



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE PVA LİF ORANININ
TEMEL MEKANİK, BOYUTSAL STABİLİTE VE ÜSTYAPI KAPLAMASI
OLARAK PERFORMANS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZGE KÜÇÜKARSLAN

Kasım 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE PVA LİF ORANININ
TEMEL MEKANİK, BOYUTSAL STABİLİTE VE ÜSTYAPI KAPLAMASI
OLARAK PERFORMANS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

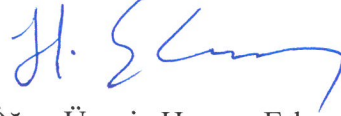
ÖZGE KÜÇÜKARSLAN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL

Kasım 2019

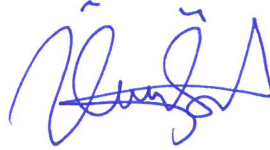
Özge KÜÇÜKARSLAN tarafından Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL danışmanlığında hazırlanan “Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerde PVA Lif Oranının Temel Mekanik, Boyutsal Stabilite ve Üstyapı Kaplaması Olarak Performans Özellikleri Üzerine Etkisi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Tolga GÖĞÜŞ, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Üye : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Bu tez Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafın dan .../.../ 2019 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’ nun .../.../ 2019 tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

.../.../ 2019

Prof. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Özge KÜÇÜKARSLAN



ÖZET

TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE PVA LİF ORANININ TEMEL MEKANİK, BOYUTSAL STABİLİTE VE ÜSTYAPI KAPLAMASI OLARAK PERFORMANS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

KÜÇÜKARSLAN, Özge

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman

:Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL

Kasım 2019, 57 Sayfa

Çalışmanın amacı, tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde (TÇEK) polivinil alkol (PVA) lif oranının temel mekanik ve boyutsal stabilite özellikleri ile rijit üstyapı kaplaması olarak performans özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Literatürde kullanılan hacimce %2 PVA lif oranlı karışım, kontrol karışımı olarak seçilmiş ve üretilen %1.75, %1.50, %1.25 ve %1 PVA lif içeriğine sahip TÇEK'ler ile karşılaştırılmıştır. Temel mekanik ve boyutsal stabilite testleri olarak basınç ve eğilme dayanımı ile kuruma rötresi testleri; üstyapı kaplama performans testleri olarak ise kısıtlanmış rötre, tabakalı yansıma çatlak ve tabakalı eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, TÇEK'de PVA lif oranının azalması ile basınç dayanımı artmakta, eğilme dayanımı azalmakta, kuruma rötresi değerleri ise neredeyse değişmemektedir. PVA lif oranının azalmasıyla kısıtlanmış rötre testi sonrası çatlak sayısı azalmış, çatlak genişliği artmıştır. Tabakalı eğilme dayanımı ve tabakalı yansıma çatlak testlerinde ise PVA lif azaldıkça eğilme dayanımı azalmış ve yansıma çatlak oluşmuştur.

Anahtar Sözcükler: Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler, polivinil alkol lifler, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, rötre, yansıma Çatlak

SUMMARY

THE EFFECT OF PVA FIBER RATIO ON BASIC MECHANICAL, DIMENSIONAL STABILITY AND PAVEMENT OVERLAY PERFORMANCE OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES

KUCUKARSLAN, Ozge

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor

:Assistant Professor Dr. Hasan Erhan YUCEL

September 2019, 57 Pages

The aim of this study is to examine the effect of PVA fiber ratio on the basic mechanical, dimensional stability and performance properties of ECC as rigid pavement overlay. PVA mixture with 2% volume used in literature has been selected as control mixture and compared with produced ECC mixtures containing 1.75%, 1.50%, 1.25%, 1% PVA ratio. Compressive strength, flexural strength and drying shrinkage tests have been performed as basic mechanical and dimensional stability tests, restrained shrinkage, reflective cracking and flexural strength tests have been performed as pavement overlay performance tests. According to test results, compressive strength increased, flexural strength decreased and drying shrinkage values are almost unchanged by reduction of PVA fiber content of ECCs. After the restrained shrinkage test, number of cracks decreased and the width of cracks increased. As PVA ratio decrease in the layered flexural strength test and reflective cracking test, flexural strength has been decrease and reflective cracking has occurred.

Key Words: ECC, PVA fiber, compressive strength, flexural strength, restrained shrinkage, reflective cracking

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde PVA lif oranının temel mekanik, boyutsal stabilite ve üstyapı kaplaması olarak performans özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Tasarlanmış çimento esaslı kompozit (TÇEK) karışımları %1.75, %1.50, %1.25 ve %1.00 gibi farklı PVA lif oranları ile üretilerek hacimce %2 PVA lif oranı ile üretilen standart TÇEK karışımı ile karşılaştırılmıştır. TÇEK karışımlarının basınç dayanımı, PVA lif içeriğinin azalması ile artmış, eğilme dayanımı ise PVA lif oranının artmasıyla artmıştır. Kuruma rötresi değerlerinin ise PVA lif içeriğine direk olarak bağlı olmadığı ve birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. Bununla birlikte, farklı PVA lif içeriği ile hazırlanan TÇEK'lerin rijit yol üstyapı kaplaması olarak kullanılabilirliği test edilmiş ve sonuçlara göre %1.75 oranında PVA lif içeren TÇEK haricindeki karışımlarda PVA lif oranının azalması TÇEK'lerin performansını olumsuz yönde etkilemiştir.

Yüksek lisans tezimin her aşamasında, tüm çalışmalarımı büyük bir titizlikle takip eden, değerli bilgi ve birikimlerini benimle her zaman paylaşan, zaman gözetmeksizin sonsuz destek olan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimi, sadece bu çalışmam sürecinde değil, her zaman her konuda destekçilerim olan babam Metin KÜÇÜKARSLAN'a, annem Nermin KÜÇÜKARSLAN'a, kardeşime ve hayat arkadaşım Ufuk SARIOĞLU'na ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1 Beton ve Özellikleri.....	3
2.1.1 Beton üretiminde kullanılan malzemeler.....	4
2.1.1.1 Agregası.....	4
2.1.1.2 Çimento.....	5
2.1.1.3 Su.....	6
2.1.1.4 Katkıları.....	6
2.1.2 Taze beton ve özellikleri.....	8
2.1.3 Sertleşmiş beton ve özellikleri.....	9
2.1.3.1 Basınç dayanımı.....	9
2.1.3.2 Çekme ve eğilme dayanımı.....	10
2.1.3.3 Büzülme (rötre).....	10
2.1.3.4 Sünme.....	10
2.1.4 Hazır beton.....	11
2.1.5 Betonun sınıflandırılması.....	11
2.2 Lif Çeşitleri ve Lifli Beton.....	11
2.2.1 Doğal lifler.....	15
2.2.2 Metalik lifler.....	16
2.2.3 Sentetik lifler.....	17
2.2.3.1 Akrilik lifler.....	18
2.2.3.2 Aramid lifler.....	18

2.2.3.3 Naylon lifler	18
2.2.3.4 Polyester lifler	19
2.2.3.5 Polipropilen lifler	19
2.2.3.6 Poliolefin lifler	19
2.2.4 Cam lifler	20
2.2.5 Betonda lif kullanımı	20
2.2.6 Lif özelliklerinin betonun özelliklerine etkisi	22
2.2.6.1 Lif geometrisinin etkisi	23
2.2.6.2 Lif uzunluğunun etkisi	23
2.2.6.3 Lif narinlik oranı ve lif miktarının etkileri	25
2.3 PVA Lifler	26
2.4 Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (TÇEK)	28
BÖLÜM III MATERYAL VE METOT	31
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Karışım Oranları	31
3.1.1 Çimento	31
3.1.2 Uçucu kül	31
3.1.3 Kuvars kumu	31
3.1.4 PVA lif	32
3.1.5 Kaba ve ince agrega	33
3.1.6 Süper akışkanlaştırıcı	33
3.1.7 Hava sürükleyici katkıları	33
3.1.8 Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ve mevcut beton karışım oranları	33
3.2 Test Yöntemleri	35
3.2.1 Basınç dayanımı	35
3.2.2 Eğilme dayanımı	35
3.2.3 Kuruma rötresi testi	36
3.2.4 Kısıtlanmış rötre testi	37
3.2.5 Tabakalı eğilme dayanımı testi	38
3.2.6 Tabakalı yansıma çatlağı testi	38
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMALAR	40
4.1 Basınç Dayanımı	40
4.2 Eğilme Dayanımı	41
4.3 Kuruma Rötresi Testi	41
4.4 Kısıtlanmış Rötre Testi	42

4.5 Tabakalı Eğilme Dayanımı Testi.....	44
4.6 Tabakalı Yansıma Çatlağı Testi	46
BÖLÜM V SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZ GEÇMİŞ	57



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. ASTM C 494'e göre kimyasal katkı türleri.....	7
Çizelge 2.2. Puzolanların sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.3. Lif takviyeli beton özelliklerindeki değişim	13
Çizelge 2.4. Farklı Türdeki Liflere Ait Özellikler	14
Çizelge 2.5. Bazı metalik liflerin karakteristik nitelikleri	16
Çizelge 2.6. Bazı cam lifleri ve özellikleri	20
Çizelge 2.7. Değişik çelik lif türleri	24
Çizelge 3.1. Portland çimento ve uçucu külün kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri	32
Çizelge 3.2. TÇEK ve MB karışımlarının oranları	34
Çizelge 4.1. TÇEK karışımlarının basınç dayanımı ve eğilme dayanımı test sonuçları	41
Çizelge 4.2. TÇEK karışımlarının kısıtlanmış rötre testi sonuçları	43
Çizelge 4.3. TÇEK/MB numunelerinin eğilme yükü ve orta nokta sehim değerleri	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Lifli betonla ile lifsiz betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	15
Şekil 2.2. Çatlak köprülemesine değişik lif uzunluklarının etkisi	25
Şekil 2.3. PVA lifin molekül durumu.....	26
Şekil 4.1. Rötire testi sonuçları	42
Şekil 4.2. TÇEK karışımlarının çatlak genişliği ölçümleri.....	43
Şekil 4.3. TÇEK/MB numunelerin eğilme dayanımı ve orta nokta sehim değerleri	44



FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Lifli çimento esaslı kompozitte oluşan paralel çatlaklar	22
Fotoğraf 2.2. PVA ve polipropilen lifli beton karışımlarının mikroskop görüntüsü	27
Fotoğraf 2.3. Farklı boyutlardaki PVA lifleri	28
Fotoğraf 3.1. Basınç dayanım test düzeneği	35
Fotoğraf 3.2. Eğilme dayanımı test düzeneği	36
Fotoğraf 3.3. Kuruma rötresi test düzeneği	37
Fotoğraf 4.1. Eğilme dayanımı testi sonrası TÇEK/MB kompozitlerinin görüntüleri....	45
Fotoğraf 4.2. Yansıma çatlağı testi sonrası TÇEK/MB kompozitlerinin görüntüleri	47

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
kg	Kilogram
m ³	Metreküp
cm ²	Santimetrekaare
N	Newton
mm ²	Milimetrekaare
gr	Gram
Al	Alüminyum
Be	Berilyum
Cu	Bakır
Mo	Molibden
W	Tungsten
CaO	Kalsiyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
m ²	Metrekare
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
°C	Santigrat derece
kN	Kilonewton
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
MgO	Magnezyum oksit
SiO ₂	Silikon dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
SO ₃	Kükürt trioksit
K ₂ O	Potasyum oksit
Kısaltmalar	Açıklama
ECC	Engineered Cementitious Composite
TÇEK	Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit
SUBC	Substrate Concrete

MB	Mevcut Beton
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
PVA	Polyvinyl Alcohol
TS	Türk Standartları
EN	European Norm
ASTM	American Society for Testing and Materials
MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal



BÖLÜM I

GİRİŞ

Yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinin başında gelen beton, hazırlanışının kolay olması, kolay şekil verilebilmesi ve güvenilir olması gibi avantajlara sahip olsa da uzun süreli kullanımlarda, durabiliteden kaynaklı problemlerden dolayı sıklıkla bozularak sürdürülebilirliğini yitirmektedir.

Günümüz teknolojisi ve yapılan araştırmalar betonun dezavantajlarının en düşük seviyelere indirilebileceğini göstermiştir. Yapılan araştırma ve yayınlar incelendiğinde betonun yapısına metalik lifler, yapay lifler veya doğal kaynaklı lifler gibi çeşitli malzemeler eklenebilir. Bu malzemeler betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı, sünekliği ve eğilme dayanımı gibi karakteristik özelliklerine katkı sağladığı görülmektedir. Kullanılan farklı türdeki liflerin betonun farklı özelliklerine etki ettiği yapılan bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır.

Polivinil alkol (PVA) lifler, yoğunluğu 1200–1300 kg/m³ arasında olan ve beyaz bir toz halinde bulunan PVA'ların işlenmesi ile ortaya çıkan organik liflerdir. PVA lifler yüksek bağ dayanımı ve ekstra ince olmalarından ötürü yüksek yayılım gösterirler. PVA lifler başka inorganik olmayan lifler ile mukayese edildiğinde, daha fazla mukavemet ve elastisite modülü değeri sergilerler. PVA lifler elastisite modülleri ve yüksek eğilme dayanımları sayesinde çatlakların beton içinde yayılması konusunda olumlu etkilerde bulunurlar. PVA lifler yüksek seviyede lif-matris uyumu oluşturur. Ayrıca meydana getirilmeleri sırasında liflerin üzerinde oluşacak olan pürüzler ile lif-matris uyumunun daha kuvvetli hale getirilmesine imkân tanımaktadır.

Yapılan bu çalışmada PVA liflerin kullanım oranlarının TÇEK'lerin mekanik, boyutsal stabilite ve üstyapı kaplaması açısından performans özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu araştırma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, PVA lif oranının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kuruma rötresi özellikleri üzerindeki etkisini belirlerken ikinci aşamasında ise üstyapı kaplaması açısından en önemli özelliklerin başında olan kısıtlanmış rötre, tabakalı eğilme dayanımı ve tabakalı yansıma çatlağı testleri yapılarak uygun PVA lif oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu nedenle %1.75,

%1.50, %1.25 ve %1.00 gibi farklı PVA lif oranlarına sahip TÇEK'ler üretilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu oranların seçilmesindeki temel amaç, malzeme özelliklerinden ödün vermeden üretim maliyetini düşürmek için daha az PVA lif oranına sahip TÇEK'lerin üretilmesi ve düşük oranlarda PVA lif içeren TÇEK'lerin üretilebilirliğinin belirlenmesidir.

Bu tez 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, beton, lifler ve PVA lifler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca çalışmanın amacı ve bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmalara değinilmiştir. İkinci bölümde, beton hakkında detaylı bilgiler, lif çeşitleri, betonda lif kullanımı, PVA lifler ve tasarlanmış çimento esaslı kompozitleri içeren literatür taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, farklı oranda PVA lif eklenmiş çimento esaslı kompozit numuneleri ile gerçekleştirilen deneyler ve tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde PVA lif oranının karayolu beton kaplamaları üzerindeki etkisini incelemek için yapılan deneyler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, çalışma kapsamında yapılan deneylere ait bulgular ve tartışmalardan bahsedilmiştir. Beşinci bölümde ise bu deneylerin sonuçlarına yer verilmiştir.

BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Beton ve Özellikleri

Beton; agregalar, su, çimento ve belirlenmiş oranda kullanılan bir takım katkı malzemelerinin homojen bir şekilde karıştırılması ile elde edilen taneli yapıya sahip kompozit bir yapı malzemesidir. Betonun hazırlanışı uluslararası standartlarla belirlenmiştir. Su ve çimento karıştırıldığında kimyasal bir reaksiyona girerek çimento hamurunu oluşturur. Suyun diğer çimento bileşenleri ile girdiği reaksiyona hidrasyon adı verilir. Hidrasyon neticesinde oluşan çimento hamuru karışımdaki agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak boşluksuz bir yapı oluşturur ve birbirine bağlayarak güçlü bir yapı oluşturulmasını sağlar. Beton hazırlanışının ilk aşamasında akışkan bir yapıya sahip olsa da zamanla sertleşip katılaşıp mukavemet kazanır.

Beton yük taşıyan esas taşıyıcı malzemedir. Buna ilave olarak dekoratif bir ürün olarak da kullanılır. Günümüzde beton, en çok kullanılan inşaat malzemesidir. Yollar, kaldırımlar, binalar, kanallar, barajlar vb. yapıların temel yapı taşıdır. Beton, yangın dayanımı olan, su geçirmeyen ve ses yalıtımı sağlayan bir yapıya sahiptir. Bazı yapılarda kullanılma amacı ise radyasyona karşı direnç göstermesidir. Dünya genelinde kullanımı en yüksek yapı malzemesi olan betonun bu kadar çok tercih edilmesinin ve kullanılmasının nedenlerinden bazıları beton hazırlanmasında kullanılan malzemelerin temininin kolay ve ucuz olması, bu malzemelerinin çok çeşitli olması, betona istenilen şeklin verilebilmesi ve beton kullanımının inşa edilen yapılar için güvenli olmasıdır. Beton her ne kadar kullanışlı bir yapı malzemesi olsa da uzun süreli kullanımlarda çevresel etkiler sebebi ile deforme olarak, sürdürülebilirliğini yitirebilmektedir. Aşırı yüklemelere karşı dayanıklılık problemleri göstermesi ve çevresel zararları betonun dezavantajları arasında gösterilebilir (Erdoğan, 2003).

Yapılan çalışmalar betonun dezavantajlarını en düşük seviyelere indirmeyi hedefleyerek, betonun daha dayanıklı ve sürdürülebilir olmasını amaçlamaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte betona bazı katkı maddeleri ilave edilebilmektedir. Bu katkı malzemelerinin eklenmesinin sebebi, betonun kalitesini artırmak, ilerleyen

süreçte betonun deforme olmasını engellemek ve hidratasyonu daha kısa zamanda sağlamaktır.

Yapılarda bağlayıcı malzeme olarak harç kullanılması eski zamanlara kadar uzanmaktadır. Bilinen en eski harç yapımında ise bağlayıcı malzeme kullanımında kil tercih edilmiştir. İlerleyen zamanlarda bağlayıcı malzeme olarak alçı ve kireç kullanılmıştır. Anadolu ve etrafında uzun süreler boyunca kireç esaslı bir malzeme olan Horasan harcı kullanılmıştır.

Bugün dünyada kullanılan betona ait yapılan ilk araştırmalar 19. yüzyılın başlarında yapılmıştır. Çimento ile alakalı yapılan araştırma ve çalışmalar neticesinde 1824 yılında Portland Çimentosu ortaya çıkmıştır. Bu çimento türünün üretilmesi, tarihsel süreç bakımından önemli bir olaydır (Kurt, 2006).

2.1.1 Beton üretiminde kullanılan malzemeler

2.1.1.1 Agregalar

Bağlayıcılar yardımı ile beton veya harç yapımında kullanılan ve betonun iskeletini oluşturan kum, çakıl, kırma taş, cüruf, pişmiş kil, bims ve genleştirilmiş perlit gibi farklı büyüklükteki maddelerin ortak ismi agregadır. Agregalar beton karışımının hacimsel olarak yaklaşık %70-%75'ini oluşturdukları için karışımın en önemli bileşenlerindedir.

Önceden beton karışımına girmiş ve daha sonra bazı yöntemlerle tekrar kullanıma hazır duruma getirilen agregalar geri kazanılmış agrega olarak isimlendirilir. Agregalar tane boyutu göz önüne alındığında; ince agregalar ve iri agregalar olarak sınıflandırılabilir. İnce agregalara örnek, kum ve kırma iken, iri agregalara örnek, çakıl ve kırma taştır.

Kaynağına göre agregalar; doğal agregalar ve yapay agregalar olarak sınıflandırılabilir. Betonda, yapımında kullanılan agreganın dayanıklılığı, tane şekli, gözenekliliği, mineral yapısı, agreganın pürüzsüzlüğü, maksimum agrega çapı, elastisite modülü ve agreganın temizliği gibi özellikleri, beton dayanıklılığını etkilemektedir (Demiryürek, 2007).

2.1.1.2 Çimento

Kil ile kalker bileşiminin belirli bir sıcaklık seviyesi üzerinde, ısıya maruz bırakılmasının ardından ezilerek meydana getirilmesi ile elde edilen hidrolik bağlayıcı yapı malzemesi çimento olarak ifade edilir. Çimento, su ile karıştırılarak hamur haline getirilmesinden bir süre sonra katılaşmaya başlar. Bu katılaşma priz olarak adlandırılır ve süresi ortam şartlarına bağlıdır. Normal şartlarda katılaşma 1-10 saat arasında gerçekleşir. Artan sıcaklık katılaşmayı hızlandırır. Betonun dayanım kazanması, sertleşme olayı ile birlikte başlar. Dayanım kazanma olayı zamanla artar (Erten, 2009). TS EN 197-1 (TS EN, 2002) standardı genel kullanımlı çimentoları (CEM çimentoları) beş temel grup altında sınıflandırmaktadır.

- 1- CEM I Portland Çimentosu
- 2- CEM II Portland Kompoze Çimento
- 3- CEM III Portland Yüksek Fırın Cürüflü Çimento
- 4- CEM IV Puzolanik Çimento
- 5- CEM V Kompoze Çimento

Çimento türlerinin ve çimentoyu oluşturan temel malzemelerin gösterilmesinde kullanılan harflerin açıklaması aşağıda belirtildiği gibidir (Boğazkesen, 2011).

- A: Çimentonun En Az Mineral Katkı İçeren Tipi
- B: Çimentonun A Tipinden Daha Fazla Mineral Katkı İçeren Tipi
- C: Çimentonun B Tipinden Daha Fazla Mineral Katkı İçeren Tipi
- K: KlinkerS: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
- D: Silis Dumanı
- P: Doğal Puzolan
- Q: Kalsine Edilmiş Puzolan
- V: Silisli Uçucu Kül
- W: Kalkersi Uçucu Kül
- T: Pişmiş Şist
- L: Organik Karbon Muhtevası %5'den Az Olan Kalker
- LL: Organik Karbon Muhtevası %2'den Az Olan Kalker

2.1.1.3 Su

Betonun en önemli malzemelerinden biri de sudur. Betona su, üç farklı amaca yönelik katılabilmektedir. Çimento ve agrega ile beraber beton yapımında “karıştırma suyu” olarak, yeni dökülen priz almamış betonun ıslatılmasında “bakım ya da kür suyu” olarak ve beton içerisindeki agregaların kirlerden ve yabancı maddelerden arındırılmasını sağlamak, beton karma işlemi veya üretim işlemi bittikten sonra üretim araçlarını temizlemek için “yıkama suyu” olarak kullanılmaktadır (Erdoğan, 2003).

2.1.1.4 Katkılar

Betonun çeşitli niteliklerini daha iyi durumu getirmek amacıyla beton karışımındaki çimento ölçüsünü referans alarak buna bağlı oranlarda eklenen organik ya da inorganik kaynaklı malzemeler katkı maddesi olarak nitelendirilir. Katkı malzemeleri, beton bileşenlerinin karılma anından hemen önce veya karılma esnasında eklenir.

Katkı malzemeleri, kimyasal katkılar, mineral katkılar ve lif katkılar olarak üç sınıfta değerlendirilebilir. Kimyasal katkılar genellikle betonu oluşturan karışımındaki su-çimento oranını düzenlemek maksadı ile kullanılır. Kimyasal katkı kullanımı zorunlu değildir. İnorganik ve organik olmak üzere iki grup kimyasal katkı malzemesi bulunur (Erten, 2009). Çizelge 2.1.’de ASTM C 494 (ASTM C, 1999) standardına göre kimyasal katkı türleri sıralanmıştır (Dilli, 2015).

Betonun dayanım ve dayanıklılık niteliklerinin iyileştirilmesi için betonun terlemesinin azaltılması ve akışkanlığının uygun olması istenir. Bu sebeple de mineral katkılar kullanılır. Uçucu kül ve silis dumanı bu katkılardandır (Erten, 2009).

Mineral katkılar “puzolan” olarak da isimlendirilmektedir. Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılır. Puzolanları sınıflandırılması Çizelge 2.2.’de gösterildiği gibidir (Dilli, 2015).

Lif katkı malzemelerinin kullanılmasının amacı ise kullanılan katkının türüne göre betondaki rötreyi düşürmek, mikro çatlakları ortaya çıkmasını engellemek ve meydana gelen mikro çatlakların ilerlemesine engel olmaktır. Cam ve polipropilen lifleri ile

birlikte çelik lifler, lif katkı malzemesi olarak örnek gösterilebilir. Kullanılan lif katkıları betonun karakteristik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Lif katkı malzemesi olarak kullanılan liflerin boyutları ve geometrileri farklılık gösterir, bu da farklı mekanik özellikleri etkiler (Erten, 2009).

Çizelge 2.1. ASTM C 494'e göre kimyasal katkı türleri (Dilli, 2015)

Sembol	Katkı Türü
A	Su azaltıcı akışkanlaştırıcılar
B	Priz geciktirici katkıları
C	Priz hızlandırıcı katkıları
D	Su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları
E	Su azaltıcı ve priz hızlandırıcı katkıları
F	Su azaltıcı süper akışkanlaştırıcılar
G	Su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı priz geciktirici katkıları
S	Özel performanslı katkıları

Çizelge 2.2. Puzolanların sınıflandırılması (Dilli, 2015)

Doğal Puzolanlar	Yapay Puzolanlar
Volkanik Küller	Uçucu Kül
Killi Şist	Pişirilmiş Kil
Diotame Toprağı	Yüksek Fırın Cürufu
Pomza Taşı	Silika Dumanı
Volkanik Tüfler	Demirli Olmayan Cüruf
Traslar Opalin Sliska	Pirinç Kabuğu Külü

2.1.2 Taze beton ve özellikleri

Çimento, su, agregalar ve katkı malzemelerinin ilk karıştırıldığında ortaya kolayca şekil verilebilecek bir karışım çıkar. Bu yapıya taze beton adı verilir. Taze betonun en önemli özellikleri homojen olması, kolay şekil alabilmesi ve kalıpta kolay yayılmasıdır.

Taze betonun ihtiva etmesi gereken bazı nitelikler şu şekilde ifade edilebilir; taze beton, zorlanmadan karılabilmeli, başka bir yere nakledilebilir olmalı, sıkıştırılabilmeli ve üzeri perdelanabilir olmalıdır. Bahsi geçen bu işler esnasında çimento hamuru ve agregalar arasında segregasyon olmamalıdır. Taze betonun bu özellikleri bulundurması, işlenebilirliği açısından çok önemlidir. Bu sebeple ifade edilen niteliklerin tamamı işlenebilirlik olarak adlandırılan ortak bir nitelik olarak ifade edilebilir (Erdoğan, 2003).

Betonun karılması ile katılaşmaya başlaması arasında geçen zamana priz süresi adı verilir. Priz süresi katılaşmadan önceki süreci kapsadığı için işlenebilirlik açısından önemli bir olgudur. Priz süresi ise çimento ve su arasındaki reaksiyon sürecini etkiler. Bu sürece ise hidrasyon hızı adı verilir. Yeteri kadar işlenebilirlik göstermeyen taze beton, katılaşta dayanıklılık konusunda istenilen performansı göstermez. Bu sebeple işlenebilirlik niteliği beton için önemli bir faktördür. Taze betonun akışkanlığını ifade eden kıvam kavramı, taze betonun içerisindeki su yoğunluğu ile ilgilidir. Kıvam, işlenebilirliği etkileyen önemli kavramlardan biridir. Ayrıca kıvamı yüksek olan taze beton pompalanabilirlik ve yerleştirilebilirlik açısından düşük kıvamlı taze betondan daha iyidir. Fakat kıvamının çok yüksek olması her zaman işlenebilirliğin yeterli olduğu anlamı taşımamaktadır.

Taze betonun ihtiva ettiği agregalar ve çimento harcının herhangi bir sebeple ayrışma göstermesine segragasyon adı verilir. Beton yapımında kullanılan malzemelerin, beton karışımında homojen bir yapıda olması gerekmektedir. Karışımı oluşturan malzemelerin oranlarının uygun ayarlanmaması veya kullanılan malzemenin uygun olmaması, karışımın homojen bir yapı göstermemesinin ve segregasyon oluşmasının temel sebepleri arasındadır. Beton tazeyken, yerleştirilme işlemi sonucunda taze beton içerisinde bulunan katı parçalar ve su arasında yerçekimi sebebiyle yer değiştirme meydana gelir. Katı parçalar dibe çökerken su ise yüzeye çıkma eğilimindedir. Suyun bu şekilde yüzeye çıkma isteğine “terleme” adı verilmektedir. Yüzeye çıkmayı başarabilen bir miktar su, yüzeyde bir birikinti oluşturur ve buharlaşma olayı sonucunda

ortadan kaybolur. Betonun belirli standartlar içinde ve yüksek kalitede meydana getirmek için, kullanılan malzemelerin niteliklerinin ve karışım oranının uygun bir şekilde belirlenmesi, uygun metotlar ile karıştırılması gerekmektedir.

Bir beton karışımını meydana getirebilecek ölçüdeki malzemelerin bir arada bulunmasına “beton malzemeleri harmanı” denir. Beton malzemeleri harmanını meydana getiren malzemelerin karıştırılması ile ortaya çıkan taze betona ise “beton harmanı” denir (Erdoğan, 2003).

2.1.3 Sertleşmiş beton ve özellikleri

Taze betonun sertleşerek katılaştığı ve şekil verilebilirliğinin kaybettiği formuna sertleşmiş beton adı verilir. Sertleşmiş betonda dayanım ve dayanıklılık temel özellikler arasındadır.

Betonun, üzerine gelen her türlü yükün sebep olabileceği şekil değişikliklerine ve kırılmalara karşı göstereceği dirence “dayanım” adı verilir.

Beton kullanımı süresince birçok çevresel olaylara maruz kalır. Bu olaylar betonun kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkiler ve deformasyona sebep olur. Betonun bu çevresel olaylar karşısındaki direnme kabiliyetine ise “dayanıklılık” adı verilir (Ezici, 2016).

2.1.3.1 Basınç dayanımı

Betonun basınç dayanımı uygulanan tek eksenli basınç altında betonun kırılmalara ve deformasyonlara karşı taşıyabileceği en büyük direnç değerine basınç dayanımı denir. Betona uygulanan eksenel yükler farklı etkilere sebep olabilmektedir. Betonun göstereceği direnme kabiliyetleri, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı şeklinde ifade edilmektedir. Basınç dayanım niteliği yapıların tasarım hesapları yapılırken de göz önünde bulundurulur. Basınç dayanımının birimi Kg/cm^2 veya N/mm^2 (MPa)’dir. Basınç dayanımı, maksimum yük miktarının numunenin kesit alanına oranı olarak formüle edilebilir (Çomak, 2012).

2.1.3.2 Çekme ve eğilme dayanımı

Betona etkiyen çekme kuvvetleri, şekil değişimlerine ve kırılmalara sebep olmaktadır. Bu çekme kuvveti çoğu zaman betona direk olarak etki edememektedir. Meydana gelen çekme kuvveti, beton bileşenlerinin maruz kaldığı basınç ve eğilme kuvvetleri nedeniyle dolaylı yoldan oluşur. Bu durum karşısında betonun dayanabileceği en büyük kuvvete çekme dayanımı adı verilir. Hidratasyonunu tamamlayarak katılmış ve belirli bir dayanım kazanmış olan betondaki çekme dayanımının biliniyor olması betona ait çözümlenmelerin ortaya çıkarılması açısından kritik öneme sahiptir. Beton çekme dayanımı üç değişik yöntemle bulunabilir (Erdoğan, 2003).

- Doğrudan çekme dayanımı
- Yarmada çekme dayanımı
- Eğilmede çekme dayanımı

2.1.3.3 Büzülme (rötire)

Betonu oluşturan suyun fiziksel ve kimyasal sebepler ile eksilmesi veya yok olması neticesinde betonda meydana gelen boyutsal ve hacimsel azalmaya “büzülme” denir. Aynı zamanda büzülme rötire de denmektedir (Gönen, 2012).

Beton prizini almadan önce agregaların yerçekimi sebebiyle aşağı yönlü hareketi ve yüzeye ulaşan suyun buharlaşması neticesinde oluşan rötireye plastik rötire adı verilir. Çimentonun hidratasyon süresince ortamdan sürekli su çekmesi sebebiyle oluşan rötireye hidratasyon rötiresi denir. Sertleşmiş betonda oluşan su kaybı sebebiyle meydana gelen rötireye ise kurutma rötiresi adı verilir (Uçar, 2008).

2.1.3.4 Sünme

Betona yapılan yükleme durumunda, beton ani bir şekilde elastik deformasyon gösterir. Bu deformasyonu takip eden yavaş bir hızda ilerleyen ve gecikmiş deformasyon olarak adlandırılan deformasyona sünme adı verilir (Uçar, 2008).

2.1.4 Hazır beton

Bilgisayar kontrolü ile istenilen orandaki beton bileşenlerin karıştırılarak fabrikasyon ürünü olarak üretilen ve üretiminden hemen sonra mikser araçları ile ihtiyaç duyulan alana taşınarak o alanda kullanılan taze betona hazır beton adı verilir (Ezici, 2016).

2.1.5 Betonun sınıflandırılması

Betonun sınıflandırılması farklı esaslara göre yapılabilir. Basınç dayanımına göre sınıflandırılması şu şekildedir; basınç dayanım değeri 20 N/mm^2 'den daha düşük olan betonlara düşük dayanımlı beton adı verilir. $20-40 \text{ N/mm}^2$ basınç dayanımı değerine sahip olan betonlar normal dayanımlı beton olarak adlandırılır. Basınç dayanım değerleri 40 N/mm^2 'nin üzerinde olan betonlar ise yüksek dayanımlı beton olarak adlandırılır (Uçar, 2008).

Türk standartları beton sınıflandırmasını yaparken kaynak olarak Avrupa ölçülerine başvurur. Bu sebeple TS EN 206-1 (TS EN, 2002) standardını temel alınır. Beton sınıfları C30, C35, C40 ve buna benzer isimlendirmelerle tanımlanır. C, betonun İngilizce'deki karşılığı olan concrete kelimesinin ilk harfini, 30, 35, 40 olarak gösterilen sayılar ise betonun basınca maruz kaldığındaki kırılma dayanımını MPa olarak ifade eder. Bu beton standart 15 cm x 30 cm silindirik betondur.

2.2 Lif Çeşitleri ve Lifli Beton

Çekme ve eğilme dayanımı yüksek olmayan malzemelerin bu niteliklerini daha iyi hale getirmek ve malzemelerin kırılma dayanımını azaltarak esneyebilme özelliğini artırma gibi maksatlarla kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan, tabii kaynaklardan veya yapay olarak elde edilebilen malzemeler lif olarak adlandırılır (Dilli, 2015).

Lifler belirli bir uzunluğa ve esnekliğe sahiptir. Ayrıca eğilebilirliği ve dayanıklılığı olan malzemelerdir. Doğal lifler, doğadan ve suni olmayan kaynaklardan elde edilen ve elde edildiği hali ile işlem gerektirmeksizin direkt kullanılabilen lif çeşitleridir. Yapay lifler ise istenilen özellikleri taşıyacak bir lifin insan katkısı ile bir dizi işlem neticesinde meydana getirilen lif çeşitleridir (Kurt, 2006).

Lifler, dayanıklılığı ve elastisite modülü göz önünde bulundurulduğunda malzemenin en gelişmiş hali olarak kabul edilirler. Lif kullanımının tarihi çok eskidir. İnsan eli ile üretilen lifler 19. Yüzyılın sonlarında ortaya çıkmıştır. İnsanların uzun süre kullandığı bir malzeme olan kerpiçte, bitkisel liflerin ve hayvansal liflerin kullanıldığı tespit edilmiştir (Sarı, 2013).

Beton, agrega, çimento ve su gibi elemanların karışımıyla meydana getirilmiş kompozit bir maddedir. Betonun çekme dayanımı ve çekme birim deformasyon kapasitesi çok düşüktür. Betonun bu yetersiz niteliklerini ıslah etmek amacıyla, içerisine değişik kaynaklardan meydana getirilmiş ve teknik özellikleri yeterli düzeyde olan lifler eklenerek elde edilen beton çeşidine lifli beton adı verilmektedir (Yardımcı, 2007). Günümüzde, lifli beton üretiminde doğal, çelik, polimer ve cam esaslı lifler yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton içerisinde lif kullanımı, betonun çatlak gelişimine karşı dirençli olmasını ve süneklik özelliğinin artmasını ve betonun; dayanım ve enerji yutma kapasitesi özelliklerini geliştirir. Lif içeren betonun niteliklerine tesir eden en önemli etkenler, narinlik oranı, lif oranı ve lifin beton karışımı içinde eşit olarak yerleşmesidir. Eşit olarak yerleşen lifler, betonda meydana gelen çatlakları engellemekte ve çatlakların beton içinde yol almasını geciktirerek betonu daha dayanımlı bir hale dönüştürmektedir (Türkmenoğlu ve Varol, 2016).

Lif ilave edilmiş betonun mekanik özellikleri; liflerin narinlik oranından, lifin boyundan, şeklinden ve beton karışımındaki oranından, çimento çeşidinden ve oranından, örneklerin ebatlarından, şeklinden ve oluşturulma metotlarından, su/bağlayıcı oranından, kullanılan agreganın türünden ve tane dağılımından etkilenir. Belirtilen etkenler betonun yetersiz olan bazı özelliklerini değiştirir. Bu değişiklikler Çizelge 2.3.'de gösterilmiştir (Aral, 2006).

Değişik mekanik nitelikler ve ihtiyaç duyulan yerler açısından çeşitli lif tipleri mevcuttur. İfade edilen lif tipleri doğal lifler, sentetik lifler, metalik lifler, cam lifler olarak sıralanmıştır ve Çizelge 2.4.'de farklı türdeki liflere ait bazı özellikler verilmiştir (Boğazkesen, 2011).

Lif takviyeli betonlar ile eşit özelliklere sahip lif takviyesi yapılmamış betonlar karşılaştırıldığında lifli betonun daha fazla enerji absorbe etme özelliğine sahip olduğu

görülmüştür. Lifli betonlarda liflerin tesiri betonu meydana getiren maddelerin elastisite modülüne bağlıdır (Dilli, 2015).

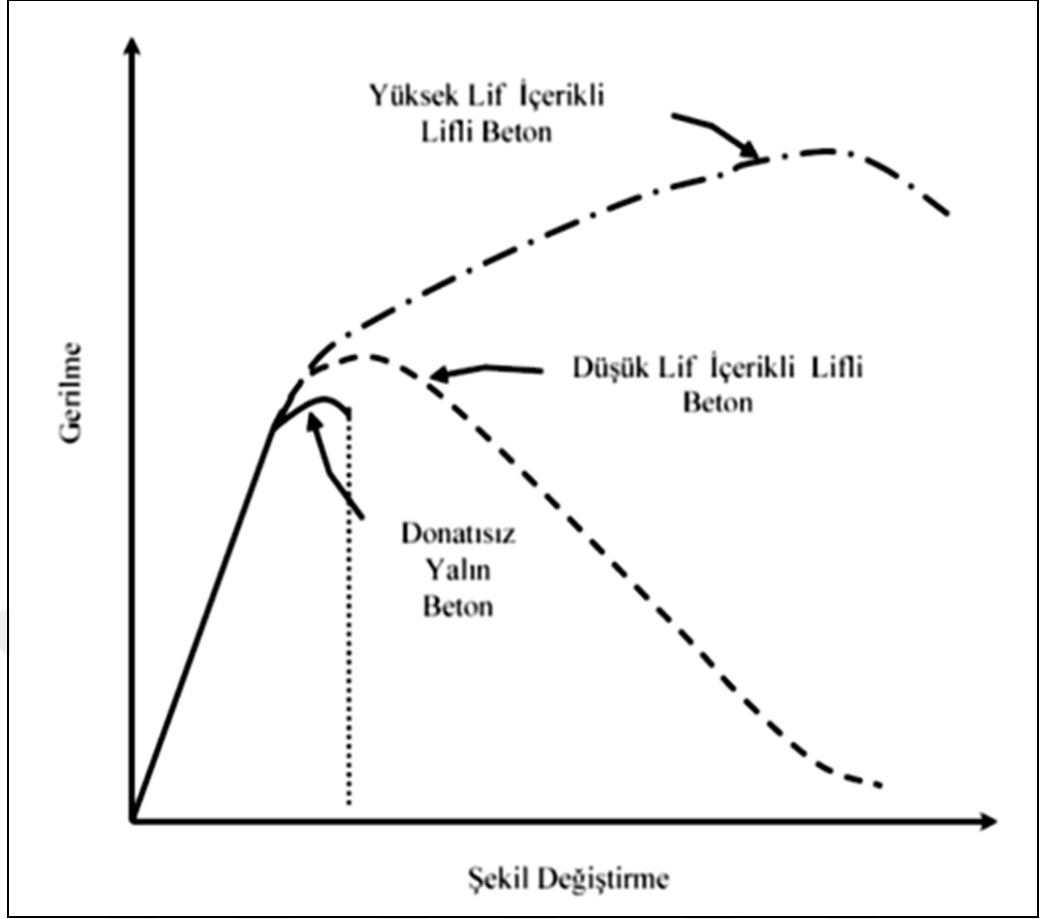
Çizelge 2.3. Lif takviyeli beton özelliklerindeki değişim (Aral, 2006)

Özellik	Artış (%)
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-150
Basınç Dayanımı	±25
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Kavitasyon-Erezyon Direnci	200-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Elastite Modülü	±25

Çizelge 2.4. Farklı Türdeki Liflere Ait Özellikler (Boğazkesen, 2011)

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (10³ MPa)	Maksimum Uzama (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm³)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Yüksek Performanslı Polietilen	2700	120	5	0,97
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,90
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25 1,5	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-35	7,8
PVA	880-1600	25-40	6-10	1,30

Şekil 2.1.'de lif takviyeli betonlarla lifsiz betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gösterilmektedir (Dilli, 2015).



Şekil 2.1. Lifli betonla ile lifsiz betonların gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Dilli, 2015)

2.2.1 Doğal lifler

Tabii kaynaklar ile oluşturulan ve temin edildiği haliyle direk olarak değerlendirilebilen liflere doğal lif adı verilir.

Lif takviyeli kompozitleri meydana getirmek için eski zamanlardan beri lifler kullanılmıştır. Bunlar at yelesi ve samandır. Modern zamanda lifler türlü bitkilerden daha iktisadi bir şekilde elde edilmektedir. Bu liflerin belirgin özelliği, çok kolay elde edilmeleridir. Ancak bu liflerin alkali ortamda dağılmaya meyil etmeleri en önemli sorunudur. Bazı katkı malzemelerinin kullanılması ile betonun alkali özelliği azaltılarak bu problem düzeltilebilmektedir (Ekincioğlu, 2003).

2.2.2 Metalik lifler

Metaller üst düzey plastik şekil değiştirme kabiliyetlerinden ve ekonomik olmalarından ötürü en çok tercih edilen malzemeler arasındadır. Metallerin lif formu da uzun süredir tercih edilmektedir.

Metalik lif türleri arasında, paslanmaz çelik lifler ilk sırada tercih edilir. Liflerin paslanmaz çelikten üretilmesi paslanma konusunda avantaj ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca elastisite modülü ile dayanımının yüksek olması metalik lifleri daha avantajlı bir duruma getirmektedir. Çizelge 2.5'te bazı metalik liflerin karakteristik nitelikleri verilmiştir (Kurt, 2006).

Çizelge 2.5. Bazı metalik liflerin karakteristik nitelikleri (Kurt, 2006)

Metal	Özgül Ağırlık (gr/cm³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Al	2,7	660	70	300
Be	1,8	1350	310	1100
Cu	8,9	1083	125	450
Mo	10,2	2625	330	2200
W	19,3	3410	350	2890 (< 250 µm) 3150 (< 125 µm) 3850 (< 25 µm)
Karbon Çeliği (0,1 mm çapında)	7,9	1300	210	4000
Paslanmaz çelik (0,05 mm çapında)	7,8	1535	198	2400

Betona eklenebilecek çelik liflerin tasnif edildiği ve niteliklerinin gösterildiği Amerikan Standardı ASTM A 820-96 (ASTM A 820, 1996), çelik lifleri aşağıdaki şekilde 4 farklı gruba ayırmıştır (Ersoy, 2001).

- Tip 1: Soğuk çekilmiş çelik lifler,
- Tip 2: Plakadan kesilmiş çelik lifler,
- Tip 3: Haddelenip çekilmiş çelik lifler,
- Tip 4: Diğer lifler.

Yukarıdaki gruplandırma yalnızca meydana gelme durumları göz önüne alınarak yapılmıştır. Türk standardı TS 10513/92 (TS 10513, 1992) ise lifleri türlerine göre aşağıda gösterildiği gibi gruplandırır:

- A: Düz, pürüzsüz yüzeyli lifler
- B: Bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler
- C: Sonu kancalı lifler

TS 10513 / 92 (TS 10513, 1992)'de çelik liflerin niteliklerini iki parametre etkiler,

- Liflerin çekme-kopma dayanım ortalaması 345 N/mm^2 değerinden küçük olmamalıdır. Lif taneleri için çekme-kopma dayanımı 310 N/mm^2 değerinden büyük olmalıdır.
- $15-17 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik ortamda, 3.18 mm 'lik bir iç çap etrafında yapılan lif eğilme deneyine tabi tutulan liflerin %90'ının kopmadan 90° eğilme kabiliyeti sergilemesi gerekmektedir (Kurt, 2006).

2.2.3 Sentetik lifler

Sentetik lifler tekstil sanayisindeki çalışmalar neticesinde meydana getirilen doğal olmayan kimyasal sanayi ürünüdür. Bu lif türünün beton içindeki bazik etkiler karşısında dayanıklılığı daha fazladır. Akriik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen bu lif türünün örnekleri arasındadır. Bu liflerin çekme dayanım değerleri üst seviyededir. Aramid haricindekilerin ise elastisite modülleri küçük değerdedir.

Sentetik liflerin nitelikleri, narinlikleri ile ilişkilidir. Bu liflerin çapı çok düşük seviyededir. Sentetik lifler genelde küçük miktar (Hacimce %0.1 ile %0.3) ve büyük miktar (Hacimce %0.4 ile %0.8) olmak üzere iki farklı şekilde betona katılır. En yaygın karışım miktarı hacimce %0.1'lik olandır (Sarı, 2013).

2.2.3.1 Akrilik lifler

Bu lifler, lif içerikli betonlarda amyanların yerini almıştır. Öncelikle lifler seyreltilmiş olan çimento hamuru ile betonu oluşturur. Vakumlama yapılarak basınç altında kompozite form verilmiştir. Akrilik lifler düşük hacimlerde betona ilave edilerek plastik büzülme etkisini betonda minimum seviyelere çekmiştir (Sarı, 2013).

2.2.3.2 Aramid lifler

Aynı miktardaki çelik lifler aramid liflerin %20'si kadar dayanıklılıktayken, aynı miktardaki cam lifler aramid liflerin %40'ı kadar dayanıklıdır. Ekonomik olmayan aramid lifler sadece betonun çok yüksek dayanım gerektirdiği alanlarda karışıma ilave edilir (Sarı, 2013).

2.2.3.3 Naylon lifler

Naylon, polyamid tipindeki plastiklerin adıdır. Su soğurma niteliği sayesinde rutubet dengesini korur. Bu nitelikleri sayesinde beton ile güç bir bağlam oluşturur. Betona lif olarak eklenen 2 tip naylon vardır. Bunlar, naylon 6 ve naylon 66'dır. Her iki tür naylon lifine ait fiziksel ve kimyasal nitelikler aşağıda gösterildiği gibidir:

- Çekme dayanımları üst seviyededir.
- Ayrışmaya karşı dirence sahiptir.
- Asit dışındaki kimyasallara karşı direnç gösterirler.
- Kimyasal dirence sahiptir.
- Alkali dayanımına sahiptirler.
- Su emme kapasiteleri yüksektir.

Naylon lifler, betonda dayanımı, sünekliği ve dayanıklılığı yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır. Naylon lif takviyeli betonların basınç dayanımları lif takviyesiz betonlar ile karşılaştırıldığında önemli bir fark kaydedilmese de diğer sentetik liflerin takviye edildiği betonlarla karşılaştırıldığında basınç dayanımları daha yüksektir. Bütün bunların yanı sıra naylon liflerin maliyetinin diğer sentetik liflerin maliyetinden daha fazla olması, bu lif çeşidinin tercih edilmemesine sebep olmaktadır (Yaşar, 2011).

2.2.3.4 Polyester lifler

Polyester lifler termoplastik polyester sınıflandırması içerisinde yer alan bir lif çeşididir. Polyester lifler ısıya karşı dirençsizdirler. Ayrıca sıcaklık bu liflerin niteliklerini değiştirir. Polyester lifler hacimsel olarak %0.1 oranında kullanılırsa plastik büzülme önler (Sarı, 2013).

2.2.3.5 Polipropilen lifler

Polipropilen lifler çok tercih edilen polimer lifler sınıfındadır. Plastik büzülme düşürürler. Hacimsel olarak %0.1-%0.05 oranında kullanılırlar. Polipropilen lifler lif hamuru içinde ya da tekil durumda bulunabilirler.

Polipropilen lifler, rötre gerilmelerine karşı direnme kuvveti ortaya çıkarır ve rötreten dolayı oluşacak çatlak tehlikesini minimum seviyeye kadar düşürür. Polipropilen lifler sertleşmiş betonda dayanıklılık yükseltici bir donatı faydası sağlamazlar. Etkilerini betonun plastik evresinde gösterirler ve bir tür katkı malzemesi görevi görürler (Kurt, 2006).

2.2.3.6 Poliolefin lifler

Bir diğer adı olefin lifler olan poliolefinler miktarca en az %85 oranında etilen ve propilen gibi olefinlerin polimerlerini. Poliizopren çeşidi elastomerik nitelik gösteren lifler bu açıklamaya dahil edilmez. 1957 yılında yüksek yoğunluklu polietilenin üretilmesi, poliolefin liflerin gelişiminde önemli bir rol oynar (Şahin, 2007).

2.2.4 Cam lifler

Cam lifler, sertlik, paslanmaya mukavemet ve başka maddelerle kolay kolay reaksiyon göstermeme gibi klasik cam niteliğine sahiptir. Bunun yanı sıra, elastik, ağır olmayan ve ekonomik bir lif çeşididir. Bu nitelikler cam liflerini uygun maliyetler gerektiren alanlar için tercih edilebilir bir lif çeşidi yapmaktadır.

Cam lifler güçlü dayanım gösterirler. Cam liflerin elastisite modüllerinin yaklaşık olarak aynı değere sahip olmalarına rağmen değişik dayanıklılık değerindedirler. Bu liflerin çevresel faktörler karşısında gösterdikleri direnme kuvvetleri de birbiri ile aynı değildir. Üst seviye çekme dayanımı ve kimyasala karşı direnmenin gerekli olduğu alanlarda E tipi cam lifleri tercih edilir. Maliyetin uygun olması, korozyona karşı direncin olması ve yeterli mekanik niteliklere sahip olmasından dolayı bu tip cam lifleri yapısal eklemelerde de tercih edilirler. Cam lifleri içerisinde en yüksek dayanıma sahip olan cam tipi, S tipi ve S-2 tipi camlar olmasına rağmen E tipine camlar, bu tip camlara göre daha uygun maliyette oldukları için uygulama alanları dardır. Bazı cam lifi tipleri ve özellikleri çizelge 2.6.'te gösterilmiştir (Ekincioglu, 2003).

Çizelge 2.6. Bazı cam lifleri ve özellikleri (Ekincioglu, 2003)

Lif Türü	Özgül Ağırlık (gr/cm³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2,54	1,7-3,5	69-72
S	2,48	2,0-4,5	85
C	2,48	1,7-2,8	70
CEM-FİL	2,7	-	80

2.2.5 Betonda lif kullanımı

Çekme dayanımı düşük olan geleneksel beton aynı zamanda kırılğan bir yapı gösterir. Bu negatif özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla betona lif takviyesi yapılır. Lif takviyesi yapılan betonun çekme dayanımı artmakta ve bunun neticesinde sünekliği de istenilen ölçüye gelmektedir. Lifli betonlar üç grupta incelenebilmektedir.

- Çelik Lif Katkılı Betonlar (SFRC): Çelik alaşımı, paslanmaz çelik, ya da karbon çeliğini ihtiva eder.
- Cam Lifi İçerikli Betonlar (GFRC): Bazik ortama direnç gösteren cam ihtiva eder.
- Sentetik Lif İçerikli Betonlar (Sentetik FRC): Polipropilen lifler ve farklı sentetik lifleri ihtiva eder.

Çimento matrisini kuvvetlendirmek maksadıyla karışıma lif takviyesi yapılır. Eklenen liflerin, gerilme altındaki çimento matrisindeki çatlak oluşumunu önlemesi ya da oluşacak çatlağı geciktirmesi, çatlağın hızını yavaşlatması ve ilerleyişini kontrol altında tutması amaçlanır. Lif eklenmesi ile darbe ve yorulma mukavemetleri artış göstermekte, büzülme olayı ise azalmaktadır. Betonun tokluğu ve eğilme dayanımı lifler sayesinde istenilen değerlere kadar yükseltilebilmektedir. Lif takviyeli betonun niteliklerini etkileyen en belirgin değişkenler matris ve lif arasındaki etkileşimdir. Bu ilişki;

- Lif türü
- Lif şekli
- Matrisin özelliği
- Lif yüzey durumu
- Lif dağılımı
- Lif muhtevası
- Yükleme hızı

gibi parametrelerden etkilenir (Çakır, 2013).

Dayanıklı, sünek bir yapıda, yüksek taşıma kapasitesine sahip ve düzgün yüzeyli bir beton üretimi amaçlandığında betona lif eklenmesi gerekmektedir. Normal betonda çatlak kontrolü yapılamazken, lifli bir betonda çatlağın ilerlemesi veya genişlemesi lif sayesinde engellenmektedir. İlk çatlak oluştuğundan sonra normal beton kırılacaktır. Bu kırılmayı engellemek için betona lif ilavesi yapılmaktadır. Uzun olmayan ve gelişi güzel konumlandırılmış liflerle takviye edilmiş betonda ise kırılma süreci çok sayıda aynı doğrultudaki çatlağın meydana gelmesiyle neticelenir. Beton içerisinde oluşan bir tek çatlağın kontrolü lif sayesinde oluşan küçük çatlaklarla sağlanır. Oluşan çatlak enerjisini

karşılaştığı ilk life aktarır ve lif bu çatlağın enerjisi ile küçük çatlaklar oluşmasını sağlar. Lif bu enerjiyi taşıyamadığı zaman kopacak ve enerjisini yeniden betona aktarır. Betonda devam eden bu çatlak enerjisini başka bir lifle karşılaşıp ona devreder. Bu olay yük devam ettikçe bu şekilde devam eder. Bu sayede tek bir çatlağın ilerleyerek genişlemesi engellenmiş olur ve paralel küçük çatlaklar oluşur. Oluşan bu küçük ve paralel çatlaklar elemanın sünekleştiğinin bir göstergesidir. Resim 3.1.'de lif içeren örnek üstünde anlatılan aynı doğrultudaki çatlaklar belirtilmiştir (Boğazkesen, 2011).



Fotoğraf 2.1. Lifli çimento esaslı kompozitte oluşan paralel çatlaklar
(Boğazkesen, 2011)

2.2.6 Lif özelliklerinin betonun özelliklerine etkisi

Lif içeren beton karışımlarının karakteristik nitelikleri; ilave edilen liflerin şekli, boyutu, karışımdaki oranı, narinlik olarak tanımlanan boy/çap değeri, hangi malzemeden meydana getirildiği ve oluşturma metotları gibi parametrelere bağlıdır. Bu sebepten lif içeren beton karışımları meydana getirilirken bu niteliklerin göz ardı edilmemesi önem taşımaktadır (Kurt, 2006).

2.2.6.1 Lif geometrisinin etkisi

Modern zamanda yuvarlak kesitli lifler yerine farklı türlerde lifler üretilmektedir. Bunlar arasında en çok çeşidi bulunanlar çelik liflerdir. Bu liflerin farklı şekillerde üretilmesindeki amaç beton ve lif arasındaki aderansı kuvvetlendirmektir.

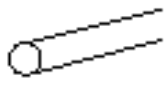
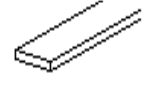





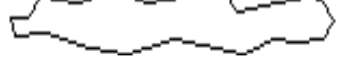



Yuvarlak kesitli çelik liflerin üretimi daha maliyetlidir. Aksine çelik levhaların kesilmesiyle elde edilen yassı kesitli liflerin üretim maliyeti ise düşüktür.

İçeriğinde oransal olarak çok lif bulunduran karışımlarda, taze beton karışımında bulunan liflerin topak bir hal alması ve liflerden ötürü işlenebilirliğin azalması, problem oluşturur. Bu problemin çözümü için, su ile temasında veya herhangi bir darbeye özelliğini kaybederek kopabilecek bir kimyasal ile belli bir sayıdaki lifin birbirine tutturulması metodu uygulanmıştır. Böylece işlenebilirliğin aşırı azalmasının önüne geçilmiş ve topaklanmanın oluşmasına engel olunmuştur. Kullanılan bu metot ile taze betonun işlenebilirlik özelliği ufak bir miktarda azalır ve karma esnasında kimyasalın erimesiyle bütün lifler tek tek beton içerisinde yayılır (Ekincioğlu, 2003). Çizelge 2.7.'de değişik çelik lif türlerine ait örnekler gösterilmiştir (Sarı, 2016).

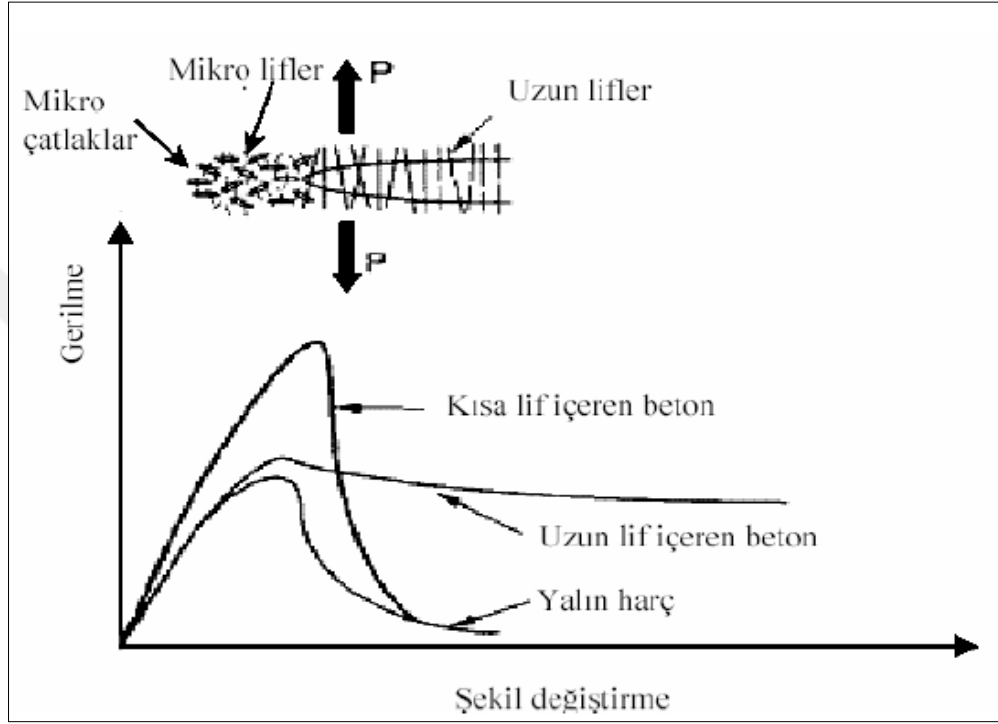
2.2.6.2 Lif uzunluğunun etkisi

Lif eklenmiş betonun niteliklerine değiştiren önemli değişkenlerin başında lif boyu yer alır. Uzunluğu az olan lif eklenmiş betonlar daha fazla gerilme değerlerine erişmiş fakat biçim değiştirme konusunda istenilen performansı sergileyememiştir. Uzun lif içeren kompozitler ise yüksek gerilme değerlerine erişememiş fakat daha büyük şekil değiştirme performansı sergileyerek betonun enerji absorbe etme özelliğini daha da arttırmışlardır. Bu durumun nedeni ise betondaki çatlakların çok küçük boyutlarda ortaya çıkmasıdır. Uzun lifler çok küçük boyuttaki çatlaklara ulaşamazlar ve çok küçük boyutlu çatlakları önleyemezler. Fakat beton kırılma gösterdiği esnada uzun lifler çatlaklar arası köprüler oluşturarak betonun nihai kırılmasına müsaade etmez ve betona daha çok süneklik kazandırır. Kısa lifli betonlarda gerilme değerinin daha büyük olmasının sebebi, ilk çatlak oluşumu için daha büyük gerilmeler gerektirmesidir. Çünkü mikro çatlakları engellemede daha etkindirler.

Çizelge 2.7. Değişik çelik lif türleri (Sarı, 2016)

Kesit	Yuvarlak	
	Yassı	
	Yassı Yuvarlak	
Şekil ve Deformasyonlar	Düz	
	Dalgalı	
	Kancalı Uçlu	
	Genişletilmiş Uçlu	
	Çarpık	
	Yassı Uçlu	
	Deforme Edilmiş	
	Zikzak Biçimli	

Uzun lifler mikro çatlakların meydana geldiği alana yakın değil ise mikro çatlakların oluşumunu engelleyemezler ancak çatlakların makro çatlaklara dönüşmesinden sonra uzun lifler etkin olmaya başlayarak kompozitin enerjiyi absorbe etme yeteneğini artırır. Şekil 2.2.'de çatlak köprülemesine değişik lif uzunluklarının etkisi gösterilmiştir (Sarı, 2013).



Şekil 2.2. Çatlak köprülemesine değişik lif uzunluklarının etkisi (Sarı, 2013)

2.2.6.3 Lif narinlik oranı ve lif miktarının etkileri

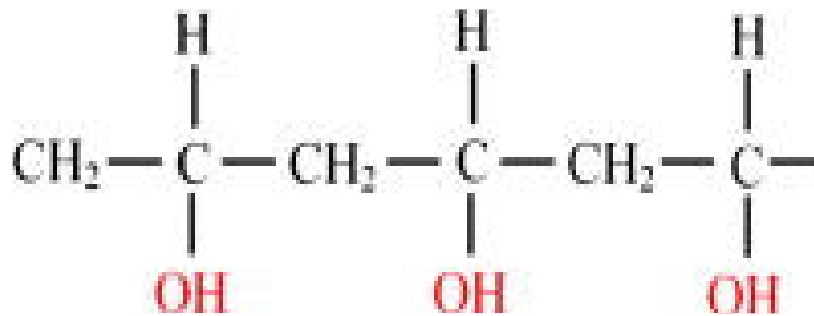
Lif eklenmiş kompozit malzemeler alanında yapılan araştırmalara göre beton içerisine karıştırılabilecek lif yüzdesi hacimsel olarak %0.5–%2.5 arasında olabilir. Yapılan çalışmalar neticesinde takviye edilecek lifin betona maksimum fayda sağlaması amaçlandığında olarak hacimsel oranın %1–%2 aralığında olması gerektiği öngörülmüştür. Bu değer altındaki miktarda eklenen liflerin betonun niteliğine ekstra fayda sağlamayarak, normal beton özelliklerinde kalmasına sebep olmaktadır. Bu durumun oluşmasına sebep olan olay ise yüksek oranda eklenmiş liflerin karışım esnasında topaklaşıp liflerin heterojen bir yapıda dağılmasıdır. Bu duruma paralel olarak da beton içinde bazı zayıf alanlar ve hava boşlukları meydana gelmektedir.

Yerleştirme esnasında uygulanan vibrasyon liflerin dönmesine ve çeşitli istikametlerde sıralanmalarına sebebiyet vermektedir. Bu olay lifin narinlik oranıyla birlikte vibrasyon türü ve kalıp boyutuna bağlıdır. Bu nedenle lif eklenmiş betonların yerleştirilme işleminde dış vibrasyon uygulanmalıdır (Gençel, 2006).

2.3 PVA Lifler

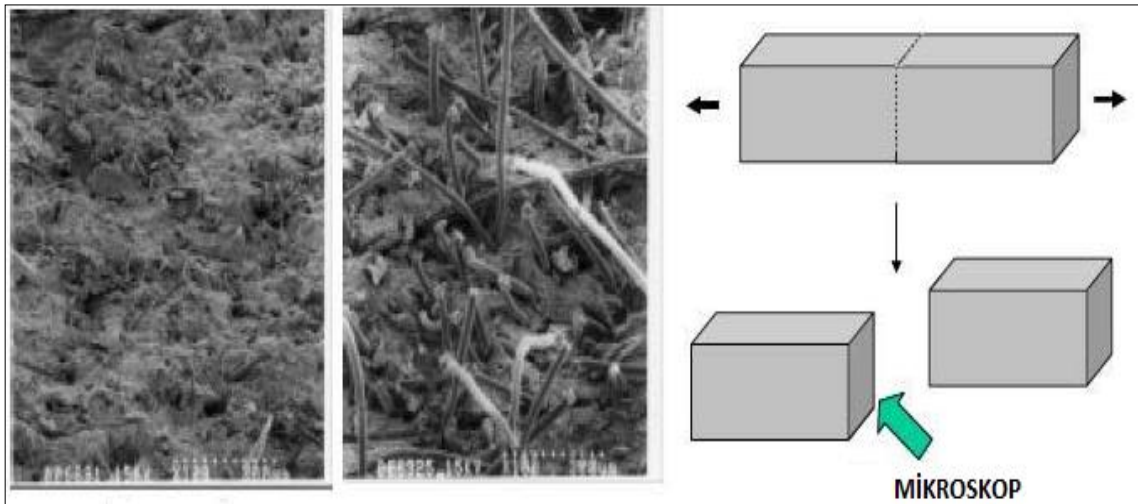
PVA (polivinil alkol) lifler yaklaşık olarak 50 yıl önce Japonya’da üretilen organik liflerdir. İlk üretim ile birlikte PVA lifler birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. PVA lifler yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahiptir. Bunun yanı sıra UV (ultraviyole) ışınları, kimyasal etkiler ve çevre şartlarına karşı üstün direnme özelliği gösterirler. Asbest kökenli liflerin sağlık açısından zararlı olduğu konusu hakkında yapılan çalışmalar, PVA liflerin asbest lifleri göre daha çok tercih edilmesine sebep olmuştur. Hidrofil niteliği taşıması ve bu durumun hidrasyon ve kür kademelerinde matrisle arasında moleküler bağ oluşmasını sağlaması PVA liflerin başka liflere karşı üstün özellikleri arasındadır. Yüksek elastisite modülü, bağ direnci ve eğilme dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı bakımından PVA lif takviyeli kompozitlerin yüksek performans göstermesini sağlar.

Polivinil alkoller, polivinil asetatların sulu asit veya alkali ile reaksiyona maruz bırakılarak bileşenlerine ayrılması sonucu meydana gelir. Hidroksil grubu ihtiva eden PVA’lar ile moleküller kimyasal reaksiyona girerek çimento matrisi ile arasındaki bağın güçlenmesini sağlarlar. PVA lifler yoğunluğu 1200–1300 kg/m³ değerinde olan ve partikül halinde bulunan PVA’ların işlenmesi ile ortaya çıkar. Şekil 2.3.’de PVA lifin molekül durumu verilmiştir.



Şekil 2.3. PVA lifin molekül durumu (Yonar, 2014)

PVA lifler yüksek bağ dayanımı ve ekstra ince olmalarından ötürü yüksek yayılım gösterirler. Bu sebeple kuruma büzülmesi çatlaklarına açılmadan engel olurlar. Yapılan deneyler neticesinde PVA liflerin 20 yıl boyunca herhangi bir deformasyona uğramadıkları anlaşılmıştır. Kuvvetli alkali ortamlarda PVA lifler Polipropilen ve naylon liflere kıyasla daha çok performans sergilerler. PVA liflerin özgül ağırlıkları sudan daha büyük olduğu için karıştırma, pompalama ve yüzey sonlama işlemleri esnasında karışım içinde durumunu koruyarak yüzeye çıkmazlar. Yüzey sonlama işlemleri esnasında yatay kaldıkları için pürüzsüz bir yüzey elde edilir. PVA lifler, tünel yapımlarında, perde duvar yapımlarında ve lif donatılı çimentolu levhaların üretiminde tercih edilmektedirler. PVA liflerin ana maddesi olan PVA reçinesi Amerikan Gıda ve İlaç Kurulu tarafından da onaylanmıştır. PVA'nın kimyasal bileşenleri karbon, hidrojen ve oksijen olduğundan dolayı, yanma sırasında dioksin ve amonyak gibi tehlikeli maddeler meydana gelmez. PVA liflerin başka inorganik olmayan liflere göre fazla mukavemet ve elastisite modülü vardır. PVA lifler fazla eğilme dayanımları ve elastisite modülleri sayesinde çatlakların beton içinde yayılması konusunda olumlu etkilerde bulunurlar. PVA lifler üst seviyelerde lif-matris uyumu oluşturur ve meydana getirilmeleri sırasında liflerin üzerinde oluşacak olan bozulmalar ile lif-matris uyumunun daha kuvvetli hale getirilmesine imkan tanımaktadır. Resim 2.2.'de PVA lif eklenmiş ve polipropilen lif eklenmiş beton karışımının kırıldıktan sonraki mikroskop görünümü gösterilmektedir (Yonar, 2014).



Fotoğraf 2.2. PVA ve polipropilen lifli beton karışımlarının mikroskop görüntüsü (Yonar, 2014)

PVA lif eklenmiş kompozitler hakkında yapılan araştırmalar sonucunda, bahsi geçen kompozitlerin eğilmede çekme dayanımlarının normal betonlara göre çok yüksek seyrettiği, enerji yutma kabiliyetlerinin fazla olması sebebiyle fazlasıyla esnek davranış gösterdikleri belirlenmiştir (Kurt, 2006).

Boyutsal olarak farklı iki tip PVA life ait görüntüler Resim 2.3.'te gösterilmiştir (Boğazkesen, 2011).



Fotoğraf 2.3. Farklı boyutlardaki PVA lifleri (Boğazkesen, 2011)

2.4 Tasarlanmış imento Esaslı Kompozitler (TEK)

Dünyadaki birçok ülke kalkınma sorunları ile mücadele etmektedir. Bu mücadelenin sonuçları, gelişmekte olan ve hızlı büyüyen ekonomiye sahip ülkelerde daha net görülmektedir. Karayolları, havaalanları, köprüler, yeraltı toplu taşıma sistemleri vb. gibi kamu yapıları hızlı büyüyen ekonomilerin ticaret ve yabancı yatırımları arttırmada ki en önemli unsurlarındandır. Dolayısıyla, bu tür yapılar ekonomik kalkınmanın temel taşlarından biri olarak kabul edilebilir (Yücel ve Kkarıslan, 2016).

Kamu yapıları, Avrupa standartlarına göre minimum 75 yıl hizmet ömrüne sahip olmalıdır. (Alexander ve Stanish, 2005) Ancak, deneyimler, yapıların 20 ila 30 yıl kullanım ömrünün ardından mekanik yükleme ve çevresel koşulların etkisiyle bozulmaya başladığını göstermiştir (Mehta ve Burrows, 2001). Yapıların kullanım ömrünün kısaltılması, bozulan yapıların onarımı ve değiştirilmesi, serbest gazlar ve

yakıt tüketimi gibi olumsuz etkilerin potansiyeli nedeniyle çok önemlidir. Ayrıca, bozulmuş yapıların onarımı/güçlendirilmesi çok maliyetlidir. Son yıllarda, mevcut yapıların onarımı için ayrılan bütçe, yeni yapıların inşası için gerekli olan bütçeyi aşmıştır (Vecchio ve Bucci, 1999).

Örneğin, Avrupa'daki köprülerin bakımı için yıllık olarak harcanan para 1 milyar doların üzerindedir (Raupach, 2006). Bu bilgiler ışığında, mekanik yüklere ve çevresel koşullara karşı etkili yeni bir yüksek performanslı inşaat malzemesi geliştirmek kaçınılmaz bir ihtiyaç olmuştur. Michigan Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar sonucunda, yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozit malzeme geliştirilmiştir. Bu malzemeler "Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (TÇEK)" olarak adlandırılır. TÇEK birçok açıdan orta ve yüksek dayanımlı betona benzer. Örneğin, TÇEK'in basınç dayanımı 30 ila 100 MPa olabilir. Bununla birlikte, diğer normal ve yüksek performanslı kompozit malzemelerden farklı olarak, TÇEK'in gerilme kapasitesi oldukça yüksektir (yaklaşık %3 ila %5) (Li, 1998; Li vd, 2001). Birçok sünek malzemenin çekme gerilme kapasitesi yaklaşık %6 ile %8 olduğu için TÇEK sünek bir malzeme olarak düşünülebilir. TÇEK'in çekme gerilme kapasitesi, geleneksel betonun çekme gerilme kapasitesinden yaklaşık 300-500 kat daha yüksektir (Li, 1998).

Öte yandan, TÇEK ağır eğilme yükleri altında sünek davranış sergiler (Li, 1997; Li ve Kanda, 1998). TÇEK tarafından gösterilen yüksek sünekliğin temel nedeni, ilk çatlak oluşumundan sonra gerilme sertleşme davranışdır (Li ve Kanda, 1998). Bu davranış, mikro mekanik tabanlı tasarımla mümkündür. Lif, matris ve alra yüzey arasındaki etkileşimin kontrolü ile yüksek performanslı kompozit malzemeler elde edilir (Li, 2003). TÇEK'e, zorlanma sertleşme davranışı kazandırmak için nispeten düşük miktarlarda, tipik olarak hacimce %2 kısa, süreksiz PVA lifi eklenir.

Genel olarak, TÇEK kiriş, sütun ve perde duvarı gibi betonarme elemanlarda onarım malzemesi olarak kullanılmıştır ve bu da dayanıklılıklarını arttırmaktadır (Li ve Kanda, 1998). Ayrıca Japonya, Kore, İsviçre, Avustralya ve ABD'de kaplama malzemesi olarak TÇEK kullanılarak istinat duvarı, baraj, köprü güvertesi ve kaldırım uygulamalarının onarımı yapılmıştır (Srinivasa ve Venkatesh, 2014). Bununla birlikte TÇEK'in tasarlanmasıyla can kaybının azalması ve ekonomik ürünlerin ortaya

çıkarılması amaçlanmıştır (Yang vd, 2008; Yang vd, 2009). Bu nedenle, TÇEK'i kaplama malzemelerinin özelliklerine göre analiz etmek çok önemlidir.

TÇEK'in dayanıklılık performansını artıran en önemli faktör TÇEK'te kullanılan farklı lif tipleridir (Maalej vd, 2007). TÇEK'te polivinil alkol (PVA) ve polietilen (PE) gibi lifler kullanılabilir. Ancak, TÇEK üretiminde genellikle PVA lifi kullanılır. Çünkü PVA lifi, PE liften daha ekonomiktir (Kına ve Türk, 2017). PVA lifinin PE lifine göre daha ekonomik olmasına ve daha yüksek mekanik özellikler sergilemesine rağmen, TÇEK karışımlarında PVA lifi kullanmak hala ekonomik sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunlar TÇEK kullanımını sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle araştırmalar TÇEK'in daha düşük oranlı PVA lifi ile üretilmesini amaçlamaktadır (Yücel vd, 2018). Ayrıca PVA lifi 1600-2500 MPa gibi yüksek bir çekme dayanımı ve %6 birim uzamaya sahiptir (Kına ve Türk, 2017). TÇEK'in bu durumu, kendi kendini kontrol eden çatlak genişliğinin özelliğini göstermektedir (Wang and Li, 2007). PVA lifinin çimento ile etkileşimi incelendiğinde, PVA lifleri çimento matrisinde gerginlik yerine kırılmaya eğilimlidir (Li vd, 2001). Bu nedenlerden dolayı, hacimce %2 PVA lifi kullanılarak üretilen TÇEK'ler günümüzde daha çok tercih edilmektedir (Kunieda and Rougo, 2006).

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Karışım Oranları

3.1.1 Çimento

TÇEK ve mevcut beton (MB) karışımlarında, özgül ağırlığı 3.06 ve Blaine inceliği 325 m²/kg olan ASTM Tip I çimentoya benzer normal CEM I Portland Çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de görülmektedir.

3.1.2 Uçucu kül

Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını artırmak, hidrasyon ısısını azaltmak, su geçirimsizliğini azaltmak için kullanılan mineral katkılardan biri de uçucu küllerdir. Uçucu küller içerdiği CaO oranının %10’un altında ya da üstünde olmasına göre C ve F sınıfı olarak ikiye ayrılır. %10 üzerinde olanlar C sınıfıdır ve kendiliğinden bağlayıcı özelliğe sahiptir. %10’un altında olanlar ise F sınıfıdır ve sadece puzolanik özellik gösterebilmektedir (Erdoğan, 2003). TÇEK karışımında ASTM C 618 (ASTM, 2003) gereksinimlerine uygun, %1.64 kireç içerikli F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Çizelge 3.1.’de Portland Çimentosu ve uçucu kül malzemesinin kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

3.1.3 Kuvars kumu

Yaygın uygulamalar için yerel kaynaklı normal boyutta agregadan TÇEK üretmek çok önemlidir. Bu amaçla, TÇEK üretiminde yerel kaynaklardan maksimum agrega boyutu 400 µm olan ince kuvars elde edilmiştir. Kullanılan kuvars kumunun su emme kapasitesi %0.3 ve özgül ağırlığı 2.60’dır.

Çizelge 3.1. Portland çimento ve uçucu külün kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri

Kimyasal İçerik (%)	Çimento	Uçucu Kül
CaO	61.43	1.64
SiO ₂	20.77	56.22
Al ₂ O ₃	5.55	25.34
Fe ₂ O ₃	3.35	7.65
MgO	2.49	1.80
SO ₃	2.49	0.32
K ₂ O	0.77	1.88
Na ₂ O	0.19	1.13
Kızdırma Kaybı	2.20	2.10
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	29.37	89.21
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık	3.06	2.31
Blaine İnceliği (m ² /kg)	325	290

3.1.4 PVA lif

Bu çalışmada TÇEK üretiminde birkaç çeşit lif kullanılmış olmasına rağmen PVA lifi kullanımına, mikromekanik prensiplere dayanarak karar verilmiştir. PVA lifleri, olağanüstü kompozit performansı olması nedeniyle dikkat çekmiştir. Çalışmada kullanılan PVA lif boyutları 8 mm uzunluğunda ve 39 µm çapında, yoğunluğu ve nominal çekme dayanımı ise sırasıyla 1300 kg/m³ ve 1620 MPa'dır. Lif/matris ara yüz bağlanma kuvvetini azaltmak için, PVA lifinin yüzeyi ağırlıkça %1.2 hidrofobik yağ ile kaplanmıştır.

3.1.5 Kaba ve ince agregası

Tabakalı numunelerin elde edilebilmesi için MB olarak kullanılacak olan beton karışımında 0-16 mm tane boyutuna sahip kaba ve ince kırmataş agregası yığını kullanılmıştır. Kaba ve ince agregaların tanımı standartlarda belirtilmiştir. Türk Standartlarına (TS 706 EN 12620, 2003; TS 802, 1985) göre 4.00 mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçebilen agregalar ince agregası, elek üzerinde kalan agregalar ise kaba agregası olarak adlandırılır. İnce agregası için kullanılan eleğin alt sınır boyutu 0.25 mm' dir. Kaba agregası için ise üst sınır 63 mm' dir (Erdoğan, 2003).

3.1.6 Süper akışkanlaştırıcı

TÇEK karışımlarının işlenebilirliğini geliştirmek için, yüksek oranda su azaltıcı bir katkı maddesi (1.1 özgül ağırlığa ve %40 katı içeriğe sahip aktif bir bileşen olarak HRWR-polikarboksilat (eter) kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı malzeme MB karışımında da kullanılmıştır.

3.1.7 Hava sürükleyici katkıları

Dış ortama maruz kalan beton en üst seviye kalitede dahi olsa tekrarlı donma çözünme etkisinde dayanıklılığını kaybeder. Soğuk hava şartlarına maruz kalacak betonların istenen dayanıklılığı göstermesi için beton içerisine hava sürükleyici katkıları eklenir. Hava sürüklemek için ilave edilen katkı malzemesi genellikle betondaki çimento ağırlığının %0.01'i civarındadır. Bu oran katkı malzemesinin cinsine göre değişiklik gösterebilir (Erdoğan, 2003). MB karışımında burada anlatılan hava sürükleyici katkı kullanılmıştır.

3.1.8 Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ve mevcut beton karışım oranları

Tüm TÇEK karışımlarının malzeme miktarları, PVA lif içeriği hariç aynıdır. PVA lifinin TÇEK'in mekanik, boyutsal stabilite ve üstyapı kaplaması olarak performans özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için TÇEK üretiminde hacimce %1.75, %1.50, %1.25 ve %1.00 gibi farklı lif oranları kullanılmıştır. Karışım isimleri, PVA lif içeriğine göre %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı), %1.75PVA-TÇEK, %1.50PVA-TÇEK,

%1.25PVA-TÇEK ve %1.00PVA-TÇEK olarak belirlenmiştir. TÇEK'ten önce yazılan sayılar, her bir karışımın PVA lif içeriğine karşılık gelmektedir. Mevcut beton (MB) olarak adlandırılan ve hali hazırda kullanılan rijit üstyapı kaplamasını ifade eden beton karışımı ise 28 günlük basınç dayanımı 30 MPa olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm TÇEK ve MB karışımlarının oranları Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. TÇEK ve MB karışımlarının oranları

Malzeme (kg/m³)	%2.00PVA- TÇEK (Kontrol karışımı)	%1.75PVA- TÇEK	%1.50PVA- TÇEK	%1.25PVA- TÇEK	%1.00PVA- TÇEK	MB
Portland Çimentosu	566	566	566	566	566	400
Uçucu Kül	680	680	680	680	680	-
Su	331	331	331	331	331	180
Kuvars Kumu	453	453	453	453	453	-
HRWR	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	1.8
PVA	26.00	22.75	19.50	16.25	13.00	-
Su / Bağlayıcı	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.45
Kaba Agregası	-	-	-	-	-	920
İnce Agregası	-	-	-	-	-	900
Hava Sürükleyici Katkı	-	-	-	-	-	0.43

3.2 Test Yöntemleri

3.2.1 Basınç dayanımı

Her TÇEK karışımından on iki kübik numune (her yaş için 6 örnek) 50 mm'lik küp boyutlarında alınmıştır. Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve plastik torbalarda nem 95 ± 5 bağıl nemde, 7 gün boyunca 23 ± 2 °C sıcaklıkta kurlenmiştir. Numuneler daha sonra test gününe kadar 23 ± 2 °C sıcaklıkta 50 ± 5 bağıl nemde, 23 °C sıcaklıkta kurlenmiştir. ASTM C 39 (ASTM, 2003)'a uygun olarak, basınç testi 3000 kN kapasiteli test makinesi kullanılarak kübik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 3.1.). TÇEK kübik numuneleri, 7 ve 28 günlük zamanlarda basınç dayanımı ölçümü için test edilmiştir.



Fotoğraf 3.1. Basınç dayanım test düzeneği

3.2.2 Eğilme dayanımı

TÇEK karışımının eğilme performansını ölçmek için, üretilen her TÇEK karışımından 360x75x50 mm boyutlarında on iki prizmatik numune (her test yaşı için 6 numune) alınmıştır. TÇEK prizmaları ilk önce temizlenmiş ve daha sonra eğilme mukavemeti üniversal test sistemi kullanılarak yapılmıştır. 0,005 mm/s yükleme hızında kapalı devre kontrollü malzeme test sisteminde dört nokta eğilmede çekme testi yapılmıştır. Yükleme çerçevesinin kapasitesi 100 kN değerinde seçilmiştir (Fotoğraf 3.2.).



Fotoğraf 3.2. Eğilme dayanımı test düzeneği

Numune dönüşleri ve destek yerleşimleri gibi yabancı deformasyonları ortadan kaldırmak için dört noktalı bir eğilme yükleme armatürü iyileştirilmiştir. Eğilme yükünün açıklık uzunluğu 101 mm merkez açıklık uzunluğu ise 304 mm'dir. Eğilme deneyleri sırasında, bilgisayardaki veri kayıt sistemine yük ve orta noktadaki sehim yazılmıştır. Numunenin eğilme deformasyonunu ölçmek için test düzeneğine LVDT sabitlenmiştir.

3.2.3 Kuruma rötresi testi

ASTM C 157 (ASTM, 2004)'ye uygun olarak, çubuk numunelerin kuruma büzülmesi, üç adet 285x25x25 mm prizmatik numuneler kalıpta bir gün sonrasında ise kireç doymuş suda 27 gün bekletilen sonra 112 gün boyunca boy değişimleri ölçülmüştür (Fotoğraf 3.3.). Tüm TÇEK karışımları kalıplara dökülmeden önce çubukla aynı eksenli kalıplara vida takılmıştır. Kuruma büzülme numuneleri laboratuvarında 23 ± 2 °C'de ve $\%50 \pm 5$ bağıl nemde saklanarak belirli aralıklarda boy değişimleri belirlenmiştir.



Fotoğraf 3.3. Kuruma rötresi test düzeneği

3.2.4 Kısıtlanmış rötire testi

Yapılarda rötire nedeniyle oluşan çatlaklar yapılar için önemli bir problemdir. Rötirenin yapılar üzerine olumsuz etkilerini azaltmak için betonda farklı yapı malzemeleri (lif, rötire azaltıcı katkı maddeleri) kullanılır ve farklı çekme testleri uygulanır (Yücel, 2014; Ulukaya, 2008). Bu çalışmada, mevcut kaplama ve kaplama malzemesini simüle etmede ve plastik rötire çatlakları ile sertleştirilmiş beton çatlaklarını değerlendirmede en yaygın yöntem olarak bilinen kısıtlanmış rötire testi uygulanmıştır (Ulukaya, 2008). Kısıtlanmış rötire testinde halka şekilli kalıplar kullanılmıştır. Kalıbın iç kısmı genellikle metaldir ve büzülme sırasında sınırlayıcı bir özellik gösterir. Çekme gerilmeleri oluşur ve bu gerilmeleri çatlak oluşumu takip eder. Gerilme dağılımı tek tip olmadığı için uygulama karşılaştırma amaçlı birkaç kez tekrar edilir (Ulukaya, 2008). Emniyet halkasının iç çapı 280 mm, dış çapı 305 mm ve yüksekliği ise 140 mm'dir. Hazırlanan TÇEK karışımları, emniyet halkası etrafında 25 mm kalınlığında dökülmüştür. Dış kalıp 24 saat sonra çıkarılmıştır. Halkanın üst kısmı silikon esaslı sızdırmazlık maddesi ile kaplanarak 50 ± 5 bağıl nem ve 23 ± 2 °C sıcaklıktaki çevre koşullarında bekletilmiştir. Daha sonra, çatlağın başlangıç zamanı ve zamanla çatlak ağzındaki genişliğin gelişimi kaydedilmiştir. Son olarak, her 24 saatte bir farklı yerlerde 28 gün boyunca çatlak dağılımı, çatlakların sayısı ve çatlakların genişliği el mikroskobu ile ölçülmüş ve ortalama değer hesaplanmıştır.

3.2.5 Tabakalı eğilme dayanımı testi

Bu test yönteminde ilk önce 400x75x80 mm boyutlarında MB dökülmüştür. Bu numuneler 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca kireçle doymuş su içinde kürlenmiştir. Bunun sonrasında alt tabaka olarak kullanılacak bu numuneler kürlenme odasında %50 bağıl nem ortamında 23 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Bu süreç yaklaşık olarak 5 ay boyunca devam ettirilmiştir. Daha sonra MB numuneleri elmas uçlu bir testere kullanılarak 30 mm kalınlığında kesilmiştir. Bunun neticesinde 400x75x30 mm boyutlarında MB numuneleri elde edilmiştir. TÇEK kaplama karışımları, her bir lif oranı (PVA lif içeriği %2, %1.75, %1.5, %1.25, %1) için MB numunelerinin üzerine 50 mm kalınlığında dökülmüştür. Bu sürecin sonunda toplam 30 numune elde edilmiştir. TÇEK/MB kompozit numuneleri 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve plastik torba içerisinde %95±5 bağıl nem ve 23±2 °C derecedeki sıcaklıktaki koşullarda 7 gün boyunca kürlenmiştir. Numuneler daha sonra test gününe kadar %50 bağıl nemde ve %23 °C derece sıcaklıkta hava küreğine maruz bırakılmıştır. TÇEK/MB kompozit numuneler üzerinde dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Dört noktalı eğilme testi, 100 kN'luk bir yükleme çerçevesine ve 0.005 mm/s'lik bir yükleme hızına sahip kapalı döngü kontrollü bir çerçeve üzerinde gerçekleştirilmiştir. Orta noktadaki sehim, numunelere yerleştirilen LVDT (Linear variable differential transformer)'ler aracılığıyla kaydedilmiştir.

3.2.6 Tabakalı yansıma çatlağı testi

Kaplama genellikle yüzey kalitesini artırmak için uygulanan bir işlemdir. Aynı zamanda köprülerde, karayollarında ve park alanlarında mevcut kaplamanın güçlendirilmesi için kullanılır. Bozulmuş kaplamalar sürüş konforu ve güvenlik gibi konularda olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Yücel, 2013). Orijinal kaplamanın birleşim noktalarında yansıma çatlakları görülebilir. Kaplama malzemesinin yansıma çatlağı potansiyelini belirlemek için kompozit kirişler kullanılmıştır. Eğilme dayanımı testinde olduğu gibi 400x75x30mm boyutlarında MB numuneleri elde edilmiştir. MB numuneleri üzerlerindeki çatlağı simüle etmek için merkezden kesilmiştir. Kaplama malzemelerinin dökülmesinden önce, çentik oluşturmak için her bir çatlak boyunca su geçirmez bant kullanılarak dikey çatlaklar oluşturulmuştur. TÇEK karışımları MB numunelerinin üzerine 50 mm kalınlığında dökülmüştür. TÇEK/MB kompozit numuneleri 24 saat

sonra kalıptan çıkarılmış ve plastik torba içerisinde 95 ± 5 bağıl nem ve 23 ± 2 °C sıcaklıktaki koşullarda 7 gün boyunca kürlenmiştir. Numuneler daha sonra test gününe kadar 50 bağıl nemde ve 23 °C sıcaklıkta hava k r ne maruz bırakılmıştır. Kompozit kirişlere 28 gün sonunda dört nokta eğilme testi uygulanmış ve 0.005 mm/sn yükleme hızında maksimum eğilme yükleri  l lm şt r. Orta noktadaki sehim değerlerinin ölümü, numunelere yerleştirilen LVDT ile yapılmıştır. Eğilme yüklenmesinden sonra, T EK malzemelerinde çatlak yayılmaları gözlenmiştir.



BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı, farklı PVA lif oranlarına sahip TÇEK üretmek ve hacme göre %2 PVA lif oranı ile üretilen literatüre göre “standart TÇEK karışımı” olarak bilinen TÇEK ile karşılaştırmaktır. Karşılaştırma temel mekanik, boyutsal stabilite ve rijit üstyapı kaplama performansı açılarından olup, öncelikle TÇEK karışımlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kuruma rötresi testleri yapılmıştır. Farklı PVA lif oranıyla üretilen TÇEK karışımlarının kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğini belirlemek için ise kısıtlanmış rötre, tabakalı eğilme dayanımı ve tabakalı yansıma çatlağı testleri yapılmıştır.

4.1 Basınç Dayanımı

TÇEK karışımlarının 7 ve 28 gün arasındaki basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 4.1.'de özetlenmiştir. Test sonuçlarına göre, TÇEK karışımlarının PVA lif içeriğinin düşük farkları nedeniyle, basınç dayanımı değerlerinde küçük farklılıklar gözlenmiştir. TÇEK karışımlarının basınç dayanımı, PVA lif içeriğinin azalması ile biraz artmıştır. Basınç dayanımı değerleri %2.00PVA-TÇEK karışımından %1.00PVA-TÇEK karışımına kıyaslandığında 7 ve 28 günlerde sırasıyla %8.65 ve %4.84 oranlarında yükselmiştir.

Çimento esaslı kompozitlere lif ilavesinin matristeki sıkışmış hava boşluklarının miktarını arttırdığı (Özbay vd., 2012) ve karışımın basınç dayanımını azalttığı bilinmektedir (Abu-Lebdeh vd., 2012; Jen vd., 2016). PVA lifleri hakkındaki bir başka çalışma da PVA lif oranının artmasının basınç dayanımı değerlerini azalttığını göstermektedir (Noushini vd., 2013). Bu nedenle, elde edilen basınç dayanımı testi sonuçları literatürdeki önceki çalışmalarla uyumludur. Ek olarak, basınç dayanımı açısından bakıldığında, daha yüksek basınç dayanımı nedeniyle tüm TÇEK karışımları %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı) yerine kullanılabilir.

Çizelge 4.1. TÇEK karışımlarının basınç dayanımı ve eğilme dayanımı test sonuçları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		Eğilme Dayanımı (MPa)	
	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
%2.00PVA- TÇEK (kontrol karışımı)	39.3	66.1	8.15	10.51
%1.75PVA- TÇEK	39.9	67.5	8.01	9.18
%1.50PVA- TÇEK	40.5	68.0	7.39	8.79
%1.25PVA- TÇEK	41.5	68.7	6.56	7.30
%1.00PVA- TÇEK	42.7	69.3	5.49	6.30

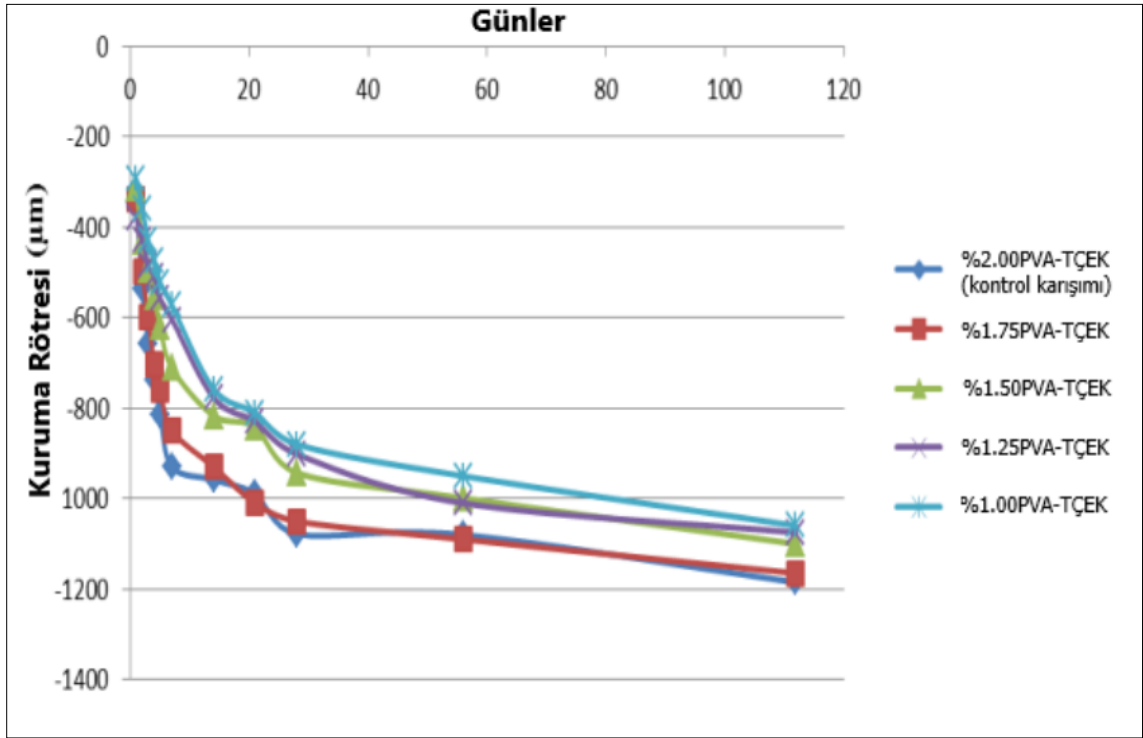
4.2 Eğilme Dayanımı

TÇEK karışımlarının eğilme dayanımı değerleri, 7 ve 28 gün için Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir. TÇEK karışımlarının eğilme dayanımı, PVA lif oranının artmasıyla artmıştır. Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi, eğilme dayanımı değerleri 7 günde 8.15 MPa ile 5.49 MPa ve 28 günde ise 10.51 MPa ile 6.30 MPa arasında değişmiştir. %2.00PVA-TÇEK kontrol karışımı, en yüksek PVA lif içeriği nedeniyle hem 7, hem de 28 gün boyunca en yüksek eğilme dayanımı değerinde olduğu görülmüş ve PVA lif içeriğinin azalmasıyla değerler azalmıştır.

4.3 Kuruma Rötresi Testi

Tüm TÇEK karışımlarının kuruma rötresi ölçümleri, Şekil 4.1.'de özetlenmiştir. Kuruma rötresi testi sonuçlarına göre, tüm TÇEK karışımları için benzer büzülme verileri elde edilmiştir. Kuruma rötresi değerleri 112 günde 1185 µm ila 1060 µm arasındadır. Bu değerler benzer olsa da, şekil 4.1.'de görüldüğü gibi 112 günde PVA lif içeriğinin azalmasıyla değerler az da olsa azalmıştır. Sonuç olarak, %2.00PVA-TÇEK (kontrol

karışımı) yerine tüm TÇEK karışımlarının kullanılması düşük kuruma rötresi değerleri nedeniyle uygundur.



Şekil 4.1. Rötres testi sonuçları

4.4 Kısıtlanmış Rötres Testi

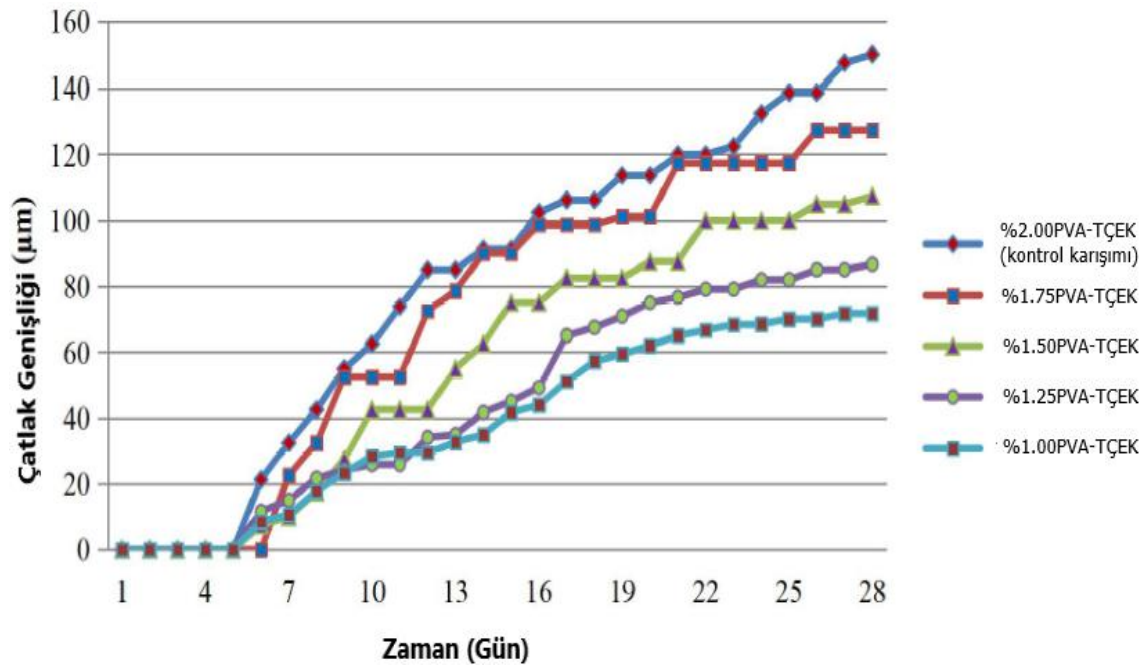
TÇEK karışımlarının kısıtlanmış rötres özelliği, bir çelik halkanın yanında dökülen halka kalıpları yardımıyla yapılmıştır. TÇEK karışımlarının, üst kaplama malzemeleri için çok önemli olan boyutsal stabilite özelliklerini belirlemek için kısıtlanmış rötres testi yapılmıştır. Kısıtlanmış rötres testinden elde edilen TÇEK karışımlarının ortalama, minimum ve maksimum çatlak genişliği Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre, %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı), %1.75PVA-TÇEK, %1.50PVA-TÇEK, %1.25PVA-TÇEK ve %1.00PVA-TÇEK numunelerinin ortalama genişlikleri 28 günde sırasıyla 72 µm, 87 µm, 108 µm, 128 µm, 150 µm olmuştur. %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı) ve %1.00PVA-TÇEK numunelerinin maksimum çatlak genişliği incelendiğinde, %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı) numunesinin (100 mikron) maksimum çatlak genişliğinin %1.00PVA-TÇEK numunesinin (200 mikron) maksimum çatlak genişliğinden iki kat daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Çatlakların

sayısı analiz edildiğinde, literatürdeki gibi PVA lifinin azalması ile çatlak sayısının azaldığı tespit edilmiştir (Yang vd, 2007).

Çizelge 4.2. TÇEK karışımlarının kısıtlanmış rötre testi sonuçları

	Çatlak Genişliği (µm)			Çatlak Sayısı
	Ortalama	En küçük	En Büyük	
%2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)	72	40	100	8
%1.75PVA-TÇEK	87	50	125	7
%1.50PVA-TÇEK	108	60	130	6
%1.25PVA-TÇEK	128	90	160	4
%1.00PVA-TÇEK	150	100	200	4

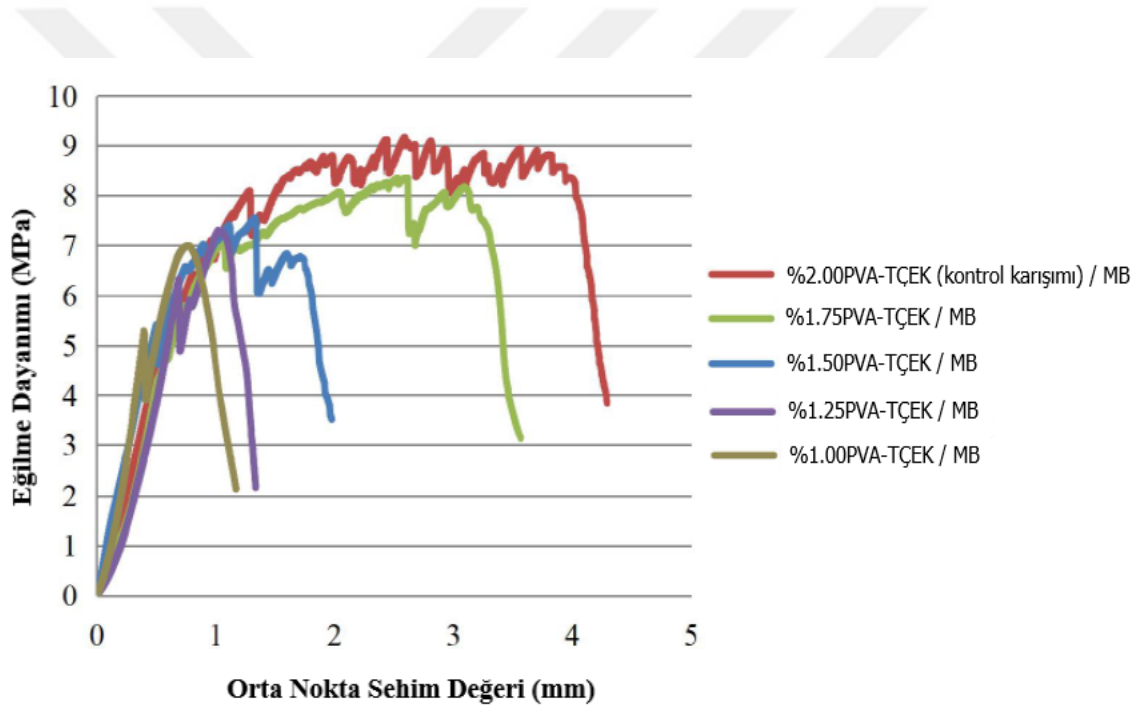
Ayrıca, 28 gün boyunca ölçülen çatlak genişlikleri, Şekil 4.2.'te gösterilmektedir. TÇEK karışımlarının çatlak genişliklerinin, TÇEK karışımlarında kullanılan PVA lif oranının azaltılmasıyla arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.2. TÇEK karışımlarının çatlak genişliği ölçümleri

4.5 Tabakalı Eğilme Dayanımı Testi

TÇEK/MB kompozit numunelerinin 28 gün sonunda eğilme davranışını belirlemek için dört nokta eğilme testi yapılmıştır. Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi test sonuçlarına göre, TÇEK/MB kompozit numunelerinde PVA lif oranının azaltılmasıyla eğilme dayanımı değerleri azalmıştır. TÇEK/MB kompozitlerinin eğilme dayanımı değerleri 9.2, 8.4, 7.9, 7.6 ve 7.2 MPa olarak belirlenmiştir. TÇEK/MB kompozit numunelerinin orta noktadaki sehim değerleri 4.0, 3.1, 1.9, 1.2 ve 1.0 mm olarak saptanmıştır. %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB kompozit numunesi ile karşılaştırıldığında %1.00PVA-TÇEK/MB kompozit numunesi, eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri için sırasıyla %21.7 ve %75 oranında azalmıştır.



Şekil 4.3. TÇEK/MB numunelerin eğilme dayanımı ve orta nokta sehim değerleri

Eğilme dayanımı testinden sonra TÇEK/MB kompozit numunelerinin elde edilen görüntüleri, Fotoğraf 4.1.'de gösterilmektedir. Daha az eğilme dayanımı değerine sahip olan TÇEK/MB kompozit numuneleri, daha düşük çatlak sayısına sahiptir.

%1.75PVA-TÇEK/MB ve %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB kompozit numunelerinde, Fotoğraf 4.1. (e) ve (d)'de görüldüğü gibi çoklu mikro çatlaklar oluşmuştur. Bununla birlikte, %1.50PVA-TÇEK/MB, %1.25PVA-TÇEK/MB ve

%1.00PVA-TÇEK/MB kompozit numunelerde çatlakların sayısı gözle görülür şekilde azalmıştır. Bu durum, TÇEK'in mikro-mekanik prensiplere göre tasarlanan şekil değiştirme sertleştirme özelliği ile açıklayabilir. TÇEK, mikro-mekanik tabanlı tasarımı nedeniyle şekil değiştirme sertleştirme davranışına sahiptir. Bu davranış, ağırlıkça %1.2 hidrofobik yağlama ile kaplanan TÇEK'te kullanılan PVA lifi sayesinde lif ve matris arasında şekil değiştirme sertleştirme performansı geliştirir (Yang vd, 2007; Li vd, 2002).



Fotoğraf 4.1. Eğilme dayanımı testi sonrası TÇEK/MB kompozitlerinin görüntüleri
% 1.00PVA-TÇEK/MB (a), % 1.25PVA-TÇEK/MB (b), % 1.50PVA-TÇEK/MB (c),
% 1.75PVA-TÇEK/MB (d), % 2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB (e)

4.6 Tabakalı Yansımaya Çatlağı Testi

MB betonunda oluşan çatlakların, yükleme altındaki yeni kaplama katmanına yansıtılıp yansıtılmadığını görmek için yansımaya çatlağı testi yapılmıştır. Fotoğraf 4.2.'de görüldüğü gibi yansımaya çatlağı testinden sonra, TÇEK/MB kompozit numunelerde PVA liflerinin azalmasının çatlak oluşumlarına sebep oldukları gözlemlenmiştir. Sadece %1.75PVA-TÇEK ve %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı) karışımları yansımaya çatlağı elimine edilebilmiş ve %1.75PVA-TÇEK/MB ve %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB örneklerinde sırasıyla; Fotoğraf 4.2. (d) ve Fotoğraf 4.2. (e)'de görüldüğü gibi çoklu mikro çatlaklar oluşmuştur. Kompozit örneklerin geri kalanı incelendiğinde, yansımaya çatlağı görülmüştür. Bu sonuç, PVA lif oranının azalmasının çatlak sayısının azalmasına neden olması ile açıklanabilir.

Çizelge 4.3.'de gösterilen test sonuçlarına göre, %1.75PVA-TÇEK/MB ve %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB kompozit numunelerinin maksimum eğilme yükleri ve orta noktadaki sehim değerleri sırasıyla 5706 N, 4885 N ve 3,0 mm, 2,4 mm olarak belirlenmiştir. Özellikle yüksek orta noktadaki sehim değerleri, alt tabaka betonunda bulunan çatlak oluşumunu desteklemiş, %1.75PVA-TÇEK/MB ve %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB kompozit numunelerinin üstyapı kaplaması üzerine çoklu mikro çatlaklar olarak yansıtılmıştır. Bununla birlikte, %1.50PVA-TÇEK/MB, %1.25PVA-TÇEK/MB ve %1.00PVA-TÇEK/MB kompozit numunelerinin maksimum eğilme yükleri ve orta noktadaki sehim değerleri sırasıyla 4203 N-3729 N- 3518 N ve 1,8 mm-1,3 mm-0,9 mm olarak belirlenmiştir.



a



b



c



d



e

Fotoğraf 4.2. Yansıma çatlak testi sonrası TÇEK/MB kompozitlerinin görüntüleri %1.00PVA-TÇEK/MB (a), %1.25PVA-TÇEK/MB (b), %1.50PVA-TÇEK/MB (c), %1.75PVA-TÇEK/MB (d), %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı)/MB (e)

Çizelge 4.3. TÇEK/MB numunelerinin eğilme yükü ve orta nokta sehim değerleri

Kompozit Numuneler	Maksimum Eğilme Yükü (N)	Orta Noktadaki Sehim (mm)
%2.00PVA-TÇEK(kontrol karışımı)/MB	5706	3.0
%1.75PVA-TÇEK/MB	4885	2.4
%1.50PVA-TÇEK/MB	4203	1.8
%1.25PVA-TÇEK/MB	3729	1.3
%1.00PVA-TÇEK/MB	3518	0.9

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu çalışmada TÇEK karışımları %1.75, %1.50, %1.25 ve %1.00 gibi farklı PVA lif içerikleri ile üretilmiştir ve hacimce %2 PVA lif oranı ile üretilen standart TÇEK karışımı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kurutma rötresi testleri yapılmıştır. Farklı PVA lif oranıyla üretilen TÇEK karışımlarının kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğini belirlemek için ise kısıtlanmış rötre, tabakalı eğilme dayanımı ve tabakalı yansıma çatlağı testleri uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar için sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Test sonuçlarına göre:

- Tüm TÇEK karışımları, yüksek basınç dayanımı, yüksek eğilme dayanımı ve düşük kuruma rötresi değerleri ile başarıyla üretilmiştir.
- TÇEK karışımlarının basınç dayanımı, PVA lif içeriğinin azalması ile belli bir oranda yükselmiştir.
- TÇEK karışımlarının eğilme dayanımı, PVA lif oranının artmasıyla artmıştır.
- Kuruma rötresi değerleri PVA lif içeriğinin azalması ile hafifçe azalmış ancak önemli seviyede bir değişim gözlenmemiştir.
- Basınç dayanımı ve kurutma rötresi açısından, %2.00PVA-TÇEK (kontrol karışımı) karışımının kullanıldığı yapılar veya uygulamalar için tüm TÇEK karışımlarının kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, eğilme dayanımı göz önüne alındığında, %1.00PVA-TÇEK için 28 günde 6.30 MPa sınırı gözlenmiştir; bu değer bütün TÇEK karışımları için en düşük eğilme dayanımı değeridir. Bu nedenle, tüm TÇEK karışımlarının 28. günde 6.30 MPa eğilme dayanımından daha düşük değerlerde eğilme dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılabilmesi anlaşılmıştır.
- Üretilen tüm TÇEK karışımlarının uygulamadaki belirlenen limitlere göre kolaylıkla kullanılabilmesi anlaşılmıştır.

- Kısıtlanmış rötre testi sonuçlarına göre, TEK karışımlarında kullanılan PVA lif oranının azaltılmasıyla TEK karışımlarının çatlak genişliğinin arttığı tespit edilmiştir.
- Tabakalı eğilme dayanımı test sonuçlarına göre, TEK/MB kompozit numunelerinin eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri, PVA lif oranının azaltılmasıyla azalmıştır. Ek olarak, %1.75PVA-TEK/MB ve %2.00PVA-TEK (kontrol karışımı)/MB kompozit örnekler üzerinde çoklu mikro çatlaklar oluşmuştur.
- Tabakalı yansımaya çatlağı test sonuçlarına göre, daha yüksek PVA lif oranına sahip TEK/MB kompozit rneklerinin (%1.75PVA-TEK/MB ve %2.00PVA-TEK (kontrol karışımı)/MB) rijit yol üstü kaplaması üzerinde çoklu mikro çatlaklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle, %2.00PVA-TEK (kontrol karışımı) ve %1.75PVA-TEK karışımları yansımaya çatlağını ortadan kaldırmıştır. Bununla birlikte, düşük PVA lif oranına sahip karışımlar (%1.50PVA-TEK, %1.25PVA-TEK ve %1.00PVA-TEK) yansımaya çatlaklarına neden olmuştur.
- Bu çalışmanın test sonuçları üstyapı kaplama performansı açısından değerlendirildiğinde, %2.00PVA-TEK (kontrol karışımı) karışımından daha yüksek performansa sahip olmamasına rağmen, %1.75PVA-TEK karışımının rijit yol üstyapı kaplama malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

Abu-Lebdeh, T.M., Fini, E. and Lumpkin, M., “Flexural and tensile characteristics of micro fiber-reinforced very high strength concrete thin panels”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(2), 184-197, 2012.

Alexander, M.G. and Stanish, K., “Durability design and specification of reinforced concrete structures using a multi-factored approach”, *CONMAT’05*, 2005.

Aral, M., Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2006

ASTM A 820, Standart Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete, *American Society for Testing and Materials*, U.S.A, 1996

ASTM C 157, Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, USA, 2004.

ASTM C 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, USA, 2003.

ASTM C 494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 1999.

ASTM C 618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for the use of mineral admixtures in portland cement concrete, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, USA, 2003.

ASTM C 618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, USA, 2016.

Boğazkesen, K., PVA Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2006

Çakır, C., Makrosentetik Ve Çelik Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2013.

Çomak, B., Farklı Beton Sınıflarının Görüntü İşleme Yöntemi İle Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2012.

Demiryürek B.E., Türkiye’de Hazır Beton Sektörü ve Sektördeki Büyüme, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Dilli, M.E., Hafif Agregalı İçeren Yalın ve PVA Lif ile Güçlendirilmiş Yapısal Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2015.

Ekincioglu, Ö., Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı- Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2003.

Erdoğan, T. Y., Beton, *ODTÜ Yayıncılık*, Ankara, 2003.

Erten K.M., Katkılı Betonların Aderans Dayanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2009.

Ezici, M., Farklı Koşullarda Dökülen Kolonlarda Vibrasyon ve Kür Koşullarının Değişiminin Beton Dayanıma Etkisi, *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adıyaman, 2016.

Gençel, O., Farklı Çelik Lif Tipi ve Miktarının Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 2006.

Gönen B. C., Hazır Beton Üretiminde Kaliteyi Etkileyen Parametrelerin Spss Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı*, Niğde, 2012.

Jen, G., Trono, W. and Ostertag, C.P., “Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: Development, properties and composite behavior”, *Construction and Building Materials*, 104, 63–71, 2016.

Kına, C., and Turk, K., “Self-Healing of Engineered Cementitious Composite Based on Micromechanics”, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 22(3), 115-126, 2017.

Kunieda M. and Rougo K., “Recent progress on HPFRCC in Japan”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 19-33, 2006.

Kurt, G., Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2006.

Li, VC., “Damage tolerance of engineered cementitious composites”, *in Advances in Fracture Research, Proc. 9th ICF Conference on Fracture*, Sydney, Australia, Ed. B.L.Karihaloo, Y.W. Mai, M.I. Ripley and R.O. Ritchie, Pub. Pergamon, UK, 619-630, 1997.

Li, VC., “Engineered cementitious composites – tailored composites through micromechanical modelling, in fiber reinforced concrete: present and the future”, *Eds. N. Banthia et. A., CSCE*, Montreal, 64-97, 1998.

Li, VC. and Kanda, T., “Engineered cementitious composites for structural applications”, *ASCE J. Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69, 1998.

Li, VC., Wang, S. and Wu, C., “Tensile strain-hardening behaviour of PVA-ECC”, *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492, 2001.

Li, V.C., “On engineered cementitious composites (ECC) – a review of the material and its applications”, *J. Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-230, 2003.

Maalej, M., Quek, S.T. and Zhang, J., “Behavior of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composites Subjected to Dynamic Tensile Loading and Projectile Impact”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 143–152, 2007.

Mehta, PK and Burrows, R.W., “Building durable structures in the 21st century”, *Conc Int*, 23(3), 57-63, 2001.

Noushini, A., Samali, B. and Vessalas, K., “Influence Of Polyvinyl Alcohol Fibre Addition On Fresh And Hardened Properties Of Concrete”, *Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers: HUSCAP*, 1-8, 2013.

Özbay, E., Şahmaran, M., Yücel, H.E., Lachemi, M. and Li, V.C., “Frost Resistance And Microstructure Of Engineered Cementitious Composites: Influence Of Fly Ash And Micro Poly-Vinyl-Alcohol Fiber”, *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 156-165, 2012.

Özbay, E., Şahmaran, M., Lachemi, M. and Yücel, H.E., “Effect of microcracking on the frost durability of high volume fly ash and slag incorporated ECC”, *ACI Materials Journal*, 110(3), 259-268, 2013.

Raupach, M., “Concrete repair according to the new European standard EN-1504”, *RWTH Aachen*, 2006.

Sarı, M., Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2013.

Srinivasa, CH and Venkatesh, D., “A literature review on engineered cementitious composites for structural applications”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(12), 531-537, 2014.

Şahin, M., Betonla Uyumlu Polipropilen Lif Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.

Türkmenoğlu Z.F. ve Varol O.O, Lifli Beton Türleri ve Kullanım Alanları, *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Adana, 2016.

TS 10513, Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1992.

TS 706 EN 12620, Beton Agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2003.

TS 802, Beton Karışım Hesap Esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1985.

TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-bilesim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

TS EN 206-1, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

Uçar, H., Kırmataşların Beton Agregasında Ve Hazır Beton Tesislerinde Kullanılma Kriterleri Örnek Uygulama: Sağlıklı Köyü Kalker Ocağı, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2008.

Ulukaya, S., Research on Shrinkage and Shrinkage Induced Cracking in Self Compacting Concrete, Master's Thesis, *İstanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology*, İstanbul, 2008.

Wang, S. and Li, V.C., "Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash", *Acı Materials Journal*, 104(3), 233-241, 2007.

Vecchio, F and Bucci, F., "Analysis of repaired reinforced concrete structures", *ASCE Str Eng*, 125(6), 644-652, 1999.

Yang E.H., Wang S., Yang, Y. and Li V.C., ‘Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites’, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), 181-193, 2008.

Yang, Y., Michael D. L., Yang E.H. and Li, V.C., “Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles”, *Cement and Concrete Research*, 39, 382–390, 2009.

Yardımcı, M., Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik Mekanik Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2007.

Yaşar, D., Naylon Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2011.

Yonar, Y., Geopolimer Çimentolu Ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2014.

Yücel, H.E. and Küçükarslan, Ö., “Effect of PVA Fiber Ratio on Mechanical And Dimensional Stability Properties of Engineered Cementitious Composites”, *Materials, Methods & Technologies*, 10, 595-601, 2016.

Yücel, H.E., Küçükarslan, Ö., and Kaya, Y., “The Effect of PVA Fiber Ratio on Rigid Pavement Overlay Performance of Engineered Cementitious Composites”, *IV. International Ege Composite Materials Symposium*, İzmir, Türkiye, 2018.

ÖZ GEÇMİŞ

Özge KÜÇÜKARSLAN 02.07.1990 tarihinde Kayseri’de doğdu. İlk orta ve lise eğitimini Kayseri’de tamamladı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden Haziran 2012’de mezun oldu. Eylül 2012’de Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2012-2015 yılları arasında Kayseri ilinde kontrol mühendisi olarak, 2015-16 yılları arasında Kayseri Şehir Hastanesi Projesi’nde teknik ofis mühendisi olarak çalıştı. Evlilik nedeniyle şehir değişikliği yaptı ve şu anda İstanbul ilinde ikamet etmektedir. 2016 yılından beri teknik ofis şefi olarak özel bir firmada çalışmaktadır.

