



**YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN BASINÇ VE
ÇEKME DAYANIMLARI ÜZERİNDE ÇELİK, BAZALT
VE MİKROSENTETİK LİFLERİN TEKLİ, İKİLİ VE
ÜÇLÜ KULLANIMININ ETKİSİ**

Emine Hazal POLAT

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
2022**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN BASINÇ VE ÇEKME DAYANIMLARI
ÜZERİNDE ÇELİK, BAZALT VE MİKROSENTETİK LİFLERİN TEKLİ, İKİLİ VE
ÜÇLÜ KULLANIMININ ETKİSİ**

(The Effect of Single, Double and Triple Usage of Steel, Basalt and Microsynthetic Fibers on
the Compressive and Tensile Strength of High Strength Concrete)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emine Hazal POLAT

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Erzurum
Ağustos, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN BASINÇ VE ÇEKME DAYANIMLARI
ÜZERİNDE ÇELİK, BAZALT VE MİKROSENTETİK LİFLERİN TEKLİ, İKİLİ VE ÜÇLÜ
KULLANIMININ ETKİSİ**

Prof. Dr. Remzi ŞAHİN danışmanlığında, Emine Hazal POLAT tarafından hazırlanan bu çalışma, 29/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL
Yozgat Bozok Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Rıza POLAT
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

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

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

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 Prof. Dr. Remzi ŞAHİN danışmanlığında sunulan “Yüksek Dayanımlı Basınç ve Çekme Dayanımları Üzerinde Çelik, Bazalt ve Mikrosentetik Liflerin Tekli, İkili ve Üçlü Kullanımının Etkisi” 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	16	30
Materyal ve Yöntem	13	35
Bulgular	3	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	11	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
Emine Hazal POLAT	Prof. Dr. Remzi ŞAHİN
10.8.2022	10.8.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* 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

Tez çalışmam süresince kendisine ne zaman danışsam kıymetli zamanını, bilgisini, fikirlerini esirgemeyen ve desteğini her daim hissettiğim değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Remzi ŞAHİN' e,

Tez dönemim boyunca zamanlarını ayırıp deneysel çalışmalarına destek ve önerileriyle katkı sağlayan değerli meslektaşlarım; Zeynep ŞAHİN, Hamza ÇINAR, Elif KULLEBİ, Merve EYÜBOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi H.Alperen BULUT ve kıymetli hocam Arş. Gör. Dr. Yeşim TARHAN' a,

CEM I çimentosu için Aşkale Çimento'ya, Kimyasal katkılar için Master Builders Solutions ve Sancak Kimya, Çelik lifler için Bekaert İzmit Çelik Kord San ve Tic. AŞ ve Mehmet YERLİKAYA'ya, agregalar için Memişoğlu Erzurum Hazır Beton' a,

Laboratuvar çalışmam boyunca sağlamış olduğu olanaklardan dolayı Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne,

Beni yetiştiren, sevgilerini eksik etmeyen ve bugünlere gelmemde maddi manevi büyük emekleri olan meslektaşım, babam Selçuk ARZUTUĞ ve annem Ülkü ASLANKILIÇ' a ve Tez çalışmam süresince sabırlarını, desteklerini ve sevgilerini eksik etmeyen kardeşim Cemal Gökay ARZUTUĞ' a ve meslektaşım, eşim Enes POLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Emine Hazal POLAT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN BASINÇ VE ÇEKME DAYANIMLARI ÜZERİNDE ÇELİK, BAZALT VE MİKROSENTETİK LİFLERİN TEKLİ, İKİLİ VE ÜÇLÜ KULLANIMININ ETKİSİ

Emine Hazal POLAT

Danışman: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Amaç: Bu çalışma “yüksek dayanımlı betonlarda üçlü lif kullanılması onun basınç ve eğilme dayanımı ile temsil edilen mekanik davranışını iyileştirir” hipotezinin deneysel olarak araştırılması amacıyla yapılmıştır.

Yöntem: Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,45, bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 , silis dumanı oranı %10, süperakışkanlaştırıcı oranı %1,4 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Lif içeriği ise değişken olarak seçilmiş ve Bazalt, mikrosentetik (polipropilen, PP) ve Çelik lifler tekli, ikili ve üçlü olarak karışımlara katılmıştır. Lif oranları lif çeşidine göre değişkenlik göstermiştir. Tekli ve ikili karışımlarda hacimce Çelik lif %1, Bazalt lif %0,25 ve mikrosentetik lif ise %0,1 oranlarında kullanılmıştır. Üçlü karışımların da birinde bu oranlar kullanılarak elde edilmiş iken diğer üçünde lifler, sırasıyla, %1,5, %0,5 ve %0,2 oranlarında kullanılmıştır. Taze beton deneyleri olarak birim ağırlık, çökme ve hava içeriği tayini deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri olarak ise ultrasonik atılımı dalgı hızı (UADH), eksenel basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilmede çekme deneyleri yapılmıştır. Örnekler 28 günlük iken deneye tabi tutulmuşlardır.

Bulgular ve sonuç: Karışımlara üçlü lif katılması ile hava içerikleri ve birim hacim ağırlıkları artmış, çökme değerleri ise düşmüştür. Karışıma lif katılması ile betonların UPV değerleri, kontrol betonuna göre, %1,6-%4,3 oranları arasında artmıştır. En yüksek artış oranı ise liflerin üçlü kullanımda görülmüştür. Tekli, ikili ve üçlü lif içeren betonların basınç dayanımları, kontrol betonuna göre, sırasıyla, -%2,5, %2,9 ve %10,9 oranlarında değişmiştir. Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımların tamamının eğilme dayanımları, kontrol betonuna göre, artmıştır. En fazla artış ise artırılmış Çelik lif içeren (%1,5) karışımda %57 oranında gerçekleşmiştir. Üçlü lif içeren karışımların yarmada çekme dayanımları, kontrol betonuna göre, %55,4-%96,1 arasında değişen oranlarında artmıştır. Çelik lifin yüksek dayanımlı betonların eğilme ve yarmada çekme dayanımı üzerinde Bazalt ve PP liflerden daha fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bulgular araştırma hipotezini doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: karma lifli yüksek dayanımlı beton, Bazalt lif, mikrosentetik lif, Çelik lif, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı

Ağustos 2022, 90 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

THE EFFECT OF SINGLE, DOUBLE AND TRIPLE USAGE OF STEEL, BASALT AND MICROSYNTHETIC FIBERS ON THE COMPRESSIVE AND TENSILE STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE

Emine Hazal POLAT

Advisor: Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

Purpose: This study was conducted to experimentally investigate the hypothesis that "the use of triple fiber in high strength concrete improves its mechanical behavior represented by compressive and flexural strength".

Method: The water/binder ratio, binder dosage, silica fume ratio and superplasticizer ratio were kept constant, respectively, at 0.45, 400 kg/m³, 10% and 1.4%. The fiber content was chosen as variable and basalt, microsynthetic (polypropylene, PP) and steel fibers were added to the mixtures as single, double and triple. Fiber ratios vary according to the fiber type. Steel, basalt and PP fibers were used in single and double mixes, respectively, at the rates of 1%, 0.25% and 0.1%. While one of the triple mixtures was obtained by using these ratios, 1.5%, 0.5% and 0.2% fibers were used in the other three mixes, respectively. Unit weight, slump and air content tests as fresh concrete tests, ultrasonic wave velocity (UPV), axial compressive strength, split tensile and bending tensile tests as hardened concrete tests were carried out. Samples were tested at 28 days of age.

Results and conclusion: With the addition of triple fiber to the mixtures, the air contents and unit weights increased, and the slump values decreased. With the addition of fiber to the mixture, the UPV values of the concretes increased between 1.6% and 4.3% compared to the control concrete. The highest increase rate was seen in triple use of fibers. The compressive strengths of concretes containing single, double and triple fiber differed, respectively, by -2.5%, 2.9% and 10.9%, compared to the control concrete. Flexural strengths of all mixtures with triple fiber combination increased compared to control concrete. The highest increase was 57% in the mixture containing increased steel fiber (1.5%). The splitting tensile strength of the mixtures containing triple fibers increased between 55.4% and 96.1% compared to the control concrete. It has been determined that steel fiber has a greater effect on the bending and splitting tensile strength of high strength concrete than Basalt and PP fibers. The findings confirmed the research hypothesis.

Keywords: hybrid fiber-reinforced high strength concrete, basalt fiber, microsynthetic fiber, steel fiber, compressive strength, bending strength, splitting tensile strength

August 2022, 90 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xi
GİRİŞ.....	1
Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
Araştırma Hipotezi	2
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Betonda Kullanılan Lifler Hakkında Genel Bilgi	3
Lif çeşitleri	3
Doğal lifler	4
Sentetik lifler.....	5
Lif Takviyeli Beton	8
Lif ve matris arasındaki etkileşim.....	9
Lif özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi.....	10
Liflerin betonda kullanım şekilleri.....	12
Liflerin taze beton özelliklerine etkisi.....	14
Liflerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi	15
Lifli Kompozitlerin Kullanım Alanları	18
Yüksek Dayanımlı Beton	19
Kaynak Özetleri	21
MATERYAL ve METOD	28
Materyal	28
Çimento	28
Karışım suyu	28
Agrega	28
Süper akışkanlaştırıcı (SA)	29

Mikrosentetik lif.....	30
Bazalt lif.....	30
Çelik lif	30
Silis dumanı.....	31
Metot	32
Parametreler, kodlama ve numune sayısı.....	32
Agrega deneyleri	33
Taze beton deneyleri	38
Sertleşmiş beton deneyleri	40
ARAŞTIRMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME.....	44
Elek Analizi Sonuçları ve Granülometri Eğrisi	44
Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi	45
Hava içeriği deneyinin sonuçlarının değerlendirilmesi.....	45
Birim ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	47
Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi.....	49
Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	51
Ultrasonik atılımlı dalga hızı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi	51
Basınç dayanımı deneyi sonuçları ve değerlendirmeler.....	54
Eğilme dayanımı deneyi sonuçları ve değerlendirmeler.....	57
Yarmada çekme deneyi sonuçları ve değerlendirmeler	61
Regresyon Analizi.....	65
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	77

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Farklı Lif Türlerine Ait Fiziksel Özellikler	4
Tablo 2. Bazı Metalik Liflerin Tipik Özellikleri.....	6
Tablo 3. Polimer Liflere Ait Fiziksel Özellikler	7
Tablo 4. Bazı Cam Liflerin Tipik Özellikleri	8
Tablo 5. Farklı Lif Tiplerinin Uygulama Alanları	19
Tablo 6. CEM I 42,5 R Çimentosunun Kimyasal Kompozisyonu ve Fiziksel Özellikleri.....	28
Tablo 7. Agregaların Özellikleri	29
Tablo 8. Süper Akışkanlaştırıcının Özellikleri	30
Tablo 9. Polipropilen Mikrosentetik Life Ait Özellikler	30
Tablo 10. Bazalt Life Ait Özellikler	30
Tablo 11. Çelik Life Ait Karakteristik Özellikler	31
Tablo 12. Silis Dumanına Ait Özellikler	31
Tablo 13. Lif Oranları ve Numune Kodları	33
Tablo 14. Ön Denemeler İçin Hazırlanan Karışım Hesapları (kg/m^3) ve Gözlem Sonuçları	34
Tablo 15. Beton Üretim Yöntemleri	35
Tablo 16. Ana Deneyler İçin Belirlenen Karışım Hesapları (kg/m^3).....	37
Tablo 17. Elek Analiz Sonuçları.....	44
Tablo 18. Taze Betonların Hava İçeriği, Birim Ağırlıkları ve Çökme Değerleri.....	45
Tablo 19. UPV Deneyleri Verileri	51
Tablo 20. Ultrases Geçiş Hızına Göre Betonun Sınıflandırılması.....	52
Tablo 21. Numunelerin Basınç Dayanım Sonuçları	54
Tablo 22. Numunelerin Eğilme Dayanımı Sonuçları	57
Tablo 23. Deneysel Veriler Arasındaki İlişkiler	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Lif çeşitleri	4
Şekil 2. Normal ve lif takviyeli betonun kırılma davranışı	9
Şekil 3. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi	11
Şekil 4. Çelik tel donatılı normal (üstte) ve YDB'lerin (altta) gerilme-şekil değiştirme davranışı	16
Şekil 5. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi	17
Şekil 6. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi	21
Şekil 7. Beton üretimi için hazırlanan agregalar	29
Şekil 8. Çalışmada kullanılan lif çeşitleri.....	31
Şekil 9. Numune üretiminde kullanılan malzemeleri.....	32
Şekil 10. Beton üretiminde kullanılan mikser	36
Şekil 11. Taze betonda çökme miktarı ölçümü	38
Şekil 12. Hava ölçer (airmeter) cihazı ve deney anından bir görüntü	39
Şekil 13. Kür havuzuna saklanan numuneler	40
Şekil 14. Telis bezi örtülerek nem kürüne tabii tutulan numuneler	40
Şekil 15. Küp (solda) ve prizmatik (sağda) numunelerin UPV ölçüm görüntüleri.....	41
Şekil 16. Beton presi (solda) ve deney anından bir görüntü	41
Şekil 17. Eğilmede çekme deney düzeneği (solda) ve deney anına ait bir görüntü.....	42
Şekil 18. Yarmada çekme deney düzeneği (solda) ve deney anından bir görüntü.....	43
Şekil 19. $D_{en\ büyük}=16$ mm için standart eğriler ve karışımın granülometri eğrisi.....	44
Şekil 20. Betonların hava içeriği değerlerinin lif türü, sayısı ve oranına göre değişimi	46
Şekil 21. Karışımların birim ağırlıkları lif türü, sayısı ve oranına göre değişimi	47
Şekil 22. Betonların çökme değerlerinin lif türü, sayısı ve oranına göre değişimi	49
Şekil 23. Numunelerin UPV değerlerinin lif çeşidi ve oranına göre değişimi.....	53
Şekil 24. Numunelerin basınç dayanımlarının lif kombinasyonu ve oranına göre değişimi	55
Şekil 25. Örneklerin eğilme dayanımlarının lif çeşidi, sayısı ve oranına göre değişimi.....	58
Şekil 26. Numunelerde eğilme dayanımı sonucu oluşan kırılma biçimleri	60
Şekil 27. S1B025P01 kodlu numunede görülen çelik donatının köprüleme davranışı.....	61
Şekil 28. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının lif türü ve oranına göre değişimleri	62

Şekil 29. Tüm numunelerin yarmada çekme dayanımı sonucu kırılma biçimleri.....	64
Şekil 30. Deney sonrası numunelerde çatlak oluşumu (solda) ve kırılma yüzeyinin görüntüsü	65



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

μs	: Mikrosaniye
ASTM	: American Society For Testing and Materials
B	: Bazalt Lif
CI	: CEM I 42,5 R
f_{ct}	: Yarama Çekme Dayanımı
$f_{ct,fl}$	: Eğilmede Çekme Dayanımı
L	: Numune Ortalama Boyu
MPa	: Megapascal
PP	: Polipropilen Lif
S	: Çelik Lif
S/Ç	: Su/Çimento Oranı
SA	: Süper Akışkanlaştırıcı
T	: Dalga Geçiş Süresi
TS	: Türk Standardı
V	: Ultrasonik Atılımlı Dalga Hızı
δ	: Özgül Ağırlık
σ	: Gerilme

GİRİŞ

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden beton; yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılığı, hammadde mevcudiyeti, kullanışlı yapısı ve yüksek plastisitesi nedeniyle inşaat mühendisliği projelerinde tercih edilmektedir (Fan *et al.* 2020). Aşınma, kayma, çekme, çatlama sonrası yük taşıma, yangına karşı dayanıklılığı, tokluk ve enerji emme kapasitesinin zayıf olması ise betonun olumsuz özelliklerindendir. Betondaki en yaygın olumsuzluklardan biri olan çatlaklar sadece yapısal taşıma kapasitesinde düşüşe sebep olmaz aynı zamanda ortamdaki zararlı asitler ve tuzların çatlaklardan nüfuz etmesine neden olur. Bu durum da yapının hizmet ömrünü azaltır (Balçıkanlı Bankir 2020).

Teknolojinin ilerlemesi, mineral ve kimyasal katkıların kullanımının yaygınlaşması ile betonda oluşan olumsuzlukları gidermek için çeşitli yeni imkânlar doğmuştur. Bunlardan bir tanesi de betona yeni özellikler kazandırıp farklı kullanım alanları sunan özel betonlardır (Karimi *et al.* 2020). Yüksek dayanımlı beton (YDB), yüksek performanslı beton (YPB) ve yüksek performanslı lif (fiber) ilaveli beton (YPLB) yeni beton türleri arasında gösterilmektedir. Bu tür betonların özellikleri, geleneksel betonun özelliklerine göre daha gelişkindir. Bununla birlikte, yüksek dayanımlı beton normal betona oranla daha kırılgan olmasından dolayı kullanım alanı nispeten sınırlıdır. Yüksek dayanımlı betonların üretimi için bağlayıcıların bir parçası olarak silis dumanı (SD), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖYC) ve uçucu kül (UK) gibi destekleyici malzemelerin kullanılmasına ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir (Afroughsabet *et al.* 2015). Betondaki ani kırılmayı önleyip sünekliği artırabilmek için beton karışımına farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip lifler eklenir. Lifler karışım içinde karma olarak da kullanılabilirler ve gevrek davranış gösteren yüksek dayanımlı betonlara (YDB) süneklik kazandırma ve zayıf yönlerini iyileştirmede yardımcı olurlar (Topçu vd 2017).

Lifler çimentolu matrisin kırılganlığını azaltıp çatlama davranışına etki edebilir, gevrek kırılmayı kontrol edebilir ve çatlamanın ardından dayanım ve tokluk sağlayabilir. Lif içeriği genellikle hacimsel oran olarak verilir. Aynı hacim oranında küçük lif geometrisi büyük lif geometrisinden daha fazla lif içereceğinden çimento esaslı matriste yoğun şekilde yayılarak mikro çatlakların ilerlemesini kontrol eder. Uzun liflerse makro çatlakların yayılmasını kontrol ederek nihai dayanımı iyileştirirler (Larsen *et al.* 2020).

Liflerin betona katkısı; matrisin özellikleri, lif hacmi, lif geometrisi, lif tipi ve lifin beton karışımındaki yönü gibi özelliklerle ifade edilir. Sertleşmiş betonun tokluğunu ve özelliklerini

iyileştirmek için esas olarak çelik, karbon veya polimerden üretilen çok çeşitli lifler vardır (Afroughsabet *et al.* 2015).

Tek çeşit lif ilavesi, betonun özelliklerini sınırlı bir şekilde iyileştirirken üstün özellikler sağlamak için iki veya daha fazla farklı tipte liflerle takviye edilen karma (hibrid) lif takviyeli betonlar tercih edilir. Betonda oluşan rötreler farklı boyutlarda meydana geldiğinden, farklı uzunluklarda çeşitli liflerin kullanılması bu sorunu çözmenin faydalı yöntemlerinden biridir. İyi tasarlanmış bir kompozit sistemde, lifler arasında faydalı bir etkileşim vardır, bu da, karma sistemin tek lif tipli kompozitten daha iyi performans göstermesiyle nihayetlenir. Karma lif kullanımının temel amacı, çimento esaslı malzemenin farklı bölgelerinde, farklı boyut seviyelerinde ve farklı yükleme aşamalarında çatlakları kontrol etmektir (Afroughsabet *et al.* 2015). Betonun rastgele dağılmış kısa liflerle güçlendirilmesi, çatlakların başlamasını, yayılmasını veya birleşmesini önleyerek veya kontrol ederek çimento esaslı matrislerin tokluğunu iyileştirebilir (Yao *et al.* 2003). Lif türlerinin birbirlerine göre farklı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Ancak, liflerin özellikle betonun eğilme dayanımı, çarpma dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve süneklik gibi özellikleri üzerinde önemli oranda katkı sağladığı genel görüştür (Uğur 2007).

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, normal betona göre daha gevrek olan yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışlarını geliştirmek amacıyla piyasada yaygın olarak kullanılan ve her birinin beton davranışı üzerindeki etkisi farklı olan Çelik, Bazalt ve polipropilen liflerin; tekli, ikili ve üçlü kullanılması suretiyle üretilen karma lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve eğilme altındaki davranışlarını incelemektir. Çalışmanın ana hedefi, üçlü lif kombinasyonunun tekli ve ikili kullanıma göre beton davranışı üzerindeki farklılığını ortaya çıkarmaktır. Karma lifli betonlar üzerinde önceki araştırmacılar daha çok ikili lif tipleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada ise üçlü lif kombinasyonu kullanılacak ve elde edilecek taze ve sertleşmiş beton sonuçları tekli ve ikili lif içeren karışımlar ile karşılaştırılacaktır. Deneysel olan ve kapsamı Metot bölümünde ayrıntılı verilen bu çalışma üçlü lif (Çelik, Bazalt ve polipropilen lif) kullanılması bakımından özgündür.

Araştırma Hipotezi

Bu tez çalışması için belirlenen araştırma hipotezi şudur: Yüksek dayanımlı betonlarda üçlü lif kullanılması onun basınç ve eğilme dayanımı ile temsil edilen mekanik davranışını iyileştirir.

KURAMSAL TEMELLER

Betonda Kullanılan Lifler Hakkında Genel Bilgi

Lifler, doğal kaynaklardan ve insan üretimi olarak elde edilen belli uzunlukta, belli esnekliği olan ve belli dayanıklılığa sahip olan hammaddedir. Lif terimi, bir boyutu diğer boyutuna oranla çok büyük olan tüm malzemeleri kapsar. Bazı durumlarda malzeme çeşitliliğine ve ham maddesine göre tel veya kıl olarak da adlandırılır (Ekincioğlu 2003).

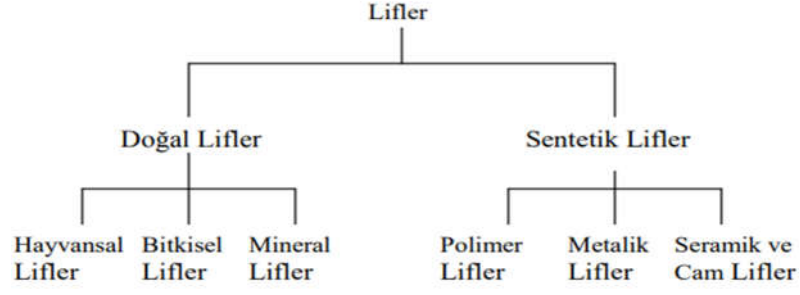
Lifli formdaki malzemeler uzun zamandır insanlık tarafından kullanılmaktadır. Lif iplikleri, bilim adamlarının bu malzemelerin içyapısı hakkında herhangi bir fikre sahip olmadan çok önce, tarih öncesi çağlardan beri kumaşlar, halatlar ve diğer birçok alanda kullanılmıştır (Chawla 1998). Diğer taraftan, kırılğan yapı malzemelerinin çeşitli lif formlarıyla güçlendirilmesi kavramı eski zamanlardan beri bilinmektedir. Hasırla güçlendirilmiş pişmiş kil ve hayvan kılı ile güçlendirilmiş duvar harcı kullanılarak yapılan kerpiç kulübeler, inşaatta lif takviyeli malzemelerin ilk örnekleridir (Johnston 2001). Mimar Sinan'ın da tercih ettiği doğu medeniyetlerinde kullanılan Horasan Harcı da saman gibi doğal lif içermektedir.

1950'lerde beton içinde katkı maddesi olarak Çelik lifler kullanılmaya başlamış ve ileriki zamanlarda cam, asbest, karbon, plastik gibi yapay lifler ile bambu gibi doğal liflerin kullanımı denenmiştir. Lif çeşitlerinin değişik özelliklerinin varlığı tespit edilmiştir. Polipropilen liflerin katkı olarak kullanılmaya başlaması 1960 yıllarında betonda sınırlı çatlak oluşumuna sebep olarak, darbe ve aşınmalara direnç sağlamasıyla askeri amacı araştırmalarla başlamıştır (Baradan vd 2015).

Lif çeşitleri

Mukavemetleri aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre yüksek olduğundan lifler malzemenin en gelişmiş formudur (Türk vd 2017).

TS 10514: Lif takviyeli betonun karışım oranları ve imalatı için kurallar (Anonim 2015) standardında lif tipleri için ayrı bir başlık açılmamış olsa da standartta; Çelik, sentetik (polipropilen, poliolefin, naylon, karbon, akrilik ve aramid vb.), cam ve doğal lif olmak üzere dört sınıftan bahsedilmektedir. Literatürde ise lifler farklı özellikleri ön planda tutularak farklı şekilde sınıflandırılmaktadırlar. Örneğin Ekincioğlu (2003)'de lifler Şekil 1'de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır.



Şekil 1. Lif çeşitleri (Ekincioglu 2003)

Kullanıldıkları alanlar ve özelliklerindeki farklılıklara bakıldığında çok fazla lif çeşidi olduğu görülecektir (Türk vd 2017). Bazı lif tiplerine ait özellikler ise Tablo 1’de belirtilmiştir.

Tablo 1. Farklı Lif Türlerine Ait Fiziksel Özellikler (Bilim 2019)

Lif Tipi	Özgül Ağırlık Uzama (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Mak. (%)
Asbest	3,2	552-966	83-138	0,6
Pamuk	1,5	414-690	4,8	3-10
Naylon	1,1	759-828	4,1	16-20
Polyester	1,4	724-863	8,3	11-13
Polietilen	0,95	690	0,14-0,4	10
Polipropilen	0,90	552-759	3,5	25
Karbon	1,9	380-5520	230-380	0,5-1,6
Kevlar	1,44	3600	60-130	0,2-4
Cam	2,5	1035-3795	69	1,5-3,5
Çelik	7,8	276-2760	200	0,5-3,5
Bazalt Lif	2,80	4840 89 3.5	89	3,5

Çelik lifler, tokluğunun yüksek olması ve uygulamadaki kolaylığından dolayı en çok tercih edilen lif türüdür. Diğer taraftan, elastisite modülü yüksek olan lifler (Çelik lif, karbon lif ve cam lifi gibi) elastisite modülü daha düşük olan liflere göre (polipropilen lif, polietilen lif vb.) gevrek davranışlarından dolayı kompozitin dayanım ve tokluğu artmaktadır. Elastisite modülü düşük lifler ise kompozitte hasara karşı direnç oluşturduğundan sünektir (Kına 2019).

Aşağıda Ekincioglu (2003)’de belirtilen sınıflama göz önünde bulundurularak liflerle ilgili daha detaylı bilgiler verilmiştir.

Doğal lifler

Hayvansal, bitkisel ya da mineral kökenli olan bu liflerin kolaylıkla temin edilmeleri olumlu özellikleridir. Fakat alkali ortamda parçalanma eğilimleri, kullanımda karşılaşılan bir problemdir. Bunun için betonun alkalinitesini azaltacak katkıları kullanılır. Kullanılan en eski

doğal lif at yelesi ve saman olarak bilinir. Bambu, Hindistan cevizi, şeker kamışı ve ahşap gibi lifler ise Portland çimentosuyla birlikte kullanılan doğal lifler arasındadır (Ekincioglu 2003).

Güneş ışığına karşı duyarlı olmaları, ısı ve su buharını absorbe etmeleri, ısı altında şekil değiştirmemeleri ve dona karşı dayanıklı olmaları doğal liflerin yapısal özellikleridir (Bilim 2019).

Mineral liflerden olan Bazalt lifler, eritme işlemi yoluyla Bazalt kayalarından elde edilir. Bazalt kayaları o kadar ince bir şekilde küçük parçacıklara bölünebilir ki, bir lif formunda üretilmesi mümkündür. Ek olarak, Bazalt lifleri, tek bir üretim sürecinde başka hiçbir katkı maddesi içermez, bu da maliyette ek avantaj sağlar. Bazalt liflerinin karbon liflere göre daha fazla kırılma gerilimine sahip olduğu ve ayrıca darbe yükü ve yangına karşı iyi bir dirence sahip olduğu bilinmektedir (Sim *et al.* 2005). İlave, Bazalt lifler çevre kirliliği oluşturmeyen, korozyona dayanıklı, yalıtkan ve elastik yapıda malzemelerdir. Bazı yapı elemanlarında donatı çeliği yerine seçen olarak Bazalt lif ve epoksi reçine kullanılarak Çelik formda üretilen Bazalt lifli donatı da kullanılmaktadır. Çelik donatıya oranla 3 kat hafif olan Bazalt lifli donatı daha yüksek dayanıma sahiptir. Termal genleşme katsayısının betonun genleşme katsayısına yakın olması, alkali reaksiyonlara karşı yüksek dirence sahip olması donatı çeliğine alternatif olma sebepleri arasındadır (Sarı 2013).

Öğüt (2020)'e göre Bazalt lifin kimyasal bileşimi; SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ 'dan oluşmaktadır. Ivanic *et al.* (2020) ise Bazalt liflerin esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluştuğunu belirtmiştir. Jenifer and Brindha (2021) tarafından Bazalt lifinin kimyasal bileşimini görebilmek için EDX altında inceleme yapmış olup yüksek oranda olan Si elementini Al, Fe ve Ca'nın izlediği rapor edilmiştir.

Sentetik lifler

Metalik lifler

Plastik şekil değiştirebilme yeteneği metallerin özelliklerindendir. Bu özellik çok basit formlardan karmaşık formlara çeşitli üretimlerin yapılmasına ve birçok alanda metallerin kullanılmasına olanak sağlar. Lif formunda da metaller uzun yıllardır kullanılmaktadır. Tablo 2'de bazı önemli metalik liflerin özellikleri verilmiştir (Ekincioglu 2003).

Beton karışımında Çelik liflerin hangi oranda kullanılacağı, lifin geometrik şekline ve lifle beton matrisi arasında kenetlenme dağılımına bağlıdır. Bu sebeple birçok geometrik formda Çelik lif imal edilip kullanılmaktadır (Kozak 2013). Çelik lifler, lif takviyeli beton elemanlarda en yaygın olarak kullanılan lif türüdür. Çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri; lif tipine, lif miktarına, en boy oranına ve agregaların boyutuna bağlıdır. Çelik lifler

betonun basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemez, çatlama sonrası süneklik sağlar ve deformasyon sırasında enerji soğurma yeteneği olan tokluğu artırır. Betonun eğilme mukavemetini iyileştirmede daha iyi performans gösterir (Çetin 2020).

Tablo 2. Bazı Metalik Liflerin Tipik Özellikleri (Ekincioğlu 2003)

Metal	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Erg. Sıcaklığı (°C)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Day. (MPa)
Al	2,7	660	70	300
Be	1,8	1350	310	1100
Cu	8,9	1083	125	450
Mo	10,2	2625	330	2200
				2890 (<250 µm)
W	19,3	3410	350	3150 (<125 µm)
				3850 (<25 µm)
%0.9 Karbon çeliği (Ø0.1 mm)	7,9	1300	210	4000
Paslanmaz Çelik (Ø 0.05 mm)	7,8	1535	198	2400

Yaygın olarak kullanılan Çelik liflerin çapı 0,5 mm ile 1 mm aralığındadır. Çelik lifin yoğunluğu ise 7,85 g/cm³'tür. Çelik lif yuvarlak, oval, çokgen ve hilal şeklindedir. Şekli, imalat işlemi ve kullanılan ham maddeye bağlı olarak farklı çeşitleri vardır.

Lifler, temiz olmalı ve tozdan, yağdan ve zararlı maddelerden arındırılmalıdır. Çelik lif uzunluğu genel olarak 13 mm ile 64 mm aralığında ve boy/en oranı da 30 ile 100 aralığında olmalıdır. Uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi katkıların kullanılması veya bu katkıların çimentonun bir kısmı yerine ikame edilmesi Çelik lifin işlenebilirliğinin iyileştirilebilmesi içindir (Anonim 2015).

Betonda Çelik lif kullanımının başlıca yararları şu şekilde sıralanabilir; i) yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton, ii) donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, iii) etkin çatlak kontrolü, iv) dayanıklılık ve v) donatı işçiliğinde belirgin azalmalardır (Kozak 2013).

Çatlak oluşuktan sonra matristeki rastgele dağılmış olan kısa Çelik lifler çatlaklar arasında köprü kurarak ilerlemeyi önler. Liflerin betondan sıyrılması esnasında çatlak genişlemesi ertelenir ve çatlak büyümesi önlenir. Tellerin matristen sıyrılarak çıkması fazla enerji gerektirdiğinden toklukta belli artış sağlanır (Kozak 2013).

Polimer lifler

Sentetik lif olarak da bilinen bu lifler yüksek çekme mukavemetine sahip olup düşük ve yüksek elastisite modülüne sahip lifler olarak iki gruba ayrılır. Elastisite modülü düşük liflere polipropilen, polyester, polietilen ve naylon gibi lifler örnek verebilir. Olumlu özellikleri olarak alkalın ortamdan etkilenmemesi, yüksek çekme mukavemetinin olması sayılabilir. Bu liflerin erime sıcaklıkları genelde 165°C'nin üstündedir. Oksijen ve güneş ışığından etkilenmesi, yangın dayanımının düşük olması ise olumsuz özellikleri arasındadır (Bilim 2019). Polimer liflere ait özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Polimer Liflere Ait Fiziksel Özellikler (Bilim 2019)

Lif Çeşidi	Etkili Çap (3-10 mm)	Özgür Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Day. (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Nihai (%)
Akrilik	13-104	1.17	207-1000	14.6-196	7.5-50.0
Aramid I	12	1.44	3620	62	4.4
Aramid II	10	1.44	3620	117	2.5
Naylon		1.16	965	5.17	20.0
Polyester		1.34-1.39	896-1100	17.5	
Polietilen	25-1020	0.96	200-300	5.0	3.0
Polipropilen		0.90-0.91	310-760	3.5-4.9	15.0

Polipropilen lifler beton takviyesinde en yaygın kullanılan polimer liftir (Avar 2006). Betonda oluşacak plastik rötre çatlaklarını sınırlaması polipropilenlerin en önemli özelliklerindendir. Betonun içindeki boşlukları doldurmak, rötre ve büzülme çatlaklarını azaltmak, betonun darbeye karşı dayanımını artırmak gibi olumlu özelliklerinden dolayı bu liflerin son yıllarda kullanımı artmıştır (Ünal vd 2006).

Kara (2011), polipropilenin, propilendeki çiftli bağın katalizörler yardımıyla açılarak ve diğer propilen monomerleri ile katılma tepkimesi sonucu birleşerek bir zincir meydana gelmesi sonu oluştuğunu bildirmiştir. Deb *et al.* (2020) ise ham PP liflerin oksijen bileşiminin (%3,63) işlenmiş PP liflerinkinden (%13,22) önemli ölçüde daha düşük olduğunu belirlemiştir. Karbon bileşiminde ise tersi durum söz konusudur. Ham PP liflerinin karbon bileşimi (%96,11) işlenmiş PP liflerine (%86,77) göre bir miktar fazladır. Bhattacharya and Chaudhari (2015) tarafından yapılan araştırmada ise ham PP liflerinin EDX analizi sonucunda C içeriği yüksek oranda (%92,5) görülmüş olup bunu O (%6,56) takip etmiştir.

Seramik ve cam lifler

Oksit, nitrit veya karbit esaslı olan seramikler metalik olmayan inorganik malzemelerdir. Yoğunlukları organik malzemelerden yüksek ancak metallerinkinden daha düşük olan seramik lifler cam ve karbon lifin kullanıldığı yerlerde kullanım alanı bulurlar. Seramik lifler organik ve diğer liflerin sahip olmadıkları bazı özelliklere sahip olup bunların en önemlilerinden biri ısısal kararlılığıdır. Mukavemet ve elastik modül gibi yapısal özellikler, inert ve hatta oksitleyici ortamlarda bile 1200-1400°C'ye kadar korunabilmektedir. SiC, Al₂O₃ ve Bor bu lif türüne örnek olarak verilebilir (Ulcay 1993).

Cam lifler sertlik, korozyona dayanıklılık ve farklı malzemelerle reaksiyona girmeme konusunda camla aynı özelliği gösterirler. Bu malzeme esnek, hafif ve ucuz olduğundan düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda tercih edilirler. Çimento hamuru ve harç karışımlarına eklenirler. Cam liflerin dayanım değerleri ve çevresel etkilere karşı dirençleri farklı, elastisite modülleri benzerdir. E tipi cam lifler; ucuz malzemelerdir. Yüksek çekme dayanımı ve kimyasal direncin fazla olması istenen ortamlarda kullanılır. S ve S-2 tipi camlar en yüksek dayanıma sahip olmalarına rağmen E tipi cam liflere göre pahalı oldukları için daha az tercih edilirler. C tipi cam lifler ise korozyona dayanımı istenen yerlerde kullanılırlar (Ekincioglu 2003). Tablo 4'te cam liflerin tipik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Bazı Cam Liflerin Tipik Özellikleri (Ekincioglu 2003)

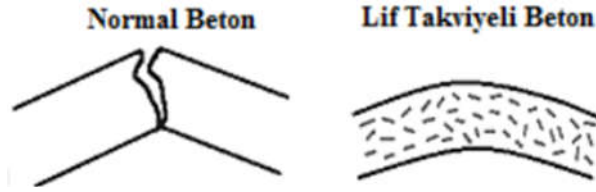
Cam lif tipi	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2.54	1.7-3.5	69-72
S	2.48	2.0-4.5	85
C	2.48	1.7-2.8	70
Cem-fil	2.70	-	80

Lif Takviyeli Beton

Beton, iri ve ince agrega ile çimento ve sudan oluşan bir yapı malzemesidir. Lif takviyeli (lifle güçlendirilmiş) beton terimi ise beton karışımı içinde rastgele dağılmış lifler içeren betonları tanımlar (Şahmaran vd 2007).

Betonun temel avantajı, yüksek basınç dayanımına sahip olmasıdır. Ancak, zayıf bir çekme mukavemetine sahiptir ve çekme yükü altında kırılmandır. Lifler, betonun zayıf çekme mukavemetinin iyileştirmek için kullanılan takviye malzemelerinden olup betonun mekanik özelliklerini ve yapısal bütünlüğünü geliştirmek için kullanılmaktadır (Çetin 2020). Lifler betonun çekme, kırılma ve çarpma dayanımını iyileştirerek oluşan çatlakların büyümelerini

engeller. Böylece kırılma esnasında sayısı az büyük çatlaklar yerine, çok sayıda fakat küçük ve zararsız çatlaklar oluşur (Şekil 2, Bilim 2019).



Şekil 2. Normal ve lif takviyeli betonun kırılma davranışı (Bilim 2019)

Çatlaklar genellikle ön sertleşme halindeki plastik rötre ve sertleşmiş betonda kuruma rötresi gibi bir takım nedenlerden dolayı zamanla gelişir. Daha sonra bu çatlaklar betonun su geçirmezlik özelliklerini zayıflatarak beton mikro yapısını nem, klorür, sülfat vb. gibi yıkıcı maddelere maruz bırakır. Bu nedenle, sertleşmiş betonun özelliklerinin iyileştirilmesi beton biliminde önemli bir hedeftir. Bu zayıflığın üstesinden gelmek için çimento esaslı betonlara lifler dâhil edilir ve artan çekme mukavemeti, süneklik, tokluk ve geliştirilmiş dayanıklılık özelliklerine sahip malzemeler üretilir. Liflerin betona eklenmesinin su emmede bir azalmaya yol açtığını ve liflerin tipine bağlı olarak betonun elektrik direncinde yalın betona kıyasla önemli veya hafif bir azalmaya yol açtığı söylenebilir (Afroughsabet et al. 2015).

Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirmektedir (Kozak 2013).

Lifli beton görünüş itibarıyla normal beton karışımına benzemesine rağmen değişik yükler altında gösterdiği davranış normal betonun göstereceği davranıştan farklıdır. Lifli betonda lifler rastgele dağılmış olmasına rağmen yük altında homojen bir davranış sergiler. Lifli betonlarda emilen enerji fazladır. Bunun sebebi liflerin matristen ayrılmalara ve uzamalarıdır. Diğer taraftan, karıştırma, yerleştirme gibi üretim aşamalarında lifin narinlik oranı etkilidir. Üretimde kullanılan lif miktarı da işlenebilme özelliği için etkilidir. Lifler karışımda homojen olarak dağılmalı ve bu dağılım karışım sonunda bozulmamalıdır. Bu durum tüm lif çeşitleri için geçerlidir (Arazsu 2012).

Lif ve matris arasındaki etkileşim

Matris olarak belirtilen yapı lifin etrafını saran malzeme yani çimento hamurudur. Lifli betonda matrisin görevi lifleri bir arada tutup liflerin gerilme transferini sağlamaktır. Çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını etkileyen temel özellik matrisle lif arasındaki

etkileşimdir (Güngör 2013). Matrisle lifler arasındaki aderansı etkileyen sebepler şu şekilde sıralanabilir: i) çimento hamurunun niteliği, ii) çimento hamurunun çatlamış veya çatlamamış olması, iii) çimento hamuru ile lifin elastisite modüllerinin farklı olması, iv) liflerin yüzey özellikleri, kullanım yüzdeleri, geometrileri, tipleri, yönleri ve v) betona uygulanan yükleme hızıdır (Ekincioglu 2003).

Çimento hamuru ile lif ara yüzeyi boyunca gerilme dağılımının iki farklı sebebi mevcuttur. İlkinde hem matris hem lif elastiktir. İkincisindeyse matris plastik, lif elastiktir. Eğer lifin elastisite modülü matrisin elastisite modülünden fazlaysa lif çevresinde deformasyon az olur. Mineral ve Çelik liflerde bu durum gözlemlenir. Matrisin elastisite modülü lifin elastisite modülünden daha fazlaysa şekil değiştirme olmaktadır (Chawla 2012).

Lifli betonlar çekme gerilmelerine maruz kalınca ve gerilme belli seviyeye gelince matris çatlar. Lifler çatlak boyunca matrisin bir ucundan diğer ucuna yükü taşır. Pratikte lifler çatlaklar arası köprü görevi görür. Eğer lifler çatlak boyunca yeteri kadar yük iletimi sağlarsa birçok çatlak numune boyunca bu şekilde tutulur (Ekincioglu 2003).

Matrise silis dumanı gibi mineral katkıların eklenmesi ise çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki bağı iyileştirir ve çimento hamurunun yoğunluğunu artırır. Bu da betonların basınç dayanımını iyileştirir (Afroughsabet *et al.* 2015).

Lif özelliklerinin kompozit özelliklerine etkisi

Birçok araştırmacı kompozit özelliklerinden daha çok kompozit malzemeyi güçlendiren liflerin özelliklerinin öneminden bahseder (Mohajerani *et al.* 2019). Liflerin geometrisi, boyu, karışıma katılım yüzdesi, narinlik oranı (boy/çap), üretildiği madde ve üretim teknikleri gibi özellikler lif takviyeli kompozitlerin özelliklerini etkilediği için lifli betonlar bu özellikler göz önüne bulundurularak yapılmalıdır (Ekincioglu 2003). Aşağıda liflerden beklenen başlıca özellikler hakkında bilgiler verilmiştir.

Lif geometrisinin etkisi

Çeşitli biçimde liflerin üretilmesi, lif ve matris arasındaki dayanımın güçlendirilmesi için yapılan çalışmalardandır (Avar 2006).

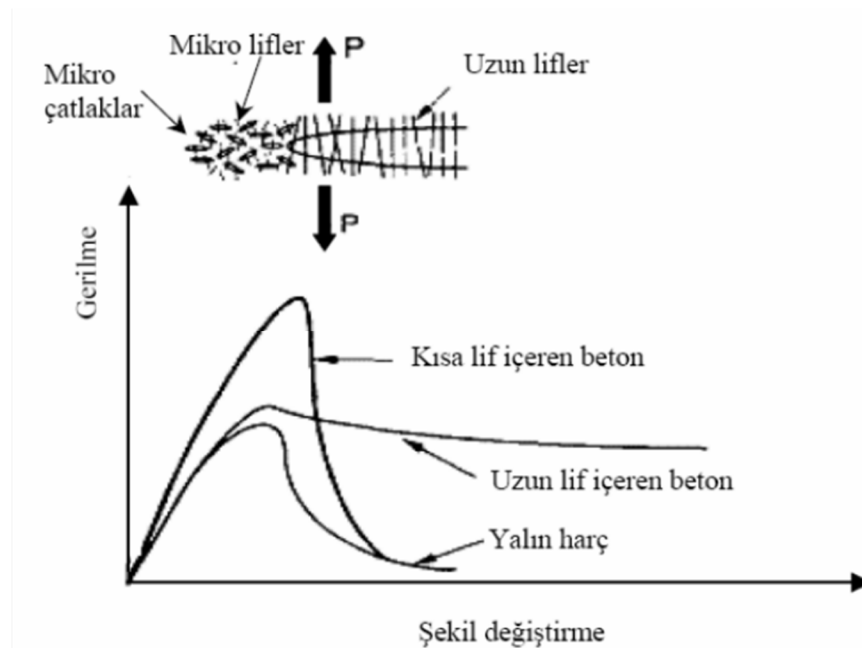
Bayasi and Soroushian (1991) tarafından yapılan çalışmada, narinlikleri 60 ve 75 civarında olan belirli geometriye sahip Çelik lifler kullanılarak lif tipinin betonların performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda lif kullanımının betonun işlenebilirliğini genel olarak düşürdüğü görülmüştür. Narinliği 60 ve lif oranı %2 olan kancalı liflerin, düz ve dalgalı liflere göre eğilme dayanımında ve enerji yutma kapasitesinde daha yüksek değerler

elde edilmiştir. Narinliğin 75 olması durumunda da yine kancalı liflerin düz liflerden daha iyi olduğu gözlenmiştir. Basınç gerilmeleri altında, pik sonrası enerji yutma kapasiteleri kıyaslandığında yine en yüksek sonuçlar kancalı liflerde olmuştur.

Lif boyunun etkisi

Çimento esaslı kompozitlerde, lif yüzdesi sabit tutulup lif boyu uzun seçilerek yapılan çalışmalarda çekme dayanımında sağlanan artışın fazla olmadığı görülmüştür. Bu gözlem, mikro çatlak bölgesindeki matris kırılmasının önlenemediği sebebine dayandırılır. Liflerin boylarındaki artış, lifler arasındaki mesafeyi artırır. Bu sebeple mikro çatlaklara yararlı olamazken çatlaklar makro düzeye ulaşınca yararlı olurlar. Lif boyları küçüldükçe aradaki mesafe azalır ve çatlaklar mikro boyuttayken mikro lifler çatlaklar arası köprü oluşturarak çatlakların büyümesi yavaşlatır ya da durdurur. (Betterman *et al.* 1995).

Mikro, mezo ve makro düzeydeki çatlaklar için mikro, mezo ve makro düzeyde lifler tercih edilir. Mikro çatlak uzunluğu yapının boyutlarına göre küçük olan çatlak olarak tanımlanırken makro çatlak, uzunluğu yapının boyutlarına göre küçük olmayan çatlak olarak tanımlanır. Matris içinde sık bir dağılım oluşturmaları, elastik bölgedeki davranışı iyileştirmeleri ve çatlakları makro düzeye gelmelerini engellemeleri mikro liflerin olumlu özelliklerini oluşturmaktadır. Maksimum yük sonrası davranışı iyileştirme, makro düzeydeki çatlakları kontrol etme, elastisite modülü, eğilme ve çekme dayanımını artırma ise makro lif özellikleridir. Mikro lifler boyut itibarıyla matrisin her yerine dağılabildikleri için makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki çatlakların başlama ve gelişimini kontrol eder (Taşdemir vd 2002). Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi (Betterman *et al.* 1995)

Liflerin hacimsel yüzdesinin etkisi

Lif takviyesi beton mekanik özelliğini belirli bir orana kadar iyileştirir. Bu oran aşıldığı zaman ise iyileşmelerde azalmalar görülür (Mohajerani et al. 2019). Yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler daha büyük gerilme değerlerine dayanabildikleri için elastisite modülleri düşük olan kompozitlerin gerilme dirençlerini ve mukavemetlerini yükseltmek için farklı oranlarda liflerle güçlendirme sağlanır (Elshafie 2015).

Teoride lifler beton karışımına ne kadar ilave edilirse betonun dayanım ve dayanıklılık değerlerine o kadar etki edeceği düşünülür. Fakat karışımdaki lif hacminin artması betonun kıvamını, işlenebilirliğini etkileyeceğinden betonun kalıba yerleştirilmesinde topaklanmalar yaşanır ve betonun yapısında zayıf bölgeler oluşur. Bu olumsuzluklardan dolayı beton üretiminde %3'ten fazla oranda lif kullanılmaması önerilir (Zollo 1997). Buna karşın, karışımdaki lif miktarının düşük olması malzemenin homojen olması ihtimalini düşürür. Lif sayısı agrega sayısından düşük olduğunda lifler, agrega yerleşimine etki edememekte ve sağlam matris oluşturamamaktadır (Vodicka et al. 2004).

Lif yüzdesi kadar liflerin matris içinde dağılımı da önemlidir. Liflerin matris içinde homojen dağılımı için; karışımdaki iri agrega miktarının azaltılması, lif narinlik oranının uygun bir değerde olması, belirli sayıda lifin suda çözünebilir yapıştırıcılarla bir araya getirilmesi, liflerin karışıma kuru katılması ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması gibi önlemler alınabilir (Özyurt 2000).

Liflerin narinlik oranının etkisi

Liflerin narinliği de betonların dayanımı etkilemektedir. Lif boyunun (L), lif çapına (d) oranı narinliktir. Bu değer 30-100 arasındadır. Karışımdaki lif narinlik oranı artması dayanımı artırsa da işlenebilirlik ve karıştırmada olumsuzluklara sebep olur. Bu yüzden narinlik oranı uygun bir aralıkta sınırlandırılmalıdır (Bilim 2019). TS 10514'de (Anonim 2015) Çelik lif uzunluğunun genel olarak 13 mm ile 64 mm aralığında, boy/en oranının ise 30 ile 100 aralığında olması gerektiği belirtilmektedir. Teorik olarak lif etkinliği, narinlik oranının artmasıyla artar. Ancak narinlik oranı 100'den fazla olan düz lifler için düzgün dağılımlı ve işlenebilir bir beton üretmek pek mümkün değildir.

Liflerin betonda kullanım şekilleri

Tek tip lif takviyesi

Uygulamada genellikle tek tip lif takviyeli beton kullanılmaktadır. Liflerin betonun içindeki en önemli görevi çatlaklar arasında köprülenme yaparak çatlakların genişlemesini

geciktirmektir. Betondaki göçme, aşamalı ve çok ölçekli bir süreçtir. Uygulanan yük altında betonda var olan mikro çatlaklar büyür ve makro çatlakları oluşturur. Yayılan makro çatlaklar göçmeye sebep olur. Tek tip lif kullanımı çökmenin etkili olduğu alanda ve tek seviyede etki gösterir (Türk vd 2017).

Karma (hibrid) lif takviyesi

Karma lifler, farklı boyuttaki liflerin birleşiminden oluşur. Bu lifler, mikro sentetik lifler ile makro Çelik liflerin birleşimi ile mikro ve makro sentetik liflerin birleşiminden oluşabilir. İyi bir tasarımda, lifler arasındaki etkileşimden kaynaklı olarak, her bir lif performansının toplamından daha fazla performans elde edilebilir. Bu olay “sinerji” olarak tanımlanmaktadır (Anonim 2015).

Uğur (2007)’de belirtildiğine göre karma lifli beton üretme fikri ilk kez Walton ve Majumdar (1975) tarafından gündeme getirilmiştir.

Tek çeşit lif kullanmak, lif takviyeli betonun özelliklerini sınırlı bir düzeye kadar iyileştirebilir. Bununla birlikte, iki veya daha fazla lif çeşidinin betona eklenmesi, bir lifin varlığı diğer liflerin potansiyel özelliklerinin daha verimli kullanılmasını sağladığı için daha çekici mühendislik özellikleri sunabilir (Şahmaran vd 2007; Afroughsabet *et al.* 2015). Bir hibrid kompozit, bir veya daha fazla matris tipinde iki veya daha fazla tipte takviye edici liften oluşur. Bir matriste iki veya daha fazla lif tipini hibridleyerek, sadece tek bir lif tipine sahip kompozitlerle karşılaştırıldığında, belirli gereksinimleri karşılamak için kompozit özelliklerin daha yakın bir şekilde uyarlanmasına izin verir (Shan *et al.* 2002).

Hibrid lifli beton iki veya daha fazla lif türü içerir. Lifler, farklı malzeme türleri, uzunluk ve en boy oranı ile beton karışımına eklenebilir. Kısa süreksiz liflerin eklenmesi, betonun mekanik özelliklerinin önemli ölçüde gelişmesine katkıda bulunur. Karma lif kullanılan betonlarla tek çeşit lif kullanılan betonlar karşılaştırıldığında karma lifli betonun performansı daha yüksek çıkmaktadır. Karma kompozitlerde daha güçlü ve daha sert liflerin varlığı, ilk gerilim çatlamasını ve tepe mukavemetini iyileştirir. Esnek ve sünek liflerin varlığı, çatlama sonrası bölgede tokluğu ve gerilim seviyelerini artırır. Daha kısa lif çeşitleri, mikro çatlakları köprüleyen ve çatlak büyümesini kontrol edebilen bir takviye sağlar. Daha uzun lifler makro çatlakların yayılmasını kontrol eder ve tokluk indeksini büyük ölçüde artırabilir. Farklı dayanımlara sahip lifler, hibrid donatı betonu üzerinde olumlu etki eder. Dayanıklılığı yüksek olan lifler, yaşlandıktan sonra tokluk ve mukavemet özelliğini artırır. Düşük dayanıklılığa sahip lifler, kompozitlerin kısa süreli performansını sağlar (Çetin 2020).

Lif hibridizasyonu için bir başka itici güç ise maliyetin düşürülmesidir. Bu, örneğin, yalnızca en çok ihtiyaç duyulan bölgelerde daha pahalı lif türü kullanılarak ve başka yerlerde ucuz bir lif türü kullanılarak başarılabılır. Genel olarak, lif takviyeli kompozitlerin daha fazla tasarım özgürlüğü, daha optimal tasarımlara yol açacaktır (Swolfs *et al.* 2017).

Barros *et al.* (2012), çimento esaslı kompozitlerde farklı tip lifleri bir arada kullanarak beton içerisindeki verimliliği ve çekme deneyi sonucu oluşan çatlaklara karşı lif etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, betondaki tüm lifler benzer olduğunda ve tek lif takviyesi uygulandığında, tüm liflerin eşzamanlı aktifleşme olasılığının daha yüksek olduğunu ve çatlak önlemede daha etkin olduğu gözlenmiştir. Qian *et al.* (2000) tarafından yapılan çalışmada ise Çelik-PP lif hibridizasyonunun olduğu karışımlarda, daha rijit ve güçlü olan Çelik lif nihai dayanımı arttırırken, daha sünek olan PP lifin çatlak sonrasında şekil değiştirme kapasitesini ve tokluğu geliştirdiğini belirlenmiştir. Rodrigues *et al.* (2010)'ın yaptığı çalışmada Çelik lifler çatlak yayılımını azaltarak süneklik sağlarken, PP lifler betondaki parçalanmayı azaltabilir sonucuna varılmıştır.

Liflerin taze beton özelliklerine etkisi

Betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve homojenliği onun işlenebilirliği ile ilgilidir (Aral 2006). Karışıma lif eklenmesi taze beton özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Kıvamı etkileyen en önemli faktörler lif türü ve miktarıdır. Farklı tür ve oranlardaki lifler betona eklenerek performans üzerinde çalışmalar yapıldığında liflerin bir araya toplanarak ve iri agregaların hareketlerini kısıtlayarak iç direncin artmasına sebep oldukları belirtilmiştir (Balçıkanlı Bankir 2020). Mehdipour *et al.* (2013) de yüksek derecede akışkan betona lif eklendiğinde betonun akışkan olmadığı kritik bir lif konsantrasyonunun olduğunu söylemiştir.

Cao *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada, kancalı Çelik liflerin hacimce % 0,25, % 0,50 ve % 0,75 oranlarında, monofilament polipropilen lifin hacimce % 0,10 oranında kullanılması ile üretilen kendiliğinden yerleşen betonların liflerin hacmi arttıkça taze haldeki betonun işlenebilirliğinin azaldığı belirtilmiştir.

Figueiredo *et al.* (2015) ise beton karışımındaki lif içeriğinin etkisini çökme ve Ve-Be deneyleriyle gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak betonun çökme değerinin azalması ve Ve-Be süresinin katlanarak artmasının ana nedeninin lif miktarı olduğu ve liflerin iri agrega hareketine engel olarak betonun hareketini de kısıtladığını belirtmişlerdir. Agrega boyutunun veya lifin narinlik oranının (boy/çap) arttırılması ile betonun akışkanlığının azaldığı da belirtilmiştir.

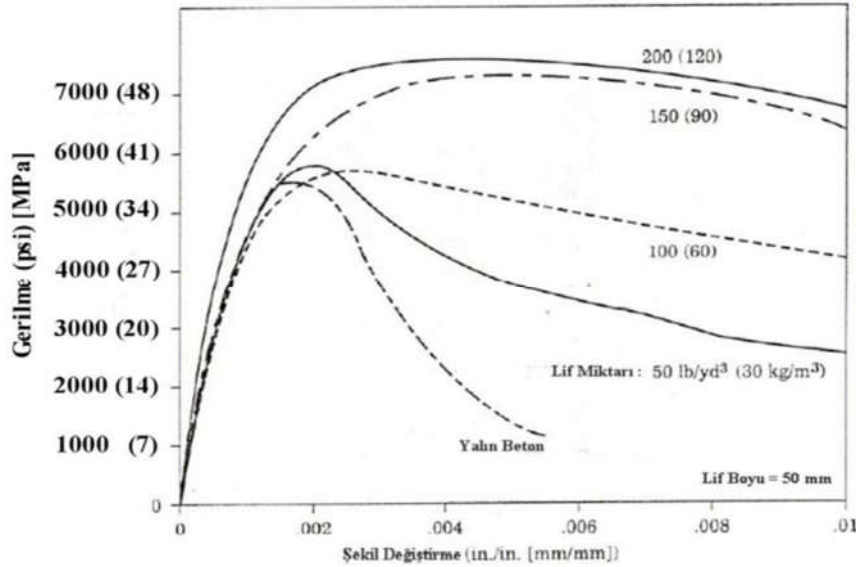
Kullanılan Çelik liflerin narinlik oranı, geometrisi, betondaki hacim oranı, matris malzemesinin karışım oranları ve lif-matris ara yüzeyi etkileşimleri Çelik lifli betonun taze

haldeki özelliklerini etkiler. Karışım hacminin %0,25 ile %1'i arasında bir değerde tercih edilen Çelik lifler yalın betonun slump değerini 25 mm ile 102 mm arasında bir değer kadar azaltır. Polipropilen liflerin taze betonun işlenebilirlik üzerinde olumsuz etki oluşturmayacağı miktarı ise karışım hacminin %2' ye varan kısmı kadardır (Uğur 2007).

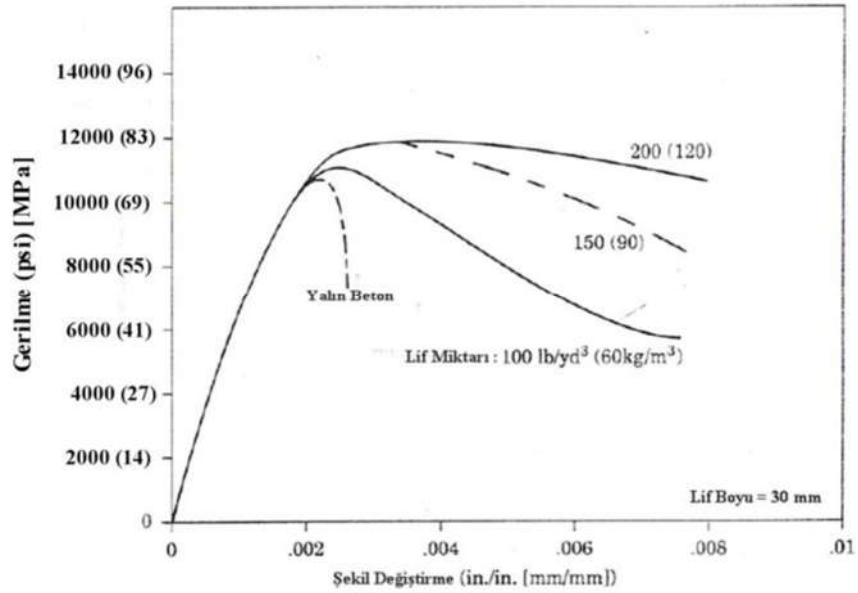
Süperakışkanlaştırıcıların katılmasıyla yüksek işlenebilirlik yakalanabilir. Karışımındaki ince malzemenin oranının fazla oluşu da lif dağılımını kolaylaştırır. Silis dumanı, uçucu kül gibi puzolanlar ince malzeme oranını artırır. Lifler karışıma en son eklenmelidir (Aral 2006).

Liflerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi

Hacimce %1,5 oranında Çelik lif kullanılan betonların basınç dayanımlarında, yalın betonlara göre, %0-%25 arasında artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu etkiler lif hacim oranı, lif geometrisi ve matris kompozisyonuyla ilişkilidir. Lif miktarının artırılması betonun daha tok malzeme olmasına sebeptir. Matris kompozisyonunun dayanım ve tokluğa iki etkisi vardır. İlki, matris lifler arası aderansın gücüdür. İkincisi ise Çelik lif takviyeli betonların mekanik davranışını etkiler (Uğur 2007). Çelik tel donatılı normal ve yüksek dayanımlı betonların basınç gerilmesi-şekil değiştirme davranışına ait grafikler Şekil 4'te verilmiştir (Uğur 2007).



Şekil 4. Çelik tel donatılı normal (üstte) ve YDB'lerin (altta) gerilme-şekil değiştirme davranışı (Uğur 2007) (devam)



Şekil 4. Çelik tel donatılı normal (üstte) ve YDB'lerin (altta) gerilme-şekil değiştirme davranışı (Uğur 2007)

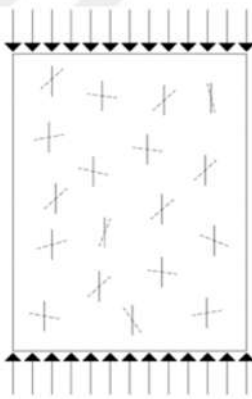
Şekil 4'ten görülebileceği gibi normal betonlarda Çelik lif miktarı artırılınca dayanım ve tokluk değerleri yalın betona göre belirgin şekilde artmış iken YDB'larda bu artışlar daha düşük seviyede kalmıştır. Bununla birlikte her iki beton türünde tepe noktasından sonra betonların davranışlarının Çelik lif miktarına göre değiştiği açıkça görülmektedir.

Karışım hacminin %1,5 oranında Çelik lif kullanılan betonların doğrudan çekme dayanımlarında normal betonlara göre %30-%40 arasında değişen oranlarda yükseliş gösterdiği yapılan deneylerde gözlemlenmiştir. Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonun Çelik liflerle güçlü aderans yapması yani kırılma halinin matristen sıyrılması yerine liflerin kopmasıyla gerçekleşmesi sebebiyle yarmada çekme dayanımı yapılan deneyler sonucu yüksek değerler aldığı görülmüştür. Bunun dışındaki betonlarda hacimce %2'den az miktarda Çelik lif içeren betonların yarmada çekme dayanımında artış gözlemlenmemiştir. Lif geometrisi, lif hacim oranı ve matris kompozisyonu Çelik lifli betonlarda eğilmede çekme dayanımını etkilemektedir (Uğur 2007).

Çelik lifli betonlar, kırılma öncesinde, normal betona göre daha fazla enerji yutabilirler. Çelik liflerin betonun süneklik ve tokluğu üstünde olumlu etkileri vardır. Yüksek dayanımlı betonlarda polipropilen lifin betonun sünekliğine olan katkısı daha belirgin görülmektedir. Deneylerde, yüksek dayanımlı yalın numunelerin, basınç yükü altında daha fazla enerji yutamadıkları noktada parçalara ayrılarak göçtükleri, polipropilen lif donatılı yüksek dayanımlı numunelerin ise daha sünek davranış sergiledikleri, bütünlüklerini koruyarak göçme süreçlerini tamamladıkları gözlenmiştir (Uğur 2007).

Literatür, Çelik lif takviyesinin beton yapıların basınç, çekme, eğilme, darbe ve tokluk, kesme ve delme direncinin yanı sıra enerji yayma kapasitesini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Çelik lifin ticari kullanımının en önemli sebebi, Çelik lifli betona ve eğilme yüküne maruz kalan bölümlere dayanan çatlak sonrası eğilme performansı sağlamasıdır. Düz ve kancalı Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun eğilme davranışı incelendiği bir çalışmada (Labib 2018) lif hacim oranının artmasının eğilme çekme mukavemetini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle Çelik lif, yalın betona kıyasla çatlak genişliğini azaltan ve düzenleyen betonun büzülme davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ancak, lifler açıkta kalması durumunda hızla korozyona uğrayacaktır. Buna karşın, donma-çözülme döngüsünden kaynaklanan bozulma ve çatlakların geçirgenliği lifler aracılığıyla azaltılabilir (Labib 2018).

Liflerin betona ilavesinin basınç dayanımı üzerinde olumlu ya da olumsuz etkileri olabilir. Bu durum lif türü ve oranına bağlıdır (Topçu 2005). Basınç dayanımında görülen değişim beton içerisindeki liflerin yük doğrultusuna göre yaptıkları açı ile ilişkilidir. Yükleme düzlemine dik olan lifler betonun basınç dayanımında herhangi bir etki etmezler. Şekil 5'te kesikli çizgilerle gösterilmiş lifler ise yükleme düzlemi ile yaptıkları açı ölçüsünde basınç dayanımının artmasında rol oynar (Oktan 2021).



Şekil 5. Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi (Oktan 2021)

Betona lif ilavesinin etkisi en çok eğilme dayanımında gözlenir. Normal betonla kıyaslayınca Çelik lifli betonun nihai eğilme dayanımı %50-%100 arasında artış gözlenmesi söz konusu olabilir. Bu artış Çelik liflerin çekme dayanımlarından kaynaklanmaktadır. Lifler ile iyi bağ kuran betonların eğilme direncindeki artış fazla olur. Bütün durumlarda eğilme dayanımındaki artış, basınç ve yarmada çekme dayanımındaki artıştan fazladır. Bu artışta lif miktarı ve lifin narinlik oranı etkilidir. Uzun lifler numune boyunca daha iyi yönlendirilerek ve belli lif tipinde daha yüksek narinlik oranına sahip olan lif dayanımında artış sağlar (Oktan 2021).

Bazalt liflerin betona ilave edilmesiyle fiziksel ve mekanik yararlar sağlanır. Bu lifler beton içerisinde oluşan çatlakları azaltmakta, betonun yorulma, aşınma, eğilme ve çekme

dayanımını artırmakta, geçirimsiz ve dayanımı yüksek betonlar üretilmesine yol açmaktadırlar (Çevik 2014).

Normal dayanımlı betonların yüksek dayanımlı betonlara göre daha az gevrek olduğunu ve lif takviyesiyle daha sünek davranış gösterdiğini söyleyebiliriz. Silis dumanı veya uçucu kül kullanımı gevrekliği artırır. Bu sebeple normal dayanımlı betonlara göre yüksek dayanımlı betonlara lif ilavesini artırarak sünek hale getirilmesi söz konusu olabilir.

Karışımındaki lif oranı %2'den azsa yarmada çekme dayanımına etki etmez. Ancak karışıma silis dumanı eklenmişse liflerin matrisle bağı daha kuvvetli olur ve liflerin kopması lif sıyrılmasına göre daha fazla gerçekleşir. Böylece ve daha yüksek yarmada çekme dayanımları elde edilir. Polimer liflerse Çelik liflere nazaran betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde fazla etkilemezler. Belli bir yerden fazla kullanımıysa olumsuz etki eder. Özellikle plastik rötrede etkilidirler. Genelde karışımda kullanılan miktarı %1'dir. Düşük yüzdede kullanıldığı için de beton özelliklerini ve elastisite modülünü çok etkilemezler. % 0.1 oranında polimerik lif katılması basınç dayanımını ve sünekliği etkilemez (Shah 1992).

Lifli Kompozitlerin Kullanım Alanları

Lifli betonlar ağır çalışma koşullarına maruz kalan yapılarda, ince kesitlerin ve yüksek dayanım özelliklerinin ihtiyaç olduğu yerlerde kullanılır (Baradan vd 2015). 1960'ların sonlarında pazara girmesinden bu yana, fiber takviyeli beton kullanımı istikrarlı bir şekilde artmıştır. 2001 itibarıyla, yıllık yaklaşık 80 milyon m³ lif takviyeli beton üretildi. Bu üretimin %60'ı zeminde döşemelerinde, %25'i fiber püskürtme betonda, %5'i prekast elemanlarda geri kalanı ise diğer alanlarda kullanıldı (Bentur *et al.* 2006).

Kozak (2013) tarafından yapılan çalışmada ise Çelik liflerin; depreme dayanıklı yapıların inşasında, yol döşemelerinde, kolon-kiriş birleşim bölgesinde, büyük sıcaklık farklarına maruz kalan yapılarda, hidrolik yapılarda, beton/betonarme borular ve altyapı malzemelerinde, fabrika depo ve hangar döşemelerinde, havaalanı ve liman kaplamalarında, püskürtme beton uygulamalarında, endüstri yapılarında, şev stabilizasyonunda, yüksek mukavetli betonlarda ve patlamaya karşı dayanıklı yapılarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Polipropilen lifler ise bitüm işlerinde, taşıyıcı sistemlerde, saha betonu ve şap işlerinde, su yapılarında, püskürtme sıva ve betonlarda, boya ve mimari uygulamalarda, toz ürünlerde (hazır beton harcı, hazır şaplar, hazır sıvalar, yüzey sertleştirici ve püskürtme harcı gibi) ve sıvalarda kullanılır (Arazsu 2012). Farklı lif tipi uygulama alanları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Farklı Lif Tiplerinin Uygulama Alanları (Sarı 2013)

Lif Tipi	Uygulama alanı
Cam	Prekast paneller, giydirme cephe kaplamaları, kanalizasyon boruları, ince beton çatılar ve beton blokların sıvası.
Çelik	Çatı uygulamalarında kullanılan gözenekli betonlar, kaldırımlar, köprü döşemeleri, ateşe dayanıklı elemanlar, beton borular, havalimanları, rüzgâra dayanıklı yapılar, tünel kaplamaları, gemi omurgaları.
Polipropilen, naylon	Temel kazığı, öngermeli kazıklar, kaplama panelleri, yürüyüş yolları, marinaların iskele elemanları, yol yamaları, büyük çaplı sualtı borularının kaplamaları.
Asbest	Saç boru, levhalar, yangına dayanıklı malzemeler ve yalıtım malzemeleri, kanalizasyon boruları, oluklu ve düz çatı levhaları, duvar kaplamaları.
Karbon	Dalgalı şekilli çatı kaplama elemanları, tek veya çift kat ince membran yapılar, tekne omurgaları, yapı iskelesi tahtaları.
Mika	Çimento esaslı levhalarda, kısmen asbestin yerine, beton borular, tamirat malzemeleri.

TS 10514 (Anomin 2015)'de ise liflerin taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan kullanım alanlarına verilen ait örnekler aşağıda sıralanmıştır:

- Havaalanları ve karayollarındaki döşemeler ve kaplamalar (Beton ve asfalt alt tabaka üzerine imal edilen döşemeler ve kaplamalar),
- Döşemeler (Zemin üzerine inşa edilen konut, ticari ve ağır endüstriyel amaçlı döşemeler),
- Köprü tabliyeleri (Tamir işleri, yüzeyin yeniden kaplanması ile yüklerin döşemedeki iç basınç kemerleri ve dış germe bağlantı elemanlarıyla karşılandığı donatısız köprü tabliyeleri),
- Püskürtme beton kaplamalar (Madenlerdeki ve tünellerdeki yeraltı destekleri, şevlerin duraylı hale getirilmesi, zemin kaplamaları ve yapısal tamirler),
- Ön dökümlü mamuller (Parçalardan (segmentlerden) oluşan tünel kaplamaları, sığınaklar, kasalar, kıyı koruma yapıları, sığınak donanımları, elektrik panelleri ve foseptik tankları)
- Patlamayla oluşan pullanma ve depreme dayanıklı yapılar (Depreme karşı yapının güçlendirilmesi ve yangından kaynaklı patlamayla oluşan pullanmaya karşı).

Yüksek Dayanımlı Beton

Günümüzün en önemli yapı malzemelerinden biri konumunda bulunan betonun gelecekte de yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Artan nüfus, yaşam standartlarının yükselmesi, kentsel dönüşüm projelerine duyulan ihtiyaç ve yapı teknolojisindeki ilerlemeler betonarme yapılara duyulan gereksinimi her geçen gün artırmaktadır. Buna karşın, geleneksel

betonun bazı durumlarda istenilen dayanım ve durabilite özelliklerini sağlamaması araştırmacıları istenilen beton özelliklerini elde etmek için farklı beton tasarımları arayışına itmiştir. Bu arayış, teknolojisindeki gelişmelerle birlikte yüksek dayanımlı betonunun (YDB) keşfine yol açmıştır (Bilim 2019).

Yüksek dayanımlı beton (YDB); çimento, agrega, süper akışkanlaştırıcı katkı ve silis dumanı gibi puzolanlar kullanılan su/çimento oranı 0,20' lere kadar düşürülerek basınç dayanımı 100 N/mm² mertebelerine çıkarılmasına rağmen yüksek işlenebilirliğe ve pompalanabilirliğe sahip (20 cm çökme) ve özel bir betondur (Sümer vd 2002). Mikro silis gibi puzolanik aktivitesi yüksek ultra incelikteki mineral katkılar ve çok düşük su/çimento oranı dayanımı artışının ana nedenleridir. Çünkü betonun dayanımı çimento hamurunun boşluklu yapısından ve agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi gibi özelliklerden etkilenmektedir (Demir 2022).

Yüksek dayanımlı betonun tanımı ve dayanım için gerekli beton sınıfının alt sınırı üzerinde kesin mutabakata varılmamış olup farklı yaklaşımlar söz konusudur. Nitekim Amerika Stratejik Otoyollar Araştırma Programının tanımına göre yüksek dayanımlı beton;

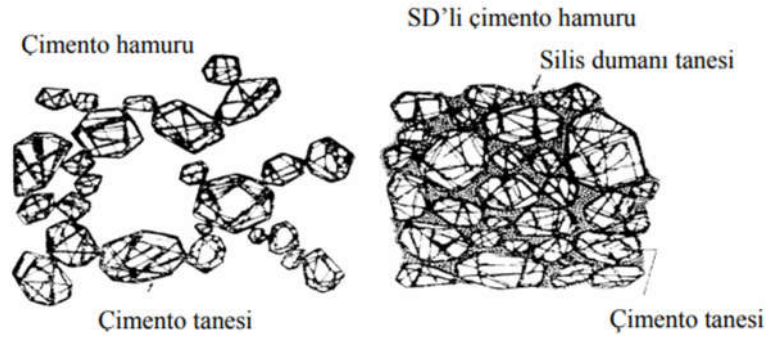
- a) 28 günlük basınç dayanımı 70 MPa'a eşit veya daha büyük,
- b) 4 saatlik basınç dayanımı 20 MPa'a eşit veya daha büyük ve
- c) 24 saatlik basınç dayanımı 35 MPa'a eşit veya daha büyük

karakteristiklerini sağlamalıdır (Topçu 2006). Birçok araştırmacı (örneğin, Attard ve Setunge 1996; Wee et al. 1996; CandaPPa et al. 2001; Demir 2022) ise Türk standartlarında (TS 500; Anonim 2000) ima edilen 28 günlük dayanımı 50 MPa'ı aşan betonları yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanmıştır. ACI 363R-10 (Anonim 2010b) ise 55 MPa ve üzerindeki basınç dayanımına sahip betonu yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanmaktadır. Buna karşın, Mindess et al. (2003) son zamanlarda yüksek dayanımlı beton için 60 MPa'ın alt sınır olarak kabul edilmekte olduğunu belirtmiştir.

Basınç dayanımı ve durabilite gibi mühendislik özelliklerinden dolayı yüksek dayanımlı betonların kullanım alanları artmıştır. Yüksek katlı yapılar, köprüler, açık deniz platformları, yollar, tüneller vb. uzun dönem performans istenen yapılar kullanım alanları arasında sayılabilir (Shafieifar et al. 2017).

Endüstriyel atıklar (mikro silis, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu vb.) yüksek dayanımlı betonun (YDB) üretiminde kullanılarak, çimento miktarı azaltılmaktadır. Böylece birim dayanım başına düşen çimento miktarı azaltılarak, karbondioksit salınım oranı da düşürülmektedir. Ayrıca beton karışımında mikro silis kullanmanın, yüksek puzolanik

aktivitesi ve inceliğinden dolayı beton basınç dayanımının arttırılmasında büyük etkisi vardır (Demir 2022). Çimento hamurunda silis dumanının varlığı, Şekil 6'da görüldüğü gibi, sıkı dizilişe sebep olur. 1980'li yıllardan bu yana betonda silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı gibi ultra incelikte mineral katkıların beraber kullanımı dayanımda çok yüksek artışlara sebep olur (Taşdemir vd 2002).



Şekil 6. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi (Taşdemir vd 2002)

Bu olumlu etkilerine karşın, silis dumanının ince taneli olması taze betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır. Bu durum ise su ihtiyacının artmasına sebeptir. Karışımında silis dumanı bulunmayan betonlarla aynı işlenebilmeyi elde etmek için silis dumanlı betonlarda 3-5 cm daha yüksek çökme değeri hedeflenmesi önerilmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı katkı olarak kullanıldığında su azaltıcı katkı maddesi de eklenmelidir. Karışımına çimento ağırlığının %10'u civarında silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi eklenerek üretilen betonlarda 80-100 MPa, hatta daha yüksek basınç dayanımına rahatlıkla ulaşılır. Ayrıca, silis dumanı içeren betonların erken yaştaki dayanımları normal betonlara göre daha yüksektir (Erdoğan 2016).

Bayasi ve Soroushian (1989), çimentoya ağırlıkça %5-%20 kadar silis dumanı ikame edilmesiyle üretilen betonlarda Çelik tel donatıların aderans etkinliğinin arttığını söylemiştir. Krenchel ve Shah (1985) ise yüksek hacim oranlarında (%2 ile %5 arasında) kullanılan polipropilen lif donatıların, silis dumanı içermeyen betonlara göre silis dumanı içeren betonlarda daha yüksek aderans kabiliyeti sergilediklerini belirtmiştir (Uğur 2007).

Kaynak Özetleri

Farklı liflerin bir arada kullanılmasıyla elde edilen karma lifli beton, tek tip ve boyutta lif kullanımı yerine betonun çeşitli özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla birden fazla tip ve boyutta lifin birlikte kullanıldığı yeni tip çimento esaslı kompozit malzemedir (Taşdemir vd 2005). Betonda kullanılan lifler esas olarak Çelik lifler, karbon lifler, cam lifler ve polimer liflerdir. Son zamanlarda birçok araştırmacı bu liflerin bir arada kullanılmasıyla (örneğin

karbon lifler ve polipropilen lifler (Mobasher *et al.* 1996), cam lifler ve polipropilen lifler (Perez-Pena *et al.* 1994) veya karbon lifler ve cam lifler (Hsie *et al.* 2008)) elde edilen karma lifli betonların mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Araştırmaların çoğu Çelik-polipropilen karma lif takviyeli betonlar üzerine odaklanmıştır (Qian *et al.* 2000; Sun *et al.* 2001; Yao *et al.* 2003; Banthia *et al.* 2003; Chen *et al.* 2005; Song *et al.* 2005). Bentur *et al.* (2006) ise tipik bir çimento matrisinde birleştirilmiş iki lifle oluşturulan hibrid kompozitin betondan beklenen tüm özellikleri sunabileceğini savunmuştur.

Beton, yarı gevrek bir kırılma mekanizmasına sahiptir ve kırılma başladığında yük taşıma kapasitesi kaybolur (Singh *et al.* 2018). Çelik lifler yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahiptir. Betona Çelik lif eklemek betonun basınç dayanımı ve tokluk gibi bazı mekanik özelliklerini iyileştirebilir, ancak, lif içeriği yüksek olmamalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması betonun ağırlığını artırır ve karıştırma sırasında işlenebilirliği düşürür. Ayrıca, Çelik lifler kolayca paslanabilir ve elektrik iletkenlik ve manyetik alan sorununa sahiptir. bu yüzden havaalanı, yüksek hızlı demiryolu sistemleri ve nükleer santral pistlerinde Çelik lif takviyeli beton kullanılması, güvenlik sorunlar oluşturabilir. (Qian *et al.* 2000). Öte yandan, polipropilen lifler iyi süneklik, incelik ve dağılma özelliğine sahiptir, bu sayede de betondaki düşük çekme mukavemetini, rötreyi ve plastik çatlakları önleyebilirler (Bayasi *et al.* 2002). Dolayısıyla bu dezavantajların üstesinden gelinmesi için yüksek miktarda kullanılacak Çelik lif yerine, polipropilen lifler veya diğer lif gruplarının bir arada kullanılması iyi bir çözüm sağlayabilecektir.

Betondaki hibrid kompozitler, betonun genel performansını iyileştirir (Singh *et al.* 2018). İyi tasarlanmış hibrid kompozitlerde, lifler arasında pozitif bir etkileşim vardır ve ortaya çıkan hibrid performans, bireysel lif performanslarının toplamını aşar. Amaç da bu hibrid sistemlerin performansının, tek başına her bir lif tipinin neden olduğu performansı aşmasıdır. Yani bir sinerji¹ oluşturulmasıdır. Banthia *et al.* (2004) bu sinerjileri ilgili mekanizmalara bağlı olarak üç gruba ayırmıştır:

1. Bir lifin daha güçlü ve daha sert olduğu ve mukavemet sağladığı, diğerinin ise daha sünek olduğu ve yüksek gerinimlerde tokluk sağladığı lifin yapısal tepkisine dayalı hibridler,
2. Bir lifin yüklemenin erken aşamalarında mikro çatlak kontrolü sağlaması için çok küçük boyutlarda olduğu ve diğer lifin makro çatlaklar arasında bir köprüleme mekanizması sağlamak için daha büyük olduğu lif boyutlarına dayalı hibridler,

¹ Sinerji (*Alm.* synergie; *Fr.* synergie; *İng.* synergy): Birden fazla etkenin bir arada bulundukları durumda, toplam etkinin bireysel katkıların toplamından büyük olması. *Eşanlam:* artımlı etki (TÜBA Türkçe Bilim Terimleri Sözlüğü, Anonim 2022).

3. Bir lif tipinin sertleştirilmiş kompozitte mukavemet veya tokluk sağladığı, ikinci lif tipinin ise işleme için uygun taze karışım özellikleri sağladığı lif işlevine dayalı hibridler.

Konu üzerindeki erken araştırmalar maksimum sinerjiyi üreten lif kombinasyonunun tanımlanmasına dayanmaktadır. Banthia *et al.* (1990) düşük elastisite modülüne sahip karbon lifleri ile yüksek elastisite modülüne sahip Çelik lifleri bir arada kullanmıştır. Çelik liflerin eklenmesi nedeniyle belirgin dayanım gelişmesi elde edilirken, karbon lif nedeniyle artırılmış tokluk elde edilmiştir. Larsen *et al.* (1991) tarafından yapılan başka bir çalışmada çimentolu kompozite Çelik ve polipropilen lifi ilave edilmiştir ve bu da 10 yıllık dış mekân maruziyetin ardından kırılma enerjisinde yaklaşık %40 artışa yol açmıştır. Glavind *et al.* (1990) ise Çelik ve polipropilen lifin hibridizasyonu nedeniyle basınç dayanımında artış rapor etmişlerdir.

90'lı yılların ortalarında araştırmacılar arasında en çok ilgiyi polipropilen lif çekmiştir. Bunun başlıca nedeni, polipropilen liflerle güçlendirilmiş betonda büzülme çatlamlarına karşı düşük maliyetli olmaları ve oldukça yüksek tokluk davranışına sahip olmalarıdır (Alhozaimy *et al.* 1996). Betonun mekanik özellikleri, beton tek tip lif ile takviye edildiğinde sınırlı bir aralıkta iyileşirken, betonun iki veya daha fazla lif türü ile takviye edildiği durumda daha üstün özellikler elde edilmiştir (Mobasher *et al.* 1996).

Qian *et al.* (2000) ise statik yükleme altında hibrid lifli betonların genel özelliklerini araştırmışlardır. Biri Çelik liflerin polipropilen liflerle bir araya getirildiği ve diğeri küçük Çelik liflerin daha büyük olanlarla birleştirildiği iki tip hibrid lifli beton üretilmiştir. Düşük lif hacim oranında %0,3'e kadar polipropilen lif ve %1,2' ye kadar Çelik lif kullanılmıştır. Çalışmada, esas olarak, minimum çimento içeriği ile uygun lif boyutları ve uygun agrega gradasyonu kombinasyonu ele alınmıştır. Sinerji etkisi, tek lifin kullanıldığı kompozitlere kıyasla hibrid lifli kompozitler durumunda önemli bir gelişme göstermiştir. Büyük Çelik lif tipine kıyasla küçük Çelik lif ilavesinde basınç dayanımında büyük bir gelişme rapor edilmiştir.

Yao *et al.* (2003) yaptıkları çalışmada, üç farklı tip hibrid lifli betonun basınç ve çekme özelliklerinin karşılaştırılmışlardır. Kullanılan lif hacim oranı % 0,5 olarak sabit tutulan çalışmada polipropilen ve karbon, karbon ve Çelik, Çelik ve polipropilen lifleri içeren üç farklı hibrid lifli beton üretilmiştir. Test sonuçlarında, tekil lif takviyeli betonlara kıyasla hibrid lif durumunda üstün kompozit performans özellikleri elde edilmiştir. Ayrıca düşük lif hacimlerinde hibrid lifler durumunda gelişmiş mukavemet ve gelişmiş tokluk özellikleri elde edilmiştir. Tek tek liflerin sinerji etkisi, karbon lifi durumunda yüksek modül ve çekme mukavemeti göstermiştir. Çelik lifler, polipropilen liflere kıyasla orta uzama göstermişlerdir.

Mono fiber kompozitlerin ve hibrid fiber kompozitlerin ilk çatlak mukavemeti, kırılma mukavemeti ve mukavemet güvenilirliği açısından sinerjik etkilerinin rapor edildiği bir çalışmada (Song, *et al.* 2005) ise hibrid fiber kompozitlerin, mono fiber kompozitlere kıyasla çatlak sonrası darbelerin sayısında yüzde artışında daha büyük bir dağılım gösterdiği ortaya konulmuştur. İstatistiksel analiz, hibrid elyaf takviyeli beton durumunda, Çelik elyaf takviyeli beton ile karşılaştırıldığında, ilk çatlak ve kırılma mukavemetinin güvenilirliklerinde iyileşme olduğunu göstermiştir.

Banthia *et al.* (2007), hibrid fiber kompozitlerin tokluk özelliklerini araştırmak için büyük çaplı kıvrımlı Çelik fiberi küçük çaplı kıvrımlı Çelik fiberle hibridleşmişlerdir. İşlenebilirlik ve elyaf dağılılabirliği taze durumda korunmuştur. Sonuçlar, tokluk açısından önemli bir gelişme olduğunu ve dolayısıyla bu tür hibridizasyonun gerçekten de gelecekte umut verici bir kavram olabileceği sonucuna vardığını göstermiştir.

Çelik ve karbon fibere kıyasla polipropilen lif için düşük modül ve çekme mukavemeti rapor edilmiştir. Song *et al.* (2004) ve Arisoy *et al.* (2008), Çelik-polivinil alkol (PVA) hibrid liflerinin kullanımının beton karıştırmada işlenebilirliği ve malzeme mukavemetini ve deforme olabirliğini artırabileceğini bildirmiştir.

Skazlic *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmada farklı lif uzunluklarına ve en boy oranlarına sahip çengel uçlu, orak şekilli ve dalga şekilli olmak üzere üç tip Çelik lif kullanılarak hibrid lif takviyeli betonlar üretilmiştir. Bu amaçla maksimum agrega boyutu 16 mm olan 12 adet lifli karışım hazırlanmıştır. Lif hacim oranı, bir kategoride %2'den azken diğer kategoride $\geq$ %2'dir. Çalışma, lifli betona 30 kg/m³ lif daha eklenmesiyle tokluk, absorpsiyon enerjisi, dinamik yüke direnç gibi dayanıklılık özelliklerinin iyileştirildiği varsayımıyla ilerlemiştir. Deneysel bulgular, 30 mm uzunluğunda ve 60 mm uzunluğunda kanca uçlu Çelik lifin %50'lik bir kombinasyon halinde optimum sinerjik etki verdiğini göstermiştir. Farklı uzunluktaki hibrid Çelik lifli kompozitlerin, tekli uzun lif takviyeli betona kıyasla betonun dayanıklılığını arttırdığını tespit etmişlerdir.

Ravichandran *et al.* (2009) 60 MPa yüksek dayanımlı betona hibrid lif takviyeli Çelik ve poliolefin lifinin farklı hacim fraksiyonlarında birleştirilmesiyle elde edilen betonun dayanım grafiğini elde etmişlerdir. Sonuç olarak, yüksek dayanımlı betona kıyasla, hibrid lif takviyeli ve hibrid lifli yüksek dayanımlı durumunda daha yüksek performans değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar ayrıca, tüm lifli betonun kopma modülünün yüksek dayanımlı betona kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Başka bir beton kompozit ile karşılaştırıldığında, hibrid lifli betonun eğilme tokluğu açısından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Jadhav *et al.* (2013) çatlak yükü, eğilme mukavemeti, eğilme rijitliği açısından sinerjik etkinin sonuçlarını değerlendirdikleri çalışmalarının sonucunda, Çelik ve polipropilen lifin hibridleştirildiği zaman betonun eğilme performansında önemli iyileşmeler olduğunu göstermişlerdir. Benzer bir çalışmada Selina Ruby *et al.* (2014), kıvrımlı Çelik ve polipropilen lifler; 0,25+0,75, 0,5+0,5, 0,75+0,25 oranlarında kullanılmıştır. Dayanım testi sonuçları, lifsiz betona kıyasla dayanımda iyileşme olduğunu göstermiştir. Liflerin eksenel yük altında betonun mikro yapısındaki çatlakların başlamasını ve ilerlemesini sınırladığı bildirilmiştir.

Jayaprakasan *et al.* (2015) yalın betona kıyasla hibrid lifli betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımının daha iyi olduğunu bildirmiştir. Ayrıca bu çalışmada dayanıklılık açısından değerlendirebilmek için geçirimsizlik testi yapılmıştır. Hibrid lifli beton numunenin darbe mukavemeti, doğrudan ona eklenen lif yüzdesine bağlı olarak bulunmuştur. Kılcal geçirimsizliğin de, lif ilave yüzdesinin artışıyla doğru orantılı olarak arttığı rapor edilmiştir.

Hibrid lifli kompozitlerin bileşimi değiştirildiğinde, sinerjik etkileri değişir. Ancak hibridizasyon için kaç tane lif eklendiğinden bağımsız olarak bileşim değiştirilirse bazı özellikler sabit kalabilir. He *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada, yüksek elastik modüllü ve düşük elastik modüllü liflerle hibridlenen betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Düşük elastik modüllü lif olarak polipropilen kullanılırken, yüksek elastik modüllü olarak Çelik, Bazalt, polivinil alkol lifleri kullanılmıştır. Test sonucu ve araştırma, tek lif ve hibrid lifin kırılma durumunda betonun direncini artıracağını göstermiştir. Hibrid Çelik-polipropilen lif takviyeli betonun mükemmel mekanik özelliklere sahip olduğu açıklanmıştır.

Hibrid kompozit lifli beton, mikro çatlaklara direnme özelliğinden dolayı son yıllarda ikincil donatı olarak geniş uygulamalara sahiptir (Singh *et al.* 2018).

Hibrid lifli betonlar sinerjik etkilerinden kaynaklanan, dayanım (Jayaprakasan *et al.* 2015; Wisnom *et al.* 2016), eğilme mukavemeti (Dong *et al.* 2013; Jayaprakasan *et al.* 2015), darbe dayanımı (Swolfs *et al.* 2017), yorulma (Shan *et al.* 2002; Wu, *et al.* 2010) gibi geniş yelpazedeki çeşitli beton özelliklerinde iyileşmeler sunmaktadır. Ayrıca normal donatılı betona kıyasla hibrid lifli kompozit için havda patlama yüklemesine (air blast loading) karşı mükemmel direnç de rapor edilmiştir (Yusof *et al.* 2013). Hibrid lif takviyeli betonun elektriksel öz direnci ve su emmesi gibi dayanıklılık özellikleriyle ilgili çok sınırlı araştırma mevcuttur. Bu çalışmalardan birinde (Afroughsabet *et al.* 2015), liflerin eklenmesiyle elektrik öz direnç ve su emme testi sonuçlarının yalın betona göre azalma eğilimi gösterdiği ortaya konulmuştur.

Smarzewski ve Barnat-Hunek (2017) tarafından yapılan çalışmanın amacı, yaygın olarak kullanılan Çelik lif ve polipropilen lifin, ultra yüksek performanslı betonun (UHPC)

sülfat ve donma-çözülme direnci ile yüzey ıslanabilirliği üzerindeki etkisini belirlemektir. Testler, % 0,25 ila %1 Çelik lif ve/veya polipropilen lif arasında değişen içeriklere sahip yalın UHPC ve fiber takviyeli UHPC küp ve silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tuza dayanıklılık testi, dona dayanıklılık testi, donma-çözülme öncesi ve sonrası dinamik elastisite modülü testi ve temas açısı testinden elde edilen kapsamlı veriler analiz edilmiştir. Aynı fiber hacim fraksiyonunda UHPC'de tek tip fiber ile karşılaştırıldığında, fiber hibridizasyonunun UHPC'nin tuz kristalleşmesine ve donma-çözülme direncine karşı direncini nispeten arttığı görülmüştür. Deneysel sonuçlar, hibrid liflerin yapışma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebileceğini ve UHPC yüzeyinin ıslanabilirliğini azaltabileceğini göstermiştir.

Hay ve Ostertag (2019) tarafından yapılan çalışmada yalın ve hibrid fiber takviyeli betona gömülü Çelik takviye çubuklarının korozyon aktivitesine enine çatlakların ve bunlarla ilişkili ara yüzey Çelik-beton hasarının rolünü ilişkilendirme amaçlanmıştır. Hem enine çatlaklar hem de ara yüzey hasarı kontrollü bir şekilde yapay olarak oluşturulmuştur. Korozyon oranlarının ve korozyon hasarının, enine çatlağın varlığı ile arttığı ve ara yüzey bozukluğu ile daha da kötüleştiği bulunmuştur. Betona hibrid liflerin dâhil edilmesi, Çelik takviye çubuklarının korozyon aktivitesini ve kütle kaybını azaltmış ve korozyona bağlı yarılma çatlaklarının yayılmasını ve açılmasını sınırlamıştır.

Liang *et al.* (2022) silindirle sıkıştırılmış betonun (SSB) basınç oluşturan yapısal mekanik parametreleri üzerinde farklı boyutlardaki polipropilen liflerin hibrid etkisini araştırmak için dokuz grup lifle güçlendirilmiş beton numunesi tasarlamış ve tek eksenli basınç testi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, PP lif ilavesinin SSB'nin sıkıştırma özelliklerini iyileştirebileceği görülmüştür. SSB'nin eksenel basınç dayanımı ve maksimum şekil değiştirme dayanımı sırasıyla %3~16 ve %7~57 oranlarında artmıştır. Bu arada, iri boyutlu PP lifler SSB'nin sünekliğini önemli ölçüde artırabilmiş olsalar da çok ölçekli PP lif hibridizasyon grubu, iki tip PP lif ile harmanlanmış gruplardan daha yüksek sıkıştırma tokluğuna sahip olmuştur.

Yakın zamanda dünya genelinde mücadele edilen COVID-19 (SARS-CoV-2) pandemisinde uzmanlar, tek kullanımlık tıbbi yüz maskelerinin (TKTYM) yaygın kullanımından kaynaklanan ve biyolojik olarak parçalanamayan yeni bir mikro plastik atık türünün doğal çevreye yönelik tehditlerine karşı uyarılar yapmıştır. Bu atıkların acilen çevre dostu bir şekilde geri dönüştürülmesi gerekmektedir. Ahmed vd (2022) tarafından yapılan araştırmada, sürdürülebilir yeşil betonda atık TKTYM'ler kullanarak çevre dostu yeni bir geri dönüşüm tekniği geliştirilmiştir. Çalışma ile iki tip (TKTYM ve Bazalt) lifin, lifli geri dönüştürülmüş agregalı betona (LGAB) dahil edildiği yeni bir fiber hibridizasyon yaklaşımı tanıtılmıştır. Hacim olarak TKTYM lif %0, %0,1 ve %0,2; Bazalt lif ise %0, %0,25 ve %0,5

oranlarında kullanılmıştır. Ayrıca karışımlara iki mineral katkı (uçucu kül ve öğütölmüş granöl yüksek fırın cürufu) da katılmıştır. Test sonuçları, hibrid lifler ve mineral katkıları içeren LGAB'ların basınç mukavemetinde yaklaşık %12, çekme mukavemetinde %26, eğilme mukavemetinde ise %60'lık bir artış olduğunu göstermiştir.



MATERYAL ve METOD

Materyal

Çimento

Karışımlarda Aşkale Çimento San. ve Tic. A.Ş.'ye ait Erzurum Çimento Fabrikası'nda TS EN 197-1 standardına göre üretilmiş olan CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir. Tablo 6'da belirtilen analiz sonuçları üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 6. CEM I 42,5 R Çimentosunun Kimyasal Kompozisyonu ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)		Fiziksel ve Mekanik Karakteristikler	
Toplam SiO ₂	19,50	32 mikron elekte kalıntı (%)	11,9
Al ₂ O ₃	4,54	90 mikron elekte kalıntı (%)	-
Fe ₂ O ₃	3,55	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3215
CaO	64,07	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
MgO	1,42	Su İhtiyacı (%)	29,3
SO ₃	2,66	Hacim Genleşmesi (mm)	2
Basınç Dayanımı			
Kızdırma Kaybı	2,59	Gün	Sonuç (MPa)
		2	24,9
		7	-
Na ₂ O	0,48		
K ₂ O	0,64		
Cl ⁻	0,0111		
Çözünmeyen Kalıntı	0,77		
Serbest CaO	1,36		

Karışım suyu

Deneylerde beton üretimi ve kür suyu olarak Atatürk Üniversitesi'nin şebeke suyu kullanılmıştır.

Agrega

Numunelerin üretimi için yapılan deneylerde agrega olarak iki çeşit ince agrega, iki çeşit de iri agrega kullanılmıştır. Gri kalker kökenli olan iri agreganın maksimum tane çapı 22,4 mm'dir. Ayrıca filler malzeme olarak beyaz kalker (özellik ağırlığı 2,60) kullanılmıştır.

Agregaların tane yoğunluğu, yüzey nemi ve su emme oranı değerleri TS EN 1097-6'ya (Anonim 2013a) göre belirlenmiş ve Tablo 7'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan agrega resimleri ise Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Agregaların Özellikleri

	0-4 (Dere kumu)	0-4 (Kırma kum)	4-8 (Kırmataş I)	8-22,4 (Kırmataş II)
Özgü ağırlık	2,57	2,68	2,66	2,64
Su emme (%)	1,9	1,4	0,68	0,9
Yüzey nemi (%)	0,7	1,0	1,4	0,4



Şekil 7. Beton üretimi için hazırlanan agregalar

Süper akışkanlaştırıcı (SA)

Numunelerinin üretiminde TS EN 934-2+A1'e (Anonim 2013b) uygun olarak üretilmiş ticari ismi Master Glenium Sky 816 olan ve piyasadan temin edilen Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti üretimi süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltıcı olan bu süper akışkanlaştırıcı beton katkısının üretici firmadan temin edilen teknik özellikleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Süper Akışkanlaştırıcının Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Kahverengi – Sıvı
Özgül Ağırlık (20°C'de)	1,065-1,105 kg/lt
Ph Değeri	7-10
Alkali İçeriği (%)	≤3,00 (kütlece)
Klor İyon İçeriği (%)	≤0,10 (kütlece)

Mikrosentetik lif

Polipropilen Elyaf San. ve Dış. Tic. A.Ş.'den temin edilen ve %100 polipropilen üretilmiş olan mikrosentetik life ait özellikler Tablo 9'da gösterilmiştir. Bu ürün orijinal ambalajında +5° ve 30° arasında, nemden ve direk güneş ışığından korunmuş halde laboratuvar ortamında depolanmıştır. Piyasada Micro Sentetik Elyaf Kırpma olarak da bilenen bu lifin boyu 12 mm'dir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde mikrosentetik lif yerine polipropilen (PP) lif kullanımı tercih edilmiştir.

Tablo 9. Polipropilen Mikrosentetik Life Ait Özellikler

Çap (µm)	Yoğunluk (g/cm³)	E. Modülü (GPa)	Çekme Day. (MPa)
27	0,91	5,15	900

Bazalt lif

Bazalt life ait özellikler Tablo 10'da gösterilmiştir. Kırpılmış Bazalt Elyaf olarak da bilinen bu lifin 24 mm boyunda olan tipi kullanılmıştır. Bazalt lifinin piyasada 12 mm'lik versiyonu da bulunmaktadır.

Tablo 10. Bazalt Life Ait Özellikler

Çekme d. (MPa)	Yoğunluk (g/cm³)	E. Modülü (GPa)	Uzama (%)
4840	2,7	89	3,15
Erg. sıcak. (°C)	Sıcaklık limitleri (°C)	Çap (µm)	Lif uzunluğu (mm)
1450	(-260)-(+982)	13-25	24

Çelik lif

Deneylerde kullanılan Dramix 3D 65/35 türü Çelik lif Bekaert İzmit Çelik Koor. San. ve Tic. AŞ' den temin edilmiştir. Çelik life ait özellikler Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Çelik Life Ait Karakteristik Özellikler

Malzeme Özellikleri		Geometri	
Nominal çekme dayanımı	1.345 (MPa)	Tel grubu	3D
Elastisite Modülü	200 (GPa)	Uzunluk	35 mm
Taşıma gücü sınır durumuna karşılık gelen birim şekil değiştirme	0,8%	Çap	0,55mm
Yoğunluk	7,85 g/cm ³	Boy/Çap oranı	65

Deneyleerde kullanılan lif çeşitleri Şekil 8’de topluca gösterilmiştir.

**Şekil 8.** Çalışmada kullanılan lif çeşitleri

Silis dumanı

Deneyleerde kullanılan silis dumanına ait özellikleri aşağıdaki Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Silis Dumanına Ait Özellikler

Özellikler (%)	Miktar
SiO ₂	88,81
Al ₂ O ₃	0,83
Fe ₂ O ₃	0,41
CaO	2,53
MgO	7,68
SO ₃	0,83
Na ₂ O	0,55
K ₂ O	2,58
Cl ⁻	0,030
Kızdırma Kaybı	1,68
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	2,20
Özgöl Yüzey (cm ² /g)	213,300

Numune üretiminde kullanılan malzemelerin tümü Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Numune üretiminde kullanılan malzemeleri

Metot

Parametreler, kodlama ve numune sayısı

Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,45, bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 , silis dumanı oranı %10, süperakışkanlaştırıcı oranı %1,4 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Karışımların lif içeriği ise değişken olarak seçilmiştir. Buna göre; Bazalt lif, polipropilen lif ve Çelik lifler tekli, ikili ve üçlü olarak karışımlara katılmıştır. Lif oranları lif çeşidine göre değişkenlik göstermiştir. Literatürden hareketle belirlenen lif oranları Tablo 12’de verilmiştir.

Diğer taraftan, numune kodları lif oranları esas alınarak belirlenmiştir. Çelik lif S, Bazalt lifi B, mikro sentetik lif ise P ile sembolize edilmiştir. Kodlamada karışımında bulunan lif(ler)in cinsini gösteren sembol(ler) ve her sembole bitişik olarak da lif yüzdesi yazılmıştır. Lif yüzdeleri “%” işareti kullanılmadan ve %1’in altındaki oranlar için “,” kullanılmadan gösterilmiştir. Örneğin **S1.5B025P01 kodlu karışım**; %1,5 Çelik lif, %0,25 Bazalt lif, %0,1 polipropilen lif içeren numuneyi göstermektedir. Buna göre çalışma kapsamında üretilen kontrol, tekli, ikili ve üçlü karışımların kodları yine Tablo 13’te gösterilmiştir.

Tablo 13. Lif Oranları ve Numune Kodları

	KOD	S Makro Çelik lif (3D 65/35)	B Bazalt lifi	P Mikrosentetik lif (PP)	Toplam lif Hacmi
1	C	0	0	0	0 (Kontrol)
2	S1	1,0	0	0	1
3	B025	0	0,25	0	0,25
4	P01	0	0	0,1	0,1
5	S1B025	1,0	0,25	0	1,25
6	S1P01	1,0	0	0,1	1,1
7	B025P01	0	0,25	0,1	0,35
8	S1B025P01	1,0	0,25	0,1	1,35
9	S1.5B025P01	1,5	0,25	0,1	1,85
10	S1B05P01	1	0,50	0,1	1,6
11	S1B025P02	1	0,25	0,2	1,45

Seçilen parametrenin seviyelerine göre 11 karışım hazırlanmıştır. Her bir karışımdan 5 adet 150×150×150 mm boyutlarında küp numune ve 2 adet 100×100×400 mm boyutlarında prizmatik numune üretilmiş olup toplamda 77 adet örnek üretilmiştir.

Agrega deneyleri

Agregalarda yüzey nemi, tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini deneyleri

TS EN 1097-6: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini (Anonim 2013a)'de belirtilen yöntemler kullanılarak agregaların yüzey nemi, tane yoğunluğu, su emme oranı tayini yapılmıştır. Deneyler sonunda bulunan değerler yukarıda (Tablo 7'de) verilmiştir.

Elek analizi deneyleri ve granülometri eğrisi

Karışım hesabına esas olmak üzere agregaların elek analizleri TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler- Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu (Anonim 2012a) standardına göre yapılmıştır. Elek analizi sonuçlarına bağlı olarak belirlenen granülometri eğrileri ise TS 706 EN 12620+A1 (Anonim 2009b) belirtilen kriterlere göre çizilmiş ve 'Araştırma Bulguları ve Değerlendirme' bölümünde verilmiştir.

Beton karışım hesapları, ön deneyler ve numunelerin üretimi

Beton karışım hesabında TS 802: Beton karışım tasarımı hesap esasları (Anonim 2016) standardı göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, TS EN 206 + A2: Beton-Özellik, performans,

imalat ve uygunluk (Anonim 2021a) standardına göre de karışım hesabı yapılan beton üretimi gerçekleşmiştir.

Uygun bir karışım hesabı ve istenilen özelliklerde beton numune üretimi için ön deneyler yapılarak süper akışkanlaştırıcı, agrega ve filler oranlarının değiştirilmesi suretiyle çökme ve kohezyonun izlemesi yapılmıştır. Ön deneyler için yapılan karışım hesapları ve gözlem sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Her bir ön deney esnasında ve ortaya çıkan ürün üzerinde taze betonun akışkanlığı ve kohezyonu incelenmiş, segregasyona neden olabilecek durumların ortaya çıkıp çıkmadığı kontrol edilmiş ve gerek kullanılan malzemeler (örneğin kimyasal katkı türü) gerekse de bileşenlerin oranlarında değişikliğe gidilerek ideal karışım elde edinceye kadar deneme yapılmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen ön deney sayısı 5'dir.

Çalışmada sertleşmiş beton deneyleri sonuçlarını sağlıklı bir şekilde birbiri ile karşılaştırabilmek için beton üretimine azami hassasiyet gösterilmiştir. Yukarıda değinilen ön deneyler bu amaçla da değerlendirilerek betonların üretim yöntemleri belirlenmiştir. Bileşenlerin karışıma katılma sırası, karıştırma ve bekleme süreleri gibi betonun taze ve sertleşmiş halde özelliklerini belirleyen karıştırma yöntemi Tablo 15'te verilmiştir.

Tablo 14'ten görülebileceği gibi üretim yöntemleri belenirken liflerin özellikleri göz önünde bulundurularak ayarlamalar yapılmıştır. En çok da liflerin karışım içerisinde homojen dağılımının sağlanması için çaba sarf edilmiştir. Bu nedenle özellikle PP liflerin üzerinde durulmuştur. Ekincioglu (2003) ve Aral (2006)'da belirtilen yöntemle benzer olarak bu çalışmada da silis dumanının tamamı, PP lifin tamamı, SA'nın %50'si ve karma suyunun % 50'si ile oluşturulan bulamaç 50±10 dakika süreyle karıştırıldıktan sonra betoniye konulmuştur.

Tablo 14. Ön Denemeler İçin Hazırlanan Karışım Hesapları (kg/m³) ve Gözlem Sonuçları

Bileşen Adı	Ön deney numarası				
	1	2	3	4	5
Çimento	360	360	360	360	360
Silis Dumanı	40	40	40	40	40
Su miktarı (%)	120 (%30)	172 (%43)	160 (%42)	172 (%43)	180 (%45)
SA Oranı (%)	8 (%2)	8 (%2)	6 (%1,5)	6 (%1,5)	5,6 (%1,4)
Filler (%)	56,5 (%3)	52,4 (%3)	53,26 (%3)	88,25 (%5)	87,26 (%5)
0/4 (Dere kumu) (%15)	270,74	251,30	255,35	248,62	245,83
0/4 (Kırma kum) (%30)	564,66	524,11	532,57	518,53	512,70
4/8 (Kırmataş I) (%30)	560,44	520,19	528,59	514,66	508,88
8/22,4 (Kırmataş II) (%25)	463,53	430,24	437,18	425,66	420,88

Tablo 14. (devamı)**Gözlemler ve alınan kararlar:**

1. *Deneme:* Beton nemli toprak kıvamında çıktı. 500 g su eklendi. Yine çok fazla değişmedi. 536 g daha eklendi. Yine istenilen akışkanlık gözlenemedi. SONUÇ: s/ç oranının 0,43'e çıkarılması ve orta sınıf su azaltıcı katkıdan (MasterPozzolith 3156W) yüksek oranda su azaltan süperakışkanlaştırıcı katkıya (MasterGlenium Sky 816) geçilmesine karar verildi.
2. *Deneme:* Beton akıcı kıvamda çıktı. Ancak, kohezyonu zayıf idi. SONUÇ: s/ç oranının 0,42'ye, SA'nın ise %1,5'a çekilmesine karar verildi. Ayrıca hesaplardaki öngörülen hava miktarının %1,5'dan %1'e indirilmesine karar verildi.
3. *Deneme:* Slump 13 cm çıktı ancak zamanla kıvam kaybı oluştu. Diğer taraftan, az da olsa kohezyon problemi (bazı iri agregaların ayrışması) gözlemlendi. SONUÇ: s/ç oranının tekrar 0,43'e, filler oranının ise %5'e çekilmesine karar verildi.
4. *Deneme:* Slump 13 cm çıktı ve kohezyonu iyiydi. Dayanım tespiti için örnek alındı ve 28 günlük dayanımı 65,51 MPa olarak bulundu. SONUÇ: Bu karışım oranlarının esas alınarak ana üretimin yapılmasına karar verildi.
5. *Deneme:* Betonun akışkanlığı ve kohezyonu fevkalade iyidi. Ancak karıştırma süresi uzayınca kıvam kaybı görüldü. Lifli karışımlarda sorun yaşanmaması için en son karışımdan önce 24 g SA + 250 g su katıldı. Bu ilavenin bundan sonra karışımların tamamına aynı aşamada katılmasına karar verildi. Böylece karışım hesabı ve yöntemine son şekli verilmiş oldu.

100 dm³ kapasiteye, 30 devir/dakika karıştırma hızına sahip laboratuvar tipi mikserde (Şekil 10) üretilen numuneler önceden temizlenip yağlanmış küp ve prizma şeklindeki kalıplara tek tabaka halinde 25 kez şişlenip yerleştirilmiş 30 saniye süreyle de vibrasyon masasında vibre edilmiştir.

Tablo 15. Beton Üretim Yöntemleri

1. Lifsiz beton üretimi	Süre (dk.)
İri agregalar (4/8 ve 8/22,4) + toz maddeler (çimento + filler+SF) betoniyere konuldu.	2
İnce agregalar (dere k+ kırma k) eklendi.	2
Suyun yarısı eklendi.	2
Suyun diğer yarısı + SA eklendi.	2
Dinlenmeye bırakıldı.	1
24 g SA + 250 g su ilave edildi ve son karıştırma yapıldı.	5
Toplam:	14
2. Çelik+Bazalt+PP lifli beton üretimi	
Ayrı bir kap içinde SD'nin tamamı + PP lifin tamamı + SA'nın %50'si + karma suyunun % 50'si karıştırılıp bulamaç oluşturuldu ve en az 1 saat karıştırıldı.	
İri agregalar (4/8 ve 8/22,4) + toz maddeler (çimento + filler) betoniyere konuldu.	2
İnce agregalar (dere k+ kırma k) eklendi.	2
Suyun diğer yarısına SA'nın kalanı (%50'si) eklenip karışıma katıldı.	2
Önce Bazalt sonra Çelik lifler çalışan betoniyere yavaş yavaş ve serpiştirilerek eklendi.	3
Ayrı kapta hazırlanan bulamaç çalışmakta olan betoniyere yavaş yavaş katıldı.	1

Tablo 15. (devamı)

24 g SA + 250 g su ilave edildi ve son karıştırma yapıldı.	5
Toplam:	15
3. Çelik ve/veya Bazalt lifli beton üretimi	
İri agregalar (4/8 ve 8/22,4) + toz maddeler (çimento + filler+ SD) betonyere konuldu.	2
İnce agregalar (dere k+ kırma k) eklendi.	2
Suyun yarısı eklendi.	2
Suyun diğer yarısı + SA eklendi.	2
Önce Bazalt sonra Çelik lifler çalışan betonyere yavaş yavaş ve serpiştirilerek eklendi.	3
24 g SA + 250 g ilave edildi ve son karıştırma yapıldı.	5
Toplam:	16
4. PP lifli beton üretimi	
Ayrı bir kab içinde SD'nin tamamı + PP lifin tamamı + SA'nın %50'si + karma suyunun % 50'si karıştırılıp bulamaç oluşturuldu ve en az 1 saat karıştırıldı.	
İri agregalar (4/8 ve 8/22,4) + toz maddeler (çimento + filler) betonyere konuldu.	2
İnce agregalar (dere k+ kırma k) eklendi.	2
Suyun diğer yarısına SA'nın kalanı (%50'si) eklenip karışıma katıldı.	2
Ayrı kapta hazırlanan bulamaç çalışmakta olan betonyere döküldü.	3
24 g SA + 250 g su ilave edildi ve son karıştırma yapıldı.	5
Toplam:	14

**Şekil 10.** Beton üretiminde kullanılan mikser

Ana deneylerde kullanılan nihai karışım oranları ise Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. Ana Deneyler İçin Belirlenen Karışım Hesapları (kg/m³)

No	Kod	Çimento	Su	SD	Superakış.	Filler	0/4 (Dere k.)	0/4 (Kırma k.)	4/8 (K. Taş I)	8/22,4 (K. Taş II)	Çelik lif (S)	Bazalt lif (B)	PP lif (P)
1	C	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	-	-	-
2	S1	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	78,50	-	-
3	B025	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	-	6,75	-
4	P01	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	-	-	0,94
5	S1B025	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	78,50	6,75	-
6	S1P01	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	78,50	-	0,94
7	B025P01	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	-	6,75	0,94
8	S1B025P01	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	78,50	6,75	0,94
9	S1.5B025P01	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	117,75	6,75	0,94
10	S1B05P01	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	78,50	13,50	0,94
11	S1B025P02	360	180	40	5,6	87,26	245,83	512,70	508,88	420,88	78,50	6,75	1,88

Taze beton deneyleri

Birim ağırlık deneyi

Birim ağırlık deneyi TS EN 12350-6: Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi (Anonim 2019c) standardına uygun olarak yapılmıştır. Kütlesi ve hacmi belli olan ve içerisine beton sıkıştırılarak doldurulan küp kalıp tartılarak deney gerçekleştirilmiştir.

Çökme (slump) deneyi

Çökme deneyinde üst çapı 10 cm, taban çapı 20 cm ve yüksekliği 30 cm olan metal malzemeden yapılmış kesik koni (slump konisi ve Abraham konisi denir) ile altlık olarak yerleştirme tablası kullanılmıştır. Şişleme işlemi için ise boyu 60 cm ve çapı 1,6 cm olan metal çubuk (şiş) kullanılmıştır. Slump konisi 20 cm'lik taban alta gelecek şekilde yerleştirme tablasının ortasına konulmuştur. Her defasında 25 kez metal çubukla şişlenerek 3 aşamada taze betonla doldurulmuş olan koni, ortalama 5 saniyede dikey hizada dikkatle çekilmiş ve çökme değeri ölçülmüştür. Deney TS EN 12350-2: Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi (Anonim 2019d) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney anından alınan bir görsel Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Taze betonda çökme miktarı ölçümü

Çökme deneyinde çökme miktarı belirlendikten sonra beton kütle gözlenmiş ve çimento şerbeti ya da iri agregaların kütleden ayrılıp ayrılmadığı kontrol edilmiştir. Ayrıca yerleştirme çubuğu ile ana kütleyle yan tarafından hafifçe vurularak kohezyon kontrolü yapılmıştır.

Hava içeriği tayini deneyi

Hava içeriği tayini deneyinde hava ölçer (airmeter) kabına her aşamada kenarlardan merkeze doğru 25 kez şişleme işlemi ile 3 aşamada taze beton yerleştirilmiştir. Yerleştirilen taze beton yüzeyi, ölçüm kabının üst seviyesinde olması gerektiği için sıyırma çubuğu ile fazla beton sıyırılmış ve yüzey tesviye edilmiştir. Ardından conta ile temas edecek tüm yüzeyler nemli bir bezle temizlenmiştir. Cihaz hafifçe sallanarak ölçüm kabı içerisindeki havanın tümüyle boşalması sağlanarak üst kapak ve ölçüm kabı kilitlenip hava tahliye musluğu kapatılmıştır. Pompalama işlemi manometre göstergesindeki başlangıç çizgisine gelene kadar yapılmıştır. Daha sonra da boşaltma muslukları kapatılmıştır. Son olarak ana hava tahliye musluğu açılmış ve manometredeki değer okunmuştur. Hava miktarı yüzde cinsinden bir değerdir. Bu deney TS EN 12350-7: Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava içeriğinin tayini - Basınç yöntemleri (Anonim 2019e) standardına göre yapılmıştır. Şekil 12’de deney anına ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 12. Hava ölçer (airmeter) cihazı ve deney anından bir görüntü

Numunelerin kürü

Tüm numuneler 24 saat bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılarak $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki olan ve kirece doymuş su içeren kür havuzuna konulmuştur (Şekil 13). 6 gün sonra kür havuzundan alınan numuneler 21 gün boyunca da ıslak telis bezine sarılarak laboratuvar ortamında saklanmıştır (Şekil 14). Bu süre boyunca telisin sürekli ıslak kalması sağlanmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri yapılacağı gün numuneler telis bezinden çıkarılmıştır.



Şekil 13. Kür havuzuna saklanan numuneler



Şekil 14. Telis bezi örtülerek nem kürüne tabii tutulan numuneler

Sertleşmiş beton deneyleri

Ultrasonik atılımlı dalga hızı (UADH)² deneyi

Proceq ticari ismiyle piyasada bulunan cihazla 28 günlük numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi öncesinde ultrasonik atılımlı dalga hızı okumaları yapılmıştır. Ultrasonik atılımlı dalga hızı yöntemi, hasarsız (tahribatsız) bir yöntemdir. Cihaz, yaydığı ultra ses dalgasının beton içindeki yayılma hızını ölçmektedir. Cihazda dalga göndericisi ve dalga alıcısı olmak üzere iki adet prob (başlık) bulunmaktadır. Çalışmada öncelikle numunelerin farklı noktalarından alınan boy ölçümlerinin ortalamasından hareketle numune boyları belirlenmiştir. Daha sonra cihazdan ultrasonik atılımlı dalga hızı geçiş süresi μsn olarak okunmuş ve boy/süre (m/s) formülü ile geçiş hızı (V) bulunmuştur. Numune üzerinde yapılan UPV deneyinde

² Ultrasonik atılımlı dalga hızının İngilizcesi Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)'dir. Beton teknolojisinde UPV kısaltması yaygın olarak kullanıldığı için tezin ilerleyen bölümlerinde UADH yerine UPV kısaltılması kullanılmıştır.

problara gress yağı sürülmek suretiyle numune ile problemlerin boşluksuz teması sağlanmış ve proplar numune yüzeyinin merkezine bastırılarak okumalar yapılmıştır. Ultrasonik atımlı dalga hızı tayini TS EN 12504-4: Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini (Anonim 2021b) standardına göre yapılmıştır. Deneyden alınan bazı görüntüler Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15. Küp (solda) ve prizmatik (sağda) numunelerin UPV ölçüm görüntüleri

Basınç dayanımı tayini deneyi

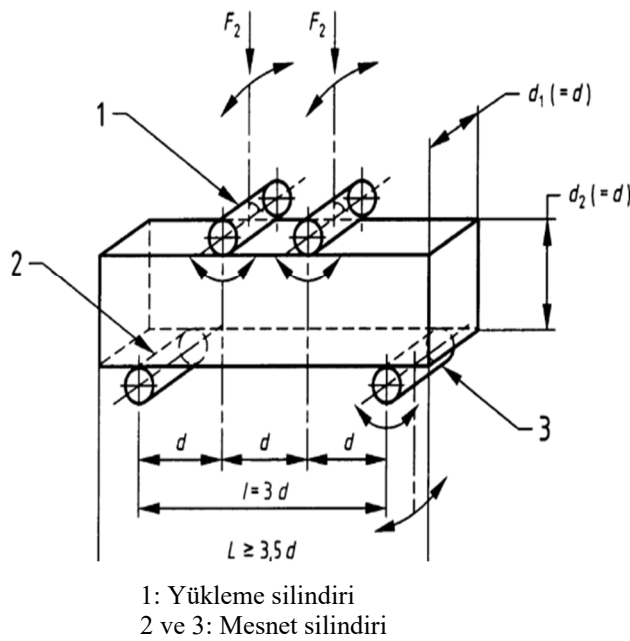
28 günün sonunda nem küründen çıkarılan 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler eksenel basınç dayanımı tayini deneyi için ELE International üretimi olan ve yük kontrollü olarak çalışan AUTOTEST 3000 cihazına konulmuştur. Bu deney, TS EN 12390-3: Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini (Anonim 2019a) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında yükleme hızı 0,6 MPa/s olacak şekilde sabit alınmıştır. Deneyde kullanılan cihaz ve deney anına ait bir görüntü Şekil 16’da verilmiştir.



Şekil 16. Beton presi (solda) ve deney anından bir görüntü

Eğilmede çekme deneyi

Numunelerin eğilme dayanımları TS EN 12390-5: Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini (Anonim 2019b) standardına göre yapılan iki noktadan yükleme deneyi ile belirlenmiştir. Deneylerde basınç dayanımı deneyinde kullanılan ELE International üretimi AUTOTEST 3000 cihaz kullanılmıştır. Deneylerde yükleme hızı 0,05 MPa/s olarak alınmıştır. Eğilmede çekme deneyi düzeneği TS EN 12390-5’de belirtildiği şekli ile hazırlanmıştır. Şekil 17’de eğilmede çekme deneyi düzeneğinin şematik resmi ve deney anına ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 17. Eğilmede çekme deney düzeneği (solda) ve deney anına ait bir görüntü

Yük uygulama düzeneğinde iki adet mesnet silindiri ve iki adet yükleme silindiri bulunmaktadır. Yükleme silindirleri, makinenin uyguladığı yükün, yükleme silindirleri arasında eşit paylaştırılmasını sağlayan mafsallı kirişe bağlanmıştır. Mesnet silindirleri arası açıklık numune genişliğinin üç katı olmalıdır. Yükleme silindirleri arasındaki mesafe ise numune genişliği kadar olmalıdır. Numune yükleme silindirleri arasındaki açıklığa eşit mesafelerde yerleştirilmelidir (Anonim 2019b).

Betonların eğilme dayanımı aşağıdaki bağıntılı ile hesaplanmıştır.

$$f_{ct,fl} = F \times l / (d_1 \times d_2^2) \quad (1)$$

Burada;

$f_{ct,fl}$: eğilme dayanımı,

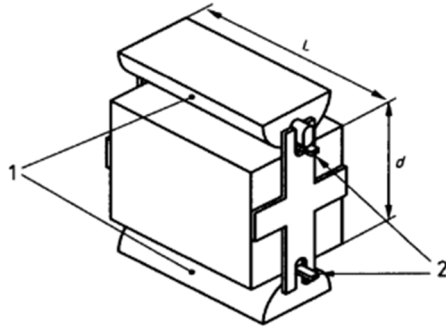
F : en büyük yük,

l : mesnet silindirleri arasındaki açıklık mesafesi,

d_1 ve d_2 : deney numunesinin en kesit boyutlarıdır.

Yarmada çekme dayanımı deneyi

Örneklerin yarmada çekme dayanımları TS EN 12390-6: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini (Anonim 2010) standardına göre belirlenmiştir. Bu standart betonun yarmada çekme dayanımının küp numuneler üzerinde yapılmasına da izin vermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında üretilen 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinden betonların yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Bu deney için de ELE International üretimi AUTOTEST 3000 cihazı kullanılmıştır. Deney esnasındaki yükleme hızı 0,05 MPa/s olarak sabit alınmıştır. Deneyler esnasında sıkıştırma şeritleri ve yükleme parçalarının, numunenin yükleme düzleminde üst ve alt kısmı boyunca dikkatli ve birbirine paralel olarak yerleştirilmesine özen gösterilmiştir (Şekil 18).



- 1.Çelik yükleme parçası
2. Sert mukavvadan sıkıştırma şeridi



Şekil 18. Yarmada çekem deney düzeneği (solda) ve deney anından bir görüntü

Örneklerin yarmada çekme dayanımı aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$f_{ct} = 2 \times F / (\pi \times L \times d) \quad (2)$$

Burada;

f_{ct} : yarmada çekme dayanımı,

F : en büyük yük,

L : numunenin yükleme parçasına temas çizgisinin uzunluğu,

d : Numunenin seçilen en kesit ölçüsüdür.

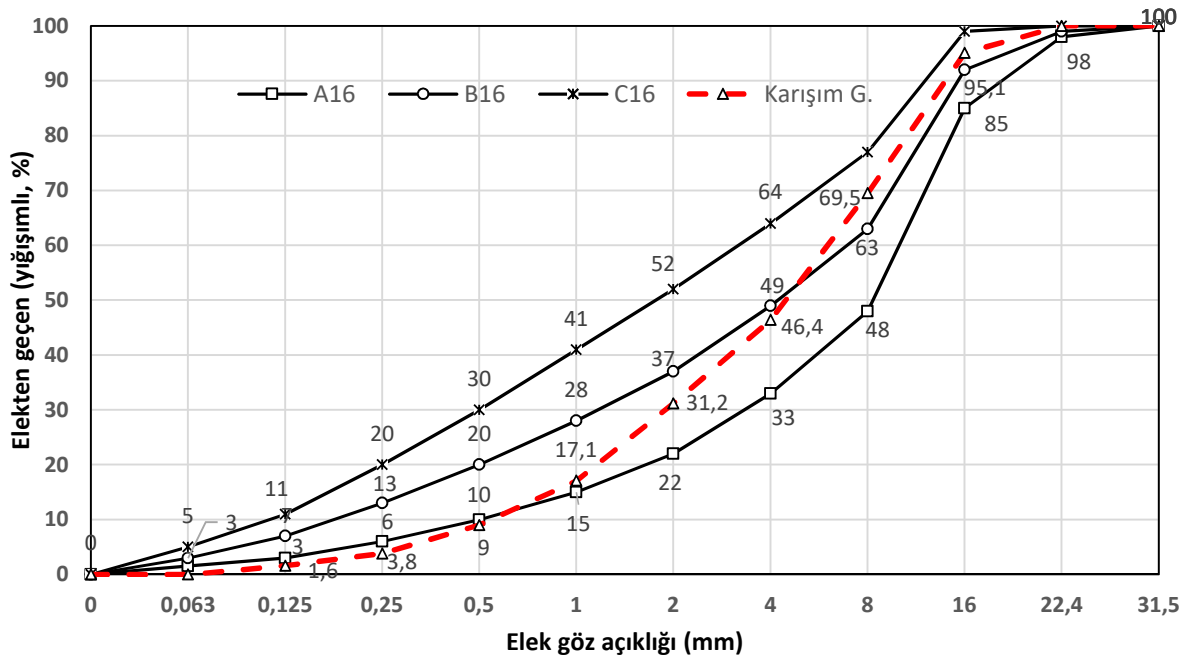
ARAŞTIRMA BULGULARI ve DEĞERLENDİRME

Elek Analizi Sonuçları ve Granülometri Eğrisi

TS EN 933-1'e (Anonim 2012c) standardına uygun bir biçimde yapılan ince ve iri agregaların elek analizinin sonuçları ile karışım granülometrisini elde etmek için her bir agrega sınıfından alınan oranlar Tablo 17'de verilmiştir. Şekil 19'da karışım granülometrisi ve D_{en} büyük=16 mm ait standart eğriler grafikte görülmektedir.

Tablo 17. Elek Analiz Sonuçları

Agrega Sınıfı	31,5	22,4	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
0/4 (D. K)	100	100	100	100	86,9	64,3	37,7	16,2	4,2	0,9	0,0
0/4 (K. K)	100	100	100	100	93,87	66,67	36,06	20,59	9,61	4,23	0,0
4/8	100	100	100	80,53	17,03	5,03	1,85	0,89	0,6	0,39	0,0
8/22,4	100	100	80,33	1,26	0,37	0,37	0,37	0,37	0,33	0,18	0,0
0/4 (D.K) *0,15	15,0	15,0	15,0	15,0	13,0	9,6	5,7	2,4	0,6	0,1	0,0
0/4 (K.K) *0,30	30,0	30,0	30,0	30,0	28,2	20,0	10,8	6,2	2,9	1,3	0,0
4/8 *0,30	30,0	30,0	30,0	24,2	5,1	1,5	0,6	0,3	0,2	0,1	0,0
8/22,4 *0,25	25,0	25,0	20,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Toplam	100	100	95,1	69,5	46,4	31,2	17,1	9,0	3,8	1,6	0,0



Şekil 19. D_{en} büyük=16 mm için standart eğriler ve karışımın granülometri eğrisi

Deneyleerde kullanılan agreganın maksimum dane çapı ($D_{en\ büyük}$) 22,4 mm'dir. Bu tane boyutu TS 802 (Anonim 2016) standardında tane büyüklüğü dağılımı (granülometri) seçiminde agrega en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan betonlar için önerilen sınır değerlerin içinde kalmaktadır. Bu nedenle Şekil 19'da $D_{en\ büyük}=16$ mm için hazırlanmış olan standart eğriler verilmiştir. Ayrıca, TS 706 EN 12620 + A1'de (Anonim 2009) üst göz açıklıklı (D) elekten kalan agregalar kabul edildiğinden $D_{en\ büyük}=16$ mm için belirlenen standart eğriler, 31,5 mm'yi de içine alacak şekildedir. Bundan dolayı, Tablo 17 ve Şekil 19'da 31,5 mm'lik elekten geçen oranlar da bulunmaktadır.

Şekil 19'da karışım granülometrisinden 0,5 mm'den küçük olan agregaların A16 eğrisini dışarıdan takip ettiği, 0,5 mm ile 4 mm arasındaki agregaların A16-B16 eğrileri arasında kaldığı, 4 mm ile 31,5 mm arasındaki agregaların ise B16 eğrisini üstten takip ederek B16-C16 eğrileri arasında kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte karışımının granülometrisinin ideal bölge olarak tanımlanan A16-B16 bölgesinin içerisinde kaldığı kabul edilebilir. Ön deneylerde de agregadan kaynaklanan her hangi bir sorun ile karşılaşılması nedeniyle karışımın granülometrisinde belirtilen oranlarda agrega ile betonlar üretilmiştir.

Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi

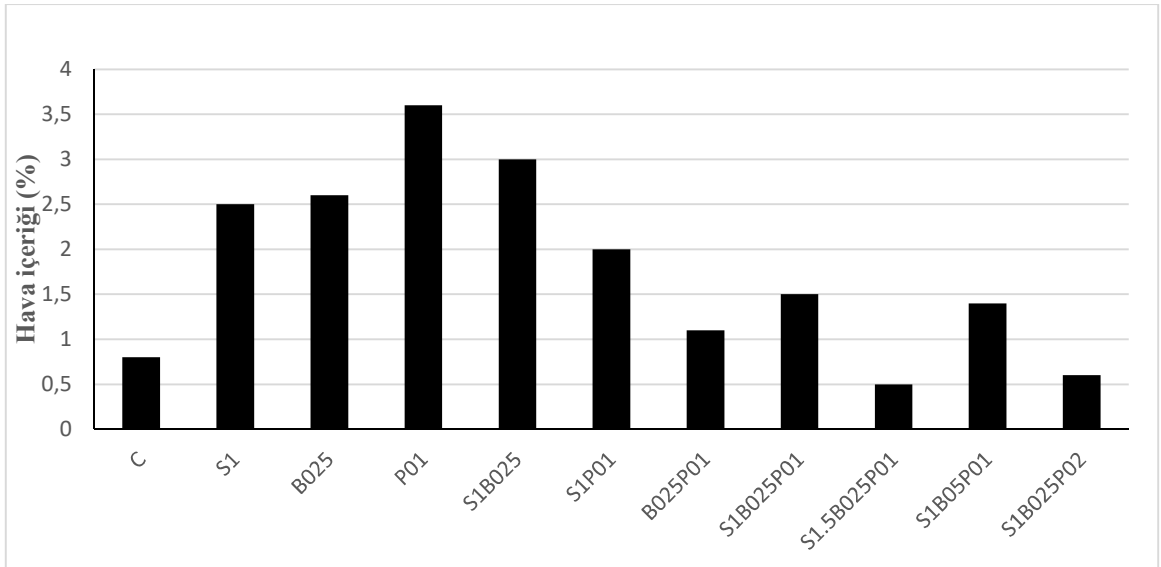
Taze beton için yapılmış olan hava içeriği, birim ağırlık ve çökme deneyi sonuçları Tablo 18'de verilmiş her özellik ile ilgili değerlendirmeleri ise ilerleyen alt başlıklarda yapılmıştır.

Tablo 18. Taze Betonların Hava İçeriği, Birim Ağırlıkları ve Çökme Değerleri

KOD	Hava içeriği (%)	Birim ağırlık (gr/cm ³)	Çökme (cm)
C	0,8	2,38	20,5
S1	2,5	2,38	14,5
B025	2,6	2,33	21,5
P01	3,6	2,30	10,5
S1B025	3	2,37	13
S1P01	2	2,42	4,5
B025P01	1,1	2,35	8
S1B025P01	1,5	2,40	4
S1.5B025P01	0,5	2,41	1
S1B05P01	1,4	2,42	2,5
S1B025P02	0,6	2,41	3

Hava içeriği deneyinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Tablo 18'de verilen hava içeriği değerleri Şekil 20'de grafik haline getirilmiştir.



Şekil 20. Betonların hava içeriği değerlerinin lif türü, sayısı ve oranına göre değişimi

Şekil 20’de çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- i. Kontrol betonunun hava içeriği %0,8 olarak ölçülmüştür. Karışım hesapları yapılırken de hava içeriğinin %1 olması öngörülmüştü. Hesaplarda öngörülen hava içeriğinin deneylerde elde edilen ile hemen hemen aynı olması üretilen betonların kalitesi bakımından olumlu bir gösterge olarak değerlendirilmiştir.
- ii. Tekli lif kullanılan örneklerin her üçünün de hava içerikleri kontrol betonuna göre daha yüksek çıkmıştır. Diğer bir ifadeyle karışıma tekli lif katılması betonun hava içeriğini kontrol betonuna göre artırmıştır.
- iii. Tüm karışımlar içinde %3,6 değeri ile en yüksek hava içeriğine PP lif içeren P01 kodlu numune sahip olmuştur.
- iv. Betona %1 oranında Çelik lif katmakla oluşan hava içeriği ile %0,25 oranında Bazalt lif katmakla oluşan hava içeriği ile hemen hemen aynı oranda oluşmuştur.
- v. Liflerin karışımlara ikili olarak katılması durumunda oluşan hava miktarı yine kontrol betonuna göre fazladır. Bu bulgu ikili lif kullanımının da betonunun hava içeriğini artıracak anlamına gelmektedir. İkili lifler içerisinde en yüksek hava içeriği ise %3 ile Çelik+Bazalt karışımında (S1B025) görülmüştür.
- vi. İkili lif içeren karışımlarda en az hava içeriği B025P01 karışımında görülmüştür. Ancak bu oran (%1,1) bile kontrol betonunkinden (%0,8) yüksektir. Bununla birlikte aradaki farkın çok fazla olmadığını da belirtmek gerekir.
- vii. Liflerin üçlü olarak karışıma katılması lif orana bağlı olarak hava içeriği üzerinde farklı etkiler oluşturmuştur. Tekli ve ikili kullanımlardaki dozajlara sahip lifler üçlü olarak karışıma katıldığında (S1B025P01) betonun hava içeriği kontrol betonuna göre artmıştır (%1,5). Ancak, üçlü karışımdaki Çelik lif oranının %1,5’a çıkarıldığı

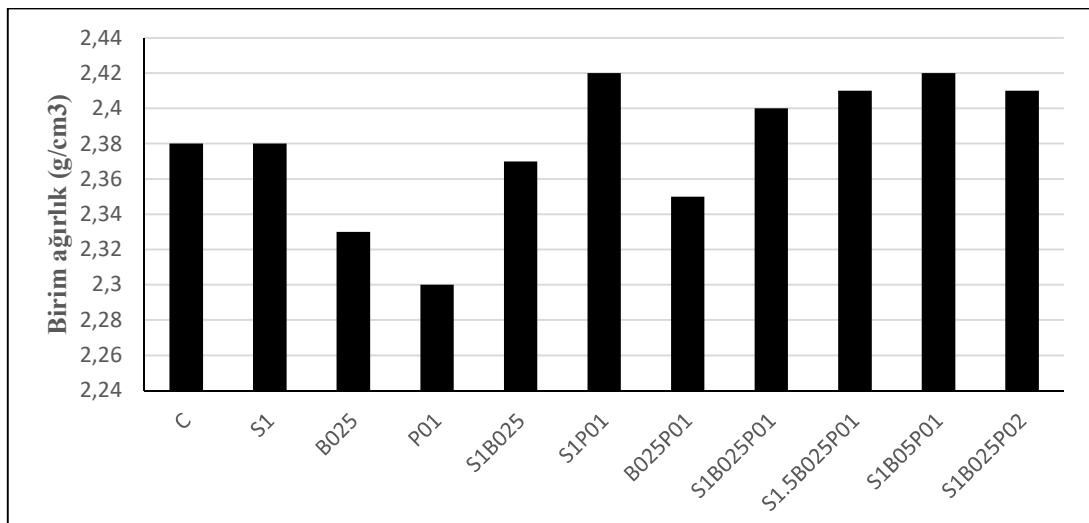
karışımın (S1,5B025P01) hava içeriği kontrol betonu ile hemen hemen aynı hatta bir miktar düşük çıkmıştır (%0,5). Öyle ki bu grup tüm karışımlar içerisinde en düşük hava içeriğine sahiptir. Buna karşın Bazalt lifi oranı artırıldığında (S1B05P01) karışımdaki hava miktarı artarak %1,5 değerine ulaşmıştır. PP lif oranını artırılması ise (S1B025P02) karışımların hava içeriğini tekrar azaltmış ve %0,6 seviyesine çekmiştir. Bu değer S1,5B025P01 kodlu karışımın ile birlikte kontrol betonuna en yakın olan değerdir.

- viii. Liflerin tekli ve üçlü kullanılmasında lif çeşitleri betonların hava içerikleri üzerinde farklı şekilde etki etmiştir. En çok PP lif olmak üzere karışımlara tekli lif katılması ile betonların hava içerikleri artmış iken üçlü karışımlarda Çelik lif ve PP lif miktarlarının artırılması hava miktarını, referans karışım olan S1B025P01 grubuna göre, düşürmüştür; Bazalt lifinin artırılması ise S1B025P01 kodlu karışım ile aynı hava içeriğini vermiştir. Bu sonuçlar, yalın betona lif katılması ile lifli betondaki lif oranlarının artırılmasının karışımları hava içeriği üzerinde farklı etkiye sahip olacağını göstermektedir.

Literatürde daha çok tekli lif kullanılması durumunda liflerin taze betonların hava içeriği üzerindeki etkileri çalışılmış olup bazı araştırmacıların bulguları ile bu çalışma elde edilmiş olan bulgular örtüşmektedir. Örneğin, Ünal vd (2006) de Çelik liflerle yaptıkları çalışmada Çelik liflerin birim hacimdeki hava miktarını bir miktar artırdığını söylemişlerdir.

Birim ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Tablo 18'deki karışımların birim ağırlık değerleri Şekil 21'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 21. Karışımların birim ağırlıkları lif türü, sayısı ve oranına göre değişimi

Şekil 21'de verilen grafikten aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

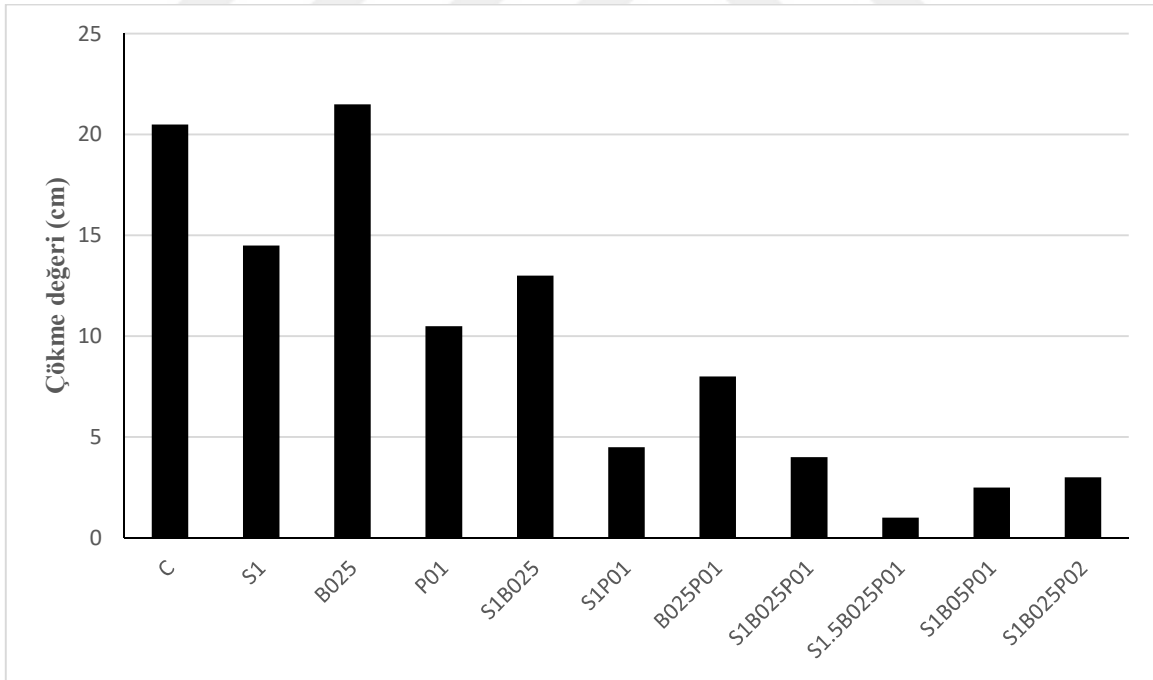
- i. Beton birim hacim ağırlıkları lif türüne, tekli ve çoklu kullanım şekline ve lif oranlarına göre değişmiştir.
- ii. Karışıma Bazalt ve PP lif katılması betonların birim ağırlıklarını düşürmüştür. En fazla düşme de %2,1 oranıyla PP lif içeren karışımlarda görülmüştür. Materyal ve Metot bölümünde verilen Tablo 9'dan PP lifin yoğunluğunun $0,91 \text{ g/cm}^3$ olduğu görülmektedir. Karışıma daha düşük yoğunluğa sahip bir bileşenin girmiş olması betonun birim ağırlığının da düşmesine yol açmıştır. Bununla birlikte, Topçu vd (2017), farklı boy ve narinlik oranlarındaki PP lif ilavesiyle topaklaşma olma ihtimalinin olduğunu, bunun betonun kıvamında azalamaya yol açacağını, kıvamdaki azalmanın ise lifli betonun kalıba yerleşmesini kısmen de olsa zorlaştıracığından betonun boşluklu olmasına sebep olabileceği ileri sürmüştür.
- iii. Karışımlara %1 oranında Çelik lif katılması ile betonların birim ağırlıklarının değişmemiş olması ilginç bulunmuştur. Çünkü Materyal ve Metot bölümünde verilen Tablo 11'den de görüleceği üzere, Çelik lifin yoğunluğu $7,85 \text{ g/cm}^3$ olduğundan karışımının birim hacim ağırlığını artırması beklenir. Nitekim Uğur (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, Çelik tel donatılı betonların birim ağırlığının yalın betonun birim ağırlığından daha yüksek çıktığını ve bu betonların birim ağırlıklarının artan lif hacim oranıyla birlikte arttığını söylemiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuca Çelik liflerin topaklaşmasının neden olduğu boşluklu yapının yol açmış olma olasılığı söz konusudur. Ancak, sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen parçalar üzerinde yapılan görsel muayenede anormal bir boşlukla yapı da gözlenmediği gibi yoğun bir matris yapısı ile karşılaşılmuştur. Bu nedenle, bu sonucun deneysel hatadan kaynakladığı ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.
- iv. İkili lif kullanımında karışımların birim ağırlıklarının tekli kullanımlara göre bir miktar arttığı söylenebilir. Öyle ki bu gruptaki Çelik+PP kombinasyonu tüm karışımlar içinde en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olan iki karışımdan biridir.
- v. Liflerin üçlü kullanımında ise en tüm karışımlar kontrol betonundan daha yüksek birim hacim ağırlık değerine sahip olmuştur. Bu gruptaki karışımların birim hacim değerleri $2,40\text{-}2,42 \text{ g/cm}^3$ arasındadır.
- vi. Tekli, ikili ve üçlü lif içeren karışımların birim hacim ağırlıklarının ortalaması, sırasıyla, $2,34 \text{ g/cm}^3$, $2,38 \text{ g/cm}^3$ ve $2,41 \text{ g/cm}^3$ çıkmıştır. Kontrol betonun birim ağırlığının $2,38 \text{ g/cm}^3$ olduğu göz önünde bulundurulacak olursa, tekli kullanımların betonların birim hacim ağırlıklarını düşürdüğü, ikili kullanımların bir

miktar artırarak kontrol betonu ile aynı seviyeye getirdiği, üçlü kullanımların ise artırdığı söylenebilir.

- vii. Maksimum birim ağırlık değeri $2,42 \text{ g/cm}^3$ ile hibrid lif içeren S1P01 ve S1B05P01 kodlu numunelerden elde edilmiştir. İki karışım arasındaki fark, S1B05P01 kodlu karışımın %0,5 oranında Bazalt lifi içermesidir. Bazalt lifi katılmasına rağmen karışımın birim hacim ağırlığı artırmamış olması onun yoğunluğu ile açıklanabilir. Materyal ve Metot bölümünde verilen Tablo 10'dan da görüleceği üzere, Bazalt lifin yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'dir. Bu değer beton hacminin yaklaşık %70'ni oluşturan agrega ile hemen hemen aynıdır. Dolayısıyla karışma katılması birim hacim ağırlığın artması yönünde bir etki etmemiştir. Bununla birlikte yalın betona Bazalt lifin tekli olarak katıldığı B025 kodlu karışımın kontrol betonundan az da olsa düşük çıkması ilginç bulunmuştur. Ancak, Ma *et al.* (2010) tarafından yapılan çalışma sonucunda da betona ilave edilen farklı oran ve boydaki Bazalt liflerin betonun birim hacim ağırlığını düşürdüğü belirtmiştir.

Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Çalışmada üretilen betonların çökme değerleri Şekil 22'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 22. Betonların çökme değerlerinin lif türü, sayısı ve oranına göre değişimi

TS EN 206 + A2'de (Anonim 2021a) 1-4 cm arası S1, 5-9 cm arası S2, 10-15 cm arası S3, 16-21cm arası S4 ve $\geq 22\text{cm}$ ise S5 sınıfı olarak belirlenmiştir. Buna göre; S1B025P01, S1.5B025P01, S1B05P01 ve S1B025P02 numuneleri S1; S1P01 ve B025P01 numuneleri S2; S1, P01 ve S1B025 numuneleri S3; C numunesi ve B025 numunesi S4 sınıfına girmektedir.

Diğer taraftan, Şekil 22'den aşağıdaki sonuçların çıkarılması mümkündür:

- i. Kontrol betonu akıcı kıvamda üretilmiştir. %0,25 Bazalt lifi içeren karışım (B025) hariç karışımlara tekli, ikili ya da üçlü lif katılması ile betonların çökme değerleri düşmüştür. Bu bulgu yalın betonlara, Çelik, Bazalt ya da PP lif katılması durumunda betonun işlenebilirliğinde bir miktar kayıp olabileceğini göstermektedir. Köksal vd (2012) tarafından yapılan araştırmada da betona lif eklenmesiyle betonun işlenebilirliğinin azaldığı belirtilmiştir. Açıkgenç vd (2012) de polipropilen liflerin akıcı kıvamlı betonlarda çökme miktarını azalttığını ve bu durumun işlenebilirliğe olumsuz etki ettiği gibi görülse de taze betonun kohezyonu için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ünal vd (2006) ise Çelik liflerle yaptıkları çalışmada liflerin betona katılmasıyla betonun karıştırılması ve yerleştirilmesinin güçleştiği yani işlenebilirliğinin düştüğünü rapor etmişlerdir. Jun *et al.* (2010) ise Bazalt lif oranının artması ile birlikte karışımın işlenebilirliğinin azaldığını bildirmişlerdir.
- ii. Tekli karışımlar daha az, ikili karışımlar biraz daha fazla üçlü karışımlar ise en fazla düşüşe sebep olmuşlardır. Nitekim tekli, ikili ve üçlü karışımların çökme değeri ortalamaları, sırasıyla, 15,5 cm, 8,5 cm ve 2,6 cm'dir. Bu sonuçlar, yalın betonlara katılan lif çeşidi arttıkça betonun işlenebilirliğinde ciddi kayıpların olacağını göstermektedir.
- iii. Tekli karışımlarda B025 kodlu karışımın betonun çökmesini bir miktar artırmış olması ilginç bulunmuştur. Ancak bu betonun çökmesinin 21,5 cm, kontrol betonun çökme değerinin ise 20,5 cm olduğu göz önünde bulundurulduğunda aradaki farkın çok önemli olmadığı ve ölçüm hatasından kaynaklanmış olabileceği ihtimali de akla gelmektedir. Bununla birlikte, diğer liflerin aksine, %0,25 oranında Bazaltın lifinin betonun çökmesini düşürmemiş olduğunu da belirtmek gerekir. Bu sonuç, Jun *et al.* (2010)'un açıkladığı sonuçla çelişmektedir.
- iv. Tekli lif kullanımında çökme değerinde en fazla düşüşe PP lifler neden olmuştur. Kontrol betonuna göre bu betonun çökme değeri %49 oranında daha azdır.
- v. İkili lif içeren karışımlarda ise en fazla çökme kaybı %78 ile S1P01 kodlu karışımda görülmüştür.
- vi. Tüm karışımlar içinde çökme değerlerinde en belirgin düşüş ise üçlü lif içeren karışımlarda görülmüştür. Bu grubu oluşturan dört karışımın çökme değerlerinin 1-4 cm arasında değiştiğini belirtmek gerekir. Ancak en düşük değere (1 cm) S1,5B025P01 kodlu karışım sahip olup bu değer kontrol betonunun çökmesinden %95 oranında daha azdır. Bu karışımın diğer üçlü karışımlardan farkı ise

içerisindeki Çelik lif miktarının %1,5 olmasıdır. Buradan karışımdaki Çelik lif oranının artırılmasıyla betonun işlenebilirliğini daha çok azaltacağı sonucu çıkarılabilir.

Sertleşmiş Beton Deneyleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ultrasonik atılımlı dalga hızı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Laboratuvar ortamında 28 günlük numuneler üzerinde yapılan UPV deneyi sonuçları Tablo 19’da verilmiştir. Okumalar yalnızca küp numuneler üzerinde yapılmıştır.

Tablo 19. UPV Deneyleri Verileri

KOD	Dalga İ. Süresi (T, μ s)	Ort. Boy (L, cm)	V (m/s)	V _{ort} (m/s)
C-1	31,7	15,1	4763	4540,4
C-2	31,3	15,0	4792	
C-3	41,8	15,2	3636	
C-4	31,9	15,0	4702	
C-5	31,4	15,1	4809	
S1-1	32,3	15,1	4675	4675,8
S1-2	32,5	15,1	4646	
S1-3	32,5	15,2	4677	
S1-4	31,7	15,1	4763	
S1-5	32,7	15,1	4618	
B025-1	32,1	15,0	4673	4698,0
B025-2	31,7	15,1	4763	
B025-3	31,7	15,0	4732	
B025-4	32,1	15,2	4735	
B025-5	32,7	15,0	4587	
P01-1	31,9	15,0	4702	4650,8
P01-2	32,3	15,1	4675	
P01-3	32,6	15,0	4601	
P01-4	32,4	15,0	4630	
P01-5	32,5	15,1	4646	
S1B025-1	32,6	15,1	4632	4612,2
S1B025-2	32,9	15,0	4559	
S1B025-3	32,5	15,2	4677	
S1B025-4	32,8	15,2	4634	
S1B025-5	32,9	15,0	4559	
S1P01-1	31,9	15,1	4734	4748
S1P01-2	31,8	15,1	4748	

Tablo 19. (devamı)

S1P01-3	32,4	15,0	4630	4734,4
S1P01-4	31,3	15,2	4856	
S1P01-5	32,1	15,1	4704	
B025P01-1	31,9	15,1	4734	
B025P01-2	32,3	15,1	4675	
B025P01-3	32	15,0	4688	4707,0
B025P01-4	31,9	15,1	4734	
B025P01-5	32,1	15,1	4704	
S1B025P01-1	31,6	15,0	4747	
S1B025P01-2	32,3	15,0	4644	
S1B025P01-3	31,4	15,0	4777	4720,8
S1B025P01-4	31,9	15,0	4702	
S1B025P01-5	31,9	15,1	4734	
S1.5B025P01-1	32,2	15,0	4658	
S1.5B025P01-2	31,7	15,1	4763	
S1.5B025P01-3	32,8	15,1	4604	4689,0
S1.5B025P01-4	32	15,1	4719	
S1.5B025P01-5	31,9	15,0	4702	
S1B05P01-1	31,9	15,1	4734	
S1B05P01-2	31,9	15,0	4702	
S1B05P01-3	32,3	15,0	4644	4706,0
S1B05P01-4	31,8	15,1	4748	
S1B05P01-5	31,9	15,0	4702	
S1B025P02-1	32,1	15,0	4673	
S1B025P02-2	32,7	15,1	4618	
S1B025P02-3	31,7	15,0	4732	4686,4
S1B025P02-4	32,3	15,1	4675	
S1B025P02-5	31,9	15,1	4734	

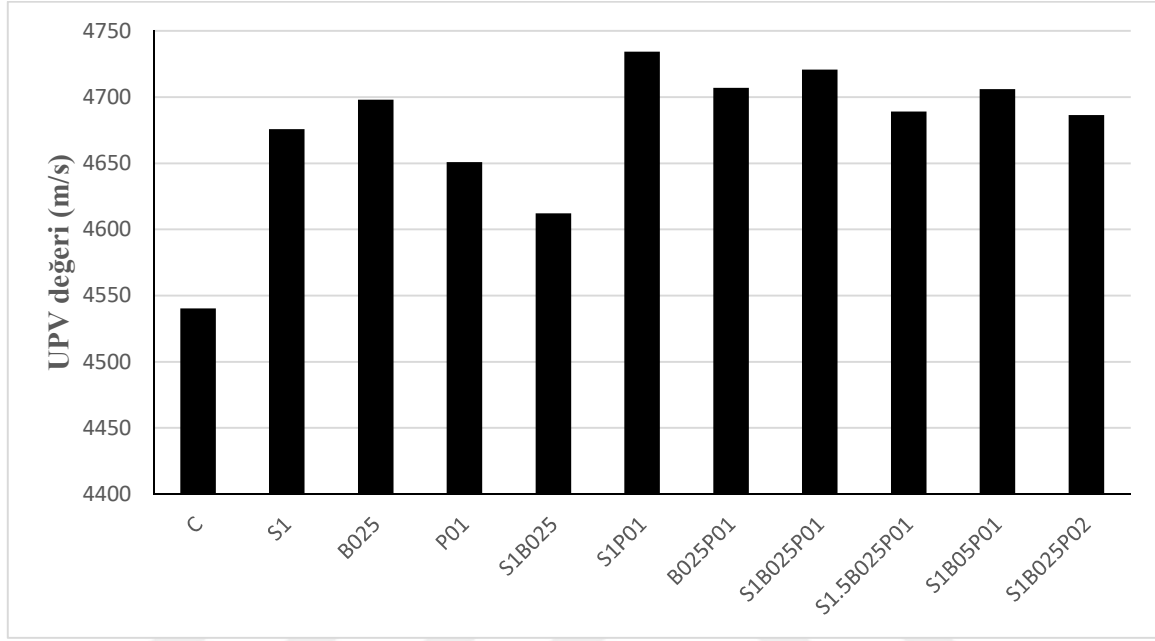
Tarhan (2020)'de ifade ettiğine göre Malhotra (1976) ultrasonik atılımı dalgı hızı değeri üzerinden beton kalitesinin belirlenmesinde Tablo 20'de verilen değere göre sınıflandırma yapılabileceğini belirtmiştir.

Tablo 20. Ultrases Geçiş Hızına Göre Betonun Sınıflandırılması (Malhotra 1976)

Ultrases geçiş hızı (V, m/s)	Beton sınıflandırması
V > 4575	Mükemmel
4575 > V > 3660	İyi
3660 > V > 3050	Şüpheli
3050 > V > 2135	Zayıf
V < 2135	Çok Zayıf

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin ultrasonik atılımlı dalga hızları 4540,4 m/s ile 4734,4 m/s arasındadır. Görüldüğü gibi örneklerin hemen hemen tamamı UPV değerleri bakımından Tablo 20’de belirtilen “mükemmel” sınıfına girmektedir. Sadece kontrol betonunun UPV değeri (4540,4 m/s) alt sınırın biraz altında kalmıştır.

Tablo 19’da verilen UPV değerlerinin ortalamaları Şekil 23’te grafik haline getirilmiştir.



Şekil 23. Numunelerin UPV değerlerinin lif çeşidi ve oranına göre değişimi

Şekil 23’teki veriler değerlendirilmesiyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Karışıma lif katılması ile betonların UPV değerleri yükselmiştir. Tüm karışımların UPV değerlerindeki artış, kontrol betonuna göre %1,6-%4,3 arasında değişmiştir.
- Tek çeşit lif kullanılan numunelerin ultrasonik atılımlı dalga hızı ortalaması 4674,9 m/s, iki çeşit lif kullanılan numunelerin ultrasonik atılımlı dalga hızı ortalaması 4684,5 m/s ve üç çeşit lif kullanılan numunelerin ultrasonik atılımlı dalga hızı ortalaması 4700,6 m/s’dir. Bu sonuçlar, karışımdaki lif sayısının artması ile UPV değerinin arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, lifli karışımların tamamının UPV değerleri 4612-4734 m/s arasında değişmiştir. Bu aralığın çok açık olmadığını da belirtmek gerekir.
- Tekli lif içeren karışımlarda en yüksek UPV değeri (4698 m/s) %0,25 oranında Bazalt içeren B025 kodlu örneğe aittir. İkili lif içerenlerde ise S1P01 kodlu numune 4734 m/s ile en yüksek UPV değerini vermiş iken üçlü lif içeren karışımlarda S1B025P01 kodlu karışımda en yüksek UPV değeri (4721 m/s) ölçülmüştür.
- Üçlü karışımlarda karışımdaki lif oranının artırılması, referans alınan S1B025P01 kodlu karışıma göre, UPV değerini artırmamış bilakis az bir miktar (%0,3-%0,7

arasında) düşürmüştür. Ancak bu gruptaki karışımların UPV değerlerinin birbirine yakın olduğunu da belirtmek gerekir.

Basınç dayanımı deneyi sonuçları ve değerlendirmeler

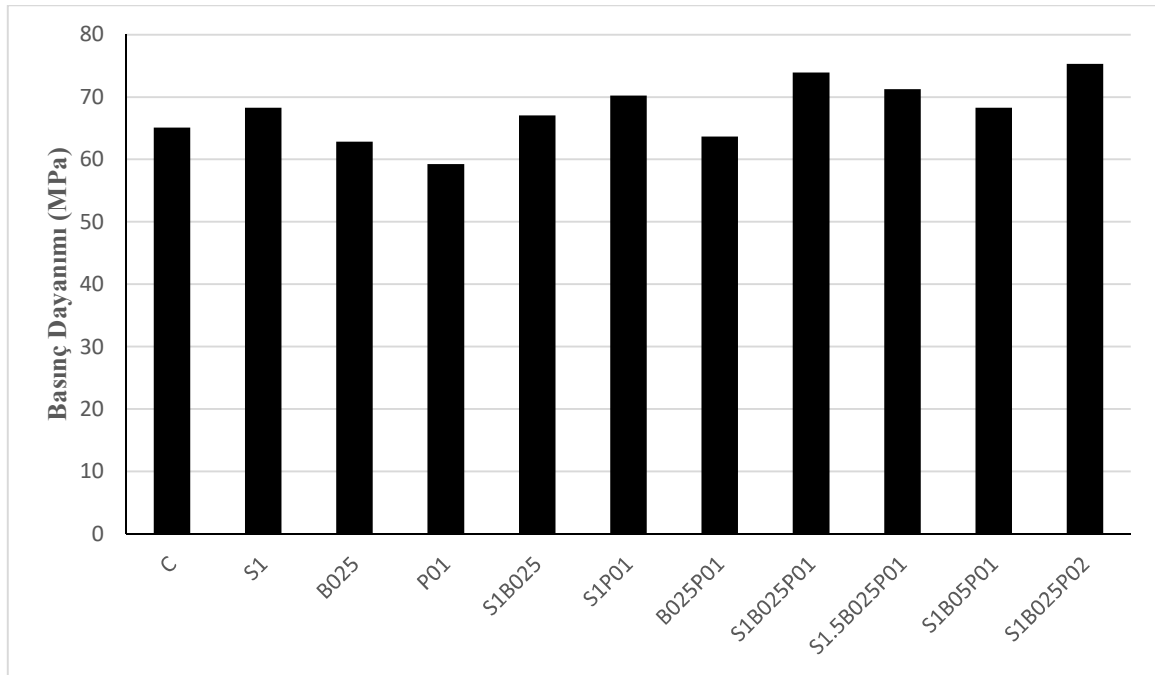
Tablo 21’de numunelerin 28 günlük basınç dayanım sonuçları verilmiştir.

Tablo 21. Numunelerin Basınç Dayanım Sonuçları

Kod	σ (MPa)	σ_{ort} (MPa)
C-1	66,36	65,09
C-2	67,28	
C-3	61,62	
S1-1	68,52	68,26
S1-2	69,67	
S1-3	66,58	
B025-1	61,64	62,86
B025-2	64,50	
B025-3	62,44	
P01-1	57,51	59,25
P01-2	63,75	
P01-3	56,49	
S1B025-1	66,89	67,05
S1B025-2	67,16	
S1B025-3	67,11	
S1P01-1	72,19	70,25
S1P01-2	69,27	
S1P01-3	69,29	
B025P01-1	60,75	63,69
B025P01-2	66,35	
B025P01-3	63,96	
S1B025P01-1	77,96	73,93
S1B025P01-2	67,42	
S1B025P01-3	76,4	
S1.5B025P01-1	70,98	71,26
S1.5B025P01-2	71,66	
S1.5B025P01-3	71,13	
S1B05P01-1	68,48	68,27
S1B05P01-2	74,76	
S1B05P01-3	61,56	
S1B025P02-1	73,78	75,31
S1B025P02-2	76,87	
S1B025P02-3	75,29	

Tablo 21’den hareketle çalışma kapsamında üretilen kontrol betonlarının 28 günlük basınç dayanım ortalamasının 65,09 MPa olduğu hesaplanmıştır. Aynı tablodan, P01 betonunun sahip olduğu 59,25 MPa dayanım değeri hariç -ki o da 60 MPa sayılır- diğer karışımların tamamının ortalama basınç dayanımlarının 60 MPa’nın üzerinde olduğu görülmektedir. Kuramsal Temeller bölümünde de izah edildiği gibi bu çalışma kapsamına üretilen betonlar, araştırmacıların birçoğuna ve Türk standartlarına göre yüksek dayanımlı beton olarak kabul edilebilir.

Tablo 21’de verilen 28 günlük ortalama basınç dayanımı değerlerine göre oluşturulan grafik Şekil 24’te gösterilmiştir.



Şekil 24. Numunelerin basınç dayanımlarının lif kombinasyonu ve oranına göre değişimi

Şekil 24’ten hareketle karışımların basınç dayanımları ile ilgili aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır:

- i. Çalışma kapsamında üretilen betonların ortalama basınç dayanım değerleri 59,25 MPa ile 75,31 MPa arasındadır.
- ii. Tek tip lif çeşidi kullanılan numunelerde kontrol (C) betonuna göre Çelik lif basınç dayanımını %4,9 oranında artırırken, Bazalt lifler %3,4 oranında, polipropilen lifler ise %9 oranında düşürmüştür. PP lifli betonlar tüm karışımlar içinde en düşük (59,25MPa) basınç dayanımı ortalamasına sahiptirler. Zollo (1984) da PP lif katkılı betonun basınç dayanımı incelemiştir. Lif katkısını beton hacminin %0-0,3’ü arasında değişen aralıkta tutmuştur. Sonuç olarak PP lif katkısının basınç dayanımı üzerinde negatif etki ettiğini belirtmiştir. Günaydın vd (2018) ise yaptıkları

çalışmada, çimento hacminin %1'i oranında Bazalt lifi katılmasıyla elde edilen 28 günlük numunelerin basınç dayanımlarının %2,16 oranında daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Bu sonuç, bu çalışmada elde edilen bulguyla çelişiyor gibi görünse de çalışmalarda belirtilen artış ya da azalış oranlarının mütevazı seviyede olduğunu belirtmek gerekir.

- iii. İki tip lif çeşidi kullanılan numunelerde Çelik + PP lif numuneler basınç dayanımını %7,9 oranında, Çelik + Bazalt lifler ise %3 oranında artırırken Bazalt + PP lifler basınç dayanımını %2,2 oranında düşürmüştür.
- iv. Üç tip lif çeşidinin kullanıldığı numunelerin tamamının basınç dayanım değerleri kontrol numunelerinden yüksek çıkmıştır. PP lifin yüzdece fazla olduğu numune (S1B025P02) maksimum (%15,7) artış sağlarken Bazalt lifin yüzdece fazla olduğu numune (S1B05P01) diğerlerine oranla daha az artış (%4,9) göstermiştir. S1B025P01 ve S1,5B025P01 kodlu karışımların basınç dayanımları ise kontrol betona göre, sırasıyla, %13,6 ve %9,5 oranında fazladır.
- v. S1B025P01 kodlu karışımın baz alındığında karışımdaki Çelik lif oranının %1,5'a çıkarılması ile %3,6 oranında, Bazalt lif oranının %0,5'e çıkarılmasıyla %7,7 oranında dayanım kayıpları olmuş iken PP lif oranının %0,2'ye çıkarılmasıyla %1,9 oranında dayanım artışları görülmüştür. Bu sonuç, üçlü lif sistemine sahip betonlarda Çelik ve Bazalt lif miktarının artırılmasının dayanımı düşüreceği PP lif miktarının artırılmasının ise dayanım üzerinde az da olsa olumlu bir etkisinin olacağını göstermektedir.
- vi. Tekli, ikili ve üçlü lif barındıran karışımların basınç dayanımı ortalamaları, sırasıyla, 63,5 MPa, 67 MPa ve 72,2 MPa olarak bulunmuştur. 65,09 MPa'lık basınç dayanımına sahip kontrol betonuna göre bu değerlerdeki artış, yine sırasıyla, -%2,5, %2,9 ve %10,9'dur. Bu sonuç tekli lif kullanımının betonların basınç dayanımlarını az (%2,5) da olsa düşürdüğünü, ikili lif kullanımının yine az bir miktar (%2,9) da olsa artıracağını ancak üçlü lif kullanımının betonların basınç dayanımını önemli oranda (%10,9) artıracağını göstermektedir.
- vii. Tekli lif kullanımında en yüksek (68,26 MPa) basınç dayanımı ortalamasına S1 kodlu, ikili lif kullanımında en yüksek (70,25 MPa) basınç dayanımı ortalamasına S1P01 kodlu, üçlü lif kullanımında ise en yüksek (75,31 MPa) basınç dayanımı ortalamasına S1B025P02 kodlu karışımlardan elde edilmiştir. S1B025P02 kodlu karışımlar, aynı zamanda, tüm karışımlar içinde en yüksek basınç dayanımı ortalamasına sahip olan betonlardır. Bu karışımların ortak yönleri ise her üçünün de Çelik lif içermesidir.

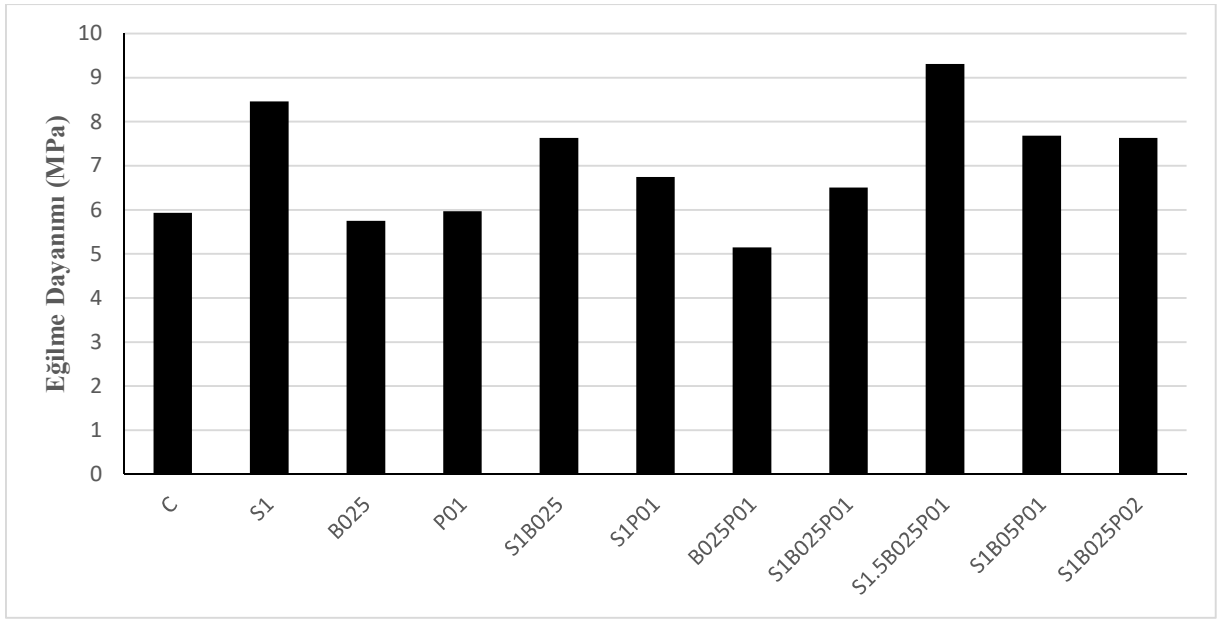
Eğilme dayanımı deneyi sonuçları ve değerlendirmeler

İki noktadan yükleme deneyi ile bulunan eğilme dayanımları Tablo 22’de verilmiştir.

Tablo 22. Numunelerin Eğilme Dayanımı Sonuçları

Kod	Eğilme Dayanımı		Yarmada çekme dayanımı	
	$\sigma_{e\check{c}}$ (MPa)	$\sigma_{e\check{c} \text{ ort}}$ (MPa)	F_{ct} (MPa)	$F_{ct \text{ ort}}$ (MPa)
C-1	5,73	5,93	3,86	3,63
C-2	6,12		3,39	
S1-1	8,01	8,46	5,10	5,11
S1-2	8,90		5,11	
B025-1	5,51	5,75	3,85	4,03
B025-2	5,99		4,21	
P01-1	6,73	5,97	4,23	4,08
P01-2	5,21		3,92	
S1B025-1	8,20	7,63	5,33	5,46
S1B025-2	7,05		5,58	
S1P01-1	6,50	6,75	5,64	6,09
S1P01-2	7,0		6,53	
B025P01-1	5,3	5,15	4,10	4,13
B025P01-2	4,99		4,15	
S1B025P01-1	6,26	6,51	6,49	6,53
S1B025P01-2	6,76		6,56	
S1.5B025P01-1	7,92	9,31	7,06	7,12
S1.5B025P01-2	10,7		7,18	
S1B05P01-1	8,60	7,68	6,12	5,64
S1B05P01-2	6,75		5,15	
S1B025P02-1	7,29	7,63	6,05	6,03
S1B025P02-2	7,96		6,01	

Tablo 22’de eğilmede çekme dayanımları ortalamalarından hareketle oluşturulan grafik Şekil 25’te verilmiştir.



Şekil 25. Örneklerin eğilme dayanımlarının lif çeşidi, sayısı ve oranına göre değişimi

Tablo 22 ve Şekil 25'te verilen eğilmede çekme dayanım değerleri ve ortalamalarından hareketle yapılan çıkarımlar aşağıda sıralanmıştır:

- i. Çalışma kapsamında üretilen betonların eğilmede çekme dayanımı değerleri 5,21 MPa ile 10,7 MPa arasında değişmiştir. İki örneğin ortalaması bakımından en düşük eğilme dayanımı 5,15 MPa ile B025P01 kodlu karışımdan yüksek ise 9,31 MPa ile S1,5B025P01 kodlu karışımdan elde edilmiştir.
- ii. Tekli lif kullanılması durumunda, kontrol betonlarının eğilme dayanım ortalamasına göre, Çelik lifler %43 oranında dayanım artışına neden olmuş iken Bazalt lifler çok az (%3 oranında) dayanım kaybına yol açmış PP lifler ise dayanım üzerinde pek etkili olmamıştır. Görüldüğü gibi Bazalt ve PP liflerin YD betonların eğilmede çekme dayanımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu söylenemez.
- iii. İkili kullanımlarda Çelik lif içeren karışımlarda dayanım artışları, içermeyen karışımda (Bazalt+PP) ise dayanım kayıpları söz konusu olmuştur. Nitekim Çelik+Bazalt lif içeren karışımda (S1B025) %28,7 oranında, Çelik+PP lif içeren karışımda (S1P01) ise %13,8 oranında eğilme dayanımı artışı söz konusu olmuş iken Bazalt+PP liflerini içeren karışımda (B025P01) %13,2 oranında dayanım kaybı görülmüştür. Bu sonuç yukarıda (ii. maddede) Bazalt ve PP liflerin eğilme dayanımı üzerinde etkisi olmadığı düşüncesini desteklemektedir. Hatta bu iki lifin bir arada kullanılması eğilme dayanımı olumsuz yönde etkilemiştir.
- iv. Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımların tamamında, kontrol betonuna göre, eğilme dayanımları artmıştır. Karışımdaki lif miktarı arttıkça dayanımdaki artış da daha fazla olmuştur. Nitekim S1B025P01, S1,5B025P01, S1B05P01 ve

S1B025P02 kodlu örneklerin eğilme dayanımları kontrol betonuna göre, sırasıyla, %9,8, %57,0, %29,5 ve %28,7 oranında artmıştır. Görüldüğü gibi en yüksek artış oranı Çelik lifin %1'den %1,5'a çıkarıldığı karışımlarda gerçekleşmiştir.

- v. Grup ortalamaları alınmak suretiyle yapılan hesaplamalarda, tekli lif içeren grupların 6,7 MPa, ikili life sahip olan grupların 6,5 MPa, üçlü lif barındıran grupların ise 7,8 MPa'lık eğilme dayanımına sahip oldukları belirlenmiştir. Buna göre, kontrol betonunun eğilme dayanımı ortalamasına (5,93 MPa) göre, tekli, ikili ve üçlü lif içeren karışımlar, sırasıyla, %13,4, %9,8 ve %31,2 oranlarında daha yüksektir. Üçlü lif içeren grupların ortalamasının en yüksek çıkmasının nedeni tüm gruplarda Çelik lif bulunmasıdır. Çünkü, yukarıda belirtildiği gibi, tekli ve ikili lif içeren gruplarda Çelik lif bulunmayan karışımların dayanım değerleri düşmüş ya da kayda değer oranda artmamıştır.
- vi. S1B025P01 kodlu karışımın ortalama eğilme dayanımı baz alındığında karışımdaki Çelik lif oranının %1,5'a çıkarılması %43, Bazalt lifi oranının %0,5'e çıkarılması %18, PP lif oranının %0,2'ye çıkarılması ise %17,2 oranlarında eğilme dayanımında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç bir taraftan karışımdaki Çelik lif miktarının artırılmasının YD betonların eğilme dayanımını artıracığı anlamını taşıırken diğer taraftan da Çelik lifle birlikte kullanılması koşulu ile Bazalt ve PP liflerin miktarının artmasıyla da YD betonların eğilme dayanımlarında bir miktar artış olabileceğini göstermektedir. Zollo (1984) da PP lif katkısını beton hacminin %0-0,3'ü arasında değiştirerek yaptığı çalışmada PP liflerin eğilme dayanımını lif oranının artmasıyla az miktarda artırdığını belirtmiştir.
- vii. Tüm karışımlar arasında B025P01 kodlu karışımın en fazla (kontrol betonuna göre %13,2 oranında) dayanım kaybına yol açtığıın bulunmuş olması dikkat çekmektedir. Tekli kullanımlarda da Bazalt lifin eğilme dayanımını düşürmesi, PP lifin de eğilme dayanımı bakımından adeta etkisiz bir bileşen olarak karışımda bulunması hususları bu bulgu ile birleştirilince yüksek dayanımlı betonların eğilme dayanımları üzerinde Bazalt ve PP lifin etkisinin olmayacağı, hatta olumsuz etki edebileceği söylenebilir.

Bu çalışma ile tekli olsun ya da ikili ve üçlü lif kombinasyonuna sahip olan hibrid olsun yüksek dayanımlı betonların eğilmede davranışları üzerinde en önemli etkenin Çelik lif olduğu kanıtlanmıştır. Öyle ki çalışma kapsamında üretilen karışımlardan içinde Çelik lif bulunmayan dört karışımın eğilme dayanımı ortalaması 5,7 MPa iken Çelik lif içeren 7 karışımın eğilme dayanımı ortalaması 7,71 MPa olarak hesaplanmıştır. Yukarıdaki maddelerde verilen bilgilere ilaveten bu sonuç bile eğilme dayanımı üzerinde Çelik liflerin etkisini göstermek için yeterlidir.

Eğilme deneyleri esnasında numunelerin kırılma biçimleri de gözlemlenmiştir. Buna göre; tek ya da çoklu lif içeren hibrid betonlar olsun içerisinde Çelik lif bulunan numunelerin alt tarafından (çekme bölgesinden) başlamak üzere çatladıkları ancak numunelerin iki parçaya ayrılmadıkları tespit edilmiştir. Kontrol betonu ile Çelik içermeyen örneklerin tamamı ise iki parçaya ayrılmıştır. Şekil 26’da eğilme deneyine tabi tutulmuş tüm örneklerin deney sonrası halleri görülmektedir. Resimdeki örneklerin kod numaralarından da anlaşılacağı üzere Çelik lif içermeyen tüm betonlar iki parçaya ayrılmıştır. Şekil 27’de ise Çelik içeren bir betondaki kırılma bölgesi gösterilmiştir.



60

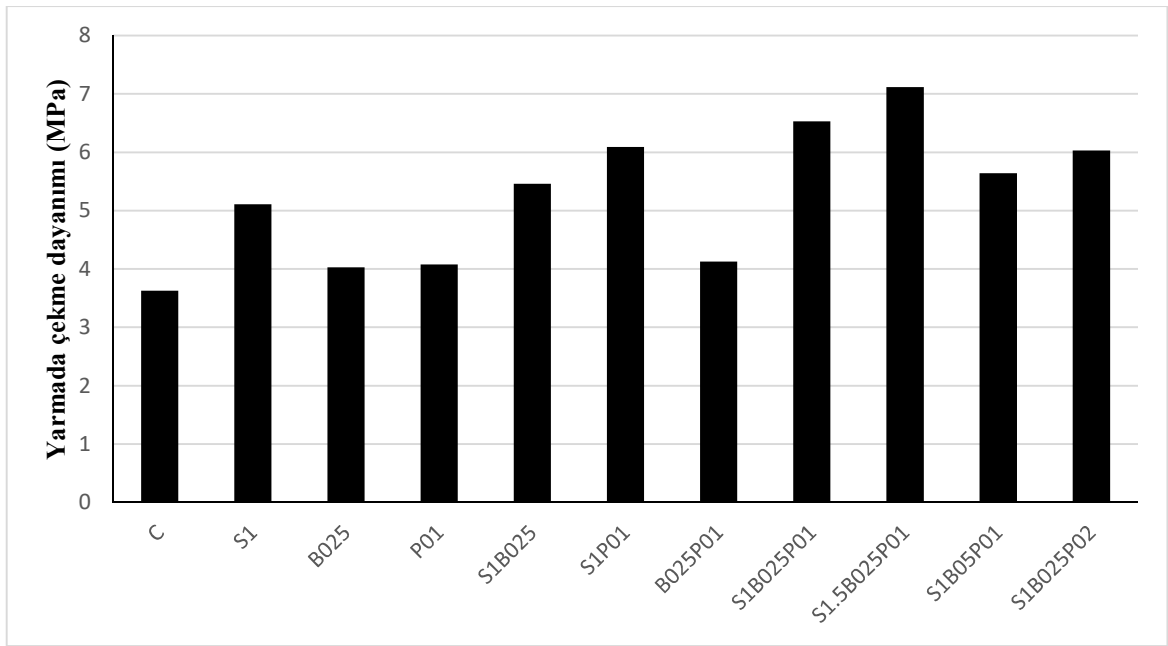


Şekil 27. S1B025P01 kodlu numunede görülen çelik donatının köprüleme davranışı

Koç ve Birinci (2012)'de belirtildiğine göre, lifli betonların, yalın betonlara göre sergilediği davranış farklılığı, beton içerisinde gelişi güzel dağılan liflerin, çatlakların ilk oluşum anında çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üstlerine ya da sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirmelerinden kaynaklanmaktadır. Böylece çatlağın yayılıp büyümesi için gereken enerji artar. Bu enerjinin büyük kısmı lifler tarafından taşınır. Bu durumun liflerin matristen sıyrılması için gereken enerji seviyesine kadar sürer. Beton kırılrsa bile Çelik lifler beton parçalarını bir arada tutmaya devam eder ve kırıldığı andaki yükten biraz daha fazlasını taşır. Bu şekilde, betonu hasara götürecek olan çatlakların büyümesi engellenir ve kırılma daha büyük yüklerde meydana gelir.

Yarmada çekme deneyi sonuçları ve değerlendirmeler

Tablo 22'de numunelerin 28 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları da verilmişti. Bu tabloda verilen ortalama yarmada çekme değerleri kullanılarak oluşturulan grafik ise Şekil 28'de gösterilmiştir.



Şekil 28. Numunelerin yarmada çekme dayanımlarının lif türü ve oranına göre değişimleri

Şekil 28'den hareketle yapılan karışımların yarmada çekme dayanımları ile ilgili değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

- i. Çalışma kapsamına üretilen örneklerin yarmada çekme dayanımları 3,39 MPa ile 7,18 MPa arasında değişmiştir. En düşük dayanım değeri kontrol betonuna ait iken en yüksek değer S1,5B025P01 kodlu karışımdan elde edilmiştir.
- ii. Tekli liflerin karışımlara katılmasıyla betonların yarmada çekme dayanımları kontrol betonlarına göre artmıştır. Bu artışlar Çelik, Bazalt ve PP lif için, sırasıyla, %40,8, %11 ve %12,4 oranlarında gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek artış Çelik lifli karışımlardan elde edilmiştir. Bazalt ve PP lifin tekli kullanılması ile, eğilmede çekme dayanımının aksine, betonların yarmada çekme dayanımlarını artırmış olması anlamlı bulunmuştur. Zollo (1984), normal ve PP lif katkılı betonun yarmada çekme dayanımlarını incelemiş ve PP lif katkısının yarmada çekme dayanımını lif oranının artmasıyla az miktarda artırdığını belirlemiştir. Günaydın vd (2018) tarafından yapılan bir araştırmada da çimento hacminin %1'i oranında Bazalt lifi katılmasının betonların yarmada çekme dayanımlarını %16,46 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Arivalagan (2012) ise Bazalt lif takviyeli betonun 28 günlük kür sonunda yarmada çekme dayanımında yaklaşık olarak %47 oranında artış görmüştür. Song (2004) ise Çelik liflerin beton mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiş ve bu liflerin yarmada çekme dayanımında %98,3'lere varan iyileşmelere yol açtığını belirtmiştir.

- iii. İkili lif kullanılması durumunda ise Çelik+Bazalt lifleri %50,4, Çelik+PP lifleri %67,8 ve Bazalt+PP lifleri %13,8 oranında yarmada çekme dayanımını kontrol betonlarına göre artırmıştır. Bu grupta da en yüksek artışlar Çelik içeren karışımlarda meydana gelmiş, Bazalt+PP lifli karışımların yarmada çekme dayanımlarındaki artış diğerlerine göre daha mütevazı seviyede kalmıştır. Yavuz (2017) tarafından yapılan bir çalışmada da Çelik, sentetik ve karma lif katkısının yarmada çekme dayanımında kayda değer artış gösterdiğini ve Çelik ve sentetik liflerin karma olarak kullanılmasının, tek başlarına kullanılmalarına göre daha etkili olduğu belirtmiştir.
- iv. Üçlü lif içeren S1B025P01, S1,5B025P01, S1B05P01 ve S1B025P02 kodlu karışımların yarmada çekme dayanımlarında ise yine kontrol betonuna göre sırasıyla, %79,9, %96,1, %55,4 ve %66,1 oranlarında artış gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi tekli ve ikili kullanımıyla aynı oranlarda lif içeren S1B025P01 kodlu karışımda %79,9 oranında artış olmuştur. Bu oran tekli ve ikili kullanımda görülen artışların hepsinden daha yüksektir. Diğer taraftan, karışımdaki Çelik lif oranının %1,5 çıkarılması ile artış oranı kontrol betonuna göre %96,1'e çıkmıştır. Bu değer tüm karışımlar içerisinde en yüksek değerdir. Bu sonuç Çelik lifin YD betonların yarmada çekme dayanımı üzerinde en önemli etkiye sahip olan lif olduğunu göstermektedir.
- v. S1B025P01 kodlu karışımın yarmada çekme dayanımı baz alındığında S1,5B025P01, S1B05P01 ve S1B025P02 kodlu karışımların yarmada çekme dayanımlarında, sırasıyla %9, -%13,6 ve -%7,7 oranlarında değişikliklerin olduğu tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi karışımdaki Çelik lif miktarı artırıldıkça dayanım değeri de artmışken Bazalt ve PP liflerinin artışı dayanımlarda düşüslere yol açmıştır. Ancak bu betonların yarmada çekme değerlerinin yine de kontrol betonlarından çok yüksek olduğunu hatırlamak gerekir. Bu maddede belirtilen bulgulardan hareketle betonların yarmada çekme dayanımını artırmak için üçlü karışımlardaki Bazalt ve PP lifi oranlarının artırılmasının yanlış bir işlem olacağı söylenebilir.
- vi. Tekli, ikili ve üçlü lif içeren karışımların grup ortalamalarına bakıldığında ise kontrol betonuna göre, sırasıyla, %21,4, %44 ve %74,4 oranlarında artış olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar da üçlü karışımların YD betonların yarmada çekme dayanımları üzerinde en etkili kombinasyon olduğunu göstermektedir.

Yarmada çekme deneyleri esnasında yapılan deneysel gözlemlerde karışımların lif içeriğine bağlı olarak farklı şekilde kırıldıkları tespit edilmiştir. Tekli ya da çoklu olsun içinde

Çelik bulunduran örneklerde boydan boya oluşan çatlak görülmüştür. Ancak numuneler ikiye ayrılmamıştır. Çelik lif içermeyen numunelerin ise tamamı ikiye parçaya ayrılmıştır. Bu durum Şekil 29’da verilen resimlerde gösterilmiştir. Diğer taraftan, çatlak ve yarılmış yüzeyler yapılan incelemede Çelik lifler net olarak görüldü yalnız Bazalt ve polimer lifler görülmedi. Yine yüzey incelemelerinde betonların, tipik bir yüksek dayanımlı davranışı olan, iri agregadan kırıldıkları tespit edilmiştir (Şekil 30). Bu gözlem betonların kompasitesinin yüksek olduğunun ve güçlü ara yüzeylere sahip olduklarının kanıtı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 29. Tüm numunelerin yarmada çekme dayanımı sonucu kırılma biçimleri



Şekil 30. Deney sonrası numunelerde çatlak oluşumu (solda) ve kırılma yüzeyinin görüntüsü

Regresyon Analizi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler bir biri ile ilişkilendirilmiştir. Tablo 23'te karşılımlar üzerinde gerçekleştirilen tüm deneylerin regresyon denklemleri ve belirleme (determinasyon) katsayıları (R^2) verilmiştir. İlişkilendirme doğrusal ve polinom olarak yapılmış olup Tablo 23'te doğrusal regresyon analizindeki belirleme katsayıları göz önünde bulundurularak küçükten büyüğe doğru deneyler sıralanmıştır.

Tablo 23. Deneysel Veriler Arasındaki İlişkiler

İlişkilendirilen Deneyler	Doğrusal		Polinom	
	Regresyon denklemi	R^2	Regresyon denklemi	R^2
1 UPV-Hava İçeriği	$y = -0,0011x + 6,8869$	0,0035	$y = -0,0001x^2 + 1,3542x - 3135,4$	0,212
2 UPV-Eğilmede Çekme	$y = 0,0021x - 2,9112$	0,0086	$y = -0,0001x^2 + 1,3541x - 3137,5$	0,1457
3 UPV-Birim Ağırlık	$y = 0,0002x + 1,516$	0,0694	$y = 5E-06x^2 - 0,0478x + 112,78$	0,2526
4 UPV-Basınç Dayanımı	$y = 0,0305x - 74,796$	0,1233	$y = 0,0003x^2 - 2,7717x + 6422,1$	0,164
5 UPV-Yarmada Çekme	$y = 0,0104x - 43,556$	0,2532	$y = -7E-06x^2 + 0,0753x - 193,87$	0,2536
6 Basınç Dayanımı-Eğilmede Çekme	$y = 0,1496x - 3,1542$	0,3238	$y = -0,0132x^2 + 1,9328x - 63,109$	0,3882
7 Basınç Dayanımı-Hava İçeriği	$y = -0,1252x + 10,267$	0,3435	$y = 0,0049x^2 - 0,7908x + 32,645$	0,3571
8 UPV-Çökme	$y = -0,0788x + 377,81$	0,3688	$y = 3E-05x^2 - 0,3205x + 938,16$	0,369
9 Basınç Dayanımı-Çökme	$y = -0,9348x + 72,694$	0,3913	$y = -0,0594x^2 + 7,0849x - 196,94$	0,4316
10 Eğilmede Çekme-Yarmada Çekme	$y = 0,6603x + 0,651$	0,5274	$y = -0,0925x^2 + 1,9889x - 3,9789$	0,5429
11 Basınç Dayanımı-Yarmada Çekme	$y = 0,2012x - 8,3744$	0,7092	$y = -0,001x^2 + 0,3338x - 12,83$	0,7096
12 Basınç Dayanımı-Birim ağırlık	$y = 0,0069x + 1,9086$	0,7403	$y = -0,0006x^2 + 0,0866x - 0,7708$	0,8765

Tablo 23'te verilen belirleme katsayılarından hareketle aşağıdaki çıkarımlarda bulunulabilir:

- i- Deneylerden elde edilen veriler arasında kurulan doğrusal denklemlerde de polinom denklemlerinde de belirleme katsayısı en düşük olan ilk beş grup UPV okumaları ile toplanan verileri içermektedir. $R^2 \leq 0,25$ olan bu grupların arasındaki ilişkinin oldukça zayıf olduğu söylenebilir. UPV deneyinin zaten yaklaşık sonuç veren tahribatsız bir yöntem olduğu bilgisi bu bulgular ile birleştirildiğinde lifli betonlar üzerinde UPV deneyi ile veri toplamanın sıhhati üzerinde ayrıntılı araştırmaların yapılması önerilir.
- ii- Her iki denklemlerine türü ile aralarındaki ilişki belirlenen deneylerden en yüksek belirleme katsayısına sahip olan deneyler 9, 10, 11 ve 12 sırada verilen deneylerdir. Bu kategoriyi oluşturan deneylerin ortak özellikleri hiçbirinde UPV ile veri toplanmamış olmasıdır.
- iii- En güçlü ilişki ($R^2 \geq 0,70$) Basınç Dayanımı- Yarmada Çekme ve Basınç Dayanımı- Birim Ağırlık deneyleri arasında kurulmuştur.
- iv- Tabloda verilen belirleme katsayılarının hemen hemen tamamında polinom denklemlerine ait olan katsayılar doğrusal denklemlere ait olanlardan daha yüksek çıkmıştır. Bu da deneyler arasındaki ilişkinin doğrusaldan ziyade polinomal olduğunu göstermektedir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çelik, bazalt ve PP liflerin tekli, ikili ve üçlü kullanılmasının yüksek dayanımlı betonların basınç ve eğilme ile temsil edilen mekanik davranışları üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Yalın betona tekli, ikili ve üçlü lif katılması ile betonların hava içeriklerinde artışlar gözlenmiştir. Ancak, üçlü lif içeren karışımlarda Çelik ve PP lif oranının ayrı ayrı artırılması hava içeriğini azaltmışken Bazalt lif oranının artırılmasının hava içeriğini azaltma yönündeki etkisi sınırlı kalmıştır. Tüm karışımlar içinde en yüksek (%3,6) hava içeriği P01 kodlu, en düşük (%0,5) hava içeriği ise S1,5B025P01 kodlu numunede ölçülmüştür.
2. Beton birim hacim ağırlıkları lif türüne, tekli ve çoklu kullanım şekline ve lif oranlarına göre değişmiştir. Bazalt ve PP liflerinin tekli kullanımı betonların birim ağırlıklarını düşürmüştür. İkili kullanımda da Çelik+PP lif karışımı birim hacim ağırlığı artırmışken Çelik+Bazalt ve Bazalt+PP lif karışımları azaltmıştır. Üçlü karışımların ise tamamı betonların birim hacim ağırlıklarını artırmıştır. Birim hacim ağırlıklarda en fazla düşüş ise %2,1 oranıyla PP lif içeren karışımlarda görülmüştür.
3. %0,25 Bazalt lifi içeren karışım (B025) hariç karışımlara tekli, ikili ya da üçlü lif katılması ile betonların çökme değerleri düşmüştür. Betonların çökme değeri ortalamaları tekli, ikili ve üçlü karışımlarda, sırasıyla, 15,5 cm, 8,5 cm ve 2,6 cm'dir. Görüldüğü gibi tekli lif kullanımı daha az, ikili kullanım biraz daha fazla üçlü kullanımlar ise çok daha fazla oranda işlenebilirlik kaybına yol açmaktadırlar.
4. En düşük çökme değeri 1 cm ile S1,5B025P01 kodlu karışımdan elde edilmiştir. Bu karışımın diğer üçlü karışımlardan farkının içerdiği Çelik lif miktarının %1,5 olduğu göz önünde bulundurulduğunda karışımlardaki Çelik lif oranının artırılmasının betonun işlenebilirliğini çok fazla azaltacağı söylenebilir.
5. Karışıma lif katılması ile betonların UPV değerleri, kontrol betonuna göre %1,6-%4,3 oranları arasında artmıştır. Tek, iki ve üç çeşit lif kullanılan numunelerin ultra ses geçiş hızı ortalaması, sırasıyla, 4674,9 m/s, 4684,5 m/s ve 4700.6 m/s olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, karışımdaki lif sayısının artması ile UPV değerinin de arttığını göstermektedir.
6. Çalışma kapsamında üretilen yüksek dayanımlı betonların ortalama basınç dayanım değerleri 59,25 MPa ile 75,31 MPa arasındadır. Tekli, ikili ve üçlü lif barındıran

karışımların basınç dayanımı ortalamaları, sırasıyla, 63,5 MPa, 67 MPa ve 72,2 MPa olarak bulunmuştur. 65,09 MPa'lık basınç dayanımına sahip kontrol betonuna göre bu değerlerdeki artış, sırasıyla, -%2,5, %2,9 ve %10,9'dur. Bu sonuç tekli lif kullanımının betonların basınç dayanımlarını az da olsa düşürdüğünü, ikili lif kullanımının az bir miktar da olsa artırdığını, üçlü lif kullanımının ise betonların basınç dayanımını önemli oranda (%10,9) artıracakını göstermektedir.

7. Çalışma kapsamında üretilen betonların eğilmede çekme dayanımı değerleri 5,21 MPa ile 10,7 MPa arasında değişmiştir. En düşük ortalama eğilme dayanımı 5,15 MPa ile B025P01 kodlu karışımdan en yüksek ortalama eğilme dayanımı ise 9,31 MPa ile S1,5B025P01 kodlu karışımdan elde edilmiştir.
8. Tekli kullanımda Çelik lif eğilme dayanımını %47 oranında artırmış iken Bazalt lifler çok az (%3 oranında) dayanım kaybına yol açmış PP lifler ise dayanım üzerinde pek etkili olmamıştır. Diğer taraftan eğilme dayanımını Çelik+Bazalt lifler %28,7 oranında, Çelik+PP lif %13,8 oranında artırmış iken Bazalt+PP lifler %13,2 oranında düşürmüştür. Bu sonuçlardan hareketle tekli ve ikili kullanılmaları halinde Bazalt ve PP liflerin yüksek dayanımlı betonların eğilme dayanımları üzerinde olumsuz etkileri olabileceği değerlendirilmiştir.
9. Üçlü lif kombinasyonuna sahip karışımların tamamında, kontrol betonuna göre, eğilme dayanımları artmıştır. Karışımdaki lif miktarı arttıkça dayanımdaki artış da daha fazla olmuştur. En fazla artış ise Çelik lifin oranının %1'den %1,5'a çıkarıldığı S1,5B025P01 kodlu karışımda %57 oranında gerçekleşmiştir.
10. Tekli, ikili ve üçlü kullanılması durumundaki performansları göz önünde buldurulduğunda bu çalışma kapsamında seçilen lifler arasında yüksek dayanımlı betonların eğilme dayanımları üzerinde en etkili lif türünün Çelik lif olduğu söylenebilir.
11. Çalışma kapsamına üretilen örneklerin yarmada çekme dayanımları 3,39 MPa ile 7,18 MPa arasında değişmiştir. En düşük dayanım değeri kontrol betonuna ait iken en yüksek değer S1,5B025P01 kodlu karışımdan elde edilmiştir.
12. Tekli kullanılan Çelik, Bazalt ve PP lifler, sırasıyla, %40,8, %11 ve %12,4 oranlarında betonların yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır. En yüksek artış Çelik lifli karışımlardan elde edilmiş olup, eğilmede çekme dayanımının aksine, Bazalt ve PP lifin tekli kullanılması betonların yarmada çekme dayanımlarını artırmıştır.
13. Çelik+Bazalt lifleri %50,4, Çelik+PP lifleri %67,8, Bazalt+PP lifleri ise %13,8 oranında yarmada çekme dayanımını kontrol betonlarına göre artırmıştır. Bu grupta

da en yüksek artışlar Çelik lif içeren karışımlarda meydana gelmiş, Bazalt+PP lifli karışımların yarmada çekme dayanımlarındaki artış diğerlerine göre daha mütevazı seviyede kalmıştır.

14. Üçlü lif içeren S1B025P01, S1,5B025P01, S1B05P01 ve S1B025P02 kodlu karışımların yarmada çekme dayanımları kontrol betonuna göre, sırasıyla, %79,9, %96,1, %55,4 ve %66,1 oranlarında artmıştır.
15. Çelik lifin yüksek dayanımlı betonların yarmada çekme dayanımı üzerinde Bazalt ve PP liflerle mukayese edilemeyecek kadar önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
16. Deneysel verilerin aralarındaki ikili ilişkilerin regresyon analizi ile incelenmesi sonucu belirleme katsayılarının (R^2) polinom denklemlerinde daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Bu bulgu deneyler arasındaki ilişkinin doğrusaldan ziyade polinomal olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hem doğrusal hem de polinom denklemlerinde en düşük belirleme katsayıları UPV deneyi ile veri toplanan deneyleri içeren ilişkilerde görülmüştür.
17. Bulgular araştırma hipotezini doğrulamıştır.
18. Çalışma kapsamında karışımlara üç farklı lifin aynı katılmasının yol açacağı maliyet artışı analiz edilmemiştir. Üçlü lif kullanmaya karar veren uygulamacıların maliyet analizi yaparak nihai kararlarını vermeleri önerilir.

KAYNAKLAR

- Açıkgeç, M., Arazsu U. ve Alyamaç K.E., "Farklı karışım oranlarına sahip polipropilen lifli betonların dayanım ve durabilite özellikleri", SDU International Technologic Science, 4(3): 41-54, (2012).
- Afrouhsabet, V., and Ozbakkaloglu, T., 2015. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. Construction and building materials, 94, 73-82.
- Ahmed, W., and Lim, C. W. 2022. Effective recycling of disposable medical face masks for sustainable green concrete via a new fiber hybridization technique. Construction and Building Materials, 344, 128245.
- Alhozaimy, A. M., Soroushian, P., and Mirza, F. 1996. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials. Cement and Concrete Composites, 18(2), 85-92.
- Anonim, 2009. TS 706 EN 12620+A1: Beton agregaları. 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, 2010b. ACI 363R-10: Report on High-Strength Concrete. American Concrete Institute.
- Anonim, 2012a. TS EN 933-1: Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini-Elleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2012b. TS EN 197-1: Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2013a. 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, 2013b. TS EN 934-2+A1: Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2015. TS 10514: Lif takviyeli betonun karışım oranları ve imalatı için kurallar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2016. TS 802: Beton karışımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019a. TS EN 12390-3: Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2019b. TS EN 12390-5: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. 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 12350-2: Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slamp) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- Anonim, 2019e. TS EN 12350-7, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 7: Hava içeriğinin tayini- Basınç yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2021a. TS EN 206+A2: Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2021b. TS EN 12504-4 Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2022. TÜBA Türkçe Bilim Terimleri Sözlüğü, <http://terim.tuba.gov.tr/> (25/08/2022)
- Aral, M., 2006. Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım. Yüksek Lisans tezi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Arazsu, U., 2012. Polipropilrn Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi.
- Arisoy, B., and Wu, H. C., 2008. Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA. *Construction and Building Materials*, 22(4), 635-645.
- Arslan, A., and Aydın, A. C., 1999, “Lifli Betonların Darbe Etkisi Altında Genel Özellikleri”, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul.
- Attard, M., and Setunge, S. 1996. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete.
- Avar, D., 2006. Karma lifli betonların mekanik davranışına buhar kürü etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Balçıkıanlı Bankir, M., 2020. Lifli hibrit betonların mekanik ve durabilite özelliklerin araştırılması ve performans optimizasyonu. Doktora Tezi, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi.
- Banthia, N., and Gupta, R., 2004. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. *Materials and structures*, 37(10), 707-716.
- Banthia, N., and Nandakumar, N., 2003. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9.
- Banthia, N., and Sappakittipakorn, M., 2007. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and concrete research*, 37(9), 1366-1372.
- Banthia, N., and Sheng, J., 1990. “Micro-reinforced cementitious materials.” In *Materials Research Society Fall Meeting Proceedings* (pp. 25–32).
- Baradan, B., Yazıcı, H., ve Aydın, S., 2015. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334, İzmir.
- Barros, J. A.O., Pereira, E. B., and Fischer, G., 2012. Effect of hybrid fiber reinforcement on the cracking process in fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*. 34, pp. 1114-1123. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp>.
- Bayasi Z., and Soroushian P., 1991. Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 88(2), 129-13
- Bayasi, Z., and McIntyre, M., 2002. Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete. *Materials Journal*, 99(4), 337-344.
- Bentur A, and Mindess S., 2006. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Technology & Engineering. 2nd ed. UK, Taylor & Francis, 2006.
- Betterman, L.R., Ouyang, C., and Shah, S.P., 1995. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Adv. Cem. Bas. Mat.*, 2, pp 53-61.

- Bhattacharya, S.S., Chaudhari, S.B., 2015. Effect of addition of silica nanoparticles on mechanical properties of polypropylene filament. In International Conference on Application of Nano-materials in Textile (pp. 64-70).
- Bilim, E., 2019. Karma Lif Kullanılan Yüksek Performanslı Nano Beton Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Candappa, D. C., Sanjayan, J. G., and Setunge, S., 2001. Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete.
- Cao, Q., Cheng, Y., Cao, M. And Gao, Q. (2017). Workability, strength and shrinkage of fiber reinforced expansive self-consolidating concrete. Construction and Building Materials, 131, 178-185.
- Chawla, K.K., 1998. Fibrous Materials, Cambridge University Press, United Kingdom.
- Chawla, K.L., 2012. Composite Materials: Science and Engineering. Springer Publications, 542 p, New York. USA.
- Chen, B., and Liu, J., 2005. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. Cement and Concrete Research, 35(5), 913-917.
- Çetin, F.Ş., 2020. Mechanical Behavior Of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Under Direct Tension. The Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Çevik, N. (2014). ‘Bazalt Elyafının Beton Yollarında Kullanılabilirliği’, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye
- Deb, S., Mitra, N., & Majumdar, S. B. (2020). Influence of Surface Morphology of Fibers on the Tensile and Flexural Ductility of Polypropylene-Reinforced Cementitious Composites. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(4), 04020042. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003048.
- Demir, T., 2022. Yüksek dayanımlı betonların yerinde dayanım tespiti için tahribatsız test metotları kullanılarak kombine metotlar geliştirilmesi. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Dong, C., and Davies, I. J., 2013. Flexural properties of E glass and TR50S carbon fiber reinforced epoxy hybrid composites. Journal of materials engineering and performance, 22(1), 41-49.
- Ekincioglu, Ö., 2003. Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı – Bir Optimum Tasarım. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Elshafie, S., and 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.
- Erdoğan, T. Y., 2016. Beton. ODTÜ Yayıncılık, Ankara.
- Fan, J., Shen, A., Guo, Y., Zhao, M., Yang, X. and Wang, X., 2020. Evaluation of the shrinkage and fracture properties of hybrid Fiber-Reinforced SAP modified concrete. Construction and Building Materials, 256
- Figueiredo, A. D. D. and Ceccato, M. R. (2015). Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test. Materials Research, 18(6), 1284- 1290.
- Glavind, M., and Aarre, T., 1990. High-strength concrete with increased fracture-toughness. MRS Online Proceedings Library (OPL), 211.

- Günaydın, O., ve Güçlüer, K., 2018. Bazalt Lifi Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi* Cilt: 5, No: 2, (416-424).
- Güngör, E., 2013. Karma Lifli Betonların Özelliklerinin Deneysel İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Hay, R., and Ostertag, C. P., 2019. Influence of transverse cracks and interfacial damage on corrosion of steel in concrete with and without fiber hybridization. *Corrosion Science*, 153, 213-224.
- He, D., Wu, M., and Jie, P., 2017. "Study on Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete." *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 73(1).
- Hsie, M., Tu, C., and Song, P. S., 2008. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1-2), 153-157.
- Ivanic, A., Kravanja, G., Kidess, W., Rudolf, R., Lubej, S., 2020. The Influences of Moisture on the Mechanical, Morphological and Thermogravimetric Properties of Mineral Wool Made from Basalt Glass Fibers. *Materials* 13,2392. DOI: 10.3390/ma13102392
- Jadhav, H. S., and Koli, M. D., 2013. Flexural behavior of hybrid fiber reinforced concrete beams. *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res*, 2, 210-218.
- Jayaprakasan, V., and Divya, R., 2015. Comparative study of hybrid fiber reinforced concrete and find optimum dosage of fiber. *Int J Appl Civil Environ Eng*, 1, 16-23p.
- Jenifer, J. V., Brindha, D., 2021. Development of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete in aspects of flexure, fracture and microstructure. *Revista de la Construcción* vol.20. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.20.1.62>
- Johnston, C. D., 2001. *Fiber-Reinforced Cements and Composites*. 3rd ed. Amsterdam, Holland, Gordon and Breach Science Publishers.
- Jun, W., and Ye, Z., 2010. Experimental Research on Mechanical and Working Properties of Nondipping Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 4, 635-637.
- Kara, Ş., 2011. Farklı Enine Kesit Şekillerinde Üretilen Kimyasal Liflerin Yapısal Davranışları ve Kullanım Özelliklerinin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Karimi, A., and Nematzadeh, M., "Axial compressive performance of steel tube columns filled with steel fiber-reinforced high strength concrete containing tire aggregate after exposure to high temperatures," *Eng. Struct.*, vol. 219, p. 110608, 2020.
- Kına, C., 2019. Yüksek Performanslı Karma Lif Takviyeli Kendiliğinden Yerleşen Beton Geliştirilmesi. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Koç, V. ve Birinci, F. 2012. Lifli Betonda Boyut Etkisi Tokluk ve Kırılma Enerjisi. *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 4(3), ss:24-40
- Kozak, M., 2013. Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, SDU Teknik Bilimler Dergisi, Sayı 5, Sayfa 26-35.
- Köksal, F., Gencel, O., Unal, B., and Durgun, M. Y., 2012. Durability properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibers. *Science and Engineering of Composite Materials*, 19(1). doi:10.1515/secm.2011.0064.
- Labib, W. A., 2018. *Fibre Reinforced Cement Composites*. Cement Based Materials.

- Larsen, E. T., and Krenchel, H., 1991. "Durability of FRC Materials. In: Sidney Mindess and Jan Skalny." In *Fiberreinforced Cementitious Materials: Symposium*, Boston, Massachusetts, 1990, Materials Research Society Symposia Proceedings Vol. 211, Materials Research Society, Pittsburgh (pp. 119–124).
- Larsen, I. L. and Thorstensen, R. T., 2020. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 256.
- Liang, N., Yan, R., Miao, Q., Cao, G., and Liu, X., 2022. Effect of multi-scale polypropylene fiber hybridization on compressive constitutive mechanics parameters of roller compacted concrete. *Structural Concrete*, 23(1), 441-456.
- M. Shafieifar, M. Farzad, and A. Aziznamini, 2017. "Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156.
- 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.
- Malhotra, V.M., 1976. *Testing Hardened Concrete: Non-Destructive Methods*. ACI Monograph No. 9, ACI. Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Mehdipour, I., Vahdani, M., Libre, N. A. and Shekarchi, M. (2013). Relationship between workability and mechanical properties of fibre-reinforced self-consolidating mortar. *Magazine of concrete research*, 65(17), 1011-1022.
- Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D., 2003. *Concrete*. Second Edition, Pearson Education, 644 p, USA
- Mobasher, B., and Li, C. Y., 1996. Mechanical properties of hybrid cement-based composites. *ACI Materials Journal*, 93, 284-292.
- 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.
- Oktan, H., 2021. Farklı Görünüm Oranlı Bazalt Liflerle Üretilen Yüksek Dayanımlı Betonun Performans Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi. Erzurum.
- Öğüt, R., 2020. Bazalt Lifi Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Dayanıklılığına Etkisi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Özyurt, N., 2000, Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Perez-Pena, M., and Mobasher, B., 1994. Mechanical properties of fiber reinforced lightweight concrete composites. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1121-1132.
- Qian, C., and Stroeven, P., 2000. Fracture properties of concrete reinforced with steel–polypropylene hybrid fibres. *Cement and concrete composites*, 22(5), 343-351.
- Ravichandran, A., Suguna, K., and Ragunath, P. N., 2009. Strength modeling of high-strength concrete with hybrid fibre reinforcement. *American Journal of applied sciences*, 6(2), 219.
- Rodrigues, J.P.C., Laím, L., and Correia, A.M., 2010. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire. *Composite Structures*, 92(5), 1263-1268.

- Sarı, M., 2013. Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Selina Ruby, G., Geethanjali, C., and Jaison Varghese, P. M., 2014. Influence Of Hybrid Fiber On Reinforced Concrete 'International Journal Of Advanced Structures And Geotechnical Engineering, Vol. 03.
- Shah, S.P. and Balaguru, P.N., 1992. Fiber-Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Shan, Y., and Liao, K., 2002. Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass-carbon/epoxy hybrid composites. International journal of fatigue, 24(8), 847-859.
- Sim, J., Park, C. and Moon, D., 2005. Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. Composites: Part B, 36.
- Singh, N. K., and Rai, B., 2018. A Review of Fiber Synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete. Journal of Applied Engineering Sciences, 8(2).
- Skazlic, M., Bjegovic, D., and Serdar, M., 2008. Utilization of high performance fiber-reinforced micro-concrete as a repair material. In Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II (pp. 335-336). CRC Press.
- Smarzewski, P., and Barnat-Hunek, D., 2017. Effect of fiber hybridization on durability related properties of ultra-high performance concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, 11(2), 315-325.
- Song, P. S., and Hwang, S., 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials, 18(9), 669-673.
- Song, P. S., Wu, J. C., Hwang, S., and Sheu, B. C., 2005. Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. Construction and building materials, 19(1), 1-9.
- Sun, W., Chen, H., Luo, X., and Qian, H., 2001. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. Cement and concrete research, 31(4), 595-601.
- Sümer, M., ve Söyler, B., "Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Çimento ve Superakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği," Sak. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 6, no. 3, pp. 3-15, 2002.
- Swolfs, Y., Geboes, Y., Gorbatikh, L., and Pinho, S. T., 2017. The importance of translaminal fracture toughness for the penetration impact behaviour of woven carbon/glass hybrid composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 103, 1-8.
- Şahmaran, M., and Yaman, G.Ö., 2007. Hybrid fiber reinforced self compacting concrete with a high-volume coarse fly ash. Journal of Construction and Building Materials. 27(1), 150-156.
- Tarhan, Y., 2020. Dijital Üretimli Gerçek Ölçekli Çimento Esaslı Kompozitlerin (3D Beton) Fiziko-Mekanik Özellikleri İle Boşluk-Boyut Dağılımı Üzerine Sürüklenmiş Hava Miktarının Etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F., 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, İTÜ Dergisi/d Mühendislik, Cilt:1, Sayı: 2, s.125-144.an yapı malzemesidir.
- Taşdemir, M. A., Kocatürk, A. N., Haberveren, S., ve Aslan, G., 2005. Özel Prefabriğe Elemanların Ultra Yüksek Performanslı Betonlarla Üretimi, TMMOB İnşaat

Mühendisleri Odası, 6. Ulusal Beton Kongresi-Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul, 447-457.

Topçu, İ. B., 2006. Beton teknolojisi. Uğur ofset A.Ş., Eskişehir.

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.

Türk, K. ve Kına, C., 2017. Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi, 23(6), 671-678.

Uğur, A. (2007). Lif Donatılarının Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı Basınç Dayanımı İlişkisine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.

Ulcay, Y., 1993. Seramik Liflerin Üretimi, Özellikleri ve Kullanımı. Tekstil ve Mühendis, özel sayı. Cilt: 7 - Sayı: 42, s:128-136.

Ünal, O., Uygunoğlu, T., ve Gençel, O., 2006. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Bölümü, Afyonkarahisar Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta

Vodicka, J., Spura, D., and Kratky, J., 2004. Homogeneity of Steel Fiber Reinforced Concrete, Sixth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Varenna, Italy, 20-22 September.

Vural, T., 1998. Fiberli Betonun Basınç Dayanımına Etkisi, Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Wee, T. H., Chin, M. S., and Mansur, M. A., 1996. Stress-strain relationship of high strength concrete in compression.

Wisnom, M. R., Czél, G., Swolfs, Y., Jalalvand, M., Gorbatiikh, L., and Verpoest, I., 2016. Hybrid effects in thin ply carbon/glass unidirectional laminates: accurate experimental determination and prediction. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 88, 131-139.

Wu, Z., Wang, X., Iwashita, K., Sasaki, T., and Hamaguchi, Y., 2010. Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets. Composites Part B: Engineering, 41(5), 396-402.

Yao, W., Li, J., and Wu, K., 2003. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. Cement and concrete research, 33(1), 27-30.

Yavuz, D., 2017. Çelik, Sentetik Ve Karma Lif Katkılı Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.

Yusof, M. A., Mohamad Nor, N., Ismail, A., Choy Peng, N., Mohd Sohaimi, R., and Yahya, M. A., 2013. Performance of hybrid steel fibers reinforced concrete subjected to air blast loading. Advances in Materials Science and Engineering, 2013.

Zollo, R. F., 1984. Collated fibrillated polypropylene fibers in FRC. Special Publication, 81: 397-410

Zollo, R.F., 1997. Fibre-reinforced Concrete: an Overview after 30 years of Development, Cement and Concrete Composites, 19, pp. 107-122

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Emine Hazal POLAT

Eğitim

Lisans: Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği (2018)

Yüksek lisans: Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalı (Halen devam etmektedir)