

Civil Engineering Articles
/
İnşaat Mühendisliği Makaleleri

Research Article / Araştırma Makalesi

BASALT FIBERS AND MECHANICAL PROPERTIES OF BASALT FIBER REINFORCED CONCRETE

Ahmet B. KIZILKANAT^{*1}, Nihat KABAY¹, Veysel AKYÜNCÜ², Gökhan ERDOĞAN³

¹*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL*

²*Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, TEKİRDAĞ*

³*Esenyurt Belediyesi, İSTANBUL*

Received/Geliş: 14.08.2014 Revised/Düzeltilme: 19.09.2014 Accepted/Kabul: 27.09.2014

ABSTRACT

Concrete is a brittle material with a low energy absorption capacity. There are several methods to increase the ductility of concrete where incorporation of different type of fibers is usually known as the most effective one. The most common type of fibers used for reinforcing concrete is steel, polymer, glass and carbon fibers. Although the addition of fibers might slightly increase the compressive strength of concrete, the main benefit occurs in terms of flexural and tensile strength of concrete. The principal role of the fibers is to modify the behavior of the material once the concrete matrix has cracked by bridging across the cracks as they begin to open and preventing the crack development. Basalt fibers are obtained by melting process of volcanic basalt rock. These fibers have many superior properties when compared to other fibers. Studies have shown that basalt fibers favorably affect the mechanical properties of concrete such as tensile strength and fracture energy.

Keywords: Basalt fibers, concrete, durability, mechanical properties.

BAZALT LİFLER VE BAZALT LİFLİ BETONLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Gevrek bir malzeme olan betonun enerji yutma kapasitesi düşük düzeylerde. Betonun daha sünek bir hale gelebilmesi için farklı yöntemler kullanılır. Betonda lif kullanımı bu yöntemler arasında en etkin olanıdır. Genellikle kullanılan lifler arasında çelik, polimer, cam ve karbon lifler sayılabilir. Basınç dayanımına kısmen de olsa katkıda bulunmasına rağmen lif kullanımında amaç betonun eğilme ve çekme dayanımını arttırmaktır. Liflerin esas rolü matris fazında ilk çatlak oluşumundan sonra çatlak boyunca köprü vazifesi görüp, çatlak gelişimini engellemektir. Volkanik bir kayalık olan bazaltın eritilmesi işleminden sonra küçük parçalar haline getirilmesi yoluyla elde edilen bazalt lifler diğer liflere göre birçok üstün özelliğe sahiptir. Yapılan çalışmalardan, bu liflerin betonun çekme dayanımı, kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği görülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Bazalt lif, beton, durabilite, mekanik özellikler.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: bkkanat@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 52 43

1. GİRİŞ

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin birlikte karıştırılması ile oluşan bir yapı malzemesidir [1]. Zamanla, farklı özelliklerde farklı katkı malzemeleri ile kullanım amacına uygun beton dizaynları geliştirilmiştir. Bu amaçla betonlar; hafif beton, ağır beton, su altında dökülebilen beton, prepakt beton, kendiliğinden yerleşen beton ve lifli betonlar olarak ayrılmıştır.

Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10'u kadardır [2]. Beton bu özelliğinden dolayı gevrek bir davranış sergilemektedir. Diğer bir deyişle plastik şekil değiştirme özelliği çok düşük olan bir malzemedir. Bu sebeple beton içerisine bu ani kırılmayı önleyecek malzemeler ilave edilmektedir. Beton içerisine her ne kadar çelik donatılar yerleştirilerek betonun azda olsa gevrekliği önlenmek istenmişse de akma dayanımına ulaşan çeliğin kopmasıyla tekrar gevrek kırılma meydana gelmektedir. Bu ani kırılmayı önleyebilmek ve betonun sünekliğini artırabilmek adına beton içerisinde farklı mekanik ve fiziksel özelliğe sahip lifler kullanılmaktadır. Çimento, su, agrega, süresiz dağılımlı kısa lifler ve gerektiğinde kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile oluşturulan yapı malzemesi "lifli beton" olarak adlandırılmaktadır. Lifli beton (Şekil 1.2) kompozit malzemeler grubunun lifli kompozitler alt sınıfına dâhil olup, ortamı saran matris malzemesi çimento hamurudur. Matrisin görevi lifleri bir arada tutmak, onları korumak ve liflerle gerilme transferi sağlamaktır [3].

Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla liflerle donatılmıştır [4]. En az 3500 yıl kadar eski bir tarihe sahip olan lifler, saman lifleriyle güçlendirilmiş pişmiş tuğlaların kullanılmasıyla inşa edilen Bağdat yakınlarındaki 57 m yükseklikteki Aqar Quf'un yapımında kullanılmıştır. Yakın geçmişte ise çimento ürünlerini güçlendirmek için yaklaşık 100 yıl öncesine kadar asbest lifleri, 50 yıl öncesine kadar selüloz lifler, 30 yıl öncesine kadar ise polipropilen ve cam lifleri güçlendirme materyali olarak kullanılmıştır [5].

Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli şart, liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Homojen bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirmektedir. Lifli betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi, tokluk olarak da adlandırılan enerji yutabilme kapasitesidir. Çatlak direnci, düktilite, darbe direnci gibi birçok malzeme özelliği enerji yutabilme kapasitesi ile ilişkilidir [6,7].

Günümüzde lifli beton üretiminde, hedeflenen amaç doğrultusunda, çelik ve polimer liflerin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda bu liflere alternatif olabileceği düşünülen doğal lifler ile ilgili yapılan çalışmaların sayısında da artış söz konusudur. Doğal bir lif türü olan bazalt lifler ile ilgili yapılan çalışmaların sayısında da artış görülmektedir. Bununla birlikte bazalt liflerin inşaat sektöründe de kullanımı zamanla daha yaygın bir hal almaktadır.

Bazalt lifler, genellikle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan, kimyasal olarak inaktif ve aşınma direnci yüksek malzeme üretiminde kullanılırlar [8]. Bazalt lifleri durabilite, sıcaklığa karşı direnç ve dayanım yönünden güçlü kılan özelliği volkanik kayalardan elde edilmesidir. Bazalt lifler, bazalt kayacının erime işlemlerinden geçirilip ince partiküller halinde ayrılmasıyla elde edilir. Bu işlemler gerçekleştirilirken lif üretiminde başka herhangi bir katkı malzemesi kullanılmamaktadır. İşlemlerin bu şekilde devam etmesi maliyeti de olumlu yönde etkilemektedir [9].

2. BAZALT LİFLER

Volkanik bir kayaç türü olan bazalt, sert, yoğun ve termoplastik bir malzemedir. Yoğunluğu 2,7-2,8 g/cm³, Moh's sertliği ise 5-9 arasındadır [10]. Bazaltın ana bileşenleri SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO ve demir oksitlerdir (Çizelge 1). Kimyasal bileşenleri bazaltın menşesine ve türüne göre farklılıklar gösterebilir [11]. Bazalt lifler (Şekil 1), bazaltın 1300-1700°C sıcaklıklarda eritilerek çok ince parçalara ayrılıp lif formunda üretilmesi yolu ile elde edilirler [12,13]. Üretimi esnasında herhangi bir ilave katkı malzemesi kullanılmadığından, bazalt lifler düşük maliyetle üretilirler.

Çizelge 1. Bazalt liflerin kimyasal kompozisyonu [11]

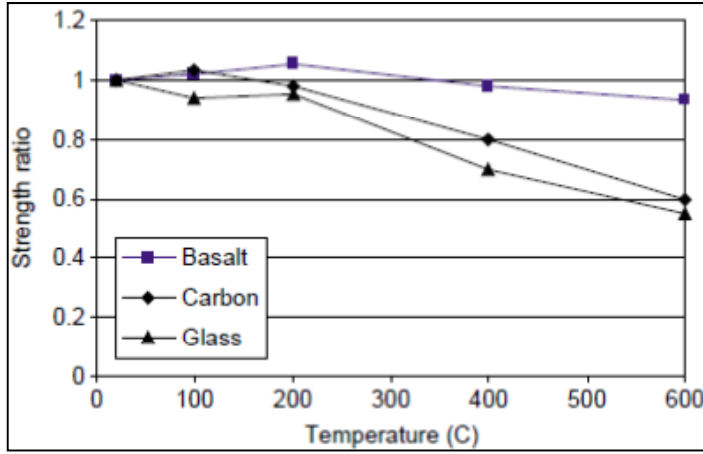
Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
%	49-54	12-17	7-10	5-11	3-5	<3	10-14



Şekil 1. Bazalt lif

Bazalt liflerin çekme dayanımı cam liflerden, kopma birim uzaması ise karbon liflerden daha yüksektir. Kimyasal etkilere karşı hemen hemen cam ve karbon lifler kadar iyi direnç gösterirler [14]. Bazalt lifin elastisite modülü 80-90 GPa ve çekme dayanımı ise 3.0-4.8 GPa arasındadır [11]. Bazalt lifler cam lifler ile kıyaslandığında, çekme dayanımı cam liflerin çekme dayanımının yaklaşık olarak iki katıdır. Elastisite modülü ise yaklaşık olarak %15-30 kadar daha fazladır. Korozyon riski söz konusu olduğunda bazalt lifli kompozitler çelik liflerin yerine kullanılabilir [15]. Bazalt lifin diğer bir avantajı ise çelik liflere göre yaklaşık 1/3 oranında daha hafif olmasıdır. Ayrıca bazalt lifin ısı genleşme katsayısı betonun ısı genleşme katsayısına çok yakındır [15]. Bağlı nemin %65 olduğu bir ortamda bazalt lifin nem adsorpsiyonu %0,1'in altındadır [10].

Bazalt liflerin alkali ve UV direnci ile termal stabilitesinin, karbon ve cam liflerle karşılaştırmalı olarak belirlendiği deneysel çalışmada; karbon lifler, bazalt ve cam liflere göre alkalilere karşı daha iyi performans göstermiştir. 4000 saat UV etkisine maruz kalan karbon liflerde dayanımda neredeyse herhangi bir kayıp gözlenmezken, cam liflerdeki dayanım kaybı bazalt liflerin yaklaşık iki katı kadar olduğu tespit edilmiştir. Bazalt lifin termal stabilitesi araştırıldığında, 600°C gibi yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldığında sadece bazalt lifin hacim sabitliğini koruduğu ve dayanımını %90 oranında muhafaza ettiği (Şekil 2) belirlenmiştir [16].



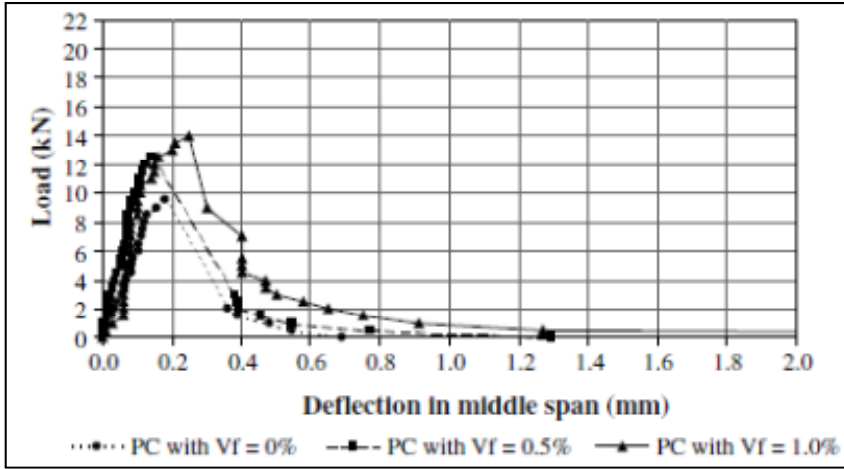
Şekil 2. Bazalt, karbon ve cam liflerin sıcaklık-çekme dayanımı değişimi

Bazalt lifin yüksek sıcaklık etkisi altındaki kararlılığı doğal bazalt kayaların karakteristik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Diğer liflerde istenen sıcaklık stabilitesi, yapı minerallerine TiO_2 , ZrO_2 veya P_2O_3 gibi elementler eklenerek elde edilmektedir. Bazalt lifinde yardımcı elementler doğal olarak bulunduğu sıcaklık stabilitesi oldukça yüksektir ve ekstra yardımcı bir elemente ihtiyacı yoktur [11]. Wei vd. [17] tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda korozyon riskinin yüksek olduğu durumlarda diğer lifler yerine bazalt lifin kullanılabileceği, kimyasal etkilere maruz kalınması durumunda bazalt lif takviyeli kompozitler kullanılarak servis ömrünün uzatılabileceği belirtilmiştir.

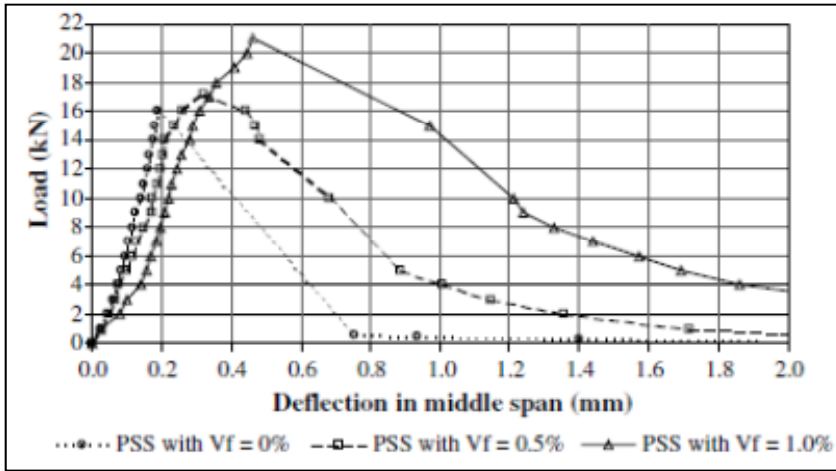
Tüm bu özellikler bazalt lifin düşük maliyetli imalatıyla birleştirildiğinde karbon, lifli beton üretiminde, çelik ve cam liflerine kıyasla daha uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır [18].

3. BAZALT LİFLİ BETONLAR

Bazalt liflerin betonda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Dias ve Thaumaturgo (2005) [19] tarafından yapılan çalışmada %0, %0,5 ve %1 bazalt lif katkılı geopolimer ve normal betonların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bazalt liflerin, hacimce %0,5 oranında kullanıldığında, polimer betonların çekme dayanımlarını %34, hacimce %1 lif kullanımında ise %25 arttırdığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarının ise hacimce %1'e kadar lif kullanıldığında önemli ölçüde değişmediği, ancak bu oranda normal betonlarda basınç dayanımının %26,4 oranında azaldığı görülmüştür. Eğilme dayanımlarında ise %1 lif katkılı normal betonlarda %46 oranında, polimer betonlarda ise %31 oranında bir artış olduğu belirtilmiştir. Aynı çalışmada beton numunelere ait yük-deplasman eğrileri çizilmiş (Şekil 3-4) ve bazalt lif katkı oranı arttıkça betonların tokluklarının önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Lif katkısız numunelerde maksimum yüke ulaşıldıktan sonra habersiz, ani bir kırılma gerçekleşirken, lif katkılı numuneler maksimum yüke ulaştıktan sonra deformasyon yapmaya devam ederek daha sünek bir davranış göstermiştir. Bu davranış polimer betonlarda daha belirgindir.



Şekil 3. Farklı oranlarda bazalt lif katkılı normal betonların (PC) yük-deplasman ilişkisi [19]



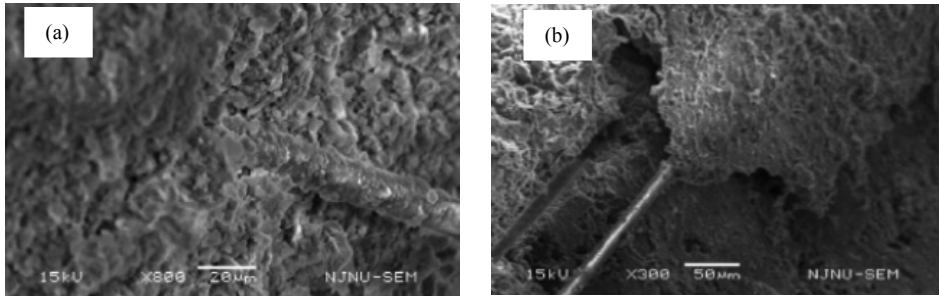
Şekil 4. Farklı oranlarda bazalt lif katkılı polimer betonların (PSS) yük-deplasman ilişkisi [19]

Borhan (2012) [20] tarafından yapılan çalışmada hacimce %0,1, %0,3 ve %0,5 oranlarında bazalt lif katkılı ince agrega olarak cam kırıklarının kullanıldığı betonlar üretilmiş, %0,3'e kadar artan lif hacmiyle birlikte betonun basınç dayanımının arttığı, %0,5 lif katkılı betonlarda ise basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Benzer durum yarmada çekme dayanımları için de geçerlidir. Lif oranı hacimce %0,3'e kadar yarmada çekme dayanımları artarken, bu orandan sonra çekme dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir [21]. Aynı çalışmada bazalt lif katkılı betonun elastisite modülü de yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı ile paralellik göstermiş, %0,3 lif oranına kadar artış, sonrasında azalma görülmüştür.

Bazalt liflerin 2kg/m^3 (hacimce %0,07) ve 4kg/m^3 (hacimce %0,14) miktarlarında kullanıldığı bir diğer çalışmada [8], 350 dozlu betonun basınç dayanımının 0,45 ve 0,60 su/bağlayıcı oranlarında sırası ile %8-18 ve %4-9 oranlarında azaldığı bildirilmiştir. Bunun yanı sıra düşük oranlarda kullanılsa dahi lifsiz betonla kıyaslandığında bazalt liflerin betonun eğilme

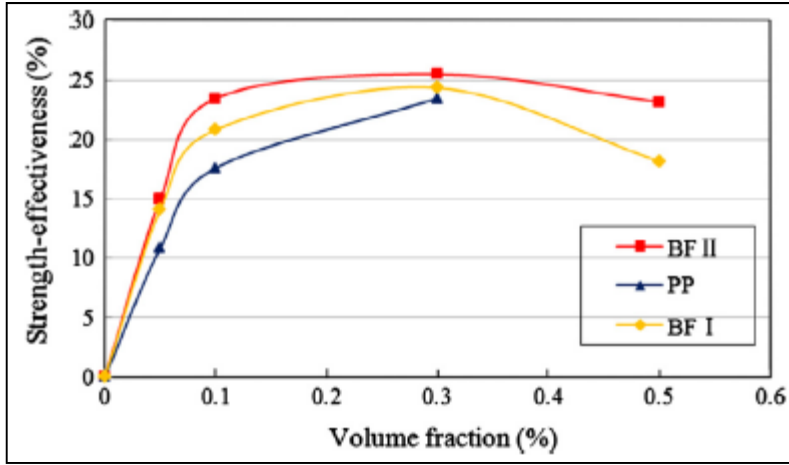
dayanımı ve kırılma enerjisi gibi parametrelerini belirgin bir şekilde arttırdığı, kullanılan lif uzunluğunun da bu parametrelere etki ettiği belirtilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda 24 mm uzunluğunda bazalt lifler betona 4kg/m^3 kadar ilave edildiğinde düşük su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı betonda kırılma enerjisinin %126, yüksek su/çimento oranına sahip normal dayanımlı betonda ise %140 oranında arttığı görülmüştür.

Jiang vd. (2014) [22] tarafından yapılan çalışmada yukarıda verilen örneklerin aksine hacimce %0,5'e kadar kullanılan bazalt lifin normal dayanımlı betonların basınç dayanımlarına olumsuz bir etkisi olmadığı rapor edilmiştir. Hatta bazalt lif ilavesi ile betonların basınç dayanımlarının erken yaşlarda arttığı, bu artışın 7. günde 22 mm uzunluğunda hacimce %0,3 oranında lif kullanılması halinde yaklaşık %10 kadar olduğu tespit edilmiştir. İlerleyen yaşlarda yapılan basınç deneylerinde ise lif katkısız betona göre bazalt lif katkılı betonların basınç dayanımında gösterdiği bu olumlu etkinin nispeten azaldığı, hatta dayanımları olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Bunun nedeni ise, ilerleyen yaşlarda lifler ile beton arayüzündeki aderansın zamanla azalması şeklinde ifade edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. a) 7. günde matris-lif arayüzü b) 28. günde matris-lif arayüzü [22]

Bunun yanı sıra bu çalışmada da bazalt lif kullanımının betonun yarmada çekme dayanımını belirgin bir şekilde arttırdığı belirtilmiştir. Bu artışın polipropilen lif (PP) kullanılan betonlara göre daha fazla olduğu, 12 mm uzunluğunda bazalt lif (BFI) kullanılan betonlarda artan lif oranıyla birlikte yarmada çekme dayanımının yaklaşık %14-24 arasında, 22 mm uzunluğunda bazalt lif (BFII) kullanıldığında ise artan lif oranıyla birlikte yaklaşık %15-25 arasında arttığı tespit edilmiştir (Şekil 6). Eğilme dayanımı sonuçlarına göre de bazalt lifler polipropilen liflere göre daha iyi performans göstermiştir. Mekanik özellikler göz önüne alındığında Jiang vd. (2014) [22] betonda kullanılması gereken optimum bazalt lif oranını %0,3 olarak önermişlerdir. Bu lif hacminin üzerindeki oranlar kullanılması durumunda betonun işlenebilmesi, liflerin beton içerisinde homojen bir şekilde dağılması konularında problem oluşabileceği ve betonun mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki edebileceği belirtilmiştir.



Şekil 6. Yarmada çekme dayanımının lif türü, boyu ve hacim oranına göre değişimi [22]

Ayub vd. (2014) [23] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada hacimce %1, %2 ve %3 oranlarında bazalt lif katkılı yüksek performanslı betonların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre betonun basınç dayanımının %2 oranında bazalt lif ilavesine kadar arttığı, lif oranı %3 olduğunda ise basınç dayanımının, artan lif hacmi betonda boşluk oranının artmasına neden olduğundan, %2,37 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Elastisite modülü artan lif hacmiyle birlikte azalsa da bazalt lif kullanımının betonun elastisite modülüne önemli ölçüde etki etmediği sonucuna varılmıştır. Benzer çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da bazalt liflerin betonun yarmada çekme dayanımını arttırdığı, gerek çekme gerekse basınç kuvvetlerine maruz kalındığında maksimum yük etkisi altındaki şekil değiştirmelerin daha fazla olduğu ve bu durumun betonun daha sünek bir davranış göstermesine olanak sağladığı belirtilmiştir.

Tarafımızca gerçekleştirilen, YTÜ BAP tarafından desteklenen araştırma projesi kapsamında bazalt liflerin betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerine etkileri, lifsiz ve cam lif katkılı betonlar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada 400 dozlu, su/bağlayıcı oranı 0,45 olan yüksek dayanımlı betonlar üretilmiş, bazalt ve cam lifler hacimce %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre lif oranı arttıkça basınç dayanımlarının lif katkısız numunelere göre olumsuz yönde etkilenmediği, ancak elastisite modüllerinin artan lif hacmiyle birlikte yaklaşık %5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Daha önce farklı tipte liflerle yapılan çalışmalarda düşük lif oranlarında elastisite modülünde belirgin bir değişim olmadığı ancak artan lif hacmiyle birlikte işlenebilmenin olumsuz yönde etkilendiği ve elastisite modülünün azaldığı bildirilmiştir [24, 25]. Genel olarak yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjilerinde ise önemli ölçüde iyileşme olduğu görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bazalt lifler, doğal bir kayaç olan bazaltın herhangi bir ilave katkı malzemesi kullanılmadan eritilip inceltilmesi yolu ile üretilen ekonomik, kimyasal etkilere karşı direnci yüksek bir malzemedir. Zararlı çevresel etkilere karşı gösterdiği direnç ve korozyona uğramaması, diğer liflerle kıyaslandığında bazalt lifleri ön plana çıkaran en önemli özelliğidir. Beton içerisinde kullanıldığında betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımı ile tokluğunu önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu artış bazalt lifin hacimce %0,3-0,5 aralığında kullanılması halinde kendini

daha belirgin bir şekilde göstermektedir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda bazalt lifin betonun mekanik özelliklerine etkileri araştırılmış olup dayanıklılık (durabilite) ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Oysa bazalt lifin beton içerisinde kullanımı özellikle kimyasal etkilere karşı gösterdiği direnç yönünden ön planda tutulmalıdır. Bundan dolayı bazalt lif kullanımının betonun durabilitesine ne ölçüde etki ettiği konusunda çalışmalara ihtiyaç vardır.

Acknowledgments / Teşekkür

Bu araştırma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: 2014-01-05-KAP01.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] T.Y. Erdoğan. *Beton*. METU Press, Ankara, 2003.
- [2] U. Ersoy. *Betonarme –Temel ilkeler ve Taşıma Gücü*. Bizim Büro Basımevi, Ankara, 1985.
- [3] B. Baradan, H. Yazıcı, S. Aydın. *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, İzmir, 2012.
- [4] H.Y. Ersoy. *Kompozit Malzemeler*, Literatür Yayınları, İstanbul, 2005.
- [5] J. Newman, B.S. Choo. *Advanced Concrete Technology Processes*, İngiltere, 2003.
- [6] F. Çivici. Çelik lif donatılı betonun eğilme tokluğu. *Pamukkale J Eng Sci*, 12(2), 183-188, 2006.
- [7] M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta. Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cem Concr Res*, 30:593–597, 2000.
- [8] N. Kabay. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, 50:95-101, 2014.
- [9] G.H. Hong, Y.S. Shin. Structural performance evaluation of reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets. *J Korean Conc Inst*, 15(1):78–86, 2003.
- [10] M. Ludovico, A. Prota, G. Manfredi. Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction ASCE*, September/October, 2010.
- [11] V.B. Brik, V. Ramakrishnan, N. Tolmare. Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete. *Idea Program Final Report*, Contract No. NCHRP-45, November, 1998.
- [12] J. Sim, C. Park, D.Y. Moon. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36:504-512, 2005.
- [13] J. Militky, V. Kovacic, J. Rubnerova. Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 69:1025-1033, 2002.
- [14] T. Förster, R. Plonka, C. Scheffler, E. Mäder. Challenges for fibre and interphase design of basalt fibre reinforced concrete. *International RILEM Conference on Material Science*, Aachen, 2010.
- [15] Y.T. Lee, J.H. Lee, H.S. Hwang, Y.D. Kim. Performance of concrete structures retrofitted with fiber reinforced polymers. *Mag Korean Conc Inst*, 14(4):89–96, 2002.
- [16] V.B. Brik. Advanced concept concrete using basalt fiber/BF composite rebar reinforcement, Final Report for Highway-IDEA Project 86, 2003.
- [17] B. Weib, H. Caoa, S. Songb. Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering A*, 527:4708-4715, 2010.
- [18] S. Deb. The Impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar. *Composite Materials*, 286-290, July, 2012.
- [19] P.D. Dias, C. Thaumaturgo. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites*, 27:49-54, 2005.
- [20] M.T. Borhan. Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials and Design*, 42:265-271, 2012.

- [21] M.T. Borhan. Thermal and mechanical properties of basalt fibre reinforced concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 76:313-316, 2013.
- [22] C. Jiang, K. Fan, F. Wu, D. Chen. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials and Design*, 58:187-193, 2014.
- [23] T. Ayub, N. Shafiq, M.F. Nuruddin. Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*, 77:131-139, 2014.
- [24] A. Noushini, B. Samali, K. Vessalas. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 49:374-383, 2013.
- [25] V. Corinaldesi, G. Moriconi. Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions. *Cement and Concrete Composites*, 33(5):596-601, 2013.