




Sargısız betonun mekanik özelliklerinin TBDY 2018 ve diğer modellerle analitik ve deneysel karşılaştırılması

Analytical and experimental comparison of mechanical properties of unconfined concrete with TBDY 2018 and other models

Hürmet Küçükgöncü^{1,*} 

¹ Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38080, Kayseri Türkiye

Öz

Betonarme elemanların davranışlarının anlaşılabilmesi için betonarmeyi oluşturan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Sargısız beton malzemesinin gerilme-şekil değiştirme davranışının tahmin edilebilmesi için pek çok matematiksel model geliştirilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) de de sargısız betonların gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına yer verilmektedir. Ancak bu matematiksel modellerin dayanım, süneklik ve yük altında enerji tüketebilme kapasitesi açısından benzer özelliklerdeki deneysel numunelerden farkının tespit edilmesi oldukça önemlidir. Böylece sargısız beton modellerin, analitik yaklaşımlarının doğruluğu belirlenebilmektedir. Betonarme yapısal elemanların özellikle kesit davranışı araştırılırken ya da yük altında kesit tasarımları yapılırken söz konusu modellerin sergilediği davranışı bilmek büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada TS 500 yönetmeliğinde yer alan beton sınıfları ve dayanımlarına uygun olarak üretilen numuneler basınç testine tabi tutulmuş, sonrasında ise bu dayanım sınıflarına ait sargısız beton davranışı için literatürde sık kullanılan matematiksel modeller ve TBDY 2018 de yer alan bağıntılar kullanılarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden yararlanılarak süneklik ve enerji tüketebilme kapasitesi gibi mekanik özellikleri, TBDY 2018 ve diğer matematiksel modellerle, deneysel verilerden elde edilen değerler karşılaştırılarak farklılıkları ortaya konulmuştur. Buna göre göz önüne alınan beton modellerinin güçlü ve zayıf yönleri belirlenmiş ve kullanılan beton sınıfına ait dayanımın da modellerin performansı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sargısız beton, Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, Dayanım, Süneklik, Tüketilen enerji

1 Giriş

Ülkemizin deprem bölgesi açısından tehlikeli bir konumda bulunması ve inşa edilen yapıların yıkıcı depremlere maruz kalması nedeniyle betonarme elemanların tasarım, yapım ve analizleri oldukça büyük önem

Abstract

It is necessary to understand the stress-strain behavior of the materials composing the reinforced concrete in order to understand the behavior of reinforced concrete members. Many mathematical models are developed to predict the stress-strain behavior of unconfined concrete. The Turkish Building Earthquake Code 2018 (TEC 2018) also includes stress-strain relations for unconfined concrete. However, it is so important to determine the differences of these mathematical models from experimental specimens with similar properties in terms of strength, ductility and consumed energy under load. Thus, the accuracy of the analytical approaches of unconfined concrete models can be determined. Comprehending the behavior of the models provides great convenience, especially when investigating the section behavior of reinforced concrete structural members or when designing the section under load. For this reason, in this study, the specimens produced in accordance with the concrete grades and strengths in the TS 500 regulation were subjected to the compression test, and then stress-strain graphs were obtained by using the mathematical models frequently used in the literature and the relations in TEC 2018 for the unconfined concrete behavior. By using these graphs, mechanical properties such as ductility and energy consumption were compared with TEC 2018 and other mathematical models and the values obtained from experimental data and their differences were revealed. Accordingly, the strengths and weaknesses of the considered concrete models were determined and it was concluded that the strength of the concrete grade was also effective on the performance of the models.

Keywords: Unconfined concrete, Stress-strain relationship, Strength, Ductility, Consumed energy

taşımaktadır. Özellikle olası yıkıcı depremlere maruz kalacak bu yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanması ve yapıyı oluşturan yapısal elemanların kesit analizlerinin doğru yaklaşımlarla yapılması gereklidir. Yapıların depreme dayanıklı tasarım ve analizlerinde doğrusal ve doğrusal olmayan olarak iki farklı davranış göz önüne alınır [1]. Buna

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hurmet.kucukgoncu@agu.edu.tr (H. Küçükgöncü)
Geliş / Received: 06.09.2022 Kabul / Accepted: 17.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1171778

göre yapısal elemanların kesit analizleri bu davranışlardan uygun olanı seçilerek yapılır. Elemanların kesit analizleri yapılırken kullanılan yapı malzemesinin davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere ilgili yapı elemanının davranışı; malzeme, geometri ve etkiyen yüklere bağlıdır [2]. Bununla birlikte, dikkate alınan malzeme özelliklerinin birim şekil değiştirme ilişkisi üzerindeki etkisi büyüktür [3]. Betonarme elemanların kesit analizlerinde ise özellikle yeterli dayanım, süneklik ve rijitliğe sahip olup olmadıkları incelenir. Bu nedenle hem yapının hem de yapısal elemanın davranışının belirlenebilmesi için betonun yapı malzemesi olarak davranışını bilmek gerekir. Böylece, gerçekçi bir yaklaşımla modellenen davranış, yapıların tasarım ve analizinin doğruluğunu artırır [4]. Bunun için öncelikle betonun gerilme-şekil değiştirme davranışının elde edilmesi gerekir. Betonun davranışı, sargılı ve sargısız olmasına göre değişkenlik göstermektedir. Bugüne kadar literatürde pek çok araştırmacı, betonun hem sargılı hem de sargısız davranışı için farklı formüller önermiştir [5-16]. Bu araştırmacıların sargılı beton davranışı için geliştirdiği formüllerin birçoğu diğer araştırmacılar tarafından çalışmalarında kullanılmış ve bazı karşılaştırmalar yapılmıştır [17-20]. Ancak, sargısız beton davranışı için önerilen formüllerin kullanıldığı oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır [21,22]. Öte yandan, sargısız beton davranışının da bilinmesi, betonun sargı donatısı olmaksızın, yapı malzemesi olarak davranışının anlaşılabilmesi, modelleme ve analizlerde gerekli görüldüğü yerlerde kullanılabilmesi açısından önemlidir.

Sargısız betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için literatürde çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu matematiksel modellerin ilki Hognestad [5], tarafından 1951 yılında önerilmiştir. Hognestad modelinde maksimum gerilme değerine kadar eğri parabolik olarak artar, sonrasında ise doğrusal olarak düşer. Chan [6], çalışmasında hem sargılı hem de sargısız beton davranışına yer vermiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde ilk iki kısım her iki model için de aynıdır. Son kısımda ise sargısız beton için maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri ϵ_{co} değerine eşit ve negatif bir eğimi varken, sargılı betonda ise son kısmın eğimi pozitifdir. Kent ve Park [8] da hem sargılı hem de sargısız beton modelleri üzerine çalışmış olup sargısız beton malzemesi için gerilme-şekil değiştirme eğrisini Hognestad modeline benzer bir şekilde maksimum gerilmeye kadar ikinci derece bir parabol ve kalan kısmı içinse azalan eğime sahip bir doğru olarak önermiştir. Sargılı ve sargısız betonlar için ampirik formüller tanımlayan diğer araştırmacılar ise Mander vd. [11,12] ile Saatçioğlu ve Razvi [13] dir. Çalışmalarında sargılı ve sargısız betonarme elemanların davranışlarını göz önüne alarak gerilme-şekil değiştirme eğrisini araştırmışlardır. Attard ve Setunge [15], hem sargılı hem de sargısız betonlar için matematiksel modeller ve onlarla ilişkili analitik formüller önermişlerdir. Modeller için kullanılan başlıca parametreler, maksimum gerilme, maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme, elastisite modülü ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin büküm noktasındaki gerilme ve şekil değiştirmedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) [23] de de sargılı ve sargısız beton davranışları

dikkate alınarak, her iki davranış için de gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesini sağlayan bağıntılarına yer verilmektedir. Bu çalışmada ise deneysel çalışmadan elde edilen silindir beton numunelere ait mekanik özellikler, Hognestad, Kent-Park, Mander, Saatçioğlu-Razvi gibi literatürde yaygın olarak kullanılan sargısız beton modellerine göre, deneysel numunelere benzer özelliklerdeki beton sınıfları için analitik olarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu amaçla TS500 yönetmeliğinde [24], yer alan farklı sınıf (C20, C25, C30, C35 ve C40) beton numuneler üretilmiş ve basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrileriyle birlikte dayanım, süneklik, tüketilen enerji değerleri gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Aynı beton sınıfları için literatürdeki modellere ait analitik formüller kullanılarak elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrileri ve buna bağlı olarak hesaplanan diğer mekanik özellikler hem deneysel verilerle hem de kendi aralarında diğer sargısız beton modelleriyle karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konulmuştur. Bu şekilde, literatürde yer alan modellerin matematiksel yaklaşımlarının gerçekte üretilen beton sınıflarıyla ne derece örtüştüğü ve analitik yaklaşımların doğruluğu tespit edilmiştir.

2 Materyal ve metod

Çalışma kapsamında, öncelikle TS 500 yönetmeliğinde tanımlanan C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarına dayanım açısından uygun olan üçer adet silindir beton numune üretilmiş ve basınç testine tabi tutulmuştur. Ancak her bir beton sınıfı için üretilen numunelerin gerilme şekil değiştirme eğrilerinin ortalamasının alınması sonucu elde edilen eğri, betonun sahip olduğu σ - ϵ karakteristik eğrisini tam olarak yansıtamamıştır. Her bir numunenin belirli noktalarının ortalamasının dikkate alınması durumunda ise eğri ikinci derece parabolik eğri olma özelliğini kaybetmektedir. Bu durumda enerji tüketimi gibi özellikleri doğrudan etkilediğinden, çalışmada her bir beton sınıfı için ilgili karakteristik dayanıma en yakın numunenin σ - ϵ grafikleri göz önüne alınmıştır. Matematiksel modellerin formülasyonları gereği beton sınıfları için karakteristik basınç dayanımı göz önüne alındığından beri, her bir beton sınıfı için karakteristik dayanıma en yakın basınç dayanımına sahip beton numuneye ait deneysel verilerin karşılaştırma için kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Böylece basınç testi sonrasında her bir beton sınıfı için tek bir numuneden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri (σ - ϵ) çizilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise herhangi bir deney verisi kullanılmaksızın C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarının yönetmeliklerde yer alan standart silindir basınç dayanımları göz önünde bulundurulmuş; Hognestad, Kent-Park, Mander, Saatçioğlu-Razvi, TBDY 2018 sargısız beton modellerinde yer alan analitik bağıntılar kullanılarak σ - ϵ eğrileri elde edilmiştir. Sonuçta, bu eğriler yardımıyla her bir sınıfın analitik ve deneysel olarak plastik şekil değiştirmenin başladığı değerler ve bu noktaya karşılık gelen dayanım değerleri, maksimum dayanımları ve maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerleri, maksimum şekil değiştirme değeri ve bu noktaya karşılık gelen dayanım

değeri ile süneklik ve tükettikleri toplam enerji miktarları hesap edilmiştir. Elde edilen bulgular, hem deneysel verilerle hem de TBDY 2018 den elde edilenlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Deneyler ve kullanılan sargısız beton modelleri ile ilişkili analitik formüllere ait bağlantılar aşağıdaki başlıklarda verilmektedir.

2.1 Deneysel çalışma

Çalışmanın deneysel kısmında, hazır beton santralinden temin edilen TS EN 206'da [25] belirtilen beton özelliklerine uygun olarak üretilen C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarına ait silindirik numuneler kullanılmıştır. Tüm numuneler, basınç deneyleri için standartlara uygun olarak [26,27] 15 cm taban çapına ve 30 cm yüksekliğe sahip silindirik kalıplara alınmıştır. Beton numuneler kalıplara yerleştirilirken, segregasyon olmayacak, yüzeye şerbet çıkmayacak ve tam sıkışma elde edilecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 1). Betonun karakteristik basınç dayanımının ilk 7 günde oldukça hızlı bir şekilde arttığı ve neredeyse nihai dayanımının %70'ine ulaştığı, ilerleyen günlerde ise nihai karakteristik basıncının kalanına daha yavaş bir artışla 28 günün sonunda ulaştığı bilinmektedir. Betonun basınç dayanımına; betonun yaşı, boyutları ve kürlenme işleminin doğrudan bir etkisi bulunmaktadır [28]. Bu nedenle silindirik numuneler, döküm işlemi tamamlandıktan 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Ardından, yönetmeliklerde belirtilen standart kür koşullarına [27] göre suda 20°C ± 2 sıcaklıkta kürlenmiş, 28 günlük standart silindirik deney numuneleri elde edilmiştir.

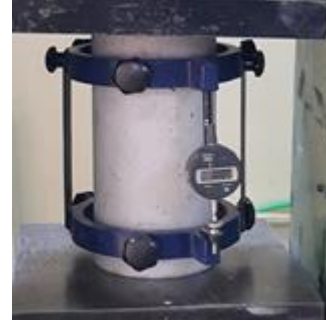


Şekil 1. Kalıplanan silindirik beton numunelerden birkaçı

Kürleme işlemi tamamlanan numunelere basınç testi uygulanacağı için standartlara [27] uygun bir biçimde kükürt başlık yapılmıştır. Sonrasında ise sırasıyla tüm numuneler tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç deneyleri sonunda, σ - ϵ grafiklerini elde edebilmek için silindirik beton numunelere birim boydaki değişimi ölçen 0,001 mm hassasiyetli komparatör takılmıştır (Şekil 2). Silindirik numuneler üzerine yerleştirilen, deney başlangıcında sıfırlanan bu deplasman ölçü saati yardımıyla deney boyunca kuvvetin artışıyla birlikte birim boyda meydana gelen değişim kaydedilmiştir. Böylece deney sonunda her bir numune için kuvvet deplasman değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerilme şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplamalar sonucunda her bir numuneye ait σ - ϵ eğrileri çizilmiştir.

2.2 Sargısız beton modelleri

Betonarme kesit analizlerinin yapılabilmesi için denge ve uygunluk koşullarının yanı sıra malzemelerin gerilme-şekil



Şekil 2. Komparatör takıldıktan sonra basınç testi uygulanan beton numune

değiştirme ilişkisinin de bilinmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere denge ve uygunluk koşulları malzeme davranışlarından bağımsız olup, denge denklemleri; gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilirken, uygunluk denklemleri ise şekil değiştirme cinsinden ifade edilir. Bu iki farklı denklem arasındaki ilişki ise sadece kullanılan malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılarak kurulmaktadır. Yapı malzemesi olarak betonun özelliklerine bakıldığında, basınç dayanımının çekme dayanımına oranla daha yüksek olması nedeniyle betonun katkısı sadece basınca maruz kalması durumunda göz önüne alınır. Buna bağlı olarak, betonun basınç dayanımını yansıtan σ - ϵ eğrilerinin elde edilmesinde; uygulanan yükün çeşidi, hızı, yük geçmişi, kesit geometrisi ve boyutları ile sargılı ya da sargısız olması gibi birçok değişken rol oynamaktadır. Bu nedenle beton için tek bir σ - ϵ eğrisi tanımlamak oldukça güçtür. Dolayısıyla, betonarme kesit analizlerinin yapılabilmesi için σ - ϵ eğrileri idealleştirilerek kullanılmaktadır [3]. Literatürde pek çok araştırmacı matematiksel model olarak adlandırılan bu idealize edilerek basitleştirilmiş σ - ϵ eğrileri üzerine çalışarak, beton malzemesi için birçok σ - ϵ modeli önermişlerdir. Bu çalışma kapsamında sargısız beton için geliştirilen modeller arasında yer alan Hognestad, Kent-Park, Mander, TBDY 2018 modelleri kullanılmıştır. Saatçioğlu-Razvi modeli ise sargılı betonlar için geliştirilmiş olup çalışmada gerekli değişikliklerin yapılmasıyla sargısız betonlar için de kullanılmıştır. Kullanılan sargısız beton modelleri için verilen denklemlerde " σ_c " betonun ilgili şekil değiştirme değerindeki basınç dayanımını, " f_c " silindirik betonun karakteristik standart basınç dayanımını, " f_{co} " sargısız betonun maksimum basınç dayanımını, " f_{c85} " silindirik betonun karakteristik standart basınç dayanımını %85 ini, " ϵ_c " betonun ilgili gerilme değerindeki şekil değiştirme değerini, " ϵ_{co} " sargısız betonun maksimum basınç dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme değerini, " ϵ_{c85} " silindirik betonun karakteristik standart basınç dayanımını %85'ine karşılık gelen şekil değiştirme değerini, " ϵ_{50u} " maksimum gerilmenin %50 azaldığı dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri, " ϵ_{u85} " maksimum gerilmenin %15 azaldığı dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri, " ϵ_{cu} " ise maksimum şekil değiştirmesini, " E_c " sargısız

betonun elastisite modülünü, “E_{sec}” sargısız betonun Sekant modülünü ifade etmektedir.

2.2.1 Hognestad modeli

Hognestad [5] tarafından önerilen bu modelde σ - ε eğrisi iki kısımdan oluşur. İlk kısımda eğri, ikinci derece bir parabol olup maksimum gerilme değerini temsil eden tepe noktasına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu noktadan sonra devam eden ikinci eğri lineer olup betonun maksimum şekil değiştirme değerine kadar doğrusal olarak ilerler. Aşağıdaki bağıntılar Hognestad tarafından sargısız beton davranışı için geliştirilmiş denklemlerdir. Modelde beton basınç dayanımı silindirik numune dayanımının %85'i olarak alınmaktadır. Maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değişimi ise geleneksel betonda 0.002 olarak alınmaktadır. Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki ise, sırasıyla parabolik eğri için [Denklem \(1\)](#), [Denklem \(2\)](#), [Denklem \(3\)](#) ve doğrusal eğri [Denklem \(4\)](#) te verilen bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (2)$$

$$E_c = 12680 + 460 \times f_c \quad (3)$$

$$\sigma_c = 0,85x f_c \quad (4)$$

2.2.2 Kent-Park sargısız beton modeli

Bu modelde σ - ε eğrisinin maksimum gerilmeye kadar olan bölümü parabolik olarak tanımlanırken, maksimum gerilmeden sonraki kısmı lineer olarak azalmaktadır. Maksimum gerilme f_c , genellikle standart silindirik beton basınç dayanımı olarak alınmaktadır. Sargısız beton davranışında gerilmenin azalarak devam ettiği lineer kısımda, maksimum gerilmenin %50 azaldığı değer ve karşılık gelen şekil değiştirme değeri de hesaplanır. Ayrıca sargısız betonda maksimum birim şekil değiştirme ε_{cu} dur ve $\varepsilon_{cu}=0.004$ alınabilmektedir. Kent-Park [8] tarafından önerilen modelde parabolik eğrinin hesabı için [Denklem \(5\)](#) kullanılırken, lineer kısmın hesabı için [Denklem \(6\)](#), [Denklem \(7\)](#), [Denklem \(8\)](#) kullanılmaktadır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$f_c [1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})] \quad (6)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.29f_c}{145f_c - 1000} \quad (8)$$

2.2.3 Mander sargısız beton modeli

Mander vd. [11,12] tarafından önerilen beton modeli, sargısız betonun davranışını ortaya koymakta olup kesitin dairesel ya da dörtgen olmasına göre farklı bağıntılar sunmaktadır. Buna göre çalışmada, silindirik numunelerin

dayanımı araştırıldığından dairesel kesite ait formüller kullanılmıştır. Mander sargısız beton modeli için geliştirilen gerilme denklemi [Denklem \(9\)](#) maksimum gerilmeyi temsil eden tepe noktasına kadar kullanılmakta olup bu noktadan sonraki gerilme değerinin hesabı için [Denklem \(10\)](#) kullanılmaktadır. Diğer denklemler ise her iki gerilme denklemi için ortak olup [Denklem \(11\)](#), [Denklem \(12\)](#) ve [Denklem \(13\)](#) te verilmektedir. Mander sargısız beton modelinde maksimum şekil değiştirme ε_{cu} yaklaşık olarak 0.004 olarak dikkate alınırken, kopma dayanımı ise bu değere karşılık gelen gerilme değeridir.

$$\sigma_c = \frac{f_{co} x r}{r - 1 + x^r} \quad (9)$$

$$\sigma_c = f_{co} \left(\frac{2r}{r - 1 + 2r^r} \right) \quad (10)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \quad (11)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (12)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}} \quad (13)$$

$$E_c = 5000 \times \sqrt{f_c} \quad (14)$$

2.2.4 Saatçioğlu-Razvi beton modeli

Saatçioğlu-Razvi [13] tarafından önerilen ve [Denklem \(15\)](#) ve [Denklem \(16\)](#) da bağıntıları verilen gerilme-şekil değiştirme modeli sargılı betonlar için önerilmiştir. Bu nedenle sargılı beton dayanımı hesaplanırken, yanal sargı basınç etkisini de dikkate almak için bazı katsayılar önermişlerdir. Bu çalışmada ise sargı donatısı olmadığından yanal basınca herhangi bir katkı olmamaktadır. Böylece, betonun basınç dayanımının artmasını sağladığı bilinen bu katsayılar 1 olarak alınmıştır. Bu sayede maksimum gerilme dayanımı, betonun standart silindirik karakteristik basınç dayanımına eşit olmuştur. Modelde sadece sargı donatısının sağladığı tüm katkılar matematiksel olarak çıkarılmış ve modelin doğasına zarar vermeksizin analitik formüller sadece sargısız beton davranışına uygun olarak hesaplanmıştır. Böylece sargılı donatı için geliştirilen bir modelin sargısız donatı davranışını nasıl bir doğruluk derecesi sağlayabileceği de araştırılmıştır. Matematiksel modelde σ - ε eğrisi artan eğime sahip bir parabol ([Denklem \(15\)](#)) ve sonrasında azalan eğime sahip bir doğru parçasından ([Denklem \(16\)](#)) oluşmaktadır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\sigma_c = f_{c+} \left(\frac{f_c - f_{c85}}{\varepsilon_{co} - \varepsilon_{c85}} \right) (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \quad (16)$$

2.2.5 TBDY 2018 sargısız beton modeli

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 [23] de sargısız beton malzemesinin davranışı tıpkı Mander modelinde

olduğu gibi dairesel ve dörtgen kesitler için ayrı ayrı formüller şeklinde verilmektedir. Bu modelde de Mander modeline benzer şekilde σ - ε eğrisinin parabolik kısmının elde edilmesi Denklem (17), doğrusal kısmının elde edilmesi Denklem (18) yardımıyla sağlanmaktadır. Denklem (19), Denklem (20), Denklem (21) ve Denklem (22), de yer alan bağıntılar ise σ - ε eğrisinin her iki kısmı içinde kullanılmaktadır. Mander sargısız beton modelinden farklı olarak TBDY 2018 de maksimum şekil değiştirme değeri $\varepsilon_{cu}=0.005$ olarak dikkate alınırken, sargısız betonun bu şekil değiştirme değerine ulaştığında, dayanımının sıfır olduğu yani yük taşımadığı kabul edilir.

$$\sigma_c = \frac{f_{co} x r}{r - 1 + x^r} \quad (17)$$

$$\sigma_c = f_{co} \left(\frac{2r}{r - 1 + 2r} \right) \quad (18)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \quad (19)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (20)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{co}}{\varepsilon_{c0}} \quad (21)$$

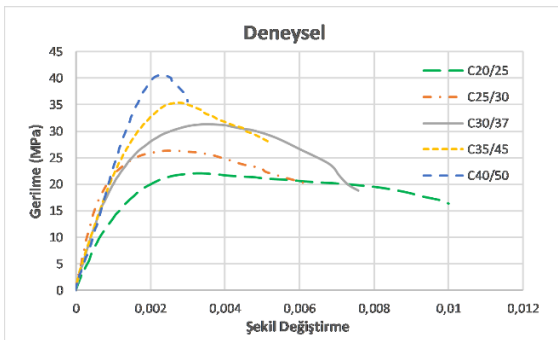
$$E_c = 5000 \times \sqrt{f_c} \quad (22)$$

3 Bulgular ve tartışma

Sargısız beton davranışı için çalışmada göz önüne alınan her bir beton sınıfına ait deneysel ve analitik sonuçlardan elde edilen σ - ε eğrileri ile bu eğrilerden elde edilen dayanım, şekil değiştirme, süneklik ve tüketilen toplam enerji değerleri karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

3.1 Deneysel sonuçlar

Silindir beton numunelerin basınç deneylerinden elde edilen kuvvet-deplasman değerlerinden, kuvvet değerinin silindir numunelerin yüzey alanına bölünmesiyle gerilme (σ), deplasman değerinin de numunenin boyuna bölünmesiyle şekil değiştirme değerleri (ε) elde edilmiştir. Böylece her bir kuvvet-deplasman değerlerine karşılık gelen gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Silindir numunelerin basınç deneylerinden elde edilen σ - ε grafikleri

3.2 Gerilme-şekil değiştirme eğrileri

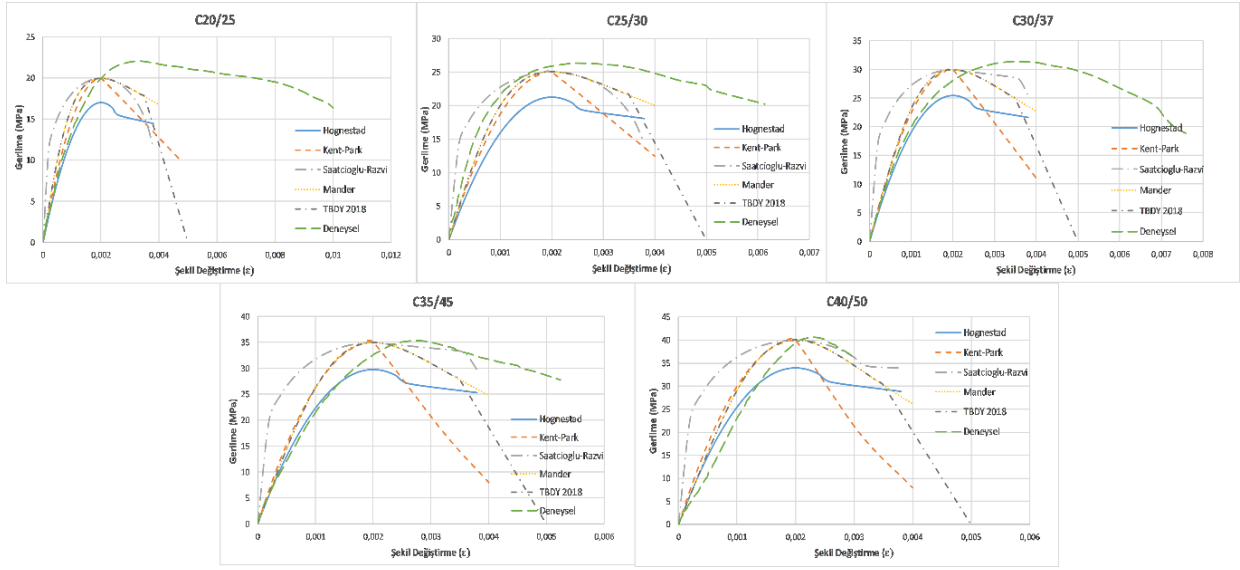
C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarına ait standart karakteristik basınç dayanımlarının; Hognestad, Kent-Park, Mander, Saatçioğlu-Razvi, TBDY 2018 sargısız beton modelleri için geliştirilen analitik bağıntılarda kullanılmasıyla ve deneysel verilerden elde edilen σ - ε eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te sunulmuştur.

Şekil 4'te yer alan C20 beton sınıfına ait σ - ε grafiklerinde, deneysel verilerden elde edilen dayanımın 1-2 MPa kadar daha yüksek olması, beton santralinden gelen numunenin 20 MPa'nın biraz üzerinde bir dayanıma sahip olması ve sonucun deneysel olarak elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Analitik sonuçlara bakıldığında ise en düşük dayanım Hognestad modelinden elde edilmiştir. Bunun nedeni, bu modelin tepe noktasındaki maksimum dayanımının, silindirik karakteristik basınç dayanımının %85'i olarak kabul edilmesi ve bu şekilde önerilmesinden kaynaklıdır. Şekil değiştirme değerleri incelendiğinde ise en büyük şekil değiştirmenin yine deneysel modele ait olduğu gözlenmektedir. Deneysel modeli sırasıyla TBDY 2018, Kent-Park, Mander, ve Saatçioğlu-Razvi ile Hognestad modeli izlemiştir. Eğrilerin tepe noktasına kadarki artan eğimli kısmı için en düşük artış miktarı Hognestad'a ait olup daha sonra onu, deneysel, Kent-Park, Mander ve TBDY 2018 ile Saatçioğlu-Razvi takip etmektedir.

Sargısız beton modellerinin C25 beton sınıfına ait eğrileri için bir karşılaştırma yapılacak olursa yine deneysel verilerden kaynaklı olarak yaklaşık 1 MPa civarında deney numunenin dayanımı yüksek iken, Hognestad modeli, geliştirilen analitik formülden kaynaklı olarak $(0.85f_c)$ maksimum dayanım olarak en düşük değere sahiptir. Şekil değiştirmeler incelendiğinde ise en büyük şekil değiştirmenin yine deneysel veriden elde edildiği onu sırasıyla TBDY 2018, Mander ve Kent-Park, Saatçioğlu-Razvi ve Hognestad izlemiştir. Eğrilerin ilk kısımları incelendiğinde, en dik olanı Saatçioğlu-Razvi olup deneysel, TBDY 2018 ve Mander, Kent-Park ve Hognestad onu takip eden modellerdir.

C30 beton sınıfı numunelerde ise deneysel çalışmadan elde edilen en yüksek dayanım değeri, standart silindirik karakteristik basınç dayanımından yaklaşık 1 MPa kadar daha fazladır. Hognestad modeli ise basınç dayanımı açısından en düşük değere sahip modeldir. Şekil değiştirmeler açısından değerlendirildiğinde ise en yüksek şekil değiştirme değeri deneysel çalışmadan elde edilmiştir. Daha sonra ise TBDY 2018, Mander ve Kent-Park, Saatçioğlu-Razvi ile Hognestad modellerinden elde edilen şekil değiştirme değerleri gelmektedir. Grafiklerin ilk kısımları incelendiğinde, daha dik bir açığa sahip olmalarına göre Saatçioğlu-Razvi TBDY 2018 ve Mander, Kent-Park, deneysel ve Hognestad olarak sıralanmaktadır.

Silindir beton numunelerin C35 sınıfında olanlarının σ - ε grafikleri incelendiğinde, Hognestad modeli dışında deneysel numunelerin maksimum dayanımları ile matematiksel modellerden hesaplanan maksimum dayanım birbirine oldukça yakındır. Şekil değiştirme değerleri karşılaştırıldığında ise diğer beton sınıflarına benzer şekilde en yüksek şekil değiştirme değeri deneysel çalışmadan elde edilmiştir. Diğer modellerden elde edilen şekil değiştirmeler



Şekil 4. Silindirik numunelerin sargısız beton modelleri ve deneylerden elde edilen σ - ϵ grafiklerinin karşılaştırılması

ise en yüksekten en düşüğe doğru; TBDY 2018, Mander, Kent-Park ve Hognestad ile Saatçioğlu-Razvi dir. Grafiklerdeki eğrilerin ilk kısımlarının eğimlerine göre en yüksek eğim; Saatçioğlu-Razvi, Kent-Park, TBDY 2018 ve Mander ile Hognestad dır. Her ne kadar çok küçük bir farkla da olsa deneysel veriler yardımıyla çizilen eğrinin eğimi en düşüktür.

C40 betonu sınıfında yer alan numuneler için deneysel veriden elde edilen maksimum dayanım ile matematiksel modellerden elde edilen dayanımlar birbirlerine oldukça yakındır. Gerilme-şekil değiştirme değerleri incelendiğinde, maksimum şekil değiştirme değeri bu kez TBDY 2018 modelinden elde edilirken, bu modeli sırasıyla Mander, Kent-Park, Saatçioğlu-Razvi ile Hognestad beton modeli ve son olarak deneysel çalışma izlemektedir. σ - ϵ eğrisinin ilk kısmı irdelendiğinde, yine en dik eğime Saatçioğlu-Razvi modelinden elde edilen eğrinin sahip olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte, Kent-Park, TBDY 2018 ile Mander, Hognestad ve son olarak deneysel sonuçlar yardımıyla çizilen eğrinin eğimleri de onu takip etmektedir.

Şekil 4'te yer alan grafiklerden görüleceği üzere Mander ve TBDY 2018 in eğimindeki artış miktarı analitik formüllerden kaynaklı olarak modellerin doğası gereği aynıdır. Tüm beton sınıflarına ait grafiklerin ikinci kısımlarında yani eğri maksimum tepe noktasına ulaştıktan sonra en hızlı düşüş Kent-Park modelinde gözlenmiştir. TBDY 2018 de önerilen matematiksel modele bağlı olarak maksimum şekil değiştirmesine karşılık gelen nokta olan $\epsilon_{cu}=0.005$ ten itibaren, beton kesitin yük almadığı kabul edildiğinden bu noktada dayanım sıfırdır.

3.3 Dayanım, şekil değiştirme ve süneklik

Bu bölümde σ - ϵ grafiklerinden faydalanılarak her bir beton sınıfı için elastik dayanım ve bu dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri, plastik şekil değiştirme başlangıcı ve bu noktaya karşılık gelen dayanım değeri, maksimum dayanım ve bu noktaya karşılık gelen şekil değiştirme ile maksimum şekil değiştirme ile bu noktaya

karşılık gelen dayanım değeri hesaplanmış ve Tablo 1 de verilmiştir. Maksimum şekil değiştirme noktasına karşılık gelen dayanım değeri literatürde en son dayanım ya da kopma dayanımı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle betonun gevrek bir malzeme olduğu bilinmekle birlikte, çalışma boyunca bu dayanımdan kopma dayanımı olarak bahsedilmiştir. Buna göre σ - ϵ eğrisi üzerinde bulunan tepe noktası maksimum dayanımı (f_c) işaret ederken, bu dayanıma karşılık gelen şekil değiştirmede (ϵ_c) yi gösterir. Elastik dayanım (f_e), maksimum dayanımın (f_c) %40 ı olarak alınmıştır [29]. Bu değere karşılık gelen şekil değiştirme ise ϵ_e ile ifade edilir. Kopma dayanımı (f_{cu}) ise eğrinin dayanım açısından geldiği son gerilme noktası olarak tanımlanırken bu değere karşılık gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_{cu}) ise maksimum şekil değiştirme olarak adlandırılır. Beton doğası gereği kırılğan bir malzeme olduğu için belirli bir akma noktasına sahip değildir. Bununla birlikte eksenel basınç kuvveti altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrileri doğrusal değildir. Fakat bir noktaya kadar betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik davrandığı kabul edilir [30,31]. Ancak beton numunelerin tek eksenli yükleme altında gerilmelerinin artmasıyla, şekil değiştirmeler de artar. Bu gerilme artışıyla birlikte, beton içerisinde mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Betonun doğrusal olmayan bu davranışında agrega çimento matrisi ara yüzeyinin önemli etkisi olduğu düşünülmekte olup, σ - ϵ grafiklerinin doğrusal olmaması, yükleme nedeniyle betonda çatlakların meydana gelmesiyle açıklanmaktadır [31-33]. Gerilme, beton içerisindeki mikro çatlakların hızla artması ve mikro çatlakların ağ oluşturmasıyla birlikte artmaktadır [34]. Bu nokta betonun hasar görmeye başladığı ve plastik şekil değiştirmenin başladığı nokta olarak kabul edilir [30,34-37]. Bu nokta bulunurken σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasına çizilen doğrunun eğiminden yararlanılır. σ - ϵ grafiği üzerinde bu noktanın, x eksenindeki değerine karşılık gelen nokta plastik şekil değiştirmenin (ϵ_{pn}) başladığı ve beton içindeki mikro çatlakların belirginleşerek ağ oluşturduğu noktayı, y eksenindeki iz düşümü ise bu

noktaya karşılık gelen gerilme değerini (f_{pn}) temsil eder [37-40].

Betonarme kesitlerin ve malzemelerin, elastik ötesi deformasyon yapma kapasitesi; yani yük altındaki büyük deformasyonlar yapabilme kabiliyeti veya enerji tüketilme kapasitesi, düktilite ya da süneklilik olarak tanımlanmaktadır [41,42]. Bu nedenle özellikle depreme dayanıklı yapı tasarım ilkeleri doğrultusunda, yapının sünekliliğinin yüksek olması istenilen bir özelliktir. Donatılandırılmamış betonun basınç altında şekil değiştirme sünekliliğinin oldukça sınırlı olduğu bilinmekle birlikte [41], matematiksel olarak şekil değiştirme sünekliliği, ulaşılabilecek toplam şekil değiştirmenin, elastik sınırın geçildiği şekil değiştirmeye oranı olarak hesaplanır [43]. Bu şekilde çalışmada, her bir beton sınıfı için her bir sargısız beton modelinden elde edilen σ - ϵ eğrilerinden faydalanılarak belirlenen maksimum şekil değiştirmenin plastik şekil değiştirmenin başladığı noktadaki

değere oranı ilgili beton sınıfının σ - ϵ eğrisi için şekil değiştirme süneklilik (μ) değerini verir. Hesaplanan süneklilik değerleri Tablo 1 de sunulmuştur.

Tablo 1'den görüleceği üzere, beton sınıflarının tamamı için, numunelerin elastik noktadaki dayanımlarından en düşük olanı beklenildiği gibi modelin matematiksel tanımı gereği daha düşük bir maksimum dayanıma sahip olan Hognestad a aittir. En yüksek elastik dayanım ise maksimum dayanımın en yüksek olduğu, deneysel çalışmaya aittir. Diğer modellerde ise eğrilerin bu noktaya kadarki eğim artışları eşit olduğundan bu değer de aynıdır. Plastik şekil değiştirme noktasına karşılık gelen dayanımlar incelendiğinde yine en düşük dayanım, en düşük maksimum dayanıma sahip olan Hognestad modelinden elde edilirken en yüksek dayanım, C40 beton numunesi hariç deneysel numunelerden elde edilmiştir.

Tablo 1. Silindir numunelerin beton sınıflarına göre dayanım, şekil değiştirme ve süneklilik değerleri

C20/25		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	6.8	16.96	17	14.45	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	8	19.95	20	10	0.000453	0.00195	0.002	0.00474	2.431
Saatçioğlu-Razvi	8	19.94	20	11.50	0.000139	0.001829	0.002	0.0038	2.078
Mander	8	19.96	20	16.78	0.000381	0.001884	0.002	0.004	2.123
TBDY 2018	8	19.96	20	0	0.000381	0.001884	0.002	0.005	2.654
Deneysel	8.83	21.82	22.10	16.37	0.000556	0.002835	0.003365	0.01001	3.531
C25/30		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	8.5	21.20	21.25	18.06	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	10	24.93	25	12.5	0.000453	0.00195	0.002	0.004	2.051
Saatçioğlu-Razvi	10	24.92	25	14.37	0.000139	0.001829	0.002	0.0038	2.078
Mander	10	24.94	25	14.37	0.000419	0.001901	0.002	0.004	2.104
TBDY 2018	10	24.94	25	0	0.000419	0.001901	0.002	0.005	2.630
Deneysel	10.52	25.85	26.29	20.20	0.000319	0.002022	0.002475	0.006135	3.034
C30/37		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	10.2	25.44	25.50	21.68	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	12	29.93	30	11	0.000453	0.00195	0.002	0.004	2.051
Saatçioğlu-Razvi	12	29.91	30	25.50	0.000139	0.00183	0.002	0.0038	2.077
Mander	12	29.96	30	22.71	0.000454	0.00196	0.002	0.004	2.041
TBDY 2018	12	29.96	30	22.71	0.000454	0.00196	0.002	0.005	2.551
Deneysel	12.55	31.12	31.37	18.87	0.000529	0.00310	0.003435	0.00758	2.445
C35/45		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	11.9	29.68	29.75	25.29	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	14	34.91	35	8	0.000453	0.00195	0.002	0.004	2.051
Saatçioğlu-Razvi	14	34.90	35	29.75	0.000139	0.00183	0.002	0.0038	2.077
Mander	14	34.97	35	24.81	0.000485	0.00198	0.002	0.004	2.020
TBDY 2018	14	34.97	35	0	0.000485	0.00198	0.002	0.005	2.525
Deneysel	14.13	35.21	35.32	27.75	0.000599	0.00264	0.00272	0.00525	1.987
C40/50		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	13.6	33.81	34	28.9	0.000453	0.001991	0.002	0.0038	1.909
Kent-Park	16	39.92	40	10	0.000453	0.001991	0.002	0.004	2.000
Saatçioğlu-Razvi	16	39.89	40	34	0.000139	0.001829	0.002	0.0038	2.078
Mander	16	39.99	40	26.18	0.000515	0.001998	0.002	0.004	2.002
TBDY 2018	16	39.99	40	0	0.000515	0.001998	0.002	0.005	2.503
Deneysel	16.25	39.84	40.63	35.60	0.000724	0.002284	0.0023	0.002995	1.311

Bunun muhtemel nedeni deneysel çalışmanın getirdiği farklılıktır. Deneysel çalışmadan sonra en yüksek plastik şekil değiştirme dayanımı ise TBDY 2018 ve Mander beton modellerinden elde edilmiştir. Her iki modelde de matematiksel yaklaşımları gereği σ - ε grafikleri maksimum dayanımı geçtikten sonraki bir noktaya kadar neredeyse aynı devam ettiğinden, kopma dayanımı hariç diğer dayanım değerleri birbirine eşittir. Plastik şekil değiştirme değerine karşılık gelen dayanım açısından bu iki grafiği izleyen diğer model ise Kent-Park modeli olup, Saatçioğlu-Razvi modeliyle arasında oldukça küçük bir fark bulunmaktadır. Plastik şekil değiştirme dayanım değerleri deneysel çalışma dâhil, tüm numunelerde maksimum dayanım değerlerine oldukça yakın değerlerdedir. Kopma dayanım değerleri incelendiğinde ise kopma dayanımının en yüksek olarak hesaplandığı model C30 ve C35 beton sınıfları için Saatçioğlu-Razvi modeli iken diğer beton sınıfları için deneysel çalışmadaki dayanım değerleridir. TBDY 2018 modelinde kopma dayanımı şekil değiştirme değeri 0.005 e ulaştığında sıfır olarak alınır.

Tablo 1'den görüleceği üzere elastik noktadaki şekil değiştirmeler açısından en düşük değer Saatçioğlu-Razvi ye aitken en yüksek değer C25 beton sınıfı hariç olmak üzere tüm sınıflar için deneysel çalışmadan elde edilendir. Plastik şekil değiştirme içinse en yüksek değer deneysel çalışmanınken, en düşük değer modelin analitik yaklaşımı nedeniyle Saatçioğlu-Razvi modelidir. Tüm modellerin analitik yaklaşımları nedeniyle maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerleri aynıdır. Maksimum şekil değiştirme değerleri incelendiğinde yapılan kabuller nedeniyle en düşük Hognestad ve Saatçioğlu-Razvi modelinde görülürken, en yüksek değer C40 beton sınıfı hariç deneysel veriden alınan değerdir. C40 betonu için karakteristik basınç dayanımı oldukça arttığında şekil değiştirmenin azalması nedeniyle bu sonuç gözlenmiştir.

Çalışmada kullanılan beton modellerine göre araştırılan tüm beton sınıfları için süneklik değerleri **Tablo 1** de sunulmuştur. Genel olarak süneklik değerleri incelendiğinde, bu değerler modeller ve beton sınıflarına göre değişmekle birlikte 2 civarlarında değerler aldığı gözlenmiştir. Beklenildiği gibi artan basınç dayanımına bağlı olarak beton sınıfı arttıkça, süneklik değerleri de azalmaktadır. Ancak Hognestad modelinde C40 beton sınıfı hariç diğer tüm sınıflarda süneklik değeri sabit kalmıştır. Süneklik değerleri beton modellerine göre incelendiğinde ise Hognestad modeli en düşük süneklik değerine sahiptir. En yüksek süneklik değeri ise C20 ve C25 için deneysel veriden elde edilen; C30, C35 ve C40 için TBDY 2018 modelleridir. Bu durumun olası nedeni uygulamada beton sınıflarında dayanım arttıkça sünekliğin azalmasıdır.

3.4 Tüketilen toplam enerji

Hem deneysel çalışmadan hem de analitik olarak beton modellerinden elde edilen σ - ε eğrileri göz önüne alınarak hesaplanan enerji tüketim miktarları **Tablo 2** de verilmektedir. Tüketilen enerji miktarları, her bir beton sınıfı için her bir modelden ve basınç deneyinden elde edilen σ - ε eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasına

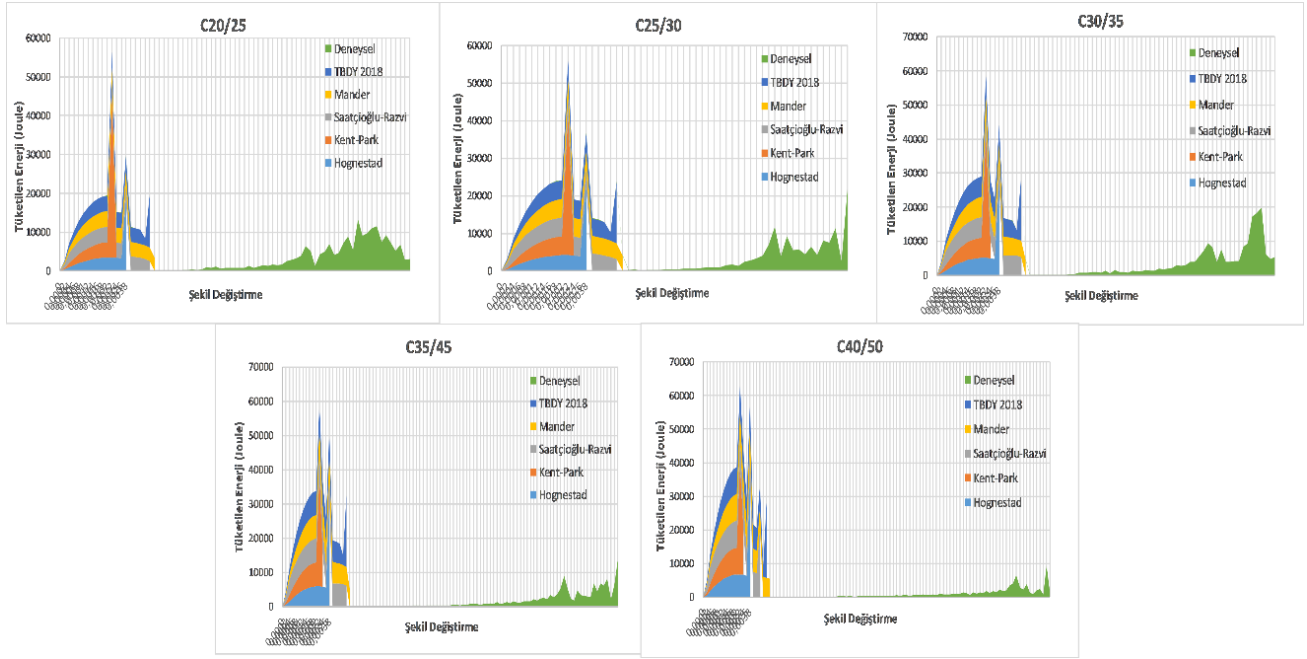
dayanmaktadır. Bilindiği üzere, enerji tüketimi ile süneklik arasında yakın bir ilişki olup, enerji tüketiminin artmasıyla sünekliğin de arttığı düşünülmektedir [44]. Süneklik artışı ise yapılarda istenen bir özelliktir. Bu nedenle her bir beton modeli için hesaplanan enerji tüketim değerleri elde edilerek bir karşılaştırma yapılmıştır.

Tüketilen enerji değerleri için **Tablo 2** ye bakıldığında, σ - ε eğrisinin altında kalan alana bağlı olarak Hognestad ve Kent-Park modelleri en az enerji tüketimine sahiptirler. En yüksek enerji tüketimine sahip model ise TBDY 2018 dir. Bu model dışında C25 ve C30 beton sınıfı için deneysel verilerden elde edilen tüketim, diğer tüm modellere göre en fazladır. **Şekil 5**'te ise şekil değiştirmelere karşılık gelen enerji tüketim alanları verilmiştir. Böylece, her bir beton modeli için şekil değiştirme değerlerinde tüketilen enerji alanları gözlenebilmektedir.

Tablo 2. Silindir numunelerin beton sınıflarına göre tüketilen enerji miktarları

Tüketilen Enerji (Joule)	Hognestad	Kent-Park	Saatçioğlu-Razvi	Mander	TBDY 2018	Deneysel
C20	50439	67687	81076	80378	93550	106252
C25	63049	70750	97291	94338	101127	170384
C30	75659	80995	119992	112534	120618	241869
C35	88268	88614	145936	130956	140246	100638
C40	100878	99482	162151	140817	150634	106353

Bu şekilde enerji tüketimi açısından her bir modelin analitik yaklaşımının daha iyi anlaşılması mümkün olmaktadır. Burada görüleceği üzere, enerji tüketiminin gerçekleşmesi açısından değerlendirildiğinde, deneysel veri ile matematiksel modellerdeki analitik yaklaşım birbirinden farklıdır. Öyle ki tüm beton modellerinde enerji tüketimi yoğun olarak maksimum tepe noktası da dâhil olmak üzere, maksimum şekil değişiminin yaşandığı noktaya kadar devam etmektedir. Bununla birlikte, her bir beton sınıfına ait tüm alan grafiklerine göre enerji tüketim değerleri maksimum dayanımın olduğu noktadan itibaren bir sıçrama gerçekleştirir ve bu nokta pik yaptığı yer olarak görülür. Maksimum şekil değişimine kadar azalan değerlerde bir miktar daha enerji tüketimi gerçekleştirir. Ancak deneysel verilerden elde edilen tüketilen enerji alanlarına bakıldığında, enerji tüketiminin elastik şekil değiştirme değerinden başlayarak arttığı ve maksimum şekil değiştirme noktasında ise maksimum değerine ulaştığı gözlenmektedir. Yani enerji tüketim değerleri, şekil değiştirmenin meydana geldiği adımlara doğru artmakta ve maksimum şekil değiştirmeye ulaşıldığı noktada ise en yüksek değerini alarak sona ermektedir. Sonuç olarak, her ne kadar tüketilen enerji değerleri benzer şekilde hesaplanırsa da tüketilen enerjinin tüketim dönemlerinin dinamiği açısından, betonun matematiksel modellerinden elde edilen enerji tüketim alanları olgusuna göre deneysel veriden elde edilenden daha farklıdır.



Şekil 5. Şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen enerji tüketim değerleri

3.5 Sargısız beton modellerin deneysel verilerle karşılaştırılması

Çalışmanın amacı doğrultusunda, matematiksel beton modellerinden elde edilen tüm sonuçlar basınç deneyinden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve ortaya çıkan farklılıklar yüzde hata cinsinden hesaplanmıştır. Tablo 3 te çalışma kapsamında incelenen tüm beton sınıfları için bu değerler ayrı ayrı sunulmuştur. Bu şekilde araştırılan özelliklere göre, hangi beton modelinin hangi beton sınıfı için yakın sonuçlar verdiği de tespit edilmiştir.

Tablo 3 ten görüleceği üzere Hognestad modeli dışında tüm beton modellerinden hesaplanan elastik dayanım ve maksimum dayanımın hata yüzdeleri birbirleriyle aynıdır. Buna göre elastik ve maksimum dayanımın hata yüzdeleri birbirleriyle aynıdır. Bu şekilde elastik ve maksimum dayanım açısından deneysel verilere en uzak beton sınıfı C20 iken en yakın olanı C35 dir. Hata yüzdeleri ise oldukça düşüktür. Deneysel verilere göre plastik şekil değiştirmeye karşılık gelen dayanımlar karşılaştırıldığında ise hata yüzdeleri yine oldukça düşük hesaplanmıştır. Burada ise en yakın sonuçlar C40 beton sınıfı, en uzak sonuçlar ise C20 beton sınıfından elde edilmiştir.

Kopma dayanımında ise analitik modellerin matematiksel yaklaşımları nedeniyle birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, C20 beton sınıfı için en iyi sonucu Mander modeli verirken; C25 ve C30 beton sınıfı için en yakın sonuçlar Hognestad modelinden, C35 ve C40 içinse Saatçioğlu-Razvi modelinden elde edilmiştir. Burada C20 beton sınıfı için Mander modelinden sonra en yakın sonuç Hognestad modelinden elde edildiği için düşük dayanım sınıfına sahip betonlarda Hognestad modeli kopma dayanımı açısından iyi sonuçlar vermektedir. TBDY2018 modelinden elde edilen kopma dayanımının en yüksek hata değerine sahip olmasının nedeni; modelin matematiksel

yaklaşımında 0.005 şekil değiştirme değerinde kopma dayanımının sıfır olarak alınmasıdır. Yüksek dayanım sınıfındaki betonlarda ise aslında orijinalinde sargılı beton davranışı için geliştirilen Saatçioğlu-Razvi beton modeli en iyi performansı göstermiştir. Bunun nedeni olarak sargı donatısının kopma dayanımına sağladığı katkıyla birlikte, bu modelin analitik olarak sargılı beton davranışına göre tasarlanmış olması gösterilebilir. Beton modellerinden elde edilen şekil değiştirmeler irdelendiğinde dayanım değerlerine göre şekil değiştirme değerleri için daha büyük hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Analitik modellerin yaptığı kabullere bağlı olarak, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri için hesaplanan hata yüzdesi tüm modellerde aynıdır. Bununla birlikte, benzer kabulleri yapan bazı modellerin de yüzde oranları aynı olabilmektedir. Örneğin, Hognestad ve Kent-Park modelleri ile Mander ve TBDY 2018 modelleri kendi aralarında σ - ϵ grafiğinde özellikle grafiğin ilk kısmında benzer eğimlere sahip olduğundan elastik dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme için aynı hata miktarına sahiptirler. Bu şekil değiştirme için en yakın sonuç C20 sınıfında Hognestad ve Kent-Parktan elde edilirken, diğer sınıflarda Mander ve TBDY 2018'den elde edilir. En yakın sonuçlar C20 betonuna aitken en uzak olanlar C40 beton sınıfında hesaplanmıştır. Oldukça benzer sonuçlar plastik şekil değişimi başlangıcına karşılık gelen şekil değiştirme için de söz konusudur. C20 beton sınıfı için Hognestad ve Kent-Park en yakın sonuçları verirken, diğer sınıflarda Mander ve TBDY 2018 en iyi sonuçları sunmuştur. Bu şekil değiştirme değerinde ise en iyi sonuçlar C25 betonu için hesaplanır, en uzak sonuçlar C30 betonu için hesaplanmıştır. Maksimum şekil değiştirmede ise C40 beton sınıfı dışında, diğer beton sınıfları için en iyi sonuçlar TBDY 2018 kullanılarak hesaplanmıştır. C40 beton sınıfında maksimum şekil değişimini 0.0038 olarak kabul eden Hognestad ve Saatçioğlu-Razvi en iyi sonucu sunmuştur.

Tablo 3. Silindir numunelerin deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla elde edilen yüzdelik hata değerleri

C20/25		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	22.99	22.27	23.08	11.73	18.53	31.22	40.56	62.04	44.81	52.53	
Kent-Park	9.40	8.57	9.50	38.91	18.53	31.22	40.56	52.65	31.16	36.30	
Saatçioğlu-Razvi	9.40	8.62	9.50	29.75	75.00	35.49	40.56	62.04	41.16	23.70	
Mander	9.40	8.52	9.50	2.50	31.47	33.54	40.56	60.04	39.87	24.35	
TBDY 2018	9.40	8.52	9.50	100.00	31.47	33.54	40.56	50.05	24.84	11.96	
C25/30		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	19.20	17.99	19.17	10.59	42.01	3.56	19.19	38.06	35.77	63.00	
Kent-Park	4.94	3.56	4.91	38.12	42.01	3.56	19.19	34.80	32.39	58.48	
Saatçioğlu-Razvi	4.94	3.60	4.91	28.86	56.43	9.55	19.19	38.06	31.52	42.90	
Mander	4.94	3.52	4.91	28.86	31.35	5.98	19.19	34.80	30.65	44.63	
TBDY 2018	4.94	3.52	4.91	100.00	31.35	5.98	19.19	18.50	13.31	40.65	
C30/37		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	22.34	21.97	22.33	13.91	23.82	56.87	57.98	61.61	16.36	68.72	
Kent-Park	5.23	4.60	5.21	38.96	23.82	56.87	57.98	58.35	12.98	66.51	
Saatçioğlu-Razvi	5.23	4.68	5.21	32.82	122.26	62.81	57.98	61.61	12.15	50.39	
Mander	5.23	4.49	5.21	19.01	23.51	56.38	57.98	58.35	13.33	53.47	
TBDY 2018	5.23	4.49	5.21	19.01	23.51	56.38	57.98	42.05	3.49	50.13	
C35/45		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	21.20	21.39	21.19	12.18	45.77	34.12	29.09	23.63	1.32	12.29	
Kent-Park	1.24	1.16	1.22	97.77	45.77	34.12	29.09	20.37	2.06	11.95	
Saatçioğlu-Razvi	1.24	1.20	1.22	9.90	144.20	40.06	29.09	23.63	2.90	45.01	
Mander	1.24	0.93	1.22	14.55	35.74	32.64	29.09	20.37	1.04	30.13	
TBDY 2018	1.24	0.93	1.22	137.38	35.74	32.64	29.09	4.07	17.69	39.36	
C40/50		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	25.19	23.33	25.22	33.17	84.95	14.49	12.12	13.12	19.70	5.15	
Kent-Park	2.38	0.31	2.40	126.73	84.95	14.49	12.12	16.38	23.00	6.46	
Saatçioğlu-Razvi	2.38	0.19	2.40	7.92	183.39	22.50	12.12	13.12	19.70	52.47	
Mander	2.38	0.58	2.40	46.63	65.52	14.14	12.12	16.38	23.00	32.41	
TBDY 2018	2.38	0.58	2.40	176.24	65.52	14.14	12.12	32.68	39.48	41.64	

Tablo 3 incelendiğinde, süneklik açısından en iyi sonuçların C35 ve C40 beton sınıfı hariç, diğer beton sınıflarında TBDY 2018 sargısız beton modeline ait olduğu görülmüştür. C35 beton sınıfında ise Mander modeli en yakın sonucu verirken, C40 beton sınıfında ise bu sonuç Saatçioğlu-Razvi ve Hognestad modellerine aittir. Buna göre düşük dayanımlı beton sınıfları için hesaplanan süneklik değerlerinde TBDY 2018 yakın değerler verirken dayanımı daha yüksek betonlarda bu durum değişmektedir.

Her bir beton sınıfı için her bir beton modelinden hesaplanan tüketilen toplam enerji miktarları deneysel

verilerle kıyaslandığında ortaya sünekliktekinе benzer bir sonuç çıkmaktadır. C35 ve C40 beton sınıfı hariç diğer beton sınıflarına ait σ - ϵ eğrilerinden hesaplanan tüketilen enerji için en yakın değerlerin TBDY 2018 sargısız beton modelinden elde edildiği gözlenmiştir. C35 beton sınıfı için Kent-Park, C40 beton sınıfı içinse Hognestad beton modelleri en yakın sonuçları veren modeller olmuştur.

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında göz önüne alınan sargısız beton modellerinden TS500 de yer alan bazı beton sınıfları için

hesaplanan dayanım, şekil değiştirme, süneklik ve tüketilen toplam enerji miktarları açısından hem deneysel verilerle hem de TBDY 2018 ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu doğrultuda yapılan deneysel ve analitik çalışmalar ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

*Beton sınıflarına ait dayanım değerlerine göre deneysel verilerle en çok uyum sağlayan verilerin TBDY 2018 ve Mander sargısız beton modellerinden elde edildiği görülmüştür. Ancak kopma dayanımında TBDY 2018 sargısız beton modelinde, betonun 0.005 değerinden sonra yük taşımadığı kabulü yapılarak bu değerle dayanım sıfır alınmaktadır. Deneysel çalışmada ise silindirik beton numunelerde kırılma gerçekleşinceye kadar beton numune yük taşımaktadır. Bu noktada TBDY 2018 sargısız beton modeli daha güvenli tarafta kalmak adına bu kabulü yaptığımızdan kopma dayanımı daha yüksek hata değerine sahiptir.

*Beton sınıflarının sahip olduğu dayanımların da, beton modellerinin doğrulukları üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Buna göre özellikle düşük dayanıma sahip beton sınıflarında Mander, TBDY 2018 ve Hognestad (kopma dayanımı için) etkinken, yüksek dayanıma sahip beton sınıflarında özellikle kopma dayanımı ve maksimum şekil değiştirme açısından Saatçioğlu-Razvi sargılı beton modelinin sargısız betonlar için revize edilerek kullanılan şeklinin de etkin olduğu görülmektedir.

*Beton numunelerin farklı noktadaki şekil değiştirme değerleri açısından en yakın sonuçlar, düşük dayanım sınıflı betonlar için Hognestad ve Kent-Park modellerinden hesaplanırken, daha yüksek dayanıma sahip beton sınıflarında Mander ve TBDY 2018 den hesaplanmıştır. Maksimum şekil değişimi açısından Saatçioğlu-Razvi sargılı beton modelinin de etkin olduğu gözlenmiştir.

*Analitik beton modellerinden hesaplanan süneklik değerlerinde ise yine düşük dayanımlı beton sınıfları için en iyi performansı TBDY 2018 sargısız beton modeli gösterirken, dayanımı yüksek betonlarda bu durum değişmektedir.

*Beton numunelerin yüklenme boyunca tükettikleri toplam enerji miktarı açısından, düşük dayanımlı beton sınıfları için en etkili model TBDY 2018 olurken, yüksek dayanıma sahip sınıflarda ise Hognestad ve Kent-Park modelleri öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, analitik modellerin enerji tüketimine yaklaşımlarının gerçekte var olan enerji tüketim olgusundan daha farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Matematiksel modeller mevcut enerji tüketiminin büyük bir kısmının maksimum dayanımda gerçekleştiği yaklaşımına sahiptir. Ancak deneysel veriler, maksimum dayanımdan sonra kuyruk kısmı ve özellikle maksimum şekil değişiminden hemen önce, açığa çıkan enerjinin önemli bir kısmının tüketildiğini göstermektedir.

Yukarıda sıralanan sonuçlara göre matematiksel modeller, özellikle deney yapma imkânına sahip olunamayan durumlarda ya da betonarme yapıları tasarlarken kesit analizlerinde, büyük kolaylıklar sağlamaktadırlar. Ancak seçilen modellere göre tasarım ya da analiz yapılırken, bu modellerin doğruluk dereceleri ya da yapı analizinde önemli bir yere sahip özellikler açısından güçlü ve zayıf yönlerinin bilinmesi analizlerin doğruluğu ve

güvenilirliği açısından önemlidir. Bu bağlamda yapılan çalışma sonucunda, mevcut deprem yönetmeliğinde yer alan TBDY 2018 sargısız beton modelinin dayanım ve şekil değiştirme açısından iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Süneklik ve enerji tüketimi açısından ise düşük dayanım sınıfına sahip betonlarda daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca analizlerde ve tasarımda beton modeli seçilirken, kullanılacak beton sınıfı ve dayanımının da önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin çimento, su miktarı, betonun kompozitesi, yükleme tipi, yükleme hızı, yükleme geçmişi, kesit geometrisi gibi pek çok değişkene bağlı olduğu ancak çalışmada nedenleri açıklandığı üzere incelenen beton sınıfları için tek bir silindirik numuneye ait σ - ϵ eğrilerinden faydalandığı belirtilmiştir. Gelecek çalışmalarda ortaya çıkan kısıtların giderilerek, beton numunelerin σ - ϵ eğri karakteristiklerini değiştirmeden daha fazla sayıda numunenin ve ilave beton sınıflarının da dahil edilmesiyle deneysel olarak incelenmesi faydalı olacaktır. Böylece deneylerde kullanılan beton sınıfının artırılması ve bu sayede elde edilen sonuçların istatistiksel olarak daha geniş ölçekte değerlendirilmesi planlanmaktadır. Bu çalışmalar neticesinde dayanımı yüksek betonlar için matematiksel beton modeli üzerine bir çalışma düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] K. J. Bathe, and S. Ramaswamy, On three-dimensional nonlinear analysis of concrete structures. Nuclear Engineering and Design, 52 (3), 385-409, 1979. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(79\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(79)90029-3).
- [2] I. Carol, and J. Murcia, nonlinear time-dependent analysis of planar frames using an 'exact' formulation-I. theory. Computers & Structures, 33(1), 79-87, 1989. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(89\)90131-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90131-4).
- [3] U. Ersoy, Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2007.
- [4] U. Ersoy ve G. Özcebe, Sarılmış betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi analitik bir irdeleme. İMO Teknik Dergi, 9 (4), 1799-1827, 1998. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/12805/155419>.
- [5] E. Hognestad, A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois Engineering Exp. Station, Urbana-Champaign, United States, Bulletin, 49 (22), 1951.
- [6] W. W. L. Chan, The Ultimate strength and deformation of plastic hinges in reinforced concrete frameworks. Magazine of Concrete research, 7(21), 121-132, 1955. <https://doi.org/10.1680/mac.1955.7.21.121>.
- [7] M. Sargin, Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections. Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 4, 1971.

- [8] D. Kent and R. Park, Flexural members with confined concrete. Journal of Structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 97(7), 1969-1990, July 1971. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002957>.
- [9] S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curves of concrete. Cement and Concrete Research, 3 (5), 583-59, 1973. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3).
- [10] S. A. Sheikh and S. M. Uzumeri, Analytical model for concrete confinement in tied columns. Journal of Structural Engineering, 108 (12), 2703-2722, 1982. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0006100>.
- [11] J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, 114 (8), 1804-1826, 1988a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [12] J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, Observed stress-strain behavior of confined concrete. Journal of Structural Engineering, 114 (8), 1827-1849, 1988b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1988\)114:8\(1827\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1827)).
- [13] M. Saatcioglu and S. R. Razvi, Strength and ductility of confined concrete. Journal of Structural Engineering, 118(6), 1590-1607, 1992. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1992\)118:6\(1590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1992)118:6(1590)).
- [14] K. M. El-Dash and S. H. Ahmad, a model for stress-strain relationship of spirally confined normal and high-strength concrete columns. Magazine of Concrete Research, 47(171), 177-184, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF02473125>.
- [15] M. M. Attard and S. Setunge, Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. Materials Journal, 93(5), 432-442, 1996.
- [16] B. Assa, M. Nishiyama and F. Watanabe, New approach for modeling confined concrete. I: Circular columns. Journal of Structural Engineering, 127(7), 743-750, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(751\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(751)).
- [17] A. İlki ve N. Kumbasar, Sargılı beton için mevcut modellerin deneysel verilerle karşılaştırılması. Teknik Dergi, 12(3), 2419-2433, 2001. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/12794/155379>.
- [18] A. İlki, T. Fukuta ve P. Özdemir, Sargılı beton davranışı ve üç doğrudan oluşan gerilme-şekil değiştirme modeli. Teknik Dergi, 14(1), 2853-2871, 2003. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/1278/155358>.
- [19] H. Özmen, M. İnel ve H. Bilgin, Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (2), 2007. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6672/88386>.
- [20] S. Foroughi, R. Jamal ve B. Yüksel, TBDY 2018 ve Mander modeline göre sargılı betonun gerilme-şekil değiştirmesinin araştırılması. El-Cezeri, 8(1), 363-375, 2021. <https://doi.org/10.31202/ecjse.788121>.
- [21] S. B. Yüksel and S. Foroughi, Betonarme kolonların sargısız ve sargılı beton dayanımının analitik olarak araştırılması. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(3), 612-631, 2019. <https://doi.org/10.36306/konjes.613880>.
- [22] B. Uzbaş, Beton için geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modellerinin karşılaştırılması. Politeknik Dergisi, 17(3), 115-126, 2014. <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33071/368015>.
- [23] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2018.
- [24] TS500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara, 2000.
- [25] TS EN 206-1, Beton, Özellik, Performans, İmalat, Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [26] TS EN 12390-1 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyle-Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [27] TS EN 12390-2 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyle-Bölüm 2: Dayanım Deneylelerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [28] T. Demir, B. Demirel ve A. Demirbilek, Farklı su bağlayıcı ve kimyasal katkı oranlarına sahip yüksek dayanımlı betonların işlenebilirlik ve dayanım özellikleri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 34 (1), 161-170, 2022. <https://doi.org/10.35234/fumbd.990036>.
- [29] T.Y. Erdoğan, Beton. ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2010.
- [30] İ. B. Topçu ve A. Uğurlu, Betonda elastisite kuramı ve baraj betonları için statik e-modülünün kompozit modellerle tahmini, Teknik Dergi, 18 (86), 4055-4067, 2007. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/12772/155292>.
- [31] M. Pekgöz, Görüntü işleme yöntemiyle betonda gerilme-şekil değiştirme davranışının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [32] P.K. Mehta, Concrete. Prentice-Hall, USA, 2006.
- [33] O.F. Slate, and L.B. Meyers, Deformation of plain concrete. 5. International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.
- [34] O.N. Oktar, Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki işlevi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1977.
- [35] S. Mindess, and J.F. Young, Concrete. Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
- [36] S.D. Santiago, and H.K. Hilsdorf, Fracture mechanisms of concrete under compressive loads, Cement Concrete Research, 3 (4), 363-388, 1973.
- [37] H.H. Bache, and P.N. Christensen, Observations on strength and fracture in lightweight and ordinary concrete. Proceedings of and International Conference on the Structure of Concrete and Its Behaviour under Load, London, 1965.

- [38] A.M. Neville, Properties of Concrete. Pitman Books Limited, London, 1981.
- [39] M. P. Kaya, Mevcut betonarme binaların deprem performanslarının belirlenmesinde doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerin karşılaştırılması üzerine sayısal bir inceleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [40] H. Özmen, M. İnel ve H. Bilgin, Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (2), 2013. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6672/88386>
- [41] A. C. Aydın ve B. Bayrak, Betonarme perde duvarların farklı yapı malzemeleri açısından değerlendirilmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (1), 217-240, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.751562>
- [42] H. E. H. Roy and M.A. Sozen, Ductility of concrete. Special Publication, 12, 213-235, 1965.
- [43] A. Nzafakumunsi, T tipi plan düzensizliği olan betonarme yapıların doğrusal olmayan yöntemle performansının değerlendirmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [44] O. Merter ve T. Uçar, Betonarme kesitlerin doğrusal elastik ötesi davranışında tüketilen enerjiye boyuna donatı oranının, enine donatı aralığının ve eksenel yükün etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4 (1), 21-39, 2015. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239360>.

