



Makale / Research Paper

Geri Dönüşümlü Agregata Katkılı Beton için Gerilme-Şekil Değiştirme Modeli

İlyas SARIBAŞ

Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. 01150 Adana/TÜRKİYE

isaribas@adanabtu.edu.tr

Received/Geliş: 20.09.2018

Accepted/Kabul: 05.12.2018

Öz: İkinci dünya savaşından sonra tahrip olan şehirleri inşaat ve yıkıntı atığı molozlardan temizlemek amacıyla ortaya çıkan dönüşüm ve yeniden kullanım faaliyetlerinin kapsamı gelişmek suretiyle devam etmektedir. Günümüzde gelişmiş makine ve ekipman ile yapılan dönüşüm çalışmaları sonucunda inşaat ve yıkıntı atığı betonlardan elde edilen geri dönüşümlü agregalar geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Geri dönüşümlü agregaların kullanım alanlarından birisi de bu agregaların yeni beton üretiminde kullanılmasıdır. Literatürdeki çalışmalarda geri dönüşümlü agregaların, kullanıldığı betonun karakteristik özelliklerinden beton basınç dayanımını ve elastisite modülünü dolayısıyla da yeni betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini önemli oranda etkilediği görülmüştür. Bu noktadan hareketle geri dönüşümlü agregata katkılı betonlarda doğal malzemeden üretilen betonlar için ortaya konulan teknik ifadelerin kullanılmayacağı açıktır. Bu çalışma kapsamında geri dönüşümlü agregata katkılı beton için karışıma giren geri dönüşümlü agregata oranına bağlı olarak yeni bir gerilme-şekil değiştirme modeli önerilmiştir. Önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu ve yakınsamanın yüksek oranda olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Beton; Elastisite Modülü; Gerilme; Geri dönüşümlü agregata; Şekil değiştirme..

Stress-strain Model for Recycled Aggregate Concrete

Abstract: The scope of the recycling and reusing activities that are being carried out after the Second World War to eradicate the construction and demolition waste from the debris continues. Nowadays, because of the recycling works with advanced machinery and equipment, recycled concrete aggregates obtained from the construction and demolition waste concrete find a wide usage area. One of the utilization area of the recycled concrete aggregates is the using of these aggregates in the new concrete production. In the literature, it has been observed that recycled concrete aggregates have a significant impact on the concrete compressive strength, elasticity modulus and stress-strain relationship of new concrete. From this point, it is obvious that the technical statements for natural concretes cannot be used for recycled aggregate concrete. In this study, a new stress-strain model is proposed based on the ratio of recycled aggregate to admixture for recycled aggregate concrete. It has been found that the stress-strain relationship obtained from the proposed model is in a good agreement with the results obtained from the experimental studies.

Keywords: Concrete; Elasticity modulus; Recycled aggregate; Strain; Stress.

1. Giriş

Ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin bir sonucu olarak ortaya çıkan ve 1970'li yılların başlarından itibaren dünyada popüler hale gelen inşaat ve yıkıntı atığı beton ve beton türevi malzemelerin dönüştürülerek yeniden kullanılması düşüncesi, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde önemli seviyelere ulaşmıştır. İnşaat ve yıkıntı atığı betonları ortaya çıkaran nedenler, önceleri savaş gibi durumlar iken günümüzde hızlı bir şekilde artan nüfusla birlikte insanların yaşam alanları olan şehirlerin büyümesi, eskiden inşa edilen yapıların günümüz ihtiyaçlarına cevap verememesinden dolayı yıkılarak yerlerine yeni binaların yapılması şeklindedir. İnşaat ve yıkıntı atığı betonları

Bu makaleye atıf yapmak için

Sarıbaş İ., "Geri Dönüşümlü Agregata Katkılı Beton için Gerilme-Şekil Değiştirme Modeli" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(1); 156-165.

How to cite this article

Sarıbaş İ., "Stress-strain Model for Recycled Aggregate Concretes" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2019, 6(1); 156-165.

oluşturan diğer bir neden ise doğal afet olan depremlerdir. Son yıllarda, ülkemizde meydana gelen depremler sonrası yapılan incelemelerde, ilgili dönemin yapım yönetmeliğine uygun olarak inşa edilmeyen yapıların yenilenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Doğal ve yapay nedenler sonucunda ortaya çıkan inşaat ve yıkıntı atığı betonların doğal yaşam dengesini bozmadan ortadan kaldırılması önemlidir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde inşaat ve yıkıntı atığı betonların ortadan kaldırılma işlemi, büyük oranda bu betonların dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması şeklindedir. Çünkü inşaat ve yıkıntı atıkları dönüştürülerek yeniden kullanıldığında, tükenme tehlikesi olan doğal hammaddelerin kullanımının, bu hammaddeleri işlemek için gerekli enerji miktarının, insan ve makine gücünün, trafik problemlerinin ve çevreye salınan karbon monoksit miktarının azalmasında önemli katkılar sağlayacaktır.

İnşaat ve yıkıntı atığı betonların geri dönüşümüyle elde edilen geri dönüşümlü agregalar (GDA), daha önceleri betonarme elemanların haricindeki yük taşımayan elemanların üretiminde (yol, otopark, kaldırım, yürüyüş yolları, drenaj çalışmaları, kanalizasyon borusu ve kablo döşemelerinde dolgu malzemesi, istinat duvarlarında dolgu malzemesi, alt ve üst yapı inşaatlarında, spor ve oyun tesisleri inşaatları ile diğer dolgu ve rekreasyon) kullanılırken, şimdilerde GDA'nın yeni beton üretiminde ve yeni yapıların üretiminde kullanılabilir olduğunu ortaya koymak için önemli oranda deneysel ve analitik çalışmalar yapılmaktadır. Geri dönüşümlü agreganın yeni beton üretiminde kullanılabilirliği konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle bu çalışmaların GDA ve GDA katkılı betonun kimyasal, fiziksel, geometrik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olduğu görülmüştür. Geri dönüşümlü agreganın kimyasal, fiziksel, mekanik ve geometrik özelliklerinin doğal agregadan (DA) farklı olduğu çoğu çalışmada ifade edilmiştir. Bu iki malzeme (GDA ve DA) arasındaki farkı yaratan ana neden, GDA üzerinde yapışık vaziyette bulunan harç parçacıkları olduğu ifade edilmiştir. Geri dönüşümlü agregaların su emme kapasitesi, birim hacim ağırlığı, aşınma kaybı, özgül ağırlığı, parçalanabilirliği, toz parçacığı kapasitesi, organik malzeme içeriği, kimyasal malzeme içeriği genellikle yönetmeliklerce belirtilen kabul edilebilir sınırların içerisinde olduğu belirtilmiştir [1-5]. Geri dönüşümlü agrega ile üretilen betonun mekanik özellikleri ile DA katkılı betonun mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, GDA katkılı betonun; kuruma büzülmesi ve sünmesinin DA katkılı betondan %50 daha yüksek [6-8], basınç dayanımının DA katkılı betondan %25 daha düşük [1, 9-12], yarma ve eğilme dayanımının DA katkılı betondan %10 daha düşük [1,9,12], elastisite modülünün (E_c) DA katkılı betondan %45 daha düşük [9,11,12], don direncinin ise DA katkılı beton ile aynı veya DA katkılı betondan daha düşük olduğu [1,13-14] belirtilmiştir. Daha önce bu konuda yapılan çalışmalar ışığında, yeni beton üretiminde kullanılacak olan GDA'nın karakteristik özelliklerinin, GDA katkılı betonun karakteristik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin bilinmesi son derece önemlidir.

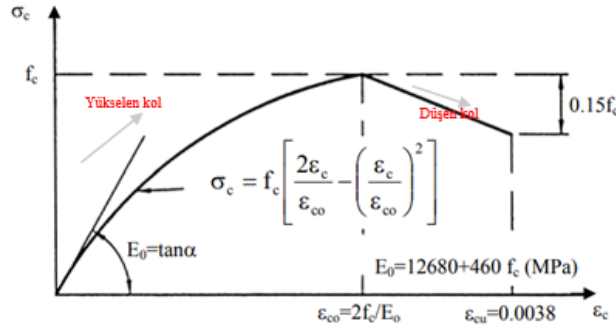
Bu çalışma kapsamında, GDA katkılı beton için karışıma giren GDA oranına bağlı olarak analitik bir gerilme-şekil değiştirme modeli tanımlanmıştır. Bu modelde, Hognestad [15] tarafından DA'lı betonlar için önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli, GDA katkılı betonda karışıma giren GDA oranına bağlı olarak revize edilmiştir.

2. Literatür Özeti

Betonun aksenal basınç dayanımının aksenal çekme dayanımına göre çok yüksek olması yapılan deneysel ve analitik çalışmalarda etken faktör olarak betonun basınç dayanımının dikkate alınmasını zorunlu hale getirmektedir. Ayrıca, betonun karakteristik beton basınç dayanımının tespit edilmesinde küp numuneler kullanılmasına rağmen, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin tespitinde ilgili malzeme standartlarına göre hazırlanmış silindir numuneler kullanılmaktadır. Dünyada sudan sonra en çok tüketilen ikinci ürün olan betonun, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin yeterince doğru bir şekilde analiz edilmesi ve modellenmesi, betondan yapılmış olan elemanların ve yapıların doğru analizi için son derece önemlidir. Betonun karakteristik özellikleri birden fazla parametreden etkilenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisine etki eden birçok değişkenin olduğunu gösterirken, betonun dayanımı, uygulanan yükün türü, yükün

uygulama hızı, yük geçmişi, kesit geometrisi ve sargı etkisi bu değişkenlerin en önemlileri arasındadır. Dolayısıyla betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için tek bir eğriden bahsetmek doğru olmamasına rağmen, beton için genelleştirilmiş ve belirli oranlarda deneysel verilere yakınsayan tipik bir gerilme-şekil değiştirme eğrisinden bahsedilebilir.

Doğal agregadan üretilmiş betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tam olarak ortaya koymak için uzun yıllardan beri deneysel ve analitik çalışmalar yapılmaktadır. Kent ve Park [16] tarafından yapılan çalışmada, Hognestad [15] tarafından sargısız beton için önerilen ampirik bağıntılardan yükselen kol için verilen ikinci derece parabol bağıntısındaki ifadelerden $0.85f_c$ ifadesi f_c ile, ε_{co} ifadesi ise 0.002 ile revize edilerek yeni bir bağıntı önerilmiştir. Popovics [17] tarafından önerilen modelde ise beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin hem yükselen hem de alçalan kolu için sadece üç terim (f_c , ε_{co} , E_c) alınarak bir ampirik bağıntı önerilmiştir. Thorenfeldt ve diğ. [18] tarafından yapılan çalışmada ise Popovics [17] tarafından beton gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde düşen kol için önerilen ampirik bağıntı revize edilerek yeni bir bağıntı önerilmiştir. Tsai [19] tarafından ise Popovics [17] tarafından önerilen modelin genelleştirilmiş hali önerilmiştir.



Şekil 1. Hognestad [15] tarafından DA'lı betonlar için önerilen gerilme-şekil değiştirme modeli

Hognestad [15] tarafından önerilen ve uzun yıllardan beri DA'lı betonlar için kullanılan model Şekil 1'de verilmiştir. Bu modelin yükselen kolu ikinci derece bir parabol ile tanımlanırken (denklem 4), düşen kol doğrusal olarak tanımlanmıştır. Modeldeki ampirik bağıntılar ve teknik ifadeler denklem 1-6'da verilmiştir.

$$f_c = 0.85 f_{ck} \quad (1)$$

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

$$\varepsilon_{co} = \frac{2 f_c}{E_c} \quad (3)$$

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2 \varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$f_{cu} = 0.85 f_c \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0038 \quad (6)$$

Modeldeki beton basınç dayanımı (f_c), silindir numune karakteristik beton basınç dayanımının %85'i ($0.85f_{ck}$) olarak dikkate alınmıştır. Maksimum beton basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme ifadesi (ε_{co}), elastisite modülü (E_c ; denklem 3) ve beton basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilmiştir (denklem 2). Doğrusal olarak tanımlanan düşen koldaki nihai beton basınç dayanımı f_{cu} : $0.85f_c$ olarak, maksimum şekil değiştirme ifadesi ε_{cu} : 0.0038 olarak tanımlanmıştır.

3. Geri dönüşümlü agrega katkılı beton için gerilme-şekil değiştirme modeli

Doğal agregadan üretilmiş betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ortaya koymak için önemli ölçüde çalışma yapılmasına rağmen, GDA katkılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ortaya koyan kapsamlı bir çalışma yoktur. Geri dönüşümlü agrega katkılı betonun E_c modülünü tahmin etmek için Ravindrarajah ve Tam [20] denklem 7'deki bağıntıyı önermiş ve GDA'nın %100 oranında yeni betonda kullanıldığında, bu betonun E_c modülünün %15-25 arasında azaldığını söylemişlerdir. Xiao ve diğ. [21] tarafından yapılan çalışmada ise denklem 8'deki ampirik bağıntı önerilmiş ve yeni beton üretiminde %100 oranında GDA kullanıldığında, bu betonun E_c modülünde %45'lere varan azalmaların olabileceği belirtilmiştir. Önerilen her iki ampirik bağıntının doğruluğunun GDA'nın karakteristik özelliklerine bağlı olduğu ifade edilmiştir.

$$E_c = 7770(f_c)^{0.33} \quad (7)$$

$$E_c = 10^5 / (2.8 + (40.1/f_c)) \quad (8)$$

Bu konuda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlarda bir tutarsızlık olduğu ve bu tutarsızlığın GDA'nın karakteristik özelliklerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Dolayısıyla GDA katkılı beton konusunda yapılacak olan herhangi bir deneysel veya analitik çalışmadan önce, GDA'nın karakteristik özelliklerinin tam olarak tespit edilmesi son derece önemlidir. Bu agreganın karakteristik özellikleri belirlendikten sonra, GDA miktarına göre yeni betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin bilinmesi diğer önemli bir noktadır. Çünkü betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin bilinmesi demek, bu betonun kullanılacağı elemanın davranışının bilinmesine katkı sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında, GDA katkılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi farklı oranlardaki GDA için belirlenmiştir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde beton basınç dayanımı denklem 9'daki gibi tanımlanmış ve bu denklemdeki s katsayısının değeri yeni betondaki ağırlıkça GDA oranına bağlı olarak Tablo 1'e göre değişmektedir. Aynı ilişkideki E_c modülü ise denklem 10'daki gibi tanımlanmış ve bu denklemdeki i katsayısı ise yeni betondaki ağırlıkça GDA oranına bağlı olarak Tablo 1'e göre değişmektedir. Örnek olarak, yeni betonda ağırlıkça %50 oranında GDA kullanılması durumunda, denklem 9 ve denklem 10'daki s ve i katsayıları sırasıyla 0.80 ve 0.90 olarak dikkate alınacaktır. Geri dönüşümlü agrega katkılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde, yükselen kol Hognestad [15] modelindeki gibi ikinci derece bir parabolle dikkate alınmıştır (Denklem 12). Bu ilişkide maksimum beton basınç dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme ifadesi denklem 11'e göre, nihai beton basınç dayanımı değeri denklem 13'e göre ve maksimum birim şekil değiştirme ifadesi ise denklem 14'te olduğu gibi dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Yeni betonda ağırlıkça GDA oranına göre i ve s katsayıları.

GDA (%)	i katsayısı	s katsayısı
25	0.95	0.95
50	0.90	0.80
75	0.85	0.75
100	0.80	0.70

Geri dönüşümlü agrega katkılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisindeki tüm katsayılar normal dayanıma (bu dayanım maksimum 60 MPa) sahip betonlar için geçerlidir. Ayrıca, bu çalışmada Hognestad [15] tarafından DA'lı betonlar için önerilen model temel alınarak GDA katkılı beton için yeni formüller önerilmesinin amacı, Hognestad [15] tarafından önerilen modelin literatürde çokça kabul görmesi ve bu model kullanılarak elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin gerçeğe yakın olması ve GDA katkılı beton için önerilen model üzerinde oluşabilecek olumsuz algıları önemli derecede azaltabileceği beklentisidir.

$$f_c = s \cdot 0.85 f_{ck} \quad (9)$$

$$E_c = 12680 + i \cdot 460 f_c \quad (10)$$

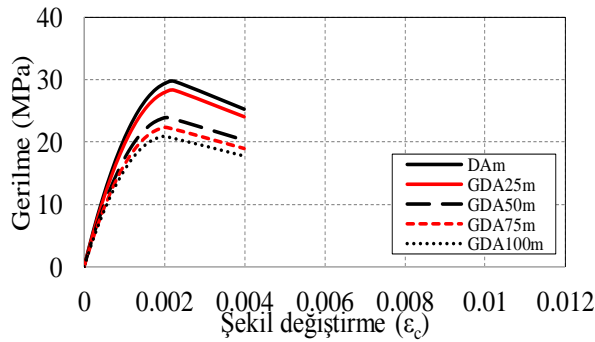
$$\varepsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (11)$$

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$f_{cu} = 0.85f_c \quad (13)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0040 \quad (14)$$

Önerilen modelden DA'lı beton ve GDA katkılı beton için $f_{ck}=35$ MPa alınarak elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri Şekil 2'de verilmiştir. Burada DAM, doğal agregadan üretilen betonun Hognestad [15] modeli tarafından elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, GDA25m, GDA50m, GDA75m ve GDA100m ise detayları yukarıda verilen modelle GDA'nın ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranında kullanıldığı beton için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini göstermektedir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, yeni betonda GDA oranı arttıkça bu betonun hem beton basınç dayanımı hem de E_c modülünde Tablo 1'de verilen katsayıların dikkate alınmasıyla azalmalar meydana gelmektedir. Doğal agregadan üretilen betonun basınç dayanımı ve E_c modülü değerleri, GDA'nın ağırlıkça %25 oranında kullanıldığı betonun aynı değerlerinden ihmal edilebilecek seviyelerde yüksek olduğu görülürken, GDA'nın %50, 75, 100 oranında kullanıldığı betonlardan da önemli oranda yüksektir.

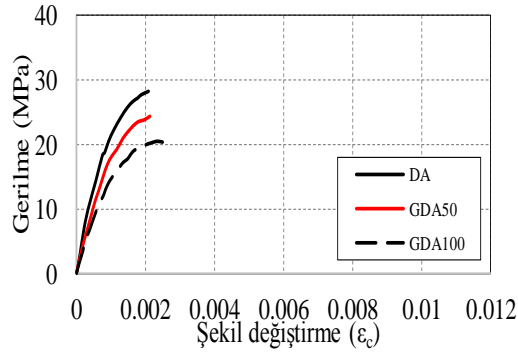


Şekil 2. DA'lı ve GDA katkılı betonlarda gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise GDA beton üretiminde farklı oranlarda kullanılmasına rağmen, bu betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi tipik beton gerilme-şekil değiştirme eğrisinden farklı değildir. Bu sonuç hem deneysel hem de analitik olarak bu konuda yapılan çalışmalardan elde edilmiştir [22-30].

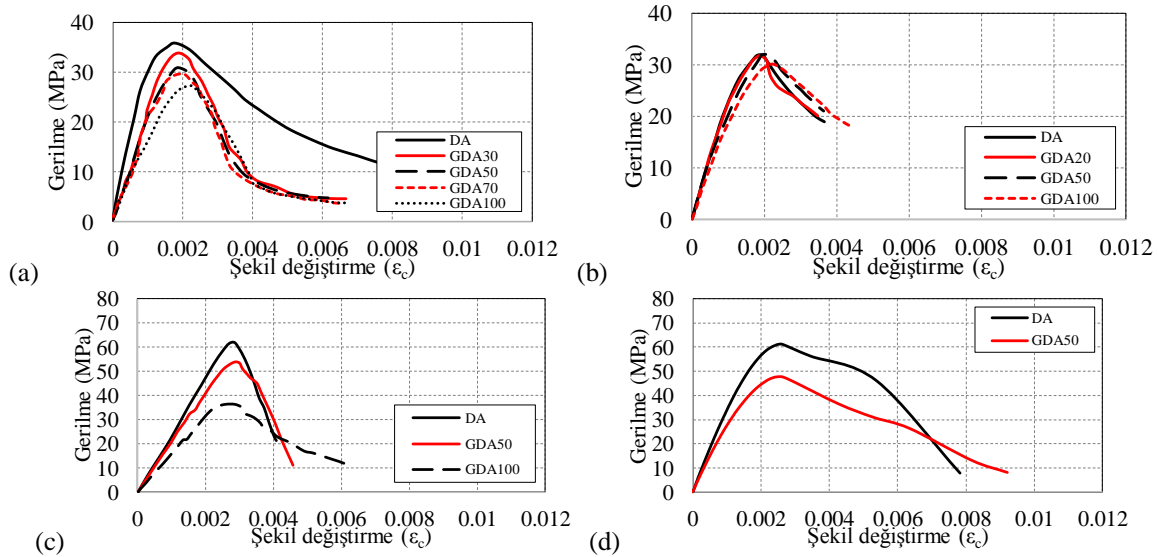
4. Geri Dönüşümlü Agregalı Beton İçin Önerilen Modelinin Deneysel Verilerle Karşılaştırılması

Geri dönüşümlü agregalı betonun kullanıldığı yapıların veya yapısal elemanların tasarımı ve analizi için, bu betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin bilinmesi son derece önemlidir. Son yıllarda GDA katkılı betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemek için önemli ölçüde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan, GDA katkılı betonda GDA'nın kullanılma oranı arttıkça bu betonun gerilme ve E_c modülü değerlerinde önemli oranda azalmaların meydana geldiği görülmesine rağmen, bu betonun maksimum birim şekil değiştirme kapasitesinin DA'lı betondan daha yüksek olduğu ifade edilmiştir (Şekil 3) [9, 22-28].



Şekil 3. DA'lı ve GDA katkılı betonlarda gerilme-şekil değiştirme ilişkileri [9, 22-28]

Bu çalışma kapsamında, önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, literatürde datalarına ulaşılan dört farklı çalışmadan elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4 (a), (b), (c) ve (d)'de verilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, sırasıyla Xiao ve diğ. [28], Belen ve diğ. [23], Breccolotti ve diğ. [29] ve Saribas ve diğ. [30-31] çalışmalarından alınmıştır.

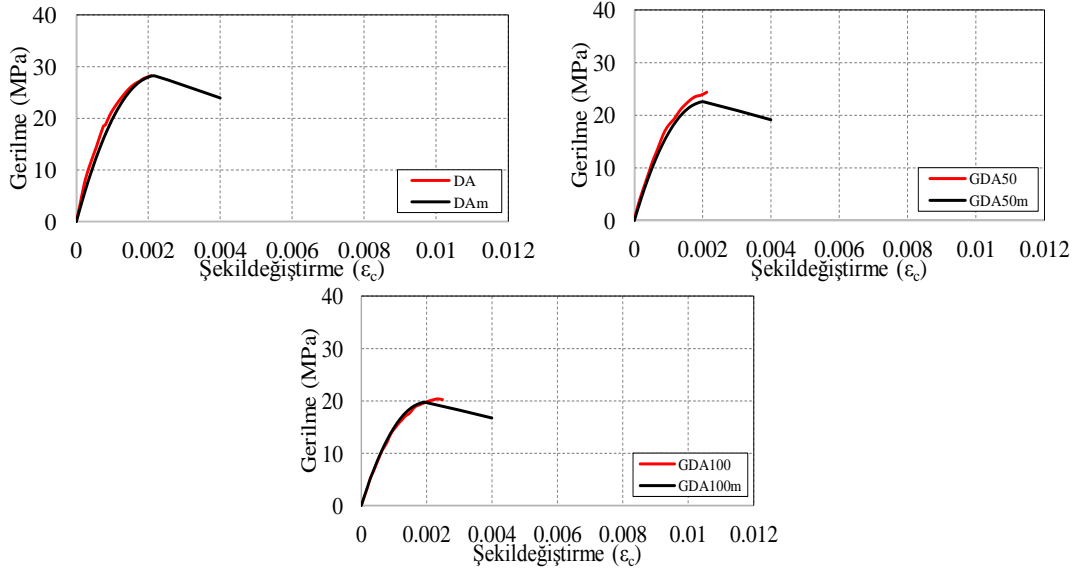


Şekil 4. Literatürdeki farklı çalışmalardan elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri [23, 28-31]

Şekil 3-9'da verilen gerilme-şekil değiştirme ifadelerinde DA doğal agregadan üretilen betonu, GDA geri dönüşümlü agrega katkılı betonu, 20, 25, 30, 50, 70, 75 ve 100 değerleri ise bu betondaki GDA oranlarını temsil etmektedir. Geri dönüşümlü agrega katkılı beton için önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Ajdukiewicz ve Kliszczewicz [9], Bairagi ve diğ. [22], Belén ve diğ. [23], González-Fonteboa ve diğ. [24], Folino ve Xargay [25], Martínez-Lage ve diğ. [26], Medina ve diğ. [27], Xiao ve diğ. [28] tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen ortalama gerilme-şekil değiştirme (Şekil 3) ilişkileri ile karşılaştırılması, Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi, önerilen modelden GDA'nın %50 ve %100 oranında kullanıldığı betonlar (GDA50m, GDA100m) için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, deneysel çalışmalardan (GDA50, GDA100) elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileriyle yükselen kolda neredeyse aynı olduğu görülmüştür.

Geri dönüşümlü agrega katkılı beton için önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin Xiao ve diğ. [28] tarafından (Şekil 4 (a)) yapılan çalışmadan elde edilen eğrilerle karşılaştırılması Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, önerilen modelden GDA'nın %25, %50, %75 ve %100 oranında kullanıldığı betonlar (GDA25m, GDA50m, GDA75m, GDA100m) için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, deneysel çalışmalardan (GDA30, GDA50, GDA70, GDA100) elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin yükselen kolunda

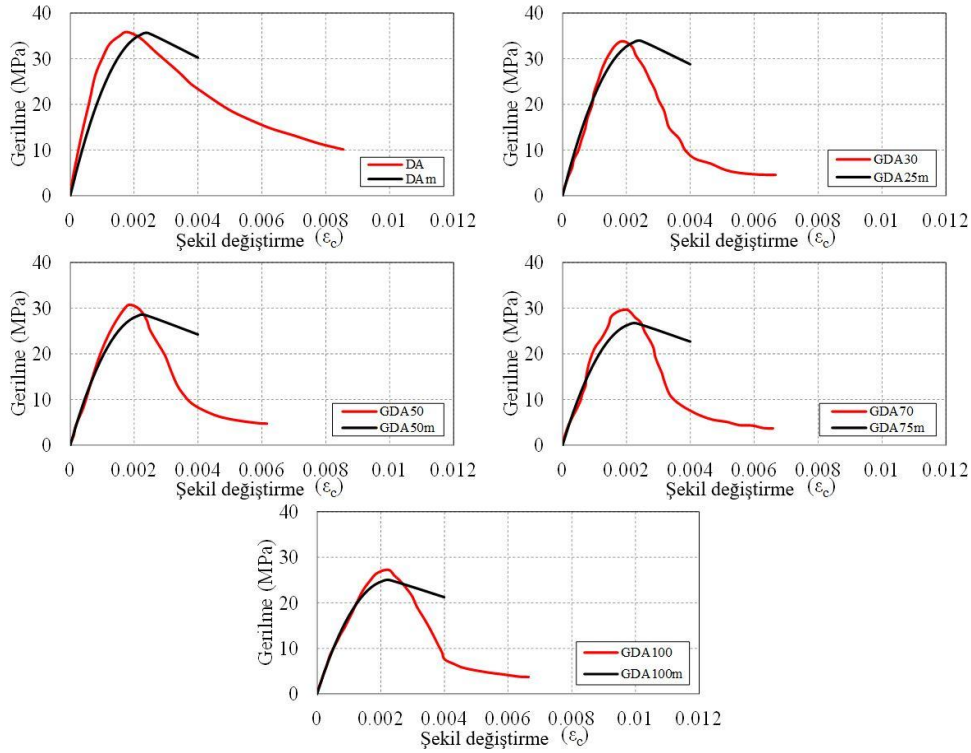
önemli oranda yakınsarken, düşen kolda ise modelden elde edilen verilerle deneysel çalışmadan elde edilen veriler arasında fark olduğu görülmüştür. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin düşen kolunda bu farkın ortaya çıkmasının sebebi, GDA'nın karakteristik özellikleridir. Çünkü GDA üzerinde bulunan fazla miktardaki artık harç parçacıkları GDA katkıli betonun çimento hamuru ile agrega ara yüzündeki bağlarda zayıf bir bölge oluşturmaktadır. Geri dönüşümlü agrega katkıli betonun basınca maruz kalması durumunda bu zayıf bölge kolayca deforme olabilmektedir. Dolayısıyla, GDA katkıli betonun hem yükselen kolu hem de düşen kolu, kullanılan agreganın tipik özelliklerinden önemli oranda etkilenebilmektedir.



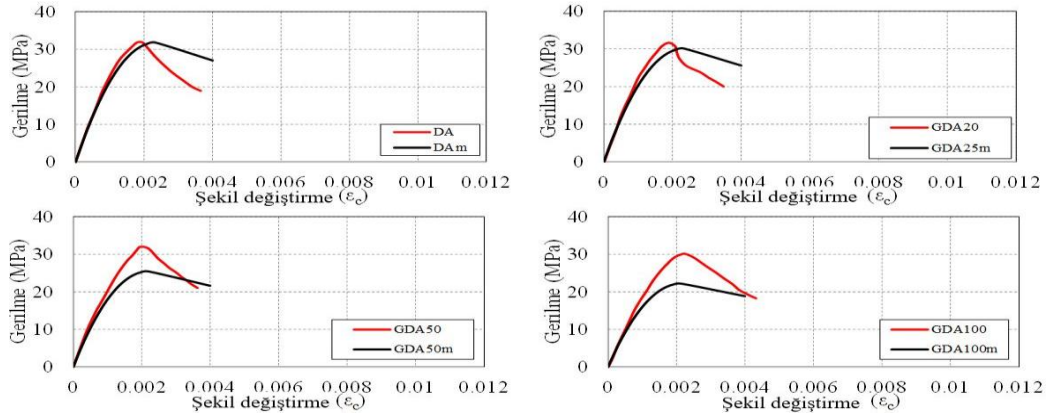
Şekil 5. Analitik ve deneysel gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Geri dönüşümlü agrega katkıli beton için önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin, Belén ve diğ. [23] tarafından (Şekil 4 (b)) yapılan çalışmadan elde edilen eğrilerle karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'den görüldüğü gibi, önerilen modelden GDA'nın %25 oranında kullanıldığı beton (GDA25m) için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, deneysel çalışmadan (GDA20) elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin yükselen kolunda önemli oranda yakınsarken, düşen kolda ise modelden elde edilen verilerle deneysel çalışmadan elde edilen veriler arasında önemli oranda fark olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, önerilen modelden GDA'nın %50 ve %100 oranında kullanıldığı betonlar (GDA50m, GDA100m) için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, deneysel çalışmadan (GDA50, GDA100) elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin yükselen ve düşen kolunda modelden elde edilen verilerle deneysel çalışmadan elde edilen veriler arasında fark olduğu görülmüştür.

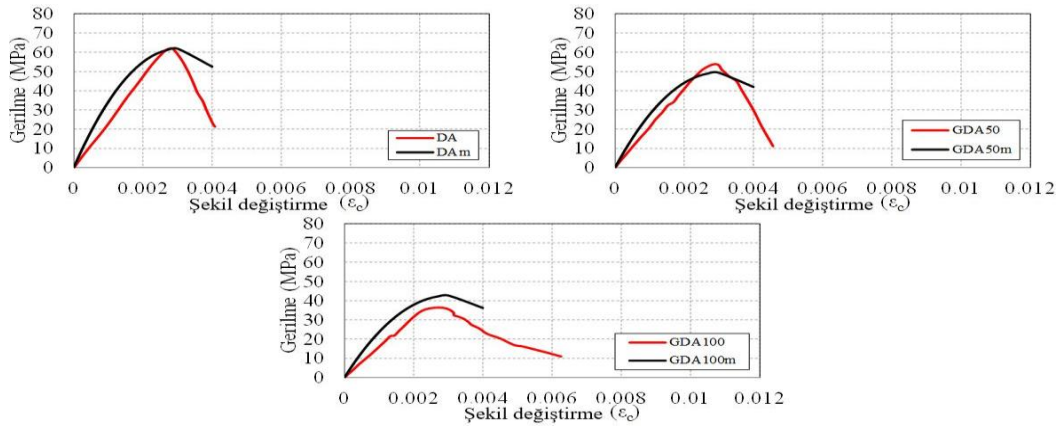
Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin yükselen ve düşen kolunda bu farkın ortaya çıkmasının sebebi, bu çalışmada GDA katkıli betonun literatürde ifade edilen tipik GDA katkıli betonun davranışından farklı davranmasıdır. Çünkü, GDA ve GDA katkıli beton üzerinde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda, yeni beton üretiminde GDA kullanımının artması sonucunda bu betonun basınç dayanımı, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımının azaldığı belirtilmektedir [32]. Geri dönüşümlü agrega katkıli beton için önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin, Breccolotti ve diğ. [29] tarafından (Şekil 4 (c)) yapılan çalışmadan elde edilen eğrilerle karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'den görüldüğü gibi, önerilen modelden GDA'nın %50 oranında kullanıldığı beton (GDA50m) için elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, deneysel çalışmadan (GDA50) elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin yükselen ve düşen kolunda önemli oranda yakınsadığı görülmüştür. Geri dönüşümlü agreganın %100 oranında kullanıldığı betonun (GDA100) gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin yükselen ve düşen kolunda modelden elde edilen değerler arasında %15'lik fark olduğu bu farkın ortaya çıkmasının sebebinin ise GDA karakteristik özellikleridir.



Şekil 6. Analitik ve deneysel gerilme-şekil değişimi ilişkileri



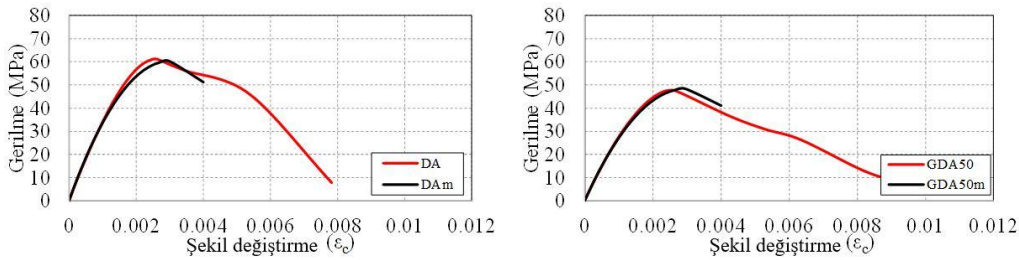
Şekil 7. Analitik ve deneysel gerilme-şekil değişimi ilişkileri



Şekil 8. Analitik ve deneysel gerilme-şekil değişimi ilişkileri

Geri dönüşümlü agrega katkılı beton için önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değişimi ilişkilerinin, Saribas ve diğ. [30-31] tarafından (Şekil 4 (d)) yapılan çalışmadan elde edilen eğrilerle karşılaştırılması Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü gibi, önerilen modelden GDA'nın %50 oranında kullanıldığı beton (GDA50m) için elde edilen gerilme-şekil değişimi ilişkileri,

deneysel çalışmadan (GDA50) elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin yükselen ve düşen kolunda neredeyse aynı olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Analitik ve deneysel gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, farklı oranda geri dönüşümlü agregaya içeren yeni beton için gerilme-şekil değiştirme modeli önerilmiş ve bu modelden elde edilen veriler deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, farklı oranlarda geri dönüşümlü agregaya içeren betonlar için önerilen modelden elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin, literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerine benzer olduğu bazı durumlarda ise aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca, önerilen modelin yükselen ve düşen kolunun bazı betonlar için farklı çıkmasının sebebi olarak GDA'nın karakteristik özellikleri düşünülebilir. Çünkü GDA üzerinde bulunan fazla miktardaki artık harç parçacıkları GDA katkılı betonun çimento hamuru ile agregaya ara yüzündeki bağlarda zayıf bir bölge oluşturmaktadır. Geri dönüşümlü agregaya katkılı betonun basınca maruz kalması durumunda bu zayıf bölge kolayca deforme olabilmektedir. Dolayısıyla, GDA katkılı betonun hem yükselen kolu hem de düşen kolu, kullanılan agreganın tipik özelliklerinden önemli oranda etkilenebilmektedir. Diğer taraftan geri dönüşümlü agregaya katkılı betonlar için önerilen model sadece iki katsayı (i ve s) ile kontrol edildiği için hem kullanımı kolay hem de deneysel verileri tahmin oranı oldukça yüksektir. Geri dönüşümlü agregaya katkılı betonlar için önerilen modelin bu konuda yapılacak olan deneysel ve analitik çalışmalara katkı sunması beklenmektedir. Ayrıca, geri dönüşümlü agregaya katkılı betondan üretilen yapısal elemanların ve yapıların tasarım ve analizinde, araştırmacı ve mühendislere katkı sunması ümit edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için vermiş oldukları katkılar adına Mustafa TOLUN'a teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] Hansen T.C., "Recycling of demolished concrete and masonry", London: E&FN SPON, 1992.
- [2] Poon C.S., Azhar S., Kou, S.C., "Recycled aggregates for concrete applications", Proceeding of the Materials Science and Technology in Engineering Conference-Now, New and Next, Hong Kong, China, 2003, 15-17.
- [3] Evangelista L., Brito J., "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregate", Cem. Concr. Compos., 2007, 5:397-401.
- [4] López-Gayarre F., Serna P., Domingo-Cabo A., Serrano-López M.A., López-Colina C., "Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties", Waste Manag. 2009, 12:3022-3028.
- [5] Malesev M., Radonjanin V., Marinkovic S., "Recycled concrete as aggregate for structural concrete production", Sustainability, 2010, 2, 1204-1225.
- [6] Gomez J.M.V., "Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate", ACI Spec. Publ., 2002a, 209:475-496.

- [7] Gomez J.M.V., “Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate”, *ACI Spec. Publ.*, 2002b, 209:461-474.
- [8] Domingo A., Lazaro C., Lopez F., Serrano M.A., Serna P., Castano J.O., “Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete”, *Constr. Build. Mater.*, 2009, 7:2545-2553.
- [9] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., “Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC”, *Cem. Concr. Compos.*, 2002, 2:269-279.
- [10] Sanchez M., Gutierrez P.A., “Influence of recycled aggregate quality on concrete properties”, *Proceeding of the International RILEM Conference: The Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain, 2004, 8-11 November; pp. 545-553.*
- [11] Rahal K., “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate”, *Build. Environ.*, 2007, 1:407-415.
- [12] Yang K.H., Chung H.S., Ashour A., “Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties”, *ACI Mater. J.*, 2008, 3:289-296.
- [13] Salem R.M., Burdette, E.G., Jackson, N.M., “Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete”, *ACI Mater. J.*, 2003, 100:216-221.
- [14] Zaharieva R., Buyle-Bodin F., Wirguin E., “Frost resistance of recycled aggregate concrete”, *Cem. Concr. Res.*, 2004, 100:1927-1932.
- [15] Hognestad E., “A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members”, *University of Illinois Bulletin*. 1951, Vol. 49, no. 22.
- [16] Kent D.C., and Park R., “Flexural members with confined concrete”, *Journal of the Structural Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers*, 1971, 97(ST7), 1969-1990.
- [17] Popovics S., “A numerical approach to the complete stress-strain curves of concret”, *Cement and Concrete Research*, 1973, 3(5), 583-599.
- [18] Thorenfeldt E., Tomaszewicz A., and Jensen, J.J., “Mechanical properties of high-strength concrete and application in design”, *Proc. of the Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Tapir, Trondheim, Norway*, 1987, 149-159.
- [19] Tsai W.T., “Uniaxial compression stress-strain relation of concrete”, *J. Struct. Eng.*, 1988, 114(9), 2133-2136.
- [20] Ravindrarajah R.S., Tam, C.T., “Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate”, *Mag. Concr. Res.*, 1985, 37(130), 29-38.
- [21] Xiao J.Z., Li J.B., Zhang C.Z., “On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview”, *Mater. Struct.*, 2006, 39, 655–664.
- [22] Bairagi N.K., Ravande K. and Pareek V.K., “Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregate”, *Resour. Conserv. Recycl.* 1993, 9 (1): 109-126.
- [23] Belén G.F., Fernando M.A., Diego C.L. and Sindy S.P., “Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, 2011, 25 (5): 2335–2342.
- [24] González-Fonteboa B., Martínez-Abella F., Eiras-Lopez J. and Seara-Paz S., “Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete”, *Mater. Struct.*, 2011, 44 (10): 1759-1771.
- [25] Folino P., and Xargay H., “Recycled aggregate concrete-Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression”, *Constr. Build. Mater.*, 2014, 56: 21–31.
- [26] Martínez-Lage I., Martínez-Abella F., Vázquez-Herrero C. and Pérez-Ordóñez J.L., “Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, 2012, 37: 171-176.
- [27] Medina C., Zhu W., Howind T., de Rojas M.I.S. and Frías M., “Influence of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concrete”, *J. Cleaner Prod.*, 2014, 68: 216–225.
- [28] Xiao J., Li J. and Zhang C., “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading”, *Cem. Concr. Res.*, 2005, 35 (6): 1187-1194.
- [29] Breccolotti M., D’Alessandro A., Roscini F., Bonfigli M.F., “Investigation of stress-strain behaviour of recycled aggregate concrete under cyclic loads”, *Environ Eng Manag J.* 2015, Vol.14, No. 7, 1543-1552.
- [30] Saribas I., Goksu C. and Ilki A., “Seismic Performance of Full-Scale Recycled Aggregate Concrete Columns”, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rhodes Island, Greece, 15–17 June 2017.
- [31] Saribas I., Goksu C., İlki A., “Seismic Performance of Reinforced Concrete Columns with Recycled Aggregate Concrete”, *ERMCO*, Oslo, Norway, 7-8 June 2018.
- [32] Xie T., Gholampour A. and Ozbakkaloglu T., “Toward The Development of Sustainable Concretes with Recycled Concrete Aggregates: Comprehensive Review of Studies on Mechanical Properties”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2018, 30 (9).2, 2016, 11(1): 10-23.