



**FARKLI GÖRÜNÜM ORANLI BAZALT
LİFLERLE ÜRETİLEN YÜKSEK DAYANIMLI
BETONUN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Hasan OKTAN

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
2021
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**FARKLI GÖRÜNÜM ORANLI BAZALT LİFLERLE ÜRETİLEN YÜKSEK
DAYANIMLI BETONUN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

(Investigation of the Performance Characteristics of High Strength Concrete Produced with
Basalt Fibers with Different Appearance Ratio)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan OKTAN

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Erzurum
Haziran, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Hasan OKTAN tarafından hazırlanan “Farklı Görünüm Oranlı Bazalt Liflerle Üretilen Yüksek Dayanımlı Betonun Performans Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışması 18/06/2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL
Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Doç. Dt. Meral OLTULU
Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN
Bayburt Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
....../....../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Meral OLTULU danışmanlığında sunulan “Farklı Görünüm Oranlı Bazalt Liflerle Üretilen Yüksek Dayanımlı Betonun Performans Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Bulgular	0	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	3	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hasan OKTAN	Doç. Dr. Meral OLTULU
14.7.2021	14.7.2021
Aslı ıslak imzalıdır	Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin her aşamasında bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendirerek yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Meral OLTULU' ya,

Çalışmama katkıda bulunan tez komitesi üyeleri Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e ve Dr. Öğr. Üyesi Ömer CAN'a,

Çalışmamın gerçekleşmesi için gerekli imkânları sağlayan Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne, Ankara TSE Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'na,

Malzeme temininde sağladıkları kolaylıklar için Erçimsan Beton'a, Chryso yapı kimyasalları firmasına,

Çalışmalarına destek ve önerileri ile katkı sağlayan değerli arkadaşım İbrahim ALAMERİ'ye,

Beni yetiştiren ve bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anneme ve babama, desteklerini esirgemeyen kardeşlerime şükranlarımı sunarım.

Hasan OKTAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI GÖRÜNÜM ORANLI BAZALT LİFLERLE ÜRETİLEN YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hasan OKTAN

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Amaç: Bu çalışmada, geleneksel betona farklı görünüm oranlarında (160, 630 ve 1263) bazalt lifler ilave edilerek betonun mekanik, fiziksel ve performans özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Liflerin görünüm oranları parametre olarak seçilmiş başta taze ve sertleşmiş beton deneyleri olmak üzere basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve aşınma dayanımı gibi betonun özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Kırılma enerjilerinin belirlenmesinde RILEM 50-FMC tarafından önerilen deney yöntemi, aşınmaya karşı dirençlerinin ölçülmesinde TS 2824 EN 1338’de belirtilen Böhme deneyi uygulanmıştır. Deneyler hacimce %0-0,025-0,05-0,10-0,15-0,20 oranlarında ve 3 mm - 12 mm - 24 mm uzunluklarında bazalt lifler kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı beton numuneler üzerinde yapılmıştır.

Bulgular: Bazalt liflerin çimento hamurunda homojen dağılmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Deney sonuçlarına göre liflerin betona ilavesi ile beton numunelerin aşınma dayanımının %1 ile %14 arasında, eğilme dayanımının %2 ile %25 arasında, yarmada çekme dayanımının %2 ile %13 arasında arttığı gözlenmiştir. Tüm gruplar arasında BF3/0,025 kodlu numunede en iyi aşınma direnci sonucu elde edilirken, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarında BF24/0,05 kodlu numunede en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç: Çalışmada genel olarak betona ilave edilen farklı görünüm oranlarında bazalt lifler betonun birim ağırlığının ve basınç dayanımının azalmasına sebep olmuştur. Bunun yanında liflerin ilavesi betonun yarmada çekme, eğilmede çekme, kırılma enerjisi ve aşınma direncine olumlu yönde katkıda bulunduğu görülmektedir. Betonlarda, bazalt lif kullanımının, betonun mekanik ve performans özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt lif, lif takviyeli yüksek dayanımlı beton, çentikli kırış, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi, aşınma dayanımı

Haziran 2021, 106 sayfa

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HIGH STRENGTH CONCRETE PRODUCED WITH BASALT FIBERS WITH DIFFERENT APPEARANCE RATIO

Hasan OKTAN

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Meral OLTULU

Purpose: In this study, it is aimed to improve the mechanical, physical and performance properties of concrete by adding basalt fibers in different aspect ratios (160, 630 and 1263) to conventional concrete.

Method: The appearance ratios of the fibers were selected as a parameter, and the effects on the properties of concrete such as compression, tensile splitting, flexural strength, fracture energy and abrasion resistance were investigated, especially in fresh and hardened concrete tests. The test method recommended by RILEM 50-FMC for determining the fracture energies, Böhme test specified in TS 2824 EN 1338 was applied to measure their resistance to abrasion. The experiments were carried out on high strength concrete specimens produced using basalt fibers in the ratio of 0-0.025-0.05-0.10-0.15-0.20% by volume and 3 mm – 12 mm - 24 mm lengths.

Findings: It is thought that it is important that the basalt fibers are homogeneously distributed in the cement paste. According to the test results, it was observed that the abrasion resistance of the concrete samples increased between 1% and 14%, the bending strength between 2% and 25%, and the split tensile strength between 2% and 13% with the addition of fibers to the concrete. Among all groups, the best results were obtained in the sample coded BF3/0,025 in abrasion resistance, while the best results were obtained in the sample coded BF24/0,05 in bending and splitting tensile strength.

Results: In the study, basalt fibers with different aspect ratios added to the concrete in general caused a decrease in the unit weight and compressive strength of the concrete. In addition, it is seen that it contributes positively to tensile in splitting, tensile in bending, fracture energy and abrasion resistance. It has been determined that the use of basalt fiber in concretes improves the mechanical and performance properties of concrete.

Keywords: Basalt fiber, Fiber reinforced high strength concrete, notched beam, bending strength, fracture energy, abrasion resistance

June 2021, 106 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Beton	3
Yüksek Dayanımlı Beton	4
Yüksek dayanımlı betonların özelliklerini etkileyen faktörler.....	4
Lifli Beton	8
Matris özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi	9
Lif özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi.....	10
Lifli betonların mekanik özellikleri	20
Lifsiz betonda çatlak gelişimi	22
Lifli betonda çimento hamuru ile lifler arasındaki etkileşim	24
Lifli betonların performans özellikleri	27
Kaynak Özetleri	29
MATERYAL VE METOT	45
Materyal	45
Çimento	45
Agrega	46
Karışım suyu	46
Bazalt lif	46
Süper akışkanlaştırıcı katkı	47
Metot	47
Deneysel çalışma.....	47
Agrega deneyleri	47
Yoğunluk, su emme, yüzey nemi deneyi	48

Agrega karışım oranları ve granülometrileri.....	48
Beton karışım hesapları.....	49
Parametreler, Seviyeleri ve Kodlama.....	49
Numunelerin üretimi	50
Taze beton deneyi	51
Sertleşmiş beton deneyleri	52
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	58
Taze Beton Deneyi.....	58
Birim ağırlık deney sonuçları ve değerlendirilmesi	58
Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	60
Basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirilmesi	60
Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları ve değerlendirilmesi.....	62
Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	64
Aşınma dayanımı deney sonuçları ve değerlendirilmesi	71
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR.....	76
EKLER	85
EK 1. Üç Noktalı Eğilme Deneyinden Elde Edilen Yük- Sehim Eğrileri	85
ÖZGEÇMİŞ.....	93

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society For Testing and Materials
BET	: Yüzey Alanı Analizi
BF	: Basalt Fiber
C ₂ S	: Dikalsiyum Silikat
C ₃ A	: Trikalsiyum Alüminat
C ₃ S	: Trikalsiyum Silikat
C ₄ AF	: Tetrakalsiyum Alüminoferrit
CH	: Ca(OH) ₂
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
DKY	: Doygun Kuru Yüzey
GKA	: Geri Kazanılmış Agrega
GPa	: Gigapaskal
LVDT	: Linear Variable Displacement Transducer
MIP	: Civalı Porozimetre
MPa	: Megapaskal
PÇ	: Portland Çimento
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
SiO ₂	: Silika
TDK	: Türk Dil Kurumu
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X Işını Kırınımı
Δm	: Kütle Kaybı
ΔV	: Hacim Kaybı
P _r	: Numunenin Yoğunluğu
μm	: Mikrometre
%	: Yüzde

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Geleneksel Beton ve Ultra Yüksek Dayanımlı Beton Özellikleri	7
Tablo 2. Betonda Kullanılan Bazı Liflerin Tipik Özellikleri.....	11
Tablo 3. Bazı Cam Liflerin Yaklaşık Kimyasal Bileşimleri.....	12
Tablo 4. Bazalt Kayanın Kimyasal Bileşenleri.....	16
Tablo 5. Çimentonun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	45
Tablo 6. Liflerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	46
Tablo 7. Agregaların Tane Yoğunlukları, Su Emme ve Yüzey Nemi Oranları.....	48
Tablo 8. Karışım Hesapları	49
Tablo 9. Karışımları Oluşturan Parametreler ve Seviyeleri.....	50
Tablo 10. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Birim Ağırlık Değerleri	58
Tablo 11. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Basınç Dayanımı Değerleri	60
Tablo 12. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri	62
Tablo 13. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Eğilme Dayanımı Değerleri....	64
Tablo 14. 3 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri	66
Tablo 15. 3 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Sehim Değerleri.....	66
Tablo 16. 12 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri	67
Tablo 17. 12 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Sehim Değerleri.....	67
Tablo 18. 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri	68
Tablo 19. 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Sehim Değerleri.....	68
Tablo 20. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri ...	70
Tablo 21. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Aşınma Kaybı Değerleri.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Portland çimentosundaki anabileşenler.....	5
Şekil 2. Basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi ile betonun zaman içindeki gelişmesi	7
Şekil 3. Betonda kullanılan çelik liflerin tipleri	13
Şekil 4. Bazalt liflerin üretim şeması	16
Şekil 5. Kompozit gerilme – şekil değiştirme eğrisi	18
Şekil 6. Çatlak köprülemesinde farklı lif boyutlarının etkisi	19
Şekil 7. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi	20
Şekil 8. Lifli betonun yük deformasyon eğrisi	21
Şekil 9. Betonun gerilme - şekil değiştirme eğrisi	22
Şekil 10. Normal dayanımlı betonda çatlama deseni	23
Şekil 11. Betonda çatlak ilerleme mekanizması.....	24
Şekil 12. Düşük elastisite modüllü bir matriste gömülü yüksek modüllü bir lif: (a) yüklemeden önce, (b) yüklemeden sonra	25
Şekil 13. Çatlamamış çimento hamuru ile lif ilişkisi	26
Şekil 14. Lif/Çimento hamuru enerji yutma mekanizması.....	26
Şekil 15. Abrasif aşınma	28
Şekil 16. Erozyon aşınması	29
Şekil 17. Agregat	46
Şekil 18. Bazalt lif görünüşü	47
Şekil 19. Granülometri eğrisi	48
Şekil 20. Beton karışımının betoniyerde karıştırıldıktan sonraki görünümü	51
Şekil 21. Basınç dayanımına maruz kalmış küp numune.....	52
Şekil 22. Yarmada çekme dayanımına maruz kalmış silindir numune	53
Şekil 23. Prizmatik numunelere mermer testeresi ile çentik açılması.....	53
Şekil 24. Eğilme dayanımı deney düzeneği	54
Şekil 25. Eğilme dayanımı deney düzeneği	54
Şekil 26. Aşınma direnci deney düzeneği	56
Şekil 27. Aşınma direnci deney numunesi	56
Şekil 28. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların birim ağırlık değerleri	59
Şekil 29. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların basınç dayanımı değerleri.....	61
Şekil 30. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların yarmada çekme dayanımı değerleri	63
Şekil 31. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların eğilme dayanımı değerleri	65

Şekil 32. 3 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonlara ait yük-sehim eğrileri.....	66
Şekil 33. 12 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonlara ait yük-sehim eğrileri.....	68
Şekil 34. 24 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonlara ait yük-sehim eğrileri.....	69
Şekil 35. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların aşınma kaybı değerleri.....	72



GİRİŞ

İnsanoğlu geçmişten günümüze doğadaki malzemeleri barınma ihtiyaçları için kullanmaya çalışmış, ilk başlarda ağaçtan barınaklar yapmışlardır. Sonraları dayanımı daha iyi olan taş barınma yapılarının malzemesi olarak kullanmışlardır (Görkem 2009).

Barınma ihtiyaçlarında taş kullanılmasına rağmen çoğu durumda uygulamalar sınırlı kalmıştır. Belirli açıklıkların geçilmesi gerektiğinde tek parça taşlar kiriş olarak kullanılmıştır. Taşın çekme dayanımının düşük olmasından dolayı geçilebilen açıklıklar sınırlı olmuştur. Daha büyük açıklıkları geçebilme arzusu insanoğlunu yeni yapı sistemlerine yöneltmiştir. Bunun sonucu olarak bütün sistemin basınca çalıştığı kemer sistemler geliştirilmiştir. Çimento ve kireç gibi bağlayıcıların bulunması sonucunda daha farklı uygulamalarla yapılar yapılabilmektedir.

18. yüzyılda John Smeaton yapımı devam eden Eddystone fenerinde kil ve kireçtaşı karışımından ürettiği bağlayıcıyı çimentoyu kullanmıştır. Günümüzde kullandığımız çimento ise John Aspdin isimli duvar ustası tarafından üretilmiştir. Patent alınırken Portland'daki taşlara benzerliğinden dolayı 'Portland Çimentosu' olarak adlandırılmıştır. 19. yüzyılda birçok ülkede kullanılmaya başlanmıştır (Ersoy ve Özcebe 2012).

Sahip olduğu teknik özellikleri, uygulamasının kolay olması, insan ve canlıların sağlığını tehdit etmemesi gibi nedenlerle neredeyse tüm alt yapı, ulaştırma ve barınma tesislerinin inşasında beton malzeme en yaygın kullanılan yapı malzemesi olmuştur (Yazıcı ve Sezer 2008).

Betonun en önemli avantajı yüksek basınç dayanımıdır. Bununla birlikte, beton malzemelerinde çatlak önleme performansının, tokluğun ve gerilme mukavemetinin düşük olması gibi kusurları da vardır. Beton yapının yük etkisi altında bozulması sırasında harcanan enerji çok sınırlıdır ve farklı boyutlarda çok sayıda çatlak meydana gelmektedir. Çok sayıda çatlağın mevcut olması, beton yapıların mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerinde büyük olumsuz etkiye sahiptir ve bu da yapıların hizmet ömrünün kısılmasına neden olmaktadır (Zhang et al. 2018). Çimento esaslı malzemelere lif takviye edilerek hem mekanik özellikleri hem de dayanıklılık özellikleri iyileştirilebilmektedir (Banthia et al. 2014).

Kırılgan matris malzemelerinde liflerin kullanımı en az 3500 yıl öncesine dayanan eski bir geçmişe sahiptir. Bağdat yakınlarındaki 57 m yüksekliğindeki Aqar Quf tepesini inşa etmek için samanla güçlendirilmiş güneşte pişmiş tuğlalar kullanılmıştır. Daha yakın zamanlarda, çimento ürünlerini güçlendirmek için asbest lifleri yaklaşık 100 yıldır, selüloz lifleri en az 50 yıldır ve son 30 yıldır aynı amaçla çelik, polipropilen ve cam lifleri kullanılmaktadır. Modern

mühendisin, lifleri dâhil ederek betonun özelliklerini değiştirme girişimindeki ana hedefleri şunlardır (Hannant 2003):

- (a) Taze halde veya dökümden sonra yaklaşık 6 saate kadar malzemenin reolojisini veya plastik çatlama özelliklerini iyileştirmek.
- (b) Çekme veya eğilme mukavemetini iyileştirmek.
- (c) Darbe mukavemetini ve tokluğunu geliştirmek.
- (d) Çatlama sonrası süneklik yoluyla çatlama ve kırılma modunu kontrol etmek.
- (e) Dayanıklılığı artırmak.

Tüm bu bilgiler ışığında bu araştırmanın amacı, temel parametrelerin; lif hacim oranı ve uzunluğunun, sade betona kıyasla bazalt lif takviyeli yüksek dayanımlı betonun mekanik davranışı üzerindeki etkisini incelemektir. Çalışma, sade betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilecek makul bazalt lif uzunluğunu ve içeriğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla bazalt lif takviyeli betonun basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve aşınma direnci gibi temel özellikleri değerlendirilerek analiz edilmiştir.

Tez beş bölüm halinde düzenlenmiştir. Tez bölümleri ve içerikleri aşağıda verilmiştir:

- **Giriş bölümü:** Tez konusu ile ilgili genel kuramsal bilginin ve bu çalışmanın amaçlarının tanıtılması,
- **Kuramsal temeller bölümü:** Kompozit malzemelerde lif ve matris malzemelerin özellikleri ve kompozit malzemeye etkileri, lifli ve liffsiz betonlarda çatlak gelişim süreci anlatımı, konu ile ilgili yapılan çalışmaların verilmesi,
- **Materyal ve metot bölümü:** Çalışmada yararlanılan malzemeler, fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri, yapılan analiz ve deney yöntemlerinin tanıtımı, bazalt liflerin çimento kompozitlerinde kullanımı ile ilgili çalışmaların verilmesi,
- **Bulgular ve tartışma bölümü:** Bazalt lifli çimento esaslı kompozitlerin dayanım ve performans özelliklerinin araştırılması, analiz yöntemleri ile birlikte sonuçların açıklanması,
- **Sonuçlar ve öneriler bölümü:** Yapılan deney sonuçlarına ilişkin açıklamalar ve ileride yapılacak çalışmalar için bazı öneriler getirilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Beton

Çimentolu kompozitlerin en önemlisi olan beton; çimentonun, kum, çakıl ve su ile homojen olarak karıştırılması sonucunda elde edilir. Gerekli durumlarda betona kimyasal ve mineral katkı malzemeleri de eklenebilir (Doğangün 2012).

Malzemeler belli oranlarda karıştırıldığında, istenilen kalıbın şeklini alabilen plastik kıvamlı malzeme elde edilmektedir. Beton malzemesini diğer yapı malzemelerinden ayıran önemli özelliklerden bir tanesi de budur. Beton karıştırılıp kalıplara döküldükten bir süre sonra sertleşir ve dayanım kazanır (Ersoy ve Özcebe 2012).

Çıplak göz ile incelendiğinde (makro inceleme) iki ayrı faz hemen dikkat çeker. Bunlar agrega fazı ile agrega tanelerinin içinde bulunduğu çimento hamuru fazıdır (Baradan vd. 2010). Çimento ve suyun birlikte oluşturduğu malzemeye “çimento hamuru” denilmektedir. Betonun oluşturulması aşamasında çimento hamuru, agrega yüzeylerini kaplayarak ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak bağlayıcılık sağlar. Bu açıdan beton, “agrega ve çimento hamuru fazından oluşan kompozit malzeme” olarak tanımlanabilir (Erdoğan 2010). Mikroskobik boyutta incelendiğinde ise agrega-çimento hamuru ara yüzeyi olarak üçüncü bir fazın varlığı göze çarpar (Baradan vd. 2010).

Beton malzemesinde aranan temel özellikler dayanım ve dayanıklılıktır (Baradan vd. 2012). Malzemenin kırılmadan alabileceği en yüksek gerilme değerine dayanım denir (Mehta and Monteiro 2006). Dayanım, bir mühendisin yeni bir malzemeyi incelerken araştırdığı ilk parametreler arasındadır. Bütün malzemelerde olduğu gibi betonun dayanımı da büyük ölçüde malzeme içindeki kusurlardan, noksanlıklardan, bir miktar da ana bileşenlerden etkilenir (Thomas 2018). Betonlar dayanımlara göre, düşük (20 MPa ve az), normal (20-40 MPa) ve yüksek (40 MPa ve fazla) dayanımlı betonlar olarak sınıflandırılırlar (Mehta and Monteiro 2006). Dayanıklılık ise, hava koşullarına, kimyasal saldırıya, aşınmaya veya diğer herhangi bir bozulma sürecine direnme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Anonymous 2016). Dayanıklı bir beton, amaçlanan hizmet ortamına maruz kaldığında orijinal şeklini, kalitesini ve hizmet verilebilirliğini korumaktadır (Mehta and Monteiro 2006).

Zamanla, farklı özelliklere sahip katkı malzemeleri yardımı ile kullanım amacına uygun beton tasarımları geliştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda yüksek dayanımlı/performanslı beton,

hafif beton, ağır beton, prepakt beton, su altında dökülebilen beton, kendiliğinden yerleşen beton ve lifli betonlar üretilmiştir (Kızılkıran vd. 2014).

Yüksek Dayanımlı Beton

Beton teknolojisindeki ilerlemelerle yüksek mukavemetli betonların üretimi kolaylaştıkça yüksek dayanımlı beton tanımı değişmiştir. Bu nedenle, günün şartlarında yüksek mukavemet olarak kabul edilen değer bir müddet sonra normal mukavemet olarak kabul görmektedir. 1920'lerde, 21 MPa'nın üzerindeki herhangi bir şey yüksek mukavemetli beton olarak kabul edilirken, 1950'lerde, 35 MPa yüksek mukavemeti temsil ediyordu. 1970'lerin sonlarında, 40 MPa beton yüksek mukavemet olarak görüldü ve son zamanlarda 60 MPa yüksek mukavemetli betonlar için alt sınır olarak kabul edildi. Beton mukavemetinin bu derece yüksek değere ulaşmasında mineral katkıların kullanılmasıyla birlikte süperakışkanlaştırıcıların gelişmesi etkili olmuştur (Mindess et al. 2003). Süperakışkanlaştırıcılar 1960'ların sonlarında, sırasıyla Japonya ve Almanya'da geliştirilmiştir. Bu sayede hem yüksek mukavemet hem de yüksek işlenebilirliğe sahip betonlar üretmek mümkün hale gelmiştir (Mehta and Monteiro 2006).

Yüksek dayanımlı betonların özelliklerini etkileyen faktörler

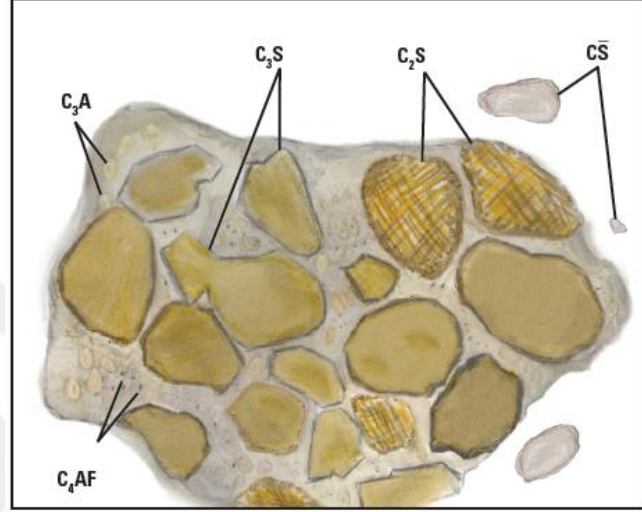
Agrega

Yüksek dayanımlı betonun hacim kararlılığında ve dayanımında agrega önemli rol oynar. Bir beton karışımının mukavemeti, iri agreganın maksimum boyutunu basitçe azaltarak önemli ölçüde arttırılabilir. 70 MPa'ya kadar basınç dayanımlı beton, maksimum 20 ila 25 mm boyutunda iyi kalitede iri agrega ile üretilebilir. 100 MPa basınç dayanımı elde etmek için maksimum 14 ila 20 mm boyutunda agregalar kullanılmalıdır. 125 MPa'nın üzerinde basınç dayanımlarına sahip betonlar, 10 ila 14 mm maksimum boyutta iri agrega ile üretilirler (Mehta and Monteiro 2006). Arzu edilen mekanik ve fiziksel özelliklere ek olarak, yüksek mukavemetli betonda kullanılan agregalar, betonun maruz kalacağı potansiyel donma ve çözülme sorunlarına dayanmalı ve olası herhangi bir kimyasal saldırıya karşı mümkün olduğunca dayanıklı olmalıdır. Çünkü yüksek mukavemetli beton, daha yüksek mukavemetinden ziyade daha yüksek dayanıklılığı nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır (Mindess et al. 2003).

Çimento

Çimento, hidrasyon sonucunda bağlayıcılık özelliği kazanan, ince toz haline getirilmiş bir malzemedir (Erdoğan 2010). Çimento özelliklerinin dayanım üzerine etkisi, büyük ölçüde hidrasyon olayının hızlı veya yavaş seyretmesiyle ilişkilidir. Hidrasyon hızını etkileyen

başlıca iki özellik çimentonun inceliği ve karma oksit bileşenlerinin miktarıdır. İnceliğin artması çimentonun dayanım kazanmasını hızlandırarak erken yaş dayanımında önemli artışlar sağlar. Karma oksitlerin hidratasyon hızları birbirlerinden farklıdır. Örneğin; C_3A ve C_3S bileşenleri su ile hızlı reaksiyon yaparlar. Portland çimentosunda C_3S miktarının fazla olması belli bir sürede çimentonun fazla miktarda hidratasyon yapmasına ve dolayısıyla dayanımın büyük değerler almasına yol açar (Baradan 2012). Portland Çimentosundaki karma oksit bileşenler Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Portland çimentosundaki anabileşenler (Taylor et al. 2019)

Kimyasal bileşimin dayanım üzerine diğer bir etkiye şekli Şekil 1’de gösterilen karma oksitlerin hidratasyon sonunda meydana getirdikleri cisimlerin farklı içyapıya sahip olmalarından ve bunların miktarlarının birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumu C_3A ’nın hidratasyonu sonunda oluşan hidrate elemanın, C_3S ’nin hidratasyonu sonunda oluşan hidrate ürününden daha fazla boşluk içermesi ve dayanımının daha düşük olmasıyla açıklayabiliriz. Böylece hidratasyon hızının çok yüksek olmasından dolayı C_3A başlangıçta dayanımı yüksek olan ürünler verir. Ancak hidrate ürünlerinin dayanımı C_3S ’nin hidrate ürünlerinin dayanımından daha çok küçük değerler almaya başlar. Diğer taraftan C_2S ’in hidratasyonu, C_3S ’in hidratasyonuna göre daha yavaş ilerlemesine rağmen, C_2S ’de daha az serbest kireç meydana gelmesinden kaynaklı ilerleyen yaşlardaki dayanım değeri C_3S ’in dayanımından daha büyük olmaktadır (Baradan 2012).

Mineral katkılar

Çimentonun su ile yaptığı reaksiyon hidratasyon olarak adlandırılır. Hidratasyon ürünleri arasında Kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) ana fazdır. Bu ürünün yanında kalsiyum hidroksit ve kılcal gözeneklerde oluşur. Oluşan bu ürünler mikro yapısal homojensizliklere yol açarak mukavemeti olumsuz yönde etkilerler. Mukavemeti sınırlayan bu ürünlere karşı alınacak

etkili bir yöntem puzolanik bir malzemenin kullanılmasıdır. Puzolanik katkıların bileşim ve özellik bakımından C-S-H'a benzer bir reaksiyon ürünü oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerler. Bu reaksiyon ilk olarak kapiller gözeneklerin toplam hacminde ve boyutunda bir azalma sağlar. Bu durum mukavemetin artırılması için önemli bir etkidir. Beton üretimi için kullanılacak olan portland çimentosunun bir kısmı puzolan ile değiştirildiğinde maliyetin düşmesine, homojen bir ürün elde edilmesine ve daha az hidratasyon ısısı nedeniyle daha düşük sıcaklık artışı gibi faydalar elde edilebilmektedir. Bu sayede yüksek dayanımlı beton karışımlarında yüksek çimento içeriği nedeniyle görülen termal çatlama riski de azaltılabilmektedir (Mehta and Monteiro 2006).

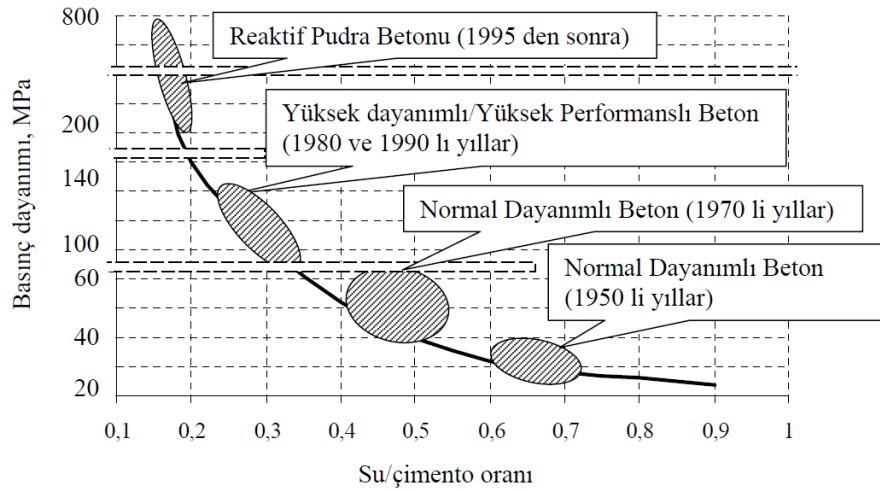
Kimyasal katkıları (Süper akışkanlaştırıcılar)

Yüksek mukavemetli betonda büyük miktardaki çimentolu malzemenin daha verimli kullanılmasını sağlamak ve en düşük su/çimento malzemesi oranını elde edebilmek için su azaltıcı kimyasal katkıların kullanılması gerekir (Kosmatka et al. 2002). Süperakışkanlaştırıcı katkıların ana avantajları betonun mukavemetini azaltmadan işlenebilirliği artırması ve daha az su ve çimento kullanılarak yüksek dayanımlı beton üretimini kolaylaştırmasıdır (Tunç 2019).

Su/çimento oranı

Yüksek dayanıma sahip bir beton üretebilmek için belirli bir çimento içeriği ile beraber düşük su/çimento içeriği gerekir (Mindess et al. 2003). Bu oranın miktarı yüksek dayanımlı betonun dayanımını etkiler. Fazla miktarda ilave edilen su buharlaşarak betondan ayrılır. Bu durum beton içerisinde boşluk oluşmasına ve dayanımın azalmasına sebep olur. Suyun miktarının fazla olması betonun dayanımını olumsuz etkilerken, az olması da çimentonun hidratasyonunun eksik kalmasına, betonun işlenebilirliğinin düşük olmasına neden olur (Oltulu 2004).

1980'li yıllarda itibaren kimyasal ve mineral katkı maddelerinin beton üretiminde birlikte kullanılması ile su/çimento oranı azaltılabilmektedir. Bu vesileyle dayanımda çok yüksek artışlar sağlanabilmektedir. Su/çimento ile dayanım arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 2'de verilmiştir (Taşdemir vd. 2003).



Şekil 2. Basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi ile betonun zaman içindeki gelişmesi (Taşdemir vd. 2003)

Şekilden de görülebildiği gibi su/çimento oranının azaltılabilmesi ile birlikte normal dayanımlı betondan yüksek dayanımlı betona ve reaktif pudra betonuna geçiş sağlanabilmektedir.

Zaman içerisinde yüksek dayanımlı beton daha da geliştirilerek ultra yüksek dayanımlı betonlar üretilebilmiştir. ACI Komitesi 239, Ultra yüksek dayanımlı betonları, basınç dayanımları 150 MPa ulaşan beton olarak tanımlanmaktadır (Anonymous 2012). Bu beton türünün arayüzey geçiş bölgesi, geleneksel betona göre, son derece yoğun, daha az gözenekli ve oldukça kompaktır. Geleneksel beton ile ultra yüksek dayanımlı betonun özelliklerini karşılaştıran Tablo aşağıda verilmiştir (Mishra and Singh 2019).

Tablo 1. Geleneksel Beton ve Ultra Yüksek Dayanımlı Beton Özellikleri

Özellikleri	Geleneksel Beton	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
Basınç Dayanımı	15-40 MPa	≥ 150 MPa
Çekme Dayanımı	~5 MPa'a Kadar	~15 MPa'a Kadar
Eğilme Dayanımı	~6 MPa'a Kadar	~40 MPa'a Kadar
Darbe Dayanımı	Zayıf	Çok Güçlü
Aşınma Direnci	Zayıf	Çok Güçlü

Yüksek performanslı beton, sağlamlığı, dayanıklılığı ve yüksek elastisite modülü nedeniyle öncelikle tünellerde, köprülerde ve yüksek binalarda kullanılmaktadır. Çeşitli uygulamalar ve ortamlar için yüksek performanslı betonlar geliştirilmiştir. Uzun ömür, erken dayanım, zorlu çevre şartlarına dayanıklılık, düşük geçirgenlik, aşınmaya, kimyasal saldırılara ve donmaya karşı direnç yüksek dayanımlı betonu avantajlı yapmaktadır (Kosmatka et al. 2002).

Tüm bu avantajlarına rağmen, çok düşük gerilme mukavemetine ve kırılma tokluğuna sahip olan beton doğası gereği kırılgandır. Bu nedenle çatlakların başlamasını ve yayılmasını önlemek ve kontrol etmek için betona lifler eklenerek lifli betonlar geliştirilmiştir. Lifler, ultra yüksek dayanımlı betonun kırılgan yapısını azaltmak ve mekanik özelliklerini artırmak için takviye olarak kullanılır. Eklenen lifler, beton matrisi içinde çatlak oluşumuna ve yayılmasına karşı daha iyi bir direnç sağlar. Kısaca bu malzemenin çok güçlü darbe dayanımı ve tokluk özelliğinin arkasındaki ana sebep liflerdir (Mishra and Singh 2019).

Lifli Beton

1960'lı yılların sonlarından itibaren çeşitli yöntemlerle, farklı miktarlarda taze betona takviye edilen, belli bir narinlik oranına sahip, farklı tiplerde ve geometrilerde süreksiz liflerin ilavesiyle üretilen lifli betonlar günümüze kadar gelişmiştir (Mindess at al. 2003).

Lifli betonlara gereksinim duyulmasının nedeni, geleneksel betonun kullanımı sırasında ortaya çıkan zayıf yönlerin iyileştirilmek istenmesidir. Lif takviyesiyle birlikte betonun sünekliliği, tokluğu, çekme ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerin artırılması hedeflenmektedir (Sekban 2007).

Çekme dayanımı, çatlak ve yapı ile alakalı incelemelerin yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir (Çetin ve İnce 2017). Betonun basınç dayanımı oldukça iyi olmasına karşın çekme dayanımı oldukça düşüktür (Çivici ve Eren 2004). Özellikle dinamik yükler çekme dayanımı düşük betonda kılcal çatlakların oluşumuna ve kolaylıkla yayılmasına neden olur (Taşdemir vd. 2013). Beton yüzeyinde oluşan bu kılcal çatlaklar uzun yıllar bir kader olarak görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda betonun çatlama mekanizması tespit edilmiş ve çözüm eski bir uygulamada bulunmuştur (Beaudoin 1990).

Eski zamanlarda yaşamış mühendisler ve mimarlar yapılarında hayvan kılı ve saman gibi doğal lifler kullanmışlardır. Böylece zamanın tahrip edici etkilerine karşı yapılarını korumaya çalışmışlardır. Ülkemizde var olan en eski uygulama Troia ören yerinin kazısı sırasında rastlanmıştır. O dönemde yaşayan insanlar yığma duvar üzerine yaptıkları sıvalarda keçi kılı ve saman çöpü kullanarak mikro donatı tekniğinin ilk örneklerini vermişlerdir (Erbaş 2003). Benzer şekilde M.Ö. yaşamış olan Vitruvius “Mimarlık Üzerine On Kitap” adlı eserinde tuğlanın kum, kil ve saman karışımından yapıldığını ifade etmiştir. Bu durum da malzemenin özelliklerini artırmak için saman ile donatıldığını göstermektedir (Dürüşken 2019).

Betonda, rastgele dağılmış liflerin kullanımı, enerji yutma kapasitesini, çekme dayanımını ve çatlak gelişim karakteristiklerini iyileştirmek için kullanılan en etkin yöntemlerden bir tanesidir (Baradan vd. 2012). Bu sayede çimento hamurundaki çatlağın

kontROLSÜZ ve hızlı ilerleyişi kontrollü ve yavaş hale getirilir (Erdoğan 2014). Çimento hamurunun görevi ise bu lifleri bir arada tutarak liflerle gerilme transferi yapmaktır (Baradan vd. 2012). Lifler, çatlakların ilk oluşma aşamasında çatlakların sonlarında oluşan gerilmeleri kendi üstlerine çekerek ya da sağlam olanlara yönlendirerek görevlerini yerine getirirler (Ünal vd. 2005).

Liflerin bu görevi yerine getirebilmesi için çatlak ilerleyişine dik olarak yerleştirilmesi çatlak gelişimi ve ilerleyişinde daha etkili olacaktır (Erdoğan 2014). Bu sebeple tüm lifli beton uygulamalarında uyulması istenen en önemli özellik betonun içinde bulunan liflerin homojen bir şekilde dağılmasıdır. Üniform olarak dağılan lifler, çatlakların beton içerisinde oluşmasını ve ilerlemesini yavaşlatır. Bu sayede beton daha dayanıklı hale gelmektedir (Ünal 1994).

Matris özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi

Kompozit malzemelerin yapımında yaygın olarak kullanılan polimer, seramik, metalik ve çimento matris malzemeleri ve kompozitin özelliklerine etkileri aşağıda verilmiştir.

Metal matris malzemeleri

Kompoziti sürekli faz olarak bir bütünlük içinde bir arada tutarak liflerle beraber kompozitin özelliklerini belirleyen metal matris malzemeleri, taşıyıcılık açısından değerlendirildiğinde özellikle polimer matris malzemelerine göre yüksek dayanıma sahiptirler. Metal matrisler ile lifli kompozit üretmek daha zor ve bunun maliyeti de çok daha yüksektir. Bunun yanında metal matris malzemeleri kompozitin tokluğunu önemli oranda artırmakta ve yüksek sıcaklık etkisindeki çalışmalara imkân sağlamaktadır (Ersoy 2001).

Seramik matris malzemeleri

Seramikler, doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kil, kaolin vb. maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilirler. Metal ve metal olmayan elementlerden meydana gelen inorganik bileşiklerdir. Gevrek olduklarından çentikler, mikro çatlaklar ve yapısal kusurlar gerilme yığılmasına neden olduklarından çekme dayanımları düşüktür. Basınç dayanımları ise yüksektir. Bu yüzden mikro çatlakları ve yapısal kusurları azaltacak şekilde ince çaplı lifler ile kullanılması durumunda daha dayanıklı kompozitler üretilmesinde önemli rol oynarlar (Şahin 2015).

Polimer matris malzemeleri

Polimer, tekrarlanan yapısal kümelerin oluşturduğu yüksek molekül ağırlıklı bileşikler olarak tanımlanmaktadır (TDK). Momonerler bir araya gelerek polimerler'i oluştururlar. Bu

açından polimerler birçok küçük molekülün bir araya gelmesiyle oluşan makro moleküllerdir. Bu malzemeye ticari anlamda plastikler de denmektedir (Şimşek 2019). Polimer matris kompozitler, yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yoğunluklarının düşük, sertlik ve mukavetlerinin yüksek olmasının yanında korozyon dirençlerinin iyi olması kompoziti kullanışlı hale getirirken (Xu et al. 2019), polimer matrisli kompozitler, metal matris ve seramik matris kompozitler kadar ısıya dayanıklı değildir (Vlahovic and Martinovic 2018).

Çimento bağlayıcılı matris malzemeleri

Çimento matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitlere göre düşük çekme yükü altında kendine özgü matris çatlaması göstermeleri yönüyle ayrılırlar. Çimento matrisli bir elemanın normal hizmet durumunda çekme gerilmelerinin geldiği bölgelerinde çatlamalar oluşur, kompozitte yer alan lifler, kırılma olmadan önce matriste mevcut olan yükün bir kısmını devralırlar (Ackeren and Wastiels 2012). Bu durum çimento matrisinin kırılma birim uzamasının, donatı olarak kullanılan liflerden daha düşük olmasının bir sonucudur (Ersoy 2001).

Lif özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi

Çeşitli araştırmalar ve çalışmalar, kompozit malzemeyi güçlendirmek için kullanılan lif içeriğinin kompozit özelliklerinde çok önemli olduğunu vurgulamıştır. Lif takviyesinin betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Bu özellik genellikle belirli miktara kadar geçerlidir ve bu miktarın aşılması durumunda mekanik özelliklerdeki iyileşmeler azalmaya başlar (Mohajerani et al. 2019). Bu yüzden kompozit malzemede en iyi sonuçları elde edebilmek için optimum lif içeriği önemlidir. Bunun yanında betona katılan liflerin türü, geometrisi, boyu ve narinlik oranı gibi parametrelerde dikkate alınmalıdır (Lloyd 2014).

Lif türleri ve etkisi

Teknoloji ve tekstil sektöründeki gelişmelerle birlikte son yıllarda yeni lif çeşitleri üretilmiştir. Üretilen bu lifler çimento, beton ve diğer kompozit malzeme üretimlerinde kullanılmaktadır. Bunlar arasında en fazla kullanılan lif çeşitleri cam, aramit, karbon ve bazalt lifidir (Arslan 2017). Lifler hem özellik, etkinlik ve maliyet açısından önemli ölçüde farklılık gösterirler. Bazı yaygın kullanılan lifler ve bazı mekanik özellikleri Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Betonda Kullanılan Bazı Liflerin Tipik Özellikleri (Mindess et al. 2003; Bentur and Mindess 2007; Taranu et al. 2012)

Lif Tipi	Çap (µm)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Elastisite Modülü (Gpa)	Çekme Dayanımı (Gpa)	Kopma Uzama Oranı (%)
Çelik	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Cam	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Bazalt	-	2,75	89	4,8	3,15
Polipropilen	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Polyester	10-200	1,34-1,39	10-18	0,23-1,2	10-50
Polietilen	25-100	0,92-0,96	5	0,08-0,60	3-100
Poliolefin	150-635	0,91	2,7	275	15
Aramid (Kevlar)	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Karbon (PAN)	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Karbon (Pich)	9-18	1,6-1,21	30-480	0,5-3,1	0,5-2,4
Naylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16-20
Akrilik	20-350	1,16-1,18	14-19	0,2-1,0	10-50
Sisal	10-50	1,5	13-26	0,3-0,6	3,5
Selüloz	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Ahşap Lif	25-75	1,5	71	0,7-0,9	-
Asbest (Krokidolit)	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2-3
Asbest (Krizotil)	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2-3
Çimento Hamuru	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Cam lif

Cam lifler, lif takviyeli kompozitlerin üretilmesinde en çok yararlanılan donatı malzemeleri arasındadır. Bu durum ekonomik olmasının yanında mekanik özelliklerinin de iyi olmasının sonucudur. Cam liflerin ticari olarak üretilmesi 1930 yıllarında İngiltere’de yapılmıştır. Çimento kompozitlerinin cam lifler ile donatılmasıyla alakalı ilk önemli çalışma 1964 yılında Biryukovich ve arkadaşlarının Sovyetler Birliği’nde yayımladıkları kitap olmuştur. Bunun yanında 1958 yıllarında Çin’de beton üretiminde cam liflerin kullanımıyla alakalı araştırmalar yapılmıştır (Ersoy 2001).

Cam lifler, camların ortalama 1200-1500 °C sıcaklıkta elektrik fırınında ergitilmesi sonucunda elde edilirler. Ergiyen camlar platin alaşımlı potadan hızla aşağı doğru çekilirler.

Soğutma bölgesinden geçirildikten sonra demetler halinde sarılarak 3 kg'lık makaralar halinde depolanırlar (Şahin 2015).

Cam lifler silika esaslı olmasının yanında (~% 50-60 % SiO₂) kalsiyum, bor, sodyum, aliminyum ve demir oksitte içerir. Piyasada kimyasal bileşimleri farklı olan cam lif tipleri mevcuttur. Örneğin Tablo 3'te yaygın olarak kullanılan bazı cam liflerin kimyasal bileşimleri gösterilmiştir (Chawla 2012).

Tablo 3. Bazı Cam Liflerin Yaklaşık Kimyasal Bileşimleri (Ağırlıkça, %)

Bileşenler	E cam	C cam	S cam
SiO ₂	55,2	65,0	65,0
Al ₂ O ₃	8,0	4,0	25,0
CaO	18,7	14,0	-
MgO	4,6	3,0	10,0
Na ₂ O	0,3	8,5	0,3
K ₂ O	0	-	-
B ₂ O ₃	7,30	5,00	-

E harfi elektrik anlamına gelir ve E tipi cam lifler iyi bir mukavemete sahip olmalarının yanında iyi bir elektrik yalıtan malzemedir. C ifadesi korozyon anlamına gelir. Diğer lif tiplerine göre korozyona karşı iyi direnç gösterir. S ifadesi lifin yüksek silika içerdiği anlamına gelir. Diğer cam lif tiplerine göre yüksek sıcaklıklara dayanmasını sağlar. En çok cam lif tipi olarak E tipi üretilmesine rağmen elektriksel yönü açısından kullanımının pazarın küçük bir kısmı olduğu belirtilmektedir (Chawla 2012).

Çelik lif

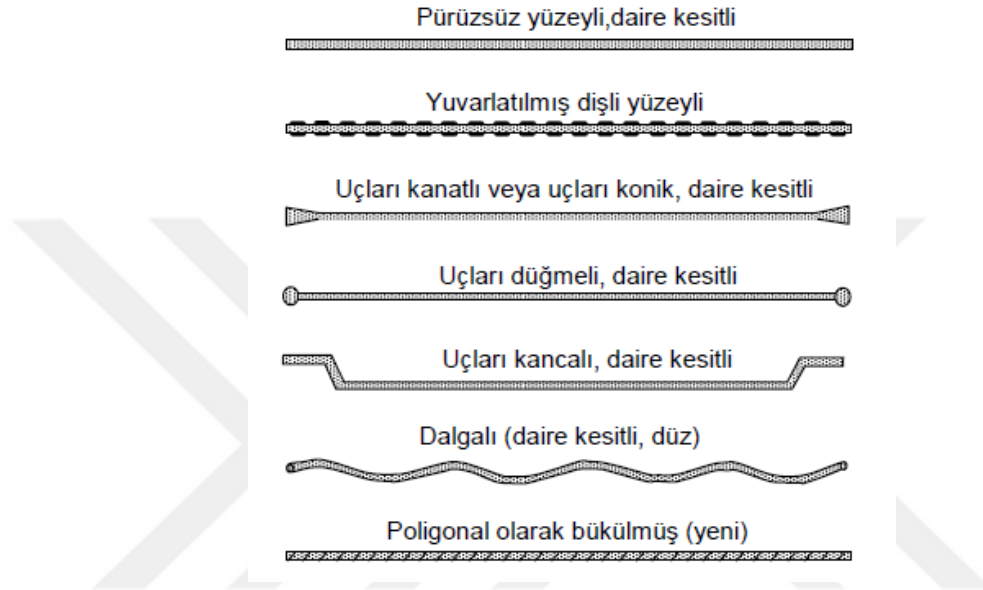
Çelik liflerin mukavemetleri, esneklik modülleri ve süneklikleri oldukça yüksektir. Bu yüzden lif takviyeli betonlarda en yaygın kullanılan lif türüdür. Çelik lifler ilk olarak kaldırım, döşeme ve tünellerde çatlakların kontrolü için ikincil takviye eleman olarak kullanılmışlardır. Bugün ise çelik liflerin kullanımı çelik donatı çubukları yerinden edecek kadar ilerlemiştir (Abbas 2013).

Çelik lifler daha çok harç ve betonlarda kullanılmaktadır. Üretimlerinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Birbirlerine özel yapıştırıcı ile tutturulan teller betonun karıştırılması sırasında karma suyunun etkisiyle rahatça çözülüp dağılabilmektedir. Bu teller, daha etkili olabilmeleri amacıyla çeşitli şekillerde üretilmektedir (Ersoy 2001).

Bu lifler; düz, dalgalandırılmış (kıvrımlı) olabileceği gibi uçları bükülmüş de olabilir. Düz liflerle karşılaştırıldığında uçları bükülmüş ve dalgalandırılmış liflerin matrsten sıyrılması daha zordur. Çelik liflerin mukavemetlerinin yüksek olmasından dolayı çekme kuvvetlerinin

etkisinde kırılmaları veya kopmaları da zordur. Bunun yanında belli bir yükten sonra liflerin matristen ayrılması betonun dayanımını olumsuz etkileyen parametreler arasındadır. Bu durum liflerin geometrik şekilleri ile ilgi olmakla beraber çimento hamurunun yapısı ile de yakından alakalıdır (Uğurlu 1994).

Matris ve lif arasında daha iyi bir bağ geliştirmek için lifin yüzeyi pürüzlendirilerek veya mekanik deformasyonlarla uzunluğu boyunca modifiye edilebilir. Çelik liflerin tipik örnekleri aşağıda Şekil 3'te gösterilmektedir (Naaman 2003).



Şekil 3. Betonda kullanılan çelik liflerin tipleri (Naaman 2003)

Sentetik lifler

Çimento esaslı malzemelerin güçlendirilmesi için kullanılan lifler son yıllarda daha çekici hale gelmiştir. Polipropilen gibi polimer lifler, özellikle harç ve betonların güçlendirilmesi için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Bentur and Mindess 2007). Sentetik lifler, erken plastik büzülme çatlamasını azaltmak ve darbe ve aşınma direncini ve tokluğu arttırmak için kullanılır. Bu lifler ayrıca işleme gerilmelerine karşı direnci artırmak için prekast betona, kohezyonu iyileştirmek için pompalanan betona ve geri tepmeyi ve malzeme israfını azaltmak için püskürtme betona eklenebilir (Ramakrishnan et al. 1998).

Bu kısımda polipropilen, polietilen, naylon ve aramid lif türleri anlatılmıştır. Bu lifler çeşitli yayınlarda sentetik lifler, polimer lifler, yapay organik lifler ve plastik esaslı lifler olarakta adlandırılmaktadırlar.

- Polipropilen lif

Polipropilenden (PP) üretilen lifler yüksek dayanıma sahiptirler. Alkali ortama iyi direnç gösterirler. Bu özelliklerinin yanında fiyatlarının da düşük olması sebebi ile de önemli

lif malzemesi olma özelliğini taşırlar. Çoğunlukla çimento esaslı kompozitlerin takviye edilmesinde kullanılırlar. Bu liflerin betonun takviyesinde kullanılması ilk olarak 1965 yılında Goldfein tarafından önerilmiştir. Polipropilen lifler, isotactic polipropilenden üretilip genellikle kalınlıkları 50 µm ile 100 µm arasında değerler alan lif tabakaları (Fibrillated film) halinde kullanılırlar. Erime noktası 165 °C olan Polipropilen lifler, 100 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bunun yanında kısa süre için 140 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda özelliklerini muhafaza ederler. Polipropilen liflerin uygulamada karşılaşılan mahsurlu yönü, düşük sıcaklık karakteristiklerinin zayıf olmasıdır. Camsı geçiş sıcaklığı -20 °C' dir. Yapıları itibariyle birçok kimyasal maddeye karşı direnç gösterirler. Bu liflerin alkali dirençlerinin de iyi olması, malzemenin çimento bağlayıcılı kompozitlerde takviye olarak kullanılmasını avantajlı kılmaktadır (Ersoy 2001).

Polipropilen lifler, çeşitli şekillerde ve farklı özelliklerde üretilir. Bu liflerin temel avantajları alkali direnci, nispeten yüksek erime noktası (165 °C) ve düşük hammadde fiyatıdır. Dezavantajları, zayıf ateş direnci, güneş ışığına ve oksijene duyarlılık, düşük esneklik modülü ve matris ile zayıf bağıdır. Matris içerisine gömülmesi koruyucu bir örtü sağlar, yangına ve diğer çevresel etkilere karşı hassasiyeti en aza indirmeye yardımcı olur. Mekanik özellikler, özellikle esneklik ve bağ modülü geliştirilebilir ve çimentolu matrislerle kullanım için özel lifler geliştirilmiş ve ticari olarak pazarlanmaktadır (Bentur 1990).

- Polietilen lif

Polietilenin deformasyon direnci iyidir ve düşük nem emme kapasitesine sahiptir. Kolay işlem görmesi, kimyasal kararlılığı ve düşük maliyeti onun önemini artırır. Yüksek ve düşük yoğunluklu olacak şekilde iki farklı türü vardır. Tel yalıtkanı, film ve tabaka alanlarında uygulamaları bulunmaktadır. Yoğunluğu yüksek olan polietilen daha yüksek linerlik ve kristallığe sahiptir. Bu durum onun daha dayanıklı ve rijit olmasını sağlamakta, boru ve şişe gibi parçaların yapımında kullanılmaktadır (Şahin 2015).

Polietilen lifler, elastisite modülünün düşük olması nedeniyle çimento bağlayıcılı kompozitlerin takviyesinde kullanılmamaktadır. Fakat yüksek elastisite modülü değerine sahip polietilen liflerin üretilmesi ve çimento bağlayıcılı kompozitlerde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar devam etmektedir (Hannant 1978).

- Naylon lif

Naylon, doğrusal poliamid tipi plastiklere verilen genel bir isimdir. Değişik yöntemlerle, farklı tiplerde üretilmektedir. Naylon eriyikten sarma ile lif haline getirilebilmektedir. Gerilme uygulanarak naylon liflerin çekme dayanımları yükselmektedir. Naylon, yüksek mekanik

dayanımı, aşınmaya karşı direnci, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sıcaklıklara kadar özelliklerini koruyabilmesi gibi birçok olumlu özelliğe sahip bir malzeme türüdür. Ancak naylonun atmosferik nemi soğurma özelliği diğer ısıl plastiklere göre daha yüksektir. Naylonun su soğurumu da malzemede şişmeye neden olmakta ve bu da uygulamada sorunlar doğurabilmektedir. Ayrıca naylon pahalı bir malzeme olma özelliğini de taşımaktadır (Ersoy 2001).

- Aramid lif

Organik lifler içinde önemli bir yeri olan aramid lifleri ticari olarak “Kevlar” adıyla tanınır. Kevların en iyi bilinen iki türü Kevlar-29 ve Kevlar-49’dur. Kevlar-29 kurşungeçirmez yelek yapımında da kullanılır. Organik elyafların çoğu gibi Kevlar, sıkıştırma kuvvetlerini içeren uygulamalar için uygun değildir. Sıkıştırma mukavemeti gerilme mukavemetinin sadece 1/ 8’i kadardır. Bu durum lifin anizotropik doğasından kaynaklanmaktadır (Chawla 2012).

Aramid, stabil zincir yapısı nedeniyle, diğer birçok sentetik fibere kıyasla sıcaklığa makul ölçüde dayanıklıdır. 160 °C’ye kadar olan sıcaklıklardan esasen etkilenmez. Bununla birlikte, 300 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda, lif mukavemetinin çoğunu kaybedebilmekte ve önemli ölçüde sünebilmektedir. Bu tür etkiler, özellikle yangına dayanıklılık açısından kompozitin özel değerlendirilmesini gerektirir. Aramid lifleri, cam ve karbonun aksine, sünek bir şekilde kırılır ve bununla birlikte kayda değer boyunlanma ve fibrilasyon görülür. Elyafın kendisi, her biri 10–15 µm çapında birkaç bin filamentten oluşan bir demetten oluşan fitillerden oluşur (Bentur and Mindess 2007).

Bazalt lif

Bazalt lif üretmeye yönelik ilk girişim, 1923’te patentini alan Paul Dhe tarafından yapılmıştır. II. Dünya Savaşı’ndan sonra ABD, Avrupa ve Sovyetler Birliği’ndeki araştırmacılar tarafından özellikle askeri ve havacılık uygulamaları için daha da geliştirilmiştir. 1995’ten bu yana bazalt lifler daha geniş uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır (Ross 2006).

Eski çağlardan beri insanlar tarafından kullanılmakta olan bazalt, lavların soğuması sonucu oluşan doğal bir kayadır (Abbas 2013). Koyu siyah renkli, ufak kristalli veya camsı yapıdadır. Yoğun ve sert olduklarından basınca karşı oldukça dirençlidirler (Ünsal 2006).

Bazaltın ana bileşenleri SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO ve demir oksitlerdir. Bazaltın türüne göre kimyasal bileşenleri farklılıklar gösterir. Bazalt lifin kimyasal bileşenleri Tablo 4’te verilmiştir. Bileşenler lifin çeşitli özelliklerini etkiler (Vincent et al. 2019).

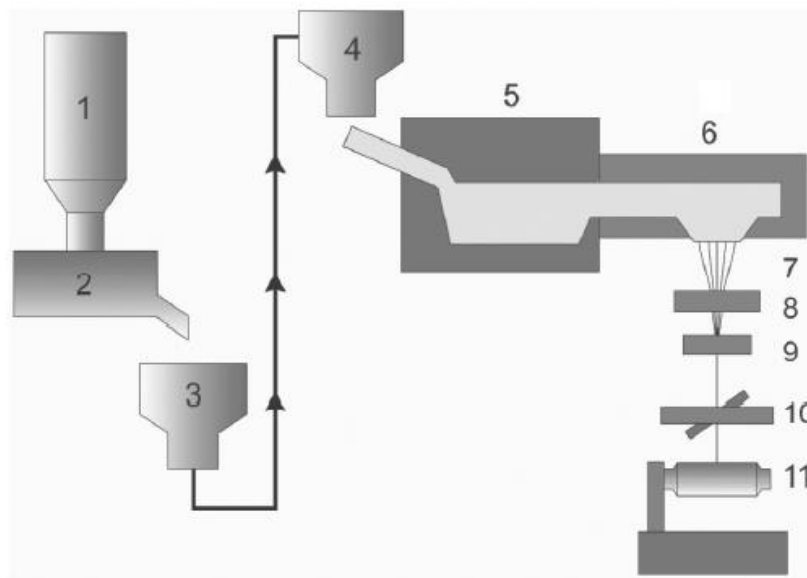
- SiO₂ ve Al₂O₃ çekme özelliklerini etkiler.

- Fe_2O_3 ve FeO , nihai ürünlerin ısı iletkenliğini ve yüksek sıcaklık performansını artırarak erime parametrelerini değiştirir.
- CaO , TiO_2 , MgO suya ve agresif ortamlara karşı direnci artırır.
- Na_2O ve K_2O alkalide korozyon direncini artırır.

Tablo 4. Bazalt Kayanın Kimyasal Bileşenleri (Vincent et al. 2019)

Bileşenler	Yüzde (%)
SiO_2	50-60
Al_2O_3	14-19
CaO	5-10
MgO	3-5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	3-5
TiO_2	0,5-3
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	9-14

Ezilmiş bazalt kayalar, elyaf üretimi için gerekli olan tek hammaddedir. Bazalt lifler, bazaltın yaklaşık 1500 °C sıcaklıklarda eritilip lif formunda üretilmesi yolu ile elde edilirler (Arivalagan 2012). Çevreye duyarlıdır ve toksik değildir. Yüksek ısı stabilitesine ve yalıtım özelliklerine sahiptirler. Kompozit malzemeler için kullanıldıklarında benzersiz mekanik özellikler sağlarlar. Yüksek güvenilirlikle kolayca fabrikada işlenebilirler (Ramakrishnan et al. 1998). Bazalt kayanın lif haline dönüştürülmesinin basitleştirilmiş şeması Şekil 4’te gösterilmiştir.



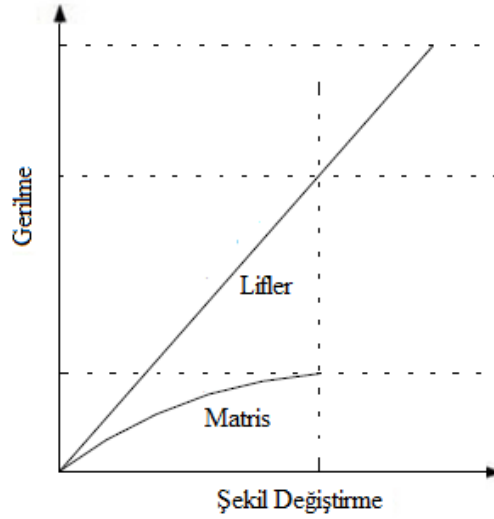
Şekil 4. Bazalt liflerin üretim şeması (Deák and Czigány 2009)

- 1) Kırma taş Silosu: Kırılarak küçültülen taşların bulunduğu kısım
- 2) Yükleme istasyonu: Yığınları taşıma sistemine aktaran birim
- 3) Taşıma Sistemi: Yığınların doldurma istasyonuna aktarılması
- 4) Doldurma istasyonu: Yığınların fırınlara iletilmesi
- 5) Birincil ısıtma bölgesi: Bazalt taşlar eritilir
- 6) İkincil ısıtma bölgesi: Bazalt son kez homojen ısıtılır
- 7) Filamentler
- 8) Boyutlandırma Bölgesi
- 9) İplik oluşturma Bölgesi
- 10) Germe Bölgesi
- 11) Sarma İstasyonu

Üretim sürecinde katkı maddelerine ihtiyaç olmaması yönüyle maliyet açısından avantaj sağlar. Bazalt lifler yangına karşı iyi direnç gösterirler ve daha az zehirli duman yayarlar. Bunun yanında E-cam liflere göre daha iyi gerilme mukavemetine, karbon liflere göre daha büyük kopma gerilimine sahiptirler. Bu özellikler, daha düşük maliyet ile birleşince çoğu uygulamalarda cam ve karbon lifler ile uygun bir yer değiştirme yapar (Berozashvili 2001). Dündar ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında bazalt liflerin aşınma dayanımlarının karbon liflerin aşınma dayanımlarından daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir (Dündar vd. 2020).

Lif miktarının etkisi

Malzemelerin mekanik özellikleri tayininde elastisite modülünden faydalanılır. Yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler, düşük elastisite modülüne sahip malzemelerden daha büyük gerilme değerlerine dayanabilirler. Bu yüzden elastisite modülleri düşük olan kompozitlerin mukavemet ve gerilme dirençlerini artırmak için farklı miktarlarda liflerle güçlendirilirler. Kısaca kompozit malzemelere lif ilave etmek malzemenin elastisite modülünü artırmak için önemli bir yoldur (Elshafie 2015).



Şekil 5. Kompozit gerilme – şekil değiştirme eğrisi (Quinn 2002)

Gerilme – şekil değiştirme eğrisi şekildeki gibi olan iki parametrelili beton kompoziti ele alalım. Birinci durumda lif miktarının düşük olduğunu kabul edelim. Bu durumda lifli betonun mukavemeti çimento hamurunun mukavemeti kadardır. Yük, çimento hamurunun maksimum dayanım değerine ulaştıktan sonra taşımaları için liflere aktarılır. Lifler ise elastikte modülleri yüksek olmasına rağmen miktarları az olduğundan bu yükü taşıyamazlar ve kompozitin göçmesine sebep olurlar

İkinci durumda lif miktarının yeterli olduğunu kabul edelim. Bu durumda lifli betonun mukavemeti liflerin mukavemeti kadardır. Yük, çimento hamurunun maksimum dayanım değerine ulaştıktan sonra taşımaları için liflere aktarılır. Lifler ise kopma dayanımlarına kadar kompozitin yük taşımasını sağlarlar (Quinn 2002).

Lif boyunun etkisi

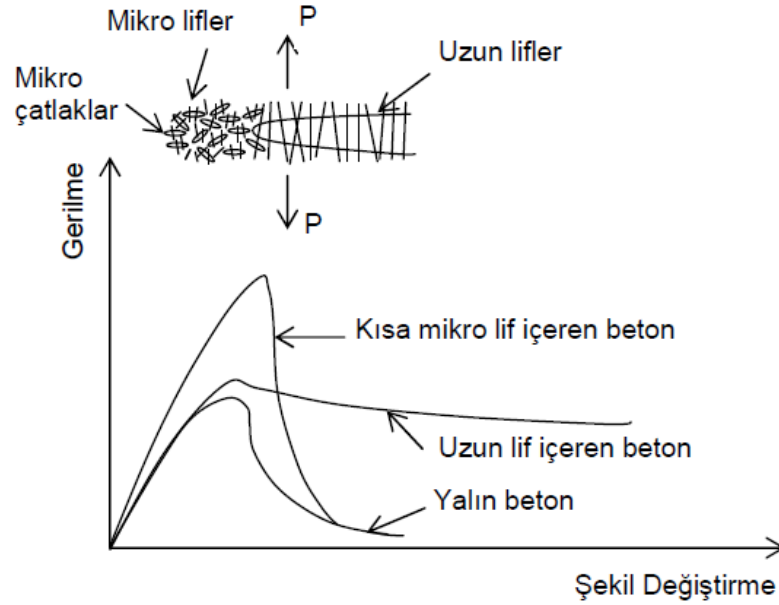
Lifler, betonda çatlağın olduğu ilk anda, çatlağın sonlarında bulunan gerilmeleri sağlam olan çimento hamuruna transfer ederek görevlerini yaparlar (Ünal vd. 2005).

Liflerin boyları büyüdükçe lifler arasındaki mesafe artar. Bundan dolayı da mikro düzeydeki çatlaklarda faydalı olamazlar. Ancak çatlaklar büyüyüp makro düzeye ulaştıklarında faydalı olabilirler (Betterman et al. 1995).

Mikro olarak ifade edilen çatlak yapının veya numunenin ölçülerine göre, uzunluğu oldukça küçük olan çatlak olarak tanımlanır. Makro çatlak ise yapının ya da numunenin ölçülerine göre, uzunluğu nispeten küçük olmayan çatlaktır (Rossi 2000).

Liflerin boyları küçüldükçe aralarındaki mesafede azalır. Böylece çatlaklar mikro boyuttayken mikro lifler çatlaklar arasında köprü oluşturarak çatlakların büyümesini yavaşlatırlar ya da durdururlar. Bu etkiye köprüleme etkisi denilir. Aşağıdaki şekilde de

görülebildiği gibi mikro boyuttaki lifler betonun her bölgesine ulaşabilecek kadar küçük boyutlu olduklarından uzun liflerin ulaşamadığı ara ve uç bölgelerde çatlakların başlaması ve gelişmesi sürecinde kilit rol oynarlar (Betterman et al. 1995).



Şekil 6. Çatlak köprülemesinde farklı lif boyutlarının etkisi (Betterman et al. 1995)

Mikro lifler, boyutlarından dolayı çimento hamuru içerisinde daha sık lif dağılımı oluşturur. Bu özellikleriyle çatlakları makro seviyeye gelmeden önce durdururlar. Kompozitin elastik bölgedeki davranışının iyileşmesinde önemli rol oynarlar. Makro lifler ise; uzun olmaları sebebiyle makro seviyedeki çatlakları kontrol ederler. Bu yönleriyle maksimum yük sonrasındaki davranışı iyileştirirler. Elastisite modülünü, eğilme ve çekme dayanımlarını artırır (Taşdemir ve Bayramov 2002).

Narinlik oranının etkisi

Lifleri tanımlayan en iyi parametre lif uzunluğunun, lif çapına bölünmesi sonucu bulunan narinlik oranıdır. Lifin çapı ise lifin enine kesit alanına eşit olan dairenin çapı olarak elde edilir (Anonymous 2002).

Lif narinliği ve miktarı reolojik özellikleri etkilemekte, reolojik özellikler de mekanik özellikleri etkilemektedir. Lifsiz halde en iyi mekanik özellikleri sağlayan bir karışım lifli halde istenilen reolojik özellikleri sağlamayabilir. Benzer şekilde düşük narinlikli liflerin düşük lif dozajlarında kullanımında yeterli reolojik ve mekanik özelliklere sahip karışımın, yüksek narinlikli liflerin yüksek dozajlarda kullanımında sağlanamayabileceği belirtilmektedir (Yardımcı 2007).

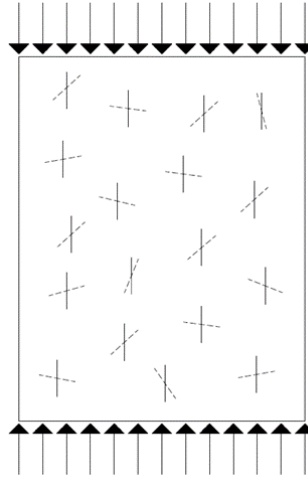
Lif geometrisinin etkisi

Liflerin beton içerisindeki performansı bu malzemelerin geometrik yapıları ile de yakından ilgilidir. Lifler; düz dalgalandırılmış olabileceği gibi uçları bükülmüşte olabilir. Çekme ve kesme kuvvetlerine maruz kalan betonda lifin beton ile arasındaki aderansı betonun performansını etkiler. Uygulanan belli bir yükten sonra lifin çimento hamurundan sıyrılması betonun dayanımını etkileyen en önemli parametredir. Bu durum çimento hamurunun yapısı ile ilgili olduğu kadar lif şekilleri ile de yakından alakalıdır. Çünkü uçları bükülmüş ve dalgalandırılmış liflerin yük etkisinde çimento hamurundan sıyrılması düz şekle sahip liflere göre oldukça zordur (Uğurlu 1994).

Lifli betonların mekanik özellikleri

Basınç dayanımı

Lif türü ve oranına bağlı olmakla birlikte, liflerin ilavesi basınç dayanımını her zaman olumlu etkilememektedir. Betonun dayanımında % 25 seviyesinde bir artış görülebileceği gibi bu seviyede bir dayanım kaybı da görülebilmektedir (Topçu ve Boğa 2005). Basınç dayanımında görülen bu artış ve azalış beton içerisinde dağılı halde bulunan liflerin yük doğrultusuna göre yaptıkları açı ile yakından ilişkilidir. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi Şekil 7’de verilmiştir.



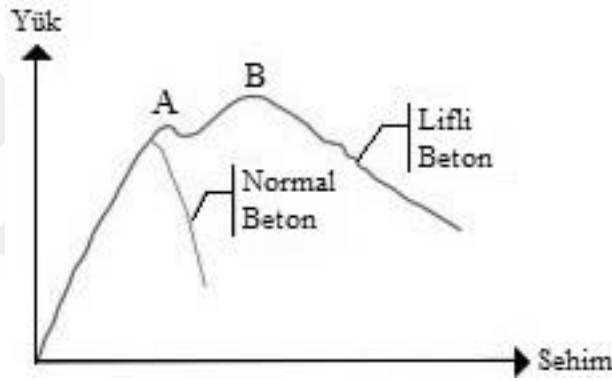
Şekil 7. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi (Soroushian and Bayasi 1991)

Şekilden de görülebileceği üzere yükleme düzlemine dik olan lifler betonun basınç dayanımında herhangi bir görev yüklenmezler. Kesikli çizgilerle gösterilmiş lifler ise yükleme düzlemi ile yaptıkları açı ölçüsünde basınç dayanımının artmasında etkilidir. Basınç dayanımının nihai yükünde belirgin bir artış olmamasına rağmen çelik lifli beton tek eksenli yükleme altında daha sünek davranabilmektedir (Uğurlu 1994).

Eğilme dayanımı

Betona lif ilavesinin en önemli etkisi malzemenin basınç dayanımından ziyade eğilme dayanımında görülmektedir (Mehta and Monteiro 2006). Yapılan çalışmalar sonucunda betonun içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı halde bulunan liflerin betonda çatlak oluşumunu önemli derecede azalttığı, betonun tokluğunu, şekil değiştirme kapasitesini, çekme ve çarpma dayanımını arttırdığını ve süneklilik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi kolaylaştırdığı ortaya çıkmıştır (Brandt 2009).

Normal betonlara göre çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları %50-100 arasında artış göstermektedir. Bu artış çelik liflerin yüksek çekme dayanımlarından kaynaklanmaktadır. Çimento hamurunun çatlamasından sonra liflerin çatlak sonlarındaki gerilmeleri transfer etmesiyle yük ilk çatlaktan sonra bir miktar artar. Bunun sonucu olarak nihai eğilme yükü lifsiz betonlara göre daha büyük olmaktadır (Uğurlu 1994). Çelik lifli betonun eğilme yükü altında yük-deplasman eğrisi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Lifli betonun yük deformasyon eğrisi (Baradan 2012)

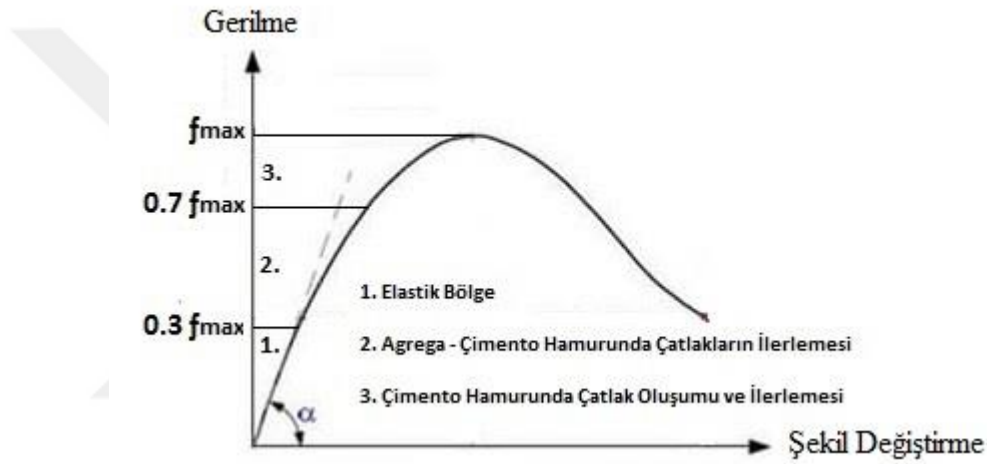
Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi eğri A noktasına kadar yaklaşık olarak doğrusaldır. A noktasından sonra eğri doğrusallıktan sapar ve nihai yükün taşındığı B noktasına ulaşır. A noktasına karşılık gelen gerilme elastik limit olarak adlandırılırken, B noktasına karşılık gelen gerilme nihai dayanım olarak adlandırılır. Lifsiz betonda kırılma sonrasındaki yük azalma hızı çok yüksek ve birim şekil değiştirme çok düşük olmasına karşın, lifli betonda çatlama sonrası yükün daha da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi kullanılan liflerin çekme dayanımlarının betonun çekme dayanımından daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Lifli beton maksimum yükte kırıldıktan sonra, yük kısa aralıkta ani olarak azalır. Bu azalma çimento hamuru matrisinin dağılmasıyla ilgilidir. Daha sonra çimento hamuru matrisi üzerinden boşalan gerilme çelik lifler tarafından karşılanır. Diğer bir deyişle çimento hamuru matrisinden liflere bir gerilme transferi söz konusudur. Liflerin çekme dayanımları yüksek olup, yük altındaki betonun sünek davranış göstermesini sağlarlar (Baradan 2012).

Lifsiz betonda çatlak gelişimi

Çatlamamış çimento hamurunda çatlak gelişimi

Beton, çimento hamurunun, agregaların ve çeşitli tiplerdeki boşlukların bir karışımı olan heterojen sistem olduğundan hem çimento partiküllerinin hidrasyonu hem de buharlaşmadan kaynaklanan su kaybından ve ayrıca sürüklenmiş, sıkışmış hava boşluklarından kaynaklanan boşluklar (Carpinteri and Ingrassia 1984) ve mikro çatlaklar içerir.

Bu mikro çatlaklar agrega-çimento hamuru ara yüzey bölgesindeki malzemelerin farklı mekanik özelliklerinden, termal gerilmelerden ve rötreten dolayı oluşur. Oluşan bu çatlaklar betonun düşük çekme dayanımına sahip olmasının da sorumlusudur (Şimşek 2020). Aşağıdaki Şekil 9’da betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 9. Betonun gerilme - şekil değiştirme eğrisi (Şimşek 2020)

Bu grafikten görülebileceği gibi beton, çeşitli yükler altında farklı davranışlar gösterir. Kırılgan bir malzeme olmasına rağmen düşük gerilmeler altında lineer elastik davranış gösterir. Bu davranış teorik olarak maksimum yükün %30’una eşittir (Mehta and Monteiro 2006).

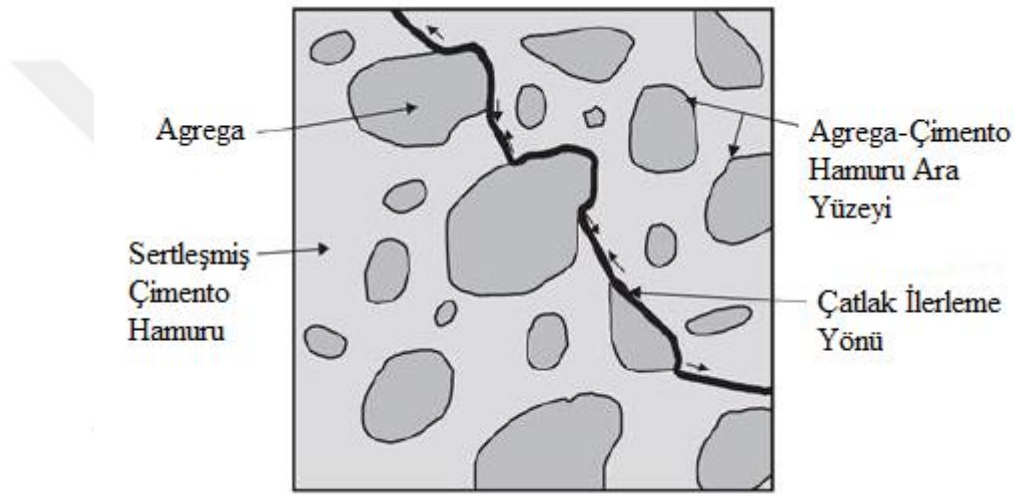
Bu lineer elastik davranış sürecinde agrega-çimento hamuru ara yüzeyi bölgesinde çatlaklar oluşur. Bunun yanında mevcut çatlaklar da aktif hale geçerler. Bu çatlaklar genellikle durağan haldedir. Yükün kaldırılmasıyla şekil değiştirme ilk haline geri döner. Maksimum yükün (f_{max}) %70-90’nına kadar yüklenmede ise elastik davranış kaybolur. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinden görüleceği gibi lineerlikten parabolik bir sapma meydana gelir. Bu aşamadan itibaren agrega-çimento hamuru ara yüzeyi bölgesindeki çatlakların genişliği, uzunluğu ve sayısı artar (Şimşek 2020).

Çatlamış çimento hamurunda çatlak gelişimi

Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde görülen bu doğrusal olmama (parabolik sapma), büyük ölçüde çimento ile agrega arasında var olan çok kusurlu bağdan ve yük arttıkça, esasen

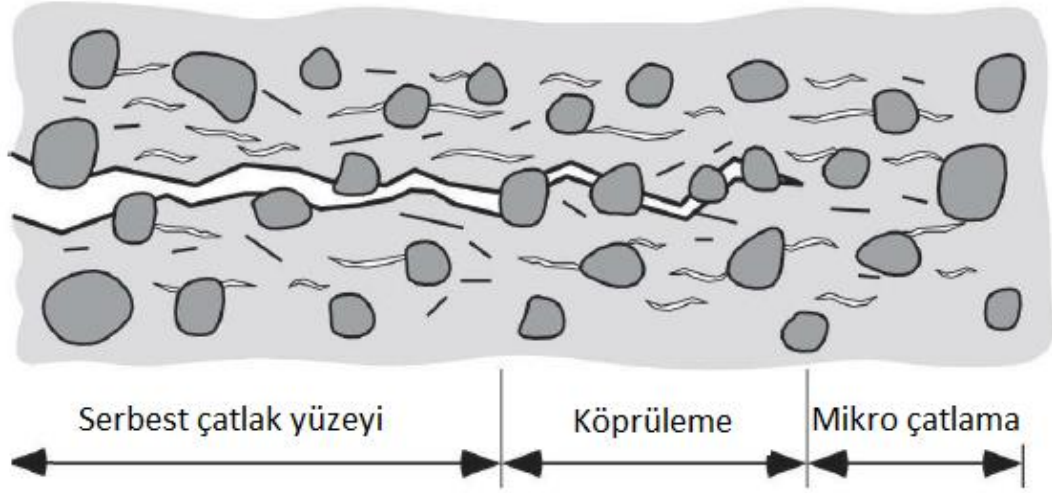
çimento-agrega ara yüzünde meydana gelen aşamalı çatlaklardan kaynaklanmaktadır (Carpinteri and Ingrassia 1984).

Agrega ara yüzeyinin yakınında bulunan çimento hamuru, diğer kısımlarda bulunan çimento hamurundan büyük ölçüde farklıdır. Çünkü çimento tanecikleri duvar etkisinden dolayı hamur yığnında verimli toplandıkları gibi agrega yüzeyinin yanında toplanamazlar. Bu yüzden bu kısım çimento hamurunun geri kalanından önemli ölçüde daha zayıftır. Yükün artması ile birlikte çatlama bu bölgede başlar (Illston and Domone 2010) ve yükün maksimum değere yaklaşması ile birlikte çatlakların oluşması çimento hamuru fazına geçer. Uygulanan yük doğrultusunda çatlaklar birleşir ve ilerlemeye devam ederler. Bundan sonra çatlakların ilerlemesi hız kazanır ve yeni çatlakların oluşması artarak devam eder (Şimşek 2020).



Şekil 10. Normal dayanımlı betonda çatlama deseni (Illston and Domone 2010)

Yük, maksimum değere ulaştıktan sonra hasar belirli bir kırılma bölgesinde yoğunlaşır. Maksimum gerilmeden sonra ortaya çıkan uzamaların tamamı bu hasar bölgesinde oluşmaktadır (Yayla 2019). Aşağıdaki şekilde genellikle agrega – çimento hamuru ara yüzey bölgesinden (betonun en zayıf bölgesi) kaynaklanan ve daha sonra betonun üzerinde hareket eden çatlak yolunu göstermektedir, Beton üzerindeki yük arttıkça büyür ve tam bir kırılma ile sonuçlanana kadar genişler (Lge 2017).



Şekil 11. Betonda çatlak ilerleme mekanizması (Anderson, 2017)

Çatlak yayılması genellikle arayüzlerde başlar ve çatlaklar matris boyunca büyür. İri agregalar çatlak büyümesini durdurur, çatlakların kıvrımlı ve dallanmasına neden olur ve bazı parçacıklar kırılır. Bu mekanizma, büyük ölçüde agreganın özelliklerine, özellikle yüzey dokusu ve şekline ve agregalar ile matris arasındaki mukavemet farklılıklarına bağlıdır (Giaccio and Zerbino 1998).

Çatlakların ilerlemesiyle birlikte betonun yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelir, şekil değiştirmeler artar. Bu durum betonun yük taşıma kapasitesinin ani bir şekilde sıfırlanmasına engel olur. Beton maksimum yükten sonra tokluk kazanır. Böylece gevrek davranışın yanında “yarı gevrek” davranışta sergiler. Maksimum yükten sonraki bölgede “şekil değiştirme yumuşaması” görülür. Betonun göçmesi yani kırılma, betonun daha fazla şekil değiştiremediği noktada meydana gelir (Şimşek 2020).

Betonun bu gevrek (çatlak) davranışını iyileştirerek daha sünek hale getirebilmek için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Enerji yutma kapasitesini, çatlak gelişim karakteristiğini ve çekme dayanımını iyileştirmek için kullanılan en etkin metotlardan biri betonda liflerin kullanımındır (Baradan vd. 2012).

Lifli betonda çimento hamuru ile lifler arasındaki etkileşim

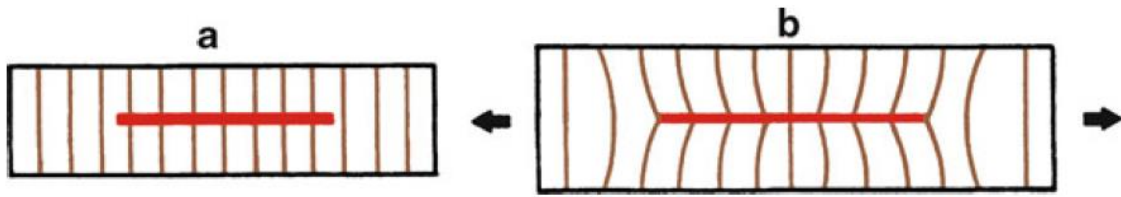
Lifli kompozit özelliklerini en çok etkileyen fazlardan biri de Balaguru and Shah (1992)’ında belirttiği gibi, çimento hamuru ile lifler arasındaki aderanstır. Bu özelliği anlayabilmek için lif ve betonun davranışlarını anlamaya ihtiyaç vardır. Günümüze kadar birçok araştırmacı bu soruya cevap aramıştır. Çimento hamuru ile lifler arasındaki aderansı etkileyen birçok durum vardır. Bunlar; çimento hamurunun niteliği, çimento hamurunun çatlamış veya çatlamamış olması, çimento hamuru ile lifin elastisite modüllerinin farklı olması, liflerin yüzey özellikleri, kullanım yüzdeleri, geometrileri, tipleri, yönleri ve betona uygulanan

yükleme hızıdır. Fakat bu maddeler arasında kullanılabilen teorik modeller oldukça azdır (Ekincioglu 2003).

Çatlamamış çimento hamuru ile lif arasındaki etkileşim

Çimento hamuru ile lif ara yüzeyi boyunca gerilme dağılımında iki durum vardır. Birinci durumda hem çimento hamuru hem de lif elastiktir. İkinci durumda ise çimento hamuru plastik iken lif elastiktir. Bor ve karbon gibi lifler kırılmaya kadar elastiktirler. Eğer lifin elastisite modülü çimento hamurunun elastisite modülünden büyükse lifin etrafındaki deformasyon küçük olur. Mineral ve çelik liflerde bu durum görülür. Çimento hamurunun elastisite modülü lifin elastisite modülünden daha büyükse lifin etrafındaki şekil değiştirme daha fazla oluşur (Chawla 2012).

Çimento hamuru lifleri bir arada tutar ve uygulanan yükü çoğu durumda gerçek yük taşıyan liflere iletir. Düşük Elastisite modülüne sahip çimento hamurunda gömülü halde bulunan yüksek elastisite modüllü lif Şekil 12’de gösterilmiştir.



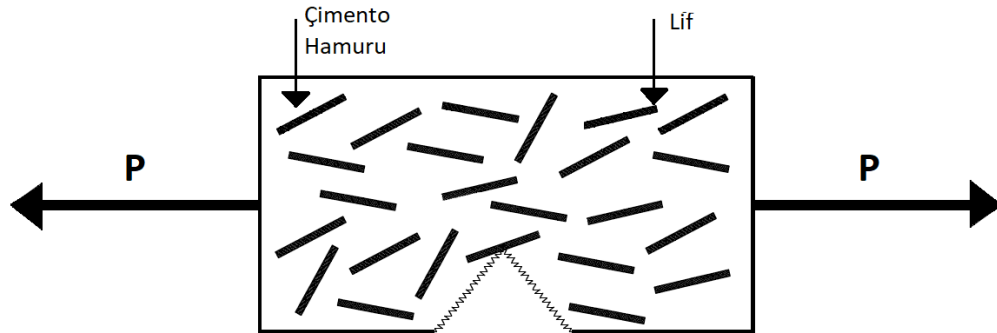
Şekil 12. Düşük elastisite modüllü bir matriste gömülü yüksek modüllü bir lif: (a) yüklemeye başlamadan önce, (b) yüklemeye başladıktan sonra (Chawla 2012)

İlk şekil herhangi bir yükün uygulanmasından önceki durumu göstermektedir. Bu durumda lif ve matrisin mükemmel bir şekilde bağlandığını ve poisson oranlarının aynı olduğunu kabul ettiğimizde Şekil-a’da gösterildiği gibi gerilmemiş halde bulunan dikey çizgiler kabulüyle aksel yük uygulandığında çimento hamuruna etkiyen yükün bir kısmı liflere yüzeyleri boyunca etki eder. Elastisite modülü farklarından dolayı lif ve çimento hamuru aksel olarak farklı yer değiştirmeler yaparlar. Bu durum lif eksenine paralel yönde kayma gerilmelerinin oluştuğu anlamına gelir. Çimento hamuruna etkiyen yükün life aktarılması bu kayma gerilmeleri vasıtasıyla gerçekleşir. Bunun sonucunda birinci şekilde gerilmemiş halde bulunan hayali çizgilerimiz ikinci şekilde gösterildiği gibi gerilmiş hale gelir (Chawla 2012).

Balaguru and Shah (1992) tarafından bildirildiğine göre, lif katkılı betonlarda lifler üç farklı doğrultuda rastgele olarak dağılırlar. Bunun yanında çelik lifler ve polimer liflerin bazıları uçlarından veya yüzeylerinden deforme edilmiştir. Bu gibi durumlar çimento hamuru ile lifler arasında var olan etkileşimi daha karmaşık duruma getirir. Bu sebeple uygulamalarda kullanılacak matematiksel modeller halen gelişim aşamasındadır (Ekincioglu 2003).

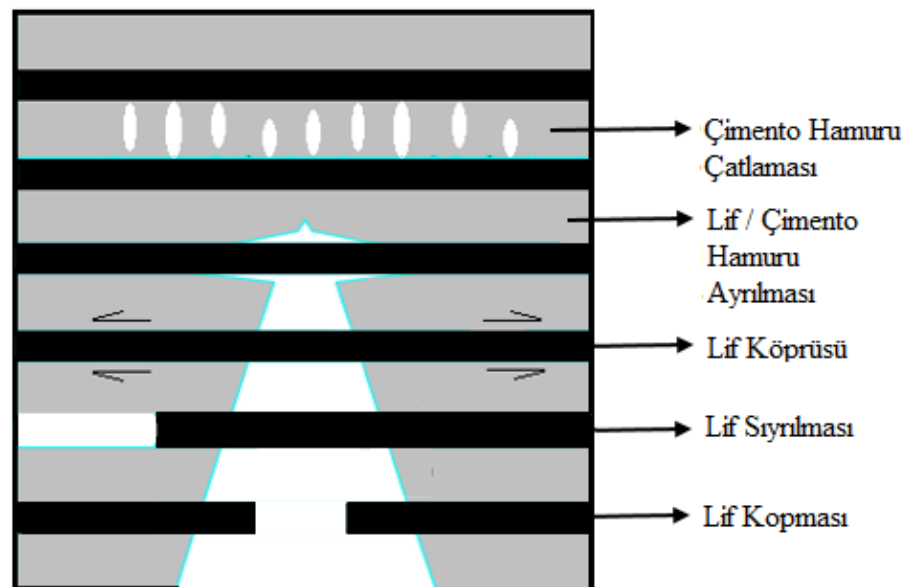
Çatlamış çimento hamuru ile lif arasındaki etkileşim

Çekme gerilmesine maruz kalan lifli betonda gerilmeler belli bir dereceye ulaştığında çimento hamurunda çatlak oluştuğunu Balaguru and Shah (1992) bildirmektedir. Bu çatlaktan dolayı matrisin bir tarafından diğer tarafına yükü lifler taşır. Lifler çatlak boyunca yeterli yükü iletebilirse çatlak tutulmuş olur. Çoklu çatlama aşaması olarak bilinen bu safhada çatlama servis yüklerinden meydana gelmektedir.



Şekil 13. Çatlamamış çimento hamuru ile lif ilişkisi

Lifli betonda yük ve kayma gerilmesi arasındaki ilişki, lif tipi, dağılımı ve sıyrılma dayanımı ile nasıl etkileneceği konusunda birçok araştırma ve liflerin çimento hamurundan sıyrılması ile ilgili birçok deney yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda liflerin enerji yutma ve çatlak genişlemesini kontrol etmek için nasıl davranışta bulundukları Şekil 14’te gösterilmektedir (Ekincioğlu 2003).



Şekil 14. Lif/Çimento hamuru enerji yutma mekanizması

Şekilde en alttaki lif elemandan başlayan ve çatlak boyunca yukarı doğru ilerleyen lif kopması, lif sıyrılması, lif köprüsü, lif çimento hamuru ayrılması ve çimento hamurunda

çatlama görülmektedir. Bu mekanizmalar lifler arasındaki mesafeye bağlı değildir. Bununla birlikte, bu durum geleneksel beton kompozitin içerisinde yer alan liflerin gevrek çimento hamuru fazına kümülatif etkisinde bir göstergesidir (Zollo 1997).

Lifli betonların performans özellikleri

Dayanıklılık, betonun özel uygulamalar için uygunluğunu belirlemede dayanım kadar önemlidir. Genel itibariyle dayanıklı beton, yoğun ve geçirimsiz olmalıdır. Liflerle güçlendirilmiş betonların geçirgenliklerinin lifsiz betonlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Lifli betonda kullanılan sentetik lifler korozyona maruz kalmazken, çelik lifler paslanabilir. Kaliteli lifli bir betonda bu paslanma değeri betonun "kabuğu" ile sınırlı kaldığı görülmüştür. Betonun iç kısımlarında bulunan lifler alkali ortam tarafından korunur (Mindess et al. 2003).

Taze betonun üst yüzeyinde bulunan suyun terleme sonucunda kaybedilmesi ile plastik büzülme görülür. Çimentonun hidratasyonu, betonun kuruması ve karbonatlaşma suyun azalmasına neden olur, bu durumda kuruma büzülmesi görülür (Erdogan 2003). Yapılan çalışmalarda betonun içerisine katılan polipropilen liflerin betonda oluşan rötire çatlaklarını önlemede etkili olduğunu göstermiştir (Branch et al. 2002).

Yorulma, malzemeyi kırmaya yetmeyen gerilmelerin, art arda uygulanması sonucunda malzemenin gevrek kırılması olarak bilinmektedir (Erdoğan 2003). Özellikle ağır ve tekrarlı yüklerin çok fazla olduğu endüstriyel döşemeler bu durum önemlidir. Yapılan araştırmalarda liflerin betona katılmasıyla birlikte yapı elamanlarının yorulma dayanımlarının arttığı gözlenmiştir (Yıldırım 2003).

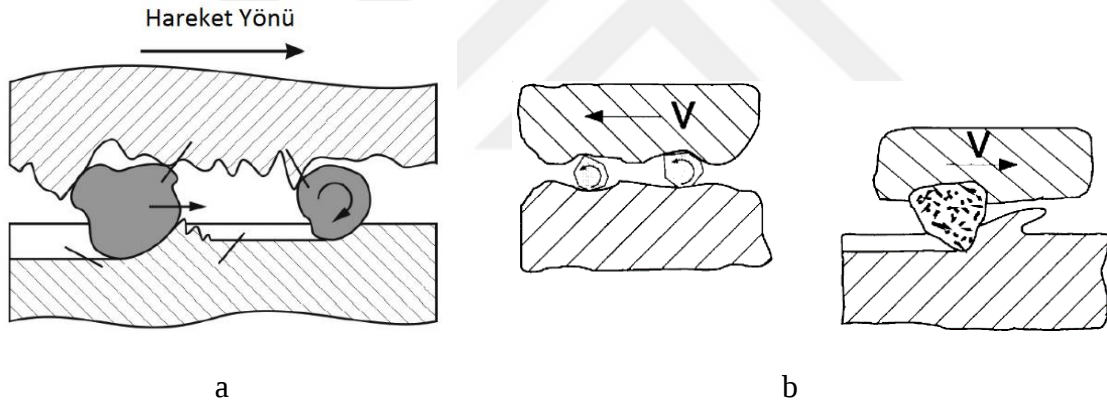
Lif takviyeli betonların darbe etkisine karşı dayanımları lifsiz betonlara göre oldukça yüksektir. Darbe etkisine maruz kalan betonda lifler, bu etkiyi kendi üstlerine çekerek çimento esaslı kompozitin daha az etkilenmesini sağlarlar. Böylece lif takviyeli betonda daha yüksek çarpma dayanımı oluştururlar (Uğurlu 1994).

Betona katılan çelik lifler betonun aşınma etkilerine karşı direncini de olumlu etkilemektedir (Yardımcı 2007). Aşınma, malzemelerin başka malzemelerle teması sonrasında mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşur. İstenmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanır (Anonymous 1979). Betonu oluşturan sertleşmiş çimento hamuru da aşınmaya karşı yüksek bir dirence sahip değildir (Mehta and Monteiro 2006). Aşınmaya dayanıklı beton yüzeylerin elde edilebilmesi için ACI Komitesi 201, betonun basınç dayanımının 4000 psi'den (28 MPa) az olmamasını tavsiye etmektedir (Mehta and Monteiro 2006). Aşınma, beton üzerinde birçok şekil ve şiddette kendini gösterebilir. Yüksek aşınma

direncine sahip bir beton sağlamak çeşitli faktörlere bağlıdır. Karışım bileşimi, mukavemet kazancı ve inşaat uygulamaları gibi, seçilen malzemeler de direnç seviyesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Scott and Safiuddin 2015). Betonun aşınması sadece malzemelerin özellikleriyle ilgili değildir, aynı zamanda çevresel faktörlerden de etkilenir (Han et al. 2017). Genel olarak betonda görülen aşınma üç farklı türe ayrılabilir.

Abrazif aşınma

Bu aşınma türü çizilme aşınması olarak da adlandırılır. Malzemelerde büyük oranda ve hızlı bir şekilde hasar oluşturabilen önemli aşınma türüdür. Basınç altında malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert parçacıklarla temas etmesi sonucunda malzemelerin yüzeylerinden kütle kaybının olması durumudur (Varol 2016). Hava alanlarında, yol ve döşeme kaplamalarında kullanılan betonda önemli seviyede aşınma etkisi görülür (Şimşek 2019). Bu gibi yerlerde aşınma, ağır cisimlerin sürüklenmesi, iş makinası paletleri, araç tekerlekleri veya yaya trafiği gibi etkenlerden kaynaklanır (Öncü 2010). Aşağıda Şekil 15'te abrazif aşınma gösterilmiştir.

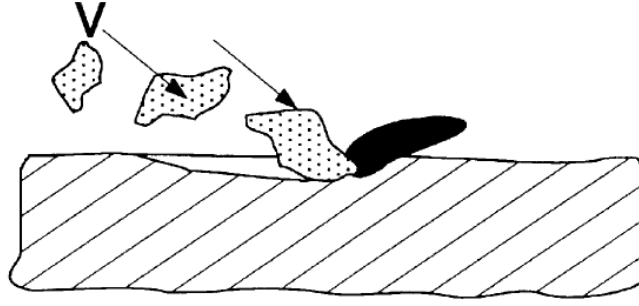


Şekil 15. Abrasif aşınma a: (Kandeva et al. 2016), b: (Gahr 1999)

Erozyon aşınması

Erozyon, askı halinde katı parçacıklar içeren sıvılar beton ile temas ettiğinde, parçacıkların çarpma, kayma veya yuvarlanma hareketleri sonucunda yüzeyin aşınması durumudur. Bu olay hidrolik yapılarda görülür. Aşınmanın derecesi, betonun gözenekliliğine, dayanımına, katı tanelerin miktarına, boyutuna, şekline, yoğunluğuna, sertliğine ve hızına bağlıdır. Suyun akışı esnasında hızının 1,8 m/s değerinin üstüne çıkmaması, katı tanelerin miktarlarının ve büyüklüklerinin az olması durumunda erozyonun kaybı ihmal edilebilir. Şiddetli erozyon koşulları söz konusu olduğunda, sert agregaların kullanımına ek olarak, betonun 28 günde en az 41 MPa basınç dayanımı geliştirecek şekilde tasarlanması ve erozyon

ortamına maruz kalmadan önce yeterince kürlenmesi tavsiye edilmektedir (Mehta and Monteiro 2006). Aşağıda Şekil 16’da erozyon aşınması gösterilmiştir.



Şekil 16. Erozyon aşınması (Gahr 1999).

Kavitasyon aşınması

Su yapılarında rastlanılan oyulma olayına kavitasyon adı verilir. Suyun hızlı aktığı su yapısında yüzey geometrisindeki bir değişiklik akımın sürekliliğini bozar. Bu durum düşük basınç bölgelerinin oluşmasına neden olur. Akan suyun statik basıncının, suyun buhar basıncından daha düşük olması durumunda içi hava dolu kabarcıklar oluşur. Bu hava dolu kabarcıkların suyun statik basıncının yüksek olduğu bölgelere taşınması sonucunda buhar, su damlacıkları şeklinde yoğunlaşarak ani bir şekilde dibe çöker. Bunun sonucu olarak beton yüzeylerinde patlama etkisine benzer şekilde, su darbeleri ve basınç dalgaları oluşur. Bu olayın devamlı olması betonun yüzeyinde oyulmalara sebep olur, özellikle dik açılı yüzeylerde bozulmalar görülür (Baradan ve Aydın 2013).

Betonda kısa kesilmiş çelik liflerin varlığı çeşitli etkiler altında çatlak oluşumunu önleyip çatlak yayılımını geciktirdiğinden dolayı, çatlak genişliğini de sınırlamaktadır. Bu açıdan bakıldığında aslında çelik lifler yapı elemanının durabilite özelliklerinin geliştirilmesinde üstünlük sağlar ve yapının servis ömrünü de uzatır. Çelik lifli betonlarda kullanılan lifin tipi, miktarı, geometrik özellikleri (boyu, narinliği, yüzey geometrisi vb.) ve lifin kullanıldığı çimentolu matris ile mekanik uyumu lifli kompozitin performansını önemli derecede etkilemektedir. Bunların yanında, lifli betonun karışım özellikleri de mekanik performansı etkilemektedir. Lifli kompozitlerin mekanik performansını etkileyen diğer önemli bir parametre de liflerin beton içerisinde homojen dağılımı ve çatlak düzlemine göre lifin pozisyonudur (Yardımcı 2007).

Kaynak Özetleri

Bazalt liflerin çimento kompozitlerinde kullanımı ile ilgili çalışmalar 21. yüzyılın başlarında başlamış (Guo et al. 2018) yapılan çalışmaların çoğunda bazalt lif ilavesinin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir (Wang et al. 2019). Yine bazalt lif

ilavesinin betonun bazı durabilite özelliklerine etkisini inceleyen araştırmalarda mevcuttur. Konu ile ilgili çalışmalar ve bulunan sonuçlar aşağıda özetlenerek verilmiştir:

Bazalt lif ilavesinin betonların dayanım özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalar

Jun and Ye (2010) yaptıkları çalışmalarında, 30 mm uzunluğundaki lifin farklı oranlarda kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda hacimce %0-0,1-0,15-0,20-0,25-0,30 ve 0,35 oranlarında bazalt lif katkılı betonlar üretmişlerdir. Tüm numunelerde bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Yapılan deneylere göre 28 günlük kür sonunda betonun basınç dayanımı %0,1 oranında lif katkısı ile maksimum değere ulaşmıştır. Lif oranı arttıkça bu değerde azalma olmuştur. Betona lif ilavesi betonun yarmada çekme dayanımını genel anlamda artırmış olmakla birlikte en büyük değer %0,3 oranında görülmüştür. Lif ilavesi sonucunda betonun eğilme dayanımı referans numunesine göre artmıştır. En büyük değere %0,35 lif içeriğinde ulaşılmıştır. Makalede ayrıca betona bazalt lif eklenmesinin betonun geçirimsizliğini artırabileceği ve oturmadan kaynaklanan çatlakları geciktireceği ifade edilmiştir.

Ma et al. (2010) çalışmalarında, 10 mm, 20 mm ve 30 mm uzunluklarındaki bazalt lifleri 3, 5 ve 7 kg/m³ oranlarında kullanarak betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bazalt lifler karışıma eklenmeden önce su ile ıslatılmıştır. Üretilen beton numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları gibi özellikleri kıyaslamıştır. Bazalt lif oranı ve uzunluğun artmasına bağlı olarak betonun işlenebilirliği azalmıştır. Çalışmada bazalt liflerin ilavesinin beton numunelerin basınç dayanımlarında önemli bir etki oluşturmadığı ifade edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı en yüksek değer 30 mm uzunluğundaki lifin 5 kg/m³ kullanılması ile elde edilmiştir. Lif oranının artmasına bağlı olarak eğilme dayanımında tüm uzunluklarda artış meydana gelmekle birlikte en büyük değer 20 mm uzunluğundaki lifin 7 kg/m³ kullanılması ile elde edilmiştir. İşlenebilirliğin azalmasının sebebi karıştırma sırasında lif ve çimento arasındaki sürtünme ve liflerin bir miktar nemi emmesinden kaynaklı olduğu belirtilmiştir.

Ketan and Kulkarni (2012) yaptıkları çalışmalarında, bazalt lif içeren betonların mekanik özelliklerini incelemek için su/çimento oranı 0,42 olan yüksek dayanımlı betonlar üretmişlerdir. Karışıma çimentonun %1'i oranında bazalt lifler ilave edilerek üretilen numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımları referans numunesine göre karşılaştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda bazalt lif içeren beton numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarının referans numunesine göre azaldığı rapor edilmiştir.

Deb (2012) yaptığı çalışmada, bazalt lif takviye edilmiş harçların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada çimento ağırlığının %0,30, %0,80, %1,30 ve %1,80'i kadar 6,5 mm uzunluğunda bazalt lif içeren numuneler üretilmiştir. 3, 7 ve 28 gün kür havuzunda bekletilerek basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sonuçta lif takviyeli harcın işlenebilirliği bazalt lif oranının artması ile azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımında genel bir artış olmakla birlikte en yüksek basınç dayanımı 28 günlük kür sonunda %0,3 lif içeriğinde görülmüştür. Eğilme dayanımında ise en yüksek değer 7 günlük kür sonunda %0,8 lif içeriğine sahip numunelerde elde edilmiştir.

Arivalagan (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmada, bazalt lif takviyeli betonun basınç ve yarmada çekme dayanımına etkisini araştırmıştır. Çalışmada 7-15 mm uzunluklarında bazalt lifler kullanılarak lifli ve lifsiz beton numuneler üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda lif takviyesi ile birlikte basınç ve yarmada çekme dayanımlarında artış gözlenmiştir. 28 günlük kür sonunda basınç dayanımında yaklaşık olarak %25 oranında artış görülürken, yarmada çekme dayanımında yaklaşık olarak %47 oranında artış görülmüştür. Makalede betonun güçlendirmesinde bazalt lifin kullanılabileceği belirtilmiştir.

Sarı (2013) yaptığı çalışmasında, hacimsel olarak farklı oranlarda çelik lifler ve hacimsel olarak aynı oranlarda bazalt, kopolimer (polietilen ve polipropilen) ve poliolefin kökenli lifler kullanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre betona lif eklenmesi ile eğilme dayanımı artmıştır. En büyük değer hacim içeriği 0,445 olan çelik lifli betonda görülürken büyükten küçüğe sırasıyla poliolefin, bazalt, kopolimer ve hacim içeriği 0,225 olan çelik lifli beton numunelerde görülmüştür.

Rathod et al. (2013) yapılan çalışma, bazalt lif takviyeli beton numunelerin performans özelliklerini değerlendirmek için deneysel bir araştırma sunmaktadır. Çalışmada %1 ve %2 oranlarında bazalt lifler ilave edilerek beton numuneler üretilmiştir. Numuneler 14 ve 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda her iki kür süresi sonunda basınç ve eğilme dayanımı lif ilavesi ile birlikte artmakla beraber en yüksek değerler 28 günlük kür sonunda %2 oranında lif ilave edilen numunelerde görülmüştür.

Irine (2014) tarafından yapılan çalışmada, ağırlıkça 1,2 ve 4 kg/m³ bazalt lifler kullanılarak numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını lifsiz numunelerin dayanımları ile karşılaştırmıştır. Bazalt lif oranının artmasına bağlı olarak betonun işlenebilirliği azalmıştır. Lif ilavesi betonun sünekliliğini artırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda lif ilavesinin artmasına bağlı olarak basınç, yarmada çekme ve

eğilme dayanımları artmıştır. Dayanımda en yüksek değerlere 4 kg/m³ lük lif ilavesinde ulaşılmıştır.

Çevik (2014) tarafından yapılan çalışmada, su/çimento oranı 0,55 olan 12 mm ve 24 mm uzunluğa sahip bazalt, çelik ve polipropilen lifler takviye edilerek beton numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelere bazalt lifler 2, 3 ve 4 kg/m³ oranlarında, çelik lifler 20 kg/m³ ve polipropilen lifler 2 ve 3 kg/m³ oranında eklenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımı en yüksek 24 mm – 4 kg/m³ değerlerindeki bazalt lifli numunelerde görülmüştür. Daha sonra polipropilen ve çelik lif içeren numunelerde elde edilmiştir. Eğilme dayanımlarında ise en yüksek değer çelik lifli numunelerde daha sonra 24 mm – 4 kg/m³ değerindeki bazalt lif numunelerde ve son olarak polipropilen liflerde elde edilmiştir.

Ayub et al. (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, yüksek performanslı betonların mekanik özelliklerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda 25 mm uzunluğa sahip hacimce %1, %2 ve %3 oranlarında betonlar üretilmiştir. Deneyler sonucunda betonun basınç dayanımında en yüksek değere %2 lif oranında ulaşılmıştır. Aynı şekilde lif ilavesi betonun yarmada çekme dayanımını artırmıştır. Betonun elastisite modülünde önemli bir değişiklik olmamıştır. Bazalt lif ilavesi ile birlikte betonun sürekliliğin artmıştır.

Jiang et al. (2014) yaptıkları çalışmada, bazalt liflerle güçlendirilmiş beton numuneler üreterek lif uzunluklarının ve hacimsel oranlarının betonun mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda %0, %0,05, %0,1, %0,3 ve %0,5 hacim oranlarında 12 mm ve 22 mm olmak üzere iki farklı uzunlukta bazalt lifli betonlar üretmişlerdir. Üretilen numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı değerlerini kontrol numunesi ile karşılaştırmıştır. Deneyler sonucunda lif ilavesinin betonun erken yaşlarda basınç dayanımını olumsuz etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Numunelerin ilerleyen yaşlardaki basınç dayanımlarında bu olumlu etkinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak lifler ile beton ara yüzeyindeki aderansın ilerleyen yaşlarda azalmasından kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Bunun yanında 12 mm uzunluğunda bazalt lif kullanılan betonlarda yarmada çekme dayanımını %14,08 - 24,34 ve eğilme dayanımını %6,30 - 9,58 kadar artırmıştır. 22 mm uzunluğunda bazalt lif kullanılan betonlarda ise yarmada çekme dayanımını %14,96 - 25,51 ve eğilme dayanımını %7,35 - 10,37 oranlarında artırmıştır. Bazalt lifi ile matris arasındaki bağın erken yaşlarda kuvvetli olduğu ancak bu bağın ilerleyen yaşlarda bozulduğu rapor edilmiştir.

Erdoğan (2014) yaptığı çalışmada, 400 dozlu, %10 uçucu kül, ilaveli 12 mm uzunluğa sahip bazalt ve cam lifler hacimce %0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında ilave edilerek beton numuneler üretmiştir. Üretilen numuneler referans numunesine göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi özelliklerini kıyaslamıştır. Yapılan

alışmalar sonucunda basınç dayanımında genel olarak artış olduğu ve en yüksek basınç dayanımına 28 günlük kür sonunda %0,75 lif oranına sahip cam lifli beton daha sonra %0,50 lif oranına sahip bazalt lifli beton ulaşıldığı belirtmiştir. Eğilme dayanımında ise lif katkılı numunelerin referans numunesine kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu ve en yüksek eğilme dayanımına %1 lif oranına sahip bazalt lifte daha sonra %0,50 lif oranına sahip cam lifte meydana geldiği gözlenmiştir. Her iki türde de lif oranının artması ile kırılma enerjisi artmış olmakla beraber en yüksek kırılma enerjisi değeri cam lif ilavesinde grlmştir.

Asprone et al. (2014) yaptıkları çalışmada, bazalt lif takviye edilmiş harçların özelliklerini araştırmışlardır. alışmalarında karışımın katı elemanlarının (kireç ve kum) %1 ve %2'si kadar 4-5 mm uzunluğunda bazalt lif içeren numuneler üretmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda liflerin köprü etkisi sonucunda lifli numunelerin lifsiz numunelere göre daha sünek davranışla bulunduğu ve lifli numunelerde daha yüksek tokluk elde edildiği ifade edilmiştir. Civa porozimetre deneyi sonucunda lif ilavesinin gözenekli bir yapı oluştuğu belirlenmiştir. Bunun sonucu olarakta betonun basınç dayanımının azaldığı belirtilmiştir.

Jagadeesan and Palanisamy (2015) alışmalarında, imento harcına katılan bazalt liflerin tuğla duvar performansına etkisini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda en/boy oranı 794 olan 12,7 mm uzunluğundaki bazalt lifler imento ağırlığının %0,5, %1 ve %1,5 gibi farklı oranlarda kullanmışlardır. Çimento harcından hazırlanan lifli ve lifsiz numunelere basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda %1 bazalt lif içeren imento harcının basınç dayanımı sıradan imento harcına göre 2,41 kat artmıştır. Lifli ve lifsiz imento harcı ile örülen tuğla duvar prizmalarına yapılan basınç dayanımı deneyi sonucunda ise %1 bazalt lif içeren tuğla duvar prizmasının basınç dayanımı, sıradan tuğla duvar prizmasından %1.82 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Branston et al. (2016) alışmalarında, iki farklı tür bazalt lif kullanarak betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda uzunlukları 36 mm ve 50 mm olan bazalt lifler hacimce %0,15, 0,31 ve 0,46 oranlarında kullanılırken, uzunlukları 43 mm olan bazalt çubuklar hacimce 0,31, 1 ve 2 oranlarında kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda bazalt lif ilavesinin betonun basınç dayanımında dikkate değer bir etkisinin bulunmadığı tespit edilirken, bazalt çubukların basınç dayanımını azalttığı belirtilmiştir. Eğilme dayanımı ise lif oranının artması ile birlikte artmıştır. En büyük artış 43 mm uzunluğa sahip bazalt çubuklarda görülürken Bazalt lifler arasında ise en büyük artış 50 mm uzunluğundaki bazalt lifli numunelerde grlmştir. Yüksek oranlarda lif kullanımı her iki tür için işlenebilirlik problemlerine yol açmıştır. Bazalt lifli katkılı

numunelerin kırılması lif göçmesi sebebiyle olurken, bazalt çubuk katkılı numunelerin kırılması lif sıyrılması şeklinde ifade edilmiştir.

Fenu et al. (2016) yaptıkları çalışmada, bazalt ve cam liflerle takviyeli edilmiş çimento harçlarının basınç dayanımı, eğilme mukavemetleri incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda 12 mm uzunluğundaki bazalt ve cam lifler ağırlıkça %3 ve %5 oranlarında kullanmışlardır. Betonların basınç dayanımları incelendiğinde lif ilavesi ile birlikte basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Eğilme dayanımlarında ise lif oranları artıkça eğilme dayanımı artmıştır. Eğilme dayanımında en büyük artış %5 bazalt lif içerikli numunelerde görülmüştür.

Arslan (2017) tarafından yapılan çalışmada, doğranmış bazalt liflerin betonun mekanik mukavemetine etkisini araştırmıştır. Bu doğrultuda 24 mm uzunlukta lifleri ağırlıkça 0,5, 1, 2 ve 3 kg/m³ değerlerinde kullanarak basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı deneyleri yapmıştır. Bazalt lif takviyesi basınç dayanımını referans numunesine göre biraz artırdığı tespit edilmiştir. Yarmada çekme dayanımında ise bazalt lifli numuneler çatlak oluşumundan sonra dağılmamıştır. Yarmada çekme dayanımında en yüksek değere 2 kg/m³ oranında ulaşılmıştır. Bunun yanında çentikli kırılganlığa yapılan üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjileri sonunda en yüksek değerlere 2 kg/m³ oranında ulaşılmıştır. Bu değer yalın betonun kırılma enerjisinden yaklaşık %30 daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç, bazalt lif takviyesinin betonun enerji yutma kapasitesini ve sünekliği artırdığını göstermektedir. Arslan (2016) aynı oranları kullandığı diğer çalışmada bazalt lif ile birlikte cam lif kullanmıştır. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjilerinde en yüksek artışın 1 kg/m³ cam lif içeren numunelerde, daha sonra 2 kg/m³ lif içeriğine sahip bazalt lif içeren numunelerde görüldüğünü raporlamıştır.

Ramadevi et al. (2017) yaptıkları çalışmalarında, betona katılan bazalt lif uzunluğunun ve hacimsel olarak lif içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda uzunlukları 16 mm, 19 mm ve 24 mm olan bazalt lifler %1, 2 ve 3 oranlarında betona ilave edilerek beton numuneler üretmişlerdir. Üretilen numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımlarını geleneksel beton ile karşılaştırmışlardır. Tüm numunelerde lif ilavesi ile birlikte basınç dayanımı artmıştır. En büyük basınç dayanımı 24 mm uzunluğa sahip %2 lif içeriğindeki beton numunede görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında yine en büyük artış 24 mm uzunluğa sahip %2 lif içeriğinde görülmüştür. Eğilme dayanımına bakıldığında yine en büyük artış (en/boy oranı 1,898 olan) 24 mm uzunluğunda %2 lif içeriğindeki numunede görülmüştür.

Ma and Zhu (2017) yaptıkları çalışmada, betona farklı oranlarda bazalt lif ve nano-SiO₂ (silika) ilavesinin betonun basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı gibi mekanik

özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda uzunlukları 9 mm olan lifler 2, 3, 4 ve 5 kg/m³ oranlarında kullanılırken, nano-silika ağırlıkça %0, 0,6, 1,2 ve 1,8 oranlarında kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda uygun miktarlarda kullanılan bazalt lif ve nano silika ilavesinin basınç ve yarmada çekme dayanımlarını referans numunesine göre artırdığı görülmüştür. Bazalt lifin 3 kg/m³ ve nano silikanın %1,2 oranlarında kullanılmaları basınç dayanımını %9,04 ve yarmada çekme dayanımını %17,42 oranında artırmıştır.

Günaydın ve Güçlüer (2018) çalışmalarında, bazalt lif katkılı betonların mekanik özellikleri araştırmışlardır. Çalışmalarında 24 mm uzunluğundaki bazalt lifler çimento hacminin %1 oranında betona ilave ederek betonun basınç ve yarmada çekme dayanımını incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda lif takviyesi ile birlikte basınç ve yarmada çekme dayanımlarında artış gözlenmiştir. 28 günlük kür sonunda basınç dayanımında %2.16 oranında artış görülürken, yarmada çekme dayanımında %16,46 oranında artış görülmüştür.

Khalid (2018) yaptığı çalışmasında, bazalt lifin beton numuneye katılmasıyla meydana gelen farklılıkları görmek amacıyla birbirinden farklı iki su/çimento oranına (0,47 ve 0,59) sahip hacimce %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 oranlarında 12 mm uzunluğunda bazalt lif takviyeli numuneler üretmiştir. Üretilen numunelerin basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve eğilme dayanımı gibi özelliklerini referans numunesine göre kıyaslamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda betonun basınç dayanımında artış görülmüştür. Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında en yüksek artış değerine 0.59 su/çimento oranına sahip %0,8 lif içeriğinde ulaşılmıştır. Lif ilavesi ile birlikte yarmada çekme dayanımında artış elde edilmiştir. En büyük değere 0,47 su/çimento oranına sahip %0,8 lif içerikli numunelerde ulaşılmıştır. Benzer şekilde eğilme dayanımında da lif içeren numunelerin lifsiz numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. 28 günlük kür sonunda en büyük değer 0,47 su/çimento oranına sahip %0,8 lif içeren numunede meydana gelmiştir.

Ateşli (2019) çalışmasında, hacimce %0,3, %0,4 ve %0,5 oranlarında bazalt lifli beton numuneler üreterek eğilme dayanımlarını karşılaştırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda lif ilavesinin betonun eğilme dayanımına olumlu sağladığını gözlemlemiş ve hacimsel olarak %0,5 bazalt lif içeren numunelerin diğer numunelere göre dayanımı yüksek çıkmıştır.

Yıldırım (2019) çalışmasında, silis dumanı, bazalt lif ve çelik lif içeren harçların mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada ağırlıkça %0, 10 ve 20 silis dumanı, hacimce %0,25, 0,5 ve 0,75 oranlarında 6 mm uzunluğunda çelik lif ve %0,3, %0,6 ve %0,9 oranlarında 12 mm uzunluğunda bazalt lifi içeren harç karışımı ve referans harç karışımı üretmiştir. Bu harçlara basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik testler yapılmıştır. Silis dumanı, çelik lif ve bazalt lif oranları arttıkça basınç dayanımı artmıştır. En yüksek basınç dayanımını

değeri %20 oranında silis dumanı, %0,75 oranında çelik lif ve %0,3 oranında bazalt lif içeren harç karışımında elde edilmiş ve bu değer referans numunesine göre %62,2 daha fazla basınç dayanımı değeri vermiştir. Çelik lif ve bazalt lif oranları arttıkça eğilme dayanımı artmıştır. En yüksek eğilme dayanımı değeri %0 oranında silis dumanı, %0,5 oranında çelik lif ve %0,9 oranında bazalt lif içeren harç karışımında elde edilmiş ve bu değer referans numunesine göre %27,8 daha fazla eğilme dayanımı değeri vermiştir.

Vavilla and Siempu (2019) çalışmalarında, bazalt liflerinin en/boy oranının ve dozajın yüksek dayanımlı (90 MPa) betonun özellikleri üzerindeki etkisi üzerine bir karşılaştırma yapmışlardır. Çalışmada en/boy oranları 230, 530 ve 600 olan 3,9 ve 12 mm uzunluğundaki bazalt lifler hacimce %0,1 ve %0,4 oranlarında kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda lifsiz numunelerle karşılaştırıldığında betona bazalt lif ilavesi genel olarak basınç dayanımını artırmıştır. En büyük artış 9 mm (530) uzunluğa sahip %0,1 lif içeriğinde görülmüştür. Lif ilavesinin yarmada çekme dayanımını önemli derecede etkisi olmamakla birlikte en büyük değer 9 mm (530) uzunluğa sahip %0,4 lif içeriğinde görülmüştür. Lif ilavesi eğilme dayanımını ekseriyetle artırmıştır. Referans betonu ile karşılaştırıldığında 9 mm (530) uzunluğa sahip %0,4 lif içeriğinde sahip numune %21 oranında eğilme dayanımını artırmıştır.

Algin et al. (2020) yaptıkları çalışmalarında, bazalt lif ile güçlendirilmiş betonun özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda 12 mm uzunluğunda bazalt lifler hacimce %0-0,2-0,4-0,6-0,8 oranlarında kullanılmıştır. Çalışmada sırasıyla 0,47 ve 0,59 su/çimento oranlarında numuneler hazırlanarak basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. Tüm numunelerde bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Her iki su/çimento oranı için bazalt lif oranı %0'dan % 0,8'e çıktıkça beton numunelerin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı değerleri kademeli olarak yükselmiştir. %0,8 bazalt lif katkılı numuneler için; basınç dayanımındaki artışlar sırasıyla 0.59 ve 0.47 su/çimento oranları için yaklaşık %16 ve %10'dur. Yarmada çekme dayanımı sonuçları, sırasıyla 0.59 ve 0.47 su/çimento oranları için yaklaşık % 34 ve % 26 artmıştır. Eğilme dayanımındaki artışlar, sırasıyla 0.59 ve 0.47 su/çimento oranları için yaklaşık %21 ve %17'dir. Betonların eğilme dayanımı performansı dikkate alındığında, % 0,8 bazalt lif kullanımının umut verici olduğu raporlanmıştır.

Zhau et al. (2020) çalışmasında, bazalt lif takviyeli betonun temel mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmasında 12 mm uzunluğundaki bazalt lifler hacimsel olarak %0-0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6 oranlarında betona ilave edilerek betonun basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Su/çimento oranı 0,42 olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda lif ilavesi basınç dayanımını genel olarak artırmakla birlikte en büyük artış %0,3 lif içeriğinde

görülmüştür. Eğilme dayanımında ise bazalt lif ilavesi tüm numunelerde eğilme dayanımını artırmakla beraber en büyük artış %0,4 lif içeriğinde görülmüştür. Bazalt lif ilavesi ile birlikte betonun kırılmasının gevrek kırılmadan sünek kırılmaya değiştiği ifade edilmiştir. Betona bazalt lif ilavesinin betonun performansını ve çatlak direncini artırdığı bildirilmiştir.

Bazalt lif ilavesinin geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen betonlarda iyileştirici etkisini inceleyen çalışmalar

Borhan (2012) tarafından yapılan çalışmada, bazalt lifleri hacimsel olarak %0, 0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında kullanarak lifli betonlar üretmişlerdir. Üretilen betonlarda ince agregalar olarak geri dönüşümlü atık cam kırıkları kullanılmıştır. Yapılan deneylerde basınç ve yarmada çekme dayanımlarında en yüksek değer %0,3 oranına sahip numunelerde görülmüştür. Borhan (2013) diğer çalışmasında bazalt lif oranının artmasına bağlı olarak ısı iletkenliğinin azaldığını raporlamıştır.

Katkhuda and Shatarat (2017) yaptıkları çalışmalarında, geri dönüştürülmüş agregalar ile üretilen betonlarda bazalt lifin iyileştirici etkisini araştırmışlardır. Bu amaç doğrultusunda bazalt lifleri hacimsel olarak %0,1, 0,3, 0,5, 1 ve 1,5 oranlarında ekleyerek beton numuneler üretmişlerdir. Üretilen betonlarda normal ve geri dönüştürülmüş agregalar kullanmışlardır. Üretilen tüm numunelerde bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Kullanılan agregalar tipine bakılmaksızın lif ilavesi basınç dayanımını artırmıştır. Her iki tür agregalar kullanımında da %1 lif içeriğinde en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Aynı şekilde lif oranının artmasına bağlı olarak yarmada çekme dayanımı da artmıştır. Tüm numunelerde en yüksek değer %1,5 lif içeriğinde görülmüştür. Yapılan deneyler bazalt lif kullanımının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bazalt lifin ilavesi ile birlikte tüm numuneler arasında eğilme dayanımının en yüksek değeri hacimsel olarak %1,5 lif içeriğinde görülmüştür. En yüksek değerler normal agregada daha sonrada geri dönüştürülmüş agregalarda görülmüştür. Bu çalışma ile geri dönüştürülmüş agregalarla üretilen betonlarda bazalt lif kullanımının iyileştirici etkisi gösterilmiştir.

Dong et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş agregalar kullanılarak üretilen betonlara bazalt lif ilavesinin betonun özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 15-29 mm uzunluğundaki lifler 0, 2 ve 4 kg/m³ oranlarında kullanılırken, geri dönüştürülmüş agregalar %0, 50 ve 100 oranlarında kullanılmıştır. Yapılan deneyler betonunun basınç ve çekme dayanımının, normal ve geri dönüştürülmüş agregalar arasında görülen nispeten zayıf yapışma mukavemeti nedeniyle azalma eğiliminde olduğunu tespit edilmiştir. Taramalı elektron mikroskop görüntülemeleri sonucunda bazalt lif eklenmesinin arayüz geçiş bölgesindeki mikro yapıyı iyileştirdiğini, bunun da beton numunelerindeki sünekliği ve

mukavemeti arttırdığını görülmüştür. Bu sonuçlara göre, üretilen betonun mekanik özellikleri artan geri dönüştürülmüş agrega oranı ile azalmasına rağmen, bazalt lifin optimum hacim oranında kullanılması ile arttırılabileceğini belirtilmiştir.

Alnahhal and Aljidda (2018) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş agrega kullanılarak üretilen betonlara makro bazalt lif ilavesinin betonun özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında 45 mm uzunluğundaki lifler hacimce %0, 0,5, 1 ve 1,5 oranlarında kullanılırken, geri dönüştürülmüş agregaları %0, 25, 50 ve 100 oranlarında kullanmışlardır. Betona farklı oranlarda makro bazalt lif ilavesi betonun basınç dayanımı üzerinde çok az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bunun yanında eğilme mukavemetinde önemli bir artış görülmüştür. Geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen tüm numunelerde bazalt lif oranının artmasına bağlı olarak eğilme dayanımında artış olduğu belirtilmiştir.

Bazalt lif ilavesinin kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalar

Salih et al. (2014) çalışmalarında, lif ile güçlendirilmiş kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda 25 mm uzunluğunda bazalt, 20 mm uzunluğunda çelik ve 30 mm uzunluğunda PVA (Polyvinyl Alcohol) lifleri 12 kg/m³ oranlarında kullanmışlardır. Üretilen tüm numunelerde lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Genel olarak liflerin ilavesi betonun basınç dayanımını artırmamıştır. Yarmada çekme dayanımlarında liflerin ilavesi ile beraber genel olarak artış görülmüştür. Portland çimentolu numunelerde lif ilavesi ile birlikte eğilme dayanımı genel olarak artmıştır. En büyük artış bazalt lif içeren numunede görülmüştür.

Shafiq et al. (2014) çalışmalarında, uzunluğu 25 mm olan bazalt lifler toplam bağlayıcı ağırlığının %1, 1,5 ve %2 oranında kullanmışlardır. Tüm numunelerde bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Yapılan tüm deney sonuçlarında lif oranının artmasına bağlı olarak basınç dayanımları azalmıştır. Yarmada çekme dayanımında ise lif ilavesi ile birlikte yarmada çekme dayanımı referans numunesine göre artmıştır. %100 Portland çimentolu numunelerde en büyük değer %2 oranında lif içeriğinde görülmüştür.

Algin ve Ozen (2018) çalışmalarında, lif ilave edilmiş kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda uzunluğu 3, 6, 12 ve 24 mm olan bazalt lifler toplam beton hacminin %0, %0,1, %0,3 ve %0,5 oranlarında kullanmışlardır. Üretilen beton numunelerde bazalt lif katkısının basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarına etkisi incelenmiştir. Tüm numunelerde bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda bazalt lif ilavesi betonun basınç dayanımını artırmıştır. En yüksek basınç dayanımına 28 günlük kür sonunda %0,1 lif oranına

sahip 12 mm uzunluğunda kullanılan lif numunelerde ulaşılmıştır. Yarmada çekme dayanımında ise genel olarak lif uzunluğunun ve oranının artmasına bağlı yarmada çekme dayanımı artmıştır. En büyük artış %0,5 lif içeriğine sahip 24 mm lif takviyeli numunelerde gözlenmiştir. Eğilme dayanımına bakıldığında yine en büyük artış 24 mm uzunluğunda %0,5 lif içeriğindeki numunede görülmüştür. Bu çalışma, daha uzun liflerin eğilme mukavemeti sonuçlarında iyileşme sağlayan daha güçlü köprüleme etkisi sağladığı fikrine uygundur.

Çelik and Bingöl (2020) çalışmasında, lif ile güçlendirilmiş kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu amaç çerçevesinde uzunlukları 12 mm olan bazalt, polipropilen ve cam lifler hacimsel olarak %0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 oranlarında betona ilave edilmiştir. Üretilen tüm numunelerde lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Tüm karışımlarında, artan lif içeriği ile basınç dayanımı azalmıştır. Her lif tipi için en yüksek basınç dayanımı değerleri % 0.15 lif içeriğinde elde edilmiştir. Bu lifler arasında en yüksek basınç dayanımı polipropilen lifli betonda görülmüştür. Referans numunesi ile karşılaştırıldığında lif içeriğindeki artışla beraber tüm numunelerin eğilme mukavemetinde iyileşme elde edilmiştir. Eğilme dayanımı en yüksek bazalt lif katkılı %0,20 lif içerikli numunede ölçülmüştür. Darbe direnci ve kırılma enerjisinin en yüksek değeri polipropilen lifli %0,30 lif içerikli numunelerde görülmüştür.

Bazalt lif ilavesinin polimer betonların mekanik özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalar

Dias and Thaumaturgo (2005) yaptıkları çalışmada, 45 mm uzunluğunda bazalt lif katkılı %0, 0,5 ve 1 hacim oranlarında normal ve geopolimer betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Her iki beton türünde de lif ilavesi basınç dayanımının azalmasına sebep olmuştur. Bazalt lifler, normal betonun yarmada çekme dayanımını ciddi anlamda etkilememesine rağmen polimer betonların yarmada çekme dayanımları hacimce %0,5 lif oranında kullanıldığında %34 oranında artırmıştır, hacimce %1 lif kullanıldığında ise %25 oranında artırmıştır. Eğilme dayanımlarında ise bazalt lif oranının artmasına bağlı olarak eğilme dayanımları da artmıştır. En yüksek artış %1 lif katkı numunelerde ölçülmüştür. Bu değer normal betonlarda %46 olurken, polimer betonlarda %31 değerinde ölçülmüştür. Numunelere ait yük-şekil değiştirme eğrileri çizilerek toklukların lif oranının artmasına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Lif içermeyen numunelerde ise maksimum yüke ulaşıldıktan sonra ani kırılma meydana gelmiştir. Lif içeren numunelerde ise maksimum yüke ulaşıldıktan sonra da şekil değiştirme devam etmiştir. Bu durum polimer betonlarda daha belirgin olmuştur.

Niaki et al. (2018) yaptıkları çalışmalarında, doğranmış bazalt liflerin polimer betonun mekanik mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Bu doğrultuda 6 mm uzunlukta bazalt lifler

ağırlıkça %0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5 değerlerinde kullanarak basınç, yarmada çekme ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ağırlıkça %2 bazalt lif ilave edilmesi sonucunda basınç mukavemetinde referans numunesine göre %10'luk, yarmada çekme dayanımında %35'e kadar bir iyileşme gözlenmiştir. Ağırlıkça %1,5 bazalt lif değerinde en iyi eğilme mukavemeti elde edilmiştir. %4,8'e kadar iyileşme elde edildiği ifade edilmiştir. SEM görüntülenmesi sonucunda lif ile polimer matrisi arasında iyi bir yapışma gözlemlendiği belirtilmiştir.

Bazalt lif ilavesinin donma çözülme, korozyon, aşınma, yüksek sıcaklık, alkali direnci gibi durabilite özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalar

Zhao et al. (2018) çalışmalarında, betona bazalt lif ilavesinin donma çözülme direnci üzerine etkisini incelemişlerdir. Liflerin eklenmesi ile beton içerisinde donma basıncını (hidrostatik basınç) azaltabilen zararsız gözeneklerin sayısının artırılacağı ve böylece donma çözülmenin neden olduğu hasar derecesinin azaltılabileceği düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda 18 mm uzunluğundaki bazalt lifler 0, 1, 1,5, 2 ve 2,5 kg/m³ oranlarında kullanmışlardır. Üretilen numuneler farklı donma çözülme döngülerine tabi tutulduktan sonra eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımında en iyi sonucu 2 kg/m³ oranında elde edilmiştir. Donma çözülme etkisi sonucunda eğilme dayanımı azalmasına rağmen, betona lif katılması referans numunesine göre eğilme dayanımının artmasını sağlamıştır.

Turan (2019) bu çalışmada, bazalt lifli betonun donma çözülme sonrası basınç dayanımı ve aşınmaya karşı direncini incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda beton numunelere 24 mm uzunluğunda bazalt lifler hacimce %0,3, %0,4 ve %0,5 oranlarında ekleyerek basınç ve aşınma deneyleri yapılmıştır. 28 günlük 5x5x5 cm boyutlu numuneler 25°C'de donma, +25°C'de çözülme deneyi uygulanmıştır. 50. donma çözülme devrinden sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda tüm lif içeriklerinde referans numunesine göre basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. En büyük artış %9 artış ile %0,4 oranlı bazalt lif numunede ölçülmüştür. Lif katkılı numunelere yapılan Böhme aşınma deneyinde ise lif eklenmesinin numunenin aşınma direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Referans numunesine göre en az aşınma %0,4 lif katkılı numunelerde görülmüştür. Elde edilen sonuçlar neticesinde; donma çözülme sonrası basınç dayanımının ve aşınmaya karşı direncin %0,4 oranında bazalt lif oranının kullanılması durumunda en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

Öğüt (2020) yaptığı çalışmada, bazalt lifin beton içerisinde bulunan donatının korozyonuna ve betonun mekanik özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Çalışmada referans beton ile birlikte %1, 2 ve 3 oranlarında lif kullanmıştır. Dayanıklılık ve mekanik deneyler için numuneler 28 gün kür havuzunda bekletilmişlerdir. Betonların basınç dayanımları

incelendiğinde lif ilavesinin dayanımları azalttığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanımı incelendiğinde sadece %1 bazalt lif katkılı beton serisinde dayanım artışı olduğu saptanmıştır. Bazalt lif ilavesinin eklenmesi genel olarak betonun eğilme dayanımını artırmakla birlikte en büyük dayanım %1 bazalt lif katkılı seride görülmüştür. Bazalt lif kullanılarak üretilen betonların korozyona karşı daha dayanıklı oldukları görülmüştür. Korozyon deneylerinde en iyi sonuçlar %2 bazalt lif katkılı oran ile üretilen betonlardan elde edilmiştir.

Kabay (2014) tarafından yapılan çalışmada, bazalt lif içeren betonların mekanik özelliklerini incelemiş, 0,60 ve 0,45 su/çimento oranı ile üretilen normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonlar üretmiştir. Bazalt lifler karışımında 12 mm ve 24 mm olmak üzere iki farklı boyutlarda, 2 kg/m³ ve 4 kg/m³ olmak üzere iki farklı içerikte kullanılmıştır. Üretilen bu numunelerin referans numunesine göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve aşınma direnci gibi özellikleri kıyaslamıştır. Deneyler sonucunda betona lif takviyesinin betonun basınç dayanımının su/çimento oranları 0,45 ve 0,60 değerlerine göre sırasıyla %8-18 ve %4-9 oranlarında azalma olduğu belirtilmiştir. Eğilme dayanımında ise lif katkılı numunelerin referans numunesine kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir. Eğilme dayanımında en büyük artış 24 mm uzunluğa sahip, 0,60 su/çimento oranı ile 4 kg/m³ lif içerikli numunede gözlemlenmiştir. Betonun kırılma enerjisi bazalt lif kullanılarak önemli ölçüde geliştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 24 mm uzunluğa sahip lifler 4 kg/m³ kullanıldığında su/çimento oranı 0,45 olan numunelerin kırılma enerjileri %126 artarken, su/çimento oranı 0,60 olan numunelerde bu değer %140 olduğu görülmüştür. Kırılma enerjisindeki en büyük artış 24 mm uzunluğa sahip, 0,60 su/çimento oranı ile 4 kg/m³ lif içerikli numunede gözlemlenmiştir. Genel anlamda lif içeriği ve lif boyundaki artış, aşınma direncine katkı sağlamıştır. Bazalt lifler betona eklenmesi ile numunelerin aşınmasında %2 ile %18 arasında azalma sağlamıştır.

Jiang et al. (2016) yaptıkları çalışmada, bazalt lif takviyeli çimento harçlarının basınç, eğilme ve aşınma dayanımları araştırmışlardır. Bu doğrultuda 20 mm uzunlukta bazalt lifler ağırlıkça 0,6 kg/m³, 1,6 kg/m³ ve 2,6 kg/m³ oranlarında kullanmışlardır. Tüm numunelerde lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Yapılan deneylere göre 28 günlük kür sonunda betonun basınç ve eğilme dayanımları lif oranının artmasına bağlı olarak artmıştır. En büyük değerler 2,6 kg/m³ değerlerinde elde edilmiştir. Bazalt lifli numunelerin aşınma dirençleri kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında lif oranının artmasıyla aşınma direncinin arttığı görülmüştür. Bunun sonucu olarak en düşük aşınma değerine 2,6 kg/m³ oranında ulaşılmıştır.

Grzeszczyk et al. (2020) yaptıkları çalışmalarında, lif ile güçlendirilmiş reaktif pudra betonunun bazı mekanik ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda 12 mm uzunluğa sahip bazalt lifleri ağırlıkça 2, 3, 6, 8 ve 10 kg/m³ oranlarında kullanmışlardır. Tüm numunelerde bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliği azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda lif içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı azalmıştır. Bu sebeple en düşük basınç dayanımı en yüksek lif içeriğinde görülmüştür. Eğilme dayanımında ise lif ilavesi eğilme dayanımını genel olarak artırmakla birlikte en büyük artış 10 kg/m³ lif içeriğinde görülmüştür. Bazalt lif kullanılarak üretilen betonlarda lif içeriğinin artmasına bağlı olarak aşınmaya karşı direncin azaldığı görülmüştür. Makalede, aşınma direnci ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişkili bulunduğu, eğilme dayanımı ile bulunmadığı ifade edilmiştir.

Gültekin (2017) yaptığı çalışmada, cam ve bazalt lif içeren kendiliğinden yerleşen beton numuneler üretmiştir. Üretilen numunelere uzunlukları 6, 12 ve 24 mm olan lifler sırasıyla 2 kg/m³, 4 kg/m³ değerlerinden ilave edilerek kür havuzunda 28 gün bekletilmiştir. Daha sonra basınç, yarmada çekme, eğilme ve aşınma dayanımları tespit edilmiştir. Bunların yanında çentikli kiriş numuneleri aracılığıyla kırılma enerjileri tespit edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı ile karışımdaki liflerin parametrik değişimi arasında da anlamlı bir ilişki kurmanın zor olması ile birlikte en yüksek yarmada çekme dayanımı 12 mm uzunluğunda ve 4 kg/m³ miktarında cam lif içeren numunede görülmüştür. Yapılan basınç dayanımı deneylerinde genel anlamda basınç değerler artmakla birlikte lif miktarı ve boyunun basınç dayanımı ile anlamlı bir ilişki içerisinde olmadığı görülmektedir. Lif içeren tüm numuneler referanstan büyük eğilme dayanımı gözlemlenmiştir. Lif miktarının metreküpte 2 kg'dan 4 kg'a çıkmasının eğilme dayanımı değerlerini azalttığı görülmektedir. Hem 2 hem de 4 kg'lık lif ilavelerinde en yüksek dayanım değerleri 12 mm uzunluğunda cam lifi içeren numunelerde görülmektedir. Çentikli kiriş deneyi sonucunda lif ilavesinin kırılma enerjisini olumlu etkide bulunduğu görülmüş ve en yüksek kırılma enerjisi 24 mm uzunluğa sahip 4 kg/m³ cam lif içeren numune de ulaşılmıştır. Lif miktarının ve boyunun artması ile beton hacmindeki kayıplar azalmaktadır. Elde edilen aşınmada hacim kayıpları sonuçlarına göre aşınmaya karşı en yüksek direnci 24 mm uzunluğunda ve 4 kg/m³ miktarında bazalt lif içeren karışımların gösterdiği söylenebilir. Aynı boy ve aynı miktarda cam ve bazalt lif içeren karışımlar karşılaştırıldığında bazalt lifin aşınma direncine katkısının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sim et al. (2005) tarafından yapılan çalışmada, bazalt liflerin alkali çözeltilere ve yüksek sıcaklıklara karşı direnci karbon ve cam liflerle karşılaştırarak deneysel olarak incelemiştir. Bazalt liflerin alkali reaksiyonlara karşı gösterdiği direnci cam ve karbon liflerle

karşılaştırılmıştır. Alkali çözeltisine 7 ve 28 günlük daldırma süreleri sonunda SEM görüntülerine dayalı olarak bazalt ve cam lifler hacimlerini önemli ölçüde kaybederken, karbon liflerde kayda değer hacim kaybı gözlenmemiştir. Çalışmada ayrıca lifler hızlandırılmış yapay hava şartlarında 1200°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Bazalt lif hacim bütünlüğünü korumuştur. Dayanımını %90 oranında muhafaza etmiştir. Diğer liflerin ise hacim bütünlüklerini koruyamadıkları görülmüştür. Lifler arasında sadece bazalt liflerin hacim bütünlüklerini koruyabildiği ve dayanımlarını %90 oranında muhafaza ettiği görülmüştür. Bunun sonucunda bazalt liflerin yüksek sıcaklıklara karşı daha dirençli olduğu sonucuna varılmıştır.

Kocabeyoğlu (2016) yaptığı çalışmada, bazalt lif takviye edilmiş betonların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada %0, %0,2, %0,4 ve %0,6 oranlarında 12 mm uzunluğunda bazalt lif içeren numuneler üretilmiştir. Standart küre tabi tutulan harç numuneler 3 saat süre ile 300 °C ve 600 °C sıcaklıkta fırında bekletildikten sonra 24 saat beklemek üzere oda sıcaklığında kendiliğinden ve su içerisinde ani soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra referans numunesine göre eğilme dayanımı özellikleri kıyaslamıştır. Sıcaklık etkisinden sonra normal soğumaya bırakılan numunelerin eğilme dayanımında %12,6-45,8 aralığında azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde sıcaklık sonrası ani soğumaya bırakılan numunelerin eğilme dayanımlarında %26,8-56,9 aralığında azalma tespit edilmiştir. Bütün sıcaklık etkileri ve soğuma tipleri için numunelerin eğilme dayanımlarındaki en büyük kayıp bazalt lifsiz numunelerde, en az kayıp ise; bütün sıcaklıklarda ve her bir soğuma tipi için ise %0,6 bazalt lif içeren numunede elde edilmiştir. %0,2, %0,4 ve 0,6 oranlarında bazalt lif içeren ve sıcaklığa maruz bırakılmayan numunelerin bazalt lifsiz numunelere göre eğilme dayanımındaki artışlar sırasıyla %9,54, %17,06, %19,63 olarak elde edilmiştir.

Zych and Krasodomski (2012) yaptıkları çalışmada, bazalt lif takviyeli çimento harçlarının basınç dayanımı, eğilme mukavemeti ve alkali ortamdaki bazalt lif direncini araştırmışlardır. Çalışmalarında 5 mm ve 12 mm uzunluklarındaki bazalt lifleri 0,4, 1 ve 2 kg/m³ oranlarında kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda 28 günlük lif takviyeli harçlarda basınç dayanımı düşmüştür. 5 mm lif basınç dayanımını yaklaşık % 5 azaltırken, 12 mm lif basınç dayanımını yaklaşık % 0-15 azaltmıştır. Eğilme dayanımında ise 28 günlük lif takviyeli harçlarda lif uzunluğun eğilme dayanımını artırmada ki etkisi görülmüştür. 5 mm lifler dayanımı yaklaşık % 10-15 artırırken, 12 mm lifler dayanımı yaklaşık % 20 arttırmıştır. Bazalt lif direncinin alkali ortamda incelenmesi için lifler 10 gün boyunca 60 °C'de %10 sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde bekletilmiş daha sonrada mikroskopik gözlemler ve ED XRF spektrometre analizi ile incelenmişlerdir. Deneyler sonucunda 5 mm ve 12 mm liflerde görülen

kütle kaybı sırasıyla %14 ve %15 olarak belirlenmiş. Bazalt liflerin bu hali ile alkali ortama karşı dayanımının olmadığı belirtilmiştir.

Yapılan literatür taramasında konu ile ilgili çalışmalarda, genelde lif uzunluğu 12 mm (Fenu at al. 2014; Jiang at al. 2014; Zhau at al. 2020) ve 24 mm (Ramadevi et al. 2017; Arslan 2017; Günaydın ve Güçlüer 2018) olan bazalt liflerin kullanıldığı görülmüştür. 3 mm uzunluğa sahip bazalt liflerin kullanıldığı çalışma sayısı ise (Algin and Ozen 2018; Vavilla at al. 2019) oldukça sınırlıdır.

Önceki çalışmaların birçoğunda (örneğin; Ketan and Kulkarni 2012; Shafiq at al. 2014; Fenu et al. 2016; Ma and Zhu 2017; Arslan 2017; Vavilla et al. 2019) üretilen numunelerin basınç Yarma ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bazı çalışmalarda ise; donma çözülme (Zhao at al. 2018), korozyon (Öğüt 2020), yüksek sıcaklık (Kocabeyoğlu 2016) ve alkali direnci (Sim at al. 2005) incelenmiştir. Aşınma direncinin etkisinin incelendiği çalışma sayısı ise sınırlıdır (Kabay 2014; Gültekin 2017; Turan 2019). 3 mm uzunluğa sahip liflerin aşınma direncine etkisinin incelendiği çalışmaya ise rastlanmamıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada yararlanılan çimento, agrega, su, kimyasal ve mineral katkı maddeleri ve bazalt lifler ile deneylerde kullanılan aletlerin özellikleri hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

Çimento

Deneylerde Aşkale Çimento Fabrikası (Erzurum) tarafından TS EN 197-1 (Anonim 2012a) standartına göre üretilen CEM II / A-M (P-LL) 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. Tablolarda belirtilen analizler üretici firma tarafından yapılmıştır.

Tablo 5. Çimentonun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Sonuçlar (%)	Fiziksel Karakteristikler	Sonuçlar (%)
Toplam SiO ₂	17,6	45 mikron elekte kalıntı(%)	6,81
Al ₂ O ₃	4,45	90 mikron elekte kalıntı(%)	-
Fe ₂ O ₃	3,08	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4403
CaO	60,02	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,01
MgO	2,29	Priz Süresi (Vicat)	156
SO ₃	2,67	Dakika Başlangıç	
Ölçülemeyen	0,54	Priz Süresi (Vicat)	204
Kızdırma Kaybı	8,49	Dakika Bitiş	
Na ₂ O	0,22	Su İhtiyacı(%)	29,8
K ₂ O	0,63	Hacim Genleşmesi(mm)	0,5
CI	0,01	Basınç Dayanımı 1. gün	-
Toplam	100	Basınç Dayanımı 2. gün	27,46
Serbest CaO	0,69	Basınç Dayanımı 7. gün	-
Toplam Katkı	19,9	Basınç Dayanımı 28. gün	51,03

Agrega

Deneylerde, iri agregalar olarak kırma taş (4/8, 8/16 ve 16/25 mm), ince agregalar olarak dere kumu (0/2 mm ve 2/4 mm) filler malzeme olarak mermer tozu kullanılmıştır. Bu malzemeler Balsoy Beton A.Ş. (Erzurum)’den temin edilmiştir. Segregasyon olmaması için iri agregaların hacminin %5’i kadar atık mermer tozu karışıma ilave edilmiştir.



Şekil 17. Agregalar

Agrega içerisindeki taş-unu miktarının betonun basınç dayanımını etkilediğini ve bunun sonucu olarak kırma taş agregalar ile üretilen betonlarda agregaların yıkanması gerekebileceği ifade edilmiştir (Özgan 2005). Agregalar yıkanıp kurutulduktan sonra nem durumuna göre düzeltmeler yapılarak sonra beton karışım hesabı yapılmıştır.

Karışım suyu

Beton üretiminde TS EN 1008 (Anonim 2003) Standardı kapsamında olan, zararlı madde ihtiva etmeyen içilebilir özellik gösteren Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

Bazalt lif

Bu çalışmada kullanılan bazalt lifler, SPİNTEX firmasından temin edilmiştir. Farklı uzunluklarda monofilament liflerdir. Lifler 13-25 μ çapında olup 3 mm, 12 mm ve 24 mm boyundadırlar. Liflerin betona homojen karışması ve çimento hamuruna iyi yapışmasını sağlamak için, el ile ayrıştırılmasını sağlayarak karışıma katılmıştır. Bazalt liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 6’da görülmüşü Şekil 18’de verilmiştir.

Tablo 6. Liflerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Uzunluk (mm)	Çap (μ m)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Uzama (%)
3, 12 ve 24	13-25	2,8	89	3,15



Şekil 18. Bazalt lif görünüşü

Süper akışkanlaştırıcı katkı

Süper akışkanlaştırıcı olarak CHRYSO firmasından temin edilen TS EN 934-2+A1 (Anonim 2014) standardına uygun Fluid Optima 208 katkı kullanılmıştır. Karışıma çimento ağırlığının %1,2' si oranında Süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Rengi yeşil olan süper akışkanlaştırıcının yoğunluğu ise; $1,045 \pm 0,02 \text{ gr/cm}^3$ dür.

Metot

Bu kısımda agregaların özelliklerini tespit etmek için uygulanan deneyler, karışım hesapları, numunelerin üretilerek kodlanması taze beton ve sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler anlatılmıştır

Deneyisel çalışma

Bazalt liflerle güçlendirilmiş beton numuneler üretilerek lif uzunluklarının ve hacimsel oranlarının betonun mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda %0, %0,025, %0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20 hacim oranlarında 3 mm, 12 mm ve 24 mm olmak üzere üç farklı uzunlukta bazalt lifli betonlar üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin referans numunesine göre basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve aşınma direnci gibi özellikleri kıyaslanmıştır.

Agrega deneyleri

Agregalardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzemenin tane yoğunluğu, yüzey nemi ve su emme özellikleri tespit edilmiştir.

Yoğunluk, su emme, yüzey nemi deneyi

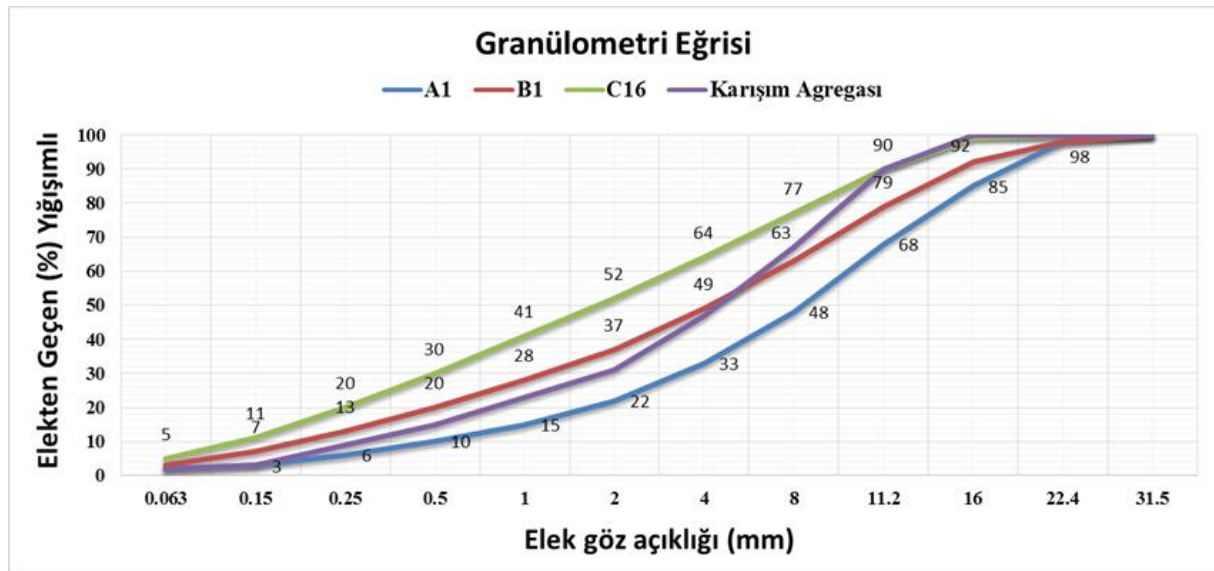
Çalışmada kullanılacak olan agregalar; 0–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm ve 16–25 mm olmak üzere beş farklı tane sınıfına ayrılmıştır. Kullanılan agregaların tane yoğunluğu, su emme ve yüzey nemi şeklindeki fiziksel özellik deneyleri TS EN 1097-6 (Anonim 2013) Standardına göre yapılmış ve değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Agregaların Tane Yoğunlukları, Su Emme ve Yüzey Nemi Oranları

Kullanılan Agregalar	Tane Yoğunluğu (gr/cm ³)(D.K.Y.)	Su Emme (%)	Deney Anındaki Yüzey Nemi (%)
16-25	2,69	1,36	-0,65
8-16	2,68	1,59	-0,89
4-8	2,67	1,82	-0,89
2-4	2,65	1,95	-0,92
0-2	2,64	2,17	-0,66

Agrega karışım oranları ve granülometrileri

Malzemelerin granülometrisi, TS 802 (Anonim 2016a)’da agregalar için önerilen standart eğrilerin (A16/C16) arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Buna göre 0/2= %31; 2/4= %16; 4/8= %20; 8/16= %23; 16/25= %10 olacak şekilde her bir tane sınıfından agregalar alınmıştır. Agregalar tane sınıflarının oranları belirlenirken ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Karışıma ait granülometri eğrisi Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Granülometri eğrisi

Beton karışım hesapları

Beton karışım hesabı TS 802 (Anonim 2016a) standardına göre yapılmıştır. Betonun üretimi ise TS EN 206: A1 (Anonim 2017) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 1m³ beton için gerekli malzeme miktarları ve taze beton özellikleri Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Karışım Hesapları

Numune Kodu	Çimento (kg)	Su (kg)	Süper Akışkan laştırıcı (kg)	Hava (lt)	Filler (kg)	0-2 (kg)	2-4 (kg)	4-8 (kg)	8-16 (kg)	16-25 (kg)	Bazalt Lif (%)	Görünüm Oranları (l/d)
BF0/0	400	181,4	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0	160
BF3/0,025	400	181,4	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,025	160
BF3/0,05	400	181,4	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,05	160
BF3/0,10	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,10	160
BF3/0,15	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,15	160
BF3/0,20	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,20	160
BF12/0,025	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,025	630
BF12/0,05	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,05	630
BF12/0,10	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,10	630
BF12/0,15	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,15	630
BF12/0,20	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,20	630
BF24/0,025	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,025	1263
BF24/0,05	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,05	1263
BF24/0,10	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,10	1263
BF24/0,15	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,15	1263
BF24/0,20	400	181,41	4,80	22,5	90,50	510,26	264,65	331,14	381,70	165,94	0,20	1263

Parametreler, Seviyeleri ve Kodlama

Karışımlarda su/çimento oranı (0,46), bağlayıcı dozajı (400 kg/m³), filler oranı (%5) ve süperakışkanlaştırıcı miktarı (%1,2) sabit tutulmuştur. Lif uzunluğu ve lif oranı ise parametre olarak seçilmiştir.

Lif uzunlukları 3, 12 ve 24 mm olan ve üç farklı l/d oranlı (160, 630 ve 1263) bazalt lifler altı farklı hacimsel oranlarda %0, %0,025, %0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20 incelenmiştir.

Belirtilen şekilde seçilen parametre ve seviyelerden hareketle üretilen 16 farklı karışım Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. Karışımları Oluşturan Parametreler ve Seviyeleri

Lif Oranı (%)	Lif Uzunlukları		
	3mm	12 mm	24 mm
0	BF0/0	BF0/0	BF0/0
0,025	BF3/0,025	BF12/0,025	BF24/0,025
0,05	BF3/0,05	BF12/0,05	BF24/0,05
0,10	BF3/0,10	BF12/0,10	BF24/0,10
0,15	BF3/0,15	BF12/0,15	BF24/0,15
0,20	BF3/0,20	BF12/0,20	BF24/0,20

Deneyler esnasında numune kodlamalarında aşağıdaki yol izlenmiştir: ilk iki karakter lifi, ondan sonraki karakter bazalt lif uzunluğunu, en son karakter ise lif oranını (yüzde olarak) göstermektedir. Buna göre örneğin;

BF3/0,025: lif uzunluğu 3 mm ve lif oranı %0,025 olan betonu göstermektedir.

BF12/0,10: lif uzunluğu 12 mm ve lif oranı %0,10 olan betonu göstermektedir.

BF24/0,20: lif uzunluğu 24 mm ve lif oranı %0,20 olan betonu göstermektedir.

Numunelerin üretimi

TS 802 (Anonim 2016a) standardına uygun olarak belirlenen 1 g hassasiyetli terazide tartılmıştır. Beton üretiminde laboratuvar tipi, düşey eksenli, yaklaşık 60 dm³ tambur hacimli betoniyer kullanılmıştır. Malzeme yerleştirilmeden önce betoniyerin iç yüzeyleri ve kanatları temizlenerek hafif nemlendirilmiştir.

Betoniyere sırası ile iri agrega ve ince agrega konulmuştur. Bazalt lifler el ile ayrıştırılarak betoniyerin üst kısmında bulunan açıklıktan karışıma yavaş yavaş ilave edilerek karışımın homojen olması sağlanmıştır. Beton karışımının betoniyerde karıştırıldıktan sonraki görünümü Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. Beton karışımının betoniyerde karıştırıldıktan sonraki görünümü

Hazırlanan karışımdan taze betonun özelliklerini temsil edecek şekilde TS EN 12350-1 (Anonim 2019a) standartında belirtilen numune alma yöntemleri uygulanarak taze beton numuneleri alınmıştır. Üretilen betonlar 150x150x150 cm boyutlu küp, 100x200 mm boyutlu silindirik ve 70x70x280 mm kalıplara yerleştirilmiştir. Numunenin kalıplardan kolaylıkla çıkarılabilmesi için, kalıpların içi ince motor yağı ile yağlanmıştır. Her 1/3 yükseklikte 25 defa şişlemeden sonra kalıpların yüzeyleri çelik mala ile düzeltilmiştir. Beton numunelerin nem kayıplarını önlemek için naylon örtü ile üzeri kapatılmış ve 24 saat kalıplarda bekletilmiştir. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletildikten sonra numunelerin kalıpları sökülerek TS EN 12390-2 (Anonim 2019b) standartında belirtilen şartları sağlayan kür havuzuna yerleştirilmişlerdir. Kür havuzu, numuneler yerleştirilmeden önce su ile doldurularak, kirece doymun hale getirilmiş ve sıcaklığının 23 ± 2 °C’de sabit olması sağlanmıştır.

Taze beton deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi

Taze betonda birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 (Anonim 2019c)’ ya göre yapılmıştır. Taze betonun birim ağırlığını bulabilmek için beton, hacmi bilinen bir kap içerisine üç eşit kademede doldurulmuştur. Her kademedeki beton 16 mm çaplı bir çelik çubuk ile 25’er kez şişlenmiştir. Hacmi bilinen bir kap içerisine yerleştirilen ve sıkıştırma işlemi yapılan betonun yüzeyi düzeltildikten sonra, kap içerisindeki betonun net ağırlığı bulunmuştur. Beton net ağırlığının kabın iç hacmine bölünmesi yolu ile birim ağırlık değeri hesaplanmıştır.

Sertleşmiş beton deneyleri

Basınç dayanımının belirlenmesi

Basınç dayanımı, betonda ilk olarak bakılan özelliklerden bir tanesidir. Basınç dayanımını etkileyen faktörler betonun özelliklerini de etkilemekte, basınç dayanımı betonun kalitesi hakkında genel bilgi vermektedir (Binici vd. 2000). Basınç dayanımı deneyi; 90. günde, TS-EN-12390-1 (Anonim 2013a)'e uygun 150x150x150 mm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Deney öncesinde numune boyutları 1 mm hassasiyetle ölçülerek yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır. Numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında TS EN 12390-3 (Anonim 2019d)'te belirtilen yöntem uygulanmıştır.

Basınç dayanımı deneyinde ELE marka 300 ton kapasiteli hidrolik press kullanılmıştır. Tüm gruplar için sabit 0,4 MPa/s yükleme hızı kullanılmıştır. Basınç dayanımına maruz kalmış küp numunenin görüntüsü Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Basınç dayanımına maruz kalmış küp numune

Yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Betonun çekme dayanımının belirlenmesinde genellikle iki geleneksel yöntem kullanılır. Bunlar silindirlerin yarmada çekme dayanımları ile kirişlerin eğilmede çekme dayanımlarıdır. Silindirin yaygın ve rutin olarak imal edilmiş bir numune olması ve test prosedürünün basit olmasından dolayı yarmada çekme testi betonun çekme dayanımını karakterize etmek için kullanılan popüler bir yöntemdir (Gerges et al. 2015). Yarmada çekme deneyi; 90. günde, TS-EN-12390-1 (Anonim 2013)'e uygun 100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Yük uygulanacak noktada ezilmenin olmaması ve yükün eşit dağılması için plakalar kullanılmıştır. Numunelerin yarmada çekme

dayanımlarının hesaplanmasında TS EN 12390-6 (Anonim 2010)'da belirtilen yöntem uygulanmıştır.

Yarmada çekme dayanımı deneyinde ELE marka 300 ton kapasiteli hidrolik press kullanılmıştır. Tüm gruplar için sabit 0,04 MPa/s yükleme hızı kullanılmıştır. Yarmada çekme dayanımına maruz kalmış silindir numune Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 22. Yarmada çekme dayanımına maruz kalmış silindir numune

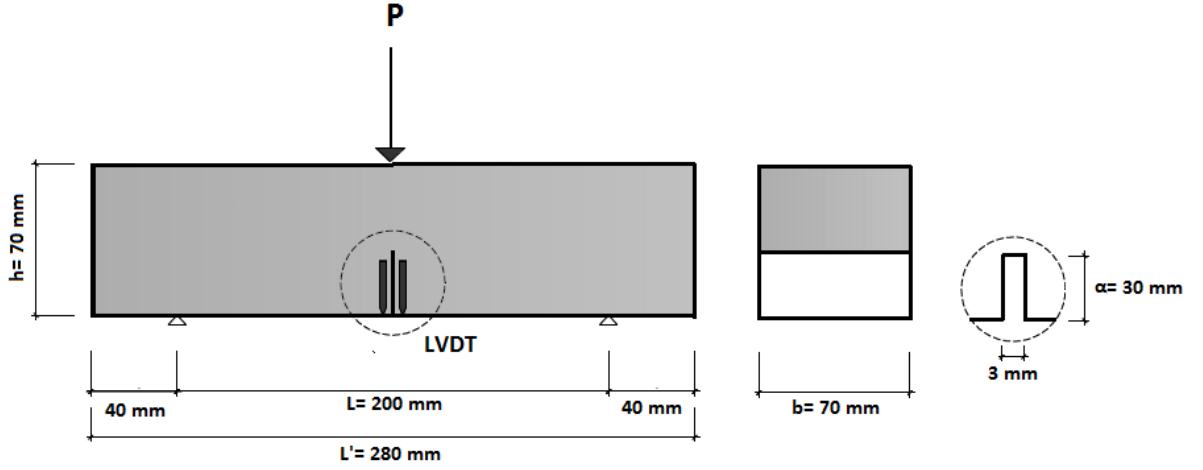
Üç noktalı eğilme deneyi

Eğilme dayanımı deneyi, 90. günde, 70 x 70 x 280 mm boyutundaki kiriş numuneler üzerinde yapılmıştır. Kırılmanın kontrollü olabilmesi için numunelerin ortasına elmas testere ile 30 mm'lik çentikler açılarak etkin kesit alanı 70x40 olarak belirlenmiştir. Daha sonra üç noktalı eğilme deneyi TS EN 12390-5 (Anonim 2019e) standartına göre uygulanmıştır. Prizmatik numunelere mermer testeresi ile çentik açılması Şekil 23'te gösterilmiştir.

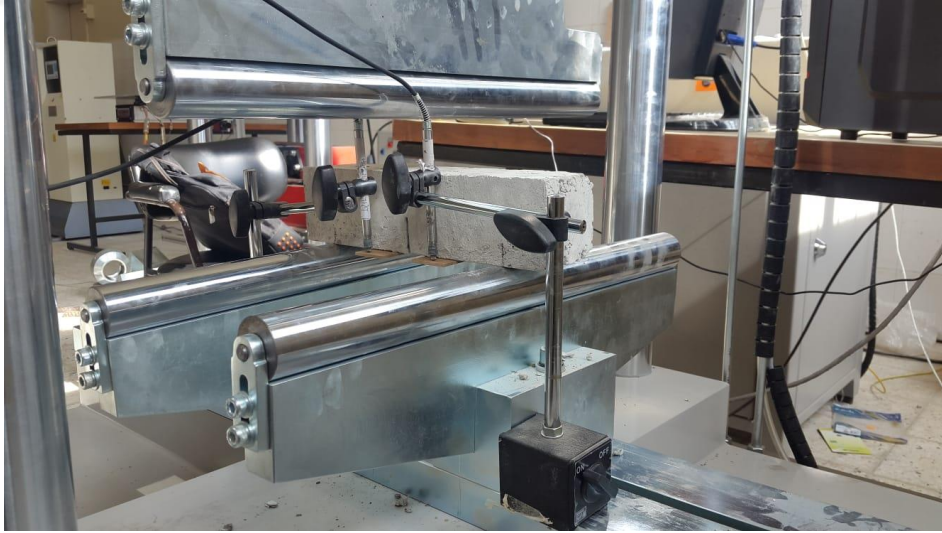


Şekil 23. Prizmatik numunelere mermer testeresi ile çentik açılması

Üç noktalı eğilme deneyinde yer değiştirme kontrollü yükleme makinası kullanıldı. Deneylerden önce kiriş numunelerin alt yüzeylerine levhalar yapıştırıldı. İki adet LVDT sehimi ölçmek amacıyla bu levhalara yerleştirilerek yükleme hızı 0,3 mm/dk olarak seçilmiştir. Elde edilen yük ve sehim değerleri ile her bir numuneye ait yük-sehim eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen eğilme dayanımı sonuçları Araştırma Bulguları bölümünde verilmiş ve lif boyunun ve miktarının betonun eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Eğilme dayanımı deney düzeneği Şekil 24 ve Şekil 25’te gösterilmektedir.



Şekil 24. Eğilme dayanımı deney düzeneği



Şekil 25. Eğilme dayanımı deney düzeneği

Eğilme dayanımının belirlenmesi

Numunelerin eğilme dayanımları üç noktalı eğilme deneyinden aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmiştir.

$$F_{net} = \frac{3PL}{2b(h - \alpha)^2} \quad (1)$$

Burada F_{net} , net eğilme dayanımını [N/mm^2]; P , kırılma yükünü [N]; L , Mesnetler arası mesafeyi [mm]; b : Kiriş genişliğini [mm]; h : Kiriş yüksekliğini [mm]; α : Çentik derinliğini [mm] temsil etmektedir.

Kırılma enerjisinin belirlenmesi

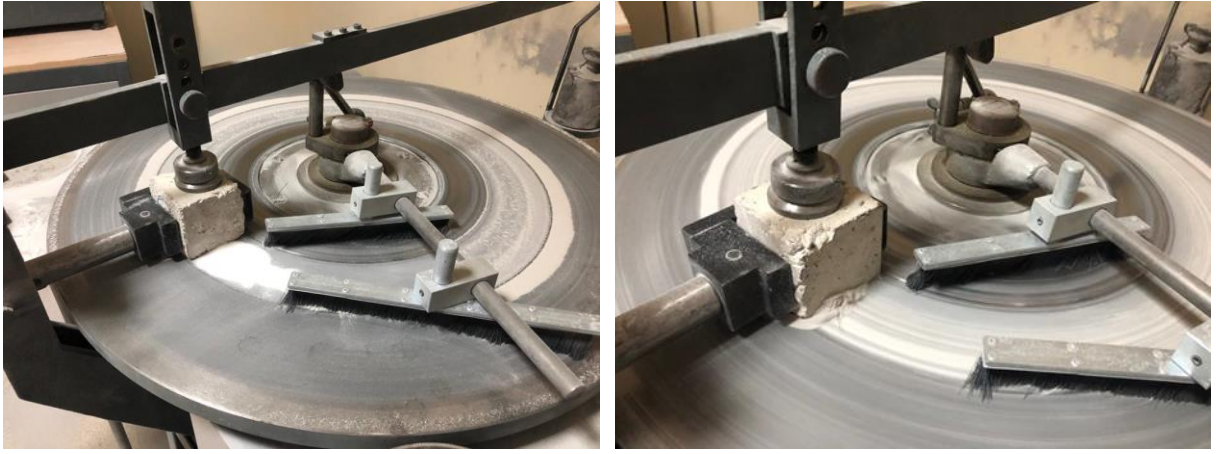
Kırılma enerjisi, eğilme yükü altındaki malzemenin kırılarak birden çok parçaya ayrılması için gerekli enerji toplamının, gelişen çatlaktaki yüzey enerjisine dönüşmesidir (Gümüş 2016). Lifsiz ve lifli serilerin kırılma enerjileri yük – sehim eğrilerinin altında kalan alan kullanılarak ve Kırılma Mekaniği Teknik Komitesi'nce (RILEM 50-FMC, 1985) önerilen denklem yardımıyla kırılma enerjileri belirlenmiştir.

$$GF = \frac{W_o + mg\delta o}{A} = \frac{W_o + mg\frac{L}{L'}\delta o}{b(h - \alpha)} \quad (2)$$

Burada GF , kırılma enerjisini [N/m]; W_o , yük – sehim eğrisi altında kalan alanı [$N.m$]; m : numune ağırlığını [kg]; g : yerçekimi ivmesini [9.81 m/s^2]; δo : göçme anında açıklık ortasında son sehim değerini [m]; L : Mesnetler arası mesafeyi [m]; L' : Numune boyunu [m]; A : Etkin kesit alanını (kırılma alanı) [m^2]; b : Kiriş enini [m]; h : Kiriş yüksekliğini [m]; α : Çentik Derinliğini [m] temsil etmektedir.

Aşınma direncinin belirlenmesi

Aşınma direncinin belirlenmesi için kenar uzunluğu ($71 \pm 1,5$) mm olan küp numuneler kullanılmıştır. Numunelerin aşınmaya karşı dirençlerinin ölçülmesinde TS 2824 EN 1338 (Anonim 2005)'de belirtilen yöntem uygulanmıştır. Bu yöntem için Ankara Türk Standartları Enstitüsü Yapı Malzemeleri laboratuvarında Böhme (Yatay) Aşındırma Cihazı kullanılmıştır. Aşınma direnci deney düzeneği Şekil 26'da verilmiştir.

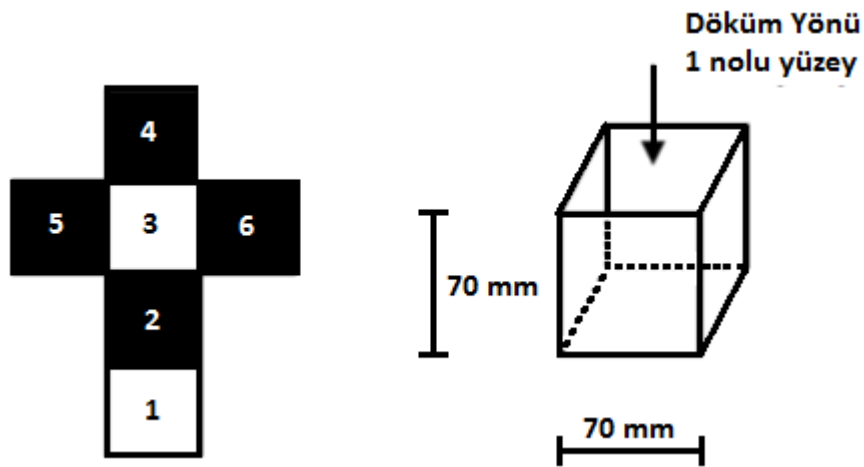


Şekil 26. Aşınma direnci deney düzeneği

Bu cihazda 30 ± 1 devir/dakika hızda dönmesini sağlayan yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırma diskisi bulunmaktadır. Bu aşındırma diskisi yaklaşık olarak 750 mm çapındadır. Disk devir sayısını gösteren sayaca ve 22 devirde cihazı otomatik olarak durduran sisteme sahiptir. Çelik manivela aracılığı ile numuneye 294 ± 3 N yük uygulanır.

Laboratuvarda 70x70x280 mm boyutlarındaki kalıplara daha önce belirtilen standartlara uygun olarak dökülen harç bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak 90 günlük kür ortamında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numuneler elmas testere ile $71 \pm 1,5$ mm ölçülerinde kesilmiştir.

Daha sonra numune yüzeyleri 1'den 6'ya kadar numaralandırılmıştır. Numaralandırmada 1 ve 3 no'lu yüzeyler alt ve üst yüzeylerdir. 2, 4, 5 ve 6 numaralı siyah yüzeyler ise yan yüzeylerdir. Şekil 27'de gösterildiği gibi numune alt ve üst yüzeylerinden değil, kalıp yan yüzeylerinden herhangi birinden aşındırılmıştır. Böylece karışım oranlarının etkisi ön plana çıkarılmaya çalışılmıştır.



Şekil 27. Aşınma direnci deney numunesi

TS 2824 EN 1338 (Anonim 2005)'de belirtilen deney yöntemine göre numune, deney başlamadan önce ve her dört devirden sonra 0,1 g doğrulukla tartılır. Deney izine standart 20 g

standart aşındırıcı yerleştirilir. Numune tutucusuna temas yüzü ize gelecek şekilde yerleştirilen numune aksel olarak 294 ± 3 N ile yüklenir. Disk, iz üzerindeki aşındırıcının, numunenin genişliğinin belirlendiği alan üzerine eşit olarak yayılmasına dikkat edilerek hareket ettirilir. Her bir 22 dönüş bir çevrim adı verilir ve numuneye, toplamda 16 çevrim uygulanır. Her çevrimden sonra disk ve temas yüzü temizlenir. Numune 90° döndürülerek ize, yeni aşındırıcı konulur. Numunelerin hacim kayıpları aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmiştir.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_r} \quad (3)$$

Burada ΔV , 16 çevrimden sonra hacim kaybını [mm^3]; Δm , 16 çevrimden sonra kütle kaybını [g]; ρ_r , Numunenin yoğunluğunu [g/mm^3] temsil etmektedir

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Taze Beton Deneyi

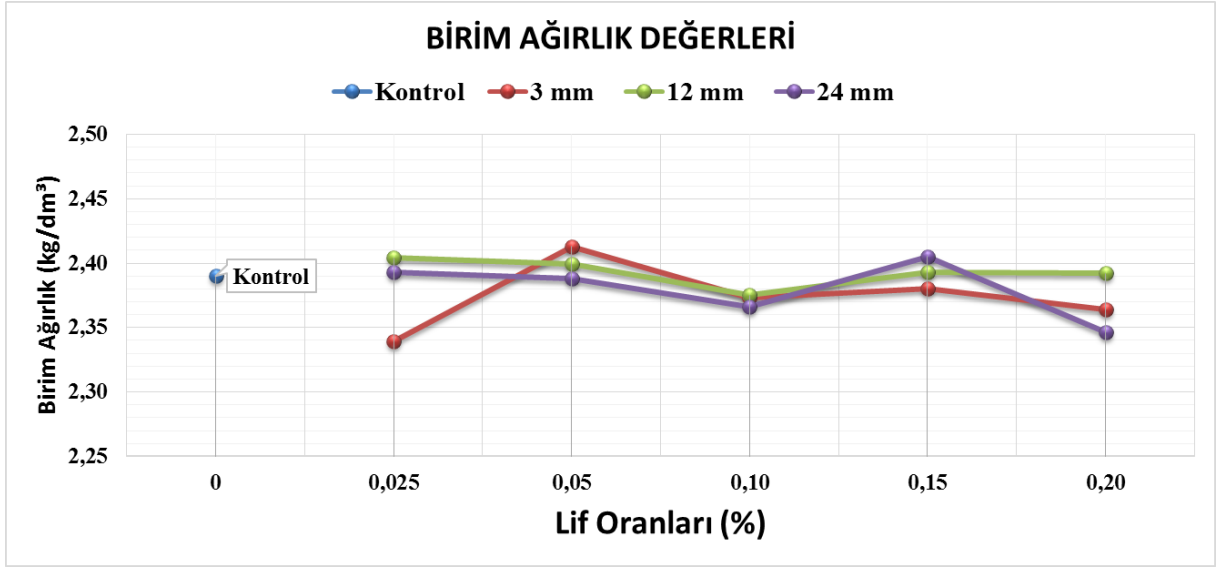
Birim ağırlık deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Birim ağırlık beton içerisinde bulunan boşluk miktarına ve betonu oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Bunun yanında karışım hesabı, hava miktarı, sıkıştırma işlemi ve agrega tane dağılımı (Granülometri) da birim ağırlığı etkiler (Erdoğan 2010).

TS EN 206’da verilen tanıma göre; normal ağırlıklı betonun yoğunluğu 2000-2600 kg/m³ değerleri arasındadır (Anonim 2021). Uygulanma yöntemi kısım 3’te anlatılan birim ağırlık deneyinin sonuçları aşağıdaki Tablo 10’da ve Şekil 28’de gösterilmiştir.

Tablo 10. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Birim Ağırlık Değerleri

Numune Kodu	Numune Birim Ağırlıkları (kg/dm ³)	Değişim (%)
BF0/0	2,394	0
BF3/0,025	2,339	-2,30
BF3/0,05	2,413	0,79
BF3/0,10	2,373	-0,88
BF3/0,15	2,380	-0,58
BF3/0,20	2,364	-1,25
BF12/0,025	2,404	0,42
BF12/0,05	2,399	0,21
BF12/0,10	2,375	-0,79
BF12/0,15	2,393	-0,04
BF12/0,20	2,392	-0,08
BF24/0,025	2,393	-0,04
BF24/0,05	2,388	-0,25
BF24/0,10	2,366	-1,17
BF24/0,15	2,405	0,46
BF24/0,20	2,346	-2,01



Şekil 28. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların birim ağırlık değerleri

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; genel olarak betona ilave edilen farklı oranlarda ve boylarda bazalt lifler betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olmuşlardır. Beton içine bazalt lif ilavesinin betonun işlenebilirliğini azalttığı yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Ma et al. 2010).

Bunun en büyük sebebi, liflerin ilavesi sonucunda topaklaşma olma olasılığıdır. Bu durum betonun kıvamının azalmasına neden olmaktadır. Kıvamdaki azalma sonucunda lifli betonun kalıba yerleşmesi kısmen de olsa zorlaşmaktadır. Bu durum betonun boşluklu olmasına sebep olmaktadır. Kontrol betonuna göre daha çok boşluklu olan betonun birim ağırlık değeri de daha düşük olur (Topçu vd. 2017).

Birim ağırlık değerleri arasında maksimum düşüş BF3/0,025 kodlu numunede % -2,30 oranında hesaplanmıştır. Bunun dışında maksimum düşüş BF24/0,20 kodlu numunede %-2,01 oranında olmuştur. Genel manada bakıldığında literatürde belirtildiği gibi lif oranının ve uzunluğunun artmasına bağlı olarak birim ağırlık değerleri de azalmıştır. Fakat seçilen oranlar doğrultusunda görünüm oranının artışı ile net bir değişim olduğunu söylemek zordur. Burada görülen azalma değeri ihmal edilebilecek kadar küçük miktardadır. Bu duruma liflerin karıştırılma esnasında topaklaşmadan homojene yakın yayılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

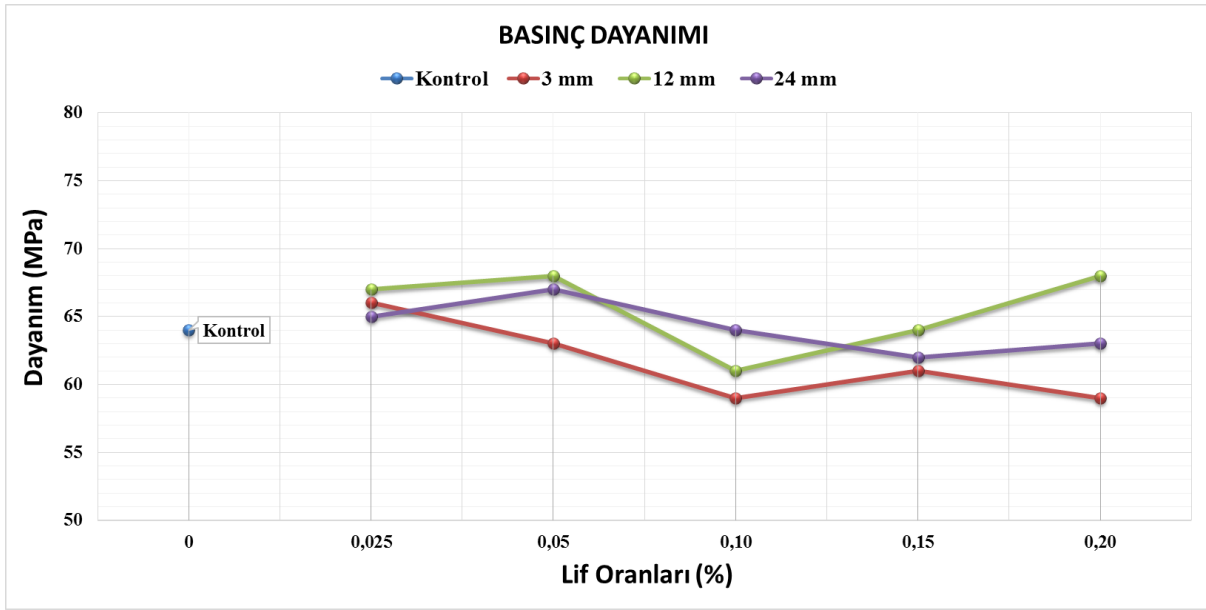
Sertleşmiş Beton Deneyleri

Basınç dayanımı deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Uygulanma yöntemi kısım 3'te anlatılan basınç dayanımı deneyinin sonuçları aşağıdaki Tablo 11'de ve Şekil 29'da gösterilmiştir.

Tablo 11. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Basınç Dayanımı Değerleri

Numune Kodu	Numune Basınç Dayanımları (MPa)	Değişim (%)
BF0/0	64	0
BF3/0,025	66	3,13
BF3/0,05	63	-1,56
BF3/0,10	59	-7,81
BF3/0,15	61	-4,69
BF3/0,20	59	-7,81
BF12/0,025	67	4,69
BF12/0,05	68	6,25
BF12/0,10	61	-4,69
BF12/0,15	64	0,00
BF12/0,20	68	6,25
BF24/0,025	65	1,56
BF24/0,05	67	4,69
BF24/0,10	64	0,00
BF24/0,15	62	-3,13
BF24/0,20	63	-1,56



Şekil 29. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların basınç dayanımı değerleri

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; genel olarak betona ilave edilen farklı oranlarda ve boylarda bazalt liflerin betonun basınç dayanımında değişikliğe sebep olduğu görülmektedir. Lif oranının artmasına bağlı olarak basınç dayanımında azalmanın görülmesi yapılan çalışma ile uyumlu bulunmaktadır (Borhan 2012).

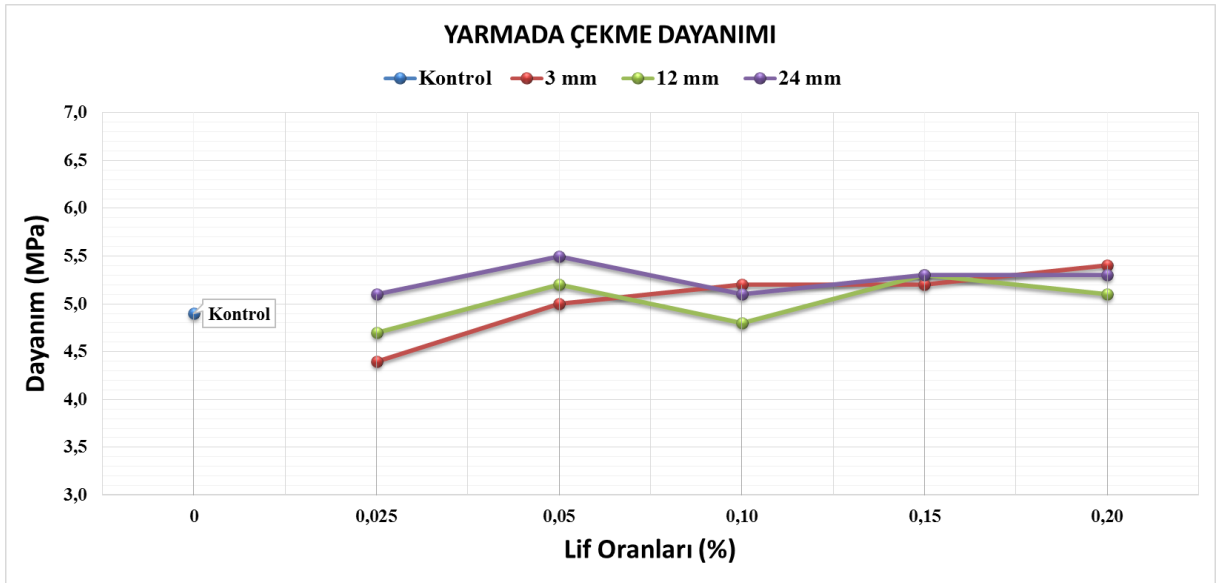
Kontrol betonuna göre basınç dayanımlarında en yüksek artış 12 mm uzunluğa sahip lif içeriklerinde görülmüştür. Sırasıyla %0,025 lif içeriğinde %4,69 artış görülürken, %0,05 ve %0,20 lif içeriklerinde %6,25 artış görülmüştür. 3 mm uzunluğa sahip lifler arasında %0,025 lif içeriğinde %3,13 artış görülürken, 24 mm uzunluğa sahip lifler arasında sırasıyla %0,025 lif içeriğinde %1,56 artış, %0,05 lif içeriğinde 4,69 artış görülmüştür. Fiore ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında bazalt lif oranının artmasına bağlı olarak basınç dayanımında azalma gözlemlemişlerdir (Fiore et al. 2015) Çalışmamızda bu durum lif uzunluğundan bağımsız olarak %0.05 ve üstündeki lif içeriklerinde kullanılması durumunda genel olarak betonun basınç dayanımının azaldığını göstermektedir. Literatür çalışmasında 12 ve 22 mm uzunluğundaki bazalt liflerin 90 günlük basınç dayanım değerlerinde en yüksek dayanımın %0.05 lif içeriğinde elde edildiği bildirilmiştir. (Jiang et al. 2014) Seçilen parametreler göz önünde tutulduğunda basınç dayanımı değerinin görünüm oranından bağımsız olduğu ve genel itibari ile %0,05 oranı ve üzerindeki değerlerde kullanılmaması gerektiğini gösterirken, artan görünüm oranı ile basınç dayanımı arasında net bir ilişki olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçların bazalt liflerin oranlarının artmasına bağlı olarak bir araya toplanmaları, çimento hamurunda boşluk bırakmaları ve suyu kendi üstlerinde tutmaları sonucunda çimentonun hidratasyonu için gerekli olan suya ulaşamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Uygulanma yöntemi kısım 3'te anlatılan yarmada çekme dayanımı deneyinin sonuçları aşağıdaki Tablo 12'de ve Şekil 30'da gösterilmiştir.

Tablo 12. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Yarmada Çekme Dayanımı Değerleri

Numune Kodu	Numune Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)	Değişim (%)
BF0/0	4,9	0
BF3/0,025	4,4	-10,20
BF3/0,05	5,0	2,04
BF3/0,10	5,2	6,12
BF3/0,15	5,2	6,12
BF3/0,20	5,4	10,20
BF12/0,025	4,7	-4,08
BF12/0,05	5,2	6,12
BF12/0,10	4,8	-2,04
BF12/0,15	5,3	8,16
BF12/0,20	5,1	4,08
BF24/0,025	5,1	4,08
BF24/0,05	5,5	12,24
BF24/0,10	5,1	4,08
BF24/0,15	5,3	8,16
BF24/0,20	5,3	8,16



Şekil 30. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların yarmada çekme dayanımı değerleri

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; betona ilave edilen bazalt liflerin betonun yarmada çekme dayanımına olumlu katkıda bulundukları görülmektedir. Lif uzunluğunun artmasına bağlı olarak yarmada çekme dayanımının artması yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Ramadevi et al. 2017).

Bazalt liflerin betona ilavesi ile birlikte yarmada çekme dayanımlarında %13'e varan artışlar elde edilmiştir. Kontrol betonuna göre yarmada çekme dayanımında en yüksek artış 24 mm uzunluğa sahip % 0,05 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. 3 mm uzunluğa sahip lifler arasında BF3/0,025 grubu dışında diğer gruplarda dayanım artışı görülmüş olup en yüksek artış %0,20 lif içeriğinde %10,20 oranında elde edilmiştir. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında BF12/0,025 ve BF12/0,10 grupları dışında bazalt liflerin ilavesi yarmada çekme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek artış %0,15 lif içeriğinde %8,16 oranında olmuştur. Jiang ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarda bazalt lif ilavesinin yarmada çekme dayanımını artırdığı bilinmekle birlikte (Jiang et al. 2014) yarmada çekme dayanımı için de %0,05 oranın iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunun yanında 3 mm uzunluğundaki liflerin %0,05 ve üstündeki hacim oranlarında dayanımı olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Genel itibariyle lifler çekme dayanımının artmasında önemli rol üstlenmişlerdir. Bu durum liflerin çatlak oluşumunu azaltması ve oluşan gerilmeleri karşılayabilmesinin sonucudur.

Görünüm oranları ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde görünüm oranının artmasına bağlı olarak yarmada çekme dayanımının arttığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak en büyük yarmada çekme dayanımı değerine en yüksek görünüm oranı değerinde (1263) ulaşıldığı görülmektedir. Görünüm oranı 160 olan lifler arasında en yüksek

değer %0,20 lif içeriğinde elde edilirken, görünüm oranı 630 olan lifler arasında ise en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde elde edilmiştir.

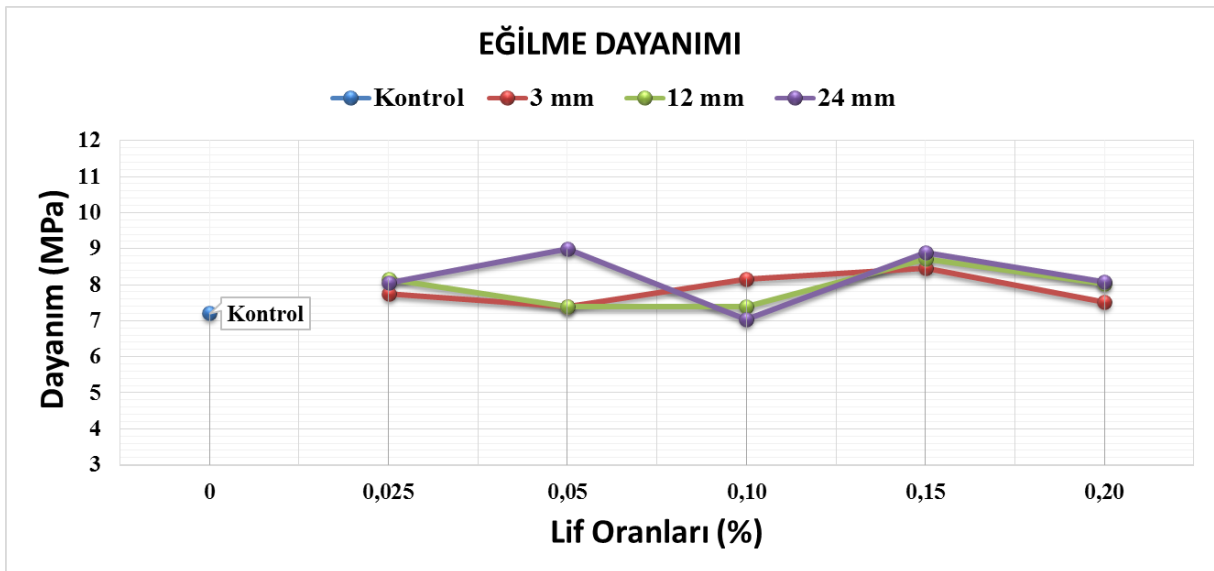
Üç noktalı eğilme deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Eğilme dayanımı sonuçları ve değerlendirilmesi

Uygulanma yöntemi kısım 3'te anlatılan eğilmede çekme dayanımı deneyinin sonuçları aşağıdaki Tablo 13'te ve Şekil 31'de gösterilmiştir.

Tablo 13. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Eğilme Dayanımı Değerleri

Numune Kodu	Numune Eğilme Dayanımları (MPa)	Değişim (%)
BF0/0	7,19	0
BF3/0,025	7,74	7,63
BF3/0,05	7,38	2,61
BF3/0,10	8,15	13,34
BF3/0,15	8,46	17,53
BF3/0,20	7,52	4,53
BF12/0,025	8,17	13,51
BF12/0,05	7,39	2,65
BF12/0,10	7,39	2,65
BF12/0,15	8,72	21,27
BF12/0,20	8,03	11,57
BF24/0,025	8,04	11,80
BF24/0,05	8,99	24,91
BF24/0,10	7,03	-2,32
BF24/0,15	8,90	23,64
BF24/0,20	8,09	12,40



Şekil 31. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların eğilme dayanımı değerleri

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; betona ilave edilen bazalt liflerin betonun eğilmede çekme dayanımına olumlu yönde katkıda bulunduğu görülmektedir. Beton içine bazalt lif ilavesinin betonun eğilme dayanımını artırması yapılan çalışmalarla uyumludur (Vavilla ve ark 2019)

Bazalt liflerin betona ilavesi ile birlikte betonun eğilme dayanımında %25'e varan artışlar elde edilmiştir. 24 mm uzunluğa sahip %0.10 lif içeriği dışında tüm gruplarda bazalt lif ilavesi betonun eğilmede çekme dayanımını artırmıştır. Kontrol betonuna göre eğilmede çekme dayanımında en yüksek artış 24 mm uzunluğa sahip %0,05 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Bu değer dışında en büyük artış değeri yine 24 mm uzunluğa sahip lifler arasında görülmüş olup %0,15 lif içeriğinde elde edilmiştir. 3 mm uzunluğa sahip lifler arasında en yüksek eğilmede çekme değeri %0,15 lif içeriğinde ve %17,53 oranında elde edilmiştir. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında ise en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde ve %21,27 oranında görülmüştür. Genel itibariyle uzun lifler eğilme dayanımının artmasında önemli rol üstlenmişlerdir. Bu durum uzun liflerin güçlü köprüleme etkisiyle eğilme mukavemetini artırdığının göstergesidir.

Görünüm oranları ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde genel olarak görünüm oranının artması ile eğilmede çekme dayanımının arttığı görülmektedir. Yarmada çekme dayanımına benzer şekilde en büyük eğilme dayanımı değerine 1263 görünüm oranına sahip grupta ulaşılmıştır. Görünüm oranı 160 olan lifler arasında en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde elde edilirken, görünüm oranı 630 olan lifler arasında da benzer şekilde en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde elde edilmiştir.

Kırılma enerjisi sonuçları ve değerlendirilmesi

Üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen veriler ile her bir numuneye ait yük-sehim eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler kullanılarak kırılma enerjileri ve sehim değerleri elde edilmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen her numuneye ait grafikler Ek 1’de verilmiştir.

3 mm uzunluğa sahip bazalt liflerin kırılma enerjileri ve sehim değerleri aşağıdaki Tablo 14 ve 15’te ve Şekil 32’de gösterilmiştir.

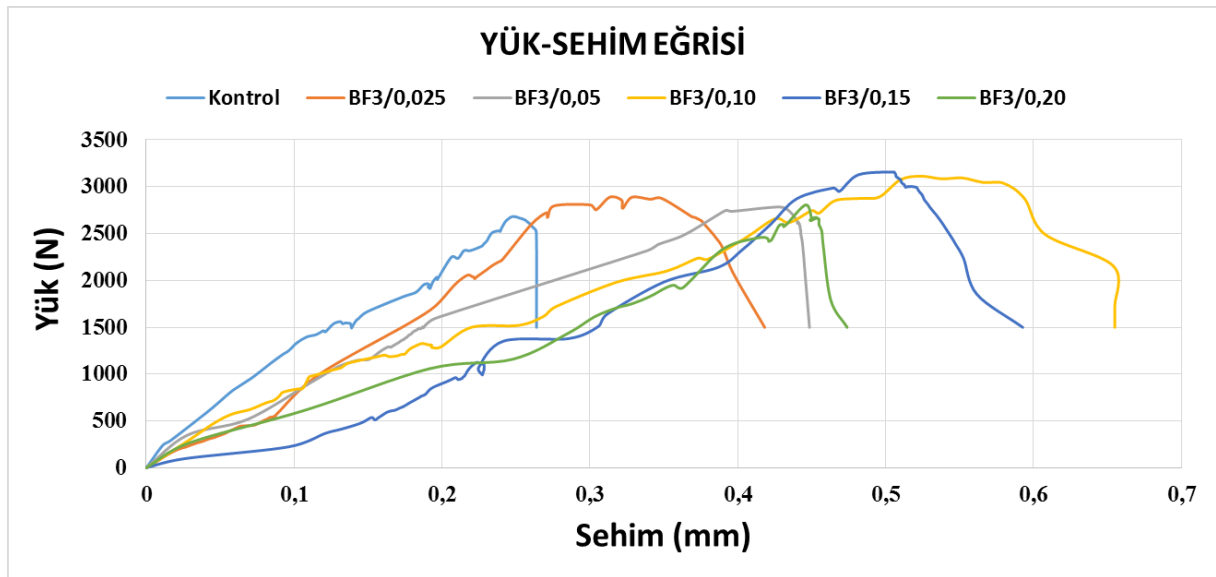
Tablo 14. 3 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri

Gruplar	Kontrol	BF3/0,025	BF3/0,05	BF3/0,10	BF3/0,15	BF3/0,20
Kırılma Enerjileri Değeri	478	695	747	1237	952	622
% Değişim	-	45,40	56,28	158,79	99,16	30,13

Tablo 15. 3 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Sehim Değerleri

Gruplar	Kontrol	BF3/0,025	BF3/0,05	BF3/0,10	BF3/0,15	BF3/0,20
Sehim Değerleri	0,26	0,42	0,45	0,66	0,59	0,47
% Değişim	-	61,54	73,08	153,85	126,92	80,77

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; betona ilave edilen bazalt liflerin betonun kırılma enerjisine olumlu katkıda bulunduğu görülmektedir. Lif miktarının artmasına bağlı olarak kırılma enerjisinin artmasının benzer sonucu yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Kabay 2014).



Şekil 32. 3 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonlara ait yük-sehim eğrileri

Şekilde verilen yük sehim eğrilerine göre 3 mm bazalt lif ilavesi numunenin sehim yapabilme yeteneğini artırmıştır. Kontrol betonuna göre sehim değerinde en yüksek artış % 10 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Benzer şekilde kırılma enerjisinde de en yüksek artış %10 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Bu oranın üzerindeki değerlerde kırılma enerjisi azalmıştır.

Bazalt lifli beton numunelerin kırılma enerjileri incelendiğinde görünüm oranı ile lif miktarı arasında bir ilişki görülmüştür. Burada lif miktarı artmasıyla kırılma enerjisinde artmış daha sonra azalmıştır. Görünüm oranı 160 olan numunelerde en yüksek kırılma enerjisi değerine %0,10 lif içeriklerinde ulaşılmıştır.

12 mm uzunluğa sahip bazalt liflerin kırılma enerjileri ve sehim değerleri aşağıdaki Tablo 16 ve 17’de ve Şekil 33’te gösterilmiştir.

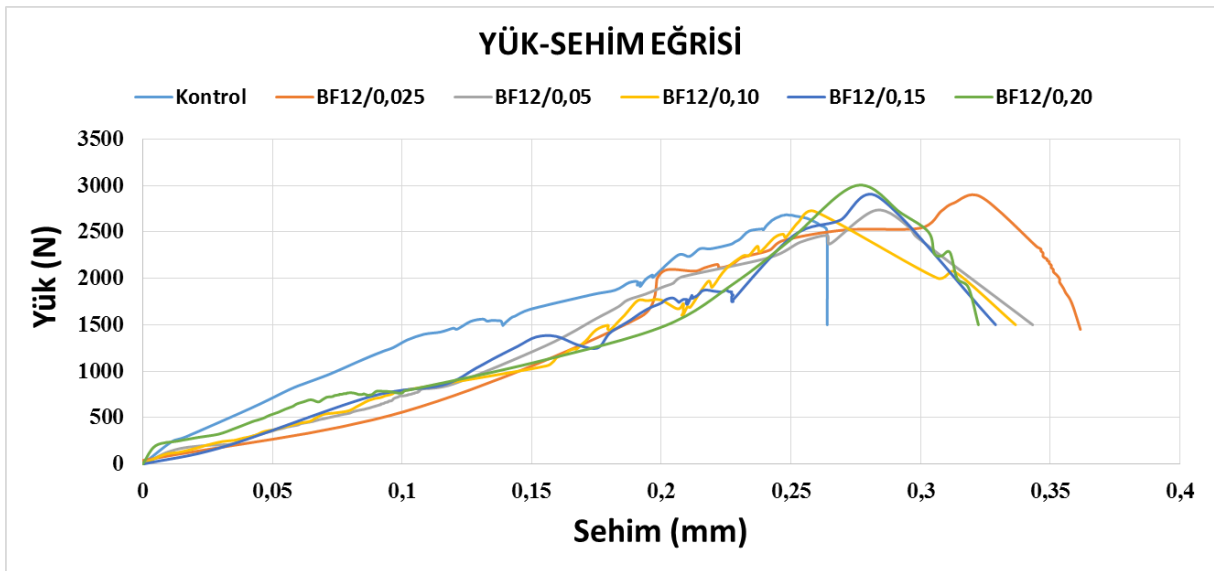
Tablo 16. 12 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri

Gruplar	Kontrol	BF12/0,025	BF12/0,05	BF12/0,10	BF12/0,15	BF12/0,20
Kırılma Enerjileri Değeri	478	1094	741	815	904	803
% Değişim	-	128,87	55,02	70,50	89,12	67,99

Tablo 17. 12 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Sehim Değerleri

Gruplar	Kontrol	BF12/0,025	BF12/0,05	BF12/0,10	BF12/0,15	BF12/0,20
Sehim Değerleri	0,26	0,36	0,34	0,34	0,33	0,32
% Değişim	-	38,46	30,77	30,77	26,92	23,08

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; betona ilave edilen farklı oranlarda bazalt liflerin betonun enerji yutabilme kapasitesine olumlu katkıda bulunduğu görülmektedir. Lif oranının artmasına bağlı olarak kırılma enerjisinde artışın görülmesi yapılan çalışmalar ile uyumlu bulunmaktadır (Arslan 2016).



Şekil 33. 12 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonlara ait yük-sehim eğrileri

Şekilde verilen yük- sehim eğrilerine göre 12 mm bazalt lif ilavesi numunenin sehim yapabilme yeteneğini artırmıştır. Kontrol betonuna göre sehim değerinde en yüksek artış % 0,025 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Benzer şekilde kırılma enerjisinde de en yüksek artış % 0,025 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Bu oranın üzerindeki değerlerde kırılma enerjisi azalmıştır.

Burada görünüm oranı ile lif miktarı arasında belli bir ilişki bulunamamıştır. Görünüm oranı 630 olan numunelerde en yüksek kırılma enerjisine %0,025 lif içeriğinde ulaşılmıştır.

24 mm uzunluğa sahip bazalt liflerin kırılma enerjileri ve sehim değerleri aşağıdaki Tablo 18 ve 19’da ve Şekil 34’te gösterilmiştir.

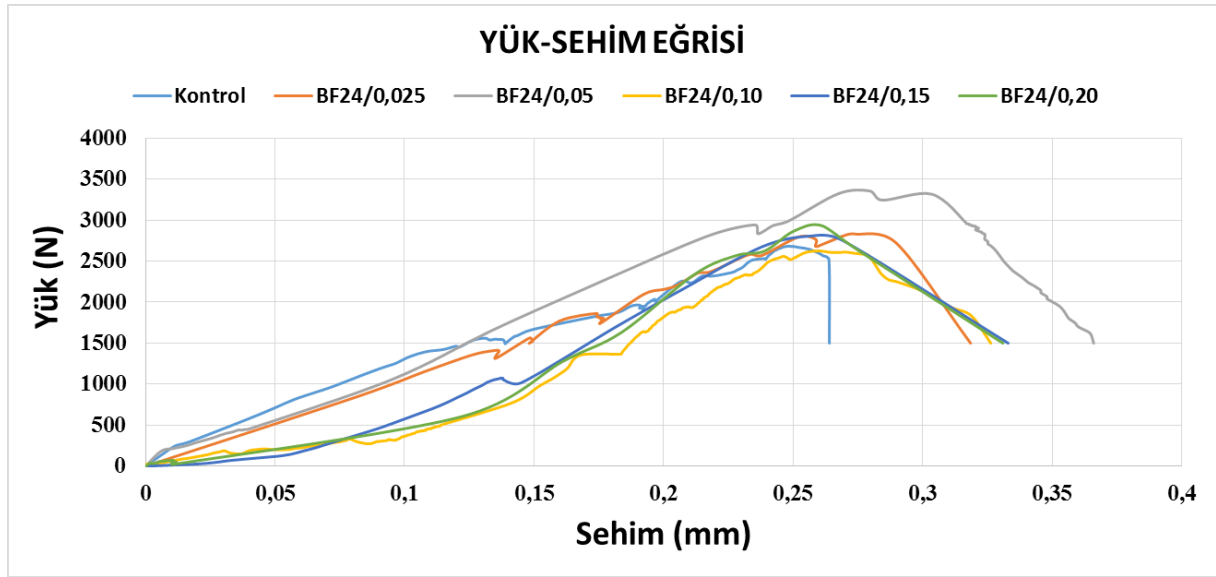
Tablo 18. 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri

Gruplar	Kontrol	BF24/0,025	BF24/0,05	BF24/0,10	BF24/0,15	BF24/0,20
Kırılma Enerjileri Değeri	478	598	741	494	524	531
% Değişim	-	25,10	55,02	3,35	9,62	11,09

Tablo 19. 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Sehim Değerleri

Gruplar	Kontrol	BF24/0,025	BF24/0,05	BF24/0,10	BF24/0,15	BF24/0,20
Sehim Değerleri	0,26	0,32	0,37	0,33	0,33	0,33
% Değişim		23,08	42,31	26,92	26,92	26,92

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; betona ilave edilen bazalt liflerin betonun sünekliliğine olumlu yönde katkıda bulunduğu görülmektedir. Beton içine bazalt lif ilavesinin betonun kırılma enerjisini artırdığı yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Çelik 2020).



Şekil 34. 24 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonlara ait yük-sehim eğrileri

Şekilde verilen yük- sehim eğrilerine göre 24 mm bazalt lif ilavesi numunenin sehim yapabilme yeteneğini artırmıştır. Kontrol betonuna göre sehim değerinde en yüksek artış % 0,05 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Benzer şekilde kırılma enerjisinde de en yüksek artış % 0,05 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Bu oranın üzerindeki değerlerde kırılma enerjisi azalmıştır.

Görünüm oranı 1263 olan numunelerde en yüksek kırılma enerjisi %0,05 lif içeriğinde görülmüştür. Lif miktarının artmasıyla kırılma enerjisi artmış daha sonra azalmıştır.

3 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluğa sahip bazalt lifli betonların kırılma enerjisi değerleri Tablo 20’de verilmiştir.

Tablo 20. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Kırılma Enerjileri Değerleri

Numune Kodu	Kırılma Enerjisi	Değişim (%)
BF0/0	478	0
BF3/0,025	695	45,40
BF3/0,05	747	56,28
BF3/0,10	1237	158,79
BF3/0,15	952	99,16
BF3/0,20	622	30,13
BF12/0,025	1094	128,87
BF12/0,05	741	55,02
BF12/0,10	815	70,50
BF12/0,15	904	89,12
BF12/0,20	803	67,99
BF24/0,025	598	25,10
BF24/0,05	741	55,02
BF24/0,10	494	3,35
BF24/0,15	524	9,62
BF24/0,20	531	11,09

Yukarıdaki çizelgeler incelendiğinde; betona ilave edilen farklı oranlarda ve boylarda bazalt liflerin betonun enerji yutma kapasitesine olumlu yönde katkıda bulunduğu görülmektedir. Genel itibariyle lifler çekme dayanımının artmasında önemli rol üstlenmişlerdir. Bu durum liflerin çatlak oluşumunu azaltması ve oluşan gerilmeleri karşılayabilmesinin sonucudur.

Diğer çalışmalarda pek kullanılmamış olan 3 mm uzunluğundaki liflerin betonun kırılma enerjisini ve sehim değerlerini 12 mm ve 24 m uzunluğa sahip liflere göre daha çok artırdığı görülmektedir. Bunun en büyük sebebinin lif boyu etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Liflerin boyları küçüldükçe lifler arasındaki mesafe azalmaktadır. Böylece çatlaklar mikro boyuttayken kısa lifler çatlaklar arasında köprü oluşturarak çatlakların büyümesini yavaşlatırlar ya da durdururlar. Kısa boyuttaki lifler betonun her bölgesine ulaşabilecek kadar küçük boyutlu olduklarından uzun liflerin ulaşamadığı ara ve uç bölgelerde çatlakların başlaması ve gelişmesi sürecinde kilit rol oynarlar.

Bazalt lifli betonların görünüm oranlarıyla kırılma enerjileri incelendiğinde 160 ve 1263 görünüm oranlı gruplarda lif miktarı ile arasında bir ilişki görülmüştür. Görünüm oranı 160 olan grupta lif miktarı artmasıyla kırılma enerjisinde artmış daha sonra azalmıştır. En yüksek

kırılma enerjisi değerine Görünüm oranı 160 olan numunelerde ulaşılmıştır. Görünüm oranı 1263 olan grupta ise; lif miktarının artmasıyla kırılma enerjisi bir müddet artmış daha sonra azalmıştır. Genel olarak 160, 630 ve 1263 görünüm oranları ile kırılma enerjilerini değerlendirdiğimizde en yüksek kırılma enerjisi değerine 160 görünüm oranına sahip değerde ulaşıldığı görülmüştür.

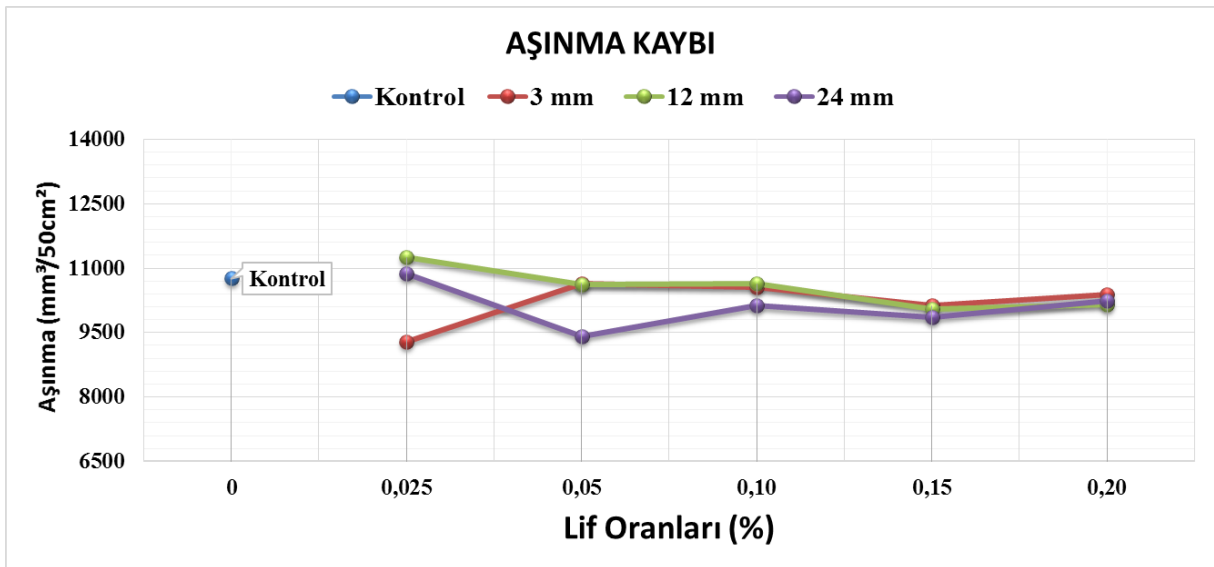
Aşınma dayanımı deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Betonun aşınma direnci kaldırım, döşeme, tünel ve baraj savakları gibi çeşitli yapı türleri için önemlidir. Bu gibi yapıların aşınmaya karşı dayanıklı olması istenir (Mindess et al. 2003). Yapılan bir dizi çalışma [Li et al. 2006; Grzeszczyk et al. 2020], betonun aşınma direncinin öncelikle betonun basınç dayanımına bağlı olduğunu göstermiştir.

Uygulama yöntemi kısım 3'te anlatılan aşınma dayanımı deneyinin sonuçları aşağıdaki Tablo 21'de ve Şekil 35'te gösterilmiştir.

Tablo 21. 3, 12 ve 24 mm Uzunluklu Bazalt Lifli Betonların Aşınma Kaybı Değerleri

Numune Kodu	Numune Aşınma Miktarları (mm ³ /50 cm ²)	Değişim (%)
BF0/0	10757	0
BF3/0,025	9282	-13,71
BF3/0,05	10645	-1,04
BF3/0,10	10557	-1,86
BF3/0,15	10129	-5,84
BF3/0,20	10378	-3,52
BF12/0,025	11250	4,58
BF12/0,05	10615	-1,32
BF12/0,10	10638	-1,11
BF12/0,15	10041	-6,66
BF12/0,20	10142	-5,72
BF24/0,025	10879	1,13
BF24/0,05	9419	-12,44
BF24/0,10	10124	-5,88
BF24/0,15	9853	-8,40
BF24/0,20	10246	-4,75



Şekil 35. 3, 12 ve 24 mm uzunluklu bazalt lifli betonların aşınma kaybı değerleri

Yukarıdaki çizelge incelendiğinde; betona ilave edilen bazalt liflerin betonun aşınma dayanımını genel olarak olumlu yönde etkide etkilediği görülmektedir. Beton içine bazalt lif ilavesinin betonun aşınma dayanımını artırması yapılan çalışmalarla uyumludur (Kabay 2014).

Liflerin betona ilavesi ile beton numunelerin aşınma dayanımlarında %14'e kadar iyileşme gözlenmiştir. 12 mm ve 24 mm uzunluğa sahip %0,25 lif içerikleri dışında tüm gruplarda bazalt lif ilavesi betonun aşınma dayanımını artırmıştır. Grzeszczyk ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında dayanımda görülen bu azalmanın, bazalt liflerin ilave edilmesiyle toplam gözenekliliğin artmasına ve bazalt lif içeriğinin büyümesiyle gözeneklerin dağılımının değişmesine bağlamışlardır (Grzeszczyk et al. 2020).

Kontrol betonuna göre aşınma dayanımında en yüksek artış 3 mm uzunluğa sahip %0,025 oranındaki lif içeriğinde %13,71 oranında görülürken, bu değerden sonra en büyük artış 24 mm uzunluğa sahip lifler arasında %0,05 lif içeriğinde %12,44 oranında elde edilmiştir. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında ise en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde ve %6,66 oranında görülmüştür. Bazalt lifin betonun aşınma direncine temel katkısı, çatlama direnci etkisidir, betonun gözenek yapısı iyileştirilir, betonun kompakt performansını artırır, gözenekliliği azaltır (Li and Zhao 2016).

Görünüm oranları ile aşınma dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde BF3/0,025 kodlu numune hariç tutulursa genel olarak görünüm oranının artması ile aşınma kaybının azaldığı, yarmada çekme ve eğilme dayanımına benzer şekilde en büyük aşınma dayanımı değerine 1263 görünüm oranına sahip %0,05 lif içeriğinde ulaşıldığı görülmektedir. Görünüm oranı 160 olan lifler arasında en yüksek değer %0,025 lif içeriğinde elde edilirken, görünüm oranı 630 olan lifler arasında en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde elde edilmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada liflerin görünüm oranları parametre olarak seçilmiş başta taze ve sertleşmiş beton deneyleri olmak üzere basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve aşınma dayanımı gibi betonun özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Deneyler hacimce %0-0,025-0,05-0,10-0,15-0,20 oranlarında ve 3 mm, 12 mm ve 24 mm (160, 630 ve 1263) uzunluklarında bazalt lifler kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı beton numuneler üzerinde yapılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve sonraki çalışmalar için öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Genel olarak bakıldığında literatürde belirtildiği gibi lif oranının ve uzunluğunun artmasına bağlı olarak birim ağırlık değerleri de azalmıştır. Fakat seçilen oranlar doğrultusunda görünüm oranının artışı ile net bir değişim olduğunu söylemek zordur. Burada görülen azalma değeri ihmal edilebilecek kadar düşük miktardadır. Bu duruma liflerin karıştırılma esnasında topaklaşmadan homojene yakın yayılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- 2) Seçilen parametreler göz önünde tutulduğunda basınç dayanımı değerinin görünüm oranlarından bağımsız olduğu ve genel itibari ile %0,05 oranının üzerindeki değerlerde kullanılmaması gerektiğini göstermektedir. Bu sonuçların bazalt lif oranlarının artmasına bağlı olarak bir araya toplanmaları, çimento hamurunda boşluk bırakmaları ve suyu kendi üstlerinde tutmaları sonucunda çimentonun hidratasyonu için gerekli olan suya ulaşamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Görünüm oranları ile basınç dayanımı arasında net bir bağ bulunamamıştır.
- 3) Kontrol betonuna göre yarmada çekme dayanımında en yüksek artış 24 mm uzunluğa sahip % 0,05 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. 3 mm uzunluğa sahip lifler arasında BF3/0,025 grubu dışında diğer gruplarda dayanım artışı görülmüş olup en yüksek artış %0,20 lif içeriğinde %10,20 oranında elde edilmiştir. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında BF12/0,025 ve BF12/0,10 grupları dışında bazalt liflerin ilavesi yarmada çekme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek artış %0,15 lif içeriğinde %8,16 oranında olmuştur. Görünüm oranları ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde görünüm oranının artmasına bağlı

olarak yarmada çekme dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak en büyük yarmada çekme dayanımı değerine en yüksek görünüm oranı değerinde (1263) ulaşıldığı görülmektedir.

- 4) Eğilmede çekme dayanımında 24 mm uzunluğa sahip %0,10 lif içeriği dışında tüm gruplarda bazalt lif ilavesi betonun eğilmede çekme dayanımını artırmıştır. Kontrol betonuna göre eğilmede çekme dayanımında en yüksek artış 24 mm uzunluğa sahip %0,05 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. Bu değer dışında en büyük artış değeri yine 24 mm uzunluğa sahip lifler arasında görülmüş olup %0,15 lif içeriğinde elde edilmiştir. 3 mm uzunluğa sahip lifler arasında en yüksek eğilmede çekme değeri %0,15 lif içeriğinde ve %17,53 oranında elde edilmiştir. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında ise en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde ve %21,27 oranında görülmüştür. Görünüm oranının artması ile eğilmede çekme dayanımının arttığı görülmektedir. Yarmada çekme dayanımına benzer şekilde en büyük eğilme dayanımı değerine 1263 görünüm oranına sahip grupta ulaşılmıştır.
- 5) Betona ilave edilen farklı oranlarda ve boylarda bazalt liflerin betonun enerji yutma kapasitesine olumlu yönde katkıda bulunduğu görülmektedir. Genel itibariyle lifler çekme dayanımının artmasında önemli rol üstlenmişlerdir. 3 mm bazalt lif ilavesi numunenin sehim yapabilme yeteneğini artırmıştır. Kontrol betonuna göre sehim ve kırılma enerjisi değerlerinde en yüksek artış % 10 oranındaki lif içeriğinde görülmüştür. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında sehim ve kırılma enerjisi değerlerinde en yüksek artış % 0,025 oranındaki lif içeriğinde elde edilmiştir. 24 mm uzunluğa sahip lifler arasında ise en yüksek değerlere % 0,05 oranındaki lif içeriklerinde ulaşılmıştır. Genel olarak 160, 630 ve 1263 görünüm oranları ile kırılma enerjilerini değerlendirdiğimizde en yüksek kırılma enerjisi değerine 160 görünüm oranına sahip değerde ulaşıldığı görülmüştür.
- 6) Liflerin betona ilavesi ile beton numunelerin aşınma dayanımlarında %14'e kadar iyileşme gözlenmiştir. 12 mm ve 24 mm uzunluğa sahip %0,25 lif içerikleri dışında tüm gruplarda bazalt lif ilavesi betonun aşınma dayanımını artırmıştır. Kontrol betonuna göre aşınma dayanımında en yüksek artış 3 mm uzunluğa sahip %0,025 oranındaki lif içeriğinde %13,71 oranında görülürken, bu değerden sonra en büyük artış 24 mm uzunluğa sahip lifler arasında %0,05 lif içeriğinde %12,44 oranında elde edilmiştir. 12 mm uzunluğa sahip lifler arasında ise en yüksek değer %0,15 lif içeriğinde ve %6,66 oranında görülmüştür. Görünüm oranları ile aşınma dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde BF3/0,025 kodlu numune hariç tutulursa genel

olarak görünüm oranının artması ile aşınma kaybının azaldığı, yarmada çekme ve eğilme dayanımına benzer şekilde en büyük aşınma dayanımı değerine 1263 görünüm oranına sahip %0,05 lif içeriğinde ulaşıldığı görülmektedir

Gelecekteki çalışmalar için öneriler

Aşağıda yüksek dayanımlı bazalt lifli betonlar ile ilgili yapılacak çalışmalara ışık tutması adına önerilerde bulunulmuştur.

- 1) Bazalt liflerle üretilen çimento kompozitlerde lif / matris arayüzeyi boşluk yapısı değerlendirilerek enstrümental analiz yöntemleri (XRD, BET, MIP vb.) ile incelenmesi.
- 2) Farklı uzunluklara sahip bazalt liflerin birlikte kullanıldığı çimento kompozitlerin ileri yaşlardaki mekanik ve performans özelliklerinin araştırılması.
- 3) Bazalt lif takviyeli betonun özellikle karışım bileşimi olmak üzere betonun mikroyapısal özelliklerinin aşınma mekaniği ile ilgili ilişkileri araştırılarak uzun süreli SEM analizi görüntüleriyle incelenmesi.
- 4) Bazalt lifle üretilen çimento esaslı kompozit malzemelerde pek fazla kullanılmamış olan 3 mm uzunluğundaki liflerin yarmada çekme, eğilme, tokluk ve aşınma dayanımı değerlerini artırdığı ve yapılacak çalışmalarda değerlendirilerek kullanılması gerektiği tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas, U., 2013. Materials Development of Steel and Basalt Fiber-Reinforced Concretes. MS Thesis, Norwegian University of Science and Technology Department of Structural Engineering, Trondheim, Norway.
- Ackeren, J.V., and Wastiels, J., 2012. Tensile Behaviour of Different High Performance Fibre
- Algin, Z., Mermerdaş, and K., Khalid, L.W., 2020. Mechanical Performance of Basalt Fibre Reinforced Concretes. Journal of the Institute of Science and Technology, 10(2), 1093-1106.
- Algin, Z., and Ozen, M., 2018. The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting Concrete. Construction and Building Materials, 186, 678–685.
- Alnahhal, W., and Aljidda, O., 2018. Flexural Behavior of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates. Construction and Building Materials, 169, 165–178.
- Anderson, T.L., 2017. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. Fourty Edition, CRS Press, 661, Boca Raton, USA.
- Anonim 2016a, TS 802: Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2003. TS EN 1008: Beton - Karma suyu- Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dâhil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2005. TS 2824 EN 1338: Zemin Döşemesi için Beton Kaplama Blokları - Gerekli Şartlar ve Deney Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010. TS EN 12390-6: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2012a. TS EN 197-1: Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2013. TS EN 1097-6: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2013a. TS EN 12390-1: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2017. TS EN 206:2013+A1: Beton- Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019a. TS EN 12350-1, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 1: Numune Alma ve Yaygın Kullanılan Aygıtlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019b. TS EN 12390-2, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019c. TS EN 12350-6: Beton - Taze Beton Deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Anonim, 2019d. TS EN 12390-3: Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019e. TS EN 12390-5: Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2021. TS EN 206 + A2: Beton- Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonymous 2002. ACI 544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute (ACI), Southern California, USA.
- Anonymous 2012. ACI Committee 239: Ultra High Performance Concrete. American Concrete Institute (ACI), Dallas, USA.
- Anonymous 2016. ACI 201.2R-16: Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute Concrete Institute (ACI), Southern California, USA.
- Anonymous, 1979. DIN 50320: Wear Tests Systematic Analysis Of Wear Processes Classification Of Wear Phenomena. German Institute for Standardization (DIN) Berlin, Germany. (ASTM G 40:2005)
- Anonymous, 1985. RILEM 50 – FMC 1985: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams. Materials and Structures 18, 287–290.
- Arivalagan, S., 2012. Study on the Compressive and Split Tensile Strength Properties of Basalt Fibre Concrete Members. Global Journal Of Research In Engineering, 12(4), 22-28.
- Arslan, M.E., 2016. Effects of Basalt and Glass Chopped Fibers Addition on Fracture Energy and Mechanical Properties of Ordinary Concrete: CMOD Measurement. Construction and Building Materials, 114, 383-391.
- Arslan, M.E., 2017. Bazalt Liflerin Geleneksel Betonların Mekanik Özellikleri ve Kırılma Enerjilerine Etkilerinin İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(3), 203-208.
- Asprone, D., Cadoni, E., Lucolano, F., Prota, A., 2014. Analysis of the Strain-Rate Behavior of a Basalt Fiber Reinforced Natural Hydraulic Mortar. Cement & Concrete Composites, 53, 52–58.
- Ateşli, C., 2019. Bazalt Lif Katkılı Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Ayub, T., Shafiq, N., Nuruddin, M.F., 2014. Mechanical Properties of High-Performance Concrete Reinforced With Basalt Fibers. Procedia Engineering. Procedia Engineering, 77, 131-139.
- Balaguru, P.N., and Shah, S.P., Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill, 530 p, Singapore.
- Banthia, N., Zanotti, C., and Sappakittipakorn, M., 2014. Sustainable Fiber Reinforced Concrete for Repair Applications. Construction and Building Materials, 67, 405-412.
- Baradan B., Yazıcı H., ve Aydın, S., 2012. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, 825 s. İzmir.
- Baradan, B., ve Aydın, S. 2013. Betonun Dürabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Türkiye Hazır Beton Dergisi, 120, 54-68.
- Baradan, B., Yazıcı, H., ve Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, 318 s, İstanbul.

- Beauodoin, J.J., 1990. Handbook of Fiber Reinforced Concrete; Principles, Properties, Development and Applications. Noyes Publications, 332 p, USA.
- Bentur, A., and Mindess, S., 1990. Fibre Reinforced Cementitious Composites., Elsevier Science Publishers, 474 p. NewYork, USA.
- Berozashvili, M., 2001. Continuous Reinforcing Fibers are Being Offered for Construction, Civil Engineering and Other Composites Applications. Advanced Material Composite News, Composite Worldwide, 21(6),5-6.
- Betterman, L. R., Ouyang, C., and Shah, S. P., 1995. Fiber- Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar. Advanced Cement Based Materials, 2(2), 53-61.
- Binici, H., Çağatay, İ.H., , Kaplan, H., 2000. Değişik Faktörlerin Beton Mukavemetine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi . Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (3) , 203-209.
- Borhan, T.M., 2012. Properties of Glass Concrete Reinforced with Short Basalt Fibre. Materials and Design, 42, 265-271.
- Borhan, T.M., 2013. Thermal and Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Concrete. World Academy of Science, Engineering and Technology, 7(4), 334-337.
- Branch, J., Rawling, A., Hannant, D.J., and Mulheron, M., 2002. The Effects of Fibres on the Plastic Shrinkage Cracking of High Strength Concrete. Materials and Structures, 35, 189-194.
- Brandt, A.M., 2009. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. Taylor and Francis, 526 p, USA.
- Branston, J., Das, S., Kenno, S.Y., and Taylor, C., 2016. Mechanical Behaviour of Basalt Fibre Reinforced Concrete. Construction and Building Materials, 124, 878-886.
- Carpinteri, A., and Ingrassia, A.R., 1984. Fracture Mechanics of Concrete: Material Characterization and Testing. Martinus Nijhoff Publishers, 202 p, Lancaster, England.
- Chawla, K.L., 2012. Composite Materials: Science and Engineering. Springer Publications, 542 p, New York. USA.
- Çelik, Z., and Bingöl, A.F., 2020. Fracture Properties and Impact Resistance of Self-compacting Fiber Reinforced Concrete (SCFRC). Materials and Structures, 53, 1-16.
- Çetin, S.Y., ve İnce, R., 2017. Küp Numunelerin Yarmada-Çekme Dayanımında Agrega Granülometrisinin Boyut Değişimi Üzerine Etkisi. Dicle üniversitesi mühendislik dergisi, 8 (3), 443-451.
- Çevik, N., 2014. Bazalt Elyafının Beton Yollarda Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Çivici, F., ve Eren, İ., 2004. Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımın Ölçülmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma. Türkiye Mühendislik Haberleri, 6 (434), 49-53.
- Deák, T. and Czigány, T., 2009. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. Textile Research Journal, 79(7), 645–651.
- Deb, S., 2012. The Impact of Basaltic Fibre on Selected Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar. Masterbuilder, 286-290.
- Dias, D.P., and Thaumaturgo, C., 2005. Fracture Toughness of Geopolymeric Concretes Reinforced with Basalt Fibers. Cement and Concrete Composites, 27(1), 49-54.
- Doğangün, A., 2012. Betonarme yapıların Hesap ve Tasarımı. Birsan Yayınevi, 844 s, İstanbul.

- Dong, J.F., Wang, Q.Y., and Guan, Z.W., 2017. Material Properties of Basalt Fibre Reinforced Concrete Made with Recycled Earthquake Waste. *Construction and Building Materials*, 130, 241-251.
- Dündar, B., Çınar, E., ve Peşin, S., 2020. Bazalt ve Karbon Lif Takviyeli Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (4): 1039-1048.
- Dürüşken, Ç., 2019. Mimarlık Üzerine Vitruvius. Alfa Yayınları, 456 s, İstanbul, Türkiye.
- Ekincioglu, Ö., 2003. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı - Bir Optimum Tasarım. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Elshafie, S., Whittleston, G., 2015. A Review of the Effect of Basalt Fibre Lengths and Proportions on the Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 4(1), 458-465.
- Erbaş M., 2003. Polipropilen lifler ve betonun durabilitesine etkisi. 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Erdoğan T.Y., 2010. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, 757 s. Ankara.
- Erdoğan, G., 2014. Bazalt Lif Katkılı Betonların Mekanik ve Geçirimlilik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ersoy, H.Y., 2001. Kompozit Malzeme. Literatür Yayınları, 227 s, İstanbul.
- Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2012. Betonarme. Evrim Yayınevi, 816 s, İstanbul.
- Fenu, L., Forni, D., and Cadoni, E., 2016. Dynamic Behaviour of Cement Mortars Reinforced With Glass and Basalt Fibres. *Composites Part B*, 92, 142-150.
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., and Valenza, A., 2015. A Review on Basalt Fibre and Its Composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94.
- Gahr, K.H., 1999. Wear by Hard Particles. *Tribology International*, 31(10), 587-596.
- Gerges, N.N., Issa, C.A., and Fawaz, S., 2015. Effect of Construction Joints on the Splitting Tensile Strength of Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 3, 83-91.
- Giaccio, G., and Zerbino, R. 1998. Failure Mechanism of Concrete: Combined Effects of Coarse Aggregates and Strength Level. *Advanced Cement Based Materials*, 7 (2), 41-48.
- Görkem, S.E., 2009. Yüksek Dayanımlı Betonarme Döşemelerinin Plastik Mafsal Çizgilerine Göre İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Grzeszczyk, S., Matuszek-Chmurowska, A., Vejmelková, and E., Cerný R., 2020. Reactive Powder Concrete Containing Basalt Fibers: Strength, Abrasion and Porosity. *Materials*, 13(13), 1-21.
- Guo, Z., Wan, C., Xu, M., Chen, J., 2018. Review of Basalt Fiber-Reinforced Concrete in China: Alkali Resistance of Fibers and Static Mechanical Properties of Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11.
- Gültekin, A., 2017. Bazalt ve Cam Lif İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Değişken Lif Parametrelerinin İşlenebilirlik ve Kırılma Enerjisine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce.

- Gümüş, M., 2016. Yüksek Performanslı Betonarme Kirişlerin Minimum Donatı Oranının Kırılma Mekanığı Esaslarına Göre Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Günaydın, O., ve Güçlüer, K., 2018. Bazalt Lifi Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(2), 416-424.
- Han, B., Zhang, L., Ou, J., 2017. Wear-Resisting Concrete. Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures, Springer, Singapore, 223-233.
- Hannant, D.J., 1978. Fibre Cements and Fibre Concretes. wiley-interscience, 219 p, New York.
- Hannant, D.J., 2003. Fibre-reinforced concrete. Advanced Concrete Technology Processes, Oxford: Butterworth-Heinemann, Ed: Newman, J., and Choo, B.S., England, 6/1-6/17.
- Illston, J., and Domone, P., 2010. Construction Materials: Their Nature and Behaviour. Fourth edition, Spon Press, 567 p New York, USA.
- Irine, F., 2014. Strength Aspects of Basalt Fiber Reinforced Concrete. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 1(8), 192-198.
- Jagadeesan, P., and Palanisamy, T., 2015. Strengthening of Brick Masonry Using Basalt Fiber Reinforced Cement Mortar. International Journal of ChemTech Research, 8(10), 102-108.
- Jiang, C., Fan, K., Wu, Fei., and Chen, Da., 2014. Experimental Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Chopped Basalt Fibre Reinforced Concrete. Materials and Design, 58, 187-193.
- Jiang, C., Huang, S., Zhu, Y., Lin, Y. and Chen. D., 2016. Effect of Polypropylene and Basalt Fiber on the Behavior of Mortars for Repair Applications. Advances in Materials Science and Engineering, 1-11.
- Jun, W., Ye, Z., 2010. Experimental Research on Mechanical and Working Properties of Non-dipping Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 4, 635-637.
- Kabay, N., 2014. Abrasion Resistance and Fracture Energy of Concretes with Basalt Fiber. Construction and Building Materials, 50, 95-101.
- Kandeva, M., Vencl, A., and Karastonayov, D., (2016). Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies. Prof. Marin Drinov Publishing House, 147 p, Sofia.
- Katkhuda, H., and Shatarat, N., 2017. Improving the Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregate Using Chopped Basalt Fibers and Acid Treatment. Construction and Building Materials, 140, 328-335.
- Ketan, G., Kulkarni, S.M., 2012. The Performance of basalt fibre in high strength concrete. Journal of Information, Knowledge and Research in Civil Engineering, 2(2), 117-124.
- Khalid, L.W., 2018. Bazalt Elyafli Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Kızılkant, A.B., Kabay, N., Akyüncü, V., and Erdoğan, G., 2014. Basalt Fibers And Mechanical Properties Of Basalt Fiber Reinforced Concrete. Journal of Engineering and Natural Sciences, 32, 444-452.
- Kocabeyoğlu, E.T., 2016. Bazalt Lif İçeren Yüksek Dayanımlı Harçların Yüksek Sıcaklık Dirençleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bozok Üniversitesi, Yozgat.

- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., and Panarese, W.C., 2002. High-Performance Concrete. Design and Control of Concrete Mixtures, 14th Edition, Portland Cement Association, USA, 299-313.
- Lge, O.A., 2017. Key Factor Affecting Distribution and Orientation of Fibres in Steel Fibre Reinforced Concrete and Subsequent Effect on Mechanical Properties. MS Thesis, University of Portsmouth, England.
- Li, H., Zhang, M.H., and Ou, J.P., 2006. Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement. *Wear*, 260(11-12), 1262-1266.
- Li, J.J., and Zhao, Z.M., 2016. Study on Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. 5th International Conference on Environment, Materials, Chemistry and Power Electronics(EMCPE), Zhengzhou, China.
- Lloyd, S., 2014. Steel Fibers in Concrete Floor Slabs. *Concrete International*, 36, 47-49.
- Ma, J., Qiu, X., Cheng, L., and Wang, Y., 2010. Experimental Research on the Fundamental Mechanical Properties of Presoaked Basalt Fiber Concrete. The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, China.
- Ma, Q., and Zhu, Y., 2017. Experimental Research on the Microstructure and Compressive and Tensile Properties of Nano-SiO₂ Concrete Containing Basalt Fibers. *Underground Space* 2, 175–181.
- Mehta, P.K., and Monterio, P.J.M, 2006. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill, 659 p, USA
- Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D., 2003. Concrete. Second Edition, Pearson Education, 644 p, USA.
- Mishra, O., and Singh, S.P., 2019. An Overview of Microstructural and Material Properties of Mohajerani, A., Hui, S.Q., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Kadir, A., Rahman, M.T., and Maghool, F. (2019). Amazing Types, Properties, and Applications of Fibres in Construction Materials. *Materials*, 12(16), 1-45.
- Niaki, M.H., Fereidon, A., and Ahangari, M.G., 2018. Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete. *Composite Structures*, 191, 231–238.
- Oltulu, M., 2004. Yüksek Dayanımlı Betonların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Üzerine Polipropilen Lif Miktarı ve Çeşidinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Ögüt, R., 2020. Bazalt Lifi Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Dayanıklılığına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Öncü, Z.İ., 2010. Betonarme İskelelerin Bakım, Onarım ve Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Özgan, E., 2005. Kırmataş Agrega İçerisindeki Taş-Unu Miktarının Betonun Basınç Dayanımına Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (1), 198-205.
- Quinn, J. A., 2002. Composites Design Manual. James Quinn Associates, 184 p, Liverpool, England.
- Ramadevi, K., Chithra, R., and Rajesh, B., 2017. Experimental Study on Strength Properties of Concrete With Different Aspect Ratios of Basalt Fibre. *International Journal of Civil Engineering And Technology (IJCIET)*, 8(9), 629-637

- Ramakrishnan, V., Tolmare, N.S., and Brick, V.B., 1998. Performance Evaluation of 3-D Basalt Fiber Reinforced Concrete and Basalt Rod Reinforced Concrete. NCHRP-IDEA Program Project Final Report, Madison, USA.
- Rathod, N., Gonbare, M., and Pujari, M., 2013. Basalt Fiber Reinforced Concrete, International Journal of Science and Research (IJSR), 4 (5), 359-361.
- Reinforced Cements. Proceedings of the Tenth International Symposium on Brittle Matrix Composites, Poland.
- Ross, A., 2006. Basalt fibers: Alternative to glass. Composites Technology, 12(4), 44–48.
- Rossi, P. 2000. Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC): An Overview. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, France.
- Salih, A.F.M., Shafiq, N., Nuruddin, M.F., Elheber, A., and Memon, F.A., 2014. Comparison of the Effects of Different Fibers on the Properties of Self-compacting Concrete. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7(16), 3332-3341
- Sarı, M., 2013. Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Scott, B.D., and Safiuddin, M., 2015. Abrasion Resistance of Concrete – Design, Construction and Case Study. Concrete Research Letters, 6(3), 136-148.
- Sekban, İ., 2007. Çelik Lif Katkısının Tekrarlı Yük Etkisindeki Geleneksel ve Yüksek Performanslı Betonarme Kolonların Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Shafiq, N., Nuruddin, M.F., Salih, A.F.M., and Elheber, A., 2014. Characterization of Stand Chopped Basalt Fiber Self – Compacting Reinforced Concrete (SCB-SCC). Applied Mechanics and Materials, 567, 356-361.
- Sim, J., Park, C., and Moon, D.Y., 2005. Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. Composites Part B: Engineering, 36(6-7), 504-512.
- Soroshian, P., and Bayasi, Z., 1991. Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete. ACI Materials Journal, 88 (2), 129-134.
- Şahin, Y., 2015. Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayıncılık, 439 s, Ankara.
- Şimşek, O., 2019. Yapı Malzemesi – II. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık, 262 s, Ankara.
- Şimşek, O., 2020. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık, 399 s, Ankara.
- Țăranu, N., Hohan, R., and Bejan L., 2012. Longitudinal Stiffness Characteristics of Unidirectional Fibre Reinforced Polymeric Composites Subjected to Tension. The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 49-62.
- Taşdemir, M.A., ve Bayramov, F., 2002. Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi, 1(2). 125-144.
- Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., ve Şengül, C., 2013. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı. Hazır Beton Kongresi, İstanbul.
- Taşdemir, M.A., ve Bayramov, F., ve Yerlikaya, M., 2003. Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar. Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 426, 76-84.
- Taylor, P., Dam, T, V., Sutter, L., and Fick, G., 2019. Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual. Second Edition, Iowa State University of Science and Technology, 315 p, Washington.

- Thomas, A., 2018. Püskürtme Beton Kaplamalı Tüneller Giriş. Nobel Akademik Yayıncılık, 241 s. Ankara.
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R, 2005. Prefabrik Beton Borularda Çelik Liflerin Kullanımı. Beton Prefabrikasyon Dergisi, 73, 13-20.
- Topçu, İ.B., Demirel, O.E., ve Uygunoğlu, T., 2017. Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Politeknik Dergisi, 20 (1), 91-96.
- Tunç, E.T., 2019. An Experimental Study Based on the Strength Properties of Concrete Containing Chemical Admixture. European Journal of Science and Technology, 17, 901-908.
- Turan, Z., 2019. Çimento Harçlarının Durabilite Özelliklerinin Bazalt Lif-Kimyasal Katkı Uyumuna Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
- Uğurlu, A., 1994. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: MLZ-878, Ankara.
- Ultra-High-Performance Concrete. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 8 (2), 97-143.
- Ünal, O., 1994. Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Beton Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., ve Elmacı, Ö., 2005. Lif Katkılı Betonun Elastisite Modülü Üzerine Kür Ortamının Etkisi. 6. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Ünsal, N., 2006. İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji. Alp Yayınevi, 376 s, Ankara.
- Varol, T., 2016. Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Vavilla, V.B.R., and Siempu, R., 2019. Effect of Basalt Fibers on the Properties of High Strength Self-Compacting Concrete. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 9(1), 3995-3998.
- Vincent, G.J., Rao, R.S., and Gangadhar, Y., 2019. Basalt Rock Fibre on Mechanical Properties of M30 Grade Concrete-An Experimental Study. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(5), 837-841.
- Vlahović, M.M., and Martinović, S.P., 2018. The Synthesis of a Sulfur-Polymer Matrix Composite and Morphological Analysis of the Samples in Extreme Conditions. Polymer-Matrix Composites: Materials, Mechanics and Applications, 1-55.
- Wang, X., He, J., Mosallam, A.S., Li, C., and Xin, H., 2019. The Effects Of Fiber Length And volume on material Properties And Crack Resistance Of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC). Advances in Materials Science and Engineering, 1-17.
- Xu, C., Chauhan, D., Yin, Z., Hou, G., Ng, V., Song, Y., and Paine, M. 2019. Synthesis of Hybrid Carbon Nanotube Yarn and Sheet and Their Applications. Nanotube Superfiber Materials (Second Edition), ed: Schulz, M., V. Shanov, V., Yin, Z., and Cahay, M., William Andrew Publishing, USA, 897-914.
- Yardımcı, M. Y., 2007. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yayla, P., 2019. Kırılma Mekaniği. Birsan Yayınevi, 252 s, İstanbul.

- Yazıcı, Ş. ve Sezer, G.İ., 2008. Çelik Lifli Betonların Darbe Direncine Agrega Maksimum Boyutunun Etkisi Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14 (3) , 237-245.
- Yıldırım, M.S., 2019. Silis Dumanı, Çelik ve Bazalt Liflerin Harçlarının Mekanik Özelliklerine Ortak Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat.
- Yıldırım, S.T., 2003. Lifli Betonlarda Yorulma Tesirlerinin Araştırılması. Kocaeli Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Zhang, P., Han, S., Ng, S., and Wang, X.H., 2018. Fiber-Reinforced Concrete with Application in Civil Engineering. Advances in Civil Engineering, 2018, 1-4.
- Zhao, Y.R., Wang, L., Lei, Z.K., Han, X.F., and Shi, J.N., 2018. Study on Bending Damage and Failure of Basalt Fiber Reinforced Concrete under Freeze-Thaw Cycles. Construction and Building Materials, 163, 460–470.
- Zhou, H., Jia, B., Huang, H., and Mou, Y., 2020. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. Materials, 13. 1-20.
- Zollo, R.F., 1997. Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 Years of Development. Cement & Concrete Composites, 19, 107-122.
- ZYCH, T., and Krasodonski, W., 2012. Study on The Properties of Cement Mortars with Basalt Fibres. Brittle Matrix Composites, 155-166.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Hasan OKTAN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Tevfik İleri Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	