

Çelik Lifli Betonlarda Agregat Tipinin Kırılma Enerjisine Etkisi

Merve DEMİRALP^{*1}, Ahmet BEYÇİOĞLU¹, Fuat KÖKSAL²,
Hüseyin Okan ANADUT², Hüsamettin ÜRÜNVEREN¹

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat
Mühendisliği Bölümü, Adana

²Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Yozgat

Geliş tarihi: 26.02.2021

Kabul tarihi: 16.03.2021

Öz

Beton, farklı özelliklerdeki malzemelerin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan kompozit bir mühendislik malzemesidir. Bu kompoziti oluşturan her bileşenin fiziksel ve mekanik performans açısından önemli düzeyde etkileri bulunmaktadır. Betonun en önemli bileşenlerinden bir tanesi de agregatlar olup agregatların birim ağırlığı, iç yapısı, mekanik özellikleri, yüzey formu vb. gibi birçok özelliği betonun fiziksel, mekanik, durabilite, radyoaktif etkilere karşı koyma yeteneği gibi mühendislik performanslarını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında, farklı tipteki agregatların çelik lifli betonlarda taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu doğrultuda, kırılma agregatı (KTA) ve doğal agregat (DOA) ile C35 dayanım sınıfında çelik lifli beton numuneler üretilmiştir. Üretilen betonların taze ve sertleşmiş beton özellikleri belirlendikten sonra agregat tipinin çelik lifli betonlarda kırılma enerjisine etkisini incelemek amacıyla çentikli kiriş numuneler üzerinde kırılma enerjisi deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak KTA ile üretilen betonların dolaylı çekme ve enerji yutma kapasitesi açısından DOA ile üretilen betonlara kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği ve normal betonda bilinen bu durumun lifli betonlar için de geçerli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik lifli beton, Farklı tip agregat, Kırılma enerjisi, Çentikli kiriş, Sürdürülebilirlik

The Effect of Aggregate Type on Fracture Energy of Steel Fiber Reinforced Concretes

Abstract

Concrete is a composite engineering material produced by using materials with different properties. Each component forming concrete has significant effects in terms of physical and mechanical performance. One of the most important components of concrete is aggregates. The unit weight, internal structure, mechanical properties, surface form, etc. of the aggregates directly affect the engineering performances of concrete such as physical, mechanical, durability and ability to resist radioactive effects. In this study, the effects of different types of aggregates on the properties of fresh and hardened concrete in steel fiber reinforced concretes were investigated. Accordingly, C35 strength class steel fiber concrete samples were produced by using crushed stone aggregate and natural aggregate. After determining the fresh and hardened concrete properties of the produced concrete, fracture energy tests were carried out on notched beam samples in order to examine the effect of aggregate type on the fracture energy of steel fiber reinforced concretes. As a result, it has been determined that concretes produced with crushed limestone

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet BEYÇİOĞLU, abeycioglu@atu.edu.tr

aggregates have a better performance in terms of indirect tensile and energy absorption capacity compared to concretes produced with natural aggregates and this situation known in normal concrete is also valid for fiber reinforced concretes.

Keywords: Fiber reinforced concrete, Different types of aggregates, Fracture energy, Notched beam, Sustainability

1. GİRİŞ

Temel bir yapı malzemesi olarak beton; su, agregata ve bağlayıcı özellik gösteren çimento gibi farklı malzemelerin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit bir malzemedir. Betonun oluşturan malzemelerin kolay temin edilebilmesi, düşük maliyetli olması ve mekanik performans özelliklerinin geliştirilmesi yönündeki ilerleme ile betonun yapı malzemesi olarak tercih edilmesi gün geçtikçe artmaktadır. Bu ilerlemenin yanında, yapılan çalışmalar gösteriyor ki; betonun basınç dayanımı değerinin yüksek olmasının aksine çekme dayanımı değeri de bir o kadar düşüktür [1-4].

Betonu meydana getiren malzemeler arasında en fazla orana sahip olan agregata, betonda pahalı olan çimento kullanımını azaltmak ve betonun teknik özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılan ve kırılmış, doğal ve sentetik halde bulunabilen tane yığındır. Beton üretiminde kullanılan agreganın şekli ve mekanik özellikleri direkt olarak betonun özelliklerini de etkiler. Agregata gerek doğal kaynakların giderek tükenmesi gerekse de nitelikli örneklerin bulunmadığı güçlüklerden dolayı beton sektöründe gittikçe önemli bir hale gelmektedir. DOA ve KTA ile hazırlanan karışımların özellikleri genel olarak incelendiğinde, kırmataş gibi köşeli bir yapıya sahip olan agregalar ile üretilen betonlarda işlenebilirlik değeri, DOA ile üretilen betonlara nazaran daha düşük olduğu, bu sebeple KTA'lı karışımlarda benzer işlenebilirlik performansını sağlamak amacıyla kullanılacak su miktarı ve akışkanlaştırıcı katkı miktarının daha fazla kullanılması gerektiği gözlenmektedir. Ayrıca sertleşmiş betonda da KTA'ların DOA'ya göre daha fazla köşeli ve daha pürüzlü yüzeye sahip olması sebebiyle beton ile daha iyi aderans yaptığı fakat, KTA'ların keskin köşeli bir yapıya sahip olması sebebiyle de daha az sıkışma gösterip

DOA'ya göre daha fazla boşluklu bir yapı oluşturduğu da gözlenmektedir [5-10].

Betonda gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin doğru yorumlanabilmesi, süneklik (μ) ve enerji tüketme kapasitesi gibi kavramların bilinmesine bağlıdır. Beton ile üretilmiş elemanın maruz kaldığı yük altında sünek bir davranış göstermesi ve yüksek enerji tüketebilmesi istenir. Çünkü deprem durumunda elemanın, meydana gelecek deprem yüklerini sönmemesi ve herhangi bir can kaybı yaşanmadan depremin atlattılması hayati öneme sahiptir [11].

Beton, donatısız halde iken belirli oranlarda süneklik ve enerji tüketme kapasitesine sahip olsa da bu değerler betonun doğal halde gevrek davranış sergilemesinden dolayı yeterli değildir. Bu gevrek davranış, donatı yerleştirilmesi ile sünek hale getirilebilmektedir. Ancak çalışmalar incelendiğinde betona süneklik özellik kazandıran çelik donatılar makro düzeydeki çatlaklarda etkili olabilmektedir. Gelişen teknolojiyle betona daha fazla enerji tüketebilmenin yanı sıra daha sünek hale getirebilmek amacıyla klasik olarak kullanılan çelik donatının yanında özellikle mikro çatlaklarda etkili olabilecek lif adı verilen malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Betonun güçlendirme amacıyla kullanılan, en boy oranı 20-100 arasında, farklı kesitlere sahip ve taze halde beton içerisinde rastgele dağılmak için yeterince küçük olan kısa, malzemeler çelik lif olarak tanımlanmaktadır. Lifli beton, içeriğinde homojen şekilde lif içeren kompozit bir malzemedir. Günümüzde üretilen yüksek performanslı cam, çelik, naylon gibi sentetik lifler betonun zayıf özelliklerini iyileştirme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, doğal (hayvansal, bitkisel, mineral) ve sentetik (polimer, metalik, seramik) olarak 2 gruba ayrılan lif tiplerinin betonun değişik mekanik özelliklerine değişen oranlarda etki yaptığı, yapılan çalışmalarda

görülmektedir. Betonun zayıf olan eğilme dayanımı, çekme mukavemeti, enerji yutma kapasitesi ve süneklik gibi özelliklerine olumlu etkilerde bulunması da bu konuda yapılan çalışmaları artırmıştır. Tarih boyunca malzemelerin kırılma yönünü güçlendirmek için çaba sarf edilmiştir. Bu doğrultuda modern liflerden önce saman ve at kılı vb. malzemeler, yapı malzemelerinde kullanılmıştır. Çelik lifli betonlar günümüzde daha çok depreme dayanıklı yapı inşası, yol döşemeleri, liman kaplama ve havaalanları, patlamaya karşı dayanıklı yapılar ve daha birçok alanda kullanılmaktadır [12-22].

Bu çalışmada KTA ve DOA kullanımının lifli betonların mekanik performansına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada çimento olarak CEM I 42.5 R kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan çimentonun özellikleri

Kimyasal bileşim	Ağırlıkça %	Mekanik özellikler	
SiO ₂	19,25	Basınç dayanımı (7 gün)	45,6 MPa
Al ₂ O ₃	5,12	Basınç dayanımı (28 gün)	54,2 MPa
Fe ₂ O ₃	4,32	Basınç dayanımı (90 gün)	62,2 MPa
CaO	65,70		
MgO	1,25	Fiziksel özellikler	
SO ₃	2,80	Priz başlangıcı	145 dk
Na ₂ O	0,12	Priz bitişi	195 dk
K ₂ O	0,45	Hacim genleşmesi	1 mm
Kızdırma Kaybı	3,55	Yoğunluk	3,15 g/cm ³
Çözünmeyen Kalıntı	0,75	Özgül yüzey alanı	4663 Blaine cm ² /g
Serbest CaO	0,49		

Betonun üretiminde karışım suyu olarak TS EN 1008'e uygun olarak [23] Düzce ili şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

Çalışmada, Düzce Asar deresinden temin edilen DOA ve Düzce Aksu köyünde Mercanlar Madencilik'in taş ocağından çıkardığı KTA kullanılmıştır.

Beton karışımlarının hazırlanmasında kullanılan iri-ince agregaya özellikleri Çizelge 2'de belirtilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan agregaların özellikleri

Agrega tipi	İnce agregaya (0-5 mm)		İri agregaya (5-15 mm)	
	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Su emme (%)
DOA	2,63	0,80	2,68	0,70
KTA	2,63	1,30	2,70	0,70

Akışkanlaştırıcı katkı olarak, AYDOS Yapı Kimyasalları firmasından temin edilen SR 770 tipindeki polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı özelliği gösteren akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Kullanılan bu malzeme özellikleri firmaya ait teknik föylerden güncel olarak elde edilmiş ve Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkının özellikleri

Yoğunluk	1,06±0,02 kg/l
pH değeri	5,5±1
Klor içeriği	<%0,1
Alkali içeriği	<%4
Donma noktası	-4°C
Kullanım dozajı	100 kg için 0,5-2,0 kg

Çalışmada kullanılan çelik lif, Bekaert firmasından temin edilmiş olan C1008 sınıfı düşük karbonlu çelikten üretilmiş ve çekme dayanımı ortalama 1160 N/mm² olan iki ucu kancalı liftir. Liflerin boyu 30 mm uzunluğunda olup elastisite modülü 200000 MPa'dır. Tutkal yardımı ile bir arada olan lifler karışım suyu ile temasından sonra ayrırmakta ve etkili karıştırma ile de homojen bir dağılım gösterebilmektedir. Kullanılan çelik life ait örnek görsel Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Çalışma kapsamında kullanılan çelik lif

2.2. Metot

2.2.1. Beton Karışımlarının Hazırlanması

KTA ve DOA olmak üzere iki agrega türü için çelik lifli beton karışımları tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan betonların 1 m³'ünde bulunan malzeme miktarları Çizelge 4 ve Çizelge 5'te belirtilmiştir.

Çizelge 4. 1 m³ KTA'lı beton karışımında kullanılan malzeme miktarları

Malzemeler	1 m ³ 'deki malzeme miktarları (kg/m ³)
Çimento	340
Su	180
0-5 Kum	1168
5-15 agrega	656
Çelik lif	31
Kimyasal katkı	4,42

Çizelge 5. 1 m³ DOA'lı beton karışımında kullanılan malzeme miktarları

Malzemeler	1 m ³ 'deki malzeme miktarları (kg/m ³)
Çimento	345
Su	183
0-5 Kum	1091
5-15 agrega	722
Çelik lif	31
Kimyasal katkı	4,49

DOA ve KTA kullanılarak hazırlanan karışımlar Düzce Yiğitler Beton firmasına ait kalite kontrol laboratuvarında, kapalı ortam koşullarında; 140 litre kapasiteye sahip, ayarlanabilir dönme açılı laboratuvar tipi mikserde hazırlanmıştır.

Mikserde çalışma, 45° açı ile yapılmıştır. İri-ince agrega, bağlayıcı olarak çimento ve çelik lifler kuru halde 1 dakika karıştırılıp karışım suyunun 3/4'ü 45 saniye süresince karışıma eklenerek 4. dakikaya kadar mikser çalıştırılmıştır. Karışım suyunun kalan 1/4'lük kısmı akışkanlaştırıcı katkı ile beraber mikserde 45 saniye boyunca eklenerek homojen kıvam oluşturulana kadar mikserde karılma işlemine devam edilmiştir.

Hazırlanan karışımlar 3 tabaka şeklinde ve her bir tabakaya masa tipi vibratör vasıtasıyla vibrasyon uygulanıp kalıplara yerleştirilmiştir. Kırılma enerjisi deneyi için 150*150*550 mm boyutlarında çentikli kiriş kalıbı kullanılmıştır. Kalıptaki çentikte yükseklik 25 mm ve genişlik 3 mm olarak tasarlanmıştır. Basınç ve yarmada çekme deneyleri için de 150*150*150 mm'lik küp kalıplar kullanılmıştır.

2.2.2. Taze Beton Deneyleri

Çalışmada KTA'lı ve DOA'lı betonların işlenebilirliğinin tespiti için TS EN 12350-2'ye [24] uygun olarak çökme (slump) deneyi yapılmıştır.

Deney, düz ve sağlam bir yüzeye yerleştirilen metal bir plaka üzerine yerleştirilen huni yardımıyla yapılmıştır. Huni 3 tabaka şeklinde doldurulmuş, her tabaka 25 defa şişlenip sıkıştırılmıştır. Doldurulduktan sonra huni ağzı düz bir şekilde temizlenerek dikey olarak uygun hızda çekilerek betonun yaptığı çökme değeri ölçülmüştür.

2.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Çalışmada sertleşmiş beton üzerinde basınç, eğilmede çekme ve çentikli kirişte enerji yutma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numune sayıları Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 6. Sertleşmiş beton deneyleri

Agrega türü		
Deney	DOA'lı beton numuneler	KTA'lı beton numuneler
Basınç dayanımı	3 adet	3 adet
Eğilme dayanımı	3 adet	3 adet
Çentikli kiriş	3 adet	3 adet

2.2.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra çıkarılan 150*150*150 mm küp numunelere TS EN 12390-3 [25] standardına uygun olarak basınç deneyi uygulanmıştır. 200 ton kapasiteye sahip preste yükleme hızı olarak 0,5 MPa/s seçilmiştir.

2.2.3.2. Eğilme Dayanımı Deneyi

Çalışmada üretilen DOA'lı ve KTA'lı betonlarda kırılma enerjisi deneyinde elde edilen veriler kullanılarak eğilmede çekme dayanımları TS EN 12390-5 [26] standardına uygun olarak Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{3 * P * L}{2 * b * d^2} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de,

P = İlk çatlak açıklığı kırılma yükünü (N),

L = Mesnetler arası uzaklığı (mm)

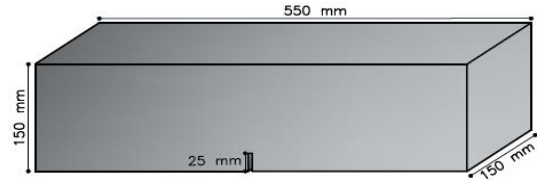
b = Numune genişliğini (mm)

d = Numune yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.

2.2.3.3. Kırılma Enerjisi Deneyi

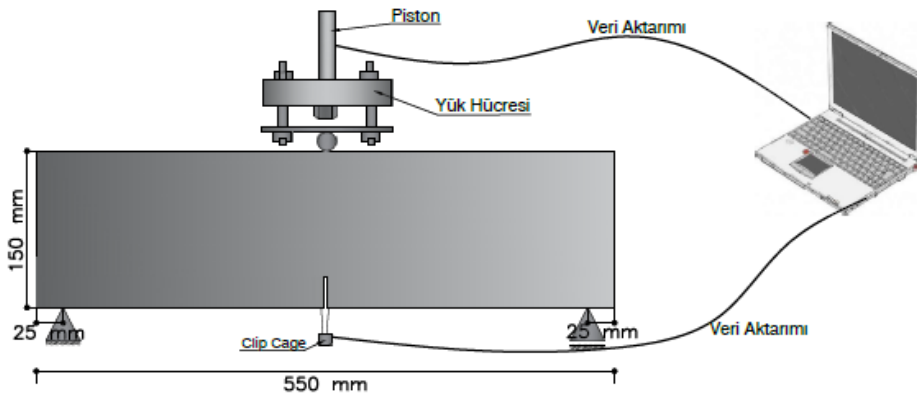
Çelik lifli tasarlanan betonlarda kullanılan DOA ve KTA'ların enerji yutma kapasiteleri çentikli kiriş deneyi ile belirlenmiş ve göreceli olarak karşılaştırılmıştır. Kirişlerde oluşan sehimler ile çentik açıklığındaki değişim çatlak ağzı açıklık yer değiştirme (crack mouth opening displacement (CMOD)) ve doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (linear variable differential transformer (LVDT)) yardımıyla belirlenip kirişlerde kırılma enerjisi hesaplanmıştır.

Üretilen ve üzerinde deney yapılan çentikli kiriş numune ölçüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çentikli kiriş numunesi

Kiriş numuneler kirece doymun kür havuzunda 28 gün boyunca bekletilmiş 28 günün ardından Şekil 3'te gösterilen deney düzeneğiyle 0,1 mm/dk sabit bir yükleme hızıyla orta noktadan yüklenmiştir. Uygulanan yük altında KTA'lı ve DOA'lı çelik lifli betonların sehim ve çatlak açıklığındaki değişimler deneysel olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Çentikli kiriş numunesi deney düzeneği

Deneyde, EN 14651 [27] standardına uygun 3 nokta eğilme deney düzeneğine yerleştirilmiş numuneler üzerinde uygulanan 0,1 mm/dk sabit yükleme ile oluşacak eğilmeden dolayı çatlaktaki açıklık değişimleri CMOD aparatı ile sayısal olarak belirlenmiştir. Kırılma enerjisi deneyi ve deneyde kullanılan numuneler Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kırılma enerjisi deneyine tabi tutulan numunelere ait görseller

Yapılan deneylerde çentikli kiriş numunelerine uygulanan yükler ve bu yüklerle karşılık oluşacak sehim değerleriyle sehim-yük eğrisi oluşturulmuş, bu eğrinin altında kalan alanlar RILEM TC 50-FMC tarafından önerilen Eşitlik 2 yardımı ile hesaplanarak kırılma enerjileri bulunmuştur [28].

$$G_f = \frac{W_0 + m(1 - k^2)g\delta}{B(D - a)} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de;

W_0 =Yük-sehim veya yük-çatlak açıklığı grafiğinin altında kalan alanı (N.m), (bu çalışmada 4 mm sehime kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan olarak alınmıştır).

m = Numunenin kütlesi (kg),

g = Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)

δ = Açıklık ortasındaki sehim (m) (bu çalışmada δ yük-sehim eğrisi için 4 mm olarak alınmıştır).

B = Numune genişliği (m)

D = Numune derinliği (m)

a = Çentik derinliği (m)

$k = (U/S) - 1$

U = Numunenin boyu (m)

S = Mesnetler arası uzaklık (m)

G_f = Kırılma enerjisini (N/m) ifade etmektedir.

Deney esnasında ve sonrasında kirişler incelendiğinde, beton içerisine yerleştirilen çelik liflerin çatlama ve kırılma bölgelerinde betonla yaptığı aderans ile gerilme aktarımı yapabilen köprücük görevi gördüğü gözlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Kırılma bölgesinde köprü görevi gören çelik lifler

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze betonda uygulanan çökme (slump) deneyi karışımların taşınma ve yerleştirme özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Yapılan çökme deneyleri sonucunda DOA içeren karışımların slump değeri 18,5 cm ölçülürken, KTA içeren beton karışımlarında bu değer 19 cm ölçülmüştür. Elde edilen bulgular agrega tipinin betonlarda işlenebilirliğe etkisini yorumlamak açısından yetersiz kalmıştır.

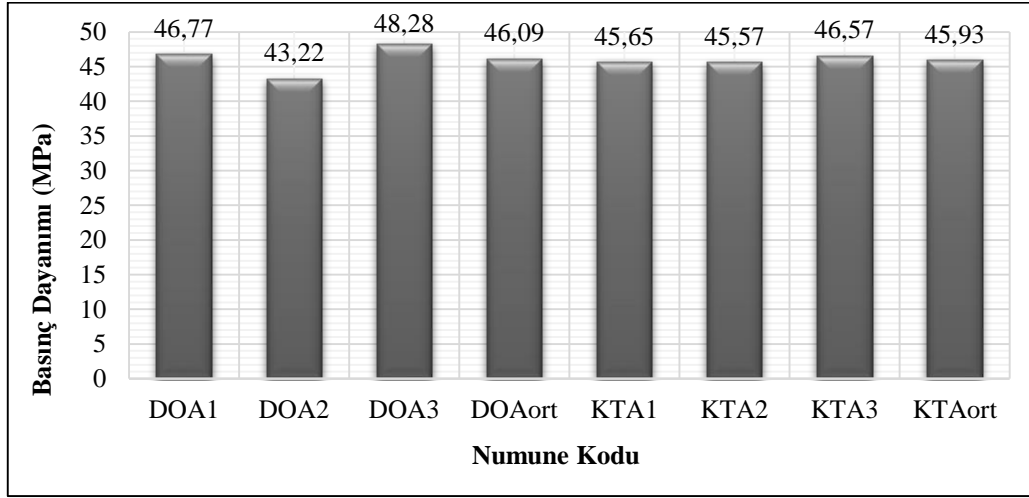
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

3.2.1. Basınç Dayanımı

Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları Şekil 6'da görülmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen basınç dayanımı değerlerinde görüldüğü gibi KTA içeren betonların en düşük

basınç dayanım değeri 45,57 MPa, en yüksek basınç dayanım değeri 46,57 MPa olarak bulunmuş ve bu tipteki agrega ile ortalama basınç değeri de 45,93 MPa olarak hesaplanmıştır. DOA içeren betonlarda ise bu değerler en düşük 43,22 MPa, en yüksek 48,28 MPa olarak bulunmuş ve DOA'lı betonlarda ortalama basınç dayanımı da

46,09 MPa olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, numunelerin çok yüksek bir standart sapma yapmadığını, hedef dayanım C35 olduğu için küp numunelerdeki bulgular karışımın doğru tasarlandığını ön deneylerin iyi bir şekilde yapıldığını ve hedeflenen değere göre uygun basınç dayanımı elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 6. Basınç dayanımı sonuçları

Çizelge 7. İlk çatlak oluştuğu andaki eğilme dayanımları

	P (N)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	σ (MPa)	σ_{ort} (MPa)
KTA1	21214	500	150	125	6,79	5,58
KTA2	18602	500	150	125	5,95	
KTA3	12492	500	150	125	4,00	
DOA1	16027	500	150	125	5,13	5,20
DOA2	17937	500	150	125	5,74	
DOA3	14799	500	150	125	4,74	

3.2.2. Eğilme Dayanımı

Numunelere ait 28 günlük eğilme dayanımı değerleri Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Çizelgedeki değerler incelendiğinde KTA ile üretilen betonların daha yüksek değere sahip olduğu görülmektedir.

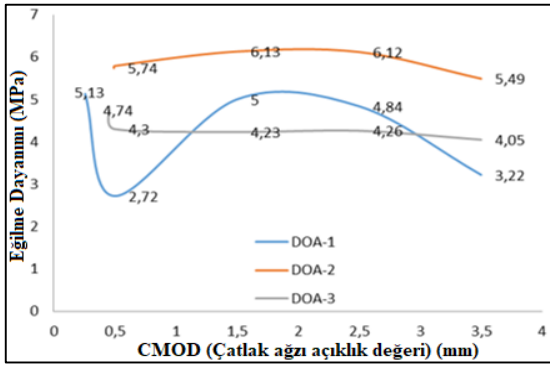
3.2.3. Kırılma Enerjisi

Çentikli kiriş numunelerinde gerçekleştirilen eğilme deneylerinden elde edilen, belirli bir CMOD değerine karşılık rezidüel yük ve rezidüel dayanım değerleri Çizelge 8'de gösterilmiştir. Eğilme deneyinde farklı düzeyde

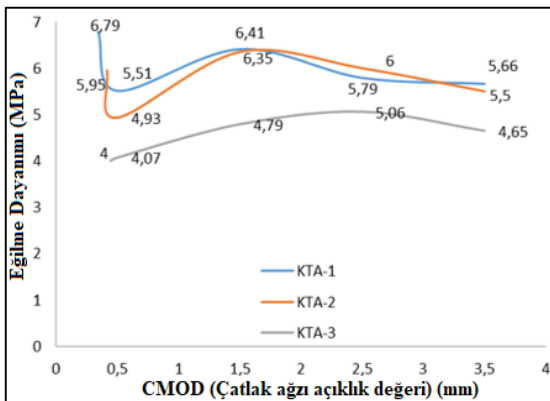
CMOD açıklığına bağlı anlık eğilme Şekil 8’de verilmiştir. dayanım değerlerindeki değişim de Şekil 7 ve

Çizelge 8. Belirli CMOD değerlerinde rezidüel yük ve rezidüel dayanım değerleri

Numune Türü		DOA			KTA		
Numune No		1	2	3	1	2	3
İlk Çatlak Yüğü (kN)		16,03	17,94	14,80	21,21	18,60	12,49
Rezidüel yük, F_j (kN)	CMOD ₁ = 0,5 mm	8,50	18,09	13,44	17,23	15,40	12,72
	CMOD ₂ = 1,5 mm	15,63	19,16	13,21	20,04	19,86	14,96
	CMOD ₃ = 2,5 mm	15,14	19,14	13,31	18,09	18,76	15,80
	CMOD ₄ = 3,5 mm	10,07	17,16	12,67	17,68	17,18	14,52
Net Eğilme Dayanımı (MPa)		5,13	5,74	4,74	6,79	5,95	4,00
Rezidüel dayanım f_{ij} (MPa)	CMOD ₁ = 0,5 mm	2,72	5,79	4,30	5,51	4,93	4,07
	CMOD ₂ = 1,5 mm	5,00	6,13	4,23	6,41	6,35	4,79
	CMOD ₃ = 2,5 mm	4,84	6,12	4,26	5,79	6,00	5,06
	CMOD ₄ = 3,5 mm	3,22	5,49	4,05	5,66	5,50	4,65



Şekil 7. DOA'lı numunelerde belirli CMOD açılmalarında eğilme dayanımı değişimi

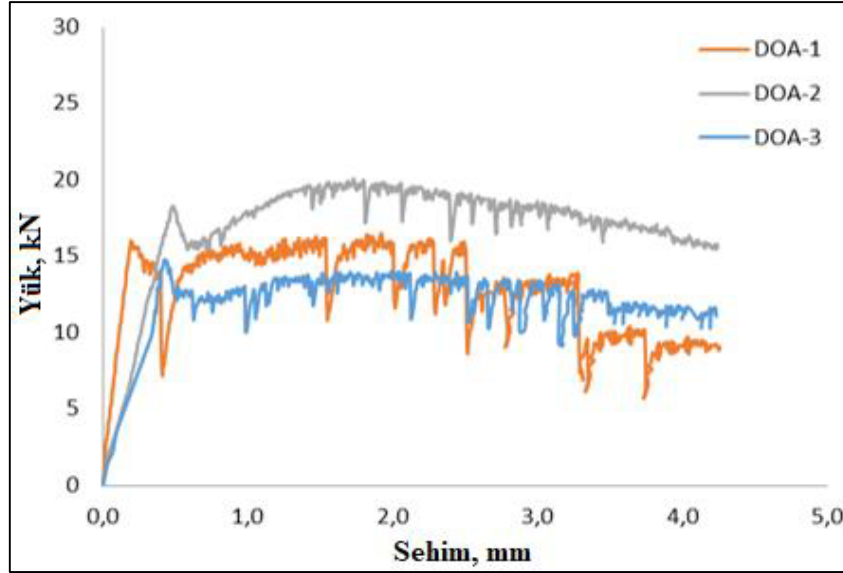


Şekil 8. KTA'lı numunelerde belirli CMOD açılmalarında eğilme dayanımı değişimi

Rezidüel dayanım sonuçları ele alındığında DOA'lı 3 adet numunede 5,13, 5,74 ve 4,74 MPa değerlerine ulaşan eğilmeye ilk çatlak oluştuğu gözlenmiştir. CMOD açıklığı 0,5 mm'ye geldiği anda ulaşılan bu değerler birinci ve üçüncü numunede sırasıyla ani olarak 2,72 ve 4,30 Mpa'ya düşmüş ancak ikinci numunede 5,79 MPa'ya gelmiştir. CMOD açıklığı 1,5, 2,5 ve 3,5 mm değerlerine ulaştığında ise eğilme dayanımı değişiklik gösterse de beton içerisinde bulunan çelik liflerin köprü görevi görmesinden dolayı numune, çelik lif kullanılmayan (lifsiz) betonlarda olduğu gibi ani bir göçme yapmamış ve yük taşımaya devam etmiştir.

Çelik liflerin varlığı ve köprü görevi görmesinden dolayı kirişlerin gerilme-deformasyon davranışı iyileşerek daha sünek bir şekilde enerji yutmaya devam etmiştir. Lif-süneklik ilişkisini daha iyi ifade etmek açısından Şekil 7 ve Şekil 8 verilmiştir. Genel anlamda incelenen bütün beton çeşitlerinde lif-matris aderansı iyi bir şekilde oluştuğu ve her iki agrega tipi için de süneklik değerinin önemli derecede arttığı ifade edilebilir.

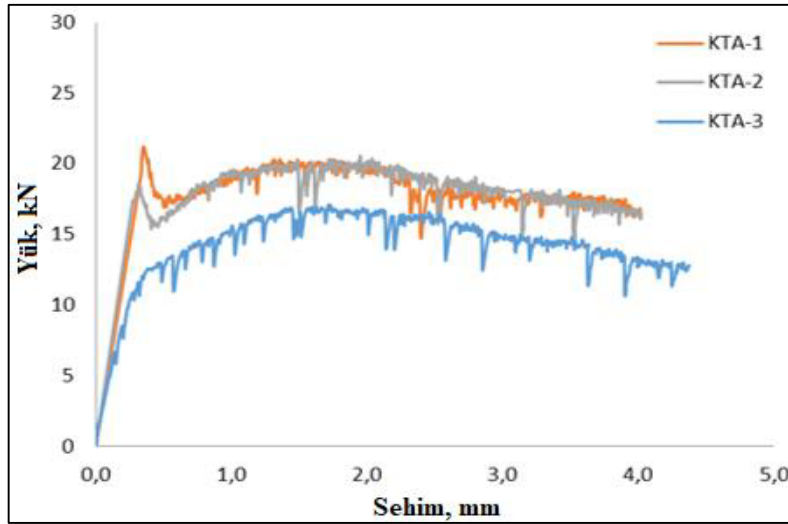
Üretilen çentikli kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme deneylerinde elde edilen Yük-Sehim grafikleri Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 9. DOA'lı numunelerde yük-sehim grafiği

Şekil 9 ve Şekil 10'da görülen yük-sehim grafikleri kullanılarak kirişlerin Yük-sehim ilişkisi grafiklerinin altında kalan alanlar (W_0) hesaplanmış ve W_0 -sehim grafikleri oluşturularak

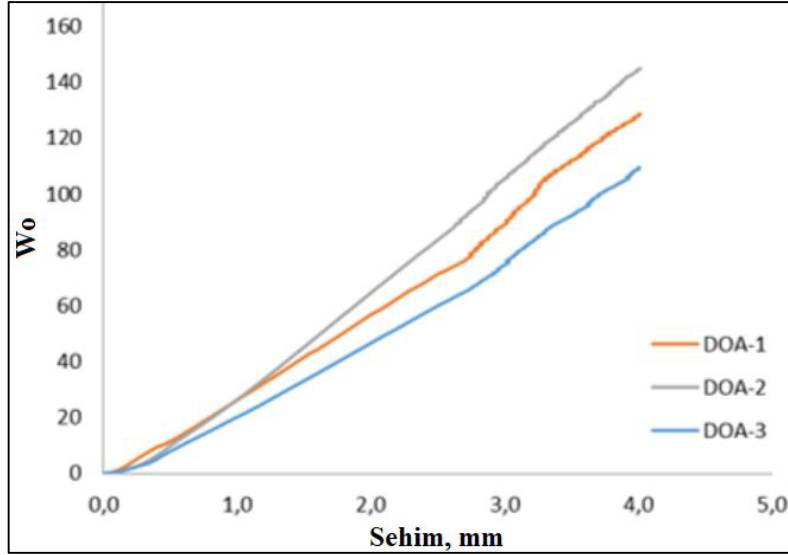
Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir. Bu grafikler Yük-sehim ilişkisi grafiklerinin altında kalan alanların kümülatif değişimini göstermektedir.



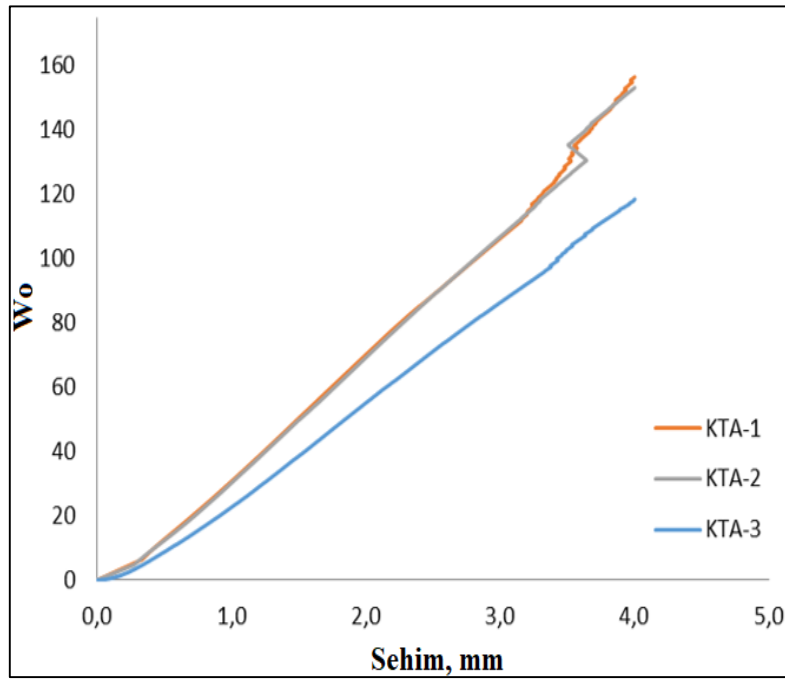
Şekil 10. KTA'lı numunelerde yük-sehim grafiği

Son olarak kırılma enerjisi değerleri Şekil 9 ve Şekil 10 kullanılarak Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmış ve hesaplanan kırılma enerjisi değerleri Şekil 13'te verilmiştir. Kırılma enerjileri

göreceli olarak karşılaştırıldığı için yük-sehim eğrisinin altında kalan alan her bir numunede sehimin 4 mm'ye ulaştığı noktaya kadar hesaplanmıştır.



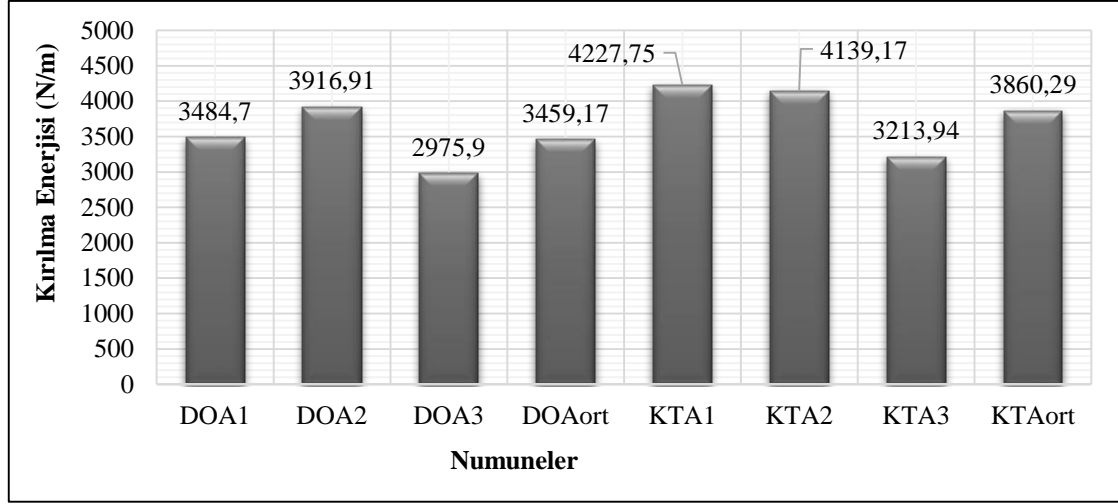
Şekil 11. DOA'lı numunelerde W_0 -sehim grafiği



Şekil 12. KTA'lı numunelerde W_0 -sehim grafiği

Kırılma enerjisi deney sonuçları incelendiğinde ortalama olarak en yüksek kırılma enerjisinin KTA içeren beton numunelerden elde edildiği, DOA içeren beton numunelerde bu değerin daha az

olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar bu konu özelinde detaylı bir şekilde içyapı analizi yapılmasının gerekli olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. Kırılma enerjisi deney sonuçları

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı türde agregalar kullanılarak üretilen benzer basınç dayanımlarına sahip çelik lifli numuneler üzerinde taze halde slump değerleri, sertleşmiş halde kırılma enerjisi, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir,

Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen bulgulara göre,

- Basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde hem KTA hem de DOA kullanılarak benzer basınç dayanımına sahip lifli betonların üretilmesi mümkündür.
- Numunelere ait eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, KTA ile üretilen lifli betonların eğilme dayanımları DOA ile üretilen betonların eğilme dayanımlarından daha yüksek bir değere sahip olduğu görülmektedir.
- Çalışmanın en önemli verilerinden biri olduğu düşünülen ve farklı tür agregalar ile üretilen çelik lifli çentikli kiriş numunelerinin süneklikleri hakkında bilgi veren kırılma enerjileri incelendiğinde, KTA ile üretilen numunelerin ortalama kırılma enerjilerinin, DOA numunelerinin

ortalama kırılma enerjilerinden daha yüksek olduğu yani daha sünek bir davranış sergilediği görülmektedir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı 18103037 no'lu proje ile mali olarak destekleyen Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., 2004. Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Kongresi Bildiriler, İstanbul.
2. <http://www.thbb.org/teknik-bilgiler/agrega/>, Erişim Tarihi: 24.02.2021.
3. Gencil, O., 2011. Physical and Mechanical Properties of Concrete Containing Hematite as Aggregates. Science and Engineering of Composite Materials, 18(3).
4. Köksal, F., Şahin, Y., Beycioğlu, A., Gencil, O., Brostow, W., 2012. Estimation of Fracture Energy of High-strength Steel Fibre-reinforced Concrete Using Rule-based Mamdani-type Fuzzy Inference System. Science and

- Engineering of Composite Materials, 19(4), 373-380.
5. Güçlüer, K., Günaydın, O., Tekin, Ö.F., Şahan, M.F., 2017. Farklı Tipte Agrega Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1), 107-114.
 6. Erdoğan, T., 2003. Beton. METU Press, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 741.
 7. Wang, X., Nie, Z., Gong, J., Liang, Z., 2021. Random Generation of Convex Aggregates for DEM Study of Particle Shape Effect, Construction and Building Materials, 268, 121468, ISSN 0950-0618.
 8. Mehta, P.K., Monteiro, J.M.P., 2006. Concrete, Microstructure-properties and Materials, Mc Graw Hill, (3rd ed.), 675.
 9. Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 334, İzmir, 428.
 10. Dobiszewska, M.; Beycioğlu, A., 2020. Physical Properties and Microstructure of Concrete with Waste Basalt Powder Addition. Materials, 13, 3503.
 11. Zahn, F.A., Park, R., Priestly, M.J.N., 1989. "Strength and Ductility of Square Reinforced Concrete Column Sections Subjected to Biaxial Bending", Structural Journal, 86(2), 123-131.
 12. Noushini, A., Samali, B., Vessalas, K., 2015. Ductility and Damping Characteristics of PVA-FRC Beam Elements, Advances in Structural Engineering, United Kingdom, 18(11), 1763-1788.
 13. Chawla, K.K., 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Pres, Cambridge, 293. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525209>.
 14. Betterman, L.R., Quyang C., Shah S.P., 1995. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, Adv. Cem. Bas., 2, 53-61.
 15. Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E., Hernández-López, S., Brostow, W., Menchaca-Campos, C., 2005. Mechanical Improvement of Concrete by Irradiated Polypropylene Fibers. Polym. Eng. Sci., 45, 1426-1431.
 16. Demiralp, M., 2020. Çelik Lifli Betonlarda Agrega Tipinin Kırılma Enerjisine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana.
 17. Sarı, M., 2013. Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 94.
 18. Han, B., Yu, X., Ou, J., 2014. Self-sensing Concrete in Smart Structures, Butterworth-Heinemann, 1st Edition, 398.
 19. Kozak, M., 2013. Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, SDU Teknik Bilimler Dergisi, 3(5), 26-35.
 20. Reported by ACI Committee 544, 2002. Report on Fiber Reinforced Concrete.
 21. Dündar, B., Çınar, E., Peşin, S., 2020. Bazalt ve Karbon Lif Takviyeli Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(4), 1039-1048. doi: 10.17714/gumusfenbil.700956.
 22. Bunnell, A.R., 1988. Fiber Reinforcement for Composite Materials, Vol: 2, (Series Editor: R. B. Pipes), Composite Material Series, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 537.
 23. TS EN 1008, Beton Karma Suyu, Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dâhil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, 2013.
 24. TS EN 12350-2, (Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2): Çökme (Slamp) Deneyi.
 25. TS EN 12390-3, 2003. (Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3): Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, 2002.
 26. TS EN 12390-5, (Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5): Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, 2002.
 27. TS EN 14651, Metal Lifli Beton- Deney Metodu- Eğilmede Çekme Dayanımının Tayini (Orantı Sınırı (Loc), Artık), 2008.
 28. RILEM TC 50-FMC, 1985. Committee of Fracture Mechanics of Concrete Determination of Fracture Energy of Mortar and concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, 18.