

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER – MODİFİYE ÇİMENTO ESASLI
HİBRİT LİFLİ HAFİF KOMPOZİT
GELİŞTİRİLMESİ



Ceren DUYAL

Ağustos, 2020

İZMİR

POLİMER – MODİFİYE ÇİMENTO ESASLI HİBRİT LİFLİ HAFİF KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,

Yapı Malzemesi Programı

Ceren DUYAL

Ağustos, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CEREN DUYAL, tarafından **PROF. DR. KAMİLE TOSUN FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan “**POLİMER - MODİFİYE ÇİMENTO ESASLI HİBRİT LİFLİ HAFİF KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU

Yönetici

Doç.Dr. Hüseyin YİĞİTER

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca bana yol gösteren, lisans yıllarımdan bu yana başarıları ile ilham vererek yapı malzemeleri üzerine çalışmaya yönelmemde büyük katkısı bulunan, desteğini her zaman hissettiğim çok kıymetli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Kamile Tosun Felekoğlu'na,

Bilgisi, tecrübesi ve kıymetli yorumları ile tezimde büyük katkısı bulunan, beni her zaman daha çok çalışmaya teşvik eden değerli hocam Prof. Dr. Burak Felekoğlu'na,

Tez çalışmalarımın başından sonuna kadar desteğini hissettiğim, her sorumu özveri ile yanıtlarak hiçbir yardımı esirgemeyen, fikir ve önerileri ile bana yol gösteren Öğr. Gör. Eren Gödek'e,

Çalışmalarım boyunca bana gösterdiği anlayış ve desteği için Yaşar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Oğuz Özgür Eğilmez'e,

Uzun laboratuvar çalışmalarım boyunca büyük bir özveri ile bana yardımcı olan Doğaner Kulak'a, destek ve yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Mert Tatarca'ya, bilgisayar ve yazılım bilgisi ile karşılaştığım sorunlara çözüm üreten Görkem Tanır'a, pozitif bakış açısı ile motivasyonumu destekleyen Yunus Seyrek'e, hep yanımda olan kuzenim Nihal Ceylan'a,

Tüm yaşamım boyunca bana destek olan kıymetli ailem; abim Aydın Duyal, babam Ali Duyal ve ellerimi hiçbir zaman bırakmayan canım annem Feriha Duyal'a

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ceren DUYAL

POLİMER – MODİFİYE ÇİMENTO ESASLI HİBRİT LİFLİ HAFİF KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Beton gevrek bir malzemedir, düşük yükler altında lineer elastik bir davranış gösterir. Yük arttırıldığında ise, yalın beton ilk çatlaktan itibaren taşıma gücünü kaybeder. “Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Çimento Esaslı Lifli Kompozit (Engineered Cementitious Composites - ECC)” bünyesinde barındırdığı mikron boyutlu lifler sayesinde, çekme yükleri altında çoklu çatlak davranışı gösterebilen, enerji yutma kapasitesi yalın betona kıyasla yüksek olan yeni nesil bir yapı malzemesidir. Bu tezde, iki farklı lif ve bunların hibrit kullanımı ile tasarlanmış ECC’lerin karışım suyu farklı oranlarda (%12,5; %25) polimer emülsiyonu ile ikame edilmiştir. Kullanılan lifler “Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen (HTPP)” ve “Polivinil Alkol (PVA)”dır. Kompozit, bu liflerin hacimce %2; %1,5-%0,5 ve %1-%1 oranlarında kullanılması ile hazırlanmıştır. Kompozitte yapılan değişikliklerin çatlak gelişimi üzerine etkilerini gözlemleyebilmek için Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation - DIC) yönteminden faydalanılmıştır.

Kullanılan polimer emülsiyonu “Stiren Akrilik Kauçuk (SAR)” kökenlidir. Polimer modifikasyonu, polimerin hava sürükleyici etkisi dolayısıyla hafif kompozit üretimini desteklemiş ve oluşturduğu film sayesinde ise çekme dayanımında %28 artış sağlamıştır. Ancak polimer modifiye ECC’lerin çoklu çatlak oluşturma kapasitelerinde polimer yüzdesine bağlı olarak belli orana kadar artış ve daha yüksek oranlarda azalış gözlenmiştir. ECC bünyesinde oluşan polimer filminin belirli bir yoğunluktan sonra, matrisin çatlamaya karşı direncini arttırarak çoklu çatlak gelişimini engellediği tespit edilmiştir. ECC’nin kırılma tokluğunu arttırmak amacıyla matrise hacimce %3 oranında granüle cam tozu eklenerek kompozitin çoklu çatlak davranışı desteklenmiş ve çatlak sayısında ortalama %20’lik artış elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: ECC, polimer modifikasyonu, lifli kompozit, hibrit lif, çoklu çatlak davranışı, dijital görüntü korelasyonu

DEVELOPMENT OF POLYMER-MODIFIED CEMENT-BASED HYBRID FIBER REINFORCED LIGHTWEIGHT COMPOSITE

ABSTRACT

Concrete is a brittle material, it shows a linear elastic behavior under low loads. When the load is increased, plain concrete loses its bearing capacity from the first crack. "Engineered Cementitious Composites (ECC)", is a new generation building material that can exhibit multiple crack behavior under tensile loads and has higher energy absorption capacity than plain concrete thanks to the micron size fibers it contains. In this thesis, the mixing water of ECC was replaced with different amounts of polymer emulsion (12.5%, 25%). ECC's were designed with the use of two different fibers and their hybrids. The fibers that used are " High Tenacity Polypropylene Fiber - HTPP" and "Polyvinyl Alcohol (PVA)". The composite contains total 2% by volume of these fibers; It is prepared by using 2%, 1.5% - 0.5% and 1%-1%. Digital Image Correlation (DIC) method was used to observe the effects of changes made in composites on crack development.

The polymer emulsion used is of "Styrene Acrylic Rubber (SAR)" origin. The polymer modification supported the lightweight composite production due to the air entraining effect of the polymer, and thanks to the film it formed, it achieved a 28% increase in tensile strength. However, depending on the polymer percentage, a certain increase in the crack-forming capacities of the polymer-modified ECCs and a reduction in higher rates were observed. It has been determined that the polymer film formed in ECC prevents the development of multiple cracks by increasing the resistance of the matrix to cracking after a certain density. To increase the fracture toughness of ECC, 3% by volume granulated glass powder was added to the matrix and the multiple crack behavior of the composite was supported, which increased the average number of cracks by 20%.

Keywords: ECC, polymer modification, fiber composite, hybrid fiber, multiple crack behavior, digital image correlation

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

1.1 Hafif Beton.....	3
1.1.1 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları	6
1.1.2 Hafif Beton Üretim Yöntemleri	7
1.2 Polimer Modifiye Harç ve Betonlar	8
1.2.1 Polimerik Lateksler	9
1.2.1.1 Lateks Modifikasyonunun Mekanizması	11
1.2.1.2 Hava Boşluklarının Oluşumu ve Stabilizasyonu	14
1.2.2 Yeniden Dağılıbilir Polimer Tozları.....	16
1.2.3 Suda Çözünebilir Polimerler	16
1.2.4 Sıvı Polimerler	16
1.3 Lifli Kompozitlerde Polimer Modifikasyonu	16

BÖLÜM İKİ - MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ GELİŞTİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER 18

2.1. ECC Tasarımında Kullanılan Polimerik Lifler	20
--	----

2.1.1 Polietilen Lifler (PE).....	20
2.1.2 Polivinil Alkol Lifler (PVA).....	21
2.1.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP)	22
2.2 ECC Tasarımının Temel Prensipleri	23
2.3 ECC'nin Çeşitli Kullanım Amaçlarına Yönelik Özelleştirilmesi	27
2.3.1 Hibrit Lifli ECC	27
2.3.2 Hafif ECC	28
2.3.3 Polimer Modifiye ECC.....	31
BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
3.1 Kullanılan Malzemeler	37
3.1.1 Çimento	37
3.1.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	37
3.1.3 Granüle Cam Tozu	38
3.1.4 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif (HTPP)	39
3.1.5 Polivinil Alkol Lif (PVA).....	39
3.1.6 Polimer Lateks Emülsiyonu.....	40
3.1.7 Süperakışkanlaştırıcı Katkı.....	41
3.2 Kompozitlerin Üretimi ve Karışım Oranları.....	41
3.2.1 Numunelerin Deneye Hazırlanması	45
3.3 Tek Eksenli Çekme Deneyi.....	46
3.4 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi.....	49
BÖLÜM DÖRT - DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	55
4.1 Kompozit Ağırlıklarının Değerlendirilmesi.....	55

4.2 Kompozitlerin Gerilme – Birim Şekil Değiştirme Değerlerinin İncelenmesi .59	
4.2.1 Polimer Modifikasyonu Yapılmamış Yalın Kompozitler 59	
4.2.2 Polimer Modifikasyonu Yapılmamış Camlı Kompozitler 60	
4.2.3 Polimer Modifiye Yalın Kompozitler 62	
4.1.4 Polimer Modifiye Camlı Kompozitler 64	
4.2 Kompozitlerin Tokluk Kapasitelerinin Değerlendirilmesi 68	
4.2 Kompozitlerin Çatlak Davranışlarının Değerlendirilmesi 69	
4.2.1 İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi 71	
4.2.2 Çatlak Sayılarının Değerlendirilmesi 72	
4.2.3 Çatlak Açıklıklarının Değerlendirilmesi 73	
BÖLÜM BEŞ - İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRMELER.....75	
5.1 Çekme Dayanımlarının İstatistiksel Değerlendirmesi 75	
5.2 Birim Şekil Değiştirme Kapasitelerinin İstatistiksel Değerlendirmesi.....76	
5.3 Tokluk Kapasitelerinin İstatistiksel Değerlendirmesi 78	
BÖLÜM ALTI - SONUÇ VE ÖNERİLER 79	
6.1 Sonuçlar 79	
6.2 Öneriler 81	
KAYNAKLAR.....82	
EKLER.....90	
EK-A: Hazırlanan Örneklerin Tek Eksenli Çekme Yükleme Altındaki Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri 90	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çekme gerilmesi altında yalın beton, lifli beton ve ECC'nin davranışı	3
Şekil 1.3 a) Sertleşmiş çimento hamurunda çatlak ilerleyişi b) Klasik betonda çatlak ilerleyişi c) Taşıyıcı hafif betonda çatlak ilerleyişi	5
Şekil 1.4 Çimento esaslı sistemlerin modifikasyonunda kullanılan polimerler	9
Şekil 1.5 Polimer lateks türleri	11
Şekil 1.6 Lateks modifikasyonunun mekanizması	12
Şekil 1.7 Lateks modifikasyonunun kimyasal mekanizması a) Lateks polimeri ile hidrasyon ürünlerinin bağ oluşturması b) Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan yapının üç boyutlu gösterimi.....	13
Şekil 1.8 Polimer modifiye betonda a) Sürüklenmiş hava baloncuğu ve b) Stabilize haldeki hava baloncuğunun yüzeyinde oluşan polimer filmleri.....	14
Şekil 1.9 Sürfaktanların temel kimyasal doğası	15
Şekil 1.10 Sürfaktan moleküllerinin hava - su arayüzündeki dağılımı	15
Şekil 2.1 Çekme ve eğilme yüklemeleri altında ECC'nin oluşturduğu kararlı çatlaklar ve gösterdiği deformasyon a) Doğrudan çekme yüklemesi b) Eğilme yüklemesi	18
Şekil 2.3 Polivinil Alkol (PVA) liflerin kimyasal yapısı	21
Şekil 2.4 Polipropilen (PP) liflerin kimyasal yapısı	22
Şekil 2.5 ECC'nin tipik çekme -birim şekil değiştirme grafiği ile ortalama çatlak açıklıkları	25
Şekil 2.6 ECC'deki tek bir çatlakta gelişen tipik σ - δ ilişkisi.....	26
Şekil 2.7 Hafifletilmiş ECC'deki tipik gerilme - birim şekil değiştirme grafiği ile ortalama çatlak açıklıkları.....	30
Şekil 2.8 ECClerin lif-matris arafazı a) Lateks ile modifiye ECC b) Yalın ECC	32
Şekil 2.9 Matris kusur modifikasyonunun olasılık - yoğunluk şeması (Cmc: Kritik kusur boyutu) a)ECC'deki doğal kusurların boyut dağılımı ve karşılık gelen çekme davranışı b) Yapay kusurların boyut dağılımı ve buna karşılık gelen doygun çoklu çatlama ile çekme davranışı	34
Şekil 3.1 Sistematik deneysel akış şeması	35

Şekil 3.2 a)Granüle cam tozu b)Granüle cam tozunun optik mikroskoptaki görünümü	38
Şekil 3.3 Hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi	42
Şekil 3.4 Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan kompozitler	42
Şekil 3.5 a) Hobart mikser b) Karışımın hazırlanması	43
Şekil 3.6 a) Kemik biçimli tek eksenli çekme kalıpları b) Kalıp ölçüleri.....	45
Şekil 3.7 Numunelerin yüzey hazırlığı a) Yüzeyin beyaza boyanması b) Siyah spre y boya ile benekleme	46
Şekil 3.8 Tek eksenli çekme deney düzeneği a) SHIMADZU çekme cihazı b) Numune ve LVDT'lerin düzenekteki yerleşimi.....	47
Şekil 3.9. DIC analizi için kullanılan kamera ve lens	48
Şekil 3.10 Dijital görüntü korelasyonu ve tek eksenli çekme deneyi düzeneği	48
Şekil 3.11 VIC-2D yazılımı ile DIC analizi a) Görüntü üzerindeki sanal LVDT'ler b) Deforme olmuş numune üzerinde çatlakların görünümü.....	49
Şekil 3.12 ECC'nin ilk çatlak dayanımı, çekme dayanımı, birim şekil değiştirme kapasitesi ve tokluk kapasitesinin belirlenmesi.....	50
Şekil 3.13 DIC yöntemi ile çatlak takibi a) Analiz bölgesi ve çatlakların numune üzerindeki görünümü b) Analiz bölgesindeki lokal deformasyonlar c) Tek bir çatlağın lokal deformasyon grafiğindeki görünümü d) Tespit edilen çatlakların analiz görüntüsü	51
Şekil 3.14 H0/P2 - 12,5 - C serisine ait numunenin LVDT ve DIC deformasyon değerlerinin kıyaslanması	52
Şekil 3.15 H0/P2 – 12,5 - C numunesinin çatlak analizi a) Numunenin deformasyon haritası ve üzerine çizilmiş sanal LVDT b) Lokal deformasyon grafiği ve çatlak sayısının tespiti c) Çatlak genişliği histogramı	53
Şekil 4.1 Polimer modifikasyonu yapılmamış yalın ve camlı ECC'lerin 1000cm ³ 'teki hava kurusu ağırlıkları	56
Şekil 4.2 Karışım suyu %12,5 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş yalın ve camlı ECC'lerin 1000 cm ³ 'teki hava kurusu ağırlıkları	57
Şekil 4.3 Karışım suyu %25 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş yalın ve camlı ECC'lerin 1000 cm ³ 'teki hava kurusu ağırlıkları	58

Şekil 4.4 Polimer modifikasyonu yapılmamış ECC'lerin gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 b) H1,5/P0 c) H1/P1 d) H0/P2	60
Şekil 4.5 Polimer modifiye edilmemiş, granüle cam tozu içeren ECC'lerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - C b) H1,5/P0,5 - C c) H1/P1 - C d) H0/P2 – C	61
Şekil 4.6 Karışım suyu %12,5 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş yalın serilerin gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 -12,5 b) H1,5/P05 - 12,5 c) H1/P1 - 12,5 d) H0/P2 - 12,5.....	62
Şekil 4.7 Karışım suyu %25 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş yalın serilerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - 25 b) H1,5/P05 - 25 c) H1/P1 - 25 d) H0/P2 - 25.....	63
Şekil 4.8 Karışım suyu %12,5 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş, granüle cam tozu içeren serilerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - 12,5 - C b) H1,5/P05 - 12,5 - C c) H1/P1 - 12,5 - C d) H0/P2 - 12,5 – C.....	65
Şekil 4.9 Karışım suyu %25 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş, granüle cam tozu içeren serilerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - 25 - C b) H1,5/P05 - 25 - C c) H1/P1 - 25 - C d) H0/P2 - 25 - C	66
Şekil 4.10 Lif türü ve polimer modifikasyonunun yalın seriler üzerindeki etkisi a) Serilerin çekme dayanımları b) Serilerin maksimum gerilmeye karşılık gelen çekme birim şekil değiştirme kapasiteleri	67
Şekil 4.11 Lif türü ve polimer modifikasyonunun granüle cam tozu içeren seriler üzerindeki etkisi a) Serilerin çekme dayanımları b) Serilerin maksimum gerilmeye karşılık gelen çekme birim şekil değiştirme kapasiteleri.....	67
Şekil 4.12 Hazırlanan ECC'lerin tokluk kapasitelerinin lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdelerine göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdelerine göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi.....	68
Şekil 4.13 DIC yöntemi ile ECC'lerin çatlak takibi.....	70

Şekil 4.14 Kompozitlerin ilk çatlak dayanımları a) Granüle cam tozu içermeyen seriler	
b) Granüle cam tozu içeren seriler.....	71
Şekil 4.15 Hazırlanan ECC'lerin çatlak sayılarının lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Granüle cam tozu içermeyen seriler b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren seriler.....	72
Şekil 4.16 Hazırlanan ECC'lerin çatlak açıklıklarının lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Granüle cam tozu içermeyen seriler b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren seriler	73
Şekil 5.1 Hazırlanan ECC'lerin çekme dayanımlarının değişkenlik katsayılarının (DK) lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi.....	76
Şekil 5.2 Hazırlanan ECC'lerin birim şekil değiştirme kapasitelerinin değişkenlik katsayılarının (DK) lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi.....	77
Şekil 5.3 Hazırlanan ECC'lerin birim tokluk kapasitelerinin değişkenlik katsayılarının (DK) lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi.....	78

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile basınç dayanımları.....	37
Tablo 3.2 Granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	38
Tablo 3.3 a) Granüle cam tozunun kimyasal özellikleri b) Granüle cam tozunun fiziksel özellikleri	39
Tablo 3.4 HTPP liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri	39
Tablo 3.5 PVA liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	40
Tablo 3.6 Acronal S 400'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	40
Tablo 3.7 Süperakışkanlaştırıcı katkının (ADVA FLOW 375 N) özellikleri	41
Tablo 3.8 Hazırlanan kompozitlerin 1m ³ için karışım reçeteleri.....	44
Tablo 4.1 Kompozit ağırlıklarının polimer modifikasyonu ve granüle cam tozu ilavesi ile değişimi	55
Tablo 4.2 Hazırlanan ECC serilerinin çatlak analizi	69

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

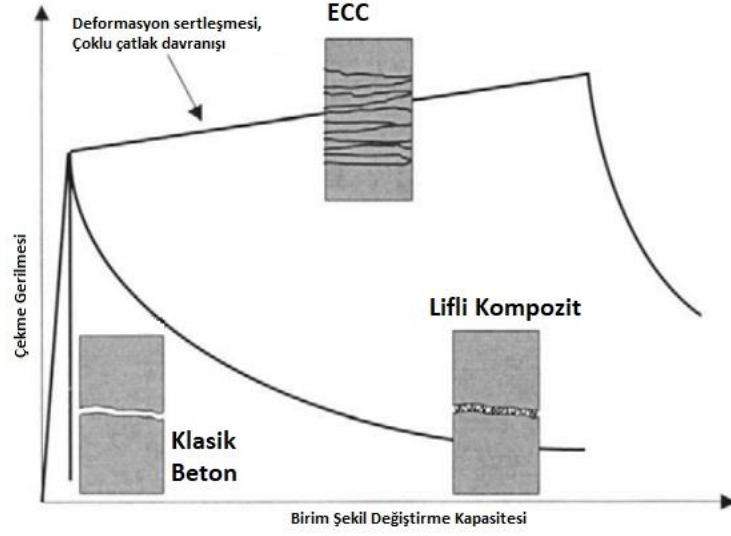
Beton, inşaat mühendisliği uygulamalarında kendisine en yaygın kullanım alanı bulan malzemedir. Agregası, su, çimento ve kullanım amacına göre, isteğe bağlı olarak seçilen çeşitli mineral veya kimyasal katkıları ile üretilir. Birim hacim ağırlığı ortalama 2400 kg/m^3 'tür. Ham maddelerinin ucuz ve kolay erişilebilir olması, istenilen formda yapı elemanlarının üretimine izin vermesi ve yüksek basınç dayanımına sahip olması onu diğer yapı malzemelerine kıyasla avantajlı kılmıştır. Betonun öne çıkan tasarım özelliği ise yüksek basınç dayanımıdır. Buna karşın beton yük altında olmasa dahi içerisinde boşluklar ve mikroçatlaklar barındırır, heterojendir, oldukça düşük çekme dayanımına sahiptir ve gevrek bir davranış gösterir (Akkaya ve diğer., 2003). Aynı zamanda yüksek birim hacim ağırlığı sebebiyle yalnız beton ile yapılan eğilme elemanları kendi kütlelerini dahi taşıyamamaktadır (Hüsem,1995).

Normal ağırlıktaki beton elemanların zati yükleri fazladır ve meydana getirdiği yapıya gelen yüklerin büyük bir kısmını oluşturur. Daha düşük yoğunluklu beton kullanımı yapıya gelen yükleri azaltacaktır. Bu amaçla beton içerisinde çeşitli boşluklar oluşturularak ya da daha düşük ağırlıklı agregalar kullanarak betonun birim hacim ağırlığı düşürülebilir. Bu yollardan herhangi biri ile üretilen ve birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 'ten düşük olan betonlar, hafif beton olarak adlandırılır (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012; TS EN 206-1). Uygulamada ise hafif betonların birim hacim ağırlığı genellikle $1600\text{-}1850 \text{ kg/m}^3$ arasında değişkenlik gösterir. Bu tür betonlar çoğunlukla yüksek dayanım/ağırlık oranı istenen çok katlı yapılar ya da geniş açıklıklı köprülerde tercih edilir. Normal ağırlıklı beton (2400 kg/m^3) yerine hafif betonun tercih edilmesi; ölü yüklerde azalma, kesit boyutlarının küçülmesi, ısı yalıtımının iyileşmesi, donatı tasarrufu, taşıma ve nakliye kolaylığı gibi avantajlar sağlar. Ancak hafif betonlar daha yüksek çimento içeriği ve daha zayıf agrega barındırması dolayısıyla, klasik betonlara göre daha kırılkan davranış gösterir. Hafif betonun gevrek yapısı, çatlamaya eğilimli ve daha az kalıcı olmasına yol açar. Bu durum yapısal kullanım alanlarını kısıtlamıştır (Huang ve diğer., 2013).

Beton düşük yükler altında lineer elastik davranış gösterir ancak yükleme devam ettikçe iç yapısındaki boşluklar ve mikroçatlaklar aktifleşerek kalıcı şekil değişikliği meydana getirir. Meydana gelen şekil değiştirmeler maksimum yük civarında kırılma düzleminde birikir ve çatlayarak ani göçmeye yol açar (Akkaya ve diğer., 2003). Yapısal elemanlarda betonun güvenle kullanılabilmesi için betondaki bu ani göçmenin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla yapılan en yaygın uygulama betonun makro/mikro boyutlu çeşitli malzemeler (Yapı çeliği, polimerik lifler, metalik lifler vb.) eklenerek donatılandırılmasıdır. (Krauthammer ve diğer., 1990; Baradan ve diğer., 2012). Böylelikle elde edilen kompozitin kırılma ve çatlak gelişimi aşamalarında yük taşımayı sürdürmesi sağlanmaktadır.

Betona, toplam hacminin belirli bir yüzdesiyle süreksiz liflerin eklenmesi sonucunda elde edilen kompozitlere lifli beton adı verilmiştir. Kullanılan lifler polimer, metal, cam gibi çok çeşitli kökenlere sahip olabilir. Lifli betonlarda çekme ve eğilme gerilmeleri altında meydana gelen ilk çatlağın ardından, kompozit içerisindeki lifler çatlak kesitinde bir köprüleme gerilmesi meydana getirerek ani yük kaybının önüne geçer. Ancak ilk çatlaktan sonra kompozitin yük taşıma kapasitesinde düşüş gerçekleşir ve çatlak genişliği zamanla açılır. Bu davranış deformasyon yumuşaması olarak adlandırılır (Fischer ve Li, 2002; Gödek, 2016).

Geleneksel çimento esaslı lifli kompozitlerin aksine çoklu çatlak davranışı gösterebilen; çekme eğilme ve kesme yüklemeleri altında yüksek düktilite ve tokluğa sahip olan Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Çimento Esaslı Lifli Kompozitler (Engineered Cementitious Composites - ECC), 1990'lı yıllarda Prof. Dr. Victor Li ve ekibi tarafından literatüre kazandırılmıştır (Li, 2012). Kompozitin yüksek düktilitesi çoklu çatlak davranışıyla sağlanır. Yük etkisinde gösterdiği bu çoklu çatlak davranışıyla normal ve geleneksel lifli betondan farklı olarak deformasyon sertleşmesi gösterir (Şekil 1.1) (Fischer ve Li, 2002). Bu davranış ise kompoziti oluşturan matris, lif ve aderans özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple son yıllarda farklı ECC matrisleri üzerine olduğu gibi, çeşitli lifler ve bu liflerin hibrit kullanımı ile üretilen ECC'lerin performanslarına yönelik çalışmalar da yapılmıştır (Zhang ve Zhang, 2018; Sridhar ve Prasad, 2019).



Şekil 1.1 Çekme gerilmesi altında yalın beton, lifli beton ve ECC'nin davranışı (Fischer ve Li, 2002)

Çekme gerilmeleri altında sahip olduğu yüksek süneklik, ECC'nin en önemli özelliğidir. ECC'nin bu sünekliği, çekme gerilmesi karşısında gösterdiği deformasyon sertleşmesi davranışından kaynaklanır. Deformasyon sertleşmesi davranışı ECC'nin çoklu mikro - çatlak oluşturma yoluyla gerçekleşir. Hacimce %2 Polivinil Alkol (PVA) lif içeren standart ECC'nin çekme birim şekil değiştirme kapasitesi %3 ile %5 arasındadır. Düşük genişlikli mikro - çatlaklar ve üstün deformasyon kapasitesi ECC'nin çeşitli mekanik ve çevresel etkiler altında klasik betona göre daha kalıcı olmasını sağlar (Huang ve diğer., 2013).

Bu tez kapsamında hafif beton olarak tasarlanmış ECC'lerin mekanik özellikleri incelenmiştir. ECC ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm İki'de sunulmaktadır.

1.1 Hafif Beton

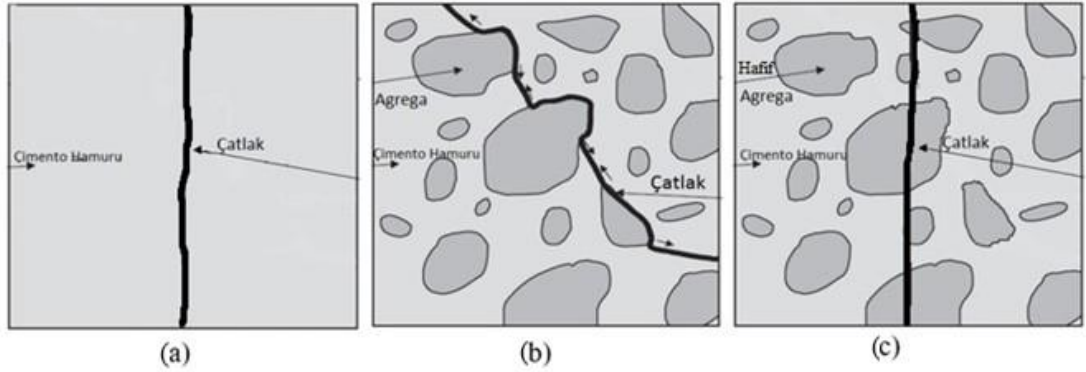
Beton içerisinde çeşitli yollarla boşluklar oluşturarak ya da birim hacim ağırlığı (b.h.a.) normal agregaya kıyasla daha düşük olan agregalar kullanarak üretilen, birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 'ten düşük olan betonlar hafif beton olarak adlandırılır (Baradan ve diğer., 2012). Hafif betonların üretimindeki öncelikli husus dayanım

özelliği değil, düşük birim hacim ağırlığıdır. Ancak yapısal eleman olarak kullanılabilen taşıyıcı hafif betonlar da mevcuttur. ACI 213R-03'e göre yapısal hafif betonlar, 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa'm üzerinde olan ve hava kurusu birim hacim ağırlığı 1120-1960 kg/m³ arasında olan betonlardır.

Yapılarda hafif beton kullanımı oldukça eskiye dayanır. Ayasofya, Pantheon Tapınağı ve Kolezyum gibi bazı tarihi anıt yapılarda hafif beton kullanılmıştır. İlk taşıyıcı hafif betonlar çoğunlukla volkanik kökenlere sahip olan doğal kaynaklardan elde edilen agregalarla üretilmiştir (Chandra ve Berntsson, 2002).

Normal ağırlıklı beton elemanlar ile meydana getirilen yapılarda, yapının toplam yükünün büyük bir kısmını beton elemanların kendisi oluşturur. Aynı yük taşıma kapasitesine sahip ve daha düşük yoğunluklu beton kullanımı yapının ölü yüklerini azaltmayı sağlar. Özellikle yüksek yapılarda, büyük ve geniş açıklıklara sahip yapılarda, yüzen beton elemanlarda betonun birim hacim ağırlığı çoğunlukla dayanımından daha önemli bir kriterdir (Huang ve diğer., 2013). Bunun yanı sıra yapısal hafif betonların çekme dayanımı/basınç dayanımı oranı normal betona göre düşüktür ve hafif beton yükler karşısında olukça gevrek bir davranış sergiler. Hafif betonun basınç yüklemesi altındaki gerilme birim şekil değiştirme grafiği göçme anında normal betona kıyasla çok daha dik bir düşüş gösterir (Gao, Sun ve Morino, 1997).

Taşıyıcı hafif betonların kırılma mekaniği klasik betona göre farklılık gösterir. Normal ağırlıklı betonda, yükleme ile birlikte iç yapıda meydana gelen mikro çatlakların ilerleyişi bir agrega - çimento hamuru arayüzeyinden bir diğer arayüze geçiş şeklinde olmaktadır (Erdoğan, 2003). Taşıyıcı hafif betonlarda ise betonun içerisindeki hafif agrega, agrega – çimento arayüzeyinden daha zayıftır. Oluşan çatlak doğrudan agregaların içerisinden geçerek daha gevrek bir kırılma gösterir (şekil 1.3). Bu tür betonlarda nihai dayanım hafif agreganın dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Gao, Sun ve Morino (1997) tarafından yapılan bir çalışmada taşıyıcı hafif betonun çekme dayanımının en fazla içerisindeki iri agregaların nihai çekme dayanımına ulaşabildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 1.3 a) Sertleşmiş çimento hamurunda çatlak ilerleyişi b) Klasik betonda çatlak ilerleyişi c) Taşıyıcı hafif betonda çatlak ilerleyişi

Taşıyıcı hafif betonların yaygın kullanımının önündeki en büyük engel olan ani gevrek kırılmanın önüne geçmek için bu tür betonların da çeşitli lifler ile donatılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Lifli kompozitlerde kullanılan lifin en önemli amacı numunenin göçtüğü ana kadar sönümlediği toplam enerjiyi arttırarak tokluğu desteklemektir. ASTM-C1018-85'e göre çekme gerilmesi altındaki numunenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin altında kalan toplam alan numunenin sönümlediği enerjiyi ifade eder. Bu enerji, malzemenin tokluk kapasitesinin karşılığıdır (Gao, Sun ve Morino, 1997). Liflerin tokluk üzerindeki etkisi, liflerin çekilmesi ve sıyrılması ile ilişkilidir. Hacimce lif yüzdesinin artışıyla lifler, yük altında meydana gelen çatlaklardaki gerilmeyi köprüler ve çatlakların genişlemesini zorlaştırır.

Lifli klasik betonun aksine lifli taşıyıcı hafif betonlarda yükleme altındaki çatlak oluşumu çimento hamurunda değil hafif agregada başlamış ve lif kullanımı klasik betondaki mekanizma ile çalışmamıştır. Hafif agregat kullanılarak üretilen taşıyıcı hafif betonlarda lif kullanımının kompozitin çatlak öncesi davranışını iyileştirdiği gözlenmiştir (Gao, Sun ve Morino, 1997). Agregat barındırmayan hafif betonlardaki lif kullanımında ise çatlak köprüleme ile tokluk artışı meydana gelmiştir. Uygun matris ile uygun lif dozajlarında çoklu çatlak davranışı ve dolayısıyla deformasyon sertleşmesi gözlenmiştir (Zhou ve diğer., 2019).

1.1.1 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları

Hafif betonlar beraberinde çeşitli avantaj ve dezavantajlar taşımaktadır (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012).

Avantajları;

- Hafif beton kullanımı yapının ölü yüklerinde azalma meydana getirir. Böylelikle taşıyıcı elemanların kesit alanları ile yapı temelinin boyutları küçülür.
- Yapıya gelen düşey yükler ve deprem yükleri azalır.
- Yapı ağırlığının azalması ile birlikte ihtiyaç duyulan eğilme donatısı miktarı azalır.
- Birim hacimdeki toplam malzeme miktarının düşmesi ile beton kalıp yüzeylerine daha az basınç uygulanır. Böylelikle kalıp kesitleri azalır, kalıp ve iskele maliyetleri düşer.
- Boşluklu yapısı sebebiyle izolasyon sağlar.
- Yangına dayanıklıdır.
- Hafifliği dolayısıyla taşınması ve yerleştirilmesi daha kolaydır.

Dezavantajları;

- Hafif betonların dayanımı, boşluklu yapısı sebebiyle düşüktür. Yüksek dayanımlı beton uygulamalarında genellikle tercih edilmez.
- Aşınma dirençleri zayıftır.
- Taşıyıcı hafif betonların elastisite modülü klasik betona göre daha düşüktür.
- Taşıyıcı hafif beton elemanlarda daha fazla deplasman meydana gelir.
- Suya ve neme karşı yalıtım gereklidir.
- Hafif agregalar normal ağırlıklı agregalara göre daha yüksek maliyetlidir.
- Hafif betonlar normal ağırlıklı betonlara göre daha fazla çimento içerir.
- Sünme ve rötre değerleri normal ağırlıklı betona göre daha yüksektir.
- Hafif beton üretimi normal ağırlıklı betona göre daha nitelikli işçilik gerektirir.

1.1.2 Hafif Beton Üretim Yöntemleri

Betonun birim hacim ağırlığının düşürülmesi, karışımdaki malzemelerin bir kısmının hava boşluğu ile yer değiştirmesi temeline dayanır. Beton içerisindeki hava agrega taneleri arasında, agregaların kendisinde ve çimento hamurunda bulunur. Hafif betonlar, beton içerisinde bulunan bu üç tip hava boşluğunu destekleyici yöntemler ile üretilir.

- a) Normal ağırlıklı agregalara göre daha fazla miktarda boşluk barındıran düşük birim hacim ağırlıklı agrega kullanmak: Hafif beton üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir. Hafif agrega kullanarak bölücü elemanların yanı sıra taşıyıcı elemanlar da üretilmektedir. Hafif agregalar doğal kökenli, yapay kökenli ya da endüstriyel atık kökenli olabilir. Bunlardan bazıları; pomza taşı, volkanik tüf, genleştirilmiş kil, yüksek fırın cürufu ve uçucu küldür. Bu tür betonlar “Hafif Agregalı Beton” olarak adlandırılır (Dikici, 2010).
- b) Betonun içerisindeki ince agregaların çıkartılmasıyla iri boşluklar meydana getirmek: Klasik betonda kullanılan ince agregalar, betonun heterojen iç yapısında bir dolgu vazifesi görür. Karışımdaki dolgu elemanının çıkartılması ve yalnızca iri agrega ile 1-3 mm kalınlığındaki bağlayıcı çimento hamurunun kullanılması ile de hafif beton elde edilmektedir. Bu yolla üretilen hafif betonlar “İnce Agregasız Beton” olarak adlandırılır. Normal betonarme yapılarda donatı korozyonuna karşı önlem alınmadan kullanılamaz ancak çatı döşemelerinde ve yığma binaların taşıyıcı duvarlarında kullanılmaktadır.
- c) Kimyasal ya da fiziksel yollarla betonun içerisinde yapay hava boşlukları oluşturmak: Bu tür betonlar yapay olarak yalnızca inşaat sektöründe kullanılmak üzere üretilirler. “Gözenekli Beton” olarak adlandırılırlar. Köpük beton, gaz beton ya da hava sürüklenmiş betonlar gözenekli betona örnektir. Yapılan çalışmalarda köpük kesici katkı kullanmayarak polimer malzemeler ile modifiye edilen betonların hafif beton kriterlerini sağlayacak ölçüde hava sürüklediği gözlenmiştir (Kurugöl, Tanaçan ve Ersoy, 2008).

Gözenekli betonların polimer modifikasyonu ile elde edilmesi hafif betonun bazı kısıtlarını iyileştirici özellikleri de beraberinde getirir. Polimer modifikasyonu, beton ya da harç içerisindeki karışım suyunun bir kısmının polimer esaslı bir katkı maddesi ile ikame edilmesidir. Karışım içerisindeki polimerler beton içerisine hava sürükleyici etkiye sahiptir. Klasik betondaki polimer modifikasyonu genellikle bir tür köpük kesici katkının da karışıma eklenmesiyle gerçekleştirilir. Ohama, 1987 yılındaki çalışmasında polimer modifiye betonlar ile harçların durabilite özelliklerinde iyileşme olduğunu, aşındırıcı kimyasallara karşı dirençlerinin ve darbe sönümleme kapasitelerinin arttığını ifade etmiştir (Ohama, 1995).

Hafif agregalı betonlarda polimer modifikasyonu betonun çekme ve eğilme dayanımını iyileştirir, tokluk kapasitesini artırır. Aynı zamanda polimer modifikasyonu, betonu korozyona ve agresif kimyasallara karşı dirençli hale getirmiş, su emme miktarını önemli ölçüde azaltmıştır (Rossignolo ve Agnesini, 2002).

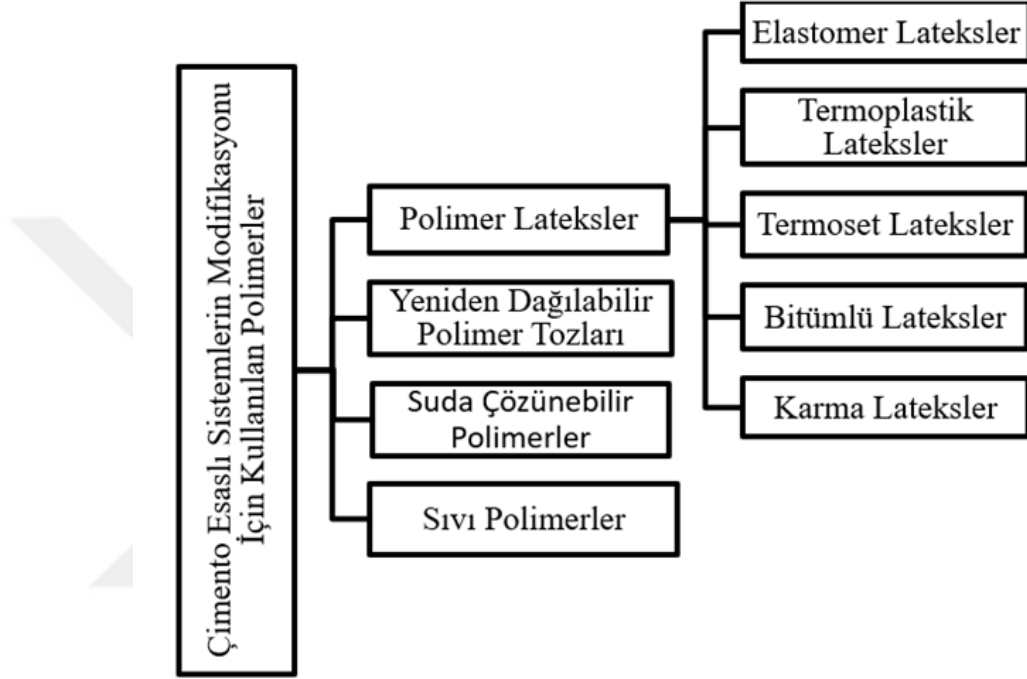
Polimer modifikasyonu ile üretilen hafif betonlarda sürüklenmiş hava kıvam üzerinde de etkilere sahiptir. Karışım içerisine sürüklenen hava, taze haldeki betonun akışkanlığını artırır. Assaad (2017), yaptığı çalışmasında polimer modifiye hafif betonun kendiliğinden yerleşen beton reolojisini yakalayabildiğini göstermiştir.

Betonda lif kullanımının ise mekanik özellikleri iyileştirirken işlenebilirliği zayıflattığı bilinmektedir. Polimer modifiye lifli hafif betonda, polimer yüzdesindeki artışa bağlı olarak kıvam özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir. Polimer modifiye hafif agregalı betonlar ile polimer modifiye lifli hafif betonlar kıyaslandığında, polimerin tokluk artışına etkisinin lifli hafif betonlarda karşılık bulduğu gözlenmiştir (Kurugöl, Tanaçan ve Ersoy, 2007).

1.2 Polimer Modifiye Harç ve Betonlar

Portland çimentosu ile üretilen harçlar ve betonlar düşük çekme dayanımına ve çatlak hassasiyetine sahiptir. Bu tür betonlar yüksek oranda kuruma büzülmesi yapar, su/çimento oranına bağlı olarak kimyasal etkiler karşısında direnci düşüktür. Polimer

modifikasyonu klasik betonun bu tür zayıflıklarını iyileştirmek amacıyla beton teknolojisine dahil edilmiştir. Polimer modifikasyonu en basit şekliyle çimento esaslı malzemelerde karışım suyunun bir kısmının polimer ile ikame edilmesidir. Bu amaçla; polimer lateks emülsiyonları, yeniden dağılıbilir polimer tozları, sıvı polimerler ve suda çözünebilen polimerler kullanılmaktadır (Şekil 1.4) (Ohama 1997, 1998).



Şekil 1.4 Çimento esaslı sistemlerin modifikasyonunda kullanılan polimerler (Ohama, 1998)

1.2.1 Polimerik Lateksler

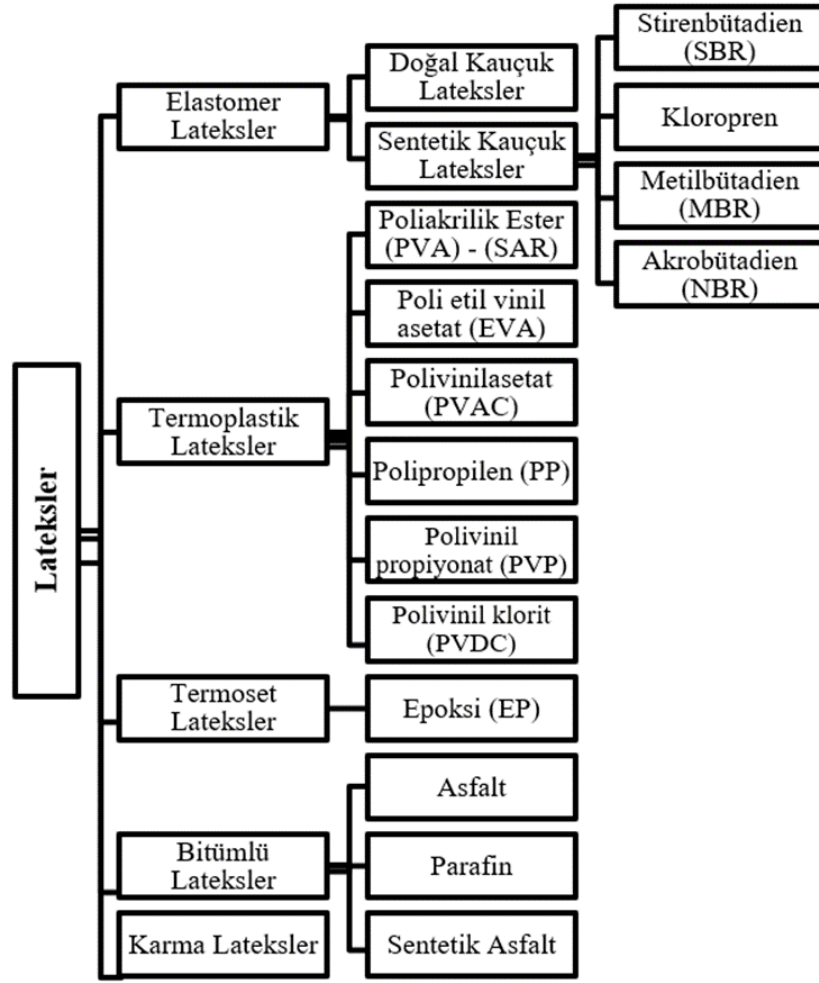
Çimentolu sistemlerin modifikasyonu yaklaşık yüz yıllık bir geçmişe sahiptir ve kullanılan ilk katkılar bir tür polimerik lateks olan doğal kauçuktur. Cresson tarafından 1923 yılında yapılan ilk polimer modifikasyonları ile kaplama malzemesi geliştirilmiştir. Sonraki yıllar içerisinde yapay lateksler geliştirilmiş ve polimer

modifiye sistemlerin patenti alınmıştır. Günümüzde halen en yaygın kullanılan polimer türü latekslerdir (Bothra ve Ghugal, 2015).

Lateksler 0,05-5 mikron çaplı polimer taneciklerinin suda asılı tutulması ile elde edilen emülsiyonlardır. Yapay lateksler emülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle üretilir. Bu yöntemde polimer taneciklerinin su içerisinde stabilize kalmasını sağlayıcı sürfaktanlar (yüzey aktif ajan) emülgatör olarak kullanılır. Sürfaktan tipine göre lateksler anyonik, katyonik ya da nötr olabilir. Sürfaktanlar bir yan etki olarak çimento esaslı sistemlere hava sürükler. Sürüklenen havanın dayanım kaybına yol açmaması için polimer modifikasyonu ile birlikte genellikle köpük kesici (de-foaming) kimyasal katkılardan faydalanılır. Çimentolu sistemlerde pek çok farklı türde lateks kullanılmaktadır. Ohama (1998), çimentolu sistemlerde kullanılan lateksleri sınıflandırmıştır (Şekil 1.5).

Çimento esaslı lateks modifiye sistemlerde, farklı türlerdeki latekslerin mekanik özellikler üzerindeki ve mikroyapıdaki etkileri pek çok çalışmanın konusu olmuştur. Karışım içerisindeki lateksler zamanla film formları meydana getirir. Uygun film formlarının meydana gelmesi için polimer/çimento oranının en az %8 olması istenir. İç yapıdaki hidrate parçacıklar ve diğer organik – inorganik tanecikler arasında meydana gelen yoğun film tabakası arayüzey zayıflığını azaltır, mikro çatlakları köprüler ve hamurun gevrek davranışını azaltır (Wang, Lackner ve Wang., 2011). Lateks modifikasyonunun mikroyapıdaki bu etkileri, mekanik özellikler üzerine tokluk ve eğilme dayanımı artışı ile yansır.

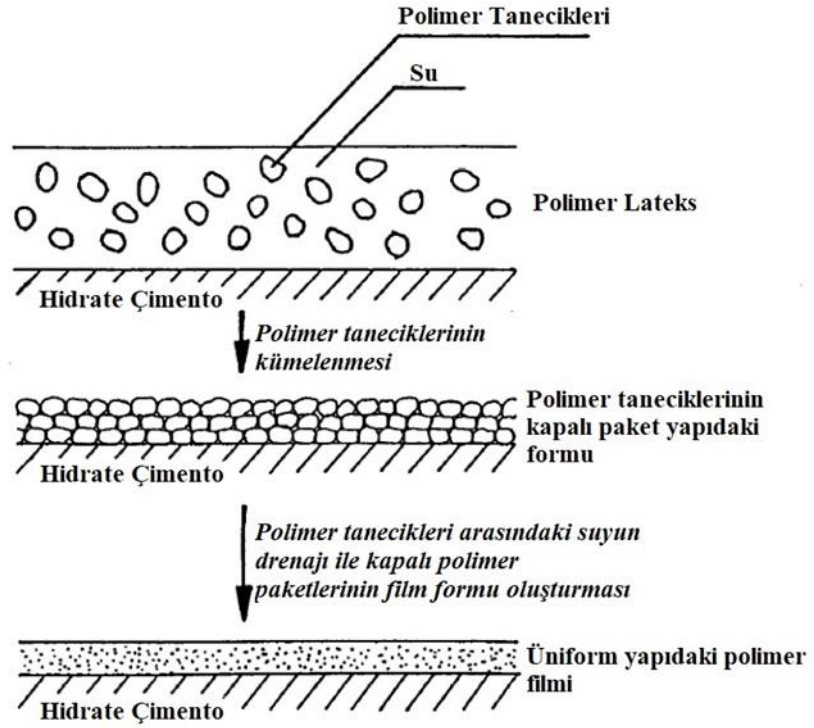
Uygulamalarda sıklıkla tercih edilen lateksler stiren bütadiyen kauçuk (SBR), stiren akrilik kauçuk (SAR), poliakrilik ester (PAE), poli etilen vinil asetat (EVA) kopolimerleridir (Ohama, 1998).



Şekil 1.5 Polimer lateks türleri (Ohama, 1998)

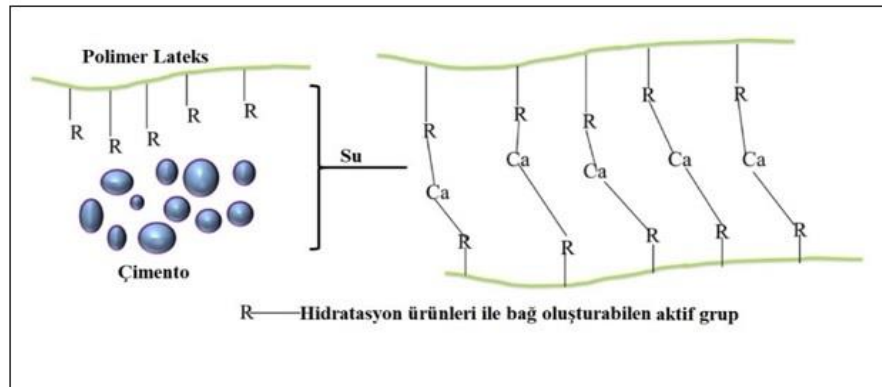
1.2.1.1 Lateks Modifikasyonunun Mekanizması

Çimento esaslı sistemlerde lateks modifikasyonu, lateks emülsiyonunun karışıma eklenmesidir. Bu şekilde sisteme polimer tanecikleri katılır. Polimer filmler, iç yapıda meydana gelen fiziksel ve kimyasal etkiler sonucunda oluşurlar (Wang ve diğer., 2016). Film oluşumunun fiziksel basamakları hidrasyonun başlamasıyla kullanılan suyun oluşturduğu boşluklara polimer taneciklerinin birikmesi ile başlar. Polimerler henüz hidrate olmamış çimento tanelerinin etrafında, agregaların dış yüzeylerinde ve oluşmakta olan C-S-H jellerinin etrafında kümelenir. Suyun tamamen kullanılmasının ardından hidrate olmuş çimento jelleri üzerinde sürekli bir film oluşturarak iç yapıdaki farklı fazları birbirlerine bağlar (Şekil 1.6) (Ohama, 1995).



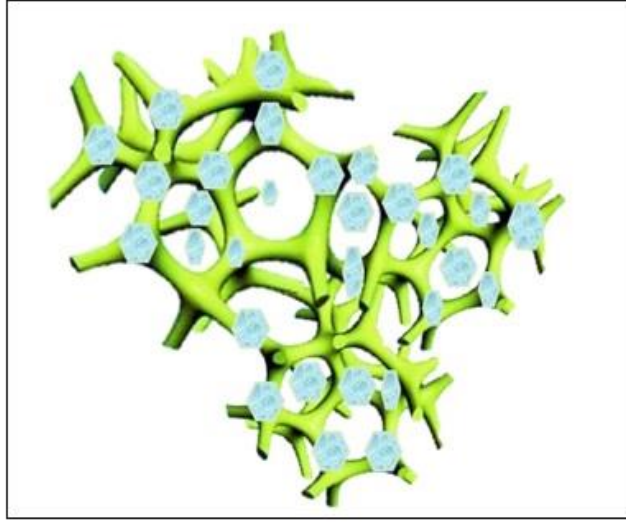
Şekil 1.6 Lateks modifikasyonunun mekanizması (Ohama, 1995)

Lateks modifikasyonunun bir diğer basamağı da hidrate ürünler ile polimer latekslerin aktif grupları arasındaki kimyasal bağların oluşumudur (Şekil 1.7). Bağların oluşumunda Ca^{+2} iyonlarının varlığı polimer zincirlerinin bir araya gelmesini sağlar (Wang ve diğer., 2016).



(a)

Şekil 1.7 Lateks modifikasyonunun kimyasal mekanizması a) Lateks polimeri ile hidratasyon ürünlerinin bağ oluşturması b) Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan yapının üç boyutlu gösterimi (Wang ve diğer., 2016).

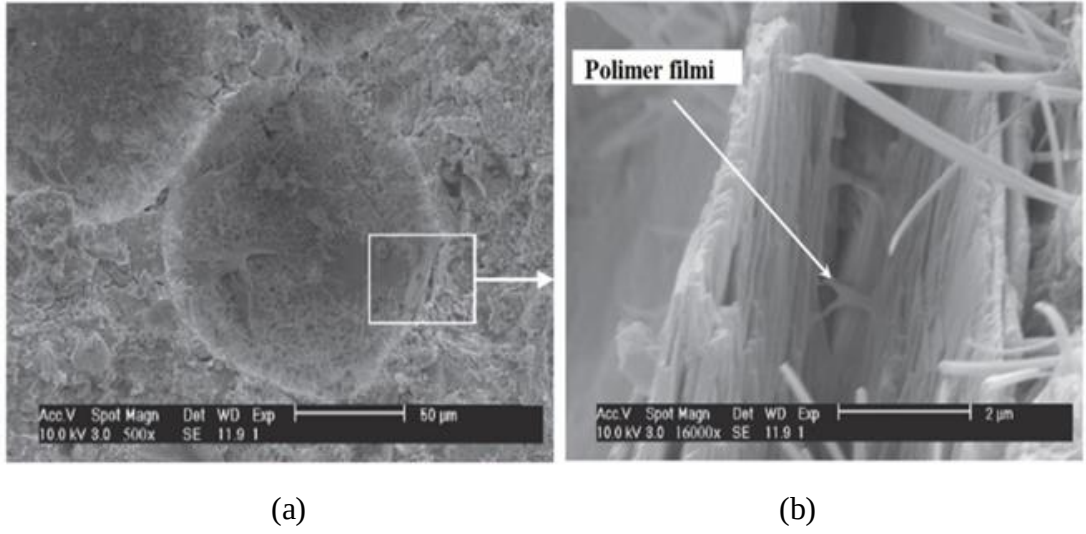


(b)

Şekil 1.7 devamı

Lateks modifiye sistemlerde polimer filmlerinin oluşumu ortamın sıcaklığından ve nemden etkilenir. Karışımdaki suyun drenajıyla uniform yapılarını oluşturan polimerler sürekli yüksek nem altında iken uygun formasyonda film meydana getiremez. Ancak çimentonun uygun hidrasyonu için 28 günlük nemli kür bilinen bir kriterdir. Polimerizasyonu sekteye uğratmasını önlemek amacıyla polimer modifiye çimentolu sistemlerde suda ve havada kür birbirini tamamlayıcı olarak tercih edilir. Yaklaşık 7 günlük bir nemli kürün ardından havada kür uygulanması önerilmektedir. Polimerler yapıları gereği yüksek ısıl duyarlılığa sahiptir. Bu durum, lateks modifiye sistemleri ısı karşısında hassas hale getirir (Wang, Lackner ve Wang, 2011).

Lateks modifikasyonunda oluşan polimer filmlerinin miktarı ve etkilerinin şiddeti Polimer/Çimento (P/Ç) oranı ile doğrudan ilişkilidir. P/Ç oranı arttıkça kırılma tokluğu ile çekme ve eğilme dayanımı artar. Ancak kritik bir dozun üzerindeki polimer kullanımı, içerisindeki sürfaktanlar aracılığıyla mekanik karıştırma esnasında çok fazla havayı beraberinde sisteme sürükler (Şekil 1.8). Sürüklenen hava birbirinden bağımsız baloncuklar oluşturarak karışım içerisindeki stabilitesini korur (Knapen ve Gemert, 2015). Sürüklenen hava polimer filmlerinin sürekliliğini bozacağından tokluk kapasitesi, eğilme ve çekme dayanımlarındaki artışın önüne geçer. Aynı zamanda sistemdeki boşluk basınç dayanımını da düşürür.

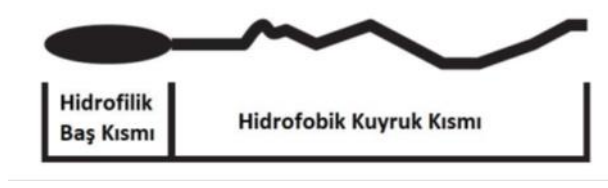


Şekil 1.8 Polimer modifiye betonda a) Sürüklenmiş hava baloncuğu ve b) Stabilize haldeki hava baloncuğunun yüzeyinde oluşan polimer filmleri (Knapen ve Gemert, 2015)

1.2.1.2 Hava Boşluklarının Oluşumu ve Stabilizasyonu

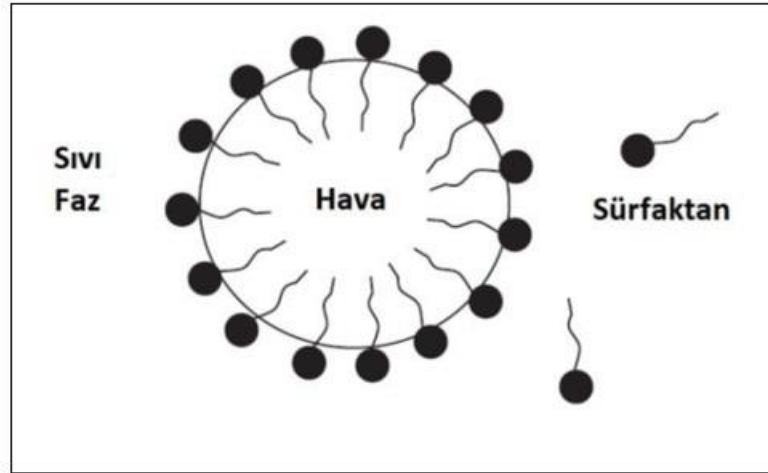
Taze betondaki hava kabarcıkları doğal olarak kararsızdır. Sürüklenmiş hava ile matris arasında kalan arayüzler, alanlarını azaltma eğiliminde olan serbest yüzey enerjisine ve termodinamik eğilime sahiptir. Bu yüzden bütün hava kabarcıklarının ömrü (kalıcılığı) vardır. Eğer betonun prizi ciddi şekilde geciktirilirse küçük hava kabarcıkları varlıklarını sürdüremez (Du ve Folliard, 2005).

Sürfaktanlar (yüzey aktif ajanlar), beton içerisinde homojenize ve stabil hava boşlukları oluşturabilen organik kimyasallardır. Çözücü ile güçlü kimyasal bağ yapan hidrofilik baş kısmı ve çözücü ile etkileşmeyen hidrofobik kuyruk kısımlarından oluşurlar (Şekil 1.9). Sürfaktanlar beton teknolojisinde kullanılmakta olan pek çok katkıda mevcuttur. Bunların bazılarında hava sürükleyici etki hedef iken bazılarında ise bir yan etki olarak karşımıza çıkar. Hava sürükleyici katkılar, lignosülfonat esaslı akışkanlaştırıcılar ve polimer emülsiyonları yapılarında bir veya birden fazla türde sürfaktan barındırır (Du ve Folliard, 2005; Ouyang, Qiu ve Chen, 2006).



Şekil 1.9 Sürfaktanların temel kimyasal doğası (Du ve Folliard, 2005)

Çimentolu sistem içerisine eklenen sürfaktanların ilk yönelimleri rastgeledir. Ancak kimyasal yapıları gereği su karşısında moleküler yönelimleri değişir (Şekil 1.10). Sürfaktanın hidrofobik kısmı, suyun itici etkisi ile çıkıntı oluşturarak kuyruk biçimini alır ve böylelikle sistemin genel serbest enerjisini düşürürler. Molekülün hidrofilik kafaları arasındaki karşılıklı itme ise moleküllerin küresel biçimde sıralanmasını sağlar. Sürfaktanlar arasındaki elektrostatik ve sterik itki hava baloncuklarının hamur fazındaki stabilizasyonunda büyük öneme sahiptir (Du ve Folliard, 2005) .



Şekil 1.10 Sürfaktan moleküllerinin hava - su arayüzeyindeki dağılımı (Du ve Folliard, 2005)

Lateks emülsiyonlarında polimer taneciklerinin su içerisinde askıda kalabilmesi için çeşitli türde sürfaktanlardan faydalanılır. Polimer modifiye sistemlerdeki hava sürükleyici yan etkinin kaynağı emülgatör olarak kullanılan bu sürfaktanlardır.

1.2.2 Yeniden Dağılabilir Polimer Tozları

Yeniden dağılabilir polimer tozlarının çimentolu sistemler üzerindeki etkisi lateks emülsiyonları ile aynıdır. Ancak sisteme dahil olma şekilleriyle birbirlerinden ayrılırlar. Bu tip polimerler kuru toz formda olup, çimento agrega kuru karışımına eklenirler. Karışıma suyun eklenmesi ile birlikte emülsiyon oluşturup polimer filmleri meydana getirirler. Yeniden dağılabilir polimer tozlarının film oluşturma mekanizması polimer lateksler ile aynıdır.

1.2.3 Suda Çözünebilir Polimerler

Suda çözünebilir polimerler kullanım amaçları ile lateks polimerlerden ayrılırlar. Bu tip polimerlerin temel kullanım amacı reolojik iyileşmeyi sağlamak ya da kıvam stabilizasyonunu korumaktır. Çok ince ve geçirimsiz bir film tabakası ile su moleküllerinin etrafını sarak su kaybının önüne geçerler. Böylelikle işlenebilirlik için gerekli su uzun süre karışım içerisinde bulunur. Yüksek miktardaki kullanımı sisteme hava sürükleyici etkiye sahiptir.

1.2.4 Sıvı Polimerler

Çimento esaslı sistemlerde sıvı polimer katkıları termoset reçinelerdir. Beton veya çimento harcına düşük molekül ağırlıklı sıvı polimerler doğrudan eklenir. Bu tür modifikasyonlarda sisteme eklenen polimer miktarı lateks modifikasyonuna göre daha fazladır. Karışım içerisinde hidrasyon ile eş zamanlı olarak polimer fazı meydana gelir. İç içe geçmiş fazlar agregaları güçlü bir şekilde birbirine bağlar (Knapen ve Gemert, 2015).

1.3 Lifli Kompozitlerde Polimer Modifikasyonu

Polimer modifiye beton ve harçlar ile ilgili çalışmalar yaklaşık yüz yıllık bir geçmişe sahip olsa da polimer modifiye lifli kompozitler ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu tür kompozitlerin patenti 2006 senesinde alınmıştır. Yalın betonun

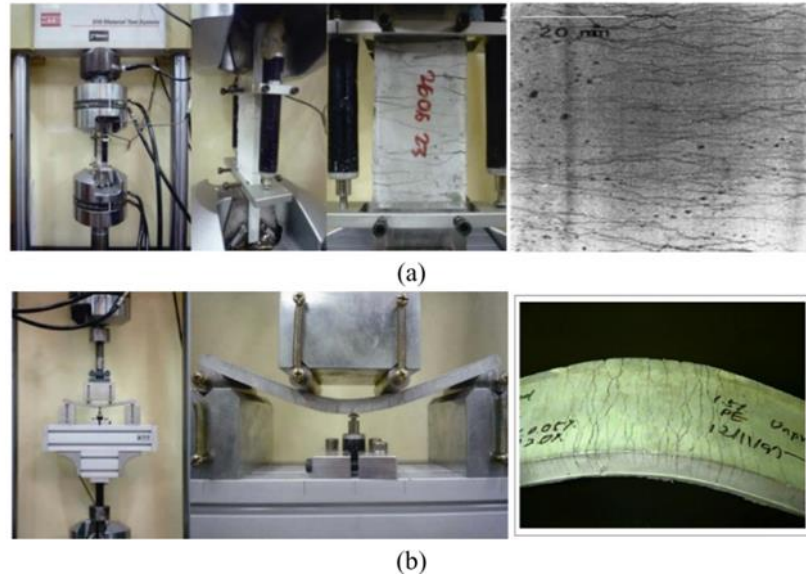
gevrek kırılmasının önüne geçmek, meydana gelen çatlakların açılmasını önlemek amacıyla lifli kompozitler geliştirilmiştir. Polimerik ya da metalik kökenli çeşitli lifler ile pek çok çalışma yapılmıştır. Diğer bir yandan çimentolu sistemlerde yapılan polimer modifikasyonunun da kompozit içerisinde film formu meydana getirdiği bilinmektedir. Polimer filmleri de çekme ve eğilme yüklemeleri karşısında enerji sönümler ve mikroçatlakların ani ilerleyişinin önüne geçer.

Kalwane, Ghugal ve Dahake (2016), çelik lifli kompozitlerde yapılan lateks modifikasyonu üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada polimer modifiye lifli kompozitlerde yalın lifli kompozitlere göre tokluk kapasitesinde ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Çelik lifli kompozitlerde gözlenen deformasyon yumuşaması davranışının da polimer barındıran serilerde daha geniş bir elastik bölgeye yayıldığı görülmüştür. Yaptıkları bir diğer çalışmada ise çelik lifli kompozitlerin polimerli ve polimersiz serilerini hazırlayarak kayma gerilmesi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, lifli kompozitlerde polimer kullanımının kesme dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu kompozitler ile hazırlanan kirişler yalın lifli kompozitlerin kırılma yüklerinde ayakta kalmayı sürdürmüş ve daha yüksek deformasyon göstermiştir. Eğilme yüklemesi altındaki kırılma davranışı ise polimer kullanımında gevrekten süneğe geçmiştir (Kalwane, Ghugal ve Dahake, 2016). Lee ve diğer., (2018) polimer modifiye lifli kompozitlerde çelik liflere alternatif olarak polipropilen (PP) lifleri ve bu liflerin hibritlerini kullanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda polimer modifiye sistemde çekme gerilmesi altındaki dayanım ve tokluk kapasitesi artışında PP lifler çelik liflerden üstün davranmıştır. Kompozitlerde PP ve hibrit lifli seriler, makro ve mikro boyutlu çatlakları daha etkili köprülemiştir.

BÖLÜM İKİ

MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ GELİŞTİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER

Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Çimento Esaslı Kompozitler (Engineered Cementitious Composites – ECC) 1990'lı yıllarda Prof. Dr. Victor Li ve ekibi tarafından geliştirilerek literatüre kazandırılmıştır (Li ve Kanda 1998). ECC'nin çekme birim deformasyon kapasitesi geleneksel betona ve lifli betona kıyasla 100 ile 400 kat daha yüksektir ve %2,5 - 4 seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Li, 2002; Weimann ve Li, 2003). ECC'nin yüksek çekme duktilitesi çok sayıda kararlı çatlak oluşturabilmesi ile ilişkilidir (Şekil 2.1.). Kararlı çatlaklar gerilme altında belirli bir genişliğe ulaştıktan sonra daha fazla açılmaz ve lifler gerilmeyi matrise aktararak bir sonraki çatlağın oluşmasını sağlar. Gerilmenin lifler ile aktarılması çoklu çatlak davranışına ve dolayısıyla meydana gelen ilk çatlaktan sonra kompozitin yük taşıma kapasitesindeki artışa sebep olur. Bu davranış eğilme yüklemesi altında “sehim sertleşmesi” çekme yüklemesi altında ise “deformasyon sertleşmesi” olarak adlandırılır (Li, 2008). ECC'nin çoklu kararlı çatlak oluşturabilmesi ve dolayısıyla deformasyon sertleşmesi gösterebilmesi Li ve ekibinin geliştirdiği mikro - mekanik teoriye dayanır (Li, Wang ve Wu, 2001).



Şekil 2.1 Çekme ve eğilme yüklemeleri altında ECC'nin oluşturduğu kararlı çatlaklar ve gösterdiği deformasyon a) Doğrudan çekme yüklemesi b) Eğilme yüklemesi (Lim , Jenn ve Yin., 2012)

ECC tasarımındaki modellemenin doğru anlaşılması ile çeşitli kullanım amaçlarına ve üretildiği bölgede sahip olunan ham maddelere göre farklı tasarımlar yapılabilir. Mikromekanik teori, istenen nitelikteki ECC'lerin tasarlanabilmesi için bir kılavuz işlevi görür. Tasarım kriterlerini sağlayarak kendiliğinden yerleşen ECC, erken yüksek dayanımlı ECC, hafif ECC, geri dönüşümlü malzemeler ile üretilmiş yeşil ECC, kendi kendini iyileştirebilen (self healing) ECC ve lateks modifiye ECC gibi çeşitli ECC'ler literatüre kazandırılmıştır (Li, 2008; Chen, Hua -Yang, Yang ve Yao, 2014; Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019)

ECC matris, lif ve lif-matris arayüzeyi olmak üzere üç fazdan meydana gelir. Yapısında iri agrega bulundurmaz. Bu sebeple matris fazında ihtiyaç duyulan çimento miktarı oldukça fazladır. Kullanılan çimento miktarını azaltarak ekonomi sağlamak ve hidrasyon ısısını bir miktar düşürmek amacıyla çeşitli mikro agregalardan faydalanılır. Bunlardan bazıları ECC'nin lif-matris arayüzey özelliklerini de iyileştiren yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanlar; metakaolin ve kireçtaşı tozu gibi mineral katkılardır (Huang ve diğer., 2013). Bu katkılar çimento ile ikame edilerek kullanılır.

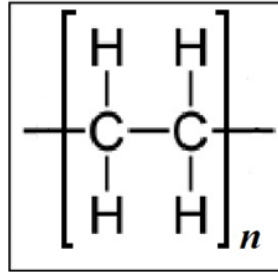
ECC üretiminde genellikle polimerik kökenli lifler tercih edilmektedir. Bu lifler ile matris fazı aralarındaki aderans çatlak köprülemeyi doğrudan etkiler. Güçlü aderansa sahip lifler yük altında kopma eğilimi gösterirken düşük aderanslı liflerde sıyrılma gözlenir. Kullanılan lifin dozajı ve liflerin matris içerisindeki yönelimi ECC'nin deformasyon derecesini etkiler. Literatürde pek çok farklı lif türü ve dozajı ile çalışmalar yapılmış, liflerin hibrit kullanımı ile de dayanım - ekonomi optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarda hacimce yaklaşık %2'lik lif kullanımı çoklu çatlak oluşumu açısından yeterli bulunmuştur (Labhasetwar ve diğer., 2019). ECC tasarımı yaygın olarak kullanılan lifler polivinil alkol (PVA), polietilen (PE) ve yüksek dayanımlı polipropilen (HTPP) liflerdir (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014). İstenilen dayanım özelliklerini sağlarken uygun maliyetli bir kompozit elde edebilmek için çeşitli optimizasyonlar denenmiştir. Lifin aderans özelliklerini modifiye etmek üzere yapılan lif yüzey uygulamaları ve liflerin karışım içerisinde belirli yüzdelarla hibrit kullanımı yaygın optimizasyon çalışmalarıdır.

2.1. ECC Tasarımında Kullanılan Polimerik Lifler

Polimer teknolojisindeki gelişmeler ile pek çok farklı polimerik lif üretilmiştir. ECC tasarımında, kompozitin işlenebilirliği üzerindeki etkileri dolayısıyla lifler düşük dozajlarda kullanılır. Sıklıkla tercih edilen lifler Polietilen (PE), Polivinil alkol (PVA) ve Polipropilen (PP) liflerdir (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014).

2.1.1 Polietilen Lifler (PE)

Polietilen lifler yüksek elastisite modülü, yüksek çekme dayanımı, agresif kimyasallar karşısında direnç, yüksek aşınma dayanımı ve düşük özgül ağırlığı ile ECC tasarımında sıklıkla tercih edilmektedir. Ortalama %8 çekme birim şekil değiştirme kapasitesine sahip olan ultra yüksek dayanımlı ve yüksek düktiliteli ECC'lerin (HSHD - ECC) tasarımında PE liflerden faydalanılmaktadır (Zhou ve diğer., 2019). Molekül dizilimi Şekil 2.2'de şematize edilmiştir.



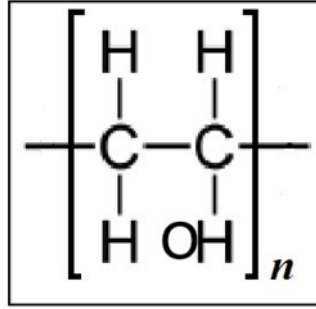
Şekil 2.2 Polietilen (PE) liflerin kimyasal yapısı

PE liflerin yüzeyleri hidrofobiktir. Bu nedenle kullanıldığı çimentolu sistemin hamur fazı ile kimyasal etkileşim göstermez. PE lifler matristen sıyrılma davranışına eğilimlidir, liflerde kopmaya rastlanmaz. (Li, 1993; Lin ve Li, 1997). PE liflerin üstün özellikleri onu ECC tasarımı için ideal kılsa da liflerin yüksek maliyeti alternatif lif arayışlarına sebep olmuştur.

2.1.2 Polivinil Alkol Lifler (PVA)

Polivinil alkol lifler heterojenik yapıdadır. Poli-vinil asetat'ın asetat grubunun kimyasal etki ile uzaklaştırılması sonucu elde edilir. Tekstil sektöründe uzun yıllardır kullanılmakta olan PVA lifler, PE liflere göre daha ekonomiktir. PVA lifler çeşitli boyutlarda üretilmektedir. ECC tasarımında kullanılan PVA'lar, genellikle 0,8 cm uzunluğunda ve 39 mikron çapındadır. Çekme dayanımları ortalama 1600 MPa'dır. Mekanik özellikleri PE liflere kıyasla zayıftır ancak yüksek dayanımlı ve yüksek düktiliteli ECC'lerin tasarımında PVA lifler de kullanılmıştır (Zhang, Yuvaraj, Di ve Quian., 2019). Pan, Yuan, Luo ve Leung (2012), PVA liflerin çatlak köprülemede istenilen etkiyi yakalayabilmesi için karışıma en az hacimce %2 oranında eklenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Daha yüksek dozajlar ise işlenebilirlik kaybı açısından dezavantaj yaratacağından önerilmez.

PVA lifler, ECC'nin tasarım kriterleri ile kompozit maliyetinin optimizasyonu açısından literatürde kendisine sıkça yer bulmuştur. PVA liflerin moleküler dizilimi Şekil 2.3'te şematize edilmiştir.



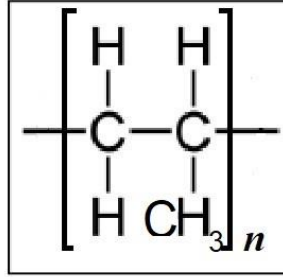
Şekil 2.3 Polivinil Alkol (PVA) liflerin kimyasal yapısı

PVA liflerin yüzey yapısı hidrofilik niteliktedir. Bu sayede çimentolu sistemlerin hamur fazı ile güçlü kimyasal bağ kurarlar. PVA lifli ECC'lerde bu güçlü lif-matris aderansı sebebiyle lifler sıyrılmaktan çok kopma eğilimi taşır. Lif kopması ile liflerin köprüleme gerilmesinde ani düşüş meydana gelir ki bu durum ECC'nin çoklu çatlak davranışını olumsuz etkiler. PVA - ECC'lerde daha yüksek düktiliteye ulaşmak amacıyla liflere çeşitli yüzey işlemleri uygulanmış, matris fazı ile aderansı

azaltılmıştır. Ancak yapılan bu modifikasyonlar PVA liflerin maliyetini arttırır (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014).

2.1.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP)

Polipropilen (PP), lif üretim teknolojisinde ekonomik açıdan avantajlı olan ve Dünya üzerindeki pek çok yerden kolaylıkla tedarik edilebilen bir ham maddedir. Polipropilen monomerlerinin uç uca eklenmesi ile elde edilir. Klasik PP lifler, düşük çekme dayanımları ve zayıf aderansları dolayısıyla gerilme altında meydana gelen çatlakları köprülemeye elverişli değildir. PP lifler betonda meydana gelen plastik rötre çatlaklarının önüne geçmek amacıyla kullanılmıştır (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Keskinates ve Gödek, 2016). PP liflerin moleküler dizilimi Şekil 2.4'te şematize edilmiştir.



Şekil 2.4 Polipropilen (PP) liflerin kimyasal yapısı

Polimer teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte ıslak çektirme (wet-spinning) yöntemi kullanılarak PP liflerin mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Bu yeni tür PP lifler, Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif (High Tenacity Polypropylene Fiber - HTPP) olarak adlandırılmıştır. HTPP lifler genellikle 10-12 mikron çaplı olup 0,8-1,5 cm uzunluğundadır. Çekme dayanımları ortalama 800-900 MPa'dır.

Polipropilen lifler hidrofobik yüzeye sahiptir, dahil olduğu çimentolu sistemin hamur fazı ile güçlü kimyasal bağlar oluşturmaz. HTPP lifler, ECC'nin lif fazında kullanıldığında artan çekme gerilmeleri karşısında matristen sıyrılma eğilimi gösterir. HTPP liflerin uygun matriste kullanımında kararlı çoklu çatlak davranışına ve %4'e

varan çekme birim deformasyon kapasitesine ulaşılmıştır (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014). HTPP liflerin ECC’de kullanımı için en uygun doz hacimce %2 olarak önerilmektedir. Daha düşük dozajdaki lif kullanımı ECC’nin doygun kararlı çatlak oluşturmalarını garanti edemezken daha yüksek dozda kullanımlarda ise liflerin karışım içerisinde kümelenmesi (aglomerasyon) gözlemlenmektedir. (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019).

2.2 ECC Tasarımının Temel Prensipleri

ECC’nin çoklu çatlak ve dolayısıyla deformasyon sertleşmesi davranışı gösterebilmesi için matris, lif, lif - matris arayüzey özellikleri dikkate alınır. Çekme gerilmeleri karşısında matrisin dayanımı, liflerin dayanımı ve liflerin yüzey özelliklerine göre değişkenlik gösterebilen matris - lif aderansı ECC’nin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler.

Jones’e (1996) göre lif - matris arasındaki geçiş bölgesi arafaz ve arayüzeyden oluşur. Arafaz bölgesi klasik beton teknolojisindeki agrega - çimento hamuru arayüzeyine benzetilebilir. Arafaz, lif yüzeyinden itibaren yaklaşık 30µm’lik bir alanı kaplar. Hidratasyon ürünlerine bağlı olarak arafaz özellikleri değişkenlik gösterebilir. Lif-matris arayüzey özellikleri ise lifin yüzey özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Arayüzey özellikleri lifin hifrofilik ya da hidrofobik olmasına bağlı olarak çatlak köprüleme davranışını etkiler. Lif yüzeylerindeki çeşitli modifikasyonlar ile bu özellikler istenilen şekilde iyileştirilmektedir (Gödek, 2016).

Mikromekanik teori 1990’lı yıllarda Prof. Dr. Victor Li ve ekibi tarafından geliştirilmiş, 2001 yılında ise detaylandırılmıştır. Bu teori temelde iki kritere dayanır. Bunlardan ilki enerji kriteri diğeri ise dayanım kriteridir. Bu iki kriteri birlikte sağlayan kompozit, uygun lif dağılımı ve lif - matris arayüzey özellikleri de mevcutsa matriste oluşan ilk çatlağın ardından gerilmenin kontrollü ilerlemesi ile çoklu çatlak davranışını gerçekleştirir (Li, 2012).

Dayanım kriterine göre iç yapıda önceden var olan bir kusurdan çatlak oluşumunun başlayabilmesi için çekme gerilmesinin (σ_{cr}) çatlaktaki liflerin köprüleme gerilmesinden (σ_0) düşük olması gerekir (Denklem 2.1).

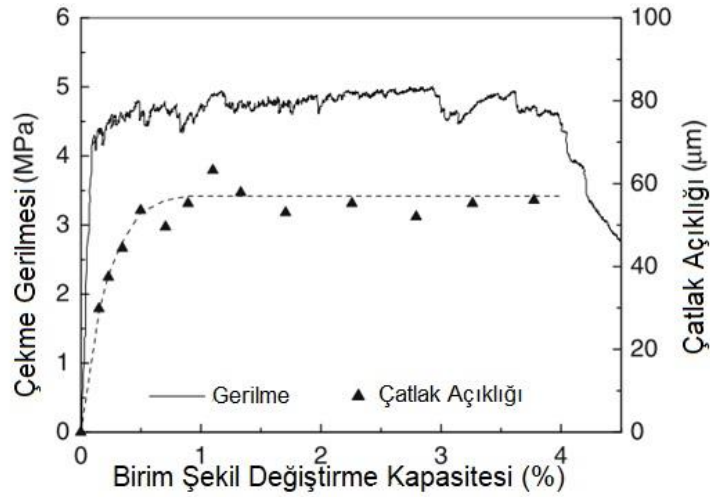
$$\sigma_{cr} < \sigma_0 \quad (2.1)$$

Dayanım kriterinin gerçekleştirilmesi, açılmaya başlayan çatlağın çatlak düzleminde ani yük kaybına sebep olmayacağını garanti eder. Matrisin çatlak dayanımı başlangıç kusur boyutuna (c) ve matris kırılma tokluğuna (K_m) bağlıdır. Çoğunlukla matrisin kırılma tokluğunun malzeme boyunca değişmediği kabul edilebilir. Ancak iç yapıdaki kusur dağılımı ve boyutları değişkenlik gösterir. Bu yüzden ilk çatlak, en büyük ve en uygun yönelimli kusurun bulunduğu kesitte başlar. Yükleme artışıyla çatlak gelişimi daha küçük kusurların bulunduğu enkesitlere doğru ilerler. Diğer bir ifadeyle mikro çatlak yoğunluğu, artan gerilme yükü ile artar. Açılan her bir yeni mikro çatlak ile çatlak aralığı azalır. (Yang, Wang, Yang ve Li, 2008; Li, 2012).

Her bir çatlak düzleminde matris tarafından aktarılan yük lifler tarafından alınır. Gerilmeyi köprüleyen bu lifler pik yapıp ardından azalan bir $\sigma(\delta)$ ilişkisi ile ifade edilen çatlak açılma fonksiyonudur. Lif köprüleme kapasitesi olarak adlandırılan pik noktası (σ_0), lif dağılımındaki kaçınılmaz düzensizlik sebebiyle bir çatlak düzleminde diğerine değişkenlik gösterir (Denklem 2.1). Bu durum ilk çatlakta gözlenirse yalnızca tek bir çatlak oluşacak ve bunu deformasyon yumuşaması davranışı takip edecektir (Li, 2012).

Farklı tip malzemeler ile hazırlanan ECC'lerde de (Denklem 2.1)'in korunması için σ_0 ve σ_{cr} arasındaki farkın yüksek olması tercih edilir. Bu farkın arttırılması, σ_{cr} 'nin düşürülmesi ile sağlanır. Düşük σ_{cr} matrisin kırılma tokluğunun (K_m) azaltılmasıyla ya da iç yapıdaki kusur boyutunun (c) arttırılmasıyla sağlanabilir. Bununla birlikte çok düşük kırılma tokluğu ve iç yapıdaki büyük boşluklar matrisin ilk çatlak dayanımının düşmesine, kompozitin daha düşük basınç dayanımına sahip olmasına yol açabilir (Kanda ve Li, 2006; Li, 2012; Zhou ve diğer., 2019).

Enerji kriteri çatlakların açılma biçimini belirlemektedir. İç yapıdaki kusurlu bir enkesitten açılmaya başlayan çatlağın ilerleme biçimi liflerinin kopma ya da sıyrılma davranışını belirler. Liflerin bu davranışı genellikle çatlağın açılma genişliğine bağlıdır. Liflerin köprülediği gerilme kesitteki liflerin köprüleme kapasitesinin üzerinde ise çatlakların genişlemesi sınırlandırılmaz. Geniş açıklıklı çatlaklarda ise liflerin kopması ya da tamamıyla sıyrılması kaçınılmaz olacaktır. Bu tip çatlaklar Griffith tipi çatlaklar olarak isimlendirilir. Griffith tipi çatlaklarda, çatlak genişliğindeki artış ile birlikte gerilme azalır. Klasik lifli betonlarda gözlenen deformasyon yumuşaması davranışı bu şekilde açıklanabilir. ECC’de ise liflerin kopması ya da sıyrılması, gelişen çatlakların genişliği ortalama 100µm’nin altında olacak şekilde kısıtlanması ile kontrol edilmektedir (Tai, 2015). Şekil 2.5’te ECC’nin çekme gerilmeleri altındaki tipik gerilme – birim şekil değiştirme grafiği görülmektedir. Grafikte gerilmeye gözlenen her bir düşüş açılan yeni bir çatlağı ifade eder. Yeni çatlaklar oluşmaya devam ederken çatlak genişliklerinin de 60µm civarında sabit seyrettiğini söylemek mümkündür (Li, 2012).



Şekil 2.5 ECC'nin tipik çekme -birim şekil değiştirme grafiği ile ortalama çatlak açıklıkları (Li, 2012)

ECC’nin tek bir çatlakta gelişen köprüleme gerilmesi – çatlak açıklığı ilişkisi (σ - δ) Şekil 2.6’daki gibi modellenebilir. ECC’nin kararlı çatlak gelişiminde çatlak açıklığı δ_{ss} genişliğinde sabittir. Kararlı çatlak gelişimi için uygulanan çekme gerilmelerinin

(σ_{ss}) yaptığı iş, çatlak ucundaki malzemenin kırılması için gerekli enerji (J_{tip}) ile çatlakların $0 - \delta_{ss}$ genişliğindeki açıklıkta sabit kalması için gerekli olan lif köprüleme enerjisine eşit olmalıdır (Denklem 2.2 ve Denklem 2.3) (Li, 2012 ; Zhou ve diğer., 2019).

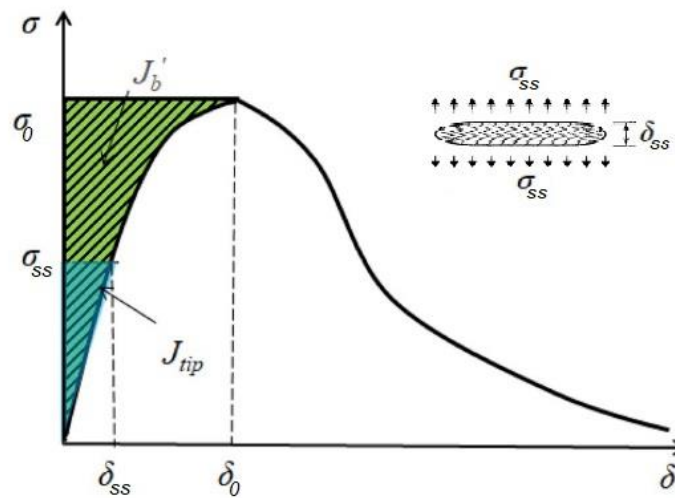
$$\sigma_{ss} \delta_{ss} - \int_0^{\delta_{ss}} \sigma(\delta) d\delta = J_{tip} \quad (2.2)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (E_c = \text{Elastisite Modülü}) \quad (2.3)$$

(K_m = Matris Kırılma Tokluğu)

Çatlak ucundaki malzemenin kırılması için gerekli enerji J_{tip} , literatürde genellikle çatlak ucu kırılma tokluğu olarak isimlendirilmektedir. Denklem 2.2'nin sol tarafı ise tamamlayıcı enerji (J_b') olarak adlandırılmaktadır. Çatlak açıklığı $\sigma(\delta)$ pik değerine ulaştığında tamamlayıcı enerji de masimum seviyesine ulaşmış olur (Şekil 2.6) (Denklem 2.4).

$$J_b' = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \quad (2.4)$$



Şekil 2.6 ECC'deki tek bir çatlakta gelişen tipik σ - δ ilişkisi (Zhou ve diğer., 2019)

Kararlı çatlak gelişimi için ise çatlak ucu kırılma tokluğu tamamlayıcı enerjiden daha düşük olmalıdır (Denklem 2.5).

$$J_b' > J_{tip} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5 ECC'nin çoklu çatlak davranışı gösterebilmesi için gerekli olan enerji kriterini ifade eder (Li, 2012). ECC tasarımında kullanılan malzeme çeşitliliği dikkate alındığında yüksek J_b' / J_{tip} oranı kararlı çatlak oluşumunun korunması açısından tavsiye edilmektedir (Kanda ve Li, 2006; Li, 2012; Zhou ve diğer., 2019).

2.3 ECC'nin Çeşitli Kullanım Amaçlarına Yönelik Özelleştirilmesi

Beton çeşitli malzemelerden oluşan heterojen bir yapıdadır. İçeriğinde değişiklikler yapılarak belirli bir uygulamanın taze ve sertleşmiş haldeki gerekliliklerine özel betonlar uzun yıllardır tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Bunlar hafif beton, yüksek dayanımlı beton, polimer modifiye beton, kendiliğinden yerleşen beton ve benzeri pek çok özel beton türüdür. İstenen yapısal performansı karşılayan karışım tasarlama fikri beton endüstrisinde uzun yıllardır kabul görmektedir. Bu bakış açısı mikromekanik temelleri sayesinde ECC için de geçerliliğini korumaktadır. Mikromekanik teori bir kılavuz olarak kullanıldığında çeşitli amaçlar için özelleştirilmiş ECC'ler üretilebilir.

2.3.1 Hibrit Lifli ECC

Mikromekanik teori, ECC'nin matris dayanımı, liflerin dayanımı, liflerin boyut ve geometrisi ile lif-matris arayüzey özelliklerini barındırır. Ancak bu teori tek tip lifli kompozitler için geliştirilmiştir. Son yıllarda farklı liflerin çeşitli oranlarda kullanılması ile oluşturulan hibrit lifli ECC'ler ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Tosun Felekoğlu ve Felekoğlu, 2013). Hibrit lif kullanımı yüksek çekme dayanımı, yüksek düktilite ve düşük maliyeti birlikte sağlama hedefi ile ortaya çıkmıştır. Çünkü ECC'nin üretim maliyetinin yaklaşık olarak %50'sini lif maliyeti oluşturmaktadır (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014). Yu, Chen ve Leung (2018),

PVA lif ve elik liflerin hibrit kullanımı ile üretilen ECC'lerin mikromekanik parametrelerinde meydana gelecek değişiklikler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Aderans ile ilgili parametrelerdeki değişimler, matristen tek bir lifin çekilmesi (pull out deneyi) ile tespit edilmiştir. Buna göre hibrit lifli ECC'lerde liflerin karşılıklı etkileşimlerinin de sayısal modelde yer alması, lif köprüleme gerilmesi hesaplarında klasik mikromekanik teoriye göre deneysel veriler ile daha uyumlu sonuç vermiştir.

Polimer liflerin kendi arasında farklı oranlarda hibrit kullanımı ile yapılan çalışmalarda genellikle birbirine göre daha yüksek ve düşük elastisite modülüne sahip lifler bir arada kullanılmıştır. Hidrofobik yüzey özeliğine sahip olan ve ECC teknolojisinde kullanılan diğer liflere göre daha düşük çekme dayanımına sahip olan HTPP ile hidrofilik yüzey özeliğine sahip PVA liflerin farklı oranlarda hibrit kullanımı ile çalışmalar yapılmıştır. HTPP/PVA oranındaki artış ile yalnızca PVA lifli ECC'lere kıyasla çekme dktilitesinde artış gözlenirken çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. ECC'nin lif fazının tasarlanması, matris fazının dayanımı önemli olup, güçlü matrisler için daha yüksek dayanımlı liflerin kullanımı çoklu çatlak davranışını destekler (Tosun Felekoğlu ve Felekoğlu, 2013). Bu sebeple matriste çeşitli boşluk ve kusur modifikasyonları ile matrisin kırılma tokluğunu düşürmek, çoklu çatlak davranışını destekleyici bir etki olacaktır. Al-Gemeel, Zhuge ve Youssuf, (2018) hibrit lifli ECC'nin matris fazında genleştirilmiş cam boncuk kullanarak kompozitin çoklu çatlak davranışını desteklemiştir. Boşluk modifikasyonu ECC'nin birim hacim ağırlığını da düşürerek ikinci bir etkiyle kompozitin kendiliğinden hafif olmasını sağlamıştır.

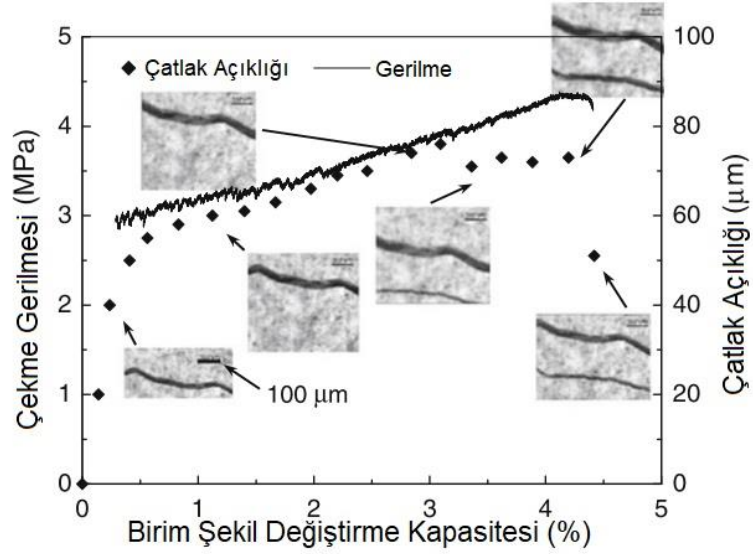
2.3.2 Hafif ECC

Uzun yıllardır çok çeşitli etkilerle betonun birim hacim ağırlığı azaltılmaktadır. Ancak tüm bu etkiler betonu olduğundan daha gevrek bir davranışa itmiştir. Hafif ECC retimi, hafif betonların geliştirilmesi ile benzer mekanizmaya sahiptir. Ancak iri agrega barındırmaması sebebiyle hafif mikro agregaların tercihi ya da sistem içerisinde oluşturulan tasarlanmış boşluklar ile ECC'lerin birim hacim ağırlığı düşürülmektedir.

ECC'nin yoğunluğu genellikle 2050 kg/m³ civarında olup klasik betona (2400 kg/m³) göre daha düşüktür. Ancak ECC, hafif beton (1850 kg/m³) sınıflandırmasının dışında kalır. Yüksek çekme düktilitesi ve hafifliği birlikte sağlayan ECC ile ilgili göze çarpan bir çalışma Wang ve Li tarafından 2003'te yapılmıştır. Bu çalışmada üç farklı hafifletirici kullanılmıştır. Bunlar; genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş cam boncuk, polimerik ve hava sürükleyici katkılar ile oluşturulan hava boşluklarıdır. Bu hafifletici dolgulardan en etkilisi kapalı hücre formu dolayısıyla lif dağılımını olumsuz etkilemeyen genleştirilmiş cam boncuk olarak belirlenmiştir. Bu dolgu ile ECC'nin yoğunluğu 1450 kg/m³'e kadar düşürölmüştür. Ancak, tasarlanan bu ECC çok yüksek çimento içeriği ve mikro - silika kumundan yüksek sıcaklıklar kullanılarak üretilen genleştirilmiş cam boncukları ile hem nihai maliyeti yükseltmiş hem de karbon ayak izini büyük ölçüde arttırmıştır. ECC'nin daha yaygın kullanım alanı bulabilmesi için ise çeşitli geri dönüşüm malzemelerinin, kompozit özelliklerini geliştirmede kullanılması teşvik edilmektedir. Bunun için yapılan çalışmalarda genellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu, geri dönüştürölmüş cam tozu gibi malzemeler kullanılmıştır (Wang ve Li, 2003; Huang ve diğer., 2013; Siad ve diğer., 2017). Son yıllarda hafifletilmiş ECC eldesinde hafif dolgu maddesi kullanımına alternatif olarak kompozitte boşluk oluşurmaya yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. Bu amaçla hava sürükleyici katkı veya polimerik lateks kullanılmıştır. Her iki alternatif de benzer hafifletici mekanizmaya sahiptir. Polimerik katkılarının çimento esaslı kompozitlerde sahip olduğu hava sürükleyici yan etki, kompoziti hafifletme aracı olarak faydalı hale getirilmiştir. Ne var ki bu yollarla elde edilen hafif ECC'lerin çatlak sayısı ve dolayısıyla tokluk kapasitelerinde düşüş gözlenmiştir (Zhang ve Li, 2017; Tosun Felekoğu ve Gödek, 2019).

Hafif ECC'de çekme düktilitesinin korunabilmesi için hafifletici etkinin lif, matris ve lif - matris arayüzey özellikleri üzerindeki etkisine dikkat edilmelidir. Yapılan çalışmalarda hafifletici etkinin, matristeki en düşük yoğunluklu bölge olan lif - matris arafaz bölgesini daha da zayıflattığı gözlenmiştir. Çoklu çatlak davranışının korunması için hafif ECC'lerde yüksek matris ile aderanslı hidrofilik liflerin kullanılması daha avantajlıdır (Li, 2012). Hafif ECC üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli etki matrisin kırılma tokluğudur. Matristeki kırılma tokluğunun düşürölmesi, sistemin

tokluk kapasitesini arttıracaktır. Böylelikle daha çok sayıda çatlak elde edilebilir. Fakat hafif ECC'lerde gözlenen çatlak açıklıkları klasik ECC'nin biraz üzerindedir (Şekil 2.7) (Li, 2012).



Şekil 2.7 Hafifletilmiş ECC'deki tipik gerilme - birim şekil değiştirme grafiği ile ortalama çatlak açıklıkları (Li, 2012)

Hava sürükleyici etki ile ECC'lerin hafifletilmesi literatürde yaygın olarak çalışılmıştır. Wang ve Li, (2003) hacimce %2 PVA lif kullanarak ürettikleri ve hava sürükleyici etki ile birim hacim ağırlığını düşürdükleri ECC'de %4'lük çekme birim şekil değiştirme kapasitesine ulaşmışlardır. Daha sonraki yıllarda erişimi göreceli olarak daha kolay ve daha uygun maliyetli bir lif olan HTPP ile de hafif ECC tasarımı yapılmıştır. Felekoğlu ve Gödek, (2019) hacimce %2 HTPP lif kullanarak ürettikleri ve hava sürükleyici katkı kullanarak birim hacim ağırlığında düşüş elde ettikleri ECC'de %2.5-3'lük çekme birim şekil değiştirme kapasitesi elde etmişlerdir. Her iki çalışmada da hava sürükleyici etkinin varlığı sistemi hafifletirken çatlak genişliklerinde kontrol grubu ECC'lere göre artış meydana getirmiştir. Bu etki hidrofobik lif kullanımında daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.

Zhang ve Li, (2015) püskürtülebilen ultra hafif ECC'ler (PH-ECC) üzerinde çalışmıştır. Bu tip ECC'ler pek çok ihtiyaca eş zamanlı cevap verebilir. Yapı çeliği

üzerine uygulanabilirliği çalışılan PH-ECC'nin daha adeziv davranabilmesi için 2017 yılında polimer modifiye PH-ECC üzerinde çalışılmış, polimer kullanımı yapısı gereği adezyonu arttırırken hava sürükleyici etkisiyle de sistemin birim hacim ağırlığının düşüşüne destek olmuştur (Zhang ve Li, 2017).

2.3.3 Polimer Modifiye ECC

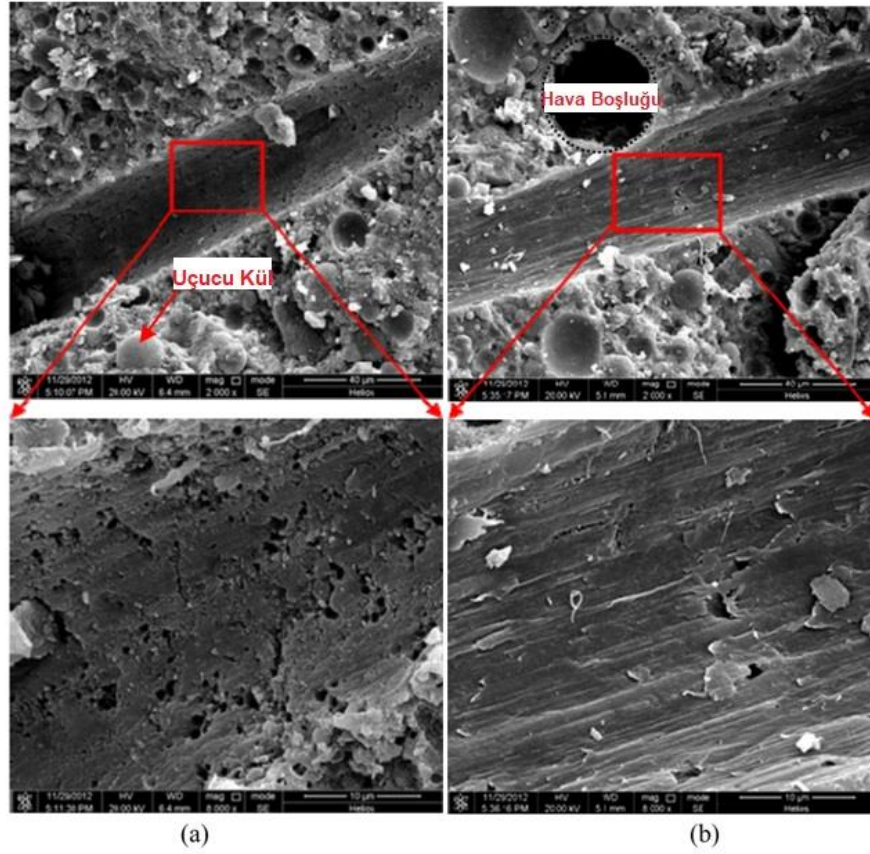
Polimer modifiye beton ile ilgili çalışmalar uzun bir geçmişe sahip olsa da polimer modifiye ECC üzerine oldukça az sayıda çalışma mevcuttur. Lateks modifikasyonu ECC'nin reolojik özelliklerini ve dolayısıyla liflerin matris içerisindeki dağılımını etkileyebilir. Polimer modifikasyonu ile sisteme sürüklenen hava, boşluk modifikasyonu sağlarken kompozitin lif-matris arayüzey özelliklerini de etkiler. Uygun kompozisyon ile her iki özellik de kompozitin mekanik özelliklerini iyiye götürebilir.

Ghugal ve State (2016), polipropilen lifli betonda polimer modifikasyonunu incelemiştir. Çalışmalarında polimer modifiye kompozitlerde işlenebiliriliğin iyileştiğini ve çekme dayanımının yalın lifli kompozite göre arttığını ifade etmişlerdir. Ancak bu iyileşme yalnızca havada kür görmüş polimer modifiyeli seriler için geçerli olabilmektedir. Lee ve arkadaşları (2018), polipropilen ile makrosentetik lifleri hibrit kullanarak hazırladıkları lifli betonda lateks modifikasyonu yapmıştır. Yapılan polimer modifikasyonu, uygun koşullar sağlandığında lateksin lifli kompozitlerin özelliklerinin iyileştiğini gösteren bir diğer çalışmadır.

Lifli kompozitler için yeni nesil bir yaklaşım olan polimer modifikasyonu, ECC'de de karşılık bulmuştur. Çekme gerilmeleri altında yüksek tokluğa sahip olan bu tür kompozitlerde deformasyon sertleşmesinin kaynağı çoklu çatlak davranışıdır. Polimerlerin çatlak köprüleme özelliğinin çoklu çatlak davranışını zayıflatacağı öngörülebilir. Ancak optimum tasarım ile ECC'nin özellikleri polimer modifikasyonu ile daha da ileriye taşınabilir.

Chen, Yang, Yang ve Yao (2014), lateks ile modifiye edilmiş PVA lifli ECC'ler üzerine çalışmıştır. Farklı oranlarda lateks ile modifiye edilen ECC'lerde kompozitin lif-matris arayüzey özelliklerinin lateksin adeziv davranışından olumsuz

etkilenmemesi adına, seçilen lifler %1,2 oranında yağ kaplanarak hidrofilik etkisi azaltılmış PVA'lardır. Çalışmada polimer modifikasyonunun hava sürükleyici etkisiyle ECC'nin basınç dayanımında beklenen düşüş gözlenmiştir. Ancak çekme dayanımında da kullanılan polimer dozajının artışıyla bir düşüş meydana gelmiştir. Bu durum lateks kullanımının liflerin köprüleme kapasitesini düşürdüğünü gösterir. Aynı zamanda yüksek dozajdaki lateks kullanımında oluşan çatlakların açıklıkları da daha yüksektir. Bu da lateks kullanımının liflerin gerilme köprülemesindeki rijitliğini azalttığını gösterir. Her iki gözlem de lateks kullanımının lif - matris arayüzey özelliklerini zayıflattığı sonucuna götürür. Şekil 2.8'de Lateks modifiye edilmiş ve yalın ECC'lerin lif matris arayüzey özellikleri görülmektedir.



Şekil 2.8 ECClerin lif-matris arafazı a) Lateks ile modifiye ECC b) Yalın ECC (Chen, Yang ,Yang ve Yao, 2014)

Şekil 2.8’de görüldüğü üzere lateks kullanımı matris fazında mikro porozite oluşturur. Bu da lif matris arayüzeyini daha zayıf kılar. Yapılan çalışmada kullanılan lateks miktarının artmasıyla daha yüksek çekme birim şekil değiştirme kapasitesine ulaşılmış ancak ortalama çatlak açıklıkları $105\ \mu\text{m}$ ’ye çıkmıştır (Chen, Yang ,Yang ve Yao, 2014).

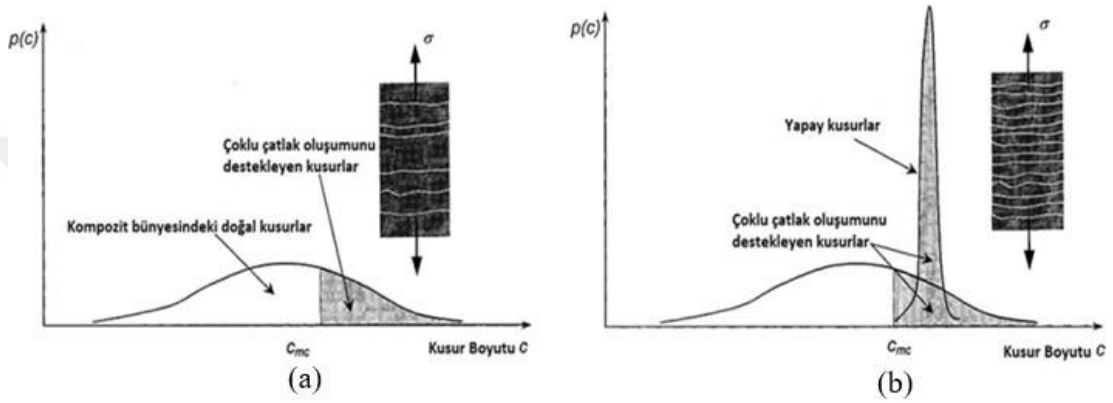
ECC’de lateks kullanımı lateksin hava sürükleyici etkisi ile çatlak ucu tokluğunu (J_{up}) azaltırken, liflerin köprüleme rijitliğini de azaltır ki bu da tamamlayıcı enerjiyi (J_b) artırır. Bu açıdan bakıldığında lateks modifikasyonu mikromekanik modelin dayanım kriterini (Denklem 2.5) destekleyici etkidedir (Chen, Yang, Yang ve Yao, 2014).

Zhang ve Li, (2018) tasarladıkları püskürtülebilen polimer modifiye ultra hafif ECC’de HTPP lif tercih etmiştir. Yaptıkları tek lif çekme deneylerinde, lifler ile matris fazı arasında kimyasal bir bağ geliştiğini gözlemlemişlerdir. HTPP hidrofobik doğası gereği matris ile bağ yapma eğilimi taşımaz. Bu kimyasal bağın kaynağı polimer matristir. Çalışmada, polimer matris - polimer lif arasında gerçekleşen kimyasal bağın, düşük adezyona sahip hidrofobik lifler ve/veya hafifletilmiş matrislerde faydalı olacağı belirtilmiştir. Normal ağırlıklı ve hidrofilik lifli (PVA vb.) ECC’lerde ise lateks modifikasyonu mikromekanik teorisinin enerji kriterini zorlayabilir.

ECC teknolojisindeki ilerlemeler mikromekanik teori esaslarına göre yapılan modifikasyonlardan kaynaklanır. Polimer modifiye ECC’ler polimer modifikasyonunun mikromekanik etki üzerindeki artı ve eksileriyle geliştirmeye açıktır.

Yüksek düktiliteli yüksek dayanımlı ve hafif kompozit eldesinde şimdiye kadar pek çok farklı yaklaşım üzerinde çalışılmıştır. Bunlar kullanım amaçlarına yönelik iyileştirmelerin yanı sıra temelinde boşluk ve kusur modifikasyonları ile matrisin kırılma tokluğunu kontrol etmek ya da liflerin köprüleyeceği gerilmeyi kontrol etmek gibi mikromekanik teoriyi destekleyici ikincil etkiler barındırır. Wang, (2005) yılındaki çalışmasında matristeki doğal kusurların kontrol edilmesi ya da kusur

dağılımının modifikasyonu ile kompozitin çatlak sayısının ve sıklığının arttırılabileceğini belirtmiştir (Şekil 2.9). Matristeki kusur modifikasyonu yoluyla çoklu çatlak davranışının desteklenmesine yönelik çalışmalarda uçucu kül, metakaolin, polietilen plastik boncuklar, düşük ağırlıklı mikro - agregalar, lastik parçaları, genişletilmiş cam boncuk ve öğütülmüş cam tozu gibi malzemeler kullanılmaktadır. (Wang ve L, 2003; Siad ve diğer., 2017; Lu, Li ve Leung, 2018; Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019).



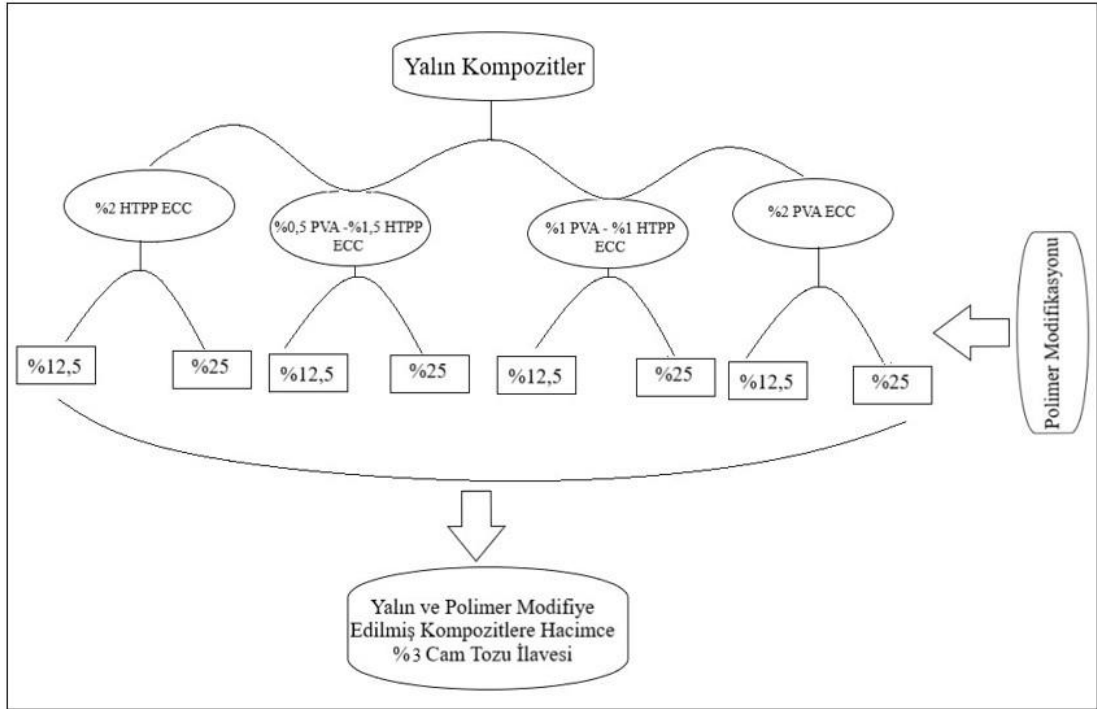
Şekil 2.9 Matris kusur modifikasyonunun olasılık - yoğunluk şeması (C_{mc} : Kritik kusur boyutu)
a) ECC'deki doğal kusurların boyut dağılımı ve karşılık gelen çekme davranışı b) Yapay kusurların boyut dağılımı ve buna karşılık gelen doygun çoklu çatlama ile çekme davranışı (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019)

Tosun Felekoğlu ve Gödek, (2019) matriste oluşturulan tasarlanmış kusurların çoklu çatlak davranışını, tokluk kapasitesindeki artışı ve çatlak açıklıklarındaki azalışı destekleyici etkidiğini gözlemlemiştir. Adesina ve Das, (2020) matristeki kusur modifikasyonunu cam tozu kullanarak gerçekleştirmiştir, bu yolla ECC'nin çekme dayanımında artış elde ederken kompozitin yoğunlunu düşürmüştür. Huang ve diğer., (2013) ECC'deki boşluk modifikasyonunun mikromekanik teoriyi destekleyici etkisinin yanı sıra kompoziti hafifletici etkisinden de faydalanmıştır. Sürdürülebilir matris tasarımı için modifikasyonlarda geri dönüşümlü malzemelere yönelim tavsiye edilmektedir (Hanif ve diğer., 2016).

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında “Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif (HTPP)” ve “Polivinil Alkol Lif (PVA)” kullanarak ECC örnekleri hazırlanmıştır. Seriler, liflerin yalın ve hibrit kullanımı ile üretilmiştir. Lifler hacimce %2 oranında kullanılmış, hibrit lifli serilerde ise %1,5-0,5 ve %1-1 oranlarında değişim yapılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Polimer modifikasyonu, ECC’nin karışım suyunun %12,5 ve %25 oranlarında polimer emülsiyonu ile ikame edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan polimer “Stiren Akrilik Kauçuk (SAR)” kökenlidir. Polimer modifikasyonunun hava sürükleyici etkisi kompoziti hafifletirken, iç yapıda meydana gelen polimer filmlerinin de kompozitin çekme dayanımını yükseltmesi öngörülmüştür. Ayrıca ECC’nin çoklu çatlak davranışını geliştirmek amacıyla matrisin kırılma tokluğunun karışıma hacimce %3 oranında geri dönüştürülmüş granüle cam tozu eklenmesi ile düşürülmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar şematik olarak Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Sistematik deneysel akış şeması

Yapılan ön çalışmalar sonucunda hacimce %2 oranında HTPP lif içeren, 1,2 su/çimento oranına sahip ECC referans kompozit olarak seçilmiştir. Karışım PVA lifler ile çeşitli oranlarda (%0,5; %1,5) hibrit olarak hazırlanmıştır. Tüm serilerin karışım suları %12,5 ve %25 oranlarında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş, aynı seriler hacimce %3 cam tozu ilavesi ile de hazırlanmıştır. Su/çimento oranı sabit tutularak liflerin hibrit kullanımı, karışım suyunun polimer emülsiyonu ile ikamesi ve matriste cam tozu kullanımı gibi değişkenlerin ECC performansına etkisini incelemek üzere toplamda 24 farklı seri hazırlanmıştır.

ECC'nin performansı çekme dayanımı ve birim şekil değiştirme kapasitesinin yanı sıra meydana getirdiği çatlakların sayısı, ilk çatlak dayanımı ve çatlakların genişliği ile de irdelenir. Klasik deformasyon ölçüm yöntemleri ile söz edilen tüm bu parametrelerin ölçülmesi mümkün değildir. Bu tez kapsamında ECC üzerinde yapılan modifikasyonların performansının incelenmesinde yeni bir deformasyon ölçüm tekniği olan Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation - DIC) yönteminden faydalanılmıştır.

DIC, matematik tabanlı yeni nesil bir temassız ölçüm metodudur. Bu yöntemde numune, yüzeyi rastgele beneklendirilerek görüntü kaydı altında yüklemeye tabi tutulur. Yükleme öncesi ve sonrasına ait dijital görüntüler, matematiksel fonksiyonlar aracılığıyla analiz edilir. Yükleme öncesindeki görüntü referans alınarak yükleme boyunca yüzeyde meydana gelen değişimler belirlenir ve bu yolla cismin deformasyon vektörleri elde edilir (Wang ve Cuitiño, 2002). Son yıllarda ECC'nin performans ölçümlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi klasik ölçüm metodlarına göre sağladığı avantajlarıyla ECC'nin kritik parametreleri hakkında yorum yapabilmeyi mümkün kılmasıdır. Felekoğlu ve Keskinates, (2016) DIC tekniği ile ECC'lerde yapılan çatlak gelişimi ve deformasyon takibinin nicel veriler sağladığını belirtmiştir. DIC yöntemiyle deformasyon takibinin yanı sıra çatlak sayısının ve çatlak genişliklerinin incelenmesi de mümkündür (Yıldırım ve diğer., 2019).

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Çimento

Tez kapsamında hazırlanan kompozitlerde CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoş'tan temin edilmiş olan çimentonun üretici tarafından beyan edilen kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

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

Kimyasal Analiz	Basit Oksit Oranları (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
SiO ₂	18,57	2 Günlük 28,5 7 Günlük 43,0 28 Günlük 54,3	
Al ₂ O ₃	4,95		
Fe ₂ O ₃	3,11		
CaO	63,94		
MgO	0,98	Fiziksel Özellikler	
Na ₂ O	0,37		
K ₂ O	0,75	Özgöl ağırlık	3,09
SO ₃	3,07	Özgöl Yüzey (m²/kg)	337
Kızdırma Kaybı	3,57	90µm elek üstü (%)	0,7
Klor	0.006	45µm elek üstü (%)	19,3
Çözünmeyen Kalıntı	0,21	Hacim sabitliği (mm)	0,5
Serbest CaO	1,03	Vicat Suyu (%)	28

3.1.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Kompozitlerin hazırlanmasında Bursa Beton'dan temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. YFC'nin üretici tarafından bildirilen kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

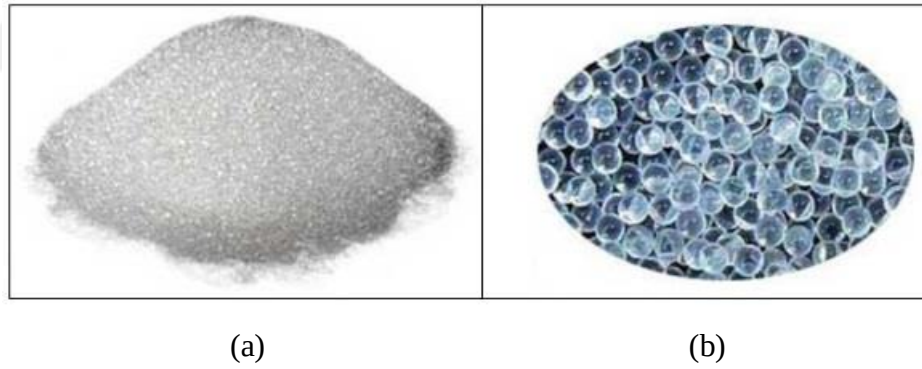
Tablo 3.2 Granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	S ⁻² (%)	Cl ⁻ (%)	CaO+MgO/Si O ₂ (%)
38,35	12,91	1,13	38,31	5,53	0,20	0,52	0.014	1,14
Kızdırma Kaybı (%)		P.A.İ* (%)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		Özgül Yüzey (cm ² /g)		45µm elek üstü (%)	
0,03		51,3	2,89		5222		0,6	

P.A.İ* = Puzolanik aktivite indeksi

3.1.3 Granüle Cam Tozu

Çapı 1 mm den daha küçük olan küresel camlara granüle cam küre ya da cam kürecik denilmektedir (Şekil 3.2). Piyasada cam küre, cam kumu, cam bilye, cam tozu da denilmekte olup özellikle paslanmaz çelik ve alüminyum yüzeyler kumlanırken yoğun miktarda kullanılmaktadır. Hammaddesi geri dönüştürülmüş camdır.



Şekil 3.2 a) Granüle cam tozu b) Granüle cam tozunun optik mikroskoptaki görünümü (Saykar, 2020)

Deneysel çalışmalar için hazırlanan kompozitlerde Saykar firmasına ait granüle cam tozu kullanılmıştır. Kullanılan cam tozu; serbest silika içermez, inert yapıya sahiptir, korozyona neden olmaz, oksijen ile raksiyona girmez, yanıcı değildir ve kanserojen madde içermemektedir. Cam tozunun üretici tarafından beyan edilen kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 a) Granüle cam tozunun kimyasal özellikleri b) Granüle cam tozunun fiziksel özellikleri

SiO₂ (%)	> 65	Özgöl Ağırlık (g/cm³)	2,45
Al₂O₃ (%)	0,5-2	Dökme Yoğunluğu (g/cm³)	1,50
CaO (%)	8-11	Serbest Akış Özelliği (%min)	97
MgO (%)	3-5	Nem Tutma Özelliği	Yüksek
Fe₂O₃ (%)	< 0,2	Radyoaktivite Özelliği	Yoktur
K₂O (%)	< 1,5	Manyetiklik Özelliği	Yoktur
Na₂O (%)	13-15	Elektrik İletim Özelliği	İletmez
		Tanecik Boyutları (mikron)	400-625

(a)

(b)

3.1.4 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif (HTPP)

Yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP), Brezilya’da bulunan Brasilit firmasından temin edilmiştir. HTPP lifler hidrofobik yüzey özelliğine ve yüksek alkali direncine sahiptir (Li, 2012). Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen kompozitlerde kullanılan HTPP liflerin üretici tarafından beyan edilen fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. HTPP liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgöl Ağırlık	0,91
Lif Uzunluğu (mm)	10
Lif Çapı (µm)	12
Elastisite Modülü (GPa)	6
Çekme Dayanımı (MPa)	850
Kopma Uzaması (%)	21

3.1.5 Polivinil Alkol Lif (PVA)

Polivinil alkol lifler hidrofobik yüzey özelliğine sahiptir. Aşınmaya karşı direnci yüksektir (Li, 2012). Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan PVA liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.5’te verilmiştir.

Tablo 3.5 PVA liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgöl Ağırlık	1,3
Lif Uzunluğu (mm)	12
Lif Çapı (μm)	39
Elastisite Modülü (GPa)	42,8
Çekme Dayanımı (MPa)	1620
Kopma Uzaması (%)	6

3.1.6 Polimer Lateks Emülsiyonu

Çalışma kapsamında akrilik ester kopolimeri olan, Stiren Akrilik Kauçuk (SAR) esaslı Acronal S 400 ticari isimli polimer katkı kullanılmıştır. BASF Türkiye’den temin edilmiş olan Acronal, çimento esaslı kompozitlerde çatlak köprüleyici etkisi dolayısıyla sisteme esneklik kazandırmak için kullanılmaktadır. Karışımda çimento ağırlığının %5-%50’si oranlarında kullanılabilir (Wang ve diğer., 2005). Acronal S400’ün üretici tarafından beyan edilen özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.6 Acronal S 400’ün fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal Köken	Stiren akrilik kauçuk kopolimeri
Katı Madde İçeriği (% ağırlık)	57+/-1
pH Değeri	7,0-8,0
Viskozite (23°C’de 25s⁻¹)	140-200 mPas
Emülgatör Tipi	-
Camsı Dönüşüm Sıcaklığı	-6°C
Ortalama Tane Çapı	0,2μm
Emülsiyon Yoğunluğu	1,04 g/cm ³
En Düşük Film Oluşturma Sıcaklığı	< 1°C
Film Çekme Dayanımı	0,3 N/mm ²
Film Kopma Uzaması	> %2500

3.1.7 Süperakışkanlaştırıcı Katkı

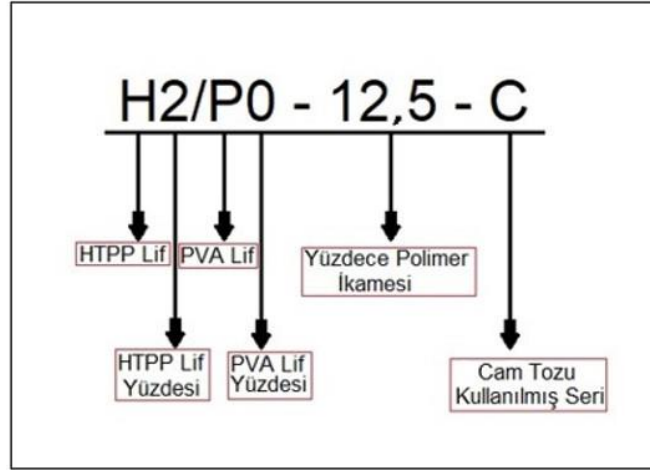
Deneyisel çalışmalar kapsamında hazırlanan kompozitlerde ADVA FLOW 375 N ticari isimli katkı kullanılmıştır. Grace firmasından temin edilmiş olan bu katkı polikarboksilat esaslı olup, TS EN 934-2 standartlarına göre yüksek oranda su azaltıcı/süperakışkanlaştırıcı katkı sınıfına girer. Beton karışımlarında kullanıma uygundur. Katkının üretici firma tarafından beyan edilen özellikleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Süperakışkanlaştırıcı katkının (ADVA FLOW 375 N) özellikleri

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

3.2 Kompozitlerin Üretimi ve Karışım Oranları

Deneyisel çalışmalar kapsamında üretilen örneklerde lif olarak yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP) ve polivinil alkol lif (PVA) kullanılmıştır. Kompozitler liflerin yalın ve hibrit kullanımı ile tasarlanmıştır. Kompozitlerin matris fazında süperakışkanlaştırıcı katkı ve polimer emülsiyonu kullanılmış olup mekanik özellikleri iyileştirmek adına karışımlar hacimce %3 oranında cam tozu ilavesi ile de hazırlanmıştır. Toplam 24 döküm gerçekleştirilmiş ve 96 adet numune üretilmiştir. Numunelerin isim etiketleri ve deneyisel çalışmalar kapsamında hazırlanan kompozitler sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te verilmiştir.



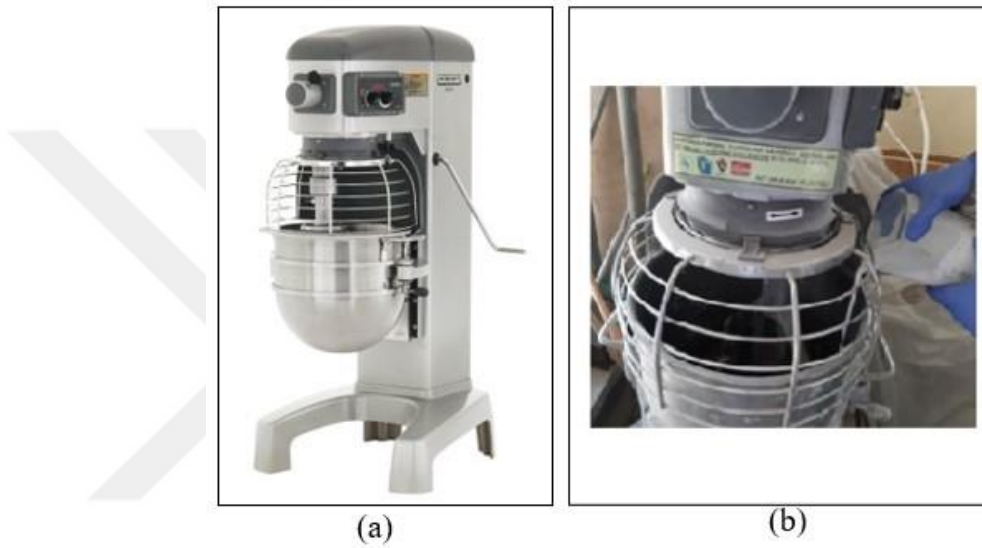
Şekil 3.3 Hazırlanan numunelerin isimlendirilmesi

Karışım hesaplarında Su/Çimento ve Puzolan/Çimento oranları sabit tutulmuştur. Sistemik deneylerde kullanılan karışım reçetelerinin 1 m³ için ağırlıkları Tablo 3.9’de verilmiştir.

H2/P0		H2/P0 – C
H2/P0 – 12,5	→ %3 Cam tozu	H2/P0 – 12,5 – C
H2/P0 – 25		H2/P0 – 25 – C
H1,5/P0,5		H1,5/P0,5 – C
H1,5/P0,5 – 12,5	→ %3 Cam tozu	H1,5/P0,5 – 12,5 – C
H1,5/P0,5 – 25		H1,5/P0,5 – 25 – C
H1/P1		H1/P1 – C
H1/P1 – 12,5	→ %3 Cam tozu	H1/P1 – 12,5 – C
H1/P1 – 25		H1/P1 – 25 – C
H0/P2		H0/P2 – C
H0/P2 – 12,5	→ %3 Cam tozu	H0/P2 – 12,5 – C
H0/P2 – 25		H0/P2 – 25 – C

Şekil 3.4 Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan kompozitler

Karışımların hazırlanmasında 40 lt kapasiteli zemin tipi Hobart mikser kullanılmıştır (Şekil 3.5). Kullanılan Hobart mikser üç farklı karıştırma hızına (56, 104, 185 dev/dak) sahiptir. Öncelikle toz malzemeler mikserin birinci devrinde 3 dakika kuru karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma su ve/veya polimer emülsiyonu ilave edilerek 1 dk birinci devirde 2 dk ikinci devirde karıştırılmıştır. Uygun lif dağılımının sağlanması için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı katkı ve ardından lifler karışıma eklenmiştir. Nihai matris 3 dk ikinci devirde karıştırılmıştır.



Şekil 3.5 a) Hobart mikser b) Karışımın hazırlanması (Kişisel arşiv, 2019)

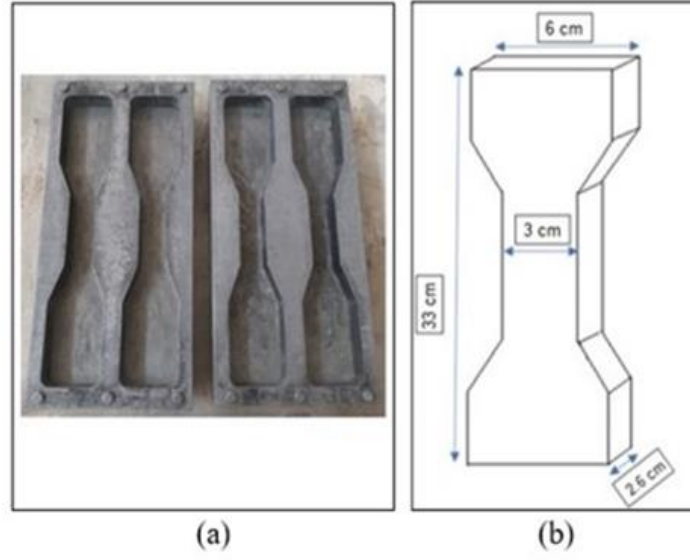
Hazırlanan karışımlar 26 mm kalınlığındaki kemik biçimli tek eksenli çekme kalıplarına alınmıştır (Şekil 3.6). Karışımın sıkıştırılması yapılan özenli perdahlama ile gerçekleştirilmiştir. 2 gün sonra kalıptan alınan numuneler $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki su kürü havuzuna alınmıştır. Polimer emülsiyonu barındırmayan serilere 28 günlük su kürü, polimer modifiye edilmiş serilere ise 7 gün su kürü ve ardından 21 gün hava kürü uygulanmıştır.

Tablo 3.8 Hazırlanan kompozitlerin 1 m³ için karışım reçeteleri

Numune Adı	Matris Bileşenleri (kg)					
	Çimento	YFC	Cam Tozu	ADVA Flow 375N	Acronal S-400	Su
H2/P0	400	1000	-	3,6	-	479
H2/P0 – 12,5	400	1000	-	4,5	59	423
H2/P0 – 25	400	1000	-	6,3	118	362
H2/P0 – C	400	1000	75	-	-	479
H2/P0 – 12,5 – C	400	1000	75	4	59	423
H2/P0 – 25 – C	400	1000	75	5,4	118	362
H1,5/P0,5	400	1000	-	4	-	479
H1,5/P0,5 – 12,5	400	1000	-	4,5	59	423
H1,5/P0,5 – 25	400	1000	-	6,3	118	362
H1,5/P0,5 – C	400	1000	75	2,7	-	479
H1,5/P0,5 – 12,5 – C	400	1000	75	4	59	423
H1,5/P0,5 – 25 – C	400	1000	75	5,9	118	362
H1/P1	400	1000	-	4	-	479
H1/P1 – 12,5	400	1000	-	4	59	423
H1/P1 – 25	400	1000	-	5,9	118	362
H1/P1 – C	400	1000	75	2,5	-	479
H1/P1 – 12,5 – C	400	1000	75	4,5	59	423
H1/P1 – 25 – C	400	1000	75	5,2	118	362
H0/P2	400	1000	-	4	-	479
H0/P2 – 12,5	400	1000	-	4	59	423
H0/P2 – 25	400	1000	-	5,4	118	362
H0/P2 – C	400	1000	75	2,5	-	479
H0/P2 – 12,5 – C	400	1000	75	4,5	59	423
H0/P2 – 25 – C	400	1000	75	5,2	116	362

*Her kompozit hacimce %2 lif içermektedir.

**Kompozitlerde kullanılan liflerin tür ve yüzdeleri Şekil 3.3'te belirtilmiştir.

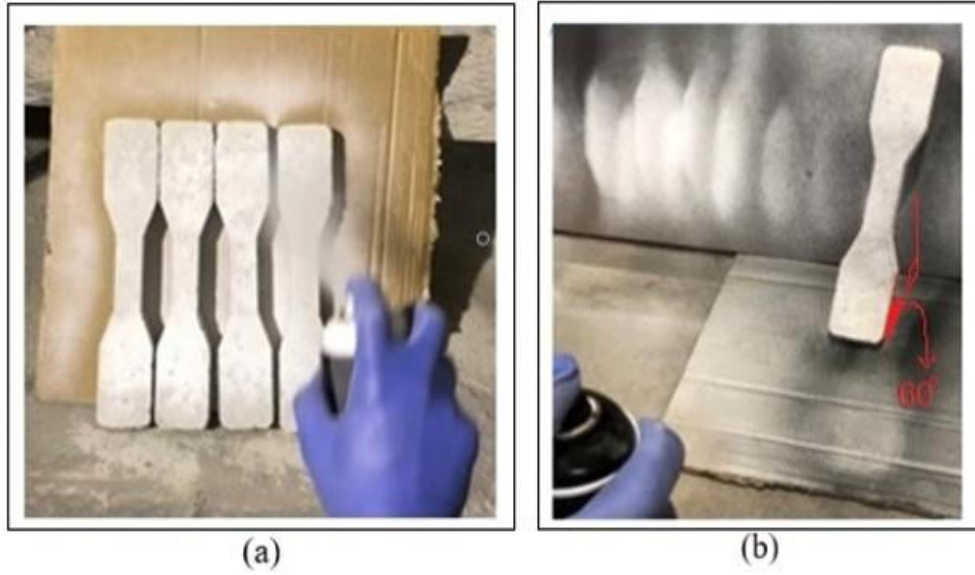


Şekil 3.6 a) Kemik biçimli tek eksenli çekme kalıpları b) Kalıp ölçüleri (Kişisel arşiv, 2019)

Üretilen numuneler DIC analizi için gerekli yüzey işlemlerinden geçirilmiş daha sonra tek eksenli çekme deneyine tabi tutulmuştur.

3.2.1 Numunelerin Deneye Hazırlanması

Dijital görüntü korelasyonu (DIC) yeni nesil bir deformasyon ölçüm yöntemidir. Bu yöntemin doğru çalışabilmesi için numunenin uygun şekilde hazırlanması gerekir. Numune yüzeyinde yapılacak beneklemenin analize cevap verecek hassasiyette olması için yüzeydeki fazla lifler yakılarak temizlenmiştir. Numune yüzeyindeki beneklemenin yoğunluğu ve kalitesi DIC analizini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Yüzeyi pürüzsüz hale getirilmiş olan numune öncelikle spreyci boya ile beyaza boyanmıştır. Boyama öncesinde numunenin kuru halde olmasına özen gösterilmiştir. DIC analizinde benekleme ile fon arasındaki yüksek kontrastın analize olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. Bu nedenle beyaz boyanın numune yüzeyi üzerinde üniform olması çatlakların takibi açısından kritiktir. Bu işlem sırasında boyanın açılacak çatlakların gözlenmesini önleyecek kalınlıkta olmamasına özen gösterilmiştir (Şekil 3.7a).



Şekil 3.7 Numunelerin yüzey hazırlığı a) Yüzeyin beyaza boyanması b) Siyah sprej boya ile benekleme (Kişisel arşiv, 2019)

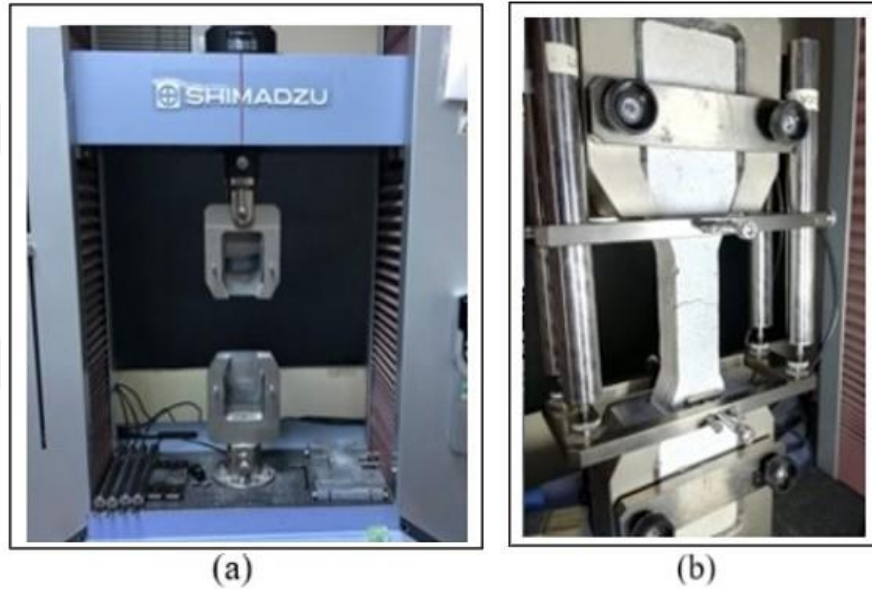
Numunelerde oluşacak deformasyonların dijital görüntü korelasyonu ile doğru şekilde tespit edilebilmesi için numunelerin yüzeyleri beneklenmiştir. Benekleme işlemi beyaz fon üzerine siyah sprej boya ile gerçekleştirilmiştir. Benekleme, karşı düzleme yaklaşık 60 derecelik açı ile yaslanmış numune yüzeyine sprej boyanın püskürtülmesi ile yapılmıştır. Sprej karşı düzleme yaklaşık 80 cm uzaklıkta ve paralel tutulmuştur (Şekil 3.7b). Boyanın 4 kez püskürtülmesi ile benekleme tamamlanmıştır. Tüm numunelerde birbirine yakın yoğunlukta benek elde etmek amacıyla aynı yol izlenmiştir.

3.3 Tek Eksenli Çekme Deneyi

Tek eksenli çekme deneylerinde 50kN kapasiteli SHIMADZU çekme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.8a). Deney, Trapezium yazılımı ile hazırlanmış metot aracılığı ile kumanda edilmiştir. Hazırlanan metotta yükleme hızı 0,5 mm/dak olarak belirlenmiştir.

Tek eksenli çekme deneyi hassasiyet gerektiren bir düzeneğe sahiptir. Düzeneğe uygun biçimde yerleştirilmemiş numunelerde yükleme ile birlikte eksen kayması ve

buna bağı olarak istenmeyen gerilmeler meydana gelebilir. Deneyler esnasında basınç ya da burulma gibi gerilmelerin meydana gelmesini önlemek amacıyla numuneler deney düzeneğine vidalar yardımı ile sabitlenmiştir. Deney esnasında numunede meydana gelen birim şekil değıştirmeler numunenin ön ve arkasında ikişer tane konumlandırılmış olan dört adet “Doğrusal Değişken Diferansiyel Dönüştürücü” (Linear Variable Differential Transformer – LVDT) aracılığı ile tespit edilmiştir (Şekil 3.8b). Birim şekil değıştirme değğerlerinin tespitinde dört adet LVDT’den alınan değğerlerin ortalaması kullanılmıştır. Örneklerin çatlak takip ve analizlerinde DIC yönteminden faydalanılmıştır.



Şekil 3.8 Tek eksenli çekme deney düzeneğı a) SHIMADZU çekme cihazı b) Numune ve LVDT'lerin düzeneğdeki yerleşimi (Kişisel arşiv, 2019)

DIC analizi için görüntü alımında kullanılan kamera Canon EOS 750D modeli olup kullanılan lens Canon EF-S 55-250 mm’dir (Şekil 3.9). Kamera CMOS sensörlü olup 24,2 MP çözünürlüğe sahiptir. Kullanılan lens ise titreşim önleyici görüntü sabitleme özelliğine sahip dar açılı ve uzak odaklı bir lenstir. Tüm numuneler için görüntü alımında kullanılan parametreler; diyafram (F) F5.6, çekim hızı (enstantane) 1/20 ve ışığa duyarlılık derecesi (ISO) ise ISO 200 olarak belirlenip sabit tutulmuştur.



Şekil 3.9 DIC analizi için kullanılan kamera ve lens (Canon EOS 750D, 2020)

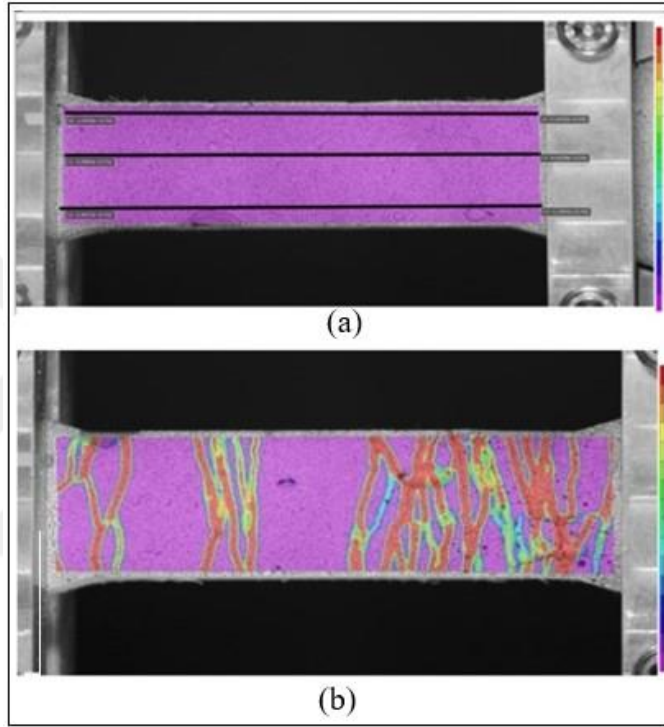
DIC sisteminde kullanılan kamera, numune ile 130 cm’lik mesafeye kurulmuştur. Kamera, optik aksları numune üzerinde ve numuneye dik; aynı zamanda kamera ile numune yüzeyi de birbirine paralel olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.10). Bunun için üç eksenli su terazisinden ve lazer düzleyiciden faydalanılmıştır. Numune yüzeyini aydınlatmak için iki adet soğuk ışık kaynağı kullanılmıştır. Işık kaynaklarının yüzeyde parlama oluşturmaması, gölgelenmeyi en aza indirmesi ve tüm yüzeyi aydınlatması analiz doğruluğu açısından önemlidir.

DIC analizi için numune üzerindeki yüklemenin başlaması ile birlikte fotoğraf makinesi de görüntü alımına başlatılmıştır. Deney süresince her 5 saniyede bir görüntü alınmıştır.



Şekil 3.10 Dijital görüntü korelasyonu ve tek eksenli çekme deneyi düzeneği (Kişisel arşiv, 2020)

Deneyin sonlanmasının ardından elde edilen görüntüler VIC-2D yazılımı aracılığı ile analiz edilmiştir. Analizde görüntüler üzerinde belirlenen altkümeler ile her numune için çatlak takibi yapılmış, nihai çatlak durumu gözlenmiş ve numune üzerinde oluşturulan sanal LVDT'ler ile deformasyon verileri alınmıştır (Şekil 3.11). Alınan veriler üzerinden MATLAB algoritması yardımıyla çatlak sayıları ve genişlikleri sayısal olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.11 VIC-2D yazılımı ile DIC analizi a) Görüntü üzerindeki sanal LVDT'ler b) Deforme olmuş numune üzerinde çatlakların görünümü (Kişisel arşiv, 2020)

3.4 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

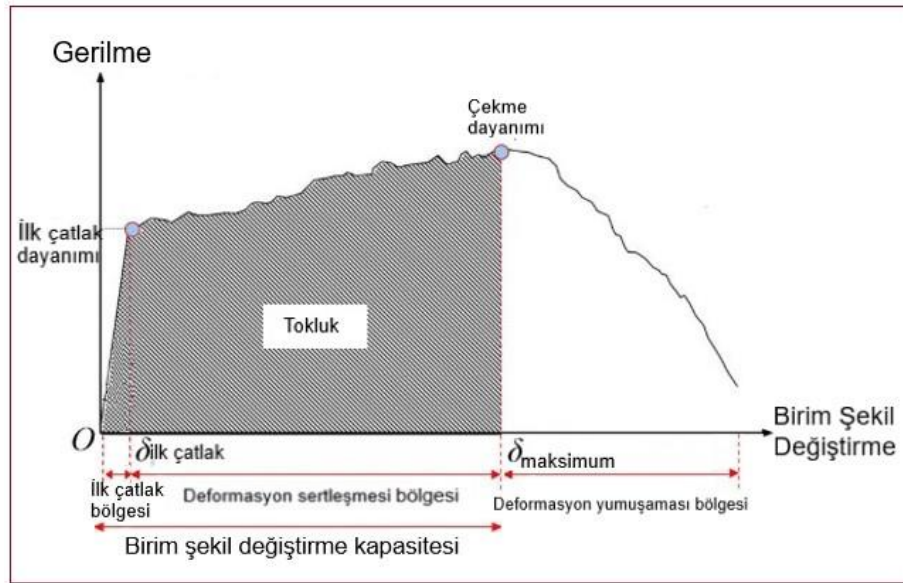
Deneyisel çalışmalar kapsamında hazırlanan kompozitlerin ağırlıkları, çekme yüklemesi karşısındaki mekanik özellikleri ve çatlak gelişimleri incelenmiştir. Kompozitler kuru ağırlıkları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Hazırlanan kompozitlere tek eksenli çekme deneyi uygulanmıştır. LVDT'ler numunelerin her iki yanında, ön ve arkada konumlandırılmıştır. Numunelerin arka

yüzeyinde yer alan LVDT'lerden burulma ya da basınç gibi istenmeyen gerilmelerin varlığı kontrol edilmiş ve bu tür gerilmelere rastlanmamıştır. Gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri, dört adet LVDT'den alınan değerlerin ortalamaları ile çizdirilmiştir. Bu grafiklerden faydalanarak kompozitlerin çekme dayanımı, birim şekil değiştirme kapasitesi ve tokluk kapasitesi değerleri belirlenmiştir.

Yüklemeye altında ECC'de meydana gelen ilk çatlak, kompozitin gerilme - birim şekil değiştirme grafiğindeki lineer elastik bölgede meydana gelen ilk bozulma ile belirlenir. Bu noktada okunan gerilme değeri kompozitin ilk çatlak dayanımını vermektedir (Şekil 3.12). İlk çatlak dayanımı kompozitin matris özellikleri ile ilişkilidir (Tosun-Felekoglu ve Felekoglu, 2013). Grafik üzerinde deformasyon sertleşmesi davranışının sonlandığı nokta, kompozitin çekme dayanımını ifade eder. Çekme dayanımı lif ve lif - matris arayüzey özellikleri ile ilişkilidir (Li, 2012).

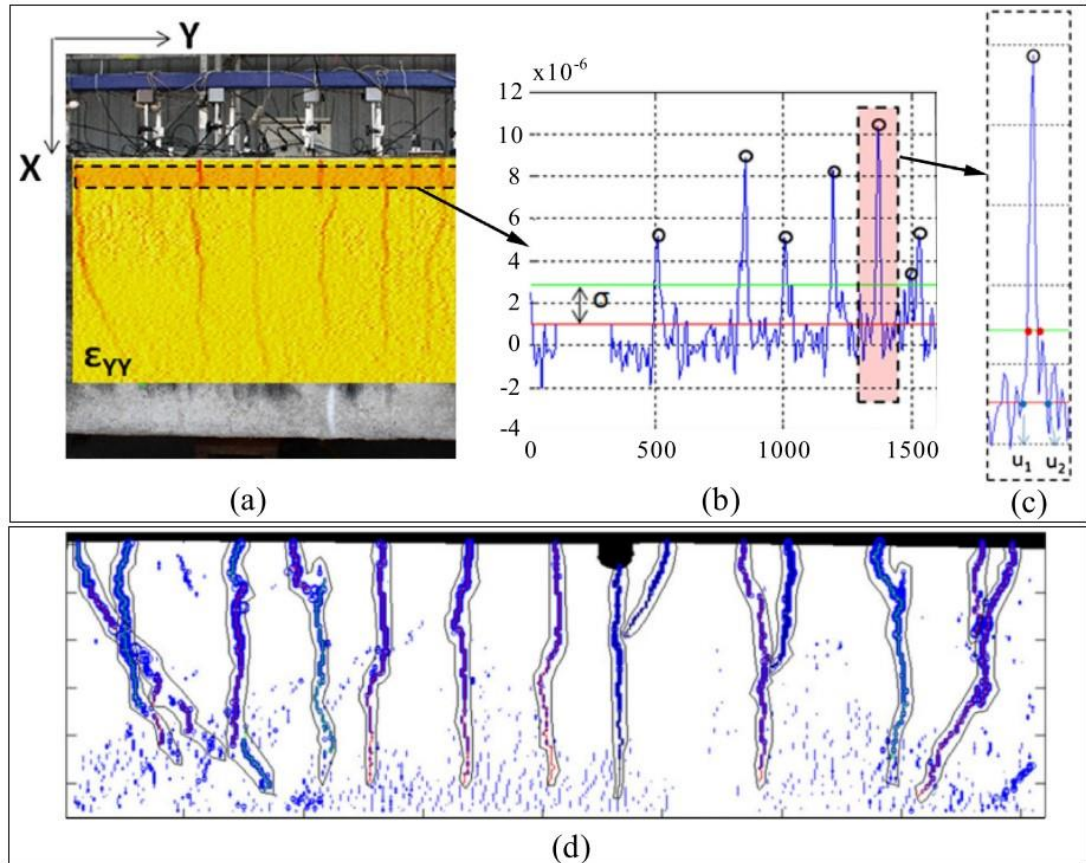
Tokluk, bir malzemenin göçme anına kadar sönümlendiği enerjiyi ifade eder ve büyüklüğü gerilme - birim şekil değiştirme grafiğinin altında kalan alanın hesaplanması ile belirlenir. ECC için ise tokluk ifadesi kompozitin ulaştığı maksimum gerilmeye kadar sönümlendiği enerji için anlamlıdır (Şekil 3.12) (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019).



Şekil 3.12 ECC'nin ilk çatlak dayanımı, çekme dayanımı, birim şekil değiştirme kapasitesi ve tokluk kapasitesinin belirlenmesi (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019)

Bu tez kapsamında numunelerin tokluk kapasiteleri gerilme - birim şekil değiştirme grafiklerinin pik noktasına kadar taradığı alanların hesaplanması ile belirlenmiştir.

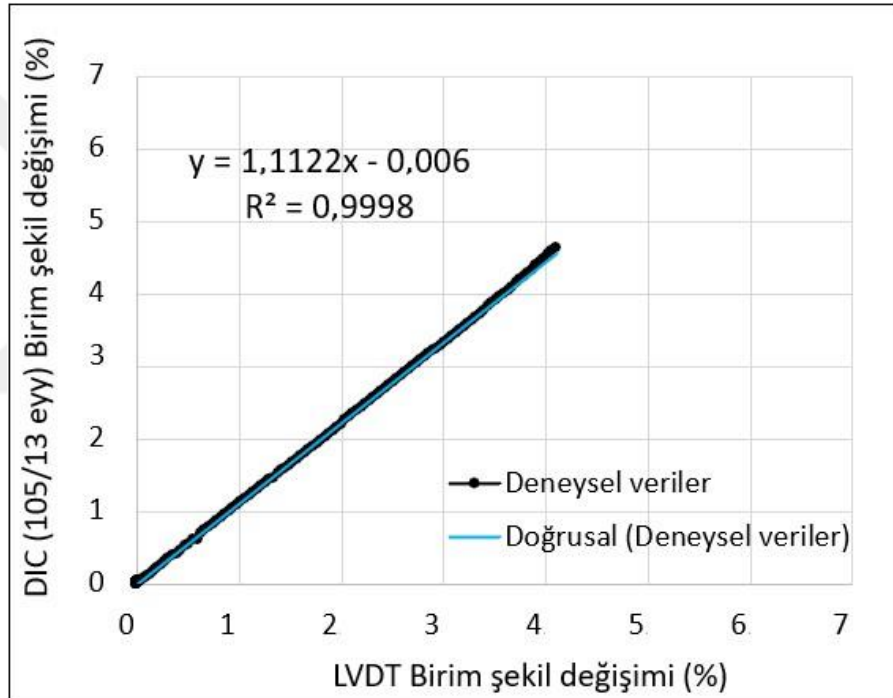
ECC'nin gerilme – birim şekil değiştirme grafiklerinde ilk çatlağın oluşumu her zaman net bir şekilde gözlenemeyebilir. Tosun-Felekoğlu ve Felekoğlu, (2013) ilk çatlak dayanımının belirlenmesinde teğetler yönteminin de kullanılabileceğini ifade etmiştir. Son yıllarda geliştirilmiş temassız bir ölçüm yöntemi olan DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu - Digital Image Correlation) de ilk çatlağın tespiti ve çatlak gelişiminin takibinde kullanılmaktadır (Felekoğlu ve Keskinates, 2016). Aynı zamanda numune üzerindeki lokal deformasyonlarda gözlenen ani değişimler çatlak sayısı ve açıklıklarının tespitinde kullanılmaktadır (Şekil 3.13) (Gehri, Falcon ve Kaufmann, 2020).



Şekil 3.13 DIC yöntemi ile çatlak takibi a) Analiz bölgesi ve çatlakların numune üzerindeki görünümü b) Analiz bölgesindeki lokal deformasyonlar c) Tek bir çatlağın lokal deformasyon grafiğindeki görünümü d) Tespit edilen çatlakların analiz görüntüsü (Gehri, Falcon ve Kaufmann, 2020)

Yıldırım ve diğer., (2020) DIC ve LVDT yöntemlerini kıyaslayarak DIC yönteminin deformasyon tespitinde kullanıma uygun olduğunu ifade etmiştir.

Bu tez kapsamında hazırlanan kompozitlerde meydana gelen ilk çatlakın zamanı, toplam çatlak sayısı, oluşan çatlakların açıklıkları DIC yöntemi ile tespit edilmiştir. DIC ile elde edilen birim şekil değiştirme verileri ile gerçek LVDT’ler ile elde edilen deformasyon verileri kıyaslanarak çatlak tespitinin doğruluğu kontrol edilmiştir (Şekil 3.14). İlk çatlakın zamanı o anda okunan gerilme değeri ile eşleştirilerek ilk çatlak dayanımlarının tespitinde kullanılmıştır.

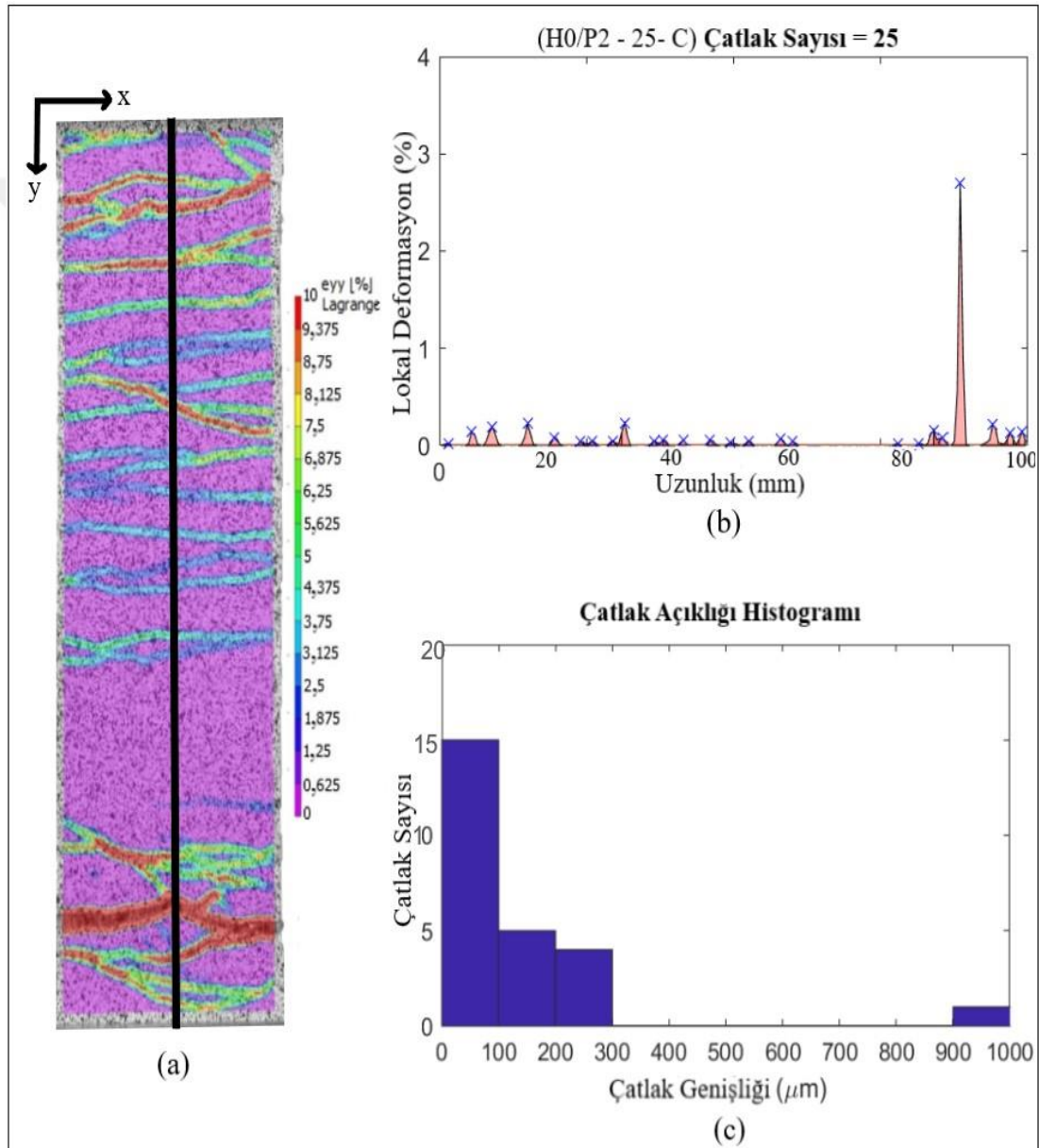


Şekil 3.14 H0/P2 - 12,5 - C serisine ait numunenin LVDT ve DIC deformasyon değerlerinin kıyaslanması

DIC analizinde kullanılan görüntüler numunenin ön yüzünden alındığı için Şekil 3.14'teki kıyaslama yapılırken numunenin ön iki yanındaki LVDT'lerden elde edilen deformasyon değerleri dikkate alınmıştır.

Tek eksenli çekme deneyi esnasında alınan görüntüler VIC-2D yazılımı ile analiz edilmiştir (Şekil 3.15). Analiz parametreleri tüm numuneler için sabit tutulmuştur.

Numune yüzeyi program tarafından alt kümelere ayrılarak analiz edilir. Alt küme boyutları numune yüzeyindeki benekleme, alınan görüntünün çözünürlüğü ve ışık gibi etkilere bağlı değişkenlik gösterir (Yıldırım ve diğer., 2020). Tüm bu özellikler her numune için farklılık göstereceğinden analizlerde, diğer analiz parametrelerinin aksine, farklı alt küme boyutları kullanılmıştır. Alt küme boyutları numunenin ilk resmi üzerinden programın önerdiği boyutlarda seçilmiştir.



Şekil 3.15 H0/P2 – 12,5 - C numunesinin çatlak analizi a) Numunenin deformasyon haritası ve üzerine çizilmiş sanal LVDT b) Lokal deformasyon grafiği ve çatlak sayısının tespiti c) Çatlak genişliği histogramı

Çatlak açıklarının ve sayısının tespitinde VIC - 2D yazılımı ile yapılan analiz verileri kullanılmıştır. Analiz sonucunda numune yüzeyindeki deformasyon haritaları elde edilmiştir. Deformasyon haritasında numune yüzeyindeki deformasyonlar (e_{yy}) farklı renklerle ifade edilir. Deforme olmamış alanlar mor iken en yüksek deformasyon kırmızı renk ile gösterilmiştir (Şekil 3.15a).

Analiz görüntüsü üzerinde, uygulanan çekme gerilmesi doğrultusunda bir adet sanal çizgi (LVDT) çizilmiş (Şekil 3.15a) ve bu çizgi üzerindeki lokal deformasyon verileri sayısal olarak elde edilmiştir. Deformasyon verileri MATLAB algoritması ile işlenmiş, ani lokal deformasyonlar aracılığı ile çatlaklar tespit edilerek sayıları ve genişlikleri belirlenmiştir (Şekil 3.15b, Şekil 3.15c). Lokal deformasyon grafiğinde numunenin ilgilenilen 10 cm'lik uzunluğu x ekseninde iken çatlak sayıları y ekseninde görülmektedir. X eksenindeki her yükseliş bir ani lokal deformasyonu diğer bir ifadeyle de çatlağı gösterir (Şekil 3.15b).

Lokal deformasyon grafiğindeki her bir düşüş bir çatlağı gösterirken bunun altında kalan alan ise o çatlağın genişliğini ifade eder. Çatlak genişliklerinin tespiti bu alanların belirlenmesi ile yapılmıştır. Şekil 3.15c'de H0/P2 - 12,5 - C numunesinin analizi sonucunda elde edilen çatlak açıklığı histogramı görülmektedir. Çatlak genişlikleri ve çatlak sayısının genişliğe göre dağılımı histogram üzerinden belirlenebilir.

BÖLÜM DÖRT

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

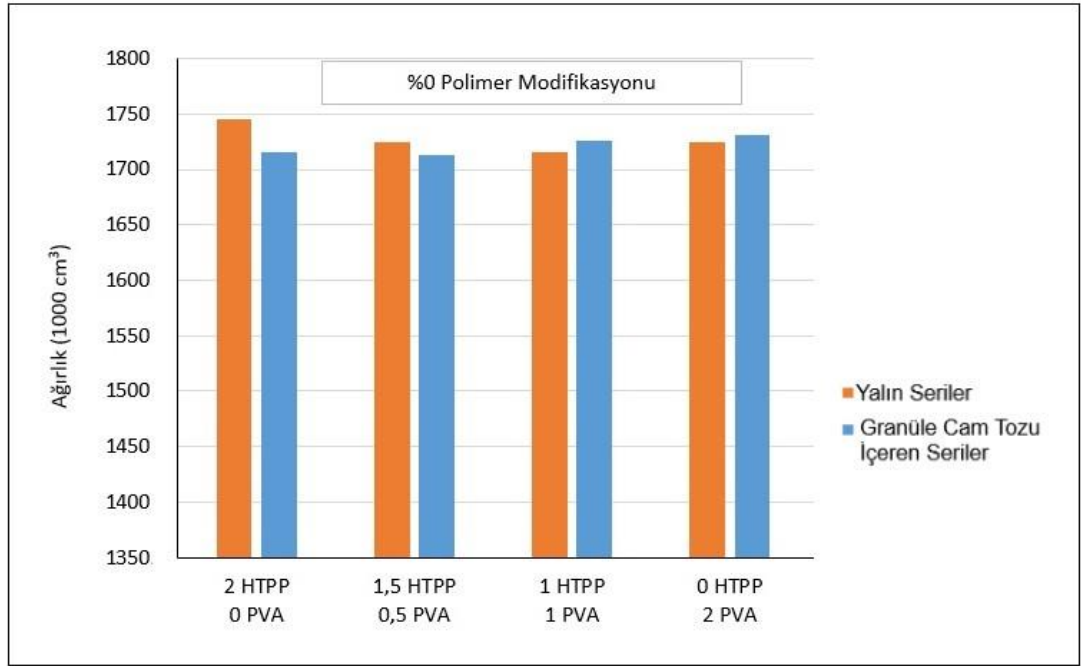
Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, ECC’de liflerin hibrit kullanımının, kompozitlerin polimer modifikasyonunun ve cam tozu kullanılarak yapılan matris kusur modifikasyonunun etkileri incelenecektir.

4.1 Kompozit Ağırlıklarının Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında kompozitte yapılan polimer modifikasyonu ve cam tozu ilavesinin kompozitin 1000 cm³ hacimdeki kuru ağırlığına etkisi Tablo 4.1 ’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kompozit ağırlıklarının polimer modifikasyonu ve granüle cam tozu ilavesi ile değişimi

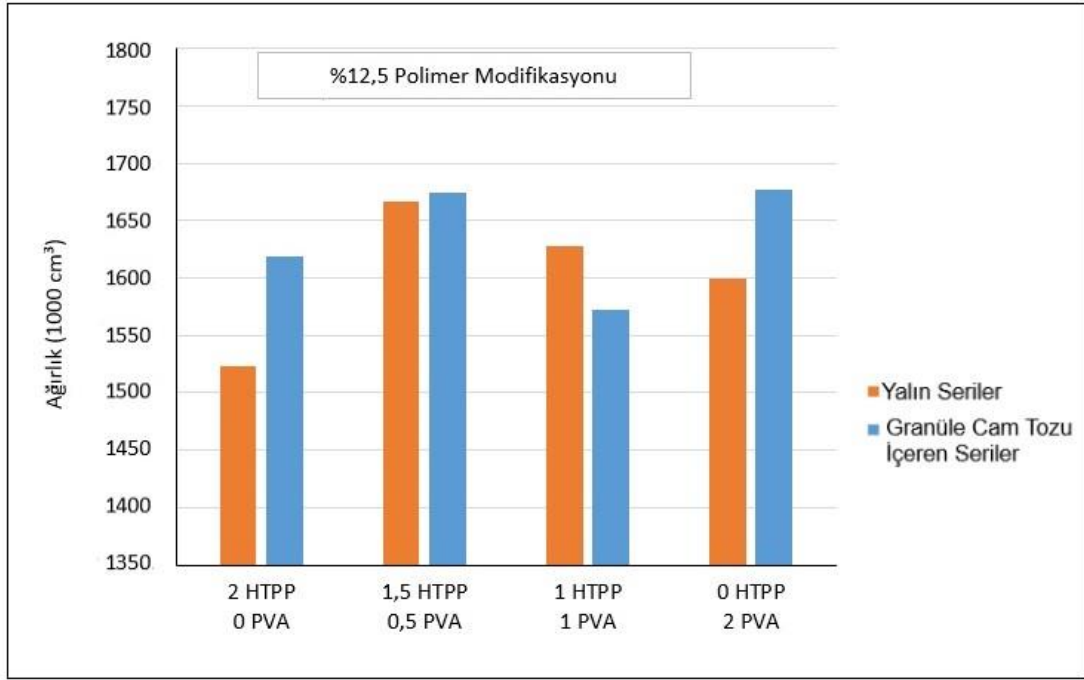
Yalın		Ağırlık (g) (1000 cm ³)	%3 Cam Tozu		Ağırlık (g) (1000 cm ³)
%0 polimer	2 HTPP 0 PVA	1745,6	%0 polimer	2 HTPP 0 PVA	1715,1
	1,5 HTPP 0,5 PVA	1724,7		1,5 HTPP 0,5 PVA	1713,1
	1 HTPP 1 PVA	1715,3		1 HTPP 1 PVA	1726,1
	0 HTPP 2 PVA	1724,8		0 HTPP 2 PVA	1730,9
%12,5 polimer	2 HTPP 0 PVA	1523,8	%12,5 polimer	2 HTPP 0 PVA	1618,5
	1,5 HTPP 0,5 PVA	1666,4		1,5 HTPP 0,5 PVA	1674,0
	1 HTPP 1 PVA	1627,8		1 HTPP 1 PVA	1572,1
	0 HTPP 2 PVA	1599,5		0 HTPP 2 PVA	1676,3
%25 polimer	2 HTPP 0 PVA	1487,1	%25 polimer	2 HTPP 0 PVA	1663,7
	1,5 HTPP 0,5 PVA	1653,8		1,5 HTPP 0,5 PVA	1704,6
	1 HTPP 1 PVA	1589,3		1 HTPP 1 PVA	1638,2
	0 HTPP 2 PVA	1636,2		0 HTPP 2 PVA	1619,1



Şekil 4.1 Polimer modifikasyonu yapılmamış yalın ve camlı ECC'lerin 1000cm³'teki hava kurusu ağırlıkları

Klasik ECC'nin 1000 cm³'teki hava kurusu ağırlıkları ortalama yaklaşık 2050 - 2100 gr'dır. Bu tez kapsamında hazırlanan ECC'lerin polimer modifikasyonu yapılmamış ağırlıkları Şekil 4.1'de verilmiştir. Seriler klasik ECC'lere görece düşük ağırlıklara sahip olup hafif beton tanımında yer alan ağırlık koşulunu (< 2000gr/cm³) kendiliğinden sağlamıştır. Polimer modifikasyonu yapılmamış kompozitlerde lif türü, dozajı ve granüle cam tozu ilavesi gibi etkiler kompozitlerin ağırlığı üzerinde belirgin farklılıklara yol açmamıştır. Granüle cam tozunun kompozit ağırlığında azaltıcı etkisinin bulunmaması onun cam baloncuk biçiminde olmayıp içi dolu taneciklerden oluşmasından kaynaklanır.

ECC'lerin karışım suyunun %12,5 oranında Acronal S400 ile ikame edilmesi sonucunda kompozit ağırlıklarında meydana gelen değişimlerin lif türü, dozajı ve cam tozu ilavesi açısından değerlendirilmesi Şekil 4.2'de verilmiştir.



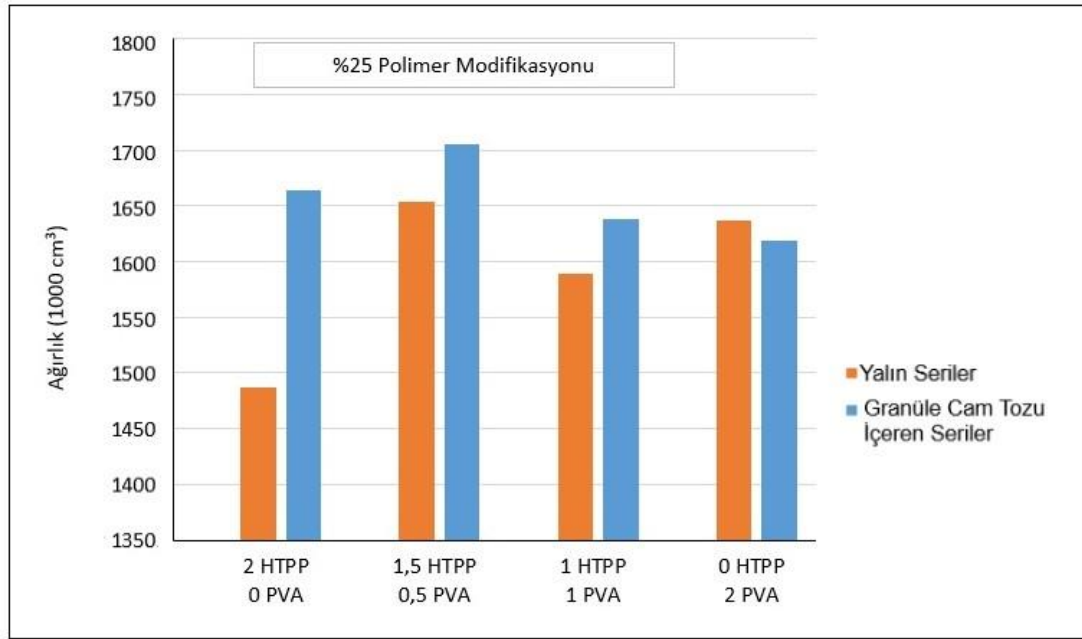
Şekil 4.2 Karışım suyu %12,5 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş yalın ve camlı ECC'lerin 1000 cm³'teki hava kurusu ağırlıkları

ECC'nin karışım suyu ile %12,5 oranında yapılan polimer modifikasyonu kompozit ağırlığında düşüşe yol açmıştır. Karışımında bulunan polimerler tarafından sürüklenen hava tüm seriler için sistemi hafifletici yönde etki etmiştir (Şekil 4.2). Bu etki yalnızca HTPP lif içeren serilerde daha belirgin gözlenmiş olup kompozitlerin ağırlığı %13 lük bir hafifleme ile ortalama 1745,6 gr/cm³'ten 1523,8 gr/cm³'e düşmüştür. Hibrit lifli serilerde sürüklenmiş havanın kompoziti hafifletici etkisi daha zayıf olmuştur. H1,5/P0,5 serisinin ağırlığında yaklaşık %3,4'lük azalma gözlenirken H1/P1 serisindeki azalma %5,1'dir. Hibrit lifli serilerde kompozit içerisindeki lif dağılımının düzensizliği sürüklenmiş hava boşluklarının stabilitesini olumsuz etkilese de serilerde ağırlık düşüşü gözlemlenebilmiştir. Yalnızca PVA lif içeren serilerde polimer modifikasyonu %7,3'lük hafifleme sağlamıştır.

Serilere eklenen granüle cam tozu, kompozit içerisindeki boşlukları doldurmuş ve genel olarak ECC'lerin ağırlığında artışa yol açmıştır. Bu etki polimer modifikasyonu ile hafifleme yüzdesi yüksek ve dolayısıyla boşluk miktarı fazla olan serilerde hibrit lifli serilere kıyasla daha belirgin gözlemlenmiştir. Ancak cam tozu ilaveli polimer

modifiye kompozitler polimer modifikasyonu yapılmamış serilere kıyasla daha hafif kalmayı sürdürmüştür.

ECC'lerin karışım suyunun %25 oranında Acronal S400 ile ikame edilmesi sonucunda kompozit ağırlıklarında meydana gelen değişimlerin lif türü, dozajı ve cam tozu ilavesi açısından değerlendirilmesi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Karışım suyu %25 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş yalın ve camlı ECC'lerin 1000 cm³'teki hava kuru ağırlıkları

Polimer modifikasyonu yapılmış ECC'lerde kompozitteki polimer yüzdesinin artışı genel olarak sisteme sürüklenen hava miktarını arttırmış ve kompozitlerin ağırlığındaki azalışı destekleyici etkide bulunmuştur (Şekil 4.3). Sürüklenmiş havanın kompoziti hafifletici etkisi polimer içermeyen seriye kıyasla yaklaşık %15'lik hafifleme ile H2/P0 - 25 serisinde gözlenmiştir. Cam tozu ilavesi düşük polimer yüzdeli serilere benzer şekilde sürüklenmiş hava boşluklarını doldurarak ağırlıkta artışa yol açmıştır. Bu artış, sürüklenmiş hava miktarı daha fazla olan serilerde daha yüksek olmuştur.

4.2 Kompozitlerin Gerilme – Birim Şekil Değiştirme Değerlerinin İncelenmesi

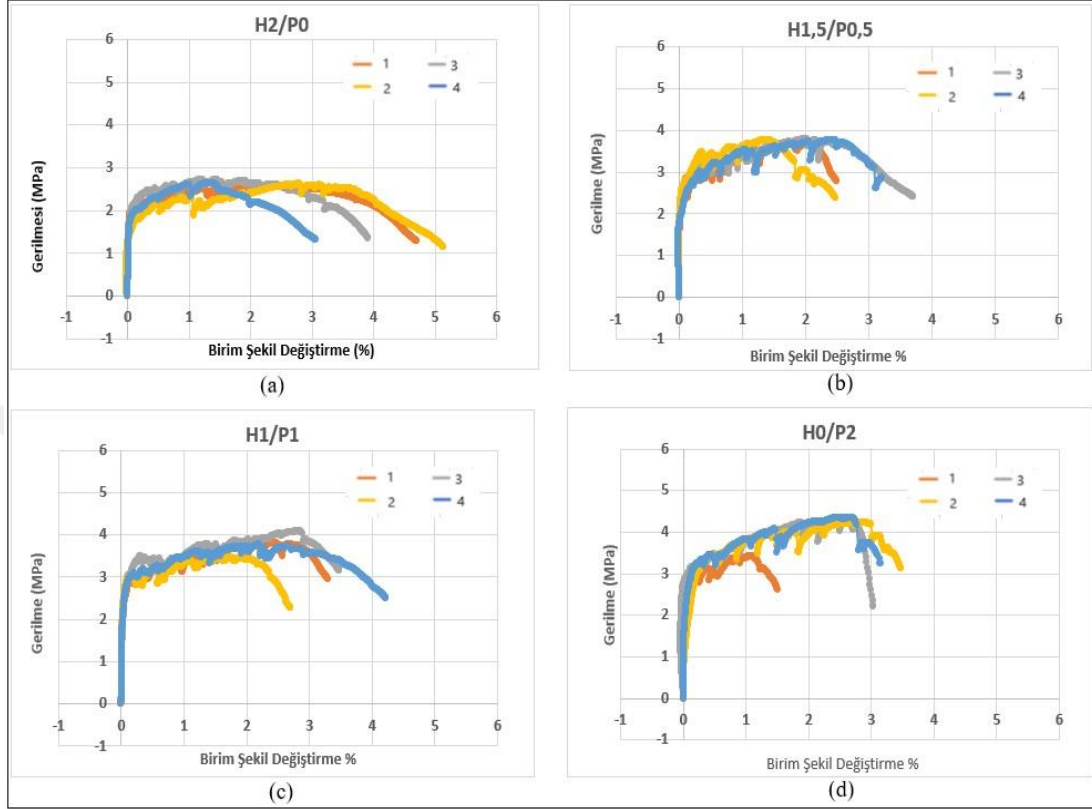
Bu başlık altında kompozitlerin doğrudan çekme deneyine tabi tutularak elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri değerlendirilecektir. Bu grafikler üzerinde gözlenen her bir düşü açılan yeni bir çatlağı ifade etmektedir. Kompozitlerin hazırlanmasında lifler yalın ve hibrit kullanılmış olup, her bir seri polimer modifiye edilmiş ve aynı zamanda granüle cam tozu ile matris fazında kusur modifikasyonu yapılmıştır. Seriler kompozit üzerinde meydana getirilen modifikasyonlara göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

4.2.1 Polimer Modifikasyonu Yapılmamış Yalın Kompozitler

Bu seride hazırlanan kompozitler polimer modifiye edilmemiş olup matris fazında cam tozu da barındırmamaktadır (yalın). Yapılan ön çalışmaların ardından referans olarak kabul edilen seri H2/P0 ismi ile adlandırılan seridir. Hacimce %2 HTPP lif barındıran ECC kompozitler ile hazırlanan bu seride ortalama çekme dayanımı 2,17 MPa olup maksimum gerilmeye karşılık gelen ortalama çekme birim şekil değiştirme değeri ise %3,31'dir (Şekil 4.4a). H1,5/P0,5 serisinde ise ortalama çekme dayanımı 3,85 MPa'a yükselmiş ve maksimum gerilmedeki ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi %2,2'ye düşmüştür (Şekil 4.4b). Hacimce %1 HTPP - %1 PVA hibrit lifli H1/P1 isimli serilerde ise ortalama çekme dayanımı 3,65 MPa iken birim şekil değiştirme kapasitesi ortalama %2,78 ile bir miktar artış göstermiştir (Şekil 4.4c). Yalnızca hacimce %2 PVA kullanılarak hazırlanan H0/P2 serisinde çekme dayanımı 3,65 MPa olarak gözlenirken yalın HTPP'li seriye kıyasla daha düşük birim şekil değiştirme kapasitesi (%2,56) elde edilmiştir (Şekil 4.4d).

Aynı matris kullanılarak lif türü üzerinde yapılan değişiklikler kompozitte liflerin karakteristik özellikleri doğrultusunda yansımalarla yol açmıştır. Matris fazı ile zayıf bağ yaparak sıyrılma eğilimi gösteren HTPP lifli serilerde çekme dayanımı düşük ve deformasyon kapasitesi yüksek olup matris ile güçlü bağ yapan PVA lifli serilerde ise deformasyon kapasitesi göreceli olarak azalırken çekme dayanımında artış

gözlenmiştir. PVA kullanımı serilerin tamamında çekme dayanımında artış sağlamıştır.



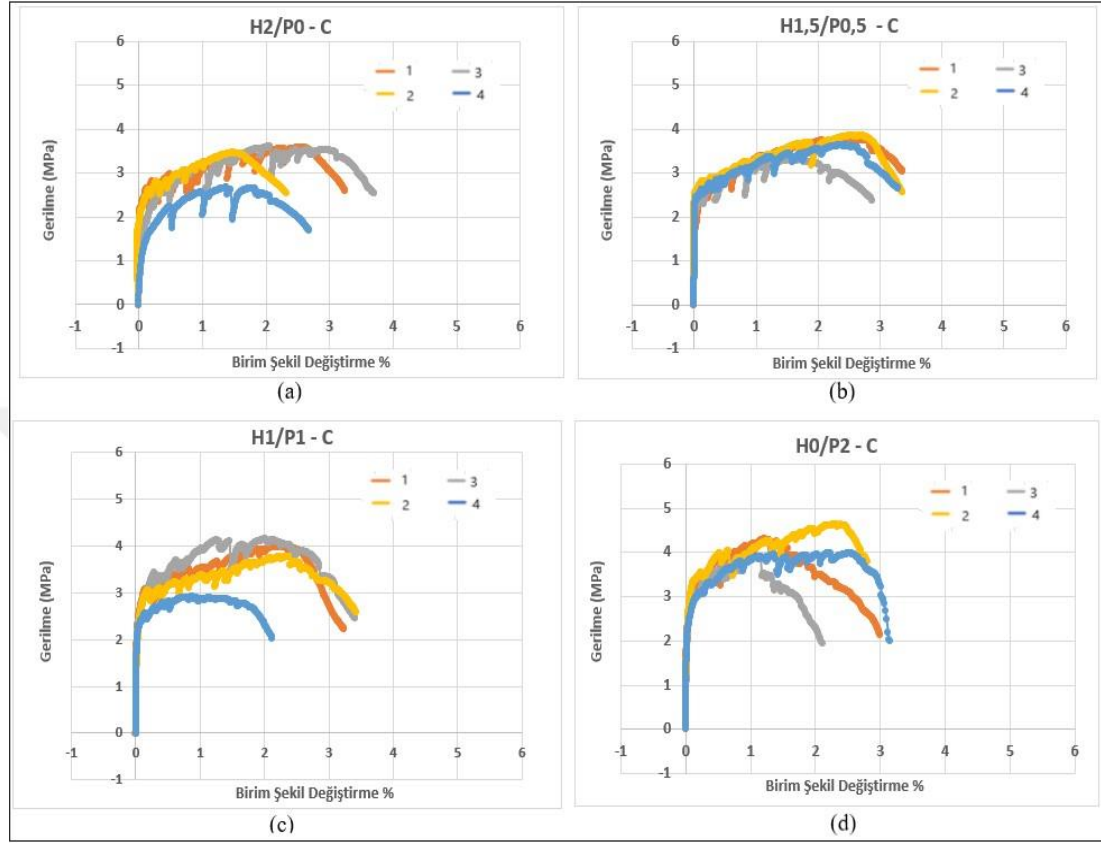
Şekil 4.4 Polimer modifikasyonu yapılmamış ECC'lerin gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 b) H1,5/P0 c) H1/P1 d) H0/P2

4.2.2 Polimer Modifikasyonu Yapılmamış Camlı Kompozitler

Bu serilerde karışıma ECC'nin çoklu çatlak davranışını desteklemek ve kompozitin deformasyon kapasitesini arttırmak amacıyla eklenmiş granüle cam tozu bulunmaktadır. Kullanılan cam tozu miktarı her bir seri için sabit olup hacimce %3'tür. Kompozitlerin doğrudan çekme gerilmesi altında elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

Kompozitlerde cam tozu ilavesi ile yapılan matris kusur modifikasyonu HTPP içeriği yüksek olan serilerde ortalama çekme gerilmesinin artışı sağlamıştır. Güçlü

matris karşısında gerilmeyi köprülemekte yetersiz kalan HTPP lifli seriler için matrisin kırılma tokluğunun düşürülmesi gerilmenin liflere aktarılmasını kolaylaştırmıştır.

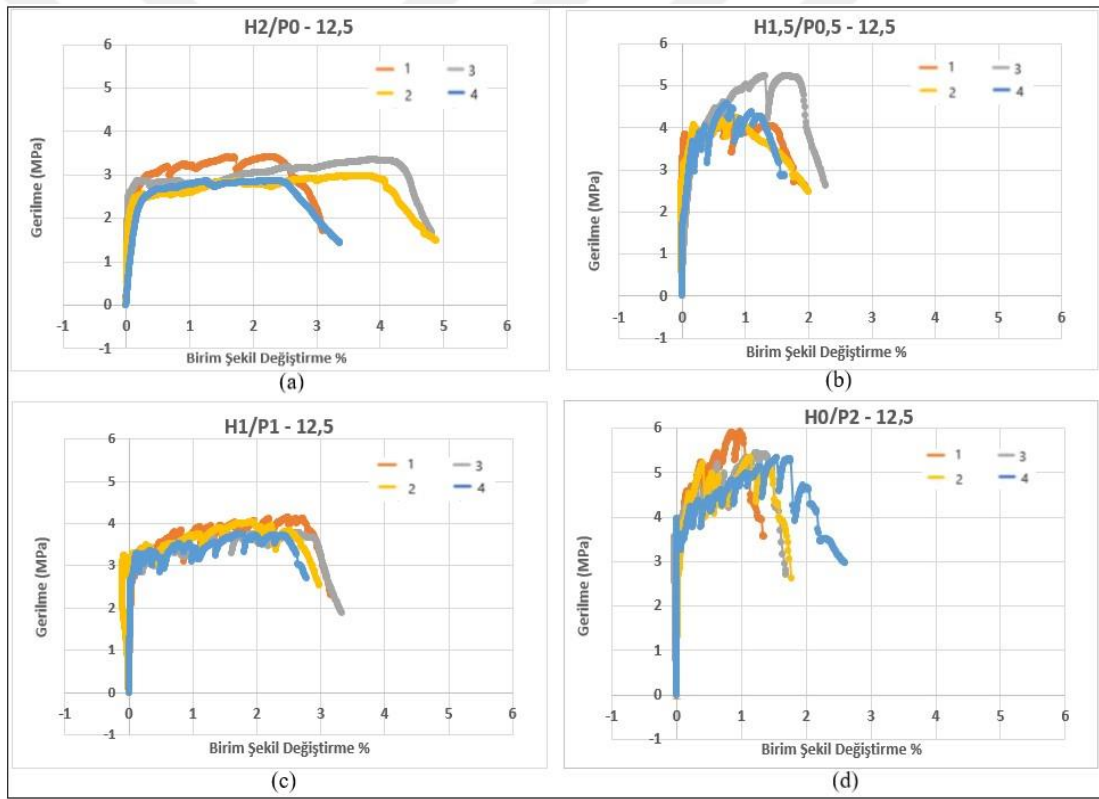


Şekil 4.5 Polimer modifiye edilmemiş, granüle cam tozu içeren ECC'lerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - C b) H1,5/P0,5 - C c) H1/P1 - C d) H0/P2 - C

H2/P0 - C serisinde ortalama çekme dayanımı camsız seriye göre yaklaşık %46'lık artış göstererek 3,18 MPa'a çıkmıştır. H2/P0 serisinin ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi cam ilavesi ile ortalama %28 mertebesindeki bir azalma ile H2/P0 - C serisinde %2,33'e düşmüştür (Şekil 4.5a). PVA lif içeren hibrit ve yalın serilerde ise büyük ölçüde bir değişiklik gözlenmemekle birlikte PVA yüzdesinin artışı ile çekme dayanımında artış birim şekil değiştirme kapasitesinde azalış eğilimi meydana gelmiştir (Şekil 4.5b, Şekil 4.5c ve Şekil 4.5d).

4.2.3 Polimer Modifiye Yalın Kompozitler

Polimer modifiyeli yalın kompozitlerde kompozitlerin karışım suyu polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş ancak karışıma cam tozu eklenmemiştir (yalın). Polimer modifikasyonunda kullanılan oranlar karışım suyunun %12,5 ve %25'idir. Görünür Su/Çimento oranı korunmuş olsa da emülsiyonun barındırdığı katı polimer partikülleri dolayısıyla polimer modifikasyonu gerçek Su/Çimento oranında azalma meydana getirmiştir. Şekil 4.6'da karışım suyu %12,5 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş ECC serilerinin çekme gerilmesi altındaki gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri görülmektedir.

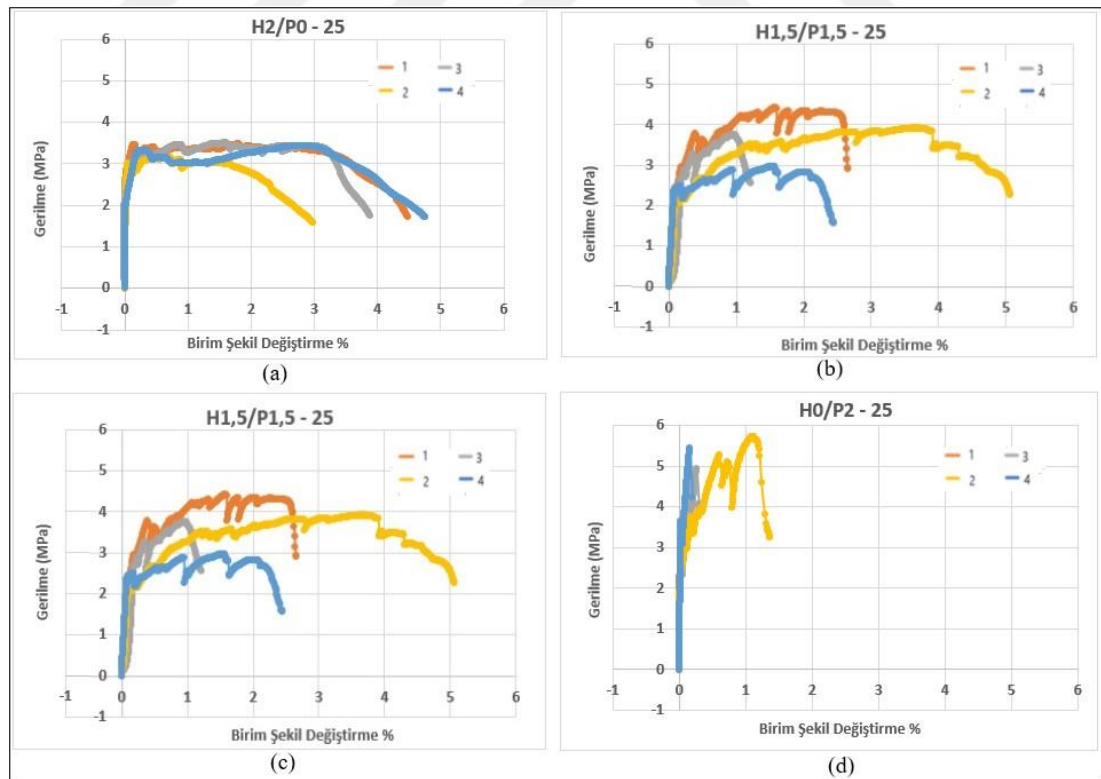


Şekil 4.6 Karışım suyu %12,5 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş yalın serilerin gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 -12,5 b) H1,5/P0,5 - 12,5 c) H1/P1 - 12,5 d) H0/P2 - 12,5

Karışım suyu ile %12,5 oranında yapılan polimer modifikasyonu ile serilerin tamamında çekme dayanımı artışı gözlenmiştir. Matris fazında oluşan polimer filmleri kompozitin çekme dayanımını arttırırken çekme deformasyonu kapasitesinde lif

türüne göre düşüş gözlenmiştir. Yalnızca PVA lif kullanarak hazırlanmış polimer ikameli serilerde birim şekil değiştirme kapasitesinde yalın kompozite göre ortalama %37'lik düşüş gözlenmiştir. Bu serideki ortalama birim şekil değiştirme kapasitesi %1,63'tür. Buna karşılık aynı serinin çekme dayanımı %35'lik bir artışla ortalama 5,02 MPa'a ulaşmıştır (Şekil 4.6d). HTPP lifli polimer modifiye seride lif sıyrılması gözlenmiş olup meydana gelen çatlaklar grafikte keskin düşümlere yol açmamıştır (Şekil 4.6a). Hibrit lifli serilerde kullanılan PVA lif miktarının artışı ile kompozitin çoklu çatlak davranışında iyileşme gözlenmiştir (Şekil 4.6b ve Şekil 4.6c).

Karışım suyunun %25 oranında Acronal S400 ile ikame edilmesiyle hazırlanan ECC'lerin çekme yüklemesi altında elde edilen gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.7'te verilmektedir. Kompozitte kullanılan polimer miktarının artışı PVA lif içeren seriler üzerinde %12,5 polimer içeren serilere benzer yönde fakat daha belirgin şekilde etkimiştir. Bu etki tüm seriler üzerinde genel olarak çekme dayanımının artışı ve birim şekil değiştirme kapasitesinin azalışı olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.7 Karışım suyu %25 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş yalın serilerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - 25 b) H1,5/P05 - 25 c) H1/P1 - 25 d) H0/P2 - 25

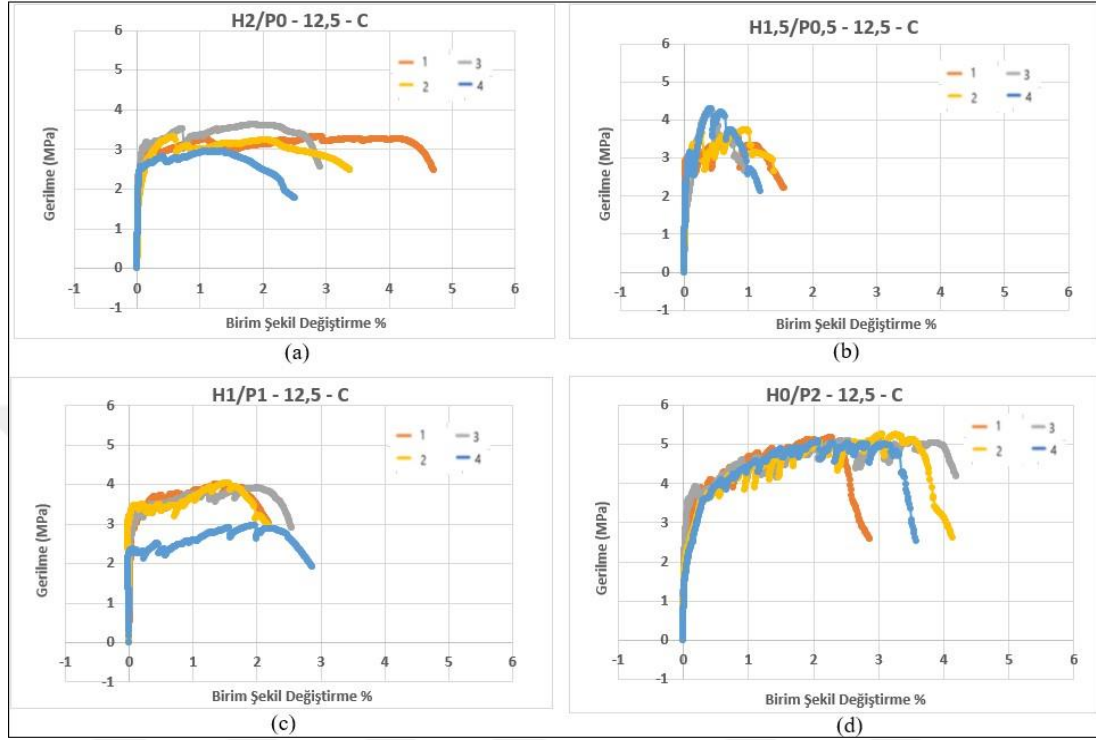
Matristeki polimer yüzdesinin artışı durumunda lif-matris aderansı düşük olan H2/P0 - 25 serisinde, grafikte ani düşümler oluşmamış, lif sıyrılması gözlenmeye devam etmiştir (Şekil 4.7a). Kompozite matris ile kuvvetli bağ yapan liflerin (PVA) eklenmesi ile liflerin gerilmeyi köprüleme davranışında iyileşme gözlenmiştir. H1,5/P0,5 - 25 ile H1/P1 - 25 serilerinin her ikisinde de %12,5 polimer içeren serilere kıyasla çekme dayanımında ve birim şekil değiştirme kapasitesinde hafif artış gözlenmiştir (Şekil 4.7b ve Şekil 4.7c). Yalnızca matris ile güçlü bağ yaptığı bilinen PVA lifi barındıran H0/P2 - 25 serisinde kompozitin ortalama çekme dayanımı 5,32 MPa olup çekme birim şekil değiştirme kapasitesi ise ortalama %0,45'tir. Bu seride yüksek dayanım değerlerine hızlı ulaşılmıştır. Kompozit ilk çatlaktan sonra gerilme değerinde artış gösterse de yük taşıyabilme kapasitesini ani bir şekilde kaybetmiştir (Şekil 4.7d).

4.1.4 Polimer Modifiye Camlı Kompozitler

Karışım da polimer emülsiyonunun yanı sıra granüle cam tozu da içeren bu serilerde iki farklı polimer dozajı (%12,5 ve %25) için cam tozu miktarı sabit tutulmuştur. Granüle cam tozu karışım içerisinde hacimce %3 oranında bulunmaktadır. Polimer emülsiyonu ile birlikte karışıma eklenen katı partiküller dikkate alınmayarak görünür Su/Çimento oranı sabit tutulmuştur.

Karışım suyu ile %12,5 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş kompozitlerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu serilerde granüle cam tozu ilavesi H2/P0 - 12,5 - C serisinde camsız serilere göre çekme dayanımı ile birim şekil değiştirme kapasitesinde belirgin bir değişiklik meydana getirmemiştir. Lif sıyrılması gözlenmiş olup grafikte keskin düşümler oluşmamıştır (Şekil 4.8a). Hibrit lifli serilerin her ikisinde de %12,5'lik polimer modifikasyonu ve cam tozunu kullanımı çekme dayanımı ile birim şekil değiştirme kapasitesini düşürücü yönde etki etmiştir. Bu düşüş, cam tozu kullanılmamış kompozitlere göre çekme dayanımında ortalama %10 mertebesinde birim şekil değiştirme kapasitesinde ise ortalama %23 mertebesinde (Şekil 4.8b ve Şekil 4.8c). Yalnızca PVA lif içeren H0/P2 -12,5 - C

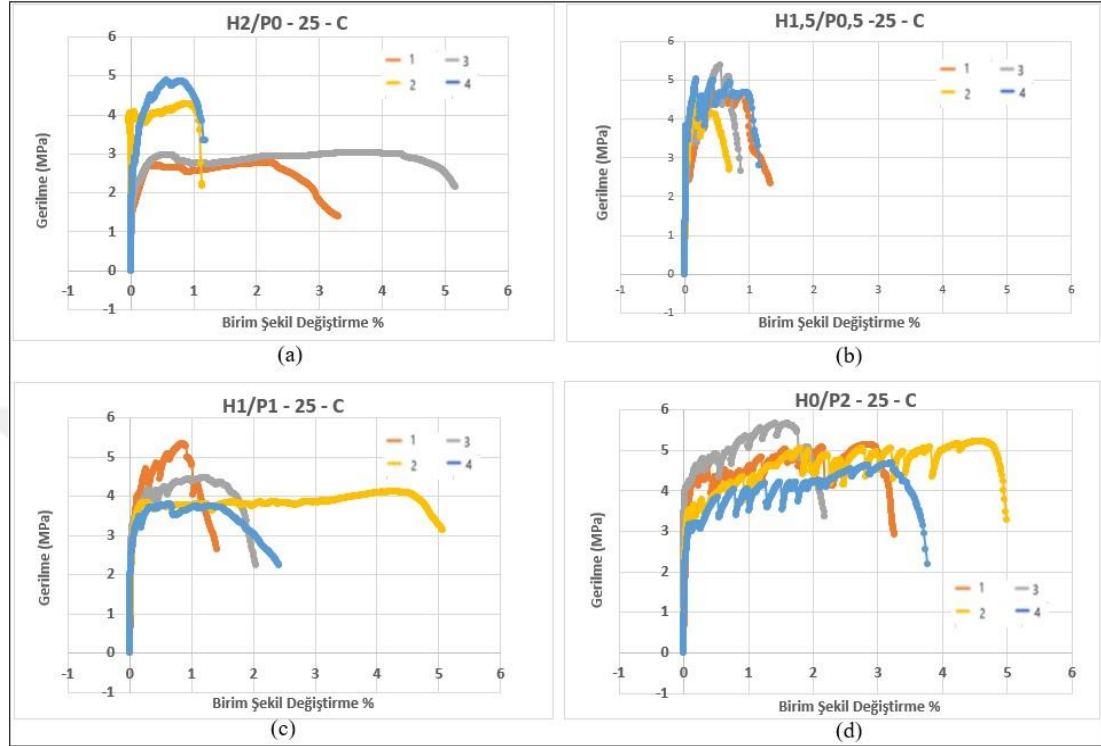
serisinde ise eklenen cam tozu, çekme dayanımında %15'lik, birim şekil değiştirme kapasitesinde ise %60'luk bir artışa yol açmıştır (Şekil 4.8d).



Şekil 4.8 Karışım suyu %12,5 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş, granüle cam tozu içeren serilerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - 12,5 - C b) H1,5/P0,5 - 12,5 - C c) H1/P1 - 12,5 - C d) H0/P2 - 12,5 - C

Karışım suyu ile %25 oranında Acronal S400 ile ikame edilmiş kompozitlerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.9'da verilmektedir. Hazırlanan H2/P0 - 25 - C serisinde cam tozu içermeyen H2/P0 - 25 serisine göre çekme dayanımı ve birim şekil değiştirme kapasitesinde hafif artış gözlenmiştir (Şekil 4.9a). Hibrit lif içeren serilerde cam tozu kullanımı H1,5/P0,5 - 25 serisi için çekme dayanımında yaklaşık %5'lik artışa ve birim şekil değiştirme kapasitesinde ise %40 mertebesinde azalışa yol açmıştır (Şekil 4.9b). H1/P1 - 25 - C serisi ise cam tozu içermeyen H1/P1 - 25 serisine göre çekme dayanımında %15'lik artış ve birim şekil değiştirme kapasitesinde ise %10'luk azalış göstermiştir (Şekil 4.9c). H0/P2 - 25 - C serisi ise cam tozu içermeyen H0/P2 - 25 serisine göre çekme dayanımında %10'luk azalışla

ortalama 4,73 MPa değerini almış ve birim şekil değiştirme kapasitesi ise yaklaşık 3 katına yükselerek ortalama %3.86 mertebesine ulaşmıştır.

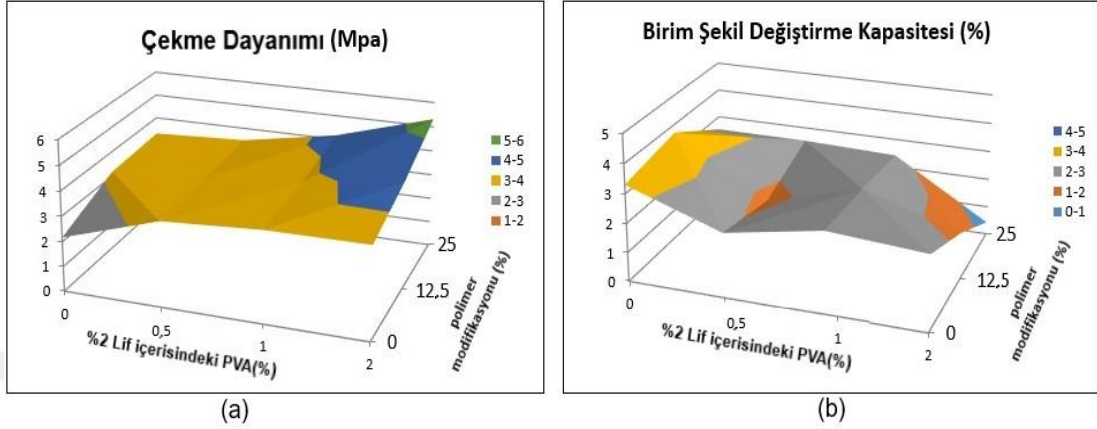


Şekil 4.9 Karışım suyu %25 oranında polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş, granüle cam tozu içeren serilerin gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri a) H2/P0 - 25 - C b) H1,5/P0,5 - 25 - C c) H1/P1 - 25 - C d) H0/P2 - 25 - C

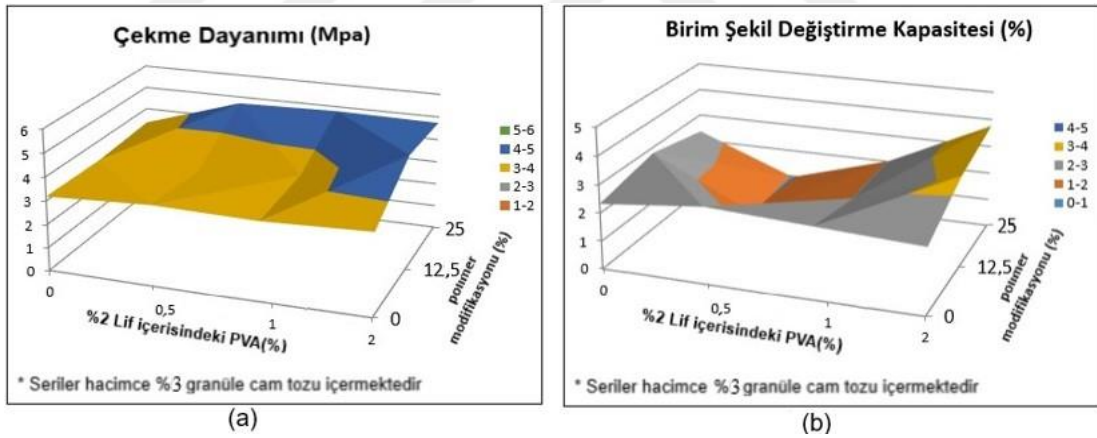
Cam tozu içermeyen (yalın) kompozitlerin gerilme - birim şekil değiştirme değerlerinin polimer modifikasyonu, granüle cam tozu ilavesi, kullanılan liflerin türü ve dozajı yönünden birlikte değerlendirildiği üç boyutlu grafikler Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.

Kompozitlerde yapılan polimer modifikasyonunun etkileri PVA lif içeriği arttıkça daha belirgin gözlenmiştir. Polimer yüzdesinin artışı PVA lif kullanıldığında sistemi yüksek çekme dayanımına fakat düşük birim şekil değiştirme kapasitesine götürmüştür. Bunun tam tersi olarak HTPP lifli serilerde ise meydana gelen lif sıyrılmaları ise daha yüksek deformasyon kapasitesi ve düşük çekme dayanımına yol açmıştır (Şekil 4.10a ve Şekil 4.10b) Liflerin hibrit kullanımı, karışımındaki PVA

yüzdesinin artışı ile serilerin hem gerilme hem de deformasyon kapasitelerinde artış sağlamıştır. Polimer yüzdesinin artışı tek tür lif içeren serilerde olduğu gibi hibrit serilerde de deformasyon kapasitesinin azalmasına yol açmıştır.



Şekil 4.10 Lif türü ve polimer modifikasyonunun yalın seriler üzerindeki etkisi a) Serilerin çekme dayanımları b) Serilerin maksimum gerilmeye karşılık gelen çekme birim şekil değiştirme kapasiteleri



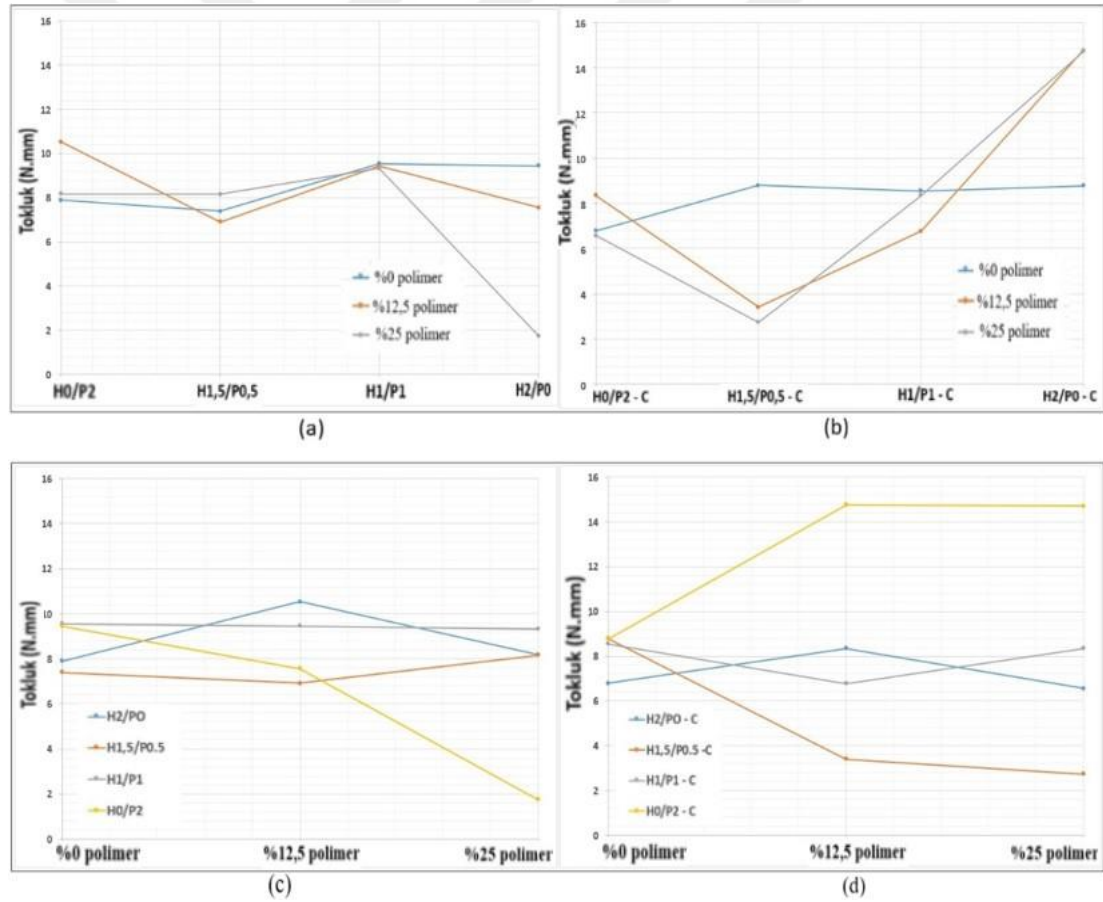
Şekil 4.11 Lif türü ve polimer modifikasyonunun granüle cam tozu içeren seriler üzerindeki etkisi a) Serilerin çekme dayanımları b) Serilerin maksimum gerilmeye karşılık gelen çekme birim şekil değiştirme kapasiteleri

Kompozitlerde granüle cam tozu kullanımı tek tip lif içeren serilerin çekme dayanımı ve birim şekil değiştirme kapasiteleri üzerinde daha belirgin etkilere yol açmıştır. Yalnızca HTPP lif içeren serilerde polimer miktarı artışı ile çekme dayanımında artış gözlenirken birim şekil değiştirme kapasitesinde camsız serilere göze düşüş meydana gelmiştir. Cam tozu kullanımı hibrit lifli serilerde kompozitteki

PVA içeriğinin artışı ile çekme dayanımında yükselmeyi sağlarken bu serilerin birim şekil değiştirme kapasitesinde düşüşe sebep olmuştur. Yalnızca PVA içeren camlı kompozitlerde ise çekme dayanımında hafif bir düşüş olsa da polimer yüzdesindeki artış ile birlikte deformasyon kapasitesinde büyük ölçüde artış gözlenmiştir (Şekil 4.11a ve Şekil 4.11b).

4.2 Kompozitlerin Tokluk Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

Hazırlanan ECC'lerin tokluk kapasitelerinin polimer modifikasyonu, granüle cam tozu ilavesi, kullanılan liflerin türü ve dozajı yönünden değerlendirildiği grafikler Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 Hazırlanan ECC'lerin tokluk kapasitelerinin lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi

ECC'lerin tokluk değerlerinde, PVA lif yüzdesi ve polimer yüzdesi arttıkça azalma gözlenmiştir (Şekil 4.12a). Kompozite yapılan granüle cam tozu ilavesi yüksek HTPP lif içeren serilerin tokluk kapasitesinde düşüşe yol açsa da PVA yüzdesinin artışı ile yükselişe sebep olmuştur (Şekil 4.12b). Yalnızca PVA içeren (H0/P2) serilerde polimer yüzdesinin artışı yalın serilerin tokluk kapasitesinde düşüşe yol açarken cam tozu içeren serilere tam tersi şekilde etki ederek tokluk kapasitesinde artış oluşturmıştır (Şekil 4.12c, Şekil 4.12d). Elde edilen en yüksek tokluk kapasiteleri %12,5 ve %25 polimer içeriğine sahip camlı PVA - ECC'lerdir. Bu durum yapılan cam ilavesinin polimer filmleri sayesinde güçlenip çoklu çatlak oluşturma potansiyeli azalan matrisi daha gevrek hale getirmesi ile açıklanabilir. Kompozitin matris fazı ile güçlü bağlara sahip olan PVA lifler cam tozu eklenerek gevrekliği arttırılmış matriste, gelişen çatlakları polimer filmleri ile birlikte köprüleyebilmiştir.

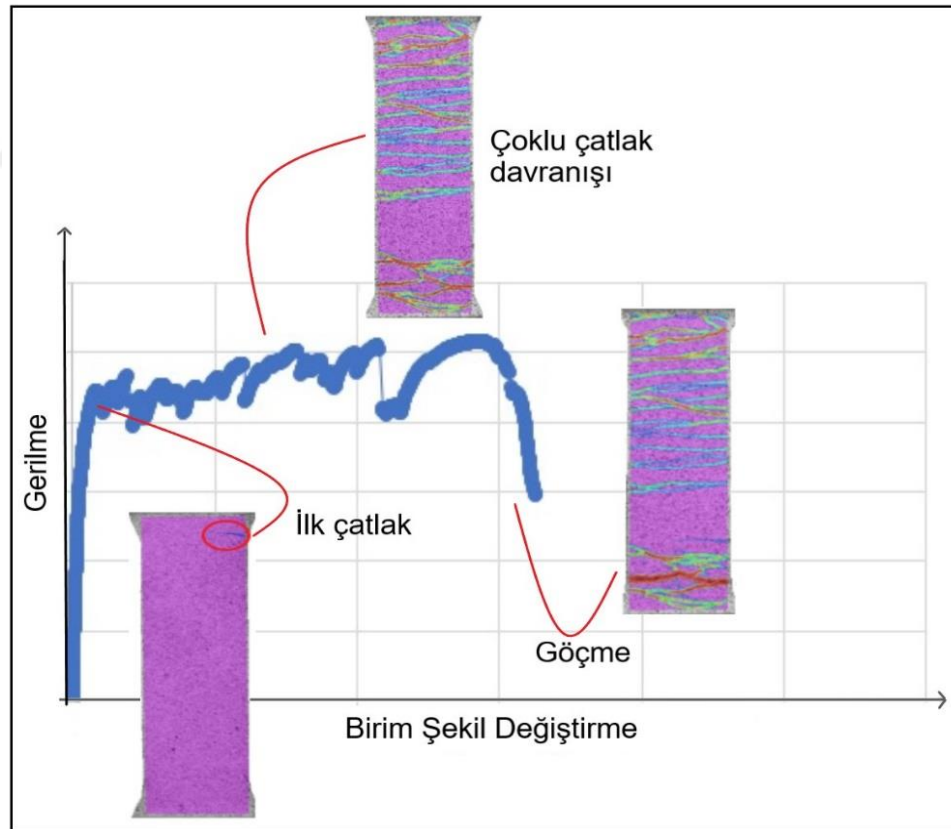
4.2 Kompozitlerin Çatlak Davranışlarının Değerlendirilmesi

ECC'nin çatlak takibinde DIC yönteminin kullanılması kompozitin farklı çatlak özelliklerini değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Bunlar ilk çatlak zamanı, ilk çatlak dayanımı, maksimum gerilmede gözlenen çatlak sayısı ve bu andaki ortalama çatlak açıklıklarıdır. Hazırlanan ECC serilerinin çatlak özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Hazırlanan ECC serilerinin çatlak analizi

Yalın		İlk Çatlak Zamanı (sn)	İlk Çatlak Dayanımı (Mpa)	Çatlak Sayısı (adet)	Ortalama Çatlak Açıklığı (micron)	% 3 Cam Tozu		İlk Çatlak Zamanı (sn)	İlk Çatlak Dayanımı (Mpa)	Çatlak Sayısı (adet)	Ortalama Çatlak Açıklığı (micron)
%0 polimer	2 HTPP 0 PVA	90	1,760	15	186	%0 polimer	2 HTPP 0 PVA	76	1,623	14	188
	1,5 HTPP 0,5 PVA	61	2,105	18	128		1,5 HTPP 0,5 PVA	65	1,914	19	147
	1 HTPP 1 PVA	61	2,587	26	93		1 HTPP 1 PVA	58	2,190	22	163
	0 HTPP 2 PVA	58	2,616	16	204		0 HTPP 2 PVA	66	2,264	18	121
%12,5 polimer	2 HTPP 0 PVA	100	2,567	19	178	%12,5 polimer	2 HTPP 0 PVA	81	2,199	15	250
	1,5 HTPP 0,5 PVA	92	2,906	10	158		1,5 HTPP 0,5 PVA	87	2,465	6	218
	1 HTPP 1 PVA	93	2,907	21	119		1 HTPP 1 PVA	80	1,968	30	90
	0 HTPP 2 PVA	125	3,568	12	132		0 HTPP 2 PVA	68	2,475	23	173
%25 polimer	2 HTPP 0 PVA	93	2,809	19	172	%25 polimer	2 HTPP 0 PVA	169	1,775	11	189
	1,5 HTPP 0,5 PVA	104	2,762	13	189		1,5 HTPP 0,5 PVA	113	2,620	9	124
	1 HTPP 1 PVA	135	3,141	17	144		1 HTPP 1 PVA	125	2,472	18	138
	0 HTPP 2 PVA	91	3,143	4	100		0 HTPP 2 PVA	103	2,684	24	143

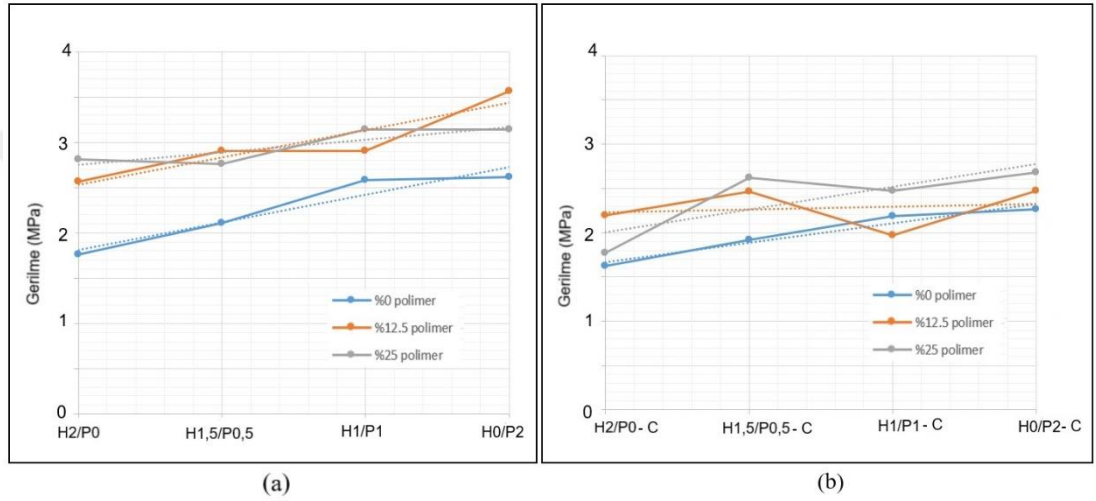
ECC çoklu çatlak davranışı gösteren bir kompozittir ve yükleme altında açılan her bir çatlak gerilme – birim şekil değiştirme grafiğinde bir düşü olarak gözlenir. Kompozitte açılan ilk çatlak matrisin kırılma tokluğu ile ilişkili olup genellikle grafikte meydana gelen ilk düşü ile belirlenmektedir (Tosun Felekoğlu ve Gödek, 2019). Ancak oluşan çatlaklar her kompozitin karakteristik grafiğinde kendisini keskin düşüler ile gösteremeyebilir. Bu tez kapsamında kompozitlerin ilk çatlak dayanımlarının belirlenmesinde DIC metodundan faydalanılmıştır. Kompozitlerde oluşan ilk çatlakların zamanı iç yapıdaki kusurların büyüklük, biçim ve miktarından etkilenmektedir. Bu tez kapsamında hazırlanan ECC'lerin ilk çatlak zamanlarının tespiti bu andaki dayanımlarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Deney boyunca 5 saniyede bir çekilen fotoğrafların analizi ile ilk çatlak tespit edilmiştir. Bu resime karşılık gelen andaki gerilme değeri ise kompozitin ilk çatlak dayanımı olarak belirlenmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 DIC yöntemi ile ECC'lerin çatlak takibi

4.2.1 İlk Çatlak Dayanımlarının Değerlendirilmesi

ECC'nin ilk çatlak dayanımı matris özellikleri ile ilişkilidir. Kompozitte meydana gelen ilk çatlağın ardından gerilme liflere aktarılır. Bu tez kapsamında hazırlanan polimer modifiyeli ECC'lerin ilk çatlak dayanımları kompozit içerisindeki PVA yüzdesinin artışı ile artmıştır. Polimer yüzdesinin artışı ise kompozitlerde matrisin kırılma tokluğunu yükseltmiş ve ilk çatlak dayanımını arttırmıştır (Şekil 4.14.a).

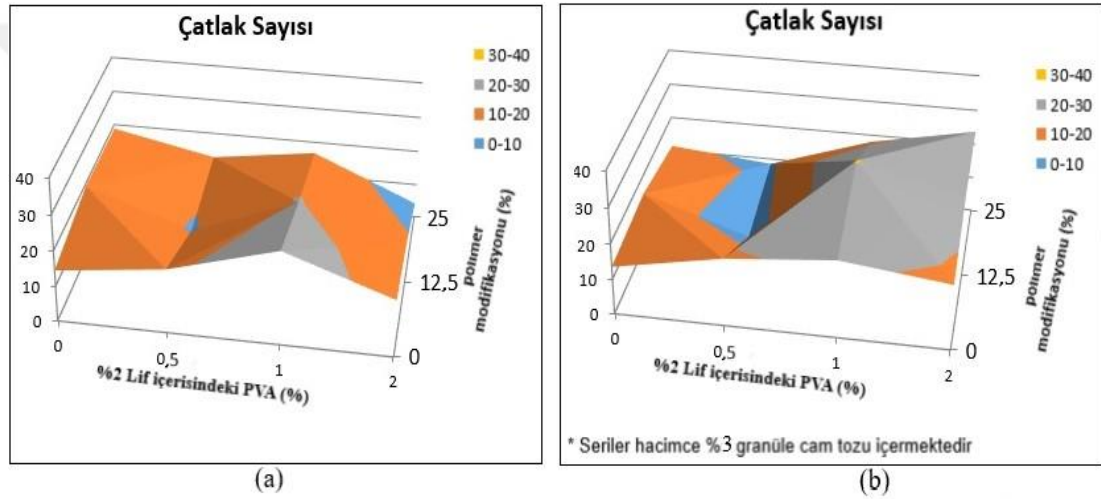


Şekil 4.14 Kompozitlerin ilk çatlak dayanımları a) Granüle cam tozu içermeyen seriler b) Granüle cam tozu içeren seriler

Hazırlanan serilere granüle cam tozu ilave edildiğinde ilk çatlak dayanımı tüm seriler için azalmıştır. Bu azalış polimer yüzdesi ve kompozitteki PVA lif miktarı arttıkça daha belirgin bir fark sergilemiştir (Şekil 4.14b). Bu durum, cam tozu ilavesinin kompozitin matris fazının kırılma tokluğunu düşürdüğünü gösterir. Li, (2012) mikromekanik teoriye dayanarak matrisin kırılma tokluğundaki azalışın, ECC'nin çoklu çatlak davranışında ve dolayısıyla deformasyon kapasitesinde artış sağladığını ifade etmiştir.

4.2.2 Çatlak Sayılarının Değerlendirilmesi

ECC, yükleme altında meydana getirdiği çok sayıdaki çatlaklar dolayısıyla deformasyon sertleşmesi davranışını gösterebilmekte ve yüksek birim şekil değiştirme kapasitelerine ulaşabilmektedir. Bu sebeple serilerin çekme deneyi sırasında maksimum gerilmeye kadar oluşturduğu çatlakların sayısı gösterdiği deformasyon sertleşmesi davranışının bir ölçüsüdür. Hazırlanan ECC serilerinin çatlak sayılarındaki değişimi polimer yüzdeleri, lif türü ve dozajı ile cam tozu ilavesi karşısında ifade eden üç boyutlu grafikler Şekil 4.15'te verilmiştir.

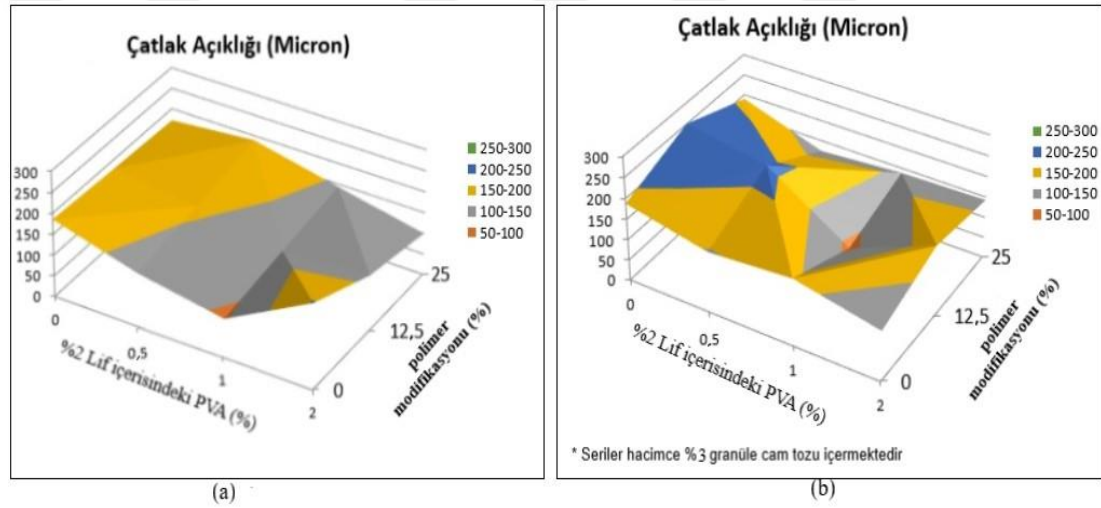


Şekil 4.15 Hazırlanan ECC'lerin çatlak sayılarının lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Granüle cam tozu içermeyen seriler b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren seriler

Bünyesinde cam tozu barındırmayan ECC serilerinin çatlak sayılarında polimer yüzdesi artışı ile lif türü ve dozajı istisna oluşturmaksızın azalma gözlenmiştir. Aynı miktarda polimer içeren ECC'ler arasında ise en yüksek çatlak sayısı H2/P0 serilerinde iken en düşük çatlak sayısı ise H0/P2 serisindedir (Şekil 4.15a). Granüle cam tozu ilavesi HTPP lif yüzdesi yüksek seriler üzerinde belirgin bir rol oynamazken artan PVA yüzdesi çatlak sayısında büyük oranda artış sağlamıştır. Lif türü sabit tutulduğunda artan polimer yüzdesi cam içermeyen serilerden farklı olarak H0/P2 – C serisinde çatlak sayısı artışına yol açmıştır (Şekil 4.15b).

4.2.3 Çatlak Açıklıklarının Değerlendirilmesi

Artan yükleme altında ECC'nin bünyesindeki kusurlu en kesitte meydana gelen ilk çatlaktan sonra kompozit çatlak açıklıklarının genişlemesine izin vermeyerek gerilmeyi lifler aracılığı ile sonraki enkesite aktarır. Maksimum gerilme esnasında kompozitte bulunan çatlakların ortalama genişliği ECC'nin lif fazının matris fazı ile ne uyumda çalıştığını anlamaya yardımcı olur. Hazırlanan ECC'lerin çatlak açıklıklarının polimer modifikasyonu, kullanılan liflerin türü ve dozajı ile granüle cam tozu ilavesi yönünden birlikte değerlendirildiği üç boyutlu grafikler Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 Hazırlanan ECC'lerin çatlak açıklıklarının lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Granüle cam tozu içermeyen seriler b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren seriler

Hazırlanan ECC'ler arasında meydana getirdiği çatlak açıklıkları bakımından yüksek oranda HTPP içeren seriler en dezavantajlı serilerdir. Bunun sebebi HTPP liflerin sıyrılma eğilimidir. Bünyesinde granüle cam tozu barındırmayan ECC serilerinde en geniş çatlak açıklıkları polimer içeriği fark etmeksizin H2/P0 serisinde olup polimer içermeyen H1/P1 kompozitleri ise minimum çatlak açıklığına sahiptir. Aynı lif türü içerisinde polimer dozajı artışı ile genel olarak çatlak açıklığı artmıştır. H0/P2 serisinde polimer artışı ile çatlak genişliklerinde artış gözlenmemesinin sebebi bu serinin taşıma gücünü ani kaybetmiş olmasıdır (Şekil 4.16a).

Granüle cam tozu ilave edilmiş serilerde çatlak açıklıklarının değişimi lif türünden etkilenmiştir. HTPP lif yüzdesi yüksek olan serilerde cam tozu ilavesi çatlak açıklıklarının genişlemesine yol açarken PVA yoğunluğu yüksek olan serilerde daha küçük açıklıklar elde edilmiştir (Şekil 4.16b). Polimer modifiye ECC'lerin klasik ECC'lere kıyasla daha geniş açıklıkta çatlak oluşturduğu bilinmektedir (Chen, Hua - Yang, Yang ve Yao, 2014). Aynı zamanda matris ile düşük aderanslı lif kullanımı çatlak açıklıklarının genişlemesi üzerinde olumsuz yönde etkimiştir.



BÖLÜM BEŞ

İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRMELER

Bu tez kapsamında hazırlanan farklı ECC serilerinin çekme dayanımları, birim şekil değiştirme kapasiteleri ve tokluk kapasitelerinin değişkenlik katsayıları (%) belirlenmiştir. Değişkenlik katsayısı (DK), bir olasılık dağılımı için normalize edilmiş istatistiksel yayılma ölçüsüdür. Bir serinin standart sapmasının (σ) ortalamasına (μ) bölünmesi ile elde edilir (Denklem 5.1). Birimi yoktur, genellikle yüzdece ifade edilir. Anlamlı olması için ortalamanın sıfır olmaması gerekir. Negatif sonuçlar için de uygulanması mümkündür. Ancak bu durumlarda genellikle mutlak değeri alınarak pozitif değerler ile kullanılır (Şencan, 2005).

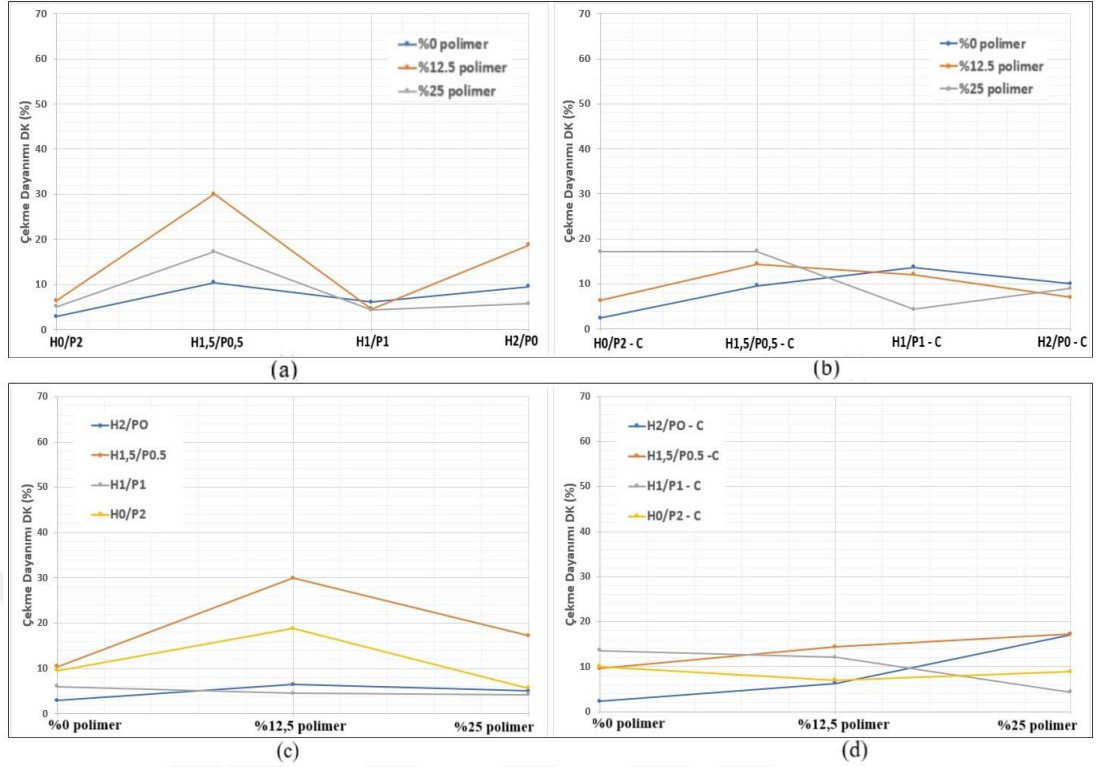
$$DK = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (5.1)$$

Değişkenlik katsayısı seriler arasındaki cins ve büyüklük farkını ortadan kaldırdığı için farklı serilerin değişkenliklerini kıyaslamada sıklıkla tercih edilir (Şencan, 2005). Değişkenlik katsayısı daha küçük olan serilerin diğerlerine göre daha az değişken olduğu ifade edilir. Bu durumda serinin ortalama etrafında daha homojen dağıldığı söylenebilir.

Bu tez kapsamında her seri için dört adet numune üretilmiştir. Örnek sayısı az olsa da kompozitlerin dağılımları hakkına fikir edinmek amacıyla değişkenlik katsayısından faydalanılmıştır.

5.1 Çekme Dayanımlarının İstatistiksel Değerlendirmesi

Hazırlanan ECC serilerinin çekme dayanımlarının yüzdece değişkenlik katsayıları (DK) polimer modifikasyonu, granüle cam tozu ilavesi, kullanılan liflerin türü ve dozajı yönünden değerlendirilmiştir (Şekil 5.1).

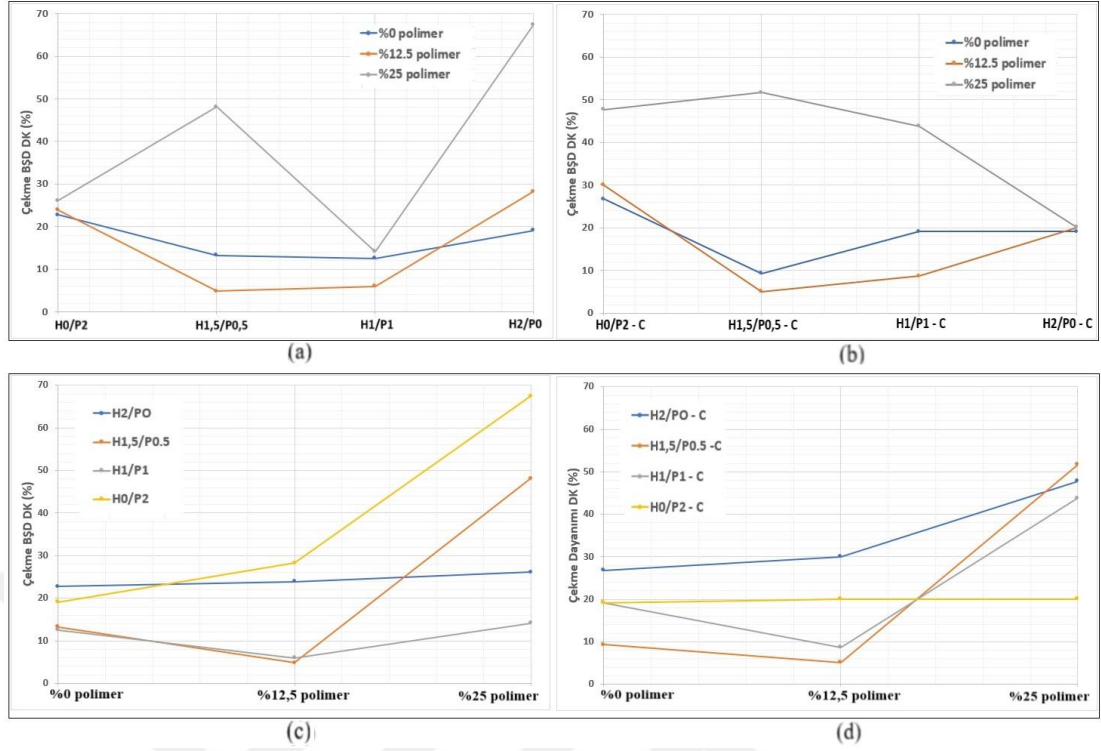


Şekil 5.1 Hazırlanan ECC'lerin çekme dayanımlarının değişkenlik katsayılarının (DK) lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdelere göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi

Şencan, (2005)'e göre %33'ün altında kalan değişkenlik katsayısı değerleri serilerin ortalama etrafında fazla saçılmadığını gösterir. Hazırlanan örneklerin çekme dayanımı verilerine ait DK değerleri genel olarak %30'un altında kalmıştır. Serilere eklenen cam tozu, kompozitlerin çekme dayanımlarını ortalama etrafına yakınsanmasını sağlamıştır (Şekil 5.1). Bu etki en fazla H1,5/P0,5 serisinde ve %12,5 polimer modifikasyonu yapılmış serilerde gözlenmiştir.

5.2 Birim Şekil Değiştirme Kapasitelerinin İstatistiksel Değerlendirmesi

Hazırlanan ECC serilerinin birim şekil değiştirme kapasitelerine (BŞD) ait yüzdece değişkenlik katsayıları (DK) polimer modifikasyonu, granüle cam tozu ilavesi, kullanılan liflerin türü ve dozajı yönünden değerlendirilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.2 Hazırlanan ECC'lerin birim şekil değiştirme kapasitelerinin değişkenlik katsayılarının (DK) lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalın serilerin polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi c) Yalın serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi

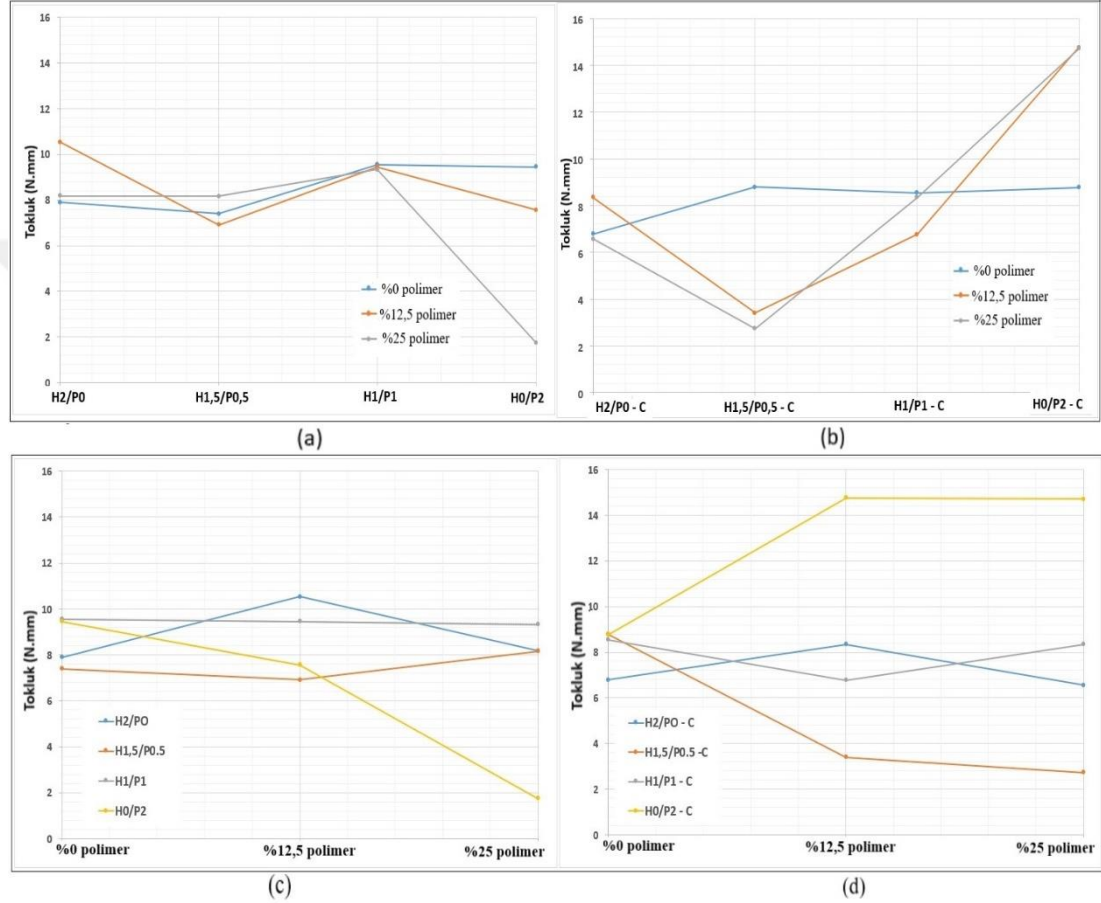
Japon İnşaat Mühendisleri Derneği (Japan Society of Civil Engineers - JSCE) tarafından yayınlanan ECC tasarım önerilerine göre; ECC'lerin BŞD kapasitelerinden elde edilen DK değerleri, çekme dayanımından elde edilenlere kıyasla yaklaşık 3 kat fazladır (Yokota, Rokugo ve Sakata, 2008).

Deneyisel çalışmalar kapsamında hazırlanan ECC serilerinin BŞD kapasitelerinin DK değerleri, çekme dayanımlarına göre yüksek elde edilmiştir. Kompozitlere eklenen cam tozu, DK değerlerinde düşüşe yol açmıştır (Şekil 5.2).

BŞD kapasiteleri %1'in altında olan serilerde DK değerleri beklenenden daha büyük elde edilmiştir. Bu durum serideki verilerin ortalama etrafındaki saçılımlarının yanı sıra ortalamanın sifıra yakınlığı ile de ilişkilidir. Ortalamanın sifıra yakın olduğu durumlarda değişkenlik katsayısının güvenilirliği azalır. (Şencan, 2005).

5.3 Tokluk Kapasitelerinin İstatistiksel Değerlendirmesi

Hazırlanan ECC serilerinin tokluk kapasitelerinin yüzdede değişkenlik katsayıları (DK) polimer modifikasyonu, granüle cam tozu ilavesi, kullanılan liflerin türü ve dozajı yönünden değerlendirilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Hazırlanan ECC'lerin birim tokluk kapasitelerinin değişkenlik katsayılarının (DK) lif türü, dozajı ve polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi a) Yalnız serilerin polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi b) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin polimer yüzdesine göre değerlendirilmesi c) Yalnız serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi d) Hacimce %3 granüle cam tozu içeren serilerin lif türü ve dozajına göre değerlendirilmesi

Serilerin tokluk değerlerinin ortalama etrafındaki heterojenliği kompozitteki polimer miktarındaki artış ile artmıştır (Şekil 5.3a, Şekil 5.3c). Cam tozu ilavesi polimer modifiye serilerin tokluk DK değerlerini azaltmıştır. Bu etki PVA içeriği yüksek serilerde daha belirgindir (Şekil 5.3b, Şekil 5.3d).

BÖLÜM ALTI

SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

ECC, bünyesinde barındırdığı mikron boyutlu lifler, kompozitin matris fazı ve lif-matris arayüzey özellikleri birbiri ile ilişkilendirilerek mikromekanik teori doğrultusunda tasarlanır. Mikromekanik teori, kompozitin çeşitli amaçlara yönelik geliştirilmesine imkan tanır. Tez kapsamında, ECC'nin karışım suyu farklı oranlarda polimer emülsiyonu ile ikame edilmiş, granüle cam tozu ile de kusur modifikasyonuna tabi tutulmuştur. ECC üzerinde yapılan değişikliklerin kompozitin çatlak davranışı üzerindeki etkileri DIC yönteminden faydalanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Polimer modifikasyonu yapılmamış ECC'lerde lif türü, dozajı ve granüle cam tozu ilavesi gibi etkiler kompozitlerin ağırlığı üzerinde belirgin farklılıklara yol açmamıştır. Granüle cam tozunun kompoziti hafifletici etkisinin bulunmaması onun baloncuk biçiminde olmayıp içi dolu taneciklerden oluşmasından kaynaklanır.
- ECC'nin karışım suyu ile %12,5 oranında yapılan polimer modifikasyonu kompozit ağırlığında düşüşe yol açmıştır. Karışımında bulunan polimer emülsiyonu tarafından sürüklenen hava tüm seriler için sistemi hafifletici yönde etki etmiştir. Bu etki H2/P0 serisinde daha belirgin gözlenmiş olup ortalama %13 lük bir hafiflemeye sebep olmuştur. Hibrit lifli serilerde sürüklenmiş havanın kompoziti hafifletici etkisi daha zayıf olmuştur. H1,5/P0,5 serisinde ortalama %3,4'lük hafifleme gözlenirken H1/P1 serisindeki hafifleme ortalama %5,1'dir.
- Karışım suyu ile %12,5 oranında polimer modifikasyonu yapılmış serilere eklenen granüle cam tozu, kompozit içerisindeki boşlukları doldurmuş ve genel olarak ECC'lerin ağırlığında artışa yol açmıştır. Bu etki polimer modifikasyonu ile hafifleme yüzdesi yüksek ve dolayısıyla boşluk miktarı fazla olan serilerde

daha belirgin gözlemlenmiştir. Ancak cam tozu ilaveli polimer modifiye kompozitler polimer modifikasyonu yapılmamış serilere kıyasla daha hafif kalmayı sürdürmüştür.

- ECC'nin karışım suyu ile %25 oranında yapılan polimer modifikasyonunda polimer yüzdesinin artışı genel olarak sisteme sürüklenen hava miktarını arttırmış ve kompozitlerin ağırlığındaki azalışı destekleyici etkide bulunmuştur. Cam tozu ilavesi hava boşluklarını doldurarak ağırlıkta artışa yol açmıştır. Bu artış, sürüklenmiş hava miktarı daha fazla olan serilerde daha yüksek olmuştur.
- Polimer modifikasyonu ile birlikte sürüklenen hava, matris içerisinde meydana getirdiği boşluklar ile çatlak oluşumu üzerine olumlu etkide bulunmuştur. Ancak matris içerisindeki polimer filmleri de çatlakları köprüleyici yönde etki etmiştir. Bu iki etki polimer miktarına, cam tozu ilavesine ve kompozitteki lif türüne bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı ve çekme birim deformasyon kapasitesi ortalamaları H0/P2 - 25 - C serisinde elde edilmiştir. Aynı matris ile üretilen camsız serilerde (H0/P2 - 25) ise çoklu çatlak davranışı gözlenememiş, kompozit yük taşıma kapasitesini ani bir şekilde kaybetmiştir. H2/P0 - 25 serisinde ise benzer bir etki görülmemiştir. Bu durum, polimer modifikasyonun PVA liflerin matris ile yaptığı bağı güçlendirmesinden kaynaklanmaktadır. Böylelikle lifler sıyrılma imkanı bulamamış, kompozit yüksek çekme dayanımına hızla ulaşmış ve taşıma kapasitesini liflerin kopması ile ani bir şekilde kaybetmiştir.
- Cam tozu ilavesi, polimer modifiyeli serilerin çoklu çatlak davranışını desteklemiş çekme dayanımında ise lif türü ile dozajına göre değişken etki göstermiştir.
- Kompozitlerin çatlak analizleri DIC yöntemi ile yapılmış, çatlak açıklık ve sayıları bu yöntem ile belirlenmiştir. Polimer modifikasyonu genel olarak ortalama çatlak genişliklerinde, cam tozu ilavesi ise çatlak sayısında artışa yol açmıştır.

6.2 Öneriler

Polimer modifiye betonlar üzerine yapılan çalışmalar uzun bir geçmişe sahip olsa da polimer modifikasyonu yapılmış çimento esaslı lifli kompozitlere yönelik çalışmalar çok daha yeni ve az sayıdadır.

- ECC üzerinde farklı türlerde ve yüzdelerdeki polimer katkıları ile modifikasyon yapılarak kompozitin kimyasal etkiler karşısında kazanacağı direnç incelenmelidir. Bu sayede ECC'nin boru sistemlerinde kullanımı geliştirilebilir.
- Polimer modifikasyonunun kompozit reolojisi üzerindeki etkileri incelenmelidir.
- Hazırlanan kompozitlerde granüle cam tozu ile hacimce %3 oranında yapılmış olan kusur modifikasyonu, farklı malzemeler ve yüzdelerle çeşitlendirilerek optimum matris tasarımı üzerine çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Adesina, A., ve Das, S. (2020). Mechanical performance of engineered cementitious composite incorporating glass as aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 121113.
- Akkaya, Y., Bayramov, F., ve Taşdemir, M. A. (2003). Betonun Kırılma Mekanîği: Tasarımda Kullanılan Mekanik Özellikler İle Kırılma Parametreleri Arasındaki Bağlılıklar. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, (426), 70-75.
- Al-Gemeel, A. N., Zhuge, Y., ve Youssf, O. (2018). Use of hollow glass microspheres and hybrid fibres to improve the mechanical properties of engineered cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 171, 858-870.
- American Society for Testing and Materials-ASTM. (1997). ASTM-C1018: Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete. West Conshohocken: ASTM.
- Assaad, J. J. (2017). Rheology and stability of lightweight polymer-modified self-consolidating concrete. *Applied Rheology*, 27(2), 28-38.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S. (2012). *Beton*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları
- Bothra, S. R., Ghugal, Y. M. (2015). Polymer-Modified Concrete. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 845-848
- Canon EOS 750D, (b.t)., 2020,
https://www.canon.com.tr/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_750d
- Chandra, S. ve Berntsson, L. (2002). *Lightweight aggregate concrete*. New York: Elsevier, William Andrew Publishing.

- Chen, Z., Yang, E. H., Yang, Y. ve Yao, Y. (2014). Latex-modified engineered cementitious composites (L-ECC). *Journal Of Advanced Concrete Technology*, (12), 510-519.
- Committe, A. C. I. (2009). 213.(nd). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-03). *ACI Manual of Concrete Practice*, 1-20.
- Dikici, T. (2010). *Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Du, L. ve Folliard, K. J. (2005). Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1463-1471.
- Erdogan, T.Y., (2003). *Beton*. Ankara: ODTÜ Gelistirme Vakfı Yayınları
- 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.
- Felekoglu, B., ve Keskinates, M. (2016). Multiple cracking analysis of HTPP-ECC by digital image correlation method. *Computers and Concrete*, 17(6), 831-848.
- 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.
- Felekoğlu, K. T., ve Gödek, E. (2019). Mechanical And Thermal Characterization of Htp Fiber Reinforced Lightweight Engineered Cementitious Composites (HTP-LECC). *Revista Romana De Materiale*, 49(1), 120-131.
- Felekoğlu, K. T., ve Gödek, E. (2019). Role of matrix structure and flaw size distribution modification on deflection hardening behavior of polyvinyl alcohol

- fiber reinforced engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Journal of Central South University*, 26(12), 3279-3294.
- Fischer, G., ve Li, V. C. (2002). Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC). *Structural Journal*, 99(1), 104-111.
- Gao, J., Sun, W., ve Morino, K. (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 307-313.
- Gehri, N., Mata-Falcón, J., ve Kaufmann, W. (2020). Automated crack detection and measurement based on digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 256, 119383.
- Ghugal, Y. M., State, M. (2016). Performance of polymer modified polypropylene fiber reinforced concrete with low fiber volume fractions. *The Indian Concrete Journal*, 90.
- Gödek, E. (2016) *Pratikte kullanılabilir polimerik lif katkılı ve çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Hanif, A., Diao, S., Lu, Z., Fan, T., ve Li, Z. (2016). Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres–Mechanical and thermal insulating properties. *Construction and Building Materials*, 116, 422-430.
- Huang, X., Ranade, R., Ni, W., ve Li, V. C. (2013). Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. *Construction and Building Materials*, 44, 757-764.
- Huang, X., Ranade, R., Zhang, Q., Ni, W., ve Li, V. C. (2013). Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 48, 954-960.

- Hüsem, M. (1995). *Doğu karadeniz bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle yapılan hafif betonun geleneksel bir betonla karşılaştırılması olarak incelenmesi*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon
- Jones, F. R. (1996). Interphase formation and control in fibre composite materials. In *Key Engineering Materials Trans Tech Publications Ltd.*, 116, 41-60
- Kalwane, U. B., Ghugal, Y. M., ve Dahake, A. G. (2016). Shear strength of polymer modified steel fiber reinforced concrete. *The Indian Concrete Journal*, 1-10.
- Kalwane, U. B., Ghugal, Y. M., ve Dahake, A. G. (2016). Toughness of polymer modified steel fiber reinforced concrete. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(1), 8-18.
- Kanda, T., ve Li, V. C. (2006). Practical design criteria for saturated pseudo strain hardening behavior in ECC. *Journal Of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 59-72.
- Knapen, E., ve Van Gemert, D. (2015). Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers. *Cement and Concrete Composites*, 58, 23-28.
- Krauthammer, T., Shahriar, S., ve Shanaa, H. M. (1990). Response of reinforced concrete elements to severe impulsive loads. *Journal of Structural Engineering*, 116(4), 1061-1079.
- Kurugöl, S., Tanaçan, L., ve Ersoy, H. Y. (2008). Young's modulus of fiber-reinforced and polymer-modified lightweight concrete composites. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1019-1028.
- Labhasetwar, M. S. A., Chaudhary, M. S. S., Chavan, M. S. V., Mohd, M., Shah, S., ve Bhatkar, M. R. (2019). A Review On Engineered Cementitious Composite (ECC). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3742-3744.

- Lee, J. H., Kim, H. H., Park, S. K., Oh, R. O., Kim, H. D., ve Park, C. G. (2018). Mechanical properties and durability of latex-modified fiber-reinforced concrete: a tunnel liner application. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-14.
- Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications. *Structural Engineering / Earthquake Engineering*, 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. (2002). Advances in ECC research. *ACI Special Publications*, 206, 373-400.
- 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.
- Li, V. C. (2008). Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance. *Concrete construction engineering handbook*, Michigan: University of Michigan.
- Li, V. C. (2012). Tailoring ECC for special attributes: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 135-144.
- Lim, I., Chern, J. C., Liu, T., ve Chan, Y. W. (2012). Effect of ground granulated blast furnace slag on mechanical behavior of PVA-ECC. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), 319-324.
- Lin, Z., ve Li, V. C. (1997). Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 45(5), 763-787
- Ohama, Y. (1995). *Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology*. New Jersey: William Andrew Publishing.

- Ohama, Y. (1997). Recent progress in concrete-polymer composites. *Advanced Cement Based Materials*, 5(2), 31-40.
- Ohama, Y. (1998). Polymer-based admixtures. *Cement And Concrete Composites*, 20(2-3), 189-212.
- Ouyang, X., Qiu, X., ve Chen, P. (2006). Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate—a potentially useful water reducer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 282, 489-497.
- Pan, J., Yuan, F., Luo, M., ve Leung, K. (2012). Effect of composition on flexural behavior of engineered cementitious composites. *Science China Technological Sciences*, 55(12), 3425-3433.
- Rossignolo, J. A., ve Agnesini, M. V. (2002). Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(3), 329-334.
- Saykar, Cam Kürecik, (b.t)., 29 Mayıs, 2020, https://www.saykar.net/cam_kure
- Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., ve Hossain, K. M. A. (2017). Mechanical, physical, and self-healing behaviors of engineered cementitious composites with glass powder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 04017016.
- Sridhar, R., ve Prasad, R. (2019). Study on Mechanical Properties Of Hybrid Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites. *Revista Romana de Materiale*, 49(3), 424-433.
- Şencan, H. (2005). *Güvenilirlik ve geçerlilik*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Tai, R. K. (2015). *Upscaling of strain-hardening cementitious composites*. Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Hollanda
- Tosun-Felekoglu, K., ve Felekoglu, B. (2013). Effects of fibre hybridization on multiple cracking potential of cement-based composites under flexural loading. *Construction and Building Materials*, 41, 15-20.

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

Wang, S., ve Li, V. C. (2003, July). Tailoring of PVA fibre/matrix interface for Engineered Cementitious Composites (ECC). *In Proceedings of the Fibre Society Symposium on Advanced Flexible Materials and Structures: Engineering with Fibre*, 91-92

Wang, S. (2005). *Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites*. Doktora Tezi, University of Michigan, Michigan

Wang, R., Lackner, R., ve Wang, P. M. (2011). Effect of styrene-butadiene rubber latex on mechanical properties of cementitious materials highlighted by means of nanoindentation. *Strain*, 47(2), 117-126.

Wang, M., Wang, R., Yao, H., Farhan, S., Zheng, S., Wang, Z. ve Jiang, H. (2016). Research on the mechanism of polymer latex modified cement. *Construction and Building Materials*, 111, 710-718.

Weimann, M. B., ve Li, V. C. (2003). Hygral Behavior Of Engineered Cementitious Composites (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(5), 513-534

Yang, E. H., Wang, S., Yang, Y., ve Li, V. C. (2008). Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), 181-193.

Yildirim, T., Felekoglu, K. T., Godek, E., Keskinates, M., Felekoglu, B., ve Onal, O. (2019). Investigation of multiple cracking behavior of cement-based fiber composites by digital image correlation method. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1), 479-493

Yokota, H., Rokugo, K., ve Sakata, N. (2008). JSCE recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks. *In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 2. 26

Temmuz,2020,

<http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter12/yokota.pdf>

Yu, J., Chen, Y., ve Leung, C. K. (2018). Micromechanical modeling of crack-bridging relations of hybrid-fiber Strain-Hardening Cementitious Composites considering interaction between different fibers. *Construction and Building Materials*, 182, 629-636.

Zhang, Q., ve Li, V. C. (2015). Development of durable spray-applied fire-resistive Engineered Cementitious Composites (SFR-ECC). *Cement and Concrete Composites*, 60, 10-16.

Zhang, Q., ve Li, V. C. (2017, September). Micromechanics of an Ultra Lightweight Engineered Cementitious Composite Containing Polymeric Latex Admixture. In *International Conference on Strain-Hardening Cement-Based Composites*, Springer, Dordrecht., 70-78.

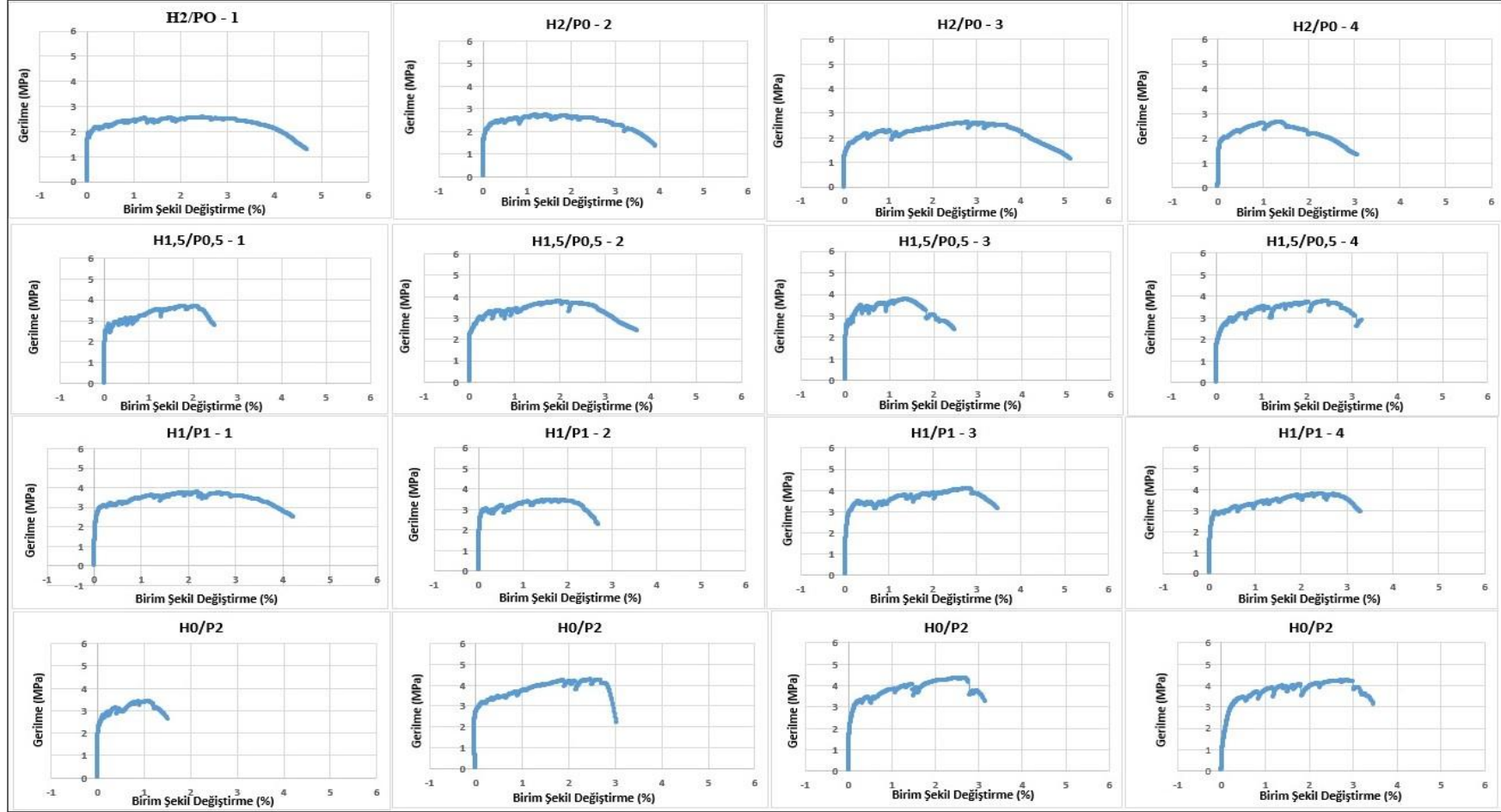
Zhang, Z., Yuvaraj, A., Di, J., ve Qian, S. (2019). Matrix design of light weight, high strength, high ductility ECC. *Construction and Building Materials*, 210, 188-197.

Zhang, Z., ve Zhang, Q. (2018). Matrix tailoring of engineered cementitious composites (ECC) with non-oil-coated, low tensile strength PVA fiber. *Construction and Building Materials*, 161, 420-431.

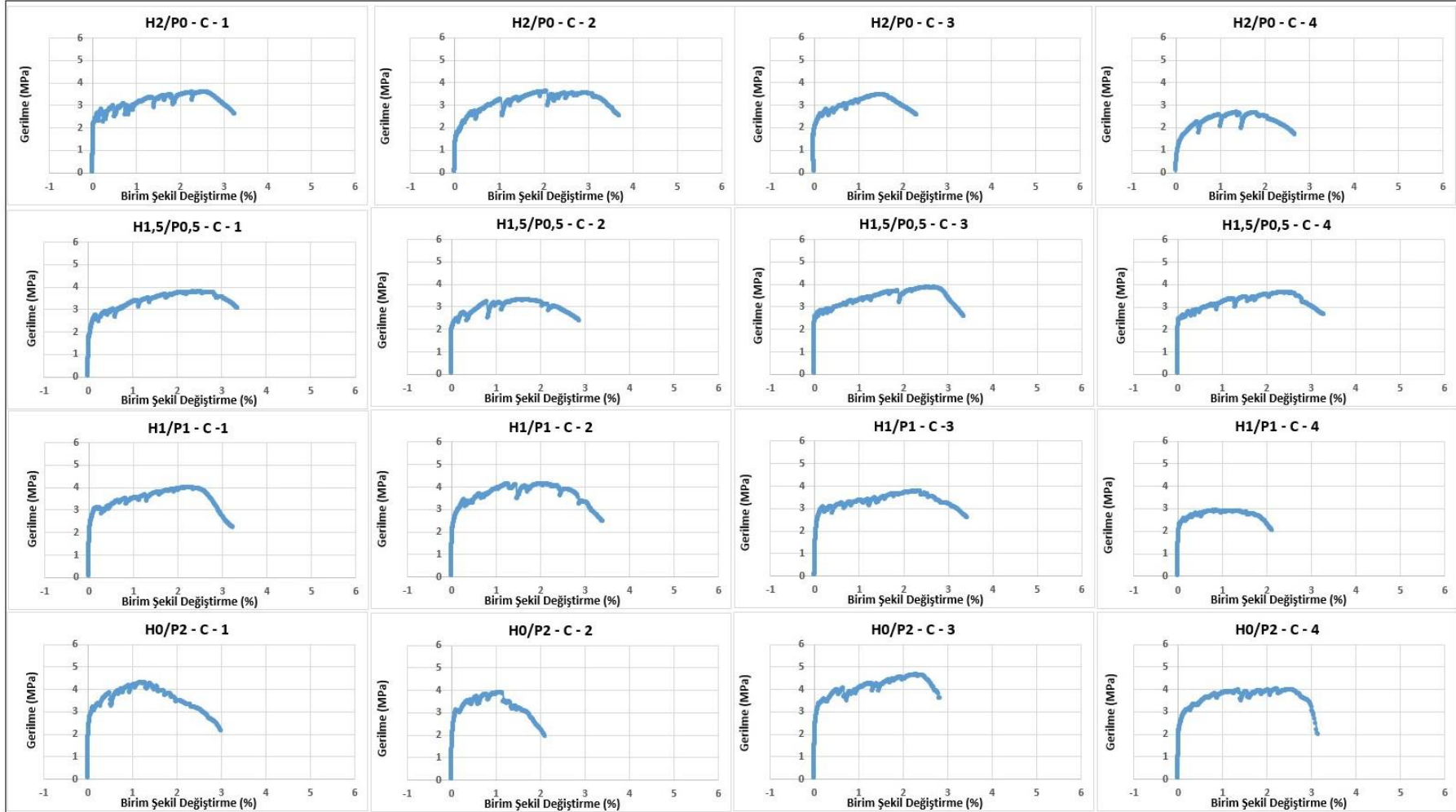
Zhou, Y., Xi, B., Sui, L., Zheng, S., Xing, F., ve Li, L. (2019). Development of high strain-hardening lightweight engineered cementitious composites: design and performance. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103370

EKLER

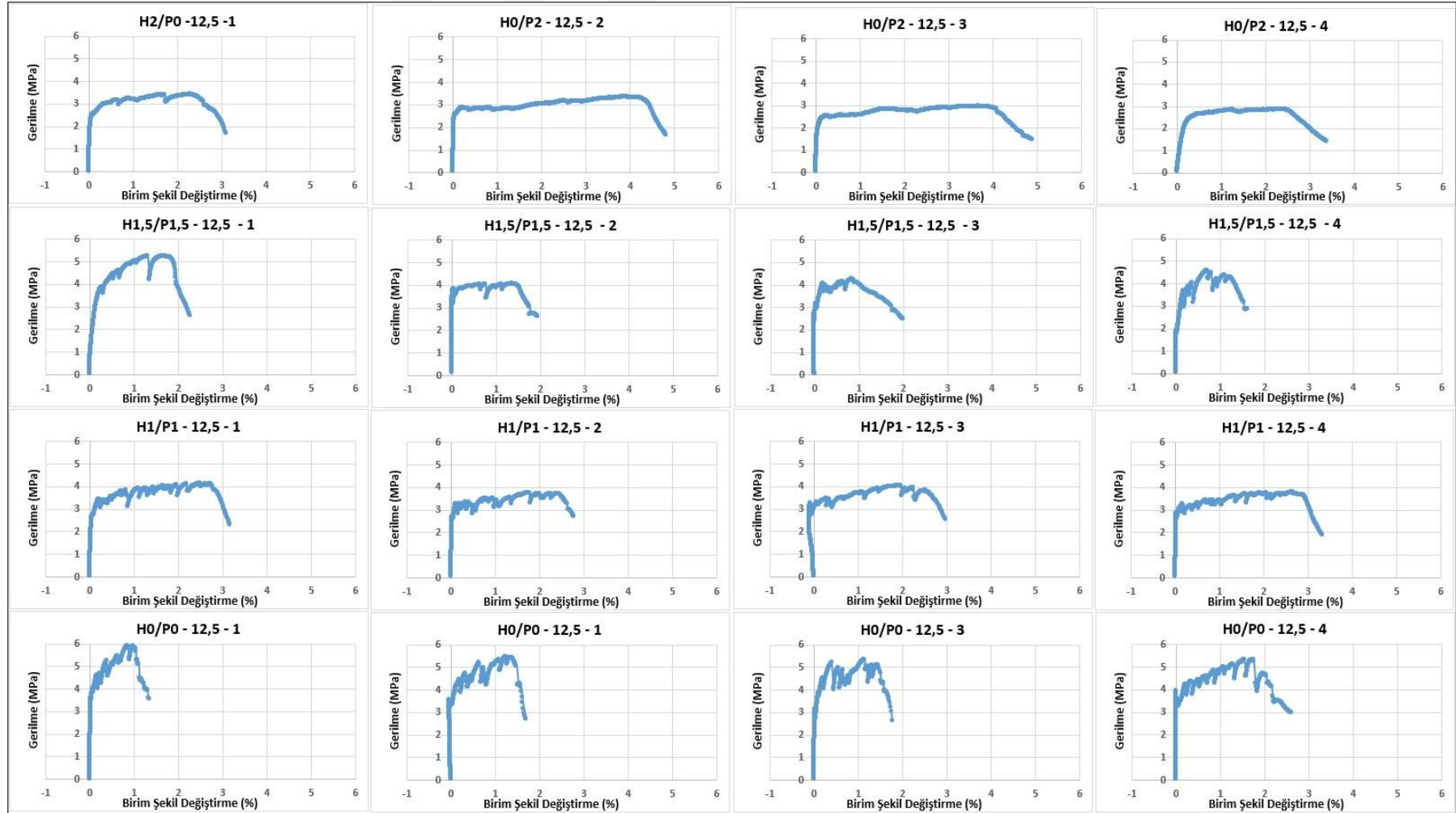
EK-A: Hazırlanan Örneklerin Tek Eksenli Çekme Yüklemesi Altındaki Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri



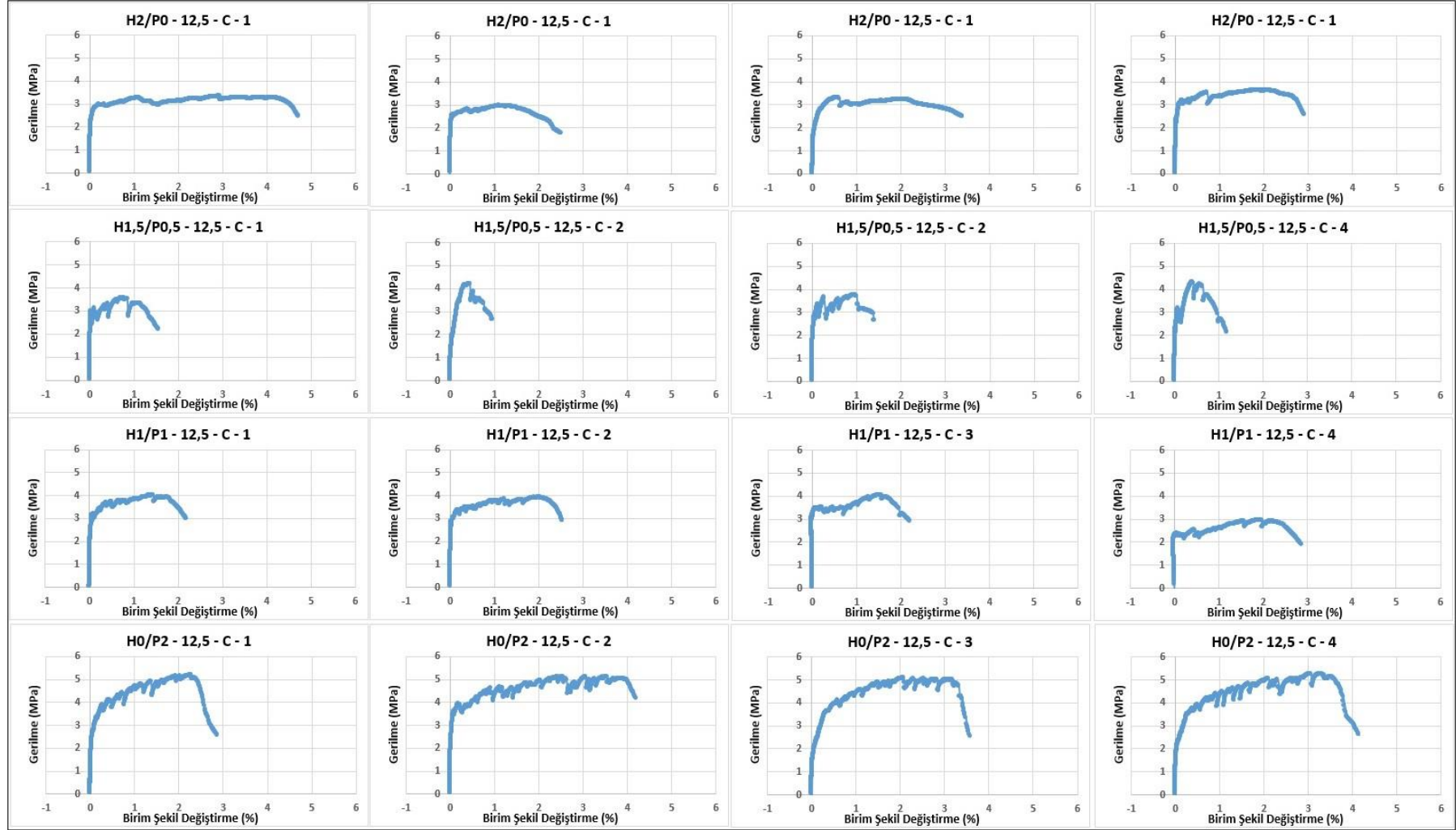
Şekil A.1 Polimer modifikasyonu yapılmamış cam tozu içermeyen (yalın) kompozitlerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme grafikleri



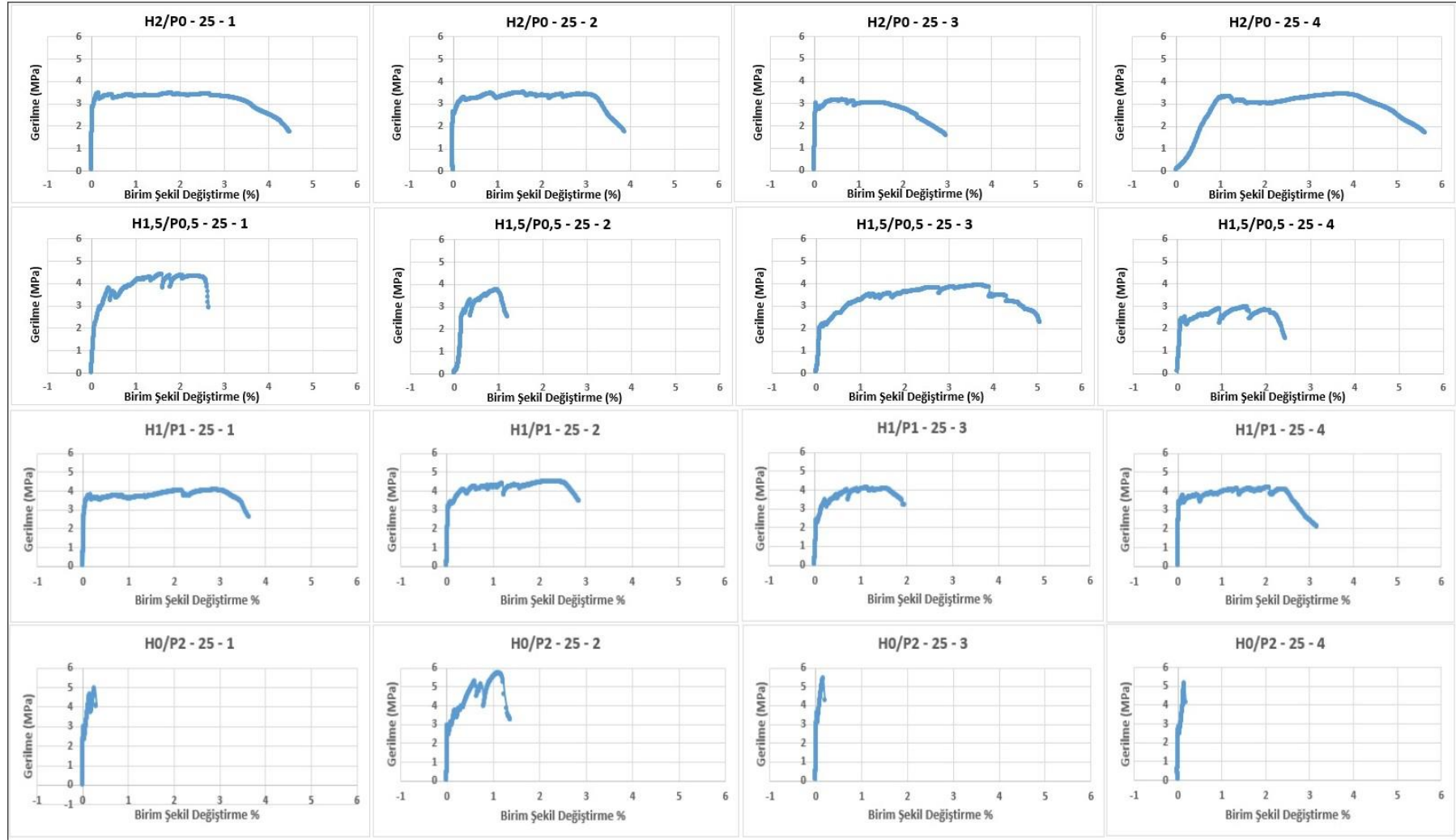
Şekil A.2 Polimer modifikasyonu yapılmamış, granüle cam tozu içeren kompozitlerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme grafikleri



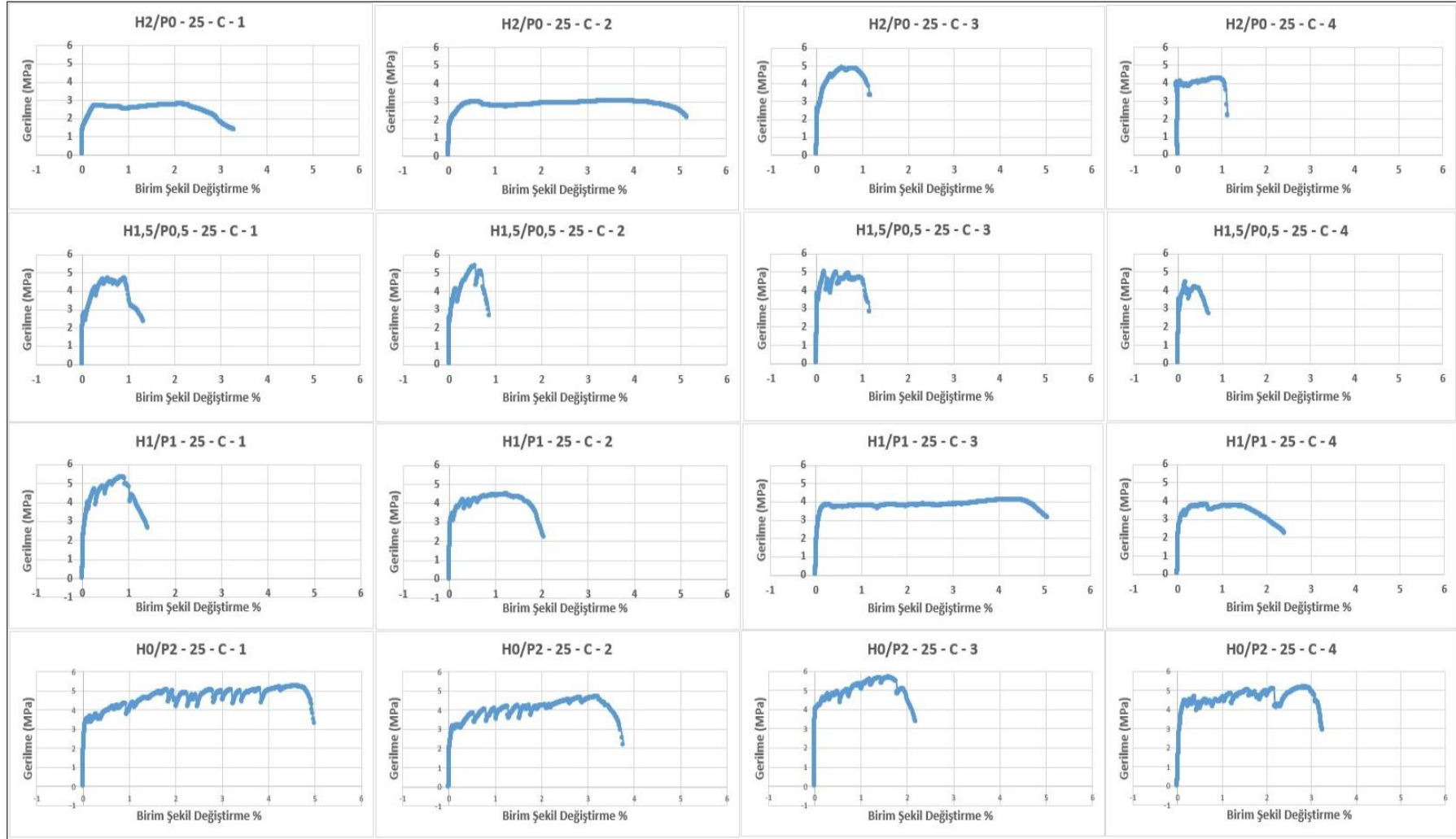
Şekil A.3 Karışım suyu %12,5 oranında polimer emülsiyonu ile modifiye edilmiş, cam tozu içermeyen (yalın) kompozitlerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme grafikleri



Şekil A.2 Karışım suyu %12,5 oranında polimer emülsiyonu ile modifiye edilmiş, cam tozu içeren kompozitlerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme grafikleri



Şekil A.3 Karışım suyu %25 oranında polimer emülsiyonu ile modifiye edilmiş, cam tozu içermeyen (yalın) kompozitlerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme grafikleri



Şekil A.6 Karışım suyu %25 oranında polimer emülsiyonu ile modifiye edilmiş, cam tozu içeren kompozitlerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme grafikleri