

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMERİK LİF KATKILI KOMPOZİTLERİN
DEFORMASYON SERTLEŞMESİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Nesim SOLMAZ

Ağustos, 2016

İZMİR

**POLİMERİK LİF KATKILI KOMPOZİTLERİN
DEFORMASYON SERTLEŞMESİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

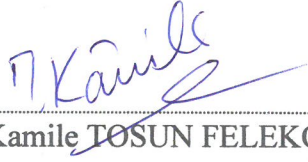
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı**

Nesim SOLMAZ

**Ağustos, 2016
İZMİR**

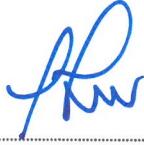
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

NESİM SOLMAZ, tarafından DOÇ. DR. KAMİLE TOSUN FELEKOĞLU yönetiminde hazırlanan “POLİMERİK LİF KATKILI KOMPOZİTLERİN DEFORMASYON SERTLEŞMESİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU

Yönetici



Doç. Dr. Semra TAZİCİ

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Serdar AYDIN

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca sahip olduğu bilgi birikimi ve güler yüzlü yaklaşımıyla bilim yolunda bana ışık tutan değerli danışmanım Doç. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU'na teşekkürlerimi borç bilirim.

Özellikle tez aşamasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU'na, İnş. Müh. Eren GÖDEK'e ve Ar. Gör. Muhammer KESKİNATEŞ'e şükranlarımı sunarım.

Eğitim hayatım boyunca imkanları elverdikçe bana her türlü desteği sağlayan aileme, özellikle eğitim konusunda bana sürekli rehberlik eden ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan abim Kenan SOLMAZ'a, beni yüksek lisans eğitimini almama ikna eden ve bana rahat çalışma ortamı sağlayan biricik eşim Semra SOLMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Nesim SOLMAZ

POLİMERİK LİF KATKILI KOMPOZİTLERİN DEFORMASYON SERTLEŞMESİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZ

Bu tezin amacı, iki farklı matris kullanılarak polimerik lif katkılı çimento esaslı kompozitlerin dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki davranışını zamana bağlı olarak araştırmaktır. Kompozitlerin matris fazında iki farklı kökünde mikro agrega (kireçtaşı ve silis tozu) ve üç farklı lif dozajında (hacimce yüzde 1,5, yüzde 2 ve yüzde 2,5) ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen lif kullanılmıştır. Literatürde çimento esaslı kompozitlerle kullanımı ender olan ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen liflerin diğer polimerik liflere göre üstün özellikleri bu tezin motivasyon kaynağı olmuştur. Söz konusu liflerin çapı 18µm, boyu 10 mm, dayanımı 3400 MPa'dır. Ayrıca matris boşluk yapısının kompozitlerin eğilme performansına etkisinin incelenmesi amacıyla aynı matrisler hacimce yüzde 6 oranında plastik tane ilavesi yapılarak tekrar üretilmiştir. Bu kapsamda 12 seri kompozit üretimi gerçekleştirilmiş ve iki farklı zamanda (kısa dönem, 28 gün ve uzun dönem, 180 gün) kompozitlerin yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Kompozitlerin eğilme davranışları ayrıntılı olarak incelendikten sonra çatlak analizleri yapılmıştır. Böylece ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen liflerin çimento esaslı kompozitlerin deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak davranışındaki performansları farklı matris ve yaşlarda kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

28 günlük ve 180 günlük deney sonuçları incelendiğinde lif katkılı kompozitlerin eğilme dayanımlarının 10 MPa ile 24 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı ve sehim kapasitesini arttırmak açısından değerlendirildiğinde; lif dozajına bağlı olarak 28 gün ve 180 gün için her iki matris türü için optimum lif dozajı farklılık göstermektedir. Yaşlanma ile birlikte genel olarak tokluk ve sehim kapasitesi değerleri azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Lif katkılı kompozitler, çimento esaslı matris, çoklu çatlak davranışı, eğilme deneyi, polietilen lif

INVESTIGATION OF STRAIN HARDENING BEHAVIOUR OF POLYMERIC FIBER REINFORCED COMPOSITES

ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate the time dependent mechanical behavior of polymeric fiber reinforced cement based composites that prepared by using two distinct type of matrices under four point flexural test. In the matrix phase of the composites, two different types of micro-aggregates (limestone and silica powder) and ultra high molecular weight polyethylene at three different fiber volume fractions (1,5 percent, 2 percent and 2,5 percent) were used. Reinforcement of cement based composites with ultra high molecular weight polyethylene fiber which has superior properties compared to other polymeric fibers is limited in literature, thus the usage of this fiber is the motivation of this thesis. These fibers have a diameter of 18 μ m, length of 10 mm and strength of 3400 MPa. Also, same matrices were re-prepared by adding plastic beads to matrices at 6 percent by total volume in order to investigate the effect of flaw structure on flexural performances of composites. In this context, 12 sets of composites prepared and load deflection curves at two different times (short term, 28 days and long term, 180 days) were obtained. Crack analyses have been performed after the detailed investigation of flexural behavior of composites. Hence, the deflection hardening and multiple cracking performances of composites produced by using ultra high molecular weight fibers were investigated comparatively at two different time and matrices.

In conclusion, flexural strengths in the range of 10 and 24 MPa were determined from fiber reinforced composites by considering the results at both 28 and 180 days. The optimum fiber dosage varies for two matrices at 28 and 180 days from the view point of flexural strength and deflection capacity. In general, the relative toughness and deflection capacity values of composites decreased with time.

Keywords: Fiber reinforced composites, cement based matrix, multiple cracking behavior, flexural test, polyethylene fiber

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	viv
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
BÖLÜM BİR-GİRİŞ	1
1.1 Betonun Yarı Gevrek Yapısı ve Çatlak Hassasiyeti	1
1.2 Liflerle Donatılma Tarihiçesi ve Önemi	2
1.3 Kompozitlerde Kullanılan Lifler ve Özellikleri	3
1.3.1 Doğal Olarak Elde Edilen Lifler	4
1.3.2 Yapay Lifler	4
1.3.2.1 Cam Lifler	4
1.3.2.2 Metal Lifler	5
1.3.2.3 Polimer Lifler	6
1.3.2.4 Polivinil Alkol (PVA) Lifler	7
1.3.2.5 Polipropilen Lifler	7
1.3.2.6 Polietilen Lifler	8
1.3.2.7 Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) Lifler ...	8
1.4 Çimento Esaslı Lifli Kompozitler	10
1.5 Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yalın Betona Kıyasla Sağladığı Avantaj ve Dezavantajlar	12

1.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kullanım Alanları.....	14
1.7 Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Sınıflandırılması ve Çoklu Çatlak Gösteren Kompozitler.....	16
1.7.1 Çekme ve Eğilme Yüklemede Deformasyon Yumuşaması ve Sertleşmesi Kavramları.....	17
1.7.2 Çoklu Çatlak için Gerekli Şartlar, Modelleme, Kırılma Mekanizması Açısından Değerlendirme	18
1.8 Çoklu Çatlak Davranışı Gösteren Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Dayanıklılığı.....	23

BÖLÜM İKİ-DENEYSEL ÇALIŞMALAR 26

2.1 Amaç ve Kapsam.....	26
2.2 Kullanılan Malzemeler	28
2.2.1 Çimento.....	28
2.2.2 Karışım Suyu	28
2.2.3 Kireçtaşı Tozu.....	29
2.2.4 Silis Tozu	29
2.2.5 Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) Lif	29
2.2.6 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı.....	30
2.2.7 PE Plastik Taneler.....	30
2.3 Deneysel Yöntemler ve Kompozit Karışım Oranları	30
2.3.1 Karışım Oranları, Karıştırma Yöntemi ve Numune Alımı	31
2.3.2 Eğilme Deneyi Sonucu Elde Edilen Parametreler ve Çatlak Analizi .	32
2.4 Deneysel Bulgular ve Tartışma	35
2.4.1 Yük - Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi	35
2.4.1.1 28 Günlük Numunelerin Yük – Sehim Eğrileri	36

2.4.1.2 180 Günlük Numunelerin Yük – Sehim Eğrileri	39
2.4.2 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitesi	42
2.4.3 Bağlı Tokluk Değerleri, Çatlak Sayısı ve Genişliği.....	48
2.4.4 Eğilme Deneyleeri ve Çatlak Analizleri Sonucu Elde Edilen Bulgular Arasındaki İlişkiler.....	50
2.4.4.1 Sehim Kapasitesi – Çatlak Sayısı x Çatlak Genişliği İlişkisi.....	50
2.4.4.2 Dayanım Oranı – Çatlak Sayısı İlişkisi	52
2.4.4.3 Sehim Kapasitesi – Bağlı Tokluk İlişkisi.....	53
BÖLÜM ÜÇ-SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR.....	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Beton ve çimento harcının yarı gevrek davranışı	2
Şekil 1.2 Günümüzde kullanılan lifler ve sınıflandırılması	4
Şekil 1.3 Cam liflerin mikroyapısı	5
Şekil 1.4 Geometrik sıyırmayı zorlaştıracak şekilde kullanılan burgu kanca çelik lif türevleri	6
Şekil 1.5 Polimer esaslı lif (Polipropilen)	7
Şekil 1.6 Polietilenin zincir yapısı	8
Şekil 1.7 UHMWPE’de kristal ve amorf bölgeleri gösteren şematik diyagramlar.....	9
Şekil 1.8 Lifli kompozitlerin gerilme- şekil değiştirme grafiği	11
Şekil 1.9 Çimento Esaslı Kompozitlerin Sınıflandırılması	16
Şekil 1.10 Çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması.....	18
Şekil 1.11 ECC’de görülen çoklu çatlak davranışı	19
Şekil 1.12 Betonarme çerçevelerde düğüm noktasında plastik mafsall oluşumu, a) Klasik betonarme düğüm noktası, b) Matrisi lifli mikro beton (ECC) olan betonarme düğüm noktası	20
Şekil 1.13 Farklı türdeki çatlak genişlemeleri, a) Griffith tipi çatlak genişlemesi, b) Kararlı çatlak genişlemesi.....	21
Şekil 1.14 Mikromekanik modelin ana kriterleri	22
Şekil 1.15 Mikromekanik model için gereken parametreler	23
Şekil 1.16 Su geçirimsizliğinin çatlak genişliği ile değişimi.....	24
Şekil 2.1 Deneysel çalışmada kullanılan sınıflandırma metodu.....	24
Şekil 2.2 Hobart mikser.....	32
Şekil 2.3 Dört noktalı eğilme deneyinde numune boyutları ve yükleme şartları.....	33
Şekil 2.4 Yük-sehim eğrisi ve parametrik noktalar.....	34
Şekil 2.5 Çatlak analizi yönteminde kullanılan portatif el mikroskobu ve numune üzerinde yapılan işlemler.....	35
Şekil 2.6 28 günlük yük-sehim eğrileri, a) 28 günlük %1,5 lif içeren M1 serisi, b) 28 günlük %2,0 lif içeren M1 serisi, c) 28 günlük %2,5 lif içeren M1 serisi, d)	

28 günlük %1,5 lif içeren M2 serisi, e) 28 günlük %2,0 lif içeren M2 serisi, f) 28 günlük %2,5 lif içeren M2 serisi,	38
Şekil 2.7 180 Günlük yük-sehim eğrileri, a) 180 günlük %1,5 lif içeren M1 serisi, b) 180 günlük %2,0 lif içeren M1 serisi, c) 180 günlük %2,5 lif içeren M1 serisi, d) 180 günlük %1,5 lif içeren M2 serisi, e) 28 günlük %2,0 lif içeren M2 serisi, f) 180 günlük %2,5 lif içeren M2 serisi.....	41
Şekil 2.8 Ortalama ilk çatlak/eğilme dayanımı grafikleri, a) 28 günlük kompozitlerin M1 serisi, b) 28 günlük kompozitlerin M2 serisi, c) 180 günlük kompozitlerin M1 serisi, d) 180 günlük kompozitlerin M2 serisi.....	44
Şekil 2.9 Kompozitlerin 28 günlük Orta nokta sehim kapasitesi grafikleri.....	46
Şekil 2.10 Kompozitlerin 180 günlük orta nokta sehim kapasitesi grafikleri.....	46
Şekil 2.11 28 günlük kompozitlerin orta nokta sehim fotoğrafları, a) Orta nokta sehim = 0 mm, b) Orta nokta sehim = 10 mm, c) Orta nokta sehim = 20 mm, d) Orta nokta sehim = 27 mm.	47
Şekil 2.12 Tokluk, çatlak sayısı ve çatlak genişliği grafikleri, a) 28 günlük kompozitlerin M1 serisi, b) 28 günlük kompozitlerin M2 serisi, c) 180 günlük kompozitlerin M1 serisi, d) 180 günlük kompozitlerin M2 serisi..	50
Şekil 2.13 Kompozitlerin sehim kapasitesi ve çatlak sayısı x çatlak genişliği grafikleri, a) 28 günlük, b) 180 günlük.....	51
Şekil 2.14 Çatlak sayısı dayanım oranı grafikleri, a) 28 günlük, b) 180 günlük.....	53
Şekil 2.15 Göreceli tokluk sehim kapasitesi grafikleri, a) 28 günlük, b) 180 günlük.	54

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Betonda kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	12
Tablo 1.2 Çatlak genişliği sınırları.....	13
Tablo 1.3 Lif kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisi.....	14
Tablo 2.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	28
Tablo 2.2 Kireçtaşı tozunun özellikleri.....	29
Tablo 2.3 UHMWPE takviyeli liflerin fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 2.4 Adva Flow 375N fiziksel ve kimyasal özellikleri	30
Tablo 2.5 Matrislerin karışım oranları	31

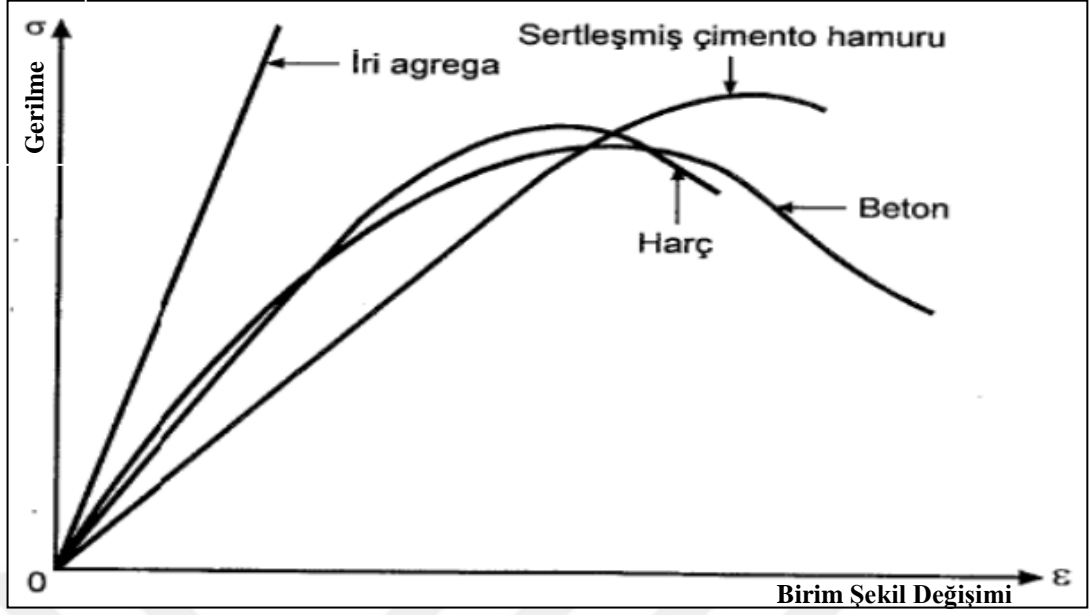
BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Yapı dünyasının en çok tercih edilen malzemesi olan betonun, günümüze kadar yapılarda istenilen basınç dayanımlarını yakalayabilmesi, kullanım açısından yeterli görülmekteydi. Ancak, beton bilindiği üzere son derece gevrek bir malzeme olup, dış etkiler altında enerji sönmüleme kapasitesi kısıtlı bir malzemedir. Eğilme ve çekme gerilmeleri altında, ilk çatlak oluşumundan sonraki aşamada beton çatlamış kesitteki zorlanmalar nedeniyle tüm kütleyle kullanmaya imkân vermeden yük taşıma potansiyelini kaybetmektedir. Betonun, çekme, eğilme, darbe, yorulma ve aşınma dayanımları, deformasyon kapasitesi, çatlak sonrası yük taşıma ve tokluk özelliklerini iyileştirmek ve betonu daha üstün özellikli bir yapı malzemesi haline getirmek amacıyla çok sayıda çalışma yapılmaktadır (Kalyoncu, 2007). Bu çalışmalardan birisi de donatı ve lif benzeri malzemelerin ilavesi ile betonun bir kompozite dönüştürülmesidir. Bu sayede, betonun kırılma ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yük taşımaya devam etmesi sağlanabilmektedir.

1.1 Betonun Yarı Gevrek Yapısı ve Çatlak Hassasiyeti

Beton, yapısında bulunan agrega ve çimento hamuru gibi gevrek malzemelerin aksine yarı gevrek davranış göstermektedir (Şekil 1.1). Uygulanan kuvvet sonucu oluşan çekme gerilmeleri altında betondaki katı parçacıkların (agrega) gösterdiği köprülme etkisi sebebiyle agrega-çimento arayüzeyi ayrılmaya direnç göstermektedir. Çatlak ilerlemesinin bir agrega-çimento arayüzeyinden diğer bir arayüzeye ilerlemesi sebebiyle çatlağın ani bir şekilde gelişmesi engellenir (Erdoğan, 2003). Ancak, bu durum her ne kadar beton içerisinde oluşan çatlağın ilerlemesini yavaşlatsa da, ilerlemesine engel olamamaktadır.



Şekil 1.1 Beton ve çimento harcının yarı gevrek davranışı (Erdoğan, 2003).

Yaklaşık 40-50 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımının en fazla 40 MPa seviyelerinde olduğu bilinmektedir. Son yıllarda, beton teknolojisindeki gelişmelerle birlikte çeşitli liflerin ve etkili süperakışkanlaştırıcıların kullanımı ile beton basınç dayanımları 200-800 MPa, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında değişen ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m^2 olan yüksek performanslı özel betonlar üretmek mümkün olmuştur. Bu tür lifli kompozitlerin süneklikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır. Ayrıca, bu tür kompozitlerin sahip olduğu düşük porozite değerleri önemli durabilite ve düşük geçirimsizlik avantajları sağlamaktadır (Taşdemir ve Bayramov, 2010).

1.2 Liflerle Donatılabilirlik Tarihi ve Önemi

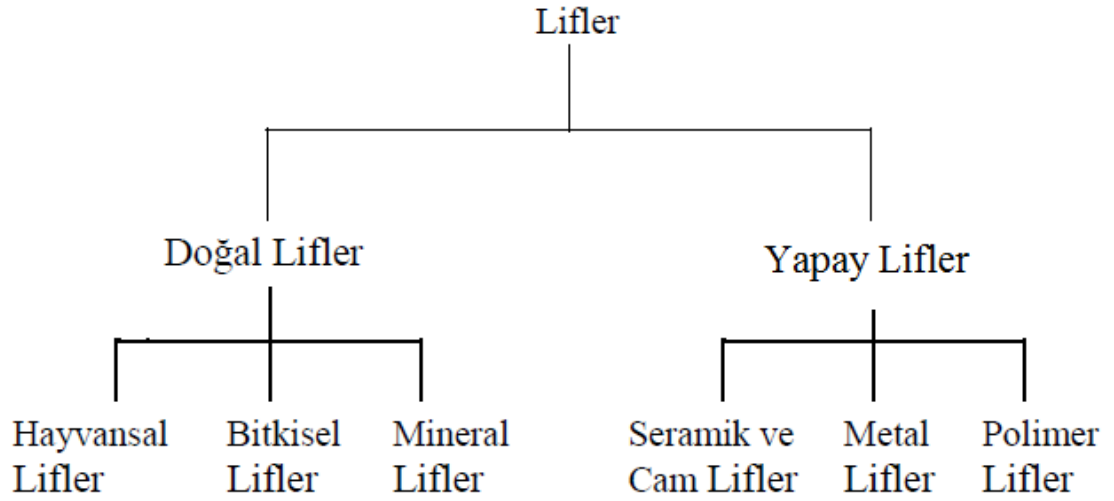
Günümüzden 3500 yıl önce Bağdat yakınlarında inşa edilen Aqar Quf kulesinin yapımında kullanıldığı bilinen, güneşte pişirilerek üretilmiş tuğlaların içerisinde lif olarak saman kullanıldığı görülmüştür. Roma Collosium inşaatı sırasında o devrin sıvası olarak adlandırabileceğimiz balçık karışımlarına, çeşitli hayvanlara ait kuyruk ve yele kıllarının ilave edilerek malzemelerin çatlak direncinin artırılmaya çalışıldığı bilinmektedir (Bentur ve Midness, 2006). Ülkemizde yapılan araştırmalarda, Osmanlı dönemi eserlerinde kullanılan Horasan harcı içerisinde de keçi kılı, at

kuyruğu ve saman gibi doğal liflerin kullanıldığı bilinmektedir (Boğazkesen, 2011). 19. yüzyılın sonlarında, gelişen sanayi ile birlikte, yüksek lif dozajlarına sahip kompozitleri üretmek mümkün olmuştur. Örneğin, Hatscheck yöntemi kullanılarak asbest esaslı lifler içeren yapı malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, asbestin insan sağlığına olan zararlarının tespit edilmesi ile çimento esaslı yapı malzemelerinde kullanılacak alternatif lif türleri aranmaya başlanmıştır. 1950'li yıllarda cam liflerinin kullanılması ve bu malzemeye uygun matris özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Özellikle alkali ortamda tahrip olan liflerin yerine alkali ortamlara daha dayanıklı olan cam liflerin kullanımına başlanmıştır. 1960'ların başında, çelik lifler çimento hamuru içinde kullanılmaya başlamıştır. Aynı dönemlerde polipropilen, naylon benzeri sentetik lifler ve karbon liflerin kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmış fakat dönemin teknolojisi ile üretilmelerinin zor ve maliyetli olması sebebiyle çelik ve cam lifler önemini korumuştur (Erbaş, 1999).

Son yıllarda özellikle Amerika ve Avrupa'da çeşitli araştırmacılar öncülüğünde çoklu çatlak davranışı gösteren ve düktilitesi geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler üretilmektedir (Li, 2003).

1.3 Kompozitlerde Kullanılan Lifler ve Özellikleri

Lif, doğal kaynaklardan elde edilebilen yada yapay olarak insan eliyle üretilen, farklı uzunluk, bükülgenlik (şekil verilebilirlik), esneklik ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip olan malzemelerdir. Günümüzde çeşitli alanlarda kullanılmak üzere doğal ya da yapay olarak elde edilebilen birçok lif türü vardır. Bu lifleri değişik biçimlerde sınıflandırmak mümkündür (Şekil 1.2). Hayvan, bitki, mineral gibi doğal kaynaklardan elde edilen lifler doğal lif olarak sınıflandırılmaktadır. Yapay lifler ise, aranan belirli özellikleri taşıyacak biçimde özel olarak tasarlanan ve insanlar tarafından malzemelerin geometrik modifikasyon yolu ile geliştirilmiş türevleridir (Acun, 2000). Yapay liflerin dayanımları ve elastisite modülleri genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyüktür. Liflerin bu özelliği sayesinde kullanım alanı ve olanakları giderek artmaktadır (Ersoy, 2001).



Şekil 1.2 Günümüzde kullanılan lifler ve sınıflandırılması.

1.3.1 Doğal Olarak Elde Edilen Lifler

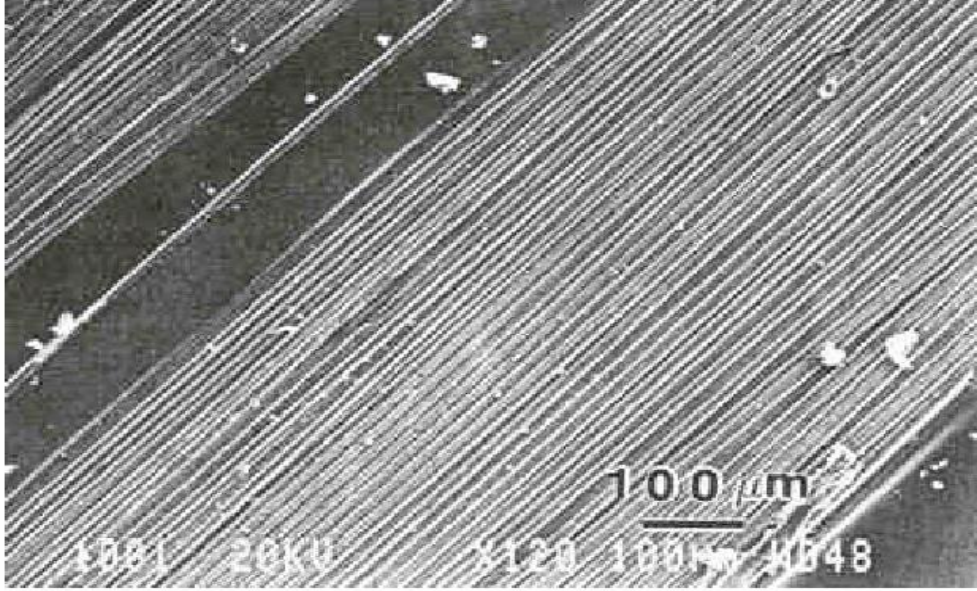
Lif takviyeli kompozitleri oluşturmada kullanıldığı bilinen en eski doğal lifler saman, keçi kılı, at kuyruğu ve yelesi gibi malzemelerdir. Hatta günümüzde bile Osmanlı zamanından kalma alışkanlıkla bazı cami kubbelerinde saman kullanımına rastlanmaktadır. Modern teknoloji ile çimentolu kompozitlerde kullanılan jüt ve bambu gibi lifler, çeşitli bitkilerden daha ekonomik biçimde elde edilebilmektedir. Ancak, bu liflerin kullanımında karşılaşılan en büyük sorun, bu liflerin alkali ortamda dayanıklılıklarının az olmasıdır. Bu liflerin beton içerisindeki dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacıyla betonun alkalinitesini azaltacak kimyasal katkıları kullanılmaktadır (Ekincioglu, 2015).

1.3.2 Yapay Lifler

1.3.2.1 Cam Lifler

Cam lifler, sertlik, korozyona dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi tipik cam özellikleri gösteren esnek, hafif, pahalı olmayan bir lif türüdür (Şekil 1.3). Bu avantajlar dolayısıyla cam lifler, endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen lif türüdür. Günümüzde cam lifi içeren farklı dayanım

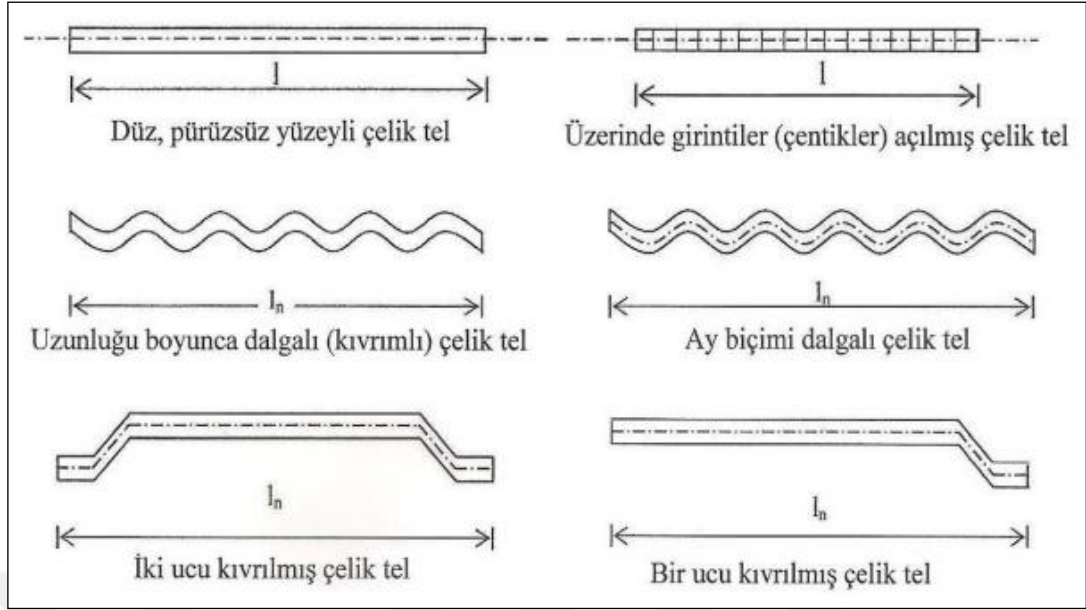
değerlerine sahip, çevresel etkilere karşı dirençli kompozitler üretilerek kullanılmaktadır (Kalyoncu, 2007).



Şekil 1.3 Cam liflerin mikroyapısı (Kalyoncu, 2007).

1.3.2.2 Metal Lifler

Metaller sahip oldukları plastik şekil değiştirebilme yeteneği sayesinde çok basit formlardan çok karmaşık formlara şekillendirilebilirler. Günümüzde farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip birçok çelik tel türevi bulunmaktadır. Çelik liflerin beton ya da kompozit içerisine farklı dozajlarda katılması ile yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip yapı malzemeleri üretilebilmektedir (Aral, 2006). Bu liflerin geometrik özellikleri matris içinde sıyrılmayı zorlaştıracak şekilde değiştirilmiştir. Kanca, burğu, girinti, çıkıntı gibi form değişiklikleri ile matrise aderans artışı hedeflenmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 Geometrik sıyrılmayı zorlaştıracak şekilde kullanılan burgu kanca çelik lif türevleri (TS 10513, 1998).

1.3.2.3 Polimer Lifler

Polimer lifler çok geniş uygulama alanları ve çeşitleri olan bir lif tipidir (Şekil 1.5). Polimerik liflerin kullanımı ilk olarak 1930'ların sonları ve 1940'ların başlarında naylon ve polyester gibi sentetik liflerin keşfi ile başlamış ancak düşük elastisite modülüne sahip olmaları nedeniyle kullanım alanları oldukça kısıtlı kalmıştır. 1960'lı yıllarda gerçekleşen teknolojik yenilikler sayesinde aramid ve uzun zincirli yapıya sahip polietilen gibi sağlam ve yüksek elastisite modülüne sahip lifler üretilerek kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip polipropilen (PP), polivinil alkol (PVA) ve polietilen (PE) lifler kullanım alanına göre optimize edilerek üretilmektedir (Chawla, 1998).



Şekil 1.5 Polimer esaslı lif (Polipropilen) (Kanalli, Palankar, B. Kumar, P. Kumar ve Parakash, 2014).

1.3.2.4 Polivinil Alkol (PVA) Lifler

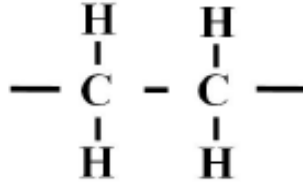
PVA (polivinil alkol) lifler ilk olarak 50 yıl önce Japonya’da üretilen organik liflerdir. Bu noktadan itibaren PVA lifler çeşitli endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmıştır. PVA lifler yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahip oldukları gibi, UV ışınları, kimyasal etkiler ve hava koşullarına karşı mükemmel direnci ile öne çıkarlar. 1980’li yıllardan itibaren asbest kökenli liflerin sağlığa karşı tehlikelerinin üzerinde giderek daha fazla durulması PVA liflerin asbest liflerin yerini almaya başlamasına neden olmuştur (Kalyoncu, 2007).

1.3.2.5 Polipropilen Lifler

Polipropilen hammaddesi kullanılarak farklı boy ve çaplarda üretilen sentetik liflerdir. Çekme dayanımı göreceli olarak diğer polimerlere göre düşük olan bu lifler daha çok taze betonun plastik rötre çatlaklarını azaltmak amacıyla düşük yüzdelerde kullanılmaktadır. Yüksek oranda kullanımı topaklaşmaya yol açtığı için genellikle toplam hacmin %1-2’si oranında kullanılır (Shah, 1995).

1.3.2.6 Polietilen Lifler

Polietilen $[(C_2H_4)_n]$, çeşitli liflerde kullanılan bir termoplastiktir. İsmi monomer haldeki etilenden alır. Yoğunluğu 0,95-1,00 arasında olup, molekül ağırlığı 3-7 milyon arasındadır. Polipropilene benzer şekilde olefin grubu bir polimerdir ve yüzeyi hidrofob karakterdedir. Şekil 1.6'da polimer zinciri verilmiştir. Kesmeye karşı da dayanıklı olan bu lifler, çimento esaslı kompozitlerden çok, polimer kompozitlerde veya savunma sanayisinde zırh ve çelik yelek üretiminde kullanılmaktadır. (Felekoğlu, 2009)

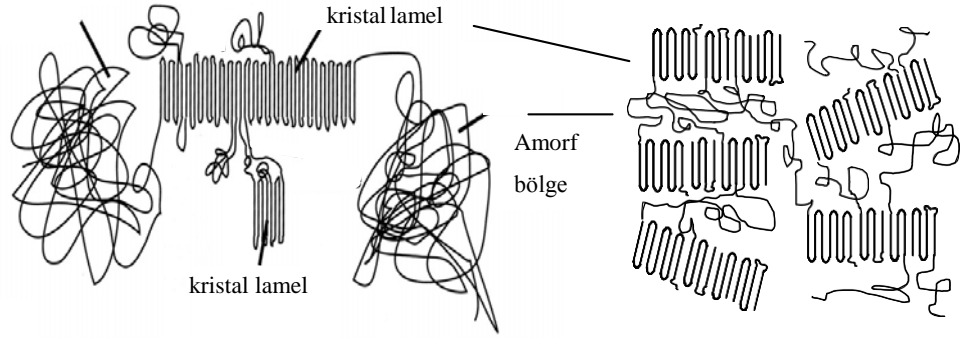


Şekil 1.6 Polietilenin zincir yapısı.

1.3.2.7 Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) Lifler

UHMWPE, yoğunluğu $0,930-0,935 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen ve molekül ağırlığı milyonlar (2-6 milyon) seviyesinde olan bir polietilen grubudur (Şekil 1.7). Yüksek molekül ağırlıklarının anlamı polimer zincirlerinin kristal yapı içinde çok sıkı bir biçimde yerleştiği veya paketlenmiştir, polimer çok serttir ve termoplastik malzemeler arasında en yüksek darbe direncine sahiptir. Uzun zincirler moleküller arası etkileşimi kuvvetlendirerek yükün polimer iskeletine daha etkin bir şekilde transferine olanak verir. Bu hal, herhangi bir yüksek darbe dirençli termoplastiğe kıyasla daha dayanıklı ve sert bir yapı oluşmasını sağlar.

UHMWPE çok uzun zincirli polietilendir. Üretiminde, genellikle metallocene katalizörler kullanılır.



Şekil 1.7 UHMWPE’de kristal ve amorf bölgeleri gösteren şematik diyagramlar (Stein, 1988).

Moleküller arasındaki Van der Waals kuvvetleri oldukça zayıftır, ancak moleküller çok uzun olduğundan molekülden moleküle büyük kayma (shear) kuvveti taşınır. Her bir zincir diğerlerine çok miktarda Van der Waals kuvvetiyle bağlandığından tüm moleküllerarası kuvvet çok yüksek olur.

UHMWPE lifler zincirlerin %95’inden fazlası paralel olacak şekilde yerleşirler ve kristallik seviyesi %85’den fazlasına ulaşır; bu durumda kısmen kısa moleküller arasında da kuvvetli bağlar meydana gelir (Şekil 1.7). Olefin molekülleri arasındaki zayıf bağlanmalar yerel ısı uyarmalara neden olarak bir zincirdeki kristalin düzenlenmeyi bozar, ısı kararlılığı zayıflatır.

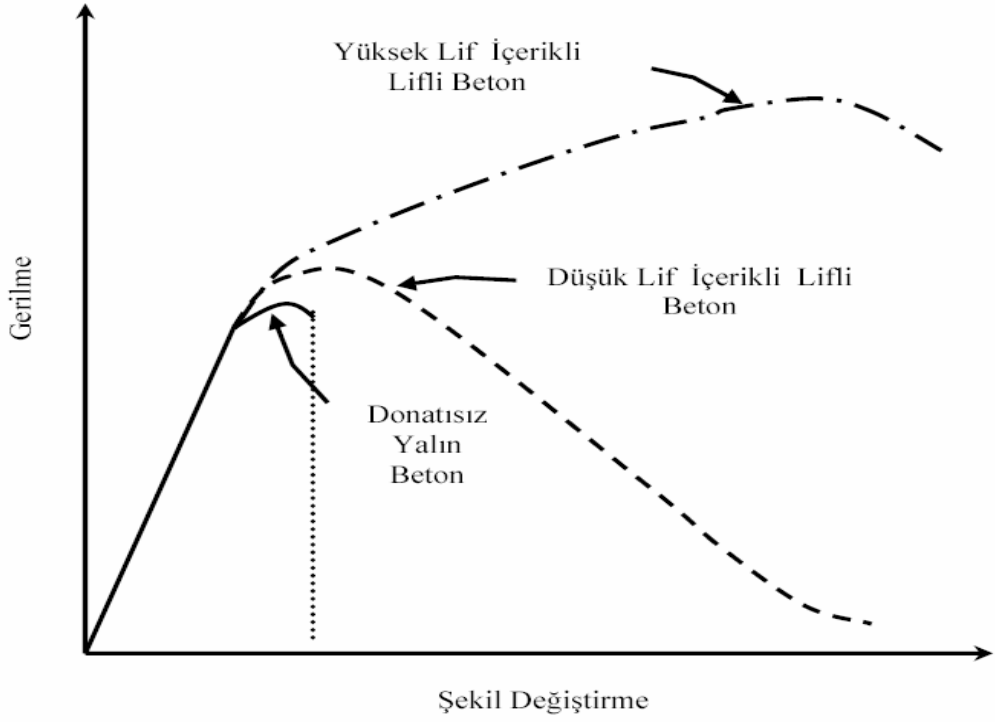
UHMWPE kokusuz, tatsız ve zehirli etkisi olmayan bir polimerdir. Oksitleyici asitler dışındaki tüm korozyif kimyasal maddelere karşı son derece dirençlidir. Nem absorpsiyonu (moleküllerde polar gruplar bulunmadığından su absorblamaz ve sürtünme katsayısı çok düşük, kendi-kendini yağlayıcı ve aşınmaya karşı son derece dayanıklı bir malzemedir. Sürtünme katsayısı naylon ve asetalden biraz daha düşük, teflonla kıyaslanabilir seviyededir. Aşınmaya direnci teflondan daha iyi, karbon çeliğine kıyasla ise 15 kat daha yüksektir. UHMWPE’in ticari olarak polimerizasyonu 1950’lerde Ruhrchemie AG firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraları çeşitli firmalar tarafından toz, levha, çubuk, ve lif ürünler pazarlanmaya başlamıştır.

UHMWPE'nin erime noktası 144-152 °C, kırılma sıcaklığı -150 °C'nin altındadır. Liflerin kullanım sıcaklığının 80-100 °C'nin üstüne çıkmaması önerilir. (Stein, 1988).

1.4 Çimento Esaslı Lifli Kompozitler

Kompozitler farklı malzemelerin bir araya getirilerek kullanımı ile ortaya çıkan malzemelerdir. Üretim ve kullanımlarındaki temel amaç, farklı bileşenlerin zayıf yönlerinin iyileştirilmesi ve istenilen özellikte daha nitelikli bir yapı oluşturulmasıdır. İnşaat sektöründe en fazla kullanılan yapı malzemesi olan betonarme gösterilebilecek en iyi örneklerden biridir (Kalyoncu, 2007).

Çimento esaslı kompozitler, kompozit malzemelerin önemli bir grubunu oluşturmaktadırlar. Çimento esaslı kompozitler, malzemenin mekanik direncini arttırmak, çatlama ve gevrek kırılmayı önlemek amacıyla matris içerisine çeşitli oranlarda farklı türdeki liflerin katılmasıyla üretilen yapı malzemeleridir. Böylece, gevrek davranış gösteren çimentolu matriste çatlak meydana gelmesi durumunda, mekanik etkilerin büyük kısmını lifler karşılayabilmektedir. Mekanik etkinin iletimi matristen life kayma kuvveti yoluyla gerçekleştiğinden, kompozit içerisinde kullanılacak lif, matris ve bu iki malzeme arasındaki aderans özelliklerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Matriste kullanılacak lif dozajı, lifin fiziksel ve mekanik özelliklerine göre ayarlanmalıdır. Lif-matris arasındaki aderans özellikleri kullanılan matris ve lif özelliklerine göre farklılık gösterebileceğinden mekanik açıdan uygun bir lif-matris kombinasyonu sağlanmalıdır (Ersoy, 2001). Bu etkenlere bağlı olarak kompozitin mekanik yüklemeler altındaki davranışı da değişiklik gösterecektir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 Lifli kompozitlerin gerilme- şekil değiştirme grafiği (Bentur ve Mindness, 2006).

Çimento esaslı lifli kompozit üretiminde, matris içerisine doğal, cam kökenli, çelik, karbon ya da polimer kökenli pek çok lif eklenebilmektedir. Her lifin kendine özgü mekanik (çekme mukavemeti, kopma uzaması) ve fiziksel (yoğunluk, erime sıcaklığı, renk) özellikleri bulunmaktadır. Kompozit üretiminde kullanılan bazı liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1.1’de verilmiştir (Felekoğlu, 2009).

Tablo 1.1 Betonda kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Felekoğlu, 2009).

Lif türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (GPa)	Boy (mm)	Çap veya enkesit ayrıtı ile ilgili farklılıklar	
Metelik lifler	Çelik	7,8	-	1000-2500	0-4	220-240	3-15	100-200 mikron, dikdörtgen kesitli olabilir, boykesit eksenine boyunca burulmuş olabilir (Kim, Naaman, El-Tawil, 2008)
Polimerik lifler	Polipropilen	0,9-1	160-165	300-700	10-50	3-5	5-15	- 10-400 mikron arasında çaplı - dikdörtgen enkesitte (Santos ve diğer., 2005) - çoklu sarmal formda (fibrillated)
	Yüksek yoğunluklu polietilen	0,97	-	2610-2770	2-4	80-120	10-15	
	Naylon	1,16-1,14	225-250	900		5-5,2	5-15	
	Polivinil alkol	1,3	230	1200	6-8	25-45	8-15	
Karbon lifler	1,6-1,8	-	400-5000	0,5-2	7-400	3-15	1-50 mikron	
Alkali dirençli cam lifleri	2,55-2,60	-	2500		80	3-10	1-5 mikron	

1.5 Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yalın Betona Kıyasla Sağladığı Avantaj ve Dezavantajlar

- Kompozit içerisindeki lifler uygulanan yükü köprüleme mantığı ile daha geniş alana yayarak çatlak oluşumunu geciktirir. Oluşan çatlakların ilerlemesini ve genişlemesini engeller.
- Betonun yük altında gösterdiği maksimum çatlama deformasyonu lifli betonlarda geleneksel betona kıyasla çok daha yüksektir. Bu nedenle yalın betona kıyasla lif kullanımı enerji yutma kapasitesini (tokluk) artırır. Lifli betonlarda maksimum yük sonrası, artan deformasyon sonucu yük azalma hızı çok daha yavaş olmaktadır. Liflerin matristen ayrılması ve uzaması esnasında emilen enerji lifli betonlarda oldukça fazladır (Tokyay, Ramyar ve Turanlı, 1991).
- Kompozitlerin ani yüklemelere ya da tekrarlı yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olması ve yük altında yutulabilen enerji miktarının fazlalığı

açısından liflerin sağladığı artış, lifli betonların avantajları arasında sayılabilir.

- Beton içerisinde üç boyutlu olarak dağılmış olan liflerin betondaki çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı, lifler matristeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine alarak matrisin çatlamamış bölgelerine naklederler ve betonun kullanılmayan kesitlerinin de kullanılmasına olanak tanır (Yerlikaya, 1998).
- Beton, donatılı da olsa, lifli de olsa yine çatlayacaktır. Çatlamayı tümüyle önlemek neredeyse imkânsızdır. Önemli olan çatlak sayısı ve genişliğinin sınırlı kalmasıdır. Aşağıdaki çizelge (Tablo 1.2), TS 500'e göre normal kabul edilebilen en büyük çatlak genişliğini gösterilmektedir. Liflerin çatlak genişliğini sınırlandırıcı etkisi durabilite özellikleri açısından avantaj sağlar.

Tablo 1.2 Çatlak genişliği sınırları (TS 500).

Ortam	İzin verilen maksimum çatlak genişliği (cm)
Yapı içi normal çevre koşulları	0,4
Yapı içi nemli ve yapı dışı normal çevre koşulları	0,3
Yapı dışı nemli çevre koşulları	0,2
Yapı içi ve dışı agresif çevre koşulları	0,1

- Betonda lif kullanımı ile betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler Tablo 1.3'de gösterilmektedir (Uğurlu, 1994). Tablo 1.3'de de görüldüğü gibi lif kullanımı betonun basınç dayanımını ve elastisite modülünü arttırabildiği gibi düşürebileceği durumlar da mevcuttur. Lif kullanımı işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle fazla lif kullanıldığında; topaklaşma, dayanım kaybı, gevrek kırılma gibi olumsuz durumlar ortaya çıkabilmektedir. Karışımdaki zayıf bölgelerden dolayı bazı mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir. Tablo 1.3'de görüldüğü üzere lifler darbe esnasında kompozitin dağılmasını ve gevrek davranış

göstermesini engeller. Özellikle çelik lifler betonun darbe dayanımını %100-1200 oranında artırır.

Tablo 1.3 Lif kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisi (Uğurlu, 1994).

Mekanik Özellikler	Artış Oranları (%)
Darbe Dayanıklılığı	100-1200
Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk)	100-1200
Eğilme Dayanımı	25-200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-150
Şekil Değiştirme Kapasitesi (düktilite)	50-300
Yorulma Dayanımı	50-100
Basınç Dayanımı	±25
Elastisite Modülü	±25

- Lif maliyetinin yüksek olması uygulamada lifli beton kullanımını kısıtlamaktadır. Özellikle yüksek dayanım özelliklerine sahip yeni nesil polimer liflerin maliyetlerinin oldukça yüksek olduğu bilinmektedir.

1.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kullanım Alanları

Çimento esaslı kompozitler, tasarlanma amaçlarına göre çok farklı uygulama alanlarında kullanılabilir. Bunlardan bazıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Lifli betonlar, çatlamanın engellenmesi, malzemenin dağılmasının engellenmesi, darbe ve dinamik yüklemelere karşı direnç istenen yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir.
- Püskürtme beton uygulamasında, yerindeki sürekli donatının güvenlik ve bütünlük açısından önemli olmadığı uygulamalarda eğilme dayanımındaki

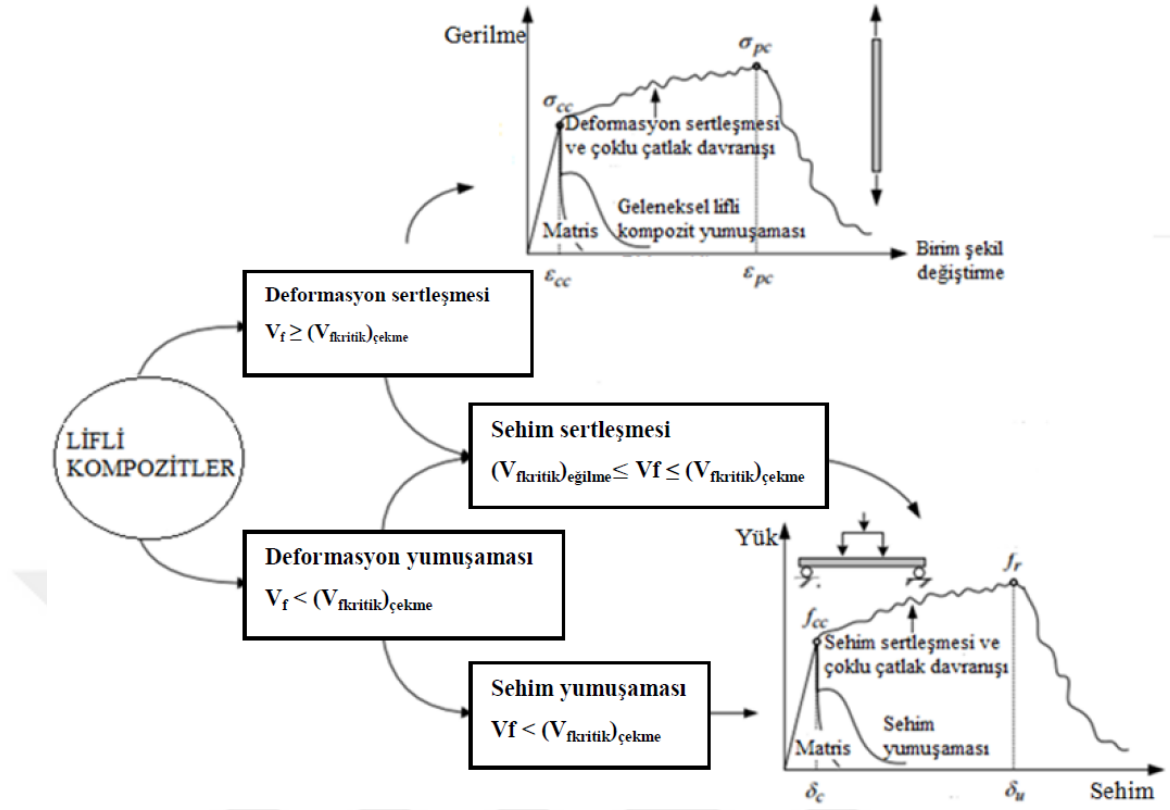
iyileştirme liflerle sağlanabilir ve kesit kalınlığını azaltmak, performansı arttırmak veya ikisi için de kullanılabilir.

- Saha betonu, pist, yol ve güvenlik yapıları gibi pek çok alanda kullanılabilir.
- Çelik liflerden yüksek süneklik ve yüksek çekme mukavemeti sayesinde depreme dayanıklı yapı imalatında.
- Tünellerde püskürtme betonlarda çelik lifli betonlar kullanılmaktadır. Ancak, polimer lifli kompozitlerin de son yıllarda püskürtme beton üretiminde kullanımı artmaktadır. Bunun sebebi çelik lifin aşındırıcı bir malzeme olup, püskürtme beton ekipmanına kalıcı zararlar vermesidir.
- Betona polimerik esaslı liflerin katılmasının bir diğer faydası da; yüksek sıcaklıklarda beton içinde genleşen su buharının dışarı kaçması sonucu betonun yangında daha az hasar görmesinin sağlanmasıdır. Yüksek performanslı betonlarda boşlukların çok küçük, az ve ilişkisiz olması su buharının kaçışını önler, sonuçta betonun dış kabuğu patlar, dökülür. Önlem olarak betona polipropilen lif katılması önerilir. Sıcaklıkta eriyen bu lifler gerekli boşlukları ve kanalcıkları oluşturarak su buharının dışarı kaçmasını sağlarlar (Walraven, 1999). Yüksek performanslı betonların yangına karşı dayanıksız olması, özellikle İngiltere ve Fransa arasında bulunan Manş tüneline 1996 yılında çıkan yangından sonra önem kazanmıştır. Silis dumanı içeren klasik karışım yöntemleriyle 80 ila 100 MPa arasında basınç dayanımına sahip beton kullanılarak yapılan bu tünelde yangın sırasında beton yüzeyinde dökülmeler oluşmuştur (Ekincioglu, 2015).
- Cam lifli betonlar ise hafifliklerinden ve iyi işlenebilme özelliğinden faydalanılıp dış cephe giydirmelerinde (fibrobeton) sıkça kullanılırlar.

olarak % 3'den daha fazla bir çekme şekil değiştirme kapasitesine sahiptir. Mikroyapı optimizasyonu sonucunda TÇK'deki lif içeriği %2-3'den daha az olacak şekilde sınırlandırılmıştır (Taşdemir ve Bayramov, 2010)

1.7.1 Çekme ve Eğilme Yüklemesinde Deformasyon Yumuşaması ve Sertleşmesi Kavramları

2003 yılında sunulan 4. Uluslararası ‘‘Yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler’’ çalıştay raporunda (HPFRCC-4) lifli kompozitlerin mekanik yükleme altındaki davranışları dikkate alınarak genel bir sınıflandırılma yapılmıştır (Şekil 1.10). Bu sınıflandırmada esas alınan ana etken, kompozitin çekme ya da eğilme yüklemesi altında, deformasyon yumuşaması ya da sehim sertleşmesi davranışlarından hangisini gösterdiğidir. Çekme yüklemesi altında deformasyon sertleşmesi gösteren bir kompozit, eğilme yüklemesi altında sehim sertleşmesi davranışı göstermektedir. Ancak, çekme yüklemesi altında deformasyon yumuşaması gösteren kompozitlerin eğilme yüklemesi altında sehim sertleşmesi ve sehim yumuşaması davranışlarından herhangi birini gösterebileceği anlaşılmıştır. Sehim yumuşaması gösteren kompozitler plastik rötre oluşumunun engellenmesi, beton kaldırım ve plaka üretimi gibi daha genel alanlarda kullanılmaktadır. Sehim sertleşmesi gösteren kompozitlerin ise eğilmenin baskın olduğu, deprem benzeri tekrarlı ya da darbe gibi ani yüklemelere maruz kalma riski olan yapısal uygulamalarda kullanılması daha uygundur (Naaman ve Reinhard, 2006).



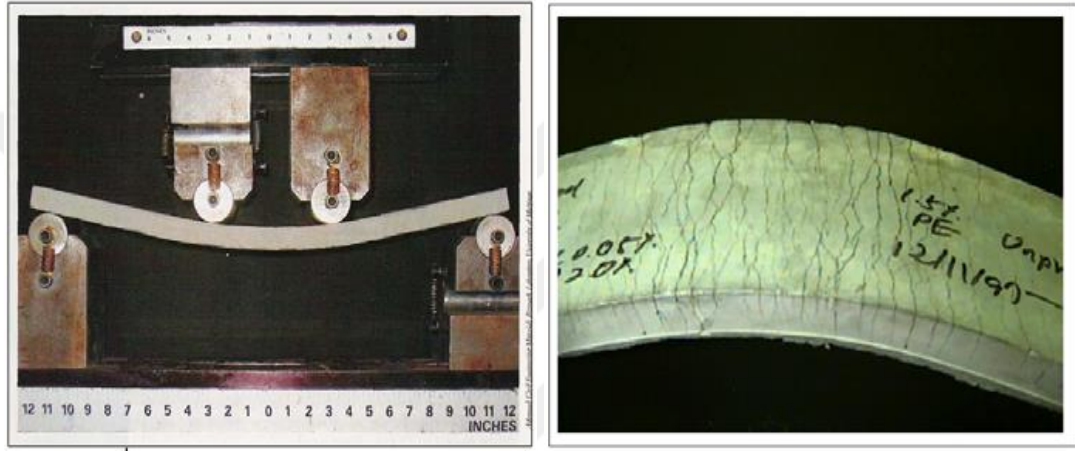
Şekil 1.10 Çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması (V_f : Lif dozajı, $V_{f,kritik}$: Kritik lif dozajı) (Naaman ve Reinhard, 2006).

1.7.2 Çoklu Çatlak İçin Gerekli Şartlar, Modelleme, Kırılma Mekanikliği Açısından Değerlendirme

Lif kullanımı ile çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı, çekme dayanımı, tokluğu, ve çatlak direnci gibi mekanik performanslarını geliştirmek mümkündür. Ancak, burada uygun lif özelliklerinin ve lifle uyumlu bir matris tasarımının yapılması kompozitten istenilen performansın elde edilmesi için en önemli şarttır. Literatürde çeşitli polimer kökenli liflerin kullanımı ile tokluk özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler “Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler -Engineered Cementitious Composites (ECC)” olarak adlandırılmaktadır (Keoleian, Kendall, Lepech ve Li, 2005).

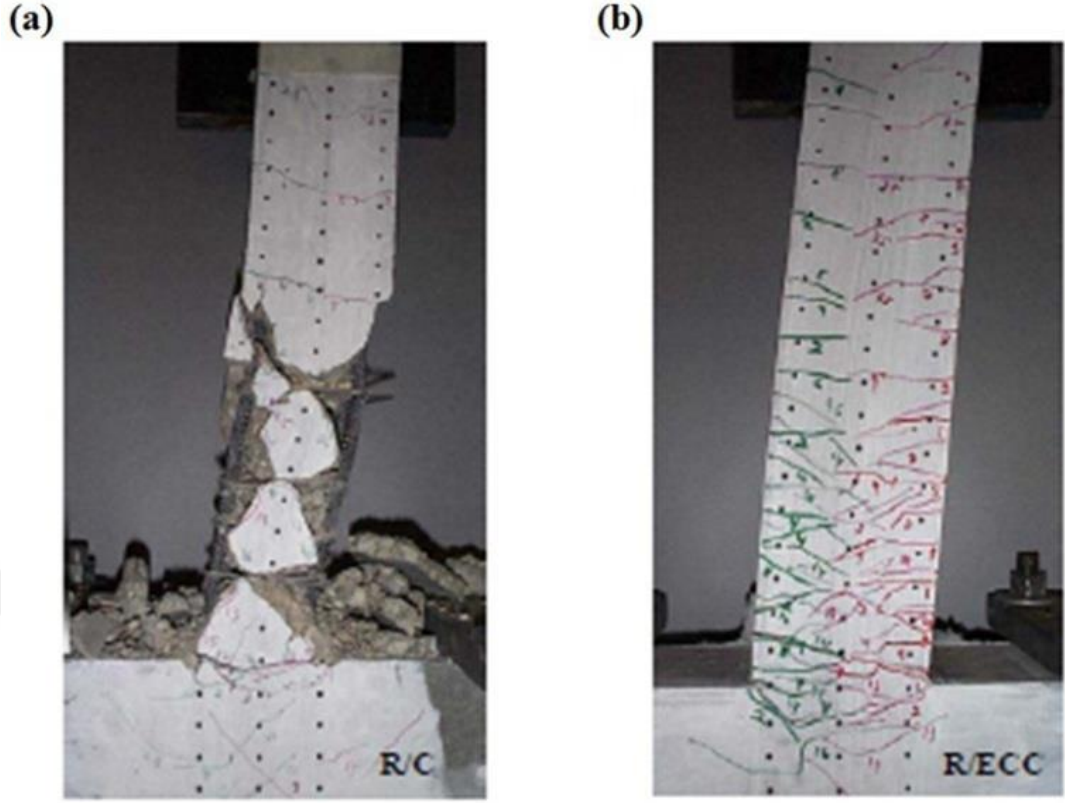
ECC geleneksel betona kıyasla oldukça yüksek tokluğa sahip olan, çekme ve eğilme gerilmeleri altında deformasyon kapasitesi yüksek bir kompozittir.

ECC'lerin çekme birim deformasyon kapasitesi %2,5-4'e kadar çıkmaktadır (Li ve Kanda, 1998). Bu derece bir deformasyon kapasitesine ve tokluğa sahip olması, lifli kompozitin çoklu çatlak oluşturma davranışından kaynaklanmaktadır (Şekil 1.11). Matris ve lif özellikleri uygun şekilde seçilmiş ve lif-matris aderansı optimize edilmiş polimerik lifli kompozitler, çekme etkisi altında çatlak genişliği fazla değişmeden çoklu çatlak davranışı göstermekte ve aynı zamanda kompozitin yük taşıma kapasitesini de artırmaktadır.



Şekil 1.11 ECC'de görülen çoklu çatlak davranışı (Li, 2005).

Betonarme yapılarda ECC kullanılması halinde, özellikle kolon kiriş bağlantı noktalarında performans farklılıkları rapor edilmiştir (Şekil 1.12) (Li ve Fischer, 2002). Geleneksel betonarme sistemde belli bir kiriş deformasyonunda düğüm noktasında plastik mafsallık oluşmakta ve bu bölgedeki beton tabakası tamamen dökülmektedir (Şekil 1.12a). Diğer taraftan ECC kullanılarak üretilen betonarme kolonda düğüm noktası bütünlüğünü korumakta, daha yüksek kiriş deformasyonlarında bile (%10 ötelenme) yük taşıma kapasitesini korumaktadır (Şekil 1.12b).

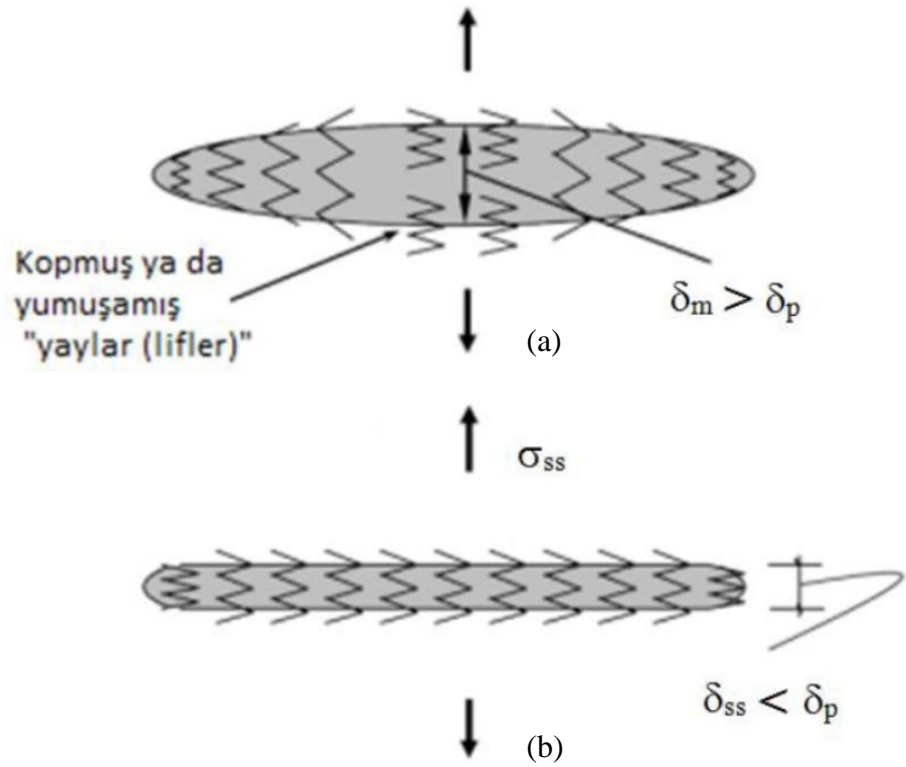


Şekil 1.12 Betonarme çerçevelerde düğüm noktasında plastik mafsal oluşumu, a) Klasik betonarme düğüm noktası, b) Matrisi lifli mikro beton (ECC) olan betonarme düğüm noktası (Li ve Fischer, 2002).

ECC'nin deformasyon sertleşmesi davranışı göstermesi lif, matris ve lif-matris arayüzey özelliklerinin birbiriyle ilişkilendirilerek tasarlanmasına bağlıdır. Tasarım yapılırken Li, Wang ve Wu, (2001) tarafından geliştirilen mikro-mekanik model dikkate alınmaktadır. Bu modelin temelleri 90'lı yılların başında kurulmuştur (Li ve Leung, 1992; Li ve Wu, 1992). Mikro-mekanik model mikro ölçekteki bileşenlerin özellikleri ile liflerin köprüleme davranışı arasında bir bağlantı kurar. Mikro mekanik modele göre, çoklu çatlak oluşumu için enerji ve dayanım kriterlerinin her ikisi birden sağlanmalıdır.

ECC, eğilme ya da çekme yüklemesi altında oluşturduğu çoklu mikro-çatlak davranışı sayesinde deformasyon sertleşmesi davranışı göstermektedir. Çoklu mikro-çatlak oluşumu da ancak kararlı çatlak genişliği oluşması durumunda gerçekleşebilmektedir. Şekil 1.13'de Griffith tipi çatlak ve kararlı durumdaki çatlak

genişlemesi lifli bir kompozit için şematik olarak gösterilmiştir (Li, 2003). Şekildeki yaylar çatlama kesiti köprüleyen lifleri temsil etmektedir. Liflerin köprülediği gerilme, kesitteki liflerin köprüleme kapasitesini aşarsa, temsili yay elastik özelliğini kaybeder (kopar). Griffith tipi çatlak oluşumunda genişleyen bir çatlak açılmasına karşı azalan bir çekme gerilmesi söz konusudur (Şekil 1.13a). Çekme gerilmesindeki bu azalma, çatlak ortasındaki liflerin kopması ya da daha az gergin olması ve çatlak ortası açıklığının (δ_m) kritik çatlak genişliğinden (δ_p) fazla olması ile ilişkilendirilir. Kararlı durumdaki çatlak genişlemesi için ise durum daha farklıdır. Kararlı durumdaki çatlaklarda çatlak genişliği kritik çatlak genişliğinden azdır. Çatlama kesitteki lifler bu sırada elastik davranışı korumaktadır. Bu çatlaklar kararlı bir çekme gerilmesi (σ_{ss}) altında kararlı bir çatlak genişlemesi (δ_{ss}) oluştuğunu ifade etmektedir (Şekil 1.13b) (Felekoğlu, 2015).

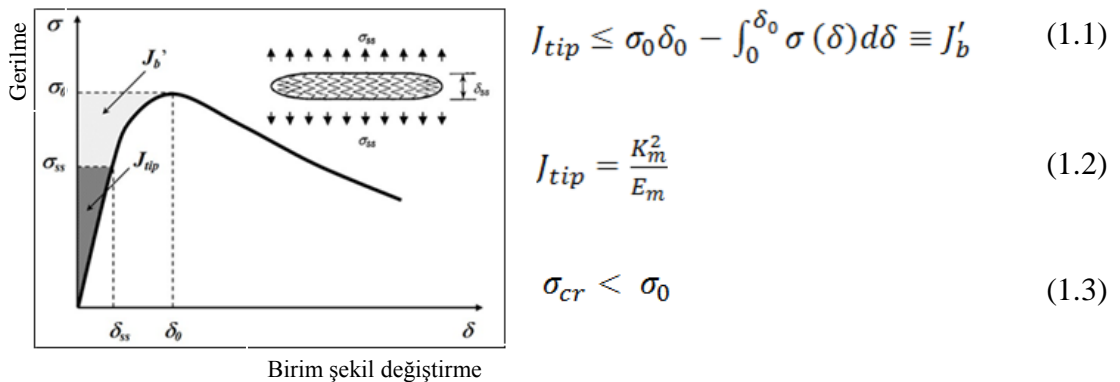


Şekil 1.13 Farklı türdeki çatlak genişlemeleri, a) Griffith tipi çatlak genişlemesi, b) Kararlı çatlak genişlemesi (Tai, 2015).

Enerji kriteri, Griffith tipi ya da kararlı çatlak genişlemesi durumlarından hangisinin oluşacağını belirler. ECC'nin tasarımında temel amaç, tamamlayıcı enerji (J_b) ile çatlak ucu kırılma tokluğu (J_{tip}) (denklem 1.1) arasındaki oranı maksimize etmektir. Bu oran, matris özelliklerine bağlı olarak J_{tip} 'in (denklem 1.2) azaltılması ya da lif yüzey özellikleri ile matris etkileşimine bağlı olarak J_b 'nin artırılması ile artmaktadır (Wang, 2005).

Dayanım kriterine göre açılan her çatlakın enkesit alanında bulunan liflerin köprüleme gerilmesi (σ_0), matrisin ilk çatlak dayanımından (σ_{cr}) yüksek olmalıdır. Köprüleme gerilmesi ile ilk çatlak dayanımı arasındaki fark ne kadar fazla ise kompozitin çoklu çatlak oluşturma potansiyeli de o kadar çok olur. Kararlı yapıda çoklu çatlak davranışının gözlemlenmesi için σ_0/σ_{cr} oranının (denklem 1.3) PVA-ECC'ler için 1,2'den büyük olması istenmektedir (Li, 1998).

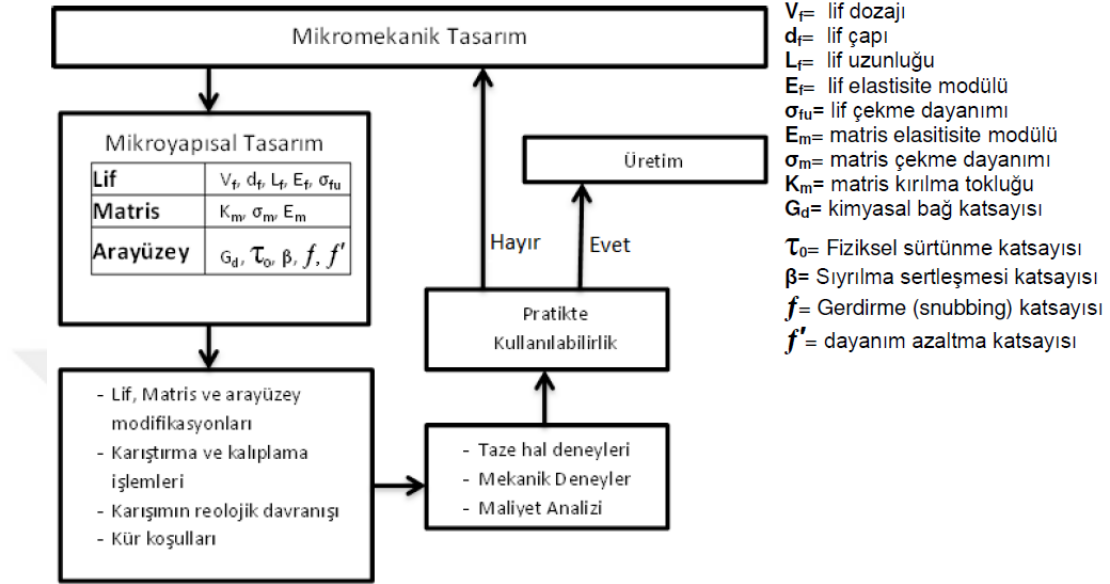
Hem enerji kriterinin hem de dayanım kriterinin sağlanması ECC'nin kararlı çoklu çatlak davranışı ve buna bağlı olarak deformasyon sertleşmesi davranışı göstermesi için gereklidir (Şekil 1.14). Bu durum tek bir çatlak için Şekil 1.14'te sunulan köprüleme gerilmesi-çatlak açıklığı ilişkisi grafiği ve yanındaki formüllerle gösterilmiştir. Aksi halde normal lifli betonlarda olduğu gibi ilk çatlak sonrası deformasyon yumuşaması davranışı oluşacaktır (Yang, 2008).



Şekil 1.14 Mikromekanik modelin ana kriterleri (Felekoğlu, 2015).

Mikro-mekanik modeli oluşturan bir çok parametre doğrudan lif, matris ve lif-matris arayüzey özellikleriyle ilişkilidir (Li, Wang ve Wu, 2001). Bu parametreler

Şekil 1.15’de gösterilmiştir. Bunlara ek olarak, Yang (2008) tarafından yapılan çalışmalarda, Cook-Gordon parametresi (α) ile pullanma faktörü’nün (k) mikromekanik model üzerine etkisi de incelenmiştir.



Şekil 1.15 Mikromekanik model için gereken parametreler (Felekoğlu, 2015).

1.8 Çoklu Çatlak Davranışı Gösteren Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Dayanıklılığı

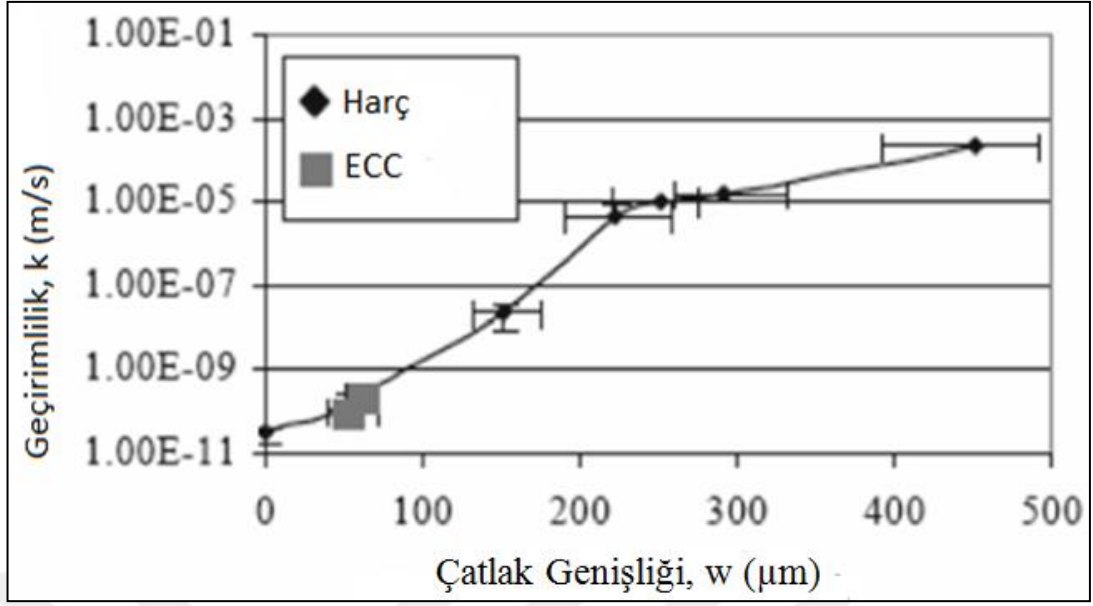
Dayanıklılık sorunu hemen hemen bütün malzemelerde karşımıza çıkan en büyük sorunlardan biridir. Ürünlerde servis ömrünü uzatabilmek için sürekli farklı çalışmalar yapılmaktadır. Zaten bir ürünü tercih edilebilir hale getiren en önemli etkenlerden biri de ürünün dayanıklılığıdır. Çimento esaslı kompozitlerde durabiliteyi olumsuz etkileyen bazı sebepler şunlardır;

- Korozyon
- Alkali silika reaksiyonları (ASR)
- Aşınma
- Asit saldırıları
- Tuz etkisi
- Islanma – kuruma

- Soğuk- sıcak hava etkileri vb.

Çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitlerde, lifler sayesinde az sayıda ve büyük çatlaklar yerine çok sayıda küçük çatlaklar meydana gelmektedir. Oluşan bu küçük çatlaklar büyük çatlaklara kıyasla yapıyı daha korunaklı hale getirirler. Çünkü çatlakların küçük olması ve fazla derin olmamasından dolayı zararlı maddeler yapının sadece dış yüzeyine zarar verebilirler.

Yukarıda bahsi geçen dayanıklılık problemleri betonun geçirimsizliği ile doğrudan ilişkilidir (aşınma hariç). Nem, gaz, tuz ve su gibi maddelerin penetrasyonu çimento esaslı yapı malzemelerinin dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkileyen en önemli etkenlerdir. Bu malzemelerin penetrasyonu sonucu malzemenin bozulması (ASR, karbonatlaşma gibi) ya da çelik donatıların korozyonu gibi olumsuzluklar meydana gelmektedir. ECC'lerin çatlak genişliğini sınırlandırarak çoklu çatlak davranışı göstermesi ile bu tür maddelerin kompozit bünyesine girişini engellenebilmektedir (Şekil 1.16) (Li, 2008). Şekil 1.16'da bu durum deneysel olarak ispatlanmıştır. Farklı şekillerde çatlaklar oluşturulan harçlar üzerinde geçirimsizlik deneyi yapılmıştır (Zijl ve Wittmann, 2008). Geçirimsizlik değerleri yüklemeler altında çoklu çatlak oluşan ECC ile kıyaslanmıştır. ECC'deki çatlak genişliği ortalama 50 µm iken, harç örneklerde 450 µm'ye kadar çıkmaktadır ve geçirimsizlikte de büyük artış meydana gelmektedir.



Şekil 1.16 Su geçirimsizliğinin çatlak genişliği ile değişimi (Zijl ve Wittmann, 2008).

Mikro boyutlu çatlak oluşturma özelliğinin yanı sıra, birçok ECC'nin mikro çatlak genişliğine bağlı olarak kendi kendini iyileştirme özelliğinin de olduğu birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir (Yang, 2008). ECC, bu özelliği sayesinde bünyesinde oluşan çatlakların kapanmasına olanak vererek dayanıklılık özelliklerinin korunmasını sağlayabilir.

Çimentolu malzemelerin aşınmaya karşı direnci genellikle bünyesinde bulunan kaba ve dayanımı yüksek agregalar ile sağlanmaktadır. ECC'ler geleneksel betonun aksine matris fazında sadece ince agrega (genellikle 100 µm civarı) içermektedir. Bu nedenle, ECC'nin aşınmaya karşı direncinin düşük olduğu söylenebilir. Ancak, referans bir harç dikkate alınarak PVA liflerin kullanıldığı bir çalışmada polimerik liflerin aşınma direncini %28 oranında arttırdığı belirtilmiştir (Wagner, 2007).

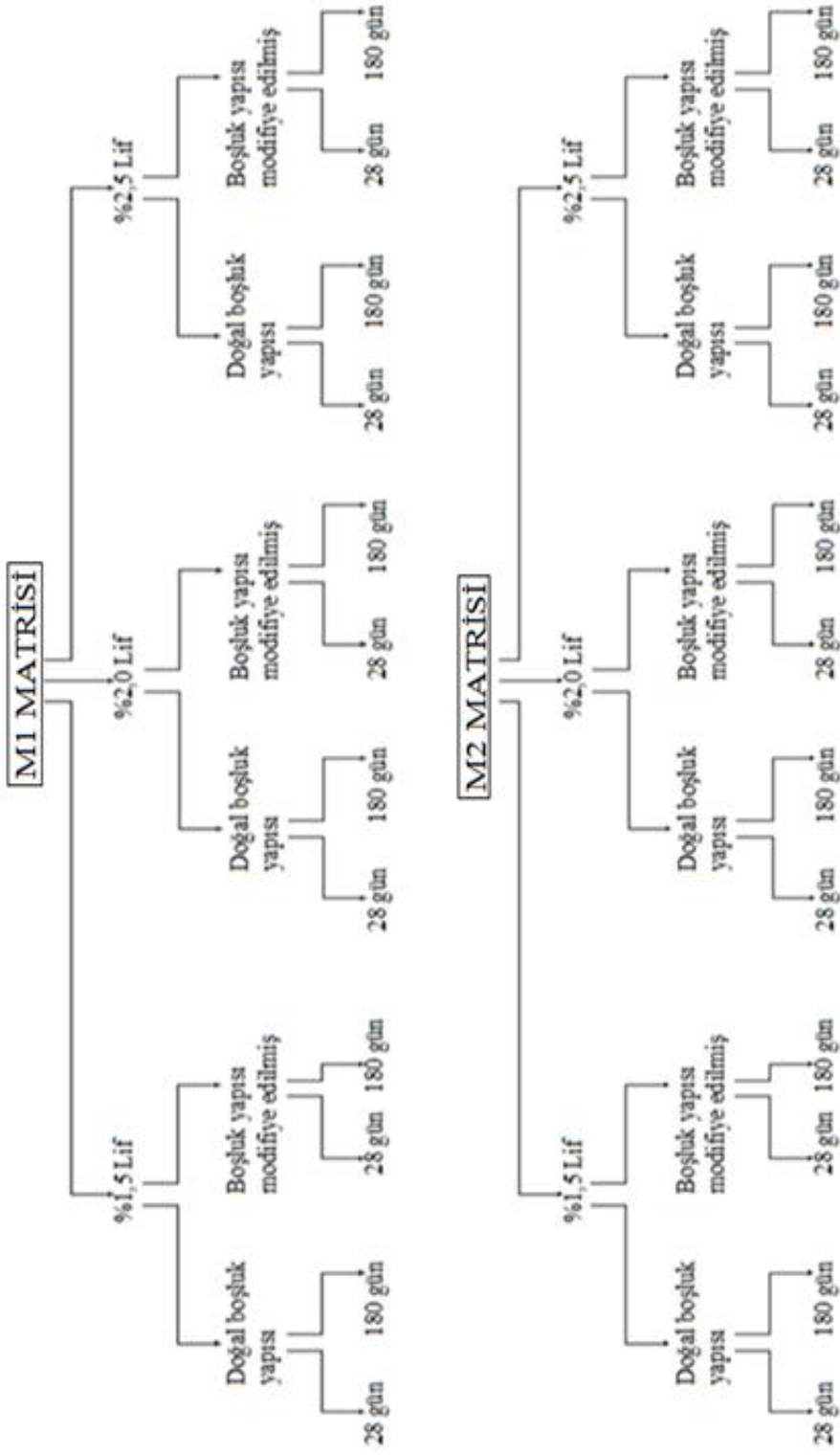
BÖLÜM İKİ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Amaç ve Kapsam

Literatürde çeşitli polimerik liflerin çimento esaslı kompozitlerle kullanım potansiyeli incelenmiş, ancak özellikle ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) liflerin bu amaçla kullanımının daha ender olduğu tespit edilmiştir. Tez kapsamında özellikle polietilen esaslı yüksek mekanik özelliklere sahip lifin, çimento esaslı kompozitin davranışına etkisi üzerinde durulmuştur.

Bu tezin amacı iki farklı matriste ve farklı dozajlarda (toplam hacmin %1,5, %2 ve %2,5 i) ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) lif kullanımının çimento esaslı tasarlanmış kompozitlerin (ECC) eğilme yüklemesi altındaki davranışını zamana bağlı olarak araştırmaktır. Ayrıca matris boşluk yapısının plastik tanelerle zayıflatılmasının kompozitlerin eğilme performansına etkisinin de incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan sınıflandırma metodu Şekil 2.1’de verilmiştir. Bu kapsamda 12 seri kompozit üretimi gerçekleştirilmiş kısa (28 gün) ve uzun (180 gün) süreli kür uygulanmış ardından dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak kompozitlerin yük – sehim eğrileri çizilmiş ve kompozitlerin eğilme davranışları ayrıntılı olarak incelendikten sonra çatlak analizleri yapılmıştır. Böylece UHMWPE liflerin çimento esaslı kompozitlerin çoklu çatlak davranışındaki performansları ortaya konulmuştur.



**M1 ve M2 matris karışım oranları Bölüm 2.3.1 de sunulacaktır.

** Kompozitlerin eğilme deneyi ile ilgili ayrıntılar Bölüm 2.3.2 de sunulacaktır.

Şekil 2.1 Deneysel çalışmada kullanılan sınıflandırma metodu

2.2 Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalar için hazırlanan kompozitlerin üretilmesi sırasında kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.2.1 Çimento

Yapılan deneylerde, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2.1’de verilen ve İzmir Çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır.

Tablo 2.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Kimyasal Analiz	Basit Oksit Oranları (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
SiO ₂	18,3	2 Günlük (MPa)	30,6
Al ₂ O ₃	3,86	7 Günlük (MPa)	44,9
Fe ₂ O ₃	3,11	28 Günlük (MPa)	55,7
CaO	64,4	Fiziksel Özellikler	
MgO	1,27	Blaine Özgül Yüzey Alanı (m ² /kg)	337
Na ₂ O	0,53	Hacim Sabitliği (mm)	0,5
K ₂ O	0,76	Özgül Ağırlık	3,10
SO ₃	3,62		
Klor	0,006		
Serbest CaO	1,8		

2.2.2 Karışım Suyu

İçilebilir nitelikteki şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2.3 Kireçtaşı Tozu

Deneysel çalışmada kullanılan kireçtaşı tozunun fiziksel özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir. Öztüre Kireççilik A.Ş.’den temin edilen kireçtaşı tozu %99 saflıkta CaCO₃’den oluşmaktadır.

Tablo 2.2 Kireçtaşı tozunun özellikleri.

Kireçtaşı Tozu	Üretim Yöntemi	Renk	Özgül Ağırlık	63 µm’dan Geçen %’si	Blaine Özgül Yüzey Alanı (m ² /kg)
Öztüre kalsit	Kireçtaşı tozu	Beyaz	2,65	99	538

2.2.3 Silis Tozu

Pomza Export Madencilik sanayi ve Ticaret A.Ş.’den temin edilen silis tozu %99 saflıkta SiO₂’den oluşmaktadır. Kullanılan silis tozunun en büyük tane boyutu 75 µm’dir. Rengi beyaz, özgül ağırlığı 2,60’dır.

2.2.4 Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) Lif

Bu tez kapsamında kullanılan Dyneema ticari isimli UHMWPE liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.3’ te verilmiştir.

Tablo 2.3 UHMWPE takviyeli liflerin fiziksel özellikleri.

Lif	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü	Uzama %	Boy	Çapı
UHMWPE	0,97	3400 MPa	107 GPa	3,9	10 mm	18 µm

2.2.5 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Grace firmasından temin edilen polikarboksilat esaslı ADVA FLOW 375 N ticari isimli süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bu katkı TS EN 934-2 standardına göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı sınıfına girmektedir. Üretici firmanın beyan ettiği özellikler Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4 Adva Flow 375N fiziksel ve kimyasal özellikleri.

İçeriği	Modifiye sentetik karboksilat polimeri
Yapı	Homojen, sıvı
Renk	Koyu kahverengi
Yoğunluk (20 °C)	1,065 g/cm ³ (TS 781ISO 758)
pH (20 °C)	4,0 (TS 6365 EN 1262)
Toplam Klorür Miktarı	<0,10 M - % (TS 1116 EN ISO 1158)
Suda Çözünen Klorür	<0,10 M - % (TS EN 480-10)
Alkali Miktarı	<7,0 M - % (TS EN 480-12)
Önerilen Dozaj	Toplam çimento miktarının 0,5 - 2,0 %

*Parantez içinde fiziksel ve kimyasal özelliklerin alındığı ilgili standartlar sunulmuştur.

2.2.6 PE Plastik Taneler

Deneyel çalışmalarda boşluk modifikasyonu amacıyla PETKİM Petrokimya Holding A.Ş.’den temin edilen YYPE I668 Pellet plastik taneleri kullanılmıştır. Tane boyutu eşit ve 3 mm çaplı plastik tanelerin hidrofob yapıları nedeniyle çimento ile aderansları zayıftır. ECC bünyesinde yapay boşluk oluşturma ve böylece çatlak oluşturma amacıyla kullanılmışlardır.

2.3 Deney Yöntemleri ve Kompozit Karışım Oranları

Laboratuvar çalışması kapsamında hazırlanan deney programı; karışım kodları, lif hacimleri, örnek tipleri ve deney yöntemleri Şekil 2.1’de görülmektedir. Şekil 2.1’de

yer alan M1 kodu mikro agrega olarak kireçtaşı tozu, M2 kodu ise silis tozu kullanılan numuneleri temsil etmektedir. M1B ile M2B ise yine aynı serilerin plastik tane ilaveli numunelerini temsil etmektedir.

2.3.1 Karışım Oranları, Karıştırma Yöntemi ve Numune Alımı

Karışımlara toplam hacmin %1,5, %2 ve %2,5 i oranında olmak üzere 3 farklı dozajda lif ilave edilmiştir. Matrislerin karışım oranları aşağıda verilmiştir (Tablo 2.5).

Tablo 2.5 Matrislerin karışım oranları.

Matris Türü	Çimento (kg/m ³)	Kireçtaşı tozu (kg/m ³)	Silis Tozu (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Toplam Ağırlık (kg/m ³)
M1	845	845	0	376	13,8	2079,8
M2	828	0	828	369	27	2052

*Kompozit üretiminde karışımlara hacimce üç farklı dozajda (%1,5-2-2,5) polimerik lif eklenmiştir.

**Boşluk modifikasyonu yapılan kompozitlerde toplam hacmin %6'sı oranında PE plastik tane ilave edilmiştir. Boşluk modifikasyonu B harfi ile belirtilecektir (Örn: M1B).

Karışımlar hazırlanırken 40 lt kapasiteli zemin tipi Hobart mikser kullanılmıştır (Şekil 2.2). Hobart mikser üç farklı devirde karıştırma hızına (56, 104, 185 dev/dak) sahiptir. Öncelikle toz malzemeler 2 dk birinci devirde kuru karıştırılmış, daha sonra su ve katkı ilavesi yapılarak 1 dk birinci devirde ve 2 dk ikinci devirde karıştırılmıştır. Süre ölçümünü takiben lif ilavesi yapılarak 2 dk ikinci devirde ve 3 dk üçüncü devirde karıştırılmıştır. Karışım içerisinde lif topaklanması olup olmadığı el ile kontrol edilmiş, eğer topaklanma varsa lif topaklarını açtırmak amacıyla ek bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Her karışımdan 3 adet 25x60x300 mm boyutlarında numuneler alınmıştır. Daha sonra karışıma hacimce %6 oranında PE plastik tane ilave edilerek karışım 1 dk daha karıştırılmış ve 3 adet numune daha alınmıştır. Taze harcın sıkıştırılması için sadece vibrasyon uygulanmıştır. Sistemik deneylerde

toplamda 12 adet set üretilmiş ve 72 adet prizmatik örnek hazırlanmıştır. Numunelerin üzeri plastik filmle kapatılarak kalıp içerisinde 3 gün bekletilmiştir. Kalıplardan sökülen numuneler 28 ve 180 gün boyunca 20 ± 2 °C'deki suda kür edilmiştir. Su kürü uygulanan örnekler 28 ve 180 gün sonunda 1 gün kurutulmuş ve ardından dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır.

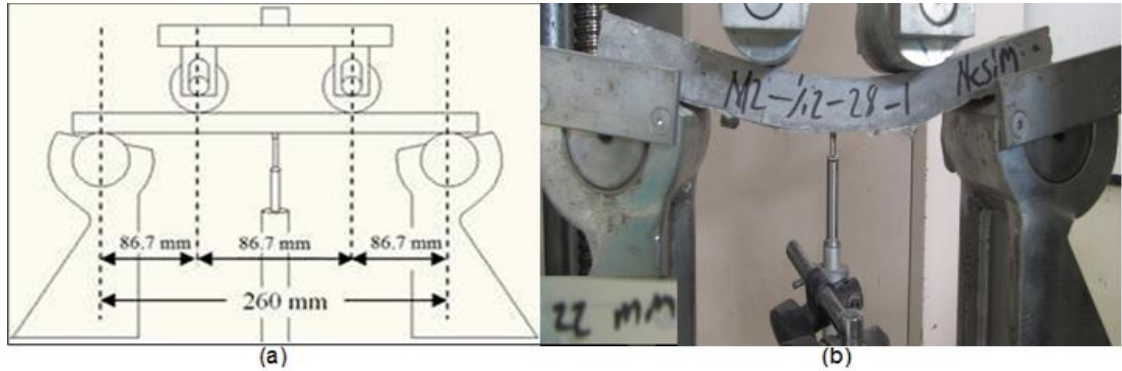


Şekil 2.2 Hobart mikser.

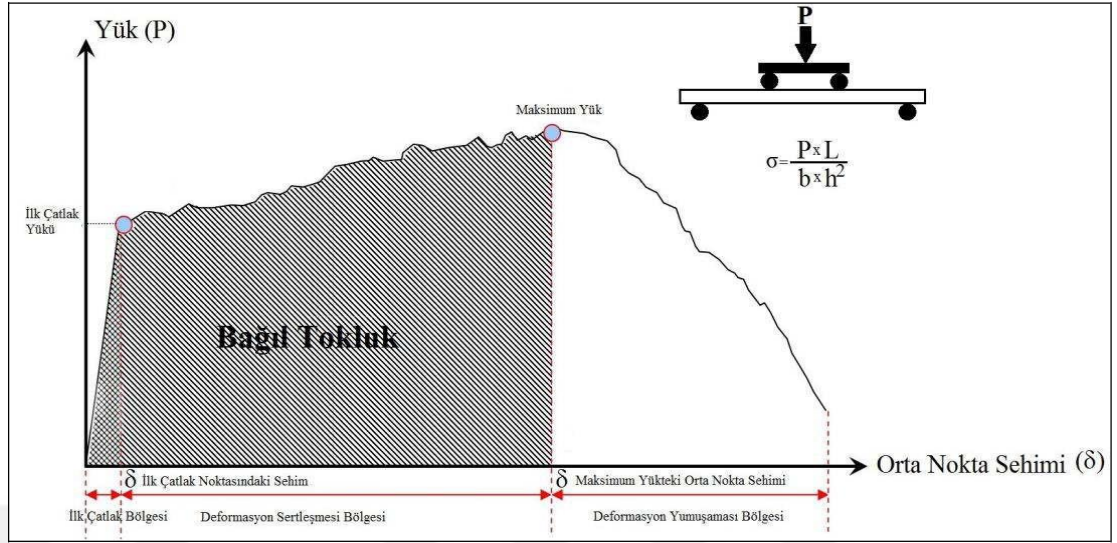
2.3.2 Eğilme Deneyi Sonucu Elde Edilen Parametreler ve Çatlak Analizi

Numuneler üzerinde yapılan dört noktalı eğilme deneyi şeması Şekil 2.3a'da sunulmuştur. Eğilme deneylerinde, 600 kg kapasiteli yük hücresine sahip, deformasyon hızı kontrollü bir cihaz kullanılmıştır. Deformasyon hızı 0,5 mm/dk ve yükleme açıklığı 260 mm olacak şekilde dört noktalı eğilme yüklemesi yapılmış (Şekil 2.3b) ve yük-orta nokta sehimi artış değerleri bilgisayardaki yazılım

yardımıyla kaydedilmiştir. Yük-sehim grafikleri incelenerek ilk çatlak yükü, maksimum eğilme yükü, maksimum eğilme yükündeki sehim (sehim kapasitesi) ve son olarak da bağıl tokluk değerleri belirlenmiştir. Eğilme dayanımı değerleri PL/bh^2 formülü ile hesaplanmıştır. Burada P maksimum eğilme yükü, L mesnetler arası açıklık, b en kesit genişliği, h ise en kesit yüksekliğidir. İlk çatlak yükü, yük-sehim eğrisinin lineerliğinin bozulduğu ilk nokta olarak belirlenmiştir. Deformasyon sertleşmesi gösteren kompozitlerde, kompozitin taşıdığı yük ilk çatlak oluştuğu anda ani bir şekilde düşmekte, daha sonra kompozit maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar kademeli olarak artarak devam etmektedir. Yük artışının son bularak düşüşe geçtiği nokta maksimum eğilme yükü ve bu noktaya karşılık gelen orta nokta sehimini de maksimum yükteki orta nokta sehimini olarak adlandırılmaktadır. Bu noktada kompozit taşıyabileceği maksimum yük kapasitesine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra taşıma kapasitesine ulaşmış olan çatlak genişleyecek ve kompozit deformasyon yumuşaması davranışı gösterecektir. ECC'nin aksine, çoğu lifli kompozit deformasyon yumuşaması davranışını ilk çatlaktan hemen sonra göstermektedir. ECC'nin tokluk hesabında ilk çatlak bölgesi ile deformasyon sertleşmesi bölgesinde yük-sehim eğrisi altında kalan alanlar hesaplanmış ve bu değerlerin toplamına bağıl tokluk adı verilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.3 Dört noktali eğilme deneyinde numune boyutları ve yükleme şartları.



Şekil 2.4 Yük-sehim eğrisi ve parametrik noktalar.

Eğilme deneyi sonrasında numuneler (25x60x300 mm boyutlarında) üzerindeki çatlak sayısı ve genişlikleri Dino - Lite Premier markalı bir dijital el optik mikroskobu yardımıyla ölçülmüştür. Dijital el mikroskobunun kamera çözünürlüğü 5 megapiksel olup, 250 kat büyütme imkanı tanımaktadır. Çatlak sayıları ve genişlikleri bulunurken, numunenin uzunluğu doğrultusunda (300 mm uzunluğunda) ve eninin (60 mm) ortasından geçecek şekilde bir çizgi çizilmiştir. Çatlak genişlikleri ölçülürken bu çizginin hemen altı ve üstünde yaklaşık olarak numune genişliğinin yarısı ve daha uzun olan çatlaklar dikkate alınmıştır. Çatlak genişliklerinin belirlenmesinde, numune orta bölgesindeki (180 mm uzunluğundaki) çatlaklar dikkate alınmıştır (Şekil 2.5).

Optik mikroskopla elde edilen veriler ile ortalama çatlak genişliği, ortalama çatlaklar arası mesafe ve çatlak genişliği standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Ortalama çatlak genişliği hesaplanırken; numune yüzeyindeki çatlak genişliği değerleri toplamının çatlak sayısına bölünmesiyle, ortalama çatlaklar arası mesafe hesaplanırken; çatlak ölçümünün yapıldığı uzunluğun (180 mm) çatlak sayısına bölünmesiyle bulunmuştur. Bu hesaplamalar yapılırken deney sırasında göçmeye neden olan büyük çatlaklar, diğer çatlaklara kıyasla çok daha fazla genişlediği ve Griffith tipi çatlığa dönüştüğü için dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.5 Çatlak analizi yönteminde kullanılan portatif el mikroskobu ve numune üzerinde yapılan işlemler.

2.4 Deneysel Bulgular ve Tartışma

Kompozitlerin yük-sehim eğrileri kullanılarak elde edilen ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı, sehim kapasitesi, bağıl tokluk ve çatlak özellikleri arasındaki ilişkiler bu bölümde sunulacaktır.

2.4.1 Yük-Sehim Eğrileri

28 günlük ve 180 günlük numuneler için sırasıyla Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de sunulmuştur. Şekillerin sol sütununda M1 matrisli numuneler, sağ sütununda M2 matrisli numuneler gösterilmiştir. Şekillerin ilk satırında lif dozajı %1,5, ikinci satırında %2,0 ve üçüncü satırında da %2,5 olan numunelerin grafikleri verilmiştir. Her bir grafik kendi içerisinde, doğal boşluk yapısına sahip olan (sarı renkte) ve boşluk yapısına müdahale edilmiş numuneleri (kırmızı renkte) içermektedir (Örn: Şekil 2.6a). Grafiklerin içerisinde, her serinin maksimum eğilme yükü ve karşılık gelen orta nokta sehim kapasitesi değerlerinin ortalamaları alınarak noktalar halinde gösterilmiştir (Örn: Şekil 2.6a).

2.4.1.1 28 Günlük Numunelerin Yük - Sehim Eğrileri

28 günlük numunelerin deney sonuçları incelendiğinde, M1 serisi numunelerinde lif dozajının %1,5'den %2,0'ye çıkartılmasıyla numunelerin sehim kapasitesi ve maksimum eğilme yükü değerleri artmıştır (Şekil 2.6a; Şekil 2.6b). Ancak, lif dozajının %2,5'e çıkartılması ile numunelerin hem yük taşıma hem de sehim kapasitesinin azaldığı görülmüştür (Şekil 2.6c).

Numunelere plastik tane ilavesi (yapay kusur oluşturma) yapılması (M1B), lif dozajı %1,5 olan numunelerde (Şekil 2.6a) sehim kapasitesinde %68 oranında artışa sebep olurken, yük taşıma kapasitesinde bir miktar azalma göstermiştir. Hacimce %2,0 oranında lif içeren numunelerin yük değerlerinde %40 oranında, sehim değerlerinde de %10 civarında azalmaya sebep olmuştur (Şekil 2.6b). Lif dozajı %2,5 olan numunelerde ise plastik tane kullanımı ile yük değerlerinde %10 oranında, sehim değerlerinde de %40 civarında artış olduğu görülmüştür (Şekil 2.6c).

Kireçtaşı tozu yerine silis tozunun kullanıldığı M2 serisinin 28 günlük deney sonuçları incelendiğinde, %1,5 lif içeren numunelerde en fazla sehim kapasitesinin elde edildiği görülmüştür (Şekil 2.6d). Lif dozajının %2,0'ye çıkartılması sehim kapasitesini %9 azaltırken yük taşıma kapasitesini %17 arttırmıştır (Şekil 2.6e). Ancak, lif dozajının %2,5'e çıkartılması performansı olumsuz etkilemiş ve sehim kapasitesi %36, yük taşıma kapasitesi de %23 azalmıştır (Şekil 2.6f).

M2 serisinde plastik tane kullanımının etkisi incelendiğinde (M2B), %1,5 lif dozajında sehim kapasitesinde %30 ve yük taşıma kapasitesinde de %20 oranında azalma görülmektedir (Şekil 2.6d). %2,0 lif içeren numunelerde ise yük değeri %20 azalırken, sehim değeri %5 civarında artmıştır (Şekil 2.6e). Lif dozajının %2,5 olduğu numunelerde ise plastik tane kullanımı yük ve sehim değerlerinde %15 oranında azalmaya sebep olmuştur (Şekil 2.6f).

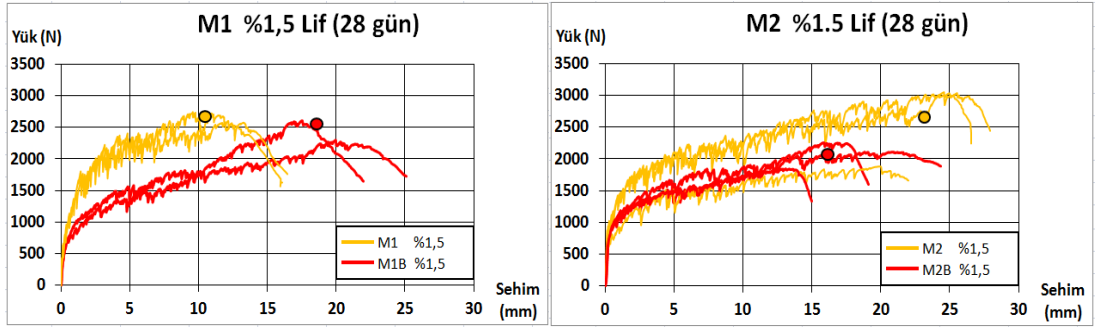
Kireçtaşı tozu içeren numuneler (M1 serisi) ile silis tozu içeren numunelerin (M2 serisini) 28 günlük sonuçları kıyaslandığında, %1,5 lif dozajında silis tozu kullanımı yük değerinde %4, sehim değerinde de %143 oranında bir artış görülmüştür (Şekil 2.6a ve Şekil 2.6d). Aynı serinin plastik tane eklenmiş numunelerinde ise yük ve sehim değerinde sırası ile %20 ve %15 e varan azalmalar gözlenmiştir.

%2,0 lif içeren numunelerde kireçtaşı tozu yerine silis tozu kullanımı ile yük ve sehim değerinde sırasıyla %13 ve %35 civarında artış olmuştur. Aynı serinin plastik tane eklenmiş numunelerinde ise yük ve sehim değerlerinde sırası ile %30 ve %40 artış olmuştur (Şekil 2.6b ve Şekil 2.6e).

Lif dozajı %2,5 olan numunelerde ise silis tozu kullanımı ile yük ve sehim değerinde sırasıyla %7 ve %40 seviyelerinde artış meydana gelmiştir. Aynı serinin plastik tane eklenmiş numunelerinde ise yük ve sehim değerinde sırası ile %33 artış ve %30 a varan azalma olmuştur (Şekil 2.6c ve Şekil 2.6f).

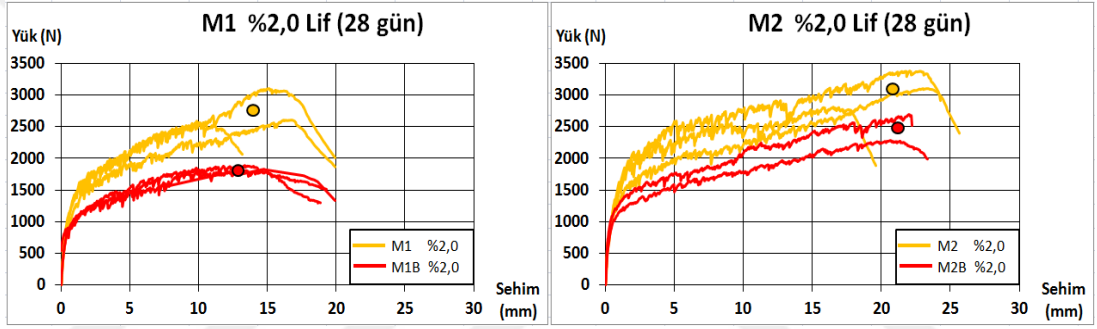
Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, matriste mikro agrega olarak kireçtaşı tozu yerine silis tozu kullanımı 28 günlük numunelerin hem yük hem de sehim kapasitelerini çoğunlukla arttırmıştır. Burada silis mikro agregalı serilerin kireçtaşına göre çok daha ince olması nedeniyle, benzer akış özelliği için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı dozajının iki katına çıktığını belirtmekte yarar vardır. Böylece lif matris arasındaki geçiş bölgesi daha kompakt (sıkışmış) bir yapı kazanmış olabilir. Böylece çatlama ile beraber açılan kesitteki köprüleme gerilmesi çatlak açıklığı ilişkisinin yukarı ötelenmiş olduğu düşünülmektedir.

Silis mikro agregası kullanılan serilerde gözlenen sehim kapasitesi artışının bir başka nedeni de yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı kullanmanın yol açacağı mikro hava sürüklenme etkisi olabilir. Bu durumda ilk çatlak sonrası göçme yüküne kadar aktive olacak kusur sayısı artacağından yük sehim eğrisinin silis mikro agregası kullanımı ile sağa doğru ötelenmiş olduğu düşünülmektedir.



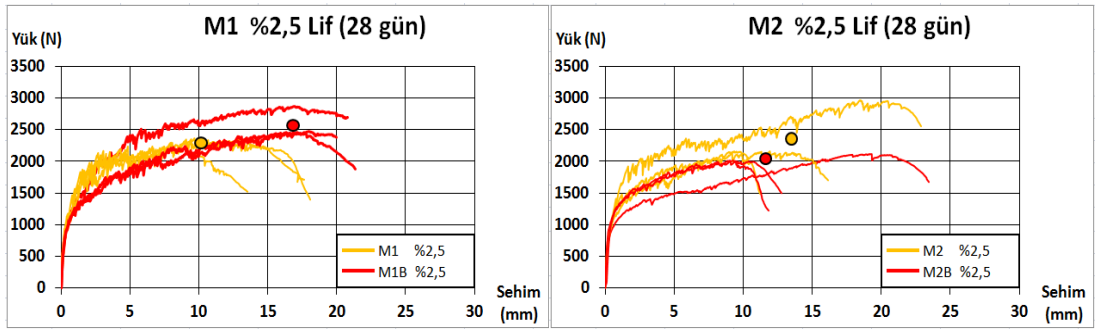
(a)

(d)



(b)

(e)



(c)

(f)

Şekil 2.6 28 günlük yük-sehim eğrileri. a) 28 günlük %1,5 lif içeren M1 serisi, b) 28 günlük %2,0 lif içeren M1 serisi, c) 28 günlük %2,5 lif içeren M1 serisi, d) 28 günlük %1,5 lif içeren M2 serisi, e) 28 günlük %2,0 lif içeren M2 serisi, f) 28 günlük %2,5 lif içeren M2 serisi,

2.4.1.2 180 Günlük Numunelerin Yük - Sehim Eğrileri

180 günlük numunelerin deney sonuçları incelendiğinde, M1 serisi numunelerinde lif dozajının %1,5'den %2,0'ye çıkartılmasıyla numunelerin sehim kapasitesinin %18 ve maksimum eğilme yükü değerlerinin ise %27 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 2.7a; Şekil 2.7b). Ancak, lif dozajının %2,5'e çıkartılması ile numunelerin yük taşıma kapasitelerinde önemli değişiklik gözlenmezken sehim kapasitesinin %23 azaldığı görülmüştür (Şekil 2.7c). %1,5 lif içeren numuneler, bu seri içinde gerek eğilme yükü gerekse sehim kapasiteleri açısından en iyi sonucu vermektedir.

Plastik tane ilavesi ile (M1B), lif dozajı %1,5 olan numunelerde (Şekil 2.7a) sehim kapasitesi %35 oranında artarken, yük taşıma kapasitesi %33 oranında azalma göstermiştir. Hacimce %2,0 oranında lif içeren numunelerin maksimum yük değerleri %20 oranında azalmış, sehim kapasitesi değerleri ise %35 civarında artmıştır (Şekil 2.7b). Lif dozajı %2,5 olan numunelerde ise plastik tane kullanımı ile yük taşıma kapasitesinde %15 oranında azalma ve sehim kapasitesinde az miktarda artış olduğu görülmüştür (Şekil 2.7c).

Kireçtaşı tozu yerine silis tozunun kullanıldığı serilerde (M2 serisi), 180 günlük eğilme deneyi sonrasında %1,5 lif içeren numunelerde en fazla sehim kapasitesi elde edilmiştir (16 mm) (Şekil 2.7d). Lif dozajının %2,0'ye çıkartılması sehim kapasitesini %20 azaltırken yük taşıma kapasitesini %15 arttırmıştır (Şekil 2.7e). Lif dozajının %2,5'e çıkartılması ise performansı olumsuz etkilemiş, sehim kapasitesini %16, yük taşıma kapasitesini ise %15 azalmıştır (Şekil 2.7f).

M2 serisinde plastik tane kullanımının etkisi incelendiğinde, %1,5 lif dozajında sehim kapasitesinde %12 artış gözlenirken, yük taşıma kapasitesinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir (Şekil 2.7d). %2,0 lif içeren numunelerde ise yük değerlerinde %26 oranında azalma, sehim değerlerinde ise %20 civarında artış görülmüştür (Şekil 2.7e). Lif dozajının %2,5 olduğu numunelerde ise plastik tane

kullanımı yük değerlerinde %33 ve sehım değerlerinde ise %45 oranında azalmaya sebep olmuştur (Şekil 2.7f).

Kireçtaşı tozu içeren numuneler (M1 serisi) ile silis tozu içeren numunelerin (M2 serisini) 180 günlük sonuçları kıyaslandığında, %1,5 lif dozajında silis tozu kullanımı, yük değerinde %38 gibi bir azalmaya, sehım değerinde de %32'ye varan bir artışa neden olmuştur (Şekil 2.7a ve Şekil 2.7d). Aynı serilerin plastik tane eklenmiş numunelerinde ise M1 serisinin yük taşıma kapasitesi M2 serisine kıyasla daha fazla iken, sehım kapasitesi açısından M2 matrisi M1'e kıyasla daha avantajlıdır.

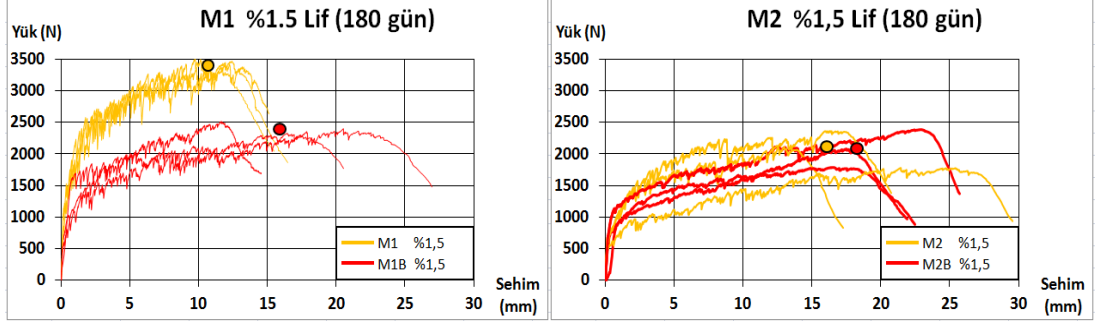
%2,0 lif içeren numunelerde silis tozu kullanımı yük ve sehım kapasitesi değerinde sırasıyla kireçtaşı tozu içeren numunelere kıyasla %12 azalma ve %35 civarında artışa neden olmuştur. Aynı serinin plastik tane eklenmiş numunelerinde de yine M1 matrisi yük taşıma kapasitesi açısından, M2 matrisi de sehım kapasitesi açısından daha iyi sonuç vermiştir (Şekil 2.7b ve Şekil 2.7e).

Lif dozajı %2,5 olan numunelerde ise silis tozu kullanımı ile yük taşıma ve sehım kapasitesinde kireçtaşı tozu kullanılan numunelere göre sırasıyla %20 oranında azalma ve %37 oranında artış olmuştur. Aynı serilerin plastik tane eklenmiş numunelerinde ise yük ve sehım değerinde sırası ile %29 ve %15'e varan azalma olmuştur (Şekil 2.6c ve Şekil 2.6f).

180 günlük numunelerin yük-sehım eğrileri genel olarak değerlendirilecek olursa, matriste mikro agrega olarak kireçtaşı tozu yerine silis tozu kullanımı ile numunelerin yük taşıma kapasiteleri azalırken, sehım yapma kapasiteleri çoğunlukla artmaktadır.

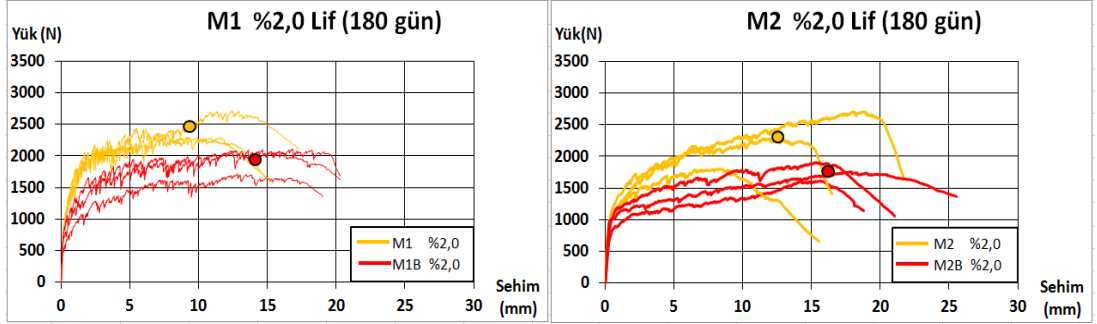
28 günlük ve 180 günlük numuneler birlikte kıyaslandığında ise, M1 numunelerinin zamana bağlı olarak yük taşıma kapasitelerinin genel olarak arttığı, sehım kapasitelerinin ise azaldığı görülmektedir. M2 numunelerinde ise hem yük taşıma kapasitesi hem de sehım kapasitesi değerlerinde azalma olduğu tespit

edilmiştir. Ancak, yapılan plastik tane ilavesiyle bazı numunelerde istisnai performans artışı olduğu görülmüştür.



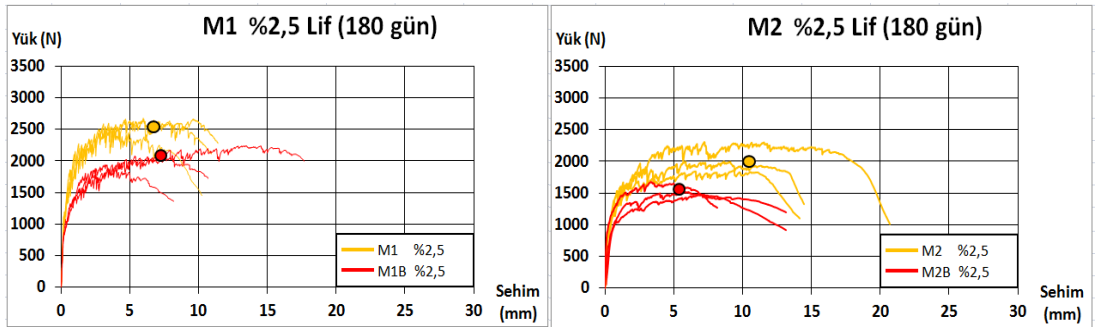
(a)

(d)



(b)

(e)



(c)

(f)

Şekil 2.7 180 Günlük yük-sehim eğrileri. a) 180 günlük %1,5 lif içeren M1 serisi, b) 180 günlük %2,0 lif içeren M1 serisi, c) 180 günlük %2,5 lif içeren M1 serisi, d) 180 günlük %1,5 lif içeren M2 serisi, e) 28 günlük %2,0 lif içeren M2 serisi, f) 180 günlük %2,5 lif içeren M2 serisi.

2.4.2 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehım Kapasitesi

Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen numunelerin yük-sehım eğrilerinden elde edilen ortalama ilk çatlak ve eğilme dayanımları Şekil 2.8’de sunulmuştur. Sol sütunda M1 serisi grafikleri, sağ sütunda ise M2 serisi grafikleri verilmiştir. 28 günlük numuneler birinci satırda, 180 günlük numuneler ise ikinci satırda gösterilmiştir.

28 günlük numunelerin ilk çatlak dayanımları 3 MPa ile 5 MPa arasında, eğilme dayanımları ise 13 MPa ile 22 MPa arasındadır. 28 günlük numuneler incelendiğinde, M1 serisi numunelerinin ilk çatlak dayanımları lif dozajının %1,5’den %2,0’ye artırılmasıyla bir miktar azalmış, lif dozajının %2,5’e çıkartılmasıyla ise artmıştır (Şekil 2.8a). Eğilme dayanımlarında ise lif dozajının %2,0’a çıkartılmasıyla dayanım bir miktar artmış ancak lif dozajının %2,5’e çıkartılmasıyla dayanım değerinin tekrar azaldığı görülmüştür (Şekil 2.8a). Plastik tane ilavesiyle numunelerin ilk çatlak dayanımlarında sistematik bir değişim görülmezken, ortalama eğilme dayanım değerinin %1,5 ve %2,0 lif içeren numunelerde azaldığı, %2,5 lif içeren numunelerde ise arttığı görülmüştür (Şekil 2.8a).

M2 serisi numuneleri incelendiğinde ise ilk çatlak dayanımlarının genel olarak M1 serisine kıyasla arttığı, ancak lif dozajı artışı ile sistematik bir değişim göstermediği belirlenmiştir (Şekil 2.8b). Numunelerin eğilme dayanımları da benzer şekilde M1 matrisine kıyasla artmıştır. Lif dozajının %1,5’den %2,0’ye çıkartılmasıyla eğilme dayanımları artarken, lif dozajının %2,5’e çıkartılmasıyla eğilme dayanımı düşmüştür (Şekil 2.8b).

28 günlük numunelerin eğilme dayanımları dikkate alındığında %2,0 oranında lif içeren numunelerin en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

180 günlük numuneler incelendiğinde ilk çatlak dayanımları 4 MPa ile 7 MPa, eğilme dayanımları ise 12 MPa ile 24 MPa arasındadır. M1 serisi numunelerinin ilk çatlak dayanımları lif dozajının %1,5’den %2,0’ye artırılmasıyla bir miktar azalmış,

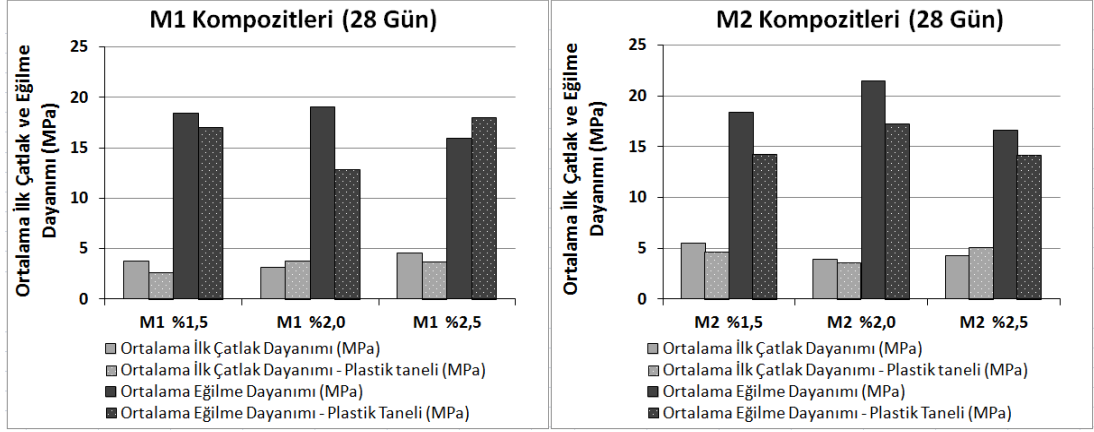
lif dozajının %2,5'e çıkartılmasıyla ise artmıştır (Şekil 2.8c). Eğilme dayanımları ise lif dozajının %2,0'ye çıkartılmasıyla azalmış, lif dozajının %2,5'e çıkartılmasıyla önemli bir değişiklik göstermemiştir (Şekil 2.8c). Plastik tane ilavesiyle numunelerin hem ilk çatlak dayanımlarında hem de eğilme dayanımlarında sistematik bir azalma olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.8c).

M2 serisi numuneleri incelendiğinde ise ilk çatlak dayanımlarının genel olarak M1 serisine kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Ancak, lif dozajı artışı ile ilk çatlak dayanımlarının artma eğiliminde olduğu söylenebilir (Şekil 2.8d). Numunelerin eğilme dayanımları da benzer şekilde M1 matrisine kıyasla azalmıştır. Lif dozajının %1,5'den %2,0'ye çıkartılmasıyla eğilme dayanımları bir miktar artarken, lif dozajının %2,5'e çıkartılmasıyla eğilme dayanımında bir miktar düşüş gözlenmiştir (Şekil 2.8d). Plastik tane ilavesiyle lif dozajı %1,5 olan numunelerde herhangi bir performans değişimi olmamış ancak lif dozajı %2,0 ve %2,5 olan serilerde performans kaybı yaşanmıştır.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, silis tozu kullanılan numunelerin erken yaş dayanımlarının kireçtaşı tozu kullanılan serilere göre daha fazla olduğu ancak, uzun dönem performansları dikkate alındığında kireçtaşı tozu içeren numunelerin dayanımlarının arttığı, silis tozu içeren numunelerde ise azaldığı görülmüştür. Yapılan plastik tane ilavesi numunelerin dayanımlarını genellikle azaltmıştır.

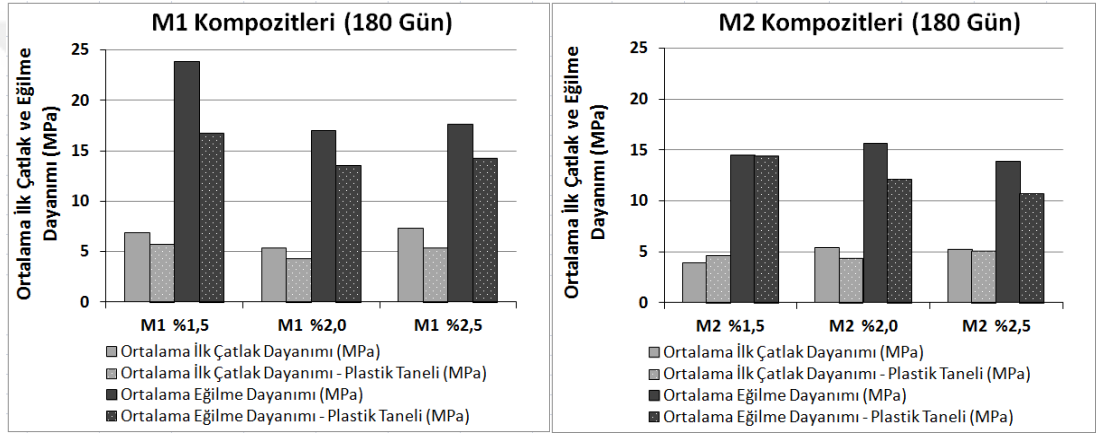
Normal betonda eğilme dayanımı 2 MPa ile 8 MPa arasında değişirken; bu kompozitte eğilme dayanımının 24 MPa'a kadar yükseldiği gözlenmiştir. Lif kullanımı eğilme dayanımını 3 kata kadar arttırmıştır.

28 günlük M1 serisi numunelerin sehim kapasitesi incelendiğinde, en yüksek sehim kapasitesi %2,0 lif dozajında elde (14 mm) edilmiştir. Ancak, plastik tane ilavesiyle %2,0 lif dozajında sehim kapasitesi azalmış (11,7 mm) %1,5 ve %2,5 lif dozajlarında sehim kapasiteleri belirgin bir şekilde artmış 17 – 18 mm mertebelerine ulaşmıştır.



(a)

(b)



(c)

(d)

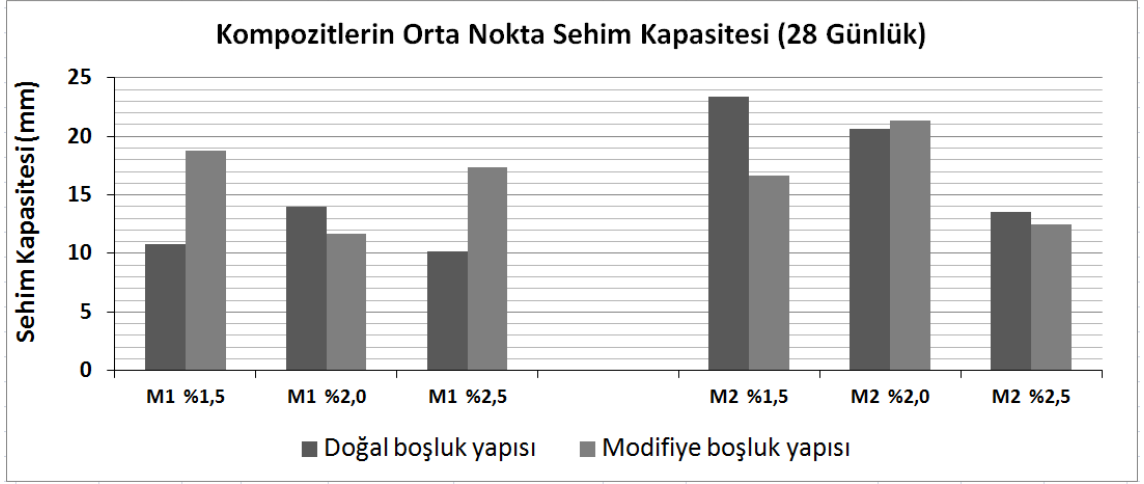
Şekil 2.8 Ortalama ilk çatlak/eğilme dayanımı grafikleri. a) 28 günlük kompozitlerin M1 serisi, b) 28 günlük kompozitlerin M2 serisi, c) 180 günlük kompozitlerin M1 serisi, d) 180 günlük kompozitlerin M2 serisi.

Orta nokta seh m kapasitesi değerleri 28 günlük numuneler için Şekil 2.9’da, 180 günlük numuneler için ise Şekil 2.10’da sunulmuştur.

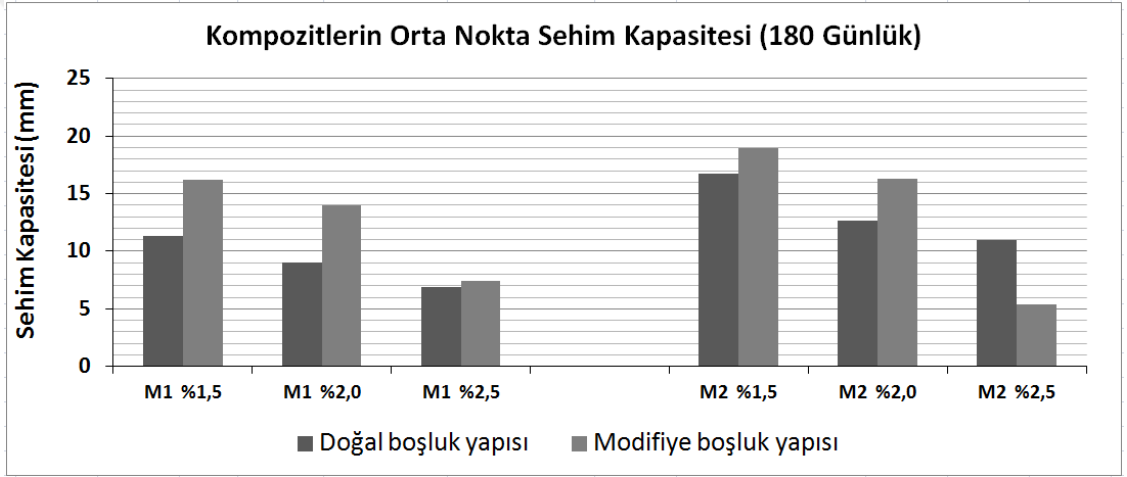
M2 serisi numunelerinde ise en yüksek seh m kapasitesi %1,5 lif dozajında (23,5 mm) elde edilmiş ve artan lif dozajıyla beraber giderek azalmıştır. Plastik tane ilavesiyle %1,5 ve %2,5 lif dozajlarında seh m kapasiteleri azalırken, %2,0 lif dozajında bir miktar artmıştır. En düşük seh m kapasitesi %2,5’de elde edilmiştir (13 – 14 mm) (Şekil 2.9).

180 günlük numuneler incelendiğinde hem M1 hem de M2 matrislerinde en yüksek seh m kapasiteleri %1,5 lif dozajında elde edilmiş ve artan lif dozajına bağlı olarak azalmıştır. Yapılan plastik tane ilavesi ile neredeyse tüm numunelerin seh m kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Tek istisna %2,5 lif dozajındaki M2 matrisidir (Şekil 2.10). En yüksek orta nokta seh m değerleri veren 28 günlük %1,5 lif içeren M2 matrisinin fotoğrafları Şekil 2.11’de verilmiştir.

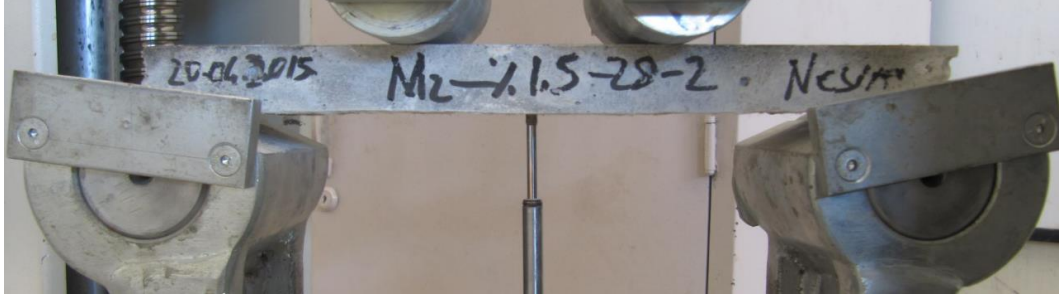
Sonuçlar genel olarak değerlendirilecek olursa, silis tozu içeren numuneler seh m kapasitesi açısından hem kısa hem de uzun dönemde kireçtaşı tozu içerenlere kıyasla daha yüksek performans göstermektedir. Kireçtaşı tozu içeren numunelerde, yalnızca %1,5 lif içeren numuneler uzun dönemde seh m kapasitesi açısından performansını koruyabilmiştir.



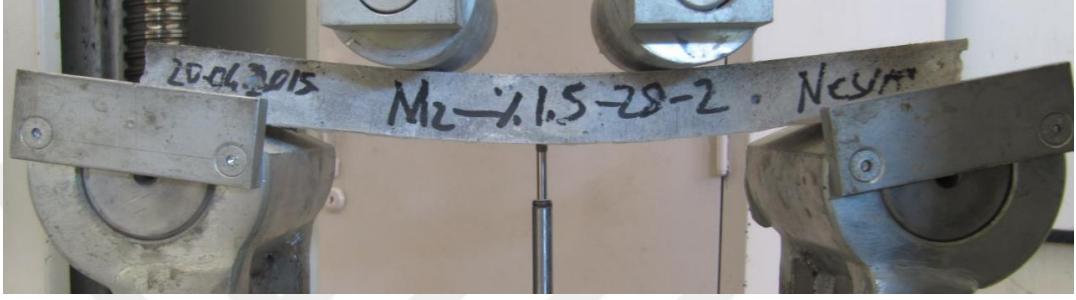
Şekil 2.9 Kompozitlerin 28 günlük orta nokta sehim kapasitesi grafikleri.



Şekil 2.10 Kompozitlerin 180 günlük orta nokta sehim kapasitesi grafikleri.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.11 28 günlük kompozitlerin orta nokta sehim fotoğrafları (M2 %1,5 – 28 serisi 2. numunesi).
a) Orta nokta sehim = 0 mm, b) Orta nokta sehim = 10 mm, c) Orta nokta sehim = 20 mm, d) Orta nokta sehim = 27 mm.

2.4.3 Bağıl Tokluk Değerleri, Çatlak Sayısı ve Genişliği

Numunelerin yük-sehim eğrilerinden elde edilen bağıl tokluk değerleri ile çatlak sayısı ve genişlikleri arasındaki ilişki Şekil 2.12’de verilmiştir. Sol sütunda M1 serisi grafikleri, sağ sütunda ise M2 serisi grafikleri; birinci satırda 28 günlük, ikinci satırda ise 180 günlük numuneler gösterilmiştir. Doğal boşluk yapısına sahip numuneler gri sütunlar halinde ve plastik tane ilavesi yapılan numuneler siyah sütunlar halinde belirtilmiştir. Çatlak sayısı değerleri çizgisel olarak gösterilmiş ve çatlak genişlikleri de her seri için kendi sütununun yanında rakamla verilmiştir.

M1 serilerinde 28 günlük numunelerin çatlak sayıları 60 ile 120 aralığında, bağıl tokluk değerleri 15000 ile 35000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 56 ile 14 μm aralığında değişmektedir. M2 serilerinde ise 28 günlük numunelerin çatlak sayıları 25 ile 95 aralığında, bağıl tokluk değerleri 20000 ile 50000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 47 ile 26 μm aralığında değişmektedir.

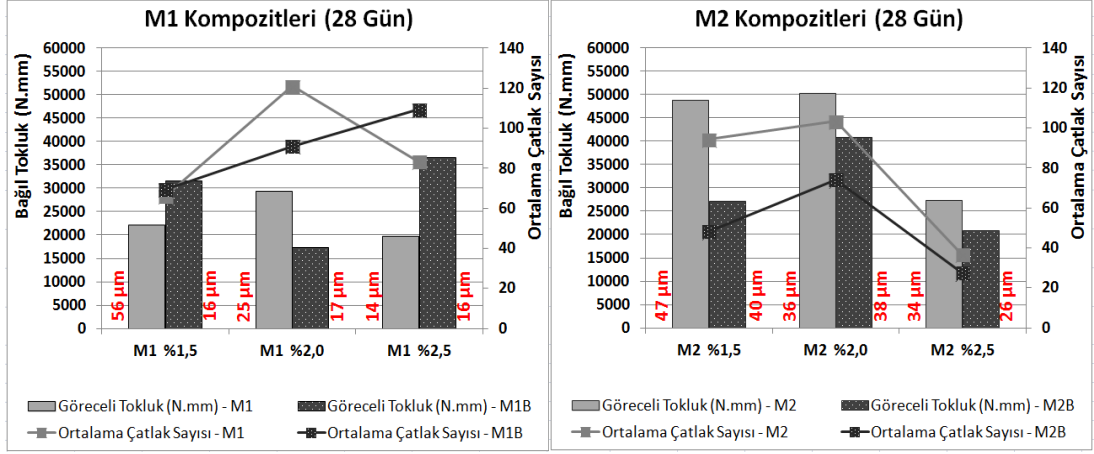
M1 serisi numunelerinin 28 günlük bağıl tokluk ve çatlak sayısı değerleri dikkate alındığında, hem çatlak sayısı hem de bağıl tokluk değerlerinin lif dozajının %1,5’den %2,0’a yükseltilmesiyle arttığı ancak %2,5 lif dozajında tekrar azaldığı görülmüştür (Şekil 2.12a). Plastik tane ilavesiyle %1,5 ve %2,5 numunelerinde çatlak sayısı ve buna bağlı olarak bağıl tokluk değerleri artış göstermiştir. %2,0 lif içeren numunelerde ise hem çatlak hem de bağıl tokluk değerleri azalmıştır (Şekil 2.12a). Çatlak genişliklerinin ise plastik tane ilavesi ile genel olarak azaldığı söylenebilir.

M2 serisinin 28 günlük numunelerinde de benzer şekilde lif dozajının %1,5’den %2,0’a arttırılmasıyla çatlak sayısı ve bağıl tokluk değerlerinin arttığı görülmüştür. Ancak, lif dozajının %2,5’e çıkartılmasıyla hem çatlak hem de bağıl tokluk değerlerinde belirgin bir düşüş olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.12b). Numunelere plastik tane ilavesi yapılması performansı olumsuz olarak etkilemiş ve tüm M2 serisi numunelerinin 28 gündeki çatlak sayısı ve bağıl tokluk değerleri azalmıştır (Şekil 2.12b). Ayrıca, çatlak genişliklerinin de plastik tane ilavesiyle genel olarak azalmakta olduğu tespit edilmiştir.

M1 serilerinde 180 günlük numunelerin çatlak sayıları 50 ile 90 aralığında, bağıl tokluk değerleri 13000 ile 32000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 55 ile 35 µm aralığında değişmektedir. M2 serilerinde ise 180 günlük numunelerin çatlak sayıları 7 ile 95 aralığında, bağıl tokluk değerleri 6000 ile 32000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 19 ile 39 µm aralığında değişmektedir.

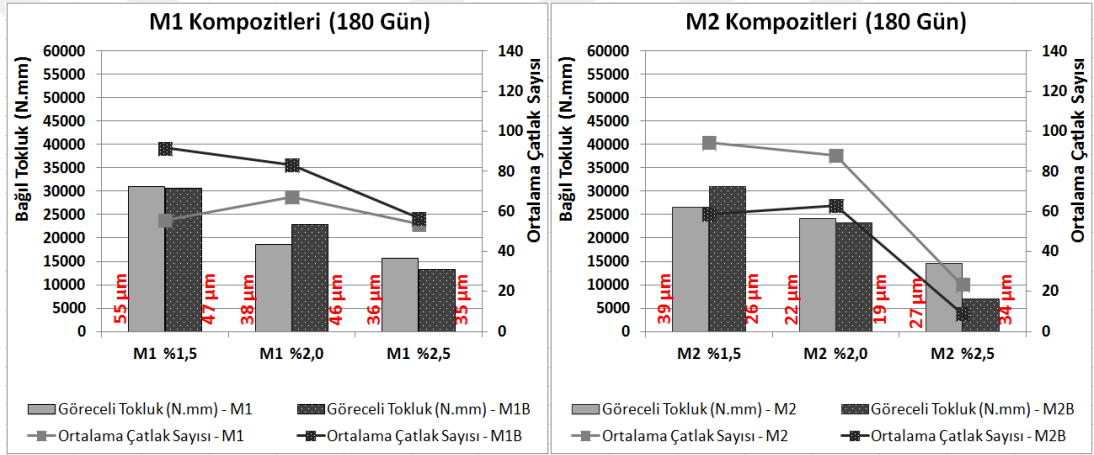
M1 serisi numunelerinin 180 günlük bağıl tokluk ve çatlak sayısı değerleri dikkate alındığında, lif dozajının artmasıyla çatlak sayısı önce artmakta daha sonra tekrar azalmaktadır. Tokluk ve çatlak genişliği değerleri ise lif dozajı arttıkça azalmaktadır (Şekil 2.12c). Sabit lif dozajında plastik tane ilavesinin etkisi incelendiğinde, tüm numunelerin çatlak sayısı arttığı, tokluk ve çatlak genişliği değerlerinde ise plastik tane ilavesinin sistematik bir değişim yaratmadığı görülmüştür (Şekil 2.12c).

M2 serisi 180 günlük numunelerinde lif dozajının %1,5'den %2,0'a arttırılmasıyla hem çatlak sayısı hem de bağıl tokluk değerlerinin fazla değişmediği görülmüştür. Ancak, lif dozajının %2,5'e çıkartılmasıyla hem çatlak hem de bağıl tokluk değerlerinde belirgin bir düşüş olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.12d). Numunelere plastik tane ilavesi yapılması performansı olumsuz olarak etkilemiş ve tüm M2 serisi numunelerinin 180 gündeki çatlak sayısı ve tokluk değerleri azalmıştır (Şekil 2.12d). Ayrıca, çatlak genişliklerinin de plastik tane ilavesiyle genel olarak azalmakta olduğu belirlenmiştir.



(a)

(b)



(c)

(d)

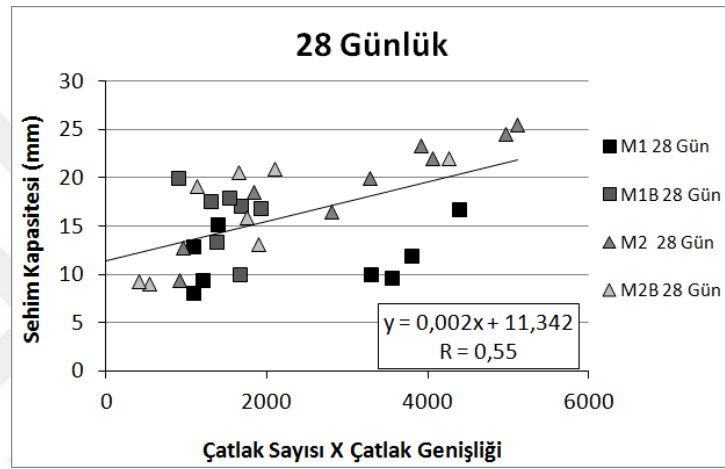
Şekil 2.12 Tokluk, çatlak sayısı ve çatlak genişliği grafikleri: a) 28 günlük kompozitlerin M1 serisi, b) 28 günlük kompozitlerin M2 serisi, c) 180 günlük kompozitlerin M1 serisi, d) 180 günlük kompozitlerin M2 serisi.

2.4.4 Eğilme Deneyleri ve Çatlak Analizleri Sonucu Elde Edilen Bulgular Arasındaki İlişkiler

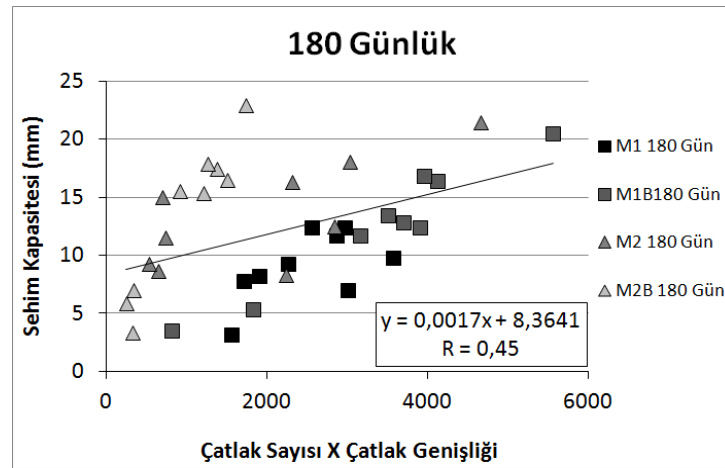
2.4.4.1 Sehım Kapasitesi – Çatlak Sayısı x Çatlak Genişliği İlişkisi

Kompozitlerin sehım kapasitelerini etkileyen en önemli iki parametre çatlak sayısı ve çatlak genişliğidir. Çatlak sayısı ve çatlak genişliği değerlerindeki artış kompozitin sehım kapasitesini arttıracaktır. Bu nedenle, kompozitlerin sehım

kapasitesi değerleri incelenirken kompozitlerin hem çatlak sayısı hem de çatlak genişliği değerleri birlikte ele alınmalıdır. Bu amaçla, tez kapsamında incelenen her bir kompozitin çatlak sayısı ve genişliği değeri çarpılarak rölatif bir değer elde edilmiş ve sehim kapasitesi ile ilişkisi incelenmiştir (şekil 2.13). Hem 28 günlük hem de 180 günlük kompozitlerin sehim kapasitesi değerleri ‘atlak sayısı x çatlak genişliği’ değeri arttıkça artmaktadır. Korelasyon katsayısı 28 günlük örneklerde 0,55 olarak tespit edilmiştir (şekil 2.13a). 180 günlük örneklerde ise korelasyon katsayısı bir miktar azalmış ve 0,45 olarak hesaplanmıştır (şekil 2.13b).



(a)

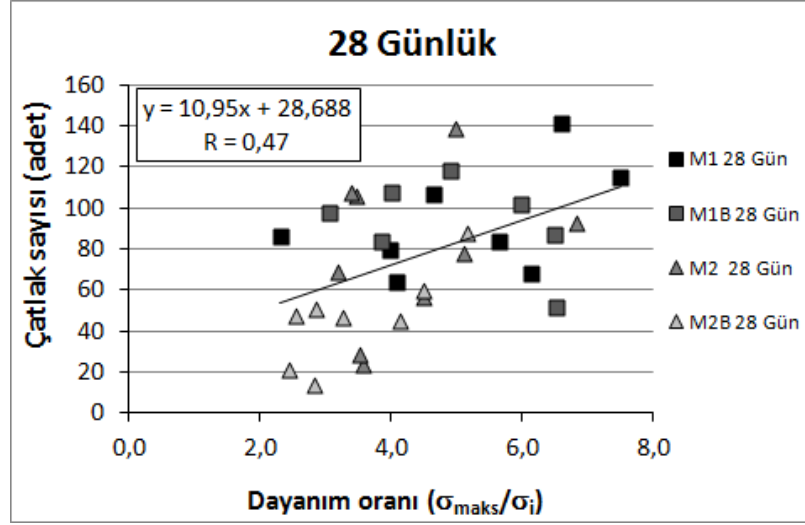


(b)

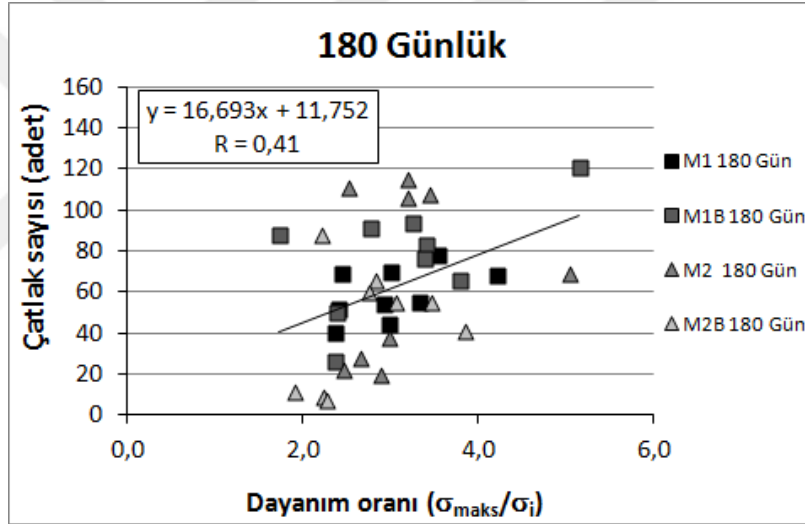
şekil 2.13 Kompozitlerin sehim kapasitesi ve çatlak sayısı x çatlak genişliği grafikleri: a) 28 günlük, b) 180 günlük.

2.4.4.2 Dayanım Oranı – Çatlak Sayısı İlişkisi

ECC üzerine yapılan çalışmalarda, kompozitlerin ilk çatlak eğilme dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki oranın artmasıyla ($\sigma_{maks}/\sigma_{ilk} = \text{dayanım oranı}$ (ECC mikromekanik teorisine göre dayanım kriteridir)), kompozitin çoklu çatlak davranışının da artacağı belirtilmiştir (Li, 1998). Ancak bu durum ECC mikromekanik teorisinde enerji kriterlerinin de sağlanması durumunda geçerlidir. Deneysel çalışmalarda incelenen kompozitlerde de dayanım oranı ile çatlak sayısı arasında benzer bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmış ve sonuçlar Şekil 2.14'te sunulmuştur. Kompozitlerin hem kısa hem de uzun dönem sonuçları değerlendirildiğinde, dayanım oranı ile çatlak sayısı arasında pozitif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.14). Korelasyon katsayıları 28 ve 180 günlük kompozitlerin için sırasıyla 0,47 ve 0,41 olarak hesaplanmıştır. Bu grafiklerdeki korelasyonların düşük olması, kompozitlerin enerji kriterini sağlamada farklılık göstermesinden dolayıdır. Hem dayanım, hem enerji kriteri açısından yüksek oranlar yakalayan kompozitlerde çatlak sayısı en üst mertebelere ulaşmaktadır.



(a)



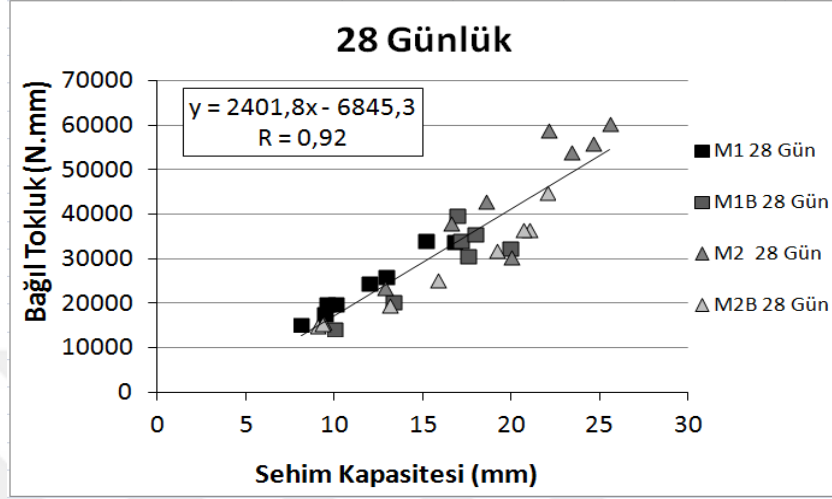
(b)

Şekil 2.14 Çatlak sayısı dayanım oranı grafikleri: a) 28 günlük, b) 180 günlük.

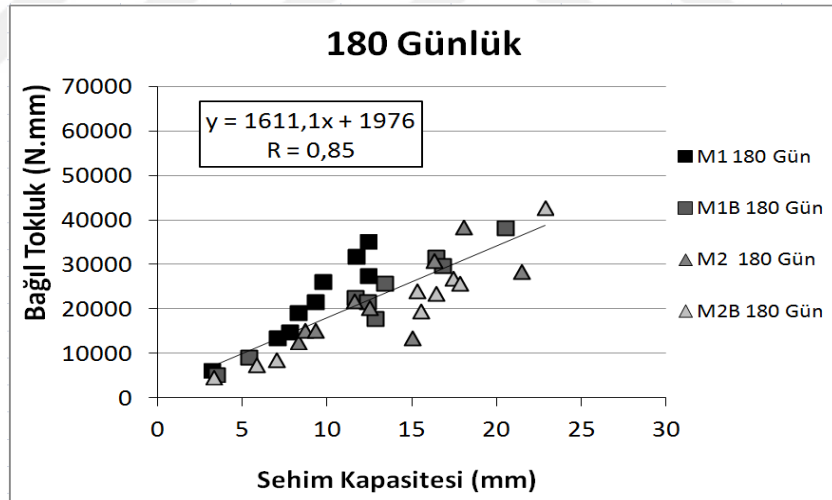
2.4.4.3 Sehîm Kapasitesi – Bağlı Tokluk İlişkisi

Kompozitlerin sehîm kapasiteleri ile bağılı tokluk değerleri arasındaki ilişki Şekil 2.15'te sunulmuştur. Şekil 2.15'te görüldüğü üzere sehîm kapasitesi ile göreceli tokluk değerleri arasında güçlü bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük örneklerde bu ilişki için korelasyon katsayısı $R=0,92$ olarak hesaplanmıştır. 180 günlük örneklerde korelasyon katsayısının bir miktar azaldığı ($R=0,85$), ancak halen

oldukça güçlü bir ilişkinin bulunduğu görülmüştür. Hem sehim kapasitesi hem de bağıl tokluk açısından en avantajlı seriler çoğunlukla silis tozu mikroagregalı M2 matrisler elde edilmiştir.



(a)



b

Şekil 2.15 Göreceli tokluk sehim kapasitesi grafikleri: a) 28 günlük, b) 180 günlük.

BÖLÜM ÜÇ

SONUÇLAR

Lif matris uyumu açısından 28 günlük eğilme dayanımı ve sehim kapasitesi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde optimum lif dozajı, kireçtaşı mikro agregalı serilerde %2,0, silis mikro agregalı serilerde %1,5 olarak tespit edilmiştir.

Matriste mikro agrega olarak kireçtaşı tozu yerine silis tozu kullanımı 28 günlük numunelerin hem yük taşıma kapasitelerini hem de sehim kapasitelerini arttırmıştır. Silis mikro agregalı serilerin kireçtaşı mikro yapısına göre çok daha ince olması nedeniyle, benzer akış özelliği için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı dozajı iki katına çıkmıştır. Böylece lif matris arasındaki geçiş bölgesi daha kompakt (sıkışmış) bir yapı kazanmış olabilir. Böylece çatlamayla beraber açılan kesitteki köprüleme gerilmesi çatlak açıklığı ilişkisinin yukarı ötelenmiş olduğu düşünülmektedir.

Gözlenen sehim kapasitesi artışının bir başka nedeni de yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı kullanmanın yol açacağı mikro hava sürüklenme etkisi olabilir. Bu durumda ilk çatlak sonrası göçme yüküne kadar aktive olacak kusur sayısı artacağından yük sehim eğrisinin sağa doğru ötelenmiş olduğu düşünülmektedir.

180 günlük %1,5 lif oranı içeren numuneler kendi serisi içinde sehim kapasitesi açısından en iyi sonucu vermektedir.

180 günlük numunelerin yük-sehim eğrilerinde matriste mikro agrega olarak kireçtaşı tozu yerine silis tozu kullanımı ile numunelerin yük taşıma kapasiteleri azalırken, sehim yapma kapasiteleri çoğunlukla artmaktadır.

28 günlük ve 180 günlük numuneler birlikte kıyaslandığında ise, M1 numunelerinde zamana bağlı olarak yük taşıma kapasitelerinin genel olarak arttığı, sehim kapasitelerinin ise azaldığı görülmektedir. M2 numunelerinde ise hem yük taşıma kapasitesi hem de sehim kapasitesi değerlerinde azalma olduğu tespit

edilmiştir. Ancak, yapılan plastik tane ilavesiyle bazı numunelerde performans artışı olduğu görülmüştür.

28 günlük numunelerin eğilme dayanımları dikkate alındığında %2 oranında lif içeren numunelerin en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirilecek olursa, silis tozu içeren numuneler sehîm kapasitesi açısından hem kısa hem de uzun dönemde daha yüksek performans göstermektedir. Kireç taşı tozu içeren numunelerde ise yalnızca %1,5 lif içeren numuneler uzun dönemde sehîm kapasitesi açısından performansını koruyabilmiştir.

M1 serisinde 28 günlük numunelerin çatlak sayıları 60 ile 120 aralığında, bağıl tokluk değerleri 15000 ile 35000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 56 ile 14 µm aralığında değişmektedir. M2 serisinde ise 28 günlük numunelerin çatlak sayıları 25 ile 95 aralığında, bağıl tokluk değerleri 20000 ile 50000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 47 ile 26 µm aralığında değişmektedir. Çatlak genişlikleri 100 µm den düşük olan bu kompozitlerin dayanıklılık açısından da avantajlı olacağı izlenimi vermektedir.

M1 serisinde 180 günlük numunelerin çatlak sayıları 50 ile 90 aralığında, bağıl tokluk değerleri 13000 ile 32000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 55 ile 35 µm aralığında değişmektedir. M2 serisinde ise 180 günlük numunelerin çatlak sayıları 7 ile 95 aralığında, bağıl tokluk değerleri 6000 ile 32000 N.mm aralığında, çatlak genişlikleri de 19 ile 39 µm aralığında değişmektedir.

KAYNAKLAR

Acun, S. (2000). *Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametresi olarak lifsel katkıların irdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Aral, M. (2006). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Bentur, A. ve Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. Amerika: CRC Press.

Boğazkesen, K. K. (2011). *PVA lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Chawla, K. K. (1998). Ceramic matrix composites. In *Composite Materials*, 212-251.

Committee, J. D. (2003). DFRCC terminology and application concepts. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 335-340.

Erbas, M. (1999). Lif donatılı betonlar. *Hazır Beton Dergisi*, 93-95.

Erdogan, T.Y. (2003). *Beton*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları.

Ekincioglu, Ö. (2015). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı–bir optimum tasarım*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit malzeme*. İstanbul: Literatür Yayınları.

Felekoğlu, B., Tosun-Felekoğlu, K., Keskinates, M. ve Godek, E, (2015). *Tübitak Araştırma Projesi Gelişme Raporu (Bilimsel Rapor)* Proje no : 114M246, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Felekoğlu, B. (2013). *Deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren gúřük maliyetli mühendislik kompozitlerinin geliştirilmesi*.Tübitak raporu no: 2219: Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Felekoğlu, B. (2009). *Yüksek performanslı mikro beton tasarımı*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Fischer, G. ve Li, V. C. (2002). Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC). *ACI Structural Journal*, 99(1).

Kalyoncu, H. (2007). *Çelik, karbon ve polivinil alkol (PVA) mikroliflerin tekil ve karma olarak kullanımının çimento harçların mekanik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Kanalli, S. A., Palankar, R., Kumar, B., Kumar, P. ve Parakash, S. K. (2014). Comparative Study of polymer fiber reinforced concrete with conventional concrete pavement. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2319-1163.

Keoleian, G., Kendall, A. M., Lepech, M. D. ve Li, V. C. (2005). Guiding the design and application of new materials for enhancing sustainability performance: Framework and infrastructure application. *Materials Research Society Proceedings*, 895, 0895-G06.

Kim, D. J., Naaman, A. E. ve El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 917-928.

- Lepech, M. ve Li, V. C. (2005). Design and field demonstration of ECC link slabs for jointless bridge decks. *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, 22 - 24.
- Li, V. C. ve Fischer, G. (2002). Influence of Matrix Ductility on Tension-Stiffening Behavior of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC). *ACI Structural Journal*, 99 (1), 104-111.
- Li, V. C. ve Leung, C. K. (1992). Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264.
- Li, V. C., Wang, S. ve Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal*, 98(6).
- Li, V. C. ve Wu, H. C. (1992). Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. *Applied Mechanics Reviews*, 45(8), 390-398.
- Li, V. C. ve Kanda, T. (1998). Innovations forum: Engineered Cementitious Composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69.
- Li, V.C. (1998). Engineered Cementitious Composites (ECC) –Tailored composites through micromechanical modeling. In *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Eds: N. Banthia, A. Bentur, A. Mufti, Canadian Society of Civil Engineer., Montreal, 64-97.
- Li, V. C. (2003). On engineered cementitious composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-230.

- Li, V. C. (2008). *Engineered cementitious composites (ECC)–material, structural and durability performance*. Florida: CRC Press, Concrete Construction Engineering Handbook, 1-78.
- Liang, S., Yang, H., Wang, K., Zhang, Q., Du, R. ve Fu, Q. (2008). Unique crystal morphology and tensile properties of injection-molded bar of LLDPE by adding HDPE with different molecular weights. *Acta Materialia*, 56(1), 50-59.
- Naaman, A. E. ve Reinhardt, H. W. (2006). Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures*, 39(5), 547-555.
- Santos, A. G., Rincon, J. M., Romero, M. ve Talero, R. (2005). Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing. *Construction and Building Materials*, 19 (5), 396–403.
- Shah, B. (1995). *Fiber-reinforced composites*, Amerika: American Concrete Institute.
- Stein, H. L. (1988). *Ultrahigh molecular weight polyethylenes(UHMWPE)*. Amerika: ASM International. Engineered Materials Handbook, 2, 167-171.
- Tai, R. K. (2015). *Upscaling of strain-hardening cementitious composites*. Doktora Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda.
- Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F. (2010). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*, 1(2).
- Tokyay, M., Ramyar, K. ve Turanlı, L. (1991). Polipropilen ve çelik lifli yüksek dayanımlı betonların basınç ve çekme yükleri altındaki davranışları. 2. *Ulusal Beton Kongresi*, 303-311, İstanbul.

- TS 10513. (1998). *Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 500 (2014). *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uğurlu, A. (1994). Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun özellikleri ve su yapılarında kullanılması. *Devlet Su İşleri Teknik Bülteni*, 80, 17.
- Van Zijl, G. P. A. G. ve Wittmann, F. H. (2010). Durability of strain-hardening fibre-reinforced cement-based composites (SHCC). *State of the Art Report, Springe*, 8-12.
- Van, Zijl G.P.A.G. ve Wittmann, F.H. (2008). *Durability of strain-hardening fibre-reinforced cement-based composites (SHCC). State of the Art Report*, 2, 120-129.
- Yang, E. H. (2008). *Designing added functions in engineered cementitious composites*. Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, Amerika.
- Yerlikaya, M. (1998). Çelik teller ile donatılmış beton elemanların düşey yük altında davranışları. *Hazır Beton Dergisi*, Eylül-Ekim, 72-73.
- Wagner, C. (2007). *Nachverfestigendes zementgebundenes Material für die Sanierung gerissener Betonoberflächen (Strain hardening cement-based material for the repair of cracked concrete surfaces)*. Yüksek Lisans Tezi, Leipzig Üniversitesi, Germany.
- Walraven, J. (1999). Structural concrete. *Journal of Fibers*, 1, 1, 3.
- Wang, S. (2005). *Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites*. Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, Amerika.