

Araştırma Makalesi - Research Article

Görece Narin Betonarme Perde Duvarlarda Mevcut Beton Malzeme Modellerinin Etkilerinin İrdelenmesi

Investigating the Effects of Existing Concrete Material Models on Relatively Slender Reinforced Concrete Walls

Emrah Kılıç¹, Muhammet Fethi Güllü^{2*}

Geliş / Received: 20/01/2022

Revize / Revised: 06/10/2022

Kabul / Accepted: 31/10/2022

ÖZ

Betonarme elemanların doğrusal olmayan analizleri gelişen teknoloji ve mevcut yönetmeliklerin geliştirilerek bu teknolojiyi kullanması ile birlikte günümüzde önem kazanmaktadır. Betonarme yapıların doğru bir şekilde modellenmesi ve doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi için uygun beton ve donatı malzeme modellerine ihtiyaç vardır. Literatürde bu konuda birçok çalışma mevcuttur. Özellikle yüksek bina tasarımında betonarme perde duvarların yayılı plastisite teorisine göre modellenmesi ile birlikte kullanılan beton ve donatı modelinin doğruluğunun önemi artmıştır. Bu çalışma kapsamında betonarme elemanlar için geliştirilmiş olan ve betonun doğrusal olmayan davranışını öngören üç farklı beton malzeme modelleri kullanılarak görece narin betonarme perde duvarların doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Bu malzeme modellerinin teorilerine uygun olarak farklı beton sınıflarının (örn: C30 ve C40) parabolik eğrileri bahsi geçen modeller kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen beton parabolik malzeme modelleri, Perform 3D yapısal analiz programında tanımlanmak için doğrusal parçacıklardan oluşan eğriler şeklinde basitleştirilmiştir. Paket programda beton malzemeleri, beton sınıfları ve tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları değiştirilerek görece narin betonarme perde duvarların analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları birbiriyle ve deneysel sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirilmiş ve farklı malzeme modellerinin boy/en oranı 3.0 olan betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analiz sonuçlarında birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Ancak boy/en oranı 2.0 ve 1.5 olan betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analizlerinde beton modeli seçiminin ve farklı beton dayanımları kullanılmasının sonuçları etkilediği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Beton Malzeme Modelleri, Betonarme Perde Duvar, Tersinir-Tekrarlanır Yükleme*

ABSTRACT

Nonlinear analysis of reinforced concrete elements becomes significant in nowadays with the developing technology and current design codes using this technology. Precise concrete and reinforcement material models are required for accurate modeling of reinforced concrete structures and performing nonlinear analysis. There are many studies on this subject in the literature. Especially in high-rise building design, the importance of the accuracy of the concrete and reinforcing bar model used with the modeling of reinforced concrete shear walls according to the distributed plasticity theory has increased. In this study, the nonlinear behavior of relatively slender reinforced concrete shear walls was investigated by using three different concrete models that predict the nonlinear behavior of concrete material developed for reinforced concrete elements. In accordance with the theories of these material

¹İletişim: emrahkili3463@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0914-6925>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Harran Üniversitesi, Osmanbey Yerleşkesi, Şanlıurfa, Türkiye

^{2*}Sorumlu yazar İletişim: fethigullu@harran.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6064-4719>)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Harran Üniversitesi, Osmanbey Yerleşkesi, Şanlıurfa, Türkiye

models, parabolic curves of different concrete classes (e.g. C30 and C40) were obtained using the aforementioned models. The obtained concrete parabolic material models were simplified as curves consisting of linear branches to be defined in the Perform 3D structural analysis program. In the package program, the relatively slender reinforced concrete shear walls were analyzed by changing concrete materials, concrete classes and reduction coefficients due to strain under cyclic loads. The analysis results were scrutinized by comparing with each other and experimental results, and it was determined that the different material models were in agreement with each other in the nonlinear analysis results of reinforced concrete wall with an aspect ratio of 3.0. However, in the nonlinear analysis of reinforced concrete shear walls with aspect ratios of 2.0 and 1.5, it was revealed that the selection of concrete material models and the use of different concrete strengths affected the results.

Keywords- Concrete Material Models, Reinforced Concrete Walls, Reversed-Cyclic Loading

I. GİRİŞ

Betonun basınç dayanımı, yapısında kullanılan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri, üretim ve taşıma esnasından yapılan hatalar ile küp ve bakımındaki eksiklikler gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Bu değişkenlere bağlı parametrelerden etkilenen beton malzemesinin davranışını kesin olarak belirlemek oldukça zor bir durumdur. Her ne kadar günümüzde betonun davranışını kesin olarak ifade etmek mümkün olmasa da betonarme yapıların davranışının ifade edilebilmesi ve uygulamada gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için betonun davranışının yaklaşık olarak ifade edilebilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle betonun malzeme davranışı birçok çalışmaya konu olmuştur. Sheikh-Üzümeri Modeli [1], Saatçioğlu-Razvi Modeli [2], Hognestad Modeli [3], Geliştirilmiş Kent-Park Modeli [4], Roy-Sozen Modeli [5], Sargin-Handa Modeli [6], Mandevd. [7] modeli ve benzeri birçok beton gerilme-şekil değiştirme teorik modelleri geliştirilmiş ve betonun davranışı ifade edilmeye çalışılmıştır. Betonun karmaşık yapısı ve çok sayıda parametreye bağlı olarak davranışının değişmesi nedeniyle bazı değişkenler göz ardı edilmiş ve modellerin geliştirilmesinde birtakım kabullere gidilmiştir. Yapılan kabullere bağlı olarak elde edilen modeller birbirlerine kıyasla farklı avantaj ve dezavantajlar barındırmakla birlikte, bazı modellerde daha karmaşık ifadeler yer alabilmektedir. Bu durum geliştirilen modellerin yapı elemanlarının davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır.

Öncelikli olarak Hognestad [3] tarafından yapılan çalışmada eksenel yük ve bileşik eğilme etkisindeki betonarme elemanların davranışı irdelenmiştir. Eksenel yüklü tüm numunelerde göçme yaklaşık 0.0038 birim şekil değiştirme oranında gerçekleşmiştir. Kesit boyunca oldukça doğrusal bir şekil değiştirme dağılımının, en küçük yüklerden kırılmaya kadar var olduğu gözlemlenmiştir. Mander vd. [7], enine sargılı veya sargısız betonarme elemanların tek eksenli basınç altındaki davranışını ifade eden bir beton modeli geliştirmiştir. Geliştirilen beton modelinden tekrarlı yükler ve yükleme hızı dikkate alınarak gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilebilmektedir. Sargılı donatısı konfigürasyonuna bağlı olarak yanal basınç değeri hesaplanmaktadır. Sargılı numunelerde yanal basınçtan yararlanarak enine donatının gerilme enerjisi hesaplanmaktadır. Enerji korunumu kanunundan yararlanarak sargılı donatısının koptuğu andaki çekirdek betonu basınç değeri elde edilmiştir. Saatçioğlu ve Razvi [2], sargılı beton davranışını ifade eden, ilk kısmı parabolik ve ikinci kısmı azalan bir doğru ile temsil edilen beton modeli geliştirmiştir. Betonarme elemanlarda yaygın olarak tercih edilen sargılı konfigürasyonlarına göre oluşan yanal basınç değerleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada sargılı etkisinden dolayı oluşan yanal basınç için ortalama bir değer alınarak düzgün yayılı yanal basınç değeri hesaplanmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde azalan kısım, eğri tepe noktasından ve en yüksek gerilme değerinin %85'ine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerinden geçen bir doğru ile ifade edilmektedir. Bu doğru, en yüksek gerilmenin %20 değerine karşılık gelen gerilme seviyesine kadar düştükten sonra sabit kalmaktadır. Razvi ve Saatçioğlu [8], sargılı yüksek dayanımlı beton için analitik bir model önermiştir. Normal dayanımlı beton için Saatçioğlu ve Razvi [2] tarafından önerilen önceki model geliştirilmiştir. Model, 30 MPa normal dayanımlı betondan 130 MPa yüksek dayanımlı betona kadar olan beton sınıflarını kapsamaktadır ve sargılı etkisinin tüm ilgili parametrelerini içermektedir. Model deneysel verilerle karşılaştırılarak kapsamlı bir şekilde doğrulanmıştır ve deneysel olarak kurulan gerilme-şekil değiştirme ilişkileriyle makul korelasyonlar göstermektedir. Cusson ve Paultre [9], sargılı yüksek dayanımlı beton için bir gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirmiş ve eksenel yükleme altında test edilen 50 büyük ölçekli yüksek dayanımlı betonarme kolondan elde edilen test sonuçlarına göre kalibre etmiştir. Beton basınç dayanımı, etriye akma dayanımı, etriye konfigürasyonu, enine donatı oranı, etriye aralığı ve boyuna donatı oranının etkileri önerilen gerilme-şekil değiştirme modelinde dikkate alınmıştır. Bu modelde sargılı betonun dayanım ve sünekliğinin

belirlenmesi; sarılmış betonun maksimum dayanımında enine donatıdaki gerilme ve etkin bir şekilde sarılmış beton alanına bağlı olan, etkin sargı basıncının hesaplanmasına dayanır.

Sönmez ve Dönmez [10], OpenSees açık kaynak yazılımı bünyesinde bulunan beton malzeme modellerinin betonarme elemanların davranışını ne düzeyde doğru temsil ettiğini araştırmıştır. Farklı malzeme modellerinin sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisinin olmamasına rağmen, bu malzeme modellerinin analiz süreleri açısından farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bedirhanoglu ve İlki [11], farklı sargılı beton modelleri kullanılarak fiber eleman yaklaşımı ile analitik moment-eğrilik ilişkileri elde etmiştir. Daha sonra analitik sonuçlar deneysel moment-eğrilik ilişkileri ile karşılaştırılmış ve dikkate alınan tüm sargılı beton modelleri için analitik ve deneysel moment-eğrilik ilişkilerinin makul bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Özmen vd. [12], Mander vd. [7], geliştirilmiş Kent-Park [4] ve Saatcioğlu-Ravzi [2] beton teorilerinin yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışı üzerindeki etkisini irdelemiştir. Değişik beton sınıfları ve donatı aralıkları dikkate alınarak dört katlı yapılar üzerinde doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiş ve malzeme teorilerinin sistem ve yapı elemanları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Uzbaş [13], betonun davranışı için geliştirilen malzeme teorileri ve bu teorilerde göz önüne alınan parametreleri araştırmıştır. Bu teorilerin birbirinden farklı olumlu ve olumsuz özellikler barındırdıklarını tespit ederek sonuçları karşılaştırmıştır. Araştırma sonucunda, betonun davranışını güvenilir şekilde temsil edecek modelin oluşturulmasında gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırmanın önemine değinilmektedir. Işık vd. [14], Seismo Struct yazılımını kullanarak farklı beton ve donatı modellerinin birbirleri ile uyumunu ve bu modeller arasındaki farkları irdelemektedir. Her model için farklı doğrultularda ayrı ayrı taban kesme kuvveti-deplasman grafikleri elde edilerek bu modellerin birbirine yakınlığı tespit edilmiştir. Foroughi ve Yüksel[15] tarafından malzeme modeli, eksenel yük, boyuna donatı oranı, enine donatı oranı ve enine donatı aralığının betonarme kesitlerin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Betonarme elemanların davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışlarını dikkate alan SAP2000 programı kullanılarak moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilip, süneklik ve mukavemet yönünden değerlendirilmiştir. Foroughi vd. [16] tarafından Mandervd. [7] beton modeline göre beton basınç dayanımı hesaplanarak betonarme kolon elemanlarının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi irdelenmiştir. Değişik çap ve aralıkta enine donatı kullanılarak kare kolon elemanlarda gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiş ve enine donatının bu elemanlar üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Enine donatının çap ve sıklığı arttıkça çekirdek bölgesinin basınç dayanımı ve yanal basıncın arttığı gözlemlenmiştir.

Yapıların kullanım ömrü boyunca maruz kalacakları yükleri güvenle taşıyacak en ekonomik şekilde imal edilmesi inşaat mühendisliğinin temel amaçlarından biridir. Bu nedenle yapıların maruz kalacakları yüklere karşı doğru bir şekilde temsil edilmesi önem kazanmaktadır. Özellikle, yapılarda sıkça tercih edilen betonun heterojen yapıda olması ve üretiminde yapılan hatalardan dolayı davranışının belirlenmesi son derece zor bir durumdur. Bu nedenle betonun davranışını anlamak için birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve bu davranışı temsil eden birçok malzeme teorisi geliştirilmiştir. Ancak betonun karakteristik özellikleri, betonun üretiminde kullanılan agreganın mekanik ve kimyasal özeliği, üretim ve taşıma esnasında yapılan hatalar gibi birçok faktöre bağlı olması nedeniyle geliştirilen bu malzeme modellerinde bir takım kabullere gidilmektedir. Yapılan kabullerin farklılık göstermesi nedeniyle bu teoriler arasında farklılıkların olması betonarme eleman simülasyonu üzerine farklılıklar gösterecektir. Bu çalışma kapsamında, Hognestad [3], Mandervd. [7] ve Saatcioğlu-Ravzi [2] tarafından geliştirilen beton modelleri betonarme perde duvar numuneleri üzerine Perform 3D [17] paket programı kullanılarak uygulanacak ve bu farklı beton modellerinin beton sınıfları ile tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları parametrik olarak değiştirilerek sonuçlar üzerindeki etkileri irdelenecektir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Malzeme Modelleri

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan ve Hognestad [3], Mandervd. [7] ve Saatcioğlu-Ravzi [2] tarafından geliştirilen beton malzeme modelleri hakkında kısa bilgi sunulmaktadır.

Hognestad [3] tarafından sargısız beton için geliştirilen model farklı iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım standart silindirik basınç gerilmesi değerinin 0.85 katına kadar artan parabolik bir eğriyle ifade edilmiştir ve ikinci kısım hesaplanan eğrinin maksimum değerinin %85 ine kadar azalan bir doğru ile ifade edilmiştir (Şekil 1). Hognestad [3] yaptığı deneysel çalışmalar ile modelini kalibre etmiş ve modelinin deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Hognestad [3] betonun gerilme şekil değiştirme davranışını 1-4 denklemleri ile ifade etmiştir. Bu model sadece sargısız beton davranışını temsil edebilmektedir.

Standart silindir basınç değerinin %85'i kadar olan maksimum gerilme (f_c) değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri (ε_0) maksimum gerilme kuvveti ve elastisite modülüne (E_c) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Denklem 1).

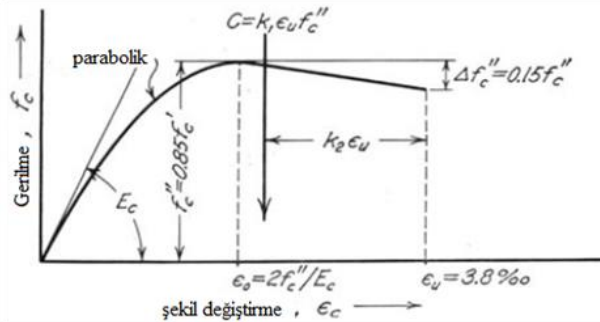
$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E_c} \quad (1)$$

$$E_c = 12680 + 460f_c \quad (2)$$

Birim şekil değiştirme değerinin (ε_c) maksimum gerilme değerine karşılık gelen şekil değiştirme (ε_0) değerinden, küçük olması halinde ilgili gerilme değeri Denklem 3 ile elde edilmektedir. Maksimum gerilme anındaki birim şekil değiştirme (ε_0) değerinden daha büyük şekil değiştirmelere karşılık gelen gerilme değerleri ise Denklem 4 kullanılarak elde edilmektedir.

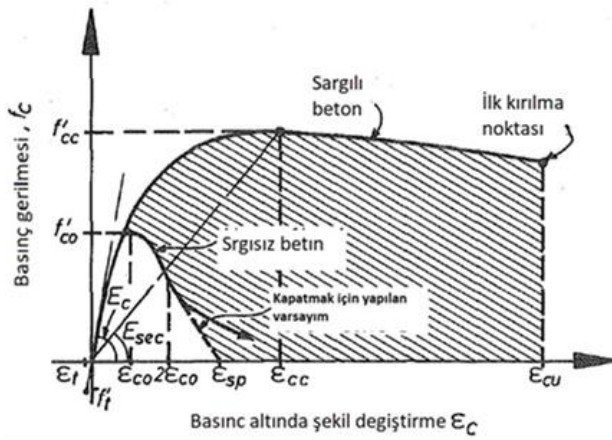
$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \text{ ise } \sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \text{ ise } \sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{0.0039 - \varepsilon_0} \right] \quad (4)$$



Şekil 1. Hognestad beton modeli için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [3]

Mander vd. [7] tarafından geliştirilen model 2007 Deprem Yönetmeliğinde uygulanmıştır. Ülkemizde 2018 yılında yürürlüğü giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde uygulanan yöntem de genel hatlarıyla Mander vd. [7] modelinin aynısıdır. Mander vd. [7] sargılı ve sargısız beton davranışı için iki farklı model geliştirmiştir (Şekil 2). Bu çalışmada sargısız beton modellerinde maksimum gerilme değerinde birim şekil değiştirmenin (ε_{co}) 0.002 alınmasını önerilmiştir. Sargılı beton modeli betonun karakteristik basınç gerilmesi, enine donatı oranı, etriye aralığı, boyuna donatı aralığı gibi birçok parametreyi dikkate almaktadır. Mander vd. [7] yükleme hızının ve tekrarlı yüklerin betonarme üzerindeki etkilerini de dikkate almıştır.



Şekil 2. Mander vd. beton modeli için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [7]

Mander vd. [7] sargısız beton modeli, başlangıçtan en büyük gerilme değerine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerinin iki katına kadar devam eden parabolik bir eğri (Denklem 7) ve bu eğriyi $\varepsilon_{sp} = 0.005$ birim şekil değiştirme değerine kadar yaklaşık olarak doğrusal devam eden (Denklem 8) iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2). Başlangıç noktasını maksimum gerilme noktasıyla birleştiren doğrunun eğimi, Denklem 5'te verilen sekant elastisite modülü (E_{sec}) ile elde edilmektedir.

$$E_{sec} = \frac{f_c}{\varepsilon_{co}} \quad (5)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \quad (6)$$

$$0 \leq \varepsilon_{ci} \leq 2\varepsilon_{co} \text{ ise } \sigma = \frac{f_c \chi r}{r-1 + \chi^r} \quad (7)$$

$$2\varepsilon_{co} \leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{sp} \text{ ise } \sigma = f_c \left(\frac{2r}{r-1+2^r} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_{ci} - 2\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{sp} - 2\varepsilon_{co}} \right) \quad (8)$$

Mander vd. [7] sargılı beton modelinde, dış etriyelerin merkezinden merkezine etkin olarak sarılmış bölge (A_e) Denklem 9 ile hesaplanır. Bu denklemde b_c ve d_c betonu saran etriyelerin merkezinden merkezine olan uzaklıklarını, s iki etriyenin merkezinden merkezine dikey mesafeyi ve s' ise iki etriye arasındaki net açıklığı ifade eder. W_i' bir etriye veya çiroz tarafından sabitlenen boyuna donatılar arasındaki net mesafedir.

$$A_e = \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (9)$$

Etriye donatısı tarafından sarılmış kesit alanının (A_e), eleman kesitinin net alanına (A_{cc}) oranı olarak ifade edilen k_e Denklem 10 ile hesaplanmaktadır. Burada k_e sargı etki katsayısıdır.

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad (10)$$

Sargı donatısının hacminin, etriye donatısı ile sarılmış çekirdek betonunun hacmine oranı (ρ_s) Denklem 11 ile hesaplanmaktadır. Burada A_{sx} ile A_{sy} sırasıyla x ve y doğrultularındaki sargı donatısının alanını ρ_x ve ρ_y ise sırasıyla x ve y doğrultularındaki sargı donatısının oranını vermektedir.

$$\rho_s = \rho_x + \rho_y = \frac{A_{xx}}{s d_c} + \frac{A_{yy}}{s b_c} \quad (11)$$

Sargı etkisinden dolayı çekirdek betonu üzerinde oluşan yanal basınç kuvveti (f_l') Denklem 12 ile hesaplanmaktadır. Burada kullanılan f_{yh} sargı donatısının akma dayanımıdır.

$$f_l' = \frac{1}{2} k_e f_{yh} \left(\frac{A_{xx}}{s' d_c} + \frac{A_{yy}}{s' b_c} \right) \quad (12)$$

Betonun sargılı basınç dayanımı, sargısız beton dayanımı f_c ve yanal basınç kuvveti f_l' değerlerine bağlı olarak Denklem 13 ile elde edilmektedir.

$$f'_{cc} = f_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_l'}{f_c}} - 2 \frac{f_l'}{f_c} \right) \quad (13)$$

Sargılı beton basınç gerilmesi olan σ_c basınç birim şekil değiştirilmesi ε_{cc} (Denklem 15) ve idealleştirilmiş beton birim şekil değiştirme değeri χ (Denklem 16) ve r (Denklem 17)'ye bağlı olarak Denklem 14'den elde edilmektedir. Denklem 18 kullanılarak sargılı beton nihai birim şekil değiştirme değeri hesaplanır. Denklem 18'de geçen ε_{su} değeri donatı kopma şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \chi r}{r - 1 + \chi^r} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (15)$$

$$\chi = \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{cc}} \quad (16)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}; E_c = 5000 \sqrt{f_c}; E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (18)$$

Saatçioğlu ve Razvi [2] beton modeli, parabolik artan bir eğri ve ardından doğrusal bir şekilde azalan kısımdan oluşur (Şekil 3). Dairesel ve dikdörtgen sargı donatısı tarafından oluşturulan yanal basınçının hesaplanmasına ve buna bağlı olarak betonun dayanım ve süneklığında meydana gelen gelişmelere dayanır. Analitik modelin parametreleri, seyrek ve sıkılaştırılmış enine donatılı beton modelleri dâhil olmak üzere çok sayıda test verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sargılı beton dayanımı ve karşılık gelen birim şekil değiştirme, etriye donatısı tarafından sağlanan eşdeğer düzgün yayılı sargı basıncı cinsinden ifade edilir. Eşdeğer düzgün yayılı sargı basıncı, kesit ve malzeme özelliklerinden hesaplanan ortalama yanal basınçtan elde edilir. Azalan kısım, tepe gerilmesinin %85'ine karşılık gelen birim şekil değiştirme tanımlanarak oluşturulur. Bu birim şekil değiştirme değeri, sargı parametreleri cinsinden ifade edilir. Azalan kısmın sonunda, %20 dayanım seviyesinde sabit bir artık dayanım olduğu varsayılır. Sargılı basınç dayanımı f_{cc} yanal basınç gerilmesi f_l dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Dikdörtgen etriyeli elemanlarda boyuna doğrultudaki donatılar tarafından tutulan noktalar arasında kalan bölgede, oluşan basınç etkisiyle etriye dışarı doğru bükülür. Dışarı doğru bükülen kısımda sargı etkisi zayıflar ve bu bölgede daha düşük yanal basınç oluşur. Bu basınç değişiminin etkisi dikkate alınarak Saatçioğlu ve Razvi [2] modelinde eşdeğer bir yanal basınç değeri hesaplanmaktadır. Saatçioğlu ve Razvi [2] basınç dağılımındaki bu değişimi dikkate alabilmek için f_l yerine, eşdeğer düzgün yayılı basınç f_{le} kullanılmasını önermektedir.

Saatçioğlu ve Razvi [2] modelinde sargılı beton basıncı olan f_{cc} , Denklem 19 ile hesaplanmaktadır. Burada k_3 standart silindirik numune ile gerçek eleman arasındaki dayanım farkını yansıtan bir katsayıdır (standart dayanımlı betonlar için $k_3 = 0.85 \sim 1$ arasındadır).

$$f_{cc} = k_3 f_c + k_n f_{le} \quad (19)$$

$$k_n = \frac{6.7}{(f_i)^{0.17}} \quad (20)$$

Burada geçen k_n katsayısı sargı etkisi olan f_i 'ye bağlı olarak Denklem 20 ile hesaplanmaktadır. Eşdeğer sargı basıncı olan f_{le} ise denklem 21-27 arasında verilen ifadelerden elde edilmektedir.

$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{kx} + f_{ley} b_{ky}}{b_{kx} + b_{ky}} \quad (21)$$

$$f_{lx} = \frac{\sum A_{sx} f_{yw} \sin \alpha}{s b_{kx}} \quad (22)$$

$$f_{ly} = \frac{\sum A_{sy} f_{yw} \sin \alpha}{s b_{ky}} \quad (23)$$

$$k_{2x} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{kx}}{a_x}\right) \left(\frac{b_{kx}}{s}\right) \left(\frac{1}{f_{lx}}\right)} \leq 1.0 \quad (24)$$

$$k_{2y} = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_{ky}}{a_y}\right) \left(\frac{b_{ky}}{s}\right) \left(\frac{1}{f_{ly}}\right)} \leq 1.0 \quad (25)$$

$$f_{lex} = k_{2x} f_{lx} \quad (26)$$

$$f_{ley} = k_{2y} f_{ly} \quad (27)$$

Saatçioğlu ve Razvi [2], sargılı betonun en büyük gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değerini (ε_{coc}) Denklem 28 ile ifade etmiştir.

$$\varepsilon_{coc} = \varepsilon_{co} (1 + 5\lambda); \lambda = \frac{k_n f_{le}}{k_3 f_c} \quad (28)$$

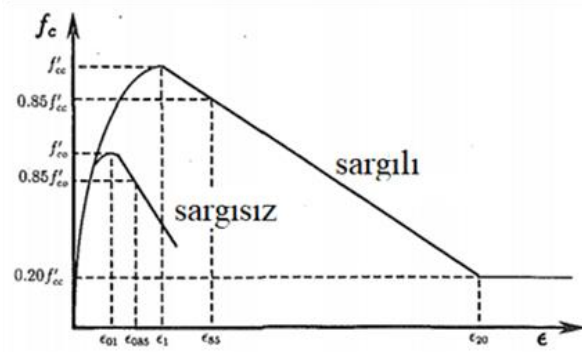
Azalan kısım, tepe gerilmesinin %85'ine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri (Denklem 29) ve tepe noktasından geçen doğru ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_{c85} = 260 \rho_s \varepsilon_{coc} + \varepsilon_{u85}; \varepsilon_{u85} = 0.0038 \quad (29)$$

İki farklı kısımdan oluşan modelin Birinci (parabolik) kısmı ($0 \leq \varepsilon_{ci} \leq \varepsilon_{coc}$) Denklem 30 ile elde edilir. İkinci (doğrusal) kısmı ($\varepsilon_{ci} \geq \varepsilon_{coc}$) ise Denklem 31 ile elde edilmektedir.

$$\sigma_c = f_{cc} \left[\frac{2\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{coc}} - \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right]^{1+2\lambda} \quad (30)$$

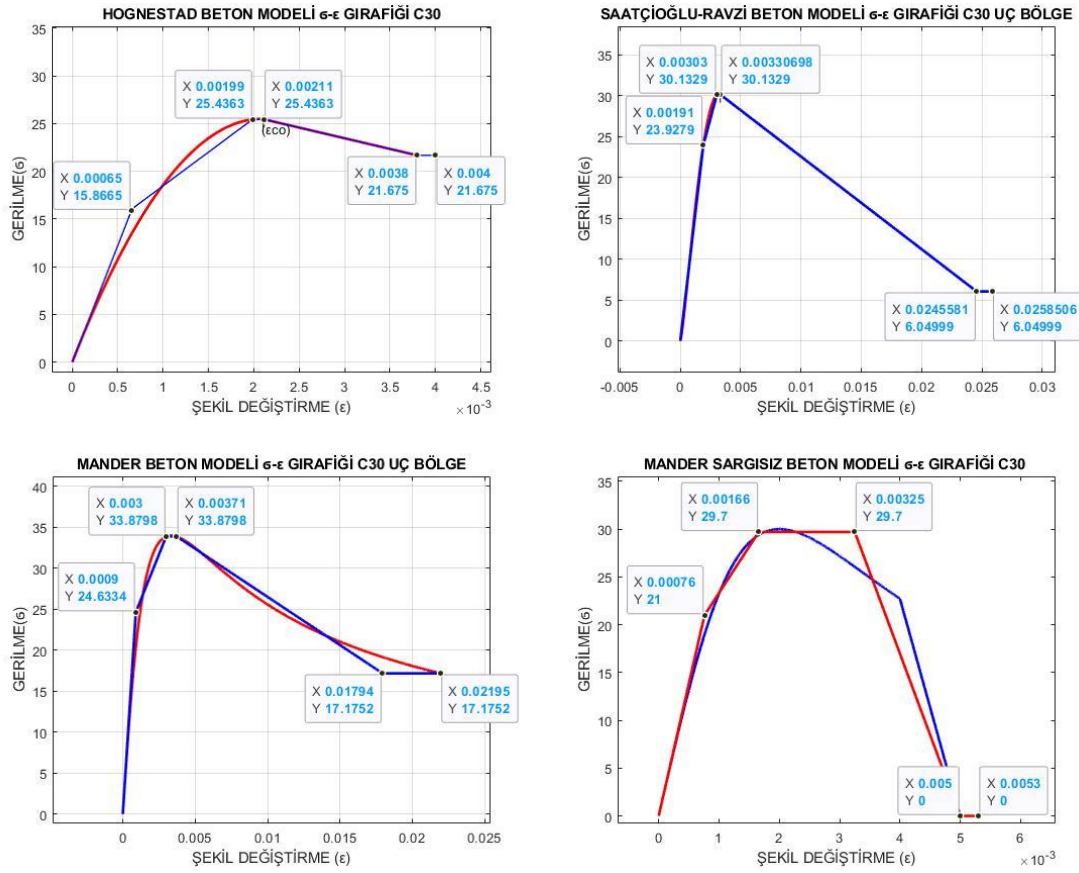
$$\sigma_c = f_{cc} + \left(\frac{f_{cc} - 0.85f_c}{\epsilon_{coc} - \epsilon_{c85}} \right) (\epsilon_{ci} - \epsilon_{coc}) \quad (31)$$



Şekil 3. Saatchioglul-Ravzi modeli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [2]

B. Yöntem

Beton davranışı için, Hognestad (H) [3], Mander vd. (M) [7] ve Saatchioglul-Ravzi (S) [2] tarafından geliştirilen denklemler kullanılarak MATLAB [18] programında malzeme modelleri tanımlanmış ve grafikleri elde edilmiştir. Beton davranışı bu grafikleri en ideal şekilde temsil eden, benzeştirilmiş üç doğru ile ifade edilmiştir (örn: Şekil 4). Bu üç doğruyla ifade edilen beton davranış grafiklerinden elde edilen veriler kullanılarak, Perform3D [17] paket programında modelleme sırasında kullanılan betonarme perde duvarların deneysel verilerle karşılaştırılması için gerekli beton davranış parametreleri Tablo 1’de sunulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan C30 ve C40 beton basınç dayanımları için gerekli beton davranış parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Son olarak çalışmada kullanılan deneysel beton sınıfları ile farklı beton malzeme modelleri için iki farklı tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları tanımlanmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen tüm parametrelere göre analizler tamamlandıktan sonra beton malzemeler için sabit olarak tanımlanan Y, U, R, L ve X parametreleri sırasıyla 0.7, 0.6, 0.5, 0.4 ve 0.3 alınarak sadece deneysel beton sınıfları için analizler tekrarlanmıştır. İlk doğrunun eğimi malzemenin elastisite modulu kabul edilmiştir. Akma (FY) dayanımından sonra malzemede şekil değiştirme artarken dayanım daha az artmaktadır. Maksimum dayanım (FU) değerinden sonra bir plastik bölge olduğu kabul edilmektedir. Şekil değiştirme (DL) değerinden sonra malzemede dayanım kaybı meydana gelmektedir (Şekil 5). Dayanım kaybından sonra malzeme en büyük şekil değiştirme (DX) değerine ulaşarak kopmaktadır. Kullanılan donatıların ise elasto-plastik davranış gösterdiği varsayılmış ve Tablo 3 de belirtilen şekliyle tanımlanmıştır. Elde edilen parametreler kullanılarak uluslararası kabul gören yapısal analiz programı, Perform-3D [17] paket programı yardımıyla beton malzeme modellerinin görece narin betonarme perdeler üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Çalışma kapsamında RW2 [19] ile RW-A20-P10-S38 [20] ve RW-A15-P10-S78 [20] olarak adlandırılan betonarme perde duvarları kullanılmıştır. RW2 [19] olarak adlandırılan betonarme perdenin genişliği 1223 mm yüksekliği 3660 mm ve kalınlığı 102 mm’dir. RW-A20-P10-S38 [20] ve RW-A15-P10-S78 [20] olarak adlandırılan betonarme perde duvarların genişlikleri 1219 mm, kalınlıkları 152 mm ve yükseklikleri sırasıyla 2440 mm ve 1830 mm’dir. Çalışma için kullanılan betonarme perde en kesit ve donatı bilgileri Şekil 6’da sunulmaktadır.



Şekil 4. Perform-3D [17] için idealleştirilmiş beton malzeme modeli eğrileri

Tablo 1. Perform-3D [17] için gerekli deneysel beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri

Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU
RW2 [19]	M_C42.8	32676	38.56	46.61	0.00266	0.0196	0.166	0.00353	0.0148	0.32000
	S_C42.8	27550	30.58	38.56	0.00193	0.0272	0.353	0.00212	0.0258	0.20000
RW-A20-P10-S38 [20]	M_C47.1	34222	57.49	75.09	0.00718	0.0261	0.093	0.00942	0.0253	0.82100
	S_C47.1	14168	33.86	52.16	0.00414	0.0836	0.738	0.00457	0.0794	0.20000
RW-A15-P10-S78 [20]	M_C55.8	37233	62.55	84.17	0.00642	0.0234	0.122	0.00842	0.0226	0.78200
	S_C55.8	18845	41.08	59.93	0.00378	0.0859	0.625	0.00443	0.0816	0.20000

Tablo 1. Perform-3D [17] için gerekli deneysel beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri (Devamı)

Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU	
RW2 [19]		H_C42.8	29415	23.53	36.29	0.00235	0.0040	0.280	0.00249	0.0038	0.85000
		M_C42.8	33746	35.10	42.80	0.00198	0.0053	0.243	0.00290	0.0050	0.00001
		S_C42.8	29415	23.53	36.29	0.00235	0.0040	0.280	0.00249	0.0038	0.85000
RW-A20-P10-S38 [20]		H_C47.1	31012	26.05	39.94	0.00245	0.0040	0.278	0.00259	0.0038	0.85000
		M_C47.1	35111	38.62	47.10	0.00198	0.0053	0.274	0.00275	0.0050	0.00001
		S_C47.1	31012	26.05	39.94	0.00245	0.0040	0.278	0.00259	0.0038	0.85000
RW-A15-P10-S78 [20]		H_C55.8	34322	30.89	47.31	0.00262	0.0040	0.278	0.00276	0.0038	0.85000
		M_C55.8	41850	40.18	55.80	0.00198	0.0053	0.366	0.00235	0.0050	0.00001
		S_C55.8	34322	30.89	47.31	0.00262	0.0040	0.278	0.00276	0.0038	0.85000
Tüm malzemeler için, tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları (Energy Degradation Factors)							Y	U	R	L	X
							1	0.9	0.7	0.4	0.3

Tablo 2. Perform-3D [17] için gerekli C30 ve C40 beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri

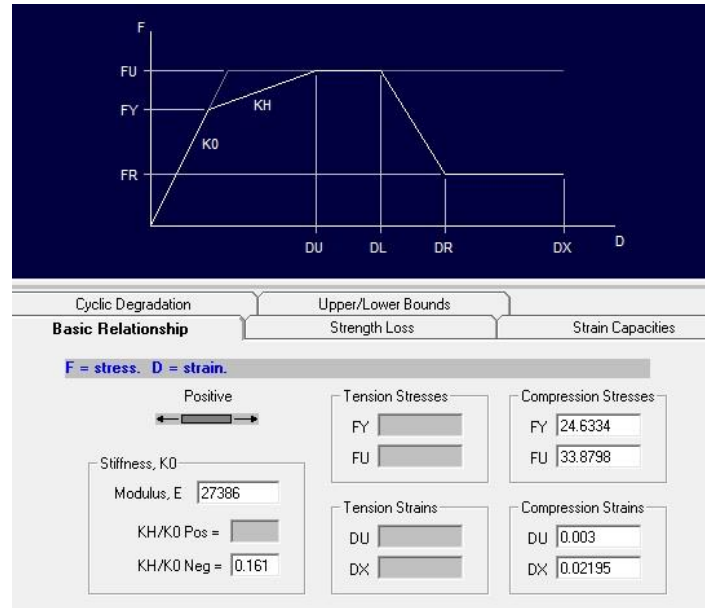
Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU	
RW2 [19]		M_C30	27386	24.63	33.88	0.00300	0.02195	0.161	0.00371	0.01794	0.50690
		M_C40	31628	32.26	44.00	0.00271	0.01785	0.220	0.00331	0.01466	0.50690
		S_C30	12528	23.93	30.13	0.00303	0.02585	0.442	0.00331	0.02456	0.20000
		S_C40	18254	31.58	39.12	0.00275	0.02921	0.405	0.00301	0.02775	0.20000
RW-A20-P10-S38 [20]		M_C30	27386	38.34	48.64	0.00742	0.03139	0.063	0.01010	0.02982	0.84200
		M_C40	31623	45.53	59.53	0.00623	0.02637	0.092	0.00847	0.02505	0.78700
		S_C30	7842	20.63	34.32	0.00500	0.05563	0.737	0.00517	0.05285	0.20000
		S_C40	13093	29.33	43.33	0.00388	0.05806	0.652	0.00436	0.05515	0.20000
RW-A15-P10-S78 [20]		M_C30	27386	38.34	48.64	0.00742	0.03139	0.063	0.01010	0.02982	0.84200
		M_C40	31623	45.53	59.53	0.00623	0.02637	0.092	0.00847	0.02505	0.78700
		S_C30	7842	20.62	34.32	0.00500	0.05563	0.737	0.00517	0.05285	0.20000
	S_C40	13093	29.33	43.33	0.00388	0.05806	0.652	0.00436	0.05515	0.20000	
RW2 [19]		H_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000
		H_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000
		M_C30	27632	21.00	29.70	0.00166	0.00530	0.350	0.00325	0.00500	0.00001
		M_C40	34210	26.00	39.60	0.00180	0.00530	0.382	0.00300	0.00500	0.00001
		S_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000
		S_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000

Tablo 2. Perform-3D [17] için gerekli C30 ve C40 beton dayanımlarına ait malzeme girdi verileri (Devamı)

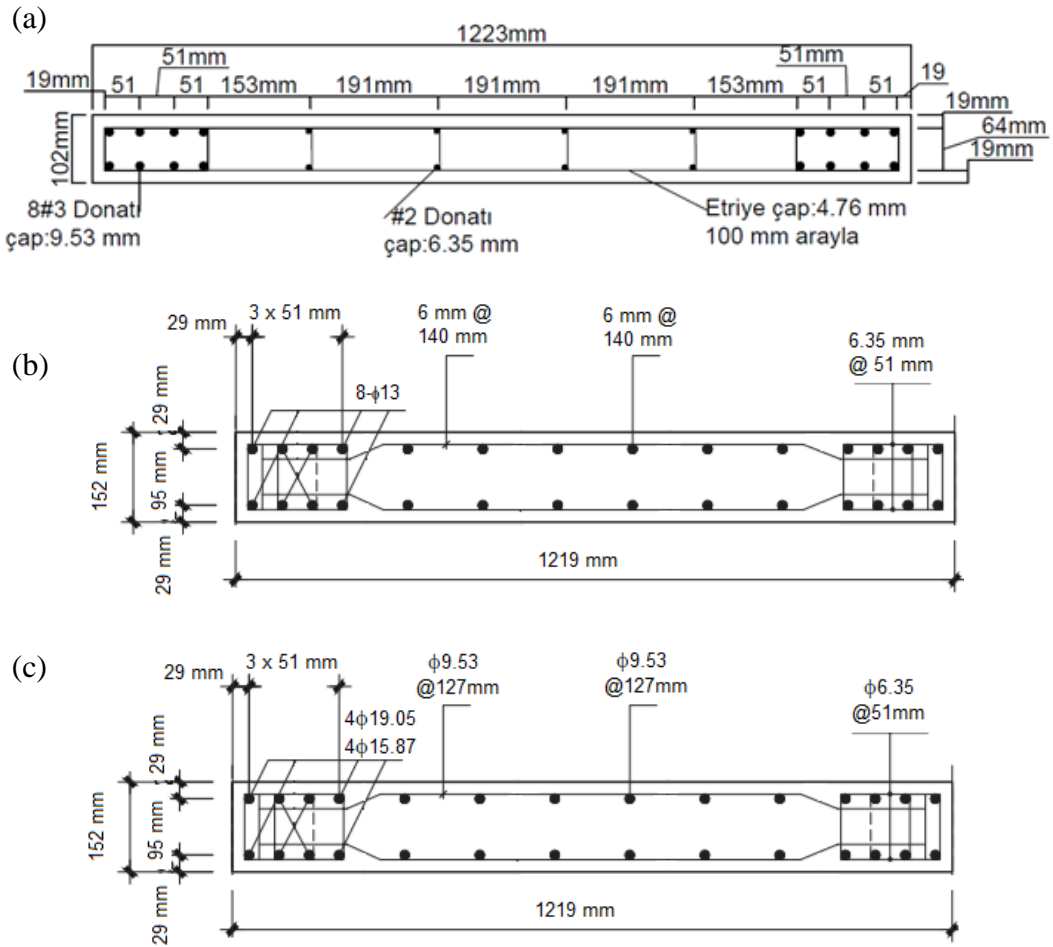
Betonarme Perde Numune Adı	Beton	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (N/mm ²)	FU (N/mm ²)	DU (mm)	DX (mm)	KH/K0	DL (mm)	DR (mm)	FR/FU	
RW-A20-P10-S38 [20]	H_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	H_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
	M_C30	27632	21.00	29.70	0.00166	0.00530	0.350	0.00325	0.00500	0.00001	
	M_C40	34210	26.00	39.60	0.00180	0.00530	0.382	0.00300	0.00500	0.00001	
	S_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	S_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
RW-A15-P10-S78 [20]	H_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	H_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
	M_C30	27632	21.00	29.70	0.00166	0.00530	0.350	0.00325	0.00500	0.00001	
	M_C40	34210	26.00	39.60	0.00180	0.00530	0.382	0.00300	0.00500	0.00001	
	S_C30	24410	15.87	25.44	0.00199	0.00400	0.293	0.00211	0.00380	0.85000	
	S_C40	28320	21.24	33.92	0.00229	0.00400	0.291	0.00242	0.00380	0.85000	
Tüm malzemeler için, tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları (Energy Degradation Factors)							Y	U	R	L	X
							1	0.9	0.7	0.4	0.3

Tablo 3. Perform-3D [17] için gerekli donatıların girdi verileri

Betonarme Perde Adı	Konum	Donatı Çapı (mm)	Elastisite Modülü (N/mm ²)	FY (kN/m ²)	FU (kN/m ²)	DU	DX	KH/K0		
Çekme altında	RW2[19]	Başlık	9.53	200000	395000	600000	0.06	0.061	0.018	
			4.76	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015	
		Gövde	6.35	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025	
	RW-A20-P10-S38 [20]	Başlık		6.35	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025
				12.7	205217	472000	613000	0.08	0.12	0.009
				6	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025
		Gövde		6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015
				6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015
				19.05	216818	477000	637000	0.08	0.11	0.009
	RW-A15-P10-S78 [20]	Başlık		15.87	206087	474000	620000	0.08	0.12	0.009
				6	200000	336000	630000	0.06	0.061	0.025
				9.53	200000	395000	600000	0.06	0.061	0.018
	Gövde	9.53	200000	395000	600000	0.06	0.061	0.018		
Basınç altında	RW2[19]	Başlık	9.53	200000	434000	648000	0.06	0.061	0.018	
			4.76	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015	
		Gövde	6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025	
	RW-A20-P10-S38 [20]	Başlık		6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025
				13	205217	472000	613000	0.08	0.12	0.009
				6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025
		Gövde		6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015
				6	214286	450000	661000	0.07	0.11	0.015
				19.05	216818	477000	637000	0.08	0.11	0.009
	RW-A15-P10-S78 [20]	Başlık		15.87	206087	474000	620000	0.08	0.12	0.009
				6.35	200000	448000	665000	0.06	0.061	0.025
				9.53	200000	434000	648000	0.06	0.061	0.018
	Gövde	9.53	200000	434000	648000	0.06	0.061	0.018		
Tüm donatılar için, tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları (Energy Degradation Factors)						Y	D=0.01	D=0.02	D=0.05	X
						0.9	0.9	0.8	0.8	0.7

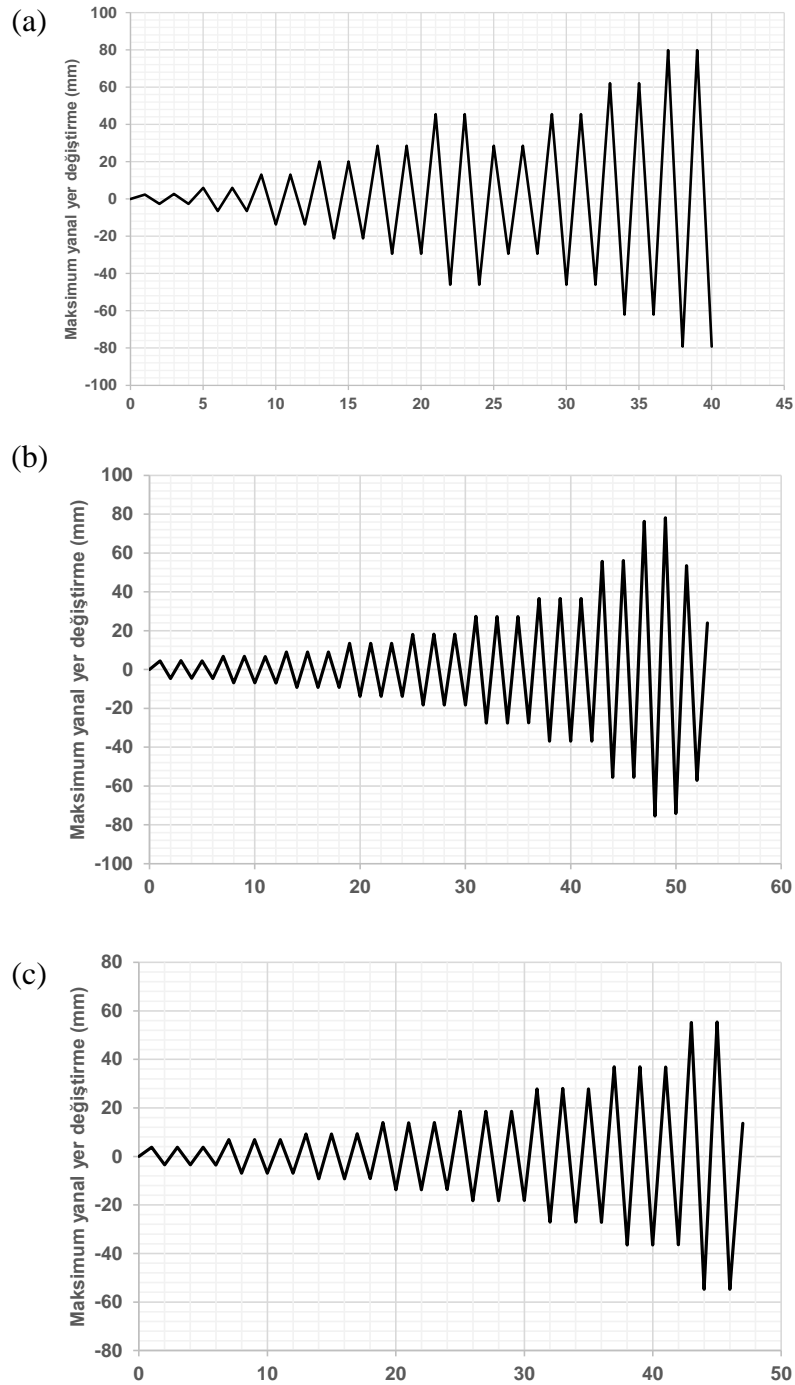


Şekil 5. Perform-3D [17] paket programında kullanılan beton malzeme modeli kapasite eğrileri için



Şekil 6. Betonarme perde en kesit görünümü; (a) RW2 [19], (b) RW-A20-P10-S38 [20], (c) RW-A15-P10-S78 [20]

Modellenen perdelerde aynı seviyedeki noktalara rijit diyafram tanımlayarak bu noktaların birlikte hareket edecekleri varsayılmıştır. Betonarme perde duvarların tabanında bulunan bütün düğüm noktalarına ankastre mesnet tanımlanarak mesnetlerde hareket ve dönmelerin engellendiği varsayılmıştır. Perform 3D [17] paket programında tersinir tekrarlanır yüklemelerin tanımlanması için tüm modellerde perdelerin üst ucundaki iki köşeye perdenin çalıştığı yatay doğrultuda pozitif (H1) yönünde 1 kN yük uygulanmıştır. Hognestad [3], Mander vd. [7] ve Saatcioglu-Razvi [2] beton modellerinden elde edilen verilere göre Perform-3D [17] paket programında beton malzeme modelleri tanımlanmıştır. Donatı modelleri Tablo 3'te verilen parametreler kullanılarak tanımlanmıştır. Tüm malzeme modellerinde öncelikli olarak tekrarlı yükler altında Mander vd. [7] modeli için önerilen bozulma katsayıları kullanılmıştır. Daha sonra çalışma kapsamında farklı katsayılar denenerek analizler aynı kabullerle tekrarlanmıştır. Perde elemanlarının tanımlanmasında fiber elemanlar kullanılmıştır. Farklı beton ve donatı grupları için modelin en-kesitinde ayrı ayrı fiber elemanlar tanımlanmıştır. Perde duvarlarda kesme dayanımını temsil etmek için doğrusal-elastik model tercih edilmiştir. Kesme rijitliği beton elastisite modülünün 0.4 katı olarak belirlenmiştir. En kesit tanımlama kısmında her beton ve donatı lifinin konumu ve kesit alanı tanımlanarak perde kesti oluşturulmuştur. Deney sırasında betonarme perde duvarlar üzerine uygulanan düşey yüklerin temsili için RW2 [19] olarak adlandırılan betonarme perde üst ucuna toplam 388 kN, RW-A20-P10-S38 [20] ve RW-A15-P10-S78 [20] olarak adlandırılan betonarme perde duvarların üst ucuna ise 877.4 kN eksenel yük tanımlanmıştır. Perdelerin üst ucuyla tabanı arasındaki göreceli öteleme hesaplarında dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında P-delta etkisi ihmal edilmiştir. Tanımlanan perdelerin düşey yükler altında doğrusal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen tersinir-tekrarlanır yer değiştirme analizini temsil edebilmek için modellenen betonarme perde duvar statik itme analizlerine tabi tutulmuştur. Doğrusal olmayan statik itme analizi her bir betonarme perde duvar için Şekil 7'de verilen yanal yer değiştirme eğrilerine göre her bir deplasman döngüsü için 50 adımda ve 200 tekrarlı adımla dört farklı yüklemeye gerçekleştirilmiştir.

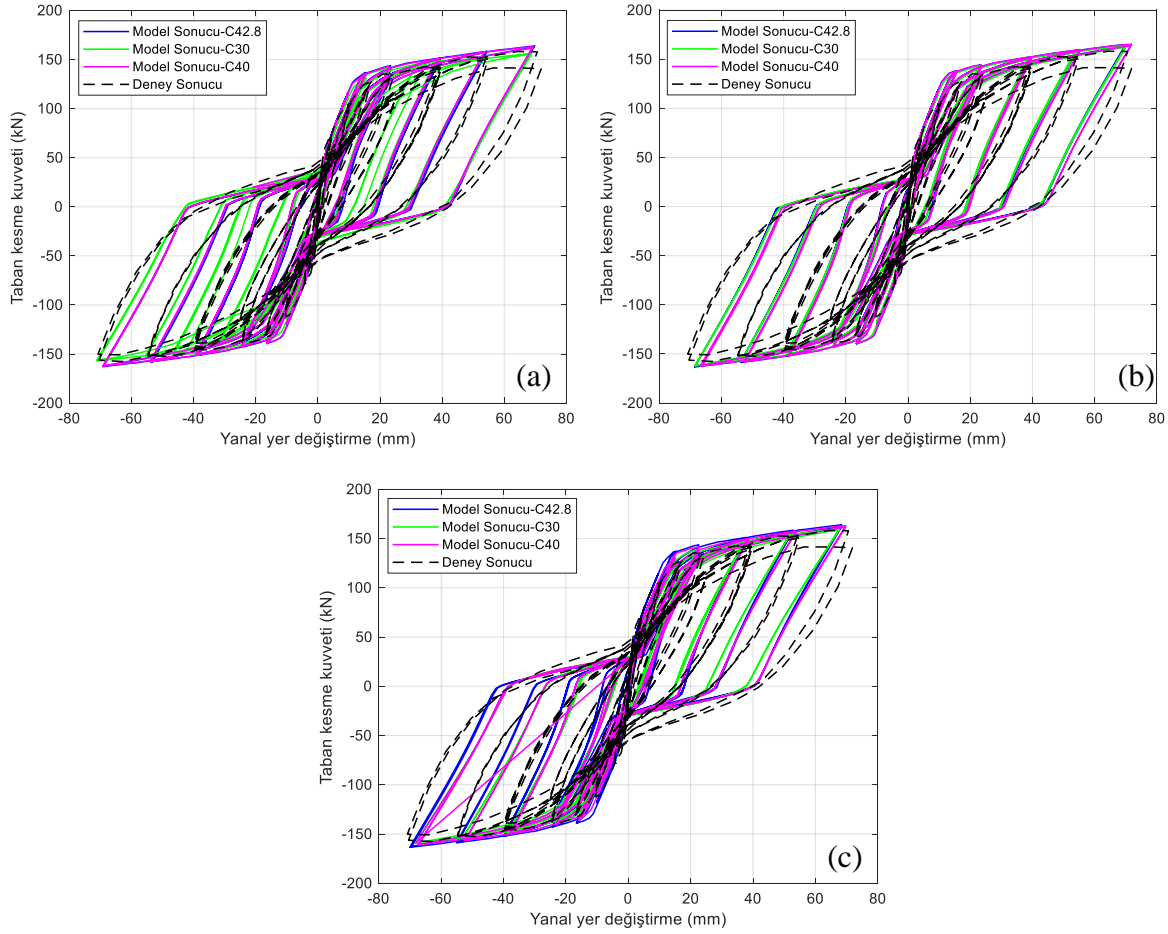


Şekil 7. Yanal yer değiştirme eğrileri; (a) RW2 [19], (b) RW-A20-P10-S38 [20], (c) RW-A15-P10-S78 [20]

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan analizler sonucunda yatay yük–yanal yer değiştirme grafikleri elde edilmiş ve sonuçları tartışılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan malzeme modellerinin birbirine oldukça yakın değerlerde kaldığı tespit edilmiştir. Sonuçların birbirine çok yakın olması görece narın betonarme perde duvar analizleri için taban kesme kuvveti–yanal yer değiştirme arasındaki ilişki üzerinde betonun sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Sönmez ve Dönmez [10], tarafından yapılan çalışmada da tüm kolonlarda farklı beton modelleri için birbirine yakın sonuçlar elde etmiştir. Şekil 8, 9 ve 10’da çalışma kapsamındaki her bir

betonarme perde duvar numunesi için deneysel beton dayanımları ve farklı beton sınıfları kullanılarak Perform 3D [17] paket programından elde edilen tersinir-tekrarlanır sonuçlar sunulmaktadır. Şekillerde görüldüğü üzere, sonuçlar üzerinde betonun karakteristik basınç dayanımının ciddi bir etkisi gözlemlenmemektedir. Özellikle boy/en oranı 3.0 olan RW2 [19] betonarme perde duvar numunesinde beton basınç dayanımı diğer iki betonarme perde duvar numunesine göre neredeyse hiçbir etki göstermemektedir (Şekil 8). RW2 [19] betonarme perde duvar numunesi için yapılan analizler incelendiğinde, hem beton sınıfının hem de beton modelinin farklılık göstermesinin taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme eğrilerinin kapasitesini ve/veya karakteristik özelliklerini neredeyse hiç etkilemediği görülmektedir (Şekil 8).

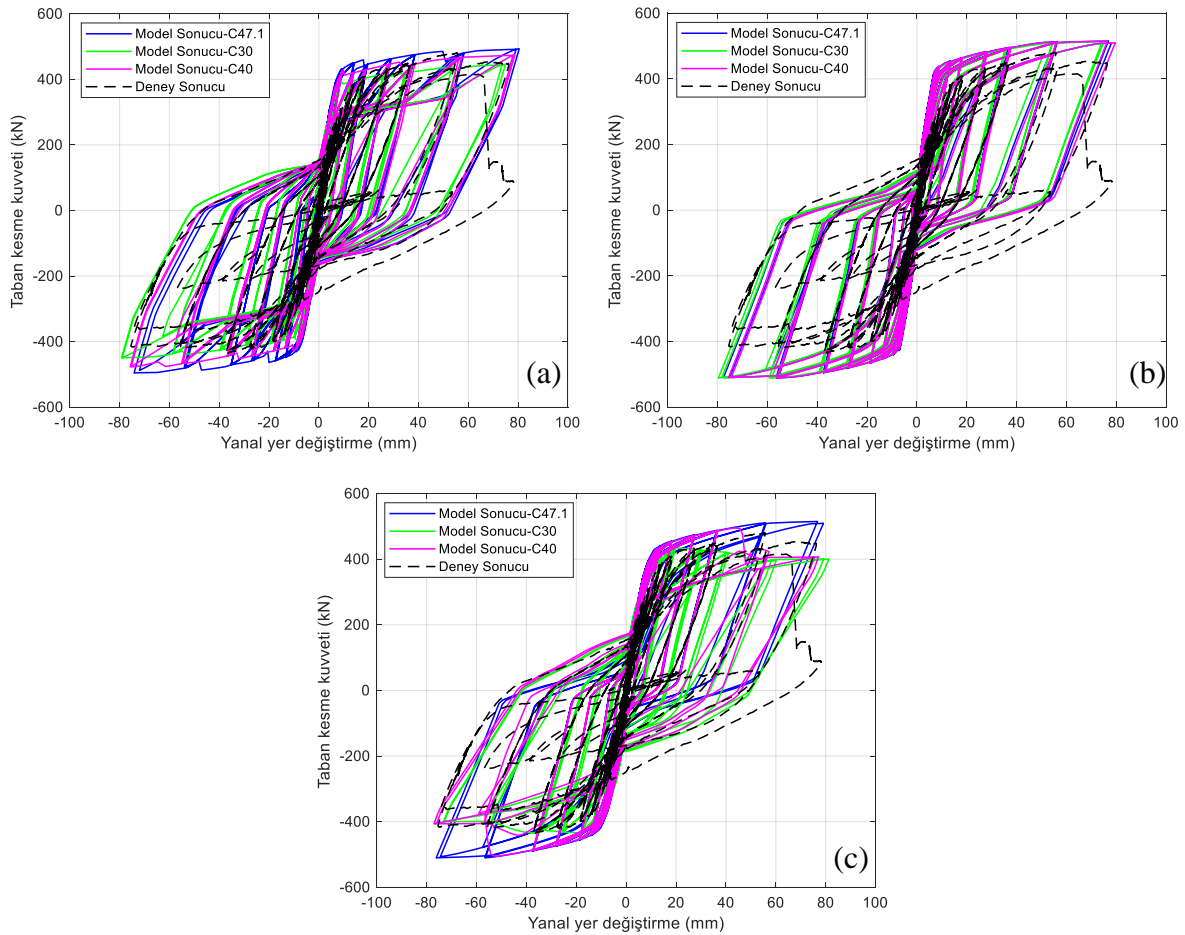


Şekil 8. RW2 [19] betonarme perde numunesi için farklı beton modelleri ile elde edilen taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkileri; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

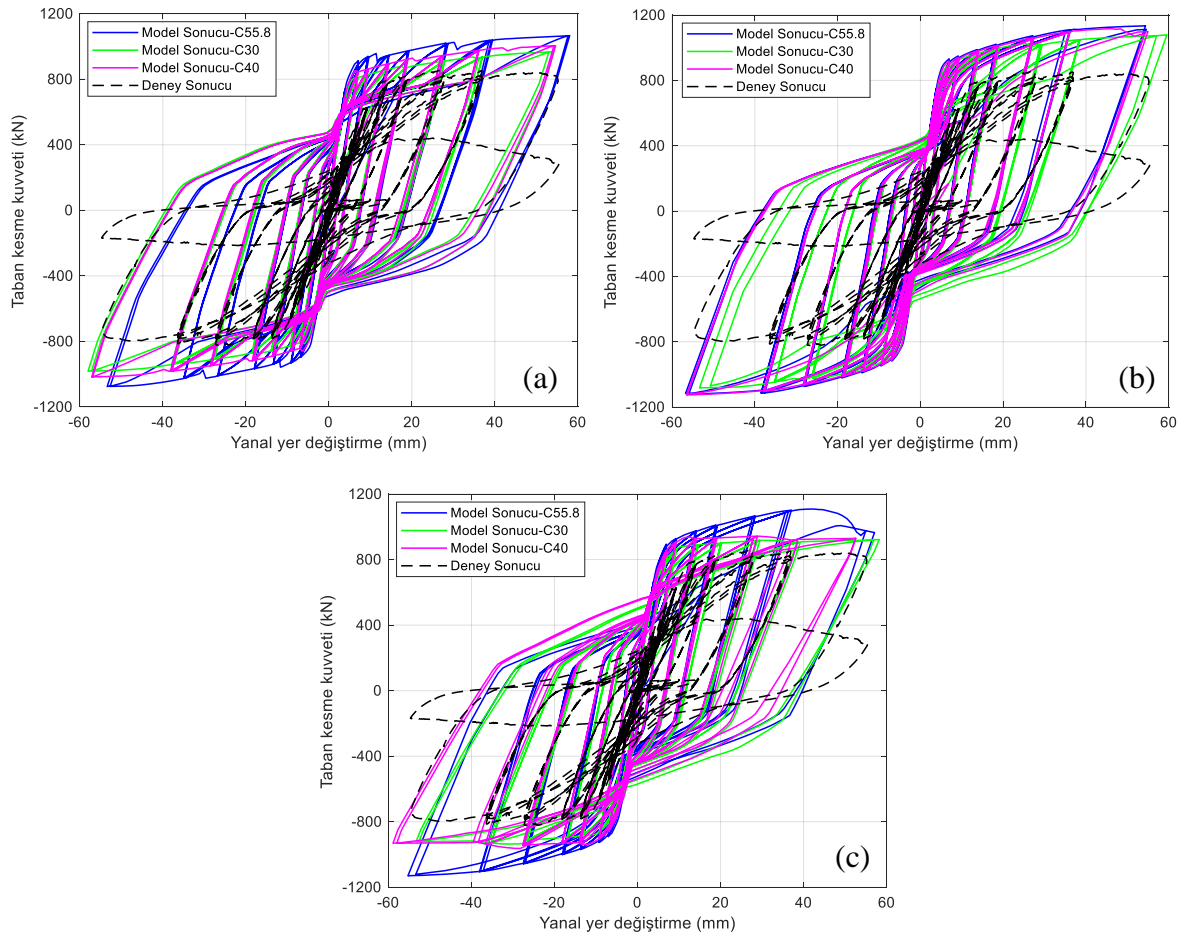
Boy/en oranı 2.0 olan RW-A20-P10-S38 [20] ile boy/en oranı 1.5 olan RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvarlar RW2 [19] numunesine kıyasla kesme-eğilme ortak etkisi altında davranış göstermektedirler. Bu sebeple boy/en oranının azalması ile beton sınıfının etkisi taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme grafiklerinde az da olsa gözlemlenmiştir (Şekil 9 ve 10). RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvar numunesi için yapılan analizler incelendiğinde, Hognestad [3] beton modeli kullanıldığı takdirde farklı beton sınıflarının kullanılmasının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme eğrisinin kapasitesini etkilediği söylenebilirken, tersinir-tekrarlanır yükleme karakteristik özelliklerini etkilemediği görülmektedir. Mander vd. [7] beton modeli ise yine RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesi için uygulandığı takdirde, beton sınıfının analiz sonuçlarını neredeyse etkilemediği görülmektedir. Aynı numune için son olarak Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modeli ile yapılan analizlerde kullanılan farklı beton sınıflarının özellikle taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme eğrilerinde yatay yük kapasitesinde azalmanın başladığı noktaları etkilediği anlaşılmaktadır (Şekil 9). Benzer şekilde RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesi için yapılan analizler incelenmiştir (Şekil 10). Bu numune de Hognestad [3] beton modeli kullanımı RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvar numunesi ile benzer

sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Mander vd. [7] beton modelinde ise C30 beton dayanımının farklılık göstermesinin kullanılan paket programda yapılan doğrusal olmayan analizlerde yakınsama problemleri nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesi için Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modeli ile C30 ve C40 gibi görece deney sırasında kullanılan beton dayanımından (C55.8) daha düşük beton sınıfları kullanılarak yapılan analizlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak deneysel olarak elde edilen beton sınıfı kullanıldığı takdirde taban kesme kuvveti-yer değiştirme grafiklerinde yanal yük kapasitesinin diğer iki beton sınıfına göre farklılık gösterdiği ve yanal yük kapasitesindeki azalmanın daha geç başladığı gözlemlenmiştir.

Tüm modeller için enine donatı çaplarının ve enine donatı aralığının yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiş ve enine donatı sıklığının, en kesitin sünekliliği ve taşıma kapasitesi üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğu kanısına varılmıştır. Boy/en oranı 3.0 olan görece narin betonarme perde duvarların doğrusal olmayan analizlerinde beton malzeme modellerinin etkili olmadığı görülmektedir. Taban kesme kuvveti ile yanal yer değiştirme arasındaki ilişki üzerinde donatı daha büyük etkiye sahiptir. Özmen vd. [12] yatay kuvvet-deplasman arasındaki ilişkide belirleyici olanın, donatı olduğunu ifade etmiştir. Özmen vd. [12], Işık vd. [14], Sönmez ve Dönmez [10] tarafından yapılan çalışmalarda da geçtiği üzere malzeme modellerinin daha kapsamlı ve karmaşık formüllerle ifade edilmesi modeller arasında analiz süresinin uzamasına neden olabilmektedir. Beton malzeme modelleri özellikle boy/en oranı 3.0 olan betonarme perde duvar numunesi için birbirine yakın sonuçlar verdiği için, çok karmaşık modeller yerine daha basit modellerin kullanılması hesap yükünü hafifleterek daha pratik ve hızlı olacağından tercih edilebilir. Ancak boy/en oranı 2.0 veya daha az olan kesme-eğilme etkisinin gözlemlendiği betonarme perde duvarlarda beton dayanımının sonuca etkisi beton modellerine göre farklılık göstermektedir.

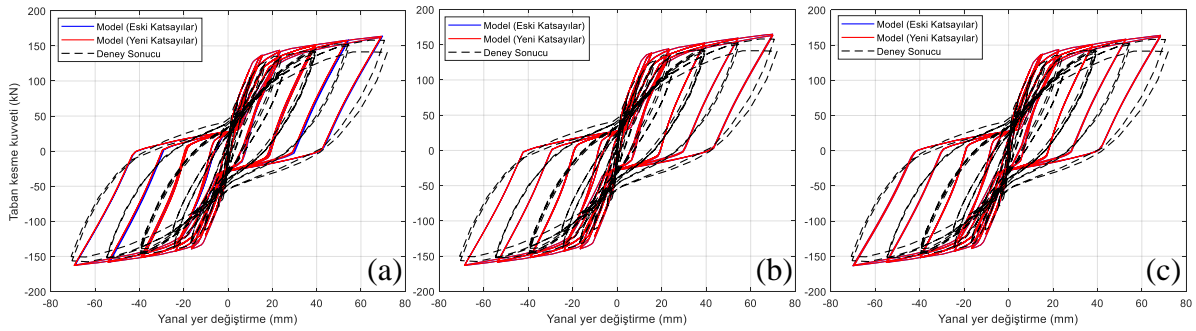


Şekil 9. RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde numunesi için farklı beton modelleri ile elde edilen taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkileri; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

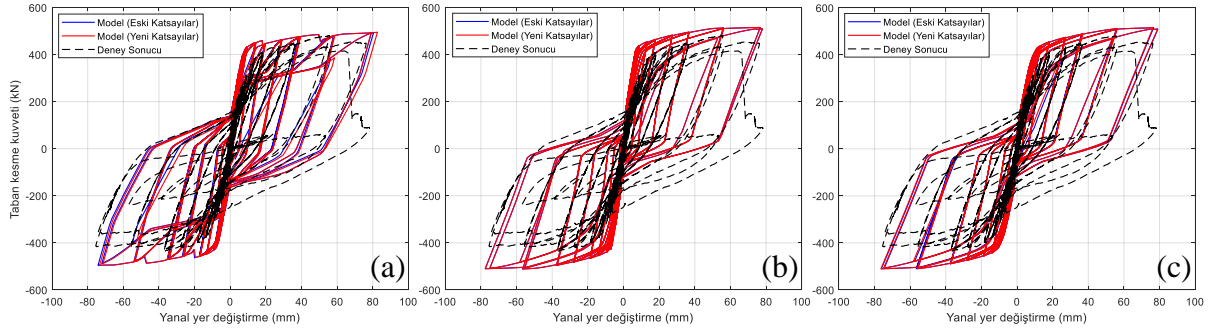


Şekil 10. RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde numunesi için farkı beton modelleri ile elde edilen taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkileri; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

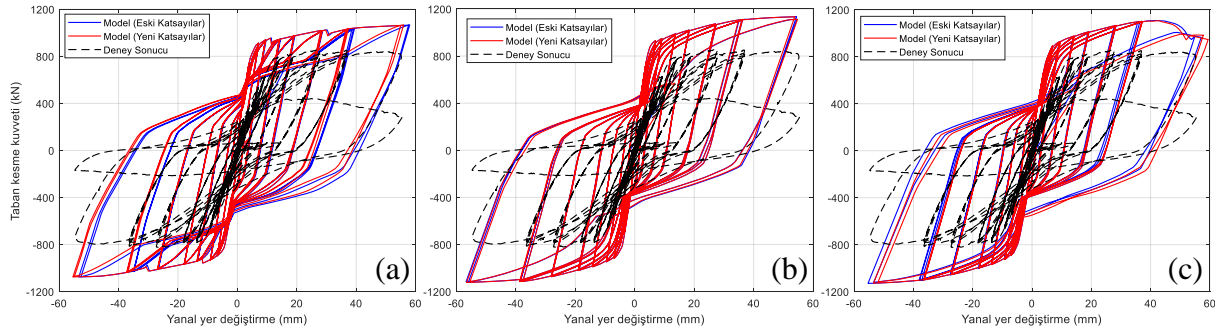
Çalışma kapsamında farklı beton malzeme modellerine ve beton sınıflarına göre yapılan tüm analizlerde beton modelleri için tanımlanan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayıları Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulduğu gibi alınarak analizler yapılmıştır. Daha sonra beton malzemeler için sabit olarak tanımlanan Y, U, R, L ve X katsayıları sırasıyla 0.7, 0.6, 0.5, 0.4 ve 0.3 olarak alınıp sadece deney beton sınıfı kullanılarak elde edilen analizler tekrarlanmış ve böylece bu katsayıların beton modeli ve sınıfı ile birlikte betonarme perde duvarların deneysel sonuçlarının tahminindeki etkileri irdelenmiştir. İlk analizlerde kullanılan katsayılarla elde edilen model sonuçları “Eski Katsayılar” ismi ile mavi olarak gösterilmiş olup, yeni katsayılar kullanılarak elde edilen sonuçlar kırmızı olarak gösterilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan bütün beton modelleri için ve betonarme perde duvar numuneleri için deneysel olarak elde edilen beton basınç dayanımları kullanılarak elde edilen analiz sonuçları deney sonuçları ile birlikte Şekil 11, 12 ve 13’te gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde RW2 [19] ile RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvarlarında neredeyse bu etkiler hiçbir beton modelinde farklılık göstermemektedir. Ancak RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesinde diğer iki numuneye göre bir miktar farklılıklar oluşmuştur. Bu farklılıkların doğrusal olmayan analizlerde sonuca yakınsama problemleri nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Yine aynı numune için sonuca yakınsama problemi yaşanmamış olan Mander vd. [7], beton modeli analizinde birebir aynı sonuçlar elde edilmiştir. Özetle, beton modelleri için tanımlanan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının sonuçları neredeyse hiç etkilemediği söylenebilir.



Şekil 11. RW2 [19] betonarme perde duvar numunesinin modellenmesi için kullanılan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkilerine etkisi; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]



Şekil 12. RW-A20-P10-S38 [20] betonarme perde duvar numunesinin modellenmesi için kullanılan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkilerine etkisi; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]



Şekil 13. RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvar numunesinin modellenmesi için kullanılan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma kat sayılarının taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme ilişkilerine etkisi; (a) Hognestad [3], (b) Mander vd. [7], (c) Saatçioğlu-Ravzi [2]

IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında literatürde geçerli olan Hognestad [3], Mander vd. [7], Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modelleri için hem kullanılan betonarme perde duvar numuneleri deneysel beton dayanımları hem de iki farklı beton dayanımı ile basitleştirilmiş birden fazla doğrudan oluşan kapasite eğrileri elde edilmiştir. Bu beton modelleri ve elasto-plastik donatı modelleri kullanılarak, görece narin betonarme perde duvarların Perform-3D [17] paket programında tersinir-tekrarlanırlı yüklem durumu (deneysel olarak uygulanan yüklem protokolünü) temsil etmek için birden fazla statik itme analizi ile doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1. Taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme grafiklerinde görüldüğü üzere özellikle RW2 [19] betonarme perde duvar numunesinde Hognestad [3], Mander vd. [7], Saatçioğlu-Ravzi [2] beton modelleri birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir. Ancak boy/en oranı azaldıkça (RW-A20-P10-S38 [20] ile RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perdelerinde) beton sınıfının etkisi taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme grafiklerinde az da olsa görülmüştür.

2. Boy/en oranı 2.0 ve 1.5 olan perdeler için yapılan analizler incelendiğinde, Hognestad [3] beton modelinde beton dayanımı az da olsa taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme kapasitesini etkilerken, Mander vd. [7] beton modelinde sadece kullanılan en düşük beton sınıflarında taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme kapasitelerinde çok az farklılıklar elde edilmiştir.

3. Beton dayanımının RW2 [19] betonarme perde duvar numunesine göre etken olduğu RW-A20-P10-S38 [20] ile RW-A15-P10-S78 [20] betonarme perde duvarlarında Saatçioğlu-Razvi [2] beton modelinin hem kapasite olarak farklılık gösterdiği hem de tersinir tekrarları yüklemeye karakteristik özellikleri açısından farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

4. Beton modelleri için tanımlanan tekrarlı yükler altında birim şekil değiştirmeye bağlı azaltma katsayılarının sonuçlara etkisini irdelemek için iki farklı set kullanılarak yapılan analizlerden bu katsayıların çalışma kapsamındaki tüm beton modelleri için neredeyse etkisi olmadığı neticesine varılmıştır.

Sonuç olarak, görece narin betonarme perdelerin doğrusal olmayan analizlerinde farklı beton malzeme modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirine yakın olduğu için, hesap kolaylığı ve daha hızlı sonuç elde etmek açısından daha basit modeller tercih edilebilir. Ancak betonarme perde duvar boy/en oranı azaldıkça bir başka deyişle betonarme perde duvar davranışında kesme etkisinin baskın olması halinde beton dayanımı ve hatta kullanılan beton modeli de azda olsa sonuçları etkilemektedir. Boy/en oranı 3.0 olan betonarme perde duvarlar için beton modeli seçiminin bir öneminin olmadığı ve hatta beton sınıfının bile taban kesme kuvveti-yanal yer değiştirme kapasitesini neredeyse etkilemediği söylenebilirken, boy/en oranı 2.0 veya daha az olan betonarme perde duvarlarda beton modeli seçiminin az da olsa etkili olduğu ve beton sınıfının doğru beton modeli kullanıldığında etkili olduğu kanısına varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Sheikh S. A. & Üzümeri S. M. (1982). Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns. *ASCE Journal of the Structural Division*, 108 (12), 2703-2722.
- [2] Saatcioglu, M., & Razvi, S. R. (1992). Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 118(6), 1590-1607.
- [3] Hognestad, E. (1951). Study of combined bending and axialload in rein forced concrete members. University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- [4] Kent D. C. & Park R. (1971). Flexural Members with Confined Concrete. *ASCE Journal of the Structural Division*, 97 (7), 1969-1990.
- [5] Roy H. E. H. & Sozen M. A. (1965). Ductility of concrete' in 'Flexural Mechanics of Rein forced Concrete'. *ACI Structural Jorunal*, 12, 213-224.
- [6] Sargin, M. & Handa, V. K. (1968). *Structural concrete and some numerical solutions*. In Proceedings of the 23rd ACM National Conference. 563-574.
- [7] Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826.
- [8] Razvi, S., & Saatcioglu, M. (1999). Confinement model for high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 125(3), 281-289.
- [9] Cusson, D., & Paultre, P. (1995). Stress-strain model for confined high-strength concrete. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 468-477.
- [10] Sönmez, E., & Dönmez, C. (2019). Malzeme ve sayısal modelleme parametrelerinin betonarme elemanların deprem simülasyonları üzerindeki etkilerinin araştırılması. *In International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (SICEES)*. 8, 11.
- [11] Bedirhanoglu, I., & Ilki, A. (2004). Theoretical moment-curvature relationships for reinforced concrete Members and comparison with experimental data. Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul, Turkey: Bogazici University.
- [12] Özmen, H., İnel, M., & Bilgin, H. (2007). Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2).
- [13] Uzbaş, B. (2014). Beton İçin Geliştirilen Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, 17(3), 115-126.
- [14] Işık, E., Özdemir, M., Karaşin, İ., & Karaşin, A. (2019). Betonarme yapılarda kullanılan malzeme modellerinin karşılaştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 968-984.
- [15] Foroughi, S., & Yüksel, S. (2020). Investigation of the moment-curvature relationship for reinforced concrete square columns. *Turkish Journal of Engineering*, 4(1), 36-46.

- [16] Foroughi, S., Jamal, R., & Yüksel, S. (2021). TBDY 2018 ve Mander modeline göre sargılı betonun gerilme-şekil değiştirmesinin araştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 363-375.
- [17] Perform-3D, CSI. "Computers and structures Inc." (2005). Berkeley, CA, USA.
- [18] Matlab. "MATLAB Starter Application." MathWork (2020). USA.
- [19] Thomsen, J.H., & Wallace, J.W. (2004). Displacement-based design of slender reinforced concrete structural walls-experimental verification. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130(4), 618-630.
- [20] Tran, T.A. & Wallace, J.W. (2015). Cyclic testing of moderate-aspect-ratio reinforced concrete structural walls. *ACI Structural Journal*, 112(6), 653-666.