



**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**LİF TAKVİYELİ POLİMER ATIKLARIN ÇİMENTO
ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

MUSTAFA KOYUNCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Handan ADIBELLİ

İkinci Danışman: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

TEMMUZ – 2025

YOZGAT

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LİF TAKVİYELİ POLİMER ATIKLARIN ÇİMENTO
ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ

MUSTAFA KOYUNCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Handan ADIBELLİ

İkinci Danışman: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

TEMMUZ – 2025

YOZGAT



**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ONAY FORMU**

T.C.

**YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı öğrencisi Mustafa KOYUNCU' nun hazırladığı “**Lif Takviyeli Polimer Atıkların Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisi**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 28/07/2025 Pazartesi günü saat 11:00' da yapılmış, tezin onayına oy birliği ile karar verilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Handan ADIBELLİ
(Danışman)

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Okan ANADUT

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

...../...../ 2025

Prof. Dr. Ümit BUDAK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa KOYUNCU

28/07/2025

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bilgi, tecrübe ve rehberlikleriyle bana yol gösteren, bilimsel yaklaşım ve yapıcı destekleri ile her zaman yanımda olan çok değerli danışmanlarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Handan ADIBELLİ ve Sayın Prof. Dr. Fuat KÖKSAL hocalarıma en içten saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatım boyunca her daim yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiren, varlıklarıyla güç bulduğum sevgili babam Mehmet KOYUNCU' ya, sevgili annem Iraz KOYUNCU' ya, sevgili kardeşlerim Furkan KOYUNCU ve Yasemin KOYUNCU' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tüm çalışma sürecim boyunca tezime yardımları dokunan herkese teşekkür ederim.

Mustafa KOYUNCU

28/07/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİF TAKVİYELİ POLİMER ATIKLARIN ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

MUSTAFA KOYUNCU

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: Dr. Öğr. Üyesi Handan ADİBELLİ
İKİNCİ DANIŞMAN: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Bu çalışmada lif takviyeli polimer atıkların çimento esaslı kompozitlerde kullanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde üç farklı elyaf cinsinden (Karbon, Cam, Aramid) 1-1,5 cm boyunda kesilerek hazırlanan lif takviyeli polimer atıkların çimento harcına hacimce %0,3, %0,6 ve %0,9 oranlarda ilave edilmesi ile 2 farklı S/Ç oranına (0.40 ve 0.55) sahip çimento esaslı kompozitler hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımdan referans ile birlikte toplam 20 farklı grup karışım için 180 adet 40x40x160 mm boyutunda standart prizma numuneler üretilmiştir. Numuneler kalıptan alındıktan sonra standart kür havuzunda 28 gün süre ile küre tabii tutulmuştur. Kuru birim ağırlık, su emme, porozite, ultrases geçiş hızı gibi fiziksel özellikleri ve eğilme, basınç değerleri gibi mekanik özellikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Su/çimento oranı arttıkça kuru birim ağırlık, su emme, porozite değerlerinin arttığı, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin azaldığı görülmüştür.

2025, xii + 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: Karbon Lif, Cam Lif, Aramid Lif

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF FIBER REINFORCED POLYMER WASTES ON MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT-BASED COMPOSITES

MUSTAFA KOYUNCU

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

SUPERVISOR: Asst. Prof. Dr. Handan ADIBELLİ

CO-SUPERVISOR: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

In this study, the use of fiber reinforced polymer waste in cement based composites was investigated experimentally. In the experiments, fiber reinforced polymer wastes prepared by cutting 1-1.5 cm lengths of three different fiber types (Carbon, Glass, Aramid) were added to the cement mortar at 0.3%, 0.6% and 0.9% by volume and cement based composites with 2 different S/W ratios (0.40 and 0.55) were prepared. A total of 180 standard prism specimens measuring 40x40x160 mm were produced from the prepared mixture, along with the reference, for a total of 20 different mixture groups. After being removed from the mold, the specimens were cured in a standard curing tank for 28 days. Physical properties such as dry unit weight, water absorption, porosity, and ultrasonic transmission velocity, as well as mechanical properties such as flexural and compressive strength, were experimentally determined. It was observed that dry unit weight, water absorption, and porosity values increased with increasing water to cement ratio, whereas the ultrasonic transmission velocity, compressive strength and flexural strength values decreased.

2025, xii + 56 pages

Keywords: Carbon Fiber, Glass Fiber, Aramid Fiber

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ BEYANI.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
RESİMLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Karbon Lifler.....	3
2.1.1. Karbon Liflerin Kullanım Alanları	5
2.2. Cam Lifler	6
2.2.1. Cam Liflerin Kullanım Alanları.....	7
2.3. Aramid Lifler.....	9
2.3.1. Aramid Liflerin Kullanım Alanları	9
3. GEREÇ VE YÖNTEM	18
3.1. Deneysel Çalışma	18
3.1.1. Kullanılan Malzemeler	18
3.1.1.1. Çimento	18
3.1.1.2. 0-4 Kırma Kum.....	18
3.1.1.3. Karbon Lif Takviyeli Polimer (CFRP) Atık	19
3.1.1.4. Cam Lif Takviyeli Polimer (GFRP) Atık	20

3.1.1.5. Aramid Lif Takviyeli Polimer (AFRP) Atık	21
3.1.1.6. Karışım Suyu	22
3.1.1.7. Akışkanlaştırıcı	22
3.1.2. Karışım Oranları ve Üretim Aşaması	22
3.1.2.1. Numunelerin Üretimi	24
3.1.3. Yapılan Deneyler	25
3.1.3.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	25
3.1.3.2. Kuru Birim Hacim Ağırlık, Porozite ve Su Emme Deneyleri.....	26
3.1.3.3. Eğilme Dayanımı Deneyi	27
3.1.3.4. Basınç Dayanımı Deneyi.....	29
3.1.3.5. Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi.....	30
4. BULGULAR.....	32
4.1. Yayılma Tablası.....	32
4.2. Taze Birim Hacim Ağırlık	32
4.3. Kuru Birim Hacim Ağırlık	33
4.4. Su Emme	35
4.5. Porozite	37
4.6. Ultrases Geçiş Hızı	40
4.7. Eğilme Dayanımı.....	42
4.8. Basınç Dayanımı	45
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	48
6. KAYNAKLAR	51

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Kullanılan CEM I 2.5 R Portland Çimentosunun Özellikleri	18
Tablo 3.2. Çalışmada Kullanılan Karbon Lifin Özellikleri	19
Tablo 3.3. Çalışmada Kullanılan Cam Lifin Özellikleri	20
Tablo 3.4. Çalışmada Kullanılan Aramid Lifin Özellikleri.....	21
Tablo 3.5. Numune Karışım Miktarı	23
Tablo 4.1. Yayılma Tablası ve Ortalama Taze Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları	32
Tablo 4.2. Kuru Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları.....	33
Tablo 4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları	40
Tablo 4.4. Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	43

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Karbon liflerinin yıllara göre üretim miktarları.....	4
Şekil 2.2. Karbon liflerinin alanlarına göre kullanım miktarları.....	5
Şekil 2.3. Boeing 787 dreamliner	5
Şekil 2.4. Kayak takımının kesiti	8
Şekil 2.5. Aramid lif kullanım alanları	10
Şekil 3.1. Üretilen numunelerin özellikleri.....	25
Şekil 3.2. Eğilme dayanımı deney düzeneği	28
Şekil 3.3. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği	31
Şekil 4.1. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı kuru birim hacim ağırlık değişimleri	34
Şekil 4.2. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı kuru birim hacim ağırlık değişimleri	34
Şekil 4.3. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı su emme değişimleri	36
Şekil 4.4. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı su emme değişimleri	36
Şekil 4.5. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı porozite değişimleri.....	38
Şekil 4.6. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı porozite değişimleri.....	38
Şekil 4.7. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı ultrases geçiş hızı değişimleri.....	41
Şekil 4.8. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı ultrases geçiş hızı değişimleri.....	41
Şekil 4.9. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı eğilme dayanımı değişimleri	44
Şekil 4.10. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı eğilme dayanımı değişimleri	44
Şekil 4.11. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı basınç dayanımı değişimleri.....	46
Şekil 4.12. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı basınç dayanımı değişimleri	47

RESİMLER LİSTESİ

<u>Resim</u>	<u>Sayfa</u>
Resim 3.1. Çalışmada kullanılan kuru kum 0-4 mm	19
Resim 3.2. Çalışmada kullanılan karbon lif takviyeli polimer atık	20
Resim 3.3. Çalışmada kullanılan cam lif takviyeli polimer atık	21
Resim 3.4. Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcı	22
Resim 3.5. Aramid lif takviyeli polimer atık ile harcın karıştırma makinesi içindeki hali	24
Resim 3.6. Bir gün kalıpta bekletilen numuneler	24
Resim 3.7. 28 günlük numuneler	25
Resim 3.8. Yayılma tablası deney aşaması	26
Resim 3.9. Arşimet deneyi	27
Resim 3.10. Numunelerin etüvdeki durumu	27
Resim 3.11. Eğilme dayanımı deneyi	28
Resim 3.12. Basınç dayanımı deneyi	29
Resim 3.13. Ultrases geçiş hızı deneyi	30

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
Fe_2O_3	: Demir Oksit
K_2O	: Potasyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
Na_2O	: Sodyum Oksit
SiO_2	: Silisyum Dioksit
SO_3	: Sülfür Trioksit
μ	: Mikron

Kısaltmalar	Açıklamalar
FRP	: Lif Takviyeli Polimer
MPa	: Megapascal
GPa	: Gigapascal
S/Ç	: Su/Çimento Oranı
N/S	: Newton / Saniye
Km/S	: Kilometre / Saat
EN	: Avrupa Normu
TS	: Türk Standartları
P	: Porozite
μs	: Mikro saniye

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde kullanılan malzeme ve yapı teknolojileri dünyada yaşanan hızlı bilimsel gelişmelere paralel olarak değişip gelişmektedir. Dünya nüfusunun hızla artması ve buna bağlı olarak başta barınma ihtiyacı olmak üzere eğitim, sanat, spor, askeri vb. alanlarda farklı ihtiyaçlara cevap veren yeni yapılar inşa etmekle birlikte eski yapıların modern yöntemler sayesinde onarım ve güçlendirilmesi oldukça güncel ve önemli bir konudur.

Onarım ve güçlendirme yöntemlerinden biri kolon, kiriş gibi yapı elemanlarına uygulanan elyaf kumaş sargılardır. Lif takviyeli polimerler (FRP) olarak da adlandırılan bu malzemeler, yüksek mukavemetleri, hafiflikleri ve korozyona dayanıklılıkları sayesinde betonarme, çelik ve ahşap yapıların güçlendirilmesinde tercih edilmektedir. Bu malzemeler ile güçlendirilen yapı elemanları, önemli ölçüde artan yük taşıma kapasitesine sahiptir.

Mühendislikte farklı malzemeler ve farklı metotlar kullanılarak, ülke ekonomisi ve sürdürülebilirliğe katkı sağlamak için akademik olarak lisansüstü düzeyde farklı çalışmalar sürdürülmüş ve sürdürülmeye devam etmektedir.

Bu çalışma konularından biri değişik malzeme özelliklerine sahip liflerin çimento esaslı kompozitlerde kullanımıdır. Tasarlanmış çimento bazlı kompozitler (Engineered cementitious composites) ismiyle patent alan çimento esaslı kompozitler kısaca ECC olarak anılmaktadır. Deprem ve yangın dayanımında, havaalanı kaplama betonlarında, beton borularda, limanlarda, beton yol üst yapılarında, endüstriyel döşemeler gibi birçok alanda Çimento esaslı kompozitler kullanılmaktadır (Vural, 1998).

Çekme dayanımları ve toklukları düşük olan çimento esaslı kompozitlerde çatlak oluşmasını ve yayılmasını kontrol etmek için de lifler kullanılabilir (Özyurt, 2000). Küçük ve yumuşak lifler çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol ederken, büyük ve güçlü lifler makro çatlakları kontrol etmektedir (Mobasher ve Li Cheng, 1996). Liflerin eldesinde kullanılabilecek malzemelerden biri, taş, tuğla, ahşap, beton, çelik ve betonarme gibi yapı elemanlarına dışarıdan kolaylıkla uygulanan bir güçlendirme malzemesi olan lifli polimerlerdir (Çelik ve Karaşin, 2014). İnşaat mühendisliğinde FRP (Lifli polimer) malzemeler tek ve çift yönlü kumaşlar, şeritler ve donatılar ve kırpıntı malzemeler olarak kullanılabilmektedir. FRP kompozitler yüksek korozyon dayanımı, yüksek çekme dayanımı, düşük ağırlık ve agresif çevre koşullarına karşı üstün durabilite gibi birçok

avantajlarından dolayı inşaat mühendisliğinde yaygın bir kullanıma sahiptir (Yuan vd., 2018).

Sahip olduğu üstün mekanik özellikleri ile bu kadar geniş kullanım alanına sahip olan FRP malzemelerin işlevini tamamladıktan sonra atık olarak kullanımı düşünülebilir. Sürdürülebilir bir çevre için atıkların geri kazanımı önemli bir konudur. Atık geri kazanımı bazı yöntemlerle atıkların başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesidir. Atıkların geri kazanımının faydalarından biri ekonomiye yaptığı katkıdır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

FRP malzemeler üretimleri oldukça maliyetli olan ve genel olarak ülkemize ithal olarak gelen malzemelerdir. Yüksek mekanik özelliklere sahip bu malzemelerin atıklarının mekanik, kimyasal vb yollarla değerlendirmesi, sürdürülebilirlik ve ekonomi odaklı çalışmaların yoğun talep kazandığı günümüzde bilime, insanlığa ve ülkemize katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, ahşap kirişlere epoksi vasıtasıyla sargı malzemesi olarak uygulanmış olan FRP kumaşın atık malzeme olarak çimento esaslı kompozitlerde kullanımı ve böylece atık geri kazanılabilirliği incelenecektir. Çalışmada değişken olarak karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf olmak üzere üç farklı atık lif cinsi, hacimce %0.3,%0.6,%0.9 oranlarında üç farklı lif miktarı çimento esaslı kompozitler için iki farklı S/Ç oranı kullanılarak kuru birim ağırlık, su emme, porozite, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases hızları deneysel olarak tespit edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Karbon Lifler

Yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gibi üstün özellikleri nedeniyle mühendislik ve sanayi alanlarında büyük ilgi gören karbon lifler ilk keşfinden günümüze kadar gelişen üretim teknolojileri ve uygulama alanları ile vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. (Morgan, 2005).

Karbon liflerin temeli, 19. yüzyılın sonlarında atılmıştır. 1879 yılında Thomas Edison, elektrik ampullerinde kullanılan karbon filamentleri üretmek için organik lifleri karbonlaştırma işlemi uygulamıştır (Fitzer, 1989). Günümüz karbon lifleri ile karşılaştırıldığında bu filamentler daha düşük mekanik özelliklere sahip olup ve bu nedenle yalnızca elektrik iletkenliği açısından kullanım için daha uygun görülmüştür.

20. yüzyılın başlarında daha fazla ilgi görmeye başlayan karbon liflerini daha yüksek mukavemette üretmek için farklı malzemeler kullanılmaya başlanılmıştır. Bu dönemde, viskon (rayon) bazlı liflerin karbonlaştırılması üzerine çalışmalar yürütülmüştür (Edie, 1998). Ancak bu yöntemle üretilen karbon liflerin mukavemeti ve elastisite modülü, modern karbon liflere kıyasla oldukça düşük olmuştur.

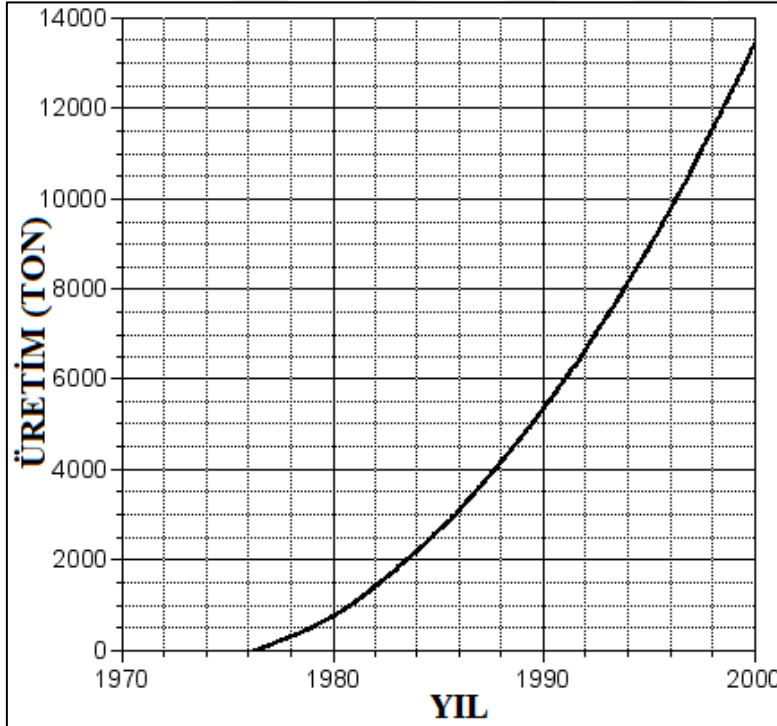
Kompozit materyallerde karbon liflerinin kullanımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. 1963 yılında yüksek dayanıma sahip karbon liflerinin üretim metotları geliştirilmiştir (Lüleci,2000). 1960'lı yıllarda Japon araştırmacılar, poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon liflerin üretiminde önemli ilerlemeler kaydetmiştir (Morgan, 2005). Akio Shindo ve ekibi, yüksek mukavemetli ve yüksek elastisite modülüne sahip karbon lifler üretmek için PAN bazlı öncül liflerin kullanımını geliştirmiştir. Bu süreç, karbon lif endüstrisinin büyümesini hızlandırmış ve günümüzde de en yaygın kullanılan üretim yöntemi haline gelmiştir (Fitzer, 1989). Aynı dönemde İngiltere'de Royal Aircraft Establishment (RAE), zift bazlı karbon liflerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu lifler, havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmak üzere tasarlanmış olup, yüksek sıcaklık dayanımı sağlamaktadır (Marsh ve Rodríguez-Reinoso, 2006).

1970'li yıllarda karbon liflerin ticari üretimi hız kazanmıştır. Özellikle havacılık ve savunma sanayilerinde kullanım alanları genişlemiş, hafif ve yüksek dayanımlı malzeme ihtiyacını karşılamak üzere yaygın olarak benimsenmiştir (Edie, 1998). Boeing ve Airbus gibi büyük havacılık firmaları, uçak gövdelerinde karbon lif takviyeli kompozit malzemeler kullanmaya başlamıştır (Morgan, 2005).

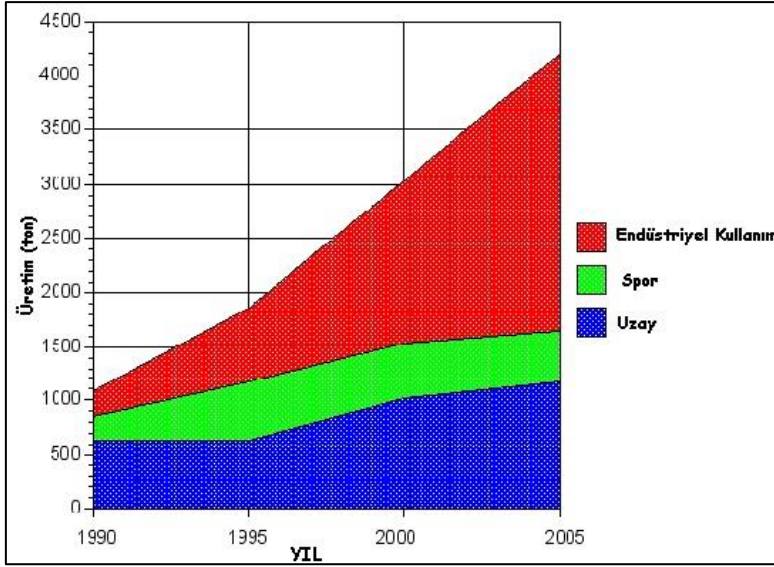
1980’lerde, otomotiv ve spor ekipmanları sektörlerinde de karbon lif kullanımı artmıştır. Bisiklet çerçeveleri, tenis raketleri ve golf sopaları gibi ürünlerde karbon liflerin hafıflığı ve dayanıklılığı büyük avantaj sağlamıştır (Fitzer, 1989).

1990’lardan itibaren nanoteknoloji ve ileri üretim teknikleri sayesinde karbon liflerin mekanik özellikleri daha da geliştirilmiştir. Zift bazlı liflerin özellikleri optimize edilmiş, daha yüksek sıcaklık dayanımına sahip karbon lif türleri geliştirilmiştir (Marsh ve Rodríguez-Reinoso, 2006).

2000’li yıllarda, otomotiv sektöründe karbon lif kullanımı artmaya başlamış, Formula 1 yarış arabalarında ve elektrikli araçlarda hafif malzeme ihtiyacını karşılamak üzere karbon lif takviyeli kompozitler yaygınlaşmıştır (Morgan, 2005). Aynı zamanda, rüzgar türbinleri, yapı güçlendirme sistemleri ve biyomedikal uygulamalarda da karbon liflerin kullanımı genişlemiştir (Edie, 1998). Gelişen üretim teknolojileri sayesinde karbon liflerin maliyetleri düşürülmekte ve kullanım alanları giderek artmaktadır. 1970-2000 yılları arasında karbon lif üretim miktarları şekil 2.1’ de, karbon liflerin alanlarına göre kullanım miktarları ise şekil 2.2’ de verilmiştir



Şekil 2.1. Karbon liflerinin yıllara göre üretim miktarları



Şekil 2.2. Karbon liflerinin alanlarına göre kullanım miktarları

2.1.1. Karbon Liflerin Kullanım Alanları

Karbon lifler, düşük ağırlık, yüksek mukavemet, uzun ömür ve kimyasal dayanıklılık gibi avantajları nedeniyle birçok sektörde kritik bir malzeme olarak kullanılmaktadır (Alshammari vd., 2021). Gelişen teknoloji ile birlikte karbon liflerin kullanım alanları da artmaktadır. Farklı amaçlar için kullanım alanları aşağıdaki gibi verilebilir:

- Havacılık ve uzay sanayi; uçak gövdeleri, kanat yapıları, uydu ve roket parçalarında, helikopter pervanelerinde, hafif ve dayanıklı kompozit malzemelerde kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı nedeniyle ticari ve askeri uçakların yapısında tercih edilmektedir. Boeing 787 Dreamliner gibi modern uçaklarda gövdenin %50'den fazlası karbon fiber kompozitlerden üretilmiştir (Donnet, 1998).



Şekil 2.3. Boeing 787 dreamliner (Kaynak: Callister ve Rethwisch, 2011)

- Otomotiv sanayi; karbon lifler, performans araçların ve lüks otomobillerin gövdelerinde, şasi bileşenlerinde, iç kaplamalarında ve süspansiyon sistemlerinde ağırlık azaltma amaçlı kullanılır. Düşük ağırlık sebebiyle daha az enerji tüketimi sağlar ve yakıt verimliliğini artırır. Çarpışma dayanımı ve yapısal sağlamlık sayesinde araç içi güvenliğine katkı sağlar. son yıllarda elektrikli araçların gelişimiyle birlikte kullanımı artmaktadır (Thostenson vd., 2001).
- İnşaat ve yapı güçlendirme; köprü ve bina güçlendirme, depreme dayanıklı yapı elemanları, prefabrik yapı malzemelerinde sık kullanılmaktadır. Karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), eski binaların ve köprülerin güçlendirilmesinde çelikten daha etkili bir alternatif olarak tercih edilmektedir (Meier, 1995).
- Savunma ve askeri teknolojiler; kurşun geçirmez zırh ve kasklarda, İHA yapılarında, dayanıklı ve hafif askeri araçlarda kullanılmaktadır. Askeri araçların hem hafif hem de dayanıklı olmasını sağladığı için savunma sanayinde kritik bir malzeme olarak tercih edilmektedir (Callister, 2007).
- Spor malzemeleri; bisiklet, tenis raketleri, golf sopaları, kayak ve snowboard takımları gibi malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek esneklik, hafiflik ve darbe dayanımı sayesinde performansın artmasını sağlar. Sporcunun eforunu azaltır ve kontrolü artırır (Hull ve Gonzalez, 1988).
- Rüzgar türbinleri ve yenilenebilir enerji; rüzgar türbinlerinin kanatlarında yüksek dayanım ve düşük ağırlık sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellik sayesinde enerji üretim verimliliğini artırır. Uzun ömür ve bakım maliyeti sebebiyle avantaj sağlar. Kanat boyu uzadıkça karbon lif kullanımı zorunlu hale gelmektedir (Brondsted vd., 2005).
- Medikal sektör; tıp alanında özellikle protez implantlar, ortopedik implantlar ve radyolojik görüntüleme ekipmanlarında sıkça kullanılmaktadır. MRI ve X-ray geçirgenliği sayesinde görüntülemeye engel oluşturmaz. Karbon liflerin biyouyumluluğu ve hafifliği sayesinde tıbbi protezlerde ve cerrahi ekipmanlarda kullanımını artırmaktadır (Veillette, 2007).

2.2. Cam Lifler

Cam lifler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve kimyasal dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde birçok endüstride yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir. Camın

işlenmesi binlerce yıl öncesine dayanırken, modern cam lif teknolojisi 20. yüzyılda önemli gelişmeler kaydetmiştir (Morampudi vd., 2021).

Cam, insanlık tarihinde yaklaşık 4000 yıl öncesine kadar uzanan bir geçmişe sahiptir. Antik Mezopotamya, Mısır ve Roma dönemlerinde cam süs eşyaları ve günlük kullanım araçları üretilmiştir (Richerson, 2005). Cam liflerinin dekoratif amaçlarla kullanıldığına dair bazı bulgular olsa da, bu malzemenin mühendislik uygulamalarında değerlendirilmesi modern dönemlere kadar mümkün olmamıştır.

Cam liflerin endüstriyel anlamda kullanımı 19. yüzyılın sonlarına doğru başlamıştır. 1880'lerde Amerikalı mucit Edward Drummond Libbey, ince cam liflerini iplik haline getirme üzerine çalışmalar yapmıştır (Bergman vd., 2007). Ancak, modern cam elyaf üretiminin temelini 1930'lu yıllarda Owens-Illinois ve Corning Glass Works şirketlerinin yaptığı araştırmalar oluşturmuştur.

1936'da Corning Glass Works, cam liflerini düşük maliyetli ve yüksek verimlilikle üretebilen yeni bir çekme yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem, cam liflerin geniş çapta endüstriyel kullanıma girmesini sağlamıştır (Hegde vd., 2004).

II. Dünya Savaşı sırasında cam lifler, özellikle askeri uygulamalarda ve uçak endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. 1940'larda Owens-Corning firması, cam liflerini polimer matrislerle birleştirerek fiberglası geliştirmiştir (Wallenberger ve Bingham, 2010). 1950'lerden itibaren cam lifler, inşaat, otomotiv ve havacılık sektörlerinde yaygınlaşmıştır.

Günümüzde cam lif teknolojisi, nanoteknoloji ve ileri mühendislik teknikleri sayesinde daha da gelişmiştir. Yeni üretim süreçleri ve malzeme modifikasyonları ile cam liflerin dayanıklılığı, esnekliği artırılmıştır ve çevre dostu üretim süreçleri geliştirilerek sürdürülebilir cam lifler üretilmeye başlanmıştır (Pickering, 2006).

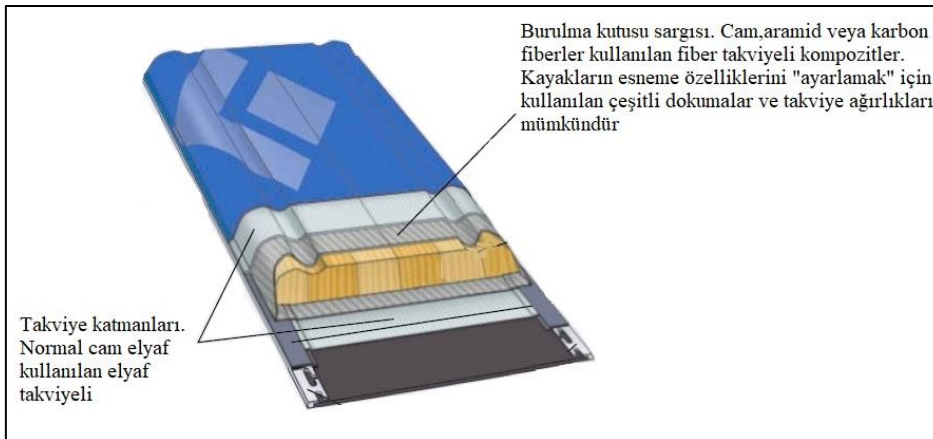
2.2.1. Cam Liflerin Kullanım Alanları

Cam lifleri, genellikle silika bazlı malzemelerden üretilen ve polimer matrislerle birleştirildiğinde mekanik dayanımı artıran bir takviye elemanı olarak kullanılan malzemelerdir (Bunsell, 2011). Yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık direnci, hafiflik ve kimyasal kararlılık gibi özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel ve teknolojik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı amaçlar için kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Yapı ve inşaat sektörü; beton takviyesi, bina güçlendirme, boru ve tank üretiminde, kompozit panellerde sık kullanılmaktadır. Cam elyaf takviyeli beton (GFRC), geleneksel

betona göre daha hafif ve esnek olması nedeniyle tercih edilmektedir (Bentur ve Mindess, 2007).

- Havacılık ve uzay sanayi; helikopter rotorları, kanatlar, uçak gövdeleri ve uzay mekikleri gibi hafif ama dayanıklı yapıların üretiminde, mukavemeti ve hafifliği nedeniyle karbon fiberle birlikte tercih edilmektedir. (Möller vd., 2015).
- Otomotiv sanayi; darbe dayanımı, şekil verilebilirliği ve hafifliği sebebiyle kaporta, tampon ve iç mekan tasarımlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Karbon fiberlere göre daha uygun maliyetli olmasıyla özellikle orta segment araçlarda kullanıldığı belirtilmiştir. Yakıt tasarrufunu ve performansı artırır. Ayrıca geri dönüştürülebilir olması çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlı olduğu saptanmıştır (Katunin vd., 2020).
- Elektrik ve elektronik sanayi; devre kartları, fiberglas, izolasyon levhaları ve kablo kılıfları gibi yüksek ısıya ve dayanıma dirençli malzemelerin üretiminde kullanıma sahiptir (Kim ve Park, 2020).
- Spor malzemeleri; kayak, tenis racketleri ve sörf tahtaları gibi spor malzemelerinde hafiflik ve yüksek rijitlik sağladığı için yaygın olarak kullanılmakta, ayrıca dayanıklı mobilyalar ve ev eşyalarında da estetik ve fonksiyonel avantajlar sunmaktadır (Singh ve Kumar, 2022).
- Denizcilik sektörü; tekne ve yatların gövdelerinde ana malzemelerden biri olarak kullanılmakta ve nemli ortamlara ve tuzlu suya karşı dayanıklı olması sebebiyle denizcilik sektöründe önemli bir yer edinmiştir. (Greene, 1999).



Şekil 2.4. Kayak takımının kesiti (Kaynak: Callister ve Rethwisch, 2011)

2.3. Aramid Lifler

Aramid lifler, yüksek mukavemetleri, termal dirençleri ve kimyasal dayanıklılıkları nedeniyle endüstriyel ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İlk olarak 1960'lı yıllarda geliştirilen bu lifler, günümüzde kompozit malzemelerden koruyucu kıyafetlere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. (Morgan, 2005).

Aramid liflerin temeli, 1960'ların başında DuPont şirketinde çalışan Stephanie Kwolek tarafından atılmıştır. Kwolek, yeni bir polimer türevi üzerinde çalışırken, yüksek mukavemetli ve termal olarak kararlı liflerin elde edilebileceğini keşfetmiştir (Kwolek, 1965). Bu keşif, "Kevlar" olarak bilinen ilk ticari aramid lifin ortaya çıkmasını sağlamıştır (Morgan, 2005).

1970'lerde DuPont, Kevlar üretimine başlayarak bu yeni malzemeyi pazara sunmuştur. Kevlar, çelikten beş kat daha güçlü olmasına rağmen çok daha hafif olmasıyla dikkat çekmiştir. Bu özellikleri sayesinde, özellikle balistik yeleklerde, hava taşıtları için hafif kompozit malzemelerde ve otomotiv sanayisinde kullanım alanı bulmuştur (Yang, 1993).

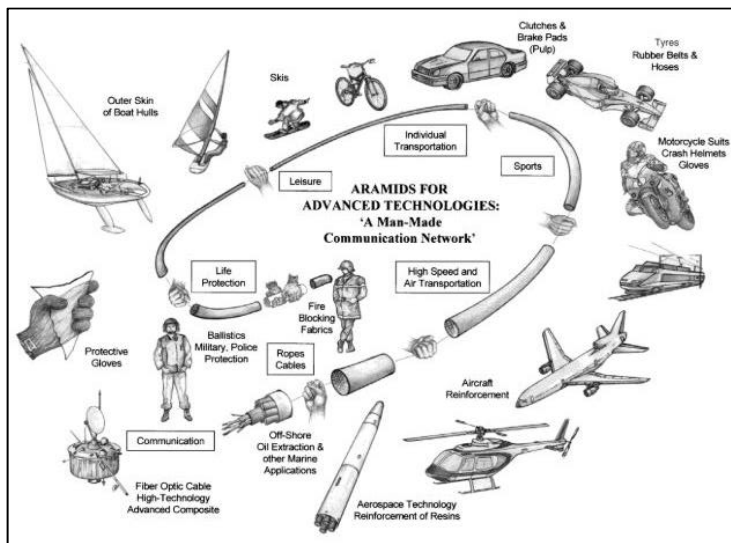
1980'ler ve 1990'lar boyunca aramid liflerin mekanik özelliklerini artırmak için araştırmalar devam etmiştir. Bu dönemde aramid liflerin üretim süreçleri geliştirilmiş, yeni formülasyonlarla yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanıklılığı artırılmıştır (Harris, 1999). Ayrıca, Asya'da Teijin şirketi tarafından üretilen "Twaron" adlı yeni bir aramid lif türü piyasaya sürülmüştür.

2000'li yıllarda aramid liflerin kullanım alanları daha da genişlemiştir. Nano teknolojinin gelişmesiyle, aramid lifler kompozit malzemelerde daha etkili bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde bu liflerin kullanımı artmıştır. Günümüzde aramid lifler, yangına dayanıklı tekstillerden uçak parçalarına kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. (Fried, 2014)

2.3.1. Aramid Liflerin Kullanım Alanları

Aramid lifleri, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk oranı, hafiflik, yüksek ısı ve kimyasal direnç gibi özelliklere sahip malzemeleridir (Mohan vd., 2013). Darbe dayanımı ve alev geciktirici özelliği sebebiyle bu lifleri çeşitli endüstriyel ve askeri uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Farklı amaçlar için kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Savunma ve askeri uygulamalar; kurşun geçirmez yelekler, balistik kasklar ve askeri giysilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu lifler, hafif ve yüksek enerji emilimi özelliklerine sahip olduğu için balistik koruma sağlamaktadır (Gupta ve Kaur, 2019).
- Havacılık ve uzay endüstrisi; uçak gövdeleri, rotor kanatları ve iç panellerinde kullanılmaktadır. Bu lifler yakıt verimliliğini ve dayanıklılığı artırmaktadır (Van de Velde ve Kiekens, 2001).
- Otomotiv sanayi; fren balataları, debriyaj sistemleri ve lastik takviyelerinde sıkça kullanılmaktadır. Sıcaklık ve aşınmaya karşı dayanıklı oldukları için tercih edilmektedir. Performans ve yakıt verimliliği sağlamaktadır. Ayrıca, güvenlik için önemli olan hava yastıklarında da tercih edilmektedir (Kader ve Heitzmann, 2012).
- Yapı ve inşaat sektörü; bina güçlendirme ve sismik dayanıklılık artırma projelerinde, aramid lifleri çelikten daha hafif ve esnek bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Genellikle tünel ve köprü yapımlarında dayanıklılığı artırdığı için tercih edilmektedir (Bentur ve Mindess, 2007).
- Spor malzemeleri; dağ bisikletleri ve kayak malzemelerinde hafif, dayanıklı yapısı ve darbe emme özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir (Gibson, 2010).
- Isıya dayanıklı ve koruyucu giysiler; itfaiyeci kıyafetleri, endüstriyel işçilerin koruyucu elbiseleri, fırın eldivenleri ve diğer yüksek ısıya maruz kalan giysilerin üretiminde kullanılır. Bu giysiler, alevlere, yüksek sıcaklıklara ve erimiş metallere karşı mükemmel koruma sağlamaktadır. (Chattopadhyay ve Majumdar, 2013).



Şekil 2.5. Aramid lif kullanım alanları (Kaynak: Hearle, 2001)

Yukarıda kısaca özellikleri verilen karbon, cam ve aramid liflerin belirli oranlarda katılması ile üretilen harç ve betonlarla ilgili farklı çalışmalar literatür de incelenmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir;

Dündar, Çınar ve Peşin (2018) yapmış oldukları çalışmalarında, farklı lif çeşitleri kullanılarak üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Lif çeşidi olarak karbon ve bazalt seçmişlerdir ve beton içerisine %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında lif takviye ederek numuneleri üretmişlerdir. Lif oranları arttıkça porozite ve su emme değerlerinde artma görülmüştür. Bazalt lifin karbona göre mekanik dayanımlarında ve aşınma dirençlerinde daha fazla artış olduğunu gözlemlemişlerdir. (Dündar vd., 2020).

Farklı lif türlerini (cam, karbon, polipropilen, çelik) kullanarak lif tipi ve kullanım oranının çimento esaslı kompozitelerin özelliklerine etkisini Topsakal ve Özel (2018) araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre lif oranına ve tipine bağlı olarak eğilme mukavemetini artırmak için liflerin kompozit olarak kullanılmasını önermişlerdir. (Topsakal ve Özel, 2018).

Nie ve ark. (2019) aramid ve karbon liflerinin erken dayanımlı çimento harcının mekanik özelliklerini araştırmışlardır. %0,1, %0,2 ve %0,3 hacim oranlarında aramid ve karbon elyaf içeren yüksek erken dayanımlı çimento harcı (HESCM) numuneleri hazırlanmış; bu numunelerin 7 günlük basınç ve çekme özellikleri, basınç ve çekme test makinesi kullanılarak test edilmiştir. Hem aramid hem de karbon elyaf ilavesi, çekme mukavemeti üzerinde olumlu bir etki göstermiş, elyafın hacim içeriği arttıkça bu iyileşme daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca elyaf ilavesi basınç dayanımını da olumlu yönde etkilemiş ancak bu artış, çekme dayanımındaki iyileşmeye kıyasla daha düşük seviyede kalmıştır. Lif hacmi arttıkça çekme gerilmesinin yükseldiği ve buna bağlı olarak numunelerin deforme olabilme kapasitesinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Aramid elyaf, karbon elyafa kıyasla daha fazla bir iyileştirici etki sağladığını gözlenmiştir (Nie vd., 2019).

Bazalt ve cam lifleriyle takviye edilmiş çimento esaslı harçların dinamik davranışlarını Fenu ve ark. (2016) incelemişlerdir. İki farklı lif türünün eklenmesinin yüksek gerilme hızında enerji emilimi ve çekme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmış ve her iki lif türüyle takviye edilen harçların performansları kıyaslanmıştır. Harç numuneleri, aynı uzunluk ve çapa sahip liflerin farklı oranlarda kullanılmasıyla hazırlandı. Bazalt ve cam lifinin harçlara eklenmesinin, eğilme dayanımında önemli bir artma sağladığı, çekme dayanımında ise neredeyse bir değişim oluşturmadığı gözlemlenmiş ancak dinamik yükleme altında pik sonrası davranışını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Cam lifin %5

oranında ilave edilmesiyle harçların kırılma enerjisinde referans harca göre 7,2 kat artış gözlemlenmiş, ancak %3 oranında cam lif ilavesiyle de referans harca kıyasla 4,6 katı artış gözlemlenmiştir. Yüksek şekil değiştirme durumlarında, dinamik yüklemeler altında cam liflerinin, aynı uzunluk ve çaptaki bazalt liflerine göre daha fazla performans gösterdiğini ifade etmişlerdir (Fenu vd., 2016).

Safiuddin ve ark. (2021) yaptıkları çalışmalarında kısa karbon fiber takviyeli harç kompozitinin su emme ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. %1, %2, %3 ve %4 oranlarında kısa zift bazlı karbon fiber içeren dört farklı kompozit üretilmiştir. Referans harcında Portland çimento harcı kullanılmıştır. Sertleşmiş harç kompozitleri 7-28 günlük kürden sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme özellikleri araştırılmıştır. Harç kompozitinin işlenebilirliği, karbon elyaf içeriği arttıkça azalmıştır; bunun sonucunda, CFRM kompozitinin hapsedilmiş hava içeriğinin arttığı gözlemlenmiştir. Harç kompozitinin basınç dayanımı, karbon fiberlerin eklenmesiyle artmış; %3 oranda karbon fiberin eklenmesiyle en yüksek basınç dayanımına ulaşan kompozit olduğunu gözlemlemişlerdir. %3 oranında karbon elyaf takviye edilen harç kompoziti, işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, sıkışmış hava içeriği, su emme açısından performansına göre optimum CFRM kompoziti olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Safiuddin vd., 2021).

Farklı boyutlardaki karbon fiberlerin portland çimento harcının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini Shu ve ark. (2015) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Kullanılan karbon liflerinin boyutları mikro uzunlukta (mikrometre cinsinden), makro uzunlukta (milimetre cinsinden) ve her iki boyutun bir kombinasyonu olarak sınıflandırılmıştır. Harç karışımlarının özellikleri; çekme testi, yarım daire çentik kırılma testi, harç küp sıkıştırma testi, birim ağırlık ve özgül ağırlık testlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda değerlendirilmiştir. Mikrofiberler, çimento harcının pik yük öncesi gerilme performansını arttırabildiği ve makrofiberlere göre daha az hava hapsedebilir olduğu gözlemlenmiştir. Uzunluğu derecelendirilmiş karbon fiber donatı, harcın çatlama direncinin artmasına sebep olduğu görülmüştür. Hibrit elyaf karışımları harcın kırılma direncini artırırken, tek uzunluktaki elyaflar artırmamıştır. Hibrit fiber karışımın mikro fiber karışıma kıyasla daha fazla çekme performansı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır (Shu vd., 2015).

Safiuddin ve ark. (2022) karbon elyaf harç kompozitlerinin eğilme ve darbe performanslarını incelemişlerdir. Hacimce sırasıyla %1, %2, %3 ve %4 karbon fiber kullanılarak dört farklı karbon elyaf takviyeli harç kompoziti üretilmiştir. Referans karışım

olarak ise karbon elyaf içermeyen başka bir karışım hazırlanmıştır. Sertleşmiş harç kompozitleri, ilk çatlak eğilme mukavemeti, nihai eğilme mukavemeti, ilk çatlak darbe direnci ve nihai darbe direnci açısından test edilmiştir. Karbon liflerinin eklenmesi işlenebilirliği azaltmış ve harç kompozitinin hava içeriğini artırmıştır. Buna göre karbon liflerinin varlığında harcın yoğunluğu azalmıştır. Karbon elyaf takviyeli harç kompozitlerinde, artan karbon elyaf hacim içeriğiyle birlikte eğilme mukavemeti, darbe direnci, eğilme tokluğu ve darbe tokluğunda paralel değişimler olduğu ve dolayısıyla çok iyi bir korelasyon bulunduğu gözlemlenmiştir. Tüm karışımlar arasında %3'lük karbon elyaf içeren harç kompoziti en yüksek yoğunluğa ve en düşük hava içeriğine sahip olmuştur. Eğilme ve darbe yükleri altında en iyi performans, %4 karbon elyaf içeren harç kompozitinde görülmüştür. Çalışmada karbon fiberlerin optimum hacim içeriği %3 olmuştur (Safiuddin, 2022).

Murthy ve ark. (2012) ince agrega yerine %0, %0,5, %0,7, %0,9 ve %1,2 oranlarda cam elyaf içeren betonun basınç dayanımını, eğilme dayanımını ve işlenebilirliğini incelemişlerdir. Bu parametrelerin sonuçları standart C30 sınıfı betonla karşılaştırılmıştır. Eğilme dayanımı %0 cam elyafı kırıya kıyasla neredeyse %30 oranında bir artış göstermiştir. Betonun basınç dayanımının çok fazla artışına neden olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca cam elyaf içeriğindeki artışla birlikte cam elyaf takviyeli betonun çökme değerinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Böylece betonda cam elyaf kullanımının sadece betonun özelliklerini iyileştirmekle ve maliyeti düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda bu çevresel tehlikenin verimli bir şekilde bertaraf edilmesi için kolay bir çıkış sağladığı sonucuna varılmıştır (Murthy vd., 2012).

Chang ve ark. (2018) karbon lif dağılımının çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve basınç dayanımı ölçülmüştür. Kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Basınç dayanımı %20 artmış, eğilme dayanımı %12,9 azalmış ve çekme dayanımı ise karbon elyaf içermeyene göre 2,4 kat arttığı gözlemlenmiştir (Chang vd., 2018).

Karbon liflerinin çimento esaslı malzemelerin mekanik ve elektriksel iletkenlik özelliklerine olan etkisi Baoguo ve ark. (2016) tarafından incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) gözlemleri ve teorik hesaplamalar yapılmıştır. Yaptıkları çalışmalara göre karbon liflerin ikamesiyle çimento harcının mekanik özelliklerini artırdığını, özellikle basınç dayanımını artırdığını göstermektedir (Baoguo vd., 2016).

Kurt (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı su/çimento oranlarına (0,36 ve 0,34) sahip beton karışımlarına %0, %2, %4 ve %6 oranlarında cam lif ilave ederek, toplamda 8 çeşit deneysel numune üretmiştir. Gerçekleştirilen deney sonucunda, su/çimento oranı 0,34 olan lifsiz betonun kırılma enerjisinde 109 kat, su/çimento oranı 0,36 olan lifsiz betonun kırılma enerjisinde ise 66 kat artış sağladığını belirtmiştir. Ayrıca, cam lifli betonlar lif içermeyen betonlara göre daha yüksek tokluğa sahip olduğunu ve daha sünek davranış gösterdiğini belirtmiştir (Kurt, 2006).

Cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerini Yıldız ve ark. (2010) deneysel olarak araştırmışlardır. C30 beton sınıfı karışımlarına farklı oranlarda (0, 5, 10, 15, 20 kg/m³) kırılmış cam lif ilave edilmiştir ve 28 günlük kür süresi sonunda çekme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri gerçekleştirilmiştir. Cam lif ilavesi, betonun hem basınç hem de çekme dayanımlarını olumlu yönde etkilemiştir. Cam lif oranının artması belirli bir seviyeye kadar dayanımda artış sağlamıştır, ancak çok yüksek oranlarda cam lif ilave edildiğinde karışımda topaklanmaya neden olduğu için dayanımda azalma eğilimi görülmüştür. Cam lif oranı arttıkça işlenebilirlikte ve ultrases geçiş hızında azalma olduğunu gözlemlemişlerdir (Yıldız vd., 2010).

Cam lif takviyeli betonun dayanım özelliklerini Qureshi ve Ahmed (2013) deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı oranlarda (0, %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5, %3, %3.5) cam lif kullanarak çeşitli beton karışımları hazırlamışlardır. Daha sonra numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, işlenebilirlik ve ultrases geçiş hızı testleri uygulamışlardır. Cam lif ilavesinin belirli bir oranından sonra betonun işlenebilirliğinde azalma olduğu görülmüştür. Cam lif oranı %1,5 olduğunda normal betona göre eğilme dayanımında 1,5 katın üzerinde bir iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Cam lif ilavesi belirli bir oranı kadar basınç dayanımını artırmıştır fakat bu orandan sonra azalma göstermiştir (Qureshi ve Ahmed, 2013).

Toklu ve ark. (2022) Farklı cam lifi oranı ve uzunluğunun çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisini Toklu ve ark. (2022) araştırmışlardır. Çalışmalarında cam liflerin farklı uzunluklarda (3, 6, 12 mm) ve %0.3, %0.4 ve %0.5 oranlarında cam lif ilave ederek ürettikleri numunelere ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testleri yapmışlardır. Hacimce %0,3 cam lif takviyesi tüm testlerde en yüksek performansı göstermiştir. Deney sonucunda, cam lifi oranı arttıkça eğilme dayanımında iyileşme görülmüştür ancak basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızlarında ise azalmaların olduğu görülmüştür (Toklu vd., 2022).

Ali ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, betona karışımlarına belirli oranlarda (0, 5, 10, 15, ve 20 kg/m³) cam lif ekleyerek ürettikleri numunelere dört farklı yangın süresine tabi tutmuşlardır. Basınç dayanımı ve üç farklı çekme dayanımını ürettikleri numuneler üzerinde test etmişlerdir. Yangına maruz bırakılmamış numunelerde cam lifin, basınç dayanımında iyileşme sağlamadığı ancak çekme dayanımının arttığı görülmüştür. 30 dakikalık yangın sonrasında cam elyaf takviyeli numunelerde çekme dayanımlarında yangın öncesine göre bir artış gözlemlenmiştir. Daha uzun süreli yangınlarda ise önemli bir artış meydana gelmediğini tespit etmişlerdir (Ali vd., 2019).

Baricevic ve ark. (2022) yüksek performanslı teknik tekstillerin yerel üretiminde atık olarak üretilen karbon, cam ve bazalt elyafların, lif takviyeli harçların taze ve sertleşmiş özelliklerine katkısını araştırmışlardır. Liflerin etkisini araştırmak için, iki farklı uzunlukta (5 ve 10 mm) üç tip lif kullanılmıştır ve lif miktarı ise sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, lif varlığı nedeniyle, lif türü ve uzunluğundan bağımsız olarak işlenebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Test edilen liflerin basınç dayanımı üzerinde düşük bir etkisi vardır, ancak bazalt ve karbon lif kullanımı çekme dayanımını artırmıştır. Ayrıca, her üç tip de tokluk ve hacimsel deformasyonlar üzerinde olumlu etkiye sahiptir, ancak karbon liflerin kullanımında bu etkinin daha büyük olduğunu belirtmişlerdir (Baricevic vd., 2022).

Saccani ve ark. (2019) karbon elyaf/epoksi kompozit atıklarının yapı malzemelerinde geri dönüştürülmesi ile elde edilen kompozitleri incelemişlerdir. Reçine ile kaplanmış kısa kesilmiş lifler (5-8 mm uzunluk), biri geleneksel portland çimentosu bazlı ve diğer ikisi metakaolin veya uçucu küllerden elde edilen jeopolimer bazlı olmak üzere farklı matris türlerine yaklaşık %5 hacim içeriğine kadar eklenmişlerdir. Son durumda, türetilen malzemeler neredeyse tamamen geri dönüştürülmüş bileşenlerden yapılmıştır. Türetilen malzemelerin işlenebilirliğini, mikroyapısını, fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Üstün eğilme mukavemeti ve artan tokluk elde edilmiştir. İncelenen en yüksek elyaf miktarına kadar işlenebilirlikte azalma olduğunu gözlemlenmiştir. Eğilme mukavemetindeki artış portland çimentosunda daha yüksek olduğu görülmüştür (Saccani vd., 2019).

Nguyen ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada geri kazanılmış karbon fiberler (RCF), CFRP atıkları veya pregreg karbon atıkları (PW) ile güçlendirilmiş portland çimento harcının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Güçlendirilmiş çimento harcına eğilme, basınç, sıkıştırma ve kırılma tokluğu testleri yapılmıştır. Eğilme dayanımı referans numuneye kıyasla %12-20 aralığında artış sağlamıştır. CFRP ve PW atıkları içeren numuneler sünek

davranış gösterirken RCF içeren numune gevrek davranış göstermiştir. Tüm takviyeli numuneler, referansa göre daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. CFRP atığı ile güçlendirilmiş malzeme referansa kıyasla %5-10 arasında iyileşme sağladığı görülmüştür (Nguyen vd., 2016).

Garces ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada karbon liflerinin karışıma eklenmesiyle portland çimentolu harçların mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. harçtaki çimento ağırlığının %0,5 oranında karbon lif içeriği için eğilme dayanımında optimum bir artış elde edilmiştir. Karbon lif eklenen her oran için numunelerde eğilme dayanımını artırdığını gözlemlemişlerdir (Garces vd., 2005).

Farinha ve ark. (2019) cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) atıklarının çimento esaslı harçlarda dolgu maddesi olarak etkisini araştırmışlardır. İki harç seti analiz edilmiştir. Benzer işlenebilirliğe sahip harçlar ve her ikisi de %10, %15, %20 ve %50 oranında GFRP atığı içermektedir. En iyi teknik performansla sahip harç, doğal agrega yerine %50 oranında GFRP atığı içeren harç olduğunu gözlemlemişlerdir. Başlangıçtaki su emilimi %80' in üzerinde azaldığı ve mekanik mukavemeti önemli ölçüde arttığı görülmüştür. 365 günde eğilme mukavemetinde %155' lik ve basınç mukavemetinde %166' lık bir artış olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Farinha vd., 2019).

Akbar ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada öğütülmüş geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin (RCF' ler) çimento kompozitleri üzerindeki etkisinin araştırmışlardır. Elyaf takviyeli çimento kompozitleri geliştirmek için %0,25-1,5 arasında değişen altı farklı elyaf hacim oranı seçilmiş ve RCF'lerin zaman içinde çimento kompozitlerinin mukavemet gelişimi, mikro yapısı, kristalin faz değişimi üzerindeki etkisini araştırmak için kapsamlı bir çalışması yapmışlardır. Eğilme dayanımında en yüksek artış, %1 oranında kullanılan öğütülmüş geri dönüştürülmüş karbon lifleri ile elde edilmiş olup ve yaklaşık %82 oranında bir dayanım artışı gözlenmiştir. Basınç dayanımında ise %1 oranında öğütülmüş geri dönüştürülmüş karbon lifleri eklenmesiyle yaklaşık %47' lik bir artış gözlenmiştir (Akbar vd., 2021).

Clark ve ark. (2020) hibrit karbon/cam fiber içeren polimer matrisli kompozit (FPMC) atıklarının, deniz suyu uygulamalarında performans özelliklerini iyileştirmek amacıyla çimentolu malzemelerde yeniden kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Hızlandırılmış tuzlu su yaşlandırma işleminden önce ve sonra, ağırlıkça %6 oranında farklı FPMC atıkları içeren sıradan portland çimentosunun performansı değerlendirilmiştir. İnce öğütülmüş FPMC atıklarının, çimentolu malzemelerde boşluk oranını azaltarak ve tuzlu su gibi

aşındırıcı bileşiklerin içeriye doğru difüzyon hızını yavaşlatarak performans üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceğini tespit etmişlerdir. Bu nedenle deniz ve kıyı ortamlarında kullanımı için uygun olduğu anlaşılmıştır (Clark vd., 2020).

El Bitouri ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada, kumun cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) atığı ile kısmi olarak ikame edilmesinin çimento harçlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. %0, %3, %5, %10 ve %15 oranda GFRP atığı içeren harçlar üzerinde basınç ve eğilme testleri gerçekleştirmişlerdir. %3' lük GFRP atığının dahil edilmesinin mekanik dayanımı önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Bununla birlikte, GFRP atık içeriğinin daha da artırılması mekanik mukavemette bir azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımına göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. %15' lik GFRP harcının eğilme mukavemetindeki düşüş sadece %37 iken, basınç mukavemeti %54 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Bitouri vd., 2024).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, malzemelerin karışım oranları, birim hacim ağırlıkları ve gerçekleştirilen deneyler anlatılmaktadır.

3.1. DeneySEL Çalışma

3.1.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1.1. Çimento

Çalışmada, CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kullanılan CEM I 2.5 R Portland Çimentosunun Özellikleri

Kimyasal Bileşim			
Bileşen	%	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	18,7	Özgöl Ağırlık g/cm ³	3,11
Al ₂ O ₃	5,48	Özgöl Yüzey cm ² /g	3319
MgO	2,6		
Fe ₂ O ₃	3,01		
Na ₂ O	0,23		
K ₂ O	1,22		
CaO	62,3		
SO ₃	3,25		

3.1.1.2. 0-4 Kırma Kum

Yapılan bu çalışmada özgül ağırlığı 2,62 ve su emme %9 olan 0-4 mm boyutunda kırma kum kullanılmıştır. 0-4 mm kırma kum Resim 3.1.'de verilmiştir.



Resim 3.1. Çalışmada kullanılan kırma kum 0-4 mm

3.1.1.3. Karbon Lif Takviyeli Polimer (CFRP) Atık

Çalışmada kullanılan karbon lifler, eğilme altında test edilen sargılı ahşap kirişlerden karbon elyaf kumaşın belirli ölçülerde makas yardımıyla kesilip kırılmasıyla elde edilmiştir. Karbon lifin elde edilmesi ve kırıntı hali Resim 3.2.' de verilmiştir. Karbon lifin özellikleri ise Tablo 3.2.' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Çalışmada Kullanılan Karbon Lifin Özellikleri

Özellikler	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
Lif Tipi	Karbon
Lif Rijitliği (GPa)	230
Lif Dayanımı (Mpa)	3900
Alan Ağırlığı (gr/m ²)	300
Elyaf Kalınlığı (mm)	0,166
Stil	Örgülü UD



(a)

(b)

Resim 3.2. Çalışmada kullanılan karbon lif takviyeli polimer atık

3.1.1.4. Cam Lif Takviyeli Polimer (GFRP) Atık

Çalışmada kullanılan cam lifler, eğilme altında test edilen sargılı ahşap kirişlerden cam elyaf kumaşın belirli ölçülerde makas yardımıyla kesilip kırılmasıyla elde edilmiştir. Cam lifin elde edilmesi ve kırıntı hali Resim 3.3.' de verilmiştir. Cam lifin özellikleri ise Tablo 3.3.' de verilmiştir.

Tablo 3.3. Çalışmada Kullanılan Cam Lifin Özellikleri

Özellikler	Cam Fiber Takviyeli Polimer
Lif Tipi	Cam
Lif Rijitliği (GPa)	190
Lif Dayanımı (MPa)	2300
Alan Ağırlığı (gr/m ²)	260 (gr/m ²)
Elyaf Kalınlığı (mm)	0,172 mm
Stil	Örgülü UD



Resim 3.3. Çalışmada kullanılan cam lif takviyeli polimer atık

3.1.1.5. Aramid Lif Takviyeli Polimer (AFRP) Atık

Çalışmada kullanılan aramid lifler, eğilme altında test edilen sargılı ahşap kirişlerden aramid elyaf kumaşın belirli ölçülerde makas yardımıyla kesilip kırılmasıyla elde edilmiştir. Aramid lifin özellikleri ise Tablo 3.4.' te verilmiştir.

Tablo 3.4. Çalışmada Kullanılan Aramid Lifin Özellikleri

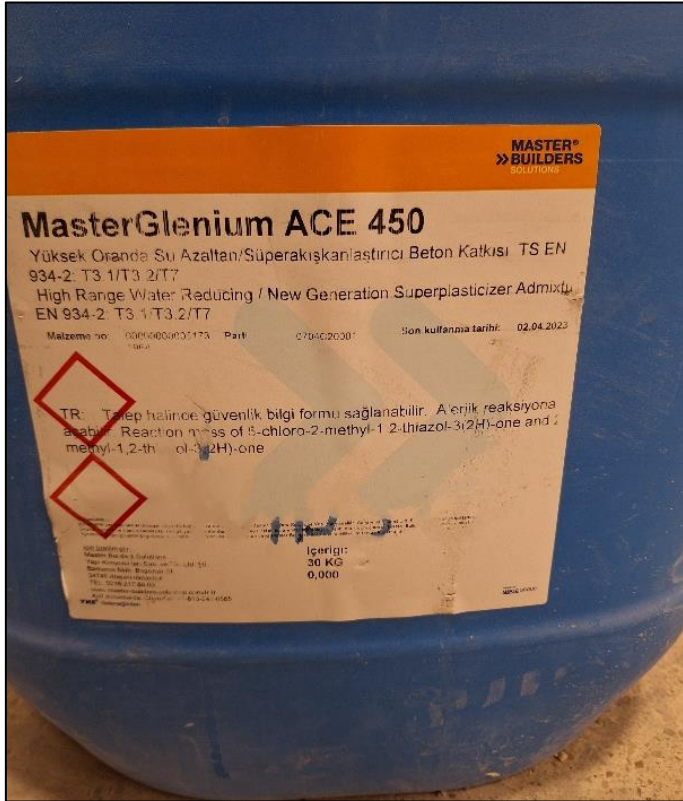
Özellikler	Aramid Fiber Takviyeli Polimer
Fiber Tipi	Aramid fiber
Fiber Doğrultusu	90° (çift yönlü)
En (m)	1 m
Boy	25 m
Ağırlığı (gr/m²)	360 gr/m ²
Dokuma Kalınlığı	0,40 mm
Çekme Kopma Sınırı (MPa)	4200-5400 MPa
Kopma Uzaması (%)	0,042

3.1.1.6. Karışım Suyu

Bu çalışma kapsamında karışım suyu olarak Yozgat şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1.7. Akışkanlaştırıcı

Taze harçların karıştırma esnasında işlenebilirliğini artırmak için Master Glenium ACE 450 tipi süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır. Resim 3.4'te verilmiştir.



Resim 3.4. Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcı

3.1.2. Karışım Oranları ve Üretim Aşaması

Harçların üretiminde standart harç karışım miktarları referans alınmıştır. Karışımlarda 0,40 ve 0,55 olmak üzere 2 farklı S/Ç oranı kullanılmıştır. Ahşap kirişlerde güçlendirme malzemesi olarak epoksi ile birlikte kullanılmış olan karbon, cam ve aramid sargı kumaşları 1-1.5 cm uzunluğunda kesilerek 0.3, 0.6 ve 0.9 oranlarda karışımlara takviye edilmiştir. Toplamda 20 grup olmak üzere toplam 180 numune elde edilmiştir. Her grup 9 numuneden oluşmaktadır. Karışım miktarları Tablo 3.5.' de verilmiştir.

Tablo 3.5. Numune Karışım Miktarı

Numune No	S/Ç	Lif Tipi	Lif Takviyeli Polimer Atık %	Çimento (kg)	0-4 mm Kırma Kum (kg)	Katkı (kg)	Lif (kg)	Su (kg)
M1	0,55	Referans	0	350	1724	3,5	0	193
M2		Karbon	0,3	350	1732	3,5	5,3	193
M3			0,6	350	1739	3,5	10,5	193
M4			0,9	350	1747	3,5	15,8	193
M5		Cam	0,3	350	1729	3,5	3,8	193
M6			0,6	350	1735	3,5	7,5	193
M7			0,9	350	1740	3,5	11,3	193
M8		Aramid	0,3	350	1730	3,5	4,4	193
M9			0,6	350	1736	3,5	8,7	193
M10			0,9	350	1743	3,5	13,1	193
M11	0,40	Referans	0	450	1672	4,5	0	180
M12		Karbon	0,3	450	1679	4,5	5,3	180
M13			0,6	450	1687	4,5	10,5	180
M14			0,9	450	1694	4,5	15,8	180
M15		Cam	0,3	450	1677	4,5	3,8	180
M16			0,6	450	1682	4,5	7,5	180
M17			0,9	450	1688	4,5	11,3	180
M18		Aramid	0,3	450	1678	4,5	4,4	180
M19			0,6	450	1684	4,5	8,7	180
M20			0,9	450	1690	4,5	13,1	180

Karışımlar hazırlanırken ilk önce çimento ve kuru kum karıştırıldı. Ardından su ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi eklendi. Daha sonra lif eklenip karıştırma işlemi tekrardan yapılarak homojen dağılımı sağlandı. Karışımların tamamı harç karıştırma makinesinde yapılmıştır. Resim 3.5.' de karıştırma makinesi ile hazırlanma anı gösterilmiştir.



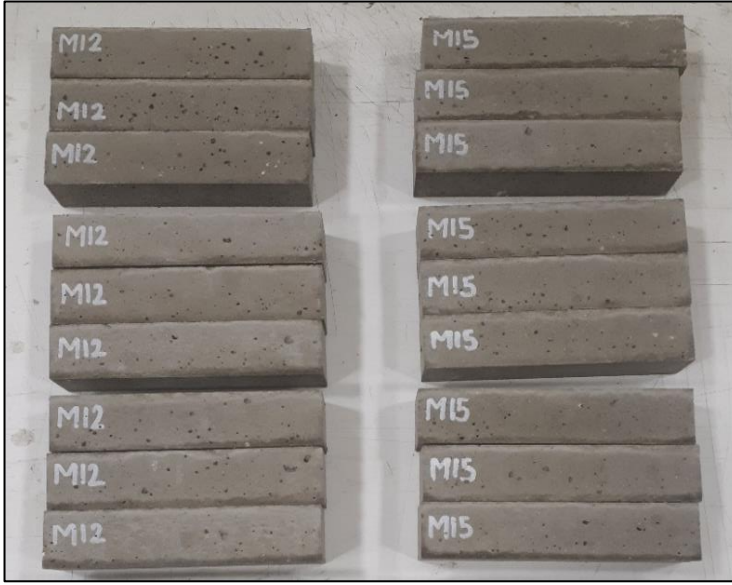
Resim 3.5. Aramid lif takviyeli polimer atık ile harcın karıştırma makinesi içindeki hali

3.1.2.1. Numunelerin Üretimi

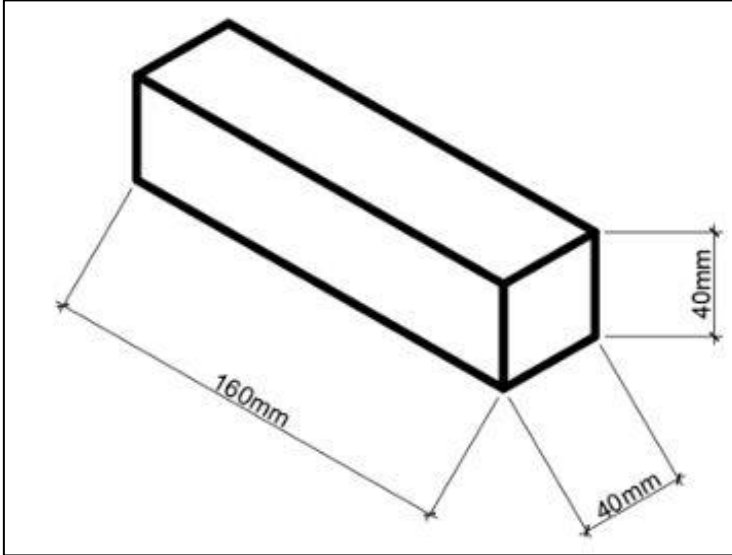
Lif oranları %0,3, %0,6 ve %0,9 olan 3 farklı atık lif kullanılmak üzere 40x40x160 mm boyutunda standart prizma numuneler Şekil 3.1.'de gösterildiği ölçüde üretilmiştir. Üretilen numuneler bir gün sonra kalıptan çıkarılmış olup 28 gün boyunca kür havuzunda bekletildi. Resim 3.6.'de bir gün kalıpta bekletilen numuneler ve Resim 3.7.'da ise 28 günlük numunelerin durumu gösterilmiştir.



Resim 3.6. Bir gün kalıpta bekletilen numuneler



Resim 3.7. 28 günlük numuneler



Şekil 3.1. Üretilen numunelerin özellikleri

3.1.3. Yapılan Deneyler

3.1.3.1. Yayılma Tablası Deneyi

Taze harçların kıvamını belirlemek amacıyla numunelerin üretimi sırasında TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiş olup Resim 3.8.'de deney aşaması gösterilmiştir. Taze harç kesik koni içerisine yerleştirildikten sonra kesik koni yavaşça yukarı doğru çekilerek çıkartılmıştır. Daha sonra yayılma tablası 15 defa serbest düşürülerek harcın yayılması sağlanmıştır ve yayılma çapları ölçülmüştür.



(a)

(b)

Resim 3.8. Yayılma tablası deney aşaması

3.1.3.2. Kuru Birim Hacim Ağırlık, Porozite ve Su Emme Deneyleri

Üretilen numunelerin 28 günlük standart kür işleminin tamamlanmasının ardından, Arşimet deneyiyle suya doymuş ağırlıkları ($M_{\text{doymuş}}$) ve 24 saat boyunca etüvde bekletilerek elde edilen etüv kuru ağırlıkları (M_{kuru}) ölçülmüştür. Numunelerin kuru birim ağırlıkları, porozite ve su emme oranları değerlerinin hesaplanmasında (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemleri kullanılmıştır. Arşimet deneyine ait fotoğraflar Resim 3.9.' da verilmiştir.

$$\text{Kuru Birim Ağırlık} = \frac{M_k}{M_{dh} - M_{ds}}, \text{ kg/m}^3 \quad (3.1)$$

$$\text{Su Emme, } \mu (\%) = \frac{M_{dh} - M_k}{M_k} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Porozite, } P (\%) = \frac{M_{dh} - M_k}{M_{dh} - M_{ds}} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada,

M_{dh} : Suya doymuş havadaki ağırlık

M_{ds} : Su içerisindeki ağırlık

M_k : Etüvden sonraki kuru ağırlık



(a)



(b)

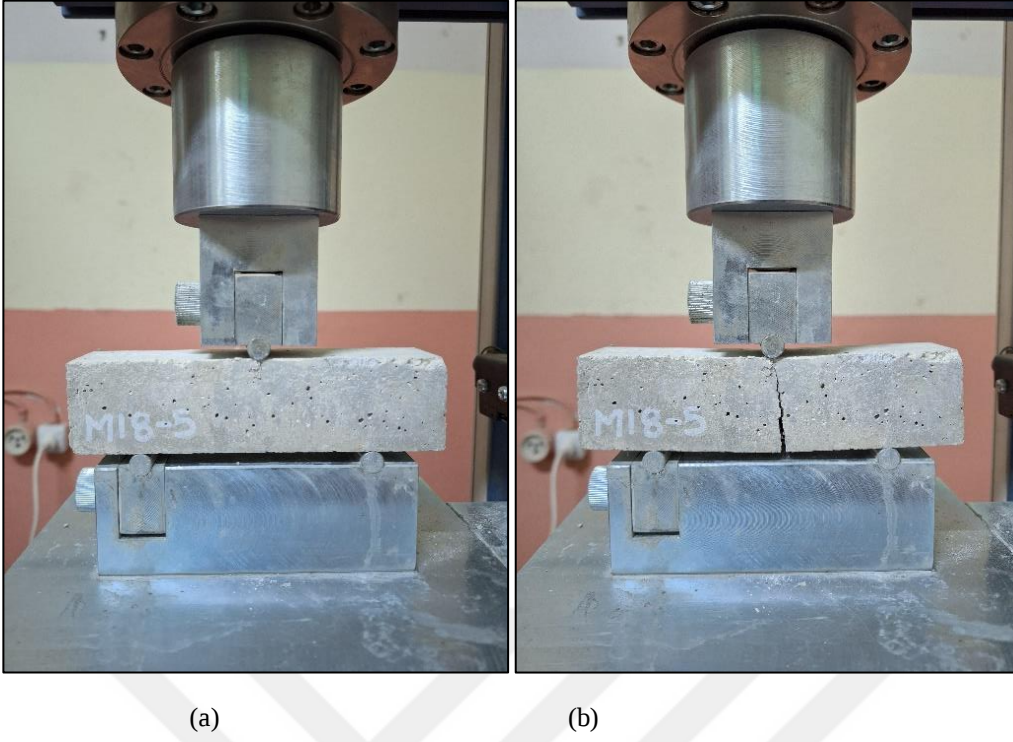
Resim 3.9. Arşimet deneyi



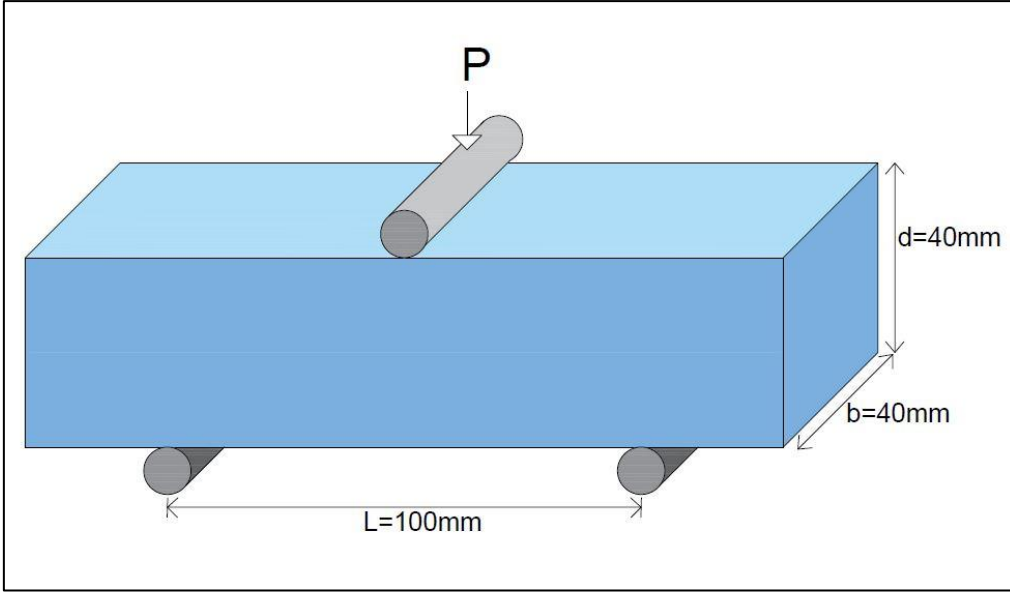
Resim 3.10. Numunelerin etüvdeki durumu

3.1.3.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Çalışma kapsamında TS EN 196-1 standardına uygun olarak, 40x40x160 mm boyutlarında üretilen numunelerin üzerinde eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyine ait fotoğraflar Resim 3.11.'de eğilme dayanımı deney düzeneği ise Şekil 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.11. Eğilme dayanımı deneyi



Şekil 3.2. Eğilme dayanımı deney düzeneği

Eğilme dayanımı deneyi, 50 N/s yükleme hızında olup 20 farklı karışım grubuna ait toplam 180 numune (her grup için 9 numune) üzerinde uygulanmıştır. Eğilme deneyi için hesaplamalarda (3.4) eşitliği kullanılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{1,5PL}{bd^2} \quad (3.4)$$

Burada;

P: Uygulanan kuvvet (N)

L: Mesnet arası uzaklık (100mm)

b: Numune kesitinin kısa kenar uzunluğu (40mm)

d: Numune kesitinin yüksekliği (40mm)

σ_e : Eğilme dayanımı, MPA

ifade etmektedir.

3.1.3.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi sonucunda numuneler yaklaşık olarak ortadan kırılarak 2 parçaya ayrılmış ve böylece 180 numuneden toplamda 360 parça elde edilmiştir. Elde edilen bu parçalar üzerinde TS EN 12390-3 standardına uygun şekilde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Resim 3.12.'de basınç dayanımı deneyine ait fotoğraflar verilmiştir. Basınç deneyinde yükleme hızı 2400 N/s seçildi. Basınç değerleri hesaplanırken (3.5) eşitliği kullanılmıştır.



Resim 3.12. Basınç dayanımı deneyi

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (3.5)$$

Burada,

P: Uygulanan kuvvet (N)

A: Kesit alanı (1600 mm²)

σ_b : Basınç dayanımı, MPA

ifade etmektedir.

3.1.3.5. Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında, TS EN 12504-4 standardına göre tüm numunelere ultrases geçiş hızı belirlenmesi deneyi uygulanmıştır. Numunelerin yüzeylerine iletken deney jeli sürülerek transdüserler numunenin boyuna paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir ve μs ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Daha sonra transdüserlerin pozisyonu değiştirilerek ikinci bir ölçüm yapılmış ve ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyine ait fotoğraflar Resim 3.13' de, ultrases geçiş hızı deney düzeneği ise Şekil 3.3.' de verilmiştir.



Resim 3.13. Ultrases geçiş hızı deneyi

Ultrases geçiş hızı; numune boyunun, kaydedilen geçiş süresine bölünmesiyle hesaplanmıştır.

$$V_s = \frac{l}{t}$$

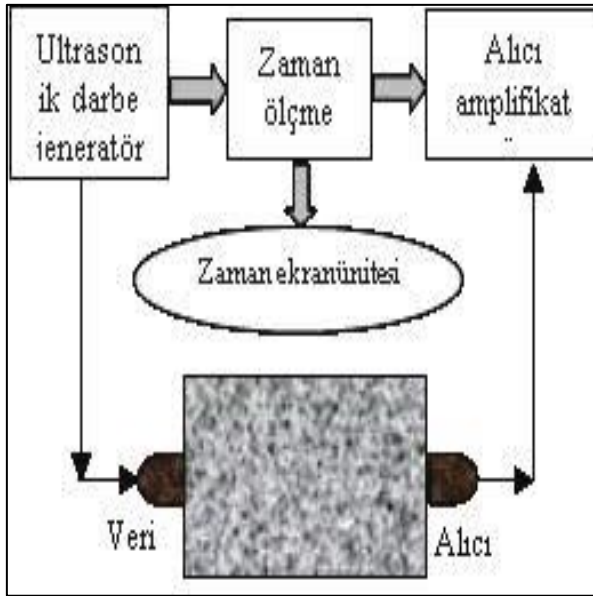
Burada,

V_s : Ultrases geçiş hızı (km/sn)

l : İki transducer arası mesafe (160 mm)

t : Ultrases geçiş süresi

ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Ultrases geçiş hızı deney düzeneği

4. BULGULAR

4.1. Yayılma Tablası

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’ de verilmiştir. Karışımlara lif takviyeli polimer atık ilave edildikçe referans numuneye göre yayılma değerlerinde azalma olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1. Yayılma Tablası ve Ortalama Taze Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Numune No	S/Ç	Lif Tipi	Lif Takviyeli Polimer Atık, %	Yayılma, (mm)	Birim Ağırlık, (kg/m ³)
M1	0,55	Referans	0	190	2456
M2		Karbon	0,3	165	2417
M3			0,6	150	2406
M4			0,9	145	2403
M5		Cam	0,3	165	2428
M6			0,6	160	2421
M7			0,9	155	2406
M8		Aramid	0,3	155	2413
M9			0,6	145	2413
M10			0,9	135	2417
M11	0,40	Referans	0	185	2463
M12		Karbon	0,3	165	2456
M13			0,6	145	2452
M14			0,9	135	2456
M15		Cam	0,3	155	2449
M16			0,6	150	2445
M17			0,9	140	2449
M18		Aramid	0,3	150	2456
M19			0,6	145	2442
M20			0,9	130	2431

4.2. Taze Birim Hacim Ağırlık

Taze harç numunelerine ait birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.1’ de verilmiştir. Su/çimento oranı arttıkça ve lif takviyeli polimer atık katılmasıyla birlikte referans

numuneye göre birim hacim ağırlıkları azaldığı gözlemlenmiştir. Çimento miktarı azalması ile birim hacim ağırlıklarının hem arttığı hem de azaldığı görülmüştür.

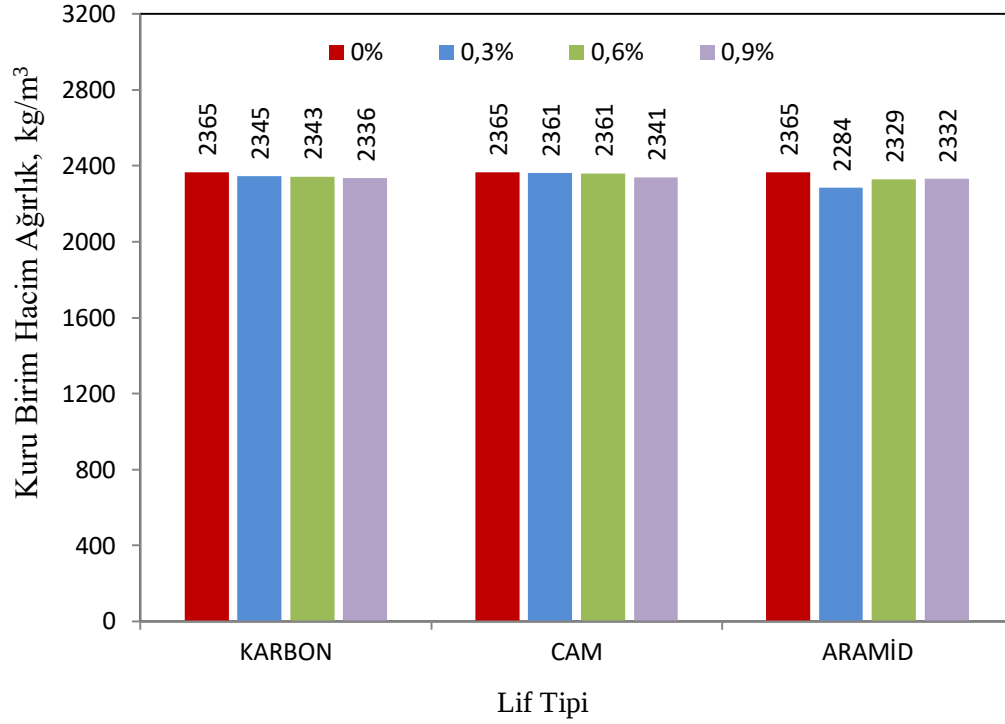
4.3. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Deney sonuçlarından elde edilen kuru birim ağırlık değerleri Tablo 4.2’ de verilmiştir.

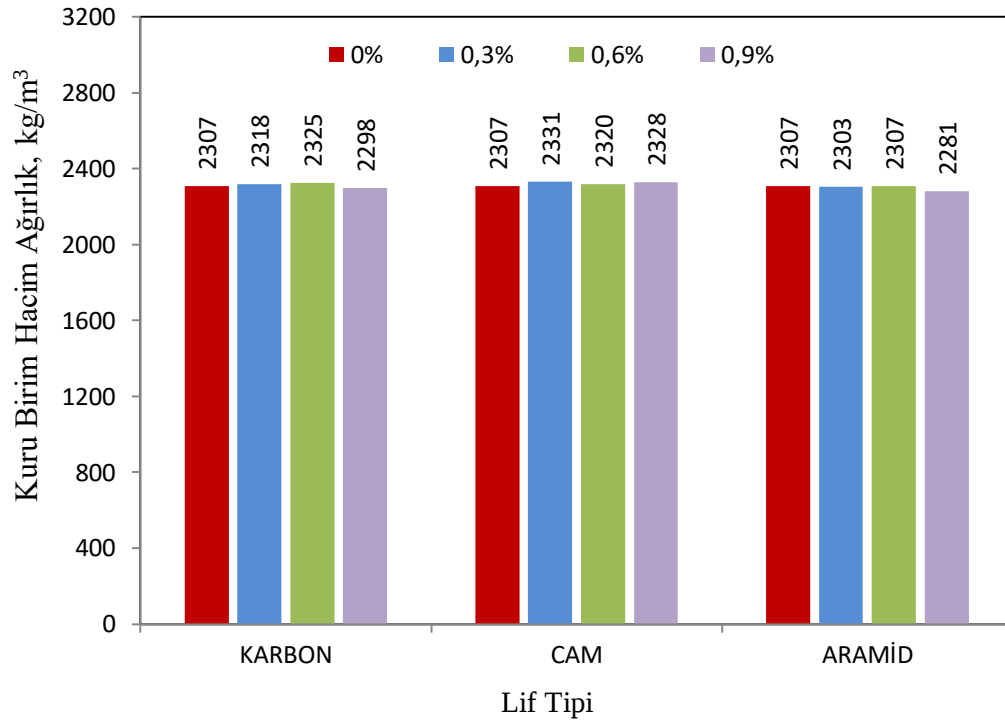
Tablo 4.2. Kuru Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Porozite Deney Sonuçları

Numune No	S/Ç	Lif Tipi	Lif Takviyeli Polimer Atık, %	Kuru Birim Ağırlık, (kg/m ³)	Su Emme, %	Porozite, %
M1	0,55	Referans	0	2307	5,16	11,9
M2		Karbon	0,3	2318	4,80	11,1
M3			0,6	2325	4,45	10,3
M4			0,9	2298	4,40	10,1
M5		Cam	0,3	2331	4,78	11,1
M6			0,6	2320	4,22	9,8
M7			0,9	2328	4,06	9,4
M8		Aramid	0,3	2303	4,82	11,1
M9			0,6	2307	4,62	10,7
M10			0,9	2281	4,47	10,2
M11	0,40	Referans	0	2365	4,43	10,5
M12		Karbon	0,3	2345	4,16	9,8
M13			0,6	2343	3,36	7,9
M14			0,9	2336	3,28	7,7
M15		Cam	0,3	2361	4,13	9,8
M16			0,6	2361	3,88	9,2
M17			0,9	2341	3,77	8,8
M18		Aramid	0,3	2284	4,28	9,8
M19			0,6	2329	3,87	9,0
M20			0,9	2332	3,62	8,4

Su/çimento oranları 0,40 ve 0,55 olan karışımlara karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer atık ilave edilmesine bağlı kuru birim hacim ağırlık değişimleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı kuru birim hacim ağırlık değişimleri



Şekil 4.2. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı kuru birim hacim ağırlık değişimleri

Sonuçlara göre kuru birim hacim ağırlığı lif takviyeli polimer atık oranlarına göre değişimleri, su/çimento oranı 0.40 olan numunelerde karbon lif takviyeli polimer atık oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda sırasıyla 2365 kg/m³, 2345 kg/m³, 2343 kg/m³ ve 2336 kg/m³; su/çimento oranı 0.55 olan numunelerde ise sırasıyla 2307 kg/m³, 2318 kg/m³, 2325 kg/m³ ve 2298 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

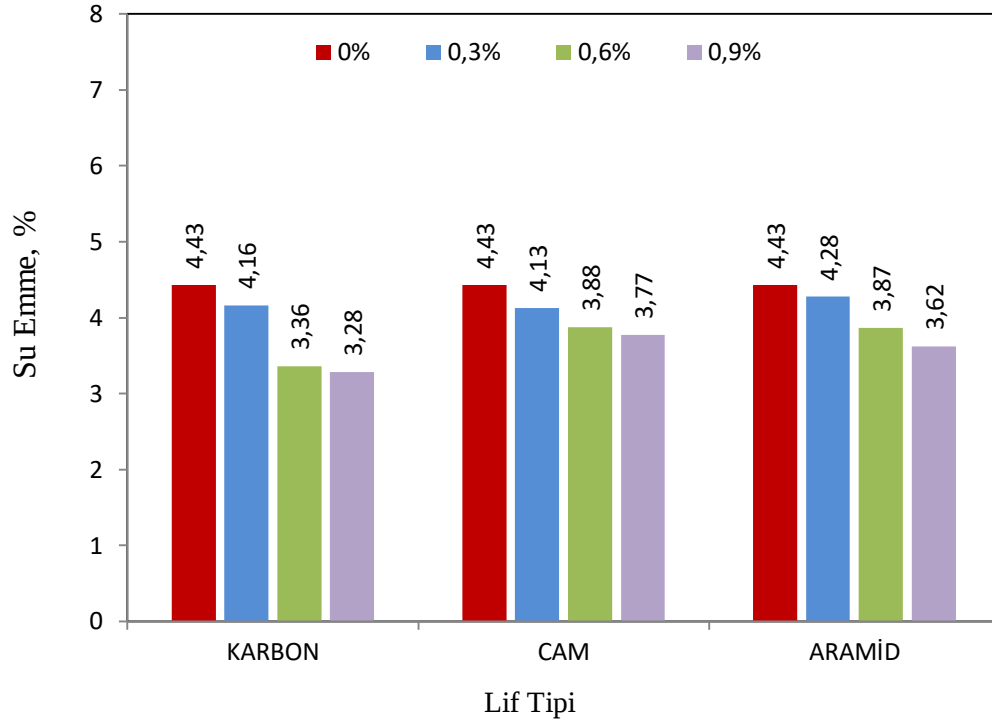
Su/çimento oranı 0.40 olan numunelerde cam lif takviyeli polimer atık oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda sırasıyla 2365 kg/m³, 2361 kg/m³, 2361 kg/m³ ve 2341 kg/m³; su/çimento oranı 0.55 olan numunelerde ise sırasıyla 2307 kg/m³, 2331 kg/m³, 2320 kg/m³ ve 2328 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

Su/çimento oranı 0.40 olan numunelerde aramid lif takviyeli polimer atık oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda sırasıyla 2365 kg/m³, 2284 kg/m³, 2329 kg/m³ ve 2332 kg/m³; su/çimento oranı 0.55 olan numunelerde ise sırasıyla 2307 kg/m³, 2303 kg/m³, 2307 kg/m³ ve 2281 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

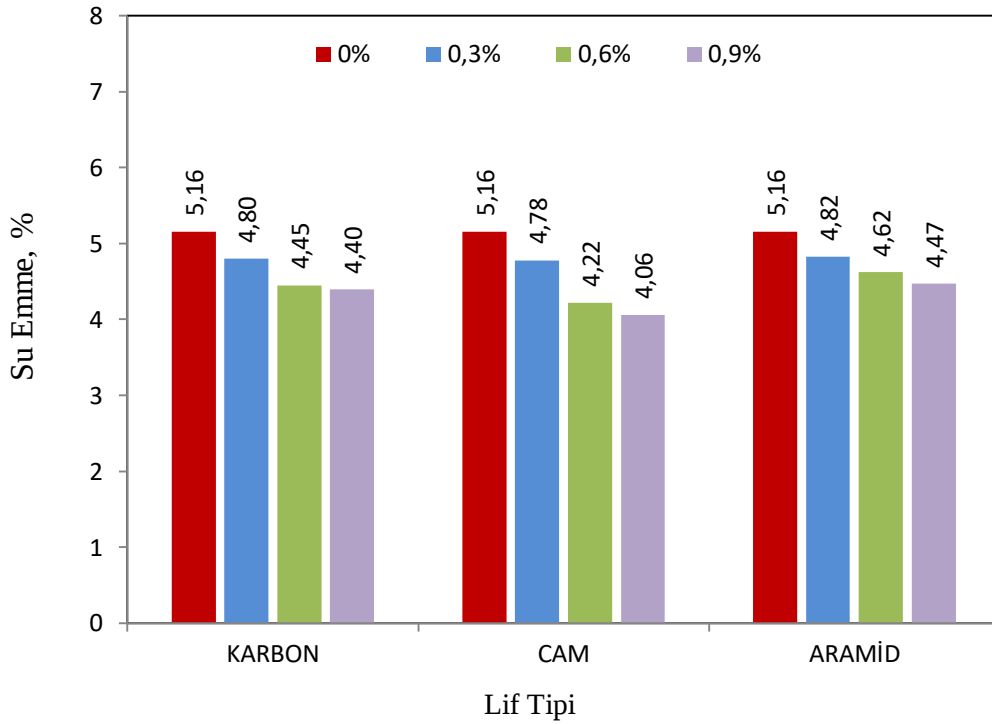
Su/çimento oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlıkları azaldığı gözlenmiştir. Karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer atık ilavesiyle kuru birim hacim ağırlıkta referans numuneye göre fazla bir değişim göstermemiştir.

4.4. Su Emme

Deneysel çalışmada elde edilen su emme değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir. Su/çimento oranları 0,40 ve 0,55 olan karışımlara karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer atık ilave edilmesine bağlı su emme değişimleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı su emme değişimleri



Şekil 4.4. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı su emme değişimleri

Deney sonuçlarına baktığımızda su/çimento oranı 0,40 olan karışımlarda karbon lif takviyeli polimer atık oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda su emme yüzdeleri sırasıyla 4.43, 4.16, 3.36 ve 3.28 olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, su/çimento oranı 0,55

olan karışımlarda ise su emme yüzdeleri sırasıyla 5.16, 4.80, 4.45 ve 4.40 olarak elde edilmiştir.

Cam lif takviyeli polimer atık ilave edilme oranlarına göre yapılan değerlendirmede, su/çimento oranı 0,40 olan karışımlarda atık oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda su emme yüzdeleri sırasıyla 4.43, 4.13, 3.88 ve 3.77; su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise su emme yüzdesi sırasıyla 5.16, 4.78, 4.22 ve 4.06 olarak elde edilmiştir.

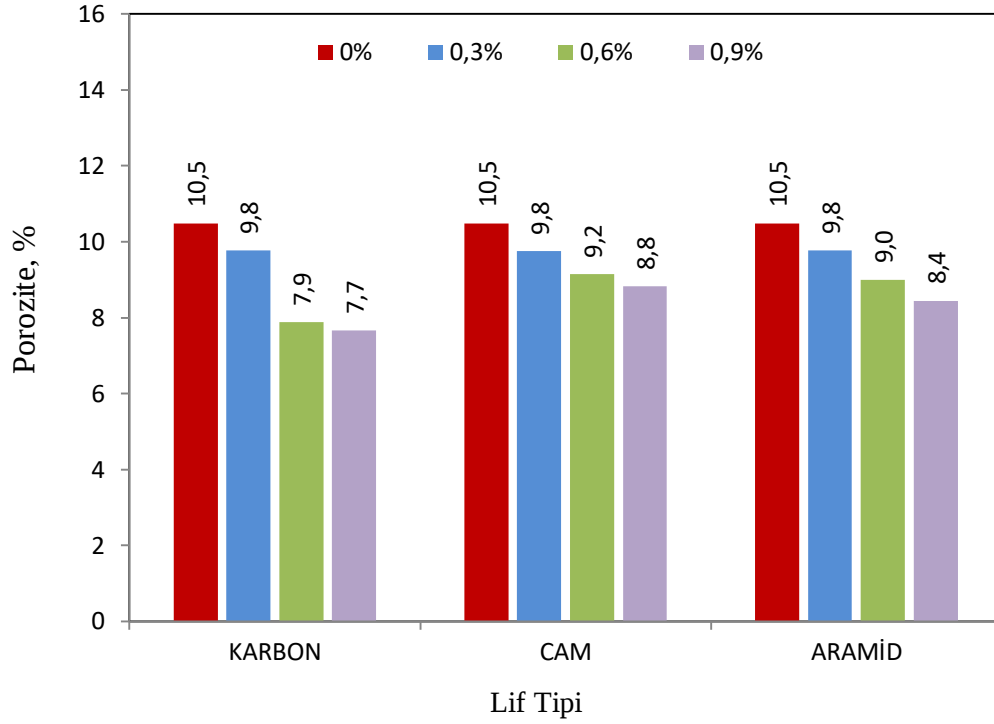
Su/çimento oranı 0,40 olan karışımlara %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında aramid lif takviyeli polimer atık lif ilave edildiğinde su emme yüzdesi sırasıyla 4.43, 4.28, 3.87 ve 3.62; su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise su emme yüzdesi sırasıyla 5.16, 4.82, 4.62 ve 4.47 olarak elde edilmiştir.

Su/çimento oranı arttıkça betondaki boşluk miktarı da arttığından dolayı su emme oranı da artış göstermiştir. Su emme miktarında, lif takviyeli polimer atık eklendikçe referans numuneye göre azalma olduğu gözlenmiştir.

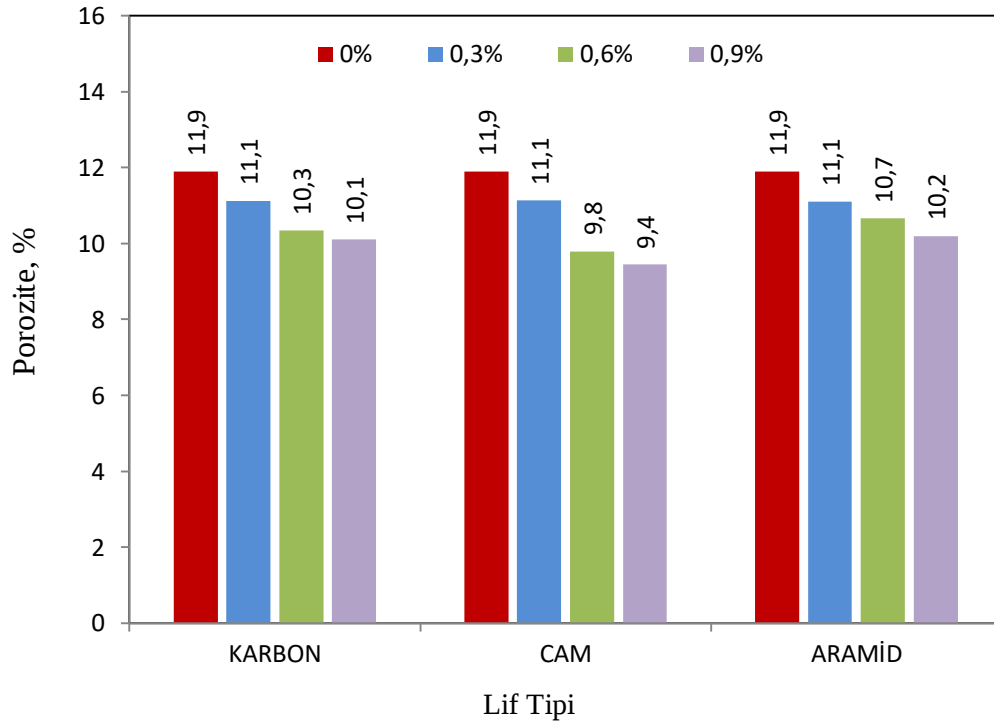
Su/çimento oranı 0,40 olan karışımda, su emme değerinde en fazla azalma %26 olarak ölçülmüş ve %0,9 oranında karbon lif takviyeli polimer atık içeren numunelerde ölçülmüştür. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda ise, su emme değerinden en fazla azalma %21,3 olarak ölçülmüş ve %0,9 oranında cam lif takviyeli polimer atık ilave edilen numunede meydana geldiği gözlenmiştir.

4.5. Porozite

Deneysel çalışmada elde edilen porozite değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir. Su/çimento oranları 0,40 ve 0,55 olan karışımlara atık olarak karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer atık liflerinin ilave edilmesine bağlı porozite değişimleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı porozite değişimleri



Şekil 4.6. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı porozite değişimleri

Deney sonuçları değerlendirildiğinde su/çimento oranı 0,40 olan karışımlara %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında karbon lif takviyeli polimer atık ilave edildiğinde porozite yüzdesi sırasıyla 10.5, 9.8, 7.9 ve 7.7 olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, su/çimento oranı

0,55 olan karışımlarda ise porozite yüzdesi sırasıyla 11.9, 11.1, 10.3 ve 10.1 olarak elde edilmiştir.

Cam lif takviyeli polimer atık oranlarına göre yapılan değerlendirmede, su/çimento oranı 0,40 olan karışımlara lif oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda porozite yüzdeleri sırasıyla 10.5, 9.8, 9.2 ve 8.8; su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise porozite yüzdesi sırasıyla 11.9, 11.1, 9.8 ve 9.4 olarak elde edilmiştir.

Su/çimento oranı 0,40 olan karışımlara %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında aramid lif takviyeli polimer atık ilavesinde ise porozite yüzdeleri sırasıyla 10.5, 9.8, 9.0 ve 8.4; su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise porozite yüzdeleri sırasıyla 11.9, 11.1, 10.7 ve 10.2 olarak elde edilmiştir.

Elde edilen verilere baktığımızda su/çimento oranı arttıkça porozite değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Karışımlara lif takviyeli polimer atık ilavesinde ise ilave ettikçe porozite değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde su/çimento oranı 0,40 olan karışımda en yüksek porozite değeri %0 (referans) lif oranı olan karışımda; en düşük porozite değeri ise karbon lif takviyeli polimer atık oranı %0,9 olan karışımda gözlenmiş ve bu azalma %26,7 olarak ölçülmüştür. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda en yüksek porozite değeri %0 (referans) lif oranı olan karışımda; en düşük porozite değeri ise cam lif takviyeli polimer atık oranı %0,9 olan karışımda gözlenmiş ve bu azalma %21 olarak ölçülmüştür.

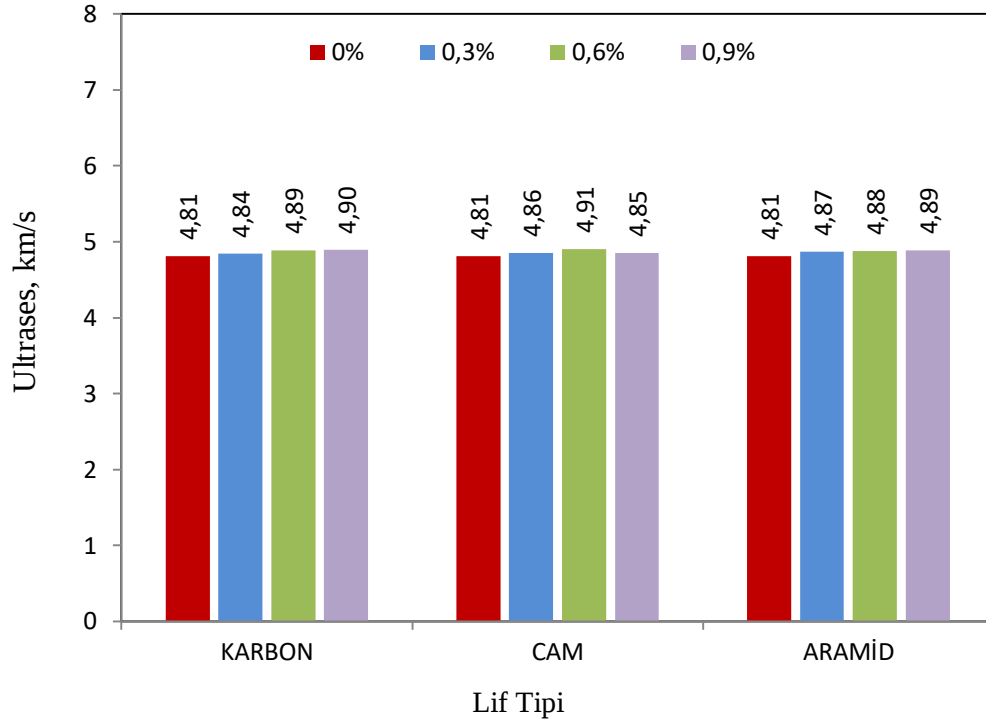
4.6. Ultrases Geçiş Hızı

Deneysel çalışmada elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4.3’ de verilmiştir.

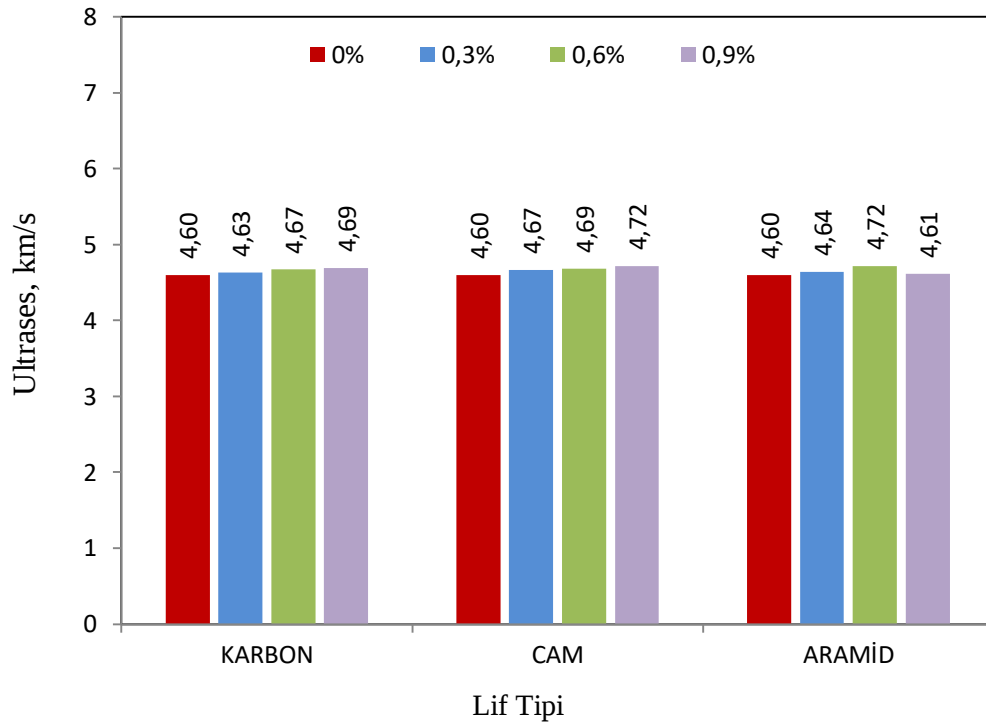
Tablo 4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Numune No	S/Ç	Lif Tipi	Lif Takviyeli Polimer Atık %	Ortalama Ultrases Geçiş Süresi, (µs)	Ortalama Ultrases Geçiş Hızı, (km/s)
M1	0,55	Referans	0	34,47	4,64
M2		Karbon	0,3	35,24	4,54
M3			0,6	34,37	4,66
M4			0,9	34,23	4,67
M5		Cam	0,3	34,28	4,67
M6			0,6	34,14	4,69
M7			0,9	33,90	4,72
M8		Aramid	0,3	34,89	4,59
M9			0,6	34,12	4,69
M10			0,9	34,81	4,60
M11	0,40	Referans	0	33,07	4,84
M12		Karbon	0,3	33,20	4,82
M13			0,6	32,74	4,89
M14			0,9	32,84	4,87
M15		Cam	0,3	33,08	4,84
M16			0,6	32,61	4,91
M17			0,9	33,23	4,81
M18		Aramid	0,3	32,98	4,85
M19			0,6	32,96	4,86
M20			0,9	32,78	4,88

Su/çimento oranları 0,40 ve 0,55 olan numunelere karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer atık ilave edilmesine bağlı ultrases geçiş hızı değişimleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı ultrases geçiş hızı değişimleri



Şekil 4.8. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı ultrases geçiş hızı değişimleri

Su/çimento oranı 0,40 olan numunelere %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında karbon lif takviyeli polimer atık ilavesinde ultrases geçiş hızı sırasıyla 4.81, 4.84, 4.89 ve 4.90 km/s; su/çimento oranı 0,55 olan numunelerde ise ultrases geçiş hızı sırasıyla 4.60, 4.63, 4.67 ve 4.69 km/s olarak elde edilmiştir.

Su/çimento oranı 0,40 olan numunelere %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında Cam lif takviyeli polimer atık ilavesinde ise ilave oranlarına göre ultrases geçiş hızı sırasıyla 4.81, 4.86, 4.91 ve 4.85 km/s; su/çimento oranı 0,55 olan numunelerde ise ultrases geçiş hızı sırasıyla 4.60, 4.67, 4.69 ve 4.72 km/s olarak elde edilmiştir.

Su/çimento oranı 0,40 olan numunelere %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında aramid lif takviyeli polimer atık ilave edildiğinde ultrases geçiş hızı sırasıyla 4.81, 4.87, 4.88 ve 4.89 km/s; su/çimento oranı 0,55 olan numunelerde ise ultrases geçiş hızı sırasıyla 4.60, 4.64, 4.72 ve 4.61 km/s olarak elde edilmiştir.

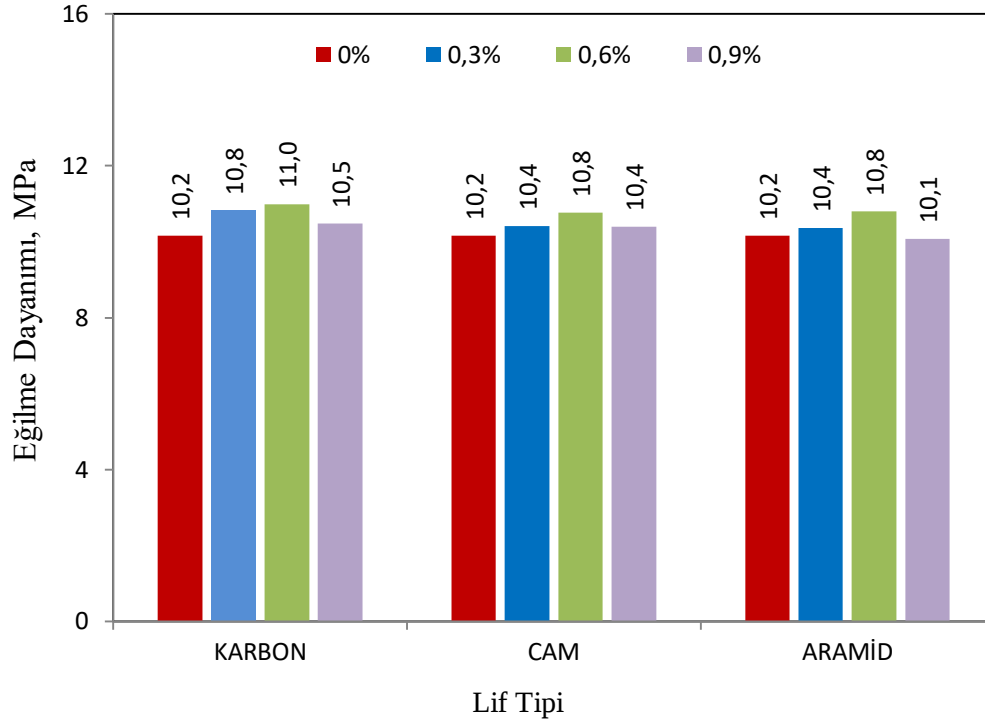
Aynı su/çimento oranları içinde değerlendirilecek olursa su/çimento oranı 0,40 olan karışımda en yüksek ultrases geçiş hızı değeri cam lif takviyeli polimer atık oranı %0,6 olan karışımda; en düşük ultrases geçiş hızı değeri ise referans karışımda gözlenmiştir. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda en yüksek ultrases geçiş hızı değeri cam lif takviyeli polimer atık oranı %0,9 olan karışımda; en düşük ultrases geçiş hızı değeri ise referans karışımda gözlenmiştir. Aynı lif türü ve oranına sahip karışımlar incelendiğinde su/çimento oranı arttıkça porozitenin artması sonucunda ultrases geçiş hızında azalma olduğu gözlenmiştir. Ancak karışımlara lif takviyeli polimer atık ilave edilmesiyle referans numuneye göre ultrases geçiş hızlarında artma olduğu görülmüştür.

4.7. Eğilme Dayanımı

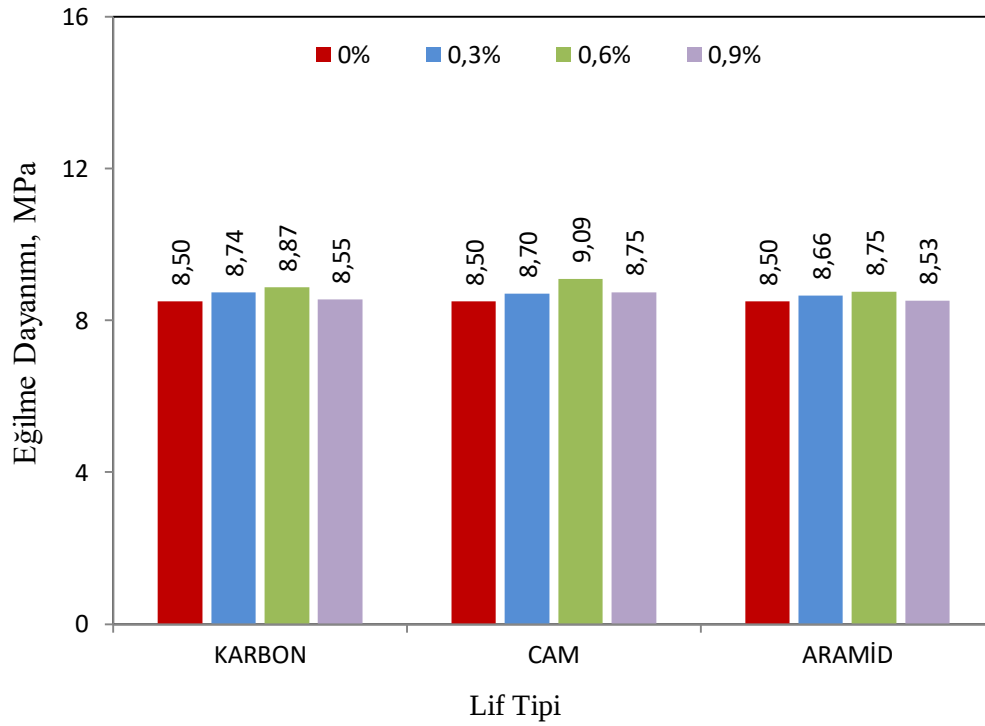
Numunelerin eğilme dayanımlarının deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.4' te verilmiştir. Su/çimento oranları 0,40 ve 0,55 olan karışımlara karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer atık ilave edilmesine bağlı eğilme dayanımı değişimleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Numune No	S/Ç	Lif Tipi	Lif Takviyeli Polimer Atık %	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
M1	0,55	Referans	0	8,50	45,9
M2		Karbon	0,3	8,74	49,4
M3			0,6	8,87	52,1
M4			0,9	8,55	49,9
M5		Cam	0,3	8,70	51,1
M6			0,6	9,09	53,0
M7			0,9	8,75	50,2
M8		Aramid	0,3	8,66	47,4
M9			0,6	8,75	50,2
M10			0,9	8,53	49,9
M11	0,40	Referans	0	10,2	60,6
M12		Karbon	0,3	10,8	64,5
M13			0,6	11,0	67,7
M14			0,9	10,5	66,7
M15		Cam	0,3	10,4	63,3
M16			0,6	10,8	67,0
M17			0,9	10,4	63,7
M18		Aramid	0,3	10,4	61,6
M19			0,6	10,8	62,6
M20			0,9	10,1	62,3



Şekil 4.9. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı eğilme dayanımı değişimleri



Şekil 4.10. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı eğilme dayanımı değişimleri

Grafiklerin incelenmesi sonucunda, su/çimento oranı 0.40 olan karışımlara %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında karbon lif takviyeli polimer atık ilave edildiğinde, numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla 10.2 MPa, 10.8 MPa, 11.0 MPa ve 10.5 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise eğilme dayanımları sırasıyla 8.50 MPa, 8.74 MPa, 8.87 MPa ve 8.55 MPa olarak elde edilmiştir.

Cam lif takviyeli polimer atık ilave edilme oranlarına göre yapılan değerlendirmede, su/çimento oranı 0.40 olan karışımlarda lif oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda eğilme dayanımları sırasıyla 10.2 MPa, 10.4 MPa, 10.8 MPa ve 10.4 MPa olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde, su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise eğilme dayanımları sırasıyla 8.50 MPa, 8.70 MPa, 9.09 MPa ve 8.75 MPa olarak elde edilmiştir.

Aramid lif takviyeli polimer atık ilave edilme oranlarına baktığımızda su/çimento oranı 0.40 olan karışımlarda lif oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda eğilme dayanımları sırasıyla 10.2 MPa, 10.4 MPa, 10.8 MPa ve 10.1 MPa; su/çimento oranı 0,55 olan karışımlarda ise eğilme dayanımları sırasıyla 8.50 MPa, 8.66 MPa, 8.75 MPa ve 8.53 MPa olarak elde edilmiştir.

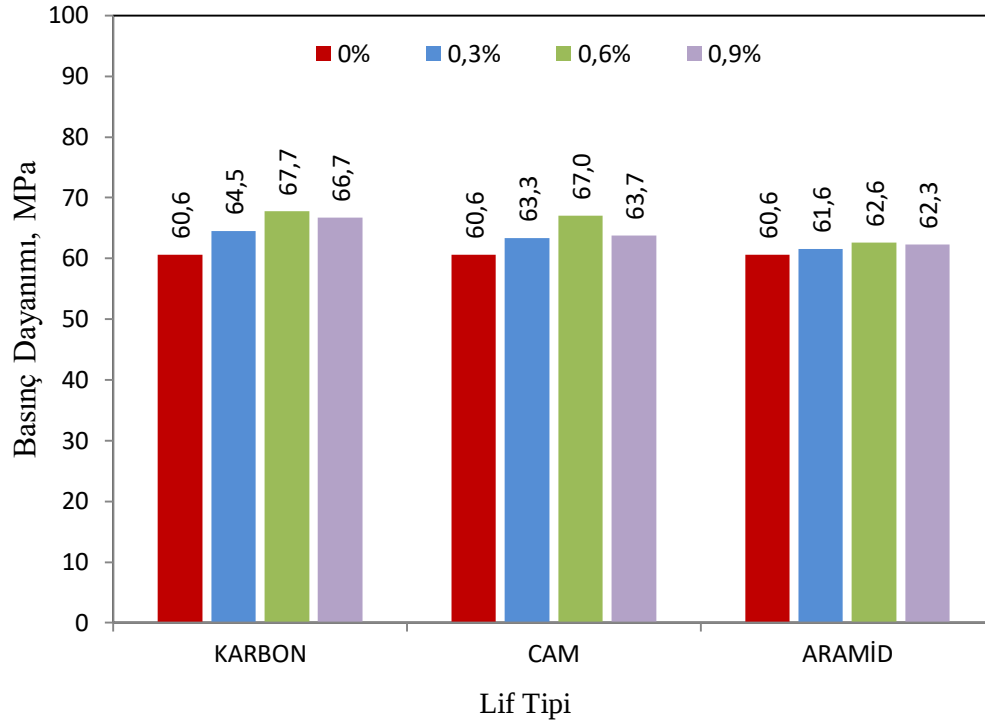
Su/çimento oranı arttıkça eğilme dayanımlarında azalma olduğu görülmüştür. Karışımlara lif takviyeli polimer atık ilave edilmesi sonucunda eğilme dayanımlarında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Karışıma lif takviyeli polimer atık ilavesi, belirli bir orana kadar eğilme dayanımında düzgün artış sağlamıştır. Özellikle %0,6 oranında lif takviyeli polimer atık eklenen numunelerde en yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Ancak bu oranın üzerinde yapılan lif takviyelerinde eğilme dayanımında azalma eğilimi gözlenmiştir.

Aynı su/çimento oranları içerisinde değerlendirilecek olursa, su/çimento oranı 0,40 olan karışımda eğilme dayanımında en yüksek artış %7,8 olarak ölçülmüş ve bu artış %0,6 oranında karbon lif takviyeli polimer atık ilave edilen numunede gözlenmiştir. Aynı şekilde su/çimento oranı 0,55 olan karışımda ise en yüksek eğilme dayanımı artışı %6,9 olarak ölçülmüş ve bu artışın %0,6 oranında cam lif takviyeli polimer atık ilave edilen numunede meydana geldiği gözlenmiştir.

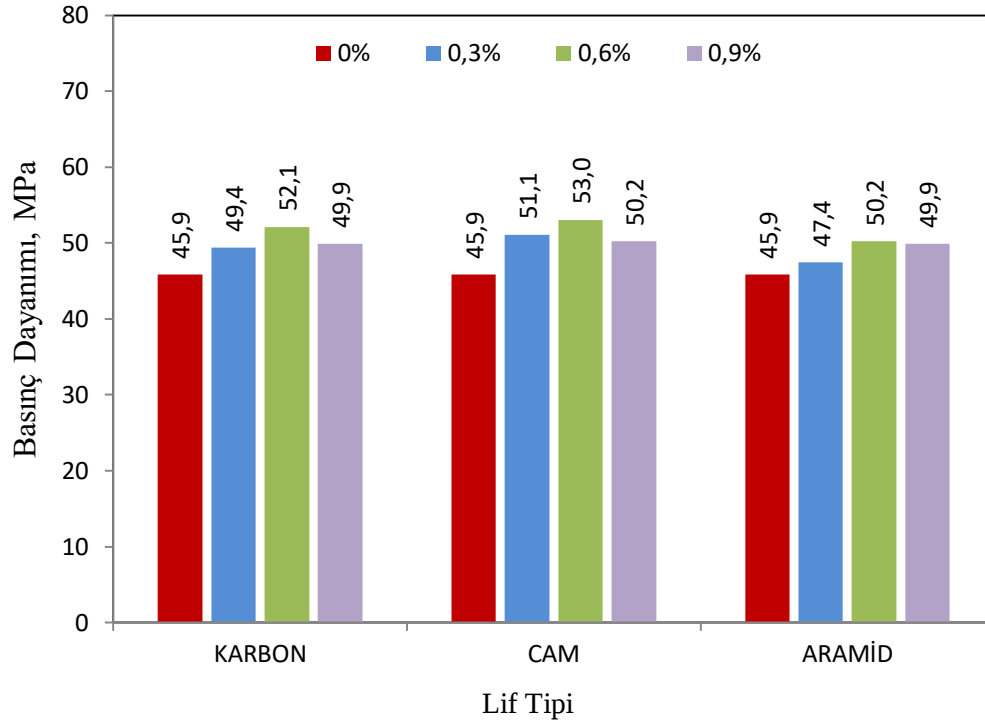
4.8. Basınç Dayanımı

Numuneler üzerinde üç noktalı eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi sonrasında her bir numuneden elde edilen iki parçaya basınç dayanımı deneyi uygulanmış, elde edilen değerlerin ortalamaları hesaplanarak Tablo 4.4' te verilmiştir. Su/çimento oranları 0,40 ve 0,55 olan numunelere karbon, cam ve aramid lif takviyeli

polimer atık ilave edilmesine bağlı basınç dayanımı değişimleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’ de verilmiştir.



Şekil 4.11. S/Ç oranı 0,40 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.12. S/Ç oranı 0,55 olan numunelerin lif takviyeli polimer atık lif tipine bağlı basınç dayanımı değişimleri

Grafikler incelendiğinde elde edilen basınç dayanımları karbon lif takviyeli polimer atık oranlarına göre değişimleri, su/çimento oranı 0.40 olan numunelerde karbon lif oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda sırasıyla 60.6 MPa, 64.5 MPa, 67.7 MPa, 66.7 MPa; su/çimento oranı 0,55 olan numunelerde ise sırasıyla 45.9 MPa, 49.4 MPa, 52.1 MPa ve 49.9 MPa olarak elde edilmiştir.

Cam lif takviyeli polimer atık oranlarına göre değişimleri, su/çimento oranı 0.40 olan numunelerde atık cam lif oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda sırasıyla 60.6 MPa, 63.3 MPa, 67.0 MPa ve 63.7 MPa; su/çimento oranı 0,55 olan numunelerde ise sırasıyla 45.9 MPa, 51.1 MPa, 53.0 MPa ve 50.2 MPa olarak elde edilmiştir.

Aramid lif takviyeli polimer atık oranlarına göre değişimleri, su/çimento oranı 0.40 olan numunelerde atık aramid lif oranları %0, %0.3, %0.6 ve %0.9 olduğunda sırasıyla 60.6 MPa, 61.6 MPa, 62.6 MPa ve 62.3 MPa; su/çimento oranı 0,55 olan numunelerde ise sırasıyla 45.9 MPa, 47.4 MPa, 50.2 MPa ve 49.9 MPa olarak elde edilmiştir.

Karışıma lif takviyeli polimer atık ilavesi, belirli bir orana kadar basınç dayanımında düzgün artış sağlamıştır. Özellikle %0,6 oranında lif takviyeli polimer atık eklenen numunelerde en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ancak bu oranın üzerinde yapılan lif takviyelerinde basınç dayanımında azalma eğilimi gözlenmiştir.

Su/çimento oranı 0,40 olan karışımda, basınç dayanımındaki en yüksek artış %11,7 olarak ölçülmüş ve bu artış, %0,6 oranında karbon lif takviyeli polimer atık ilave edilen numunede gözlenmiştir. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda ise, basınç dayanımındaki en yüksek artış %15,5 olarak ölçülmüş ve bu artışın, %0,6 oranında acam lif takviyeli polimer atık ilave edilen numunede meydana geldiği gözlenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

İnşaat sektöründe lifli polimer kumaşlar, yüksek mukavemet, hafiflik ve korozyona dayanıklılık gibi avantajlarıyla yapı elemanlarında güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sargı malzemeleri kullanım ömrü sona erdiğinde atık olarak uygun şekilde değerlendirilmesi ekonomi ve sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu çalışmada ahşap kirişlerde epoksi ile sargı malzemesi olarak uygulanmış olan lifli polimer malzemenin herhangi bir işlem görmeden atık malzeme olarak doğrudan çimento esaslı harçlara %0, %0.3, %0.6, %0.9 oranlarında ilave edilerek 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kuru birim hacim ağırlık, su emme, porozite ve ultrases geçiş hızı özelliklerinin değerlendirilmesi ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Taze birim hacim ağırlık değeri, iki farklı su/çimento oranları içinde en yüksek değer referans numunelerde gözlenmiştir. Su/çimento oranı 0,40 olan karışımda ise en yüksek değer 753 kg/m^3 , en düşük değer 744 kg/m^3 ; su/çimento oranı 0,55 olan karışımda en yüksek değer 751 kg/m^3 , en düşük değer ise 737 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Harçlara lif takviyeli polimer atık katılmasıyla birlikte birim hacim ağırlıklarında %0,3-2 aralığında azalma olduğu görülmüştür. Su/çimento oranı arttıkça birim hacim ağırlıklarında azalma olmuştur.
- Kuru birim hacim ağırlık lif takviyeli polimer atık eklenmesiyle birlikte referans numuneye göre fazla bir değişim göstermediği gözlenmiştir. Su/çimento oranı 0,40 olan karışımda en düşük değer %0,3 oranında aramid lifli polimer atık kullanımında görülmüştür. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda en düşük değer %0,9 oranında aramid lifli polimer atık kullanımında görülmüştür. Su/çimento oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlıkları azaldığı gözlenmiştir.
- Su/çimento oranındaki artış, betonun iç yapısında daha fazla boşluk oluşmasına neden olarak su emme oranını da artırmıştır. Karışımlara lifli polimer atık ilave edilmesi, su/çimento oranından bağımsız olarak tüm numunelerde su emme değerinde bir azalma olduğu görülmüştür. Su emme yüzdesinde en yüksek değerler referans numunelerde gözlenmiştir. Lifli polimer atık ilavesiyle birlikte su emme değerlerinde azalma olmuştur. Karışıma lifli polimer atık eklenmesiyle birlikte su/çimento oranının 0,40 olması durumunda %3,4-26 arasında, Su/çimento oranının 0,55 olması durumunda %6,6-21,3 arasında azalma görülmüştür.
- Porozite yüzdesinde, karışımlara lifli polimer atık ilave edilmesiyle referans numuneye

göre azalış gözlemlenmiştir. Su/çimento oranı arttıkça porozite değerlerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir. Su/çimento oranı 0,40 olan karışımda en düşük porozite değeri ise karbon lifli polimer atık ilave oranı %0,9 olan karışımda gözlenmiş ve bu azalma %26,7 olarak ölçülmüştür. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda ise en düşük porozite değeri ise cam lifli polimer atık ilave oranı %0,9 olan karışımda gözlenmiş ve bu azalma %21 olarak ölçülmüştür.

- Ultrases geçiş hızı lif takviyeli polimer atık ilavesiyle birlikte referans numuneye kıyasla arttığı görülmüştür. Su/çimento oranı 0,40 olan karışımda ise en yüksek ultrases geçiş hızı değeri cam lifli polimer atık ilave %0,6 olan karışımda 4,91 km/s; en düşük ultrases geçiş hızı değeri ise referans karışımda 4,81 km/s olarak gözlenmiştir. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda en yüksek ultrases geçiş hızı değeri cam lifli polimer atık ilave atık oranı %0,9 olan karışımda 4,72 km/s; en düşük ultrases geçiş hızı değeri ise referans karışımda 4,60 km/s olarak gözlenmiştir.

- Eğilme dayanımı, su/çimento oranı 0,40 olan karışımda en yüksek değere %0,6 karbon lifli polimer atık oranında ulaşmış ve bu değer, referans numuneye kıyasla %7,8 oranında bir artma göstermiştir. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda ise en yüksek değere %0,6 cam lifli polimer atık ilave oranında ulaşmış ve bu değer, referans numuneye göre %6,9 oranında artma göstermiştir. Su/çimento oranı arttıkça eğilme dayanımı azaldığı gözlenmiştir. Lif takviyeli polimer atık eklenmesiyle birlikte iki farklı su/çimento oranı için de eğilme dayanımlarının belirli bir orana kadar arttığı görülmektedir. Özellikle %0,6 oranında lifli polimer atık ilave eklenen numunelerde en yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Ancak bu oranın üzerinde yapılan lif takviyelerinde eğilme dayanımında azalma eğilimi gözlenmiştir.

- Lifli polimer atık takviyesiyle birlikte su/çimento oranı 0,40 olan karışımda basınç dayanımında %1,7-11,7 arasında arttığı ve en yüksek artmanın %0,6 oranında kullanılan karbon lifli polimer atık ilave türünde olduğu tespit edilmiştir. Su/çimento oranı 0,55 olan karışımda ise bu artma %3,3-15,5 arasında olduğu ve en yüksek artmanın %0,6 oranında kullanılan cam lifli polimer atık ilave türünde gözlemlenmiştir. Su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımında azalma olmuştur. Karışıma lif takviyeli polimer atık ilavesi, belirli bir orana kadar basınç dayanımında düzgün artış sağlamıştır. Özellikle %0,6 oranında lifli polimer atık eklenen numunelerde en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ancak bu oranın üzerinde yapılan lif takviyelerinde basınç dayanımında azalma eğilimi gözlenmiştir.

Elde edilen verilere göre, su/imento oranının artmasıyla birlikte betondaki boşluk oranının artması sonucunda betonun iç yapısında daha fazla gözenek oluşmasına yol açarak malzemenin porozitesini ve su emme kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, betonun daha geçirgen hale gelmesine ve dayanıklılığının azalmasına neden olmuştur.

Su/imento oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlığında bir azalma meydana getirmiştir. Bu durum betonun yoğunluğunun azaldığını göstermiştir. Aynı şekilde, ultrases geçiş hızı değerlerinde düşüş gözlenmiş, bu da betonun iç yapısındaki süreksizliklerin arttığını ve malzeme bütünlüğünün zayıfladığını göstermektedir.

Mekanik performans açısından değerlendirildiğinde ise, karışımlara lifli polimer atık eklenmesiyle birlikte su/imento oranına bakılmaksızın eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiştir. Sonuç olarak, su/imento oranının artması betonun hem dayanıklılığı hem de yapısal bütünlüğü üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. lifli polimer atık ilave takviyesiyle bu olumsuzluğun giderilebilir olduğu anlaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Akbar, A., Kodur, V. K. R. and Liew, K. M. (2021). Microstructural changes and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104069.
- Ali, A.M., Arslan, M.H. ve Altın, M. (2019). Cam lif takviyeli betonun yangın dayanımlarının çeşitli parametreler açısından irdelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 198-213.
- Alshammari, B. A., Alsuhybani, M. S., Almushaikh, A. M., Alotaibi, B. M., Alenad, A. M., Alqahtani, N. B. and Alharbi, A. G. (2021). Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymers*, 13(15), 2474.
- Baoguo, H., Liqing, Z., Chenyu, Z., Yunyang, W., Xun, Y. and Jinping, O. (2016). Reinforcement effect and mechanism of carbon fibers to mechanical and electrically conductive properties of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 125, 479-489.
- Baricevic, A., Didulica, K., Francic Smrkic, M. and Jelcic Rukavina, M. (2022). Cementitious composites reinforced with waste fibres from the production of high-quality construction textiles. *Materials*, 15(4), 1611.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. CRC Press.
- Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F. and DeWitt, D. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Brondsted, P., Lilholt, H. and Lystrup, A. (2005). Composite materials for wind power turbine blades. *Annual Review of Materials Research*, 35, 505-538.
- Bunsell, A. R. (2011). *Handbook of Tensile Properties of Textile and Technical Fibres*. Woodhead Publishing.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2011). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.

- Chang, W., Ke-Zhi, L., He-Jun, L., Geng-Sheng, J., Jinhua L. and Dang-She, H. (2018). Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber reinforced cement based composites. *Materials Science and Engineering*, 487(1-2), 52-57.
- Chattopadhyay, S. and Majumdar, A. (2013). Aramid fibers: A review of their properties and applications. *Journal of Industrial Textiles*, 42(3), 329-354.
- Clark, E., Bleszynski, M., Valdez, F. and Kumosa, M. (2020). Recycling carbon and glass fiber polymer matrix composite waste into cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104659.
- Çelik K.V. ve Karaşin H. (2014). Karbon elyaf ile betonun güçlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(1), 1-11.
- Donnet, J. B., & Bansal, R. C. (1998). *Carbon Fibers*. CRC Press.
- Dündar, B., Çınar, E. ve Peşin, S. (2020). Bazalt ve karbon lif takviyeli betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 1039-1048.
- Edie, D. D. (1998). The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers. *Carbon*, 36(4), 345-362.
- El Bitouri, Y., Fofana, B., Léger, R., Perrin, D. and Ienny, P. (2024). The effects of replacing sand with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) waste on the mechanical properties of cement mortars. *Eng*, 5(1), 266-281.
- Farinha, C. B., de Brito, J. and Veiga, R. (2019). Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1579-1594.
- Fenu, L., Forni, D. and Cadoni E. (2016). Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B*, (92), 142-150.
- Fitzer, M. (1989). PAN-based carbon fibers – Present state and trend of the technology from the viewpoint of possibilities and limits to influence the fiber properties by the process parameters. *Carbon*, 27(5), 621-645.
- Fried, J. R. (2014). *Polymer Science and Technology*. Pearson.

- Garces, P., Fraile, J., Vilaplana-Ortego, E., Cazorla-Amoros, D., Alcocel, E. G. and Andion, L. G. (2005). Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 324-331.
- Gibson, R. F. (2010). *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC press.
- Greene, E. (1999). *Marine Composites*. Eric Greene Associates.
- Gupta, A. and Kaur, P. (2019). Ballistic performance of aramid fibers: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 3479-3494.
- Harris, B. (1999). *Engineering Composite Material*. IOM Communications.
- Hearle, J. W. S. (2001). *High-Performance Fibres*. Woodhead Publishing.
- Hegde, S., Ishikawa, T., & Sampe, F. (2004). Development of high-strength glass fibers for aerospace applications. *Composite Science and Technology*, 64(15), 2273-2284.
- Hull, M. L. and Gonzalez, H. R. (1988). Bending stiffness of composite bicycle frames. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 120(1), 132-140.
- Kader, M.A. and Heitzmann, M. (2012). Aramid fiber-reinforced composites in automotive applications. *Composite Structures*, 94(7), 2195-2200.
- Katunin, A., Krukiewicz, K. and Dragan, K. (2020). Recent advances and trends in development of structural composites for automotive applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 203.
- Kiekens, P. (2001). Aramid fibers as reinforcement in composites. *Polymer Composites*, 22(4), 519-532.
- Kim, S. and Park, J. (2020). Electrical and thermal properties of glass fiber reinforced epoxy composites for electronic applications. *Journal of Composite Materials*, 54(8), 1067–1078.
- Kurt, G. (2006). *Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri*, [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kwolek, S. (1965). *Polyparaphenylene Terephthalamide Fibers and Their Properties*. Journal of Polymer Science.
- Marsh, H. and Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.

- Meier, U. (1995). Strengthening of structures using carbon fibre reinforced polymers (CFRP). *Construction and Building Materials*, 9(6), 341-351.
- Mobasher, B. and Li Cheng Y. (1996). Mechanical properties of hybrid cement based composites. *American Concrete Institute Materials Journal*, 93(3), 284-92.
- Mohan, P., Gupta, S. and Singh, R. P. (2013). Aramid fibers: Review on synthesis, properties and applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(4), 1735-1755.
- Morampudi, P., Namala, K. K., Gajjela, Y. K., Barath, M. and Prudhvi, G. (2021). Review on glass fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 43, 314-319.
- Morgan, P. (2005). *Carbon Fibers and Their Composites*. CRC Press.
- Möller, H., Biermann, H. and Unger, R. (2015). *Advanced Materials in Aerospace Engineering*. Springer.
- Murthy, Y., Sharda, A. and Jain, G. (2012). Performance of glass fiber reinforced concrete. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 1(6).
- Nguyen, H., Carvelli, V., Fujii, T. and Okubo, K. (2016). Cement mortar reinforced with reclaimed carbon fibres, CFRP waste or prepreg carbon waste. *Construction and Building Materials*, 126, 321-331.
- Nie L., Xu, J., Luo, X., Chen, H., Chang, S., Wang, T. and Liu, G. (2019). Study of aramid and carbon fibers on the tensile properties of early strength cement mortar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 267(3).
- Özyurt, N., (2000). *Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı*, [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Pickering, S. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials. *Recycling in Composite Science and Technology*, 66(2), 1463-1471.
- Qureshi, L.A. and Ahmed, A. (2013). An investigation on strength properties of glass fiber reinforced concrete. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(4), 2567-2572.
- Richerson, D. W. (2005). *Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design*. CRC Press.

- Saccani, A., Manzi, S., Lancellotti, I. and Lipparini, L. (2019). Composites obtained by recycling carbon fibre/epoxy composite wastes in building materials. *Construction and Building Materials*, 204, 296-302.
- Safiuddin, M., Abdel-Sayed, G. and Hearn, N. (2021). Absorption and strength properties of short carbon fiber reinforced mortar composite. *Buildings*, 11(7).
- Safiuddin, M., Abdel-Sayed, G. and Hearn, N. (2022). Flexural and impact behaviors of mortar composite including carbon fibers. *Materials*, 15(5).
- Shu, X., Graham, R., Huang, B. and Burdette, E. (2015). Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of portland cement mortar. *Materials and Design*, 65, 1222-1228.
- Singh, M. and Kumar, R. (2022). Glass fiber reinforced composites in automotive and sporting goods applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 410-417.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2018). *Atıkların Geri Kazanımı*. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/bolu/icerikler/atiklarin-geri-kazanimi-20180222082519.pdf>
- Thostenson, E. T., Ren, Z. and Chou, T. W. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61(13), 1899-1912.
- Toklu, K., Avşar, Y.E., Cihan, M.T. ve Bıçakçı, E. (2022). Cam lifi uzunluğu ve oranının çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(1), 95-102.
- Topçu, İ.B. ve Boğa, A.R. (2005). Uçucu kül ve çelik liflerin beton ve beton borularda kullanımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(2), 1-14.
- Topsakal, A. ve Özel, C. (2018). Lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde lif türü ve oranının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 107-116.
- Veillette, C. J. H. and McKee, M. D. (2007). Comparison of polyaxial locking plates and conventional plates in distal humeral fractures. *The Journal of Orthopaedic Trauma*, 21(5), 318-325.
- Vural T., (1998). *Fiberli Betonun Basınç Dayanımına Etkisi*, [Bitirme ödevi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Wallenberger, F. T. and Bingham, P. A. (2010). *Fiberglass and Glass Technology*. Springer.

Yang, H. H. (1993). *Kevlar Aramid Fiber*. Wiley.

Yıldız, S., Bölükbaş, Y. ve Keleştemur, O. (2010). Cam elyaf katkısının betonun basınç ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 239-243.

Yuan F., Chen L., Chen M. and Xu K. (2018). Behaviour of hybrid steel and FRP Reinforced concrete—ECC composite columns under reversed cyclic loading. *Sensors*, 18(12), 4231.

<http://www.technica.net/NF/NF2/efibreinorganiche.htm>

