DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PRATİKTE KULLANILABİLİR POLİMERİK LİF KATKILI VE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

Eren GÖDEK

Temmuz, 2016
İZMİR

PRATİKTE KULLANILABİLİR POLİMERİK LİF KATKILI VE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

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

Eren GÖDEK

Temmuz, 2016
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

EREN GÖDEK, tarafından **DOÇ. DR. BURAK FELEKOĞLU** yönetiminde hazırlanan **"PRATİKTE KULLANILABİLİR POLİMERİK LİF KATKILI VE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU

Yönetici

Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL

Jüri Üyesi

Doç. Dr. A. Uğur ÖZTÜRK

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar yanımda olan, engin tecrübe ve bilgisiyle her zaman yol gösteren, sunduğu fikirlerle ufkumu genişleten, yapı malzemesi dünyasını sevdiren, gösterdiği sabır ve anlayışıyla hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve beni her an daha da çok çalışmaya azmettiren tez danışmanım Doç. Dr. Burak Felekoğlu'na,

Pozitif bakış açısı ve güleryüzüyle her zaman desteğini yanımda hissettiğim Doç. Dr. Kamile Tosun Felekoğlu'na,

Yapı malzemesi laboratuarındaki çalışmalarımda yardımcı olan, sürekli fikir alışverişinde bulunduğum, aynı projede görev aldığım arkadaşım Arş. Gör. Muhammer Keskinateş'e,

114M246 no'lu proje kapsamında, deneysel çalışmalarımda kullandığım cihazların ve malzemelerin temininde sağladığı maddi desteğinden dolayı bursiyer olarak görev aldığım TÜBİTAK'a, laboratuar imkânlarından yararlandığım Dokuz Eylül Üniversitesi'ne,

Bilgisayar hakkında sahip olduğu teknik bilgi ve becerisiyle karşılaştığım sorunlara çözüm üreten kuzenim İsmail Fuat Vural'a,

Tüm yaşantım boyunca beni destekleyen, her zaman yanımda olan, emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim annem Zeynep Gödek ve babam Selim Gödek'e, özlemini ve sevgisini her an hissetiğim kardeşim Nilsu Gödek'e, sevgisiyle yanımda olan ve beni sabırla bekleyen sevgili nişanlım Fulden Çınar Büyükcindil'e ve tüm aileme,

Sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Eren GÖDEK

PRATİKTE KULLANILABİLİR POLİMERİK LİF KATKILI VE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Geleneksel beton sahip olduğu yarı gevrek özelliği nedeniyle dış kuvvetler etkisinde fazla şekil değiştiremeden çatlamakta, oluşan çatlağın çok hızlı ilerlemesi nedeniyle yük taşıma potansiyelini kolayca kaybetmektedir. Günümüzde, beton içerisine yerleştirilen donatılar ya da makro ve mikro boyuttaki lifler sayesinde betonun yük taşıma kapasitesi arttırılabilmektedir. Son zamanlarda geliştirilen "Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler", çekme ve eğilme yüklemesi altında çoklu çatlak oluşturarak deformasyon sertleşmesi davranışı gösterebilen, geleneksel betona kıyasla daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip yeni nesil bir yapı malzemesidir.

Bu tez kapsamında, iki farklı uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kalsine kaolin kullanılarak üç farklı su çimento ve üç farklı toz malzeme çimento oranına sahip matrisler tasarlanmıştır. Bu tasarımlar kullanılarak polimerik lif katkılı kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin boşluk yapısı modifiye edilerek olası kusur oluşumundaki çoklu çatlak davranışları değerlendirilmiştir. Matrislerin taze haldeki akış özellikleri ve üretilen kompozitlerin dört noktalı eğilme deneyi altında mekanik performansları incelenmiştir. Kompozitlerin çatlak sayıları ve genişlikleri ile göçme kesitlerindeki lif dağılım özelliklerinin belirlenmesine yönelik mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak pratikte kullanılabilir akıcılığa sahip, lif topaklaşma problemi giderilmiş, yüksek sehim kapasitesine, tokluğa ve eğilme dayanımına sahip, çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitlerin üretiminin uygun bir matris seçimi ile mümkün olacağı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Çimento esaslı kompozit, lif, uçucu kül, cüruf, kalsine kaolin, boşluk modifikasyonu, lif dağılımı.

DEVELOPMENT OF PRACTICAL POLYMERIC FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

ABSTRACT

Conventional concrete, owing to its quasi-brittle behavior, cracks under exterior loads at low strain capacities and easily loses its load bearing capacity due to rapid progress of initial crack. Recently, load bearing capacity of concrete can be improved by placing bar reinforcement or macro and micro size fiber reinforcements. “Engineered Cementitious Composites” are new generation construction materials that show strain hardening behavior by multiple cracking under uniaxial or flexural loading conditions with an improved energy absorption capacity compared to conventional concrete.

In this study, matrices at three different Water to Cement and three different Fine Materials to Cement have been desined by using two distinct types of fly ashes, blast furnance slag and calcined kaolin. Polymeric fiber reinforced composites were produced by using these designs. The effect of possible defect formation in composite structure on the mechanical behavior of composites have been evaluated by modifying their flaw structure. Fresh state properties of matrices and mechanical performances of composites under four point flexural loading conditions have been investigated. Micro-structural studies were performed to measure the crack numbers and widths of composites and determine the fiber distribution properties at failure crack section. Finally, it was concluded that it is possible to produce composites exhibiting practicable flowability, eliminated fiber clumping problems, high deflection capacity, toughness and flexural strength with multiple cracking behavior by selecting proper fiber matrix combination.

Keywords: Cement based composites, fiber, fly ash, slag, calcined kaolin, flaw modification, fiber distribution.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii

TEŞEKKÜR iii

ÖZ iv

ABSTRACT v

ŞEKİLLER LİSTESİ x

TABLOLAR LİSTESİ xiii

BÖLÜM BİR-GİRİŞ 1

1.1 Lifli Betonun Tarihsel Gelişimi 2

1.2 Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Kompozitler (ECC) 3

1.2.1 ECC'nin Mikromekanik Tasarımı 5

1.2.2 ECC Tasarımında Kullanılan Mikromekanik Model 10

1.3 ECC'nin Üretimi 13

1.3.1 Lif Fazında Kullanılan Polimerik Lif Türleri ve Özellikleri 13

1.3.1.1 Polietilen Lifler (PE) 14

1.3.1.2 Polivinil Alkol Lifler (PVA) 15

1.3.1.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP) 16

1.3.2 Matris Fazında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 17

1.3.2.1 Mikro Agrega 18

1.3.2.2 Uçucu Kül 18

1.3.2.3 Yüksek Fırın Cürufu 21

1.3.2.4 Kalsine Kaolin 22

1.3.3 Lif-Matris Aderans Özellikleri 24

1.4 ECC'nin Mekanik Performansının İncelenmesi ve Geliştirilmesi 26
1.4.1 ECC'nin Çoklu Çatlak Davranışı..... 26
1.4.2 Çoklu Çatlak Davranışını Geliştirmek için Yapılan Çalışmalar..... 30

BÖLÜM İKİ-DENEYSEL ÇALIŞMALAR 35

2.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler 36
2.1.1 Çimento..... 36
2.1.2 Uçucu Kül (UK)..... 37
2.1.3 Taştozu (TT) 38
2.1.4 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (YFC) 38
2.1.5 Kalsine Kaolin (KK) 38
2.1.6 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropleп Lif (HTPP) 39
2.1.7 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı..... 39
2.1.8 Polietilen Plastik Taneler (PE)..... 40
2.2 Kompozitlerin Karışım Oranları ve Üretimi.....40
2.3 Eğilme Deneyi Sonucu Elde Edilen Parametreler ve Çatlak Analizi 42
2.4 Kompozitlerin Göçme Kesitinden Lif Dağılım Parametrelerinin Elde Edilişi.....45

BÖLÜM ÜÇ-DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 47

3.1 Uçucu Kül İçeren Kompozitlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .47
3.1.1 Uçucu Küllerin Karakterizasyonu..... 47
3.1.2 Taze Haldeki Özelliklerinin Değerlendirilmesi 50
3.1.2.1 Akma Sürelerinin Değerlendirilmesi 50
3.1.2.2 Taze Haldeki Lif Topaklanma Miktarının Değerlendirilmesi..... 52

3.1.3 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi 54

3.1.4 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi 56

3.1.5 Çatlak Sayısı ve Genişliklerinin Değerlendirilmesi 62

3.1.5.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi 62

3.1.5.2 Dayanımı Oranının (σ_{maks}/σ_i) Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi 64

3.1.6 Çatlak Sayısı ve Genişliğinin Sehim Kapasitesine Etkisinin Değerlendirilmesi 66

3.1.6 Tokluk Değerlerinin İncelenmesi ve Tokluk Korelasyonları 67

3.2 Yüksek Fırın Cürufu İçeren Kompozitlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 69

3.2.1 Taze Haldeki Özelliklerinin Değerlendirilmesi 69

3.2.1.1 Akma sürelerinin değerlendirilmesi 69

3.2.1.2 Taze Haldeki Lif Topaklanma Miktarının Değerlendirilmesi 70

3.2.2 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi 70

3.2.3 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi 72

3.2.4 Çatlak Sayısı ve Genişliklerinin Değerlendirilmesi 74

3.2.4.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi 74

3.2.4.2 Dayanımı Oranının (σ_{maks}/σ_i) Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi 75

3.2.5 Çatlak Sayısı ve Genişliğinin Sehim Kapasitesine Etkisinin Değerlendirilmesi 77

3.2.6 Tokluk Değerlerinin İncelenmesi ve Tokluk Korelasyonları 78

3.3 Kalsine Kaolin İçeren Kompozitlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 80

3.3.1 Taze Haldeki Özelliklerin Değerlendirilmesi 80

3.3.1.1 Akma Sürelerinin Değerlendirilmesi 80

3.3.1.2 Taze Haldeki Lif Topaklanma Miktarının Değerlendirilmesi..... 81

3.3.2 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi 81

3.3.3 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi 83

3.3.4 Çatlak Sayısı ve Genişliklerinin Değerlendirilmesi 85

3.3.4.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi 85

3.3.4.2 Dayanım Oranının (σ_{maks}/σ_i) Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi 86

3.3.5 Çatlak Sayısı ve Genişliğinin Sehim Kapasitesine Etkisinin Değerlendirilmesi 87

3.3.6 Tokluk değerlerinin incelenmesi ve tokluk korelasyonları 88

3.4 Kompozitlerin Lif Dağılım Katsayılarının İncelenmesi 90

3.4.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Lif Dağılım Katsayısına Etkisi 90

3.4.2 Lif Dağılım Katsayılarının Mekanik Performansa Etkisi 92

3.4.2.1 Lif Dağılım Katsayısı – Eğilme Dayanımı İlişkisi 92

3.4.2.2 Lif Dağılım Katsayısı – Sehim Kapasitesi İlişkisi 93

3.4.2.3 Lif Dağılım Katsayısı – Tokluk İlişkisi 93

3.4.2.4 Lif Dağılım Katsayısı – Çatlak Sayısı İlişkisi 94

BÖLÜM DÖRT-SONUÇLAR 96

KAYNAKLAR 102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Çekme gerilmesi altında farklı kompozitlerin davranışları 4
Şekil 1.2 Mikro mekanik modeli oluşturan parametreler 5
Şekil 1.3 Mikromekanik modele uygun tasarım aşamaları 9
Şekil 1.4 PVA-ECC için 2D ve 3D lif yönlenmesi durumlarında lif köprüleme gerilmesi-çatlak 9
Şekil 1.5 Çatlak genişlemesi türevleri 11
Şekil 1.6 Tek bir çatlakta gerçekleşen çekme gerilmesi (σ) – çatlak açıklığı (δ) ilişkisi 12
Şekil 1.7 Polietilen (PE) lifin kimyasal yapısı 14
Şekil 1.8 Polivinil alkol (PVA) lifin kimyasal yapısı 15
Şekil 1.9 Polipropilen lifin (PP) kimyasal yapısı 17
Şekil 1.10 Mikro silika kumu 18
Şekil 1.11 Farklı morfolojik özelliklere sahip uçucu küller 20
Şekil 1.12 Yüksek fırınn cürufunun morfolojisi 21
Şekil 1.13 Metakaolinin morfolojisi 23
Şekil 1.14 Lif-matris geçiş bölgeleri 24
Şekil 1.15 Lif-matris arafaz mikrosertlik değişimi 25
Şekil 1.16 ECC'nin çoklu çatlak oluşum mekanizması 27
Şekil 1.17 Çekme ve eğilme yüklemesi altında ECC'nin çoklu çatlak davranışı . 28
Şekil 1.18 Kompozitlerin çekme ve eğilme yüklemesi altındaki davranışları 29
Şekil 1.19 Mikrofotoğraflardan lif dağılımlarının elde edilmesi 32
Şekil 1.20 Liflerin yönlenme açılarının bulunması 33
Şekil 1.21 Matris kusur yapısının modifikasyonu 34
Şekil 2.1 Matrislerin tasarımlarının belirlenmesi 35
Şekil 2.2 Matrislerin etiket düzeni örneği 36
Şekil 2.3 Hobart mikser ve modifiye marsh hunisi 42
Şekil 2.4 Dört noktalı eğilme deneyinde numune boyutları ve yükleme şartları .. 43
Şekil 2.5 Yük-sehim eğrisi ve parametrelerin belirlenişi 44

Şekil 2.6 Çatlak analizinin yapılışı 45
Şekil 2.7 Numune hazırlığı ve mikrofotoğraf çekim aşamaları 46
Şekil 3.1.Yatağan ve Tunçbilek uçucu küllerinin parça büyüklüklerinin kıyaslanması 48
Şekil 3.2 Yatağan uçucu külü (C sınıfı) SEM fotoğrafları 49
Şekil 3.3 Tunçbilek uçucu külü (F sınıfı) morfolojik özellikleri 49
Şekil 3.4 YUK serisi Akma süresi-Katkı dozajı ilişkisi 51
Şekil 3.5 TUK serisi akma süresi-katkı dozajı ilişkisi 51
Şekil 3.6 YUK serisi yük-sehim eğrileri 55
Şekil 3.7 TUK serisi yük-sehim eğrileri 56
Şekil 3.8 YUK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 58
Şekil 3.9 TUK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 60
Şekil 3.10 YUK serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 63
Şekil 3.11 TUK serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 64
Şekil 3.12 Dayanımı oranı ile çatlak sayısı ilişkisi 65
Şekil 3.13 Dayanımı oranı ile çatlak genişliği ilişkisi 65
Şekil 3.14 Çatlak sayısı-sehim ilişkisi 66
Şekil 3.15 Çatlak genişliği-sehim ilişkisi 67
Şekil 3.16 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi 68
Şekil 3.17 Tokluk korelasyonları 68
Şekil 3.18 YFC serisi akma sürelerinin değerlendirilmesi 69
Şekil 3.19 YFC serisi yük-sehim eğrileri 71
Şekil 3.20 YFC serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 73
Şekil 3.21 YFC serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 75
Şekil 3.22 YFC serisi dayanım oranı ile çatlak sayısı ilişkisi 76
Şekil 3.23 YFC serisi dayanım oranı ile çatlak genişliği ilişkisi 76

Şekil 3.24 Çatlak sayısı-sehim ilişkisi 77
Şekil 3.25 Çatlak genişliği-sehim ilişkisi 78
Şekil 3.26 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi 79
Şekil 3.27 Tokluk korelasyonları 79
Şekil 3.28 Tokluk korelasyonları 81
Şekil 3.29 KK serisi yük-sehim eğrileri 82
Şekil 3.30 KK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 84
Şekil 3.31 KK serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi 86
Şekil 3.32 KK serisi dayanım oranı ile çatlak sayısı ilişkisi 87
Şekil 3.33 KK serisi dayanım oranı ile çatlak genişliği ilişkisi 87
Şekil 3.34 KK serisi çatlak sayısı ile sehim ilişkisi 88
Şekil 3.35 KK serisi çatlak genişliği ile sehim ilişkisi 88
Şekil 3.36 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi 89
Şekil 3.37 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi 89
Şekil 3.38 Kompozitlerin lif dağılım katsayılarının S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak incelenmesi 91
Şekil 3.39 Lif dağılım katsayısı-eğilme dayanımı ilişkisi 92
Şekil 3.40 Lif dağılım katsayısı-sehim kapasitesi ilişkisi 93
Şekil 3.41 Lif dağılım katsayısı-tokluk ilişkisi 94
Şekil 3.42 Lif dağılım katsayısı-çatlak sayısı ilişkisi 95
Şekil 4.1 Kompozitlerin sehim kapasitesi-tokluk ilişkileri 101

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri, basınç dayanımları 37
Tablo 2.2 Deneylerde kullanılan uçucu küllerin kimyasal özellikleri 37
Tablo 2.3 Kireçtaşı tozunun özellikleri 38
Tablo 2.4 Ereğli ÖYFC Kimyasal Bileşimleri 38
Tablo 2.5 Kalsine kaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri 39
Tablo 2.6 HTPP liflerin mekanik özellikleri 39
Tablo 2.7 Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri 39
Tablo 2.8 Matris karışım oranları 41
Tablo 3.1 Taze haldeki uçucu küllü kompozitlerin lif topaklanma oranları 53
Tablo 3.2 Taze haldeki yüksek fırın cüruflu kompozitlerin lif topaklanma oranları 70
Tablo 3.3 Taze haldeki kalsine kaolin içeren kompozitlerin lif topaklanma oranları 81
Tablo 4.1 Kompozitlerin taze hal performanlarının kıyaslanması 97
Tablo 4.2 Kompozitlerin mekanik performanslarının kıyaslanması 99
Tablo 4.3 Kompozitlerin lif dağılım katsayılarının kıyaslanması 100

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Beton; çimento, su, agrega ve bazı katkıların belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilen, kullanımı gelişen teknoloji ile her geçen gün daha da artan ve tüm dünyada neredeyse vazgeçilmez hale gelmiş en önemli yapı malzemesidir (Alexander, Bertron ve De Belie, 2013; Gambhir, 2013; MacDonald, 2010). Betonun uygulamalarda dikkate alınan en önemli özelliği sahip olduğu yüksek basınç dayanımıdır. Bu nedenle birçok araştırmacı tarafından betonun basınç dayanımını daha da iyileştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Özellikle 1980'li yıllarda başlayan çalışmalarla, basınç dayanımı 150 MPa'dan büyük olan yüksek dayanımlı betonların üretimi gerçekleştirilmiştir (Schmidt ve Fehling, 2005). Ancak, beton her ne kadar basınç dayanımı açısından üstün bir performans gösterse de, doğası gereği yarı-gevrek, çatlamaya eğilimli ve oldukça düşük çekme dayanımına (basınç dayanımının yaklaşık %10'u) sahip bir malzemedir (MacDonald, 2010). Ayrıca, artan basınç dayanımı ile giderek daha da gevrek bir davranış göstermeye başlamaktadır (C. Taşdemir, M.A. Taşdemir, Lydon ve Barr, 1996). Beton, belirli bir yük taşıma kapasitesine ulaştığında, kesitinde oluşacak bir çatlak, hızla ilerleyerek betonun tüm kütlesini kullanmaya imkan vermeden yük taşıma kapasitesini kaybetmesine sebep olacaktır. Hem bu ani göçme hareketini engellemek hem de beton kütlesinden daha fazla yararlanmak amacıyla, beton içerisine sürekli ve süreksiz, makro ve mikro boyutlu donatılar ilave edilmektedir. Böylece, kesitteki çatlağın hızlı bir şekilde ilerlemesi ve açılması engellenerek, betonun kırılma ve çatlak ilerlemesi aşamalarında da yük taşımaya devam etmesi sağlanmaktadır (Bentur ve Mindess, 2006).

Beton elemanların üretiminde en çok kullanılan donatı türü, sürekli ve makro boyutlu bir donatı türü olan geleneksel yapı çeliğidir. Özellikle betonarme elemanların üretiminde, çekme bölgesine konulan yapı çeliği betonun çekme dayanımını arttırmaktadır. Ancak, yapı çeliğinin ince kesitli elemanlarda kullanımında sıkıntılar yaşanabilmektedir. Ayrıca, yapı çeliği betonun çekme gerilmesi kapasitesini arttırsada, betonda oluşan çatlakların genişlemesine yeterince

engel olamamaktadır. Bu durum, çeliğin korozyonu sebebiyle yapısal elemanlarda durabilite problemlerine sebep olmaktadır. Bu nedenle, ince kesitli yapı elemanlarında ve durabilite açısından çatlak genişliklerinin sınırlandırılmasının istendiği durumlarda süreksiz ve mikro boyutlu lifler beton içerisine katılarak bu problemlerin önüne geçilebilmektedir (Frosch, 1999; Bentur ve Mindess, 2006).

1.1 Lifli Betonun Tarihsel Gelişimi

Antik çağlardan günümüze, yapı malzemelerinin liflerle güçlendirilmesi kavramı süregelen bir gelişimdir (Bentur ve Mindess, 2006). Geçmişte, güneşte pişirilen tuğlaların ya da kerpiç gibi kırılgan yapı malzemelerinin içerisine hayvan kılı, saman ya da bitkisel lifler katılarak malzemelerde oluşacak rötre çatlaklarının engellenmesi amaçlanmıştır (Brandt, 2008; Bentur ve Mindess, 2006).

Beton içerisine çivi ve ince metal parçalar konularak beton özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar eski yıllarda başlamıştır. 1874 yılında, Amerikalı A. Bernard, betonun içerisine atık demir parçalarının yerleştirilerek uygulanmasına dair patent almıştır. 1900'lerde, geliştirilen Hatscheck yöntemi ile asbest lifli kompozitler üretilmeye başlanmıştır. 1918-1920 yılları arasında betonun çekme dayanımının arttırılması amacıyla beton içerisine ahşap ve demir gibi lifler eklenmiştir. 1927 yılında, betonun içerisine kıvrılmış dalgalı ya da yassı özellikteki ince çelik tellerin kullanılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. 1950'li yıllarda beton içerisinde cam lifinin kullanılmasına dair çalışmalarda bulunulmuştur (S.T. Erdoğan ve T.Y. Erdoğan, 2007). 1960'ların başlarında Romualdi, Batson ve Mandel tarafından çelik lifli betonlar üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekerek, akademik ve endüstriyel açıdan lifli betonların araştırılması hız kazanmaya başlamıştır (ACI committee 544, 1982).

Betonun içerisine rastgele olarak dağıtılan farklı hacim, boy ve tipdeki çelik liflerin betonun taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Bayasi ve Soroushian, 1992; Shah ve Rangan, 1971; Soroushian ve Bayasi, 1991; Yazıcı, İnan ve Tabak, 2007). Çelik liflere alternatif olarak, cam, karbon, naylon ve polimer gibi farklı lif türlerinin beton performansı üzerine etkisi hakkında çalışmalar yapılmıştır

(Marikunte, Aldea ve Shah, 1997; Mobasher ve Shah, 1989; Shah, Ludirdja, Daniel ve Mobasher, 1988; Wang, Backer ve Li, 1987).

Beton matrisi kırıldığında, içindeki liflerin yükü tutarak, çoklu çatlak davranışı göstereceği teorisi ile ilgili çalışmalar da yine ilk kez 1970'li yıllarda yapılmaya başlamıştır (Aveston ve Kelly, 1973). Liflerin sıyrılması ile ilgili çalışmalar yapılmış ve lifli kompozitler için mikromekanik modelin temelleri atılmaya başlanmıştır (Harris, Morley ve Philips, 1975). Çoklu çatlak davranışının görülebilmesi için kritik lif dozajının belirlenmesi hakkında bazı araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Maalej, Hashida ve Li, 1995; Johnston ve Skarendahl, 1992). Kompozitlerde, lif-matris arayüzey zayıflığının lif sıyrılmasında önemli bir rolü olduğu görülmüş ve lif sıyrılmasını minimize etmek amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Shah ve Stang, 1986; Jones, 1996).

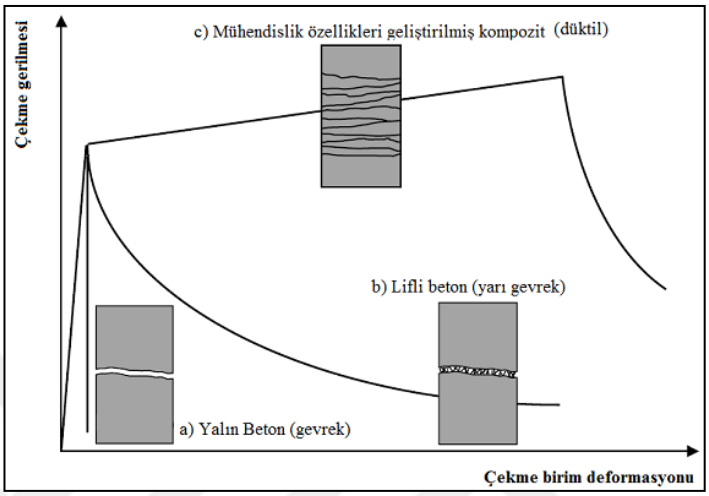
1980'li yıllarda Prof. Dr. Victor Li tarafından yapılan çalışmalarda, mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (Engineered Cementitious Composites – ECC), çoklu çatlak ve deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren yeni nesil bir yapı malzemesi olarak literatüre kazandırılmıştır (Keoleian, Kendall, Lepech ve Li, 2006; Li ve Kanda, 1998).

1.2 Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Kompozitler (ECC)

Bilindiği üzere geleneksel yalın betonun çekme birim deformasyon kapasitesi yaklaşık %0,01 seviyelerindedir (Şekil 1.1a). Yalın betona lif eklenerek üretilen kompozitlerde, kompozit içerisinde bulunan lifler ilk çatlak oluşumundan sonra çatlak kesitinde bir köprüleme gerilmesi oluşturarak çatlağın hızlı bir şekilde genişlemesini engeller ve kompozitin yük taşıma kapasitesini artırır. Ancak, bu tür kompozitlerin genelinde ilk çatlaktan sonra yük artışı olmaz ve çatlak genişleyerek deformasyon yumuşaması meydana gelir (Şekil 1.1b). Bu durum pek çok lif dozajı ve türü için de geçerlidir (Naaman, 2007).

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (ECC), geleneksel betona kıyasla çok daha yüksek tokluğa sahip, betonun kullanım kısıtlamalarını

gidermeye yönelik olarak tasarlanmış, polimerik lif içeren kompozitlerdir (Şekil 1.1c) (Li, 2012a). Son yıllarda Amerika'da Prof. Dr. Victor Li öncülüğünde ECC üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Keoleian ve diğer., 2006; Li ve Kanda, 1998).



Şekil 1.1 Çekme gerilmesi altında farklı kompozitlerin davranışları; a) Yalın beton, b) Lifli betonun, c)Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (Li ve Fischer, 2002).

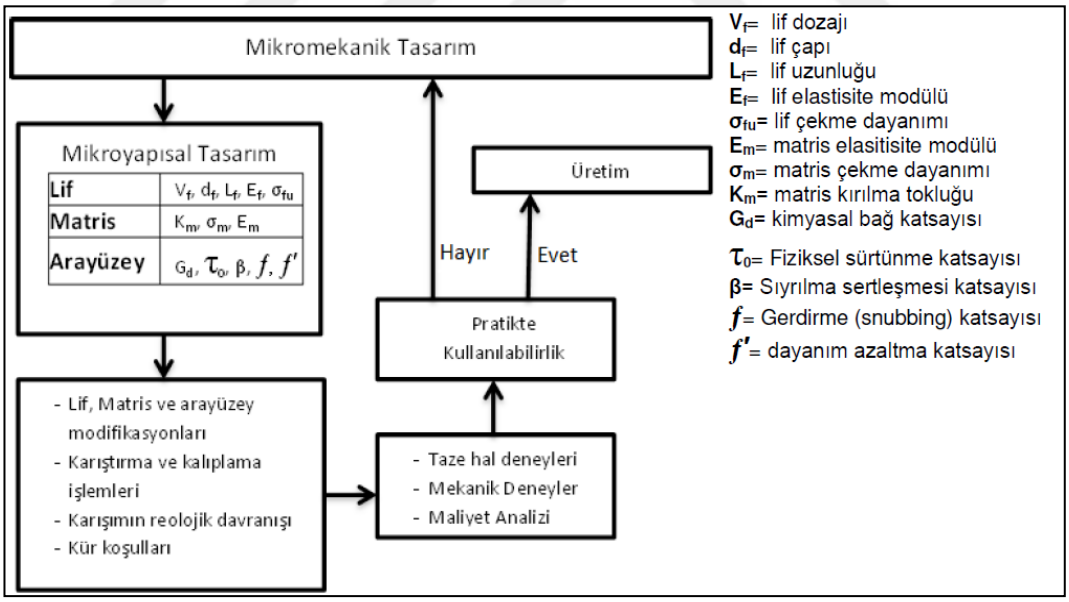
ECC'nin hem şekil değiştirebilme hem de yük taşıma kapasitesi, gösterdiği çoklu çatlak davranışı sayesinde, çekme ve eğilme yükü etkisi altında artmaktadır. Bu davranış, çekme yüklemesi altında deformasyon sertleşmesi, eğilme yüklemesi altında ise sehim sertleşmesi olarak adlandırılır (Wille, El-Tawil ve Naaman, 2014). ECC, sağladığı yüksek şekil değiştirme kapasitesinin yanısıra, artan deformasyonla birlikte kompozitte oluşacak çatlak genişliklerini de sınırlandırmaktadır. Oluşan çatlaklarının genişlememesi, kompozitin uzun servis ömrü ve dayanıklılık avantajlarını da beraberinde getirmektedir (Li ve Herbert, 2012; Şahmaran, Yıldırım, Özbay, Ahmed ve Lachemi, 2014).

ECC üretiminde, hacimce yalnızca %2 oranında lif kullanımı ile çoklu çatlak davranışı ve deformasyon sertleşmesi gösteren, çekme birim deformasyon kapasitesi %2,5-4'e kadar çıkan ve çatlak genişliği 50-60 µm olan kompozitler üretilebilmektedir (Li, 2012; Zhou ve diğer., 2010). Ancak, ECC'nin çoklu çatlak ve

deformasyon sertleşmesi davranışı gösterebilmesi için kompoziti oluşturan lif, matris ve lif-matris arayüzey özelliklerinin birbiriyle ilişkilendirilerek mikromekanik teoriye uygun olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (Li, Wang ve Wu, 2001).

1.2.1 ECC'nin Mikromekanik Tasarımı

Li ve diğer., (2001) tarafından geliştirilen mikro-mekanik modelin temelleri 90'lı yılların başında kurulmuştur (Li ve Leung, 1992; Li ve Wu, 1992). Mikromekanik teori, mikro ölçekteki bileşenlerin özelliklerinin ve birbiriyle uyumunun geliştirilmesi ile makro boyuttaki kompozitlerin davranışının istenilen şekilde tasarlanmasını sağlar. Mikromekanik modeli oluşturan parametreler lif, matris ve lif-matris arayüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu parametreler Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Lif ve matrise ait özellikler, lif-matris aderans özelliklerine kıyasla daha kolay elde edilebilmektedir. Ancak, lif-matris arayüzey özellikleri, kullanılan her lif–matris kombinasyonu için farklılık gösterecektir (Li, 1993).



Şekil 1.2 Mikro mekanik modeli oluşturan parametreler (Li ve diğer., 2001).

Kritik lif uzunluğu, bir lifin matris içerisinden kopmadan sıyrılarak çıkabileceği en büyük gömülü uzunluğu ifade etmektedir (Wang, Backer ve Li, 1988). Bu uzunluk lif ve matris özelliklerine bağlı olarak, lifin matristen tek taraflı ya da çift

taraflı sıyrılma davranışı göstermesi ile farklılık göstermektedir. Farklı türdeki liflerin sıyrılma davranışını ve kritik lif uzunluklarının belirlenmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Wang, Li ve Backer, 1988).

Lif dozajı, yüksek şekil değiştirme ve yük değerlerine ulaşabilmek için belirlenmesi gereken en önemli parametrelerden birisidir. Lif dozajının kompozit davranışına etkisi üzerine yapılan çalışmalarda, lif dozajı artışıyla birlikte kompozitin mekanik performansının arttığı görülmüştür (Maalej ve diğer., 1995). Ancak, istenilen performansın minimum miktarda lif kullanılarak elde edilebilmesi için, kritik lif dozajının, lif ve matris özellikleri dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir (Denklem 1.1) (Li, 1993).

$$V_f \geq V_f^{crit} \equiv \frac{12 J_{tip}}{g\tau(L_f/L_d)\delta_0} \tag{1.1}$$

Denklem 1.1'de, V_f lif dozajını, V_f^{crit} kritik lif dozajını, J_{tip} çatlak ucu kırılma tokluğunu, g lif-matris arayüzeyindeki kimyasal bağ katsayısı (daha sonraki çalışmalrda G_d ile belirtilmeye başlanmıştır), τ lif-matris arasındaki fiziksel sürtünme katsayısını, L_f/L_d kullanılan lifin görünüm oranını, δ_0 da çatlak açıklığını belirtmektedir. Mikroyapı çalışmalarında, liflerin yüzey özelliklerinin geliştirilerek lif-matris arayüzey özelliklerinin optimizasyonu amaçlanmaktadır (Yang, 2008). Matrise gömülü olan tek bir lifin kontrollü bir şekilde matris içerisinden çekilmesi deneyi (pull-out deneyi) ile lif-matris arayüzeyinde oluşacak olan aderans özellikleri ve bu aderansı doğrudan etkileyecek parametreler belirlenebilmektedir (Li, Wang ve Backer, 1990; Maalej ve diğer., 1995). Tek lif çekme deneyinde, lif-matris aderans özelliklerine bağlı olarak üç farklı yük-sehim eğrisi gözlenebilir (Şekil 1.3a). Sıyrılma sertleşmesi davranışı, lif yüzeyinin polimerik lif yüzeyi ile matris arasındaki aderans sebebiyle aşınmasından kaynaklanmaktadır (Li ve Stang, 1996). Bu tür davranış genellikle hidrofil yüzey karakterli PVA liflerde görülmektedir. Eğer lif yüzeyi ile matris arasında yeterli bir aderans gözlenmezse (çelik lifler de olduğu gibi) sıyrılma yumuşaması davranışı gözlenecektir (Kanda, Lin ve Li, 2000). Ayrıca, hidrofob karakterli polimerik liflerde de sıyrılma yumuşaması davranışı

görülmektedir. Tek lif çekme deneyi ile elde edilen sıyrılma yükü-sıyrılma miktarı eğrisi dikkate alınarak herhangi bir lif-matris kombinasyonu için τ_o= Fiziksel sürtünme katsayısı (Denklem 1.2), G_d= kimyasal bağ katsayısı (Denklem 1.3), β= Sıyrılma sertleşmesi katsayısı (Denklem 1.4) deneysel olarak elde edilmektedir (Redon ve diğer., 2001).

$$\tau_0 = \frac{P_b}{\pi d_f l_f} \tag{1.2}$$

$$G_d = \frac{2(P_a - P_b)}{\left(\pi^2 E_f d_f^3\right)} \tag{1.3}$$

$$\beta = \left(d_f / l_f\right)\left[\left(1/\tau_0\, \pi d_f\right)(\Delta P/\Delta S')\right]|_{\,s'\to 0} + 1 \tag{1.4}$$

Denklem 1.2, 1.3 ve 1.4'teki parametrelerin açıklamaları için Şekil 1.2 ve Redon ve diğer., (2001)'in yaptığı çalışmalardan yararlanılabilir.

Pratikte matris içerisindeki lifler matris içerisine rastgele dağılmış ve yükleme doğrultusu ile belirli bir açı yapacak şekilde yönlenmiş durumdadır. Matris içerisinde belirli bir yönlenme açısıyla duran liflerin çekme davranışı altında sıyrılmaya direnç gösterdiği ve yük artışına sebep olduğu rapor edilmiştir (Li ve diğer., 1990). Bu yük artışı, lifin bir ucunun matrise belirli bir açı ile gömülmesi ve tek lif çekme deneyinin uygulanmasıyla bir katsayı olarak elde edilebilmektedir. Belirlenen bu katsayı mikro-mekanik model içerisinde gerdirme (snubbing) katsayısı (f) olarak dikkate alınmaktadır (Şekil 1.3b). Morton ve Groves, (1976) ve Wang ve diğer., (1990), tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, lifin matristen çıkma noktasında Euler'in sürtünmeli makara sisteminden yararlanılarak bir gerdirme katsayısı formülize edilmiştir (Denklem 1.5). Bu formül ile f katsayısı elde edilebilmektedir (Yang, 2008). Bazı tür liflerde, lif çekilirken eğilme veya kesme etkisi de söz konusuysa çekme dayanımında bir miktar düşüş meydana geldiği gözlenmiş. Söz konusu azalma etkisi de, mikro-mekanik modelde dayanım azaltma katsayısı olarak f' ile tanımlanmıştır (Denklem 1.6) (Kanda, 1998).

$$P(\emptyset) = P(0)e^{f\emptyset} \tag{1.5}$$

$$\sigma_{fu}(\emptyset) = \sigma_{fu}(0)e^{-f'\emptyset} \quad (1.6)$$

Burada $P(\emptyset)$ liflerin çıkış noktasında $\emptyset$ açısı ile bulunması durumundaki lif köprüleme gerilmesini (Yang, 2008), $\sigma_{fu}(\emptyset)$'da kesitteki liflerin $\emptyset$ açısı kadar yönlenmesi durumundaki kopma dayanımını ifade etmektedir (Kanda, 1998).

Elde edilen bu veriler dahilinde, çatlağı köprüleyen liflerin yönlenmesi ve gömülü uzunluklarına bağlı bir olasılık yoğunluk fonksiyonu elde edilerek çatlağın köprüleme gerilmesi tahmin edilebilir (Şekil 1.3c) (Li, Wang ve Backer, 1991). Kesitteki rastgele lif dağılımının ve yönlenmesine bağlı olarak köprüleme gerilmesi (σ) - çatlak genişliği (δ) ilişkisini ifade eden bir σ(δ) eşitlik Denklem 1.7'de gösterilmiştir.

$$\sigma(\delta) = \frac{1}{A_f V_f} \int P(z,\emptyset)p(z,\emptyset)dzd\emptyset \quad (1.7)$$

P(z,ϕ), çatlak düzleminde ϕ açısıyla ve merkezinden z mesafesinde bulunan tek bir lifin köprüleme kuvvetini ifade etmektedir. p(z, ϕ) ise z mesafesinde, ϕ açısıyla bulunma olasılığını belirten bir olasılık yoğunluk fonksiyonudur. A_f ve V_f ise enkesit alanı ile lif dozajını belirtir.

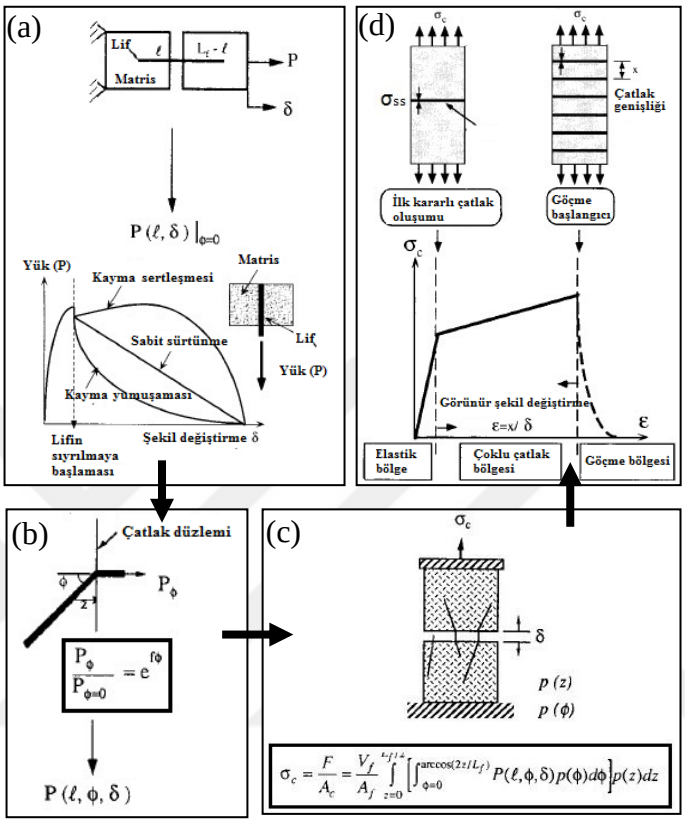
Lif yönlenmesinin köprüleme gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Pratikte lif dağılımı mükemmel değildir (Şekil 1.3c). Bu nedenle, σ-δ ilişkisi her bir çatlak kesiti için farklılık göstermektedir. Şekil 1.4'de PVA-ECC için σ-δ arasındaki teorik ilişki ve liflerin 2D ve 3D yönlenmesine bağlı köprüleme gerilmesinde meydana gelecek değişim gösterilmektedir (Denklem 1.8-1.10). 3D olarak rastgele dağılmış liflerde p(z,φ) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$p(z,\emptyset) = p(z)p(\emptyset) \quad (1.8)$$

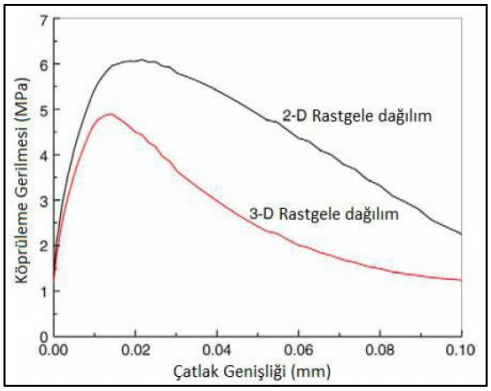
$$p(z) = \frac{1}{l_f} \qquad -\frac{l_f}{2} \le z \le \frac{l_f}{2} \quad (1.9)$$

$$p(\emptyset) = sin(\emptyset) \qquad 0 \le \emptyset \le \frac{\pi}{2} \quad (1.10)$$

Yukarıda anlatılan tüm bu veriler dikkate alınarak ECC'nin yük altındaki davranışını modellenebilmekte ve makro boyutta üretilecek kompozitin yük altındaki davranışı tahmin edilebilmektedir (Şekil 1.3d) (Li, 1993).



Şekil 1.3 Mikromekanik modele uygun tasarım aşamaları, a) Matristen tek bir lifin çekilmesi, b) Matristen tek bir lifin belirli bir açıyla çekilmesi, c) Kompozit üretimi ve tek bir çatlağın açtırılarak modellenmesi, d) Kompozit üretimi ve çoklu çatlak davranışı.

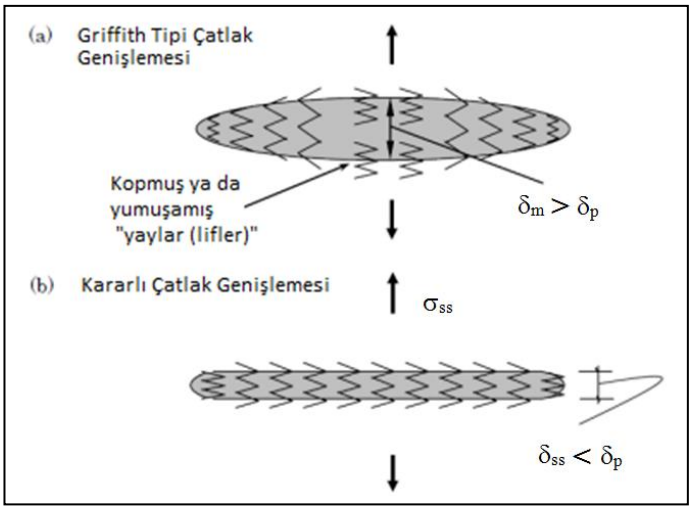


Şekil 1.4 PVA-ECC için 2D ve 3D lif yönlenmesi durumlarında lif köprüleme gerilmesi-çatlak açıklığı ilişkisinin teorik modeli (Ranade, Stults, Lee ve Li, 2012).

1.2.2 ECC Tasarımında Kullanılan Mikromekanik Model

Mikromekanik tasarım parametrelerinin dikkate alınmasıyla oluşturulan mikromekanik modelin iki önemli kriteri vardır. Bunlar, dayanım kriteri ve enerji kriteridir. Kompozitin çoklu çatlak göstermesi ve deformasyon sertleşmesi davranışı göstermesi için enerji ve dayanım kriterlerinin her ikisi birden sağlanması gerekmektedir (Li, 1993).

ECC, eğilme ya da çekme yüklemesi altında oluşturduğu çoklu mikro-çatlak davranışı sayesinde deformasyon sertleşmesi davranışı göstermektedir. Çoklu mikro-çatlak oluşumu da ancak kararlı çatlak genişliği oluşması durumunda gerçekleşebilir. Şekil 1.5'de Griffith tipi çatlak ve kararlı durumdaki çatlak genişlemesi lifli bir kompozit için şematik olarak gösterilmiştir (Li, 2003). Şekildeki yaylar çatlamış kesiti köprüleyen lifleri temsil etmektedir. Liflerin köprülediği gerilme, kesitteki liflerin köprüleme kapasitesini aşarsa, temsili yay elastik özelliğini kaybedecektir (lifler kopacaktır). Griffith tipi çatlak oluşumunda genişleyen bir çatlak açılmasına karşı azalan bir çekme gerilmesi söz konusudur (Şekil 1.5a). Çekme gerilmesindeki bu azalma, çatlak ortasındaki liflerin kopması ya da daha az gergin olması ve çatlak ortası açıklığının (δ_m) kritik çatlak genişliğinden (δ_p) fazla olması ile ilişkilendirilir. Kararlı durumdaki çatlak genişlemesi için ise durum daha farklıdır. Kararlı durumdaki çatlaklarda çatlak genişliği kritik çatlak genişliğinden azdır. Çatlamış kesitteki lifler bu sırada elastik yay davranışını korumaktadır. Bu çatlaklar kararlı bir çekme gerilmesi (σ_{ss}) altında kararlı bir çatlak genişlemesi (δ_{ss}) oluştuğunu ifade etmektedir (Şekil 1.5b) (Tai, 2015).



Şekil 1.5 Çatlak genişlemesi türevleri; a) Griffith tipi çatlak genişlemesi, b) Kararlı çatlak genişlemesi (Tai, 2015)

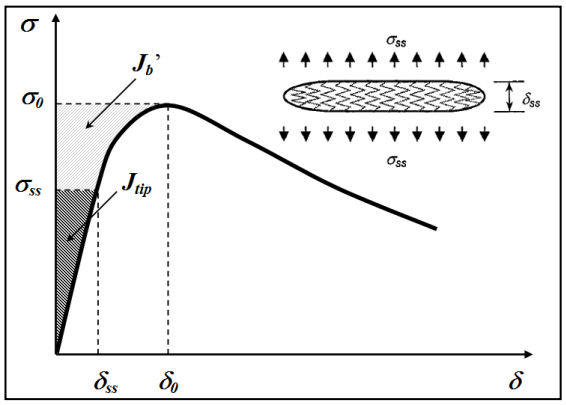
Enerji kriteri, kompozitte açılacak çatlakların genişleme davranışını (Griffith tipi ya da kararlı çatlak genişlemesi) karakterize etmektedir. ECC'nin tasarımında temel amaç, tamamlayıcı enerji (J_b') ile çatlak ucu kırılma tokluğu (J_{tip}) arasındaki oranı maksimize etmektir (Denklem 1.11). Bu oran, matris özelliklerine bağlı olarak J_{tip} 'in azaltılması ya da lif yüzey özellikleri ile matris etkileşimine bağlı olarak J_b' nün arttırılması ile artmaktadır. Bu oran (J_{tip}/J_b') ne kadar fazla olursa kompozitin çoklu çatlak davranışı gösterme potansiyeli de o kadar artacaktır (Wang, 2005).

$$J_{tip} = \sigma_0\delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta)d\delta \equiv J_b' \tag{1.11}$$

Denklem 1.11'in sağ kısmı, dış işten kaynaklanan enerjinin (etkiyen yükün yarattığı yıkıcı enerji), köprüleme elemanları tarafından sönümlenen enerjiden (çatlağı köprüleyen liflerin sönümlediği enerji) farkını göstermektedir. Bu enerji farkına tamamlayıcı enerji (J_b') denilmektedir (Şekil 1.6). J-integral yöntemi ile elde edilen bu denkleme göre, çatlağın açılması için gerekli net enerjinin, çatlak ucu tokluğuna (J_{tip}) en azından eşit ya da büyük olması gerekmektedir (Yang, 2008). J_{tip}'in hesaplanmasında Denklem 1.12'den yararlanılır.

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \tag{1.12}$$

Denklem 1.12'de K_m yalın matrisin kırılma tokluğunu, E_m ise yalın matrisin elastisite modülüdür.



Şekil 1.6 Tek bir çatlakta gerçekleşen çekme gerilmesi (σ) – çatlak açıklığı (δ) ilişkisi

Dayanım kriterinde ise kompozit üzerinde açılan her yeni çatlakta enkesit alanında bulunan liflerin köprüleme gerilmesinin (σ_o), matrisin ilk çatlak dayanımından (σ_{cr}) yüksek olması gerektiği anlatılmaktadır (Denklem 1.13). Açılan kesitlerdeki liflerin köprüleme gerilmesi ile ilk çatlak dayanımı arasındaki fark ne kadar fazla olursa kompozitin çoklu çatlak oluşturma potansiyeli de o kadar çok olacağı bilinmektedir. PVA-ECC'ler üzerinde yapılan çalışmalarda, kararlı yapıda çoklu çatlak davranışının gözlemlenmesi için σ_o/σ_{cr} oranının 1,2'den büyük olması gerektiği belirtilmiştir (Li, 1998). Kanda, 1998 tarafından yapılan çalışmalarda ise bu oranın PVA lifli kompozitler için 1,45 ve PP lifli kompozitler için 2'den büyük olması gerektiği tespit edilmiştir.

$$\sigma_{cr} < \sigma_0 \tag{1.13}$$

Mikromekanik modele uygun bir tasarım yapılarak hem enerji kriterinin hem de dayanım kriterinin sağlanması durumunda, üretilecek kompozit kararlı çoklu çatlak davranışı ve buna bağlı olarak deformasyon sertleşmesi davranışı gösterecektir. Kriterlerin sağlanamaması durumunda ise çoğu lifli betonda olduğu gibi ilk çatlak sonrası deformasyon yumuşaması davranışı oluşacaktır (Yang, 2008).

1.3 ECC'nin Üretimi

Kompozitin, tasarlanan özellikte bir mekanik davranış sergileyebilmesi için üretim aşamalarında kullanılan malzemelerin de tasarıma uygun seçilmesi gereklidir. Kompozitin davranışı, üretimde kullanılan lif ve matris özellikleri ile bu malzemelerin birbiri ile oluşturduğu lif-matris arayüzey aderans özelliklerinden doğrudan etkilenmektedir. Kompozitlerin üretiminde farklı lif türleri ve farklı matris kombinasyonlarından yararlanılarak, istenilen özellikte bir kompozit üretilebilir.

1.3.1 Lif Fazında Kullanılan Polimerik Lif Türleri ve Özellikleri

ECC üretiminde, lif fazında şimdiye kadar çelik, karbon ve polimer lifler olmak üzere çok çeşitli lifler kullanılmaya çalışılmıştır (Li, 1998). Literatürde belirtilen ECC uygulamalarında ise çoğunlukla polimer kökenli liflerin kullanıldığı görülmektedir (Zhang, Matsumoto, Hirata, Ishizeki ve Niwa, 2015).

Polimerler, çok sayıda aynı veya farklı atomik grupların birbirine bağlanmasıyla oluşan, genellikle uzun zincir yapısına sahip malzemelerdir. Organik ve inorganik polimerler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Organik polimerler, karbon (C) bir ana zincirin yanısıra hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ya da halojen atom içerebilirler. Eğer ana polimer zinciri üzerinde dizili atomların hepsi aynı türde ise homopolimer, farklı türde ise heteropolimer olarak adlandırılırlar. Monomerlerin bağlanma şekillerine göre ise lineer, dallı ya da çapraz bağlı halde bulunabilirler. Dallı yapıya sahip monomerlerin molekül ağırlıkları düşükken, bağ yapısı lineer monomerlerin molekül ağırlıkları göreceli olarak daha yüksektir. Molekül ağırlığının artması ile polimerik yapının çekme gerilimi, elastisite modülü, ısıl dayanıklılık ve aşınma direnci gibi özellikleri de artmaktadır (Erturan ve Deniz, 2009). Aynı türdeki polimerler farklı sıralanma özellikleri göstererek izotaktik, ataktik ve sindiotaktik gibi farklı yapılar oluşturabilmektedirler (Akyüz, 1999).

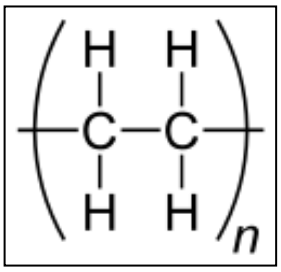
ECC üretiminde kullanılan polimerik liflerin çoğu organik polimer sınıfına girmektedir. Günümüzde özellikle polimer endüstrisinde gerçekleşen teknolojik

ilerlemelerle farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip polimerik lifler üretilebilmektedir (Kozanoğlu, 2006). Ancak, farklı özelliklere sahip bu liflerin hepsi ECC üretiminde kullanılamamaktadır. ECC üretiminde kullanılan başlıca lif türleri ve özellikleri maddeler halinde incelenmiştir.

1.3.1.1 Polietilen Lifler (PE)

Polietilen, etilen monomerinin polimerizasyonu sonucunda oluşan, uzun zincirli bir homopolimerdir. Literatürdeki ilk ECC'ler polietilen (PE) lifler kullanılarak hazırlanmıştır (Li, 1993; Lin ve Li, 1997). ECC üretiminde kullanılan PE lifler genellikle, 38 mikron çapında, 12,7 mm uzunluğunda ve 2400-2600 MPa çekme dayanımına sahiptirler.

PE lifler, çatlak açılması sırasında sahip oldukları hidrofobik yüzey yapısı nedeniyle matrisle kimyasal bir bağ oluşturmadan yalnızca fiziksel bir sürtünme etkisiyle yük taşımaktadır (Şekil 1.7). Artan gerilme seviyesi ile birlikte lifler matristen sıyrılmaya başlamaktadır. PE liflerin yüzey özellikleri plazma teknikleriyle yeniden tasarlanabilir. Lif yüzeyinde oluşturulan plazma sayesinde lif-matris arasında kimyasal bir bağ kurularak lif-matris arayüzey aderansı arttırılabilmektedir (Li, 1993; Li, 2012; Lin ve Li, 1997). Ancak, uygulanan bu işlem zaten yüksek maliyetli olan PE liflerin fiyatı daha da arttırmakta ve pratikte kullanılabilirlikten uzaklaştırmaktadır.

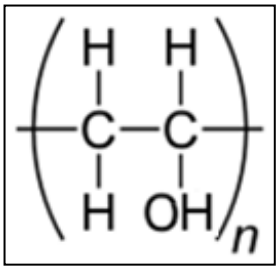


Şekil 1.7 Polietilen (PE) lifin kimyasal yapısı (Ekşi, 2007).

1.3.1.2 Polivinil Alkol Lifler (PVA)

Polivinil alkol, polivinil asetatın sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak sabunlaştırılmasıyla elde edilen bir heteropolimerdir (Şekil 1.8). PE liflere kıyasla daha ekonomik olan PVA lifler PVA-ECC üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Li ve diğer., 2001; Li, Wu, Wang, Ogawa ve Saito, 2002; Redon ve diğer., 2001). ECC üretiminde kullanılan PVA lifler genellikle, 39 mikron çapında, 8 mm uzunluğunda ve 1600 MPa çekme dayanımına sahiptirler. Ancak, farklı boyut ve mekank özellikte PVA lifler de ECC üretiminde kullanılmıştır.

PE liflerin aksine, PVA lifler sahip oldukarı hidrofilik yüzey yapısı sebebiyle matrisle güçlü bir kimyasal bağ kurar. Bu nedenle lifler, gerilme altında matristen az miktarda sıyrılır ve belirli bir gerilme seviyesine ulaşıldığında kopar. Liflerin kopmasıyla kesitteki lif köprüleme gerilmesi ani bir şekilde düşer ve kompozitin çoklu çatlak potansiyelinin erken kaybına neden olur. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek çekme düktilitesinin elde edilebilmesi için PVA liflerin yüzeyleri bir yağ tabakası ile kaplanarak lif-matris arasındaki bu güçlü aderansın azaltılmaktadır (Li, 1998; Felekoğlu, Tosun ve Baradan, 2009). Söz konusu problemi çözmek için lif yüzeylerine farklı oranlarda kaplama yapılarak çimentolu matris ile lif yüzeyi arasındaki aderans optimize edilmiştir (Redon ve diğer., 2001; Li ve diğer., 2002). Günümüzde yapılan birçok çalışmada, yüzeyi %1,2 oranında yağ tabakası kaplanmış PVA lifler ile çoklu çatlak davranışı gösteren PVA-ECC'ler üretilmiştir. Her ne kadar PVA lifler PE liflere kıyasla daha az maliyetli olsa da, lif maliyeti hala ECC'nin malzeme maliyetinin yaklaşık olarak %50'sini oluşturmaktadır (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014).



Şekil 1.8 Polivinil alkol (PVA) lifin kimyasal yapısı (Celep ve Dayık, 2009).

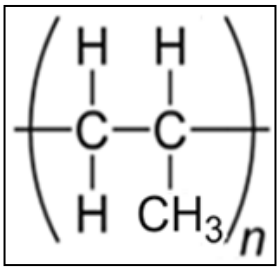
1.3.1.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lifler (HTPP)

Polipropilen, propilen monomerinin uç uca eklenmesinden elde edilen bir heteropolimerdir (Şekil 1.9) (Vahapoğlu, 2013). Yapısındaki CH_3 moleküllerinin C ana zincir üzerinde sıralanma şekline bağlı olarak izotaktik ya da ataktik yapıda bulunabilmektedirler (Ekşi, 2007).

ECC'nin ilk tasarımlarında PE ve PVA liflere kıyasla daha düşük maliyetli olan polipropilen (PP) lifler kullanılmıştır (İkai, Reichert, Vasconcellos ve Zampieri, 2006). Ancak geleneksel PP liflerin düşük çekme dayanımı ve çimentolu matrisle yaptıkları bağın çok zayıf olması etkin kullanımlarını güçleştirmiştir ve PP liflerin ECC üretiminde kullanımını kısıtlamıştır (Wang ve diğer., 1990). Günümüzde, PP lifler, betondaki plastik büzülme çatlaklarını azaltma amacıyla çok düşük dozajlarda beton içerisine katılarak kullanılmaktadır.

Polimer endüstrisindeki teknolojik gelişmelerle birlikte (Wet-spinning yöntemi vb.) son yıllarda geliştirilen ve Brezilya'da Brasilit firması tarafından ticari olarak üretilebilen yüksek çekme dayanımlı polipropilen liflerin (HTPP) ECC üretiminde PP, PE ve PVA liflere alternatif olarak kullanım potansiyelleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. HTPP lifler, 10-12 mikron çapında, 8-15 mm uzunluğunda ve 800-900 MPa çekme dayanımına sahiptirler (de Lhoneux ve diğer., 2002; Ikai ve diğer., 2006; Yang, 2008). Yang (2008) tarafından, HTPP liflerin yüzey özelliklerini ve boy/çap oranlarını en uygun hale getirmeye yönelik çalışmalar yapılmış, olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak Michigan Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü, İleri İnşaat Mühendisliği Malzemeleri Araştırma Laboratuvarı'nda yapılan çalışmalarda, HTPP liflerin pratikte kullanılabilirlik açısından bazı problemleri olduğu belirtilmiştir (Felekoğlu ve diğer., 2014). Liflerin matris içinde homojen dağılımının sağlanması için karıştırma yöntemlerinde değişiklikler yapılmış, ABD'deki malzemelerle hazırlanan matriste liflerin homojen dağılımı sağlanmıştır. Lif dağılımının iyileştirilmesi için matris viskozitesinin de matris türüne göre değişen belli sınırlar arasında olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Uygun bir lif-matris kombinasyonunun sağlanması ve etkili bir karıştırma yönteminin kullanılması ile

hacimce %2 oranında HTPP lif içeren, çekme birim deformasyon kapasitesi %4 seviyelerinde (geleneksel betondan 400 kat fazla), çekme dayanımı 3.6 MPa (geleneksel yüksek dayanımlı betona benzer) olan çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitler üretilmiştir (Felekoğlu ve diğer., 2014).



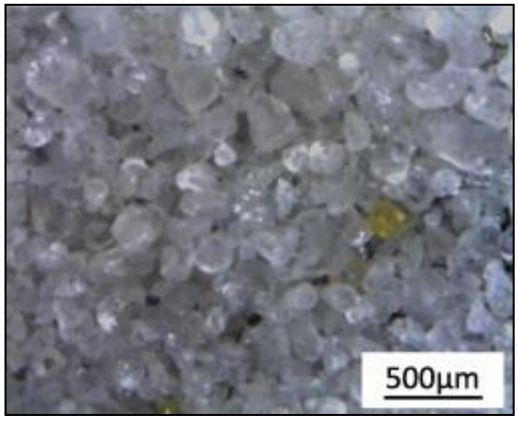
Şekil 1.9 Polipropilen lifin (PP) kimyasal yapısı (Ekşi, 2007).

1.3.2 Matris Fazında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

İlk geliştirilen ECC'nin matris fazında, geleneksel betondan farklı olarak agrega bulunmamaktadır. Matris fazından agreganın çıkartılması ile karışımın çimento içeriğini geleneksel betona kıyasla 5 kat arttırmaktadır. Artan çimento içeriğine bağlı olarak daha fazla rötre, hidratasyon ısısı, CO_2 gazı çıkışı ve maliyet artışı gibi problemler ortaya çıkmaktadır (Altwair, Johari ve Hashim, 2012; Bang, Prabhu, Jang ve Kim, 2015). Bu nedenle, agregayı matristen tamamen çıkartmak yerine, ECC üretiminde kullanılan ince agreganın en büyük tane boyutunu sınırlandırmak hem daha ekonomik hem de daha çevreci bir çözüm olmaktadır (Huang, Ranade, Ni ve Li, 2013; Lepech, Li, Robertson ve Keoleian, 2008). Ayrıca, mikro agregaların ilavesinin yanı sıra, matrisin çimento içeriğini azaltmak, lif-matris arayüzey özelliklerini geliştirmek ve ECC'nin sürdürülebilirliğini arttırmak amacıyla puzolanik özelliği bulunan uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar ve kalsine kaolin gibi mineral katkılar da ECC üretiminde çimento ile ikame edilerek kullanılmaktadır.

1.3.2.1 Mikro Agrega

Agregalar, çimentolu kompozitlerde ekonomik dolgu malzemesi olarak kullanılmalarının yanısıra bu malzemelerin hidratasyon ısılarını ve hacim sabitliğini düzenleyici rol oynamaktadır (Li, Mishra ve Wu, 1995; Şahmaran, Lachemi, Hossain, Ranade ve Li, 2009). Ancak, ECC matrisinin kırılma tokluğunu ve polimerik liflerin kesitteki dağılımını değiştirdiğinden deformasyon sertleşmesi davranışını da oldukça etkilemektedir. Matriste kullanılan agrega boyutunun artması matris kırılma tokluğunu artıracak ve çatlak oluşumunu kısıtlayacaktır (Şahmaran ve diğer., 2009). Lifler arasındaki ortalama mesafeden daha iri agregaların kullanılması durumunda, liflerin dağılımını ve yönlenmesini olumsuz etkilenecektir. İyi bir çekme performansının elde edilebilmesi için standart ECC karışımlarında iri agrega kullanımından kaçınılmakta ve en büyük agrega boyutu ve miktarı azaltılmalıdır (Huang ve diğer., 2013). Bu nedenle, ECC üretiminde kullanılan ince agreganın en büyük tane boyutu 200 μm civarında sınırlandırılmakta ve genellikle en büyük tane boyutu 110 μm olan mikro silika kumu kullanılmaktadır (Şekil 1.10) (Huang ve diğer., 2013; Lepech ve diğer., 2008).



Şekil 1.10 Mikro silika kumu (Huang ve diğer., 2013).

1.3.2.2 Uçucu Kül

Uçucu kül (UK), termik santrallerde kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan gazlarla bacalara taşınan ve siklonlarda ya da elektrostatik filtrelerde tutulan bir atık

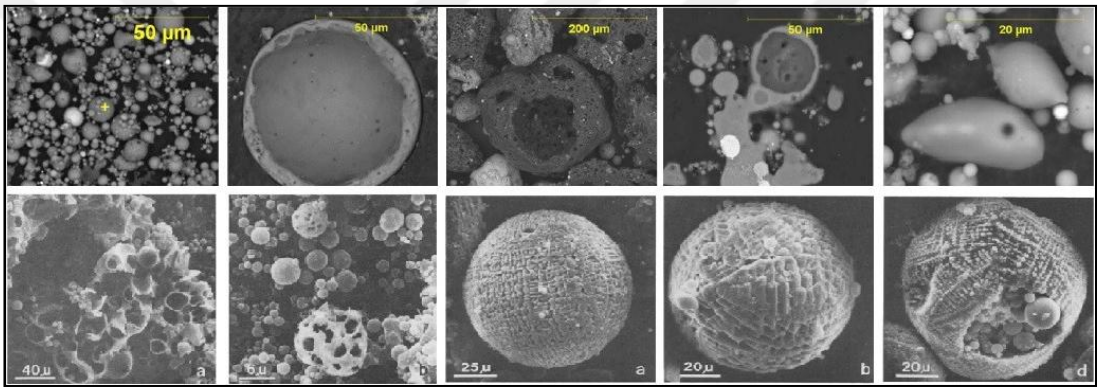
yan üründür (Norton, Markuszewski ve Shanks, 1986; Sherir, Hossain ve Lachemi, 2015). Uçucu kül gibi yan ürünlerin kompozitlerde çimento ile ikame edilerek kullanımı çevresel, ekonomik ve mekanik açıdan avantaj sağlamaktadır (Wang ve Li, 2007). Bu nedenle, uçucu küllerin çimento esaslı kompozitlerin üretiminde mineral katkı olarak kullanımı neredeyse vazgeçilmez hale gelmiştir (Sherir, Hossain ve Lachemi, 2015).

UK'ların fiziksel ve kimyasal özellikleri yakılan kömür türüne, ısıtma/soğutma ve yakılma yöntemine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir (Kutchko ve Kim, 2006; Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğinobalı, 2009). Ülkemizde, UK'ların sınıflandırılmasında ASTM C 618 (2003) ve TS EN 197-1 (2012) standartlarından yararlanılmaktadır.

TS EN 197-1 (2012)'e göre V sınıfı uçucu küllerin mineral içeriğinin büyük bir bölümünü silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) oluşturmaktadır. V sınıfı küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının ise %25'den fazla olması gerekmektedir. Puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden oluşan ince toz yapıya sahiptir. W sınıfı küllerde ise, reaktif kireç (CaO) içeriği diğer bileşenlere göre yüksek olup, geri kalan kısmının da büyük çoğunluğunu reaktif SiO_2, Al_2O_3 ve demir oksit (Fe_2O_3) oluşturmaktadır. Bu küllerde, reaktif kireç ve reaktif silis oranının sırasıyla %10 ve %25'den fazla olması gerekmektedir.

ASTM C 618 (2003) standardına göre ise C sınıfı ve F sınıfı küller olarak sınıflandırılmaktadır. C sınıfı küller genellikle linyit ya da yarı bitümlü kömürlerin yakılması ile oluşan açık gri renkli küllerdir. İçeriğindeki toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 oranın %50'den fazla ve CaO oranının da %10'dan fazla olması istenmektedir. F sınıfı küller ise, antrasit ya da bitümlü kömürlerin yakılmasıyla oluşan, daha koyu gri renkli küllerdir. İçeriğindeki toplam SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 oranın %70'den fazla ve CaO oranının da %10'dan az olması gerekmektedir (Türker ve diğer., 2009; Felekoğlu, 2006).

UK parçacıkları, küresel, oval, delikli, prüzsüz, içi dolu, içi boş vb. gibi farklı morfolojik özelliklere sahip olabilmektedirler. Fischer ve diğer., (1978), Del Monte ve Sabbioni (1984) ile Kutchko ve Kim (2006) tarafından yapılan çalışmalarda, farklı türdeki UK'ların detaylı bir morfolojik incelemesi yapılmıştır (Şekil 1.11). Ayrıca, Kutchko ve Kim (2006) tarafından yapılan çalışmalarda UK parçacıklarının boyutunun, yüzey alanının ve şeklinin çimentolu kompozitlerin boşluk yapısını, su ihtiyacını ve işlenebilirlik özelliklerini doğrudan etkilediği görülmüştür. Pürüzsüz yüzey özelliklerine sahip küresel UK parçacıkları, boşluk yapısını ve su ihtiyacını azaltmakta, işlenebilirlik özelliklerini ise geliştirmektedir. Gözenekli ve oval yapıdaki UK parçacıkları ise tam tersi etki yaratmaktadır (Kutcho ve Kim, 2006).

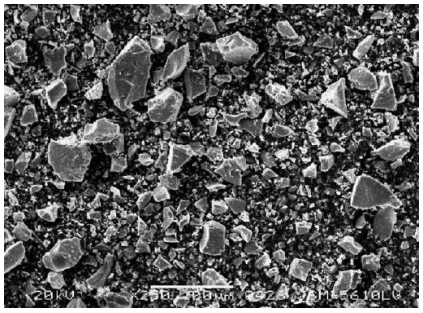


Şekil 1.11 Farklı morfolojik özelliklere sahip uçucu küller (Del Monte ve Sabbioni, 1984; Kutchko ve Kim, 2006).

Taze haldeki ECC matrisinde, çimentonun UK ile ikame edilmesiyle birlikte liflerin homojen dağılımının iyileştiği belirtilmiştir (Qian ve Stroven, 2000). ECC üretiminde UK kullanımının, matrisin kırılma tokluğunun azalttığı, çekme düktilitesi ve eğilmede sehim kapasitesi açısından performansın arttığı bilinmektedir (E. H. Yang, Yang ve Li, 2007; Özbay, Şahmaran, Lachemi ve Yücel, 2013; W. Li, Zhou ve N. Li, 2015; Wang ve Li, 2007). Ayrıca, yükleme sonrasında ECC örnekleri üzerinden ölçülen ortalama çatlak genişliğinin UK ikamesi ile azaldığı da gözlemlenmiştir (Gong ve Zhang, 2008; Li ve diğer., 2015; Özbay ve diğer., 2013; Yang ve diğer., 2007). Ancak elde edildiği termik santrale göre UK'nın farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olabileceği, dolayısıyla, ECC bünyesindeki performansının değişebileceği de unutulmamalıdır.

1.3.2.3 Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), pik demir üretiminde kullanılan yüksek fırınlarda, demir filizinin içerdiği safsızlıkların, demir filizinin demire indirgenmesini kolaylaştırmak üzere kullanılan kalkerin ve yakıt olarak kullanılan kömür külünün yanma sonrası kalıntılarından oluşan bir atık bir malzemedir. Yüksek fırın cürufu 1400-1600°C'de eriyik halde elde edilir. Karakteristik özellikleri yüksek fırından çıktıktan sonra uygulanan soğutma yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir (Tokyay, 2013). YFC yavaş soğutulduğunda, bazalta benzer mekanik özelliklere sahip olan, kristal yapıya sahip gehlenit (C_2AS), akermanit (C_2MS_2) ve mervinit (C_3MS_2) katı eriyiği haline gelir. Bu haliyle ancak beton agregası olarak kullanılabilmektedir. Ancak, soğutma işleminin hızlı uygulanması sonucunda akışkanlığındaki ani azalma kristal yapılaşmayı engeller ve camsı yapıda bir katı eriyik elde edilmesini sağlar. Bu malzemenin çok ince öğütülmesiyle elde edilen toz atık (Şekil 1.12), puzolanik ve hidrolik özellik göstermekte ve çimentolu sistemlerde bağlayıcı olarak kullanılabilmektedir (Tokyay ve Erdoğdu, 2009). YFC'nin çimentolu sistemlere etkisi parçacık morfolojisinden daha çok tane boyut dağılımı ile ilişkilidir. Tane boyut dağılımı inceldikçe, çimento harcının akıcılığının arttığı görülmüştür. Ayrıca, öğütme işlemi sırasında %0,05 öğütmeye yardımcı katkı ilave edilmesiyle üretilen YFC'nin çimento harcının akıcılığını %18 oranında arttırdığı belirtilmiştir (Wan, Shui ve Lin, 2004).



Şekil 1.12 Yüksek fırınn cürufunun morfolojisi (Wan ve diğer., 2004).

Son yıllarda YFC'nin ECC üretiminde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. YFC'nin camsı yapısındaki kırılmış Si-O bağlarından kaynaklanan polarite ve yüzeylerindeki elektriksel çift tabaka sayesinde süperakışkanlaştırıcı katkı adsorbe

edebildikleri, böylece hem matrisin işlenebilirliğinin arttırılabileceği hem de liflerin daha homojen dağıtılabileceği belirtilmiştir (Bang ve diğer., 2015; J.K. Kim, J.S. Kim, Ha ve Y.Y. Kim, 2007). Zhou ve diğer., (2010) tarafından yerel cüruf atıklarını kullanarak çoklu çatlak davranışı gösteren ECC'ler üretilmiştir. Alkali aktivasyonu yapılmış cüruf hamurlarında PVA liflerin kullanılmasıyla yüksek çekme düktilitesine sahip deformasyon sertleşmesi gösteren çimentosuz kompozitler tasarlanmış ve imal edilmiştir (Lee ve diğer., 2012). YFC'nin, çimento ile %70 oranında ikame edilmesiyle üretilen kompozitlerin, çekme birim şekil değiştirme ve eğilme deformasyon kapasitelerinin büyük ölçüde arttığı görülmüştür (Özbay ve diğer., 2013). Ayrıca, cüruf içeren ECC'lerin donma çözülme direncinin de yüksek olduğu, 300 çevrimde yalnızca %5 oranında kütle kaybı yaşandığı bildirilmiştir (Özbay, Karahan, Lachemi, Hossain ve Atiş, 2013). UK kullanılarak üretilen ECC matrislerinde, YFC'nin UK ile ikame edilmesiyle kompozitin birim şekil değiştirme kapasitesinin ve düktilitesinin yalnızca UK ile üretilen kompozitlere kıyasla arttığı belirtilmiştir (Chen, Yang ve Yao, 2013). UK içeren kompozitlerde, kompozitin kendiliğinden iyileştirebileceği çatlak genişliği 30-50 μm iken, YFC içeren kompozitlerde bu genişliğin 100 μm'ye kadar arttığı görülmüştür (Yıldırım, G. Keskin, Ö.K. Keskin, Şahmaran ve Lachemi, 2015).

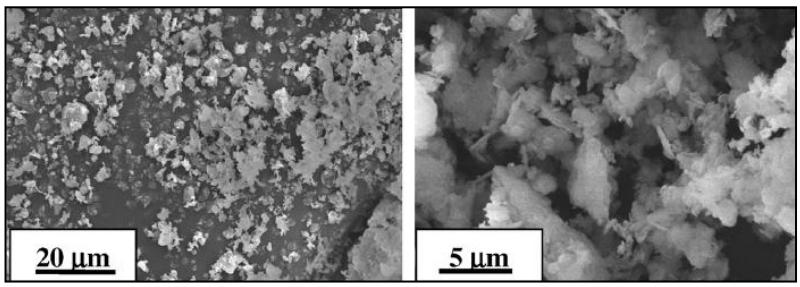
1.3.2.4 Kalsine Kaolin

Kaolinler, beyaz ya da beyaza yakın renk tonlarında, plaka şeklindeki yalancı-hekzagonal kristal yapıya sahip, genellikle kağıt, plastik ve seramik sektöründe kullanılan malzemelerdir. Dehidroksilasyon işlemleri ile bazı kaolinlerin kimyasal özellikleri geliştirilerek yapı sektöründe kullanımı sağlanabilmektedir (Liew ve diğer., 2012).

Kaolin killerinin dehidroksilasyonu 400 – 650 C° de başlar. Sıcaklığın 550 – 900 C° ye çıkmasıyla kaolin killeri temel oksitlerine ayrışır ve kaolinin kristal kafes yapısını bozularak oldukça düzensiz, amorf ve puzolanik özellik gösteren bir yapıya dönüştürür (Badogiannis, Aggeli, Papadakis ve Tsivilis, 2015). Kaolinin termal dönüşümü bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Brown, MacKenzie,

Meinhold ve Bowden, 1985; Bulens, Leonard ve Delmon, 1978; Chakraborty ve Ghosh, 1978; Lambert, Millman ve Fripiat, 1989; Rocha ve Klinowski, 1990; Sanz, Madani, Serratosa, Moya ve Aza, 1988). Çoğu araştırmacı kaolin killerinin 550-950 ºC arasında kalsinasyonu sonucunda amorf yapıdaki metakaolin formuna, kalsinasyon sıcaklığının daha da artırılarak 1200 ºC'ye ulaşması ile kristal yapıya sahip mullit fazına dönüştüğü konusunda hemfikirdir (Q. Liu, Spears ve Q. Liu, 2001).

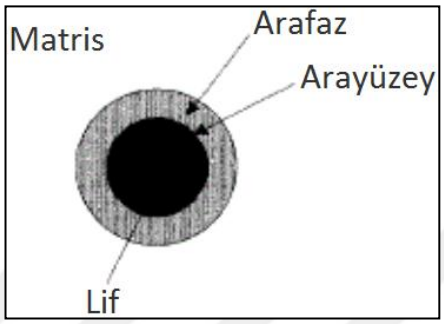
Amorf yapıdaki MK katkısı (Şekil 1.13), çimento hidratasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girer ve ikincil C-S-H jellerini oluşturarak beton dayanımını artırmada etkili olur. Ayrıca, içerdiği alümina sayesinde, yine $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek ilave alüminalı bileşenler de (C_4AH_{13}, C_2ASH_8, and C_3AH_6) oluşturarak betonun durabilite özelliklerini geliştirmede katkıda bulunur (Neville, 1995; Özbay ve diğer., 2012; Tironi, Trezza, Scian ve Irassar, 2013). MK katkısının yüksek performanslı çelik lifli betonlarda kullanılmasıyla, betonun enerji yutma kapasitesinin ve tokluğunun arttığı bilinmektedir (Dubey ve Banthia, 1998). Özbay ve diğer., (2012) tarafından yapılan çalışmalarda, metakaolinin ECC'nin yüksek düktilite davranışını ve mekanik özelliklerini kaybetmeksizin; çatlak direnci, düşük su emme oranı ve klor iyonu geçirimsizliği gibi durabilite avantajları sağladığı saptanmıştır. Gödek, Keskinateş, Tosun-Felekoğlu ve Felekoğlu (2015) tarafından yapılan çalışmalarda ise kompozit matris yapısının (S/B oranı ve boşluk yapısı) uygun şekilde tasarlanması halinde, çoklu çatlak davranışının süreksiz mikro donatılı (hacimce %2 polimerik lif içeren) kompozitlerde belirgin şekilde elde edilebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 1.13 Metakaolinin morfolojisi (Medri ve diğer., 2010).

1.3.3 Lif-Matris Aderans Özellikleri

Çimento esaslı lifli kompozitlerin çatlama davranışını belirleyen en önemli parametrelerden birisi lif-matris geçiş bölgesi özellikleridir. Lifli kompozitlerde, lifler matristen sıyrılırken davranışı etkileyen iki farklı durum söz konusudur. Bunlar, lif-matris arafazı ve lif-matris arayüzey özellikleridir (Şekil 1.14)(Jones, 1996).

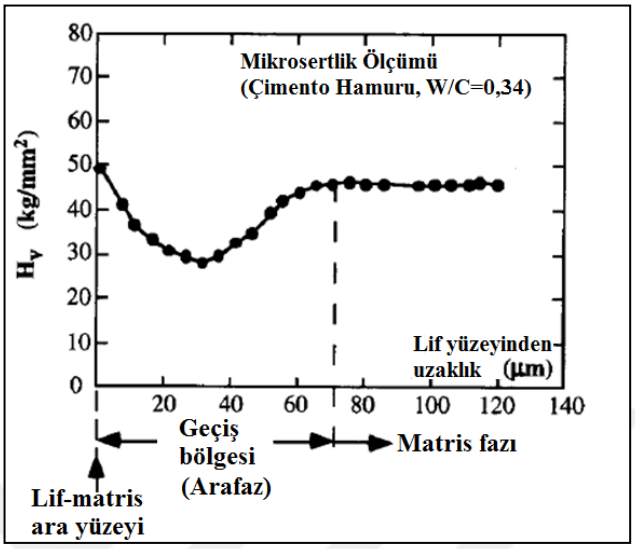


Şekil 1.14 Lif-matris geçiş bölgeleri (Jones, 1996)

Lif-matris arafazı, çimento-agrega arayüzeyine benzeyen, matris fazına kıyasla mekanik açıdan daha zayıf olan bir bölgedir. Yapılan mikrosertlik deneylerinde, arafaz içerisindeki en zayıf kısmın, lif yüzeyinden 30 μm uzaklıkta olduğu belirlenmiştir (Şekil 1.15) (Katz ve Li, 1994). Bu bölgenin göreceli olarak daha zayıf olması, oluşan $Ca(OH)_2$ kristalleri ve lif etrafında yüzey etkisiyle su tutulması gibi sebeplerle geçiş bölgesinin daha poroz bir yapıda olmasıyla ilişkilendirilmektedir (Chan ve Li, 1997). Bu poroz yapının, hidratasyon ürünlerinin ya da paketleme yoğunluğunun arttırılmasıyla güçlendirilebileceği düşünülmektedir.

Lif-matris arayüzey özellikleri ise daha çok lif ile matris arasında oluşan kimyasal ve sürtünme bağlarını kapsamaktadır. Lif-matris arayüzey özelliklerinin geliştirilmesinde, matris yoğunluğundan çok lif özelliklerinin geliştirilmesi daha etkili olmaktadır (Li ve Stang, 1997). Lif yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde, lif deformasyon teknikleri (burma, kıvırma, oyma, uç oluşturma vs.) ve yüzey kaplama-modifikasyon yöntemleri (kimyasal oksidasyon, hale kaplama, plazma kaplama) kullanılmaktadır (Li, Wu ve Chan, 1995). Düşük yüzey enerjisine sahip polimerik liflerde, plazma kaplama yöntemiyle arayüzey bağ özelliklerinin geliştirilebildiği ve

sıyrılma sertleşmesi davranışının etkin bir şekilde arttırıla-bileceği Michigan Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Li ve Stang, 1997).



Şekil 1.15 Lif-matris arafaz mikrosertlik değişimi (Wei, Mandel ve Said, 1986)

Bağ kuvveti lifin kimyasal özelliği ile doğrudan ilişkilidir. Çimento esaslı kompozit üretiminde kullanılan liflerin çoğu ya hidrofobik (PE, PP) ya da hidrofilik (PVA) yapıdadır. Kompozit içerisindeki hidrofilik lifler, matrisle çok güçlü bir kimyasal bağ oluşturacak ve liflerin sıyrılamadan kompasıyla tamamlayıcı enerjiyi düşürecektir. Hidrofobik yapıdaki lifler ise, yük altında hemen sıyrılma davranışı gösterecek ve liflerin dayanım özelliklerinden yararlanamadan yumuşama davranışı görülecektir. Bu nedenle, hidrofobik yapıdaki liflerde kimyasal bağ özelliklerinin geliştirilmesi, hidrofilik yapıdaki liflerde ise kimyasal bağ enerjisinin düşürülmesi mikromekanik açıdan daha uyumlu bir lif-matris arayüzey özelliğinin elde edilmesine yardımcı olacaktır (Rathod ve Pathodi, 2010).

PE lifler üzerine Ar, CO_2 ve NH_3 gazı ile yapılan plazma çalışmalarında, kimyasal bağ dayanımı %35'e kadar arttırılmış ve kompozitin birim şekil değiştirme ve yük taşıma kapasitesi geliştirilmiştir (Li, Wu ve Chan, 1996). Benzer performans artışları, Wu ve Li, (1999)'un yaptığı çalışmalarda da gözlenmiştir. PP liflere Ar ve O_2 plazması uygulanması sonucunda kompozitlerin yük taşıma, orta nokta sehim ve tokluk kapasitelerinin arttığı bildirilmiştir (Felekoğlu ve diğer., 2009). PVA lifler

üzerine yapılan kaplama çalışmalarında ise, yüzeyi %0,3-0,5-0,8-1,2 oranlarında yağ kaplanmış liflerin performansları incelenmiştir. %0,8 ve %1,2 oranında yağ kaplanmış PVA liflerde deformasyon sertleşmesi davranışı açısından belirgin performans artışı gözlenmiştir (Li ve diğer., 2002).

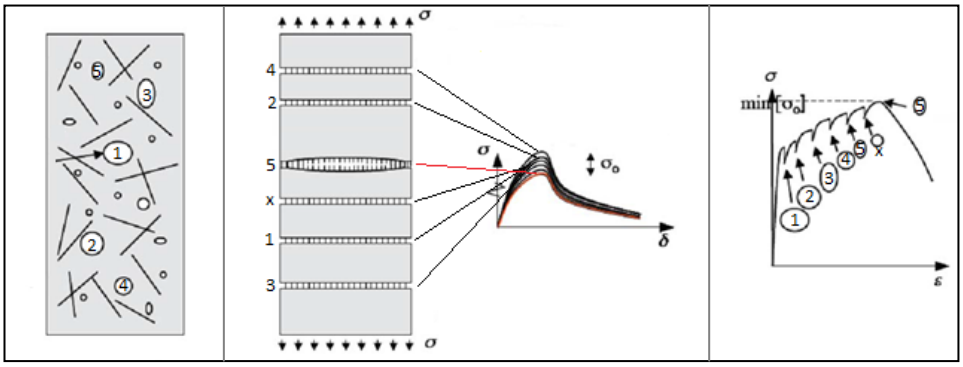
1.4 ECC'nin Mekanik Performansının İncelenmesi ve Geliştirilmesi

Çimentolu kompozitlerde çatlak oluşumu, matris bünyesindeki doğal boşluk ve kusurlardan başlar. Çimento hamuru, çimento harcı ya da beton gibi kompozitlerde çatlakğın ilerlemesini engelleyecek bir mekanizma bulunmadığından, çatlak oluşumu çatlağın hızlı bir şekilde ilerlemesiyle devam edecek ve kompozitin kırılarak yük taşıma kapasitesini yitirmesine sebep olacaktır. Ancak, ECC matrisinin içerisinde bulunan lifler sayesinde, çatlağın ilerlemesi engellenerek taşınan yük, kompozitin diğer kesitlerine aktarılabilmekte ve yeni çatlakların oluşmasını sağlamaktadır (Li, 2012).

1.4.1 ECC'nin Çoklu Çatlak Davranışı

ECC'nin çoklu çatlak davranışı, kompozit içerisindeki kusurun en büyük olduğu kesitten ilk çatlağın oluşması ile başlamaktadır (Şekil 1.16a). İlk çatlak kesitinde rastgele dağılmış halde bulunan lifler, kesitteki yükü köprüleyerek oluşan çatlağın açılmasını engeller ve gerilmeyi kompozitin diğer kesitlerine aktarırlar. İlk çatlak kesitinde enerji ve dayanım kriterlerinin sağlanması halinde, kararlı çatlak oluşumu gerçekleşir. Kompozite etkiyen yük miktarı artışına bağlı olarak, kompozit kesitindeki bir sonraki en büyük kusur aktive olur ve ikinci çatlak oluşumu bu kesitte gerçekleşir. Çatlaklardaki lifler, etkiyen gerilme kuvvetini kesitlerindeki lif dağılım özellikleri doğrultusunda paylaşarak kompozitin diğer bölgelerine aktarmaya devam ederler. Bu süreç, kompozitte yeni çatlakların açılmasıyla devam eder (Şekil 1.16b). Açılan her yeni kararlı çatlak ile kompozitin yük taşıma, şekil değiştirme ve enerji yutma kapasitesi artar (Şekil 1.16c). Ancak, oluşan çatlakların herhangi birinde liflerin yük taşıma kapasitesine ulaşması ile çatlak kararsız çatlak durumuna geçer ve genişlemeye başlar (Şekil 1.16b; 1.16c). Bu noktadan sonra yeni çatlak açılmaz ve

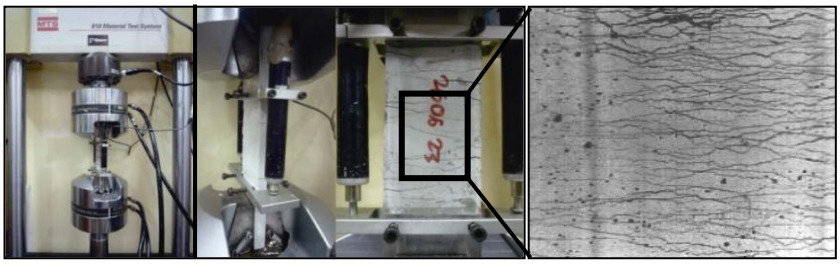
genişleyen çatlak kesiti ile birlikte kompozitin yük taşıma kapasitesini kaybeder (Li, 2012).



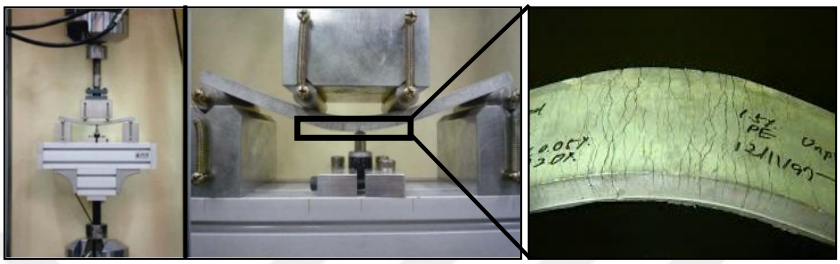
(a) (b) (c)

Şekil 1.16 ECC'nin çoklu çatlak oluşum mekanizması; a) Kompozitin doğal boşluk yapısı, b) Çoklu çatlak oluşumu, c) Yük-şekil değiştirme grafiği.

ECC'nin mekanik performansı incelenirken çekme ve eğilme deneylerinden yararlanılmaktadır. ECC, hem eğilme hem de çekme yüklemesi altında çoklu çatlak davranışı gösterebilmektedir (Şekil 1.17). Son yıllarda yapılan çalışmalarda, kompozitlerin çekme ve eğilme yüklemesi altındaki davranışları dikkate alınarak genel bir değerlendirme yapılmıştır (Şekil 1.18) (Wille ve diğer., 2014). Bu değerlendirmelere göre, lifsiz kompozitler her iki yüklemede de kırılma davranışı göstererek yük taşıma kapasitelerini yitireceklerdir (Şekil 1.18a). Lifli kompozitlerin ise, uygun tasarlanamamaları ya da üretilememeleri halinde deformasyon ve sehim yumuşaması davranışı göstereceği görülmüştür (Şekil 1.18b). Çekme yüklemesi altında deformasyon yumuşaması davranışı gösteren bir kompozitin, eğilme yüklemesi altında çoklu çatlak davranışı ve sehim sertleşmesi davranışı gösterebileceği belirtilmiştir (Şekil 1.18c). Ancak, çekme yüklemesi altında deformasyon sertleşmesi gösteren bir kompozitin, eğilme yüklemesi altında da kesinlikle çoklu çatlak davranışı göstereceği anlaşılmıştır (Şekil 1.18d). Sonuç olarak, sehim sertleşmesi gösteren kompozitlerin çoklu çatlak davranışlarının çekme gerilmesi altında da incelenmesi yerinde bir yaklaşım olacaktır. Bir diğer alternatif de eğilme yüklemesi altında, ilk çatlak yükü ile eğilme tepe yükü arasındaki oranın (σ_{f2}/σ_{f1}) yüksek olmasını sağlamaktır. Böylece, eğilme etkisi altında çatlama ile yük tırmanışı daha belirgin olacaktır (Şekil 1.18d).

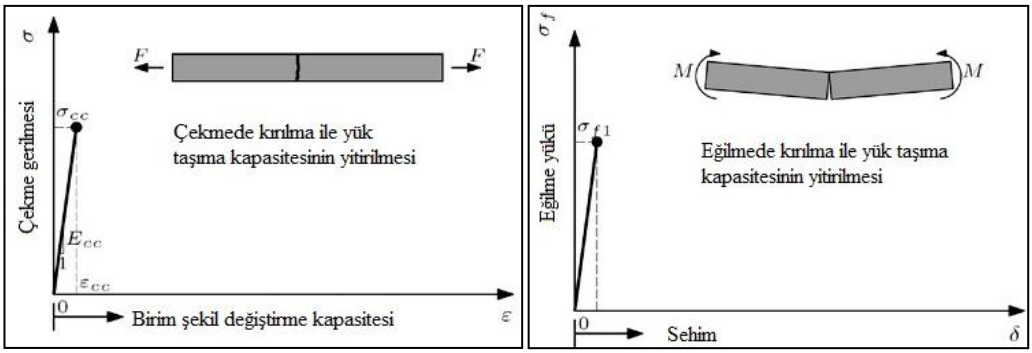


(a)

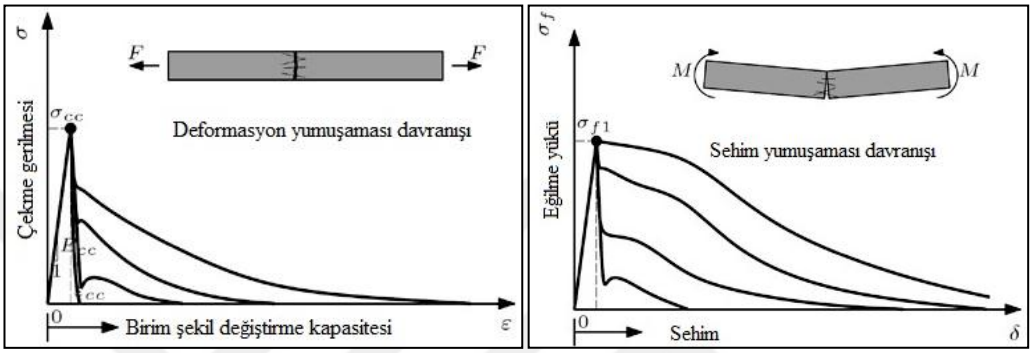


(b)

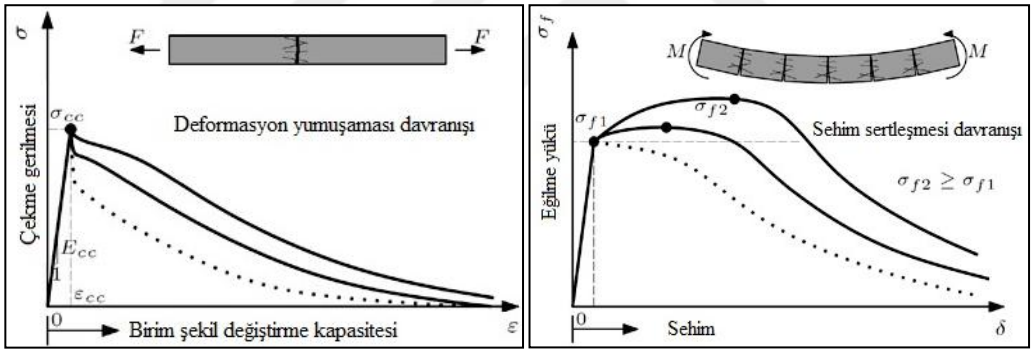
Şekil 1.17 Çekme ve Eğilme Yüklemesi altında ECC'nin çoklu çatlak davranışı; a) Çekme yüklemesi, b) Eğilme yüklemesi (Li, 1998; Li ve Kanda, 1998; Lim, Jenn ve Yin, 2012).



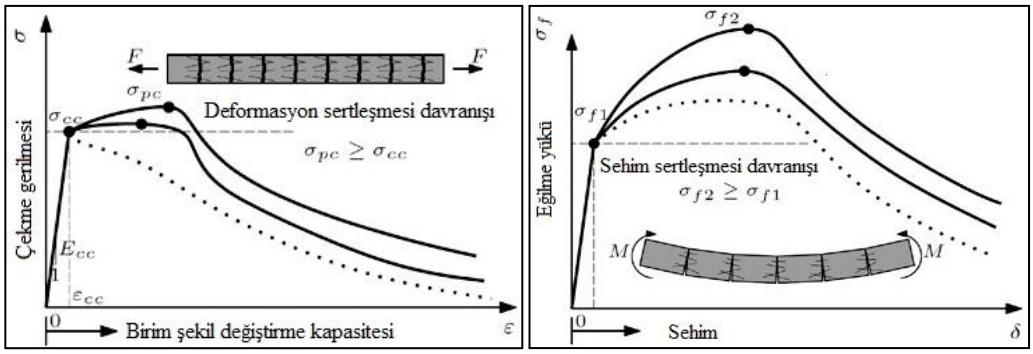
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1.18 Kompozitlerin çekme ve eğilme yüklemesi altındaki davranışları (Wille ve diğer., 2014)

1.4.2 Çoklu Çatlak Davranışını Geliştirmek için Yapılan Çalışmalar

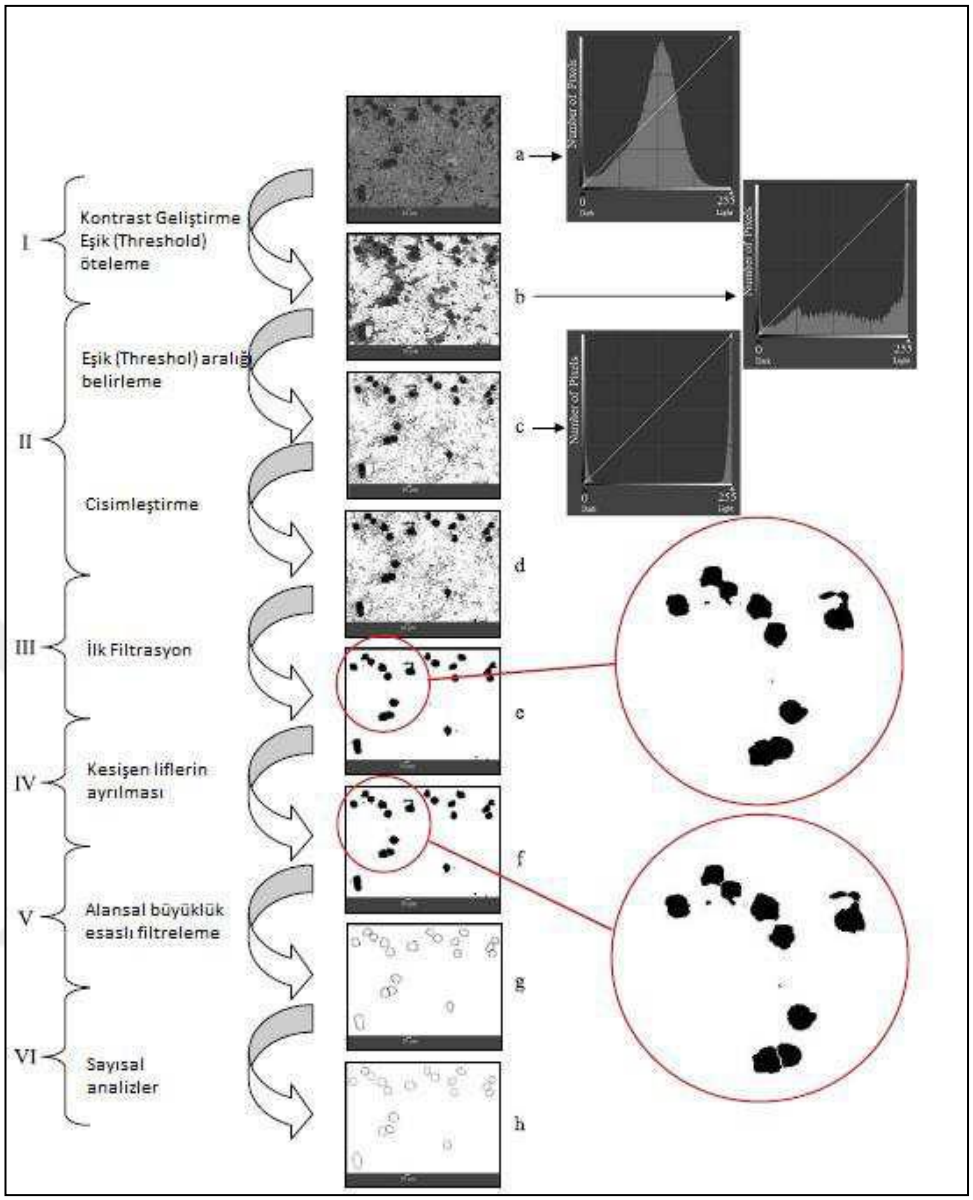
Kompozitin çoklu çatlak davranışı, üretimde kullanılan lif, matris ve arayüzey özelliklerinin yanı sıra liflerin kesitteki dağılımına ve yönlenme özelliklerine göre de değişebilmektedir. Lif köprüleme gerilmesi ile çatlak genişliği arasındaki ilişki kesitteki liflerin matris ile aderansına ve matris bünyesindeki liflerin dağılımına bağlıdır (Lee, J.K. Kim, J.S. Kim ve Kim, 2009). Liflerin kompozit içerisinde homojen bir şekilde dağıtılamaması, kompozitin en zayıf kesitindeki efektif lif dozajının düşük olmasına sebep olacaktır. Kesitteki lif dozajının yetersiz olması durumunda, kesitin yük taşıma kapasitesi olması gerekenden daha düşük olacak ve kompozitin yük altında daha çabuk göçme davranışı gösterecektir. Bu nedenle, kompozitin en zayıf kesitindeki lif dağılımının bilinmesi durumunda, çoklu çatlak potansiyelinin kontrol edilebileceği ve geliştirilebileceği söylenebilir (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu ve Gödek, 2015).

Lif dağılım karakterizasyon teknikleri, çelik liflerin lifli kompozit üretiminde daha yoğun kullanılması nedeniyle genellikle metalik lifler odaklıdır. Metalik liflerin kesitteki dağılımlarını belirlemek, polimerik liflere kıyasla çaplarının daha fazla olması ve ışığı reflekte edebilme özellikleri sayesinde daha kolaydır. Basit bir CCD kamera ile birleştirilmiş optik mikroskop kullanılarak lifleri tespit etmek mümkündür (Kang, Lee, J.K. Kim ve Y.Y. Kim, 2011; Wille, Tue ve Parra-Montesinos, 2014). Ayrıca, X-ray transmisyon görüntülemeye dayalı tahribatsız inceleme teknikleri (J.L. Chermant, Chermant, Coster, Dequiedt ve Redon, 2001; Ferrara ve Meda, 2006), X-ray bilgisayarlı tomografi (CT) (Kang ve diğer., 2011; Ponikiewski, Katzer, Bugdol ve Rudzki, 2015) ve alternatif akım iç direnç spektroskopisi (AC-IS) (Özyurt, Mason ve Shah, 2006) gibi alternatif yöntemler kullanılarak da iletkenlik özelliği bulunan liflerin kesitteki dağılımları incelenebilmektedir.

Yukarıda listelenen yöntemler, polimerik liflerinin çapının genellikle 50 μm'den az olması, yalıtkan olması ve lifler ile matris arasındaki düşük kontrast farkı sebebiyle, polimerik lifli kompozitlerin lif dağılımlarının belirlenmesinde kullanılamamaktadır. PVA-ECC'lerin kesitlerindeki lif dağılımları, floresan

görüntüleme tekniklerinin kullanılmasıyla belirlenebilmektedir (Lee ve diğer., 2009; M. Li ve Li, 2013; Torigoe, Horikoshi, Ogawa, Saito ve Hamada, 2003). PVA lifler, önceden tanımlanmış bir dalga boyu aralığında (380 ve 447 nm) UV filtreli bir ışık kaynağı ile aydınlatıldığında görünür spektrumda yeşil renkte ışıma yapmakta ve karanlıkta siyah renkte görünen çimentolu matristen kolayca ayırt edilebilmektedir (Lee ve diğer., 2009). Ancak bu yöntem PP'nin uyarılma ve ışıma dalga boyu aralığının 285-305 nm (göze zararlı UV dalga boyları) arasında olması sebebiyle HTPP için kullanışlı değildir. PVA, PE ve PP polimerleri için göreceli floresan yoğunluğunu temel alan optimum uyarılma ve ışıma dalga boyu aralıkları Lee, T. Kim ve Y.Y. Kim (2010) tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir.

Geleneksel ve ileri ışık mikroskop tekniklerinde PP ve HTPP lifleri görünür kılmada karşılaşılan sorunlar dikkate alınarak, PP ve HTPP liflerin lif dağılım özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobunu (SEM) esas alan farklı fotoğraf analiz metodolojileri kullanılmaktadır (Takashima, Miyagai, Hashida ve Li, 2001). Felekoğlu ve diğer., (2015) tarafından yapılan çalışmada, çekme yüklemesi altındaki mekanik performansları belirlenmiş iki farklı HTPP-ECC'nin göçme çatlağına yakın enkesiti üzerindeki lif dağılımlarını belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Numunelerin göçme enkesitlerinden, SEM kullanılarak 150 kat büyütmede 64 adet mikrofotoğraf çekilmiş ve bir fotoğraf analiz metodolojisi kullanılarak lif dağılım analizleri yapılmıştır. Kullanılan metodoloji Şekil 1.19'da verilmiştir. Elde edilen lif dağılım özellikleri dikkate alınarak, HTPP-ECC'lerin çekme yüklemesi altındaki çekme düktilitesi ve çoklu çatlak potansiyeli hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.



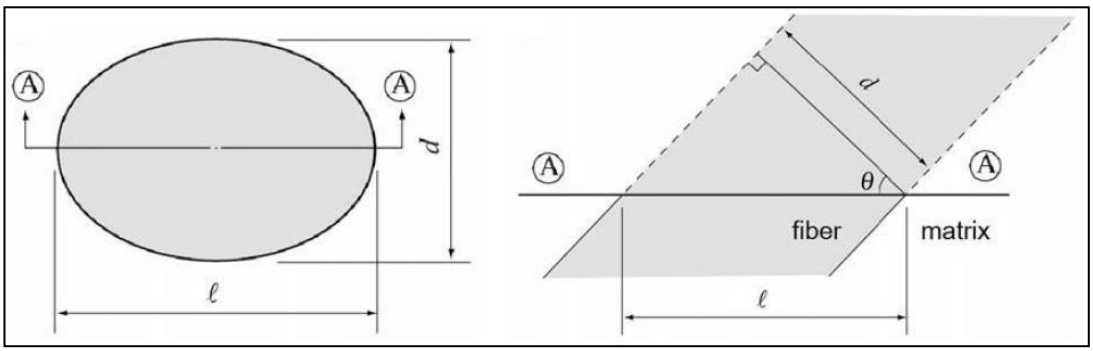
Şekil 1.19 Mikrofotoğraflardan lif dağılımlarının elde edilmesi (Felekoğlu ve diğer., 2015).

Lif dağılım özelliklerinin yanı sıra, liflerin kesitteki yönlenme açıları da kompozitin performansını etkilemektedir. Süreksiz mikro donatı içeren kompozitlerde, lifler matris içerisinde çatlak düzleminin normali ile 0-90º arasında bir açı (Θ) yapacak şekilde rastgele dağılmış olarak bulunurlar (Zhang ve Li, 2002) (Şekil 1.20). Çelik lifli kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, yükleme doğrultusunda belirli bir açı ile bulunan çelik liflerin, matristen çıkış noktasında kıvrılma sebebiyle oluşan ek sürtünme kuvvetlerinin kompozitin yük taşıma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir (Morton ve Grovees, 1974; Naaman ve Shah,

1976). Mikro boyutlu çelik lifler kullanarak, ultra yüksek performanslı lifli kompozitlerde, lif yönlenme açısının artmasıyla eğilme dayanımlarının %40 oranında arttırılabileceği görülmüştür (Kang ve Kim, 2011; 2012).

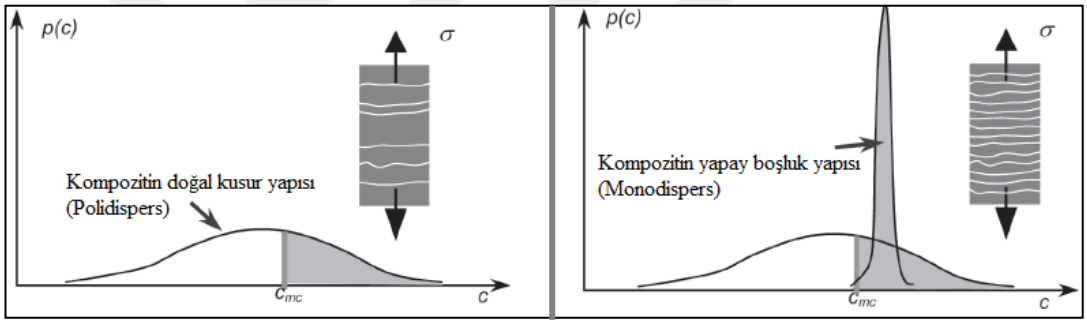
Polimerik kökenli liflerin kullanıldığı kompozitlerde, liflerin düşük eğilme rijitliği sebebiyle bu davranış göz ardı edilebilmektedir (Li ve diğer., 1990). Ancak, Li ve diğer., (1990)'nın naylon ve polipropilen lifler kullanarak yaptığı farklı matrislerden lif çekme deneylerinde, 45º den az bir yönlenme açısına sahip olan liflerin daha fazla yük taşıdığı, 45º den daha fazla yönlenme açısına sahip liflerin yük taşıma kapasitelerinin ise belirgin bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, güçlü matrislerde $\Theta<45^{o}$ olması durumunda yük taşıma kapasitesindeki artışın daha da fazla olduğunu göstermişlerdir. Ancak, zayıf matrislerde lifin matristen çıkma noktasında oluşacak parça kopmaları sebebiyle lif gömülü uzunluğunun kısalarak liflerin sıyrılmasını kolaylaştıracağı ve kompozitin enerji yutma kapasitesini azaltabileceği gösterilmiştir (Li ve diğer., 1990). Tosun-Felekoğlu, Felekoğlu, Ranade, Lee ve Li (2014)'ün PVA lif içeren kompozitlerde yaptığı çalışmada, liflerin yönlenme açısının artmasıyla lif köprüleme gerilmesinin azalacağı ve kompozitlerin çekme düktilitesinde kayıplar meydana geleceği belirtilmiştir.

Liflerin yönlenme açıları belirlenirken, kesme düzlemindeki durumları dikkate alınmaktadır (Şekil 1.20). Silindir şeklindeki lifler, kesme düzleminde yönlenme açısına göre eliptik şeklinde görülürler. Bu elipslerin küçük çapı d, büyük çapları l ve $l=d/\cos(\Theta)$'dır. Böylece, görünme oranı (l/d) dikkate alınarak liflerin yönlenme açıları $\Theta=\arccos(d/l)$ bağıntısı ile hesaplanabilmektedir (Lee ve diğer., 2009).



Şekil 1.20 Liflerin yönlenme açılarının bulunması (Lee ve diğer., 2009).

Çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitlerde, oluşan çatlak sayısı kadar çatlakların kesitteki yoğunluğu da önemlidir. Çok sayıda ve sık açılan çatlaklar, kompozitin enerji yutma kapasitesinin önemli ölçüde artmasını sağlayacaktır (Wang ve Li, 2004). Oluşan çatlak sayısı ve sıklığı, matrisin kırılma tokluğu ve kesitteki kusur boyut dağılımı ile doğrudan ilişkilidir. Matris içerisindeki doğal kusurların kontrolü ya da matristeki kusur dağılımının modifikasyonu ile çatlak sayısının ve sıklığının arttırılabileceği belirtilmiştir (Wang, 2005). Wang, (2005) yaptığı çalışmalarda, matris içerisine düşük ağırlıklı mikro agrega ya da polietilen plastik tane ilave ederek matris kusur boyutu ve dağılımının polidispers halden monodispers hale getirmiştir (Şekil 1.21). Matriste oluşturulan bu yapay kusurlar, matrisin daha kolay çatlması sağlayarak, kompozitin çok sayıda ve sık çatlamasını sağlamış ve kompozitin mekanik performansını önemli ölçüde geliştirmiştir.

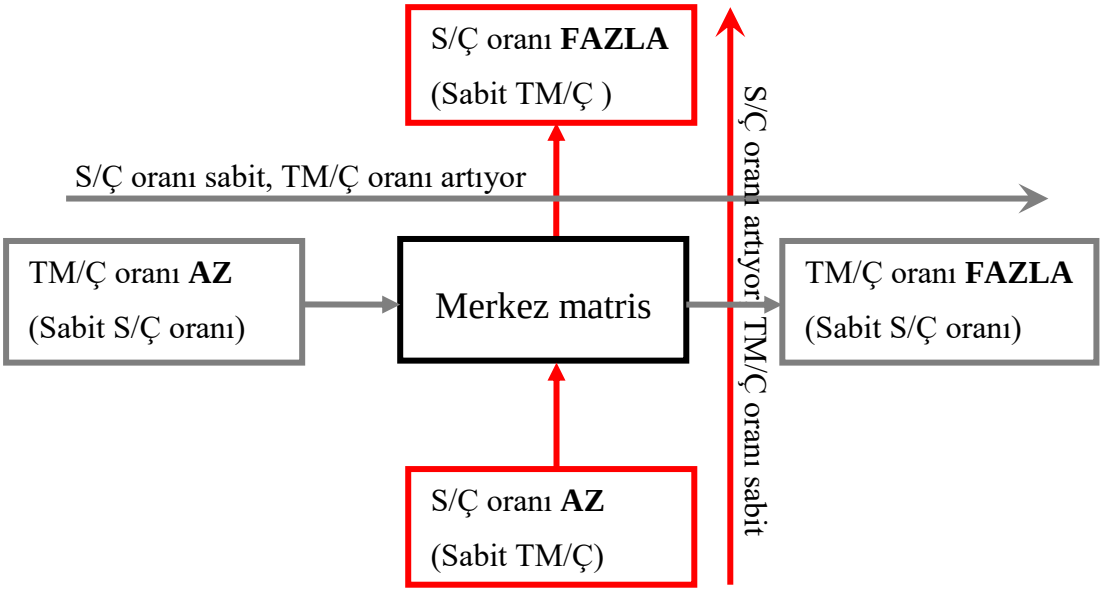


(a) (b)

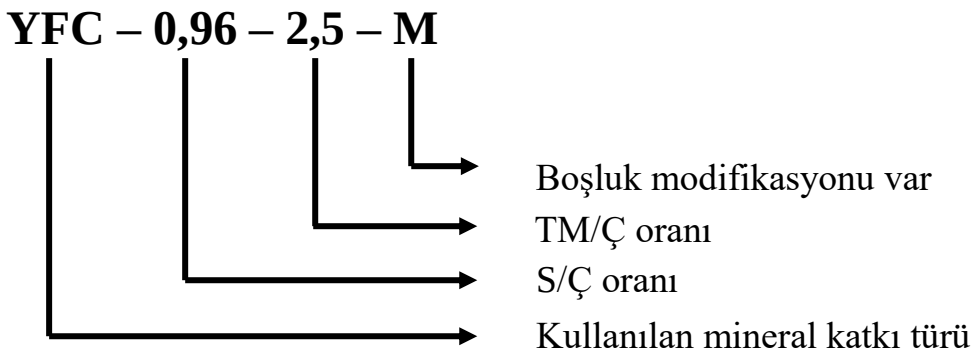
Şekil 1.21 Matris kusur yapısının modifikasyonu olasılık yoğunluk fonksiyonunun kusur boyutu ile değişimi (C_{mc}: Kritik kusur boyutu), a) Polidispers kusur dağılımı, b)Monodispers kusur dağılımı (Wang ve Li, 2004)

BÖLÜM İKİ
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda, iki farklı uçucu kül (Tunçbilek uçucu külü, TUK; Yatağan uçucu külü, YUK), öğütülmüş yüksek yüksek fırın cürufu (YFC) ve kalsine kaolin (KK) olmak üzere toplamda dört adet mineral katkı kullanılmıştır. Her bir mineral katkı türü için bir merkez matrisi tasarlanmıştır. Bu merkez matrisin tasarım oranları dikkate alınarak, her mineral katkı türü için üç farklı su/çimento (S/Ç) oranına ve üç farklı toz malzeme/çimento (TM/Ç) oranına sahip 5 farklı matris tasarımı yapılmıştır. Kompozitlerin tasarım oranları belirlendikten sonra sistematik deney dökümlerine geçilmiştir. Matrislerin taze haldeki akış özellikleri ve üretilen kompozitlerin dört noktalı eğilme deneyi altında mekanik performansları incelenmiştir. Kompozitlerin çatlak sayıları ve genişlikleri ile kesitteki lif dağılımları belirlenmesine yönelik mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen veriler bir bütün olarak ele alınmış ve düktilite açısından olumlu sonuç veren matrisler belirlenmiştir. Matris tasarım çalışmalarının akış diyagramı ve kompozitlerin etiket düzeni sırasıyla Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Matrislerin tasarımlarının belirlenmesi



Şekil 2.2 Matrislerin etiket düzeni örneği

Merkez matris üretiminde her mineral katkı tipi için uygun işlenebilirliği sağlayan (pratikte kullanılabilirlik hedefi) S/Ç ve süperakışkanlaştırıcı katkı kombinasyonu belirlenmiştir. Daha sonra S/Ç ve TM/Ç oranı değiştirilerek, işlenebilirlik sorunu açısından sınırda kalan alternatif matrisler hazırlanmıştır (Şekil 2.1). Tüm matrisler için boşluk yapısı yapay olarak değiştirilerek kusur varlığının eğilme performansına etkisinin gözlenmesi hedeflenmiştir.

2.1 Üretimde Kullanılan Malzemeler

2.1.1 Çimento

Tez kapsamında hazırlanan matrislerde, CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri, basınç dayanımları

Kimyasal Analiz	Basit Oksit Oranları (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	
SiO_2	18,46	**2 günlük (MPa)**	28,5
Al_2O_3	4,18	**7 günlük (MPa)**	43,0
Fe_2O_3	3,17	**28 günlük (MPa)**	54,3
CaO	64,28	**Fiziksel Özellikler**	
MgO	1,27	**Özgül ağırlık**	3,10
Na_2O	0,50	**Özgül Yüzey (m^2/kg)**	305
K_2O	0,84	**0,090mm elek üstü (%)**	1,5
SO_3	3,14	**0,045mm elek üstü (%)**	23,1
Klor	0,006	**Hacim sabitliği (mm)**	0,5
Serbest CaO	1,80	**Vicat suyu (%)**	28

2.1.2 Uçucu Kül (UK)

Tez kapsamında, farklı kaynaklarda alınan Yatağan ve Tunçbilek termik santrallerinden elde edilen iki farklı uçucu kül kullanılmıştır. Küllerin, üreticinin beyan ettiği fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir. ASTM C 618 (2003)'e göre, Yatağan uçucu külü (YUK) C sınıfı, Tunçbilek uçucu külü (TUK) ise F sınıfı olarak belirlenmiştir. Uçucu küllerin puzolanik aktivite değerlerinin ASTM C 311 (1996)'ya uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 2.2 Deneylerde kullanılan uçucu küllerin kimyasal özellikleri

	Tunçbilek Uçucu Külü (%)	Yatağan Uçucu Külü (%)
SiO_2	55,49	37,67
Al_2O_3	18,72	18,28
Fe_2O_3	10,02	4,42
CaO	2,43	16,28
MgO	4,57	1,7
Na_2O	0,51	0,65
K_2O	1,66	1,25
SO_3	0,38	1,49
Kızdırma Kaybı	1,3	15,73
S. CaO*	0,17	0,1
P.A.İ**	79	62.5
Blaine özgül yüzey değeri (m^2/kg)	333	213
Özgül ağırlık	2,20	2,33

* Serbest kalsiyum-oksit

** Puzolanik aktivite indeksi

2.1.3 Taştozu (TT)

Deneysel çalışmalarda kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Kullanılan kireçtaşı tozunun fiziksel özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir. Kimtaş Kireç sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilen kireçtaşı tozu %90 saflıkta kalsit'ten ($CaCO_3$) oluşmakta ve kütlece en büyük %4 oranında $MgCO_3$ içermektedir.

Tablo 2.3 Kireçtaşı tozunun özellikleri

Tür	Renk	Özgül Ağırlık	0,5 mm üstü geçme %'si	pH
Kireç taşı tozu	Açık kahverengi	2,69	22	11-12

2.1.4 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Yüksek fırın cürufu olarak, Ereğli'den (BASF firması aracılığıyla) temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Kullanılan YFC'nin kimyasal özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Ereğli ÖYFC Kimyasal Bileşimleri

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	Özgül ağırlık	S. Yüzey Alanı (m^2/kg)	P.A.İ* (%)	32µm**	90µm**
34,0	14,0	33,0	4,0	7,0	2,89	420	87	0,7	0,2

*Puzolanik aktivite indeksi

**Elek bakiyeleri

2.1.5 Kalsine Kaolin (KK)

Kalsine kaolinli kompozitlerin üretiminde, OPTISIL PS-20 ticari isimli kalsine kaolin kullanılmıştır. Kullanılan Kalsine kaolinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5 Kalsine kaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Beyazlık (%)	> 93,5	**SiO_2**	52 ± 0,5
Granülometri (-2µm) (%)	88 ±2	**Al_2O_3**	45 ± 0,5
Görsel Görüntüleme 325 mesh	< 0,003	**Fe_2O_3**	< 0,35
Reaktiflik indeksi	1,62	**TiO_2**	< 0,5
Yağ emme (%)	65 ± 5	**CaO**	< 0,3
PH değeri	6,0 – 7,0	**MgO**	< 0,2
Tane dağılımı (µm)	< 55	**K_2O**	< 0,05
Nem içeriği (%)	< 0,5	**Na_2O**	< 0,15
Özgül ağırlık	2,5		

2.1.6 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif (HTPP)

Brezilya'da Brasilit firması tarafından ticari olarak üretilen HTPP lifler, Brezilya'dan ithal edilmiştir. HTPP liflerin mekanik özellikleri Tablo 2.6'de verilmiştir.

Tablo 2.6 HTPP liflerin mekanik özellikleri

Lif türü	Özgül ağırlığı	Lif çapı (µm)	Lif uzunluğu (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopma uzaması
HTPP	0,91	12	10	850-900	6	%21

2.1.7 Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Grace firmasından temin edilen polikarboksilat esaslı ADVA FLOW 375 N ticari isimli süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Bu katkı TS EN 934-2 standardına göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı sınıfına girmektedir. Üretici firmanın beyan ettiği katkı özellikleri Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7 Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkının özellikleri

İçeriği	Modifiye sentetik karboksilat polimeri	
Yapı	Homojen, sıvı	**İlgili Standart**
Yoğunluk(20 ºC)	1,065 g/cm^3	(TS781 ISO758, 1998)
Ph(20 ºC)	4,0	(TS6365 EN 1262, 2005)
Toplam Klorür Miktarı (%)	<0,10M	(TS 1116 EN ISO 1158, 1999)
Alkali miktar (%)	<7,0M	(TS EN480-12, 2008)
Önerilen dozaj	Toplam çimento miktarının	%0,5-2,0

2.1.8 Polietilen Plastik Taneler (PE)

Deneysel çalışmalarda kompozitin boşluk yapısını değiştirmek amacıyla PETKİM Petrokimya Holding A.Ş.'den temin edilen yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE I668 Pellet) plastik taneleri kullanılmıştır. Tane boyutu eşit ve 3 mm çaplı plastik tanelerin hidrofob yapıları nedeniyle çimento ile aderansları zayıftır. ECC bünyesinde yapay boşluk oluşturma ve böylece çatlak oluşturma amacıyla kullanılmışlardır.

2.2 Kompozitlerin Karışım Oranları ve Üretimi

Üretilen kompozitlerin matris karışım oranları Tablo 2.8'de verilmiştir. Tüm karışımlara hacimce %2 oranında HTPP lif ilave edilmiştir. Boşluk modifikasyonu yapılan serilerde ise toplam hacmin %6'sı oranında PE plastik tane ilavesi yapılmıştır. Karışımlar hazırlanırken 40 lt kapasiteli, üç farklı karıştırma hızına (56, 104, 185 dev/dak) sahip zemin tipi Hobart mikser kullanılmıştır (Şekil 2.3a). Şekil 2.1'de verilen akış şemasında belirtilen her setten yaklaşık 3,10 dm^3 lük karışımlar hazırlanmıştır.

Öncelikle toz malzemeler 2 dk birinci devirde kuru karıştırılmış, daha sonra su ve katkı ilavesi yapılarak 1 dk birinci devirde ve 2 dk ikinci devirde karıştırılmıştır. Taze haldeki karışımın akma süresini belirlemek amacıyla modifiye bir Marsh hunisi kullanılmıştır (üst çap: 150 mm, alt çap: 10 mm, yükseklik: 320 mm) (Şekil 2.3b). Modifiye Marsh hunisi taze haldeki karışımla doldurularak 1 lt hacmindeki matrisin boşalma süresi TS EN 445 (2012)'de belirtildiği şekilde ölçülmüştür. Akıcılık problemi olan karışımlara (Marsh hunisi tıkanan) süperakışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılarak tekrar karıştırma işlemi uygulanmış ve her karışım için akma süresi elde edilmiştir. Homojen ve akıcı bir matris karışımı elde edildikten sonra lif ilavesi yapılarak 2 dk ikinci devirde ve 3 dk üçüncü devirde karıştırılmıştır. Karışım içerisinde lif topaklaşması olup olmadığı el ile kontrol edilmiş, eğer topaklanma varsa lif topaklarını açtırmak amacıyla ek bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Hazırlanan karışımlardan 3'er adet 25x60x300 mm boyutlarında numuneler

alınmıştır. Daha sonra karışıma hacimce %6 oranında PE plastik tane ilave edilerek karışım 1 dk daha karıştırılmış ve 3 adet numune daha alınmıştır. Taze harcın sıkıştırılması için sadece dış vibrasyon uygulanmıştır. Sistematik deneylerde toplamda 20 adet döküm gerçekleştirilmiş ve 120 adet prizmatik örnek hazırlanmıştır. Numunelerin üzeri plastik filmle kapatılarak kalıp içerisinde 3 gün bekletilmiştir. Kalıplardan sökülen numuneler 28 gün boyunca 20±2^{o}C'deki suda kür edilmiştir. Su kürü uygulanan örnekler 28 gün sonunda 1 gün kurutulmuş ve ardından dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır.

Tablo 2.8 Matris karışım oranları

TUK Serisi	**Matris Bileşenleri**			
	Çimento (kg/m^3)	**Uçucu Kül (F sınıfı) (kg/m^3)**	**Su (kg/m^3)**	**Katkı (kg/m^3)**
TUK-0,82-2,5	412	1030	339	24
TUK-0,96-2,5	393	981	376	13
TUK-1,19-2,5	363	906	403	3
TUK-0,96-1,5	489	733	469	0
TUK-0,96-3,0	354	1063	340	25
YUK Serisi	**Matris Bileşenleri**			
	Çimento (kg/m^3)	**Uçucu Kül (C sınıfı) (kg/m^3)**	**Su (kg/m^3)**	**Katkı (kg/m^3)**
YUK-0,82-2,5	396	989	325	67
YUK-0,96-2,5	388	971	373	25
YUK-1,19-2,5	360	900	428	9
YUK-0,96-1,5	489	734	470	0
YUK-0,96-3,0	334	1002	321	87

YFC Serisi	**Matris Bileşenleri**				
	Çimento (kg/m^3)	**Cüruf (kg/m^3)**	**Taştozu (kg/m^3)**	**Su (kg/m^3)**	**Katkı (kg/m^3)**
YFC-0,66-2,5	504	633	633	333	15
YFC-0,82-2,5	466	583	583	384	8
YFC-0,98-2,5	435	543	543	426	4
YFC-0,82-1,5	570	428	428	467	2
YFC-0,82-3,0	428	641	641	351	13

KK Serisi	**Matris Bileşenleri**				
	Çimento (kg/m^3)	**Kalsine Kaolin (kg/m^3)**	**Taştozu (kg/m^3)**	**Su (kg/m^3)**	**Katkı (kg/m^3)**
KK-0,88-2,5	454	851	283	399	16
KK-1,24-2,5	393	736	245	487	4
KK-1,75-2,5	325	609	203	571	0
KK-1,24-1,5	458	516	172	569	1
KK-1,24-3,0	364	819	273	451	8

*Tüm kompozitler hacimce %2 oranında polimerik lif içermektedir.

**Boşluk yapısı modifikasyonu amacıyla hacimce %6 oranında PE plastik tane ilavesi yapılmıştır.



(a) (b)

Şekil 2.3 Hobart mikser ve modifiye marsh hunisi

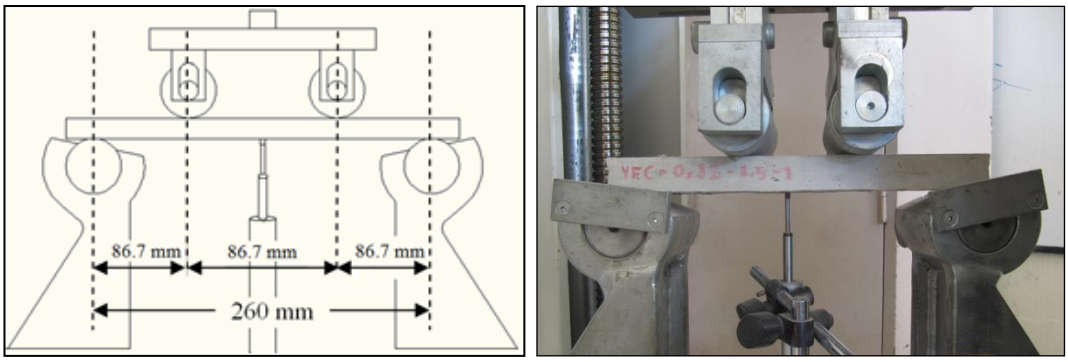
2.3 Eğilme Deneyi Sonucu Elde Edilen Parametreler ve Çatlak Analizi

Yapılan dört noktalı eğilme deneylerinde, 600 kg kapasiteli yük hücresine sahip, deformasyon hızı kontrollü bir cihaz kullanılmıştır. Hazırlanan kompozitlere deformasyon hızı 0,5 mm/dk ve mesnetler arası yükleme açıklığı 260 mm olacak şekilde dört noktalı eğilme yüklemesi yapılmıştır (Şekil 2.4). Kompozitlerin yük-orta nokta sehimi artış değerleri bilgisayardaki yazılım yardımıyla kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerler kullanılarak her bir kompozitin yük-sehim grafikleri çizilmiştir. Kompozitlerin ilk çatlak yükü, en büyük eğilme yükü, en büyük eğilme yükündeki sehim ve bağıl tokluk değerleri, yük-sehim grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımı değerleri PL/bh^2 formülü ile hesaplanmıştır. Burada P en büyük eğilme yükü, L mesnetler arası açıklık, b kompozitin en kesit genişliği, h ise kompozitin en kesit yüksekliğidir.

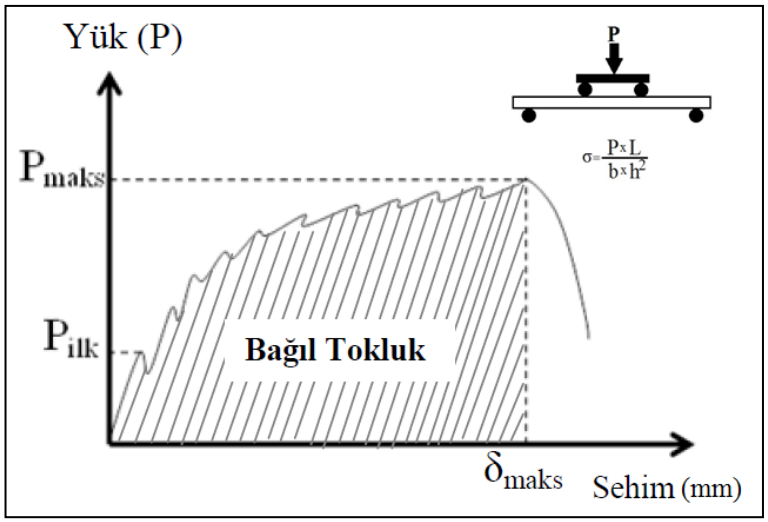
İlk çatlak yükü, yük-sehim eğrisinin lineerliğinin bozulduğu ilk nokta olarak belirlenmiştir. Ancak, bazı örneklerde yük değerinde ani bir düşüş olmadan sürekli bir eğim azalması gözlenmiştir. Bu tür durumlarda eğrinin lineer bölgelerinden eğriye teğet iki düz çizgi çizilmiş, bu çizgilerin birbirini kestiği noktanın yük sehim eğrisi üzerindeki izdüşümü ilk çatlak yükü olarak kabul edilmiştir (Tosun-Felekoğlu ve Felekoğlu, 2013).

ECC'nin aksine, çoğu lifli kompozit deformasyon yumuşaması davranışını ilk çatlaktan hemen sonra göstermektedir. ECC gibi deformasyon sertleşmesi gösteren kompozitlerde, kompozitin taşıdığı yük kompozit en büyük yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar kademeli olarak artmaktadır. Yük artışının son bularak düşüşe geçtiği nokta en büyük eğilme yükü ve bu noktaya karşılık gelen orta nokta sehimi de en büyük yükteki orta nokta sehimi olarak adlandırılmaktadır. Bu noktada kompozit üzerindeki herhangi bir çatlak düzleminde bulunan lifler taşıyabileceği en büyük yük kapasitesine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra taşıma kapasitesine ulaşmış olan çatlak Griffith tipi çatlak genişlemesi göstererek genişleyecek ve kompozit deformasyon yumuşaması davranışı göstermeye başlayacaktır.

Deformasyon yumuşaması davranışı gösteren kompozitlerde, tokluk değeri yük-sehim grafiği altında kalan toplam alan olarak tanımlanmaktadır. Ancak, ECC'nin tokluk hesabında ilk çatlak bölgesi ile deformasyon sertleşmesi bölgesinde yük-sehim eğrisi altında kalan alanlar hesaplanmakta ve yumuşama davranışı görülen bölgenin alanı dikkate alınmamaktadır. Bu değerlerin toplamına bağıl tokluk adı verilerek kompozitlerin enerji yutma kapasiteleri bu değer dikkate alınarak yorumlanmıştır (Şekil 2.5).



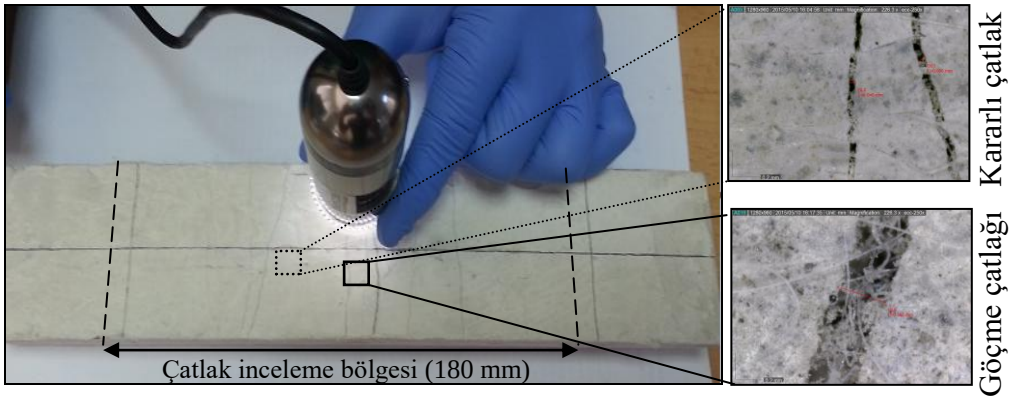
Şekil 2.4 Dört noktalı eğilme deneyinde numune boyutları ve yükleme şartları



Şekil 2.5 Yük-sehim eğrisi ve parametrelerin belirlenişi

Eğilme deneyi sonrasında, yüksüz durumdaki kompozitlerin üzerindeki çatlak sayısı ve genişlikleri Dino-Lite Premier markalı bir dijital el optik mikroskobu yardımıyla ölçülmüştür. Dijital el mikroskobunun kamera çözünürlüğü 5 megapiksel olup, 250 kat büyütme imkanı tanımaktadır. Çatlak sayıları ve genişlikleri bulunurken, numunenin çekme bölgesinde, uzun kenar doğrultusunda 300 mm uzunluğunda bir çizgi çizilmiştir (Şekil 2.6). Çatlak genişlikleri ölçülürken bu çizginin hemen altı ve üstünde, yaklaşık olarak numune genişliğinin yarısı kadar ya da daha uzun olan çatlaklar dikkate alınmıştır. Çatlak genişliklerinin belirlenmesinde, numune orta bölgesindeki 180 mm uzunluğundaki bölge incelenmiştir (Şekil 2.6). Böylece yükleme noktalarının dışında oluşan çatlaklar da değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 2.4).

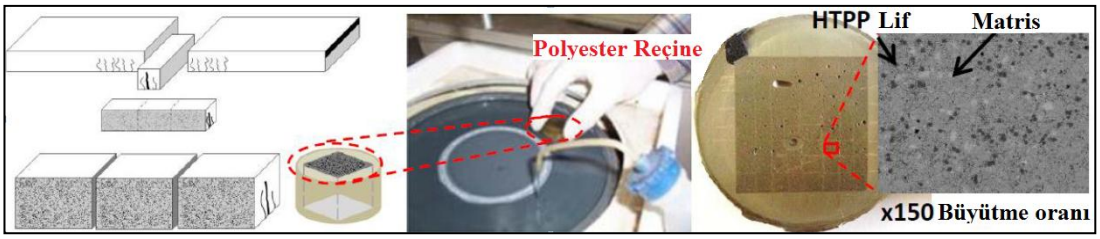
Optik mikroskopla elde edilen veriler kullanılarak, ortalama çatlak sayısı ve ortalama çatlak genişliği değerleri hesaplanmıştır. Ortalama çatlak genişliği, numune yüzeyindeki çatlak genişliği değerlerinin toplanarak çatlak sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Ancak, yapılan hesaplamalarda deney sırasında göçmeye neden olan büyük çatlaklar, diğer çatlaklara kıyasla çok daha fazla genişleyerek Griffith tipi çatlağa dönüştüğü için, ortalama çatlak genişliği hesabında dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.6 Çatlak analizinin yapılışı (Fotoğraftaki örnekte çıplak gözle görülemeyen 30 kadar çatlak bulunmaktadır.

2.4 Kompozitlerin Göçme Kesitinden Lif Dağılım Parametrelerinin Elde Edilişi

Üretilen kompozitilerin her serisinden temsili birer kompozit belirlenmiş ve kompozitin göçme çatlağına en yakın kesiti çıkartılarak Bölüm 1.4.2'de anlatılan yöntem dikkate alınarak lif dağılım katsayıları elde edilmiştir. Numunelerden parça çıkartılması ve SEM incelemeleri için hazırlık aşamaları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Çıkartılan parçanın tüm enkesit boyutunun SEM'de inceleme yapmaya elverişli olmaması nedeniyle, kompozitin en zayıf kesitini temsil eden parça da üç kısma ayrılmıştır (Şekil 2.7a). Kesiti temsil ettiği kabul edilen orta kısım SEM incelemelerinde kullanılmıştır. SEM incelemeleri için hazırlanan parçaların daha çabuk vakum alması amacıyla çıkartılan numune parçaları Polyester kalıba alınmıştır. Daha sonra hazırlanan parçalar #800 ve #1000 SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanmış, #1200 SiC zımpara kağıdı kullanılarak incelenecek enkesit alanı parlatılmıştır (Şekil 2.7b). Son olarak SEM'de inceleme yapılabilmesi için vakum ve kaplama işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan ve kaplanan yüzey 64 bölgeye ayrılmış ve her bölgeden 150 kat büyütmede mikrofotoğraflar çekilmiştir (Şekil 2.7c). Kesitteki lif sayısı, taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla çekilen mikro fotoğrafların analiz edilmesi sonucunda elde edilmiş ve her kompozit için lif dağılım katsayıları belirlenmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 2.7 Numune hazırlığı ve mikrofotoğraf çekim aşamaları

Her birim karedeki lif sayıları belirlendikten sonra lif dağılım katsayıları Torigoe ve diğer., (2003)'ün tarafından gösterilen yaklaşım kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 2.1).

$$\propto_{Torigoe} = e^{-\left(\frac{\sqrt{\Sigma\frac{(x_i-\bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}}\right)} \quad (2.1)$$

BÖLÜM ÜÇ
DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında, kullanılan mineral katkı türleri dikkate alınarak önce uçucu küllü kompozitlerin (TUK ve YUK), daha sonra yüksek fırın cürufu (YFC) içeren kompozitlerin ve en son olarak da kalsine kaolin (KK) içeren kompozitlerin deney sonuçları değerlendirilecektir. Değerlendirmeler sırasında kullanılacak olan bütün grafiklerin eksen ölçekleri, deneysel çalışmalarda üretilen kompozitlerin tamamı dikkate alınarak belirlenmiş, daha kolay ve anlaşılır bir değerlendirme ve kıyaslama yapabilmek amacıyla tüm seriler için (TUK, YUK, YFC ve KK) sabit tutulmuştur.

3.1 Uçucu Kül İçeren Kompozitlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Uçucu kül kullanılarak üretilen YUK ve TUK kompozitlerinin, taze haldeki akma özellikleri ve sertleşmiş haldeki deney sonuçları dikkate alınarak yapılan değerlendirilmeler başlıklar halinde sunulmuştur. Ancak, öncelikle küllerin farklılıklarını irdelemek için ayrıntılı karakterizasyon çalışmaları sunulmuştur.

3.1.1 Uçucu Küllerin Karakterizasyonu

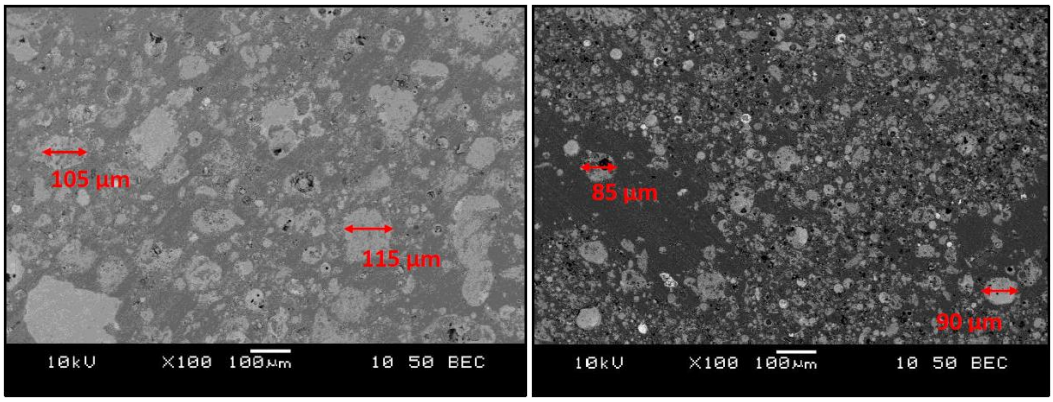
Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu küllerin, üreticiden alınan fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları değerlendirildiğinde, Yatağan uçucu külünün C sınıfı bir uçucu kül olduğu, Tunçbilek uçucu külünün ise F sınıfı bir uçucu kül olduğu belirlenmişti. Ancak, uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra, sahip oldukları morfolojik özellikler de kompozitin taze haldeki işlenebilirliğini ve buna bağlı olarak mekanik performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan küller, polyester reçine içerisine kalıplanmış ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla SEM içerisinde mikrofotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca, SEM-EDS analizleri de yapılarak üreticiden elde edilen bilgilerle kıyaslanmıştır.

Her iki uçucu kül örneğinden çekilen 100 kat büyütmeli fotoğraflar Şekil 3.1'de verilmiştir. Sonuç olarak, F sınıfı uçucu küllerin parçacık boyutunun (TUK), C sınıfı uçucu küllere göre (YUK) daha ince olduğu belirlenmiştir. Üreticiden elde edilen blaine özgül yüzey alanı değerleri dikkate alındığında (YUK için 213 m^2/kg; TUK için 333 m^2/kg) , bu sonucun desteklendiği görülmüştür (Tablo 2.2).

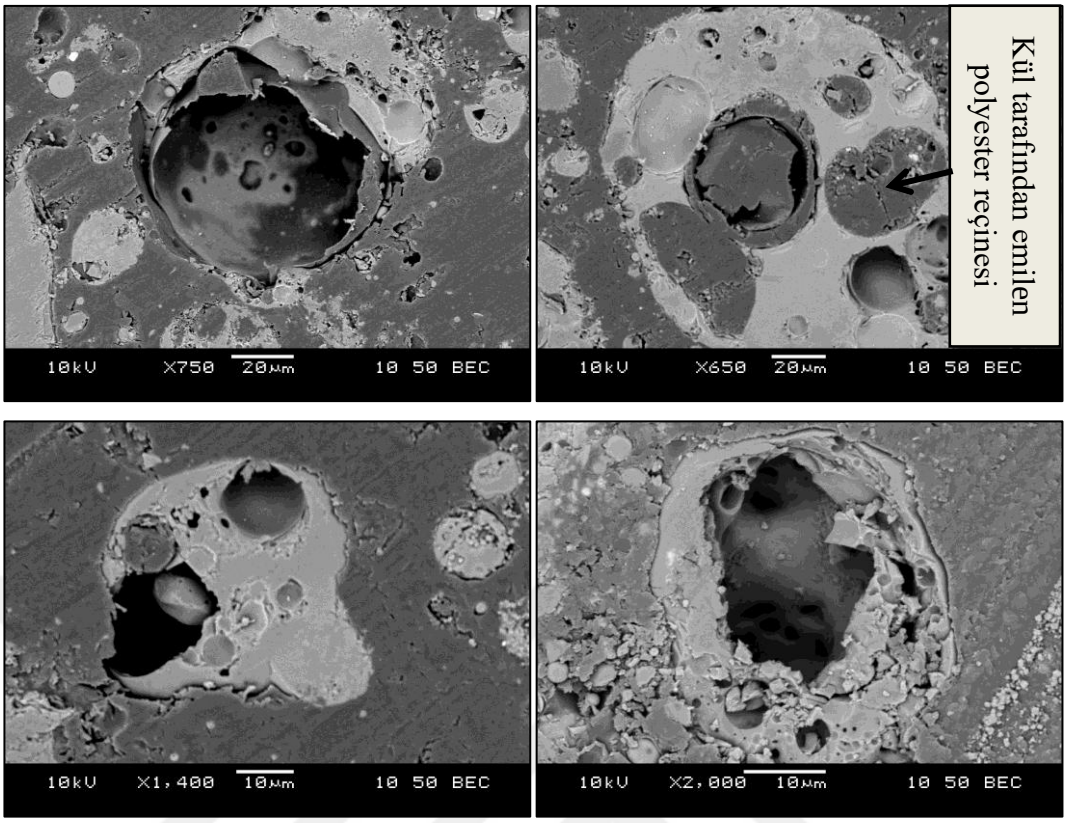
Daha büyük büyütme değerlerinde çekilen mikrofotoğraflar, YUK ve TUK için sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir. C sınıfı uçucu kül parçacıklarının (YUK) delikli, pürüzlü ve köşeli bir şekle sahip olduğu (Şekil 3.2), F sınıfı uçucu kül parçacıklarının ise (TUK) düz, pürüzsüz ve dairesel bir şekle sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.3).

SEM incelemeleri sırasında yapılan EDS analiz sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir. Elde edilen veriler üreticiden alınan kimyasal özellikler ile kıyaslanmıştır. EDS analizinde kullanılan elde edilen temel oksit oranları bulunurken yarı-nitel hesaplamalar kullanıldığından (ZAF prosedürü; De Bock, Van Malderen ve Van Grieken, 1994), gerçekteki temel oksit oranları ile hasaplanan değerler birebir aynı sonuçları vermemektedir. Ancak, EDS sonuçlarının üreticinin sağladığı kimyasal analiz sonuçlarını büyük ölçüde desteklediği görülmektedir.

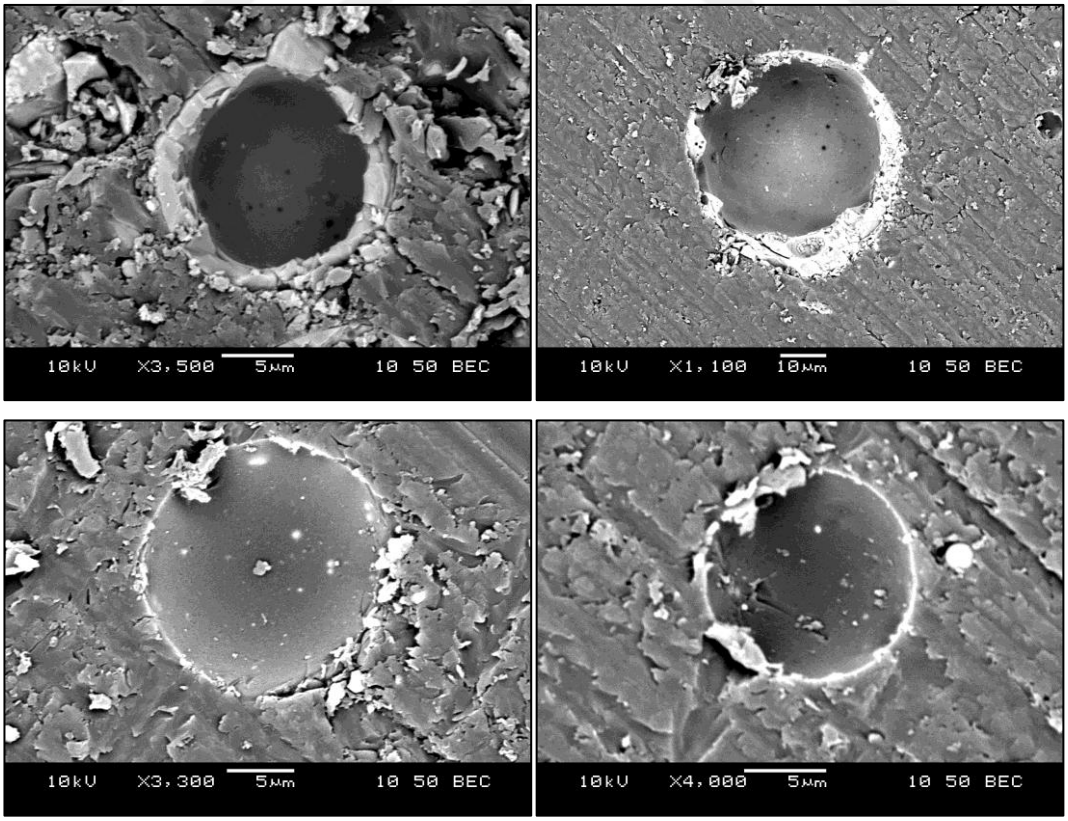


(a) (b)

Şekil 3.1 Yatağan ve Tunçbilek uçucu küllerinin parça büyüklüklerinin kıyaslanması, a)Yatağan uçucu külü, b)Tunçbilek uçucu külü



Şekil 3.2 Yatağan uçucu külü (C sınıfı) SEM fotoğrafları



Şekil 3.3 Tunçbilek uçucu külü (F sınıfı) morfolojik özellikleri

Tablo 3.1 Küllerin EDS analiz sonuçları

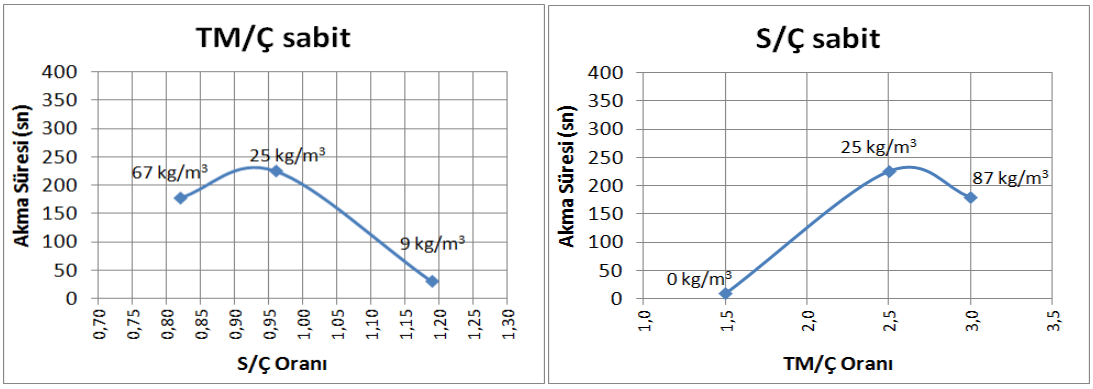
Uçucu Kül Tipi	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	SO_3 (%)
Yatağan (C)	37,31	12,47	2,29	38,19	8,96	0,19	0,29	0,29
Tunçbilek (F)	63,05	15,70	5,55	1,33	12,00	0,39	1,73	0,26

3.1.2 Taze Haldeki Özelliklerinin Değerlendirilmesi

3.1.2.1 Akma Sürelerinin Değerlendirilmesi

Karışımların taze haldeki akma sürelerini etkileyen üç önemli faktör, S/Ç ve TM/Ç oranı ile içerdikleri süperakışkanlaştırıcı katkı miktarıdır. Modifiye Marsh hunisi kullanılarak elde edilen akma süreleri, karışımların S/Ç ve TM/Ç oranları ile içerdikleri süperakışkanlaştırıcı miktarları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı miktarının tüm serilerde sabit tutulması pratikte mümkün değildir. Çünkü S/Ç oranı düşük seride kullanılan katkı miktarı, S/Ç oranı yüksek seride kullanılırsa ayrışmaya yol açacaktır. Benzer şekilde TM/Ç oranı düşük seride kullanılan katkı miktarı, TM/Ç oranı yüksek seride kullanılırsa Marsh hunisi tıkanarak akma kesilecektir. Bu nedenle katkı dozajlarının akmayı sağlayıcı minimum değerde tutulması hedeflenmiştir.

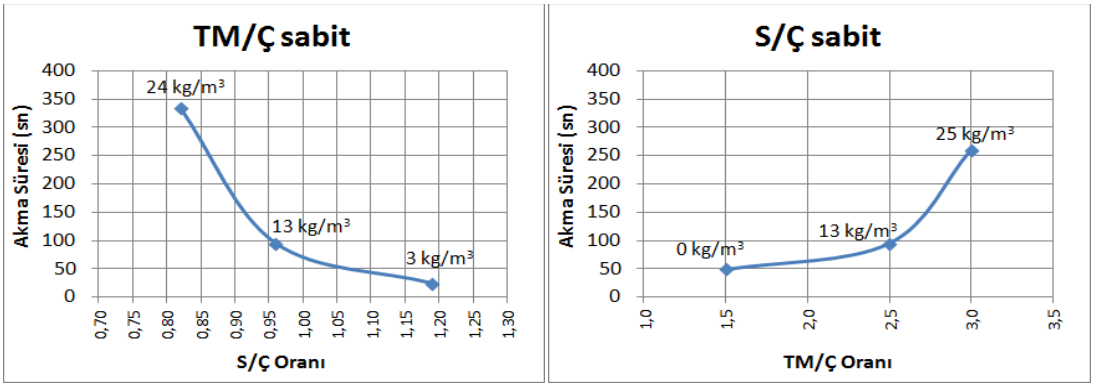
YUK serisine ait akma süresi grafikleri Şekil 3.4'de verilmiştir. YUK serisinde, sabit TM/Ç oranında, S/Ç oranı artışı ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarını azaltmaktadır (Şekil 3.4a). S/Ç oranının artışı ve süperakışkanlaştırıcının kullanım dozajı dikkate alındığında akma süresinde önce bir miktar artış daha sonra düşüş görülmektedir (Şekil 3.4a). Benzer şekilde, sabit S/Ç oranına sahip karışımlarda da TM/Ç oranı arttıkça akma süresi önce artmakta daha sonra azalmaktadır (Şekil 3.4b). Ancak, düşük S/Ç (Şekil 3.4a) ve yüksek TM/Ç oranına (Şekil 3.4b) sahip matrislerin aşırı dozajdaki katkı ilavesi ile akma davranışı gösterdiği, katkı dozajı arttırılmadan akışın gerçekleşmediği de unutulmamalıdır.



(a) (b)

Şekil 3.4 YUK serisi Akma süresi-Katkı dozajı ilişkisi a) TM/Ç sabit, S/Ç oranı artan örnekler, b) S/Ç oranı sabit TM/Ç oranı artan örnekler.

TUK serisine ait akma süresi grafikleri Şekil 3.5'de verilmiştir. TUK serisinde, S/Ç oranı artışıyla, hem akma süresi hem de karışımın ihtiyaç duyduğu süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı azalmaktadır (Şekil 3.5a). Akma süresindeki azalma S/Ç oranının düşük olduğu durumlarda daha belirgindir (Şekil 3.5a). Ancak, TM/Ç oranı artışıyla hem akma süresi hem de karışımın ihtiyaç duyduğu süperakışkanlaştırıcı miktarı artmakta ve TM/Ç oranının artmasıyla daha da belirginleşmektedir (Şekil 3.5b).



(a) (b)

Şekil 3.5 TUK serisi akma süresi-katkı dozajı ilişkisi a) TM/Ç sabit, S/Ç oranı artan örnekler, b) S/Ç oranı sabit TM/Ç oranı artan örnekler.

Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilecek olursa, TUK serisinin YUK serisine kıyasla akma süresi ve süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı açısından kararlı bir davranış gösterdiği ve daha avantajlı olduğu söylenebilir. Bu durumun sebebi olarak

küllerin parçacık morfolojilerindeki farklılıklar gösterilebilir. Küçük tane çaplı, düz, ve dairesel yüzey özelliklerine sahip TUK parçacıkları, matrisin işlenebilirlik özelliklerini geliştirerek süperakışkanlaştırıcı ihtiyacının YUK serisine göre daha az olmasını sağlamıştır. Ancak, büyük tane çaplı, delikli ve köşeli yüzey özelliklerine sahip olan YUK parçacıkları, karışımların işlenebilirlik özelliklerini azaltarak süperakışkanlaştırıcı katkı ihtiyacını belirgin bir şekilde arttırmıştır. Polyester reçine içerisine alınan YUK parçacıklarının içerisinde görülen emilen polyester reçinesi (Şekil 3.2), bu durumu kanıtlamaktadır.

3.1.2.2 Taze Haldeki Lif Topaklanma Miktarının Değerlendirilmesi

Karışımların taze haldeki lif topaklanma kontrolü karıştırma sırasında el ile aşamalı olarak yapılmıştır. Karışımlar ilk olarak lif eklendikten sonraki 2 dk'lık karıştırma işleminin ardından kontrol edilmiştir. Lif topaklanmasına rastlanan karışımlara 10 dk süreli bir ek karıştırma işlemi uygulanarak lif topaklarının açılıp açılmadığı tekrar kontrol edilmiş ve ilk üç numune alınmıştır. Daha sonra plastik tane ilavesi yapılmış ve lif topaklanması olup olmadığı tekrar kontrol edilerek modifikasyonlu numunelerin alınma işlemine geçilmiştir. Lif kontrol aşamaları ve karşılaşılan durumlar Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2'de görüldüğü üzere YUK serisi kompozitlerin tamamında lif topaklanma sorunu ile karşılaşılmıştır. Uygulanan ilave karıştırma süresi ve plastik tane ilavesi topaklanma sorununu çözmede başarılı olamamıştır. TUK serisinde ise göreceli olarak daha az bir lif topaklanması görülmüştür. Ayrıca, ilave karıştırma süresi uygulanması ve plastik tane ilavesi ile TUK serilerindeki lif topaklanma sorunu %66 oranında çözülmüştür.

Tablo 3.2 Taze haldeki uçucu küllü kompozitlerin lif topaklanma oranları

Matris	S/Ç	TM/Ç	Katkı Dozajı (kg/m^3)	2 dk karıştırma sonunda	10 dk ek karıştırma süresi sonrası	Plastik tane ilave edilip karıştırma sonrası
TUK (sabit TM/Ç)	0,82	2,5	24	TT	T	T
	0,96	2,5	13	T	-	-
	1,19	2,5	2	TT	TT	-
TUK (sabit S/Ç)	0,96	1,5	0	TT	T	T
	0,96	2,5	13	T	-	-
	0,96	3,0	25	T	-	-
YUK (sabit TM/Ç)	0,82	2,5	67	T	T	T
	0,96	2,5	25	TT	TT	TT
	1,19	2,5	9	T	T	T
YUK (sabit S/Ç)	0,96	1,5	0	TT	TT	TT
	0,96	2,5	13	TT	TT	TT
	0,96	3,0	25	TT	T	T

* TT: Yoğun topaklanma olduğunu, T: Az miktarda topaklanma olduğunu, -: Topaklanma olmadığını ifade etmektedir.

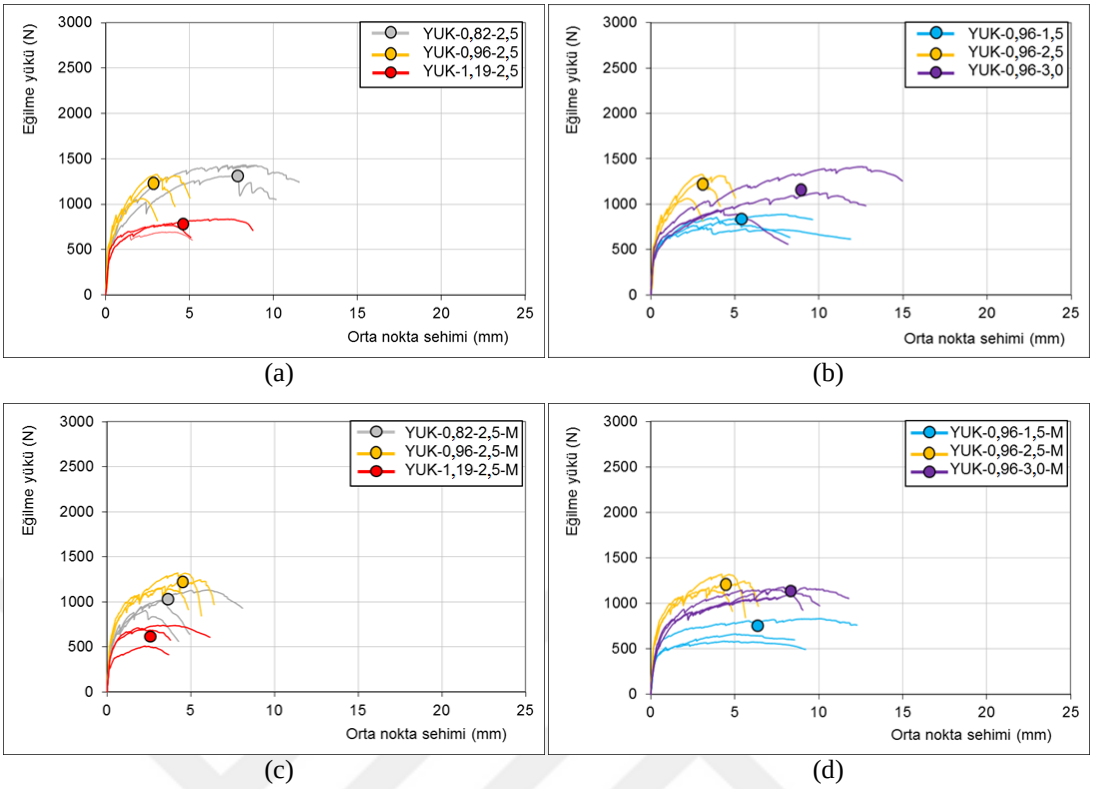
Bu durum, yine uçucu kül parçacıklarının morfolojik özellikleriyle ilişkilendirilebilir. İri ve köşeli şekil özelliklerine sahip olan YUK parçacıkları, matrislerin taze haldeki işlenebilirlik özelliklerini azalttığından, liflerin kesite homojen bir şekilde yayılmasında ve lif topaklarının açılmasında başarılı olamamıştır. Küçük ve dairesel şekil özelliklerine sahip TUK parçacıkları ise, matrisin taze haldeki işlenebilirlik özelliklerini YUK serisine kıyasla geliştirerek, ilave karıştırma sürelerinin uygulanmasıyla çoğu durumda problemi çözmede başarılı olmuştur. Ayrıca, TUK ve YUK'un Blaine özgül yüzey alanları dikkate alınacak olursa, TUK parçacıklarının blaine incelik değerinin (333 m^2/kg) çimentonun Blaine özgül yüzey alanlarına (305 m^2/kg) yakın bir değere sahip olduğu görülmektedir. YUK parçacıklarında ise (213 m^2/kg), çimento ve kül Blaine özgül yüzey alanı değerlerinde belirgin bir fark olduğu görülmektedir. Bu durumun, YUK kompozitlerinde taze halde uyum problemlerinin yaşanmasına sebep olarak liflerin kesitteki homojen dağılımlarını etkilediği düşünülmektedir. TUK serisinde ise, çimento ile yaklaşık olarak aynı olan bu değerin uyum açısından belirgin bir problem oluşturmadığı, bu nedenle liflerin topaklanma ve dağılım özellikleri YUK serisine göre daha etkili olduğu söylenebilir.

3.1.3 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi

Kompozitlerin dört noktalı eğilme yüklemesi sonucu elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir. Doğal boşluk yapısına sahip kompozitlerin eğrileri ilk satırda, boşluk modifikasyonu yapılan kompozitlerin yük-sehim eğrileri ise ikinci satırda verilmiştir. Şekillerin sol tarafında S/Ç oranı değişirken, TM/Ç oranı sabit tutulmuş, sağ tarafında ise TM/Ç oranı değişirken S/Ç oranı sabit tutulmuştur. Yük-sehim eğrilerinden elde edilen en büyük yüklerin ve en büyük yük değerlerine karşılık gelen sehim değerlerinin ortalamaları alınarak şekillerin üzerinde noktalar halinde belirtilmiştir. Bu noktaların ordinatı ortalama en büyük yük değerini, apsisi de en büyük yüke karşılık gelen ortalama sehim değerini belirtmektedir.

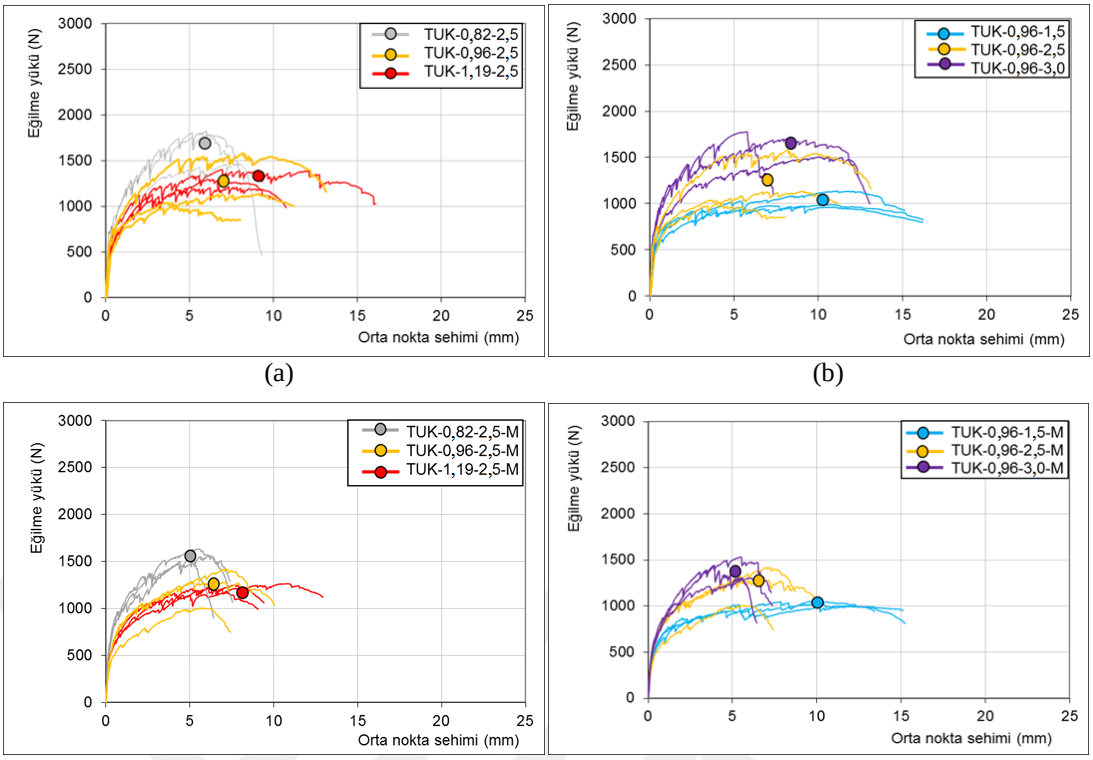
Yatağan uçucu külü kullanılarak üretilen örneklerin eğilme yükü – sehim eğrileri Şekil 3.6'da sunulmuştur. Artan S/Ç oranına bağlı olarak, örneklerin en büyük eğilme yükü değerleri azalmaktadır (Şekil 3.6a). En büyük yükteki orta nokta sehim değerleri ise S/Ç oranı artışıyla azalmış ancak S/Ç oranının 0,96'dan 1,19'a çıkartılmasıyla bir miktar artmıştır (Şekil 3.6a). Plastik tane ilavesiyle, S/Ç oranı 0,82 ve 1,19 olan örneklerde hem en büyük eğilme yükü hem de en büyük yükteki orta nokta sehim değerleri azalmıştır (Şekil 3.6c). S/Ç oranı 0,96 olan örnekte ise en büyük eğilme yükünde belirgin bir fark gözlenmezken en büyük yükteki orta nokta sehim değeri ötelenmiştir (Şekil 3.6c).

S/Ç oranı sabit tutulan örneklerde, TM/Ç oranın 1,5'den 2,5'e çıkması durumunda en büyük eğilme yükü değeri artarken, bu oranın 3,0'e çıkması durumunda bir miktar düşüş gözlenmiştir (Şekil 3.6b). TM/Ç oranının 1,5'den 2,5'e arttırılmasıyla en büyük yükteki orta nokta sehim değeri azalmıştır. TM/Ç oranının 2,5'den 3,0'a çıkartılmasıyla en büyük yükteki orta nokta sehim değeri belirgin bir şekilde artarak en yüksek değere ulaşmıştır (Şekil 3.6b). Plastik tane ilavesiyle en büyük eğilme yükü değerlerinde önemli bir değişim gözlenmezken, TM/Ç oranı 1,5 ve 2,5 olan serilerin en büyük yükteki orta nokta sehim değerleri artmış, 3,0'e çıkartıldığında ise bir miktar azalmıştır (Şekil 3.6d).



Şekil 3.6 YUK serisi yük-sehim eğrileri

Tunçbilek uçucu külü kullanılarak üretilen kompozitlerin eğilme yükü – sehim eğrileri Şekil 3.7'de sunulmuştur. S/Ç oranı 0,82 olan kompozitlerin ortalama en büyük eğilme yükü değeri en fazladır (Şekil 3.7a). S/Ç oranının 0,82'den 0,96'ya arttırılmasıyla ortalama en büyük eğilme yükü azalmakta, orta nokta sehim kapasitesi ise artmaktadır. S/Ç oranının 0,96'dan 1,19'a arttırılmasıyla hem en büyük yük değeri hem de en büyük yükteki orta nokta sehimi artmıştır (Şekil 3.7a). Plastik tane ilavesi yapılmasıyla kompozitlerin en büyük eğilme yükü değerlerinde S/Ç oranı 0,82 ve 1,19 olan serilerde azalma olurken, S/Ç oranı 0,96 olan seride önemli bir değişiklik görülmemiştir. En büyük yükteki orta nokta sehim değerleri ise tüm serilerde azalmıştır (Şekil 3.7c). S/Ç oranı sabit tutularak TM/Ç oranının arttırılmasıyla, kompozitlerin en büyük eğilme yükü değerleri artmaktadır (Şekil 3.7b). En büyük yükteki orta nokta sehimleri ise TM/Ç oranı 1,5'den 2,5'e arttırıldığında azalmış, 2,5'den 3,0'a arttırıldığında bir miktar artmıştır. Plastik tane ilavesiyle en büyük eğilme yükü değeri TM/Ç oranı 3,0 olan seride azalmış, diğer serilerde ise belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Ancak en büyük yükteki orta nokta sehim değerleri tüm kompozitlerde azalmıştır (Şekil 3.7d).



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 3.7 TUK serisi yük-sehim eğrileri

YUK ve TUK kompozitlerinin yük-sehim grafiklerinden elde edilen bulgular değerlendirildiğinde genel olarak TUK kompozitlerinin YUK kompozitlerine kıyasla yük taşıma ve sehim kapasitesi açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Yapılan boşluk yapısı modifikasyonu ile kompozitlerin eğilme performanslarında herhangi bir olumlu etki görülmemiştir.

3.1.4 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

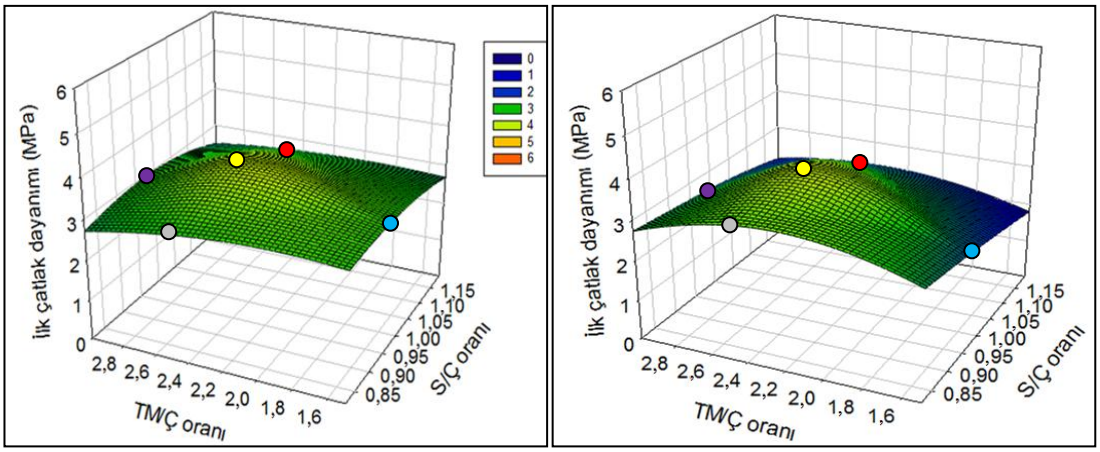
Kompozitlerin ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı ve sehim kapasiteleri değerleri, S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak üç boyutlu grafikler halinde oluşturulmuş, YUK ve TUK serileri için sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da sunulmuştur. Grafiklerin sol sütunlarında doğal boşluk yapısına sahip kompozitlerin, sağ sütunlarında ise boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerin grafikleri verilmiştir. Ayrıca, daha anlaşılır bir grafik elde edebilmek için, Bölüm 3.1.3'de

verilen renk notasyonları kullanılarak kompozitlerin yerleri grafikler üzerinde noktalar halinde belirtilmiştir.

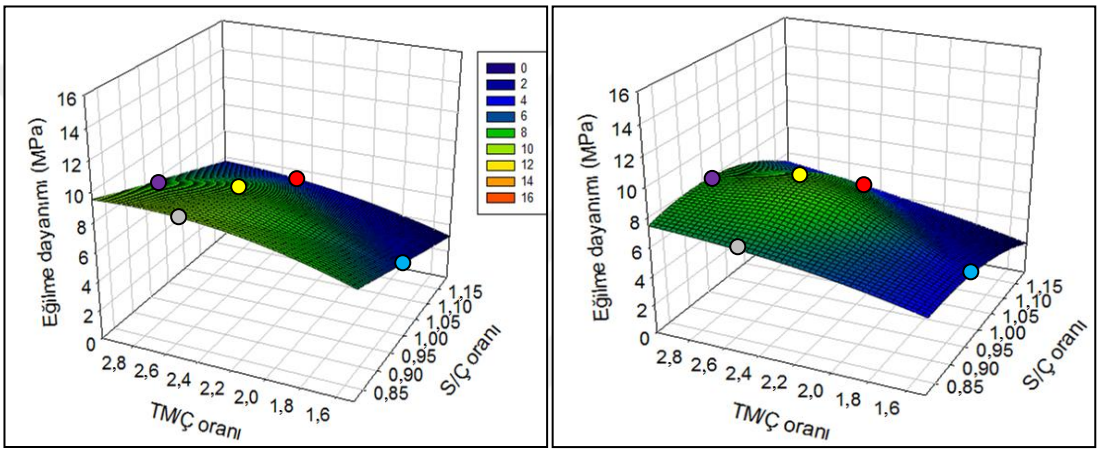
YUK serisi ilk çatlak dayanım değerleri dikkate alındığında, merkez matriste ilk çatlak dayanımının en fazla olduğu, S/Ç ya da TM/Ç oranı artışı ile birlikte ilk çatlak dayanımlarının azaldığı görülmektedir (Şekil 3.8a). Yapılan boşluk modifikasyonu ile kompozitlerin ilk çatlak dayanımları genel olarak bir miktar azalmıştır. Yalnızca, merkez matriste belirgin bir değişiklik görülmemiş (sarı nokta) ve S/Ç oranının düşük olduğu kompozitte (gri nokta) bir miktar artmıştır (Şekil 3.8b).

Eğilme dayanımlarında ise artan S/Ç ve azalan TM/Ç oranı ile kompozitlerin eğilme dayanımlarının azaldığı görülmektedir (Şekil 3.8c). Boşluk modifikasyonu ile merkez kompozitte eğilme dayanımı artmış, TM/Ç oranının yüksek olduğu kompozitte değişmemiş (mor nokta), diğerler kompozitlerde ise azalmıştır (Şekil 3.8d).

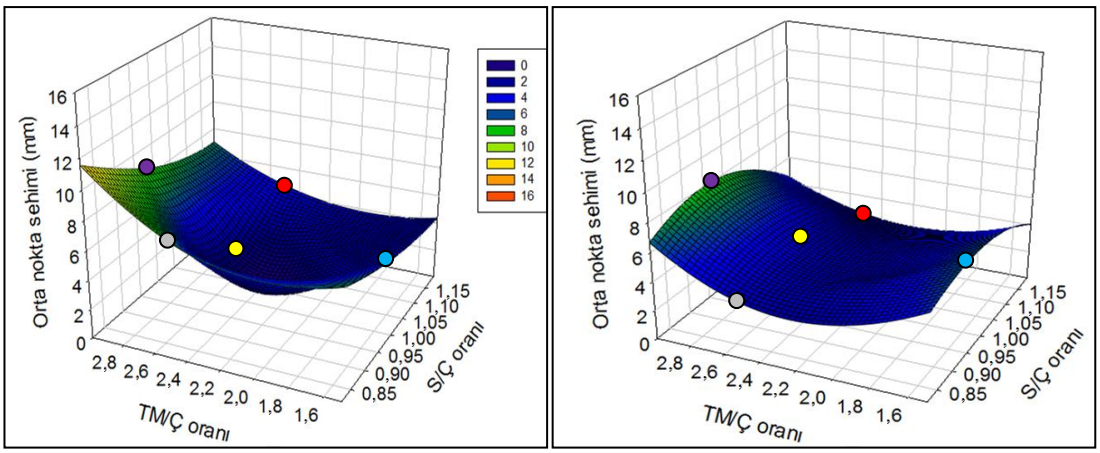
Kompozitlerin sehim kapasiteleri değerlendirilecek olursa, merkez kompozitin sehim değerinin en düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3.8e). En yüksek sehim kapasitesine ise düşük S/Ç ve yüksek TM/Ç oranlarında ulaşılmıştır (gri ve mor noktalar) (Şekil 3.8e). Kompozitlerin boşluk yapısı değiştirildiğinde ise, düşük S/Ç ve yüksek TM/Ç oranlarındaki kompozitlerin sehim kapasiteleri azalmakta (gri ve mor noktalar), merkez matrisin artmakta, yüksek S/Ç ve düşük TM/Ç oranına sahip kompozitlerde ise herhangi bir değişiklik görülmemektedir (Şekil 3.8f).



(a) (b)



(c) (d)



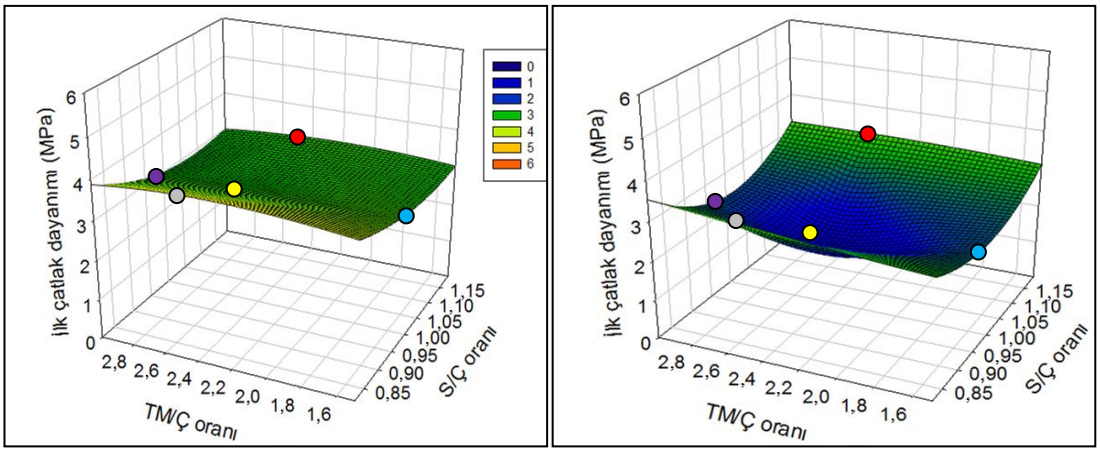
(e) (f)

Şekil 3.8 YUK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

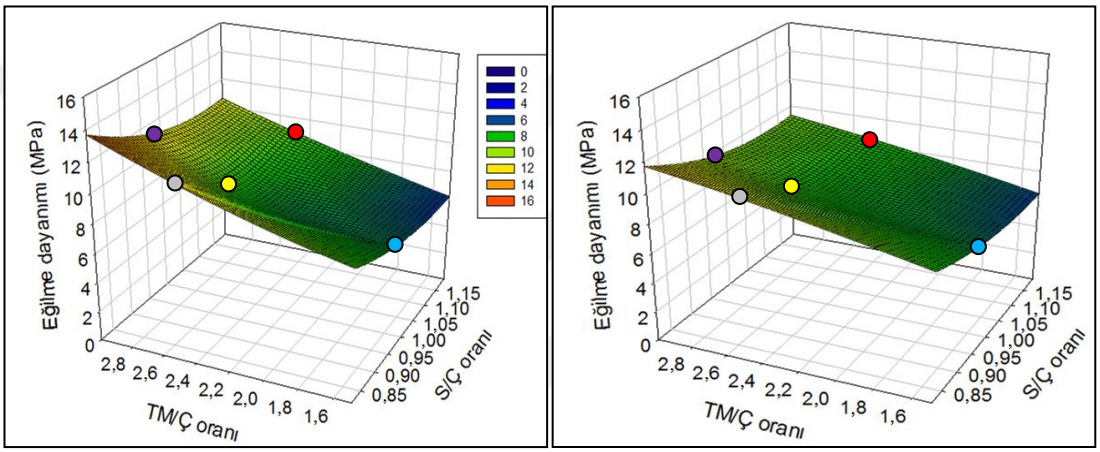
TUK serisine ait ilk çatlak-eğilme dayanımı ve sehim kapasitesi grafikleri Şekil 3.9'da verilmiştir. Kompoztilerin ilk çatlak dayanımları incelendiğinde, sabit S/Ç oranında TM/Ç oranın değişimi ile ilk çatlak dayanımlarında belirgin bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Ancak, TM/Ç oranı sabit tutulduğunda, S/Ç oranındaki artışla birlikte ilk çatlak dayanımlarının azaldığı söylenebilir (Şekil 3.9a). Kompozitlerin boşluk yapılarının modifikasyonu ile sabit S/Ç oranına sahip kompozitlerin ilk çatlak dayanımları belirgin olarak azalmıştır. Sabit TM/Ç oranına sahip kompozitlerde ise yalnızca merkez kompozitte belirgin bir düşüş olduğu söylenebilir (Şekil 3.9b).

Kompozitlerin eğilme dayanımları dikkate alındığında, sabit TM/Ç oranında S/Ç oranın azalması ya da artmasıyla eğilme dayanımlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca, sabit S/Ç oranında TM/Ç oranı artışıyla beraber kompozitlerin eğilme dayanımları belirgin bir şekilde artmaktadır (Şekil 3.9c). Boşluk yapısı modifikasyonu ile yalnızca merkez matrisin eğilme dayanımda bir miktar artış gözlenmiştir. Diğer kompozitlerin eğilme dayanımları ise ya azalmış ya da yaklaşık aynı seviyelerde kalmıştır (Şekil 3.9d).

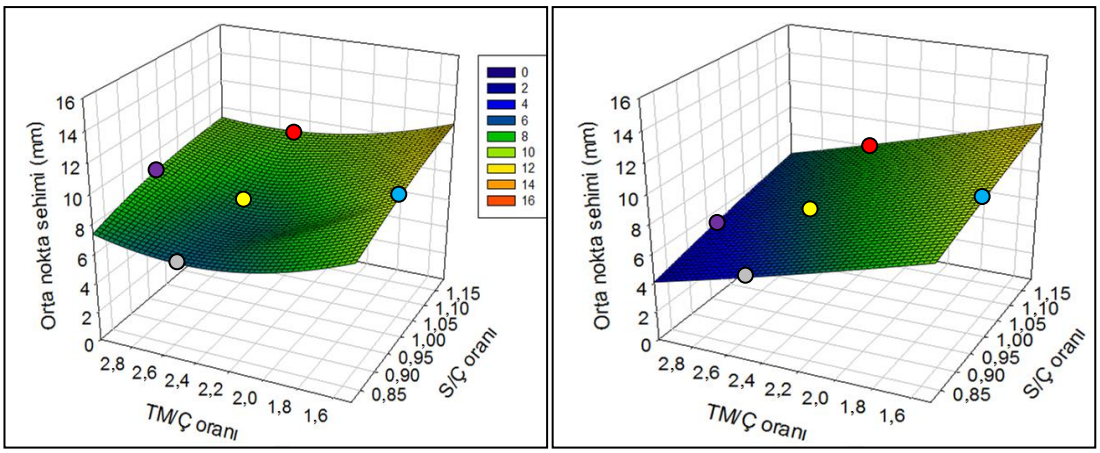
Sehim kapasiteleri kıyaslandığında, sabit S/Ç oranında TM/Ç oranının değiştirilmesi ile sehim kapasiteleri bir miktar artmaktadır. Ancak, bu artışın TM/Ç oranın azalması ile daha da belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca, sabit TM/Ç oranında S/Ç oranının artışı ile sehim kapasitesi belirgin bir şekilde artmaktadır (Şekil 3.9e). Yapılan boşluk modifikasyonu ile genel olarak tüm kompozitlerin sehim kapasitelerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 3.9f).



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Şekil 3.9 TUK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

Genel bir değerlendirme yapıldığında, TUK kompozitlerinin hem ilk çatlak hem de eğilme dayanımı değerlerinin YUK kompozitlerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Tunçbilek uçucu külünün Yatağan külüne kıyasla daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olması bu durumun bir sebebi olarak nitelendirilebilir (Tablo 2.2). Ayrıca, SEM analizi sonuçları dikkate alındığında TUK parçacıklarının YUK'a kıyasla daha ince bir yapıda olduğu tespit edilmişti (Şekil 3.1). Bu nedenle, TUK kompozitlerinin hem lif-matris arafazı hem de lif-matris arayüzeyi açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir. Böylece, lifler eğilme yükünü kompozitlerin diğer kesitlerine daha kolay aktaracak ve kırılma tokluğu açısından uygun bir matrisin bulunması durumunda da çoklu çatlak davranışı gelişecektir. TUK kompozitlerinin genel olarak hem eğilme dayanımlarının hem de sehim kapasitelerinin daha yüksek olması, bu durumların ortak bir sonucu olarak elde edilmiş olabilir.

Sehim kapasiteleri dikkate alındığında, TUK serisinde yüksek S/Ç oranı düşük TM/Ç oranına sahip zayıf matrislerde daha yüksek sehim kapasitelerine ulaşılırken (Şekil 3.9e), YUK kompozitlerinde düşük S/Ç oranı ve yüksek TM/Ç oranına sahip güçlü matrislerde sehim kapasitelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3.8e). Bu durumda, TUK kompozitlerinde yeterli bir lif-matris arayüzey aderansının bulunması sebebiyle, matrisin güçsüzleştirilmesi ve daha kolay çatlamasının sağlanmasıyla çoklu çatlak davranışının olumlu yönde etkilendiği ve sehim kapasitesinin arttığı söylenebilir (Şekil 3.9e). YUK kompozitlerinde ise yeterli bir lif matris aderansının olmadığı düşünülmektedir. Bu sebeple, daha güçlü yapıdaki YUK matrislerinde (fazla bağlayıcı madde ve az su), oluşan fazla miktardaki hidratasyon ürününün lif-matris arafazını doldurarak aderans özelliklerini geliştirdiği düşünülmektedir. Bu sayede, liflerin köprüleme özelliklerinin arttığı, kompozitlerin çoklu çatlak davranışı gösterme potansiyellerinin ve sehim kapasitelerinin geliştirildiği gözlenebilir (Şekil 3.8e).

Yapılan boşluk modifkasyonunun her iki seride de belirgin olumlu bir etkisi görülmemiştir. Yalnızca, YUK serisi merkez kompozitin sehim yapma kapasitesinin plastik tane ilavesiyle arttığı görülmektedir.

3.1.5 Çatlak Sayısı ve Genişliklerinin Değerlendirilmesi

3.1.5.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi

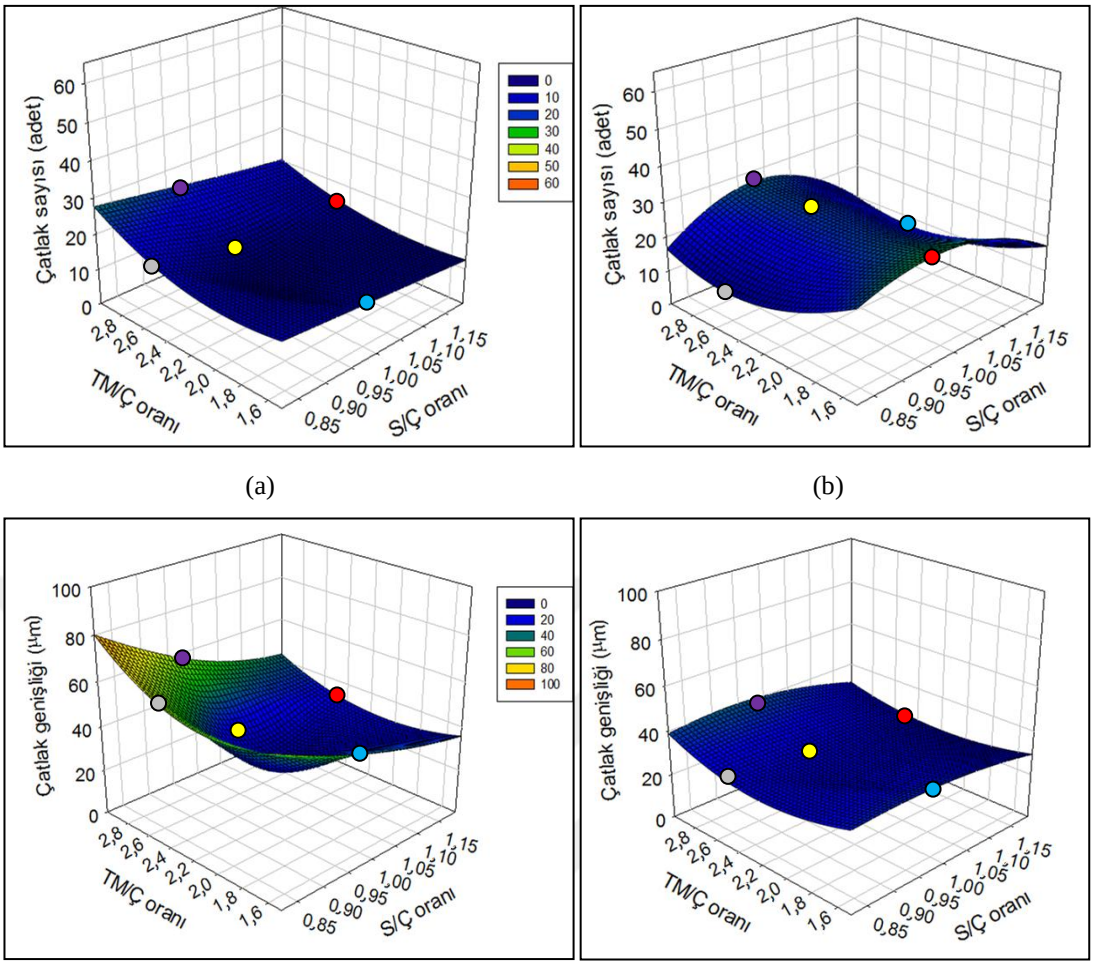
Kompozitlerin çatlak sayıları ve genişlikleri, YUK ve TUK serileri için, S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak üç boyutlu grafikler halinde Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de verilmiştir. Grafiklerin ilk satırında çatlak sayıları, ikinci satırında ise çatlak genişlikleri; ilk sütunda doğal boşluk yapısına sahip kompozitlerin, ikinci sütununda ise boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerin grafikleri verilmiştir.

YUK serisinde, S/Ç oranı azalıp TM/Ç oranı artarken çatlak sayılarının artma eğilimde olduğu görülmektedir (Şekil 3.10a). Plastik tane ilavesi yapıldığında ise merkez ve TM/Ç oranının düşük olduğu kompozitlerin çatlak sayısında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Ancak, S/Ç oranının değiştiği kompozitlerde çatlak sayılarının azaldığı görülmektedir (Şekil 3.10b).

YUK serisinde merkez kompozitin çatlak genişliği değeri en azdır. Ancak, S/Ç ve TM/Ç oranı değişimi ile çatlak genişliklerinin genel olarak arttığı söylenebilir (Şekil 3.10c). Kompozitlerin boşluk yapısı modifiye edildiğinde ise çatlak genişliklerinin genel olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 3.10d).

TUK kompozitlerinin çatlak sayıları incelendiğinde, S/Ç ve TM/Ç oranı artışıyla kompozitlerin çatlak sayılarının arttığı görülmektedir (Şekil 3.11a). Kompozit boşluk yapısının modifiye edilmesi ile çatlak sayılarının, S/Ç ve TM/Ç oranının yüksek olduğu kompozitler düştüğü, S/Ç ve TM/Ç oranının düşük olduğu kompozitlerde ise bir miktar arttığı görülmektedir (Şekil 3.11b).

TUK kompozitlerinin çatlak genişliklerinin ise, artan S/Ç ve azalan TM/Ç oranı ile arttığı görülmektedir (Şekil 3.11c). Kompozit boşluk yapısının modifiye edilmesi ile çatlak genişliklerini azaltmıştır (Şekil 3.11d).



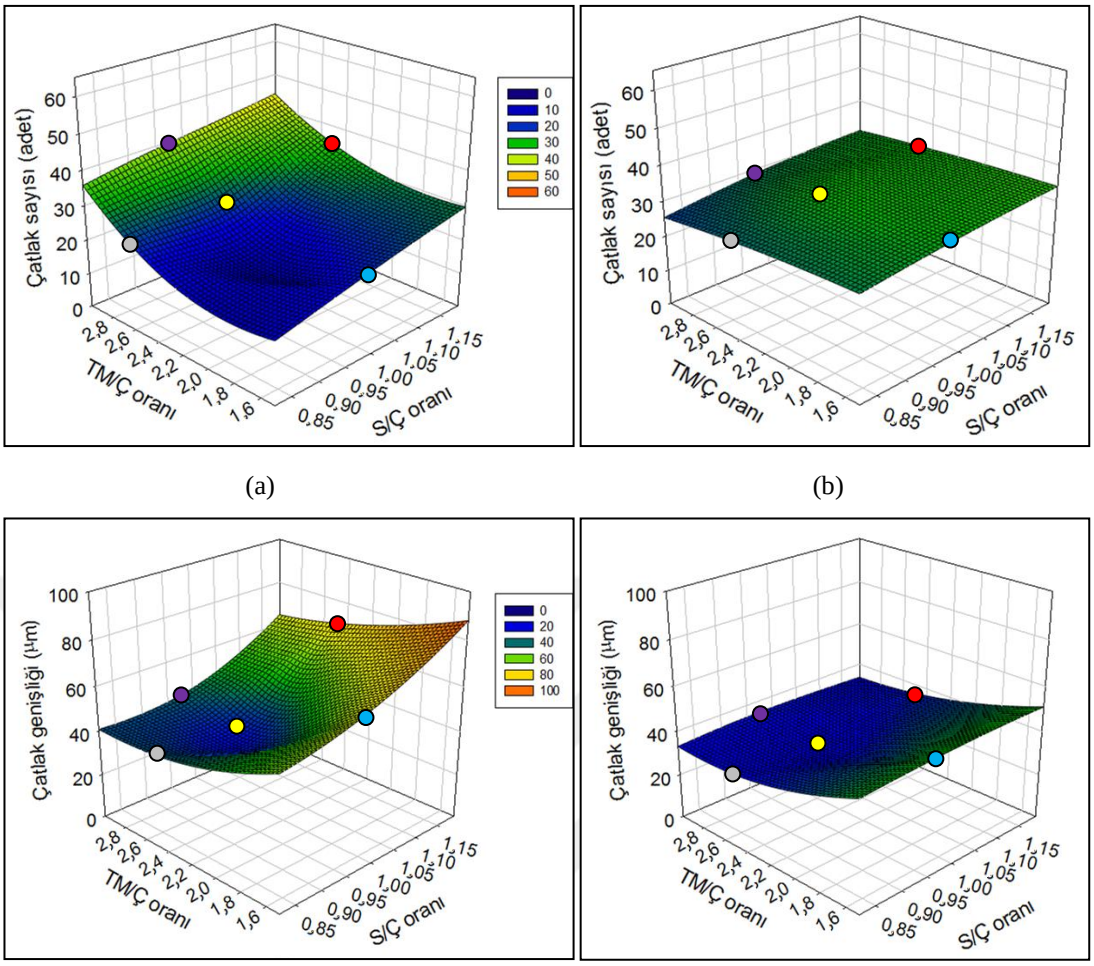
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 3.10 YUK serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

Genel olarak TUK kompozitlerinin çoklu çatlak potansiyelinin YUK kompozitlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Çatlak genişlikleri, YUK kompozitlerinde güçlü matrislerde daha fazla iken TUK kompozitlerinde zayıf matrislerde daha fazladır. Bu durum dikkate alındığında TUK kompozitlerinde uygun lif-matris aderansının elde edildiği düşüncesi daha da güçlenmektedir. Benzer şekilde, YUK kompozitlerinin güçlü matrislerinde hem çatlak sayısı hem de çatlak genişliğinin diğer YUK kompozitlerine kıyasla artması, bir önceki bölümde lif-matris aderansı açısından yapılan yorumları haklı çıkartmaktadır.

Boşluk modifikasyonunun ise çoklu çatlak davranışı geliştirmede olumlu bir etki etmediği tespit edilmiştir.



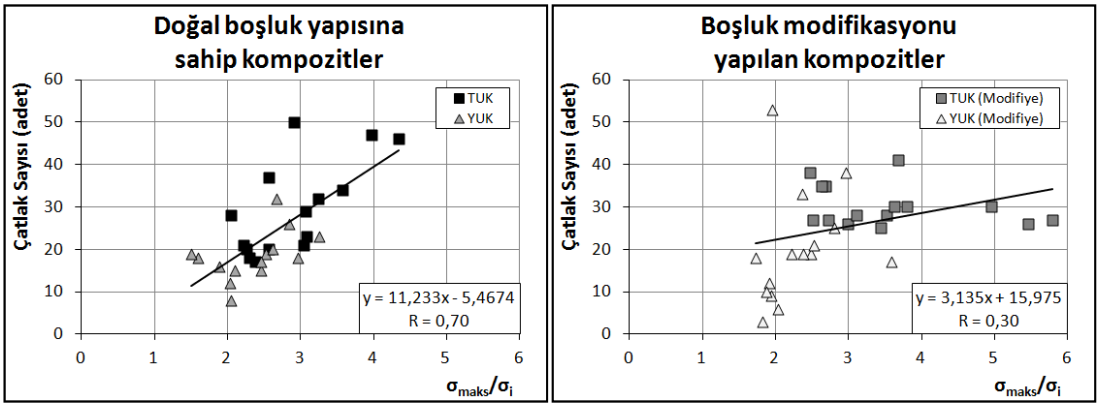
Şekil 3.11 TUK serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

3.1.5.2 Dayanımı Oranının (σ_{maks}/σ_i) Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi

Li, (1998) tarafından yapılan çalışmalarda, kompozitin ilk çatlak ve eğilme dayanımı arasındaki fark arttıkça, çoklu çatlak gösterme potansiyelinin artacağı belirtilmiştir. Şekil 3.12'de TUK ve YUK kompozitlerinin eğilme dayanımı/ilk çatlak dayanımı oranı (dayanım oranı: σ_{maks}/σ_i) ile çatlak sayısı ve çatlak genişliği arasında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır.

Doğal boşluk yapsına sahip kompozitlerde dayanım oranı ile çatlak sayısı arasında korelasyon kurulmuş ve korelasyon katsayısı R=0,70 olarak tespit edilmiştir (Şekil

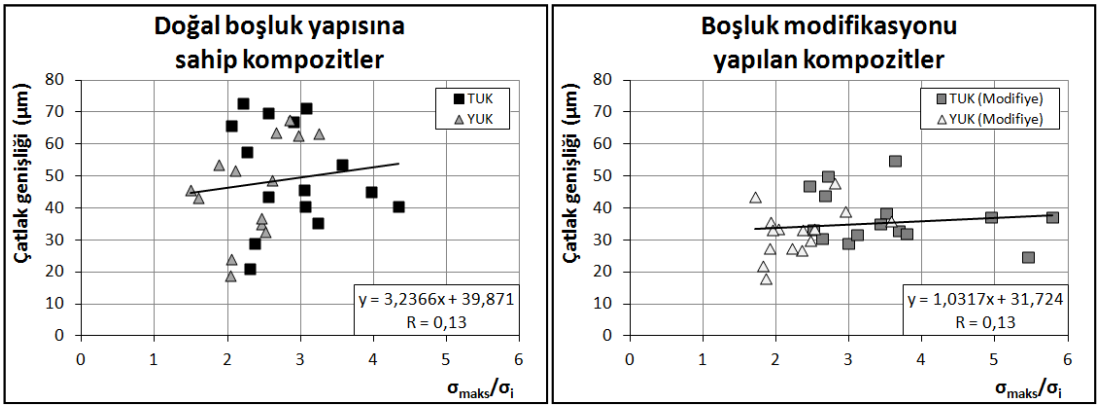
3.12a). Boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerde de yine benzer bir ilişki kurulmuş ancak korelasyon katsayısı R=0,30 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.12b).



(a) (b)

Şekil 3.12 Dayanımı oranı ile çatlak sayısı ilişkisi

Dayanımı oranının, çatlak genişliği üzerine herhangi bir etkisi olup olmadığı incelenmiştir (Şekil 3.13). Ancak, çatlak genişliği ile dayanım oranı arasında, hem doğal boşluk yapsına sahip hem de boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerde, düşük bir korelasyon katsayısı elde edilmiş (R=0,13) ve dayanım oranı ile çatlak genişliği arasında belirgin bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 3.13).



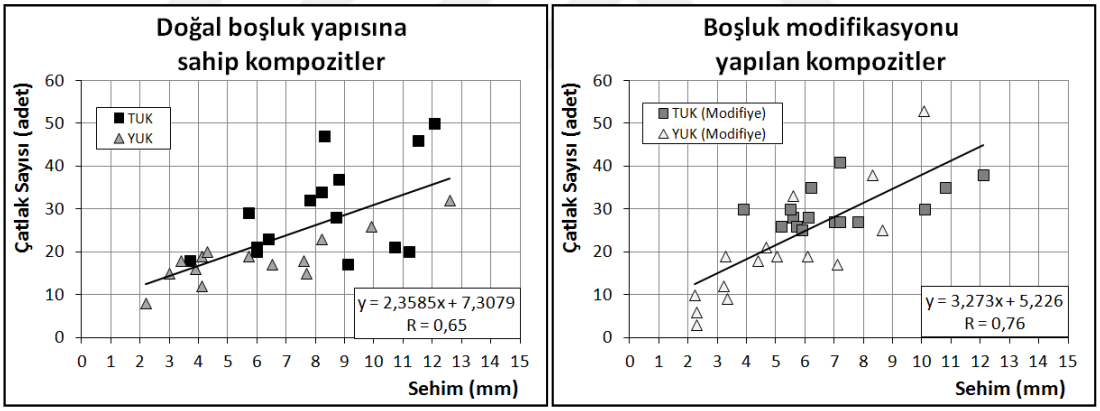
(a) (b)

Şekil 3.13 Dayanımı oranı ile çatlak genişliği ilişkisi

3.1.6 Çatlak Sayısı ve Genişliğinin Sehim Kapasitesine Etkisinin Değerlendirilmesi

Kompozitlerin sehim kapasitelerini etkileyen en önemli iki ölçüt çatlak sayısı ve çatlak genişliğidir. Çatlak sayısı ve çatlak genişliğinin kompozitlerin sehim kapasitelerine etkisi sırasıyla Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

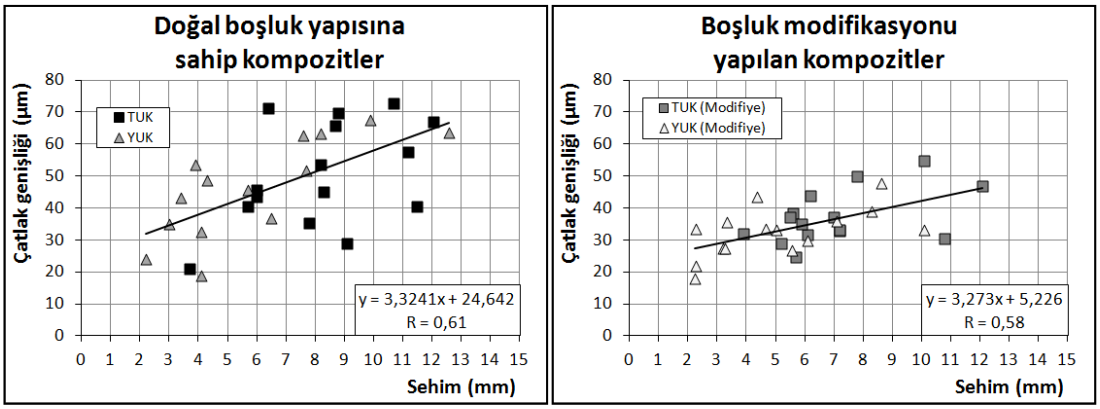
Kompozitlerin çatlak sayıları ile sehim kapasitelerindeki ilişkiler incelendiğinde, çatlak sayısı ile sehim kapasitesi arasında pozitif bir ilişki olduğu görülmüştür. Doğal boşluk yapısında sahip kompozitlerde, çatlak sayısı ile sehim arasındaki korelasyon katsayısı R=0,65 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.14a). Boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerde ise bu korelasyon daha da güçlenmiş R=0,76 olarak tespit edilmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak, yapılan boşluk modifikasyonu ile çatlak sayısının daha da arttığı ve sehim kapasitesinin geliştirilmesine daha çok katkıda bulunduğu söylenebilir.



(a) (b)

Şekil 3.14 Çatlak sayısı-sehim ilişkisi

Kompozitlerin sehim kapasitesi ile çatlak genişliği arasındaki ilişki Şekil 3.15'de verilmiştir. Hem doğal boşluk yapısına sahip kompozitlerde (Şekil 3.15a) hem de boşluk yapısı modifiye edilmiş kompozitlerde (Şekil 3.15b), artan çatlak genişliğiyle birlikte kompozitlerin sehim kapasitelerinin de artığı görülmüş ve bu kompozitler için korelasyon katsayıları sırasıyla R=0,61 ve R=0,58 olarak belirlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.15 Çatlak genişliği-sehim ilişkisi

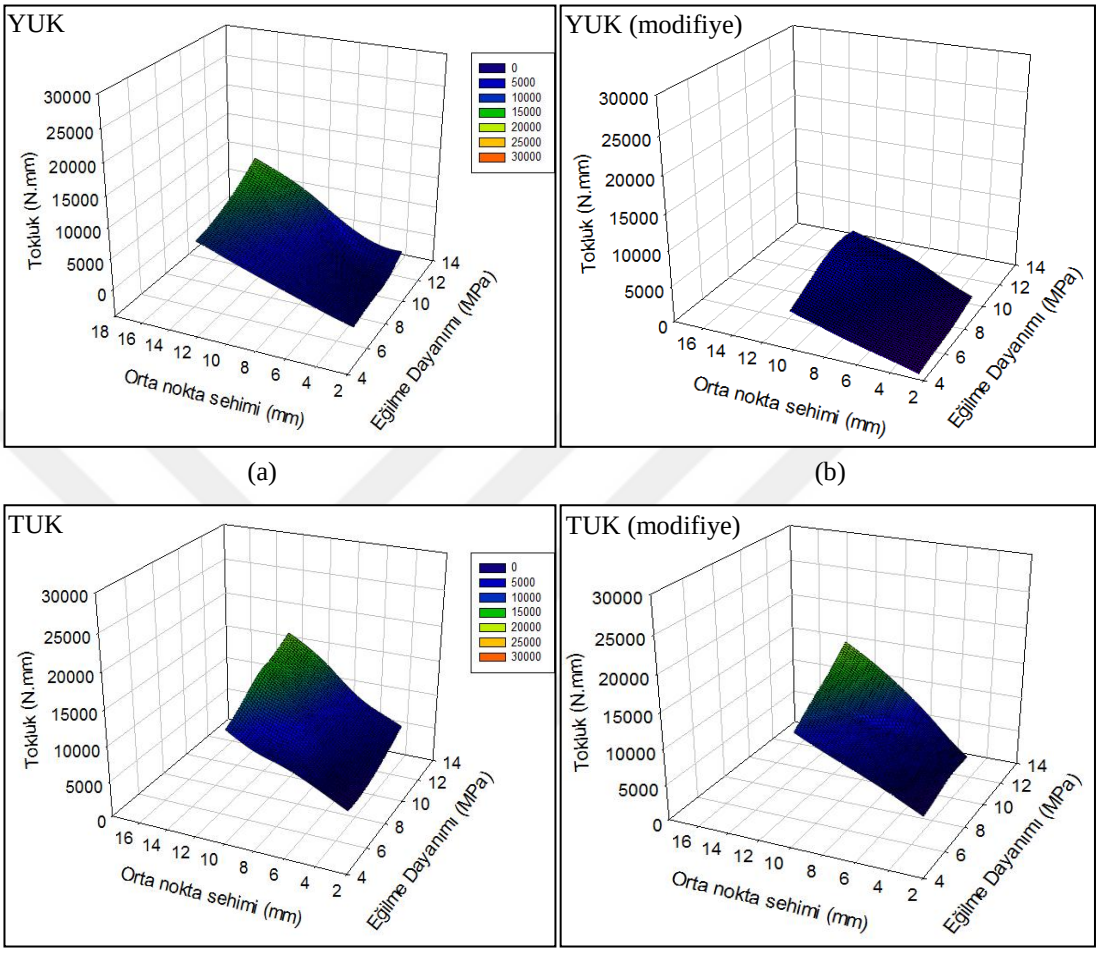
3.1.6 Tokluk Değerlerinin İncelenmesi ve Tokluk Korelasyonları

Eğilme dayanımı, sehim kapasitesi, çatlak sayısı ve çatlak genişliği parametreleri, kompozitin tokluk değerine etki eden en önemli parametrelerdir.

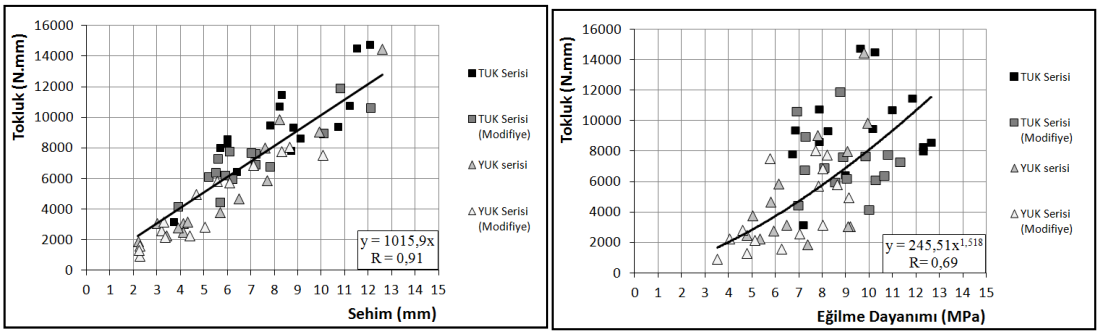
Eğilme dayanımı ve sehim kapasitesinin kompozitlerin tokluk değerlerine etkisi Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Şeklin ilk satırında YUK, ikinci satırında ise TUK kompozitleri; ilk sütununda doğal boşluk yapısındaki, ikinci sütununda ise boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerin grafikleri verilmiştir. Tüm kompozitlerde, eğilme dayanımı ve sehim kapasitesinin en fazla olduğu noktada tokluk kapasitesi en büyük değere ulaşmaktadır. TUK kompozitlerinin tokluk kapasiteleri (Şekil 3.16c), YUK kompozitlerine kıyasla göreceli olarak daha fazladır (Şekil 3.16a). Ayrıca, yapılan boşluk modifikasyonu ile YUK kompozitlerinin tokluk kapasitelerinin azaldığı (Şekil 3.16b), TUK kompozitlerinin tokluk kapasitelerinin ise etkilenmediği belirlenmiştir (Şekil 3.16d).

Sehim ve eğilme dayanımı değerleri ile tokluk arasındaki korelasyonlar sırasıyla Şekil 3.17a ve Şekil 3.17b'de verilmiştir. Korelasyon katsayıları dikkate alındığında, sehim kapasitesindeki artış miktarının eğilme dayanımına kıyasla tokluk değerlerini daha fazla etkilediği belirlenmiştir (Sehim için R=0,91, eğilme dayanımı için

R=0,69). Ancak, eğilme dayanımının tokluk değerine etkisinin eğilme dayanımındaki artışa bağlı olarak daha da arttığı görülmüştür (Şekil 3.17b).



Şekil 3.16 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi, a)YUK kopozitleri, b)YUK (modifiye) kompozitleri, c) TUK kompozitleri, d)TUK (modifiye) kompozitleri



Şekil 3.17 Tokluk korelasyonları, a) Sehim – tokluk, b) Eğilme dayanımı – tokluk

3.2 Yüksek Fırın Cürufu İçeren Kompozitlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

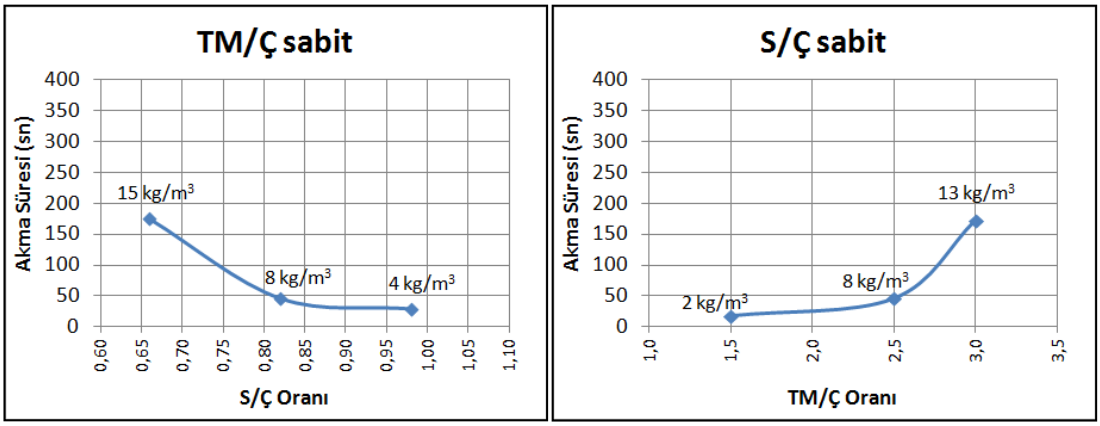
Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen YFC serisi kompozitlerinin, taze haldeki akma özellikleri ve sertleşmiş haldeki deney sonuçları dikkate alınarak yapılan değerlendirilmeler başlıklar halinde sunulmuştur.

3.2.1 Taze Haldeki Özelliklerinin Değerlendirilmesi

3.2.1.1 Akma sürelerinin değerlendirilmesi

YFC serisi matrislerinin akma süreleri modifiye Marsh hunisi kullanılarak elde edilmiştir. Matrislerin akma süreleri, karışımların S/Ç ve TM/Ç oranları ile içerdikleri süperakışkanlaştırıcı miktarları dikkate alınarak Şekil 3.18'de verilmiştir.

YFC serisinde, S/Ç oranı artışıyla, hem akma süresi hem de karışımın ihtiyaç duyduğu süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı azalmaktadır (Şekil 3.18a). Ancak, akma süresinde bu azalma miktarı, S/Ç oranının düşük olduğu durumlarda daha belirgindir. TM/Ç oranı artışıyla hem akma süresi hem de karışımın ihtiyaç duyduğu süperakışkanlaştırıcı miktarı artmaktadır (Şekil 3.18b). Akma süresindeki bu artış ise TM/Ç oranının artmasıyla daha belirgin hale gelmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.18 YFC serisi akma sürelerinin değerlendirilmesi, a) TM/Ç oranı sabit, b) S/Ç oranı sabit

3.2.1.2 Taze Haldeki Lif Topaklanma Miktarının Değerlendirilmesi

Taze haldeki YFC kompozitlerinin lif topaklanma durumları Tablo 3.3'te verilmiştir. TM/Ç oranı sabit, S/Ç oranı 0,66 olan kompozitte ek karıştırma süresi lif topaklanmasının giderilmesine etki etmezken, plastik tane ilavesi ile lif topaklanma sorunu giderilmiştir. S/Ç oranı 0,82 olan karışımda ise ek karıştırma uygulanması lif topaklanmasını sorununu tamamen ortadan kaldırmıştır. TM/Ç oranının sabit tutularak S/Ç oranının arttırılması, kompozitin ihtiyaç duyduğu katkı dozajını azaltılmış ve liflerin dağılımını olumlu yönde etkilemiştir.

S/Ç oranının sabit tutulduğu kompozitlerde ise, tüm kompozitlerde 2 dk 'lık karıştırma sonunda az miktarda lif topaklanması olduğu görülmüştür. Ancak, uygulanan 10 dk'lık ek karıştırma süresi lif topaklanma sorununu tamamen ortadan kaldırmıştır.

Tablo 3.3 Taze haldeki yüksek fırın cüruflu kompozitlerin lif topaklanma oranları

Matris	S/Ç	TM/Ç	Katkı Dozajı (kg/m^3)	2 dk karıştırma sonunda	10 dk ek karıştırma süresi sonrası	Plastik tane ilave edilip karıştırma sonrası
YFC (sabit TM/Ç)	0,66	2,5	15	T	T	-
	0,82	2,5	8	T	-	-
	0,98	2,5	4	-	-	-
YFC (sabit S/Ç)	0,82	1,5	2	T	-	-
	0,82	2,5	8	T	-	-
	0,82	3,0	13	T	-	-

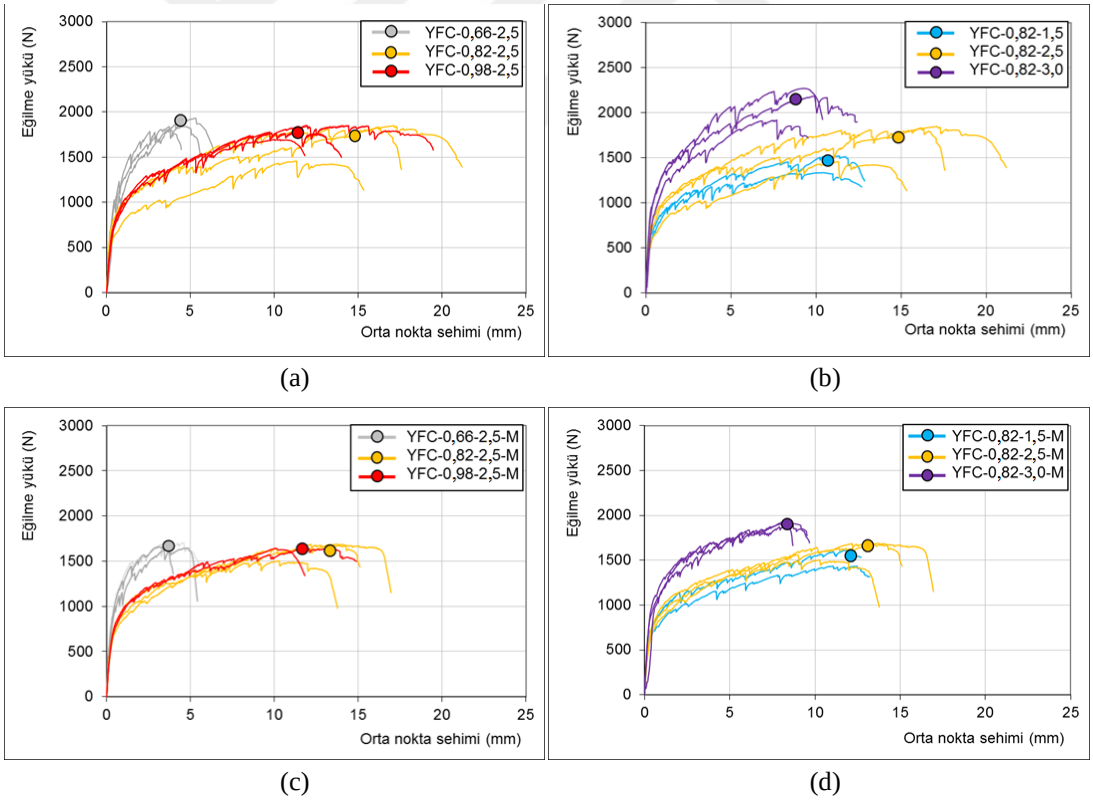
3.2.2 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi

YFC kompozitlerine ait yük-sehim eğrileri, Bölüm 3.1.3'de kullanılan grafik düzeni kullanılarak, Şekil 3.19'da verilmiştir.

TM/Ç oranının sabit tutulduğu YFC kompozitlerinde, S/Ç oranı artışıyla en büyük eğilme yükü değerlerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir (Şekil 3.19a). Ancak, S/Ç oranındaki artışla birlikte en büyük yükteki orta nokta sehim değerleri başlangıç

değerine göre artmıştır (Şekil 3.19a). Kompozitlerin boşluk yapısına müdahale edildiğinde, en büyük eğilme yükü değerlerini bir miktar azaltmıştır. Sehim kapasiteleri ise S/Ç oranı 0,66 ve 0,82 olan örnekte azalırken, 0,98 olan örnekte yaklaşık aynı seviyelerde kalmıştır (Şekil 3.19c).

S/Ç oranının sabit tutulduğu kompozitlerde, TM/Ç oranının arttırılmasıyla, kompozitlerin en büyük eğilme yükü değerleri artmaktadır (Şekil 3.19b). En büyük yükteki orta nokta sehim değerleri ise TM/Ç oranı 1,5'dan 2,5'a çıkartıldığında artmakta, 3,0'a arttırıldığında ise azalmaktadır (Şekil 3.19b). Boşluk modifikasyonu, TM/Ç oranı 1,5 ve 2,5 olan kompozitlerde en büyük eğilme yükü değerlerini etkilemezken, 3,0 olan seride azaltmıştır (Şekil 3.19d). En büyük yükteki orta nokta sehim değerleri ise TM/Ç oranı 1,5 olan seride artmış, 2,5 olan seride azalmış, 3,0 olan seride yaklaşık aynı kalmıştır (Şekil 3.19d).



Şekil 3.19 YFC serisi yük-sehim eğrileri

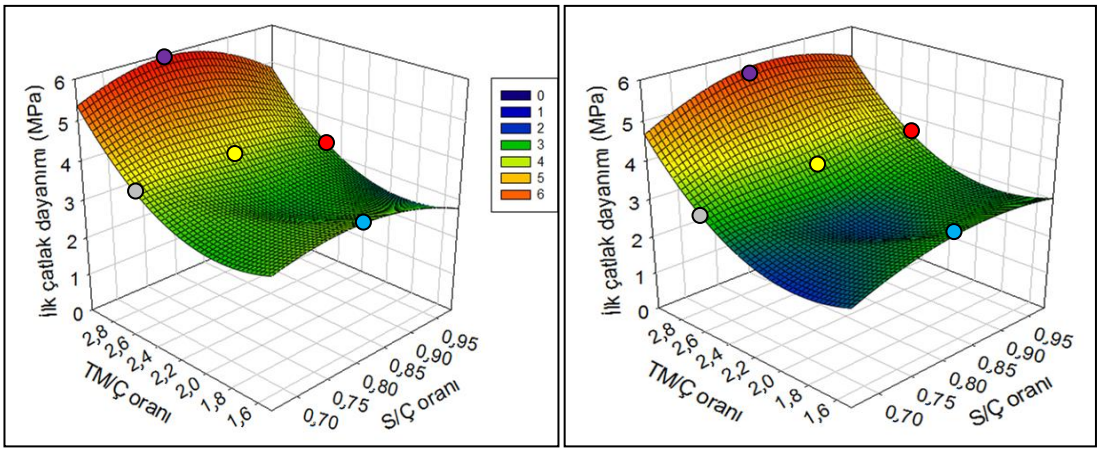
3.2.3 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

YFC serisi kompozitlerinin ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranı ile değişimi Şekil 3.20'de üç boyutlu grafikler halinde verilmiştir.

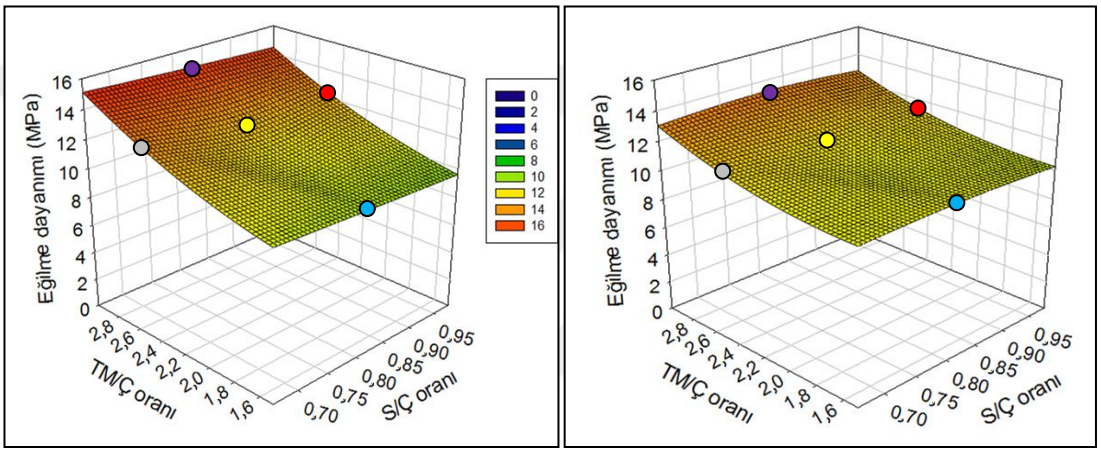
Kompozitlerin ilk çatlak dayanımlarının artan TM/Ç oranı ile belirgin olarak artmıştır. Sabit TM/Ç oranında ise azalan S/Ç oranı ile az da olsa bir artış olduğu görülmektedir (Şekil 3.20a). Kompozitlerin boşluk yapısına müdahale edildiğinde ise ilk çatlak dayanımları bir miktar azalmış ancak fazla etkilenmemiştir (Şekil 3.20b).

Eğilme dayanımlarında da ilk çatlak davranışına benzer bir durum söz konusudur. Eğilme dayanımları TM/Ç oranı artışı ile artarken S/Ç oranı değişiminden etkilenmemektedir (Şekil 3.20c). Boşluk yapısı modifikasyonu ile kompozitlerin eğilme dayanımları düşmekte ve bu düşüş TM/Ç oranının fazla olduğu kompozitlerde daha belirgin olarak görülmektedir (mor nokta) (Şekil 3.20d).

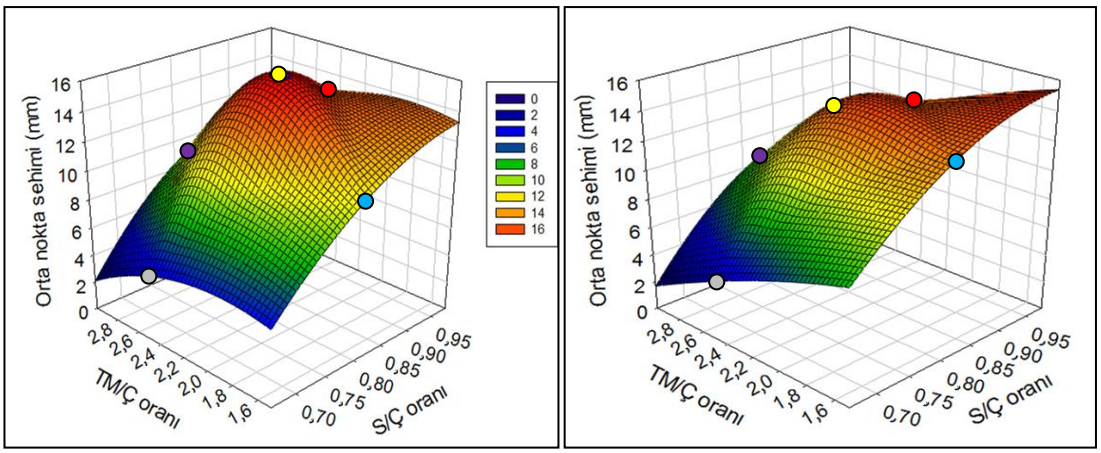
Kompozitler arasında en yüksek sehim kapasitesi merkez matriste elde edilmiştir (Şekil 3.20e). TM/Ç ve S/Ç oranı değişiminin sehim kapasitesini düşürdüğü görülmektedir. Boşluk modifikasyonu yapılmasıyla da benzer bir durum söz konusudur. Ayrıca, yapılan plastik tane ilavesi ile kompozitlerin sehim kapasitelerinin genel olarak düştüğü söylenebilir. Yalnızca TM/Ç oranının en düşük olduğu kompozitte (mavi nokta) sehim kapasitesi artmıştır (Şekil 3.20f). Hem doğal hem de modifiye edilmiş boşluk yapısına sahip kompozitlerde, merkez matris hariç diğer kompozitler kendi aralarında kıyaslanırsa, düşük TM/Ç oranı ve yüksek S/Ç oranına sahip olan kompozitlerin göreceli olarak daha fazla sehim yapabileceği söylenebilir (Şekil 3.20e, Şekil 3.20f).



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Şekil 3.20 YFC serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

Elde edilen bulgular dikkate alındığında, YFC kompozitleri içerisinde optimum performansın merkez kompozitten elde edildiği görülmektedir. Güçlü bir matris kullanımı ile (yüksek TM/Ç, düşük S/Ç) hem matris daha zor çatlamakta hem de lif-matris aderansı yükselmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak kompozitin yük taşıma kapasitesi hızlı bir şekilde artmakta, ancak yeni çatlaklar açılamadığı için sehim kapasitesinde azalmalar meydana gelmektedir. Tam tersi bir durumda ise (zayıf bir matris kullanıldığında), lif-matris aderansı ve dolayısıyla kompozitin yük taşıma kapasitesi bir miktar azalmaktadır. Ancak, matris daha kolay çatlaması sebebiyle zayıf matrislerdeki sehim kapasitesi kaybının tolere edilebildiği tespit edilmiştir.

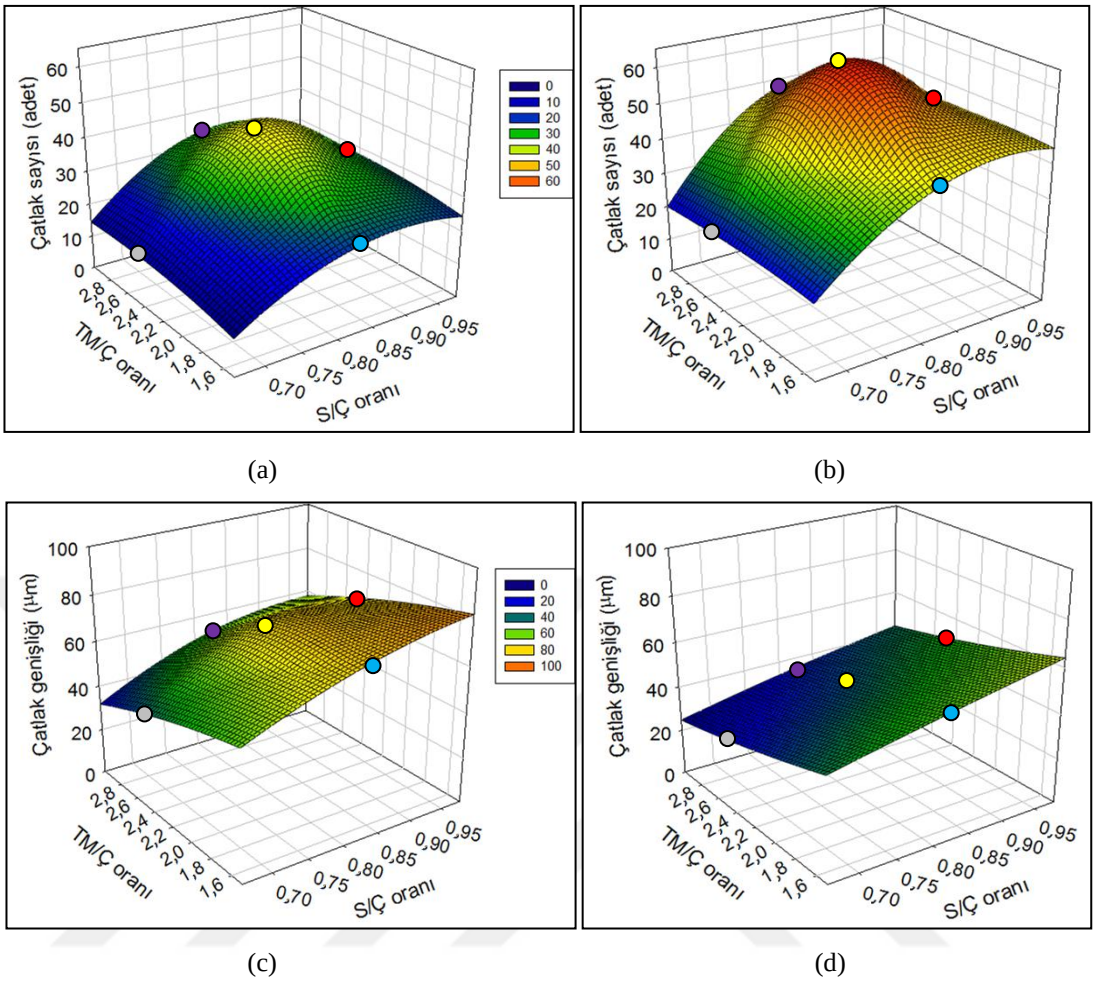
3.2.4 Çatlak Sayısı ve Genişliklerinin Değerlendirilmesi

3.2.4.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi

S/Ç ve TM/Ç oranının YFC serisi kompozitlerinin çatlak sayısı ve genişliğine etkisi Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Çatlak sayısının en fazla olduğu kompozit merkez kompozit olarak belirlenmiştir. S/Ç ve TM/Ç oranı değişimi ile kompozitlerin çatlak sayılarının azaldığı görülmektedir (Şekil 3.21a). Kompozitlerin boşluk yapılarının modifikasyonu ile tüm kompozitlerin çatlak sayılarında belirgin bir artış olmuştur (Şekil 3.21b). Ancak, yine en fazla çatlak sayısının merkez kompozitte olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.21b).

Kompozitlerin çatlak genişlikleri incelendiğinde ise düşük TM/Ç ve yüksek S/Ç oranında çatlak genişliklerinin artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.21c). Kompozit boşluk yapısının modifikasyonu ile yine benzer bir durum gözlenmiştir. Ancak, yapılan boşluk modifikasyonu ile kompozitlerin çatlak genişlikleri azalmıştır (Şekil 3.21d).

YFC kompozitlerinde plastik tane ilavesi ile genel olarak çatlak sayısının arttığı ancak çatlak genişliklerinin azaldığı söylenebilir. Ayrıca, çatlak genişlikleri zayıf matrislerde liflerin matristen daha kolay sıyrılması sebebiyle artış göstermektedir.



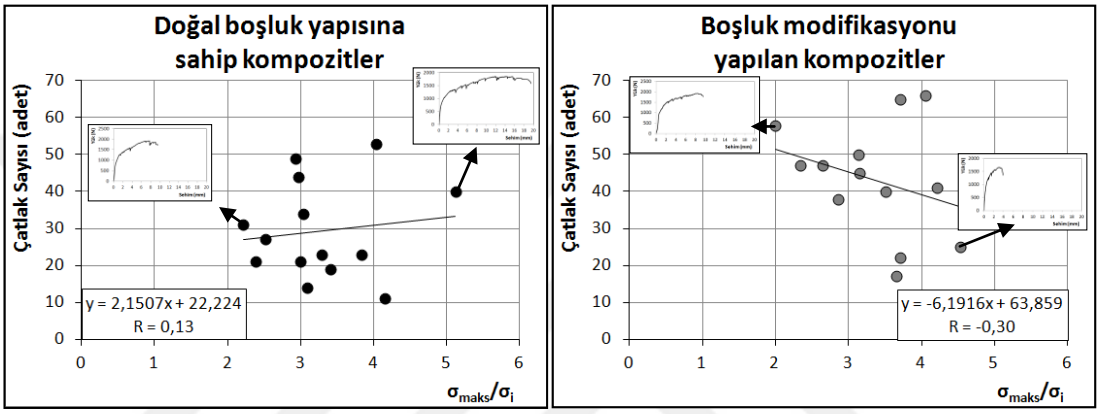
Şekil 3.21 YFC serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

3.2.4.2 Dayanımı Oranının (σ_{maks}/σ_i) Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi

YFC serisi kompozitlerinin dayanım oranı-çatlak sayısı ilişkisi Şekil 3.22'de verilmiştir. Tüm kompozitlerde σ_{maks}/σ_i oranı 2'den büyüktür ve çoklu çatlak davranışı sağlanmıştır. İncelenen eğilme kompozitlerindeki çatlak sayısı en az 10'dur. Bazı serilerde ise çatlak sayısı 60'ın üzerine çıkmıştır. Ancak, YFC kompozitlerinde dayanım oranı ile çatlak sayısı arasında güçlü bir ilişki kurulamamış ve korelasyon katsayısı R=0,13 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.22a). Boşluk modifikasyonu yapılan kompozitlerde ise kurulan bu ilişki ters orantılı bir hal almış ve R= -0,30 olarak bulunmuştur (Şekil 3.22b).

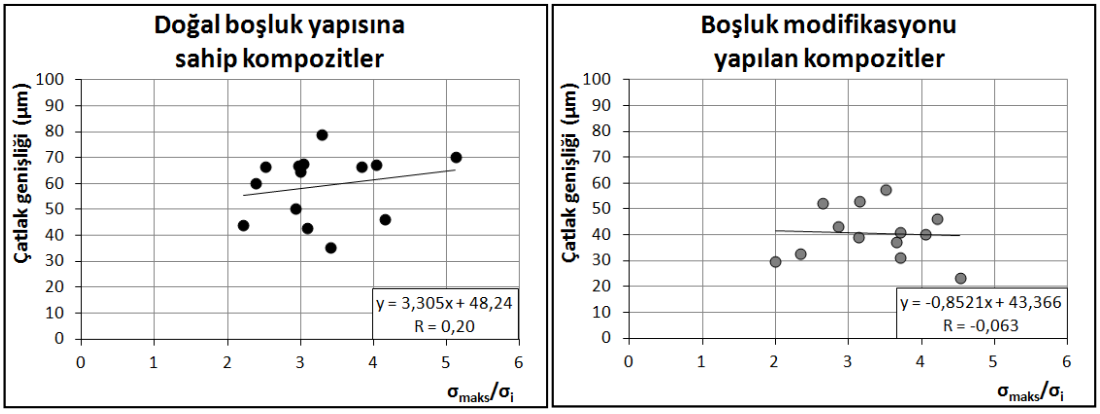
Kompozitlerin dayanım oranları ile çatlak genişlikleri arasında kurulan korelasyonlarda da belirgin bir ilişki görülmemiş ve çatlak sayısı korelasyonlarına benzer durumlar elde edilmiştir (Şekil 3.23a, Şekil 3.23b).

Matris kırılma tokluğu açısından lifle uyumsuz ve boşluk yapısı çatlak oluşumuna uygun olmayan kompozitler nedeniyle dayanım oranı ile çatlak sayısı ve genişliği arasında bir ilişki kurmak güçleşmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.22 YFC serisi dayanım oranı ile çatlak sayısı ilişkisi



(a) (b)

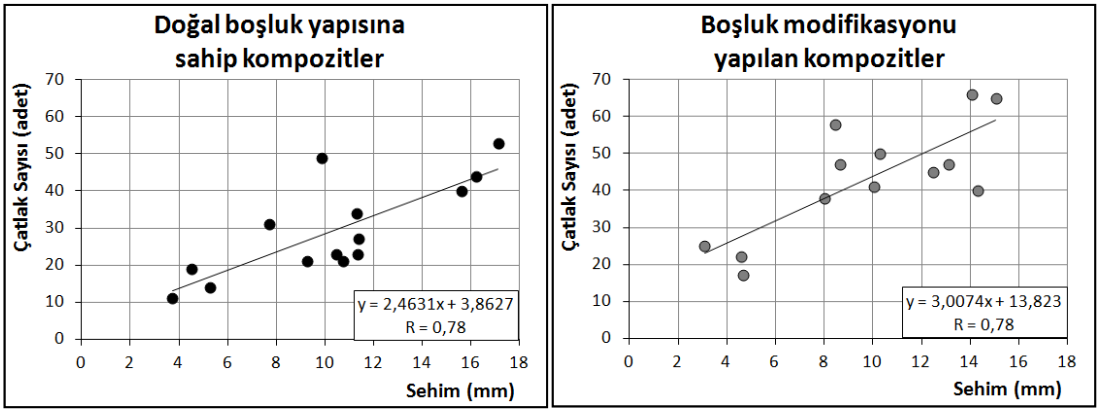
Şekil 3.23 YFC serisi dayanım oranı ile çatlak genişliği ilişkisi

3.2.5 Çatlak Sayısı ve Genişliğinin Sehim Kapasitesine Etkisinin Değerlendirilmesi

YFC serisi kompozitlerinde, çatlak sayısı ve çatlak genişliğinin sehim kapasitesine etkisi sırasıyla Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de gösterilmiştir. Doğal boşluk yapısına sahip kompozitlerde, 17 mm sehimde 50'nin üzerinde çatlak tespit edilirken, 10 çatlaklı kompozitlerde sadece 4 mm sehim görülmüştür. Boşluk yapsına müdahale edilen kompozitlerde ise, 15 mm sehimde 65 çatlak ve 3 mm sehimde 25 çatlak ölçülmüştür.

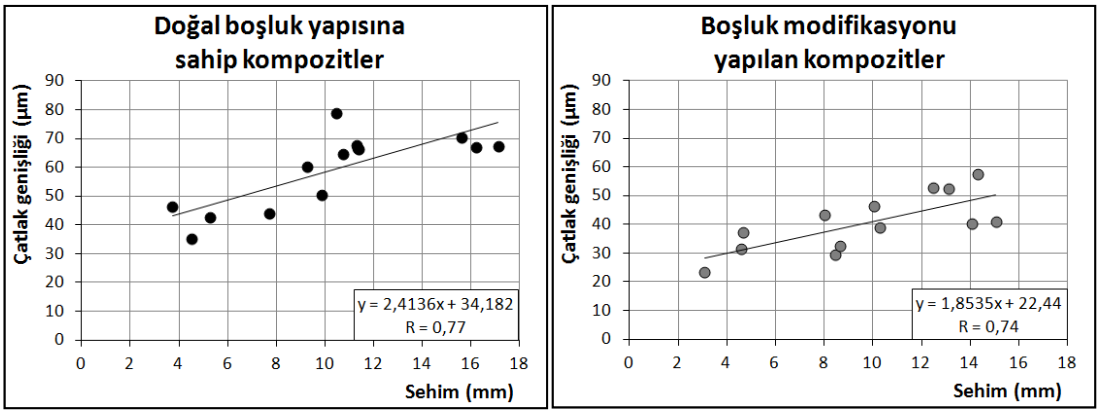
Çatlak sayısı ile sehim kapasitesi arasında, korelasyon katsayısı R=0,78 olan güçlü ilişki olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.24a). Kompozitlerin boşluk yapısına müdahale edildiği durumda da benzer şekilde güçlü bir ilişki elde edilmiştir (Şekil 3.24b).

Çatlak genişliği ile sehim kapasitesi arasında da güçlü bir ilişki tespit edilmiş ve korelasyon katsayısı R=0,77 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.25a). Kompozitlerin doğal boşluk yapısına müdahale edilmesiyle korelasyon katsayısı bir miktar düşüş göstermiştir (Şekil 3.25b, R=0,74). Ancak, hala çatlak genişliği ile sehim kapasitesi arasında güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir. Literatürde ECC için çatlak genişliklerinin en fazla 100 µm olması önerilmektedir (Boshoff, 2014). YFC için ölçülen çatlak genişlikleri genellikle 30-80 µm arasında olup, boşluk yapısı modifikasyonu ile 20-60 µm aralığına inmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.24 Çatlak sayısı-sehim ilişkisi



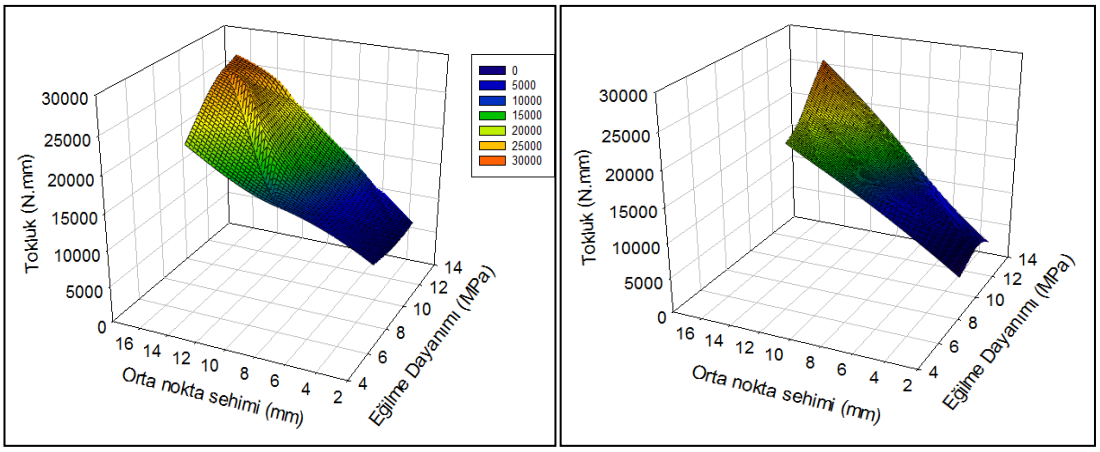
(a) (b)

Şekil 3.25 Çatlak genişliği-sehim ilişkisi

3.2.6 Tokluk Değerlerinin İncelenmesi ve Tokluk Korelasyonları

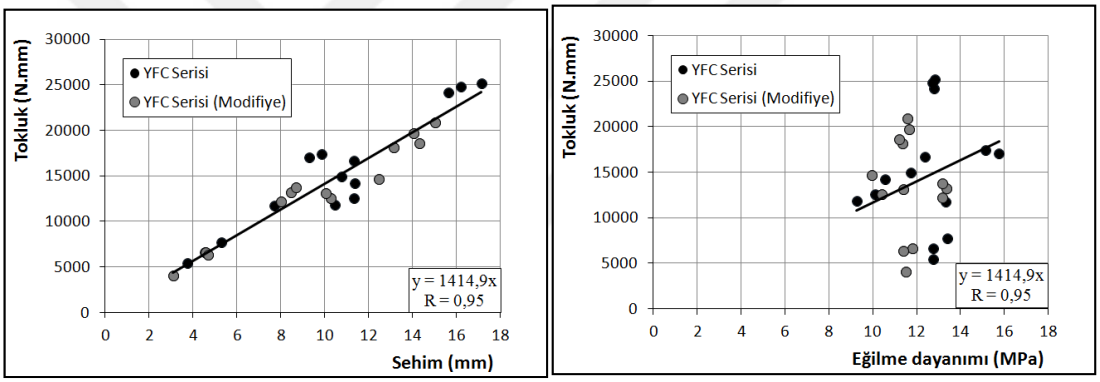
Eğilme dayanımı ve sehim kapasitesinin tokluk değerine etkisi Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Tüm kompozitlerde, eğilme dayanımı ve sehim kapasitesinin en fazla olduğu noktada tokluk kapasitesi de en büyük değere ulaşmaktadır (Şekil 3.26a). Yapılan boşluk modifikasyonu ile kompozitlerinin tokluk kapasitelerinde belirgin bir değişim görülmemiştir (Şekil 3.26b). Bu durum kompozitlerin farklı derecelerde kusur tolere etme yetenekleri olduğunu ispatlamaktadır. Geleneksel beton ya da deformasyon yumuşaması gösteren lifli betonlarda, kusur ilavesi tokluğu olumsuz etkiler. Uygun bir tasarımla bu soruna dirençli bir ECC üretmek mümkündür.

Sehim ve eğilme dayanımı değerleri ile tokluk arasındaki korelasyonlar şekil 3.27'de verilmiştir. Korelasyon katsayıları dikkate alındığında, sehim kapasitesindeki artış miktarının tokluk değerlerini doğrudan etkilediği söylenebilir (Şekil 3.27a, R=0,95). Ancak, eğilme dayanımının tokluk değerine etkisinin sehim kapasitesine kıyasla çok daha az olduğu görülmüştür (Şekil 3.27b, R=0,13). Bu sonuç matrisin dayanımını arttırmanın ECC tasarımında tek başına öneminin olmadığının bir ispatıdır. Lif-matris arası etkileşimin ve ECC'nin mikromekanik teorisinde açıklanan enerji kriterinin sağlanması dayanımdan bağımsız faktörlerdir.



(a) (b)

Şekil 3.26 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi



(a) (b)

Şekil 3.27 Tokluk korelasyonları, a) Sehim – tokluk, b) Eğilme dayanımı – tokluk

3.3 Kalsine Kaolin İçeren Kompozitlerin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

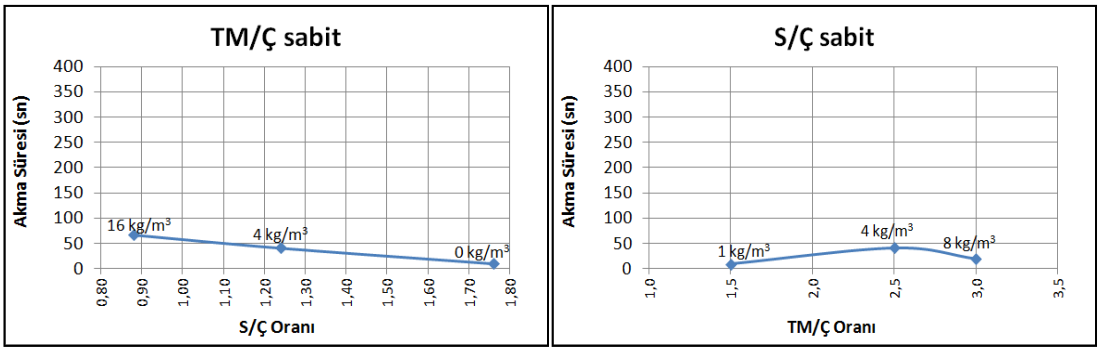
Kalsine kaolin kullanılarak üretilen KK serisi kompozitlerinin, taze haldeki akma özellikleri ve sertleşmiş haldeki deney sonuçları dikkate alınarak yapılan değerlendirilmeler başlıklar halinde sunulmuştur.

3.3.1 Taze Haldeki Özelliklerin Değerlendirilmesi

3.3.1.1 Akma Sürelerinin Değerlendirilmesi

KK matrislerinin Marsh hunisinden akma süreleri, S/Ç ve TM/Ç oranları ile süperakışkanlaştırıcı katkı dozajları arasındaki ilişki Şekil 3.28'de sunulmuştur. KK serisinde S/Ç oranı artışıyla, akma süresi ve karışımın ihtiyaç duyduğu süperakışkanlaştırıcı katkı dozajı azalmaktadır (Şekil 3.28a). Ayrıca, S/Ç oranı 1.75 olan karışımda herhangi bir süperakışkanlaştırıcı katkı ilavesine gerek duyulmadan en düşük akma süresi elde edilmiştir (Şekil 3.28a). S/Ç oranı sabit tutulan kompozitlerde ise, TM/Ç oranı artışına bağlı olarak, karışımı akıcı hale getirmek için gereken süperakışkanlaştırıcı dozajı bir miktar artmaktadır (Şekil 3.28b). Akma sürelerinde ise önce bir miktar artış görülmüş, ancak daha sonra akma süresi tekrar düşmüştür (Şekil 3.28b).

KK serisinde diğer mineral katkılı serilere kıyasla daha yüksek S/Ç oranının kullanılmasının nedeni, bu matrisin akıcı hale gelmesi gereken su ihtiyacının çok yüksek olmasıdır. Su yerine yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında matris topaklaşmış ve akıcı hale getirilememiştir. Bu nedenle merkez matrisin S/Ç oranı diğer mineral katkılı serilere kıyasla daha yüksektir.



(a) (b)

Şekil 3.28 Tokluk korelasyonları, a) Sehim – tokluk, b) Eğilme dayanımı – tokluk

3.3.1.2 Taze Haldeki Lif Topaklanma Miktarının Değerlendirilmesi

KK serisinde gözlenen lif topaklanma miktarları Tablo 3.3'de sunulmuştur. TM/Ç oranının sabit tutulduğu kompozitlerin hepsi liflerin ayrılması ve dağıtılmasında olumlu sonuç vermiştir. S/Ç oranının sabit tutulduğu kompozitlerde ise yalnızca KK-1,24-1,5 karışımında topaklanma problemi ile karşılaşılmış, ancak bu kompozitteki lif topaklanma problemi de plastik tane ilavesi ile giderilmiştir. Kalsine kaolinli kompozitlerde, az miktarda katkı ilavesi ile lif topaklanması probleminin önüne geçilmiştir. Ayrıca, akma süresi ve içerdiği katkı miktarı açısından en iyi sonucun kalsine kaolinli matrislerden elde edildiği de söylenebilir.

Tablo 3.4 Taze haldeki kalsine kaolin içeren kompozitlerin lif topaklanma oranları

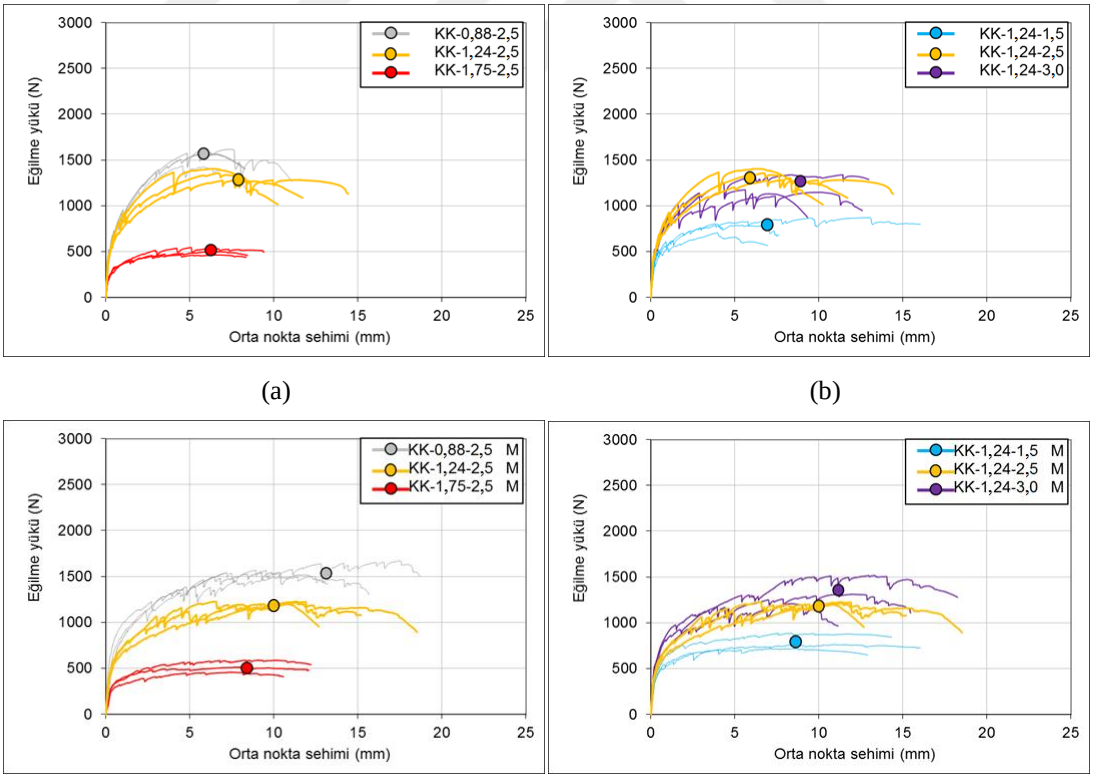
Matris	S/Ç	TM/Ç	Katkı Dozajı (kg/m^3)	2 dk karıştırma sonunda	10 dk ek karıştırma süresi sonrası	Plastik tane ilave edilip karıştırma sonrası
KK (sabit TM/Ç)	0,88	2,5	16	-	-	-
	1,24	2,5	4	-	-	-
	1,75	2,5	0	-	-	-
KK (sabit S/Ç)	1,24	1,5	1	T	T	-
	1,24	2,5	4	-	-	-
	1,24	3,0	8	-	-	-

3.3.2 Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi

KK kompozitlerine ait yük-sehim eğrileri Şekil 3.29'da verilmiştir. TM/Ç oranının sabit tutulduğu serilerde, S/Ç oranı artışıyla kompozitlerin en büyük eğilme

yükü değerlerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 3.29a). Sehim değerleri ise S/Ç oranının 0,88'den 1,24'e arttırılmasıyla artmış, 1,75'e arttırılmasıyla azalmıştır (Şekil 3.29a). Kompozitlerin boşluk yapısının modifiye edilmesi ile tüm kompozitlerin en büyük eğilme yükü değerlerinde önemli bir değişiklik görülmeden en büyük yükteki orta nokta sehim değerleri artmıştır (Şekil 3.29c).

S/Ç oranının sabit tutulduğu serilerde ise, TM/Ç oranının 1,5'den 2,5'e arttırılmasıyla, örneklerin en büyük eğilme yükü değerleri artmıştır. Ancak, TM/Ç oranının 2,5'den 3,0'a arttırılmasıyla eğilme yükünde hafif bir düşüş görülmektedir (Şekil 3.29b). En büyük yükteki orta nokta sehimleri ise TM/Ç oranı 1,5'den 2,5'e arttırıldığında azalmış, 2,5'den 3,0'a arttırıldığında ise artmıştır (Şekil 3.29b). Boşluk yapısına müdahale edilen kompozitlerin en büyük eğilme yükü değerlerinde önemli bir değişme görülmezken, en büyük yükteki orta nokta sehim değerlerinin tekrar tüm kompozitlerde arttığı görülmüştür (Şekil 3.29d).



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 3.29 KK serisi yük-sehim eğrileri

3.3.3 İlk Çatlak Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Sehim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

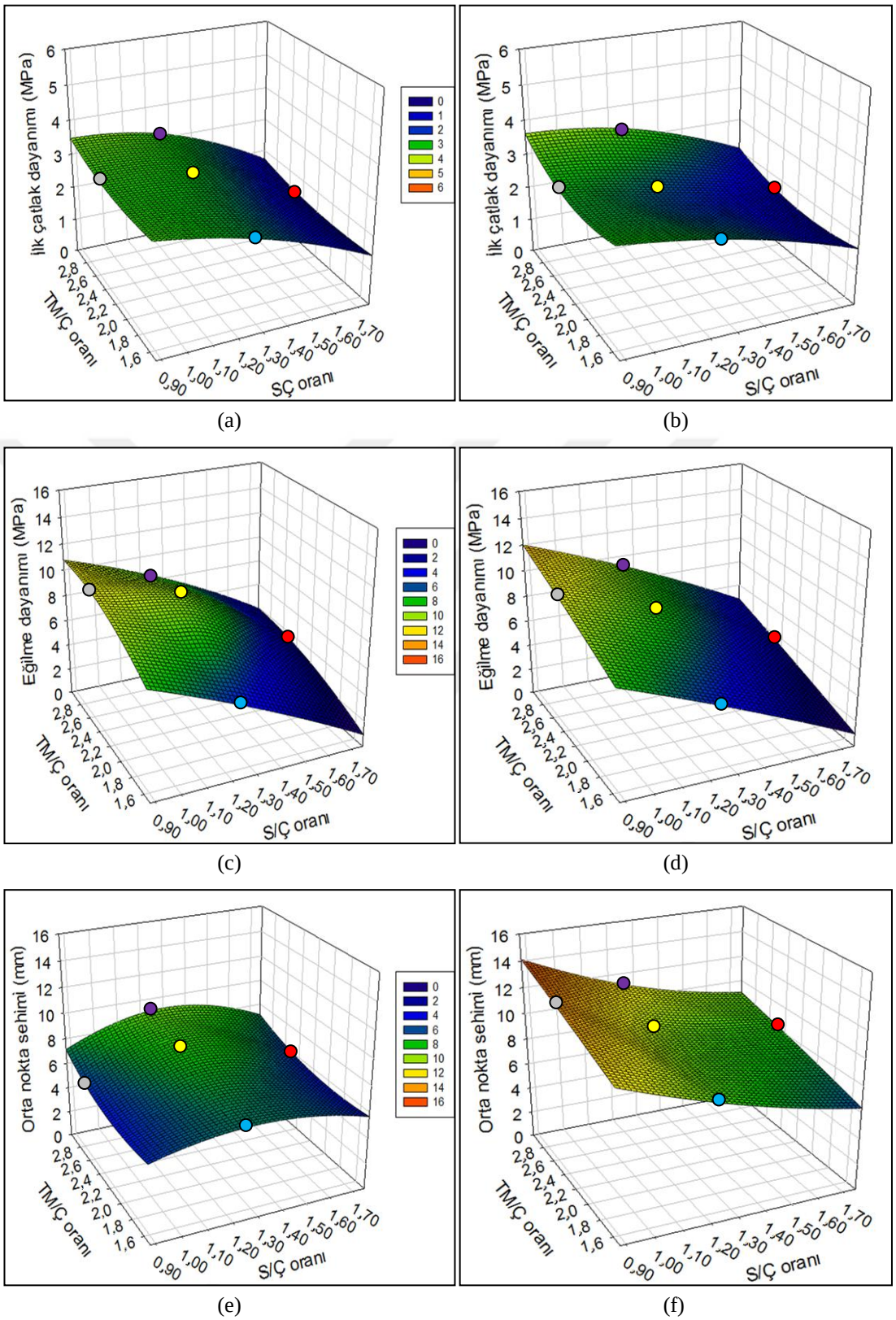
Kalsine kaolin kullanılarak üretilen kompozitlerinin ilk çatlak dayanımı, eğilme dayanımı ve sehim kapasitesi grafikleri TM/Ç ve S/Ç oranları dikkate alınarak Şekil 3.30'da sunulmuştur.

Kompozitlerin ilk çatlak dayanımları S/Ç oranı arttıkça azalmakta, TM/Ç oranı değişiminden ise etkilenmemektedir (Şekil 3.30a). Boşluk yapısı modifikasyonu ile yalnızca merkez matrisin ilk çatlak dayanımı bir miktar azalmış, diğer kompozitlerin ilk çatlak dayanımlarında ise belirgin bir değişim olmamıştır (Şekil 3.30b).

Eğilme dayanımları dikkate alındığında, TM/Ç oranının artması ve S/Ç oranının azalması ile kompozitlerin eğilme dayanımları artmaktadır (Şekil 3.30c). Kompozitlerin boşluk yapılarının modifiye edilmesi ile eğilme dayanımlarında da belirgin bir değişiklik görülmemektedir (Şekil 3.30d).

Kompozitlerin sehim kapasiteleri incelendiğinde S/Ç oranının sabit tutulduğu kompozitlerde en yüksek sehim kapasitesi değerleri elde edilmiş ve TM/Ç oranı arttıkça sehim kapasitesi de artmıştır (Şekil 3.30e). Yapılan boşluk modifikasyonu, tüm kompozitlerin sehim kapasitelerini arttırmada başarılı olmuştur (Şekil 3.30f). Bu artış, S/Ç oranının az olduğu serilerde yaklaşık %33 seviyelerinde iken (kırmızı nokta), S/Ç oranın düşük olduğu kompozitlerde neredeyse %100'e ulaşmıştır (gri nokta) (Şekil 3.30f).

Kalsine kaolinli kompozitlerde, kompozitlerin ilk çatlak ve eğilme dayanımları S/Ç oranı ile değişmektedir. Hem ilk çatlak hem de eğilme dayanımları düşük S/Ç oranlarında daha yüksektir. Sehim değerleri ise 6-10 mm arasında değişmektedir. Ancak, plastik tane ilavesi KK kompozitlerinin çoklu çatlak davranışını geliştirmede etkili olmuş ve dayanımlarda belirgin bir fark görülmeksizin kompozitlerin sehim kapasitelerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sehim kapasitesi bu artışın güçlü matrislerde daha da fazla olduğu gözlenmiştir.



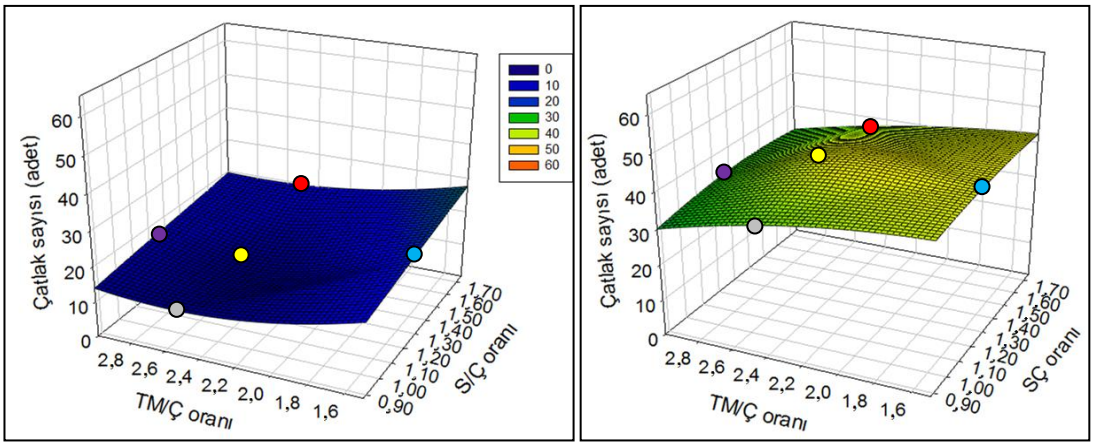
Şekil 3.30 KK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve sehim kapasitelerinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

3.3.4 Çatlak Sayısı ve Genişliklerinin Değerlendirilmesi

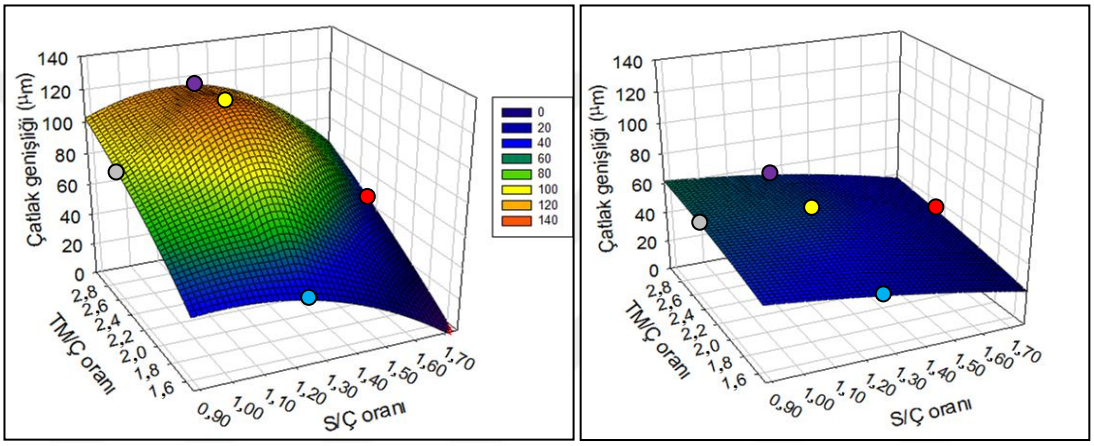
3.3.4.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi

Kompozitlerin S/Ç ve TM/Ç oranının çatlak sayısı ve genişliğine etkisi Şekil 3.31'de verilmiştir. Kompozitlerin çatlak sayıları artan S/Ç oranı ve azalan TM/Ç oranı ile bir miktar artmaktadır (Şekil 3.31a). Kompozitlerin boşluk yapısının modifiye edilmesi ile tüm kompozitlerin çatlak sayısında belirgin bir artış olmuştur (Şekil 3.31b).

Çatlak genişlikleri incelendiğinde ise çatlakların en fazla merkez matriste genişlediği görülmektedir (Şekil 3.31c). Yüksek TM/Ç ve düşük S/Ç oranına sahip kompozitlerde de çatlak genişliklerinin fazla olduğu tespit edilmiştir. TM/Ç oranın azalması ve S/Ç oranın artması ile çatlak genişliklerinin azaldığı söylenebilir (Şekil 3.31c). Kompozitlerin boşluk yapısına müdahale edildiğinde ise çatlak genişliklerinde önemli ölçüde bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 3.31d).



(a) (b)



(a) (b)

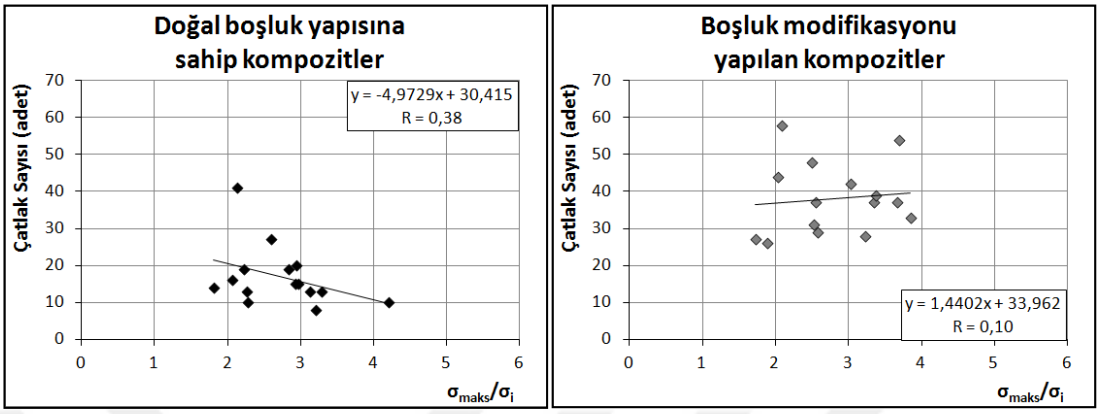
Şekil 3.31 KK serisi çatlak sayısı ve genişliğinin S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak değerlendirilmesi

3.3.4.2 Dayanım Oranının (σ_{maks}/σ_i) Çatlak Sayısı ve Genişliğine Etkisi

Kompozitlerin dayanım oranının çatlak sayısı ve genişliği ile ilişkisi sırasıyla Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de verilmiştir. Doğal boşluk yapısına sahip kompozitlerde dayanım oranı arttıkça çatlak sayısının azaldığı (Şekil 3.32a), boşluk yapısı modifiye edilen kompozitlerde ise dayanım oranı arttıkça çatlak sayısının az da olsa arttığı sonucu edilmiştir (Şekil 3.32b).

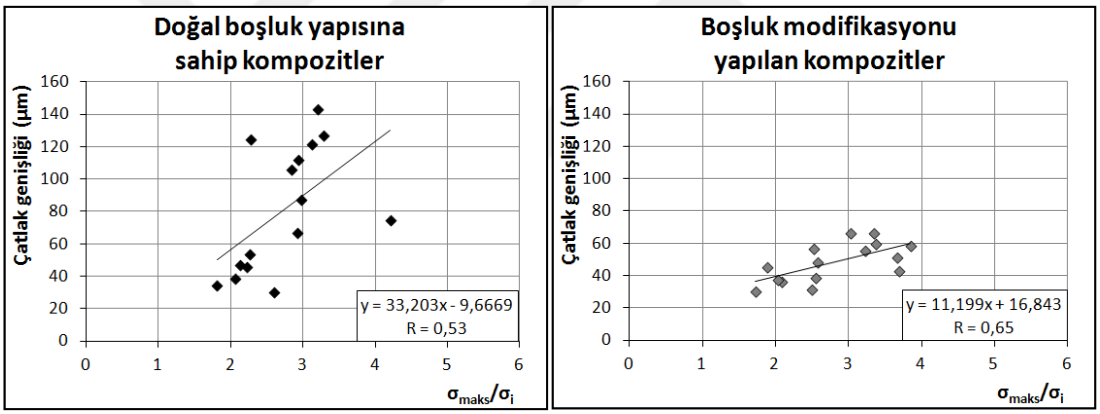
Kompozitlerin dayanım oranı – çatlak genişliği ilişkisi incelendiğinde ise hem doğal hem de modifiye edilmiş boşluk yapısına sahip kompozitlerde dayanım oranı arttıkça çatlak genişliğinin arttığı görülmektedir (Şekil 3.33). Korelasyon katsayıları

ise doğal boşluk yapısına sahip kompozitler için R=0,53 (Şekil 3.33a), boşluk yapısı modifiye edilmiş kompozitler için R=0,65 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.33b).



(a) (b)

Şekil 3.32 KK serisi dayanım oranı ile çatlak sayısı ilişkisi



(a) (b)

Şekil 3.33 KK serisi dayanım oranı ile çatlak genişliği ilişkisi

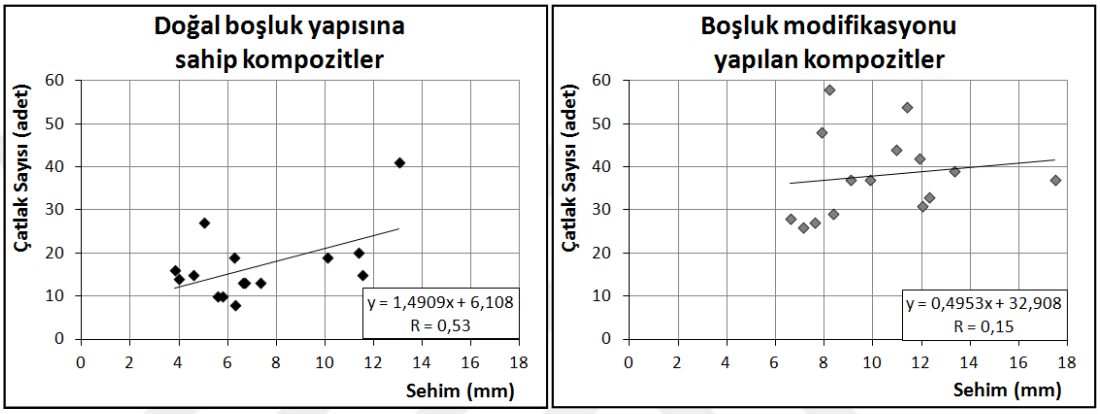
3.3.5 Çatlak Sayısı ve Genişliğinin Sehim Kapasitesine Etkisinin Değerlendirilmesi

Çatlak sayısı ve genişliğinin kompozitlerin sehim kapasitesine etkisi sırasıyla Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'de verilmiştir.

Çatlak sayısı-sehim ilişkisi incelendiğinde, kompozitlerin sehim kapasitesinin çatlak sayısı ile arttığı görülmektedir (Şekil 3.34). Ancak, bu artış doğal boşluk

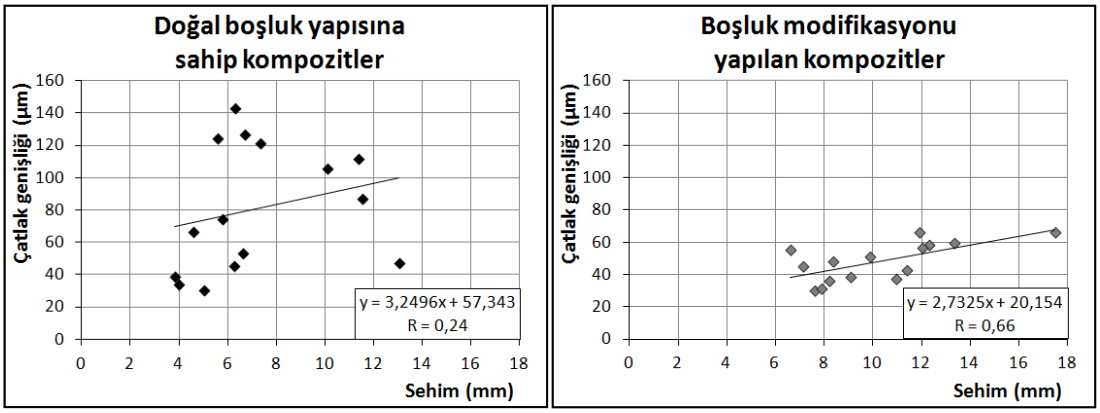
yapısına sahip kompozitlerde daha belirgin olarak gözlenmiş ve R=0,53 olarak bulunmuştur (Şekil 3.34a).

Çatlak genişlikleri ile sehim kapasiteleri incelendiğinde de çatlak genişliği arttıkça sehim kapasitelerinin arttığı görülmüştür (Şekil 3.35). Ancak, bu artış çatlak sayısındaki durumun aksine boşluk yapısı modifiye edilmiş kompozitlerde daha belirgin olarak gözlemlenmiş ve R=0,66 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.35b).



(a) (b)

Şekil 3.34 KK serisi çatlak sayısı ile sehim ilişkisi



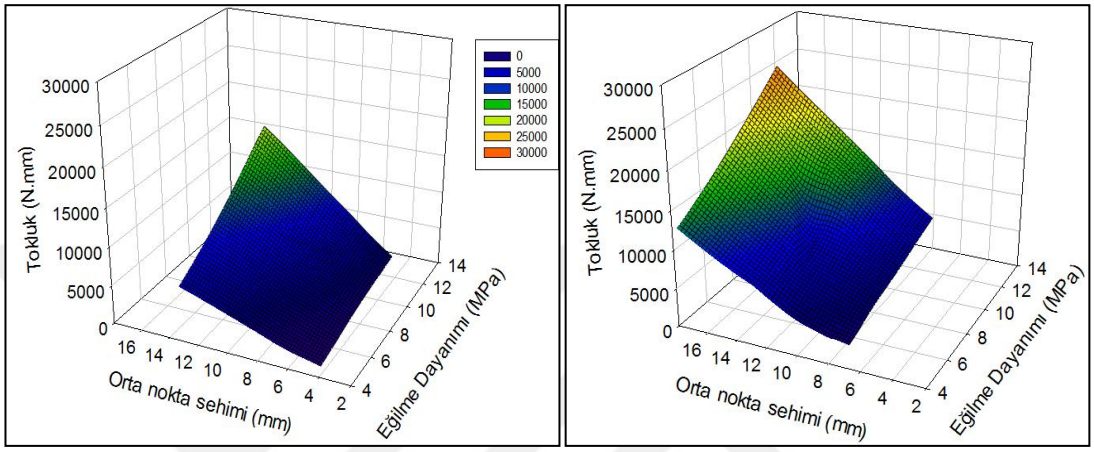
(a) (b)

Şekil 3.35 KK serisi çatlak genişliği ile sehim ilişkisi

3.3.6 Tokluk Değerlerinin İncelenmesi ve Tokluk Korelasyonları

Kompozitlerin tokluk değerleri, eğilme dayanımları ve sehim kapasiteleri dikkate alınarak incelenmiş ve Şekil 3.36'da sunulmuştur. Kompozitlerin eğilme dayanımları

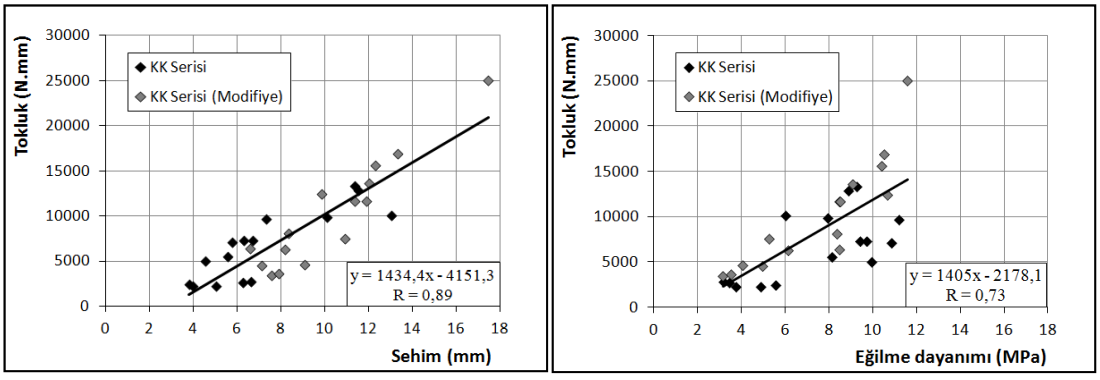
ve sehim kapasiteleri arttıkça tokluk değerlerinin de arttığı görülmektedir (Şekil 3.36a). KK serisi kompozitlerinin boşluk yapısının modifiye edildiğinde ise tokluk değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir (Şekil 3.36b). Bu artışın sebebi, KK serisinde plastik tane ilavesiyle çoklu çatlak davranışının geliştirilmesi ve kompozitlerin sehim kapasitelerinin artmasıdır.



(a) (b)

Şekil 3.36 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi

Eğilme dayanımı ve sehim kapasitesinin tokluk üzerine etkisi ayrı ayrı ele alındığında ise hem eğilme dayanımının hem de sehim kapasitesinin kompozitlerin tokluk değerlerine önemli ölçüde etki ettiği tespit edilmiştir. Sehim kapasitesi-tokluk ilişkisi için korelasyon katsayısı R=0,89 (Şekil 3.37a), eğilme dayanımı-tokluk ilişkisi için ise korelasyon katsayısı R=0,73 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.37b).



(a) (b)

Şekil 3.37 Eğilme dayanımı, orta nokta sehimi ve tokluk ilişkisi

3.4 Kompozitlerin Lif Dağılım Katsayılarının İncelenmesi

Kompozitlerin çoklu çatlak ve sehim sertleşmesi davranışını etkileyen bir diğer parametrede liflerin kesit içerisindeki homojen dağılımıdır. Liflerin dağılım özellikleri Bölüm 1.4.2'de anlatılan yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Lif dağılım katsayısı 0-1 arasında değer almakta olup, 0 liflerin tek bir noktada topaklaştığını 1 ise mükemmel bir dağılımı ifade etmektedir (Torigoe ve diğer., 2003). Bu bölümde matris karışım oranlarının lif dağılım özelliklerine etkisi incelenecek ve lif dağılım katsayıları ile kompozitlerin mekanik performansları arasındaki ilişkiler sunulacaktır.

3.4.1 S/Ç ve TM/Ç Oranının Lif Dağılım Katsayısına Etkisi

Kompozitlerin lif dağılım katsayılarının değişimi, her kompozit için kendi S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak üç boyutlu grafikler halinde Şekil 3.38'de sunulmuştur.

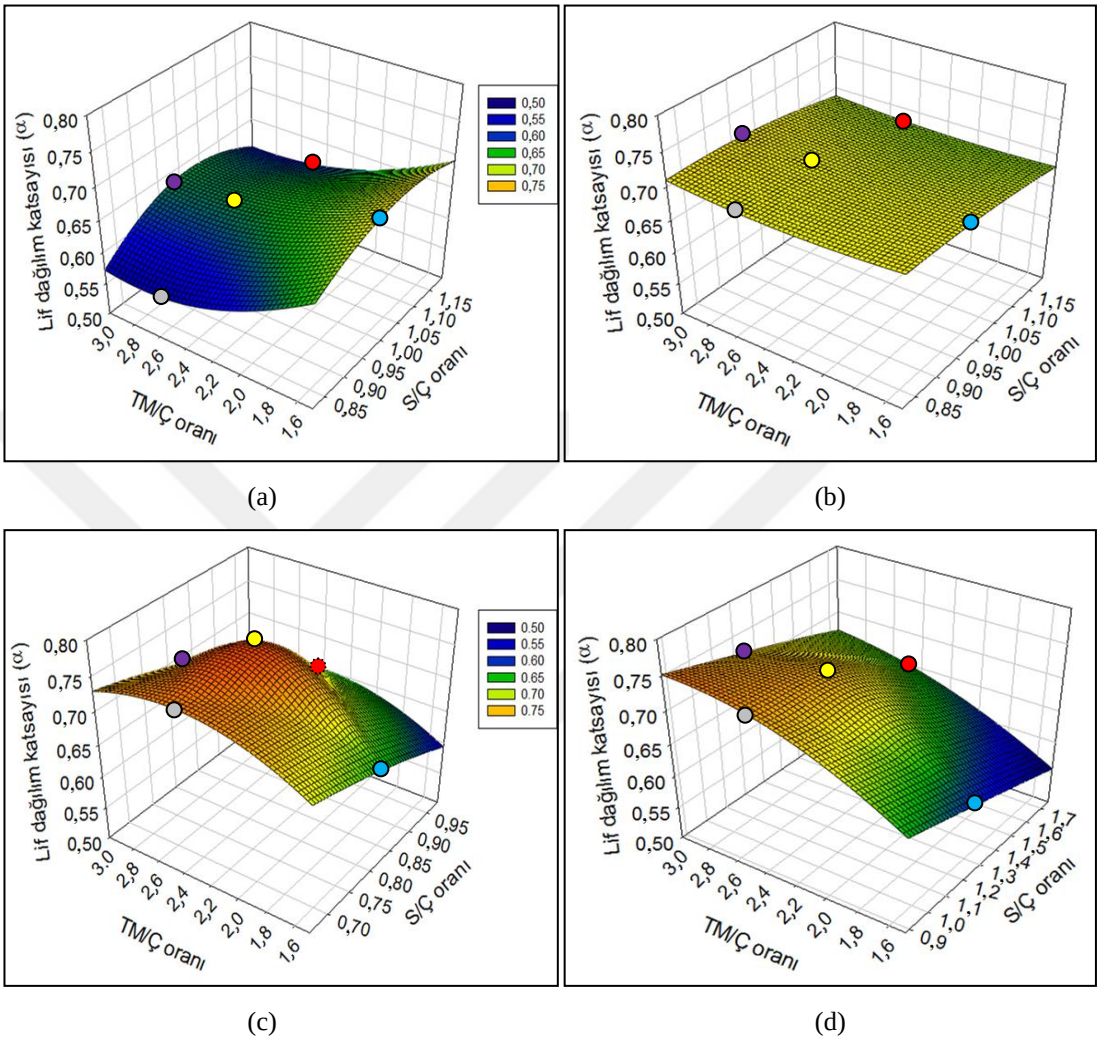
YUK serisi kompozitleri dikkate incelendiğinde genel olarak lif dağılım katsayılarının düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3.38a). Sabit TM/Ç oranında S/Ç oranının değiştirilmesi lif dağılım katsayısını merkez matrise göre olumsuz yönde etkilemiştir. Ancak, sabit S/Ç oranında TM/Ç oranının artması ile lif dağılım katsayısının iyileştiği görülmektedir (Şekil 3.38a).

TUK serisi kompozitlerinde ise S/Ç ve TM/Ç oranı değişimi ile kompozitlerin lif dağılım katsayılarında belirgin bir değişiklik görülmemiştir (Şekil 3.38b).

YFC'li kompozitlerde en iyi lif dağılım katsayısı merkez matriste elde edilmiştir (Şekil 3.38c). Artan S/Ç ve azalan TM/Ç oranı ile birlikte lif dağılım katsayılarının azaldığı görülmektedir. Tam tersi durumda ise (azalan S/Ç ve artan TM/Ç oranı) lif dağılım katsayılarının yükselme eğiliminde olduğu söylenebilir (Şekil 3.38c).

KK serisi kompozitlerinde de YFC kompozitlerine benzer bir davranış görülmektedir. Artan S/Ç ve azalan TM/Ç oranı ile lif dağılım katsayıları azalırken,

azalan S/Ç ve artan TM/Ç oranıyla lif dağılım katsayılarının artmaya başladığı görülmektedir (Şekil 3.38d).



Şekil 3.38 Kompozitlerin lif dağılım katsayılarının S/Ç ve TM/Ç oranları dikkate alınarak incelenmesi a) YUK serisi, b)TUK serisi, c)YFC serisi, d)KK serisi

Liflerin homojen dağılımı açısından en kötü sonuçlar YUK kompozitlerde elde edilmiştir. YUK kompozitlerinin bazılarında lif dağılım katsayısı 0,55'e kadar düşmektedir. TUK kompozitlerinde lif dağılımları S/Ç ve TM/Ç oranı değişiminden fazla etkilenmemiş ve yaklaşık 0,70 seviyelerinde kalmıştır. En iyi lif dağılım katsayıları ise YFC ve KK kompozitlerinde, TM/Ç oranının fazla, S/Ç oranının az olduğu matrislerde elde edilmiştir. Deneysel çalışmaların döküm aşamasında bu matrislerin diğer matrislere kıyasla daha kohezif ve viskoz olduğu görülmüştür. Bu

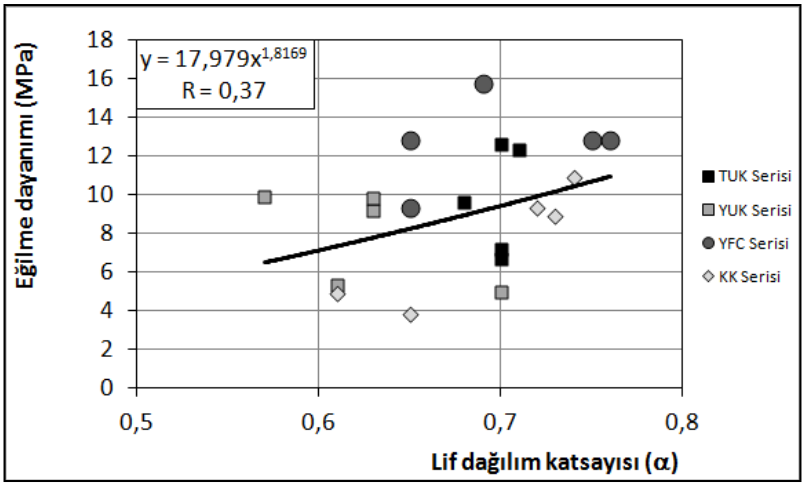
durumda, matristeki toz malzeme konsantrasyonu arttıkça göreceli olarak daha viskoz davranış gösteren matrislerin lifleri homojen dağıtabilme yeteneklerinin daha fazla olduğu sonucu çıkartılabilir.

3.4.2 Lif Dağılım Katsayılarının Mekanik Performansa Etkisi

3.4.2.1 Lif Dağılım Katsayısı-Eğilme Dayanımı İlişkisi

Kompozitlerin lif dağılım katsayısı-eğilme dayanımı ilişkisi Şekil 3.39'da verilmiştir. Lif dağılım katsayısı ile eğilme dayanımı arasında pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiş ve korelasyon katsayısı R=0,37 olarak elde hesaplanmıştır.

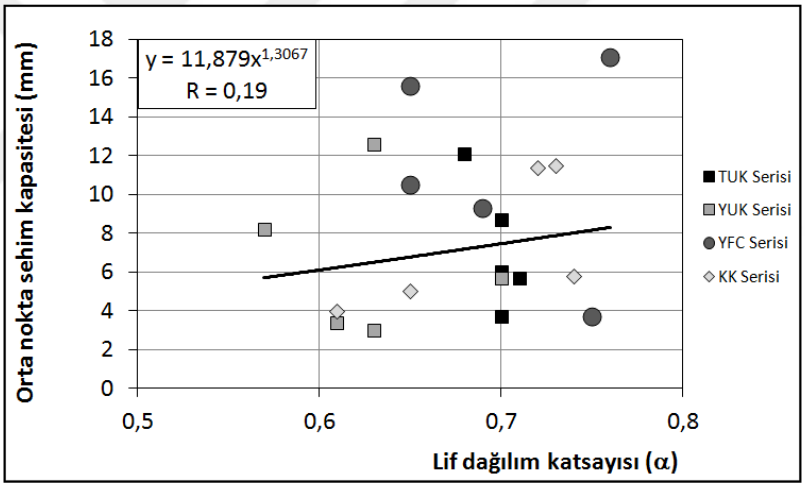
Lif dağılım katsayısı genel olarak daha yüksek olan TUK ve YFC serilerine ait kompozitlerin eğilme dayanımlarının da daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3.39). YUK serisi kompozitlerinin lif dağılım katsayısılarının genel olarak daha düşük olması eğilme dayanımlarını da sınırlandırmıştır (Şekil 3.39). KK serisinde ise göreceli olarak daha yüksek S/Ç oranı kullanılması liflerin sıyrılmasını kolaylaştırdığı için eğilme dayanımlarının YUK seviyelerinde kaldığı düşünülmektedir.



Şekil 3.39 Lif dağılım katsayısı-eğilme dayanımı ilişkisi

3.4.2.2 Lif Dağılım Katsayısı – Sehim Kapasitesi İlişkisi

Kompozitlerin lif dağılım katsayısı-sehim kapasitesi ilişkisi Şekil 3.40'da verilmiştir. Lif dağılım katsayısı ile sehim kapasitesi arasında da pozitif bir ilişki olduğu görülmüştür. Sehim kapasitesi-lif dağılım oranı ilişkisinin korelasyon katsayısı eğilme dayanımına kıyasla azalmış ve R=0,19 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.40). Ancak, sehim değerleri ve dağılım katsayıları dikkate alındığında yüksek lif dağılım oranlarında düşük sehim kapasitesi değerleri (örn: YFC serisi), düşük lif dağılım katsayılarında da yüksek sehim kapasitesi değerlerinin (örn: YUK serisi) elde edilebileceği de görülmüştür (Şekil 3.40). Bu durumun, kullanılan matris özelliklerine bağlı olarak, lif-matris aderans özelliklerinin değişiklik göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

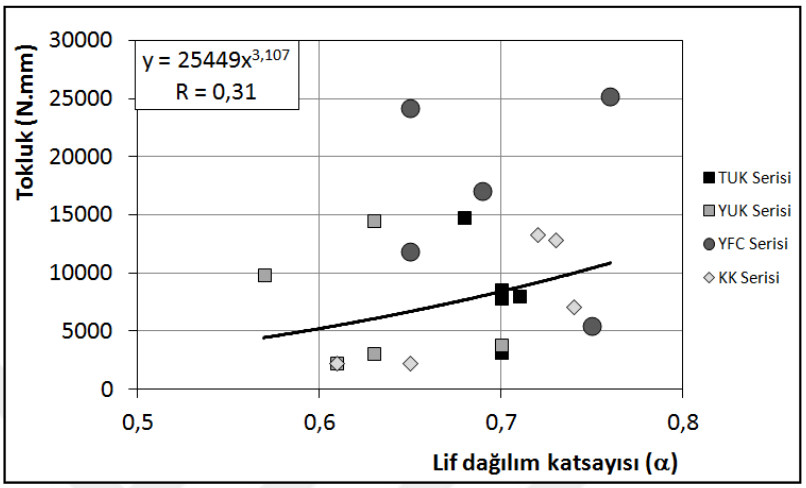


Şekil 3.40 Lif dağılım katsayısı-sehim kapasitesi ilişkisi

3.4.2.3 Lif Dağılım Katsayısı – Tokluk İlişkisi

Lif dağılım katsayısı ile tokluk değerleri arasındaki ilişki Şekil 3.41'da sunulmuştur. Lif dağılım katsayısı ile tokluk değerleri arasında pozitif bir ilişki olduğu ve artan lif dağılım katsayısı ile tokluk değerlerinin de göreceli olarak arttığı görülmüştür. Korelasyon katsayısı R=0,31 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, en yüksek tokluk değerlerinin YFC kompozitlerinden elde edildiği, ancak göreceli olarak düşük lif dağılım katsayısılarında da yüksek tokluk değerlerinin elde edilebileceği

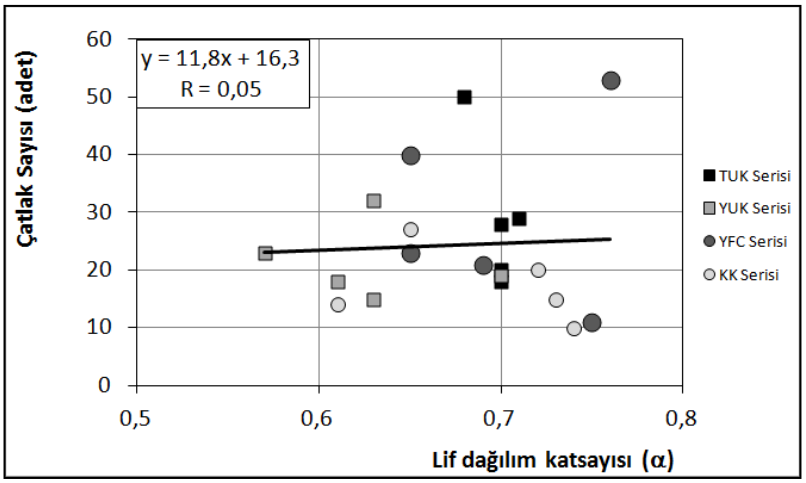
gözlemlenmiştir (Şekil 3.41). Bazı kompozitlerde güçlü lif-matris aderansı sebebiyle eğilme dayanımının diğer kompozitlere kıyasla yüksek olması, düşük sehim kapasitelerinde dahi tokluk değerlerinin artmasını sağlayabilmektedir.



Şekil 3.41 Lif dağılım katsayısı-tokluk ilişkisi

3.4.2.4 Lif Dağılım Katsayısı – Çatlak Sayısı İlişkisi

Lif dağılım katsayılarının çatlak sayısına etkisi Şekil 3.42'de verilmiştir. Ancak, lif dağılım katsyıları ile çatlak sayısı arasında belirgin bir ilişki tespit edilememiştir. Çatlak oluşumunu etkileyen en önemli iki faktör matrisin kırılma tokluğu ve lif-matris aderans özellikleridir. Homojen bir lif dağılımı elde edilse dahi, lif-matris aderansının daha zayıf olduğu zayıf matrislerde liflerin kolayca sıyrılması, ya da lif-matris aderansının yüksek olduğu güçlü matrislerde matrisin çatlama direncinin yüksek olması sebebiyle Şekil 3.42'deki ilişkinin elde edildiği düşünülmektedir.



Şekil 3.42 Lif dağılım katsayısı-çatlak sayısı ilişkisi

BÖLÜM DÖRT
SONUÇLAR

Elde edilen deneysel bulgular değerlendirildiğinde, kompozit üretiminde kullanılan mineral katkı türünün kompozit performansını doğrudan etkilediği görülmüştür. Kullanılan mineral katkı türüne bağlı olarak, mekanik açıdan uyumlu bir lif-matris aderansının sağlanabileceği S/Ç ve TM/Ç oranları da değişiklik göstermektedir.

Kompozitlerin taze hal performansları, akma süreleri, işlenebilirlik için gerekli katkı ihtiyaçları ve lif topaklaşma problemleri açısından tüm seriler dikkate alınarak Tablo 4.1'de özetlenmiştir.

Tüm serilerin taze haldeki işlenebilirlik ve lif topaklaşma özellikleri dikkate alındığında en kötü performansı veren serinin YUK serisi olduğu tespit edilmiştir. YUK serisinde kullanılan külün delikli, pürüzlü, köşeli ve büyük tane boyutlu yapısı sebebiyle katkı ve su absorbe ettiği belirlenmiştir. Bu durum, YUK serisi matrislerinde uygun işlenebilirlik özelliğinin sağlanması için gereken süperakışkanlaştırıcı katkı miktarını önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca, YUK serilerinde lifler yoğun olarak topaklaşmış ve topaklaşma sorunu yapılan müdahalelerle çözülememiştir.

TUK serisinde kullanılan külün morfolojik özelliklerinin YUK'a kıyasla daha iyi olması, TUK matrislerinin taze haldeki işlenebilirlik özelliklerini olumlu yönde etkilemiş ve ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı katkı dozajının YUK serisine kıyasla azaltmıştır. TUK serisinde de liflerin topaklaşması açısından problemlerin olduğu tespit edilmiştir. Ancak, yapılan ek işlemlerle TUK serisindeki topaklaşma sorunu %66 oranında çözülmüştür (Tablo 4.1).

Taze hal performansları açısından en olumlu sonuçlar YFC ve KK serilerinden elde edilmiştir. YFC serisinde, cürufun katkı adsorbe edebilme yeteneği matrise ilave edilen süperakışkanlaştırıcı katkının daha efektif kullanılmasını sağlayarak, matrisin

süperakışkanlaştırıcı katkı ihtiyacını azaltmış ve işlenebilirlik özelliklerini geliştirmiştir. YFC serisinde seyrek bir lif topaklaşması olduğu belirlenmiş ve yapılan müdahalelerle tüm karışımlarda lif topaklaşma sorunu çözülmüştür.

KK serileri ise hem işlenebilirlik, hem uygun işlenebilirliğin sağlanması için gereken katkı ihtiyacı hem de lif topaklaşması açısından en olumlu sonuçları sağlamıştır (Tablo 4.1). KK matrislerinde, kalsine kaolinin çok ince yapısı sebebiyle, su içeriği diğer mineral katkılı serilere göre oldukça fazladır. Ayrıca, KK'nın tane çapının oldukça küçük olması nedeniyle daha kohezif bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Böylece, KK kullanımı matrislerin hem akış hem de lifleri dağıtma performansı önemli ölçüde geliştirmiş ve lif topaklanma sorununu çözmüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Kompozitlerin taze hal performanlarının kıyaslanması

		YUK serisi	**TUK serisi**	**YFC serisi**	**KK serisi**
İşlenebilirlik için gerekli katkı ihtiyacı	Katkı	Çok fazla	YUK'a göre az katkı	Az katkı	En az katkı
	İşlenebilirlik	Kötü	Orta seviye	İyi	Çok iyi
Akma süresi		Fazla	YUK'a kıyasla az	Az	En az
Topaklaşma problemi*	İlk topaklaşma kontrolü	Yoğun topaklaşma %100	YUK'a göre az ancak yoğun topaklaşma %100	Seyrek topaklaşma %83	Yok denecek kadar az %17
	Ek karıştırma sonrası	Yoğun topaklaşma %100	Topaklaşmada açılma eğilimi %50	Topaklaşmada azalma %17	Belirgin bir etki yok %17
	Plastik tane ilavesi	Yoğun topaklaşma %100	Topaklaşmada açılma eğilimi %33	Topaklaşma sorunu çözüldü %0	Topaklaşma sorunu çözüldü %0
	Çözülemeyen durum	%100	%33	%0	%0

*%0-Topaklaşma sorununun çözüldüğünü, %100 Yoğun topaklaşma problemi olduğunu ifade etmektedir.

Kompozitlerin mekanik performanslarını kıyaslamak amacıyla, her serinin kendi içerisindeki eğilme dayanımlarının, sehim ve tokluk kapasiteleri, çatlak sayıları ve genişliklerinin ortalamaları alınarak Tablo 4.2'de sunulmuştur. YUK serisi eğilme

dayanımı, sehim kapasitesi ve tokluk açısından en olumsuz sonuçları verirken, aynı kriterler dikkate alındığında YFC serisi en olumlu sonuçları vermiştir.

YUK serisinde ortalama 7,3 MPa eğilme dayanımı, 5,9 mm sehim kapasitesi ve 5320 N.mm tokluk değeri elde edilmiştir. Bu değerler TUK serisinde bir miktar yükselme göstermiş ve sırasıyla 9,6 MPa, 8,3 mm ve 9430 N.mm olarak hesaplanmıştır. YFC serisinde ise eğilme dayanımı 12,5 MPa, sehim kapasitesi 10,3 ve tokluk değeri de 15043 N.mm olarak tespit edilmiştir. YFC serisi örneklerinde YUK serisine kıyasla eğilme dayanımı ve sehim kapasitesi açısından 2 kat, tokluk kapasitesi açısından ise 3 kat performans artışı olduğu görülmektedir. YFC serisinde eğilme dayanımı 12,5 MPa, sehim kapasitesi 10,3 mm ve tokluk değeri ise 15043 N.mm olarak bulunmuştur. Ancak her üç seride de yapılan boşluk modifikasyonu ile %10-20 arasında bir performans kaybı yaşanmaktadır. KK serilerinde ise eğilme dayanımı açısından YUK serisine yakın sonuçlar elde edilmiş, ancak sehim ve tokluk kapasitesi açısından KK serisinin daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir (Tablo 4.2).

Yapılan boşluk modifikasyonun YUK ve TUK serilerinde çatlak sayısı açısından belirgin bir etkisi yokken, YFC ve KK serilerinde sırasıyla %43 ve %123 oranında artış meydana gelmiştir. Özellikle KK serisinde gerçekleşen bu belirgin çatlak artışı, sehim kapasitesi ve tokluk değerlerini yaklaşık %30-50 oranında arttırmış ve YFC serisinden sonraki en olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 4.2).

Yapılan araştırmalarda, çatlak genişliğinin 100 μm seviyelerde sınırlandırıldığı kompozitlerde, çatlamamış beton ile aynı seviyede geçirimsizlik özelliklerinin elde edileceği tespit edilmiştir (Boshoff, 2014). Tez kapsamında incelenen kompozitlerde çatlak genişlikleri genellikle 100 μm nin altında bulunmuştur. Ayrıca, yapılan boşluk modifikasyonu ile çatlak genişliklerinin belirgin bir şekilde azalmalar gözlenmiştir. Özellikle bazı KK serilerinde 140 μm mertebesinde ölçülen çatlak genişlikleri, plastik tane ilavesiyle 40 μm mertebelerine düşmüştür (Tablo 4.2).

Plastik tane ilavesiyle KK serisi kompozitlerinin çatlama direnci düşürülmüş ve daha çok çatlak oluşması sağlanarak kompozit bünyesindeki liflerden daha çok yararlanılmıştır. Özellikle güçlü matrislerde %100 oranında performans artışı gözlenmiştir. ECC tasarımında uygun bir lif-matris aderansının elde edilmesiyle, kompozit bünyesindeki kusurlar performans açısından bir avantaja dönüşebilmektedir. Ayrıca, çatlak genişliklerinde meydana gelen azalma ile durabilite özelliklerinin de büyük ölçüde geliştirilebileceğini söylemek mümkündür. Bu durum, bünyesindeki kusurlu yapıyı tolere edebilecek ve performans açısından avantaja dönüştürebilecek düktil davranış sergileyen kompozitlerin üretilebileceğini ispatlamaktadır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2 Kompozitlerin mekanik performanslarının kıyaslanması

Mekanik Özellikler		**YUK serisi**	**TUK serisi**	**YFC serisi**	**KK serisi**
Eğilme dayanımı (MPa)	Doğal boşluk yapısı	7,3	9,6	12,5	7,5
	Modifiye boşluk yapısı	6,6	9,0	11,7	7,5
Sehim kapasitesi (mm)	Doğal boşluk yapısı	5,9	8,3	10,3	7,21
	Modifiye boşluk yapısı	5,1	7,1	9,8	10,2
Tokluk (N.mm)	Doğal boşluk yapısı	5320	9430	15043	6693
	Modifiye boşluk yapısı	4238	7264	13387	10100
Çatlak sayısı (adet)	Doğal boşluk yapısı	18	30	30	17
	Modifiye boşluk yapısı	20	30	43	38
Çatlak genişliği (adet)	Doğal boşluk yapısı	46	51	59	81
	Modifiye boşluk yapısı	32	37	41	48

Üretilen kompozitlerin lif dağılm katsayıları en düşük, en yüksek ve ortalama değerler olarak Tablo 4.3'te verilmiştir. İncelenen örnekler arasında en düşük lif dağılım katsayısı 0,57 ile YUK serisinde bulunmuştur. En yüksek lif dağılım

katsayısı ise 0,76 ile YFC serisinden elde edilmiştir. Ancak, genel olarak bakıldığında, YUK serisi hariç tüm serilerde lif dağılım katsayılarının ortalama 0,70 civarında olduğu tespit edilmiştir.

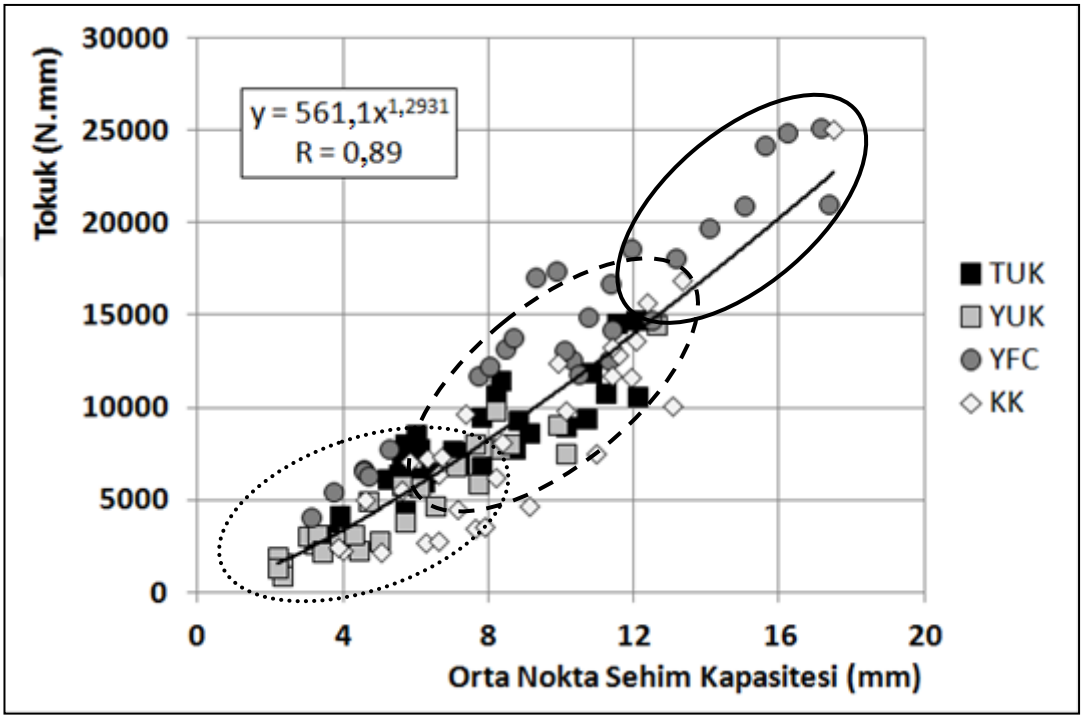
Tablo 4.3 Kompozitlerin lif dağılım katsayılarının kıyaslanması

	YUK Serisi	TUK Serisi	YFC Serisi	KK Serisi
En düşük lif dağılım katsayısı	0,57	0,68	0,65	0,61
Ortalama Lif dağılım katsayısı	0,63	0,70	0,70	0,69
En yüksek lif dağılım katsayısı	0,70	0,71	0,76	0,74

Kompozitlerin lif dağılım katsayıları ile mekanik performansları ilişkilendirildiğinde, lif dağılım katsayısının mekanik performansı belirlemede tek başına yeterli olamadığı görülmüştür. Ancak mekanik açıdan uyumlu bir lif-matris kombinasyonu sağlandığında, lif dağılım katsayısının kompozitin mekanik performansını arttırmada etkili olacağı söylenebilir.

Kompozitlerin sehim kapasitesi ve tokluk değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.1'de verilmiştir. Kıyaslamaların daha anlaşılır olabilmesi için göreceli olarak orta performans veren kompozitler noktalı elips, iyi seviyede performans veren kompozitler kesikli çizgili ve en iyi sonucu veren kompozitler de sürekli çizgili elipsler kullanılarak şekil üzerinde belirtilmiştir. Genel olarak bakıldığında sehim kapasitesi ile tokluk değeri arasında pozitif ve güçlü bir ilişkinin bulunduğu tespit edilmiştir (R=0,89). Ayrıca, tüm serilerde orta ve iyi seviyede performans veren kompozitlerin bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum, uygun bir lif-matris aderansının sağlanması ile farklı mineral katkı türlerinde benzer performansların elde edilebileceğinin bir ispatıdır. Diğer taraftan, Şekil 4.1 dikkatle incelendiğinde, tokluk ve sehim kapasitesi açısından en iyi performansların YFC ve KK serilerinden elde edildiği görülmektedir. YFC ve KK serilerinin işlenebilirlik ve mekanik performans (akma süresi, katkı ihtiyacı ve lif topaklaşması) açısından en olumlu sonuçları

vermesi ve lif dağılım katsayıları açısından en yüksek değerlerin yine bu serilerde elde edilmesi (0,76 ve 0,74) tokluk ve sehim kapasitelerinin doğrudan artmasını sağlamıştır. Bu durumda hem uygun bir lif-matris kombinasyonunun hem de homojen bir lif dağılımının elde edilmesiyle oldukça yüksek sehim kapasitesine ve tokluğa sahip kompozitlerin üretilmesi mümkündür.



Şekil 4.1 Kompozitlerin sehim kapasitesi-tokluk ilişkileri

KAYNAKLAR

ACI committee 544. (1982). State of the art report on fiber reinforced concrete. *Concrete International*, 9-30.

Alexander, M., Bertron, A. ve De Belie, N. (Eds.) (2013). *Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments*. Springer.

Akyüz Ö. F. (1999). *Plastikler ve plastik enjeksiyon teknolojisine giriş*. PAGEV Yayınları, İstanbul.

Altwair, N. M., Johari, M. M. ve Hashim, S. S. (2012). Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials, 37,* 518-525.

ASTM C 618. (2003). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. American Society of Testing and Materials, Amerika.

ASTM C 311. (1996). *Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete*. American Society of Testing and Materials, Amerika.

Aveston, J. ve Kelly, A. (1973). Theory of multiple fracture of fibrous composites. *Journal of Materials Science*, *8*(3), 352-362.

Badogiannis, E., Aggeli, E., Papadakis, V. G. ve Tsivilis, S. (2015). Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion, binding model and of the k-value concept. *Cement and Concrete Composites*, *63*, 1-7.

Bang, J. W., Prabhu, G. G., Jang, Y. I. ve Kim, Y. Y. (2015). Development of ecoefficient engineered cementitious composites using supplementary cementitious materials as a binder and bottom ash aggregate as fine aggregate. *International Journal of Polymer Science, 2015,* 1-12.

Bayasi, M. Z. ve Soroushian, P. (1992). Effect of steel fiber reinforcement on fresh mix properties of concrete. *ACI Materials Journal*, *89*(4), 369-374.

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

Boshoff, W. P. (2014). Cracking behavior of strain-hardening cement-based composites subjected to sustained tensile loading. *ACI Materials Journal*, *111*(5).

Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures, 86*(1), 3-9.

Brown, I. W. M., MacKenzie, K. J. D., Meinhold, R. H. ve Bowden, M. E. (1985). Outstanding problems in the kaolinite-mullite reaction sequence ınvestigated by 29Si and 27Al solid-state nuclear magnetic resonance: I, Metakaolinite. *Journal of the American Ceramic Society*, *68*(6), 293-297.

Bulens, M., Léonard, A. ve Delmon, B. (1978). Spectroscopic ınvestigations of the kaolinite-mullite reaction sequence. *Journal of the American Ceramic Society, 61*(1-2), 81-84.

Celep, G. ve Dayık, M. (2009). İçi boş iplikler ve üretim yöntemleri. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3*(2), 50-57.

Chakraborty, A. K. ve Ghosh, D. K. (1978). Reexamination of the kaolinite to mullite reaction series. *Journal of the American Ceramic Society, 61*(3-4), 170-173.

Chan, Y. W. ve Li, V. C. (1997). Effects of transition zone densification on fiber/cement paste bond strength improvement. *Advanced Cement Based Materials, 5*(1), 8-17.

Chen, Z., Yang, Y. ve Yao, Y. (2013). Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag. *Materials and Design, 44*, 500-508.

Chermant, J. L., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A. S. ve Redon, C. (2001). Some fields of applications of automatic image analysis in civil engineering. *Cement and Concrete Composites, 23*(2), 157-169.

De Bock L.A., Van Malderen H. ve Van Grieken R.E. (1994). Individual aerosol particle composition variations in air masses crossing the North Sea, *Environmental Science and Technology, 28*, 1513-1520.

De Lhoneux, B., Kalbskopf, R., Kim, P., Li, V., Lin, Z., Vidts, D. ve diğer. (2002). Development of high tenacity polypropylene fibres for cementitious composites. In *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)-Application and Evaluation*. October, 2246-2264.

Del Monte, M. ve Sabbioni, C. (1984). Morphology and mineralogy of fly ash from a coal-fueled power plant. *Meteorology and Atmospheric Physics, 35*(1), 93-104.

Dubey, A. ve Banthia, N. (1998). Influence of high-reactivity metakaolin and silica fume on the flexural toughness of high-performance steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal, 95*(3), 284-292.

Ekşi, O. (2007). *Plastik esaslı malzemelerin ısıl şekil verme özelliklerinin incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.

Erdoğan S. T. ve Erdoğan, T. Y. (2007). *Bağlayıcı malzemeler ve betonun on bin yıllık tarihi*, ODTÜ yayıncılık, Ankara.

Erturan, S. ve Deniz, S., 2009. *Polimer mühendisliği esasları ders notları*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.

Felekoğlu, B. (2006). Utilisation of Turkish fly ashes in cost effective HVFA concrete production. *Fuel, 85*(12), 1944-1949.

Felekoğlu, B., Tosun, K. ve Baradan, B. (2009). Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites. *Cement and Concrete Research, 39*(11), 1023-1032.

Felekoğlu, B., Tosun-Felekoğlu, K. ve Gödek, E. (2015). A novel method for the determination of polymeric micro-fiber distribution of cementitious composites exhibiting multiple cracking behavior under tensile loading. *Construction and Building Materials, 86*, 85-94.

Felekoğlu, B., Tosun-Felekoğlu, 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.

Ferrara, L. ve Meda, A. (2006). Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Materials and Structures, 39*(4), 411-420.

Fischer, G. ve Li, V. C. (2002). Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced Engineered Cementitious Composites (ECC). *ACI Structural Journal, 99*(1), 104-111.

Fisher, G. L., Prentice, B. A., Silberman, D., Ondov, J. M., Biermann, A. H., Ragaini, R. C. ve diğer. (1978). Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash. *Environmental Science and Technology, 12*(4), 447-451.

Frosch, R. J. (1999). Another look at cracking and crack control in reinforced concrete. *ACI Structural Journal, 96*, 437-442.

Gambhir, M. L. (2013). *Concrete technology: Theory and practice*. Tata McGraw-Hill Education.

Gödek, E., Keskinateş, M., Felekoğlu, K. T. ve Felekoğlu, B. (2015). Metakaolin katkılı lifli kompozitlerin çoklu çatlak davranışını geliştirmeye yönelik deneysel çalışmalar. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5*(1), 54-63.

Harris, B., Morley, J. ve Phillips, D. C. (1975). Fracture mechanisms in glass-reinforced plastics. *Journal of Materials Science, 10*(12), 2050-2061.

Herbert, E. N. ve Li, V. C. (2012). Self-healing of Engineered Cementitious Composites in the natural environment. In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, 155-162. Springer Netherlands.

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.

Ikai, S., Reichert, J. R., Vasconcellos, A. R. ve Zampieri, V. A. (2006). Asbestos-free technology with new high tenacity PP–polypropylene fibers in air-cured Hatschek process. In *10th International Inorganic-bonded Fiber Composites Conference.*

Johnston, C. D. ve Skarendahl, Å. (1992). Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes acoording to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters. *Materials and Structures*, *25*(4), 191-200.

Jones, F. R. (1996). Interphase formation and control in fibre composite materials. *Key Engineering Materials, 116*, 41-60.

Kanda, T. (1998). *Design of Engineered Cementitious Composites for ductile seismic resistant elements.* Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, Amerika.

Kanda, T., Lin, Z. ve Li, V.C. (2000). Tensile stress-strain modeling of pseudostrain hardening cementitious composites. *Journal of Materials in Civil Engineering, 12*(2), 147-156.

Kang, S. T. ve Kim, J. K. (2011). The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC). *Cement and Concrete Research, 41*(10), 1001-1014.

Kang, S. T. ve Kim, J. K. (2012). Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution. *Construction and Building Materials*, *28*(1), 57-65.

Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J. K. ve Kim, Y. Y. (2011). The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials, 25*(5), 2450-2457.

Katz, A. ve Li, V. C. (1994). Bond properties of micro-fibers in cementitious matrix. In *MRS Proceedings*, 370, (529). Cambridge University Press.

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

Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J. ve Kim, Y. Y. (2007). Tensile and fiber dispersion performance of ECC (Engineered Cementitious Composites) produced with ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research, 37*(7), 1096-1105.

Kozanoğlu G. S. (2006). *Elektrospinning yöntemiyle nanolif üretim teknolojisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kutchko, B. G. ve Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM–EDS. *Fuel, 85*(17), 2537-2544.

Lambert, J. F., Millman, W. S. ve Fripiat, J. J. (1989). Revisiting kaolinite dehydroxylation: A silicon-29 and aluminum-27 MAS NMR study. *Journal of the American Chemical Society*, *111*(10), 3517-3522.

Lee, B. Y., Cho, C. G., Lim, H. J., Song, J. K., Yang, K. H. ve Li, V. C. (2012). Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar–a feasibility study. *Construction and Building Materials*, *37*, 15-20.

Lee, B. Y., Kim, T. ve Kim, Y. Y. (2010). Fluorescence characteristic analysis for discriminating fibers in cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology, 8*(3), 337-344.

Lee, B. Y., Kim, J. K., Kim, J. S. ve Kim, Y. Y. (2009). Quantitative evaluation technique of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber dispersion in engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites, 31*(6), 408-417.

Lepech, M. D., Li, V. C., Robertson, R. E. ve Keoleian, G. A. (2008). Design of green Engineered Cementitious Composites for improved sustainability. *ACI Materials Journal, 105*(6), 567-575.

Li, M. ve Li, V. C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of Engineered Cementitious Composites. *Materials and Structures, 46*(3), 405-420.

Li, V. C. (1993). From micromechanics to structural engineering: The design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 10*(2), 37–48.

Li V. C. (1998) Engineered Cementitious Composites (ECC) – tailored composites through micromechanical modeling, Fibre reinforced concrete: Present and the future. In: Banthia N, Mufti A, (eds.), *Canadian Society of Civil Engineers*, (64–97).

Li, V. C. (2003). On Engineered Cementitious Composites (ECC). *Journal of Advanced Concrete Technology, 1*(3), 15-230.

Li, V. C. (2012). Can concrete be bendable? The notoriously brittle building material may yet stretch instead of breaking. *American Scientist, 100*(6), 484-93.

Li, V. C. (2012). Tailoring ECC for special attributes: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *6*(3), 135-144.

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. ve Leung, C. K. (1992). Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. *Journal of Engineering Mechanics, 118*(11), 2246-2264.

Li, V. C. ve Wu, H. C. (1992). Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. *Applied Mechanics Reviews, 45*(8), 390-398.

Li, V. C. ve Stang, H. (1996). Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites. *Journal of Advanced Cement Based Materials, 6*(2), 1–20.

Li, V. C., Mishra, D. K. ve Wu, H. C. (1995). Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures, 28*(10), 586-595.

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., Wang, Y. ve Backer, S. (1990). Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites, 21*(2), 132-140.

Li, V. C., Wang, Y. ve Backer, S. (1991). Fracture energy optimization in synthetic fiber reinforced cementitious composites. In *MRS proceedings, 211,* (p.63), Cambridge University Press.

Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A. ve Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *ACI Materials Journal, 99*(5), 463-472.

Li, V. C., Wu, H. C. ve Chan, Y. W. (1995). Interface property tailoring for pseudo strain-hardening cementitious composites. In *Advanced Technology for Design and Fabrication of Composite Materials and Structures* (261-268). Springer Netherlands.

Li, V. C., Wu, H. C. ve Chan, Y. W. (1996). Effect of plasma treatment of polyethylene fibers on interface and cementitious composite properties. *Journal of the American Ceramic Society*, *79*(3), 700-704.

Li, W., Zhou, X. ve Li, N. (2015). Research on the effect of fly ash content on the tensile properties of PVA-ECC, *Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference (AP3ER 2015)*, Atlantis Press, in Zhuhai, China on June 13-14, 166-172.

Liew, Y. M., Kamarudin, H., Al Bakri, A. M., Luqman, M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C. M. ve diğer. (2012). Processing and characterization of calcined kaolin cement powder. *Construction and Building Materials*, *30*, 794-802.

Lim, I., Jenn, C. C. ve Yin, W. C. (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.

Liu, Q., Spears, D. A. ve Liu, Q. (2001). MAS NMR study of surface-modified calcined kaolin. *Applied Clay Science*, *19*(1), 89-94.

Maalej, M., Hashida, T. ve Li, V. C. (1995). Effect of fiber volume fraction on the off-crack-plane fracture energy in strain-hardening Engineered Cementitious Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, *78*(12), 3369-3375.

MacDonald, J. L. (2010). *A Study of the Chemical Interactions at the Interface Between Polymeric Powder/fibre and White Cement*. Doktora Tezi, Dalhousie Üniversitesi, Kanada.

Marikunte, S., Aldea, C. ve Shah, S. P. (1997). Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin. *Advanced Cement Based Materials*, *5*(3), 100-108.

Medri, V., Fabbri, S., Dedecek, J., Sobalik, Z., Tvaruzkova, Z., ve Vaccari, A. (2010). Role of the morphology and the dehydroxylation of metakaolins on geopolymerization. *Applied Clay Science*, *50*(4), 538-545.

Mobasher, B. ve Shah, P. (1989). Test parameters for evaluating toughness of glass-fiber reinforced concrete panels. *ACI Materials Journal, 86*(5), 448-458.

Morton, J. ve Groves, G. W. (1974). The cracking of composites consisting of discontinuous ductile fibres in a brittle matrix—effect of fibre orientation. *Journal of Materials Science*, *9*(9), 1436-1445.

Morton, J. ve Groves, G. W. (1976). The effect of metal wires on the fracture of a brittle-matrix composite. *Journal of Materials Science, 11*(4), 617-622.

Naaman, A. E. (2007). Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960. In *Advances in Construction Materials 2007*, 181-202, Springer Berlin Heidelberg.

Naaman, A. E. ve Shah, S. P. (1976). Pull-out mechanism in steel fiber-reinforced concrete. *Journal of the Structural Division*, *102*(8), 1537-1548.

Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. Pearson.

Norton, G. A., Markuszewski, R. ve Shanks, H. R. (1986). Morphological and chemical characterization of iron-rich fly ash fractions. *Environmental Science and Technology*, *20*(4), 409-413.

Özbay, E., Karahan, O., Lachemi, M., Hossain, K. M. A. ve Atiş, C. D. (2012). Investigation of properties of Engineered Cementitious Composites ıncorporating high volumes of fly ash and metakaolin. *ACI Materials Journal, 109*(5), 565-571.

Özbay, E., Karahan, O., Lachemi, M., Hossain, K. M. ve Atiş, C. D. (2013). Dual effectiveness of freezing–thawing and sulfate attack on high-volume slag-incorporated ECC. *Composites Part B: Engineering*, *45*(1), 1384-1390.

Özbay, E., Şahmaran, M., Lachemi, M. ve Yücel, H. E. (2013). Effect of microcracking on frost durability of high-volume-fly-ash-and slag-incorporated engineered cementitious composites. *A Journal of The American Concrete Institute, 110*(3), 259.

Özyurt, N., Mason, T. O. ve Shah, S. P. (2006). Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and Concrete Research, 36*(9), 1653-1660.

Ponikiewski, T., Katzer, J., Bugdol, M. ve Rudzki, M. (2015). X-ray computed tomography harnessed to determine 3D spacing of steel fibres in self compacting concrete (SCC) slabs. *Construction and Building Materials, 74*, 102-108.

Qian, C. X. ve Stroeven, P. (2000). Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research, 30*(1), 63-69.

Ranade, R., Stults, M. D., Lee, B. ve Li, V. C. (2012). Effects of fiber dispersion and flaw size distribution on the composite properties of PVA-ECC. In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6* (pp. 107-114). Springer Netherlands.

Rathod, J. D. ve Patodi, S. C. (2010). Interface tailoring of polyester-type fiber in Engineered Cementitious Composite matrix against pullout. *ACI Materials Journal*, *107*(2), 114-122.

Redon, C., Li, V. C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T. ve Ogawa, A. (2001). Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering, 13*(6), 399-406.

Rocha, J. ve Klinowski, J. (1990). 29Si and 27Al magic-angle-spinning NMR studies of the thermal transformation of kaolinite. *Physics and Chemistry of Minerals, 17*(2), 179-186.

Sanz, J., Madani, A., Serratosa, J. M., Moya, J. S. ve Aza, S. (1988). Aluminum-27 and Silicon-29 magic-angle spinning nuclear magnetic resonance study of the kaolinite-mullite transformation. *Journal of the American Ceramic Society, 71*(10), 418-421.

Schmidt, M. ve Fehling, E. (2005). Ultra high performance concrete: Research, development and application in Europe. *ACI Special Publication, 228*, 51-78.

Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I. ve Mobasher, B. (1988). Toughness-durability of glass fiber reinforced concrete systems. *ACI Materials Journal, 85*(5), 352-360.

Shah, S. P. ve Rangan V. B. (1971). Fiber reinforced concrete properties. *ACI Journal 68 Proceedings,* February, 126-135.

Sherir, M. A., Hossain, K. ve Lachemi, M. (2015). Structural performance of polymer fiber reinforced Engineered Cementitious Composites subjected to static and fatigue flexural loading. *Polymers, 7*(7), 1299-1330.

Soroushian, P. ve Bayasi, Z. (1991). Fiber type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, *88*(2), 129-134.

Stang, H. ve Shah, S. P. (1986). Fracture mechanical ınterpretation of the fiber/matrix debonding process in cementitious composites. In *Fracture Toughness and Fracture Energy of Composites*, 513-523. Elsevier New York.

Şahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M., Ranade, R. ve Li, V. C. (2009). Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of Engineered Cementitious Composites. *ACI Materials Journal, 106*(3), 308-316.

Şahmaran, M., Yıldırım, G., Özbay, E., Ahmed, K. ve Lachemi, M. (2014). Self-healing ability of cementitious composites: Effect of addition of pre-soaked expanded perlite. *Magazine of Concrete Research, 66*(7-8), 409-419.

Tai, R. K. (2015). *Upscaling of Strain-Hardening Cementitious Composites*, Doktora Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda.

Takashima, H., Miyagai, K., Hashida, T. ve Li, V. C. (2001). Design for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber-reinforced cementitious composites manufactured by extrusion molding. In *Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, (115-122).

Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. ve Barr, B. I. (1996). Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete. *Cement and Concrete Research, 26*(1), 63-68.

Tokyay, M. ve Erdoğdu., K. (2009). *Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği yayınları.

Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N. ve Irassar, E. F. (2013). Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, *37*, 319-327.

Tokyay, M. (2013). Betonda UK, GYFC ve SD'nin rolü: Mevcut bilgi birikimi. *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 21-23 Şubat*, 201-238.

Torigoe, S. I., Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T. ve Hamada, T. (2003). Study on evaluation method for PVA fiber distribution in Engineered Cementitious Composite. *Journal of Advanced Concrete Technology, 1*(3), 265-268.

Tosun-Felekoğlu, K. ve Felekoğlu, B. (2013). Effects of fibre hybridization on multiple cracking potential of cement-based composites under flexural loading. *Construction and Building Materials*, *41*, 15-20.

Tosun-Felekoğlu, K., Felekoğlu, B., Ranade, R., Lee, B. Y. ve Li, V. C. (2014). The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC. *Composites Part B: Engineering*, *56*, 536-545.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobali, A. (2009) *Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları.

TS EN 197-1. (2012). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar, bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 445. (2012). *Şerbet ve öngerilmeli tendonlar için deney yöntemleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 480-12. (2008). *Kimyasal katkılar: Beton, harç ve şerbet için deney metotları - Bölüm 12: Alkali muhtevasının tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 781 ISO 758. (1998). *Sanayide kullanılan sıvı kimyasal ürünler - 20°C'da yoğunluk tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 934-2. (2014). *Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 1116 EN ISO 1158. (1999). *Plâstikler: Vinil klorür homopolimerleri ve kopolimerleri - Klor muhtevasinin tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 6365 EN 1262. (2005). *Yüzey aktif maddeler: Çözeltilerin veya dispersiyonların pH değerlerinin tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

Vahapoğlu, V. (2013). Kauçuk türü malzemeler: Sınıflandırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *4*(1), 25-34.

Wan, H., Shui, Z. ve Lin, Z. (2004). Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties. *Cement and Concrete Research, 34*(1), 133-137.

Wang, S. (2005). *Micromechanics based matrix design for Engineered Cementitious Composites.* Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, Amerika.

Wang, S. ve Li, V. C. (2004, April). Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening. In *Proceedings of FRAMCOS, 5*, 1005-1012.

Wang, S. ve Li, V. C. (2007). Engineered Cementitious Composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal-American Concrete Institute, 104*(3), 233-241.

Wang, Y., Backer, S. ve Li, V. C. (1987). An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites. *Journal of Materials Science*, *22*(12), 4281-4291.

Wang, Y., Backer, S. ve Li, V. C. (1988). A special technique for determining the critical length of fibre pull-out from a cement matrix. *Journal of Materials Science Letters*, *7*(8), 842-844.

Wang, Y., Li, V. C. ve Backer, S. (1988). Modelling of fibre pull-out from a cement matrix. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 10*(3), 143-149.

Wang, Y., Li, V. C. ve Backer, S. (1990). Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar. *Cement and Concrete Composites, 12*(1), 29-40.

Wei, S., Mandel, J. A. ve Said, S. (1986). Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites. *ACI Journal*, *83*(4), 597-605.

Wille, K., El-Tawil, S. ve Naaman, A. E. (2014). Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, *48*, 53-66.

Wille, K., Tue, N. V. ve Parra-Montesinos, G. J. (2014). Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. *Materials and Structures*, *47*(11), 1825-1838.

Yang, E. H. (2008). *Designing added functions in Engineered Cementitious Composites*. Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, Amerika.

Yang, E. H., Yang, Y. ve Li, V. C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI Materials Journal*, *104*(6), 620-628.

Yazıcı, Ş., İnan, G. ve Tabak, V. (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, *21*(6), 1250-1253.

Yıldırım, G., Keskin, Ö. K., Keskin, S. B., Şahmaran, M. ve Lachemi, M. (2015). A review of intrinsic self-healing capability of Engineered Cementitious Composites: Recovery of transport and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, *101*, 10-21.

Zhang, J. ve Li, V. C. (2002). Effect of inclination angle on fiber rupture load in fiber reinforced cementitious composites. *Composites Science and Technology*, *62*(6), 775-781.

Zhang, R., Matsumoto, K., Hirata, T., Ishizeki, Y. ve Niwa, J. (2015). Application of PP-ECC in beam–column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements. *Engineering Structures*, *86*, 146-156.

Zhou, J., Qian, S., Beltran, M. G. S., Ye, G., van Breugel, K. ve Li, V. C. (2010). Development of Engineered Cementitious Composites with limestone powder and blast furnace slag. *Materials and Structures*, *43*(6), 803-814.