

Bazalt liflerin geleneksel betonların mekanik özellikleri ve kırılma enerjilerine etkilerinin incelenmesi

Investigation on the effects of basalt fibers on the mechanical properties and fracture energy of ordinary concretes

Mehmet Emin ARSLAN¹

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.
mehmeteminarslan@duzce.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 27.01.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 25.04.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.95815
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmanın temel amacı, bazalt liflerinin geleneksel betonun mekanik özellikleri ve eğilme altında kırılma parametrelerine etkilerini incelemektir. Betonun kırılma enerjilerinin belirlenmesi amacıyla, RILEM TC 50-FMC standardına uygun olarak, lifsiz ve 24 mm boyunda 0.5, 1, 2 ve 3 kg/m³ bazalt lif içeriğine sahip 15 adet 50x100x480 mm boyutlarında çentikli kiriş numuneleri üretilmiştir. Üretilen çentikli kiriş numuneleri üzerinde üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çentikli kiriş numunelerin kırılma enerjileri, yük-çatlak açıklığı eğrisinin altında kalan alan kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bazalt liflerin betonun kırılma enerjisini önemli oranda artırdığını göstermiştir. Bunun yanında bazalt liflerin betonun, basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yarmada ve eğilmede çekme dayanımlarında ise 2 kg/m³ lif içeriğinden sonra azalma başladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların tamamı beraber değerlendirildiğinde geleneksel beton için en uygun lif oranının 2 kg/m³ olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bazalt lif, Kırılma enerjisi, Çentikli kiriş, Çatlak ağzı açılımı, Üç nokta eğilme

Abstract

The main purpose of this study is to investigate the effect of basalt fibers on mechanical properties and fracture behavior of ordinary concrete. For this purpose, 15 notched concrete beams measuring 50x100x480 mm were prepared and tested using three point bending test in accordance with RILEM TC 50-FMC. Mixtures were produced using basalt fibers of 24 mm length at contents of 0.5, 1, 2, and 3 kg/m³ in addition to the mixture without fiber for comparison. Fracture energies were calculated using the area under the Load-Crack Mouth Opening Displacement (CMOD). The results obtained from the tests indicate that basalt fibers have considerably increased the fracture energy of ordinary concrete. However, it was observed that the addition of basalt fibers had no significant effect on the compressive strength and elastic modulus. It was also observed that the splitting tensile and flexural strengths began to decrease beyond a fiber content of 2 kg/m³. Overall evaluation indicated that addition of 2 kg/m³ basalt fibers to the mixture seems to be proper in relation with the properties tested in this work.

Keywords: Basalt fiber, Fracture energy, Notched beam, Crack opening displacement, Three point bending test

1 Giriş

Betonun çekme dayanımının ve şekil değiştirme kapasitesinin düşük olduğu bilinmektedir [1],[2]. Lif ilavesinin genel olarak betonun çekme, eğilme, aşınma ve darbe dayanımlarını, süneklik, tokluk, şekil değiştirme ve yük taşıma kapasitesini artırdığı bilinmektedir [3],[4]. Bunların yanında, dayanıklılık, süneklik, korozyon dayanımı gibi özelliklerinden dolayı liman, açık deniz yapıları, patlama dayanımı gerektiren yapıları da içeren inşaat sektörünün birçok alanında kullanılmaktadır. Son yıllarda, teknoloji ve tekstil sektöründeki gelişmelere paralel olarak geliştirilen yeni lif türleri çimento, beton ve diğer kompozit malzeme üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan en çok kullanılanları cam, aramit, karbon ve bazalt liflerdir.

Bazalt volkanik kökenli, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek bir kayaç türüdür [5],[6]. Bazalt lifi ise bu kayacın eritilip işlenmesi ile elde edilen çapı 13-20 µm arasında olan bir lif türüdür. Bazalt liflerin ısı ve ses yalıtımları oldukça yüksektir [7]. Ayrıca, doğada çok fazla bulunan bir kayaçtan üretildikleri için diğer liflere göre daha ucuzdur. Bunun yanında, yapılan çalışmalar bazalt liflerin çekme dayanımlarının E-Sınıfı cam liflerden, kopma uzamalarının ise karbon liflerden fazla olduğunu göstermiştir [6],[8]. Bazalt liflerin yukarıda sayılan faydalarının bilinmesine rağmen, bunlarla alakalı çalışmalar

oldukça sınırlıdır [1],[9],[10]. Yapılan çalışmaların az olması sebebiyle bazalt liflerin, kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini belirlemek için daha fazla araştırma yapılması gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Kırılma enerjisi, betonun özelliklerini ve beton yapıların tasarım kriterlerinin belirlenmesinde kullanılan en önemli parametrelerden birisidir. Beton yapıların analizinde en yaygın kullanılan kırılma mekaniği modeli Hillerborg [11],[12] tarafından önerilen Fiktif Çatlak Modelidir (FÇM). Kırılma enerjisi (G_f), bir çatlağın kesit boyunca tamamen açılması için gerekli olan enerjidir. G_f 'nin belirlenmesi için RILEM [13] ve Peterson [14] tarafından üç nokta eğilme deneyinin kullanıldığı bir yöntem önerilmiştir.

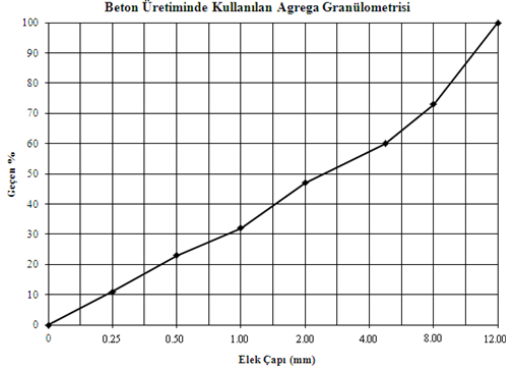
Liflerin esas görevlerinden biri betonun kırılma enerjisini artırmaktır [15],[16]. Bu çalışmanın amacı, yalın ve 0.5, 1, 2 ve 3 kg/m³ bazalt lif (BL) içeriğine sahip geleneksel betonların, mekanik özelliklerinin ve üç nokta eğilme deneyi yapılarak kırılma enerjilerinin belirlenmesidir.

2 Deneysel çalışma

2.1 Malzeme özellikleri ve deney numunelerinin hazırlanması

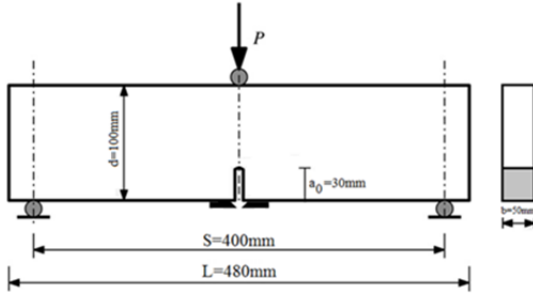
Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, beton numunelerin üretilmesinde CEM I 42.5-R Portland çimentosu kullanılmıştır.

Üretilen bazalt lifli ve yalın betonlara ilişkin karışım oranları Tablo 1’de verilmektedir. Bütün üretimlerde S/Ç oranı 0.5 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Çalışmada 0-5 mm çaplı ince ve 5-12 mm çaplı iri kalker agregası kullanılmıştır. Agregalara ilişkin granülometri eğrisi Şekil 1’de verilmektedir. Uygun işlenebilirliği sağlamak amacıyla deneme üretimleriyle karar verilen ve bütün karışımlarda sabit olmak üzere çimento ağırlığının %1’i oranında akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 1: Agregra granülometri eğrisi.

Yalın ve bazalt lifli betonların kırılma enerjilerini belirlemek amacıyla her seriden 3 adet olmak üzere 50 mm x 100 mm x 480 mm olan toplam 15 adet çentikli kiriş numunesi üretilmiştir. Üretilen çentikli kirişlere ilişkin boyutlar ve detaylar Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2: Çentikli numunelerin boyut ve detayları.

Lifli beton elemanlarının üretiminde 24 mm uzunluğunda ve 0.5, 1, 2 ve 3 kg/m³ oranlarında bazalt lifleri kullanılmıştır. Bazalt liflere ilişkin, üretici firmadan temin edilen bazı fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2’de, liflerin bir görünümü ise Şekil 3’te verilmektedir [6],[17].

Çentikli kiriş numunelerinin üretiminde, içerisinde kiriş numunelere çentik formunu veren 3 mm genişliğinde 30 mm

yüksekliğinde bir plaka bulunan modüler çelik kalıplar kullanılmıştır. Kullanılan kalıpların bir görünümü Şekil 4’te verilmektedir.



Şekil 3: 24 mm uzunluğunda bazalt lifler.



Şekil 4: Çentikli kiriş numunelerinin üretiminde kullanılan çelik kalıp.

2.2 Yöntem

Lifli ve yalın betonların ortalama basınç dayanımları, 28 gün standart küre maruz bırakılmış 150x300 mm standart silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler yardımıyla belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımları ise 150 mm boyutlarında küp numunelerle.

$$f_{st} = 2P/\pi a^2 \quad (1)$$

eşitliği kullanılarak belirlenmiştir. Burada, P ve a sırasıyla, nihai yük ve kenar boyutunu ifade etmektedir.

Çentikli kiriş deney numuneleri üzerinde yapılan üç nokta eğilme deneyi yerdeğiştirme kontrollü olarak Universal Test Cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1: Beton karışım oranları.

Numune Kodu	Lif İçeriği (kg/m ³)	Çimento (kg/m ³)	S/Ç Oranı	İri Agregra (5-12 mm)(kg/m ³)	İnce Agregra (0-5 mm) (kg/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)
Ref	-					
BL-24-0.5	0.5					
BL-24-1	1	350	0.5	740	1100	3.5
BL-24-2	2					
BL-24-3	3					

Tablo 2: Bazalt liflerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Some physical and mechanical properties of basalt fiber).

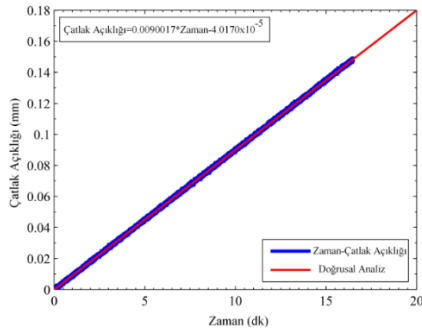
Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
12-24	13-20	88	3.15	4000-4500	2.80

Üç nokta eğilme deney ve ölçüm düzeneği Şekil 5'te, yükleme zamanı ve çatlak açıklığı arasındaki ilişki ise Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi yerdeğiştirme kontrollü yükleme doğrusaldır. Deney yükleme hızı 0.009 mm/dk. hassasiyetle belirlenmiş ve yüklemeye nihai yükte %95 azalma elde edilinceye kadar devam edilmiştir.

$$G_f = \frac{W_0 + mg\delta}{A} \quad (2)$$



Şekil 5: Üç nokta eğilme deney ve ölçüm düzeneği.



Şekil 6: Üç nokta eğilme deneyinin zaman-çatlak açıklığı ilişkisi.

Çentikli kirişlerin orta noktalarında eğilmeden dolayı oluşan çatlak açıklıklarını ölçmek için çatlak açıklığı ölçüm aleti (Clip-gage) kullanılmıştır (Şekil 7). Clip-gage'in kiriş ortasına yerleştirilmesinde keskin uçlu çelik plak parçaları kullanılmıştır (Şekil 5). Düşey yükler ise yük hücresi (Loadcell) yardımıyla ölçülmüştür. Uygulanan düşey yükler ve bunlara karşılık gelen çatlak açıklık verileri 0.04 s aralıklarla kaydedilmiştir. Ayrıca kiriş ortasında meydana gelen düşey yerdeğiştirmeler de bir video-ekstansiyometre yardımıyla ölçülmüştür. Deneyler sonunda elde edilen yük-çatlak açıklığı eğrileri yardımıyla bazalt lifli ve yalın betonlarla üretilen kiriş numunelerinin kırılma enerjileri (G_f) RILEM [13] tarafından önerilen (2) ifadesi yardımıyla hesaplanmıştır.

Burada W_0 , yük-çatlak açıklığı eğrisinin altında kalan alanı (N/m); mg , kiriş numunelerinin mesnet açıklığı arasında kalan ağırlığını (kg); δ maksimum çatlak açıklığını (m) ve A ise kırılma alanını göstermektedir [$b(d - a_0)$] (m^2). Kırılma alanındaki b ve d sırasıyla, kiriş genişliğini ve yüksekliğini ifade etmektedir. Lifli ve yalın betonların eğilmede çekme dayanımları ise üç nokta eğilme deneyi verileri kullanılarak (3) eşitliği yardımıyla belirlenmiştir.

$$f = \frac{3PS}{2b(d - a)^2} \quad (3)$$

Burada P , nihai yükü; S , mesnet açıklığını; b , kiriş genişliğini; d , kiriş yüksekliğini ve a_0 ise çentik derinliğini göstermektedir. Üretilen lifli ve yalın betonların Elastisite Modülleri (E), yük-çatlak açıklığı eğrilerinin kompliyansı (C_i) kullanılarak (4) eşitliği yardımıyla belirlenmiştir [18],[19].

$$E = \frac{6S a_0 V_1(\alpha)}{(C_i b d^2)} \quad (4)$$

Burada, $V_1(\alpha)$, $\alpha = (a_0 + h_0)/(d + h_0)$ katsayısına bağlı bir fonksiyonu ifade etmektedir. Ayrıca, α ifadesindeki h_0 kullanılan keskin uçlu çelik plağın yüksekliğini (5.50 mm) göstermektedir.

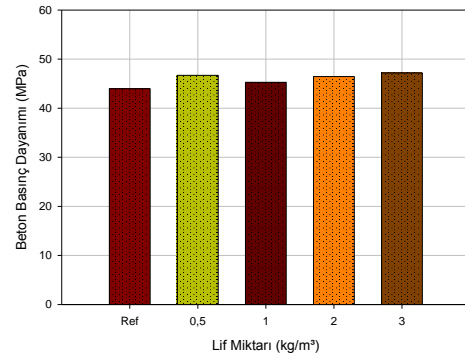


Şekil 7: Çatlak açıklığı ölçüm aleti (Clip gage).

3 Bulgular ve irdeleme

3.1 Basınç dayanımı

Standart silindir numuneleri üzerinde gerçekleştirilen basınç deneyi sonunda bazalt lifli ve yalın betonlar için elde edilen ortalama basınç dayanımları Şekil 8'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi farklı orandaki bazalt lif katkısının basınç dayanımı üzerine önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yalın beton numunelere göre, basınç dayanımlarında bir miktar artış gözlenmiştir. Yalın beton deney numunelerine göre basınç dayanımındaki maksimum artış %7 civarındadır.

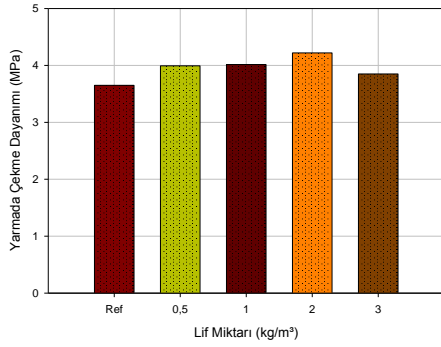


Şekil 8: Bazalt lifli ve yalın beton numunelerin ortalama basınç dayanımları.

3.2 Yarmada ve eğilmede çekme dayanımları

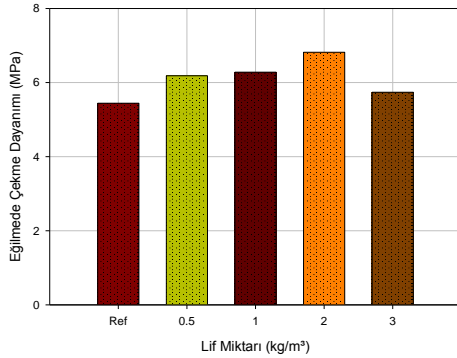
Bazalt lifli ve yalın betonlar için elde edilen ortalama yarmada çekme dayanımları Şekil 9'da verilmektedir. Bazı çalışmalarda

[17],[20], deney esnasında gerilme yığılmalarının meydana gelmesi ve farklı lif dağılımlarının oluşma ihtimalinden dolayı yarmada çekme deneyinin, betonun çekme dayanımı hakkında sağlıklı sonuçlar vermediği, ancak malzemelerin sünekliliği hakkında bir fikir verebileceği savunulmuştur. Gerçekleştirilen bu çalışmada, yarma deneylerinde bazalt lifli betonların yalın betonların tersine, oluşan ilk çatlak sonunda dağılmadığı görülmüştür. Bu sonuç lif katkısının betonun sünekliliğine katkı sağladığını göstermektedir. Yalın betona göre maksimum artış %10 oranında BL-24-2 beton karışımında gerçekleşmiştir.



Şekil 9: Bazalt lifli ve yalın beton numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımları.

Bazalt lifli ve yalın betonların, üç nokta eğilme deneyiyle elde edilen, üçer numunenin ortalama eğilme çekme dayanımları Şekil 10'da verilmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi bazalt lifler betonların eğilme çekme dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır. Eğilme çekme dayanımındaki büyük artış (6.85 MPa) BL-24-2 beton karışımı için elde edilmiştir. Bu değer 3 kg/m³ bazalt lif içeriğine sahip BL-24-3 karışımında azalma göstermiştir (5.74 MPa).

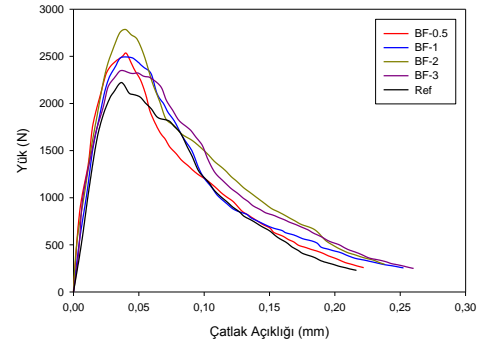


Şekil 10: Bazalt lifli ve yalın beton numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımları.

3.3 Kırılma enerjisi ve elastisite modülleri

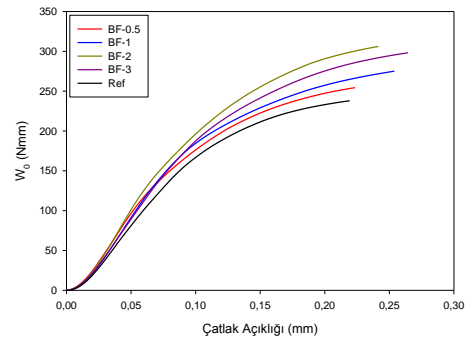
Çentikli kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç nokta eğilme deneyinden elde edilen Yük-Çatlak Açıklığı eğrileri Şekil 11'de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, bazalt lif

ilavesi taşıma kapasitesini oldukça artırmıştır. En yüksek yük taşıma kapasitesine ise BL-24-2 karışımında ulaşılmıştır.

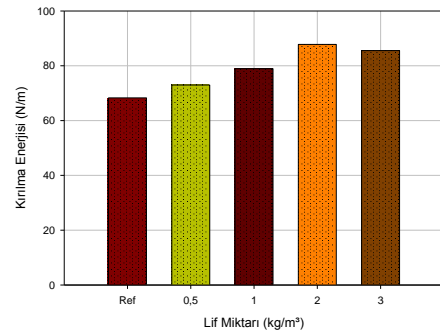


Şekil 11: Üç nokta eğilme deneyinden elde edilen yük-çatlak açıklığı eğrileri.

Çentikli kiriş, küp ve silindir deney elemanları üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kırılma enerjisi (G_f) değerleri ve bazı mekanik özellikler Tablo 3'te verilmektedir. Yük-çatlak açıklığı eğrisinin altında kalan alanın (W_0) çatlak açıklığı ile değişimi ve lif miktarına bağlı olarak kırılma enerjisi değerleri sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 12: Bazalt lifli ve yalın beton kiriş numunelerinin çatlak açıklığı- W_0 eğrileri,



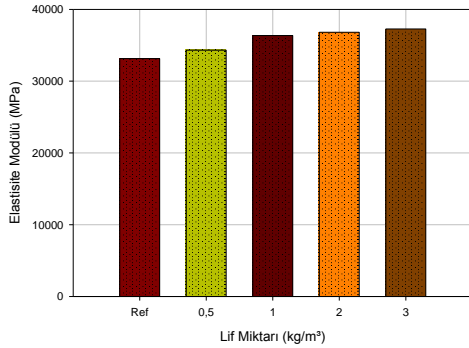
Şekil 13: Bazalt lifli ve yalın beton kiriş numunelerinin kırılma enerjileri.

Tablo 3: Bazalt lifli ve yalın betonların kırılma enerjileri ve bazı mekanik özellikleri.

Karışım Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	Kırılma Enerjisi (N/m)	Elastisite Modülü (MPa)
Ref	43.98	3.65	5.44	68.28	33138
BL-24-0.5	46.70	3.99	6.18	72.98	34310
BL-24-1	45.28	4.02	6.28	78.94	36360
BL-24-2	46.45	4.22	6.82	87.79	36815
BL-24-3	47.17	3.85	5.74	85.54	37278

Şekillerden de görüldüğü gibi bazalt lif katkısının kırılma enerjisini oldukça artırmaktadır. Eğilmeye çekme dayanımında da olduğu gibi BL-24-2 karışımından sonra kırılma enerjisinde azalmalar başlamıştır. En yüksek kırılma enerjisine ise yine BL-24-2 karışımında (87.79 N/mm) ulaşılmıştır. Bu değer yalın beton karışımı için elde edilen kırılma enerjisi değerinden yaklaşık olarak %30 fazladır. Bu sonuç, bazalt lif kullanımının betonun sünekliği ve enerji yutma kapasitesini artırdığını göstermektedir.

Bazalt lifli ve yalın betonların (4) denklemi yardımıyla hesaplanan Elastisite Modülleri Şekil 14'te verilmektedir. Lifli betonların üç nokta eğilme deneyi verileri kullanılarak belirlenen Elastisite Modülleri 33000-37300 MPa arasında ve yalın betona göre daha yüksektir. En yüksek Elastisite Modülü değeri BF-24-3 karışımı için elde edilmiştir. Bu değerler basınç dayanımıyla paralellik göstermektedir.



Şekil 14: Bazalt lifli ve yalın beton kiriş numunelerinin elastisite modülleri.

Çentikli kiriş, küp ve sisli deney elemanları üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kırılma enerjisi ve bazı mekanik özellikler Tablo 3'te verilmektedir.

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada, 24 mm boyunda, 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ bazalt lif içeriğine sahip lifli betonlar ve yalın betonların kırılma davranışı ve bazı mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu betonlarla üretilen çentikli kiriş numuneler üzerinde üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiş ve kırılma enerjileri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Çalışmadan çıkarılabilecek başlıca sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir:

- Farklı oranda bazalt lif katkısının betonların basınç dayanımında önemli bir etkisinin olmadığı bunun yanında basınç dayanımında yalın betonlara göre bir miktar artış gözlenmiştir. Burada, iyileştirilmesi hedeflenen esas beton karakteristiklerinin çekme dayanımı ve kırılma enerjisi olduğu düşünüldüğünde, basınç dayanımındaki artış, bazalt liflerin ilave olumlu bir katkısını daha ortaya koymuştur,
- Bazalt lifli betonların yalın betonların aksine yarmada çekme deneyleri sırasında ilk çatlak oluşumundan sonra dağılmamışlardır. Bunun, bazalt lif katkısının, gevrek bir davranış gösteren yalın betonların, sünekliğini artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek yarmada çekme dayanımına BL-24-2 karışımında ulaşılmıştır. Bu orandan sonra yarmada çekme dayanımında

azalmalar başlamıştır. Bu sonuç yarmada çekme dayanımı için en uygun lif oranının 2 kg/m³ olduğunu göstermektedir,

- Bazalt lif katkısı yalın betonların eğilmeye çekme dayanımlarını önemli derecede artırmıştır. En yüksek eğilmeye çekme dayanımına BFRC-24-2 (6.82 MPa) karışımında ulaşılmıştır. Bu değer yalın betona göre %25 daha fazladır. Bunun yanında, yarmada çekme dayanımında olduğu gibi BL-24-3 beton karışımında eğilmeye çekme dayanımı da azalmaya başlamıştır,
- Bazalt lifli betonların kırılma enerjileri yalın betonlara göre oldukça fazladır. Elde edilen en yüksek kırılma enerjisi değeri, BL-24-2 karışımı için, 87.79 N/mm olarak belirlenmiştir. Bu değer yalın betonların kırılma enerjilerinden yaklaşık %29 daha fazladır. Bu sonuç, bazalt lif katkısının betonun süneklik ve enerji tüketme kapasitesini oldukça artırdığı sonucunu ortaya koymaktadır. Bunun yanında 3 kg/m³ lif oranında kırılma enerjisinde azalmalar başlamıştır,
- Lif katkısının betonların Elastisite Modüllerini çok fazla etkilemediği görülmüştür. Betonların Elastisite Modülü değerleri 33000-37300 MPa civarındadır ve en yüksek değere BL-24-3 karışımında ulaşılmıştır. Elde edilen bu değerler basınç dayanımı ile paralellik göstermektedir.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bu çalışmada beton karışımlarında her ne kadar lif topaklaşmasına rastlanmasa da yüksek hacimli karışımlarda üretimlerin daha dikkatli yapılması gerektiği unutulmamalıdır.

5 Kaynaklar

- Jiang C, Fan K, Wu F, Chen D. "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete". *Materials & Design*, 58(6), 187-193, 2014.
- Tassew ST, Lubell AS. "Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete". *Construction and Building Materials*, 51, 215-224, 2014.
- Mohammadi Y, Singh SP, Kaushik SK. "Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state". *Construction and Building Materials*, 22(5), 956-965, 2008.
- Shaikh FUA. "Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites". *Construction and Building Materials*, 43(6), 37-49, 2013.
- Di Ludovico M, Prota A, Manfredi G. "Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement". *Journal of Composites for Construction*, 14(5), 541-552, 2010.
- Kabay N. "Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber". *Construction and Building Materials*, 50, 95-101, 2014.
- Brigante D. *New Composite Materials: Selection, Design, and Application*. Switzerland, Springer International Publishing, 2014.
- Sim J, Park C, Moon DY. "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures". *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512, 2005.

- [9] Dias DP, Thaumaturgo C. "Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers". *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 49-54, 2005.
- [10] Li W, Xu J. "Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading". *Materials Science and Engineering: A*, 505(1-2), 178-186, 2009.
- [11] Hillerborg A. *Analysis of one Single Crack*. Fracture Mechanics of Concrete (Developments in civil engineering) Editors: Wittmann FH. Fracture Mechanics of Concrete (Developments in Civil Engineering), 223-249, Michigan University, USA, Elsevier, 1983.
- [12] Hillerborg A. "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete". *Materials and Structures*, 18(4), 291-296, 1985.
- [13] RILEM FMC-50. "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams". *Materials and Structures*, 18(4), 287-290, 1985.
- [14] Peterson PE. "Fracture energy of concrete: Method of determination". *Cement and Concrete Research*, 10(1), 79-89, 1980.
- [15] Bayramov F, Taşdemir C, Taşdemir MA. "Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method". *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 665-675, 2004.
- [16] Şahin Y, Köksal F. "The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete". *Construction and Building Materials*, 25(4), 1801-1806, 2011.
- [17] Kizilkanat AB, Kabay N, Akyüncü V, Chowdhury S, Akça AH. "Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study". *Construction and Building Materials*, 100, 218-224, 2015.
- [18] Bažant ZP. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*. New York, USA, Taylor and Francis, 1992.
- [19] Shah SP, Swartz SE, Ouyang C. *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials*. New York, USA, John Wiley & Sons, 1995.
- [20] Patel PA, Desai Atul K, Desai Jatil A. "Evaluation of engineering properties for polypropylene fibre reinforced concrete". *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 3(1), 42-45, 2012.