun olarak hazırlanıp analiz edilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere iki farklı program ile bulunan M_r değerleri önerilen bağıntı ile bulunan değerlerden en fazla %10 oranında farklı olmaktadır. Bu karşılaştırmalarda eksenel yük etkisi ihmal edilmiştir.

Tablo 2: Farklı kalınlık, uzunluk ve perde uç bölgesi donatı oranına sahip perdelerin momentlerinin karşılaştırması.

l_w mm	b_w mm	ρ_u, %	Önerilen	Section Designer		Response 2000	
			M_r kNm	M_r kNm	Fark %	M_r kNm	Fark %
1400	200	1.2	584	530	-10.2	563	-3.7
2000	200	1.5	1044	1057	1.2	1059	1.4
2800	200	2.2	2724	2770	1.6	2776	1.9
4000	200	3.1	6799	7224	5.9	7240	6.1
1750	250	1.0	973	894	-8.9	895	-8.7
2500	250	1.3	1741	1792	2.9	1800	3.3
3500	250	1.8	4257	4410	3.5	4511	5.6
5000	250	2.4	10198	11149	8.5	11176	8.7
2100	300	1.1	1784	1627	-9.6	1660	-7.4
3000	300	1.1	2611	2680	2.6	2737	4.6
4200	300	1.5	6130	6498	5.7	6567	6.7
6000	300	2.2	16318	17726	7.9	17897	8.8

Tablo 1'de verilen perdelerin detaylı hesap sonucu bulunan taşıma gücü momentleri önerilen bağıntı kullanılarak bulunan taşıma gücü momentleri ile Şekil 10'da gösterildiği gibi kıyaslanmış ve aradaki farkın çok az olduğu görülmüştür.



Şekil 10: Farklı kalınlıklara sahip perdelerde önerilen bağıntı ile detaylı hesap sonucunun karşılaştırılması.

Önerilen bağıntının güvenirliğini farklı perdeler ile test etmek amacıyla farklı kalınlıklara, uzunluk/kalınlık oranlarına ve donatı oranlarına sahip 60 adet dikdörtgen kesitli perde ele alınmıştır. Tablo 3'te 200 mm, Tablo 4'te 250 mm ve Tablo 5'te 300 mm kalınlığa sahip perdelerin özellikleri ile önerilen bağıntı kullanılarak bulunan taşıma gücü momentlerinin Section Designer programı kullanılarak bulunan taşıma gücü momentleri ile olan farkı verilmektedir. Tablolardan

görüldüğü üzere farklı kalınlıklara, farklı uzunluklara ve farklı donatı oranlarına sahip perdelerin taşıma gücü momentleri kabul edilebilir hata payları içerisinde hesaplanabilmektedir. Üç tablo beraber değerlendirildiğinde genel olarak hata paylarının %10'un altında olduğu (48 adet perde), 8 adet perdede %10-%15 aralığında olduğu ve 4 adet perdede de %15'in üzerinde olduğu görülmüştür. Betonarme hesaplarının çeşitli varsayımlar içermesi sebebiyle bu hata paylarının kabul edilebilir düzeyde olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir [6],[7].

Tablo 3: $b_w = 200\ mm$ için perde özellikleri.

l_w mm	b_w mm	l_w/b_w	ρ_u %	Önerilen M_r, kNm	Section Designer M_r, kNm	Fark %
1400	200	7	1.2	584	530	-10.2
1400	200	7	1.5	713	648	-10.1
1400	200	7	2.4	997	920	-8.4
1400	200	7	3.1	1329	1152	-15.4
1400	200	7	3.9	1662	1396	-19.0
2000	200	10	1.2	855	880	2.9
2000	200	10	1.5	1044	1057	1.2
2000	200	10	2.4	1459	1470	0.7
2000	200	10	3.1	1946	1836	-6.0
2000	200	10	3.9	2432	2219	-9.6
3000	200	15	1.0	1710	1863	8.2
3000	200	15	1.7	2611	2584	-1.0
3000	200	15	2.1	2919	3049	4.3
3000	200	15	3.1	4378	4158	-5.3
3000	200	15	4.1	5099	5176	1.5
4000	200	20	1.0	2849	3120	8.7
4000	200	20	1.5	4177	4201	0.6
4000	200	20	2.4	5838	5849	0.2
4000	200	20	3.1	6799	7224	5.9
4000	200	20	4.0	8953	8875	-0.9

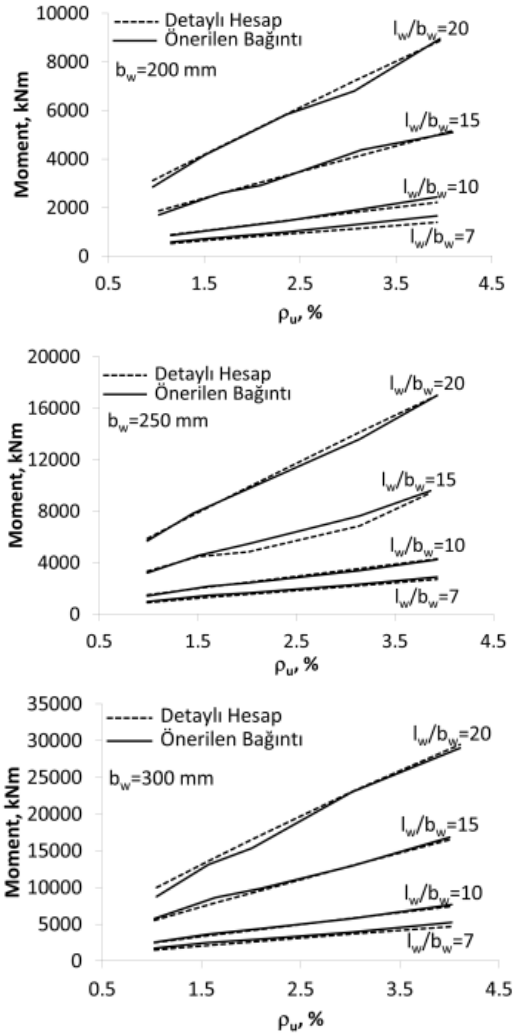
Şekil 11'deki grafikler Tablo 3, 4, ve 5'i esas alacak şekilde oluşturulmuş ve grafiklerdeki kıyaslamalar perde uç bölgelerinde bulunan donatı oranları üzerinden farklı l_w/b_w oranları için yapılmıştır. Şekillerden görüleceği üzere önerilen bağıntı kullanılarak bulunan taşıma gücü momentleri ile detaylı hesap sonucu bulunan taşıma gücü momentleri arasındaki fark çok azdır.

Tablo 4: $b_w = 250\ mm$ için perde özellikleri.

l_w mm	b_w mm	l_w/b_w	ρ_u %	Önerilen M_r, kNm	Section Designer M_r, kNm	Fark, %
1750	250	7	1.0	973	894	-8.9
1750	250	7	1.6	1486	1310	-13.5
1750	250	7	2.0	1662	1548	-7.3
1750	250	7	3.1	2322	2232	-4.0
1750	250	7	3.9	2903	2717	-6.8
2500	250	10	1.0	1425	1497	4.8
2500	250	10	1.6	2176	2120	-2.6
2500	250	10	2.0	2432	2491	2.3
2500	250	10	3.1	3399	3552	4.3
2500	250	10	3.9	4249	4302	1.2
3750	250	15	1.0	3205	3337	3.9
3750	250	15	1.5	4569	4476	-2.1
3750	250	15	2.0	5473	4835	-13.2
3750	250	15	3.1	7649	6860	-11.5
3750	250	15	3.9	9593	9434	-1.7
5000	250	20	1.0	5698	5879	3.1
5000	250	20	1.4	7832	7694	-1.8
5000	250	20	2.0	9730	9869	1.4
5000	250	20	3.1	13598	14134	3.8
5000	250	20	3.9	16997	17000	0.0

Tablo 5: $b_w = 300\ mm$ için perde özellikleri.

l_w mm	b_w mm	l_w/b_w	ρ_u %	Önerilen M_r, kNm	Section Designer M_r, kNm	Fark, %
2100	300	7	1.0	1752	1512	-15.9
2100	300	7	1.6	2497	2121	-17.7
2100	300	7	2.1	2991	2714	-10.2
2100	300	7	3.0	3932	3684	-6.7
2100	300	7	4.0	5242	4700	-11.5
3000	300	10	1.0	2564	2516	-1.9
3000	300	10	1.6	3655	3428	-6.6
3000	300	10	2.1	4378	4325	-1.2
3000	300	10	3.0	5756	5824	1.2
3000	300	10	4.0	7674	7436	-3.2
4500	300	15	1.0	5770	5536	-4.2
4500	300	15	1.6	8616	7900	-9.1
4500	300	15	2.1	9852	9587	-2.8
4500	300	15	3.0	12950	12981	0.2
4500	300	15	4.0	16827	16525	-1.8
6000	300	20	1.0	8757	10018	12.6
6000	300	20	1.6	13135	13612	3.5
6000	300	20	2.0	15348	16568	7.4
6000	300	20	3.0	23023	23058	0.2
6000	300	20	4.0	29012	29480	1.6



Şekil 11: Farklı l_w/b_w ve donatı oranlarına sahip perdelerde önerilen bağıntı ile detaylı hesap sonucunun karşılaştırılması.

Eksenel yük dikkate alındığında önerilen bağıntı ile hesaplanan taşıma gücü momentlerinin detaylı hesap sonucu bulunan taşıma gücü momentlerinden ne kadar farklılık gösterdiğini belirlemek amacıyla Tablo 6'da gösterilen 36 perde kullanılmıştır. Tablodan görüldüğü üzere önerilen bağıntı ile bulunan taşıma gücü momentleri Section Designer programı kullanılarak bulunan taşıma gücü momentlerine güvenli tarafta kalacak şekilde yaklaşmaktadır. l_w/b_w'nin küçük olduğu perdelerdeki hata payı küçük olmasına rağmen perde boyutu arttıkça önerilen bağıntı ile bulunan taşıma gücü momentlerindeki hata payı da artmaktadır. Hata payı daha karmaşık bağıntılar kullanılarak azaltılabilir fakat bu çalışmanın amacı güvenli tarafta kalacak şekilde ve kabul edilebilir hata payı içerisinde kalmak suretiyle dikdörtgen kesitli perdeler için taşıma gücü momenti hesabını basitleştirmek olduğundan karmaşık hesaplamalardan ve formülasyonlardan kaçınılmıştır. Ayrıca önerilen bağıntı ile bulunacak taşıma gücü momentinin güvenli tarafta olması, deprem etkileri dikkate alınarak bulunan tasarım momentinin taşınabilmesi için projede daha uzun perdelerin kullanmasını sağlayacaktır.

Tablo 6: Eksenel yük seviyesinin taşıma gücü momentine etkisi.

l_w mm	b_w mm	l_w/b_w	ρ_u %	$\frac{N_d}{A_w f_{cd}}$	Önerilen M_r, kNm	Section Designer M_r, kNm	Fark, %
1750	250	7	2.0	0.00	1662	1532	7.8
1750	250	7	2.0	0.07	1903	1870	1.7
1750	250	7	2.0	0.14	2144	2171	-1.2
1750	250	7	2.0	0.20	2351	2380	-1.2
1750	250	7	2.0	0.26	2558	2551	0.3
1750	250	7	2.0	0.32	2765	2653	4.0
2500	250	10	2.0	0.00	2432	2472	-1.6
2500	250	10	2.0	0.07	2836	3263	-15.0
2500	250	10	2.0	0.14	3240	3938	-21.5
2500	250	10	2.0	0.21	3644	4491	-23.2
2500	250	10	2.0	0.28	4048	4893	-20.9
2500	250	10	2.0	0.35	4451	5118	-15.0
3500	250	14	1.8	0.00	4257	4750	-11.6
3500	250	14	1.8	0.07	5058	6500	-28.5
3500	250	14	1.8	0.14	5860	7900	-34.8
3500	250	14	1.8	0.21	6662	9100	-36.6
3500	250	14	1.8	0.28	7463	10100	-35.3
3500	250	14	1.8	0.35	8265	10700	-29.5
2100	300	7	1.8	0.00	2493	2322	6.8
2100	300	7	1.8	0.10	3091	3147	-1.8
2100	300	7	1.8	0.15	3390	3518	-3.8
2100	300	7	1.8	0.20	3689	3822	-3.6
2100	300	7	1.8	0.25	3988	4073	-2.1
2100	300	7	1.8	0.30	4288	4261	0.6
3000	300	10	1.8	0.00	3649	3693	-1.2
3000	300	10	1.8	0.07	4369	5122	-17.2
3000	300	10	1.8	0.14	5088	6280	-23.4
3000	300	10	1.8	0.21	5808	7281	-25.4
3000	300	10	1.8	0.28	6528	7963	-22.0
3000	300	10	1.8	0.35	7248	8400	-15.9
4200	300	14	1.5	0.00	6130	6400	-4.4
4200	300	14	1.5	0.07	7537	9100	-20.7
4200	300	14	1.5	0.14	8944	11500	-28.6
4200	300	14	1.5	0.21	10351	13200	-27.5
4200	300	14	1.5	0.28	11758	14800	-25.9
4200	300	14	1.5	0.35	13165	15700	-19.3

6 Sonuçlar

Bu çalışmada 2007-Deprem Yönetmeliği kurallarına göre tasarlanan dikdörtgen kesitli perdelerin taşıma gücü momentinin hesabı için basit bir yaklaşım önerilmektedir. Perdelerin kolonlara göre çok fazla sayıda donatı barındırmaları nedeniyle taşıma gücü momentlerinin hesabının zahmetli olduğu ve bir yazılıma ihtiyaç duyduğu bilindiğinden basit bir formülasyon ile hesabın kabul edilebilir hata payları içerisinde yapılmasının mühendislik hesaplarını kolaylaştıracağı düşünülmektedir. Önerilen bağıntının mühendislerin bir yazılıma ihtiyaç duymadan temel mühendislik kurallarını kullanarak perdelerin taşıma gücü momentini hesaplamalarına olanak vermesi daha özgüvenli tasarımların yapılmasına ve hesaplara ayrılan zamandan tasarruf edilmesine vesile olacaktır.

Pratik bir bağıntı bulmak amacıyla öncelikle perde taşıma gücü momentini etkileyen faktörler irdelenmiştir. Bu irdelemelerde aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

- Taşıma gücü momenti eksenel yük seviyesinden çok fazla etkilenmektedir. Bu etki en iyi eksenel yük-moment etkileşim diyagramından görülebilir. Bilindiği üzere taşıma gücü momenti, maksimum moment noktasına kadar (denge durumu) eksenel yük ile birlikte artmakta, bu noktanın ilerisinde, büyük eksenel yük seviyelerinde, eksenel yük arttıkça taşıma gücü momentinde azalma görülmektedir,
- Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde perde uzunluğunun ve kalınlığının eksenel yük-moment etkileşim diyagramının başlangıç eğimine olan etkisi incelenmiş ve perde uzunluğu arttıkça eğrinin eğiminin azaldığı görülmüştür. Ayrıca perde kalınlığının da başlangıç eğimine etki ettiği ve perde kalınlığının artması ile başlangıç eğiminin azaldığı gözlenmiştir,
- Perde uç bölgesinde kullanılan donatıların taşıma gücü momentine olan etkisinin fazla olduğu, perde gövdesinde kullanılan donatıların ise taşıma gücü momentine etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu tespit edilmiştir,
- Taşıma gücü momentini, donatı dayanımının doğrudan etkilediği fakat beton basınç dayanımının etkisinin ise çok düşük olduğu ve ihmal edilebileceği belirlenmiştir.

Yukarıdaki çıkarımlar neticesinde taşıma gücü momentinin hesabı için öncelikle ele alınacak perde kesiti eşdeğer perdeye çevrilerek basit donatılı dikdörtgen kesitli bir eleman haline getirilmiştir. Burada gövde donatıları ve basınç bölgesinde yer alan perde uç bölgesi donatıları ihmal edilmiş ve perdede yalnızca çekme bölgesinde yer alan perde uç bölgesi donatılarının var olduğu varsayılmıştır. Böyle bir sistemin çözümü nispeten daha kolay olmaktadır çünkü sistemde var olan kuvvet çiftinin dengesini oluşturmak basittir ve taşıma gücü momenti için kuvvet çifti arasındaki mesafe (moment kolu, "z") yeterli olacaktır. Bu amaçla farklı uzunluğa, kalınlığa ve donatı oranlarına sahip perdeler analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- "z" mesafesi üssel bir fonksiyon şeklinde taşıma gücü momentini etkilemektedir,
- "z" mesafesinin perde uzunluğu ile olan ilişkisi doğru orantılı olmakta fakat perde uç bölgesinde kullanılan donatı çapı "z" mesafesini ters orantılı olarak etkilemektedir.

Moment kolu ("z") bulunduktan sonra taşıma gücü momenti için de bağıntı bulunmuş olmaktadır çünkü çekme bölgesindeki perde uç bölgesinde bulunan donatıların bileşke kuvvetini moment kolu ile çarpmak taşıma gücünü verecektir.

Taşıma gücü momentini eksenel yükün ihmal edilemeyecek düzeyde etkiliyor olması sebebiyle önerilen bağıntıya eksenel yük etkisinin eklenmesi faydalı olacaktır. Bu kapsamda yapılan analizlerde taşıma gücünün eksenel yük oranı ile doğru orantılı olduğu (eksenel yük-moment etkileşim diyagramının ilk bölümü -maksimum moment noktasına kadar olan bölüm) ve başlangıç eğiminin l_w/b_w ile b_w değerlerinden etkilendiği belirlendiğinden bu etkilerin tamamının dikkate alındığı bir "α" faktörü oluşturulmuş ve taşıma gücü momenti bağıntısına ilave edilmiştir. Önerilen "α" faktörü düzenli artan bir faktör olduğundan taşıma gücü momentinin eksenel yük ile birlikte düzenli olarak arttığı durumlar için geçerlidir. Bir başka deyişle önerilen bağıntı 2007-Deprem Yönetmeliği kuralları da dikkate alınarak eksenel yük oranının 0.4'ten az olduğu durumlarda kullanılmalıdır.

Bu çalışmada önerilen bağıntı kullanılarak hesaplanan taşıma gücü momentlerinin detaylı hesap ile bulunan taşıma gücü momentlerine çok yakın olduğu, hata payının çok düşük olduğu, farklı uzunluklara, kalınlıklara ve donatı oranlarına sahip perdelerin analizleri neticesinde görülmüştür.

Önerilen bağıntı 2007-Deprem Yönetmeliği'nde belirtilen taşıma gücü momentini (M_r) bulmaya yöneliktir. Perdenin moment kapasitesi (M_p) yönetmelikte verilen bilgiler ışığında M_r değerini kullanarak hesaplanabilir.

Sonuç olarak, önerilen bağıntı kullanılarak çeşitli perde kalınlıkları için taşıma gücü moment (M_r) abakları oluşturulmuş ve makale ekinde sunulmuştur. Bu abaklar pratik bir şekilde M_r değerlerini bulmaya imkan sağlamaktadır. Abaklar piyasada sıkça kullanılan donatılar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Ara değerler için lineer interpolasyon uygulanabilir. Hesaplarda paspayı 20 mm alınmıştır. Boyuna donatılar arasındaki mesafe 2007-Deprem Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere $25\phi_{etriye}$ ile sınırlandırılmıştır. Perde uç bölgelerinde minimum donatı çapının 14 mm olduğu kabul edilmiştir. Gövde donatısı olarak 10 mm çapında donatılar kullanılmıştır. Abaklar oluşturulurken eksenel yük etkisi ihmal edilmiştir. Eksenel yükün etkisi, abaklardan bulunan M_r değerinin "α" katsayısı ile çarpılması neticesinde hesaba katılabilir.

7 Kaynaklar

[1] Afet İşleri Genel Müdürlüğü. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik". Deprem Araştırma Dairesi, Ankara, Türkiye, 2007.

[2] Gülkan P, Utkutuğ D. "Okul binalarının deprem güvenliği için minimum dizayn kriterleri". *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 425(3), 13-22, 2003.

[3] Corley WG, Hanson JM. "Design of earthquake-resistant structural walls". *Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Rome, Italy, 25-29 June1973.

[4] Hidalgo PA, Jordan RM, Martinez MP. "An analytical model to predict the inelastic seismic behavior of shear-wall, reinforced concrete structures". *Engineering Structures*, 24(1), 85-98, 2002.

[5] Hidalgo PA, Ledezma CA, Jordan RM. "Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls". *Earthquake Spectra*, 18(2), 287-308, 2002.

[6] Ersoy U, Özcebe G. *Betonarme*. 2. baskı. İstanbul, Türkiye, Evrim Yayınevi, 2012.

[7] Doğangün A. *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*. CD ilaveli 10. baskı, İstanbul, Türkiye, Birsen Yayınevi, 2013.

[8] Kurç Ö, Kayışoğlu B, Lüleç A, Özcebe G. "A comparative study on structural wall design approach of 2007 Turkish earthquake code". *Teknik Dergi*, 22(110), 1477-1497, 2011.

[9] Türk Standartları Enstitüsü. "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Standardı". Ankara, Türkiye, TS 500, 2000.

[10] Cardenas AE, Magura DD. "Strength of High-rise Shear Walls-Rectangular Cross Section". *ACI Special Publication*, 36, 119-150, 1972.

[11] Cardenas AE, Hanson JM, Corley WG, Hognestad E. "Design provisions for shear walls". *ACI Structural Journal*, 70(3), 221-230, 1973.

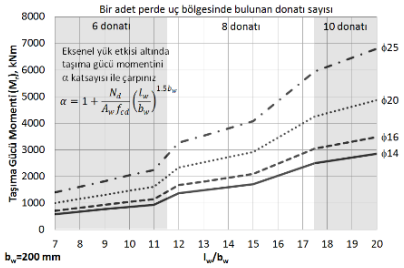
[12] SAP2000 v.14. "Integrated Software for Structural Analysis and Design". Computer and Structures Inc., Berkeley, California, USA, 2009.

[13] Su RKL, Wong SM. "Seismic behaviour of slender reinforced concrete shear walls under high axial load ratio". *Engineering Structures*, 29(8), 1957-1965, 2007.

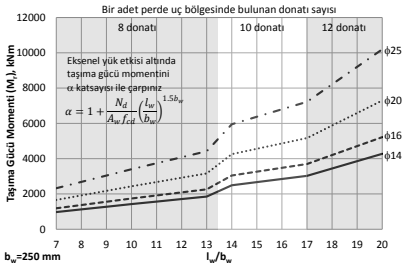
[14] Response 2000. "University of Toronto". http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm (15.02.2016).

Ek A

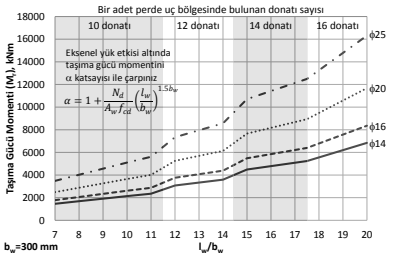
Bu makale ekinde 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanan dikdörtgen kesitli betonarme perde duvarların taşıma gücü momentlerinin (M_r) basit bir şekilde bulunmasını sağlayan üç adet yardımcı abak verilmektedir. Abaklar piyasada sıkça kullanılan perde kalınlığı (b_w=200 mm, 250 mm ve 300 mm), l_w/b_w oranı (7'den 20'ye kadar) ve donatı çapları (ϕ14, 16, 20, 25) kullanılarak oluşturulmuştur. Abaklar kullanılırken öncelikle tasarlanacak olan perdenin l_w/b_w oranı seçilecektir. Daha sonra perde uç bölgesinde kullanılacak donatıların çapı belirlenecek ve l_w/b_w oranından düşey yönde gidilerek donatı çapı eğrisini kesen noktadan taşıma gücü momenti (M_r)okunacaktır. Örneğin; 2800x200 mm boyutlarına sahip (l_w/b_w=14) bir perde tasarlanmak istensin. 2007-Deprem Yönetmeliği'ne göre kritik perde yüksekliği boyunca perdenin plandaki her iki ucunda en az 560 mm uzunluğunda perde uç bölgesi oluşturulacaktır. Perde uç bölgesine konulacak donatı $0.002l_wb_w$ değerine eşit veya büyük olacaktır. Ayrıca minimum donatının 4ϕ14 ve maksimum donatı aralığının $25\phi_{etriye}$ olduğu unutulmamalıdır. Bu hususlar dikkate alındığında perde uç bölgesine minimum 8 adet ϕ14 donatı konulabilmektedir. Perde uç bölgelerine 8'er adet ϕ14'ün konulduğu 2800x200 mm boyutlarına sahip bir perdede $M_r = 1600\ kNm$ (Denklem (6) kullanılarak hesap yapıldığında ise 1596 kNm) olmaktadır. Perde üzerindeki eksenel yük dikkate alınırsa eksenel yük oranının 0.3 olduğu varsayıldığında $\mathbf{M_r = 1600(1 + 0.3(14)^{1.5x0.2})}$ denkleminden $M_r = 2659\ kNm$ olarak bulunmaktadır.



Şekil A1: 200 mm kalınlığa sahip perdelerin taşıma gücü moment abağı.



Şekil A2: 250 mm kalınlığa sahip perdelerin taşıma gücü moment abağı.



Şekil A3: 300 mm kalınlığa sahip perdelerin taşıma gücü moment abağı.