

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİF TÜRÜ VE MİKTARININ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN TEKRARLI YÜKLER
ALTINDAKİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Mert TATARCA

Ağustos, 2020
İZMİR

LİF TÜRÜ VE MİKTARININ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

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

Mert TATARCA

**Ağustos, 2020
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MERT TATARCA, tarafından **PROF. DR. BURAK FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan “**LİF TÜRÜ VE MİKTARININ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Burak FELEKOĞLU

Yönetici

.....
Prof.Dr.Selçuk TÜRKEL

Jüri Üyesi

.....
Doç.Dr. Tahir Kemal ERDEM

Jüri Üyesi

.....
Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans yapma kararı almamda bana ilham kaynağı olan, tez konumu seçmemde ve lisansüstü eğitimimin başından sonuna kadar yanımda olarak gelişmeye yardımcı olan, tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. Burak FELEKOĞLU'na,

Yardımları, tavsiyeleri ve güler yüzüyle her zaman bana destek olan değerli hocam Prof. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU'na,

Bu tezin yazımında başından sonuna kadar yanımda olan, teknik bilgi ve tecrübesiyle çalışmalarımı bana yardımcı olan arkadaşım Öğr. Gör. Eren GÖDEK'e,

Laboratuvar ve deneysel çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan, sürekli fikir alışverişinde bulunduğum arkadaşlarım Tarık YILDIRIM, Yunus SEYREK ve Ceren DUYAL'a,

Deneysel çalışmalarım için kullandığım cihaz ve malzemeleri temin etmemde yardımcı olan Dokuz Eylül Üniversitesi'ne,

Son olarak hayatta her daim yanımda olan ve koşulsuz şartsız sevgisini benden esirgemeyen çok sevdiğim ailem, annem Özgül TATARCA, babam Ramazan TATARCA ve abim Ahmet TATARCA'ya,

Sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Mert TATARCA

LİF TÜRÜ VE MİKTARININ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Betonarme yapılar; trafik yükleri, sıcaklık değişimleri, rüzgârlar, deniz dalgaları, depremler gibi çeşitli tekrar eden yüklere maruz kalmaktadır. Bu yüklere maruz kalan yapının rijitliğinde sürekli bir azalma, bunun sonunda ise yorulma kaynaklı göçmeler meydana gelir. Geleneksel betonunun tekrarlı yükler altındaki performansının zayıf olduğu bilinmektedir ve bir çeşit takviye içermediği sürece dinamik yükler altında kullanılması tavsiye edilmez. Çeşitli liflerin betona dahil edilmesi; çatlama direnci, yorulma yüklerine karşı direnç, süneklik ve darbe direnci gibi betonun birçok özelliğini de geliştirmektedir. Buradan yola çıkılarak, son yıllarda çeşitli polimer lifler kullanılarak oluşturulan, Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC) geliştirilmiştir. Polimer lif olarak genellikle poli-etilen (PE), poli-vinil alkol (PVA), yüksek dayanımlı poli-propilen (HTPP) lifler kullanılarak üretilen bu kompozitlerin; çekme, eğilme ve kesme kuvvetleri altında yüksek düktilite ve tokluğu çoklu çatlak davranışıyla sağlanır. Söz konusu davranış, polimerik lifli kompozitlerin, tekrarlı yükler altındaki performansını da arttırmaktadır.

Bu tez kapsamında %1,5 ve %2 oranlarında HTPP, PVA ve hem HTPP hem de PVA lif eşit oranda kullanılarak üretilen HİBRİT kompozitlerin tekrarlı yükler altındaki performansları incelenmiştir. Öncelikle çekme dayanımları bulunan bu kompozitler, ortalama çekme dayanımlarının %75, 85 ve 95'i olacak şekilde çekme gerilmesi kontrollü tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, numunelerin “gerilme-birim şekil değiştirme” ve “gerilme-çevrim sayısı” eğrileri çizdirilmiştir. Tekrarlı yükler altındaki rijitlik değişimini belirlemek için her bir çevrime ait sekant modülü değerleri hesaplanmış ve optik el mikroskobu yardımıyla numuneler üzerindeki çatlak sayıları kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlarda yorulma performansları bakımından, bir yapının sahada karşılaşacağı şartlar düşünüldüğünde

en yüksek çekme dayanımına ve bu dayanımda yapabildiği en yüksek çevrim sayısına %2 PVA lifli kompozitlerin ulaştığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Tekrarlı yükleme, yorulma, Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler, ECC, HTPP lif, PVA lif, HİBRİT lif



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FIBER TYPE AND AMOUNT ON THE PERFORMANCE OF CEMENT-BASED COMPOSITES UNDER REPETITIVE LOADING

ABSTRACT

Reinforced-concrete structures are exposed to various cyclic loads such as traffic loads, temperature changes, winds, sea waves, earthquakes. A continuous decrease in the stiffness of the structure exposed to these loads occurs at the end of it, resulting in fatigue collapses. Conventional concrete is known to have poor performance under cyclic loads and is not recommended for use under dynamic loads unless it contains some kind of reinforcement. The addition of various fibers to concrete also improves many properties of concrete, including cracking resistance, resistance to fatigue loads, ductility and impact resistance. Based on this, Engineered Cementitious Composite (ECC) have been developed in recent years, created using various polymer fibers. These composites produced using poly-ethylene (PE), poly-vinyl alcohol (PVA), high-tensile poly-propylene (HTPP) fibers as polymer fibers; high ductility and toughness are provided with multiple crack behavior under tensile, flexural and shearing loads. This behavior also increases the ductility performance of polymeric fiber composites under cyclic loads.

Within the scope of this thesis, the fatigue performance of HTPP, PVA and HYBRID composites which HYBRID is produced by using both HTPP and PVA fiber in equal proportions, at the rates of 1.5% and 2% are examined. Firstly, these composites with tensile strengths were subjected to load-controlled cyclic loading with 75%, 85 and 95% of average tensile strengths. As a result of the experiments, “the stress-unit strain” and “stress-number of cyclic” curves of the samples were drawn. In order to determine the stiffness change under repeated load, the secant modulus values of each cycle were calculated and the number of cracks on the samples were recorded with the help of an optical hand microscope. In terms of fatigue performance, considering the conditions that a structures come across in the field, it has been

observed that composites with 2% PVA fiber have reached the highest tensile strength and the highest number of cycles it can perform at this strength.

Keywords: Repetitive loading, fatigue, Engineered Cementitious Composite, ECC, HTPP fiber, PVA fiber, HYBRID fiber



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
1.1 Yorulmaya Sebep Olan Faktörler.....	3
1.1.1 Termal Yorulma.....	4
1.1.2 Korozyon Yorulması	5
1.1.3 Yapısal Yorulma.....	6
BÖLÜM İKİ - BETONUN YORULMASI	9
2.1 Sade (Yalın) Betonun Yorulması	10
2.2 Lif Takviyeli Kompozitlerin Yorulması	12
2.2.1 Çelik Lifli Kompozitlerin Yorulması	13
2.2.2 Polimer Lifli Kompozitlerin Yorulması	17
2.3 Yorulma Deneyi Prosedürleri.....	25
2.3.1 Gerilme (Yük) Kontrollü Yükleme	26
2.3.2 Deformasyon Kontrollü Yükleme	27
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı	29
3.2 Kullanılan Malzemeler	30
3.2.1 Bağlayıcı Toz Malzemeler	30
3.2.2 Polimerik Lifler	31
3.2.3 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı	32
3.3 Kompozitlerin Karışım Oranları ve Üretimi	32
3.4 Deney Yöntemi	35
3.4.1 Çekme Cihazı.....	35
3.4.2 Deneyler Sonucunda Elde Edilen Parametreler ve Analizler	37
BÖLÜM DÖRT - BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	40
4.1 Tek Eksenli Statik Çekme Deneyi	40
4.1.1 Lif Kullanılmadan Üretilen Numunelerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları	40
4.1.2 HTPP Lifli Kompozitlerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları	40
4.1.3 PVA Lifli Kompozitlerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları	42
4.1.4 Hem HTPP Hem de PVA Lifli Kompozitlerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları.....	43
4.1.5 Tek Eksenli Statik Çekme Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi	44
4.2 Çekme Gerilmesi Kontrollü Yorulma Deneyleri	45
4.2.1 %1,5 Lif Kullanılarak Üretilen Kompozitlerin Yorulma Testi Sonuçları	46
4.2.2 %2 Lif Kullanılarak Üretilen Kompozitlerin Yorulma Testi Sonuçları ..	50
4.2.3 Çekme Gerilmesi Kontrollü Yorulma Deneyleri Genel Değerlendirmesi	54

4.2.4 Lifli Kompozitlerin Yorulma Performanslarını Olumsuz Etkileyen Durumlar	61
---	----

BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
---	-----------

KAYNAKLAR	66
------------------------	-----------



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Wöhler eğrisi diyagramı	2
Şekil 1.2 Yorulma hasarı aşama karakterizasyonu	2
Şekil 1.3 Malzeme yüzeyinin yorulma yüklemesi altındaki davranışı	3
Şekil 1.4 Yüksek sıcaklık değişimlerine maruz kalan döküm kalıplarının termal yorulma performansının incelenmesi	4
Şekil 1.5 Minneapolis şehrinde I-35W köprüsünün yorulma kaynaklı göçmesi	5
Şekil 1.6 Hoan Köprüsü tabliyesi birleşim noktalarında oluşan yorulma hasarı	6
Şekil 1.7 1988 yılında metal yorugunluk kaynaklı yaşanan Boeing 737 uçağının yırtılan gövdesi	7
Şekil 1.8 Versay demiryolu kazası temsili resmedilişi	7
Şekil 1.9 “Silver Bridge” Köprüsünün a) Göçmeden önceki hali b) Göçmeden sonraki hali	8
Şekil 2.1 Çekme gerilmesi altında kompozitlerin deformasyon davranışı	13
Şekil 2.2 Çelik lifli kompozitlerde gerilmenin dağıtılması	14
Şekil 2.3 Çelik lifli kompozitlerde liflerin çatlak sonlarını takviye etmesi sonucu çatlak yayılımının durdurulması	15
Şekil 2.4 Çelik lifli kompozite ait gerilme-deformasyon eğrisi	15
Şekil 2.5 Çelik lif kullanımının betonun yorulma performansına etkisi	16
Şekil 2.6 Lif içeriğinin gerilme-deformasyon ilişkisine etkisi	17
Şekil 2.7 Yalın beton ve ECC’lerin doğrudan çekme yüklemesi altındaki gerilme-birim şekil değiştirme/çatlak genişliğini gösteren grafik	18
Şekil 2.8 ECC’nin çoklu çatlak oluşum mekanizması	20
Şekil 2.9 Deformasyon kontrollü ve yük kontrollü tekrarlı yüklemeler için tipik örnekler	21
Şekil 2.10 Çeki-bası (hem çekme hem basınç) gerilmesi uygulanan yorulma testi grafiği	22
Şekil 2.11 Çekme ve basınç gerilmelerinin çevrimsel yüklenmesi sonucu gerilme-deformasyon grafiği	23
Şekil 2.12 HTPP-ECC’lerin eğilme gerilmesi altında yorulma performansı	23

Şekil 2.13 Farklı yorulma yüklemeleri oranlarında elde edilen gerilme-çevrim sayısı grafiği	24
Şekil 2.14 Numunelerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında yaptıkları çatlak sayıları görüntüleri	25
Şekil 2.15 Gerilme kontrollü yükleme modeli	27
Şekil 2.16 Deformasyon kontrollü yüklemede gerilme-deformasyon eğrisi	28
Şekil 3.1 Tez kapsamında yapılması planlanan çalışmaların iş akış şeması.....	29
Şekil 3.2 HTPP ve PVA lif gösterimi	31
Şekil 3.3 Hobart mikser ve kemik şeklindeki çelik kalıplar	35
Şekil 3.4 Çekme cihazının görüntüsü.....	36
Şekil 3.5 Sekant modülü hesaplama yöntemi	38
Şekil 3.6 Python isimli program ile sekant modülü hesabı.....	38
Şekil 3.7 Optik el mikroskopu yardımı ile çatlak sayılarının belirlenmesi.....	39
Şekil 4.1 H1,5P0 ve H2P0 adlı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	41
Şekil 4.2 H0P1,5 ve H0P2 adlı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	42
Şekil 4.3 H0,75P0,75 ve H1P1 adlı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	44
Şekil 4.4 Numunelerin çekme dayanımları ve birim şekil değiştirme değerleri.....	45
Şekil 4.5 H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 adlı serilerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışları	47
Şekil 4.6 H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 numunelerinin sekant modülü-çevrim sayısı grafikleri	49
Şekil 4.7 H2P0, H0P2 ve H1P1 adlı serilerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışları	51
Şekil 4.8 H2P0, H0P2 ve H1P1 numunelerinin sekant modülü-çevrim sayısı grafikleri	53-54
Şekil 4.9 H0,75P0,75-H0P1,5-H1,5P0 numunelerinin lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve çevrim sayıları ilişkisi ve lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve birim şekil değiştirme ilişkisi	55

Şekil 4.10 Lif dozajı %1,5 olan H1,5P0-H0P1,5-H0,75P0,75 numunelerinin birim şekil değiştirme-çatlak sayısı grafiği	56
Şekil 4.11 Lif dozajı %1,5 olan H0,75P0,75-H0P1,5-H1,5P0 numunelerinin sekant modülleri değerleri	56
Şekil 4.12 H1P1-H0P2-H2P0 numunelerinin lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve çevrim sayıları ilişkisi ve lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve birim şekil değiştirme ilişkisi	57
Şekil 4.13 Lif dozajı %2 olan H2P0-H0P2-H1P1 numunelerinin birim şekil değiştirme-çatlak sayısı grafiği.....	59
Şekil 4.14 Lif dozajı %1,5 olan H1P1,75-H0P2-H2P0 numunelerinin sekant modülleri değerleri.....	60
Şekil 4.15 Tüm kompozitlerden elde edilen veriler ile çizdirilen gerilme-çevrim sayısı eğrisi (S-N)	60
Şekil 4.16 Lifli kompozitlerin üretim kaynaklı oluşabilecek hatalı/boşluklu yapısı .	61

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Maruz kaldığı çevrim sayılarına göre sınıflandırılan yapılar.....	10
Tablo 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri, basınç dayanımları	30
Tablo 3.2 Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları.	31
Tablo 3.3 HTPP ve PVA lifin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	32
Tablo 3.4 Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri	32
Tablo 3.5 Matris karışım oranları.....	33
Tablo 3.6 Karışımların döküm süreci	34
Tablo 4.1 Lif kullanılmadan üretilen kompozitlerin doğrudan çekme testi sonuçları	40
Tablo 4.2 Farklı lif dozajlarındaki H1,5P0 ve H2P0 adlı iki serinin doğrudan çekme testi sonuçları.....	41
Tablo 4.3 Farklı lif dozajlarındaki H0P1,5 ve H0P2 adlı iki serinin doğrudan çekme testi sonuçları.....	43
Tablo 4.4 Farklı lif dozajlarındaki H0,75P0,75 ve H1P1 adlı iki serinin doğrudan çekme testi sonuçları	44
Tablo 4.5 H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 serilerinden elde edilen çevrim sayısı, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları tablosu	48
Tablo 4.6 H2P0, H0P2 ve H1P1 serilerinden elde edilen çevrim sayısı, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları tablosu.....	52
Tablo 4.7 Tüm numunelerden elde edilen tahmini yorulma ömrü denklemleri tablosu	61

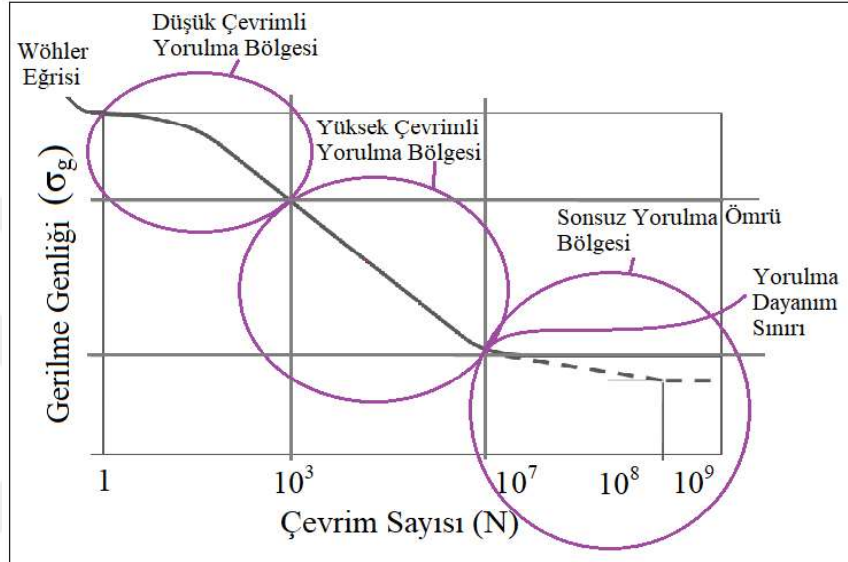
BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Malzeme yavaşça artan yüklemeye maruz kaldığı zaman, belirli bir sınır gerilmede taşıma kapasitesine erişip geçer. Bulunan bu gerilme değerine malzemenin statik dayanımı adı verilir. Ancak aynı malzemeyi, yükü belirli iki sınır arasında tutarak, çok sayıda çevrim yaptırarak statik dayanımının çok daha altındaki düşük gerilmelerde tahrip etmek mümkündür (Demirci, 2004). Yükün malzemeye etkililmesi (yükleme) ve geri alınması (boşaltma) işleminin periyodik olarak çok sayıda çevrimi sonucunda cisim içinde oluşan karmaşık termik ve mekanik olaylar nedeniyle cisimde çözülme, yıpranma ve ayrışmalar meydana gelir. Bu olayın nedeni yükün şiddetinden ziyade, yükün periyodik olarak belirli bir süre içinde değişmesidir. İç mekanizması çok karışık olan bu olaya malzemenin yorulması denmektedir (Baradan, 2011). Yorulma ASTM E 206-72'ye göre şu şekilde tanımlanmıştır: “Tekrarlı gerilme ve uzamalara maruz kalan malzemelerde belirli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine ve sonucunda da kırılmaya neden olan kalıcı yapı değişimi olayıdır” (s.192). “Yorulma” kelimesi ilk olarak 1830’lu yıllarda kullanılmaya başlanmıştır (Çökelek, 2001). Konu hakkındaki ilk sistematik çalışmalar ise Alman mühendis August Wöhler (1819-1914) tarafından 1850’li ve 1860’lı yıllarda yapılmıştır. Wöhler, gerilme – yüklenme sayısı arasında bir ilişki kurarak Şekil 1.1’de görüldüğü gibi bir diyagram oluşturmuştur. Wöhler diyagramı adı verilen bu diyagramda, düşey eksen gerilme genliği (σ_g -uygulanan maksimum ve minimum gerilmenin aralığı), yatay eksen çevrim sayısını (N) göstermekte olup, eğri 3 bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölge yüksek genliğe ve düşük çevrim sayıları sahip (1000 çevrime kadar), ikinci bölge düşük genliğe ve yüksek çevrim sayıları sahip bölgelerdir. Üçüncü bölge ise malzemenin artık yorulma dayanım limitine ulaştığı ve yüklenme sayısına bağlı olmaksızın malzemenin sonsuza kadar dayanabildiği sonsuz yorulma ömrü bölgesidir (R.I. Stephens, Fatemi, R.R. Stephens ve Fuchs, 2000; Kolluru, O’Neil, Popovics ve Shah, 2000). Bununla birlikte Wöhler, kendi adını verdiği Wöhler Kurallarını şu şekilde tanımlanmıştır:

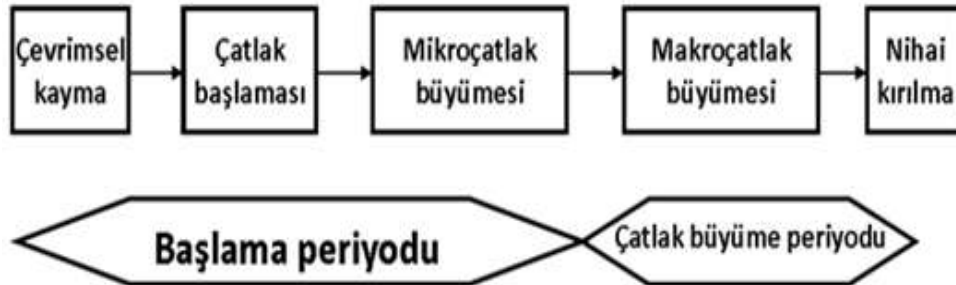
(a) Malzemeler üzerlerine etkiyen gerilmenin tekrarlanması sonucu statik mukavemetlerinden çok daha düşük gerilme değerlerinde hasara uğrayabilirler.

- (b) Malzemede meydana gelecek zarar ve deformasyonda uygulanan gerilmenin genliği belirleyici faktördür.
- (c) Maksimum gerilme oranı hasarı etkiler, ortalama gerilme değeri ne kadar yüksek ise hasar o kadar erken oluşur.



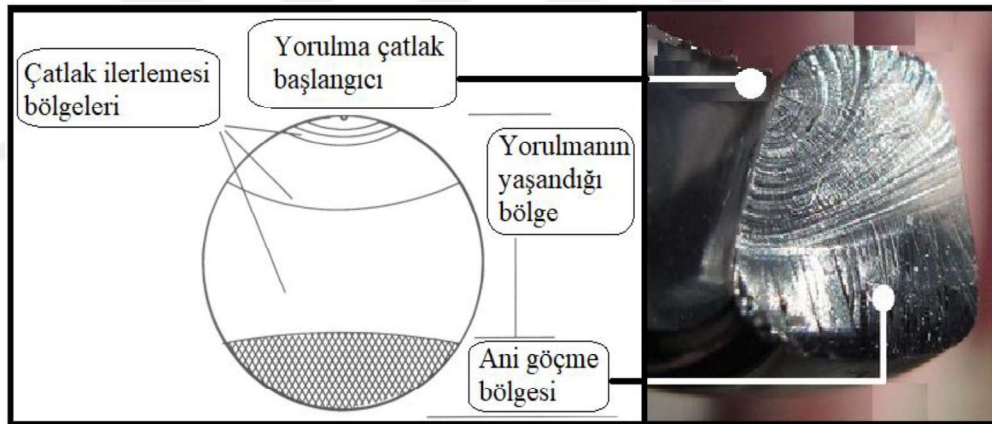
Şekil 1.1 Wöhler eğrisi diyagramı (Milesi, 2009; Shigley, 2011)

Yorulma olayının en önemli özelliği, olayın sürekli olarak devam etmesi, bölgesel gelişmesi ve çatlak büyümesinin ilerlemesiyle göçmenin olmasıdır. Buna bağlı olarak yorulma hasarı; çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve nihai kırılma olarak karakterize edilir (Şekil 1.2) (Özmen, 2007; Horii, Shin, Pallegatta, 1992).



Şekil 1.2 Yorulma hasarı aşama karakterizasyonu (Özmen, 2007)

3. Kırılma: Yıpranma nedeniyle ayrışma yeter derecede ilerledikten sonra kalan kısmı yükü taşıyamaz hale gelir ve malzeme aniden göçer (Şekil 2, 2011).



Şekil 1.3 Malzeme yüzeyinin yorulma yüklemesi altındaki davranışı (Sachs, 2005)

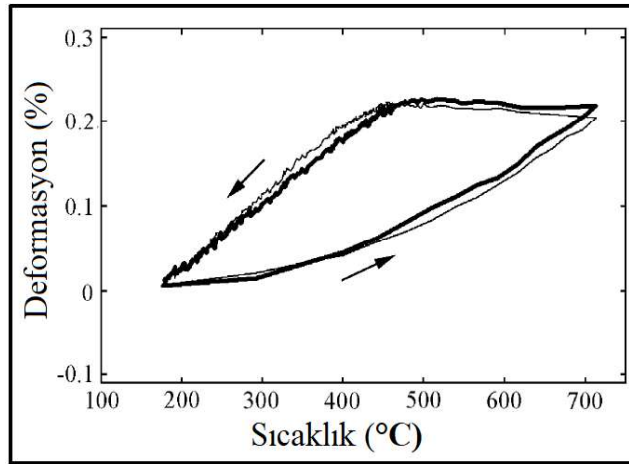
1.1 Yorulmaya Sebep Olan Faktörler

Bir malzemenin yorulmasına ve göçmesine sebep olan etken, üzerine gelen tekrarlı gerilmelerdir. Bu gerilmeler; sıcaklık, korozyon, ikincil gerilmeler, distorsiyon, titreşim ve yapının malzemesi gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Bu nedenle malzemelerin kullanım amacı ve maruz kalacağı çevresel şartları iyi anlamak son derece önemlidir (Özmen, 2007; Okumuş, 2011).

1.1.1 Termal Yorulma

Sıklıkla değişim gösteren çevresel şartlar ve sıcaklık değişimleri sebebiyle yapıda mekanik yük olmadan da oluşabilir. Tekrar eden termal gerilmeler sonucunda kompozitin yüzeyinde çatlaklar oluşur. Eğer müdahale edilmez ise çok hızlı bir şekilde yayılabilir ve hızla yayılan bu çatlaklar yapının taşıma kapasitesine ciddi zararlar verir. Bu tür yorulmaya en çok maruz kalan yapılar buharlı elektrik santralleri, yüksek sıcaklık tribünleri, motorlar, egzoz kanalı, su ısıtıcı kazanları gibi yapılardır (Spera, 1976; Persson, Hogmark ve Bergström, 2005; Suryawanshi, Engineer, 2010).

Persson ve diğer. (2005) yaptığı çalışmada, metallere şekil veren çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan döküm kalıplarının termal yorulma altında davranışlarını incelemiştir. Krom, nitrit, aliminyum, titanyum gibi metaller kullanılarak üretilen alaşımın 170°C ve 700°C derece arasında tekrarlı olarak sıcaklığın artırılıp azaltılmasıyla termal yorulmaya karşı performansı incelenmiştir (Şekil 1.4). Çalışmanın sonucunda alaşımın döküm kalıplarının kaplamalarında kullanılması, çok yüksek sıcaklık döngülerinde beklenilenin aksine olumsuz sonuçlansa da, ana bileşeni olarak kullanımının umut vadettiğı belirtilmiştir.



Şekil 1.4 Yüksek sıcaklık değişimlerine maruz kalan döküm kalıplarının termal yorulma performansının incelenmesi (Persson ve diğer., 2005)

1.1.2 Korozyon Yorulması

Korozyon yorulması, korozif ortama ve çevrimsel gerilmeye bağılı olarak oldukça sık görülen bir yorulmadır. Tekrar eden gerilmelerden kaynaklanan çatlakların oluşması ile bu çatlakların genişlemesi sonucunda malzemenin iç yapısına kadar işleyen kimyasal saldırılar çok yıkıcı etkilere sebep olur. Bu nedenle, oda sıcaklığında normal şartlar altında yorulma dayanımı sınırı gösteren malzemeler, korozif bir ortamda yorulma dayanım sınırına ulaşamaz ve göçer. Bu tür yorulmalar, özellikle deniz ortamında bulunan yapılar ve malzemelerde çok sık görülmektedir (Fleck ve Eifler, 2010; Suryawanshi, Engineer, 2010).

Amerika'nın Minneapolis şehrinde 1 Ağustos 2007 yılında I-35W köprüsü aniden göçmüştür. Birçok kayıp yaşanan bu olayda, yapılan incelemeler sonucunda yaklaşık 580 metre uzunluğunda 6 şeritli köprünün nehir ile temas eden ayaklarında tekrarlı korozyon ve trafik yükü sebebiyle göçtüğü anlaşılmıştır (Roberts, b.t).



Şekil 1.5 Minneapolis şehrinde I-35W köprüsünün yorulma kaynaklı göçmesi (Roberts, b.t)

1.1.3 Yapısal Yorulma

Mekanik yorulma türü olan bu yorulma, yapıların servis ömürleri süresince maruz kaldıkları trafik yükü, deprem yükü, endüstriyel makinelerin titreşim gerilmeleri sebebiyle oluşur. Tekrar eden gerilmeler, en zayıf kesitten ilk çatlağın oluşmasına neden olur. Bu gerilmelerin uzun süre tekrarı sonucunda çatlaklar yayılır ve taşıma kapasitesini kaybedip göçmeye sebep olur. Pompalar, kompresör tipi ekipmanlara sabitlenmiş taşıyıcı yapılar, otoyollar, demiryolları ve köprüler genellikle bu yorulmaya maruz kalmaktadırlar (Cowles, 1996; Aykan ve Celik, 2009; Haghani, Al-Emrani ve Heshmati, 2012).

Amerikanın Milwaukee nehri üzerinde bulunan Hoan Köprüsü, 2000 yılının Kasım ayında ciddi bir tehlike atlattı ve köprü tabliyesinin birleşim noktalarında meydana gelen hasarlar sebebiyle trafiğe kapatılmıştır (Şekil 1.6). Yapılan incelemeler sonucunda hasarların olduğu bölgenin tekrar eden trafik yükü ve sıcaklık değişimleri nedeniyle olduğu anlaşılmıştır (Cooper, 2001).



Şekil 1.6 Hoan Köprüsü tabliyesi birleşim noktalarında oluşan yorulma hasarı (Cooper, 2001)

1988 yılında Hawaii'nin Hilo şehrinden Honolulu şehrine uçuş yapan Boeing 737 model uçak, uçuş sırasında gövdesinin bir kısmının yırtılması sonucu acil iniş yapmak zorunda kalmıştır. Kaza sonrası yapılan incelemelerde, gövdenin uçağın sık aralıklı seferlerinde tekrarlı basınç ve sıcaklık değişiminin metal yorgunluğuna sebep olduğu görülmüştür (Şekil 1.7) (Stere ve Baran, 2011).



Şekil 1.7 1988 yılında metal yorulgunluk kaynaklı yaşanan Boeing 737 uçağının yırtılan gövdesi (Stere ve Baran, 2011)

Paris ve Versay arasında 1842 yılında meydana gelen Versay demiryolu kazası, ilk Fransız demiryolu kazası olarak bilinmektedir. Yolculuk sırasında lider lokomotif bir aksın kırılması sonucunda kaza oluşmuş ve çıkan yangında çok sayıda insan hayatını kaybetmiştir (Şekil 1.8) (Smith, 1990). Kazanın sebebini anlamak için yapılan incelemelerde, kazanın o yıllarda pek bilinmeyen metal yorulmasına bağlı olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir (Woo, 2017).



Şekil 1.8 Versay demiryolu kazası temsili resmedilişi (Woo, 2017)

Amerikan'nın Batı Virginia eyaletinde Ohio Nehri üzerinde bulunan “Silver Bridge” köprüsü, 1967 yılında meydana gelen kaza sonrasında çökmüştür (Şekil 1.9). Çok sayıda insanın hayatını kaybettiği bu olayın, yapılan incelemeler sonucunda köprü halatlarını tutan metal bağlantı noktalarının yorulmasından kaynaklandığı görülmüştür (Bullard, Gromek, M. Fout ve R. Fout, 2012; Woo, 2017).



(a)

(b)

Şekil 1.9 “Silver Bridge” Köprüsünün a) Göçmeden önceki hali b) Göçmeden sonraki hali (Bullard ve diğer., 2012)

BÖLÜM İKİ

BETONUN YORULMASI

Betonarme yapılar çeşitli çevrimsel yüklere maruz kalmaktadır. Trafik yükleri, sıcaklık değişimleri, rüzgârlar, deniz dalgaları, depremler, makinelerin çalışmasından kaynaklanan titreşimler bu tekrarlanan çevrimsel yüklere örnek olarak verilebilir. Çevrimsel (tekrarlı) yüklere maruz kalan yapının rijitliğinde sürekli bir azalma, bunun sonunda ise yorulma kaynaklı göçmeler meydana gelir (Mechtcherine ve Jun, 2007; Suthiwarapirak, Matsumoto ve Kanda, 2004). Yorulmaya bağlı çatlak mekanizması, bu altyapıların servis ömrünü etkilemektedir. Çünkü çatlaklar sadece yapının yük taşıma kapasitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkenlere karşı dayanıklılığını da olumsuz yönde etkiler (Qiu ve Yang, 2017; Şahmaran ve Li, 2016). Bu nedenle yapı malzemelerinin yorulma davranışının anlaşılması, çevrimsel yüklere maruz kalan yapıların tasarımı için oldukça önemlidir. 1900’lü yılların başında ulaşım yapılarının gelişimi ile başlayan; demiryolu köprüleri, karayolu köprüleri, kaldırımlar, havaalanı pistleri ve otoyol kaplamalarının yorulma performansları çevrimsel testler yapılarak anlaşılmaya çalışılmıştır (Hsu, 1981). 1950’li yılların ortalarında, deprem yüklemesi gibi yüksek genlikte düşük çevrimlere maruz kalan betonarme yapıların performansı, yapısal tasarımda giderek daha önemli bir parametre haline gelmiştir. Kitleli hızlı ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması ile birlikte, 10 ile 20 milyon çevrimsel yüklemelere maruz kalabilen beton yapıların tasarımı gündeme gelmiştir. Ayrıca, endüstriyel zeminler, makine temelleri ve deniz yapıları gibi 500 milyon çevrimsel yüklemelere maruz kalabilen yapıların tasarlanmasında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Modern beton yapıları, geniş aralıkta değişen bir yorulma yükleme döngüsüne maruz kaldığından, tüm yorulma spektrumu boyunca betonun yorulma performansını karakterize etmek önemlidir. Bu nedenle, söz konusu yapıların servis ömürleri boyunca performanslarını koruması için, yapı malzemelerinin yorulma davranışı yapısal tasarımda dikkate alınmalıdır (Paranjape, 2007).

Yorulma, çevrimsel özelliklere bağlı olarak düşük çevrimli ve yüksek çevrimli olarak iki kategoriye ayrılır. Düşük çevrimli yükleme, yüksek gerilme seviyelerinde birkaç yük çevriminin uygulanmasını içerir. Öte yandan, yüksek çevrimsel yükleme,

düşük gerilme seviyelerinde çok sayıda çevrim ile karakterize edilir (Tablo 2.1) (Lee ve Barr, 2004).

Tablo 2.1 Maruz kaldığı çevrim sayılarına göre sınıflandırılan yapılar (Lee ve Barr., 2004)

	Düşük Çevrimli Yorulma			Yüksek Çevrimli Yorulma						
Çevrim Sayısı	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
Maruz Kalması Muhtemel Yapı Türü	Deprem yüküne maruz kalan yapılar			Köprü ve havaalanı kaplamaları		Otoyol ve demiryolu köprüleri, otoyol kaplamaları		Hızlı toplu taşıma yapıları		Deniz yapıları

2.1 Yalın (Sade) Betonun Yorulması

Beton, çimento hamuru ve agregalardan oluşan homojen olmayan bir malzemedir. Agregalar, betonda inert bir dolgu malzemesi olarak kullanılırlar. Bu da betonu oldukça dayanıklı bir malzeme haline getirir. Betonda hidratasyon işlemi ile çimento hamuru ve agregalar birbirine bağlanırlar ve bu olay ile betonun mekanik özellikleri önemli ölçüde artar (Forgeron, 2005). Fakat hidratasyon sırasında oluşan büzülme gerilmeleri, beton matrisi içindeki nem ve sıcaklık gibi faktörlerin hepsi mikro çatlaklar olarak adlandırılan çok sayıda ince çatlak meydana getirmektedir. Ayrıca, agrega matris geçiş bölgesi, jel ve kılcal boşluklar, sürüklenen hava boşlukları ve sıkışmış hava boşlukları gibi parametreler betonun mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir (Paranjape, 2007). Bu nedenle yalın betonun çekme dayanımı çok düşüktür ve genellikle betonarme projelerin hesabında dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte çekme birim deformasyon kapasitesi de oldukça düşük olup yaklaşık %0,01 seviyelerindedir (Wang ve Li, 2006). Tekrarlı yükleme altında yüksek çevrimlere de ancak nihai gerilmenin yaklaşık %60'ı gibi düşük gerilme seviyelerinde ulaşabilmektedir (Lott ve Kesler, 1964).

Literatürde betonun yorulma davranışı ilk olarak yalın betonlar üzerinde incelenmiştir. Bu konu üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Çeşitli yöntemler kullanılarak yapılan bazı çalışmalar şunlardır;

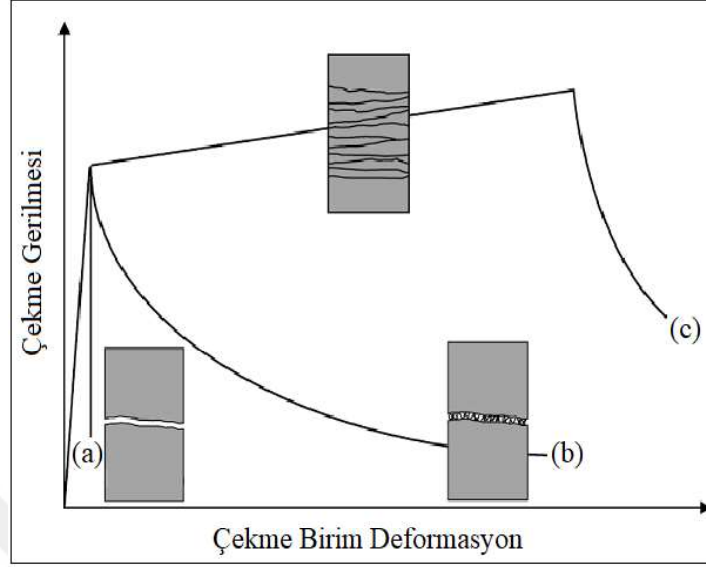
Oh (1986), 100 mm x 100 mm x 500 mm boyutundaki kiriş numunelerin eğilme yüklemesi altında yorulma davranışlarını incelemiştir. Dakikada 250 çevrim yaptırılan deneyler sonucunda yalın beton kirişlerin yorulma dayanım sınırı, eğilme dayanımının %54 ile %58'i aralığında bulunmuştur. Ramakrishnan, Oberling ve Tatnal (1987) yaptığı çalışmada, 20 Hz'lik bir yükleme frekansı ile 152 mm x 152 mm x 533 mm boyutlarındaki beton kiriş numunelerin eğilme testi altındaki yorulma performanslarını incelemiştir. Yorulma dayanım sınırının gerilme değeri yalın betonun eğilme dayanımının %55'i olduğu sonucuna varmıştır. Nagabhushanam, Ramakrishnan ve Vondran (1989) yaptığı çalışmada, 100 mm x 100 mm x 350 mm kiriş numunelerde 20 Hz yükleme sıklığı ile eğilme testi altında yorulma çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmalara yalın betonun yorulma dayanım sınırının gerilme değeri, eğilme dayanımının %50'si olduğunu tespit etmiştir. Hordijk ve Reinhardt (1993) yalın betonun çekme ve basınç yüklemesi altındaki yorulma davranışını incelemiştir. Boyutları 50 mm x 50 mm x 150 mm olan dikdörtgen prizma numunelerin kafaları bir başlık ile tutturularak dört adet ekstensometre yardımıyla 6 Hz bir frekansla yorulma deneyi yapılmıştır. Çekme gerilmesinin %80'i uygulanarak yapılan deneylerde yalın betonun yorulma dayanım sınırına ulaşmadan 12812 çevrimde göçtüğü görülmüştür. Forgeron (2005), 100 mm x 100 mm x 350 mm boyutlarındaki kiriş numunelerin, dört noktalı eğilme testi ile 20 Hz frekansta yorulma performansları incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda yorulma dayanım sınırının gerilme değeri, eğilme dayanımının %50'si olarak bulunmuştur.

Yapılan çalışmalara bakılarak, yalın betonun yorulma ömrünün eğilme dayanımının %50 ile %55'i aralığında olduğu söylenebilir. Yorulma ömrünün kesin olarak tahmin edilemeyip yaklaşık olarak bir aralıkta olmasının, kullanılan yükleme tipi gibi test prosedürlerindeki farklılıklar, malzeme kompozisyonundaki değişim, yükleme frekansları, yüzey etkisi, sıcaklık ve nem durumu bu değişikliklerden

kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, numunelerin boyutu da betonun yorulma dayanım sınırını etkileyen önemli bir faktördür (Paranjape, 2007; Özmen, 2007).

2.2 Lif Takviyeli Kompozitlerin Yorulması

Betonun yorulma sırasındaki göçme olayı, ilk çatlak oluşuktan sonra beton elemanın üstüne gelen yükleri aktaramaması ve oluşan çatlakın hızlı bir şekilde ilerleyerek ani şekilde yük taşıma kapasitesini kaybetmesi şeklinde olduğu bilinmektedir (Şekil 2.1.a) (Yıldırım, 2018; Gödek, 2016; Gao ve Hsu, 1998). Bunun için beton, bir çeşit takviye içermediği sürece dinamik yükler altında kullanılamaz. Bu kapsamda günümüzde çokça betonarme donatısı kullanılmakta ancak takviye donatılarının kullanılmasının zor olduğu birçok uygulamalarda çeşitli lif takviyeli çimento esaslı kompozitler de uygulanmaktadır. Bu tür kompozitlerin kullanılmasındaki esas amaç, tekrarlı yük altındaki yapıyı daha yüksek yorulma dayanım sınırı değerlerine ulaştırabilmektir. Bu bağlamda lifli kompozitlerin, çatlama direnci, yorulma yüklerine karşı direnç, süneklik, darbe ve aşınma direnci olmak üzere birçok özellik bakımından, yalın betonlara kıyasla üstün olduğu görülmüştür (Qiu ve Yang, 2017; Suthiwarapirak ve diğer., 2004). Sözü edilen avantajlardan dolayı, lif takviyeli kompozitler, havaalanı kaplamaları, makine temelleri ve endüstriyel zeminler gibi uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında, çelik lifli kompozitlerin betonarme donatılarının yetersiz geldiği durumlar için alternatif bir çözüm olarak düşünülmektedir (Berozashvili, 2001; Hsu, 1981). Bu liflerin, matrisin bütününde homojen olarak dağıtılması koşulu ile, basınç dayanımına olan katkısı genel olarak dikkate alınmazken, çekme yüklemesi altında deformasyon yeteneğini arttırdığı bilinmektedir (Şekil 2.1.b). Çelik liflerin dışında, günümüzde çeşitli polimerik lifli kompozitlerde geliştirilmektedir. Polimerik liflerin kompozitler üzerinde, Şekil 2.1.c’de görüldüğü gibi hem çekme mukavemetini hem de birim şekil değiştirme kapasitesini arttırıcı etkisi olduğu görülmektedir. Bu artışlar sadece liflerin, bağlayıcı malzemelerin, agrega ve karışım tasarımının akıllı bir seçimiyle yapılabilen, lif tipi ve miktarı ile matris arasındaki iyi bir kombinasyona bağlıdır (Li, 1993). Bu tür tasarımlar, dinamik yükler altında kullanılabilen çok çeşitli lif takviyeli kompozit üretimine olanak sağlamaktadır (Alam, 2016).



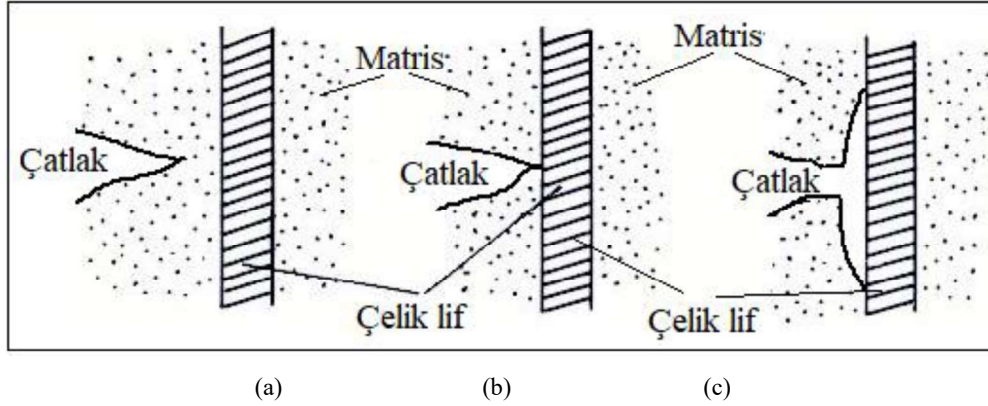
Şekil 2.1 Çekme gerilmesi altında; a) Yalın beton, b) Çelik lifli kompozitler, c) Polimerik lif kökenli kompozitlerin deformasyon davranışı (Fischer ve Li, 2002)

Lifli kompozitlerin lif türü dışında, yorulma performansını etkileyen etkenlerden birisi de lif içeriğidir. Lif içeriğinin ve en / boy oranının optimize edilmesi, lif takviyeli kompozitlerin tekrarlı yük altında çatlak büyümesi için harcanan enerji miktarının artırılmasında çok büyük bir rolü bulunmaktadır (Chang ve Chai, 1995). Liflerin dozajı, kompozit içinde oluşan mikro çatlakları köprüler ve çatlak büyümelerini geciktirmesinde önemli rol oynamaktadır. Böylece, yapıların çevrimsel yük altındaki performansını artırırlar (Alam, 2016).

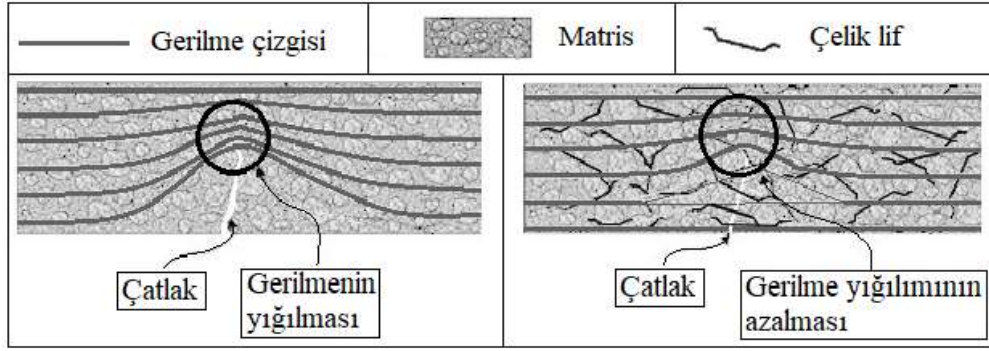
2.2.1 Çelik Lifli Kompozitlerin Yorulması

Son 50 yıl içerisinde birçok lif türü geliştirilmiş ve çimento esaslı kompozitlere adapte edilmiştir. Bunlardan modern olarak geliştirilen ilk lif türü olan çelik lifler, 1960'lı yılların başında kullanılmaya başlanmıştır. İlk zamanlarda betona çelik ve cam lifler ikame edilirken, bununla beraber bu liflerin de yalnızca düz ve pürüzsüz şekilde olanları kullanılmıştır (Wong, 2004). Çelik liflerin betona ilave edilmesinin, beton elemanların yorulma performanslarını önemli ölçüde geliştirdiği farkedilmiştir (Jansen ve Shah, 1997). Bu artışın arkasında çelik liflerin mekanik özellikleri ve yükleme altında geleneksel beton ile uyumunun iyi olmasının payı büyüktür (Afroughsabet,

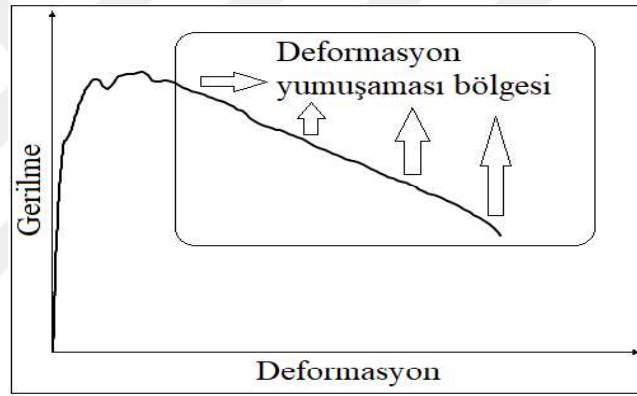
Biolzi ve Ozbakkaloglu, 2016). Daha sonraki yıllarda, çelik lif içeren çimento esaslı kompozitlerin keşfedilmesi ile yük taşıma kapasitesi ve çatlak gelişimine karşı dirençte önemli artışların olduğu görülmüştür (Morris ve Garrett, 1981). Çelik lifli kompozitlerde, ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik liflere doğru bir gerilme transferi meydana gelir. Yüksek çekme dayanımına sahip çelik lifler bu gerilmeyi üstlenir ve çatlağın daha fazla açılmasına engel olur (Şekil 2.2). Uygulanan gerilmenin artması ile birlikte çelik lifler yük taşımaya devam ederken aynı zamanda üstlerine gelen gerilmeyi köprüleme görevi yaparak matrisin diğer bölgelerine de aktarır (Şekil 2.3) (Aydöner, 2002; Aldanmaz 2018; Damasceno, Ferreira, Oliveira, 2014). Bu kompozitlerde çatlağın yayılması için daha fazla gerilme ve enerji gerekir. Böyle bir enerjinin bulunması durumunda bile bu enerjinin büyük bir bölümü lifler tarafından taşınır ve bu taşıma, liflerin çimento hamuru matrisinden çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder (Aydöner, 2002). Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Maksimum taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra bile deformasyon yumuşaması davranışı göstererek (Şekil 2.4), lifler kırılan parçaları bir arada tutmaya devam ederek belli bir deformasyon değerine kadar yük taşımaya devam eder (Parvez ve Foster, 2015).



Şekil 2.2 Çelik lifli kompozitlerde gerilmenin dağıtılması (Uğurlu, 1994)



Şekil 2.3 Çelik lifli kompozitlerde liflerin çatlak sonlarını takviye etmesi sonucu çatlak yayılmasının durdurulması (Damasceno ve diğer., 2014)

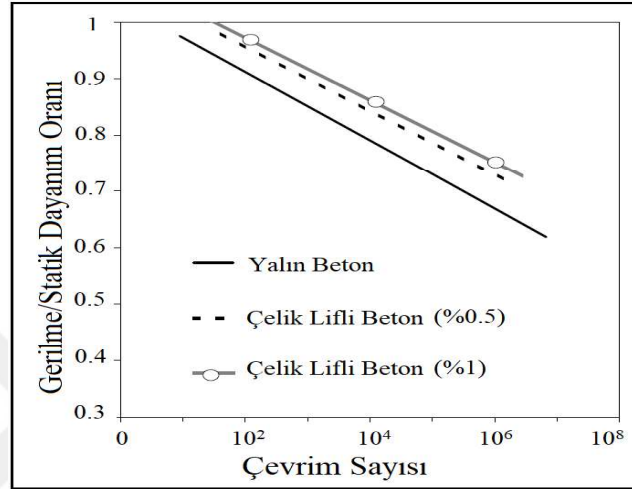


Şekil 2.4 Çelik lifli kompozite ait gerilme-deformasyon eğrisi (Kişisel arşiv, 2019)

Çelik liflerin çekme ve eğilme yüklemelerindeki davranışından yola çıkılarak aynı mekanizmanın tekrarlı yükleme altındaki yorulma performanslarının da artmasını sağlayacağı ön görülmüş ve literatürde bununla ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Lee ve Barr, 2004; Parant, Rossi ve Boulay, 2007; Isojeh, El-Zeghayar, Vecchio, 2017; Parvez ve Foster, 2015).

Lee ve Barr (2004) yaptığı çalışmada, literatürde eğilme testi ile yapılan yorulma çalışmaları incelenmiştir. %0, 0,5, 1 oranlarında çelik lif kullanılarak üretilen betonların farklı gerilme/statik dayanım oranında tekrarlı yüklenmesi ile yorulma performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen gerilme-çevrim sayısı eğrisi incelendiğinde %1 lif bulunan kompozitlerin daha yüksek gerilme/statik dayanım

oranında yüklenmesine rağmen daha fazla çevrim sayısına ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte lif ikamesinin azalması ile birlikte göçme için gereken çevrim sayılarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2.5).

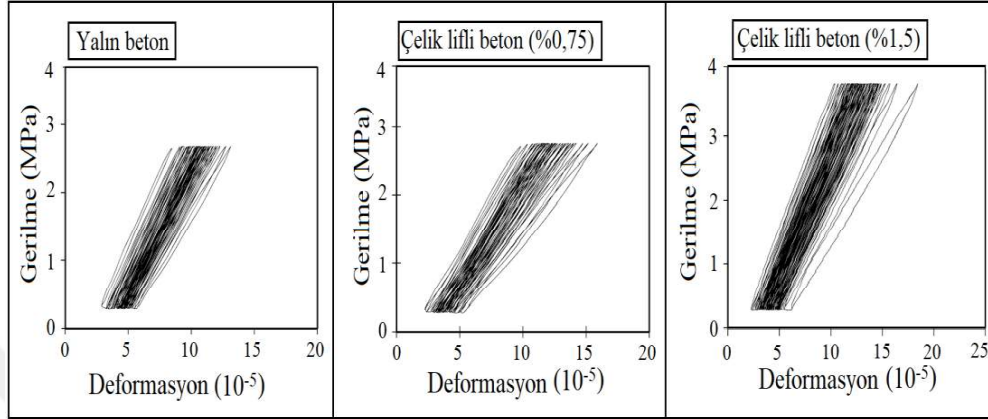


Şekil 2.5 Çelik lif kullanımının betonun yorulma performansına etkisi (Lee ve Barr, 2004)

Parant ve diğer. (2007) tarafından yapılan çalışmada, 600 mm x 200 mm x 40 mm'lik kiriş numunelere 4 noktalı eğilme testi ile çelik lifli kompozitlerin yorulma performansları incelenmiştir. Yapılan statik yükleme sonucunda eğilme dayanımı 61,5 MPa olarak bulunmuştur. Yükleme hızı 0,2 mm/dk olacak şekilde 2,5 Hz Frekans ile tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Numuneler, 2 milyon çevrime ulaştıktan sonra deney durdurulmuştur ve ulaşılan gerilme seviyesi yorulma dayanım sınırı olarak kabul edilmiştir. Bu sonuçlar kapsamında çelik lifli kompozitlerin yorulma dayanım sınırı eğilme dayanımının ortalama %62'si olarak bulunmuştur.

Isojeh ve diğer. (2017) yaptığı çalışmada, çelik lif takviyeli betonlarda farklı lif oranlarının kullanılmasının çekmede yorulma performansına nasıl etki ettiğini araştırmıştır. Çelik lifler hacimce %0, 0,75 ve 1,5 olarak belirlenmiş olup yorulma deneyleri doğrudan çekme cihazı ile yapılmıştır. Deney, boyutları 500 mm x 200 mm x 70 mm olan kemik çekme numunelerinde 5 Hz'lik bir frekansta gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, çelik lif kullanılmasının, yorulma yüklemeleri altında daha yüksek çevrim sayılarına ulaşılmasına yardımcı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte

lif oranının artmasının, betonun tekrarlı yükleme altında deformasyon yapabilme yeteneğinin artmasını da sağlamıştır (Şekil 2.6).



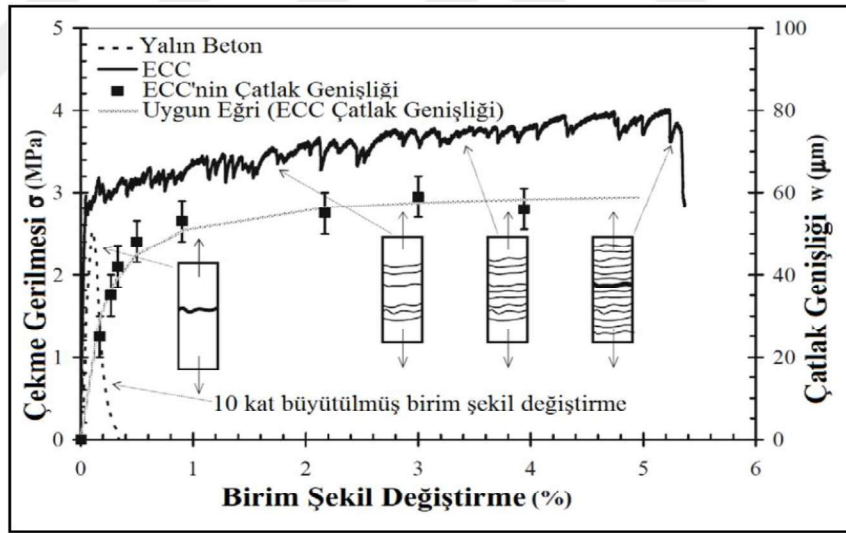
Şekil 2.6 Lif içeriğinin gerilme – deformasyon ilişkisine etkisi (Isojeh ve diğer., 2017)

Parvez ve Foster (2015) yaptığı çalışmada, çelik lif takviyeli betonlarda lif içeriğinin yorulma performansına etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında oluşturulan 2 seriden birincisinde 1200 mm x 200 mm x 100 mm boyutlarında betonarme kirişlere Dramix RC-65/35 kancalı çelik lif taviye edilmiştir. İkinci seri ise 3000 mm x 300 mm x 180 mm boyutlarında kirişlere Dramix RC-80/60 kancalı çelik lifler eklenmiştir. %0, %0,4 ve %0,8 oranlarında ikame edilen çelik liflerin, eğilme testi altındaki yorulma performansları incelenmiştir. Büyük kirişlerde kullanılan çelik liflerin, yorulma performanslarına etkisinin daha olumlu olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte küçük kirişlerde kullanılan çelik liflerin ise lifsiz betona kıyasla iyi bir yorulma performansı verdiği tespit edilmiştir. Fakat kullanılan çelik lifin oranının artması ile yorulma performansının gelişiminde önemli bir fark görülmemiştir.

2.2.2 Polimer Lifli Kompozitlerin Yorulması

Çelik lif takviyeli kompozitlere ek olarak son yıllarda, çekme yüklemesi altında deformasyon sertleşmesi yapan lif takviyeli çimento esaslı kompozitler (SHFRCC-strain hardening fiber reinforced cementitious composites) geliştirilmektedir (Kunieda ve Rokugo, 2006). Çeşitli polimer lifler kullanılarak oluşturulan bu kompozitlere

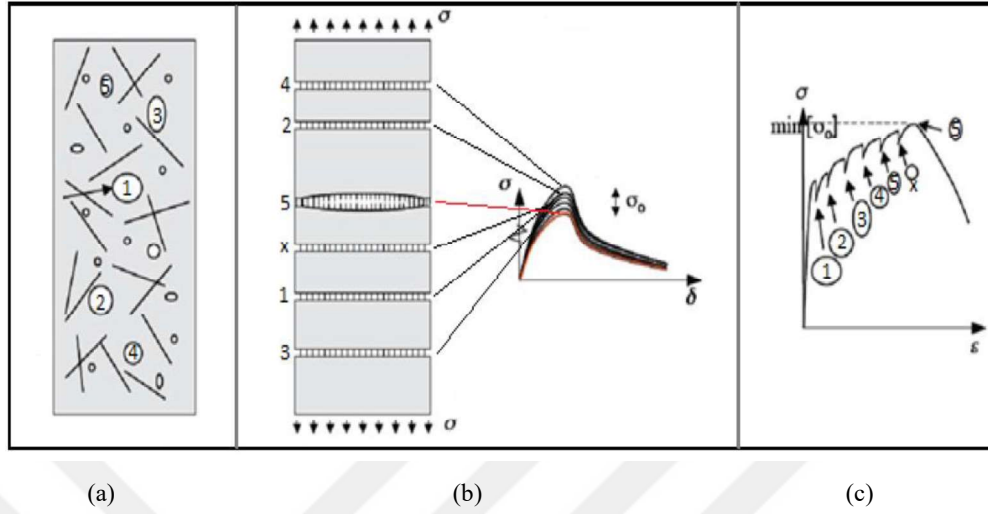
Mühendislikçe Geliştirilmiş Kompozitler veya Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC-Engineered Cementitious Composite) de denmektedir (Li ve Kanda, 1998; Li, Wang ve Wu, 2001). Polimer lif olarak ise genellikle hacimce %2 oranını aşmayacak şekilde poli-etilen (PE), poli-vinil alkol (PVA), yüksek dayanımlı poli-propilen (HTPP) veya aramid (Kim, Park ve Kim, 2018) lifler tercih edilmektedir (Felekoğlu, Tosun-Felekoglu, Ranade, Zhang ve Li, 2014; Yıldırım, 2018). Bu kompozitler çekme, eğilme ve kesme yüklemeleri altında diğer lifli kompozitlere kıyasla yüksek düktiliteye sahiptir. Bu özelliklerin sağlanmasında lif türü ve matris uyumunun rolü çok büyüktür (Li ve Kanda, 1998). Kompozitin yüksek düktilitesi ve tokluğu çoklu çatlak davranışıyla sağlanır. Yükleme etkisinde gösterdiği bu çoklu çatlak davranışıyla normal ve geleneksel lifli kompozitlerden farklı olarak deformasyon sertleşmesi davranışı gösterir (Şekil 2.7) (Sherir, Hossain ve Lachemi, 2015).



Şekil 2.7 Yalın beton ve ECC'lerin doğrudan çekme yüklemesi altındaki gerilme-birim şekil değiştirme/çatlak genişliğini gösteren grafik (Weimann ve Li, 2003)

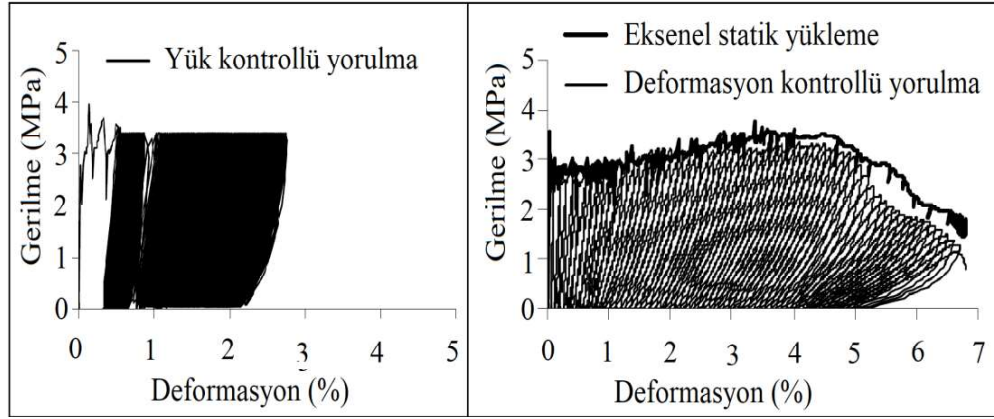
Bu davranışın mekanizması genel olarak şu şekilde açıklanabilir; çatlak açıldıktan sonra, çatlakın ani şekilde ilerlemesine neden olacak kuvvetler kompozit içerisindeki lifler tarafından köprülenir, kompozitin çatlamayan kesitlerine yük aktarılarak ani göçme önlenir. Yani açılan her yeni çatlak, liflerin köprüleme etkisiyle kompozitin

deformasyon sertleşmesi yapmasını sağlamaktadır (Li ve Leung, 1992; Kesner, Billington ve Douglas, 2003). Bu olay, Şekil 2.8.a'da görülen kompozit içerisindeki 1 numara olarak işaretlenmiş en büyük kusurun olduğu kesitten ilk çatlak oluşması ile başlamaktadır. İlk çatlak kesitinde rastgele dağılmış halde bulunan lifler, kesitteki yükü köprüleyerek oluşan çatlak açılmasını engeller ve gerilmeyi kompozitin diğer kesitlerine aktarırlar. İlk çatlak kesitinde enerji ve dayanım kriterlerinin sağlanması halinde, kararlı çatlak oluşumu gerçekleşir (Gödek, 2016). Kompozite etkiyen yük miktarı artışına bağlı olarak, kesitin diğer bölgelerindeki daha küçük kusurlar da (Şekil 2.8.a'da 2,3,4,5 numaralı kusurlar) aktive olarak çatlak ve yükü köprüleyerek yeni çatlaklar oluşmaya devam eder (Şekil 2.8.b). Böylece oluşan her yeni çatlak çekme birim deformasyon kapasitesine katkıda bulunur. Çatlak sayısı ile birim deformasyon kapasitesi arasında belirli bir ilişki vardır (Yıldırım, 2018). Açılan her yeni kararlı çatlak kompozitin yük taşıma, şekil değiştirme ve enerji yutma kapasitesini artırır (Şekil 2.8.c). Ancak, oluşan çatlakların herhangi birinde liflerin yük taşıma kapasitesine ulaşması ile (Şekil 2.8.b ve 2.8.c'de görülen 5 numaralı çatlak) söz konusu çatlak kararsız çatlak durumuna geçer ve genişlemeye başlar. Bu noktadan sonra yeni çatlak açılmaz ve genişleyen çatlak kesiti ile birlikte kompozit yük taşıma kapasitesini kaybeder (Gödek, 2016). Her ne kadar deformasyon sertleşmesinden sonra yük taşıma kapasitesini kaybettiği varsayılsa da özellikle ECC'ler tepe noktasından sonra deformasyon yumuşaması davranışı göstermeye devam ederler. Güvenli tarafta kalmak adına hesaplara katılmasa bile bu davranış ile genişleyen çatlakın kopmaya kadar geçen süresinde enerji yutmaya devam ettiği bilinmektedir. Bu davranış sayesinde ECC'lerin yorulma yüklemelerinde çok daha uzun yorulma ömrü ve çok yüksek enerji yutma kapasitelerine ulaşabilen malzemeler olduğu görülmektedir (Khlef, Barbosa ve Ideker, 2019; Şahmaran ve Li, 2009). Söz konusu davranış ile polimerik lifli kompozitlerin, tekrarlı yükler altındaki performansının da arttırılabileceğine dair çalışmalar mevcuttur (Jin ve Li, 2019; Mechtcherine ve Jun, 2007; Müller ve Mechtcherine, 2017; Matsumoto, Wangsiripaisal, Hayashikawa ve He, 2010; Huang, 2018; Sui ve diğer., 2018).



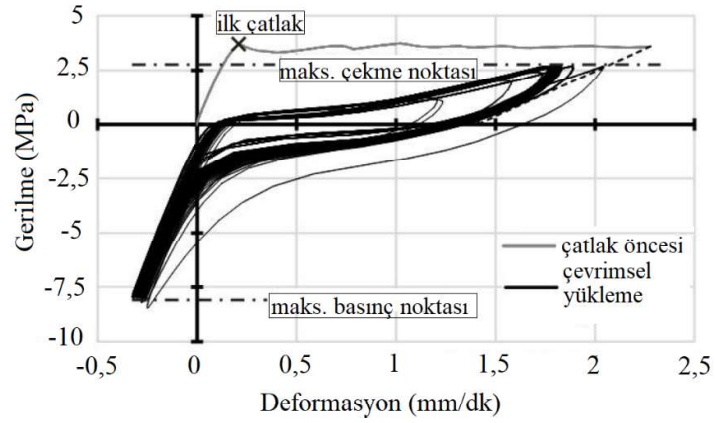
Şekil 2.8 ECC'nin çoklu çatlak oluşum mekanizması; a) Kompozitin doğal boşluk yapısı, b) Çoklu çatlak oluşumu, c) Yük-şekil değiştirme grafiği (Gödek, 2016)

Mechtcherine ve Jun (2007) yaptığı çalışmada, PVA lifli kompozitlerin yorulma performanslarını deformasyon kontrollü ve yük kontrollü olmak üzere iki farklı metod ile incelemiştir (Şekil 2.9). Deneyler 24 mm x 40 mm x 100 mm ve 60 mm x 100 mm x 250 mm boyutlarındaki kemik çekme numunelerinde yapılmıştır. Deformasyon kontrollü deneylerde deformasyon hızı daima 0,01 mm/s olarak kullanılmıştır. Yük kontrollü deneylerde ise maksimum gerilmenin %90'ı kadar bir çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Deney sonunda numune boyutlarının artması ile yapılan çevrim sayısında artış fakat deformasyon kapasitelerinde azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte deformasyon kontrolü yükleme metodu ile yapılan yorulma deneyi sonuçlarında çevrim sayısının, yük kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonuçlarına göre daha düşük sayılarda kaldığı kaydedilmiştir.



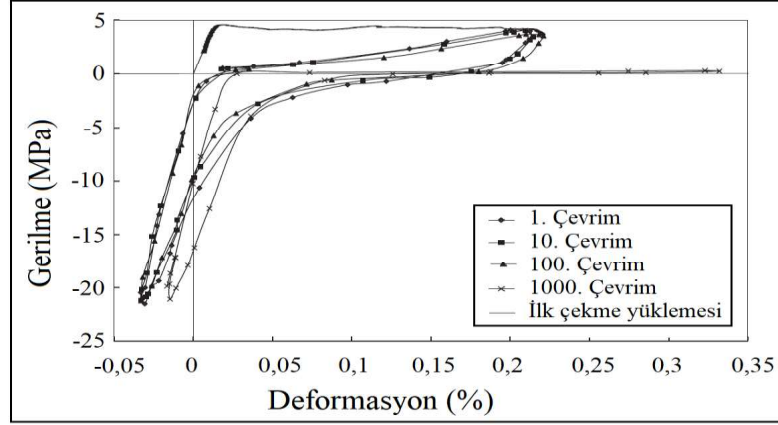
Şekil 2.9 Deformasyon kontrollü ve yük kontrollü tekrarlı yüklemeler için tipik örnekler (Mechtcherine ve Jun, 2007)

Müller ve Mechtcherine (2017) yaptığı çalışmada, PVA lif kullanarak üretilen kompozitlerin yorulma performansları araştırılmıştır. 24 mm x 40 mm x 240 mm boyutlarında üretilen numunelere çekme gerilmesi kontrollü metod ile yorulma testi uygulanmıştır. Çekme gerilmesi olarak maksimum gerilmenin %80, 60, 40'ı uygulanırken, basınç gerilmesi olarak bazı numunelere Şekil 2.10'da gösterildiği gibi 8 MPa uygulanırken bazı numunelere ise ilk çatlağın oluştuğu gerilmenin %10'u oranında bir kuvvet uygulanmıştır. Sonuç olarak; yük kontrollü yorulma testlerinde uygulanan düşük gerilme oranında çok yüksek çevrim sayılarına ulaşılmıştır. Uygulanan gerilme oranının artması ile birlikte yapılan çevrim sayılarının kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte kompozitlerin deformasyon kapasitelerinin çevrim sayıları ile ters bir ilişkide olduğu görülmüştür. Yani gerilme oranının artması ile birlikte deformasyon kapasitesi değerlerinde de artışlar kaydedilmiştir. Yapılan deneyin bir diğer parametresi olan basınç yükleme rejim değişiminde ise, sabit 8 MPa basınç rejiminin, ilk çatlak gerilmesinin %10'u alınarak yapılan deneylere kıyasla daha düşük çevrim sayılarında kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte deformasyon kapasitesi değerlerinde ise daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.



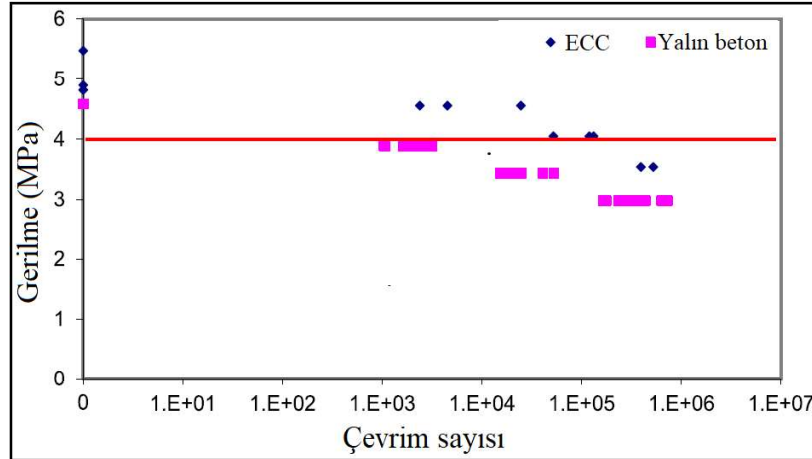
Şekil 2.10 Çeki-bası (hem çekme hem basınç) gerilmesi uygulanan yorulma testi grafiği (Müller ve Mechtcherine, 2017)

Matsumoto ve diğer. (2010) yaptığı çalışmada, PVA lif kullanılarak üretilen çimentolu kompozitin basınç ve çekme durumlarının betonun düşük çevrimli yorulma performansına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Deformasyon kontrollü metod ile gerçekleştirilen bu deneyde frekans 1 Hz olarak ayarlanmıştır. Test sırasında 1., 10., 100. ve 1000. çevrimlerdeki veriler kullanılarak gerilme-deformasyon grafiği elde edilmiştir (Şekil 2.11). Sonuç olarak grafiğe bakıldığında, 1 – 100 devir arasında, eğrilerin şekillerinde belirgin bir değişim olmamakla birlikte eğrilerdeki azami çekme ve basma gerilmesi hafifçe azalır. 100 ila 1000 devir arasında, histerisis eğrileri önemli ölçüde bozulmaya başlar. 1000 devirde çekme gerilmesi neredeyse sıfırdır, yani oluşan çatlaklar, çekme gerilmesi olmadan açılır. Gerilme-deformasyon eğrileri çatlak boyunca köprüleme gerilmesinin 100 ila 1000 devir arasında hızla bozulduğunu göstermiştir.



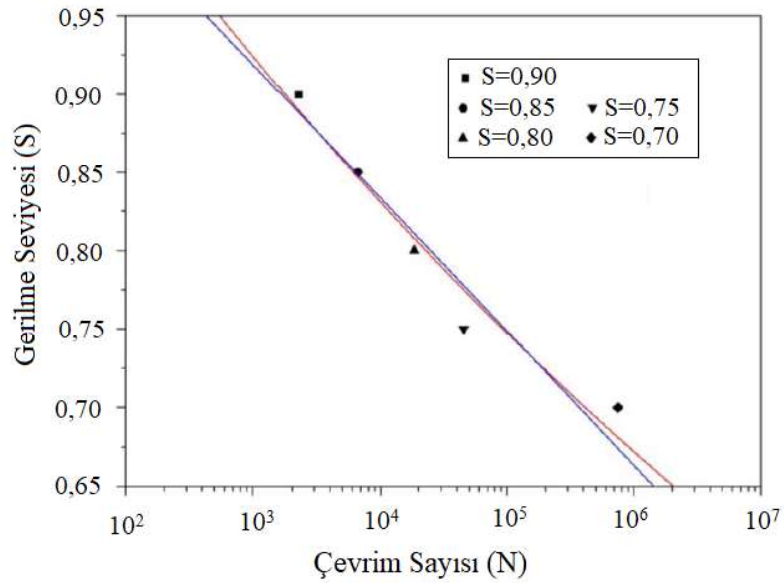
Şekil 2.11 Çekme ve basınç gerilmelerinin çevrimsel yüklenmesi sonucu gerilme – deformasyon grafiği (Matsumoto ve diğer., 2010)

Jin ve Li (2019) yaptığı bu çalışmada, HTPP-ECC'lerin eğilme ve çekme gerilmeleri altındaki performanslarını incelemiştir. Rüzgar kulelerinin kaplamalarında kullanılan HTPP ECC'lerin, statik dayanımlarının %70, 80 ve 90'ı oranında ve minimum sabit %20 gerilme oranında olacak biçimde 4 noktalı eğilme yüklemesi altında yorulma performansları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada geleneksel betona kıyasla HTPP-ECC'lerin yorulma ömrünün 50 kat daha uzun olduğu görülmüştür (Şekil 2.12).



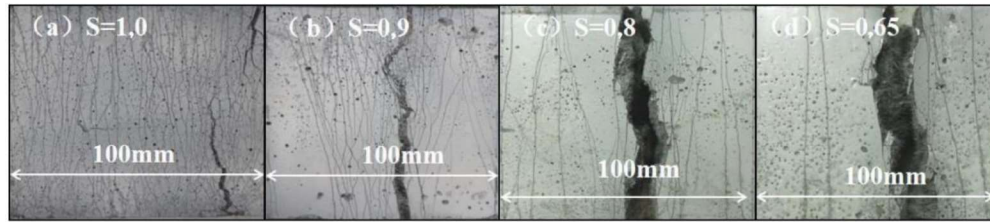
Şekil 2.12 HTPP-ECC'lerin eğilme gerilmesi altında yorulma performansı (Jin ve Li, 2019)

Huang (2018), PVA lifli kompozitlerin basınç yüklemesi altında yorulma davranışlarını incelemiştir. Hacimce %2 lif ekleyerek elde ettiği 70 mm çapında ve 140 mm yüksekliğindeki kompozitlerin, basınç dayanımlarının %90, 85, 80, 75, 70 ve 65'i oranlarında yorulma performanslarına bakmıştır ve bu deneylerde frekans 4 Hz olarak uygulanmıştır. Deneyler 2 milyon çevrime ulaştığında durdurulmuştur ve bu çevrime ulaştığındaki yorulma yüklemesi oranı kompozitin yorulma dayanım sınırı olarak kabul edilmiştir. Bu değer deneyler sonucunda yorulma yüklemesi oranının %65'i olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte farklı yorulma yüklemesi oranlarında kompozitin yorulma yüklemesi altındaki tepkisi de incelenmiştir. Şekil 2.13'te gösterildiği üzere, yorulma yüklemesi oranı %65 iken kompozitte yorulma göçmesi yaşanmadan iki milyon çevrime ulaştığı kaydedilirken, yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte yapılan çevrim sayılarında azalmaların olduğu tespit edilmiştir ve %90 yorulma yüklemesi oranında kompozitin en düşük çevrim sayısına ulaştığı durum olarak belirtilmiştir. Bu verilerin yanı sıra, kompozitin deformasyon yeteneğinde yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür.



Şekil 2.13 Farklı yorulma yüklemeleri oranlarında elde edilen gerilme-çevrim sayısı grafiği (Huang, 2018)

Sui ve diğer. (2018) yılında yaptığı araştırmada, %2 oranında Polietilen lif kullanılarak üretilen Ultra Yüksek Performanslı Mühendislikçe Geliştirilmiş Kompozitlerin yorulma performansları incelenmiştir. 300 mm x 100 mm x 100 mm boyutlarında üretilen kompozitlerin, eğilme yüklemesi altında %90, 80, 65 ve 50 yorulma yüklemesi oranlarında yaptıkları çevrim sayıları ve çatlak sayıları elde edilmiştir. Deneyler 2 milyon çevrime ulaştığında durdurulmuştur ve bu çevrime ulaştığındaki yorulma yüklemesi oranı kompozitin yorulma dayanım sınırı kabulü yapılmıştır. Yorulma yüklemesi oranı %50 olan numunelerin 2 milyon çevrime ulaştığı ve yorulma göçmesi yaşamadığı görülmüştür. Dolayısıyla bu kompozitlerin yorulma dayanım sınırı %50 olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte çevrim yapabilme yeteneğinde ciddi azalmalar olduğu tespit edilmiştir ve en düşük çevrim sayısına %90 yorulma yüklemesi oranında ulaşılmıştır. Yorulma deneylerinin bir diğer parametresi olan deformasyon kapasitesi incelendiğinde ise %50 yorulma yüklemesi oranında ($S=0,50$) ortalama 5 çatlak, %65'te 6, %80'de 20, %90 yorulma yüklemesi oranında 30 çatlak yaptığı tespit edilmiştir (Şekil 2.14). Aynı numunelerin statik çekme testinde ise 45 çatlak yaptığı kaydedilmiştir. Buna bağlı olarak yüklem oranının artması ile birlikte hem çatlak sayılarında hem de deformasyon kapasitesi değerlerinde ciddi artışlar belirtilmiştir.



Şekil 2.14 Numunelerin yaptığı çatlak sayıları a) statik çekme testi, b) %90 yorulma yüklemesi oranında yorulma testi, c) %80 yorulma yüklemesi oranında yorulma testi, d) %65 yorulma yüklemesi oranında yorulma testi çatlak görüntüleri (Sui ve diğer., 2018)

2.3 Yorulma Deneyi Prosedürleri

Genel olarak, bir malzemenin yorulma davranışını araştırmak için kullanılan iki temel yüklem prosedürü vardır: a) sadece gerilme düzeylerine dayanan, en yaygın ve

geleneksel olarak kullanılan gerilme kontrollü yükleme, b) deformasyon kontrollü olarak yapılan diğer bir yükleme ise lokalize bölgelerdeki gerilme ve deformasyon karakterizasyon tahminleri için dikkate alındığında daha detaylı olarak analiz edebilmektedir (Alam, 2016).

2.3.1 Gerilme (Yük) Kontrollü Yükleme

Bu yöntem, yorulma gerilme oranı ve çevrim sayısını içeren Wöhler diyagramının temelini oluşturur. Yorulma gerilmesi sabit değerler arasında değişmek suretiyle malzeme, yorulma göçmesi yaşayana kadar ya da hedeflenen çevrim sayısına ulaşana kadar yüklenmeye devam eder (Baradan, 2011). Deneyler yüksek bir gerilme değerinden başlatılır ve değerler düşürülerek devam edilir. Daha sonra elde edilen sonuçlar ve Wöhler yorulma ömrü tahmini denklemi kullanılarak gerilme-çevrim sayısı grafiği çizdirilir (Denklem 1). Bu denklemin dışında modifiye edilmiş birçok denklem de bulunmaktadır (Wöhler, 1871).

$$\frac{\sigma_m}{f_r} = a - b \times \log_{10} N_c \quad (2.1)$$

σ_m = Yüklenen maksimum gerilme (MPa),

f_r = Dayanım (MPa),

a, b = Farklı yükleme şartlarına bağlı deneysel katsayılar,

N_c = Yorulma dayanım sınırı (Çevrim sayısı),

Gerilme kontrollü yüklemelerde, uygulanan gerilmenin türü ve genliğine bağlı olarak değişken, tam değişken ve tekrarlanan gerilme modelleri bulunabilir (Şekil 2.15). Malzemenin hem çekme hem de basınç yüklemesi altındaki yorulma performansını değerlendirmek için tam değişken (Şekil 2.15.a), sadece çekme gerilmeleri altındaki yorulma performansını değerlendirmek için ise değişken ya da tekrarlanan gerilme modeli seçilebilir (Şekil 2.12.b ve 2.12.c) (Özmen, 2007). Bu yöntem, malzemelerin yorulma ömrünü hesaplamada kullanılan en yaygın yöntemdir. Yüksek çevrim sayılarına ulaşan malzemelerin yorulma ömrünün hesaplanmasında

çok etkili olmasına rağmen, düşük çevrimli yorulma analizlerinde o kadar etkili olmadığı belirtilmektedir (Acar, 2002).

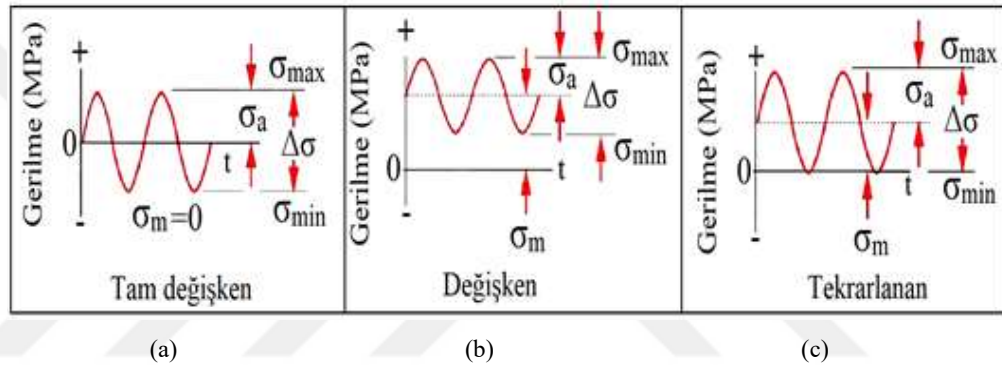
$\sigma_{\max}$ = Maksimum gerilme,

$\Delta\sigma$ = Gerilme aralığı = $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$,

$\sigma_{\min}$ = Minimum gerilme,

σ_a = Gerilme genliği = $\Delta\sigma/2$,

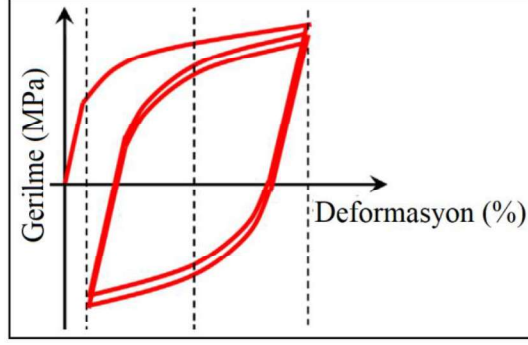
σ_m = Ortalama gerilme = $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$,



Şekil 2.15 Gerilme kontrollü yükleme modeli (Baradan, 2011)

2.3.2 Deformasyon Kontrollü Yükleme

Deformasyon kontrollü yükleme, malzemelerin kritik bölgelerindeki deformasyonlarının davranışlarını inceleyen en etkili yorulma ömrü metodlarından biridir (Özmen, 2007). Beton için genel olarak yük kontrollü yükleme yöntemi kullanılmasına rağmen, malzemelerin yorulma ömrü ilişkilerini anlamak için bu yöntem de oldukça sık tercih edilir (Shigley, 2011). Şekil 2.16'da görüldüğü gibi belirli iki deformasyon seviyesinde tekrarlı yüklenmesi ile çentikler, çatlaklar veya gerilme yığılmalarının olduğu alanlar daha efektif incelenebilmektedir (Alam, 2016). Yorulma yüklemelerine maruz kalan malzemelerin elastik ve plastik deformasyon tespitinde çok iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir (Özmen, 2007). Deformasyon kontrollü yükleme ile bölgesel deformasyon çok daha etkili incelenebildiği için, çatlak oluşumu ve çatlak yayılımına dayalı olan bu yorulma ömrü metodu sıkça kullanılmaktadır (Lee, Pan, Hathaway ve Barkley, 2005).



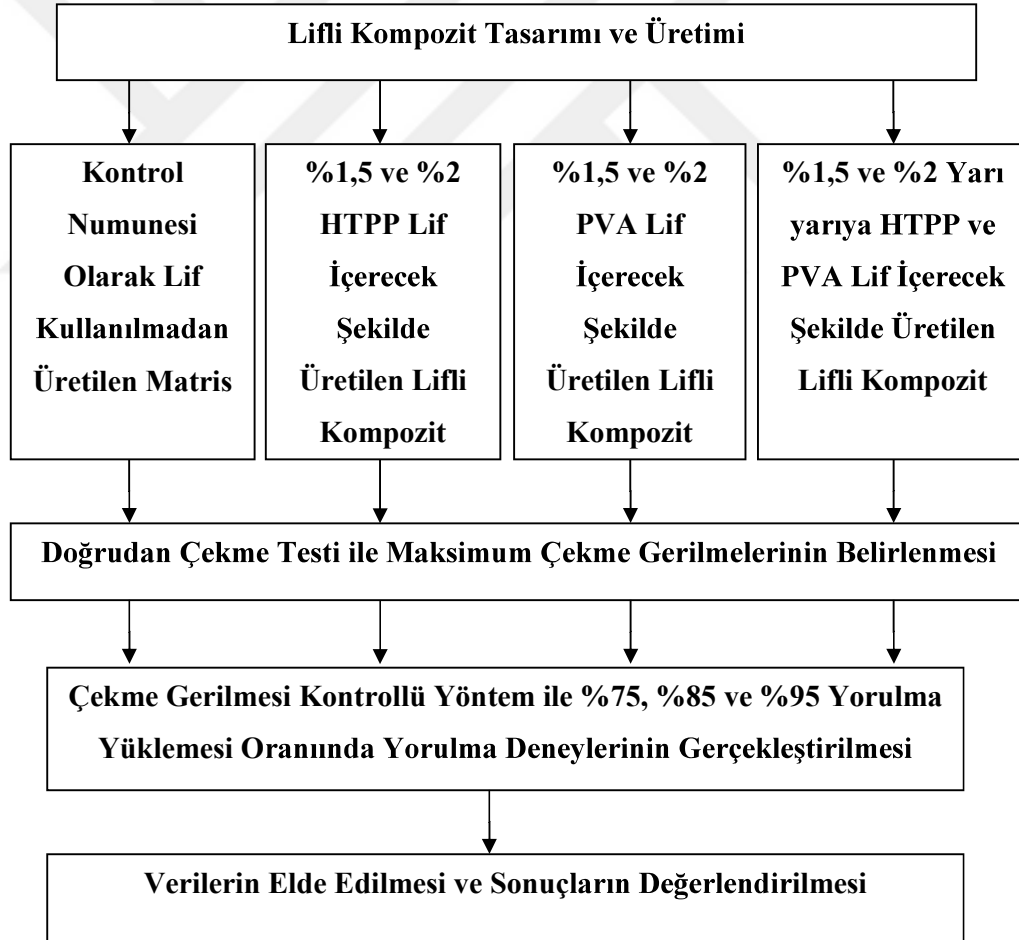
Şekil 2.16 Deformasyon kontrollü yüklemde gerilme-deformasyon eğrisi (Paul, 2019)

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı

Deneysel program Şekil 3.1’de sunulmuştur. Bu programa göre HTPP, PVA ve HİBRİT (hacim olarak yarı yarıya HTPP ve PVA lif) liflerin %1,5 ve %2 oranında eklenmesi ile üretilen kompozitlerin tekrarlı yüklemeler altındaki performansı, çekme gerilmesi kontrollü yöntem ile %75, %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranında incelenmiştir.



Şekil 3.1 Tez kapsamında yapılması planlanan çalışmaların iş akış şeması

3.2 Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Bağlayıcı toz malzemeler

Deneysel çalışmada CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC), Adana Çimentodan temin edilmiş olup TS EN 15167-1 standardına uygundur. Kullanılan ÖYFC’nin üretici firma tarafından beyan edilen kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri, basınç dayanımları

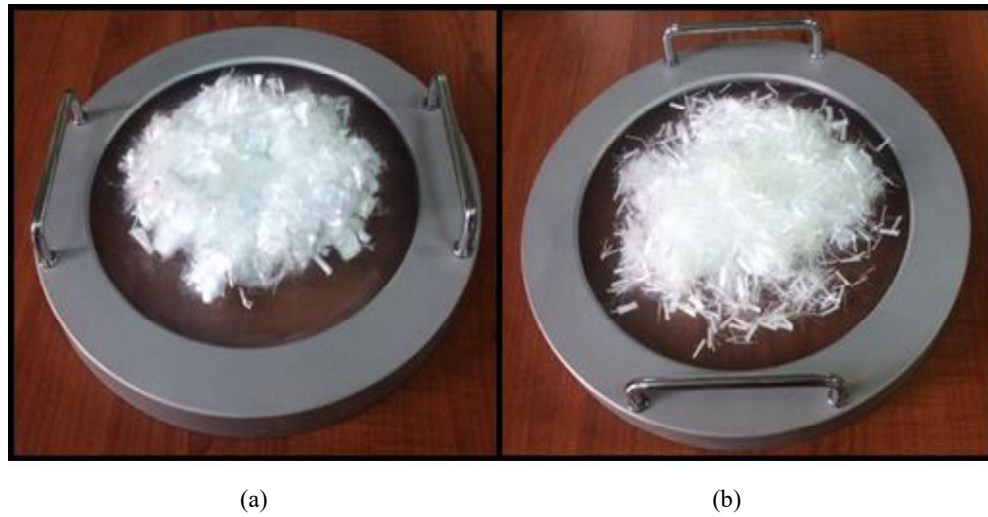
Kimyasal Analiz	Basit Oksit Oranları	Basınç Dayanımı (MPa)	
SiO ₂ (%)	18,57	2 Günlük (MPa)	27,2
Al ₂ O ₃ (%)	4,95	7 Günlük (MPa)	39,9
Fe ₂ O ₃ (%)	3,11	28 Günlük (MPa)	49,3
CaO (%)	63,94	Özgül Ağırlık	3,09
MgO (%)	0,98	Özgül Yüzey (m ² /kg)	337
Na ₂ O (%)	0,37	0.090 mm elek üstü (%)	0,7
K ₂ O (%)	0,75	0.045 mm elek üstü (%)	19,3
SO ₃ (%)	3,07	Hacim Sabitliği (mm)	0,5
Cl ⁻ (%)	0,006	Karma Oksit Oranları (%)	
Kızdırma Kaybı (%)	3,57	C ₃ S	68,52
Çözünmeyen Kalıntılar (%)	0,21	C ₂ S	13,55
Serbest CaO (%)	1,03	C ₃ A	7,86
		C ₄ AF	9,46

Tablo 3.2 Ögütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

Kimyasal Analiz	Basit Oksit Oranları (%)	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂ (%)	39,98	Kızdırma Kaybı (%)	2,34
Al ₂ O ₃ (%)	11,06	Rutubet (%)	0,1
Fe ₂ O ₃ (%)	0,77	Özgül Ağırlık	2,87
CaO (%)	32,95	Özgül Yüzey (m ² /kg)	420
MgO (%)	10,26	90 Mikron Elek üstü (%)	0
SO ₃ (%)	0,34	45 Mikron Elek üstü (%)	0,4
Cl ⁻ (%)	0,0075		

3.2.2 Polimerik lifler

Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP) (Şekil 3.2.a), alkali dayanıklılığı yüksektir ve hidrofob yüzey özelliğine sahiptir. Brezilya’da Brasilit firması tarafından ticari olarak üretilmektedir (Ikai, Reichert, Rodrigues ve Zampieri, 2010). Şekil 3.2.b’de ise hidrofil özelliklere sahip PVA lifler (kaplaması var hidrofilliği azaltılmış) gösterilmiştir. HTPP ve PVA liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2 a) HTPP lif, b) PVA liflerin gösterimi (Kişisel arşiv, 2020)

Tablo 3.3 HTPP ve PVA lifin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

	Özgül Ağırlık	Çap (μm)	Uzunluk (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
HTPP Lif	0,91	12	10	850	6	21
PVA Lif	1,3	39	12	1620	42,8	6

3.2.3 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 katkı özellikleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4 Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri

İçeriği	Modifiye sentetik karboksilat polimeri
Yapı	Homojen, sıvı
Yoğunluk (20°C)	1,065 g/cm ³
Ph (20°C)	4
Toplam klorür miktarı (%)	<0,10
Alkali miktarı (%)	<7,0
Önerilen dozaj	Toplam çimento miktarının %0,5-2,0

3.3 Kompozitlerin Karışım Oranları ve Üretimi

DeneySEL program kapsamında, matris tasarımı yapılırken ECC’nin mikromekanik teorisinden yararlanılmıştır (Li, 1993; Li ve diğer., 2001). Detaylı literatür taramasından sonra elde edilen bilgiler ışığında PVA ve HTPP lifleri ile en uyumlu matrisi belirlemek için ön çalışmalar yapılmıştır (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu,

Keskinates ve Gödek, 2016). Bu çalışmaların sonucunda ise kullanılacak matris seçilmiştir. Karışımın su/çimento oranı 1,20 ve puzolan/çimento oranı 2,5 olarak belirlenmiştir (Tablo 3.5). Numunelerin adlandırılması ise sahip olduğu lif türünün baş harfi ve % olarak içerdiği lif dozajına göre yapılmıştır (H1P1= %1 HTPP lif ve %1 PVA lif içerir).

Tablo 3.5 Matris karışım oranları

SERİ ADI	Matris Bileşenleri				
	Çimento (kg/m ³)	Öğütülmüş Yüksek fırın cürufü (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Lif (kg/m ³)	Katkı (kg/m ³)
Lifsiz Kontrol Numueleri	406	1015	487	-	-
H1,5P0	406	1015	487	HTPP (%1,5) = 13,68	0,5
H2P0	406	1015	487	HTPP (%2) = 18,25	2
H0P1,5	406	1015	487	PVA (%1,5) = 19,5	-
H0P2	406	1015	487	PVA (%2) = 26	1
H0,75P0,75	406	1015	487	HTPP (%0,75) = 6,84 + PVA (%0,75) = 9,75	-
H1P1	406	1015	487	HTPP (%1) = 9,125 + PVA (%1) = 13	1

Döküm işlemi için Şekil 3.3.a'da gösterilen, dakikada 56, 104 ve 185 devir yapabilme özelliğine sahip zemin tipi Hobart mikser kullanılmıştır. Kompozit karışımlarının hacmi ise 4 dm³ olacak şekilde belirlenmiştir. Karışımların döküm süreci Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Toz malzemeler olan çimento ve öyfc tartımları yapıldıktan sonra 56 devir/dakika hızında üç dakika kuru karıştırılmıştır. Daha sonra kuru karışıma su ilave edilmiştir ve üç dakika da 104 devir/dakika hızında karıştırılmaya devam edilmiştir. Toplam 6 dakika karıştırıldıktan sonra mikserin hızı 185 devir/dakikaya alınıp üç dakika daha karıştırılmıştır. Daha sonra tartımları yapılan polimerik lifler karışıma ilave edilip 104 devir/dakika hızında üç dakika daha karıştırılmıştır. Bu süre içinde hazırlanan süperakışkanlaştırıcı karışımın içine dahil edilmiştir. Karıştırmanın sonunda ise liflerin matris içinde dağılıp dağılmadığı kontrol edilmiş ve topaklaşmanın görüldüğü karışımlarda bir miktar daha süperakışkanlaştırıcı ilave edilip karışım istenen kıvama geldiği zaman, 30 x 60 x 330 boyutlarındaki Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu'nun önerisine (JSCE, 2008) uygun olarak imal edilen kemik şeklindeki çelik çekme kalıplarına doldurulmuştur (Şekil 3.3.b). Karışım kalıplara iyice yerleştirildikten sonra bir mala yardımıyla üzeri perdahlanmış ve 2 gün boyunca kalıpta kalacağı için üst kısmı strech naylon ile örtülmüştür. Numuneler iki gün kalıpta bekledikten sonra kalıplardan çıkarılıp 28 gün boyunca 20±2 °C'de kirece doymun kür havuzunda tutulmuştur. Su kürü uygulanan örnekler 28 gün sonunda 1 gün havada kurutulmuş ve ardından çekme cihazında deneyler yapılmıştır

Tablo 3.6 Karışımların döküm süreci

Karıştırma süresi (saniye)	Karıştırma hızı (devir/dakika)	Eklenen malzemeler
180	56	Çimento + ÖYFC
180	104	Su
180	185	-
180	104	Lif + süperakışkanlaştırıcı



(a)

(b)

Şekil 3.3 a) Hobart mikser, b) Kemik şeklindeki çelik kalıplar (Kişisel arşiv, 2020)

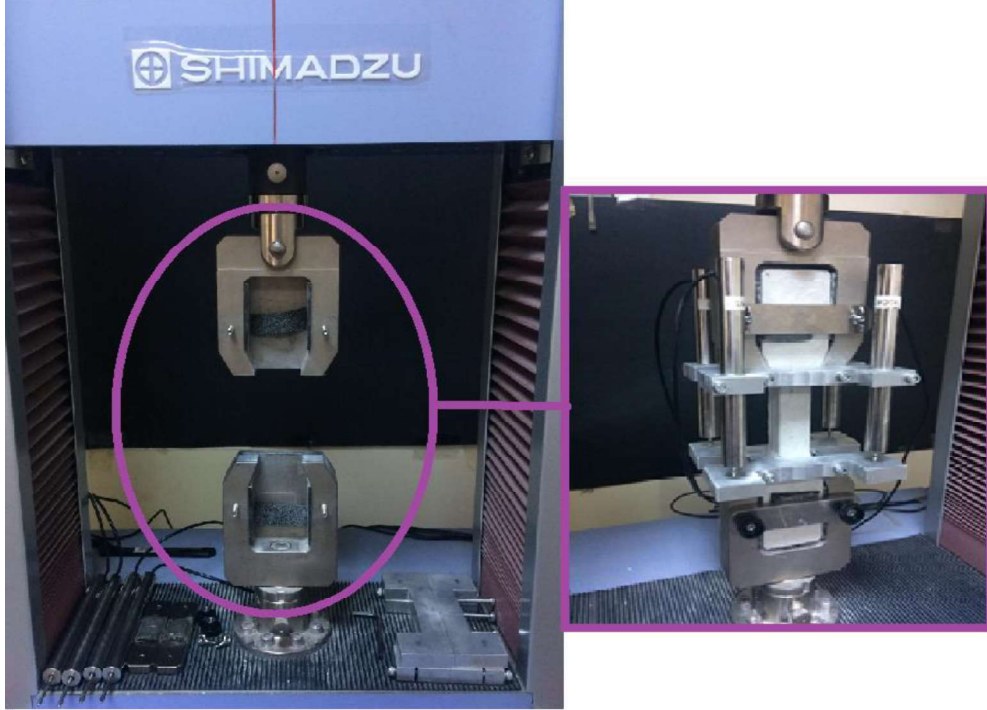
3.4 Deney Yöntemi

Tekrarlı yüklemeye maruz kalan lif takviyeli kompozitlerde çatlak gelişimi ve yayılımına karşı direnç sadece lifler tarafından sağlanmaktadır. Yüksek çevrimli yorulma yüklemelerinde çatlaklar matris-arayüzey ilişkisine bağlantılı olarak gelişir ve liflerin yüksek çevrimli yorulmalar üzerinde bir etkisinin olmadığı bilinmektedir (Lee ve Barr, 2004). Fakat lif türü ve dozajının betonun yorulma performansı üzerindeki etkisi en iyi düşük çevrim aralığında (<1000 çevrim) anlaşılmaktadır. Bununla birlikte araştırmalar, özellikle süreksizlik gerilmesi olarak bilinen ve yorulma kaynaklı göçmeye sebep olan çatlakların, yorulma yüklemesi oranının %75'ten sonra oluşmaya başladığını göstermektedir (Hsu, 1984). Literatürde belirtilen tüm bu sonuçlar doğrultusunda, yapılacak olan deneylerin %75 yorulma yükleme oranından başlatılması; %85 ve 95 oranlarının da uygulanması hedeflenmiştir.

3.4.1 Çekme Cihazı

Kemik şeklinde olan numunelerde çekme yüklemesi altındaki yorulma performanslarını ölçmek amacıyla Shimadzu model çekme cihazı ile çalışılmıştır. Şekil 3.4'te detayları verilen cihazın özellikleri; 50 kN (5 ton) yük uygulama kapasiteli, dakikada üç çevrim yapabilecek şekilde 0,05 Hz ile tekrarlı yükleme

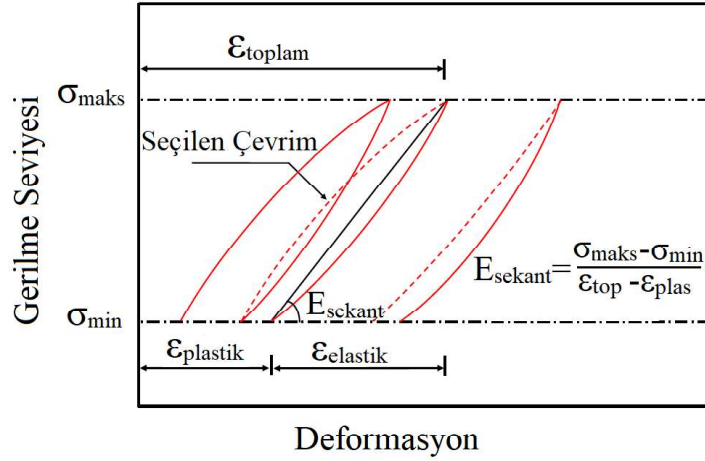
yapabilen, hız ölçüm hassasiyeti $\pm 0,1$, veri toplama hızı 5000 Hz, yük ölçüm hassasiyeti yük hücresi kapasitesinin 1/1 ile 1/1000 aralığında ± 1 , dikey test bölgesi 1250 mm, yatay test alanı (kolonlar arası boşluk) 500 mm tezgah üstü tipidir. Çekme düzeneğinin alt kısmı ankastre üst kısmı ise mafsallı pin konfigürasyonuna sahip ve numuneye eksenel çekme kuvveti uygulanmasına izin vermektedir. Numunenin test esnasında boy değişimini ölçmek için 4 adet ekstensometre (LVDT) ve bağlantı adaptörüne sahiptir. LVDT özellikleri; paslanmaz çelik, çekme cihazı ile bağlantıda elektriksel olarak uyumlu, giriş ve çıkış voltajı çekme cihazı yazılımı ile veri alınabilecek şekilde ve toplam hareket mesafesi 25 mm'dir. Cihaz ayrıca, çekme gerilmesi altında tekrarlı yükleme yapabilen ve bu verileri rapor olarak sunan TrapeziumX yazılımına sahiptir. Yazılım ile ayrıca ön yükleme (preload) veya ön çevrim (precycle) yapılabilmektedir. Yazılım test sonuçlarını, grafikleri ve istatistiki değerleri Excel, Word gibi ofis programlarına aktarabilmekte, bu değerleri içeren test raporunu pdf formatında kaydedilebilmektedir.



Şekil 3.4 Çekme cihazının görüntüsü (Kişisel arşiv, 2020)

3.4.2 Deneyler Sonucunda Elde Edilen Parametreler ve Analizler

Çekme gerilmesi kontrollü metod ile gerçekleştirilecek olan yorulma deneylerinin yapılabilmesi için ilk olarak yorulma yüklemesi oranını bulmak gerekmektedir. Bunun için her bir grup için üretilen 15 adet numuneden altışar tane alınarak tek eksenli statik çekme testine tabi tutulmuştur. Yükleme 0,5 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. Çeneler arası mesafe 95 mm olarak belirlenmiş ve bu bölgedeki birim şekil değiştirmeler dört tane LVDT ile kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanılarak kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri çizdirilmiştir. Bu grafikler üzerinde en yüksek çekme gerilmesi değeri çekme dayanımı olarak adlandırılmıştır ve bu noktanın yatay ekseninde karşılık gelen değeri ise birim şekil değiştirme kapasitesi değeri olarak isimlendirilmiştir. Daha sonra yorulma deneylerini gerçekleştirebilmek için bu sonuçların ortalamaları alınarak, her grup için ayrı ayrı ortalama çekme dayanımları hesaplanmıştır. Her bir grup için kalan 9 adet numuneden 3'er tanesi ise elde edilen ortalama çekme dayanımlarının %75, 85 ve 95'i olacak şekilde çekme gerilmesi kontrollü tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Test sırasında frekans sabit olup bir çevrim 20 saniye sürecek şekilde 0,05 Hz olarak ayarlanmıştır. Göçme ve ana çatlağın meydana gelmesinden sonra elde edilen veriler kullanılarak numunelerin "gerilme-birim şekil değiştirme" eğrileri çizdirilmiş ve yaptırılan çevrim sayıları belirlenmiştir. Çevrimlerin olduğu grafikler incelendikten sonra her bir çevrime ait sekant modülü değerlerinin hesaplanmasında Şekil 3.5'te gösterilen hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Sekant modülü hesabı için bir çevrimin en büyük gerilme değeri ile en küçük gerilme değeri farkı, aynı gerilmelerin denk gelen birim deformasyon değerlerinin farkına bölünmesi ile bulunmuştur.



Şekil 3.5 Sekant modülü hesaplama yöntemi (Malek, Scott, Pampanin, MacRae ve Marx, 2018)

Yorulma testleri sonucunda elde edilen excel verileri python isimli programda algoritması oluşturularak programlama dili yazılmıştır. Bu yazılım ile her bir çevrimin sekant modülü hesabı için gerekli maksimum gerilme ve ona denk gelen birim şekil değiştirme kaydedildikten sonra, minimum gerilme ve ona denk gelen şekil değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak göçme anına kadar her bir çevrimin sekant modülü hesaplanmıştır (Şekil 3.6).

<pre> import numpy import xlrd,xlsxwriter import os,sys if(len(sys.argv) > 1): dosyaismi = sys.argv[1] # print('{}'.format(dosyaismi)) book = xlrd.open_workbook(dosyaismi) print('{}'.format(book.nsheets)) sheet = book.sheet_by_index(0) col = sheet.col_values(2) maxFind = False last_y_min, last_y_max= 0,0 valueList = [] for colNumber in range(3,len(col)): # print('{}'.format(col[colNumber])) if colNumber == 3: yMin = col[colNumber] yMax = col[colNumber] startMin,startMax = yMin,yMax </pre>	<pre> if not isinstance(col[colNumber],str): if maxFind == False: if(yMax < col[colNumber]): yMax = col[colNumber] else: xMax = sheet.cell(colNumber-1,1).value if(yMax != startMax): # print('Max : {} {}'.format(yMax,xMax)) valueList.append([xMax,yMax]) yMin = yMax maxFind = True else: if(yMin > col[colNumber]): yMin = col[colNumber] else: maxFind = False xMin = sheet.cell(colNumber-1,1).value if(yMin != startMin): # print('Min : {} {}'.format(yMin,xMin)) valueList.append([xMin,yMin]) yMax = yMin </pre>
---	---

Şekil 3.6. Python isimli program ile sekant modülü hesabı (Kişisel arşiv, 2020)

Numuneler test edildikten sonra Şekil 3.7’de görülen optik el mikroskopi ile, numunenin ön yüzeyinin sağ ve sol tarafına iki adet kontrol çizgisi çekildikten sonra bu çizgiler baz alınarak üstünde oluşan çatlaklar sayılarak bilgileri kaydedilmiştir ve daha sonra bu çatlak sayılarının ortalaması hesaplanmıştır. Son olarak da “yorulma yüklemesi oranı-çevrim sayısı” verileri ile yorulma dayanım sınırı grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3.7 Optik el mikroskopi yardımı ile çatlak sayılarının belirlenmesi (Kişisel arşiv, 2020)

BÖLÜM DÖRT

BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

4.1 Tek Eksenli Statik Çekme Deneyleri

4.1.1 Lif Kullanılmadan Üretilen Numunelerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları

Kontrol numunesi olarak lif kullanılmadan üretilen yalın kompozitlerin doğrudan çekme testi sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Yalın kompozitlerin ortalama çekme dayanımı $0,38 \pm 0,12$ MPa, ortalama birim şekil değiştirme değeri $\%0,0078 \pm 0,0016$ olarak bulunmuştur ve bütün numuneler tek çatlak yaparak göçmüştür. Yalın numunelerin özellikle çekme dayanımlarının çok düşük değerlerde kalmasının, matrisin içinde ince ve iri agrega bulunmamasından kaynaklı rötreler ve buna bağlı olarak erkenden oluşan mikro-çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

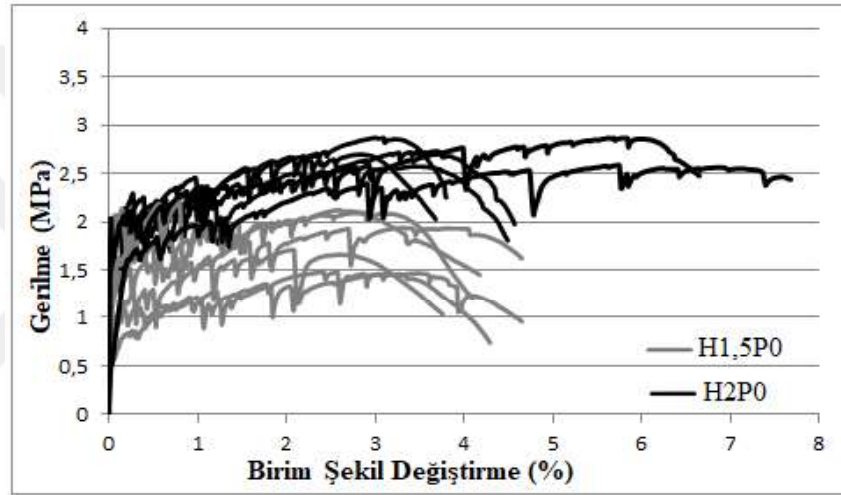
Tablo 4.1 Lif kullanılmadan üretilen kompozitlerin doğrudan çekme testi sonuçları

Numune lif türü ve dozajı	Ortalama statik çekme dayanımı	Ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi	Ortalama çatlak sayıları
	MPa $\pm$ Std. sapma	% $\pm$ Std. sapma	Adet $\pm$ Std. sapma
Yalın Kompozitler	$0,38 \pm 0,12$	$0,0078 \pm 0,0016$	1 ± 0

4.1.2 HTPP Lifli Kompozitlerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları

HTPP lif kullanılarak üretilen farklı lif dozajlarındaki iki serinin doğrudan çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.1’de verilmiştir. Deney tamamlandıktan sonra ortaya çıkan ortalama statik çekme dayanımı, ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi ve çatlak sayıları Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Buna göre, $\%1,5$ HTPP lif kullanılarak üretilen H1,5P0 adlı numunelerin ortalama çekme dayanımı $1,79 \pm 0,29$ MPa, ortalama birim şekil değiştirmeleri $\%3,09 \pm 0,49$ ve ortalama çatlak sayısı $13 \pm 2,25$ olarak bulunmuştur. Lif

dozajı %2 olan H2P0 adlı numunelerin ise ortalama çekme dayanımı $2,68 \pm 0,16$ MPa, ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi $3,98 \pm 1,31$ ve ortalama çatlak sayısı $21 \pm 5,37$ olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlara bakarak lif dozajının HTPP lifli kompozitlerde %1,5'tan %2'ye çıkması ile birlikte ortalama çekme dayanımında %50'lik ve ortalama birim şekil değiştirme kapasitesinde %28'lik bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca lif dozajının artması ile birlikte ortalama çatlak sayısında da %61 oranında bir artış meydana gelmiştir.



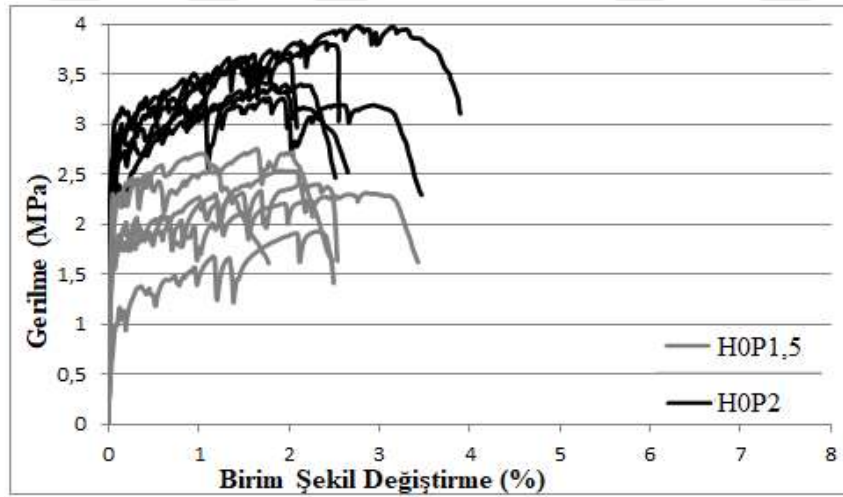
Şekil 4.1 H1,5P0 ve H2P0 adlı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Tablo 4.2 Farklı lif dozajlarındaki H1,5P0 ve H2P0 adlı iki serinin doğrudan çekme testi sonuçları

Numune lif türü ve dozajı	Ortalama statik çekme dayanımı	Ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi	Ortalama çatlak sayıları
	MPa $\pm$ Std. sapma	% $\pm$ Std. sapma	Adet $\pm$ Std. sapma
H1,5P0	$1,79 \pm 0,29$	$3,09 \pm 0,49$	$13 \pm 2,25$
H2P0	$2,68 \pm 0,16$	$3,98 \pm 1,31$	$21 \pm 5,37$

4.1.3 PVA Lifli Kompozitlerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları

PVA lif kullanılarak üretilen farklı lif dozajlarındaki iki serinin doğrudan çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4.2’de verilmiştir. Tamamlanan deney sonunda ortaya çıkan ortalama statik çekme dayanımı, ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi ve çatlak sayıları Tablo 4.3’te gösterilmiştir. %1,5 PVA lif kullanılarak üretilen H0P1,5 numunelerin ortalama çekme dayanımı $2,42 \pm 0,28$ MPa, ortalama birim şekil değiştirmeleri $\%2,13 \pm 0,56$ ve ortalama çatlak sayısı $12 \pm 2,21$ olarak bulunmuştur. Lif dozajı %2 olan H0P2 adlı numunelerin ise ortalama çekme dayanımı $3,58 \pm 0,27$ MPa, ortalama birim şekil değiştirmeleri $\%2,32 \pm 0,46$ ve ortalama çatlak sayısı $15 \pm 2,64$ olarak bulunmuştur. Lif dozajlarının değişmesinin PVA lifli kompozitlere etkisini inceleyecek olursak, lif dozajının %1,5’tan %2’ye çıkması ile birlikte ortalama çekme dayanımlarında %48, ortalama birim şekil değiştirmelerde %9 ve ortalama çatlak sayılarında ise %25’lik artış meydana geldiği görülmüştür.



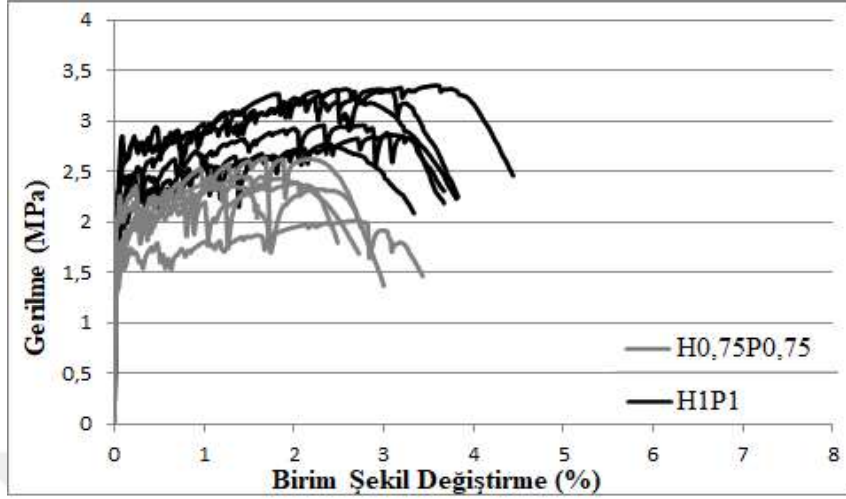
Şekil 4.2 H0P1,5 ve H0P2 adlı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

Tablo 4.3 Farklı lif dozajlarındaki H0P1,5 ve H0P2 adlı iki serinin doğrudan çekme testi sonuçları

Numune lif türü ve dozajı	Ortalama statik çekme dayanımı	Ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi	Ortalama çatlak sayıları
	MPa $\pm$ Std. sapma	% $\pm$ Std. sapma	Adet $\pm$ Std. sapma
H0P1,5	2,42 $\pm$ 0,28	2,13 $\pm$ 0,56	12 $\pm$ 2,21
H0P2	3,58 $\pm$ 0,27	2,32 $\pm$ 0,46	15 $\pm$ 2,64

4.1.4 Hem HTPP Hem PVA Lifli Kompozitlerin Doğrudan Çekme Testi Sonuçları

Yarı yarıya HTPP ve PVA lif kullanılarak üretilen kompozitlerin Şekil 4.3'te hem H0,75P0,75 hem de H1P1 numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Deney tamamlandıktan sonra ortaya çıkan ortalama statik çekme dayanımı, ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi ve çatlak sayıları Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Buna göre %0,75 HTPP ve %0,75 PVA lif kullanılarak üretilen H0,75P0,75 adlı numunelerin ortalama çekme dayanımı 2,35 $\pm$ 0,18 MPa, ortalama birim şekil değiştirmeleri %2,10 $\pm$ 0,37 ve ortalama çatlak sayısı 12 $\pm$ 1,89 olarak bulunmuştur. %1 HTPP ve %1 PVA lif kullanılarak üretilen H1P1 adlı numunelerin ise ortalama çekme dayanımı 3,07 $\pm$ 0,23 MPa, ortalama birim şekil değiştirmeleri %2,96 $\pm$ 0,36 ve ortalama çatlak sayısı 12 $\pm$ 1,24 olarak bulunmuştur. Lif dozajının artması ile birlikte ortalama çekme dayanımında %30, ortalama birim şekil değiştirmede %40'lık bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte çatlak sayılarında bir değişim olmadığı göze çarpmaktadır.



Şekil 4.3 H0,75P0,75 ve H1P1 adlı kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

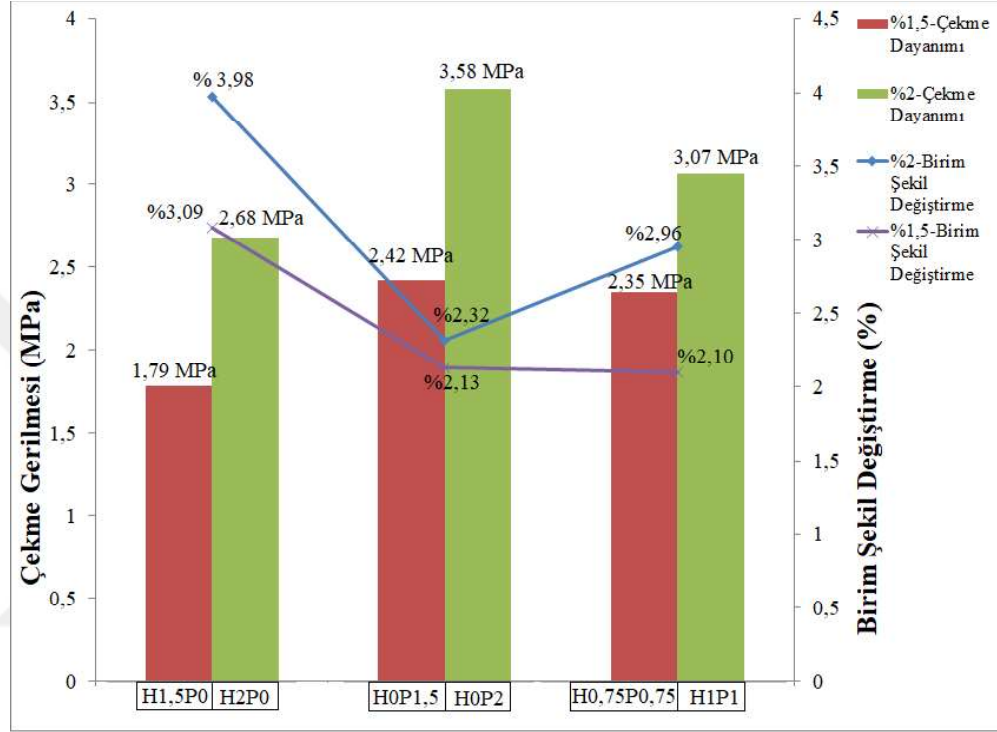
Tablo 4.4 Farklı lif dozajlarındaki H0,75P0,75 ve H1P1 adlı iki serinin doğrudan çekme testi sonuçları

Numune lif türü ve dozajı	Ortalama statik çekme dayanımı	Ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi	Ortalama çatlak sayıları
	MPa $\pm$ Std. sapma	% $\pm$ Std. sapma	Adet $\pm$ Std. sapma
H0,75P0,75	2,35 $\pm$ 0,18	2,10 $\pm$ 0,37	12 $\pm$ 1,89
H1P1	3,07 $\pm$ 0,23	2,96 $\pm$ 0,36	12 $\pm$ 1,24

4.1.5 Tek Eksenli Statik Çekme Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi

Çekme gerilmesi kontrollü metod ile yapılacak olan yorulma deneyleri sırasında uygulanması planlanan gerilme değerlerini hesaplayabilmek için ilk olarak numuneler üzerinde tek eksenli statik çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 4.4'teki grafikte numunelerin çekme dayanımları ve birim şekil değiştirme değerleri görülmektedir. Bu grafiğe bakılarak, üç farklı lif kombinasyonu içinde lif dozajının %1,5'tan %2'ye artması ile birlikte hem çekme dayanımlarında hem de birim şekil değiştirme değerlerinde farklı oranlarda artışların olduğu görülmektedir. Bununla birlikte lif kombinasyonları arasında bir kıyaslama yapıldığında ise PVA lifli kompozitlerin iki farklı lif dozajında da en yüksek, HTPP lifli kompozitlerin ise en düşük çekme

dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanısıra birim şekil değiştirme değerleri açısından incelendiğinde, HTPP lifli kompozitlerin diğerlerine kıyasla çok daha yüksek birim şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.



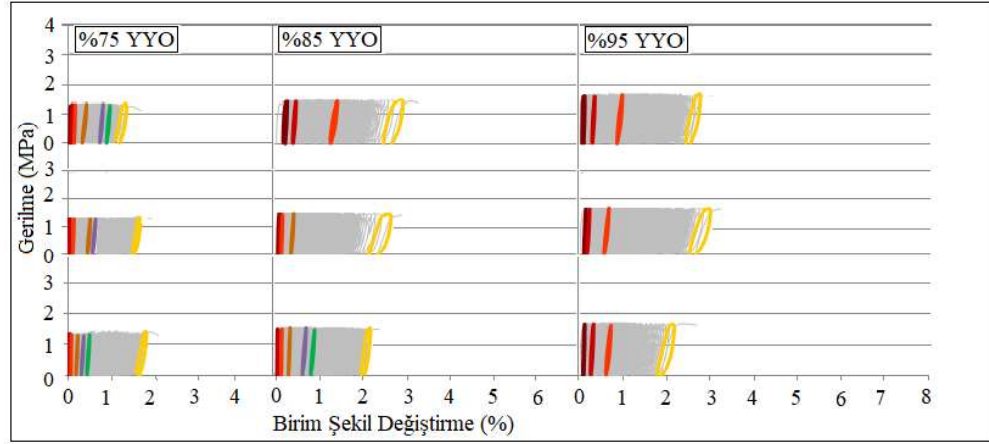
Şekil 4.4 Numunelerin çekme dayanımları ve birim şekil değiştirme değerleri

4.2 Çekme Gerilmesi Kontrollü Yorulma Deneyleri

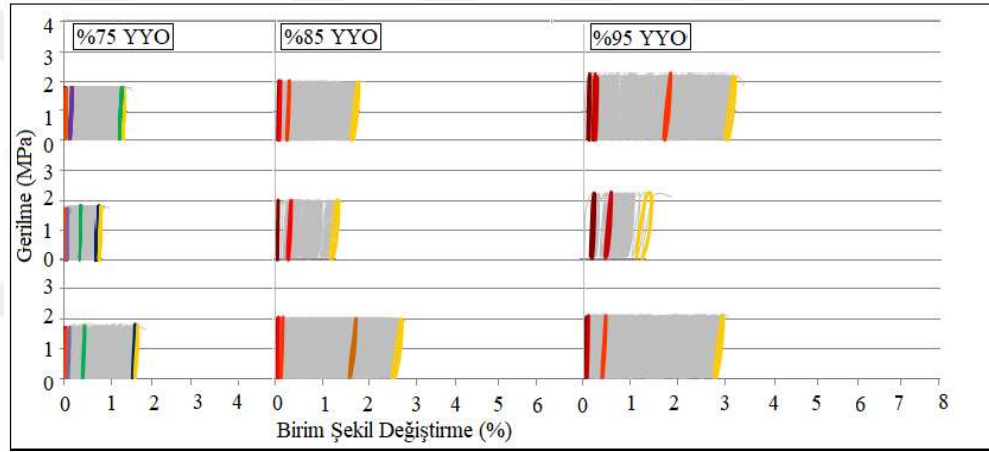
Tek eksenli statik çekme testlerinden elde edilen çekme dayanımlarının %75, %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranında; HTPP, PVA ve hem HTPP hem PVA lif içeren kompozitlere yorulma testleri yapılmıştır. Bu kapsamda lif kullanılmadan üretilen kompozitlerin tek çatlakta kırılıp çevrim yapamaması nedeniyle yorulma sonuçları ve değerlendirmeleri sadece lif içeren kompozitler için yapılmıştır.

4.2.1 %1,5 Lif Kullanılarak Üretilen Kompozitlerin Yorulma Testi Sonuçları

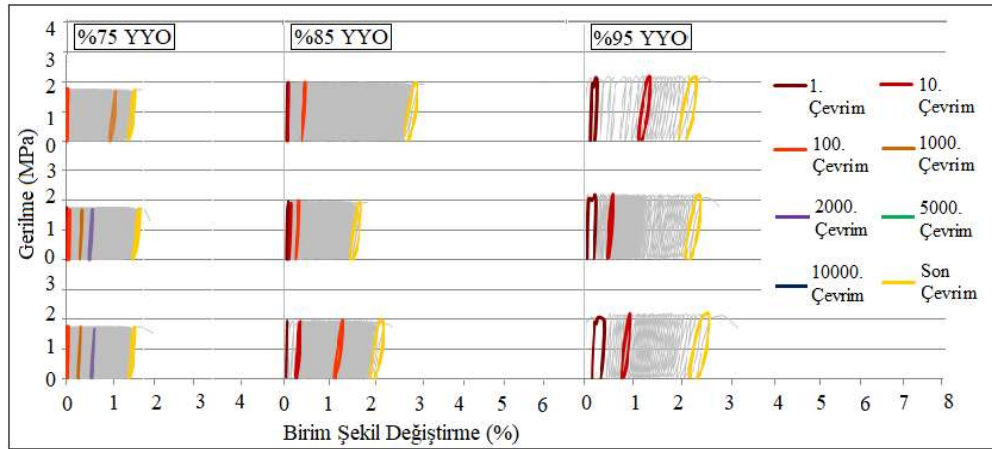
Hacimce %1,5 lif kullanılarak üretilen H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 adlı serilerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışları Şekil 4.5'te verilmiştir. Grafiğe göre, üç lif kombinasyonu içinde yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte deformasyon yapabilme yeteneğinin arttığı fakat yapılan çevrim sayısının azaldığı görülmüştür. Gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulduktan sonra, H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 serilerinden elde edilen çevrim sayısı, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları elde edilmiş ve Tablo 4.5'te verilmiştir. H1,5P0 numunelerinin sonuçları incelendiğinde, %75 yorulma yüklemesi oranında ortalama 6728 ± 2744 çevrim, ortalama $1,44 \pm 0,19$ birim şekil değiştirme ve ortalama $6 \pm 1,69$ çatlak sayısı kaydedilmiştir. %85 yorulma yüklemesi oranında 2920 ± 2779 ortalama çevrim yaptığı, $2,47 \pm 0,35$ ortalama birim şekil değiştirme ve $7 \pm 1,41$ ortalama çatlak sayısına ulaştığı görülmüştür. Yorulma yüklemesi %95'e artması ile birlikte ortalama 386 ± 85 çevrim sayısı, ortalama $2,62 \pm 0,36$ birim şekil değiştirme değerine ve $10 \pm 1,41$ ortalama çatlak sayısına ulaştığı görülmüştür. H0P1,5 adlı numunelere bakıldığında, %75 yorulma yüklemesi oranında ortalama 10412 ± 3321 çevrim, $1,19 \pm 0,38$ ortalama birim şekil değiştirme ve $4 \pm 0,47$ ortalama çatlak sayıları kaydedilmiştir. %85 yorulma yüklemesi oranında ortalama çevrim sayısı 593 ± 545 , ortalama birim şekil değiştirme $1,89 \pm 0,55$ ve ortalama çatlak sayısı ise $7 \pm 0,47$ olarak bulunmuştur. Yorulma yüklemesi oranının %95'e çıkması ile birlikte 260 ± 209 ortalama çevrim sayısına, $2,5 \pm 0,79$ ortalama birim şekil değiştirme değerine ve $11 \pm 1,69$ ortalama çatlak sayısına ulaşılmıştır. Bununla birlikte, %0,75 HTPP ve %0,75 PVA lif kullanılarak üretilen H0,75P0,75 adlı seriye bakıldığında, %75 yorulma yüklemesi oranında ortalama çevrim sayısı 2432 ± 1046 olarak kaydedilmiş ve $1,34 \pm 0,05$ ortalama birim şekil değiştirme değeri ile ortalama çatlak sayısı $4 \pm 0,47$ olarak tespit edilmiştir. %85 yorulma yüklemesi oranında ortalama 406 ± 209 adet çevrim, $2,19 \pm 0,5$ ortalama birim şekil değiştirme değeri ve ortalama $6 \pm 0,47$ adet çatlak görülmüştür. Yorulma yüklemesi %95 olan kompozitler incelendiğinde ise ortalama çevrim sayısı 45 ± 18 , ortalama birim şekil değiştirme değeri $2,35 \pm 0,1$ ve ortalama çatlak sayısı $10 \pm 0,81$ olarak bulunmuştur.



(a)



(b)



(c)

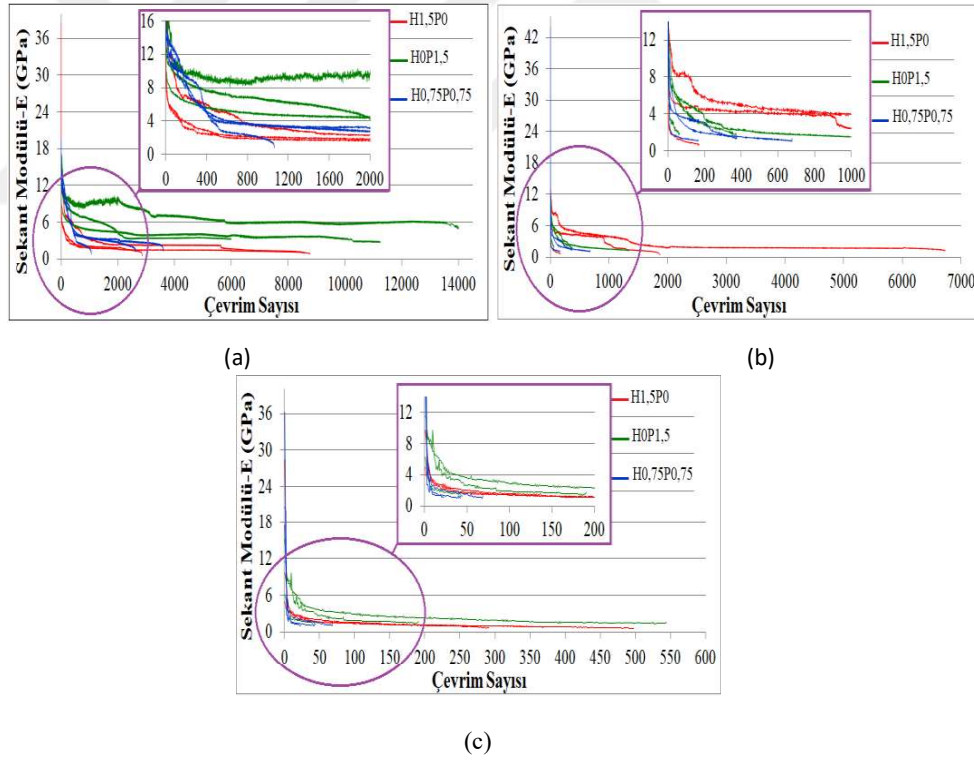
Şekil 4.5 a) H1,5P0, b) H0P1,5 ve c) H0,75P0,75 adlı serilerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışları

Tablo 4.5 H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 serilerinden elde edilen çevrim sayısı, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları tablosu

Numune Adı	Yorulma Yükleme Oranı	Çevrim Sayısı	Ortalama Çevrim Sayısı	Birim Şekil Değiştirme	Ortalama Birim Şekil Değiştirme	Ortalama Çatlak Sayısı
	(%)	Adet	Adet $\pm$ Std. sapma	(%)	(%)	Adet $\pm$ Std. sapma
H1,5P0	%75-1	8571	6728 $\pm$ 2744	1,62	1,44 $\pm$ 0,19	6 $\pm$ 1,69
	%75-2	2849		1,53		
	%75-3	8765		1,18		
	%85-1	6726	2920 $\pm$ 2779	2,03	2,47 $\pm$ 0,35	7 $\pm$ 1,41
	%85-2	1867		2,51		
	%85-3	169		2,88		
	%95-1	291	386 $\pm$ 85	2,12	2,62 $\pm$ 0,36	10 $\pm$ 1,41
	%95-2	498		2,98		
	%95-3	369		2,77		
H0P1,5	%75-1	11247	10412 $\pm$ 3321	1,58	1,19 $\pm$ 0,38	4 $\pm$ 0,47
	%75-2	13998		0,68		
	%75-3	5991		1,31		
	%85-1	1343	593 $\pm$ 545	2,64	1,89 $\pm$ 0,55	7 $\pm$ 0,47
	%85-2	63		1,31		
	%85-3	373		1,72		
	%95-1	544	260 $\pm$ 209	2,94	2,5 $\pm$ 0,79	11 $\pm$ 1,69
	%95-2	45		1,39		
	%95-3	191		3,18		
H0,75P0,75	%75-1	2630	2432 $\pm$ 1046	1,28	1,34 $\pm$ 0,05	4 $\pm$ 0,47
	%75-2	3602		1,36		
	%75-3	1064		1,39		
	%85-1	166	406 $\pm$ 209	2,12	2,19 $\pm$ 0,5	6 $\pm$ 0,47
	%85-2	375		1,62		
	%85-3	677		2,84		
	%95-1	43	45 $\pm$ 18	2,5	2,35 $\pm$ 0,1	10 $\pm$ 0,81
	%95-2	69		2,3		
	%95-3	23		2,25		

Yorulma deneyleri sonunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme verileri kullanılarak üç lif kombinasyonu için %75, %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranlarında ilk çevrimden yorulma göçmesi yaşanan çevrime kadar olan süreçte, %1,5

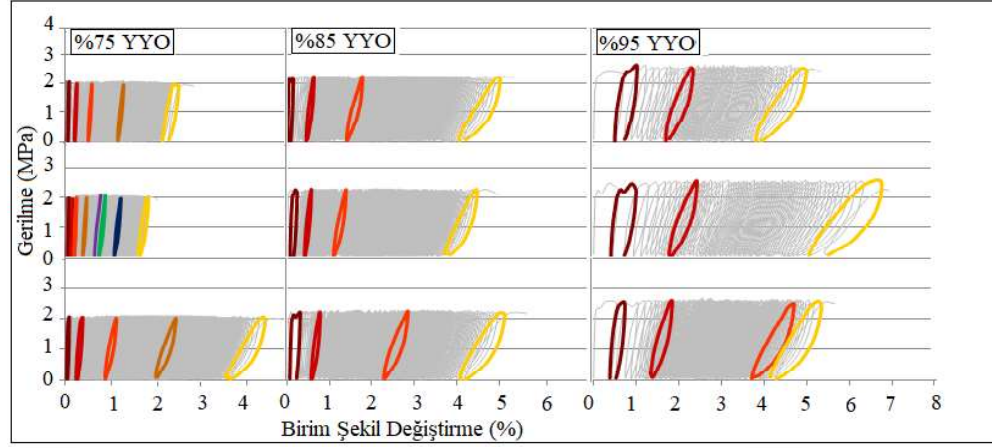
lif kullanılarak üretilen kompozitlerin her bir çevrimi için sekant modülleri bulunarak rijitlikleri hesaplanmıştır. H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 numunelerinin rijitlikleri %75 yorulma yüklemesi için Şekil 4.6.a, %85 yorulma yüklemesi oranı için Şekil 4.6.b, %95 yorulma yüklemesi oranı için Şekil 4.6.c'de gösterilmiştir. %75 yorulma yüklemesi oranında ilk çevrimden sonra oluşan en yüksek sekant modülü değeri H1,5P0 numunelerde görülmesine rağmen, yorulma göçmesi yaşandığı andaki son çevrimin sekant modüllerinde H0P1,5 numunelerinde daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranında da H0,75P0,75 numunelerinin ilk çevrim sekant modülü değerleri diğer iki lif kombinasyonuna kıyasla daha yüksek olsa da, yorulma göçmesi yaşandığı çevrimlerin sekant modülü değeri en yüksek H0P1,5 numuneleri olduğu görülmektedir.



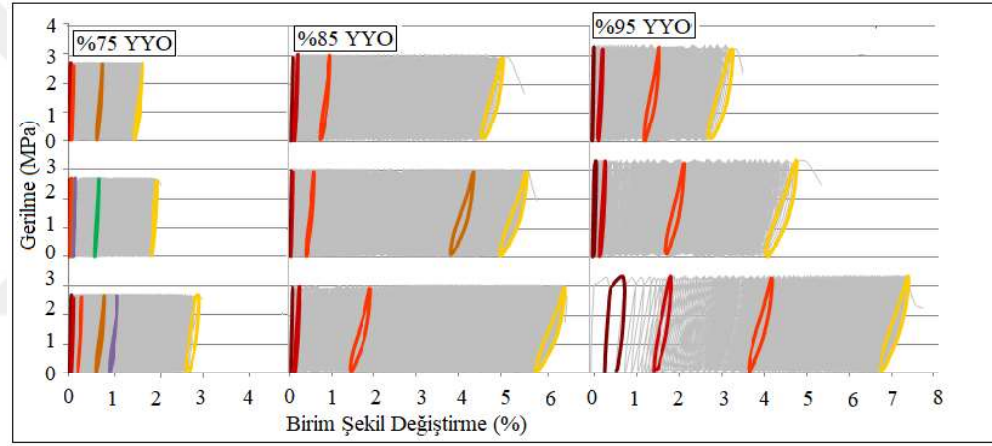
Şekil 4.6 H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 numunelerinin sekant modülü-çevrim sayısı grafikleri a) %75 yorulma yüklemesi uygulanan numuneler b) %85 yorulma yüklemesi uygulanan numuneler c) %95 yorulma yüklemesi uygulanan numuneler

4.2.2 %2 Lif Kullanılarak Üretilen Kompozitlerin Yorulma Testi Sonuçları

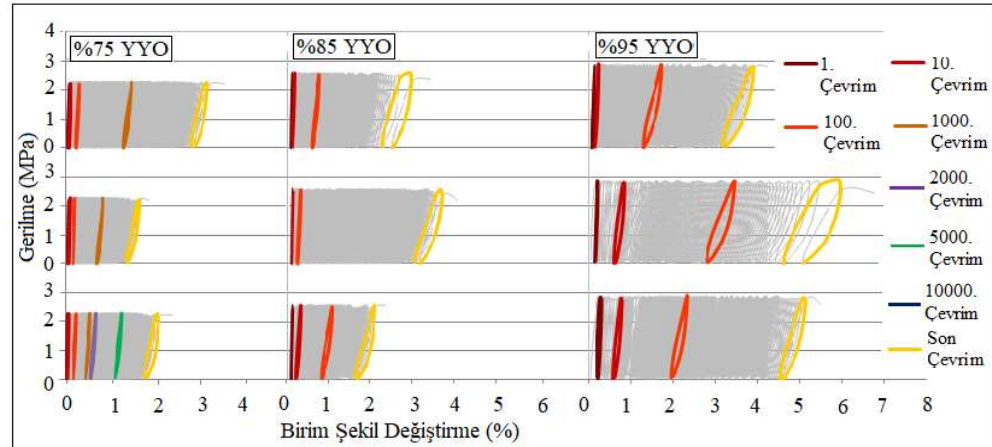
Hacimce %2 lif kullanılarak üretilen H2P0, H0P2 ve H1P1 adlı serilerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışları Şekil 4.7’de verilmiştir. Grafiğe göre, üç lif kombinasyonu içinde yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte deformasyon yapabilme yeteneğinin arttığı fakat yapılan çevrim sayısının azaldığı görülmüştür. Gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulduktan sonra, H2P0, H0P2 ve H1P1 serilerinden elde edilen çevrim sayısı, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları elde edilmiş ve Tablo 4.6’da verilmiştir. H2P0 numunelerinin yorulma performansı irdelendiğinde, %75 yorulma yüklemesi oranında ortalama 5106 ± 4966 çevrim, ortalama $2,88 \pm 1,27$ birim şekil değiştirme ve ortalama $10 \pm 3,55$ çatlak yaptığı görülmüştür. Yorulma yüklemesi oranının %85’e arttırılması ile birlikte ortalama 358 ± 109 çevrim, ortalama $4,81 \pm 0,25$ birim şekil değiştirme ve ortalama çatlak sayısının $18 \pm 2,10$ olduğu tespit edilmiştir. %95 yorulma yüklemesi oranı ile yapılan deneylerde ise 83 ± 24 ortalama çevrim sayısına, $5,61 \pm 0,80$ ortalama birim şekil değiştirme değerine ve $27 \pm 2,16$ ortalama çatlak sayısına ulaşılmıştır. H0P2 numunelerinin yorulma performansı irdelendiğinde ise, %75 yorulma yüklemesi oranında ortalama 3609 ± 2009 çevrim, ortalama $2,07 \pm 0,45$ birim şekil değiştirme ve ortalama $9 \pm 1,69$ çatlak yaptığı görülmüştür. Yorulma yüklemesinin artması ile birlikte %85 yorulma yüklemesi oranında, ortalama 913 ± 182 çevrim, $5,64 \pm 0,52$ ortalama birim şekil değiştirme ve ortalama $15 \pm 2,49$ çatlak sayısı kaydedilmiştir. Yorulma yükleme oranı %95 olan kompozitlerin ise ortalama çevrim sayısı 309 ± 65 , ortalama birim şekil değiştirme $5,29 \pm 1,75$ ve ortalama çatlak sayısı $18 \pm 3,39$ olarak bulunmuştur. Bununla birlikte %1 HTPP ve %1 PVA lif ikamesi ile üretilen H1P1 adlı numunelerin %75 yorulma yüklemesi oranında ortalama 2715 ± 1924 çevrim sayısına, ortalama $1,86 \pm 0,57$ birim şekil değiştirme değerine ve ortalama $5 \pm 2,62$ çatlak sayısına ulaştığı görülmüştür. %85 yorulma yükleme oranında 375 ± 224 çevrim, $2,6 \pm 0,61$ ortalama birim şekil değiştirme ve $8 \pm 1,69$ adet ortalama çatlak yaptığı tespit edilmiştir. Yorulma yüklemesi %95 olan kompozitlerin ise ortalama çevrim sayısı 205 ± 53 , ortalama birim şekil değiştirme değeri $4,65 \pm 0,81$ ve ortalama çevrim sayısı $13 \pm 3,09$ ’tür.



(a)



(b)



(c)

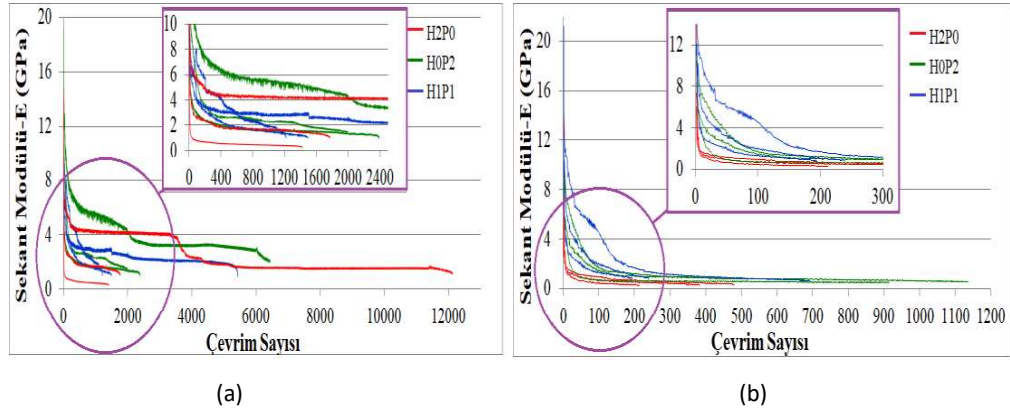
Şekil 4.7 H2P0, H0P2 ve H1P1 adlı serilerin farklı yorulma yüklemesi oranlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme davranışları

Tablo 4.6 H2P0, H0P2 ve H1P1 serilerinden elde edilen çevrim sayısı, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları tablosu

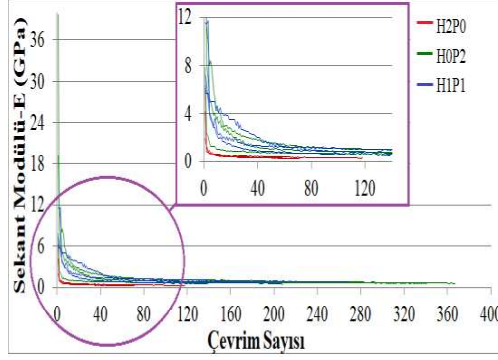
Numune Adı	Yorulma Yükleme Oranı	Çevrim Sayısı	Ortalama Çevrim Sayısı	Birim Şekil Değiştirme	Ortalama Birim Şekil Değiştirme	Ortalama Çatlak Sayısı
	(%)	Adet	Adet $\pm$ Std. sapma	(%)	(%)	Adet
H2P0	%75-1	1422	5106 $\pm$ 4966	4,64	2,88 $\pm$ 1,27	10 $\pm$ 3,55
	%75-2	12126		1,67		
	%75-3	1771		2,34		
	%85-1	213	358 $\pm$ 109	4,98	4,81 $\pm$ 0,25	18 $\pm$ 2,10
	%85-2	479		4,45		
	%85-3	383		5		
	%95-1	118	83 $\pm$ 24	5,26	5,61 $\pm$ 0,80	27 $\pm$ 2,16
	%95-2	71		6,73		
	%95-3	61		4,86		
H0P2	%75-1	2387	3609 $\pm$ 2009	2,69	2,07 $\pm$ 0,45	9 $\pm$ 1,69
	%75-2	6441		1,87		
	%75-3	1998		1,65		
	%85-1	915	913 $\pm$ 182	6,32	5,64 $\pm$ 0,52	15 $\pm$ 2,49
	%85-2	1137		5,55		
	%85-3	689		5,05		
	%95-1	343	309 $\pm$ 65	7,62	5,29 $\pm$ 1,75	18 $\pm$ 3,39
	%95-2	367		4,88		
	%95-3	218		3,39		
H1P1	%75-1	5431	2715 $\pm$ 1924	1,54	1,86 $\pm$ 0,57	5 $\pm$ 2,62
	%75-2	1219		1,38		
	%75-3	1496		2,67		
	%85-1	195	375 $\pm$ 224	1,86	2,6 $\pm$ 0,61	8 $\pm$ 1,69
	%85-2	692		3,37		
	%85-3	240		2,57		
	%95-1	269	205 $\pm$ 53	4,88	4,65 $\pm$ 0,81	13 $\pm$ 3,09
	%95-2	139		5,53		
	%95-3	208		3,56		

Yorulma deneyleri sonunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme verileri kullanılarak üç lif kombinasyonu için %75, %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranlarında ilk çevrimden yorulma göçmesi yaşanan çevrime kadar olan süreçte, %2

lif kullanılarak üretilen kompozitlerin her bir çevrimi için sekant modülleri bulunarak rijitlikleri hesaplanmıştır. H2P0, H0P2 ve H1P1 adlı serilerin rijitlikleri %75 yorulma yüklemesi için Şekil 4.8.a, %85 yorulma yüklemesi oranı için Şekil 4.8.b, %95 yorulma yüklemesi oranı için Şekil 4.8.c'de gösterilmiştir. Buna göre yorulma yükleme oranı artarken numunelerin ilk çevrimlerde verdiği tepki sonucunda sekant modüllerinde bir artış görülmektedir. Fakat çevrim sayısının ilerlemesi ile birlikte kompozitlerin çatlak sayısı ve deformasyonunun artması ile birlikte rijitlik değerlerinde de azalmalar gözlemlenmektedir. Bu sebeple %75 yorulma yüklemesi uygulanan numunelerin başlangıç sekant modülü değerleri ortalama 10-15 GPa civarında değişirken, yorulma göçmesi yaşandığı andaki değerlerinin yaklaşık 0,8-1,5 GPa arasında olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise yorulma yüklemesi oranının az olması ile lifli kompozitlerin çoklu çatlak yapabilme yeteneğini tetikleyememesi ve az çatlak yapan ama daha gevrek davranmasıdır. Yorulma yükleme oranı arttıkça numunelerin çok daha fazla çatlak yaparak daha fazla deformasyona uğradığı ve buna bağlı olarak yorulma göçmesi yaşanırken sekant modülü değerlerinin 0,2-0,7 GPa mertebelerinde değiştiği görülmüştür. Lifler kombinasyonun sekant modülü değerlerine etkisi incelendiğinde ise, her üç yorulma yüklemesi içinde en az sekant modüle sahip lifin H2P0 olduğu, daha yüksek değerlere sahip H0P2 ve H1P1 numunelerinin benzer sekant modülü değerlerine sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.8 H2P0, H0P2 ve H1P1 numunelerinin sekant modülü-çevrim sayısı grafikleri a) %75 yorulma yüklemesi uygulanan numuneler b) %85 yorulma yüklemesi uygulanan numuneler c) %95 yorulma yüklemesi uygulanan numuneler

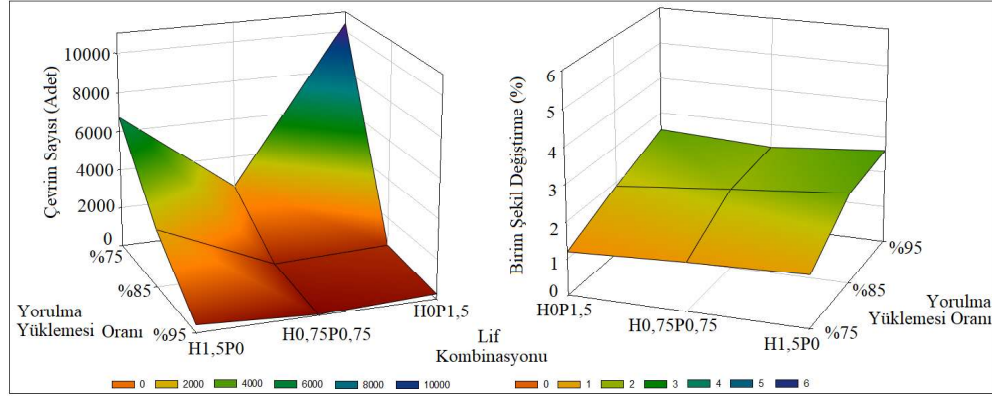


(c)

Şekil 4.8 devamı

4.2.3 Çekme Gerilmesi Kontrollü Yorulma Deneyleri Genel Değerlendirmesi

Hacimce %1,5 lifkullanılarak üretilen H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 adlı serilerin lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve çevrim sayıları ilişkisi Şekil 4.9.a'da, lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi ve birim şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 4.9.b'de özetlenmiştir. Grafiklere bakıldığı zaman, %75 yorulma yüklemesi oranında elde edilen çevrim sayılarında H0P1,5 numunelerin en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Yorulma yüklemesi oranının %85 ve %95 seviyelerine çıkması ile birlikte en yüksek çevrim sayısına H1,5P0 numunelerin ulaştığı, hemen ardından sırasıyla H0P1,5 ve H0,75P0,75 numunelerinin geldiği görülmektedir. Bununla birlikte birim şekil değiştirmeleri incelendiğinde ise, üç farklı yorulma yüklemesi oranında da en yüksek birim şekil değiştirme değerlerinin H1,5P0 numunelerinde olduğu görülmektedir. H0P1,5 ve H0,75P0,75 numunelerinin H1,5P0 numunelerine kıyasla daha az birim şekil değiştirme yaptığı kaydedilmiştir.



(a)

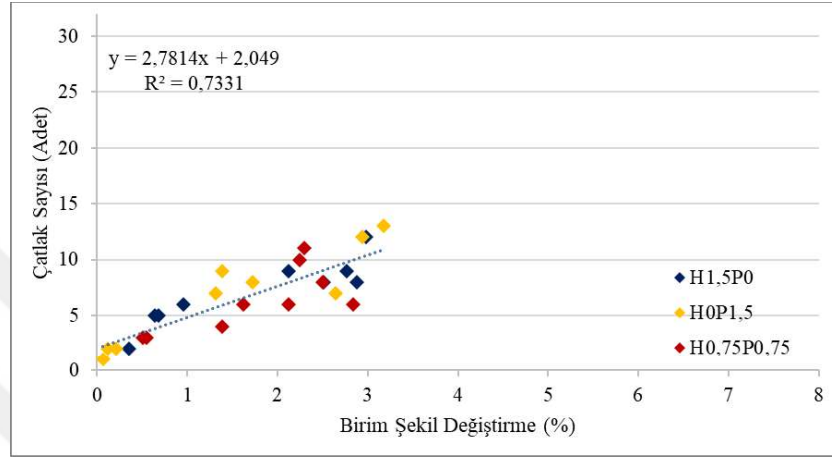
(b)

Şekil 4.9 H0,75P0,75-H0P1,5-H1,5P0 numunelerinin a) Lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve çevrim sayıları ilişkisi, b) Lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve birim şekil değiştirme ilişkisi

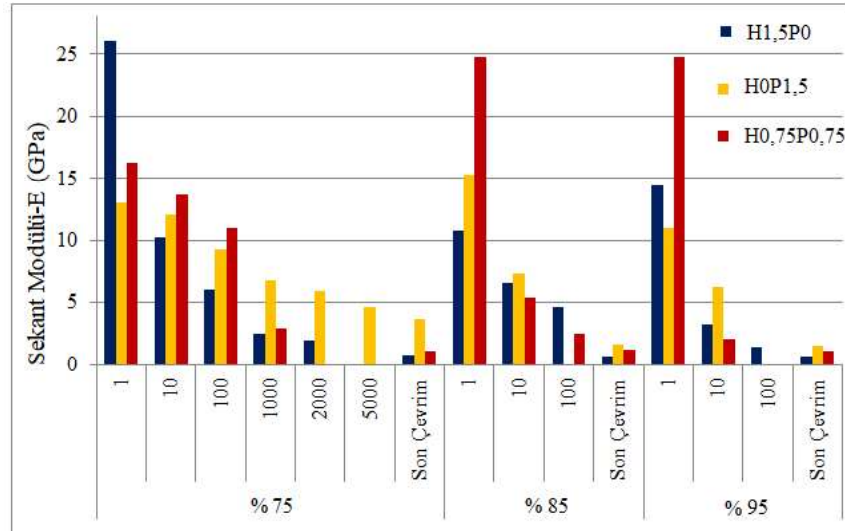
Bununla birlikte H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 adlı numunelerin birim şekil değiştirme değeri-çatlak sayısı ilişkisi grafiği ise Şekil 4.10'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları arasında korelasyon katsayısı $R=0,85$ olarak elde edilmiştir. Buna göre, kompozitin çatlama yeteneği ile deformasyon yeteneği arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.9'da gösterildiği üzere %75 yorulma yüklemesi oranında en yüksek birim şekil değiştirme değerine ve çatlak sayısına ulaşan serinin H1,5P0, %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranlarında ise H0P1,5 olduğu görülmüştür. Bununla birlikte en az birim şekil değiştirme yapan serilerin ise en az çatlak yaptığı tespit edilmiştir.

Yorulma deneyleri sonunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme verileri kullanılarak elde edilen sekant modülü değerleri seçilerek 1., 10., 100., 1000., 2000., 5000., 10000. ve yapabildiği son çevrimin sekant modülü değerleri Şekil 4.11'de verilmiştir. H1,5P0, H0P1,5 ve H0,75P0,75 adlı numunelerin grafiği incelendiğinde, %75 yorulma yüklemesi altında yüksek rijitlik değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni, yorulma yüklemesi sırasında saniye başına daha düşük gerilmeye maruz kalması ve buna bağlı olarak daha düşük bir dinamik etki oluşması olduğu söylenebilir. Yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte rijitlik değerlerinde azalmalar görülmektedir. H0P1,5 numunelerinin %75 yorulma yüklemesi oranı altında yüksek çevrim sayılarına ulaşmasına rağmen rijitliğini koruduğu

görülmektedir. Yorulma yükleme oranının artması ile birlikte, ilk çevrimden sonra oluşan yüksek sekant modülü değerlerinin çevrim yapılmaya devam edildikçe hızla azaldığı ve benzer değerlerde göçmenin yaşandığı görülmektedir.



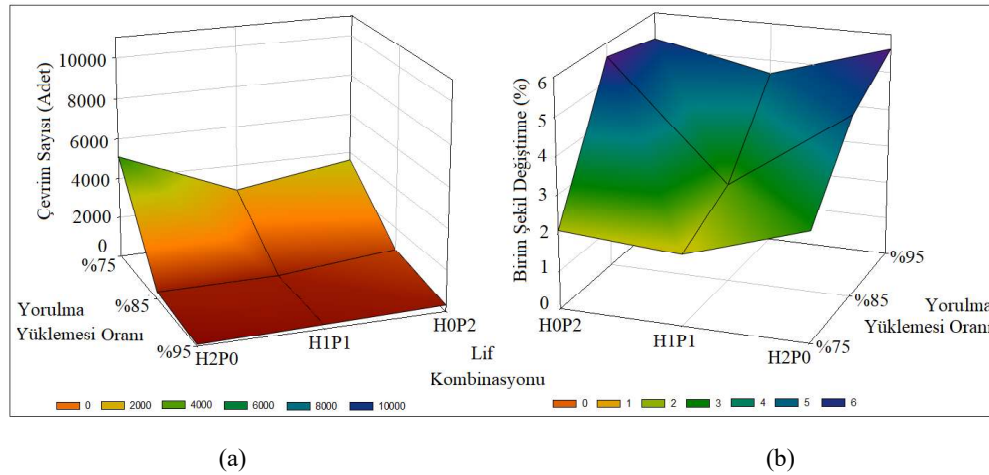
Şekil 4.10 Lif dozajı %1,5 olan H1,5P0-H0P1,5H0,75P0,75 numunelerinin birim şekil değiştirme-çatlak sayısı grafiği



Şekil 4.11 Lif dozajı %1,5 olan H0,75P0,75-H0P1,5-H1,5P0 numunelerinin sekant modülleri değerleri

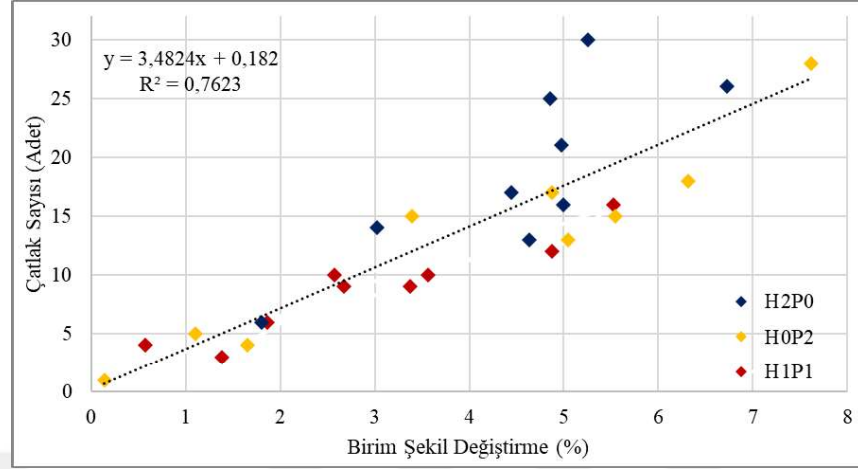
Hacimce %2 lif kullanılarak üretilen H1P1, H0P2 ve H2P0 kompozitlerin lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve çevrim sayıları ilişkisi Şekil 4.12.a'da, lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi ve birim şekil değiştirme ilişkisi ise Şekil 4.12.b'de

özet olarak verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %75 yorulma yüklemesi oranında en yüksek çevrim sayısına H2P0 numunelerinin ulaştığı görülmektedir. Yükleme oranının artması ile birlikte %85 ve %95 yorulma yüklemesi oranlarında üç lif kombinasyonu içinden en yüksek çevrimlere H0P2 numunelerinin ulaştığı görülmektedir. Bununla birlikte birim şekil değiştirmeleri incelendiğinde ise, %75 yorulma yüklemesi oranında en yüksek birim şekil değiştirme değerlerine H2P0 numunelerinin, %85 yorulma yüklemesi oranında H0P2 numunelerinin ve %95 yorulma yüklemesi oranında ise yine en yüksek değerlere H2P0 numunelerinin ulaştığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise HTPP liflerin hidrofob yapısı ve uzama kapasitesinin yüksek olması nedeniyle, yorulma yüklemesi altında göçmeler zamanla lifin sünmesi ve sıyrılması olduğu düşünülmektedir. Bu davranış kompozitlerin yüksek birim şekil değiştirme değerlerine ulaşmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte PVA lifler hidrofil bir yapıda, daha düşük bir uzama kapasitesine ve yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Bu nedenle PVA lifli kompozitlerin yorulma yüklemesi altındaki göçmeleri liflerin kopması ile gerçekleşir ve genellikle daha yüksek gerilmelerde daha düşük birim şekil değiştirme değerlerine ulaşır. Bu üç lif kombinasyonu arasından H1P1 numunelerinin üç farklı yükleme oranında da en düşük birim şekil değiştirme değerlerinde kaldığı görülmektedir.



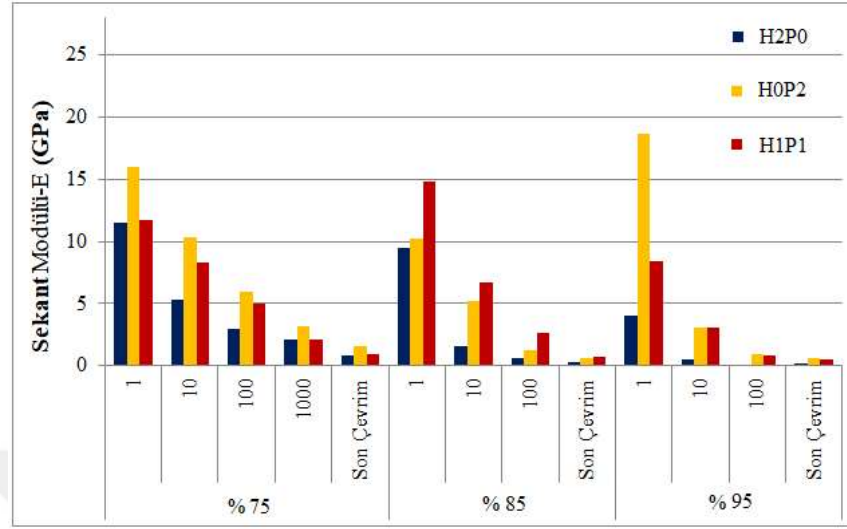
Şekil 4.12 H1P1-H0P2-H2P0 numunelerinin a) Lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve çevrim sayıları ilişkisi, b) Lif kombinasyonu-yorulma yüklemesi oranı ve birim şekil değiştirme ilişkisi

Bununla birlikte H1P1, H0P2 ve H2P0 adlı numunelerin birim şekil değiştirme değeri-çatlak sayısı ilişkisi grafiği ise Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları arasındaki korelasyon katsayısı $R=0,87$ olarak elde edilmiştir. Birim şekil değiştirme ve çatlak sayısı değerlerine bakıldığında, %75 ve %95 yorulma yüklemesi oranlarında H2P0 serisinin, %85 yorulma yüklemesi oranında ise H0P2 serisinin en yüksek değerlere ulaştığı, H1P1 serisinin ise 3 yorulma yüklemesi oranında da en düşük değerlerde kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, %1,5 lif dozajına sahip kompozitlere benzer olarak çatlama yeteneği ile deformasyon yeteneği arasında doğrusal bir ilişki olduğu, ortalama çatlak sayısının yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte arttığı, bu olayın ortalama birim şekil değiştirme değerlerini de arttırdığı anlaşılmaktadır. Bunun esas sebebinin %95 gibi yüksek bir yorulma yüklemesi oranı kullanılan deneylerde polimerik lifli kompozitlerin çoklu çatlak yapabilme mekanizmasının daha çok tetiklendiği ve buna bağlı olarak yükü matrsten ziyade liflerin taşımasından dolayı yüksek birim şekil değiştirme değerlerine çıktığı görülmektedir. Ancak yorulma yüklemesi oranının azalması ile birlikte bu yeteneğini kaybettiği, az sayıda çatlak ve birim şekil değiştirme değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu olayın mekanizmasının, ilk başlarda oluşan çatlaklardaki liflerin zamana bağlı olarak sıyrılması ve bir çatlakta kararlı çatlağın Griffith tipi çatlağa dönüşerek genişlemesi olduğu düşünülmektedir (Gödek, 2016). Bununla birlikte yorulma yüklemesi altında liflerin mevcudiyeti ile numunelerin deformasyon yeteneği arasında bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 4.10 ve 4.13'te görüldüğü üzere lif dozajının %1,5'tan %2'ye arttırılması ile birlikte hem çatlak yapabilme hem de deformasyon yeteneğinde artış olduğu görülmüştür.



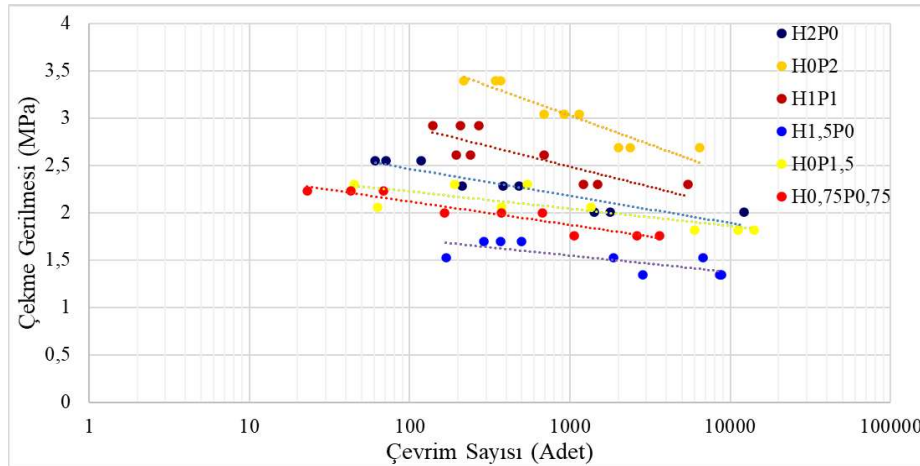
Şekil 4.13 Lif dozajı %2 olan H2P0-H0P2-H1P1 numunelerinin birim şekil değiştirme-çatlak sayısı grafiği

Yorulma deneyleri sonunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme verileri kullanılarak elde edilen sekant modülü değerleri seçilerek 1., 10., 100., 1000., 2000., 5000., 10000. ve yapabildiği son çevrimin sekant modülü değerleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. H1P1, H0P2 ve H2P0 adlı numunelerin grafiğine bakıldığı zaman, yorulma yüklemesi oranının %75'ten %95'e çıkması ile birlikte sekant modülü değerlerinde ciddi azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin ise göreceli olarak yüksek orandaki dinamik yükleme sonucu erkenden oluşan mikro çatlaklar olduğu düşünülmektedir. Çoklu çatlak mekanizmasını tetiklemesi ile kısa bir süre içinde mikro çatlak sayısında meydana gelen hızlı artış, numunelerde yüksek plastik deformasyona neden olmuştur. Bu durum ilk çevrim haricinde sekant modülü değerlerinin diğer serilere kıyasla daha düşük değerlerde kalmasına yol açmıştır.



Şekil 4.14 Lif dozajı %1,5 olan H1P1,75-H0P2-H2P0 numunelerinin sekant modülleri değerleri

Yapılan tüm yorulma deneylerin sonucunda bütün kompozitlerden elde edilen veriler ile gerilme-çevrim sayısı (S-N) grafiği çizdirilmiştir (Şekil 4.15). Lif kombinasyonu ve lif içeriğine göre üretilen bu kompozitlerin %75, 85 ve 95 yorulma yüklemeleri değerleri kullanılarak logaritmik denklemleri oluşturulmuştur. Bu denklemler Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Buna göre, kompozitlerin 3 farklı yorulma yüklemesi oranından elde edilerek tahmini yorulma ömrü denklemleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu denklemler kullanılarak, bu kompozitlerin diğer yorulma yüklemesi oranlarında da yapacağı çevrim sayıları tahmin edilebilecektir.



Şekil 4.15 Tüm kompozitlerden elde edilen veriler ile çizdirilen gerilme-çevrim sayısı eğrisi (S-N)

Tablo 4.7 Tüm numunelerden elde edilen tahmini yorulma ömrü denklemleri tablosu

Numune İsmi	Denklem
H1,5P0	$y = -0,077\ln(x) + 2,0766$
H2P0	$y = -0,125\ln(x) + 3,0383$
H0P1,5	$y = -0,079\ln(x) + 2,5896$
H0P2	$y = -0,268\ln(x) + 4,8768$
H0,75P0,75	$y = -0,107\ln(x) + 2,6130$
H1P1	$y = -0,185\ln(x) + 3,7627$

4.2.4 Lifli Kompozitlerin Yorulma Performansını Olumsuz Etkileyen Durumlar

Metaller gibi üretim aşamasında homojen bir şekilde dökümleri yapılabilen ve üretim kaynaklı hata paylarının düşük olduğu malzemelerin yorulma performanslarının ve yorulma ömürlerinin tahmin etmek, beton veya lifli kompozitlere kıyasla çok daha kolaydır. Özellikle beton ve lifli kompozitlerin iç yapısındaki heterojenlik ve üretimden kaynaklı hataların/boşlukların yerlerinin tespit edilememesi, yorulma yüklemesi sırasında ilk çatlakların kolayca oluşmasına neden olur ve yorulma ömrünü olumsuz etkilemektedir (Şekil 4.16). Bu hataların/boşlukların sonucunda yorulma deneylerinde farklı sonuçlar ve yüksek standart sapma değerleri görülebilmektedir.



Şekil 4.16 Lifli kompozitlerin üretim kaynaklı oluşabilecek hatalı/boşluklu yapısı (Kişisel arşiv, 2019)

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tek eksenli statik çekme deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde:

1. Lif kullanılmadan üretilen kompozitlerin, özellikle çekme dayanımlarının çok düşük değerlerde kalmasının, matrisin içinde ince ve iri agrega bulunmamasından kaynaklı rötreler ve buna bağlı olarak erkenden oluşan mikro-çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Kompozitlerin çekme dayanımları incelendiğinde, her iki lif dozajı için PVA lifli kompozitlerin en yüksek, HTPP lifli kompozitlerin ise en düşük çekme dayanımına sahip oldukları görülmüştür. Bununla birlikte yarı yarıya hem HTPP hem de PVA lif kullanılarak üretilen kompozitlerin çekme dayanımlarının ise HTPP ve PVA lifli kompozitlerin arasında bir değerde kaldığı bulunmuştur. Bu sonuçlar ışığında, PVA lifin HTPP life kıyasla kompozitlerin çekme dayanımı performansını arttırmada çok daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.
3. Aynı kompozitlerin birim şekil değiştirme değerlerine bakıldığında ise, her iki lif dozajında da HTPP lifli kompozitlerin en yüksek birim şekil değiştirme değerlerinde olduğu görülmüştür. %1,5 lifli kompozitlerde yarı yarıya hem HTPP hem de PVA lif kullanılarak üretilen kompozitlerin, %2 lifli kompozitlerde ise PVA lifli kompozitlerin en düşük birim şekil değiştirme değerlerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Böylece HTPP lif kullanımının kompozitlerin deformasyon yeteneğini arttırmada PVA liflere kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür.
4. Üç farklı lif kombinasyonunda da geçerli olmak üzere, lif dozajının %1,5'tan %2'ye çıkması ile birlikte çekme dayanımlarında artış tespit edilmiştir. Bununla birlikte kompozitlerin çoklu çatlak yapabilme yeteneğinin artması ve buna bağlı olarak hem çatlak sayısında hem de birim şekil değiştirme değerlerindeki artışlarda en kesit alanda bulunan lif miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çekme gerilmesi kontrollü yorulma deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde:

1. Tüm seriler içinde en yüksek çevrim sayılarına %1,5 lif dozajında HTPP lifli H1,5P0 serisi, %2 lif dozajında PVA lifli H0P2 serisinin ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte tüm lif dozajlarında HTPP lifli serilerin (H1,5P0 ve H2P0) en yüksek birim şekil değiştirme değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ise kullanılan liflerin farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Yarı yarıya hem HTPP hem de PVA lif kullanılarak üretilen kompozitlerin yorulma performansları incelendiğinde ise, her iki lif dozajı içinde genel olarak en düşük çevrim sayısına ve en düşük birim şekil değiştirme değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu kompozitlerin oluşturulmasındaki amaç, HTPP lifin yüksek uzama kapasitesi ve PVA lifin yüksek çekme dayanımının harmanlandığı yüksek yorulma performansına sahip bir kompozit elde etmektir. Fakat elde edilen sonuçlara bakıldığında bu iki lifin birbiri ile uyumu beklenenden kötü olduğu görülmüştür. Bu kombinasyonu oluşturmak için hem HTPP hem de PVA lifin dozajının yarıya düşmesi, liflerin en güçlü olduğu özelliklerinde azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir.
3. Tüm seriler içinde, uygulanan yorulma yüklemesi oranının %75'ten %95'e doğru artması ile birlikte polimerik lifli kompozitlerin çoklu çatlak yapabilme mekanizmasının daha çok tetiklendiği ve buna bağlı olarak yükü matristen ziyade liflerin taşımasından dolayı yüksek birim şekil değiştirme değerlerine çıktığı görülmektedir. Ancak düşük yorulma yüklemesi oranında bu yeteneğini kaybettiği, az sayıda çatlak ve birim şekil değiştirme değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu olayın mekanizmasının, uygulanan gerilmenin matrisin çoklu çatlak yapabilmesi için gereken eşik gerilmeyi aşamaması ile birlikte ilk başlarda oluşan çatlaklardaki liflerin zamana bağlı olarak sünmesi ve sıyrılarak bir çatlakta kararlı çatlağın Griffith tipi çatlağa dönüşerek genişlemesi olduğu düşünülmektedir.
4. Kompozitlerin çatlak yapabilme ile deformasyon yapabilme yeteneği arasındaki ilişki irdelendiğinde, %1,5 lif dozajına sahip numunelerin, birim şekil değiştirme ve çatlak sayıları arasındaki korelasyon katsayısı $R=0,85$ olarak elde edilmiştir. %2 lif dozajına sahip numunelerin ise, birim şekil değiştirme ve

çatlak sayıları arasında korelasyon katsayısı $R=0,87$ olarak elde edilmiştir. Buna göre, kompozitin çatlama yeteneği ile deformasyon yeteneği arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

5. Yorulma yüklemesi altında lif dozajının %1,5'tan %2'ye çıkması en kesit alanda bulunan lif miktarının artmasına, buna bağlı olarak hem çatlak yapabilme hem de deformasyon yeteneğinde artışa neden olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak kompozitlerde liflerin mevcudiyetinin artması ile deformasyon yeteneğinin artması arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu tespit edilmiştir
6. Kompozitlerin sekant modülü değerleri incelendiğinde, %1,5 lif dozajına sahip numunelerin %75 yorulma yüklemesi altında yüksek sekant modülü değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Bunun en önemli nedeni, yorulma yüklemesi sırasında saniye başına daha düşük gerilmeye maruz kalması ve buna bağlı olarak daha düşük bir dinamik etki oluşması olduğu söylenebilir. Yorulma yüklemesi oranının artması ile birlikte rijitlik değerlerinde azalmalar görülmektedir. H0P1,5 numunelerinin %75 yorulma yüklemesi oranı altında yüksek çevrim sayılarına ulaşmasına rağmen rijitliğini koruduğu görülmektedir. Yorulma yükleme oranının artması ile birlikte, ilk çevrimden sonra oluşan yüksek sekant modülü değerlerinin çevrim yapılmaya devam edildikçe hızla azaldığı ve benzer değerlerde göçmenin yaşandığı görülmektedir. Bununla birlikte %2 lif dozajına sahip numunelerde, yorulma yüklemesi oranının %75'ten %95'e çıkması ile birlikte ciddi azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin ise göreceli olarak yüksek orandaki dinamik yükleme sonucu erkenden oluşan mikro çatlaklar olduğu düşünülmektedir. Çoklu çatlak mekanizmasını tetiklemesi ile kısa bir süre içinde mikro çatlak sayısında meydana gelen hızlı artış numunelerde yüksek plastik deformasyona neden olmuştur. Bu durum ilk çevrim haricinde sekant modülü değerlerinin diğer serilere kıyasla daha düşük değerlerde kalmasına yol açmıştır.
7. Bir yapının sahada karşılaştacağı şartlar düşünüldüğünde en yüksek çekme dayanımına ve bu dayanımda yapabileceği en yüksek çevrim sayısı malzemenin yorulma dayanıklılığını simgeler. Şekil 4.15'te verilen S-N grafiğinde görüldüğü üzere; H0P2 kompozitleri en iyi yorulma performansına sahip

olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra bu tez kapsamında 3 farklı yorulma yüklemesi oranındaki veriler kullanılarak tahmini yorulma ömrü denklemleri oluşturulmuştur. Bu sebeple çok daha sık ve düşük yorulma yüklemesi oranlarında daha fazla testler yapılarak bu denklemin deneysel sonuçlar ile desteklenmesi tavsiye edilmektedir.



KAYNAKLAR

- Acar, E. (2002). *Thermo mechanical fatigue analysis*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Afroughsabet, V., Biolzi, L., ve Ozbakkaloglu, T. (2016). High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*, 51(14), 6517-6551.
- Alam BA. (2016). *Fatigue performance of engineered cementitious composites*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Aldanmaz, B. A. (2018). Karma lifli betonların tek eksenli çekme altında çatlak yapısının incelenmesi. *Teknik Dergi*, 31(1), 9773-9787.
- Aydöner, T. (2002). *Çelik tel takviyeli betonların mekanik davranışı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aykan, M., ve Celik, M. (2009). Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 897-907.
- Baradan B. (2011). *İnşaat Mühendisleri İçin Malzeme Bilgisi* (5. Baskı). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Berozashvili, M. (2001). Continuous reinforcing fibers are being offered for construction, civil engineering and other composites applications. *Advance Materials Composites News, Compos Worldwide*, 6, 5-6.
- Bullard, S. G., Gromek, B. J., Fout, M. ve Fout, R. (2012). *The Silver Bridge Disaster of 1967*. Charleston, South Carolina: Arcadia Publishing.

- Chang, D. I., ve Chai, W. K. (1995). Flexural fracture and fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 156(1-2), 201-207.
- Cooper, J. D. (2001). *Hoan Bridge investigation*. 8 Mart 2020, <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel/010710.cfm>.
- Cowles, B. A. (1996). High cycle fatigue in aircraft gas turbines—an industry perspective. *International Journal of Fracture*, 80(2-3), 147-163.
- Çökelek, M. (2001). *Islah çeliklerinde, ısıtım işlem parametrelerinin yorulma limitine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Damasceno, I. I. R., de Pina Ferreira, M., ve de Oliveira, D. R. C. (2014). RC beams with steel fibers under impact loads. *Acta Scientiarum. Technology*, 36(1), 23-31.
- Demirci, A. H. (2004). *Malzeme bilgisi ve malzeme muayenesi: Seçilmiş temel kavramlar ve endüstriyel uygulamalar*. İstanbul: ALFA Yayın.
- Felekoglu, B., Tosun-Felekoglu, K., Ranade, R., Zhang, Q., ve Li, V. C. (2014). Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC. *Composites Part B: Engineering*, 60, 359-370.
- Felekoğlu, B., Tosun-Felekoğlu, K., Keskinates, M., ve Gödek, E. (2016). A comparative study on the compatibility of PVA and HTPP fibers with various cementitious matrices under flexural loads. *Construction and Building Materials*, 121, 423-428.
- 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), 104-111.

- Fleck, C., ve Eifler, D. (2010). Corrosion, fatigue and corrosion fatigue behaviour of metal implant materials, especially titanium alloys. *International Journal of Fatigue*, 32(6), 929-935.
- Forgeron, DP. (2005). *The combined effects of flexural fatigue cycles and freezing and thawing cycles on the flexural properties of plain and fiber reinforced concrete*. Doktora Tezi, Dalhousie University, Nova Scotia.
- Gao, L., ve Hsu, C. T. T. (1998). Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. *Materials Journal*, 95(5), 575-581.
- Gödek E. (2016). *Pratikte kullanılabilir polimerik lif katkı ve çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Haghani, R., Al-Emrani, M., ve Heshmati, M. (2012). Fatigue-prone details in steel bridges. *Buildings*, 2(4), 456-476.
- Horii, H., Shin, H. C., ve Pallewatta, T. M. (1992). Mechanism of fatigue crack growth in concrete. *Cement and concrete composites*, 14(2), 83-89.
- Hordijk, D. A., ve Reinhardt, H. W. (1993). Numerical and experimental investigation into the fatigue behavior of plain concrete. *Experimental Mechanics*, 33(4), 278-285.
- Huang, B. T. (2018). *Fatigue performance of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composite and its functionally-graded structures*. Doktora Tezi, Zhejiang University, Hangzhou.
- Hsu, T. T. (1981). Fatigue of plain concrete. *In Journal Proceedings*, 78(4), 292-305.
- Hsu, T. T. (1984). Fatigue and microcracking of concrete. *Matériaux et Construction*, 17(1), 51-54.

- Ikai, S., Reichert, J. R., Rodrigues, A. V., ve Zampieri, V. A. (2010). Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. *Construction and Building Materials*, 24(2), 171-180.
- Isojeh, B., El-Zeghayar, M., ve Vecchio, F. J. (2017). Fatigue behavior of steel fiber concrete in direct tension. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 04017130.
- Japan Society Of Civil Engineers (JSCE). (2008). Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). *Concrete Engineering Series*, 1-88.
- Jansen, D. C., ve Shah, S. P. (1997). Effect of length on compressive strain softening of concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(1), 25-35.
- Jin, Q., ve Li, V. C. (2019). Development of lightweight engineered cementitious composite for durability enhancement of tall concrete wind towers. *Cement and Concrete Composites*, 96, 87-94.
- Kesner, K. E., Billington, S. L., ve Douglas, K. S. (2003). Cyclic response of highly ductile fiber-reinforced cement-based composites. *Materials Journal*, 100(5), 381-390.
- Khlef, F. L., Barbosa, A. R. ve Ideker, J. H. (2019). Tension and cyclic Behavior of high-performance fiber-reinforced cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), 04019220.
- Kim, S. G., Park, J. K., ve Kim, D. J. (2018). Direct tensile responses of aramid fiber reinforced cementitious composites and textile reinforced cementitious composites with 3D spacer fabric at high strain rates. *Construction and Building Materials*, 168, 232-243.

- Kolluru, S. V., O'Neil, E. F., Popovics, J. S., ve Shah, S. P. (2000). Crack propagation in flexural fatigue of concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(9), 891-898.
- Kunieda, M., ve Rokugo, K. (2006). Recent progress on HPFRCC in Japan. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 19-33.
- Lee, M. K., ve Barr, B. I. G. (2004). An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 299-305.
- Lee, Y. L., Pan, J., Hathaway, R., ve Barkey, M. (2005). *Fatigue testing and analysis: theory and practice* (Vol. 13). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- 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. (1993). From micromechanics to structural engineering: The design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48
- 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., Wang, S. ve Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 98(6), 483-492.
- Lott, J. L., ve Kesler, C. E. (1964). *Crack propagation in plain concrete* (648). Urbana: University of Illinois.

- Malek, A., Scott, A., Pampanin, S., MacRae, G., ve Marx, S. (2018). Residual Capacity and Permeability-Based Damage Assessment of Concrete under Low-Cycle Fatigue. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 04018081.
- Matsumoto, T., Wangsiripaisai, K., Hayashikawa, T., ve He, X. (2010). Uniaxial tension-compression fatigue behavior and fiber bridging degradation of strain hardening fiber reinforced cementitious composites. *International Journal of Fatigue*, 32(11), 1812-1822.
- Mechtcherine, V., ve Jun, P. (2007). Stress-strain behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) under repeated tensile loading. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 1441-1448.
- Milesi, M. (2009). *Impact des caractéristiques microstructurales des pièces forgées sur leur tenue en fatigue à grand nombre de cycles: Modélisation multi-échelles et validation expérimentale*. Doktora Tezi, Mines Paris-Technology University, Paris.
- Morris, A. D., ve Garrett, G. G. (1981). A comparative study of the static and fatigue behaviour of plain and steel fibre reinforced mortar in compression and direct tension. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(2), 73-91.
- Müller, S., ve Mechtcherine, V. (2017). Fatigue behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC). *Cement and Concrete Research*, 92, 75-83.
- Nagabhushanam, M., Ramakrishnan, V., ve Vondran, G. (1989). Fatigue strength of fibrillated polypropylene fiber reinforced concretes. *Transportation Research Record*, 1226, 36-47.
- Oh, B. H. (1986). Fatigue analysis of plain concrete in flexure. *Journal of Structural Engineering*, 112(2), 273-288.

Okumuş V. (2011). *Çelik-betonarme kompozit köprü kirişlerinde yorulma davranışının deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Özmen, D. (2007). *Yarı otomatik av tüfeği mekanizmasının yorulma dayanımının analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Paul, S. K. (2019). A critical review of experimental aspects in ratcheting fatigue: microstructure to specimen to component. *Journal of Materials Research and Technology*.

Paranjape, A. S. (2007). *The flexural fatigue performance of high volume synthetic fiber reinforced concrete*. Yüksek Lisans Tezi, Dalhousie University, Nova Scotia.

Parant, E., Rossi, P., ve Boulay, C. (2007). Fatigue behavior of a multi-scale cement composite. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 264-269.

Parvez, A., ve Foster, S. J. (2015). Fatigue behavior of steel-fiber-reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*, 141(4), 04014117.

Persson, A., Hogmark, S., ve Bergström, J. (2005). Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels. *Surface and Coatings Technology*, 191(2-3), 216-227.

Roberts, C.C. (b,t). *Minneapolis şehrinde I-35W köprüsünün yorulma kaynaklı göçmesi*. 1 Mart 2020, <http://www.croberts.com/minneapolis-bridge-collapse.htm>.

Qiu, J. ve Yang, E. H. (2017). Micromechanics-based investigation of fatigue deterioration of engineered cementitious composite (ECC). *Cement and Concrete Research*, 95, 65-74.

- Ramakrishnan, V., Oberling, G., ve Tatnal, P. (1987). Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete. *Special Publication*, 105, 225-246.
- Sachs, N. W. (2005). Understanding the surface features of fatigue fractures: how they describe the failure cause and the failure history. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 5(2), 11-15.
- Sherir, M. A., Hossain, K., ve Lachemi, M. (2015). Structural performance of polymer fiber reinforced engineered cementitious composites subjected to static and fatigue flexural loading. *Polymers*, 7(7), 1299-1330.
- Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design (No:9)*. New York: Tata McGraw-Hill Education.
- Spera, D. A. (1976). What is thermal fatigue?. In *Thermal Fatigue of Materials and Components*. ASTM International, 3-9.
- Smith, R. (1990). The versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue (Retroactive coverage). *Fatigue 90*, 2033-2041.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O., (2000). *Metal Fatigue in Engineering. Second Edition*. New York: A Wiley-Interscience Publication.
- Stere, M. ve Baran, D. (2011). Calculation of hybrid joints used in modern aerospace structures. *Incas Bulletin*, 3 (4), 161-169.
- Sui, L., Zhong, Q., Yu, K., Xing, F., Li, P., ve Zhou, Y. (2018). Flexural fatigue properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) reinforced by polymer fibers. *Polymers*, 10(8), 892
- Suryawanshi, C. S., ve Engineer, F. C. (2010). Fatigue in concrete concerns security and stability of flyovers. *Infra Constuction ve Equipment Magazine*, 1 Mart

2020, <https://www.nbmcw.com/tech-articles/concrete/18265-fatigue-in-concrete-concerns-security-and-stability-of-flyovers.html>.

Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., ve Kanda, T. (2004). Multiple cracking and fiber bridging characteristics of engineered cementitious composites under fatigue flexure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(5), 433-443.

Şahmaran, M., ve Li, V. C. (2009). Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033–1043.

Şahmaran, M., ve Li, V. C. (2016). Suppressing Alkali-Silica Expansion. *Concrete International*, 38(5), 47-52.

Uğurlu, A. (1994). Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Özellikleri ve Su Yapılarında Kullanılması. *DSİ Teknik Bülteni*, 80, 17.

Wang, S., ve Li, V. C. (2006). High-early-strength engineered cementitious composites. *Materials Journal*, 103(2), 97-105.

Weimann, M. B., ve Li, V. C. (2003). Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC)/Vergleich der hygrischen Eigenschaften von ECC mit Beton. *Restoration of Buildings and Monuments*, 9(5), 513-534.

Wong, C.M., (2004). *Use of short fibers in structural concrete to enhance mechanical properties*. Research Project, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Queensland.

Woo, S. (2017). Reliability disasters and its Assessment Significance. In *Reliability Design of Mechanical Systems* (7-34). Cham: Springer.

Wöhler, A. (1871). Tests to determine the forces acting on railway carriage axles and the capacity of resistance of the axles. *Engineering*, 11(199), 1858-1870.

Yıldırım T. (2018). *Dijital görüntü korelasyonu tekniğinin yapı malzemelerinin yük altında şekil değişiminin ölçümünde kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

