



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**SÜPER ELASTİK ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIM LİFLERİNİN TASARLANMIŞ
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ve DİNAMİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Ezgi GÜRBÜZ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Savaş ERDEM**

**II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Mingzhong ZHANG
(University College London)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Haziran, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Ezgi GÜRBÜZ tarafından, **Prof. Dr. Savaş ERDEM** danışmanlığında ve **Doç. Dr. Mingzhong ZHANG** eş danışmanlığında hazırlanan ***SÜPER ELASTİK ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIM LİFLERİNİN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ve DİNAMİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ*** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **20/06/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Prof. Dr. Savaş ERDEM	☒ Kabul
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	☐ Ret
	Mekanik Anabilim Dalı	
ÜYE	Prof. Dr. Özlem ÇELİK SOLA	☒ Kabul
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	☐ Ret
	Malzeme Anabilim Dalı	
ÜYE	Prof. Dr. Turhan BİLİR	☒ Kabul
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	☐ Ret
	Malzeme Anabilim Dalı	
ÜYE	Doç. Dr. Zeynep BAŞARAN BUNDUR	☒ Kabul
	Özyeğin Üniversitesi	☐ Ret
	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	
ÜYE	Doç. Dr. Anıl NİŞ	☒ Kabul
	İstanbul Gelişim Üniversitesi	☐ Ret
	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Ezgi GÜRBÜZ

Bu tezi her daim yanımda olan; desteklerini her zaman, her yerde, her koşulda hissettiğim ve varlıklarına şükrettiğim canım aileme ♥ ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

SÜPER ELASTİK ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIM LİFLERİNİN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ve DİNAMİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından kısmen desteklenmiştir. Proje numarası: FBA-2020-34937

TEŞEKKÜR

En büyük teşekkürü beni her zaman destekleyen, 2012 yılından beri vizyonu ile harika bir rehberlik yaparak akademik olarak en iyi şekilde yetişmemde müthiş bir emeği olan çok değerli danışmanım Prof. Dr. Savaş ERDEM'e ediyorum. Onunla çalışmaktan büyük bir mutluluk ve onur duyuyorum.

Eş danışmanım Doç. Dr. Mingzhong ZHANG'a emekleri ve destekleri için çok teşekkür ederim. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na 1059B142100610 başvuru numaralı 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile İngiltere'ye gitmemi sağlayıp, University College London'daki proje danışmanım Doç. Dr. Mingzhong ZHANG ile çalışmalarımı desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Malzeme temini için Nanografi Nano Teknoloji A.Ş.'ne, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasındaki yardımları için İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ile Kimya Mühendisliği'ne, İstanbul Aydın Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'na, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'ndeki araştırmacı Dr. Enver YALÇIN ve Dr. Merve GÜRTEKİN SEDEN'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran 2023

Ezgi GÜRBÜZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xvi
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler	3
2.2. Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	16
2.3. SMA Lif Kullanılmış ECC	32
3. YÖNTEM.....	35
3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	35
3.2. Nano Grafit Kaplı PVA (GPVA) Üretimi	38
3.3. Karışım Özellikleri ve Hazırlanması	40
3.4. Taze ve Sertleşmiş Kompozit Özellikleri	44
3.4.1. Mini yayılma tablası deneyi	44
3.4.2. Ultrases geçiş hızı ölçüm deneyi.....	45
3.4.3. Basınç dayanımı deneyi	46
3.4.4. Üç noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyi	46
3.4.5. Doğrudan çekme dayanımı deneyi.....	48
3.4.6. Kuruma rötresi deneyi.....	49
3.4.7. Çatlak iyileştirme	50
3.4.8. Ağırlık düşürmeli düşük hızlı çarpma deneyi	50

3.5. Üç Boyutlu (3D) Fraktal Çatlak Analizi	51
3.6. Mikro ve Nano Yapısal Karakterizasyon.....	52
3.6.1. Taramalı Elektron Mikroskobu	52
3.6.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu	53
3.6.3. Bilgisayarlı Mikro Tomografi (Mikro CT) analizi.....	54
3.6.4. Statik temas açısı ölçümü.....	55
3.6.5. Optik profilometre analizi	55
4. BULGULAR	57
4.1. PVA ve GPVA Liflerin Hidrofobiklik Dereceleri	57
4.2. İşlenebilirlik	58
4.2.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	58
4.2.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	59
4.3. Ultrasonik Hız Ölçümü.....	60
4.3.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	60
4.3.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	61
4.4. Basınç Dayanımı.....	62
4.4.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	62
4.4.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	65
4.5. Eğilme Performansı	66
4.5.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	66
4.5.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	70
4.6. Doğrudan Çekme Davranışı.....	75
4.6.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	75
4.6.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	77
4.7. Kuruma Rötresi.....	79
4.7.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	79
4.7.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	81
4.8. Ağırlık Düşürmeli Çarpma Analizi.....	83
4.8.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	83
4.8.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	86
4.9. Dijital Görüntü İşleme ve 3D Fraktal Çatlak Analizi	89
4.9.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	90
4.9.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar	93
4.10. Mikroyapısal İncelemeler ve 3D Kırılma Yüzeyi Topoğrafik Analizi.....	95

4.10.1. SEM analizi	95
4.10.2. 3D temassız (non-contact) lazer tarayıcılı profilometre ile kırılma yüzeylerinin analizi	99
5. TARTIŞMA.....	106
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	114
KAYNAKLAR.....	117
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	124
ETİK KURUL İZİN YAZISI	125
KURUM İZNİ YAZILARI.....	126
EKLER	127
ÖZGEÇMİŞ	135



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Eksenel çekme yükleri altında geleneksel beton ile lif ilaveli çimento bağlayıcılı malzemelerin davranışları (Yıldırım, 2016).	4
Şekil 2.2 ECC'nin tipik çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ve çatlak genişliği gelişimi (Şahmaran ve diğ., 2012).	5
Şekil 2.3 Tek eksenli çekme yüklemesine maruz kalan çimento esaslı bir kompozitin tipik tepkisinin şematik görüntüsü (Özkan ve Demir, 2020).	6
Şekil 2.4 ECC'nin eğilme yüklemesi altındaki davranışı (Yang ve Li, 2010).	7
Şekil 2.5 ECC sınıflarının basınç dayanımı ile çekme şekil değiştirme kapasitesi aralıkları (Li, 2019).	9
Şekil 2.6 Çimentolu malzemelerde içsel kendi kendini iyileştirmenin olası nedenlerinin şematik sunumu (Yıldırım ve diğ., 2015).	12
Şekil 2.7 Mihara Köprüsü'nün ECC döşemesi (Li, 2019).	14
Şekil 2.8 Mitaka Barajı ve su aşınmasından kaynaklı hasarı (Li, 2019).	14
Şekil 2.9 ECC'nin Hida Tüneli'nde spreyc uygulaması (Li, 2019).	15
Şekil 2.10 a) Glorio-Tower, b) Nabule Yokohama Tower ve c) Kitahama Tower (Li, 2019).	15
Şekil 2.11 Kompozit ECC panelin yük-deplasman testi (Li, 2019).	16
Şekil 2.12 Şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi ve süper elastiklik özelliği (Sherif ve diğ. 2018).	18
Şekil 2.13 Şekil hafıza döngüsü (Mu ve diğ., 2018).	19
Şekil 2.14 Özel şekil verilmiş SMA örnekleri (Memry Corporation, 2017).	19
Şekil 2.15 SMA'nın kullanım alanları.	21
Şekil 2.16 Nikel-Titanyum alaşım (nitinol) için tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Cladera ve diğ., 2014).	22
Şekil 2.17 Bazı malzemelerin özgül aktivasyon enerjilerinin aktivasyon frekansı ile ilişkisi (Kumar ve Lagoudas, 2008).	23

Şekil 2.18 0.5 mm çapındaki NiTi kablonun 31 °C'deki pseudo elastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Shajil ve diğ., 2013).	23
Şekil 2.19 SMA'nın a) donatı olarak (Abdulridha ve diğ., 2013), b) kablo olarak (Li ve diğ., 2015) ve c) lif olarak (Aslani ve diğ., 2019) kullanım örnekleri.....	26
Şekil 2.20 a) SMA donatı ilaveli ve b) geleneksel donatı ilaveli beton kirişler (Abdulridha ve diğ., 2013).....	27
Şekil 2.21 Farklı şekillerdeki SMA lifler (Kim ve diğ., 2016a).....	30
Şekil 2.22 Farklı lifler ile üretilen çimento esaslı kompozitlerdeki çatlak davranışı (Dehghani ve Aslani, 2020).....	31
Şekil 3.1: 16 mm uzunluğa getirilen Ni-Ti SMA lifler.	36
Şekil 3.2: (a) Polivinil alkol (PVA) liflerin ve (b) Şekil hafızalı alaşım (SMA) liflerin görüntüleri.	37
Şekil 3.3: Ni-Ti SMA'nın Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi.	38
Şekil 3.4 PVA liflerin etanol-epoksi çözeltisi içinde dağıtılması.....	39
Şekil 3.5 PVA liflerin epoksi ile kaplama sonrası kurutulması.....	39
Şekil 3.6 Yüzey kaplama işlemi için kullanılan nano grafit.....	40
Şekil 3.7 PVA liflerin nano grafit ile kaplanması.	40
Şekil 3.8 PVA, GPVA ve SMA ilaveli ECC'lerin üretimi.....	42
Şekil 3.9 Kemik numunelerin boyutları.	43
Şekil 3.10: Numunelerin kür işlemi.....	44
Şekil 3.11 Mini yayılma tablası deneyi.	45
Şekil 3.12 Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı.	45
Şekil 3.13 Basınç dayanımı test cihazı.	46
Şekil 3.14: Eğilme deneyi cihazı.	47
Şekil 3.15: Tokluk hesaplarında kullanılan sehimler (Çivici, 2006).....	48
Şekil 3.16 Doğrudan çekme test cihazı.	49
Şekil 3.17 Kuruma rötresi deney düzeneği.....	49
Şekil 3.18 Çatlak iyileştirme için üç noktalı eğilme testi ve ısı uygulaması.	50
Şekil 3.19 Ağırlık düşürmeli düşük hızlı çarpma deneyi.	51

Şekil 3.20: Fraktal boyut-çatlak analizi.....	52
Şekil 3.21 Kullanılan a) Taramalı Elektron Mikroskobu ve b) altın kaplama sistemi.	53
Şekil 3.22 Kullanılan Atomik Kuvvet Mikroskobu.	54
Şekil 3.23 Bilgisayarlı Mikro Tomografi cihazı ve örnek görüntü.	54
Şekil 3.24 a) PVA ve b) GPVA liflerin statik temas açısı ölçümü.....	55
Şekil 3.25 Optik profilometre ölçüm cihazı.	56
Şekil 4.1 a) PVA lifin ve b) GPVA lifin statik temas açıları sonuçları.....	57
Şekil 4.2 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin bağlı çökme sonuçları.	59
Şekil 4.3 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin bağlı çökme sonuçları.....	60
Şekil 4.4 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin ultrases geçiş hızı sonuçları.....	61
Şekil 4.5 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin ultrases geçiş hızı sonuçları.....	62
Şekil 4.6 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları. ...	63
Şekil 4.7 0 SMA-2 PVA ve 1 SMA-2 PVA karışımlarının arayüz poroziteleri.....	64
Şekil 4.8 Karışımlarda lif kümelenmesi.	64
Şekil 4.9 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları. 65	
Şekil 4.10 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin eğilme dayanımı sonuçları.	66
Şekil 4.11 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin tokluk indisi değerleri.	68
Şekil 4.12 a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.50 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA için hasar desenleri.	69
Şekil 4.13 a) 0 SMA-2 PVA ve b) 1 SMA-2 PVA karışımları için eğilme yükü sonrası kırılma yüzeyindeki liflerin durumu.	70
Şekil 4.14 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin eğilme dayanımı sonuçları.	71
Şekil 4.15 Temsili GPVA lif davranışı.....	72
Şekil 4.16 GPVA liflerin davranışının incelendiği SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.17 SMA ve GPVA lif ilaveli ECC'nin tokluk değerleri.	73
Şekil 4.18 a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA için hasar desenleri.	74

Şekil 4.19 PVA ve SMA ilaveli ECC'nin doğrudan çekme gerilmesi-şekil değiştirmesi eğrileri.....	76
Şekil 4.20 ECC'deki çekme yüklemesi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	77
Şekil 4.21 Doğrudan çekme yüklemesi altında a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.5 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA'nın kırılma davranışı.	77
Şekil 4.22 GPVA ve SMA ilaveli ECC'nin doğrudan çekme gerilmesi-şekil değiştirmesi eğrileri.....	78
Şekil 4.23 Doğrudan çekme yüklemesi altında a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA'nın kırılma davranışı.....	79
Şekil 4.24 PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin kuruma rötresi sonuçları.....	80
Şekil 4.25 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin kuruma rötresi sonuçları.....	82
Şekil 4.26 PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin enerji-zaman grafikleri.	83
Şekil 4.27 PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin çarpma yükü-deformasyon grafikleri.	84
Şekil 4.28 a) %0.25 ve b) %1 SMA lif ilaveli numunelerdeki SMA lif dağılımının 3 boyutlu modelleri.....	86
Şekil 4.29 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin enerji-zaman grafikleri.	87
Şekil 4.30 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin çarpma yükü-deformasyon grafikleri.	88
Şekil 4.31 Lif köprüleme gerilmesi ve çatlak açıklık genişliği grafiği (Kına ve Türk, 2017).	89
Şekil 4.32 a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.5 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA kompozitlerin Fraktal boyut grafikleri.	90
Şekil 4.33 a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.5 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA kompozitlerin 3 boyutlu çatlak görüntüleri.	91
Şekil 4.34 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin kırılma enerjisi.	91
Şekil 4.35 a) SMA ve b) PVA liflerin yüzey pürüzlülük profilleri.	92
Şekil 4.36 a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA kompozitlerin Fraktal boyut grafikleri.	93
Şekil 4.37 a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA kompozitlerin 3 boyutlu çatlak görüntüleri.	94
Şekil 4.38 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin kırılma enerjisi.....	94
Şekil 4.39 GPVA lifin yüzey pürüzlülük profili.	95

Şekil 4.40 0 SMA-2 PVA numunesinin SEM mikro-görüntüleri.	96
Şekil 4.41 1 SMA-2 PVA numunenin SEM mikro-görüntüleri.	96
Şekil 4.42 0 SMA-2 GPVA numunesinin EDS analizi.	97
Şekil 4.43 1 SMA-2 GPVA numunenin EDS analizi.	98
Şekil 4.44 0 SMA-2 PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	100
Şekil 4.45 0.25 SMA-2 PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	100
Şekil 4.46 0.5 SMA-2PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	101
Şekil 4.47 1 SMA-2PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	101
Şekil 4.48 0 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	103
Şekil 4.49 0.25 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	103
Şekil 4.50 0.5 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	104
Şekil 4.51 1 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.	104
Şekil 5.1 Çatlak iyileştirme sırasında uygulanan ısı kontrolü.	106
Şekil 5.2 SMA lif miktarına göre çatlak iyileştirme sonuçları.	107
Şekil 5.3 a) %0, b) %0.25, c) %0.5 ve d) %1 SMA lif yüzdesine göre kırılma yüzeyleri. ...	108
Şekil 5.4 SMA lif ilavesiyle PVA ve GPVA lifli ECC'lerde çatlak boyutları.	108
Şekil 5.5 PVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve eğilme dayanımı ilişkisi.	109
Şekil 5.6 GPVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve eğilme dayanımı ilişkisi.	110
Şekil 5.7 PVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve çarpma enerjisi ilişkisi.	111
Şekil 5.8 GPVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve çarpma enerjisi ilişkisi.	111
Şekil 5.9 Yük altında boşluk kümelenmesinin sistematik gösterimi (Erdem, 2012).	112
Şekil 5.10 Mikro CT analiz ile elde edilen referans numunenin içyapı görüntüsü.	113
Şekil 5.11 Mikro CT analiz ile elde edilen %1 SMA lif ilaveli numunenin içyapı görüntüsü.	113

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 Geleneksel beton ile ECC'nin özelliklerinin karşılaştırılması (Yıldırım, 2016).....	7
Tablo 2.2 ECC türleri ve özellik aralıkları (Li, 2019).	8
Tablo 2.3 Nitinol ve paslanmaz çeliğin tipik fiziksel özellikleri (Memry Corporation, 2017).	25
Tablo 3.1: Çimento ve uçucu külün kimyasal içerikleri (%).....	35
Tablo 3.2: Ni-Ti şekil hafızalı alaşım (SMA) teknik özellikleri.	36
Tablo 3.3: PVA ve NiTi-SMA liflerinin genel özellikleri.	36
Tablo 3.4 Kullanılan etanolün özellikleri.	38
Tablo 3.5: Kompozitlerin karışım oranları.	41
Tablo 4.1 Beton kalitesi değerlendirme (Şimşek, 2011).	60
Tablo 4.2 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin üç noktalı eğilme test sonuçları.....	67
Tablo 4.3 SMA ve PVA lif ilaveli ECC'nin eğilme testindeki çatlak genişlikleri.....	70
Tablo 4.4 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin üç noktalı eğilme test sonuçları.....	71
Tablo 4.5 SMA ve GPVA lif ilaveli ECC'nin eğilme testindeki çatlak genişlikleri.....	75
Tablo 4.6 PVA ve SMA ilaveli ECC'lerin ağırlık düşürmeli çarpma deneyi sonuçları.	85
Tablo 4.7 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'lerin ağırlık düşürmeli çarpma deneyi sonuçları. ..	87
Tablo 4.8 PVA-SMA ilaveli kompozitlerin S_a değerleri.....	99
Tablo 4.9 GPVA-SMA ilaveli kompozitlerin S_a değerleri.....	102

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
σ	: Gerilme
ε	: Şekil değiştirme
Ω	: Ohm
μm	: Mikrometre
CO_2	: Karbondioksit
J	: Joule
Hz	: Herzt
$^{\circ}\text{C}$	: Derece santigrat
W	: Watt
K	: Kelvin
(M)	: Martensit
(A)	: Östenit
nm	: Nanometre
Ws	: Çatlağın toplam enerjisi
Gf	: Çatlağın kırılma enerjisi
h	: Numune yüksekliği
δ	: Silis kumunun maksimum boyutu
D	: Çatlağın Fraktal boyutu
3D	: Üç boyutlu
J_{tip}	: Çatlak uç tokluğu
J_b'	: Tamamlayıcı enerji
G_d	: Arayüzey kimyasal aderans
τ_0	: Arayüzey sürtünme aderansı
S_a	: Tüm yüzeyin pürüzlülük değeri
keV	: Kiloelektronvolt
A	: Amper
R^2	: Korelasyon katsayısı
R_a	: Yüzey pürüzlülüğü

Kısaltmalar	Açıklama
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
ECC	: Tasarlanmış çimento esaslı kompozit
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
FRC	: Geleneksel lif takviyeli beton
FR-ECC	: Yangına dirençli tasarlanmış çimento esaslı kompozit
FRP	: Lif takviyeli polimer
GPa	: Gigapascal
GPVA	: Nano grafit kaplı polivinil alkol
HS-ECC	: Yüksek mukavemetli tasarlanmış çimento esaslı kompozit
ITZ	: Ara yüzey geçiş bölgesi
LOI	: Kızdırma kaybı
LW-ECC	: Hafif tasarlanmış çimento esaslı kompozit
Mikro CT	: Bilgisayarlı Mikro Tomografi
MPa	: Megapascal
NiTi	: Nitinol
PESMA	: Psödoelastik şekil hafızalı alaşım
PP	: Polietilen
PVA	: Polivinil alkol
SCC	: Kendiliğinden yerleşen beton
SE	: Çelik lif
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SMA	: Şekil hafızalı alaşım
UPV	: Ultrases geçiş hızı
YPLDÇK	: Yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitler

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SÜPER ELASTİK ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIM LİFLERİNİN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ve DİNAMİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ezgi GÜRBÜZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Savaş ERDEM

II. Danışman : Doç. Dr. Mingzhong ZHANG

Bu tez çalışmasının amacı yüzey özellikleri nanoteknolojik yöntemlerle iyileştirilmiş polivinil alkol lif (PVA) ile üretilecek tasarlanmış çimento esaslı kompozitlere (ECC) süperelastik şekil hafızalı alaşım (SMA) lif ilavesinin kompozitin mekanik ve dinamik özelliklerine etkilerini araştırmaktır. Hibrit lifli ECC'nin işlenebilirliği, basınç özellikleri, eğilme ve çekme dayanımları, rötire ve ağırlık düşürmeli çarpma performansı için bir dizi test gerçekleştirilmiştir. 3D Fraktal çatlak analizi ve mikro yapısal incelemenin yanı sıra, deformasyon sertleşmesi, çoklu mikro çatlak performansı ve içyapı hasar özellikleri mikro ve nano yapısal karakterizasyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Basınç dayanımı, yüzey özellikleri nano grafit ile iyileştirilmiş PVA (GPVA) liflerle üretilen kompozitlerde hidrofiliklik derecesinin azalmasına bağlı olarak artış göstermiştir. Eğilme performansında ise sadece SMA ilavesi ile yaklaşık %100'e yakın artış, hem GPVA hem de SMA lif ilavesi ile ise yaklaşık %300'e yakın artış elde edilmiştir. Çekme yüklemesi altındaki dayanım iyileşmesinin yanında, çekme düktilitesi değeri %2'yi aştığı için hibrit lifli bu kompozitlerin yapısal onarım uygulamalarında

da kullanılabileceği belirtilmektedir. Sadece mekanik yükler altında değil, dinamik yükler altında da yüksek performans sergileyen kompozitlerin SMA ilavesi ile çatlak iyileştirme özellikleri de araştırılmıştır. Bilgisayarlı tomografi görüntüleri ile kontrol edilen içyapıda homojen olarak dağılabilen SMA lif miktarının çatlak boyutlarındaki azalma ile doğrusal olarak ilişkili arttığı da ortaya konulmuştur. Böylece bu tez kapsamında GPVA ve SMA liflerle üretilen ECC’lerin hem yapı ve deprem mühendisliği açısından, hem de kritik öneme sahip yapıların yapımı ve hızlı tamirine imkan verebilecek son derece faydalı yeni nesil bir kompozit olarak değerlendirilebileceği sunulmuştur. |

Haziran 2023 , |157|sayfa.

Anahtar kelimeler: |Tasarlanmış imento Esaslı Kompozitler, şekil Hafızalı Alaşımlar, 3D atlak Analizi |

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

**EFFECT OF SUPER ELASTIC SHAPE MEMORY ALLOY FIBERS ON
MECHANICAL and DYNAMICAL PROPERTIES OF ENGINEERED
CEMENTITIOUS COMPOSITES**

Ezgi GÜRBÜZ

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Programme of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Savaş ERDEM

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mingzhong ZHANG

The aim of this thesis is to investigate the effects of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber addition on the mechanical and dynamic properties of the Engineered Cementitious Composites (ECC) are produced with polyvinyl alcohol fiber (PVA), whose surface properties are improved by nanotechnological methods. A series of tests were performed to characterize the flowability, compressive properties, flexural and tensile strengths, shrinkage, and drop-weight impact performance of the hybrid fiber ECC. In addition to 3D Fractal crack analysis and microstructural analysis, strain hardening, multiple microcrack performance, and internal structure damage properties were evaluated by micro and nanostructural characterization analyses. The compressive strength has increased for the composites produced with GPVA (PVA fibers improved surface properties). In the flexural performance, an increase of approximately 100% was obtained with the addition of SMA fiber and an increase of approximately 300% with the addition of both GPVA and SMA fiber. In addition to the improvement in strength under uniaxial tensile loading, it can be recommended that these

hybrid fiber composites can also be used in structural repair applications as the tensile ductility values exceed 2%. Composites, which exhibit high performance not only under mechanical loads but also under dynamic loads, were also investigated for crack healing properties. It was also revealed that the amount of SMA fiber homogeneously dispersed in the internal structure controlled by computed tomography images increased linearly with the decrease in crack sizes. Thoroughly, the ECCs produced with the hybridization of GPVA and SMA fibers can be evaluated as a considerably useful new-generation composite that can enable the structural and earthquake engineering, the construction, and rapid repair of critical structures.]

June 2023, [157] pages.

Keywords: [Engineered Cementitious Composites, Shape Memory Alloys, 3D Crack Analysis]

1. GİRİŞ

Ülkemiz, dünyanın en yıkıcı depremlerine yol açan bir coğrafya üzerinde yer almaktadır. Yakın zamanda, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli meydana gelen depremlerde 50000'den fazla kişi hayatını kaybetmiş, 250000'den fazla kişi yaralanmış ve beklenenin çok ötesinde inşaat üst ve altyapı hasarları meydana gelmiştir. Düşük malzeme performansı bu çapta bir yıkımın ve hasarlarının temel sebeplerinden biri olarak düşünülmektedir. Beton gevrek niteliğe sahip, yaygın olarak kullanılan çimento esaslı bir yapı malzemesidir ve özellikle yüksek deprem riski olan bölgelerdeki yapılar için betonun bu niteliği büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Betonun yeterli plastik şekil değiştirme yapamaması ve dolayısıyla gevrek kırılmasından kaynaklanan sismik hasarı azaltmak için, tasarımı karmaşıktırsa da beton elemanın esnekliğini arttırmaya yönelik özel bir detaylandırma uygulanmalıdır.

Bu zorluğu çözmek için yapısal mühendislik ve mikromekanik prensipleri kullanılarak üretilen ve çimento esaslı bir malzeme için oldukça yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC) geliştirilmiştir. Betonarme ve lif takviyeli beton yük altında ilk çatlaktan sonra şekil değiştirme yumuşaması gösterirken, matris içerisinde rastgele dizilmiş süreksiz lifler nedeniyle ECC şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gösterir. ECC üretiminde genel olarak üstün mekanik özellikleri sebebiyle PVA lifler kullanılmakta, ancak bu liflerin yüzeylerinin aynı zamanda suyu emebilme (hidrofil) özelliğe sahip olduğu da bilinmektedir. PVA liflerin suyu seven bu yüzey özellikleri, matrise gömülü lifler üzerindeki gerilmenin uniform olmaması ve beraberinde kompozitten teoride alınması beklenen verimin alınamaması sonucunu doğurabilmektedir. Yüzey özelliklerinin değiştirilmesi PVA esaslı ECC'nin mekanik, dinamik ve süneklik performansının geliştirilmesi ve daha yaygın bir kullanım alanı olabilmesi adına önemli bir fırsat olarak görülmektedir.

Bu projenin ana amaçlarından biri, mevcut malzemeler arasında yerini alan tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin içerisine dâhil edilecek PVA liflerin yüzey özelliklerini iyileştirmek suretiyle, kompozit içerisinde homojen dağılımlarını ve üzerlerinde uniform gerilmelerin oluşmasını sağlayarak ve lif köprüleme özelliğini geliştirerek kompozitin süneklik ve şekil değiştirme sertleşmesi özelliklerini daha da geliştirmektir. Bu bağlamda, son derece yenilikçi ve nanoteknolojik esaslı bir yöntemle (nano grafit kullanımı) PVA liflerin yüzeyleri iyileştirilerek

çekme şekil değiştirme kapasitesi, temel mekanik özellikleri ve kısa süreli ve şiddetli dinamik yükler altındaki davranışı araştırılacaktır. Buna ek olarak normal PVA ve yüzey özellikleri iyileştirilmiş PVA liflerle üretilen numunelerin kırılma yüzeyleri üzerinde Fraktal Analizi gerçekleştirilecek, çatlak karakteristikleri (fraktal boyut, çatlak yoğunluğu, tortuosity gibi) ölçülerek kırılma davranışlarının çok daha iyi anlaşılabilmesi sağlanacaktır. Literatürde bu alanda yapılmış olan çalışmalar son derece kısıtlıdır.

Son yıllarda önem kazanan akıllı sistemler, yapısal güvenliği geliştirmeye yönelik olarak yapının ani yükleme veya düzensizliklere direncinde yapısal özellikleri otomatik olarak ayarlayabilmektedir. Özellikle akıllı malzemeler yapının içine katılarak his, hareket gibi özellikler sağlanmaktadır. Son yıllarda İnşaat Mühendisliğinde de akıllı malzemeler kullanımına yönelik araştırmalar hızlanmıştır. Bunlardan biri de şekil hafızalı alaşımlardır. Literatürde Shape Memory Alloys (SMA) olarak adlandırılan şekil hafızalı alaşımlar orijinal şekillerini hatırlayan metalik alaşımlardır. Büyük elastik olmayan deformasyona uğradıktan sonra ısı, radyasyon gibi uyarıcılara maruz kaldığında deforme olmadan önceki şekline geri dönebilme gibi özgün bir özelliğe sahiptirler (Dilibal, 2017). İnşaat mühendisliği alanında SMA'ların çoğunlukla SMA çubuklar şeklinde veya sürekli teller şeklinde kullanıldığı görülmektedir, ancak kısa lifler halinde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar son derece sınırlıdır.

Bu projenin temel amaçlarından biri de havacılık ve uzay, robotik teknoloji ve sağlık gibi alanlarda üstün özellikleri literatürdeki çalışmalarla kanıtlanmış olan şekil hafızalı alaşımların (Ni-Ti esaslı) tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (ECC) içerisinde kullanarak yenilikçi ve kendini iyileştiren hibrit lif takviyeli (PVA ve SMA lif) ve ultra yüksek performanslı kompozit bir malzeme geliştirmektir. Rastgele dağılmış PVA lifler ve şekil hafızalı esnek SMA liflerin dahil edilmesi sinerjik bir tepki gösterecektir. Burada PVA lifler ilk çatlak mukavemetini ve nihai mukavemeti sağlarken, SMA lifler çatlama sonrası bölgede geliştirilmiş tokluk ve şekil değiştirme sertleşme kapasitesini sağlayacak ve böylece ECC'nin mekanik, dinamik ve süneklik performansı daha da geliştirilecektir.

Bu çalışma sonunda beklenen sonuçlara ulaşılabilmesi durumunda elde edilecek kazanımlar yalnızca yapı mühendisliği ile sınırlandırılmayacak kadar büyük olacaktır. Özellikle uzun vadede hem deprem mühendisliği hem de kritik öneme sahip yapıların (köprü, baraj ve askeri havalimanları gibi) yapımı ve hızlı tamirine imkan verebilecek son derece faydalı yeni nesil bir kompozitin ortaya çıkarılması mümkün olacaktır.

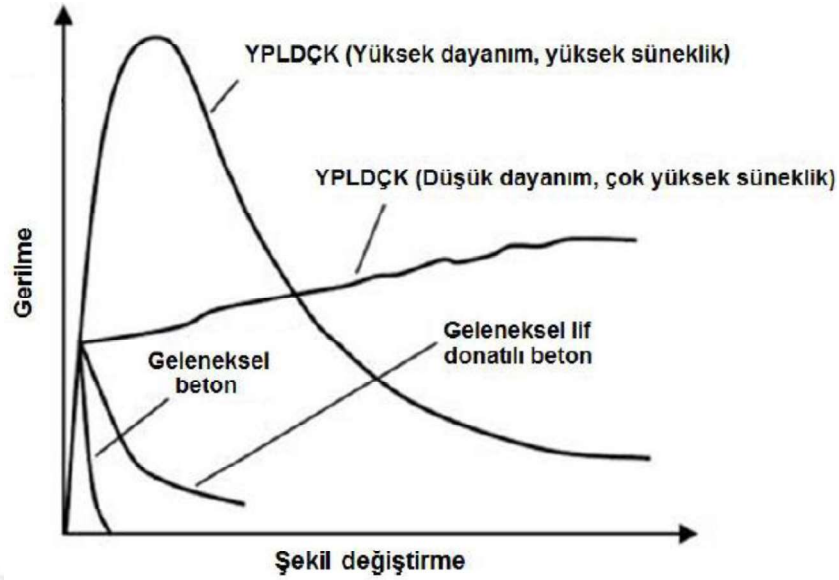
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler

Yüksek basınç dayanımlı betonlar geçmiş yıllardan bu yana yapısal amaçlarla kullanılmasına rağmen normal dayanımlı betonlara göre daha gevrek bir davranış sergilemektedir. Basınç dayanımı yükseldikçe artan gevreklik yapısal uygulamalarda dayanıklılık açısından bazı sorunlara neden olabilmektedir. Yüksek sünekliliğe sahip betonların kullanımı sayesinde ise yapıların deprem yüküne vereceği tepkilerde ve çevresel koşullar altındaki dayanıklılığında ciddi iyileşmeler gerçekleşmektedir. Bu nedenle yapısal uygulamalarda yüksek sünekliliğe sahip çimento esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi önemli hale gelmiştir (Özkan, 2017).

Betonun gevrek davranışını iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar sayesinde çekme yüklemeleri altında sünek davranış gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento bağlayıcılı kompozitler (YPLDÇK) ortaya çıkmıştır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, geleneksel beton çekme yüklemesi altında ilk çatlaktan hemen sonra aniden gevrek bir biçimde kırılırken geleneksel lif donatılı beton matristeki çatlamayı şekil değiştirme yumuşaması ile devam ettirmektedir. YPLDÇK’de ise ilk çatlaktan sonra lifler yük artışı ile fazla yükü matrise transfer ederek 100 μm ’den daha az çatlak genişliğine sahip çoklu mikro-çatlak davranışı sergiler. Bu çoklu mikro çatlak davranışı sayesinde betonun şekil değiştirme kapasitesi önemli ölçüde arttırılmış olur. İstenilen sünek davranışın elde edilebilmesi için lif, matris, lif-matris arayüzü, lif geometrisi ve lif hacimsel oranı gibi malzeme ve geometrik parametreler geliştirilmektedir (Yıldırım, 2016).

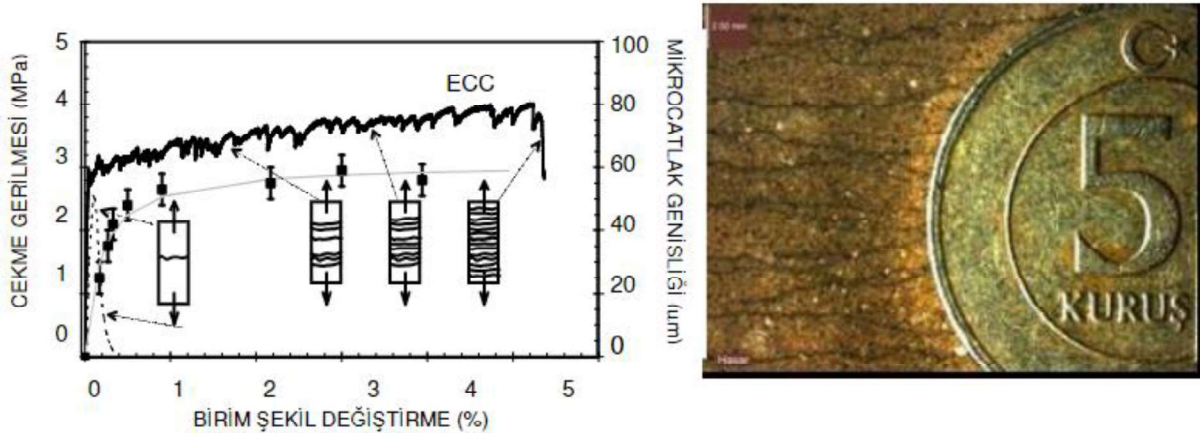
Bu amaçla ağır yüklemeler altında yüksek hasar toleransı ve normal servis şartlarında yüksek dayanıklılık gösteren, mikromekanik olarak tasarlanmış, deformasyon sertleşmesi (strain hardening) gösteren tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (patentli ismi ile Engineered Cementitious Composites - ECC) yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin yeni bir türü olarak ortaya çıkmıştır (Özkan, 2017).



Şekil 2.1 Eksenel çekme yükleri altında geleneksel beton ile lif ilaveli çimento bağlayıcılı malzemelerin davranışları (Yıldırım, 2016).

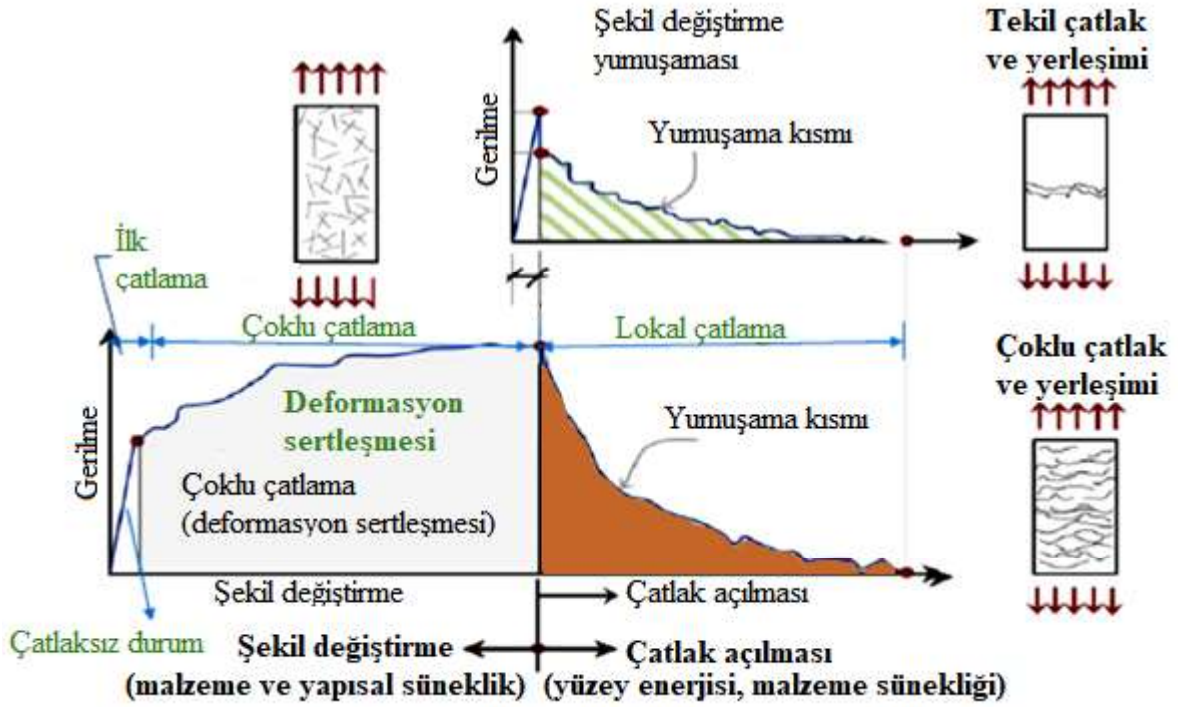
Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit (ECC) 1990'ların başında geliştirilen yüksek performanslı çimento esaslı bir kompozittir. %8'e varan gerilme kapasitesine sahip ECC geleneksel lif takviyeli beton (FRC) ile karşılaştırıldığında üstün gerilme özellikleri sergiler (Li, 2003). ECC'de FRC'ninkine benzer bileşenler kullanılır. Temel farklardan biri ECC'de iri agrega kullanılmaz, çünkü bunlar homojeniteyi bozarak kompozitin benzersiz sünek davranışını olumsuz yönde etkileme eğilimindedir. Tipik bir ECC karışımı bileşiminde çimento, nano-milimetre ölçeğinde ek çimentoya benzer malzemeler (çoğunlukla uçucu kül), mikro-silika kumu veya 300 µm parçacık boyutu veya daha küçük kireçtaşı tozu, su, su azaltıcı katkıları ve hacim olarak yaklaşık %2 kısa lifler kullanılır. ECC üretiminde üstün mekanik ve fiziksel özellikte polivinil alkol (PVA) ve polietilen (PE) lifler gibi çeşitli lifler kullanılmaktadır (Ali, 2017). Ancak bu liflerin yüksek üretim maliyetleri ve üretim sırasındaki çevresel etkileri uygulamada geniş yer bulmasını kısıtlayan faktörlerdir. Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler %3'ten fazla (normal betonunkinin yüzlerce katı) çekme gerilimine sahiptir. Diğer çimento esaslı malzemelerden farklı olarak PVA lif ilaveli ECC, ilk çatlamadan sonra metal benzeri bir performans ile normal betondan yaklaşık 500 kat daha büyük bir gerilme kapasitesi sergiler (Wu ve diğ., 2011). Üstün mekanik performansı, eşsiz mikro çatlama kabiliyeti, enerji emme kapasitesi ve darbe dayanımı sayesinde ECC, koruyucu yapıların inşası için güçlü bir rakip haline gelmiştir (Soe ve diğ., 2013).

Birçok lif ilaveli çimento esaslı kompozit malzemelerde yüksek performans elde edebilmek amacıyla yüksek hacimlerde lif kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Buna rağmen, ECC üretiminde sadece hacimce %2 oranında, kısa süreksiz lifler yeterli olmaktadır. Üretiminde %2 oranında PVA lif içeren ECC'nin tipik çekme gerilmesi - birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.2'de görüldüğü gibidir. İlk çatlak oluştuktan sonra çoklu mikro-çatlak özelliği karakteristik deformasyon sertleşmesi özelliği ile birlikte gerçekleşmektedir. Böylece çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi metallerde olduğu gibi sünek malzemelere benzer şekilde elde edilmektedir. Plastik şekil değişimi sırasında oluşan çatlakların gelişimi de Şekil 2.2'deki gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında görülmektedir. Şekil 2.2 çatlak genişliğinin azami yük taşıma kapasitesinde bile 100 µm seviyesinin çok altında kaldığını göstermektedir (Özkan, 2017). Bu özellikler ECC ile yapılan yapıların güvenliğini, mekanik dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini arttırmada katkı sağlamaktadır. ECC'nin 4 ile 12 MPa'lık tipik bir çekme dayanımına, 20 ile 95 MPa'lık bir basınç dayanımına, 10 ile 30 MPa'lık bir eğilme dayanımına ve normal betonun yüz katı olan %1'den daha yüksek bir süneklığe sahip olduğu bilinmektedir (Ali, 2017).



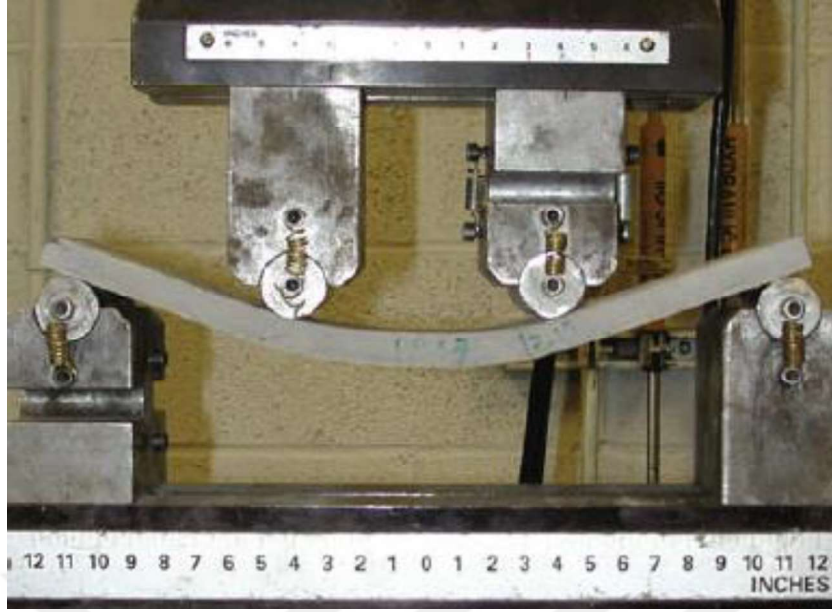
Şekil 2.2 ECC'nin tipik çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ve çatlak genişliği gelişimi (Şahmaran ve diğ., 2012).

Çimento esaslı bir kompozitin çekme yükü altındaki gerilme ve kırılma davranışı Şekil 2.3'teki gibi bölümlere ayrılarak şematik bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi ile açıklanabilir. Bu davranış biçiminde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ilk aşamasında lineer elastik davranış meydana gelir. Lineer fazı, ani kırılmalar izler. İlk çatlaktan sonra elastik olmayan şekil değiştirme ile birlikte şekil değiştirme artmaya devam ederek nihai çekme mukavemetine ilk çatlamayı takip eden deformasyon sertleşmesi davranışından sonra ulaşılmaktadır. Bir sonraki süreçte, numune şekil değiştirme yumuşama davranışı göstermektedir, bu da uzamayla birlikte şekil değiştirme kaybı anlamına gelmektedir (Özkan ve Demir, 2020).



Şekil 2.3 Tek eksenli çekme yüklemesine maruz kalan çimento esaslı bir kompozitin tipik tepkisinin şematik görüntüsü (Özkan ve Demir, 2020).

Eğilme yüklemeleri altında ECC kiriş numuneleri yüksek plastik deformasyon göstererek sünek bir metal gibi davranmaktadır (Şekil 2.4). Basınç yüklemeleri altında ise ECC normal veya yüksek dayanımlı betona benzer basınç dayanımı göstermektedir. ECC'nin genel özellikleri değerlendirildiğinde, düzgün tasarlanıp kullanılması durumunda şantiyelerde pratik kullanım kolaylığı ile normal betona ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olarak görülmektedir (Şahmaran ve diğ., 2015). ECC'nin geleneksel beton ile kıyaslanmasıyla elde edilen diğer avantajları Tablo 2.1'de görüldüğü gibidir. Tablo 2.1 incelendiğinde ECC'nin şekil değiştirme kapasitesinin geleneksel betona göre 200-500 kat, eğilmede çekme dayanımının yaklaşık 2 kat, yorulma mukavemetinin onlarca kat daha iyi olduğu görülmektedir. Basınç dayanımında da üç kata kadar daha yüksek değerler, geçirimsizlik açısından da çok daha düşük geçirimsizlik ECC ile elde edilebilmektedir. Böylece Tablo 2.1'de sunulan diğer özellikler de değerlendirildiğinde ECC'nin geleneksel betona göre oldukça avantajlı olduğu belirtilebilmektedir.



Şekil 2.4 ECC'nin eğilme yüklemesi altındaki davranışı (Yang ve Li, 2010).

Tablo 2.1 Geleneksel beton ile ECC'nin özelliklerinin karşılaştırılması (Yıldırım, 2016).

Özellikler	Geleneksel Beton	ECC
Boyutsal uyumluluk	Zayıf	Geleneksel betonla çok uyumlu
Şekil değiştirmesi kapasitesi	%0.01 - %0.02	~%2-5 (yaklaşık 200-500 kat daha sünek)
Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	5-8	10-14 (yaklaşık iki kat daha yüksek)
Basınç Dayanımı (MPa)	30-60	40-150 (üç kata kadar daha yüksek)
Kısıtlanmış rötre çatlak genişliği	1 mm	0.03 mm
Geçirimsizlik (m/s)	1.7×10^{-5}	2.5×10^{-10} (çok düşük geçirimsizlik)
Dona karşı dayanım	Hava sürüklenmişse iyi	En az hava sürüklenmiş beton kadar dayanıklı
Yorulma mukavemeti	Zayıf	Geleneksel betona oranla onlarca kat daha iyi
Çatlama/Tabakalanma	Gevrek	Sünek
Korozyona dayanım	Zayıf	Üst Düzey
Darbe dayanımı	Zayıf	Üst Düzey

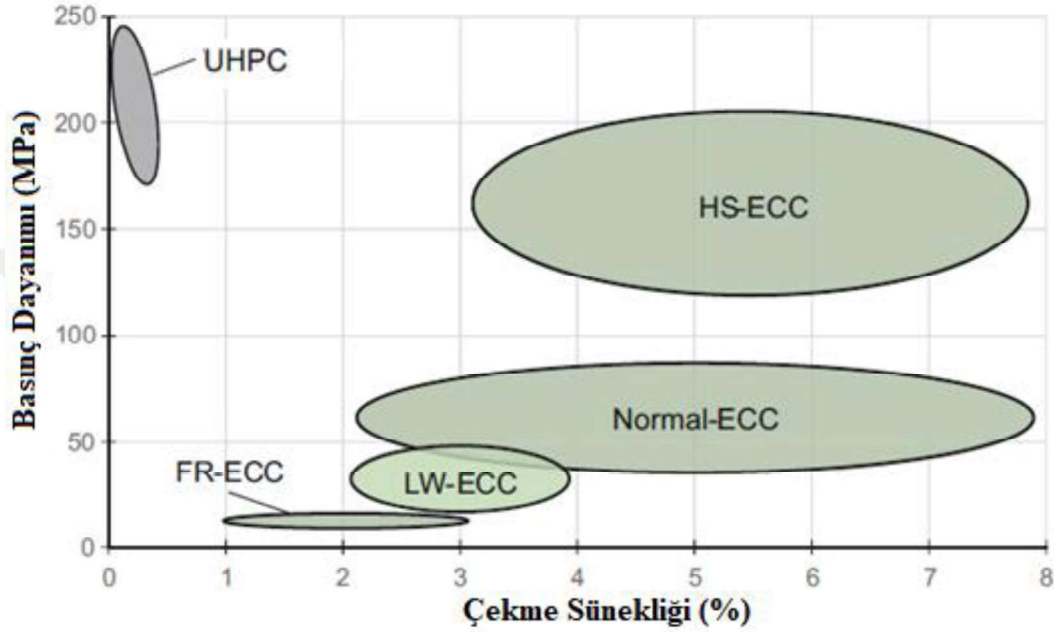
ECC amaçlanan uygulamalarına göre ayarlanmış özelliklere sahip bir malzeme ailesini temsil etmektedir. Çeşitli ECC'ler kendi kendini pekiştirme, kendi kendini iyileştirme, kendi kendini algılama, kendi kendini ısıya uyarlama veya kendi kendini temizleme gibi belirli işlevler için ayarlanmıştır. ECC'nin belirli türleri de yangına dayanıklı amaçlar veya çarpma/patlamaya dayanıklı uygulamalar için tasarlanmıştır. Çoğu durumda mekanik özellikler beklenen yükleme türü ve büyüklüğüne dikkat edilerek tasarlanır. Bu nedenle ECC çekmede sünek olma gibi ortak bir özelliğe sahipken; yoğunlukları, elastisite modülleri ve basınç dayanımları dört geniş ECC sınıfı oluşturulmasında etkili olmuştur. Bunlar Tablo 2.2'de detaylı özelliklerinin gösterildiği yangına dirençli (FR-ECC), hafif (LW-ECC), normal ve yüksek mukavemetli (HS-ECC) ECC'ler olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.2 ECC türleri ve özellik aralıkları (Li, 2019).

	FR-ECC	LW-ECC	Normal-ECC	HS-ECC
Yoğunluk (kg/m ³)	550	930–1800	1800–2100	2300–2400
Elastisite modülü (GPa)	4–6	8–12	15–23	41–48
İlk çatlak dayanımı (MPa)	0.8–1	2–4	3–5	8–10
Çekme dayanımı (MPa)	1–1.5	2–5	4–8	14–17
Çekme şekil değiştirme kapasitesi (%)	1–3	2–4	2–8	3–8
Basınç dayanımı (MPa)	2.5–3.5	20–40	30–80	120–205
Eğilme dayanımı (MPa)	-	-	10–16	28–32
Uygulama alanları	Çelik yapıların yangına dayanıklı hale getirilmesi	Hafif uygulamalar	Yapısal kullanım	Darbe ve patlamaya dayanıklı yapılar

Beklenildiği gibi; daha düşük yoğunluk, daha düşük elastisite modülü ve basınç dayanımı ile ilişkilidir. Püskürtülebilir bir kaplama olarak çelik yapıyı korumaya yönelik yangına dayanıklı ECC (FR-ECC) 550 kg/m³ gibi düşük bir yoğunluğa ve yaklaşık 3 MPa'lık düşük bir basınç dayanımına sahiptir. Hem yüksek basınç yüklemesine maruz kalabilecek, hem çarpma/patlamaya dayanıklı yapılara yönelik tasarlanmış yüksek mukavemetli ECC (HS-ECC)

yaklaşık 2350 kg/m^3 yoğunluğa ve yüksek çekme ve basınç gerilmesine sahiptir. FR-ECC'nin alt sınırı hariç, ECC'nin dört sınıfının tamamı %2'yi aşan çekme şekil değiştirme kapasitelerine sahiptir. Şekil 2.5 bu dört geniş ECC sınıfının basınç dayanımı ile çekme şekil değiştirme kapasitesi aralığını özetlemektedir. ECC sınıflarını karşılaştırmak için bu çizime ultra yüksek performanslı beton (UHPC) malzemesi de dahil edilmiştir (Li, 2019).



Şekil 2.5 ECC sınıflarının basınç dayanımı ile çekme şekil değiştirme kapasitesi aralıkları (Li, 2019).

ECC'de çoğunlukla PVA lifler (genellikle %2'lik bir hacim oranına kadar) kullanılmaktadır. PVA lifin dahil edilmesiyle ECC'nin basınç dayanımı bir miktar azalsa da, ECC basınç altında çimento hamurundan daha iyi bir tokluk sergiler ve basınç altındaki ECC'nin hasar modu gevrek yerine sünek kesme kırılması şeklinde gerçekleşir. Bununla birlikte ECC'de şu anda yaygın olarak kullanılan PVA liflerin yüzeyi, lif yüzeyi ile matris arasındaki kimyasal bağı zayıflatmak için (lifler ve matris arasında kaymaya izin vererek) ultra yüksek bir gerilme tokluğu ve iyi bir enerji yutabilme performansı elde etmeyi amaçlayarak yağlanmaktadır. Bu da yağlanmış PVA lifin yüksek fiyatına neden olur ve sonuç olarak mühendislikte ECC uygulamalarını sınırlar. Malzemelerin performansı önemli ancak maliyet verimliliği de yatırımcılar ve mühendisler için önemli bir konudur. Bu nedenle ECC'nin daha geniş uygulamalarını kolaylaştırmak için uygun maliyetli bir lif takviyeli ECC geliştirmek faydalı olacaktır. PVA-ECC'nin maliyetini düşürmenin yollarından biri, diğer ekonomik lifleri yağlanmış PVA liflerle karıştırmaktır. Mevcut çalışmalarda çelik lif, polietilen tereftalat lif,

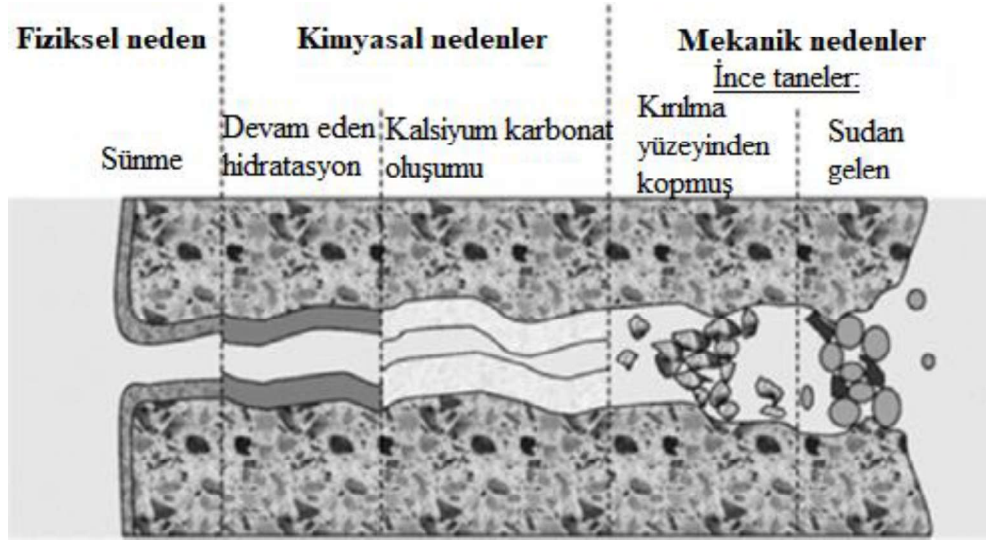
yağlanmamış PVA lif ve PVA lif ile karıştırılan polipropilen liflerin kullanıldığı görülmektedir (Lin ve diğ., 2020).

Sürdürülebilirlik açısından incelendiğinde, üretilen her ton çimento atmosfere salınan yaklaşık bir ton CO₂ üretir ve bu miktar küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7'sine karşılık gelir. Yol gibi yapılar Portland çimentosu kullanılarak inşa edildiğinde, genellikle daha sık tamir edilmeleri gerekir. Bu nedenle daha fazla çimento tüketilir ve daha fazla sera gazı salınır. Yol onarımı sırasında bölgedeki trafik sıkışıklığı yakıt kullanımının ve emisyonların da artmasına neden olur. ECC'nin bu tür uygulamalarda kullanılması bu çevresel etkinin azaltılmasına yardımcı olarak projenin sürdürülebilirliğini artırabilir. ECC üretmek için gereken enerji normal beton ve sıcak karışım asfalt için kullanılan enerjiden sırasıyla yaklaşık %21 ve %72 daha azdır. Ayrıca ECC'den kaynaklanan CO₂ emisyonu normal betondan ve sıcak karışım asfalttan sırasıyla yaklaşık %33 ve %38 daha azdır. Yine de ECC karışımların çoğu önemli miktarda çimento içerir. Çimentoyu kısmen uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerle değiştirerek ECC'nin karbon ayak izi azaltılabilir ve aynı zamanda atıklar da bertaraf edilebilir. Ayrıca uçucu kül gibi yan ürünler ECC'de kendi kendini iyileştirme reaksiyonlarını da kolaylaştırabilir. Olumsuz çevresel etkileri azaltma yeteneği, bakım ve onarım için gerekli kaynakları azaltarak yapıların ömrünü uzatma gibi bina sürdürülebilirlik özelliklerinin tümü, ECC'nin geleneksel betona karşı sürdürülebilir ve güçlü bir rakip olduğunu göstermektedir.

ECC ve normal betonun maliyet açısından karşılaştırmasında yalnızca imalat maliyetleri değil, aynı zamanda yapının ömür boyu maliyetleri de hesaba katılmalıdır. Normal betonun ilk maliyeti ECC'ninkinden yaklaşık üç kat daha azdır, ancak uzun vadeli faydalar ECC'yi desteklemek için yeterlidir. ECC'nin maliyetini düşürmek için çimentonun bir kısmı için daha düşük maliyetli ve daha sürdürülebilir çimento benzeri malzemeler kullanılabilir. Ayrıca daha küçük ECC yapısal eleman boyutu, azaltılmış/ortadan kaldırılmış güçlendirmeler ve kendiliğinden yerleşebilme ile daha hızlı inşaat, maliyetleri daha da azaltabilmektedir. ECC kullanımı normal betona kıyasla bakım maliyetlerinin azaltılması konusunda da daha uzun vadeli faydalar sağlayabilmektedir. Daha sağlam, daha az gevrek, daha esnek ve kendi kendini iyileştirebilme özelliklerine sahip olduğundan, normalde daha az bakım ve onarım gerektirir. Bu da sürekli hizmette olması gereken otoyollar ve tüneller gibi büyük ölçekli altyapılar için özellikle arzu edilir. Bu gibi durumlarda zahmetli emek ve sermaye gerektirmeden çatlakların otomatik olarak onarılması veya kendi kendine onarılması çok cazip olabilir. Etkilenen yapıdaki hasara erişimin zor olması gibi mevcut koşullar nedeniyle onarım çalışmaları da zor

veya imkansız olabilir. Uzun vadeli maliyetler ve çevresel faydalar hesaba katıldığında, ECC'nin geleneksel betona göre sunduğu avantajlar daha belirgin hale gelmektedir (Ali, 2017).

ABD'de mevcut köprülerin bakımının yıllık maliyeti yaklaşık 5.2 milyar dolar ve yeniden yapılanma için tahmini bütçe 20 ile 200 milyar dolar arasındadır. İngiltere'de de inşaat ve yapı sektörüne ayrılan bütçenin yaklaşık %45'i onarım ve bakım uygulamalarına harcanmaktadır. Avrupa Birliği'ndeki ülkeler köprü bakımı için yıllık 1 milyar doların üzerinde ve tüm altyapı türlerinin bakımı için tahmini 20 milyar dolarla benzer bir durumla karşı karşıyadır. Sonuç olarak kendi kendini iyileştirme inşaat mühendisliğinde önemli bir ilgi konusudur. Yaklaşık bir asır önce sivil altyapılarda gözlemlenebilmesine rağmen, bununla ilgili çalışmalar ancak son yirmi yılda ortaya çıkmaya başlamıştır. Beton benzeri malzemelerin kullanıldığı sivil altyapılar kalite, dayanıklılık ve hizmet verebilirlikte eksiktir ve tekrarlanan denetim ve onarım gerektirir. Beton yapılarıdaki hasarın (örneğin çatlakların) kendiliğinden iyileşmesi bozulma oranlarının azalmasına, onarım sıklığının azalmasına, maliyetlerin en aza indirilmesine ve nihai hizmet ömrünün uzamasına neden olabilir. Ayrıca dışarıdan insan müdahalesi olmadan kendi kendini iyileştirme, özellikle büyük altyapılarda yapısal kısıtlamalar nedeniyle ulaşılamayan yerlerde kendi kendini onarmaya olanak tanır. Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin mevcut çatlakları kapatarak ve kendi kendini iyileştirme yoluyla orijinal mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geri kazanıp su ve zararlı kimyasalların nüfuz etmesini önleme olasılığı yüksektir. Bu özellik hasara dayanıklı yapıların geliştirilmesine katkıda bulunmayı vaat etmektedir. ECC'ler dar çatlak genişlikleri ve karışım oranlarındaki yüksek miktarlardaki ek çimento benzeri malzemeler sayesinde içsel kendi kendini iyileştirme için potansiyel olarak mükemmeldir. Beton benzeri bir malzemenin içsel kendini iyileştirme yeteneğinin üç ana nedenden kaynaklandığı bildirilmektedir: fiziksel, kimyasal ve mekanik. Bunların tümü şematik olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Yıldırım ve diğ., 2015).



Şekil 2.6 Çimentolu malzemelerde içsel kendi kendini iyileştirmenin olası nedenlerinin şematik sunumu (Yıldırım ve diğ., 2015).

ECC’de elastik olmayan deformasyon genellikle $60\ \mu\text{m}$ ’den daha az genişliğe (insan saçı çapının yaklaşık yarısı) sahip çoklu mikro çatlaklar yoluyla elde edilir ve bu çoklu mikro çatlak davranışı ECC’nin en önemli özelliklerinden biridir (Ali, 2017). Çünkü kontrolsüz ve büyük boyutlu çatlama beton yapıların herhangi bir evresinde önemli hasar ve zararlardan birisidir. Çatlaklar yüksek sıcaklıklar, sünme, plastik oturma, rötre veya alkali silika reaksiyonu ve donma/çözünme döngüleri gibi bozunma mekanizmalarından dolayı yükleme ve hacimsel değişiklikten kaynaklanabilir. Çatlaklar genellikle beton ve çevresel koşullar arasındaki çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimlerin sonucu olup yapının kullanım süresi boyunca farklı aşamalarda oluşabilir. Çatlak genişliği kontrolü olmayan, gevrek karakterdeki geleneksel betonlarda çatlakların yapısı, öncelikle iki olağanüstü hasardan sorumludur. Bu hasarlar, betonun mukavemeti ve rijitliğinin düşmesi ile korozyon, alkali-silika reaksiyonları, donma-çözülme hasarları ve sülfat hücumu gibi diğer beton bozulma tiplerini başlatan zararlı kimyasalların girişinin hızlanmasıdır. Bu nedenle, dayanıklılık bütün beton yapılar için son derece önemli olup bu özellik, büyük oranda betonun gevrek doğasıyla ilgilidir (Özkan, 2017).

Malzemenin gevrekliğinden dolayı betonun çatlaması, beton altyapısının bozulmasını hızlandıran en önemli etkenlerden biridir. Bozulmayı önlemek veya geciktirmek için çimento harcına kısa liflerin eklenmesiyle betonun sünekliğinin artırılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Lifler sünekliği artırmakta ve betonun çatlama sonrası davranışını ve çatlak direncini geliştirmektedir. Bununla birlikte, lif ilaveli çimento kompozitlerinin çatlama

mukavemetinin arttırılması ve mevcut çatlakların kapatılması hala çalışılmaya devam eden zor bir amaç olmaya devam etmektedir (Kim ve diğ., 2014).

Çatlaklar sadece statik yükler veya çevresel koşullarla meydana gelmez. Yapılar dinamik yükler ile de hasar görmektedir. Askeri tesisler, dağlık kaya barakaları ve nükleer santrallerin koruyucu duvarları füzeler, düşen kayalar, ezici araçlar ve uçaklar tarafından uygulanan darbe ve patlama yükleri gibi ağır yükleme koşullarına dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Darbe yüküne maruz kalan bir yapının tepkisi geometrisine, malzeme özelliklerine ve mermi veya patlayıcı yükünün özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Çekme gerilmeleri hedef malzemenin dinamik çekme mukavemetini aştığında çekme kırılması meydana gelir. Bu tür şiddetli yüklere direnmek için yapısal malzeme parçalanmadan ve bozulmadan bütünlüğünü korumak için yüksek gerinim hızında yeterli güce ve yeterli enerji emme kapasitesine sahip olmalıdır. Statik yükler tarafından önceden hasar görmüş olanlarda bile yapısal elemanlara liflerin dahil edilmesinin, darbe yükü altındaki tepkileri üzerinde önemli bir pozitif etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Ali, 2017). Bu nedenlerle hem yapılarda kullanılacak kompozit türleri, hem de tercih edilecek lifler çeşitlendirilerek, uygun koşullar ve yükler altında en iyi davranışı sergileyecek malzemeler araştırılmaları devam edilmektedir.

ECC sahip olduğu özellikleri nedeniyle sahada oldukça fazla kullanım alanına sahip kompozit türlerinden biridir. Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi malzemenin gerçek dünyadaki uygulamaları olmadan tamamlanmış sayılmaz. ECC'nin bina, ulaşım, su altyapısı gibi alanlarda birçok uygulamaları mevcuttur. Bazı uygulamalarda yapısal dayanıklılık performansı, bazılarında geliştirilmiş hizmet ömrü dikkate alınırken bazılarında da su sızıntısında azalma, inşaat verimliliğindeki iyileştirmeler, yeni malzemenin benimsenmesi hedeflenmektedir.

ECC'nin ilk uygulamalarından biri, 2004–2005'te Japonya'nın Hokkaido kentindeki Mihara Köprüsü'nün (Şekil 2.7) inşasıdır. Ölü ağırlığı yaklaşık %40 oranında azaltmak için bir kompozit ECC-çelik döşeme kullanılmıştır ve bu da maliyetin %50 oranında azalmasını sağlamıştır. ECC'nin kullanımı ile döşeme rijitliği iyileştirilmiş ve döşeme çeliğinin yorulma direnci arttırılmıştır. Köprünün uzunluğu 972 m, açıklığı 340 m'dir. Döşeme alanı 20000 m²'dir. Hazır beton fabrikasında toplam 800 m³ ECC üretilmiştir. ECC katman kalınlığı 38 mm'dir. Bu üst tabakanın gerekli olan kalınlığı, ağırlığı ve çekme gerilmesi beklentisi ECC'nin sünek davranışı ile karşılanmıştır.



Şekil 2.7 Mihara Köprüsü'nün ECC döşemesi (Li, 2019).

Japonya'da bulunan Mitaka Barajı 60 yıldan daha önce yapılmıştır. Beton yüzeyi su aşınması nedeniyle ciddi şekilde hasar görmüştür. Baraj yüzeyinde su sızıntısına neden olan çatlaklar ve dökülmeler (Şekil 2.8) bulunmaktaydı. Barajın güçlendirilmesi barajın yüksekliğinin 33 m'den 44 m'ye çıkarılması ve kaynak tarafının bir ECC tabakası ile korunması şeklinde 2003 yılında gerçekleştirilmiştir. Barajın kaynak tarafında ciddi şekilde hasar görmüş, baraj yüzeyinin 500 m²'si ortalama 30 mm kalınlığındaki ECC tabakası ile kaplanmıştır. ECC'nin püskürtülebilir bir versiyonu kullanılarak, ECC tabakası eski beton üzerine 1.5 m aralıklarla ankrajların yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



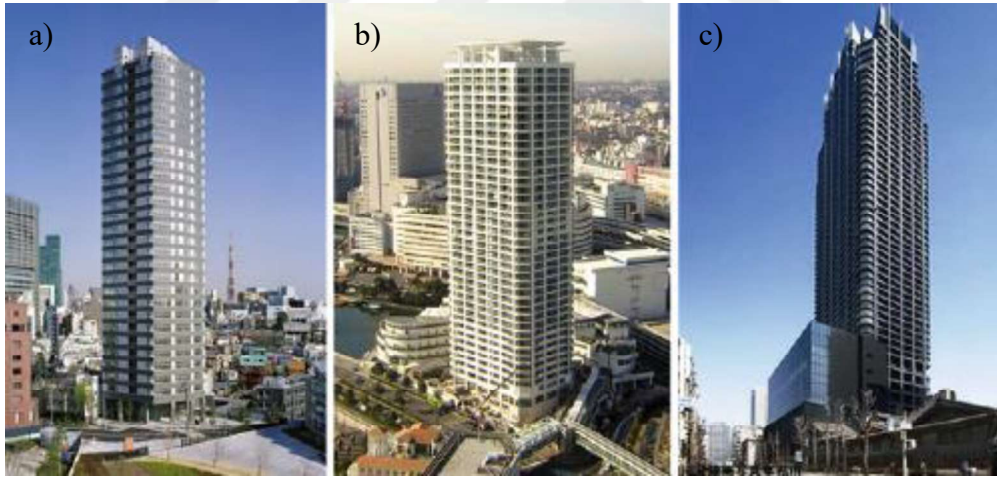
Şekil 2.8 Mitaka Barajı ve su aşınmasından kaynaklı hasarı (Li, 2019).

2008 yılında 12.3 m çapında bir otoyolla tamamlanan Hida Tüneli, ikinci en uzun (10.7 km) karayolu tünelidir ve Japonya'daki Tokai-Hokuriku Otoyolu'nun ana bileşenidir. 2005 yılında tünele beton kaplamanın yüzey karbonasyonu ve klorür taşınması nedeniyle bir güçlendirme yapılmıştır. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi, ECC 20 acil durum park bölgesinde çok katmanlı bir astarın yüzey tabakası olarak 10–20 mm kalınlığında ve püskürtülerek uygulanmıştır. Bu uygulama ile ECC yüzey tabakası su sızdırmazlığı, klorür taşıma direnci ve dökülmeyi önleme olarak üç önemli işlevi yerine getirmiştir.



Şekil 2.9 ECC'nin Hida Tüneli'nde sprej uygulaması (Li, 2019).

Tokyo'daki 27 katlı Glorio-Tower, Yokohama'daki 41 katlı Nabule Yokohama Tower ve Osaka'daki 60 katlı Kitahama Tower bina çekirdeklerinde ECC bağlantı kirişlerine sahiptir. Şekil 2.10'da görülen bu bina tasarımlarında her katta iki veya dört ECC bağlantı kirişi kullanılmıştır.



Şekil 2.10 a) Glorio-Tower, b) Nabule Yokohama Tower ve c) Kitahama Tower (Li, 2019).

Son yıllarda modüler konutlar; hızlı kurulum, düşük maliyet ve işçilik, fabrika üretimi sayesinde yüksek kalite kontrolü olmak üzere yerinde inşaata göre avantajları nedeniyle dikkatleri üzerine çekmektedir. Bunun için donatı veya kaynaklı tel örgü olmadan ince ECC paneller kullanılarak ECC'nin çekme özelliklerinden yararlanılmaktadır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi 1.20 m genişlik, 8.30 m uzunluk ve 50 mm kalınlığa sahip ECC panel daha sonra kafes kirişlere bağlanmaktadır ve yük testleri ile gerekli kontroller de yapılmaktadır (Li, 2019).



Şekil 2.11 Kompozit ECC panelin yük-deplasman testi (Li, 2019).

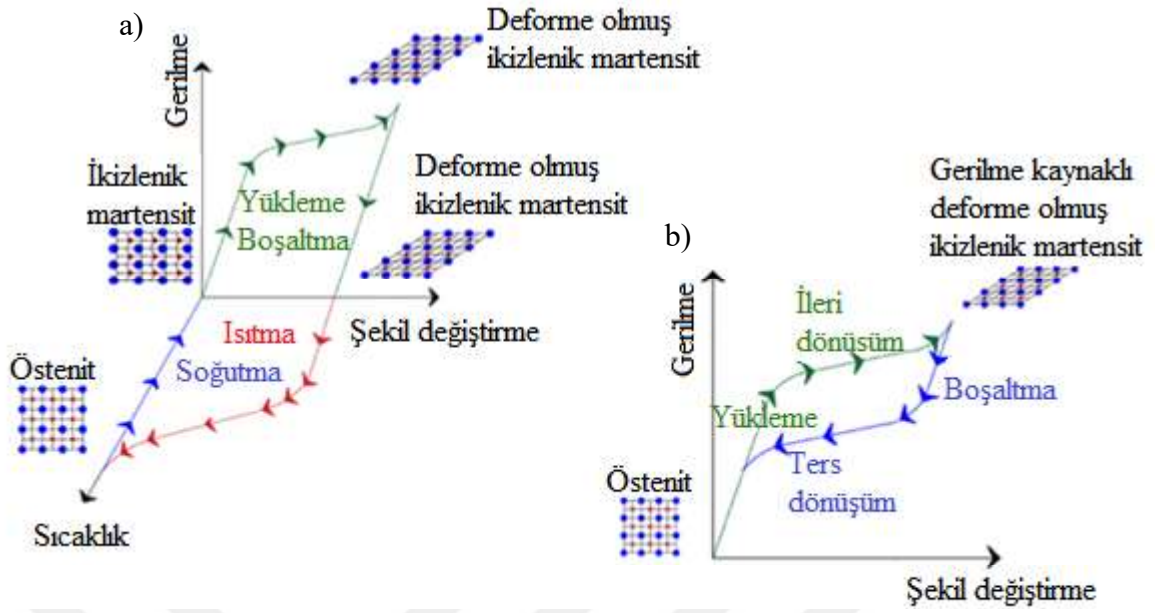
2.2. Şekil Hafızalı Alaşımlar

Depremlere maruz kalan betonarme yapılarda ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Geleneksel betonarme yapılar çökmeye karşı güvenlik için deprem enerjisi dağılımının donatı akması ve elastik olmayan deformasyon ile sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Can güvenliği sağlanmış olmakla birlikte betonarme yapıların deformasyonu hasara ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Günümüzde yapıların sismik tasarımı; gelişmiş deformasyon kapasitesi ve sünekliğe, daha yüksek hasar toleransına ve düzeltilmiş ve/veya azaltılmış kalıcı deformasyonlara sahip sağlam yapısal elemanlara ve sistemlere olan ihtiyacın olduğu performansa dayalı bir yaklaşıma doğru evrilmiştir (Alam ve diğ., 2012). Bir deprem durumunda beton yapının stabilitesi sünekliği ile belirlenir. Diğer bir deyişle yapının sismik bir olaya karşı ayakta kalabilmesi, biriken enerjiyi bertaraf edebilme yeteneğine bağlıdır. Özellikle kiriş-kolon birleşim yerleri gibi kritik yerlerde, birincil takviye ile sağlanabilecek olandan daha fazla süneklik istenir. Kiriş-kolon birleşim yeri betonarme bir yapıda en kritik bölge olarak kabul edilir ve şiddetli depremlerde büyük deformasyonlara eğilimlidir. Bu bölgede büyük elastik olmayan deformasyonlar, sismik enerjinin dağılması ve belirli yerlerde plastik mafsall oluşumu için gereklidir. Enerjiyi dağıtmak için çatlak oluşumu gereklidir, ancak bir tasarım mühendisinin yapının çökmesini önlemek için önlemler alması da gerekir (Shajil ve diğ., 2015).

Çevreden maruz kalınan sıcaklık, ışık, gerilme veya elektrik akımı gibi etkilere yüksek tepkisel davranış alan malzemeler akıllı malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Piezoelektrik malzemeler, faz değişim malzemeleri, şekil hafızalı polimerler ve şekil hafızalı alaşımlar akıllı

malzemeler içerisinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler işlevsel özellikleri sayesinde birçok mühendislik uygulamasında potansiyel kullanım alanı bulmuştur (Dilibal, 2017). Akıllı malzemelerin sivil altyapı sistemlerinde giderek artan uygulamalar bulacağına inanılmaktadır. Bu nedenle araştırmacıların bu potansiyeli keşfedip üstün performans ve daha düşük hizmet ömrü maliyeti, bakım ve onarım gereksinimleri ile verimli, akıllı, esnek ve sürdürülebilir altyapı sağlamak için bu tür akıllı malzeme ve sistemlerin sunduğu fırsatları takip etmeleri önerilmektedir (Ali, 2017). Bu akıllı malzemelerden şekil hafızalı alaşımlar (SMA-shape memory alloy) radyasyon, termo-mekanik veya manyetik varyasyonlar ve elektrikli ısıtma gibi uyaranlara maruz kaldıklarında, büyük elastik olmayan deformasyona uğrama ve deforme olmayan şekline kavuşma yetenekleri ile orijinal şekillerini hatırlayan bir metalik alaşım sınıfıdır (Nehdi ve Ali, 2019). Yük boşaltma veya Joule kuralları sebebiyle bir elektrik devresi oluşturulmasına neden olacak ısıtma sonrasında büyük deformasyon ve önceden tanımlanmış şekle dönme kabiliyetine sahip benzersiz malzemelerdir. SMA'ların bu ayırt edici özellikleri, onları çevrelerindeki değişikliklere yanıt veren ve bunlara uyum sağlayan yapılarda kullanılma potansiyeli olan akıllı malzemeler haline getirmektedir (Otsuka ve Wayman 1998). Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Be, Cu-Sn, Cu-Zn, Fe-Mn-Al-Ni, Fe-Mn-Si-Cr, Fe-Ni-Nb, Fe-Cr-Ni-Mn-Si, Fe-Ni-Co-Al-Ta-B, Mn-Cu, Ti-Ni-Hf, Ni-Ti-Fe, Ni-Ti-Nb, Ni-Ti-Al, Ni-Ti-Cu ve Ni-Ti gibi farklı bileşimlere sahip birçok SMA geliştirilmiştir (Ali, 2017).

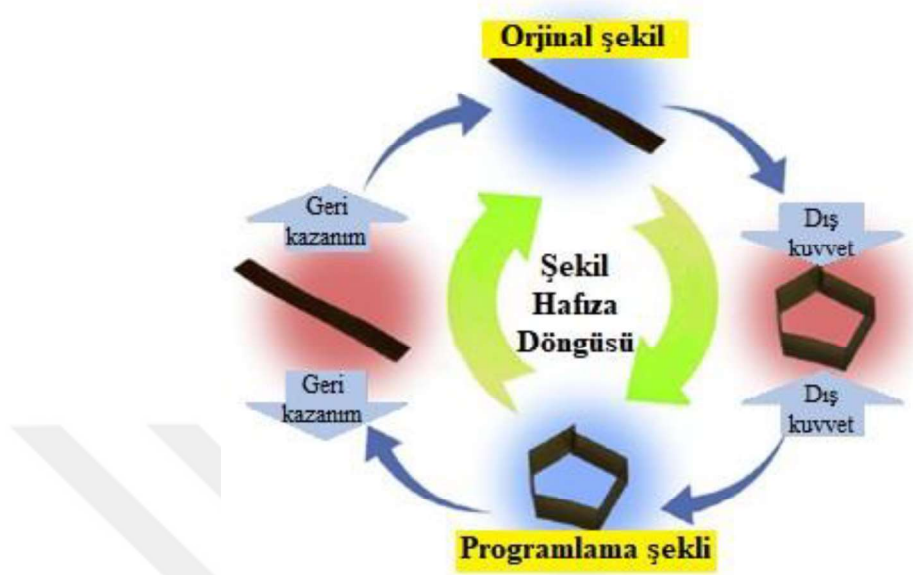
SMA'lar benzersiz özellikleri nedeniyle İnşaat Mühendisliği uygulamalarında giderek daha fazla ilgi duyulan bir akıllı malzeme türüdür. SMA'lar şekil hafıza etkisi ve süper elastik olmak üzere iki gruba ayrılabilir; her iki grup da elastik olmayan bir şekilde deforme olduğunda orijinal şekillerini geri kazanma özelliğine sahiptir. Şekil hafıza etkisi için, şekil geri kazanımı termal aktivasyon sayesinde meydana gelir (Şekil 2.12 a)); oysa süper elastik için şekil geri kazanımı mekanik olarak (stres) meydana gelir (Şekil 2.12 b)). SMA'ların bu eşsiz yetenekleri katıdan katıya faz dönüşümleri ile elde edilir. Ayrıca orijinal şekillerini hatırlayabilen SMA'lar iyi enerji yayma kapasitesi, yüksek korozyon direnci ve uzun yorulma ömrü gibi elverişli özelliklere sahiptir (Sherif ve diğ. 2018).



Şekil 2.12 Şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi ve süper elastiklik özelliği (Sherif ve diğ. 2018).

SMA'ları diğer alaşımlardan farklı kılan bu iki temel özelliğin elde edilmesinde, alaşımların mikroyapılarında düşük sıcaklık fazı (martensit) ile yüksek sıcaklık fazı (östenit, ana faz) arasındaki tersinir termoelastik faz dönüşümü etkilidir (Dilibal, 2017). SMA martensit formunda olduğu zaman kolaylıkla yeni şekline deforme olur. Ancak alaşım onun dönüşüm sıcaklığına ısıtıldığında östenite döner ve büyük bir kuvvetle onun ilk şekline gelir. Bu proses şekil hafızası olarak bilinir. SMA malzemenin martensit (düşük sıcaklık fazı) ve östenit (yüksek sıcaklık fazı) olarak iki farklı faz arasındaki kristal yapısının değişmesine bağlı sıcaklık ve gerilme sayesinde meydana gelir. Faz değişiminin meydana geldiği sıcaklık dönüşüm sıcaklığı olarak adlandırılır. Östenit fazda malzemenin yapısı simetriktir, malzemenin her tanesi dik açıyla küptür. Alaşım soğutulduğunda martensit faza döner ve farklı şekil ile yapı bozulur/daralır. Eğer dış gerilme uygulanırsa alaşım eğilecek ve birbiri ardına gelen duruma deforme olacaktır. Bu halde alaşım dönüşüm sıcaklığının üstünde tekrar ısıtılırsa östenit faz oluşturulacak ve malzemenin yapısı orijinal kübik forma dönüşür. Bu şekil hafıza özelliği Şekil 2.13'te görüldüğü gibi genellikle şekil hafıza döngüsü olarak tanımlanan özel bir mekanik olgudur. Bu şekil hafıza döngüsü iki sıcak aşamadan (kırmızı arka plan) ve iki soğuk aşamadan (mavi arka plan) oluşur ve şekil değişiklikleri sıcak faz sırasında gerçekleşir. İlk olarak, orijinal şekil (düz) ısıtılır ve harici bir kuvvetle özel bir şekle ayarlanabilir. Bu şekil soğuduktan sonra sabitlenebilir. Bu aşamaya programlama süreci, geçici şekle ise programlama şekli denir. Tekrar ısıtıldığında, malzeme orijinal şekline geri dönecek ve belirli bir geri kazanım kuvveti

verecektir. Bu aşamaya da iyileşme süreci denilmektedir (Mu ve diğ., 2018). Özel şekil verilmiş SMA'lara örnek görseller Şekil 2.14'teki gibidir.



Şekil 2.13 Şekil hafıza döngüsü (Mu ve diğ., 2018).



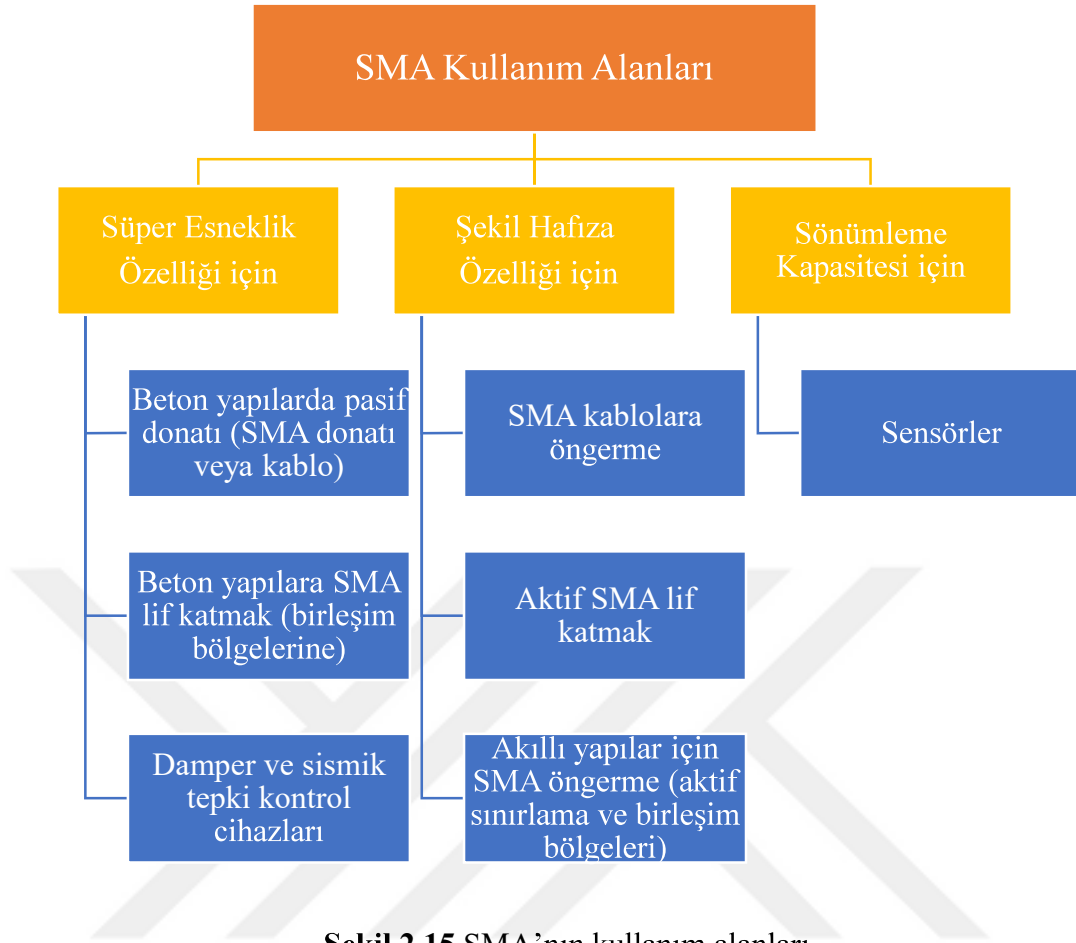
Şekil 2.14 Özel şekil verilmiş SMA örnekleri (Memry Corporation, 2017).

Süper esneklik; SMA'nın büyük inelastik deformasyona maruz kalabilmesi ve yükün kaldırılmasından sonra şeklini geri kazanabilmesi olayını ifade eder. Dış gerilmenin termal aktivasyon olmaksızın artmasında SMA'nın faz değişimi süper esnekliğe veya gerçek olmayan esnekliğe neden olan östenitten martensite doğru meydana gelebilir. Eğer bu deformasyon iyileşmesi engellenirse malzemede mekanik gerilme meydana gelir. Bu iyileşen gerilme sünme, büzülme ve termal şekil değiştirmenin büyümesine yönelik direncini geliştirmek için beton yapıda kuvvetleri göstermede kullanılabilir. Süper esneklik özelliğinin oluşu sayesinde

SMA'lar inşaat uygulamalarında pasif yapı kontrolü, izolasyon aletleri ve enerji dağılımı cihazları olarak kullanılabilir (Kumar ve diğ., 2016).

Yapı mühendisliği açısından SMA'ların şekil hafıza etkisi ve süper esneklik özellikleriyle birlikte sönümleme kapasitesi özelliği de vardır. Şekil hafıza etkisi SMA'ların ısıtma ile önceden tanımlanmış bir şekle geri dönebildiklerini ifade ederken süper esneklik SMA'ların yüksek elastik olmayan deformasyonlara uğrayabilmelerini ve bu deformasyonlara rağmen yük boşaltma sonrasında orijinal şekillerine dönebileceklerini ifade eder. Bahsedilen ve detaylandırılan bu iki özelliğe bağlı üçüncü özellik, mekanik enerjiyi termal enerjiye dönüştürme kapasitesinden ve dolayısıyla bir yapının hareketlerini veya titreşimlerini azaltma olasılığından kaynaklanmaktadır. Birleşim bölgeleri ve birleşim elemanları genel olarak, bir depremdeki yapıların doğru davranışı için kilit unsurlardır. Bu nedenle süper elastik alaşımların sönümleme etkisinden ve kendi kendini yeniden merkezleme kapasitelerinden yararlanan birleşimler tasarlanmıştır. Tüm bu özellikler, aslında, SMA'ların martensitik dönüşüm denilen tersinir faz dönüşümünün sonucudur (Cladera ve diğ., 2014).

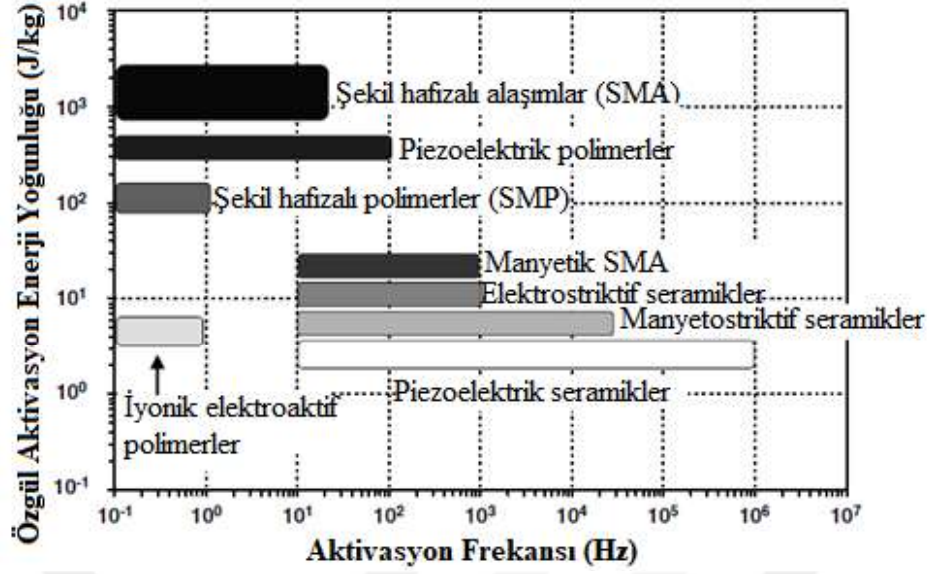
Adolf Martens tarafından martensitin keşfi 1890'larda şekil hafızalı alaşımların nihai keşfine doğru büyük bir adımdır. Martensitik dönüşüm, 1900'lerin başında belki de en çok çalışılan metalurjik fenomendir. Martensitin tersinir dönüşümünü açıklayan termoelastik martensitik dönüşüm kavramı, 1949'da CuZn ve CuAl alaşımlarındaki termal olarak tersinir martensitik yapının deneysel gözlemlerine dayanarak ortaya atılmıştır. 1953'e gelindiğinde, InTl ve CuZn gibi diğer alaşımlarda termoelastik martensitik dönüşümün meydana geldiği gösterilmiştir (Memry Corporation, 2017). Şekil hafıza etkisi de ilk olarak 1951 yılında altın (Au) ve kadmiyum (Cd) alaşımında bulunmuştur. Bununla birlikte, titanyum (Ti) ve nikel (Ni) bazlı SMA malzemeleri daha fazla şekil hafıza etkisi sağladığı için otomobiller, havacılık-uzay ve robotik gibi çeşitli mühendislik ve bilim alanlarında daha aktif olarak uygulanmıştır (Lee ve diğ., 2018). Ayrıca mevcut SMA'lar arasında nispeten düşük maliyeti nedeniyle NiTi (nitinol) en yaygın kullanılan tiplerden biridir (Saïdi ve diğ., 2007). SMA'ların bu üç temel ve önemli özellikleri İnşaat Mühendisliği alanında da birçok yerde kullanılmaktadır. Bu özelliklerden yararlanıldığı kullanım alanları Şekil 2.15'te görüldüğü gibi şematikleştirilebilmektedir.



Şekil 2.15 SMA'nın kullanım alanları.

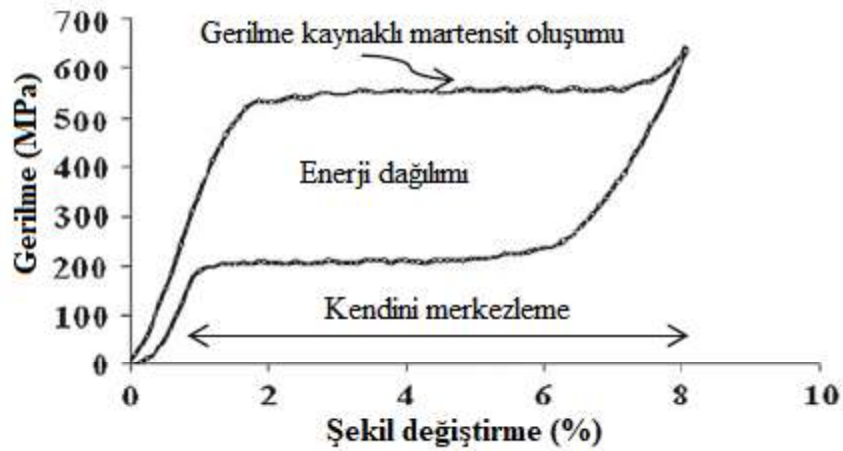
SMA'ların yük altındaki mekanik davranışını etkileyen malzeme esaslı temel parametreler; malzemenin kimyasal kompozisyonundaki nikel oranı, uygulanan sıcak-soğuk şekil verme işlemi (haddeleme, tel çekme, dövme vb.), ısıtma işlemleri ve matris yapıdaki çökelti oranı şeklinde sıralanabilir (Dilibal, 2017). Mesela NiTi alaşımı daha yüksek akma ve nihai dayanımların yanı sıra daha iyi kopma uzaması ve geri kazanılabilir gerilmeye sahip olsa da NiTi SMA'ların özellikleri büyük ölçüde değişebilir. Ni/Ti oranındaki küçük bir değişiklik veya üretim sürecindeki küçük değişiklikler aynı alaşım için bile büyük farklılıklar yaratabilir. Örneğin üçlü bir alaşım oluşturmak için NiTi'ye üçüncü bir metalin eklenmesi, belirli uygulamalar için arzu edilen özelliklerle sonuçlanabilir. Bakır bazlı alaşım (NiTiCu) faz dönüşümleriyle ilişkili daha düşük histerezise sahiptir, bu da onu aktüatör uygulamaları için daha iyi bir seçim haline getirir. Benzer şekilde niobium bazlı alaşım (NiTiNb) büyük sıcaklık değişikliklerine minimum yanıtla ilişkili daha geniş termal histerezise sahiptir ve birleştirme uygulamaları için tercih edilir. NiTi'ye paladyum, platin, hafniyum ve altın gibi üçüncü bir element eklenerek yüksek sıcaklıklarda çalışan uygulamalar için SMA'lar elde etmek mümkündür. Belirli bir uygulama

Şekil hafızalı malzemelerin benzersiz bir sınıfı olan şekil hafızalı alaşımlar belirli koşullar altında, uygulanan mekanik döngüsel yüklemeye maruz kaldıklarında tersinir histeretik bir şekil değişikliğine girerek mekanik enerjiyi emebilir ve dağıtabilir. SMA'ların bu özellikleri onları algılama, darbe emilimi ve titreşim sönümleme uygulamaları için popüler hale getirmektedir. Ayrıca SMA'lar Şekil 2.17'de görüldüğü gibi, yüksek özgül aktivasyon enerji yoğunluğunda düşük aktivasyon frekans tepkisi sergiler. Son zamanlarda manyetik şekil hafızalı alaşımlar olarak adlandırılan bir SMA sınıfı da daha yüksek aktivasyon frekansları elde edebilmek için araştırılmaktadır (Kumar ve Lagoudas, 2008).



Şekil 2.17 Bazı malzemelerin özgül aktivasyon enerjilerinin aktivasyon frekansı ile ilişkisi (Kumar ve Lagoudas, 2008).

SMA liflerde yükleme sırasında gerilme kaynaklı dönüşümün başlaması ve boşaltma sırasında bunun tersine dönmesi ile ilişkili görünür akma noktasındaki eşik gerilme değerlerinin aynı olmadığı ve yanıt eğrisinde büyük bir histerezise neden olduğu görülmektedir (Şekil 2.18). Gerilme-şekil değiştirme eğrisi tarafından çevrelenen alan, dağıtılan enerjiye eşittir. Böyle bir histerezisin varlığının, bir yükleme-boşaltma işleminde önemli bir enerji dağılımına yol açtığı belirtilmiştir. Bu, psödo-elastik bir alaşımın sismik titreşimlere eğilimli yapılara dahil edilmek üzere etkili bir sünek ve sönümlenme malzemesi olarak işlev görebileceği beklentisine yol açmaktadır (Shajil ve diğ., 2013).



Şekil 2.18 0.5 mm çapındaki NiTi kablonun 31 °C'deki pseudo elastik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Shajil ve diğ., 2013).

Çarpma yüklemesi altında, betonarme elemanların hasarı genellikle yapıların kısmen veya tamamen çökmesine neden olarak önemli ekonomik ve insan yaşamı kayıplarına neden olmuştur. Bu nedenle, nihai çatlak boyutlarını en aza indirgeyerek ve kalıcı deformasyonları iyileştirerek/azaltarak, deformasyon kapasitesini, sünekliği, hasar toleransını ve yapısal beton elemanlarının kısıtlamasını artırabilen yenilikçi malzemeler aranmaktadır. Böyle gelişmiş bir performans elde etmek için, yapısal elemanlarda geleneksel betonarme çeliğinin tamamen veya kısmi yer değiştirilmesi olarak şekil hafızalı alaşım (SMA) çubukları kullanmak potansiyel bir tasarıdır. Ancak büyük çaplı SMA çubuklarının kullanılmasının küçük çaplı SMA tellere kıyasla SMA'nın histeretik alanını ve enerjiyi dağıtma yeteneğini azalttığı bulunmuştur. Bu, küçük çaplı tellere göre daha bozuk martensit kristal yapısının birikmesine ve daha büyük çaplı çubuklardaki içsel kusurlara bağlanmıştır. Ayrıca kısa liflerin üç boyutta daha iyi dağılımı, tek yönlü çubukların aksine birçok yönde çatlak kapanmasını kolaylaştırabilir. İki ya da daha fazla lif tipi ve boyutu ile hibrit lif kullanma konusundaki artan ilginin arkasındaki fikir, farklı elastik özellikleri ve/veya çeşitli boyutları ile sinerjistik etkiler yaratabilmeleridir. Çünkü uzun lifler büyük çatlakların büyümesini engellerken, mikro lifler mikro çatlakların büyümesini kontrol edebilir (Ali ve diğ., 2017).

Betonun kırılgan yapısı, çeşitli altyapı türlerinin hizmet ömrünü önemli ölçüde kısaltır. Hizmet ömrünü uzatmak için, hızlı bozulmayı önleme çözümlerinden biri olarak çatlak kendi kendini onaran betonun geliştirilmesi ve kullanılması konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Mevcut çatlak kendi kendini iyileştirme yöntemleri çoğunlukla çatlaklar içinde kalsiyum karbonatın çökmesini kullanır. Genişletici mineraller ve kimyasallar içeren özel karışımlar kullanılarak ve/veya çok ince çatlak genişlikleri gibi uygun iyileştirme koşulları için kısa lifler eklenerek, çatlağın kendi kendine iyileşmesi nispeten kısa bir süre içinde (3-7 gün) başarılı bir şekilde elde edilir. Bununla birlikte, kendi kendine çatlak iyileştirme yöntemleri, özellikle kentsel alanlarda, beton altyapısının acil onarımı için uygulanamaz, çünkü mevcut çatlakların tamamen iyileşmesi için en az birkaç gün gerekir. Kalsiyum karbonatın hızlı oluşumu çoğunlukla bir su kaynağının yanı sıra uygun hareketsiz çatlak koşulları gerektirir (Kim ve diğ., 2016a). Beton inşaat altyapısının erken bozulmasını önlemek için önleyici tedbirler olarak kısa liflerin eklenmesiyle betonun çekme dayanımının ve sünekliğinin artırılması, öngerilme stresi uygulamak ve betona çatlama iyileştirici katkı maddelerinin dahil edilmesi gösterilebilir. Ancak, bu yöntemlerin hala sınırlamaları vardır. Betona kısa liflerin eklenmesi çatlak direncini arttırabilse de önceden açılmış çatlakları kapatmak zordur. Çatlak direncini arttırmak için

öngermeli beton inşaat altyapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak ilk rötre çatlaklarından kaçınmak hala zordur. Kendi kendini onaran betonun da hareketsiz yük ve kristal kalsiyum karbonatın çökmesi için sürekli su sağlama koşulları nedeniyle sınırlı uygulamaları vardır (Kim ve diğ., 2016b).

Betonda kullanılan en yaygın lif türlerinden biri, betonun mekanik performansını önemli ölçüde artıran çelik liflerdir. Çelik lifler sıklıkla daha iyi bağ sağlamak ve lifler ile beton matris arasındaki bağ kuvvetini artırmak için kancalı uçlarla yapılır. Çelik lifler beton dayanıklılığını, eğilme tokluğunu ve mukavemetini önemli ölçüde artırır. İlk çatlağın oluşmasından sonra çelik lifler deformasyon enerjisini emmeye başlar ve gerilme sertleşmesi davranışı sergileyerek çatlak ilerlemesini azaltmaya yardımcı olur. Bununla birlikte, çelik lifler akmanın ötesinde kalıcı olarak deforme olur ve halihazırda oluşmuş çatlakları azaltma kapasitesine sahip değildir. Bunun için beton çatlak kontrolünün iyileştirilmesi için yeni teknikler geliştirilmektedir. Çatlakların kendi kendini onarma yeteneklerini kolaylaştırmak için şekil hafızalı alaşımlar gibi akıllı malzemelerin betona ve kompozitlere uygulanması araştırılmaktadır (Khakimova ve diğ., 2015). Çelik ve Ni-Ti SMA'nın fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2.3'te görüldüğü gibidir. Farklı malzemelerin farklı teknikler ile betonda/kompozitte kullanılması gerekli özellik ve davranışı karşılayabilmesi amacıyla değerlendirilmektedir. Çünkü çimento esaslı kompozitlere liflerin eklenmesi süneklik, enerji dağılımı ve çatlamaya karşı direnç sağlayabilmesine rağmen malzeme tekrarlı yüklemeye maruz kaldığında kalıcı deformasyonları en aza indirmek ve çatlak kapatma yeteneklerini sağlamak da önemlidir (Sherif ve diğ., 2018).

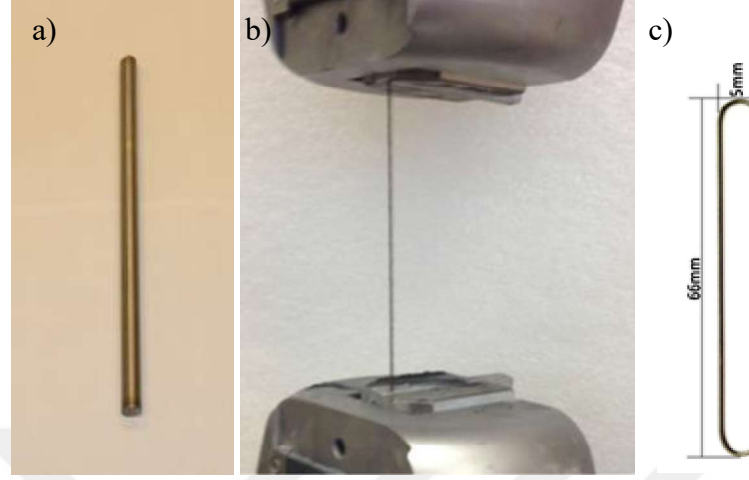
Tablo 2.3 Nitinol ve paslanmaz çeliğin tipik fiziksel özellikleri (Memry Corporation, 2017).

	Nitinol	Paslanmaz Çelik
Erime Noktası (°C)	1310	1450
Yoğunluk (g/cm ³)	6.5	8
Özgül Elektriksel Direnç (μΩcm)	76 (M) / 82 (A)	72
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	6.6 (M) / 11 (A)	17.3
Isıl İletkenlik (W/(m °C))	18	16.3
Elastisite Modülü (GPa)	40 (M) / 75 (A)	193
Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	1100 - 1500	620 - 2400

*Çekme dayanımı ısıtılma ve alaşıma bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir.

** (M) = Martensit, (A) = Östenit

Literatür çalışmaları incelendiğinde SMA beton veya kompozitlerde Şekil 2.19’da görüldüğü gibi donatı olarak, kablo olarak veya lif olarak kullanılmıştır.

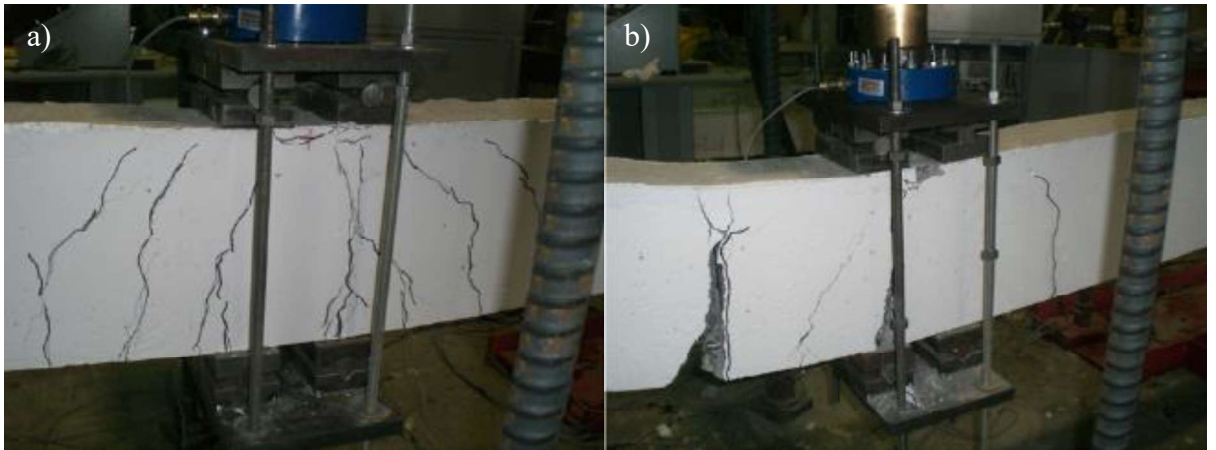


Şekil 2.19 SMA’nın a) donatı olarak (Abdulridha ve diğ., 2013), b) kablo olarak (Li ve diğ., 2015) ve c) lif olarak (Aslani ve diğ., 2019) kullanım örnekleri.

SMA’ların beton kirişlerde donatı veya kablo olarak kullanıldığı çalışmalarda, SMA’ların şekil hafıza etkisi ile betonda bir öngerme kuvveti ürettiği bilinmektedir. Bu gibi durumlarda, SMA donatılar tam geri kazanım için östenite dönüşümün tamamlandığı sıcaklığın üzerine önceden gerilmiş ve ısıtılmış olarak kullanılır. Bunun için betona gömülü SMA çubuklar beton dışına uzatılarak elektronik güç kablolarına bağlanmaktadır. Ancak bu durum gerçek bir durumu yansıtmamaktadır. Çünkü montaj sorunlarına neden olduğu için açıkta kalan SMA donatılarla bir beton kiriş üretilemez. Beton kolonların etrafındaki SMA’ları ısıtmak için bir ısıtma ceketini kullanıldığında da ısıtma ceketlerinin SMA’ların sıcaklığını artırmada etkili olmadığı görülmüştür. Hidratasyon ısısı da beton yapılarıdaki SMA’ların sıcaklığını yükselterek şekil hafıza etkisini ve toparlanma gerilmesini tetikleyebilir. Betonun iç sıcaklığını kontrol etmek de kolay değildir; çünkü yapının boyutu, çimento tipi, su/çimento oranı, ortam sıcaklığı vb. birçok faktöre bağlıdır. Genel olarak betonun ölçülen iç sıcaklığının, kürlemenin başlamasından 20 saat sonra 70 °C’ye ulaştığı belirtilmektedir. Hidrasyon ısısı da betonda kullanılan SMA donatılar için geri kazanım gerilmesinin tetikleme potansiyeline sahiptir (Choi ve diğ., 2015a).

Betonun içinde SMA’nın donatı olarak kullanılan çalışmalar incelendiğinde; Saiidi ve diğ. (2007) tekrarlı yükler altında süper elastik SMA donatı ilave edilmiş beton kirişlerin davranışları üzerine yaptıkları çalışmalarında, Ni-Ti ilaveli kirişlerin orta kalıcı deplasmanının çelik takviyeli elemanların beşte birinden daha az olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte

kullanılan alaşımin düşük elastisite modülü, betonarme elemanların rijitliğinde bir azalma meydana getirmiştir. Yapılan araştırmalar SMA'lar ile yüksek dirençli çelik veya karbon lif ilaveli polimerler ilave edilmiş hibrit elemanlarda daha büyük bir rijitliğin ve kısmi deformasyon iyileşmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Alam ve diğ. (2012), çelik ve SMA beton çerçevelerin sünekliğini ve sismik dayanım fazlalığını analitik olarak incelemiştir. Depremde 3, 6 ve 8 katlı binaların davranışlarını incelemek için bir durumda tamamen çelik donatılarla, diğer bir durumda tamamen SMA'larla betonarme çerçeveler yapılmıştır ve son durumda da çerçevenin çelikle güçlendirildiği, SMA'ların plastik mafsallarda kullanıldığı hibrit bir çözüm kullanılmıştır. Sonuçlar, incelenen binanın kat sayısına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. 6 kata kadar, süneklik ve dayanım fazlalığı için en iyi sonuçlar SMA'lı binadan, ardından SMA-çelik karışık binadan ve son olarak da geleneksel çelik binadan elde edilmiştir. Öte yandan 8 katlı bina için, geleneksel betonarme çerçeveli bina SMA'ya göre daha büyük elastisite modülü nedeniyle daha iyi davranış göstermiştir. Bu nedenle, daha büyük elastisite modüllü bir SMA kullanımının, depremde 8 veya daha yüksek katlı binaların davranışını iyileştirebildiği düşünülmektedir. Abdulridha ve diğ. (2013) de süper elastik SMA donatı ile güçlendirilmiş betonun yapısal performansını araştırmıştır. Şekil 2.20'de görüldüğü gibi, kritik bölgede SMA donatı veya geleneksel donatı ile güçlendirilmiş basit mesnetli beton kirişler tekil, çevrimsel ve tersinir çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, plastik deformasyonu düzeltmek için SMA donatı ilaveli kirişlerin üstün kapasitesini göstermiştir. SMA donatı ilaveli kirişler geleneksel donatılı kirişlerle karşılaştırıldığında yer değiştirme sünekliğini ve dayanım kapasitesini devam ettirmiştir.



Şekil 2.20 a) SMA donatı ilaveli ve b) geleneksel donatı ilaveli beton kirişler (Abdulridha ve diğ., 2013).

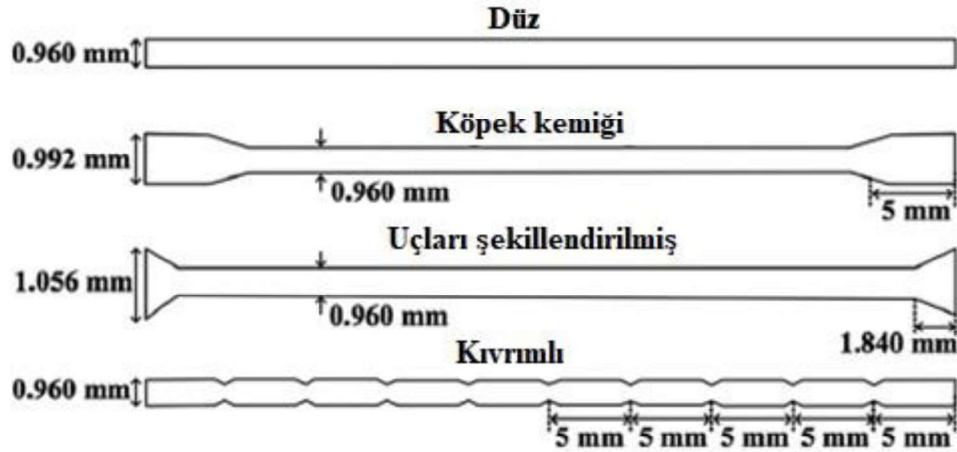
SMA'nın beton içinde kablo olarak kullanılan çalışmaları incelendiğinde; Wierschem ve Andrawes (2010) FRP (fiber takviyeli polimer) ile güçlendirilmiş beton yapıların süneklik ve sönümlenme kapasitesini geliştirmek amacıyla süper elastik şekil hafızalı alaşım (SMA) kablolarla güçlendirilmiş SMA-FRP kompozit türünün uygulamasını incelemiştir. Çünkü lineer elastik davranışlarından dolayı FRP takviye çubukları yapısal sönümlenme veya dinamik uygulamalar için dikkate alınmamaktadır. Sonuçlar FRP takviyesinin tipik elastik özelliğini korurken, beton yapıların sünekliğini ve sönümlenmesini iyileştirmek için SMA-FRP takviyesinin önemli bir potansiyel olduğunu göstermiştir. Li ve diğ. (2015) süper elastik NiTi SMA kabloların tasarlanmış çimento esaslı kompozitlere (ECC) ilave eden bir kompozit malzeme sisteminin performansını araştırmıştır. Normal betona iki adet çelik donatı, normal ECC, normal betona ve ECC'ye yerleştirilen altı adet önceden gerilmiş SMA kablolar ile oluşturulmuş 4 farklı türde küçük ölçekli kiriş numunelerinde tekrarlı eğilme yüklemesi altında deneyler gerçekleştirilmiştir. SMA kablolar ile güçlendirilmiş ECC numuneler betonarme ve SMA ilaveli beton kirişlerin aksine döngüsel eğilme yüklemesi altında olağanüstü enerji dağıtma kapasitesi, minimum deformasyon ve hasarın tamamen kendi kendine iyileşmesini sergilemiştir. Ayrıca ECC'deki dağıtılmış mikro çatlama hasar mekanizması, yük boşaltma sırasında hasarın yeterli ve güvenilir bir şekilde geri kazanılması için kritik öneme sahiptir.

Khakimova ve diğ. (2015) ise rastgele dağılmış şekil hafızalı alaşım liflerinin betonda kullanımını incelemiştir. Bunun için lif ilavesi yapılmayan numuneler, çelik lif ilaveli numuneler ve çelik lif ile yer değiştirerek SMA lif ilaveli numuneler yapılmıştır. 0.9 mm çapında ve 60 mm uzunluğundaki çelik lifler hacimce %0.6 oranında kullanılmıştır. Diğer numuneler için çelik liflerin sırasıyla %25, %50 ve %100'ü NiTi SMA lifleri ile değiştirilmiştir. Kullanılan NiTi SMA lifler 0.58 mm çapa ve 60 mm uzunluğa sahiptir. Çekme testi sonuçları, SMA lif yüzdesinin artmasının çekme mukavemetini azalttığını göstermiştir. Bu durum SMA liflerin daha düşük çekme mukavemetine ve düz uçlarına bağlanmıştır. Bu çalışma SMA liflerin betonda çatlak genişliğini ve gelişimini azalttığını, ancak kalıcı deformasyon geri kazanımında önemli bir gelişme olmadığını belirtmiştir. Shajil ve diğ. (2015) de rastgele dağıtılmış psödoelastik SMA (PESMA) lifleri tarafından elde edilen kendi kendine merkezleme kabiliyetini, kirişlerin sünekliğini ve kiriş-kolon birleşim bölgesini değerlendirmek için çeşitli deneyler ve analizler yapmıştır. Çelik ve PESMA lifli prizma numuneler ve özel olarak tasarlanmış prototip kiriş-kolon bağlantı numuneleri üzerinde yapılan üç noktalı yükleme

deneyleri, PESMA lifli kompozitin süneklik ve kendi kendini merkezleme kabiliyetinin çelik liften çok daha üstün olduğunu göstermiştir.

SMA'ların lif olarak çimento harç numuneleri içinde kullanılan çalışmalar incelendiğinde; Shajil ve diğ. (2013) SMA liflerin güçlü döngüsel yükleme koşulları altında büyük geri kazanılabilir deformasyonlarını (kendi kendine merkezleme yeteneği) belirlemek için SMA lif takviyeli çimento harç kirişlerde deneysel bir çalışma yürütmüştür. Çelik lifli kirişler 0.1 kendi kendini yeniden merkezleme faktörü gösterirken, bu faktör Ni-Ti lifli kirişlerde 0.7'ye yükselmiştir ve SMA lifler çelik liflere alternatif olarak büyük bir potansiyel göstermiştir.

Choi ve diğ. (2015b), şekil hafıza etkili NiTi ve NiTiNb SMA kısa lifli çimento harç kirişlerinin çatlak kapatma yeteneklerini araştırmak için üç noktalı eğilme testleri yapmıştır. Kullanılan SMA lifler 30 mm uzunluğa sahip ve düz, köpek kemiği ve kağıt sargılı köpek kemiği şeklindedir. Beş adet SMA lif, kirişlerin alt merkezine 10 mm derinliğinde ve 1 mm kalınlığında yapay bir çatlak ile yerleştirilmiştir. Çatlak yüzeylerini enjeksiyon kullanarak birleştirmek için epoksi kullanılmıştır ve çatlaklardaki SMA lifleri ısıtmak için de bir sıcak hava tabancası kullanılmıştır. Köpek kemiği şekilli liflerin daha yüksek aderans dayanımına sahip olduğu, harca daha iyi bağlanmaya izin verdiği ve daha büyük çatlak kapama kapasitesi gösterdiği sonucuna varılmıştır. Kim ve diğ. (2016a) de harç matrisine gömülmüş farklı biçimde şekillendirilmiş şekil hafızalı alaşım liflerin kendi kendine çatlak kapatma kapasitesi geliştirmek için sıyrılma direncini incelemiştir. Bu çalışmalarında Şekil 2.21'deki gibi farklı şekillerdeki Ni-Ti ve Ni-Ti-Nb SMA lifler kullanılmıştır. Kopma direnci, farklı şekillerdeki şekil hafızalı alaşım lifler için, düz şekilli şekil hafızalı alaşım liflerden genel olarak daha yüksektir. Farklı biçimde şekillendirilmiş şekil hafızalı alaşım lifler arasında ise köpek kemiği şeklindeki lifler, ısıtılma işleminden sonra bağ kuvvetinde en yüksek artışı göstermiştir. Ayrıca farklı biçimlerde şekillendirilmiş alaşımlarda Ni-Ti-Nb alaşımın çekme direnci daha yüksekken, düz şekilli alaşımlarda ilişki tersine dönmüştür.

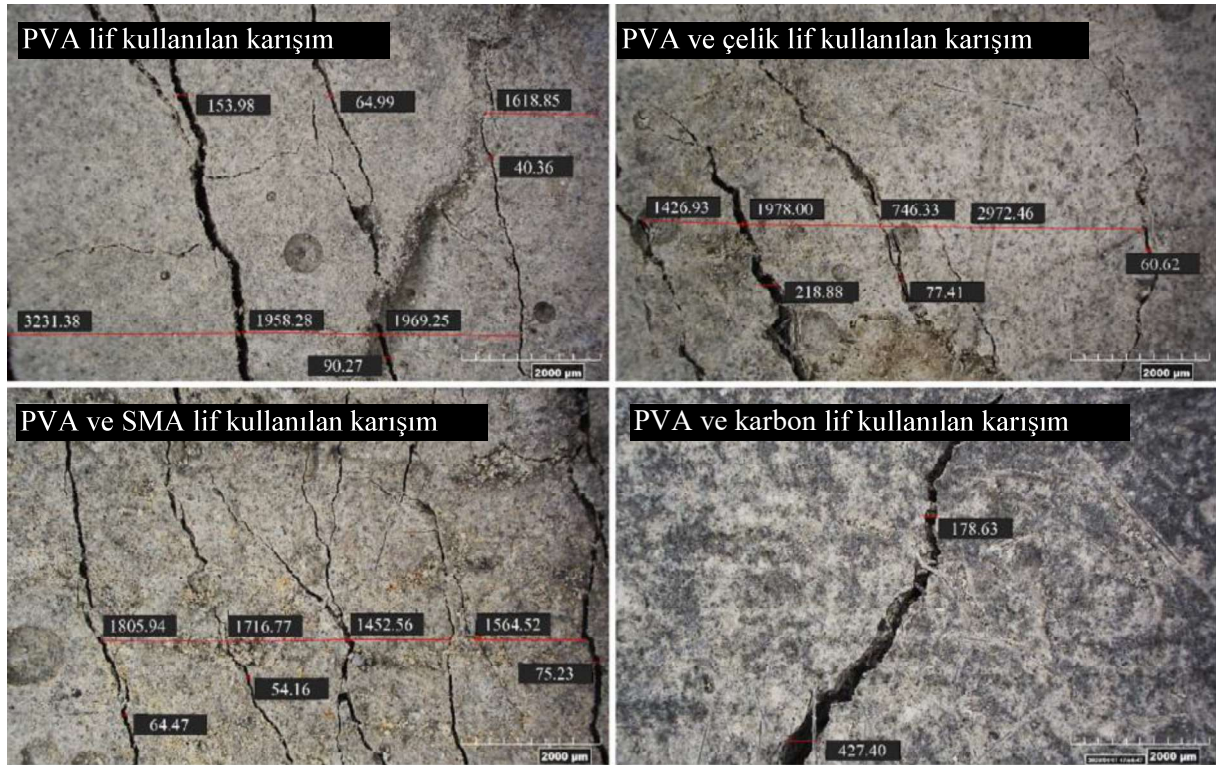


Şekil 2.21 Farklı şekillerdeki SMA lifler (Kim ve diğ., 2016a).

Sherif ve diğ. (2018) yaptığı çalışmada, rasgele dağıtılmış süper elastik şekil hafızalı alaşımların geleneksel lif takviyeli çimento esaslı kompozitlere uygun bir alternatif olarak etkisini incelemek için, değişen lif hacim oranına sahip NiTi şekil hafızalı lif takviyeli harç kiriş numuneleri hazırlamış ve tekrarlı eğilme yüklemesi altında testler gerçekleştirmiştir. 20 mm ve 30 mm uzunluğundaki lif ilaveli numunelerde yapılan test sonuçları, harç kompozitlere şekil hafızalı alaşım liflerinin eklenmesinin büyük deformasyon seviyelerinde yeniden merkezleme ve çatlak geri kazanım yetenekleri sağlarken eğilme mukavemetini ve sünekliği arttırabildiğini göstermektedir. Lee ve diğ. (2018) ayrı ayrı NiTi ve NiTiNb şekil hafızalı alaşım (SMA) lifleri ile rastgele güçlendirilmiş çimento harcı kirişlerin eğilme deneyleri ile SMA liflerin şekil hafıza etkisinin aktivasyonu ile indüklenen çatlak kapatma performansını değerlendirmiştir. Kapalı eğilme çatlaklarının miktarı artan lif içeriği ile artmış, çimento esaslı kompozit kirişlerdeki NiTi ve NiTiNb liflerindeki her %1 artış için sırasıyla yaklaşık 0.36 ve 0.06 MPa çatlak kapatma gerilimi üretilebileceği elde edilmiştir.

Dehghani ve Aslani (2020) deformasyon sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozitlerde SMA, çelik ve karbon liflerin taze, mekanik ve elektriksel özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. SMA lifler ve çelik lifler kullanılarak yapılan karışımların kompozitin eğilme performansını önemli ölçüde arttırdığı, ancak bazı lif miktarları için kompozitin basınç özelliklerinde bir azalma meydana geldiği bulunmuştur. Karbon liflerin ise kompozitin eğilme performansı üzerinde herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığı, ancak iletken bir kompozit geliştirmek için hacimce %0.2 karbon lif içeriğinin optimum karbon lif içeriği olduğu belirtilmiştir. Üretilen kompozitlerin kullanılan liflere göre çatlak davranışı da Şekil 2.22’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Kim ve diğ. (2016b) de şekil hafızalı alaşım (SMA) lif takviyeli

çimento esaslı kompozitlerin (SMA-FRCC) kendinden öngerme ve çatlak kapatma özelliklerini geliştirmek için yaptıkları çalışmalarında, 55 MPa basınç dayanımına sahip bir harç matrisine %1.5 hacim içeriği ile iki tip (NiTi ve NiTiNb) SMA lif eklemiştir. SMA-FRCC'lerin çekme numuneleri üzerinde 10 dakikalık ısıtıl işleminden sonra, numunenin uzunluğunun şekil hafızası etkilerinden dolayı belirgin şekilde kısaldığını ve bunun da sonucu olarak kompozitte öngerme etkileri üretildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca ısıtıl işlem ile şekil hafızası etkilerinden dolayı elastisite modülünde önemli artışlar da elde edilmiştir.



Şekil 2.22 Farklı lifler ile üretilen çimento esaslı kompozitlerdeki çatlak davranışı (Dehghani ve Aslani, 2020).

Aslani ve diğ. (2019) ise SMA lif ilavesinin kendiliğinden yerleşen betonun (SCC) taze ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırıp polipropilen (PP) lif ve çelik lif ilaveli SCC ile karşılaştırmıştır. Bunun için çökme-yayımla ve J halkası olmak üzere taze beton özellik testleri ile basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe mukavemeti olmak üzere mekanik özellik testleri gerçekleştirilmiştir. SMA lif takviyeli SCC, PP ve çelik lif ilaveli SCC'ye kıyasla olağanüstü taze beton özellikleri ve sünek performans sergilemiştir. Bunun nedeni de SMA liflerin olağanüstü nihai gerilme mukavemeti ve süper elastik özellikler sunmasıdır. İlk çatlak gelişimini geciktirmiş ve çatlak aralığı genişliğini daraltmıştır, bu da hem

mekanik deneylerde sünek performansı hem de darbe yükünde dinamik direnci artıran enerji dağılımı ile sonuçlanmıştır.

2.3. SMA Lif Kullanılmış ECC

İnşaat mühendisliği yapılarında şekil hafızalı alaşımların kullanımının etkilerinin araştırılması, çoğunlukla normal betonda veya harç karışımlarda SMA donatı, kablo veya lif şeklinde kullanan birçok araştırmacı tarafından sunulmuştur. Bununla birlikte, bu tür malzemenin kısa lifler şeklinde tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde kullanılmasıyla ilgili araştırmalar son derece sınırlıdır.

Ali ve Nehdi (2016a) toplam lif oranını %2 sabit tutarak yaptıkları çalışmalarında, PVA ve SMA liflerin bir kombinasyonunun kullanılması ile (%1.5 PVA-%0.5 SMA) kompozitin basınç dayanımında hafif bir azalış (%3.6) gözlemlemişken, bu çalışma eğilme kapasitesinin lif kullanılmaması durumuna göre % 144'e kadar arttırılabildiğini belirtmektedir. Sadece PVA kullanılması ve bir kısmının SMA ile yer değiştirmesi durumu için ise SMA ilavesi ile %6.4 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Çalışmalarında 8 mm uzunluğunda ve 39 µm çapında PVA lif ile 16 mm uzunluğunda ve 625 µm çapında Ni-Ti SMA kullanılmıştır. Ayrıca, ECC karışımına kıyasla kompozite bu fiberlerin dahil edilmesinden dolayı işlenebilirlikte genel bir azalma gözlemlenmiştir. Ali ve Nehdi (2016b) yaptıkları diğer çalışmalarında PVA lif yüzdesini sabit (%2) tutarak %0.5, %1 ve %1.5 NiTi-SMA lif ilavesi ile üretilen ECC'lerin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Deneysel sonuçlar bu liflerin beraber kullanılması ile işlenebilirlikte genel bir azalmayı, basınç dayanımında hafif bir artışı veya hiç artış olmadığını, eğilme kapasitesinin ise %39'a kadar arttırılabileceğini göstermiştir. Test edilen ECC karışımlar arasında %2 PVA ve %1 NiTi-SMA ile yapılan kompozitin en iyi mekanik performansı sunduğu belirtilmektedir.

Nehdi ve Ali (2019) şekil hafızalı alaşım ve polivinil alkol kısa lifler içeren ECC'leri ağırlık düşürme darbe yüklemesine tabi tutmuştur. 100 mm çapa ve 50 mm yüksekliğe sahip silindirik numuneler üzerinde yapılan deneyler ile kompozitin çarpma davranışının sayısal simülasyonu gerçekleştirilmiş ve model tahminleri yapılmıştır. Deney sonuçları kompozite SMA liflerin dahil edilmesinin üstün darbe direnci sağladığını göstermiştir. SMA liflere şekil hafıza etkisi için deneyden önce 3 dk, 35 mm mesafeden ısı tabancası ile ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Isıtılma işlemi sırasında PVA liflerde hasar meydana gelmesine rağmen, kompozitlerin enerji emme

kapasitesi artmıştır. Hibrit kompozitin üstün darbe performansı, kritik altyapı varlıklarının patlamalara ve çarpma olaylarına karşı güvenliğini artırma potansiyeline sahip koruyucu yapıların inşası için onu güçlü bir rakip haline getirmektedir.

Chen ve diğ. (2022) SMA lif içeriğinin ve ön yükleme seviyesinin SMA-ECC'nin kendi kendini iyileştirme özellikleri üzerindeki etkisini iki aşamalı dört noktalı bir eğilme testi ile incelemiştir. Sonuçlar ilk çatlakların genişliğinin artmasıyla çatlakların iyileşme etkinliğinin azaldığını göstermiştir. Genişliği 50 μm 'den az olan çatlaklar SMA-ECC'de iyileştirilebilirken, genişliği 200 μm 'den büyük olan çatlaklar iyileşme için üst sınır olarak değerlendirilmiştir. Çatlak kapatma açısından kendi kendine iyileşmenin etkinliği SMA lif içeriğinin %0.3'ten %0.7'ye çıkarılmasıyla önemli ölçüde artmıştır, ancak SMA lif içeriği %0.7'den %1'e yükseldiğinde bariz bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Eğilme özelliklerinin ve hasarın geri kazanımı, artan ön yükleme seviyesi ile önemli ölçüde azalmıştır. Yüksek bir ön yükleme seviyesinde kendi kendini iyileştirme davranışı için yüksek bir SMA lif içeriği gerekmektedir.

Literatür çalışmaları göz önüne alındığında, ECC kompozitlerin süneklik özelliğini kontrol eden temel iki parametre vardır: kırılma tokluğunun azaltılması ve lif-matris arayüzündeki kimyasal bağların en düşük seviyelere indirilmesi. Kırılma tokluğunun azaltılması için matriste bazı kusurlar meydana getirilerek yapılmış çalışmalarda erken yaş sünekliği ve dayanımda istenilen koşullar elde edilirken, ilerleyen yaşlarda kimyasal bağların etkisi ve liflerde meydana gelen bozulmalar bu özelliklerin korunamamasına neden olmuştur. Bu bağlamda bu tez çalışmasının özgün yanlarından biri literatürde ilk defa nanoteknolojik esaslı bir yöntemle PVA liflerin yüzey özellikleri iyileştirilerek ECC içinde kullanılacak ve böylece çekme şekil değiştirme kapasitesi ve mekanik özellikleri geliştirilmiş bir kompozit üretilerek olmasıdır.

Yapılan literatür taramasında SMA lifli ECC'nin yük altında çatlak ve kırılma yüzeylerinin üç boyutlu (3D) görüntülenmesi ve karakterizasyonu üzerine de neredeyse hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır. Halbuki çatlak yayılımının bir sonucu olan kırılma yüzeylerinin görüntülenmesi ve yüzey pürüzlülük parametresinin ve derinlik değerlerinin hesaplanması kompozitlerin mekanik davranışı ve buna karşılık gelen hasar davranışının ortaya çıkarılmasını sağlayacaktır. Kompozit malzemelerin içyapısında yük altında meydana gelen matris çatlakları, lif kopması ve delaminasyon gibi hasar türleri yük taşıma kapasitesinde önemli ölçüde düşümlere sebep olarak yapı güvenliğini ciddi derecede tehlikeye atabilmektedir. Gözle yapılan incelemelerde çoğunlukla tespit edilemeyen bu hasarlar ileri teknoloji ürünü görüntüleme

cihazlarıyla tespit edilip görüntülenebilir. Bu çalışmada Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), ve Bilgisayarlı Mikro Tomografi (Mikro CT) gibi ileri görüntüleme tekniklerinin yanında literatürde bu tür kompozitler için ilk defa kullanılması planlanan üç boyutlu (3D) Optik Profilometre ile kırılan yüzeylerin yüzey pürüzlülük haritaları çıkarılacaktır ve ardından kırılan yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri/derinlikleri ile yük altında ortaya çıkacak enerji yayılımları arasında korelasyonlar kurulacaktır. Bu sayede içyapı hasarlarının ne zaman kritik boyuta ulaşabileceğine dair önceden bilgi sahibi olunabilecek, üretilecek SMA lif içeren hibrit lifli beton kompozit malzemenin kullanılacağı yapılarda taşıyıcı elemanın servis ve bakım zamanını kestirmede önemli bir adım atılmış olunacaktır.



3. YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Ana bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 N tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3.06 ve Blaine değeri 325 m²/kg'dır. Uçucu kül Akçansa Çimento San. Tic. A.Ş. Tekirdağ Tesisi'nden temin edilmiştir. Kullanılan uçucu külün özgül ağırlığı 2.1 ve Blaine değeri 290 m²/kg'dır. Çimento ve uçucu küle ait kimyasal içerikler Tablo 3.1'de görüldüğü gibidir. Karışımlarda özgül ağırlığı 2.6, ortalama tane büyüklüğü 120 µm ve maksimum tane büyüklüğü 300 µm olan silika kumu kullanılmıştır. Kompozit karışımların işlenebilirliğini artırmak için polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı, BASF Türk Kimya Tic. ve San. Ltd. Şti.'nden temin edilen süper akışkanlaştırıcı katkı (MasterGlenium® ACE 450) çimento ağırlığının %1'i olarak kullanılmıştır.

Tablo 3.1: Çimento ve uçucu külün kimyasal içerikleri (%).

Oksitler	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Çimento	5.55	20.8	3.35	61.4	2.49	0.77	0.19	2.2
Uçucu kül	21.7	60.8	5.48	3.48	1.71	1.95	0.74	1.57

Not: LOI (kızdırma kaybı).

Polivinil alkol (PVA) lif ARKEM Kimya San. ve Tic. A.Ş. firmasından KURALON RECS ticari isimle temin edilmiştir. Kullanılan PVA lifler 857 boy/çap oranına (aspect ratio) ve 12 mm uzunluğa sahiptir. Şekil hafızalı alaşım (SMA) ise Nanografi Nano Teknoloji A.Ş.'nden kablo şeklinde temin edilmiştir. Elde edilen Ni-Ti SMA'nın teknik özellikleri Tablo 3.2'deki gibidir. %55.75 Ni ve %44.25 Ti'den oluşan Ni-Ti SMA Şekil 3.1'de görüldüğü gibi boy/çap oranı PVA lifinkine benzer olacak şekilde lif haline getirilmiştir. ASTM F2063'e uygun PVA ve NiTi-SMA liflerin genel özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Ayrıca liflerin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri de Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

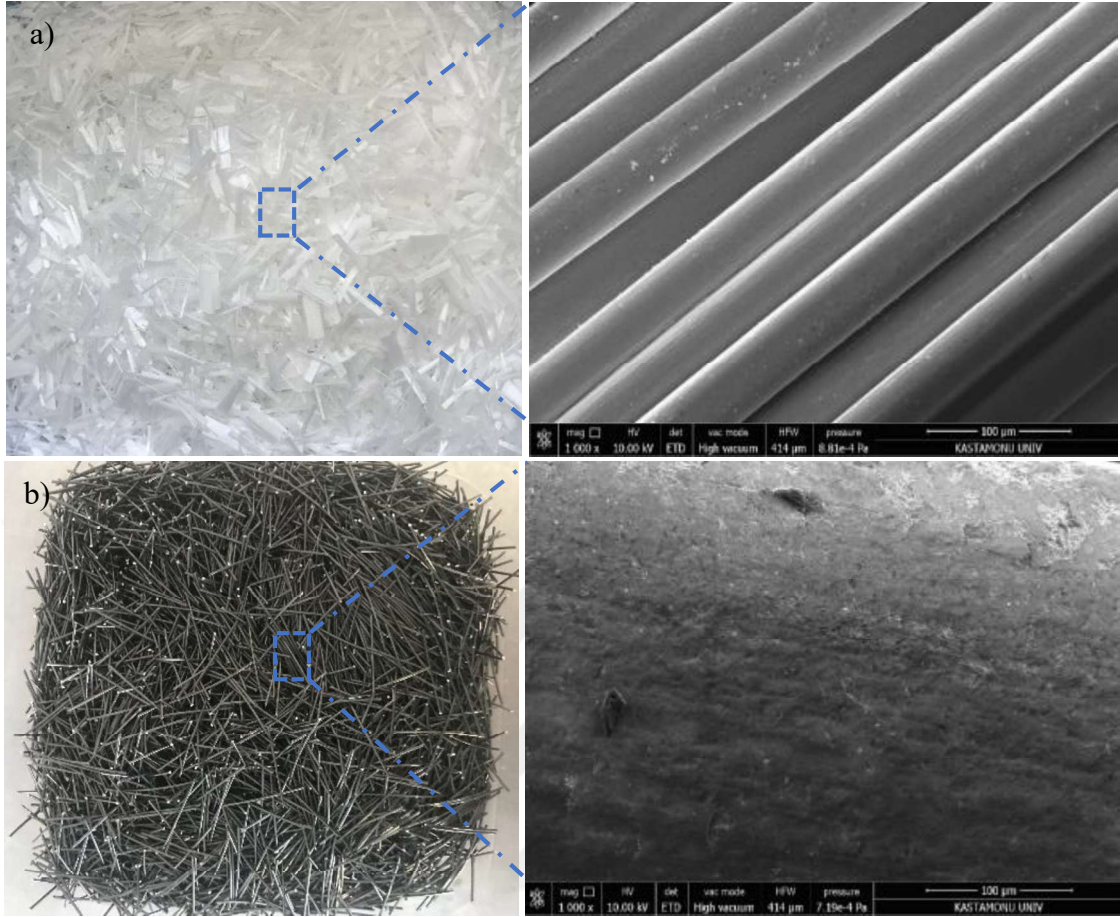
Tablo 3.2: Ni-Ti şekil hafızalı alaşım (SMA) teknik özellikleri.

Östenit bitiş sıcaklığı (°C)	(-10) – (-15)	
Elektriksel direnç (W/cm °C)	Östenit	Martensit
	0.18	0.086
Ortalama ısı genleşme katsayısı (µm/m•K)	Östenit	Martensit
	11	6.6
Erime Noktası (°C)	1310	

**Şekil 3.1:** 16 mm uzunluğa getirilen Ni-Ti SMA lifler.**Tablo 3.3:** PVA ve NiTi-SMA liflerinin genel özellikleri.

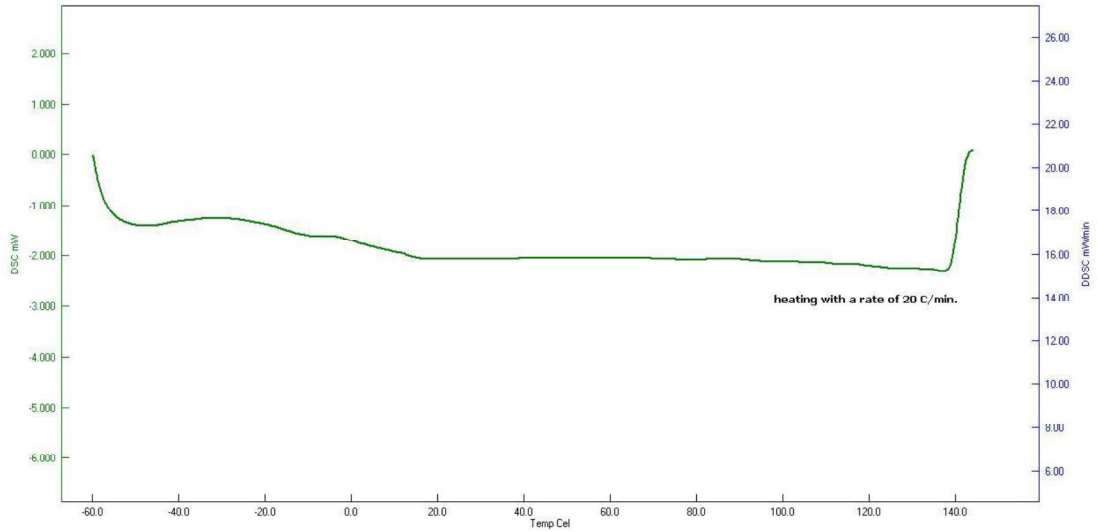
Tür	Yoğunluk (kg/m³)	Uzama (%)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
PVA	1300	6	1600	41
SMA	6450	15.5	857	79 (Östenit) 34 (Martensit)

Not: PVA (polivinil alkol); SMA (şekil hafızalı alaşım).



Şekil 3.2: (a) Polivinil alkol (PVA) liflerin ve (b) Şekil hafızalı alaşım (SMA) liflerin görüntüleri.

Ni-Ti SMA'nın Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı ile ekzotermik ve endotermik ısı akışı pikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. DSC analizi, malzemelerin ısı analizi için kullanılan termoanalitik bir yöntemdir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Cihazı numune ısıtılırken, soğutulurken veya sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğurulan veya salıverilen enerji miktarını ölçer. DSC analizi sonucunda elde edilen ısı akışı-sıcaklık diyagramları Ni-Ti numuneler ısıtılıp soğutulurken, soğurulan/salıverilen enerji miktarı belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen ısıtma/soğutma hızına bağlı olarak bulunur (Dilibal, 2017). Ni-Ti SMA'nın Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı (DSC) ile ekzotermik ve endotermik ısı akışı pikleri Şekil 3.3'teki gibi elde edilmiştir. Analiz sonuçları ile östenit-martensit değişiminin olduğu yerler incelenebilmiştir.



Şekil 3.3: Ni-Ti SMA'nın Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi.

3.2. Nano Grafit Kaplı PVA (GPVA) Üretimi

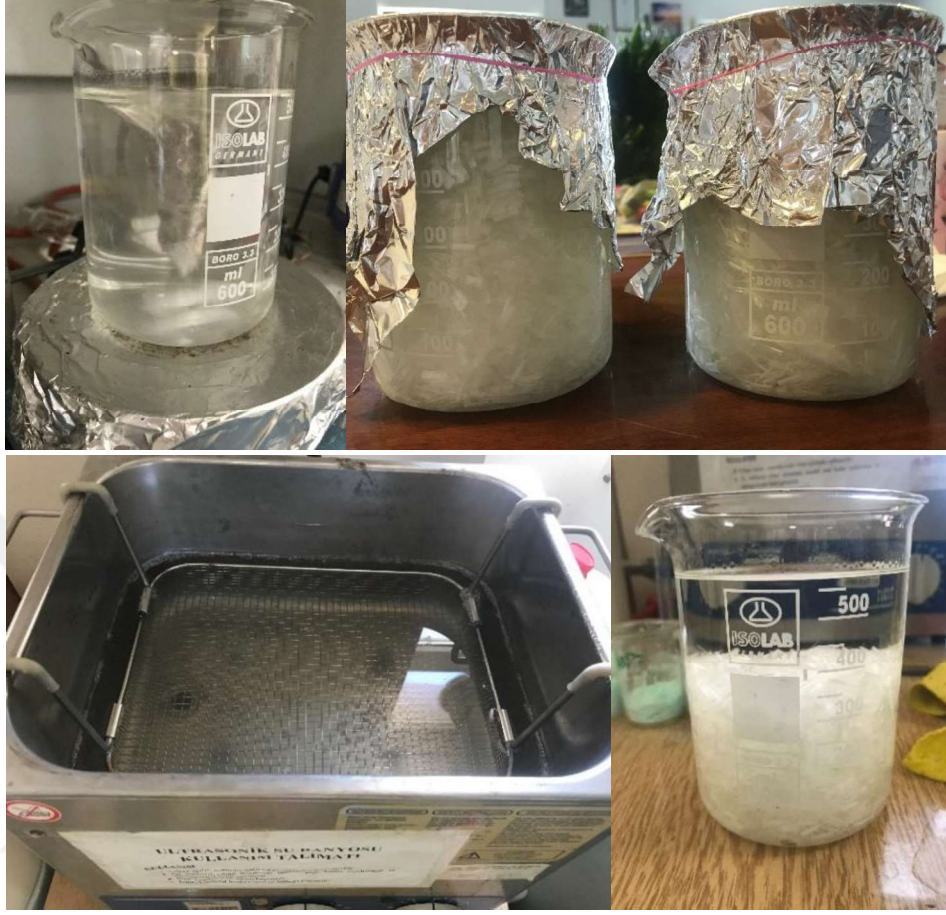
Bu tez çalışmasının literatüre kattığı en önemli yeniliklerden biri PVA liflerin çatlak köprüleme ve matrisle olan aderansını artırma amacıyla nanoteknolojik esaslı bir yöntemle lif yüzey özelliklerini iyileştirmek olmuştur. Bu kapsamda yüzeyleri yağ ile kaplı PVA liflerde nano ölçekli grafit ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için yapılan işlemler iki adımda gruplandırılmıştır:

Adım 1: PVA liflerde epoksi kaplama

Lif ve nano ölçekli grafit arasındaki yüzey bağını güçlendirmek için epoksi kullanılmıştır. % 3 hacim konsantrasyonlu etanol (etil alkol) - epoksi solüsyonu hazırlanmıştır. Solüsyon için temin edilen etanolün özellikleri Tablo 3.4'te görüldüğü gibidir. Yüzeyleri yağ ile kaplı, piyasadan hazır elde edilen PVA lifler 2 saat boyunca 50°C'de ultrasonik banyoda etanol-epoksi çözeltisi içerisinde Şekil 3.4'teki gibi dağıtılmıştır. Daha sonra epoksi ile yüzeyi kaplanan PVA lifler, 12 saat boyunca 50 °C'de etüvde bekletilerek Şekil 3.5'te görüldüğü gibi kurutulmuştur.

Tablo 3.4 Kullanılan etanolün özellikleri.

Safılık	%96 (Denature)
Kimyasal formül	C ₂ H ₅ OH
Molekül ağırlığı	46.06844(232) g/mol
Kimyasal adı	Etanol
CAS-No	64-17-5



Şekil 3.4 PVA liflerin etanol-epoksi çözeltisi içinde dağıtılması.

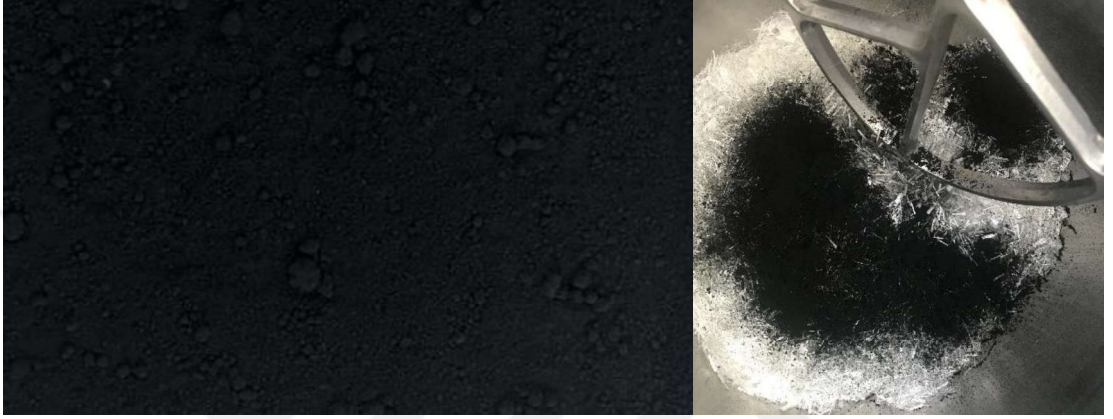


Şekil 3.5 PVA liflerin epoksi ile kaplama sonrası kurutulması.

Adım 2: Grafit kaplama

Nano ölçekli grafit ve yukarıdaki işlemler gerçekleştirilmiş PVA lifler, grafitin lifler üzerine düzgün bir şekilde kaplanmasını sağlamak için Hobart mikserde karıştırılmıştır. Bu işlem için

kullanılan ve Şekil 3.6’da görülen nano grafit 50 nm boyutlarındadır. Toz halindeki nano grafit kurutulmuş PVA liflerin üzerine serpilmiştir. PVA lifler üzerinde grafitin eşit olarak dağıldığına emin olana kadar Hobart mikserde karıştırma işlemi devam etmiştir. Bunun için 50 gr lif için yaklaşık 4 dk karıştırma yeterli olmuştur. Lif miktarı arttıkça karıştırma süresi de arttırılabilir. Son olarak da fazla nano ölçekli grafit elenerek uzaklaştırılmıştır ve Şekil 3.7’de görülen, GPVA indisinin kullanıldığı nano grafit kaplı PVA lifler elde edilmiştir.



Şekil 3.6 Yüzey kaplama işlemi için kullanılan nano grafit.



Şekil 3.7 PVA liflerin nano grafit ile kaplanması.

3.3. Karışım Özellikleri ve Hazırlanması

Laboratuvar çalışmalarında bağlayıcı matrisin su/bağlayıcı oranının 0.26 olduğu, referanslar dahil toplam 8 farklı karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda çimento, uçucu kül, silika kumu, su, akışkanlaştırıcı, PVA/GPVA lif miktarı aynı olup sadece Ni-Ti SMA miktarları değiştirilmiştir. Ni-Ti SMA lif miktarları hacimce %0.25 , %0.5 ve %1 olarak belirlenmiştir. Karışım detayları Tablo 3.5’te görüldüğü gibidir.

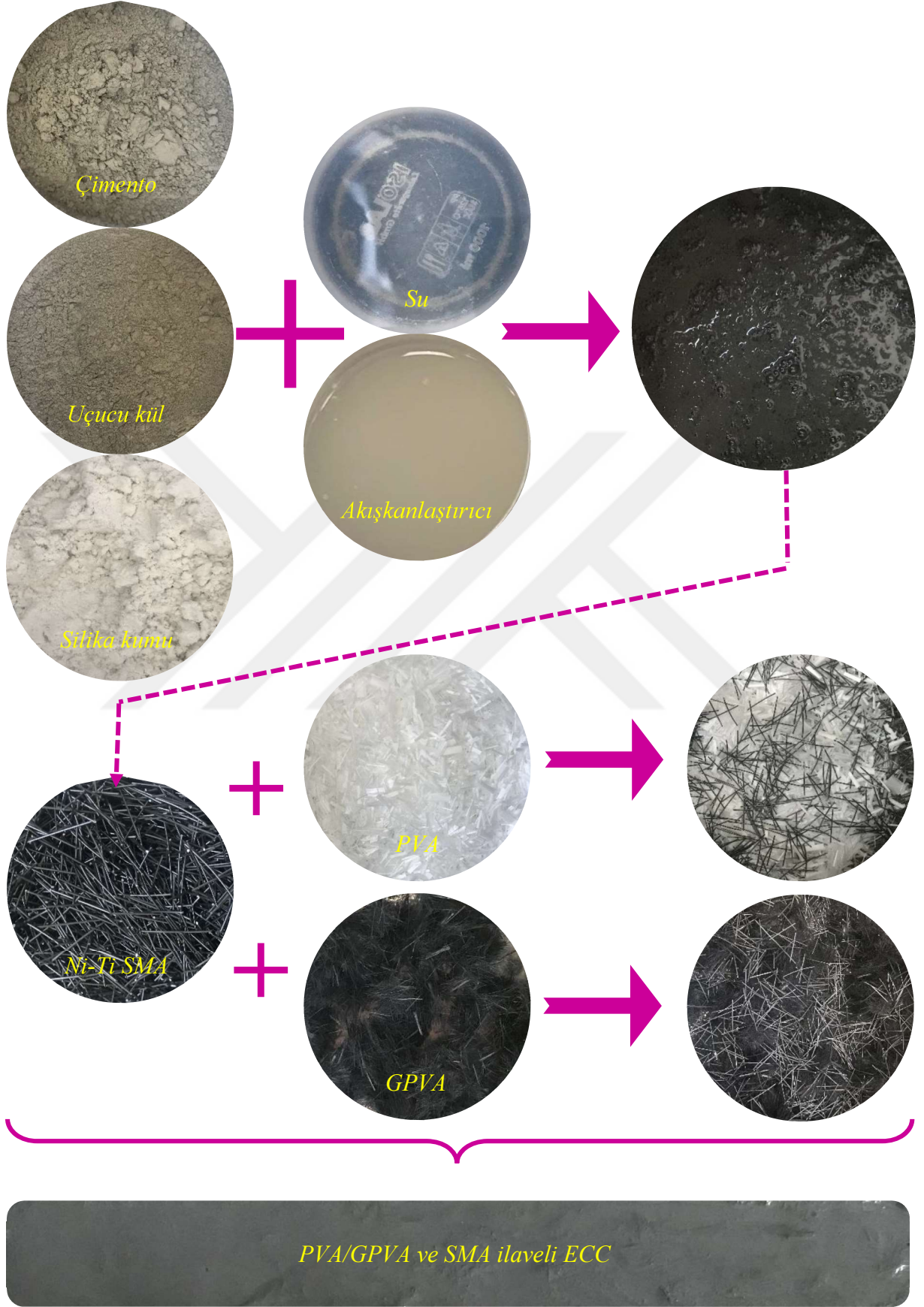
Tablo 3.5: Kompozitlerin karışım oranları.

Karışım Adlandırmaları	Çimento	Uçucu Kül	Su	Silika Kumu	Katkı	PVA %	GPVA %	SMA %
0SMA-2PVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01	2	0	0
0.25SMA-2PVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01011	2	0	0.25
0.5SMA-2PVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01047	2	0	0.5
1SMA-2PVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01083	2	0	1
0SMA-2GPVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01	0	2	0
0.25SMA-2GPVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01011	0	2	0.25
0.5SMA-2GPVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01047	0	2	0.5
1SMA-2GPVA	1	1.83	0.74	0.70	0.01083	0	2	1

PVA, GPVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin üretiminde izlenen sıra aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- * Çimento, uçucu kül ve silika kumu kuru olarak Hobart mikserin 1. seviyesinde 1 dakika karıştırıldı.
- * 2. seviyeye getirilen miktare su ve süper akışkanlaştırıcı eklenerek 1 dakika daha karıştırıldı. Devamında karıştırma işlemine 3. seviyede 2 dakika daha devam edildi.
- * PVA-SMA veya GPVA-SMA lifler matrise eklenerek karıştırma işlemine 2. seviyede 3 dakika daha devam edildi.
- * Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler yağlanmış kalıplara yerleştirilerek kompozit üretim işlemi tamamlandı.

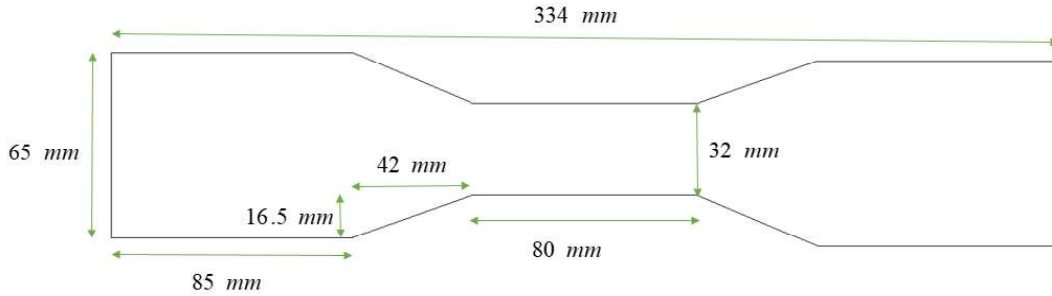
Üretilen tüm karışımlar ‘kendiliğinden yerleşebilme (self-consolidating)’ özelliği gösterdiği için kalıplara yerleştirilirken titreşim masası kullanımına gerek duyulmamıştır. Kompozitlerin üretim aşaması görselleri Şekil 3.8’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.8 PVA, GPVA ve SMA ilaveli ECC'lerin üretimi.

Üretilen karışımlardan;

- * Basınç dayanımı deneyleri için 7 günlük, 28 günlük ve 56 günlük olmak üzere her yaştan 3 adet 50 mm'lik küp numune,
- * 3 noktalı eğilme deneyleri için 28 günlük olmak üzere 3 adet 350x50x15 mm boyutlarında prizma numune,
- * Doğrudan çekme deneyleri için 28 günlük olmak üzere 3 adet Şekil 3.9'da görülen kemik numune,
- * Kuruma rötresi deneyleri için 28 günlük olmak üzere 250x25x25 mm boyutlarında prizmatik çubuk numune,
- * Çarpma dayanımı deneyleri için 28 günlük olmak üzere 3 adet 100x100x5 mm plak numune,
- * Çatlak iyileştirme deneyleri için 28 günlük olmak üzere 3 adet 160x40x40 mm prizma numune hazırlanmıştır.



Şekil 3.9 Kemik numunelerin boyutları.

Üretilen kompozitler deney tarihine kadar özel, hava geçirimsiz plastik poşetlerde (95 ± 5 relatif nem ile) Şekil 3.10'da görüldüğü gibi kür edilerek deney tarihine kadar muhafaza edilmiştir. Suda kür işlemi çimento matrisi ile agrega arasındaki ara yüzeyi güçlendirir ve iyileştirir. ECC'de ise ara yüzeyin göreceli olarak daha zayıf kalması istendiği için suda kür tercih edilmez. Bunun nedeni de yük altındaki kırılmalarda oluşan çatlağın göreceli olarak zayıf olan ara yüzeyi dolanarak ilerlemesinin istenmesidir. Böylece daha belirgin çoklu çatlak davranışı ve bunun neticesinde daha çok süneklik elde edilir (Gürbüz, 2018).



Şekil 3.10: Numunelerin kür işlemi.

3.4. Taze ve Sertleşmiş Kompozit Özellikleri

3.4.1. Mini yayılma tablası deneyi

PVA/GPVA ve SMA ilaveli ECC karışımların kıvamının belirlenmesi için karıştırma işlemi tamamlanan numunelerde yayılma deneyi yapılmıştır. Bunun için TS EN 459-2 standartlarına uygun, Şekil 3.11’de görülen, tabla çapı 300 mm ve taban çapı 100 mm, üst yüz çapı 70 mm, yükseklik 60 mm olan kesik koni şekilli kalıba sahip çimento yayılma tablası deney seti kullanılmıştır. Karışımları paslanmaz çelikten üretilen kalıba yerleştirirken Ø40x200 mm ölçülerinde ve 250 gr ağırlığında pirinç kaplı ahşap tokmak kullanılmıştır. Yerleştirme işleminden sonra kalıp düşey olarak kaldırılmış ve tabla kol aparatı çevrilerek 10 mm yükseklikten 25 kez düşürülmüştür. Yayılan karışımlarda iki farklı doğrultuda yayılma çapları ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Elde edilen mini yayılma tablası deney sonuçları kullanılarak Dehghani ve Aslani (2020) tarafından önerilen Denklem (1)’e göre bağıl çökme değerleri hesaplanmıştır. d_0 kalıbın taban çapını, d yayılma çapını ifade etmektedir.

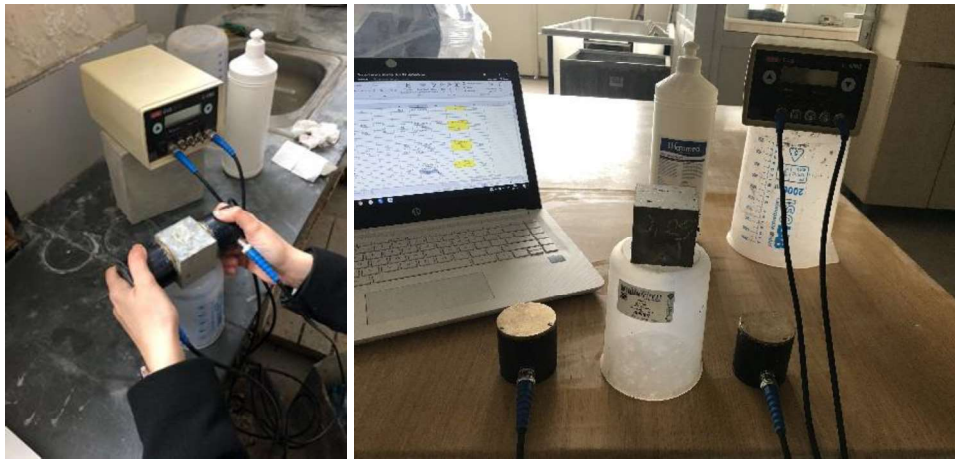
$$\Gamma_p = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 - 1 \quad (1)$$



Şekil 3.11 Mini yayılma tablası deneyi.

3.4.2. Ultrases geçiş hızı ölçüm deneyi

Tahribatsız bir test olarak, numunelerin kalitesini değerlendirmek için numuneler üzerinde TS EN 12504-4 uyarınca ultrases geçiş hızı (UPV) ölçümü yapılmıştır. UPV dedektörün bir vericisi ve bir alıcısı vardır. Verici kompozitin bir ucuna, alıcı diğer ucuna yerleştirilir. Dedektör alıcı/verici ile kompozitin yüzeyi arasındaki olası boşlukları ortadan kaldırmak amacıyla başlıklara ultrasonik jel sürülmektedir. Ultrases dalgasının kompozitten geçiş süresi Şekil 3.12’de görüldüğü gibi cihazdan ölçülmüştür ve ardından ultrases geçiş hızı hesaplanmıştır.



Şekil 3.12 Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı.

3.4.3. Basınç dayanımı deneyi

Basınç deneyi ASTM C39 standardına uygun olarak, 50x50x50 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Kullanılan deney aleti Şekil 3.13'te görüldüğü gibidir. Numuneler deney presine döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiş ve deney numunelere 2000 kN kapasiteli press makinesi ile basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir. 0.602 MPa/sn yükleme hızı ile sistemin ortasına yerleştirilen küp numunelere basınç yükü uygulandıktan sonra maksimum yük değeri elde edilmiş ve bu maksimum yük değerine göre basınç dayanımı otomatik olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.13 Basınç dayanımı test cihazı.

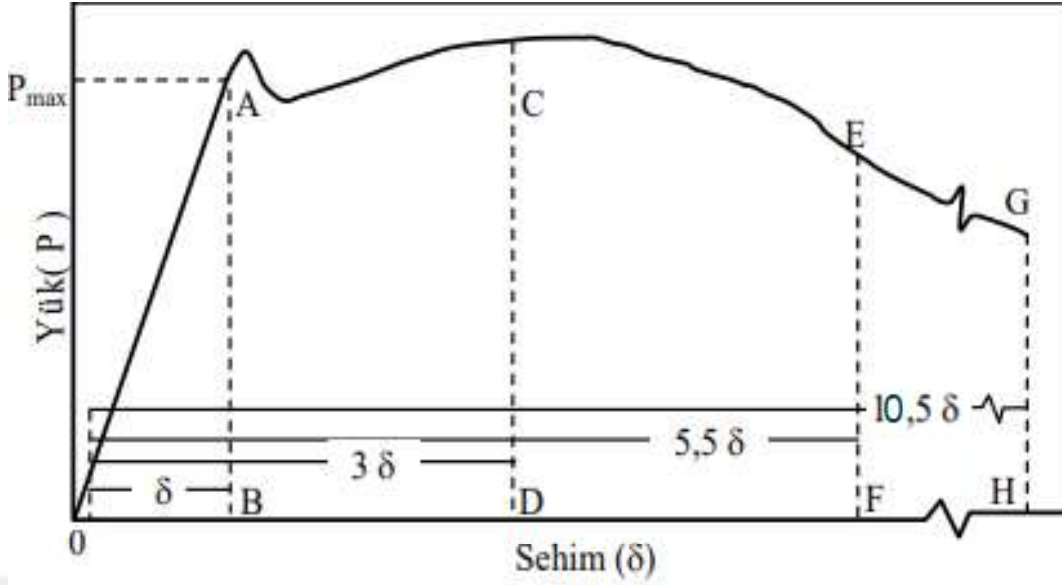
3.4.4. Üç noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyi

Üç noktalı eğilmede çekme testi 350x50x15 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde 0.02 mm/sn hızla ASTM C348 standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 300 mm olacak şekilde numuneler deney aletine yerleştirilmiştir. Şekil 3.14'te eğilmede kullanılan SHIMADZU marka test cihazı görülmektedir. Deney sonrası cihazdan yük ve bu yüklere karşılık gelen uzama değerlerinden yük-uzama grafikleri alınmıştır. Ayrıca elde edilen veriler kullanılarak eğilme dayanımları da hesaplanarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri de elde edilmiştir.



Şekil 3.14: Eğilme deneyi cihazı.

Tokluk lifli betonlar için önemli bir özelliktir. Tokluk veya enerji yutma kapasitesi yük-sehim eğrisinin altında kalan alanla ilişkilendirilir ve yapı elemanlarının enerji yutma özelliklerinin ölçüsüyle maksimum nokta sonrası davranışını göstermek için kullanılır. Tokluk değerleri genellikle çentiksiz numuneler üzerinde yapılan eğilme deneyi sonuçlarından elde edilmektedir. Değişik yaklaşımlar tokluğu farklı yöntemlerle belirleyebilmektedir. Amerikan Standardı ASTM C1018’de tokluk, belirli bir deplasmana kadar yük-deplasman eğrisinin altında kalan alana eşit olan enerji ile tanımlanır. İçine lif katılan betonun taşıma gücünü yitirmesi için gereken enerji, yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın büyümesi ile artacaktır. ASTM C1018’e göre tokluk indisleri seçilen deplasman değerine kadar malzeme davranışını tanımlamak için kullanılır (Çivici, 2006). Üç noktalı eğilme deneyi çentiksiz giriş numunelere uygulanmıştır ve ilk çatlaktaki deplasman (δ) için gereken enerji hesaplanmıştır. İlk çatlak yük-deplasman eğrisinde eğrinin yükselen kısmının doğrusallıktan saptığı nokta ile belirlenmiştir ve ilk çatlığa karşı gelen deplasmanın birkaç katı kadar olan sehimler (Şekil 3.15) için gereken enerjiler hesaplanmıştır. Şekil 3.15’e göre yazılabilecek (2), (3) ve (4) nolu denklemler ile kompozitlerin I5, I10, I20 gibi tokluk indisi değerleri elde edilmiştir. Tokluk indislerinin formüllerinde görülen alan hesabında kullanılan sehimlerin katsayıları I5, I10, I20 ve I30 için sırasıyla 3, 5.5, 10.5 ve 15.5 olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.15: Tokluk hesaplarında kullanılan sehimler (Çivici, 2006).

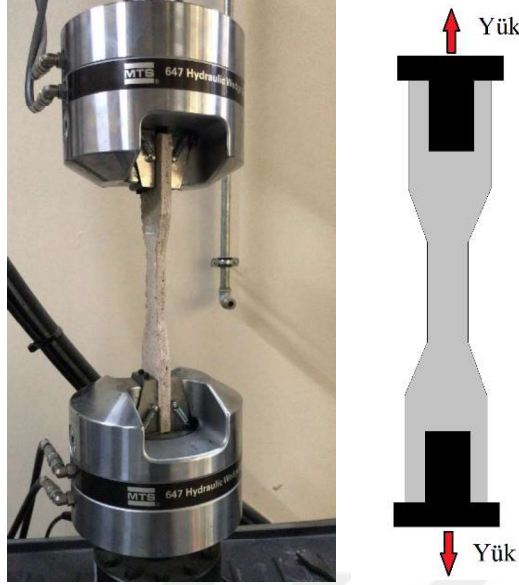
$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad (2)$$

$$I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad (3)$$

$$I_{20} = \frac{OAGH}{OAB} \quad (4)$$

3.4.5. Doğrudan çekme dayanımı deneyi

Çimento esaslı kompozitlerin çekme dayanımının belirlenmesinde doğrudan çekme testleri için özel bir standart mevcut değildir. Literatürdeki çalışmalarda çimento esaslı kompozitler için en uygun metot olarak ASTM C1275-16 standardı esas alınmıştır (Özkan, 2017). Tüm karışımlar için hazırlanan kemik numunelerin doğrudan çekme testi 100 kN kapasiteli MTS 647 Hydraulic Wedge Grips cihazında, yükleme hızı 2 mm/dk olarak gerçekleştirilmiştir. Deney cihazına numune yerleşimi Şekil 3.16’da görüldüğü gibidir. Deney sonucunda elde edilen yük ve deplasman değerlerinden gerilme-şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.16 Doğrudan çekme test cihazı.

3.4.6. Kuruma rötresi deneyi

ASTM C157'ye uygun olarak, 250x25x25 mm prizmatik çubuk numunelerde kuruma rötresi deneyi yapılmıştır. Tüm karışımlar diğer deney numuneleri gibi hazırlanmış ve hazırlanan numuneler kalıplara dökülmeden önce kalıplara çubukla aynı eksenli olacak şekilde vida takılmıştır. Kompozitler kalıptan bir gün sonra çıkartılmıştır ve kirece doymuş suda 28 gün bekletilmiştir. Daha sonra Şekil 3.17'deki deney düzeneğine yerleştirilmiş ve 118 gün boyunca laboratuvarında 23 ± 2 °C'de ve $\%50 \pm 5$ bağıl nemde saklanarak belirli aralıklarda boy değişimleri ölçülmüştür.



Şekil 3.17 Kuruma rötresi deney düzeneği.

3.4.7. Çatlak iyileştirme

SMA'ların şekil hafıza özelliklerini kullanarak yükleme sonrası oluşan çatlakların boyutlarını iyileştirmek için 160x40x40 mm boyutlarında hazırlanan prizma numuneler üzerinde Şekil 3.18'de görüldüğü gibi 3 noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyi ASTM C348 standardına uygun aparatla, 0.05 MPa/sn yükleme hızı ile 600 kN kapasiteli eğilme cihazında gerçekleştirilmiştir. Eğilme testleri sonrasında numunelerin çekme bölgesindeki çatlakların (en genişinin) boyutu ölçülmüş ve bir ısı tabancası yardımıyla çatlaktan yaklaşık 200 mm uzaklıktan çatlağa sabit ısı uygulanmıştır. Termal kamera ile numune üzerindeki sıcaklık değerleri de kontrol edilmiştir. 15 dakika boyunca aralıksız uygulanan ısı sonrasında çatlağın boyutu tekrar ölçülmüştür ve çatlak boyutundaki değişim hesaplanmıştır.



Şekil 3.18 Çatlak iyileştirme için üç noktalı eğilme testi ve ısı uygulaması.

3.4.8. Ağırlık düşürmeli düşük hızlı çarpma deneyi

100x100x5 mm boyutlarındaki PVA/GPVA ve SMA lifli ECC numunelerde, ağırlık düşürmeli düşük hızlı çarpma testleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü Kompozit Laboratuvarı'nda bulunan, Şekil 3.19'da görülen INSTRON DYNATUP 9250HV cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz; test numune yüzeyine sadece bir defa vuruş yapıldıktan sonra darbe ucunu yakalayan pnömatrik geri sekme önleme sistemine sahip olduğu için tekrarlı bir yüklemeyi önlemektedir. Numuneler 10 kg ağırlığındaki düşürme çekicinin 10 mm yarıçaplı yarı küresel darbe ucuyla 0.5 metre yükseklikten darbeye maruz bırakılmıştır. Karışımların

çarpma yüklemesi altındaki davranışlarını inceleyebilmek için, her karışıma ait bir vuruştaki yük-deformasyon ve enerji-zaman değerleri elde edilmiştir.



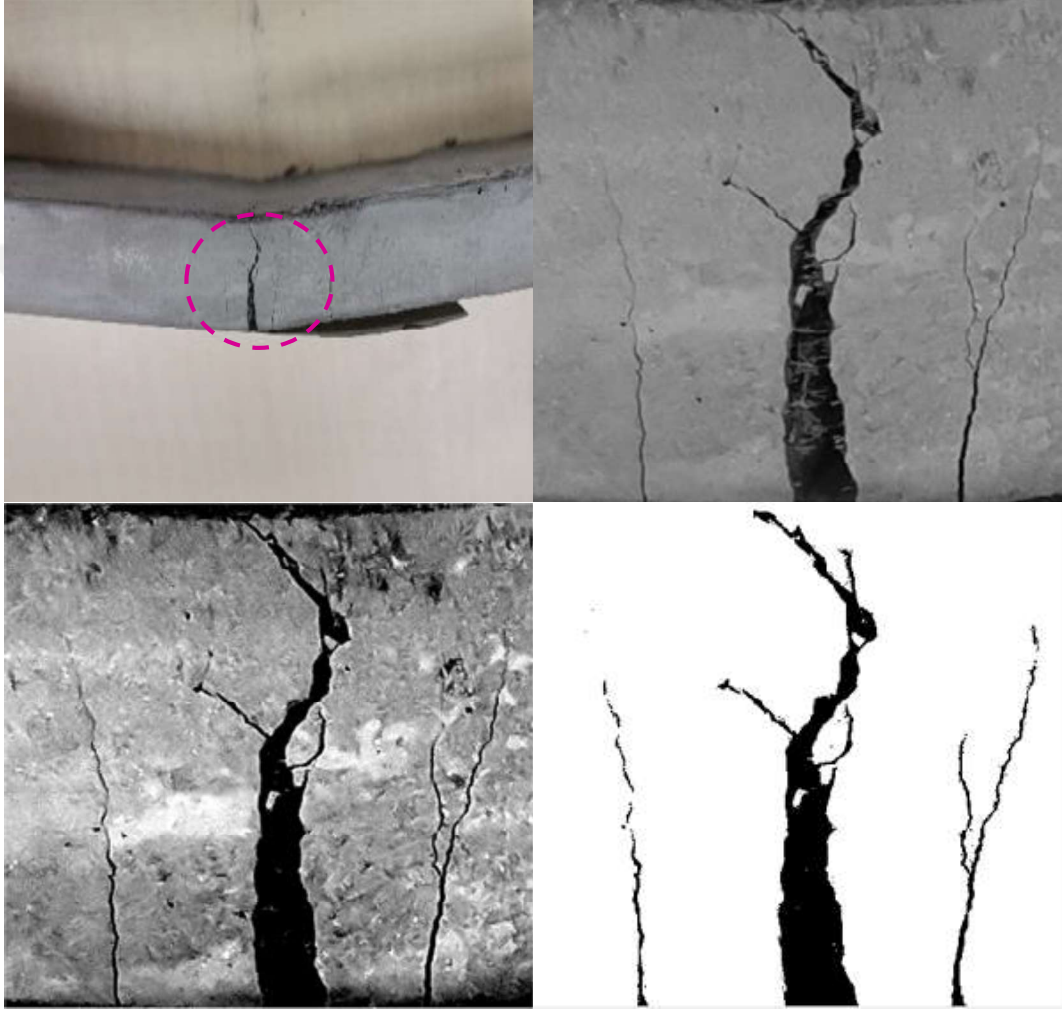
Şekil 3.19 Ağırılık düşürmeli düşük hızlı çarpma deneyi.

3.5. Üç Boyutlu (3D) Fraktal Çatlak Analizi

Üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiş kompozitlerin çatlak fotoğrafları üzerinden dijital görüntü işleme programı (Image J) kullanılarak çatlak haritaları çıkarılmış ve Fraktal boyutları hesaplanmıştır. Fraktal geometri kavramı, düzensiz şekillere sahip cisimlerin geometrilerini nicel olarak tanımlamak için kullanılmaktadır ve Fraktal boyut 1 ile 2 arasında değişen bir değere sahiptir. Image J programı open access bir program olup kutu yöntemi (Box Counting) kullanarak çatlak haritasından Fraktal boyutunu otomatik olarak hesaplamaktadır (Gürbüz, 2018). Eğilme deneyi sonrası kompozitlerde oluşan çatlakların fotoğraflarında Şekil 3.20’de örneği görüldüğü gibi çatlak analizi gerçekleştirilmiş ve Fraktal boyut değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan Fraktal boyut kullanılarak makro düzeyde numunenin yük altında kırılma enerjisi (Ws/Gf) değeri elde edilebilmektedir. Yük altında kırılma enerjisi mm cinsinden, çatlak oluşurken yayılan toplam enerjinin (Ws) kırılma enerjisine (Gf) oranı şeklinde Denklem (5)’teki gibi bulunur (Guo ve diğ., 2006).

$$W_s/G_f = h \cdot \left(\delta/h \right)^{1-D} \quad (5)$$

Denklemden h numune yüksekliğini (mm), δ silis kumunun maksimum boyutunu (mm) ve D çatlağın Fraktal boyutunu göstermektedir. Fraktal boyutu yüksek olan numunenin makro düzeyde numunenin yük altında kırılma enerjisi de yüksek olmaktadır.



Şekil 3.20: Fraktal boyut-çatlak analizi.

3.6. Mikro ve Nano Yapısal Karakterizasyon

3.6.1. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), odaklanmış elektron demetinin bir numune yüzeyini tarayıp, o yüzeyden görüntü elde edilmesini sağlayan bir elektron mikroskop çeşididir. Elektronlar örnek atomlarıyla etkileşerek değişik sinyaller üretirler. Bu sinyaller dedektörler tarafından algılanır ve örnek yüzey topografisi ve kompozisyonu hakkında bilgi verir. 28

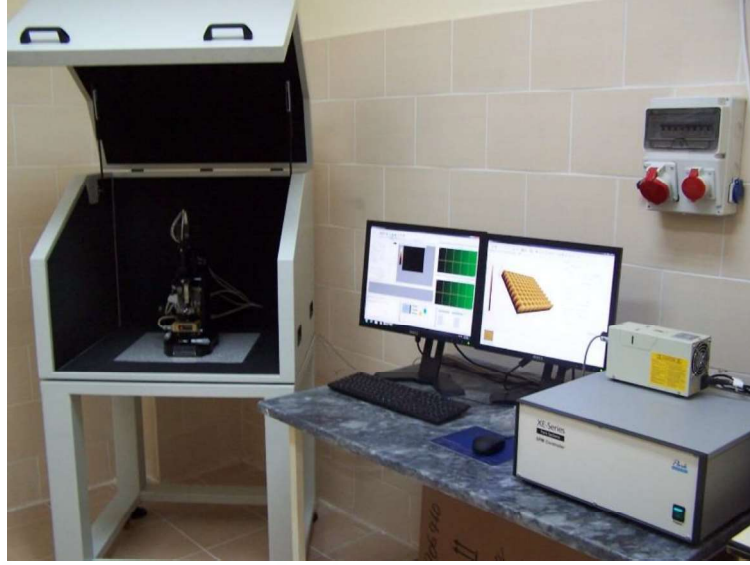
günlük numunelerden alınan parçalar üzerinden SEM ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmıştır. Numunelerin üstü daha iyi iletkenlik sağlamak amacıyla altınla kaplandıktan sonra JEOL JSM-6610 cihazı kullanılarak görüntüler alınmıştır. Kullanılan SEM cihazı ve altın kaplama sistemi Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 Kullanılan a) Taramalı Elektron Mikroskobu ve b) altın kaplama sistemi.

3.6.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) incelenmesi, yüzeyin fiziksel özellikleri ve topografisini yüksek çözünürlükte ve üç boyutlu görüntülenmesini sağlamaktadır. AFM üç boyutlu bir yüzey görüntüsü üzerinde incelemeye olanak sağlamakla birlikte, yüzey pürüzlülüğü parametrelerini rakamsal olarak da verebilir. Temel olarak, bu alet bir keskin uç ile numune yüzeyi arasındaki Van der Waals etkileşimini referans alarak çalışır. Temaslı ve temassız iki modu vardır (Çankaya ve Sökmen, 2021). AFM yardımıyla elde edilen yüzey topografyası nanometre seviyesinde belirlenir. Böylece AFM ile yüzeylerin pürüzlülüğü, porozitesi, gözenek dağılımı gibi özellikler hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında kullanılan PVA, GPVA ve SMA liflerin temassız (non-contact) modda AFM analizleri gerçekleştirilerek üç boyutlu topografyaları ve yüzey pürüzlülük (roughness) değerleri hesaplanmıştır. Kullanılan Parksistem marka AFM analiz cihazı Şekil 3.22’de görülmektedir. 800x optik mikroskop ile XY tarama 0.02nm çözünürlükte ve 50µm x 50 µm tarama alanında, Z ekseninde ise 12µm tarama yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.22 Kullanılan Atomik Kuvvet Mikroskobu.

3.6.3. Bilgisayarlı Mikro Tomografi (Mikro CT) analizi

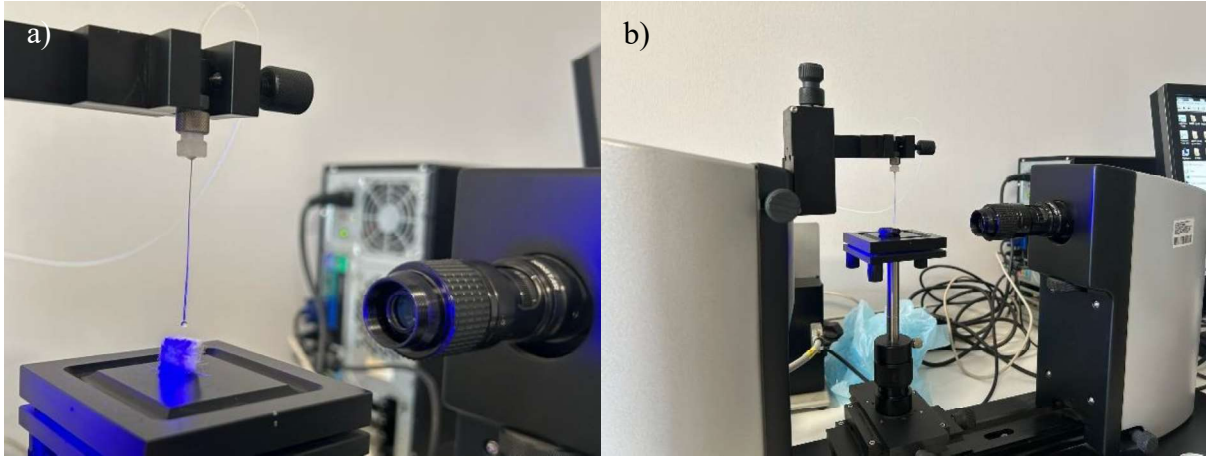
Lif dağılımının makro ölçekli özellikler üzerindeki etkisini incelemek ve daha iyi anlamak için bazı karışımlar (%0.25 ve %1 SMA ilaveli ECC'ler) üzerinden Bilgisayarlı Mikro Tomografi (Mikro CT) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler Şekil 3.23'te görüldüğü gibi SkyScan 1275 Micro CT cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu analiz ile 1000'den fazla projeksiyon görüntüsü elde edilmiştir ve bu görüntüler 3 boyutlu görüntüler oluşturmak için kullanılmıştır. Konfigürasyon ve parametreler şunlardı: 1 mm alüminyum filtre, 80 keV, 125 μ A, 10 μ m çözünürlük, pozlama 47 ms, döndürme 180° ve döndürme adımı 0.400°. Yeniden yapılandırma verileri için NRecon yeniden yapılandırma yazılımı kullanılmıştır ve tüm ölçümler CTAN yazılımı ile yapılmıştır. Kompozitlere ait 3 boyutlu görüntüler de CTVol yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.23 Bilgisayarlı Mikro Tomografi cihazı ve örnek görüntü.

3.6.4. Statik temas açısı ölçümü

PVA liflerin yüzeylerinin kaplanmasından sonra yüzeyin hidrofobiklik özelliğinde değişim olup olmadığını belirlemek amacıyla hem PVA liflerde hem de GPVA liflerde statik temas açısı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm için KSV Attension THETA yüzey temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümden önce lifler basınç ile sıkıştırılarak düz yüzeyli ve pelet haline getirilmiştir. Daha sonra Şekil 3.24'te görüldüğü gibi, cihaza yerleştirilen pelet halindeki numunelerin yüzeyine 5 μ L hacmindeki su damlacığı 3 farklı noktadan damlatılmıştır ve yüzeyin seri şekilde çekilen fotoğrafları kullanılarak bu görüntülerden yüzey temas açısı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.24 a) PVA ve b) GPVA liflerin statik temas açısı ölçümü.

3.6.5. Optik profilometre analizi

Optik profilometre analizi katı malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için üç boyutlu yüzey profili çıkaran bir analizdir. Bu analiz Şekil 3.25'te görülen Filmmetrics marka Profilm 3D cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 10x objektif lensi ile 2mm x 1.7mm geniş görüş alanına, 20x objektif lensi ile 1mm x 0.85 mm görüş alanına sahip cihaz 3 boyutlu yüzey tarama özelliği ve 50nm - 10mm arasındaki kalınlık ölçüm aralığı ile analiz sonucunda pürüzlülük (roughness) değerini ve yüzey profilini vermektedir. Yükleme sonrası kompozitlerin kırılan yüzeyleri üzerinden profilometre analizi gerçekleştirilerek yüzey pürüzlülük haritaları elde edilmiştir.

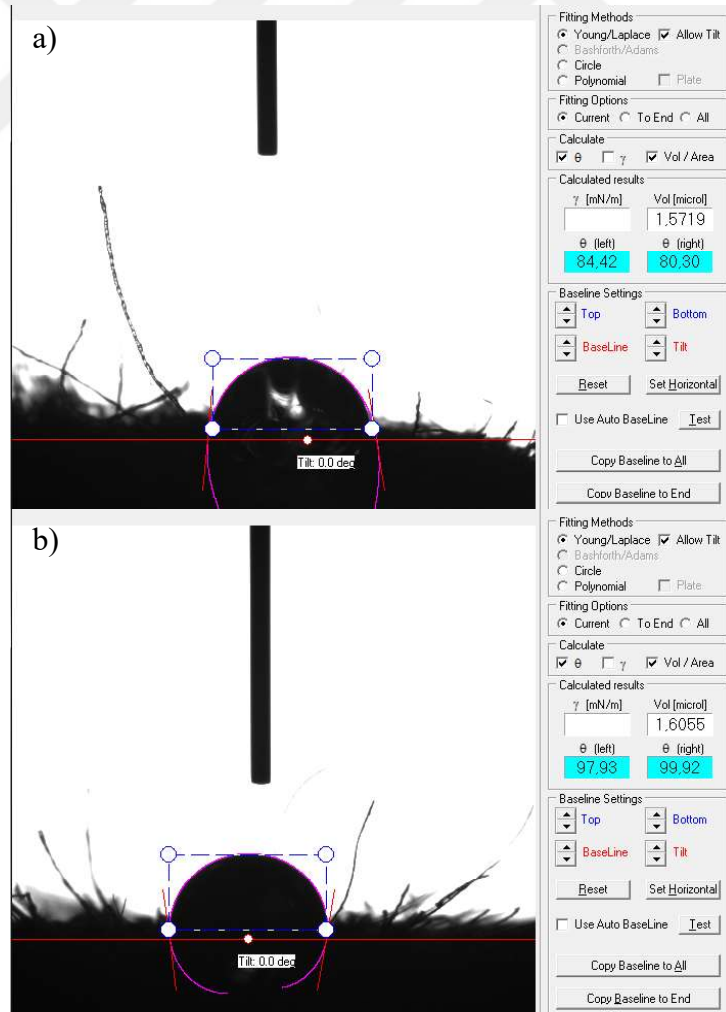


Şekil 3.25 Optik profilometre ölçüm cihazı.

4. BULGULAR

4.1. PVA ve GPVA Liflerin Hidrofobiklik Dereceleri

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde kullanılan PVA liflerin ağırlıkça %1.2 hidrofobik yağla kaplanmış olduğu bilinmektedir (Li ve diğ., 2001). Wenzel Denklemi dikkate alındığında daha büyük yüzey pürüzlüğünün hidrofobik yüzeyler için daha büyük statik temas açısı ile sonuçlanacağı da bilinmektedir. Islanabilirliğin derecesini ifade eden statik temas açısı ıslanabilirlik derecesine, büyüklüğü kohezyon ve adezyon kuvvetlerinin büyüklüğüne bağlıdır. PVA liflerin ve yüzeyi nano grafitle kaplanmış PVA (GPVA) liflerin statik temas açıları Şekil 4.1’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.1 a) PVA lifin ve b) GPVA lifin statik temas açıları sonuçları.

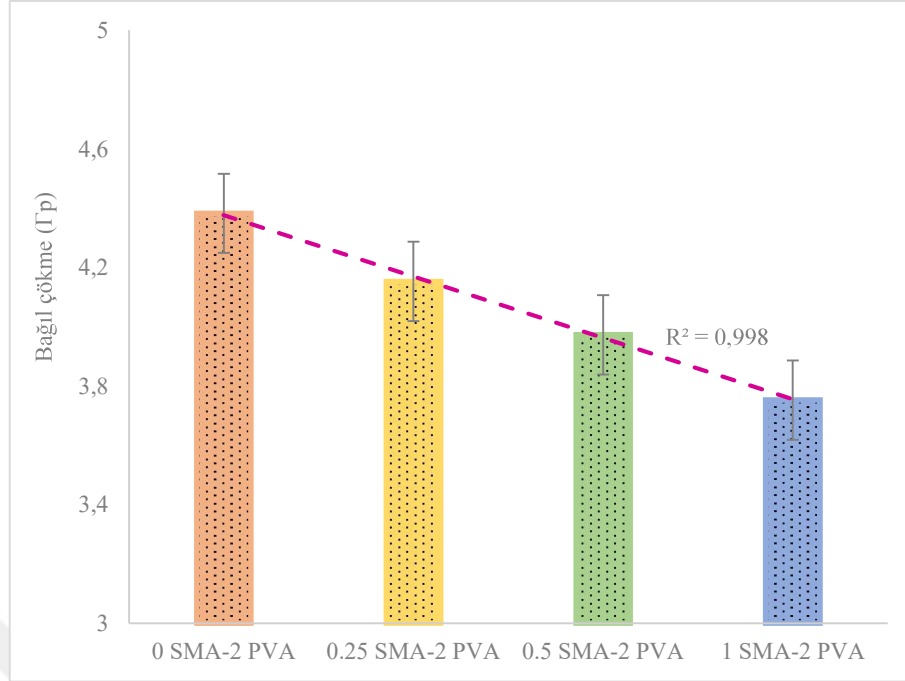
Mevcut İngilizce ve Türkçe literatür incelendiğinde PVA liflerin ve yüzeyi nano grafitle kaplanmış PVA (GPVA) liflerin statik temas açıları bu çalışma kapsamında ölçülerek ilk kez tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde kullanılmıştır ve sonuçlar incelendiğinde PVA liflerin statik temas açısının yaklaşık 82.36° olduğu, buna karşın GPVA liflerde ise temas açısının yaklaşık 98.93° olduğu belirlenmiştir. Wenzel yaklaşımı dikkate alındığında daha büyük temas açısı daha fazla hidrofobik yüzey göstermektedir.

4.2. İşlenebilirlik

4.2.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

PVA ve SMA ilaveli ECC karışımların bağıl çökme değerleri, mini yayılma tablası deney sonuçları kullanılarak Dehghani ve Aslani (2020) tarafından önerilen formüle göre hesaplanmıştır. Şekil 4.2, PVA ve SMA ilaveli ECC'nin SMA lif miktarına karşı bağıl çökmenin değişimini göstermektedir. Beklenildiği gibi, PVA lifli ECC'ye SMA lifin eklenmesi çökme değerini azaltmıştır. Referans karışıma (0 SMA-2 PVA) kıyasla, %0.25 SMA (0.25 SMA-2 PVA), %0.5 SMA (0.5 SMA-2 PVA) ve %1 SMA (1 SMA-2 PVA) ilavesiyle çökme değerleri sırasıyla %5.2, %9.3 ve %14.4 oranında azalmıştır. Şekil 4.2 incelendiğinde SMA lif yüzdesi ile çökme değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Liflerin yüzey parametreleri, hibrit lifli çimento esaslı kompozitlerin akışkanlığında çok önemli bir rol oynamaktadır (Dehghani ve Aslani, 2020). PVA lifler ile kıyaslandığında SMA liflerinin daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olmasının, iç sürtünmeyi ve taneler ile onları çevreleyen matris arasındaki temas ağını artırdığı ve bu da bağıl çökme değerlerinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, yüksek çökme değerleri ile ilişkili yüksek akışkanlığın, genellikle çimentolu matrisin akma gerilimindeki düşüşten kaynaklandığı ve çökme değerindeki bir artışın kompozitlerin daha fazla deforme olabilirliğini gösterdiği iyi bilinmektedir (Blankson ve Erdem, 2015; Zhong ve Zhang, 2021). Bu kapsamda taze haldeki karışımın hareketi, SMA liflerinin ECC'ye dahil edilmesiyle sınırlanabilmekte ve bu da genel akma geriliminde artışla sonuçlanabilmektedir.

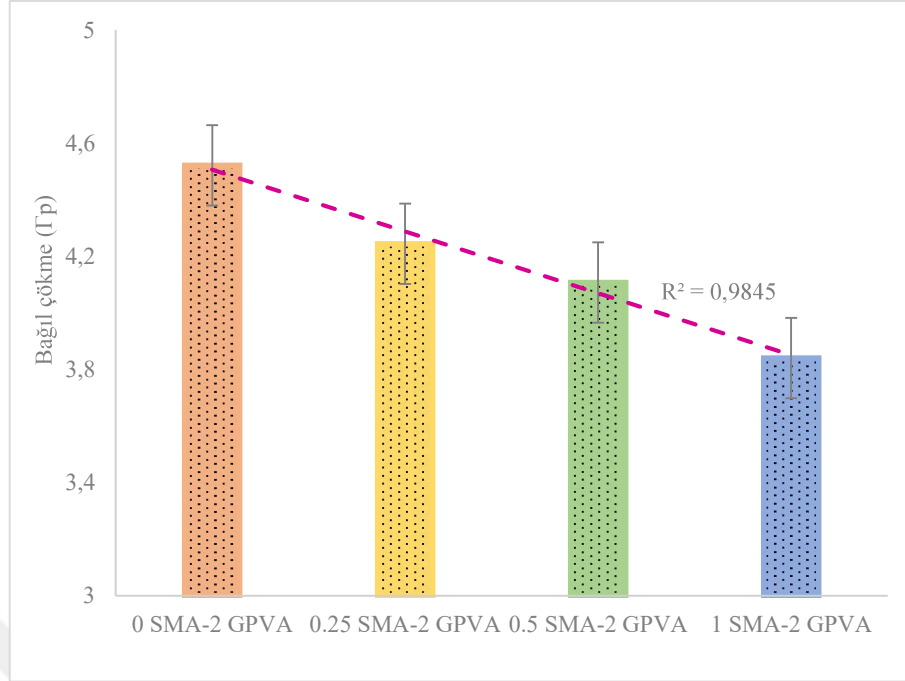
Ayrıca SMA liflerin kullanılması PVA ve SMA ilaveli ECC kompozitlerinin kendiliğinden yerleşme özelliklerinde herhangi bir değişikliğe yol açmadığı ve tüm karışımlar için belirgin bir lif kümelenmesi veya topaklanma olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle üretilen karışımların kalıplara yerleştirilmesinde laboratuvar vibrasyon masası kullanılmamıştır.



Şekil 4.2 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin bağıl çökme sonuçları.

4.2.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

GPVA ve SMA ilaveli ECC karışımların bağıl çökme değerleri de Bölüm 4.2.1'deki gibi hesaplanmıştır. Şekil 4.3, GPVA ve SMA ilaveli ECC'nin SMA lif miktarına karşı bağıl çökmenin değişimini göstermektedir. PVA yerine GPVA kullanılan ECC'de de SMA lifin eklenmesi bağıl çökme değerini azaltmıştır. Referans karışıma (0 SMA-2 GPVA) kıyasla, %0.25 SMA (0.25 SMA-2 GPVA), %0.5 SMA (0.5 SMA-2 GPVA) ve %1 SMA (1 SMA-2 GPVA) ilavesiyle bağıl çökme değerleri sırasıyla %6.2, %9.2 ve %15.1 oranında azalmıştır. Bu sonuçlar PVA ve SMA ilaveli ECC ile karşılaştırıldığında, bağıl çökmelerde PVA yerine GPVA kullanılmasının önemli bir farklılık yaratmadığı ve benzer bir eğilimin ortaya çıktığı görülmektedir. Tüm karışımlar incelendiğinde referans karışımlara göre kıyaslanan bağıl çökme değerleri PVA yerine GPVA kullanılmasıyla maksimum %1 değişkenlik göstermektedir.



Şekil 4.3 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin bağıl çökme sonuçları.

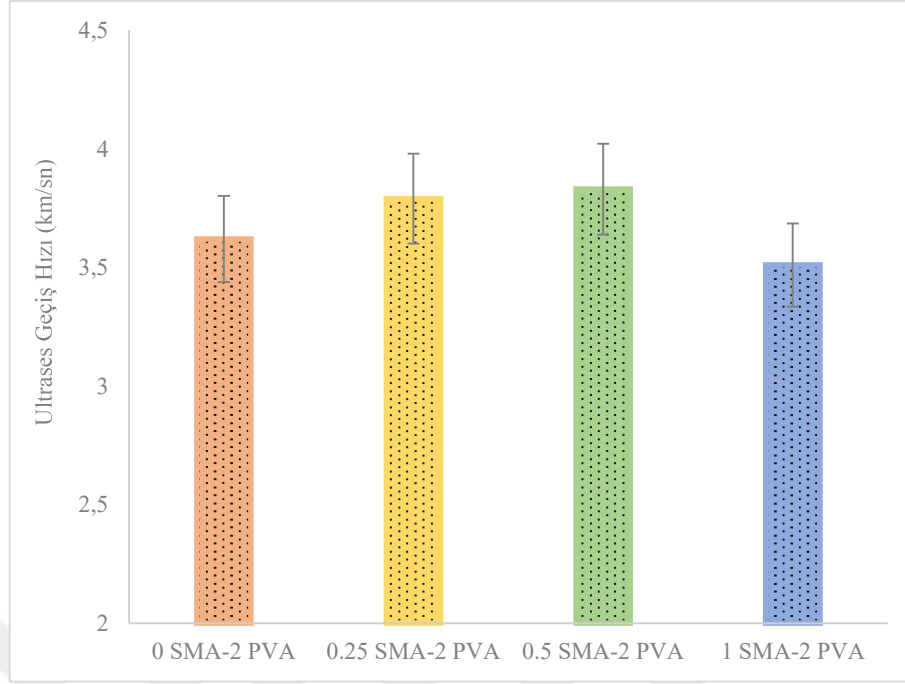
4.3. Ultrasonik Hız Ölçümü

4.3.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

Numuneler kırılmadan önce hasarsız bir yöntemle beton kalitesi hakkında yorum yapabilmek için ultrases geçiş hızı ölçümü TS EN 12504-4'e uygun olarak yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'e göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.4, numunelerin 28 gün sonraki ultrases geçiş hızı değerlerini göstermektedir. Referans karışımla karşılaştırıldığında, %0.25 SMA ve %0.5 SMA ilavesiyle ultrases geçiş hızı sırasıyla %4.7 ve %5.8 oranında artmıştır. Ancak karışıma %1 SMA eklenmesi ultrases geçiş hızı değerini %3.1 oranında azaltmıştır. Tablo 4.1'e göre, üretilen kompozitlerin kalite derecelendirmeleri tüm karışımlar için iyi olarak yorumlanabilmektedir, bu da SMA ve PVA liflerin hibrit dağılımının kompozitlerin kompakt yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

Tablo 4.1 Beton kalitesi değerlendirme (Şimşek, 2011).

Ultrasonik Hız (km/s)	Beton Kalitesi
>4.5	Mükemmel
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Şüpheli
2.0-3.0	Zayıf
<2.0	Çok zayıf

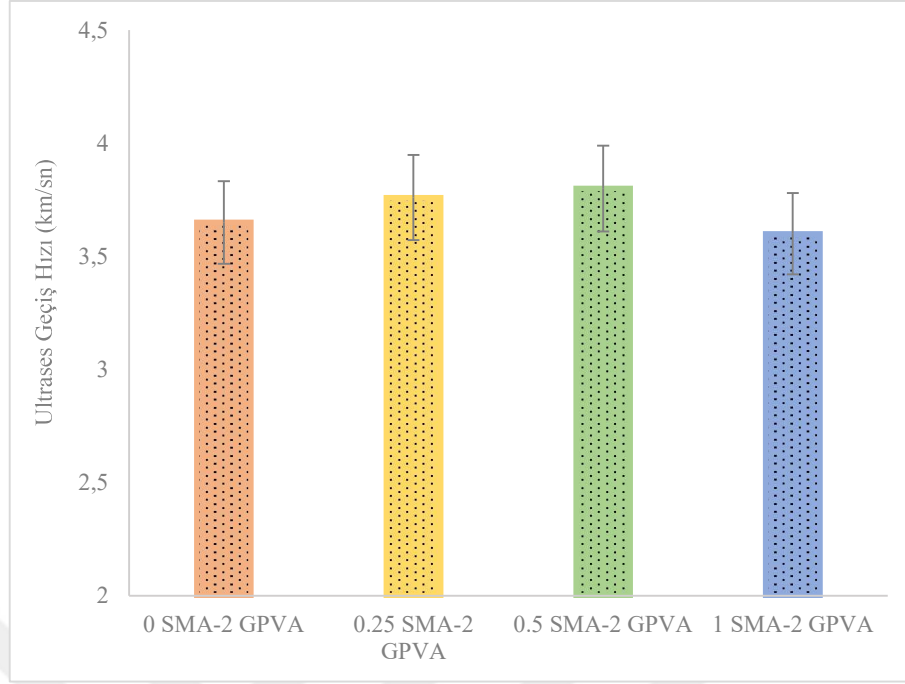


Şekil 4.4 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin ultrases geçiş hızı sonuçları.

4.3.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

Şekil 4.5, PVA yerine GPVA kullanılan numunelerin 28 gün sonraki ultrases geçiş hızı değerlerini göstermektedir. Referans karışımla karşılaştırıldığında, %0.25 SMA ve %0.5 SMA ilavesiyle ultrases geçiş hızı sırasıyla %3 ve %4.1 oranında artmıştır. Ancak karışıma %1 SMA eklenmesi ultrases geçiş hızı değerini %1.4 oranında azaltmıştır. Sonuçlar incelendiğinde değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu ve değişen değerlere rağmen Tablo 4.1'e göre lif ilavesi ile içyapının hepsinin kalite olarak iyi olduğu yorumlanabilmektedir.

İçyapı kalitesi açısından hem PVA lifli, hem de GPVA lifli kompozitlerde kompozit kalitesinin tüm karışımlar için iyi olmasına rağmen, %1 SMA lif ilavesi ile ultrases geçiş hızında düşüş görülmektedir. Bu düşüş %1 SMA ilavesi ile kompozitteki toplam lif hacminin %3'e ulaşmasının ve bunun da içyapıdaki dağılımı etkilemesinin sonucu şeklinde değerlendirilebilmektedir.

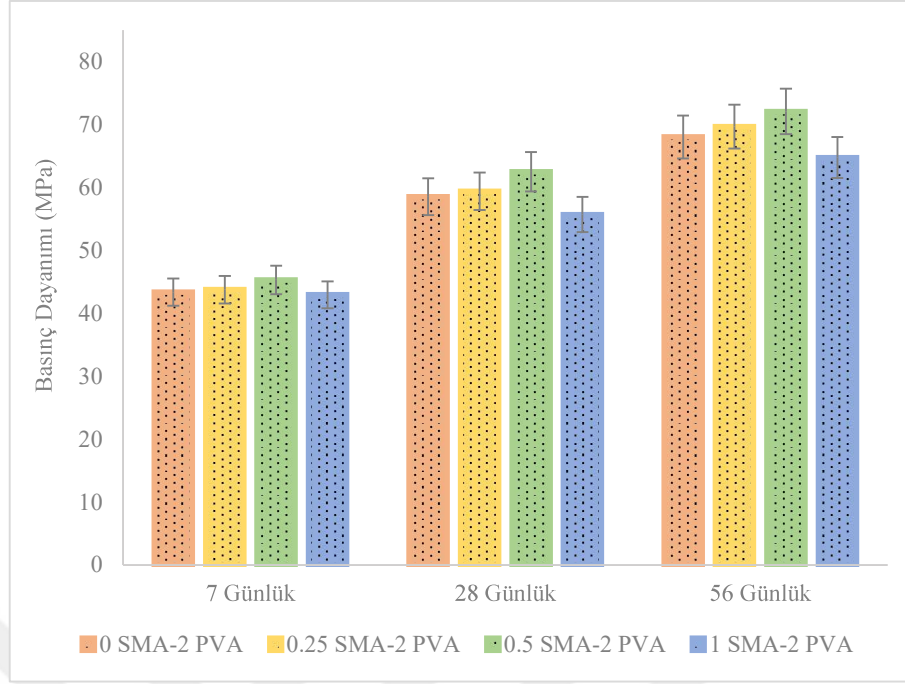


Şekil 4.5 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin ultrases geçiş hızı sonuçları.

4.4. Basınç Dayanımı

4.4.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

Referans ECC (0 SMA-2 PVA) ve SMA lif katkılı hibrit ECC kompozitlerin basınç dayanımı-zaman ilişkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Kontrol karışımın basınç dayanımında, SMA lif ilavesiyle genel olarak erken ve geç yaşlarda artış elde edilmiştir. %0.25 SMA lifli (0.25 SMA-2 PVA) ECC'nin basınç dayanımı 28 ve 56. günde 59.4 ve 69.7 MPa'a ulaşmıştır. Maksimum basınç dayanımı, 28 ve 56. günde 62.5 ve 72.1 MPa'a ulaşan %0.5 SMA içeren (0.5 SMA-2 PVA) ECC kompozitte elde edilmiştir. Bununla birlikte, sonuçlar incelendiğinde %0.5 SMA lif hacminin kritik lif değeri olduğu ve bu değerden daha yüksek lif hacmine çıkıldığında basınç dayanımında belirgin bir düşüşün görüldüğü tespit edilmiştir. Elde edilen bu bulgu Ali ve Nehdi (2017)'nin çalışmalarıyla uyumluluk göstermektedir. Belli bir seviyedeki lif miktarından sonra lifler ve ECC matrisi arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin (interfacial transition zone-ITZ) daha yüksek porozitesi mikroyapıyı zayıflatır. Bu da her bir lifin etrafında daha az miktarda birikmiş matrise yol açar ve böylece kompozitin basınç dayanımını azaltır (Dehghani ve Aslani, 2020).

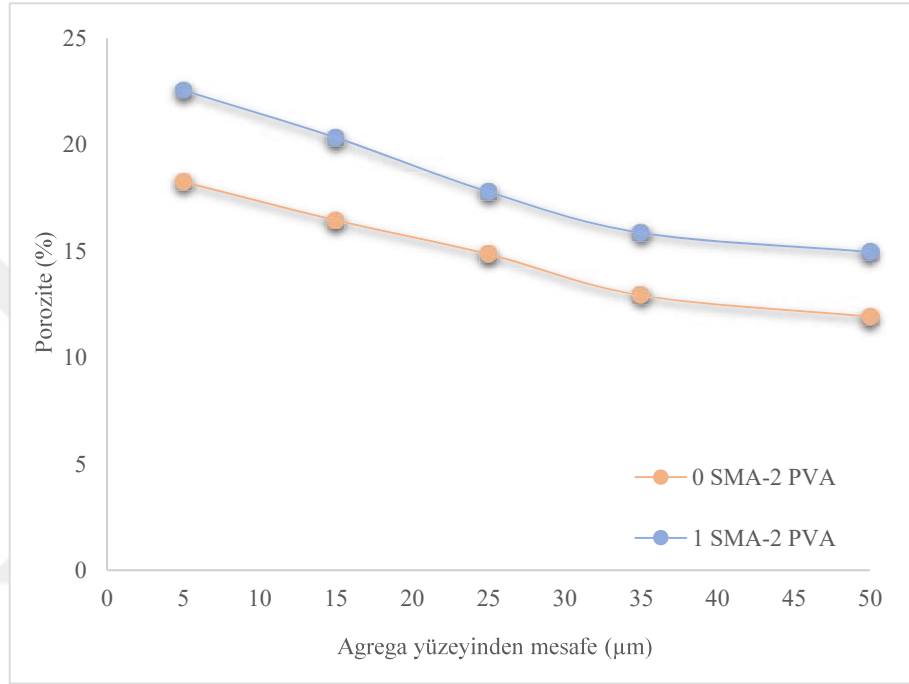


Şekil 4.6 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları.

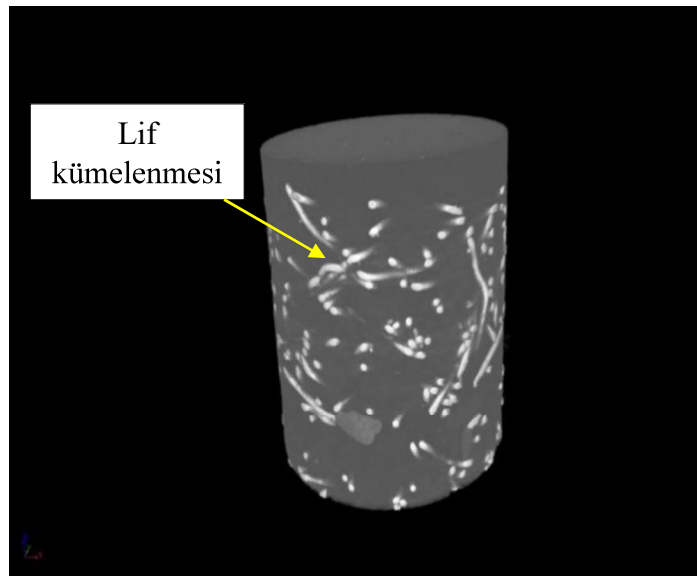
Scrivener ve Pratt (1986) tarafından geliştirilen teknik vasıtasıyla numunelerin düz parlatılmış kesitlerinde agregalar ve onu çevreleyen matris arasındaki arayüzey bölgesindeki porozitenin sayısal olarak karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Arayüz bölgesi ve matris görüntüleri, bir görüntü işleme yazılımı olan Scandium kullanılarak analiz edilmiştir. ITZ'nin porozitesini ölçmek ve karşılaştırmak için, referans karışım ve %1 SMA ilaveli ECC için üç mikrograf seçilmiştir ve porozite ITZ içinde 50 μm mesafede ölçülmüştür. Aynı eşikleme algoritması uygulanmıştır ve her örnek için dokuz değer ortalama kaydedilmiştir. Şekil 4.7, agrega yüzeylerinden uzaklığın bir fonksiyonu olarak mikrografların görüntü analizinden elde edilen ITZ'nin porozitesini göstermektedir. ITZ'nin porozitesi, agregalardan uzaklaştıkça ITZ'deki gözeneklerin hacminin azaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, tüm mesafelerde referans karışımındaki (0 SMA-2 PVA) ara yüzey porozitesinin, %1 SMA ilaveli ECC karışımın matrisinkinden belirgin bir şekilde az olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, tüm mesafelerdeki 1 SMA-2 PVA numunesi, 0 SMA-2 PVA'ya kıyasla belirgin şekilde daha büyük arayüz porozitesine sahiptir. Elde edilen bu bulgular, %1 SMA lif ilavesiyle basınç dayanımında meydana gelen düşüşü açıklamaktadır.

Genel olarak, sonuçlar basınç dayanımının iyileştirilmesi için optimum bir lif içeriği olduğunu göstermiştir. Spesifik olarak, SMA liflerin eklenmesiyle basınç dayanımı %0.5 SMA lif ilavesine kadar artmış ve ardından kompozite daha fazla SMA lif eklendiğinde basınç

dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Basınç dayanımında %1 SMA lif eklenmesiyle meydana gelen düşüş için makul bir başka açıklama da Şekil 4.8’de görülen bilgisayarlı tomografi analizi ile teyit edilmiştir. Şekil 4.8 kompozitteki lif kümelerini göstermektedir. Bu görüntü incelendiğinde, lif kümesi matristen liflere yük aktarımı için zayıf noktalar oluşturabilecek ve artan gerilmeler altında kompozitin daha düşük dayanım seviyesinde kalmasına neden olabilecektir.



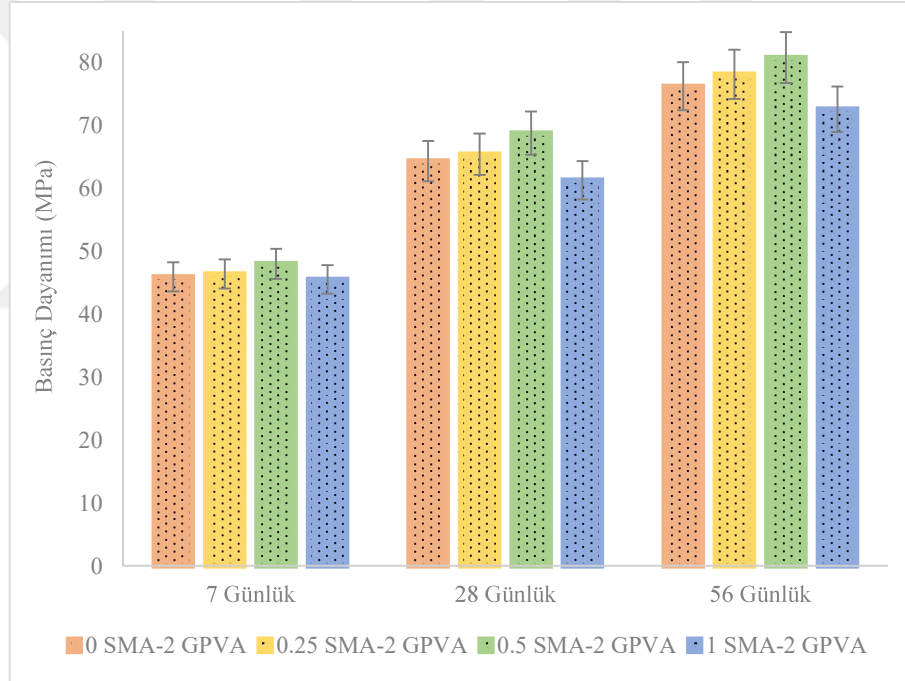
Şekil 4.7 0 SMA-2 PVA ve 1 SMA-2 PVA karışımlarının arayüz poroziteleri.



Şekil 4.8 Karışımlarda lif kümelenmesi.

4.4.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

GPVA liflerle üretilen karışımların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Referans karışımla kıyaslandığında %0.25 ve %0.5 SMA lif ilavesi ile basınç dayanımında 28. günde sırasıyla %1.7 ve %6.9 artış meydana gelmiş, %1 SMA lif ilavesi ile ise %4.8 azalış meydana gelmiştir. 56. günde ise %0.25 ve %0.5 SMA lif ilavesi ile %2.5 ve %6 artış, %1 SMA lif ilavesi ile ise %4.8 azalış meydana gelmiştir. PVA ve GPVA kullanılan karışımlar için sonuçlar birlikte incelendiğinde de, referans numunesine ait basınç dayanımının erken ve geç dönem yaşlarda yüzeyi normal olan PVA lifli karışımlara göre iyileştiği gözlemlenmiştir. Basınç dayanım değerleri 0 SMA-2 GPVA karışımından 0 SMA-2 PVA karışımına kıyaslandığında 7, 28 ve 56 günlerde sırasıyla %6, %10 ve %12 oranlarında artmıştır.



Şekil 4.9 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları.

PVA lif yüzeyinin nanoteknolojik esaslarla grafitle kaplanmasının sağladığı en önemli avantajlardan biri, Bölüm 4.1'de sunulduğu üzere lif yüzeylerinin hidrofobiklik derecesini değiştirmesidir. Bu bağlamda artan hidrofobiklik derecesi lif-matris ara yüzey porozitesini modifiye ederek artan basınç gerilmeleri altında kompozitin daha fazla direnç gösterebilmesine ve daha stabil çoklu çatlak davranışı oluşturabilmesine imkan vermiştir.

GPVA lifli karışımlarda PVA lifli karışımlara benzer olarak SMA lif eklenmesi genel olarak dayanımları iyileştirmiş olup, %0.5 SMA lif ilavesinin optimum dayanım değerini verdiği, bu oranın ötesinde dayanımda azalmaların olduğu görülmektedir. Bu azalmanın lif ilavesindeki artışa paralel olarak matris içerisindeki sıkışmış hava boşluğundaki artışa ve matris-lif ara yüzeylerindeki porozite artışına bağlı olarak geldiği düşünülmektedir.

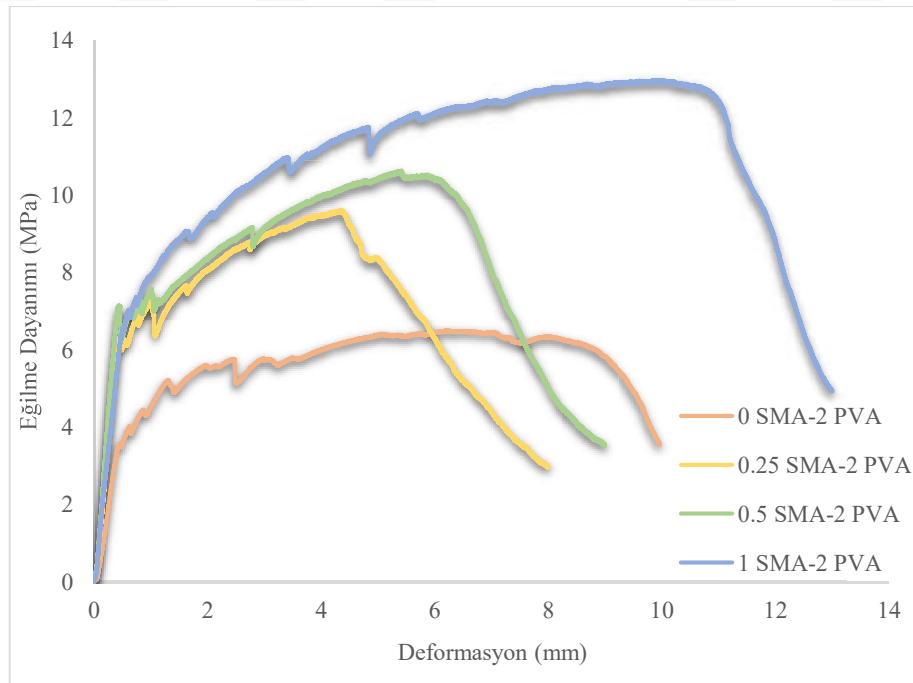
4.5. Eğilme Performansı

PVA-SMA ve GPVA-SMA liflerin kompozitin eğilme performansına etkisi incelenmiş ve eğilme davranışı ile çatlak davranışı arasındaki ilişkiler analiz edilerek liflerin yüzey özellikleri ile değerlendirilmiştir.

4.5.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

4.5.1.1. Eğilme dayanımı ve tokluk

Şekil 4.10, ECC'nin 28. gündeki eğilme dayanımı-deformasyon eğrilerini göstermektedir. Her karışım için üç numune yapılmıştır ve ECC'nin eğilme kapasitesi, maksimum eğilme yüküne karşılık gelen deplasman olarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 4.2'de özetlenmiştir.



Şekil 4.10 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin eğilme dayanımı sonuçları.

Tablo 4.2 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin üç noktalı eğilme test sonuçları.

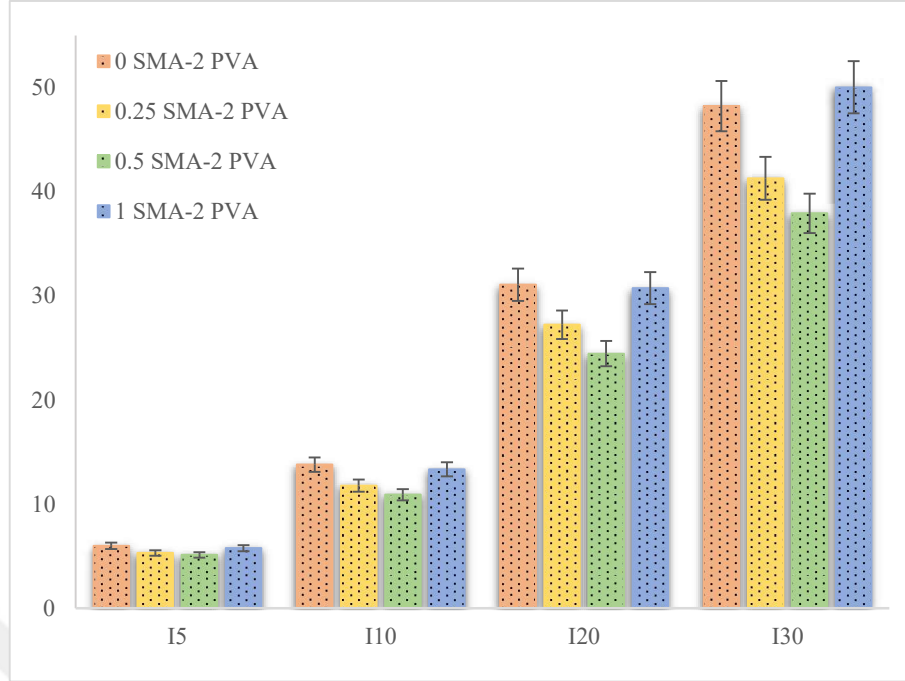
	0 SMA- 2 PVA	0.25 SMA- 2 PVA	0.5 SMA- 2 PVA	1 SMA- 2 PVA
Eğilme dayanımı (MPa)	6.50	9.62	10.63	12.97
Orta açıklık deplasman (mm)	6.20	4.36	5.41	10.02
Şekil değiştirme (%)	0.62	0.44	0.54	1.00

Not: Tablodaki orta açıklık deplasman ve şekil değiştirme değerleri maksimum yüke karşılık gelen değerlerdir.

En yüksek eğilme dayanımı (12.97 MPa) 1 SMA-2 PVA karışımı için elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı, referans karışıma (0 SMA-2 PVA) kıyasla 0.25 SMA-2 PVA, 0.5 SMA-2 PVA ve 1 SMA-2 PVA karışımları için sırasıyla %46, %62 ve %97 artmıştır. %0.25 ve %0.5 SMA lif eklenmesiyle maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerlerinin düşmesine rağmen, açıklık ortası deplasmanı en yüksek olan numune (10.02 mm) 1 SMA-2 PVA karışımı olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde tüm kirişlerin davranışının metale benzediği (deformasyon sertleşmesi davranışı) ve çoklu çatlak davranışı sergilediği de görülmektedir.

Bir diğer açıdan sonuçlar incelendiğinde, ECC'de artan SMA lif içeriği ile eğilme dayanımı-deformasyon eğrisinin lineer kısmının sonundaki mukavemete karşılık gelen çatlama dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca SMA liflerin eklenmesi, maksimum eğilme dayanımını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, artan SMA lif hacmine paralel olarak üretilen kompozitlerin eğilmede çekme kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Bu durum, SMA lifin çatlakan yüzeyler arasında gerilme transferini sağlayarak lokalize olma eğilimindeki çatlakları başarılı bir şekilde köprüleyebildiğini ve dolayısıyla çatlak lokalizasyonunu erteleyebildiğini ortaya koymaktadır. Böylece daha yüksek eğilme dayanımına sahip deformasyon sertleşmesi gösteren bir kompozit üretilmiştir. Bu bulgular literatürdeki (Ali ve Nehdi, 2017; Dehghani ve Aslani, 2020) bulgularla da uyumludur.

Tüm numuneler için eğilme deneyi sonuçlarından Şekil 4.11'de görülen tokluk indisleri hesaplanmıştır. Düşük tokluk indisi, çatlama sonrası mukavemet kaybının büyük olduğunu ve enerji yutabilme kabiliyetinin düşük olduğunu gösterir. PVA ve SMA liflerin kullanıldığı tüm ECC karışımları için tokluk indisleri karşılaştırıldığında, I5, I10, I20 ve I30 değerlerinin sırasıyla 5, 10, 20 ve 30'dan büyük olduğu görülmektedir. Bu da PVA ve SMA lifler ile üretilen tüm ECC kompozitlerin sünek davranış sergilediğini göstermektedir.



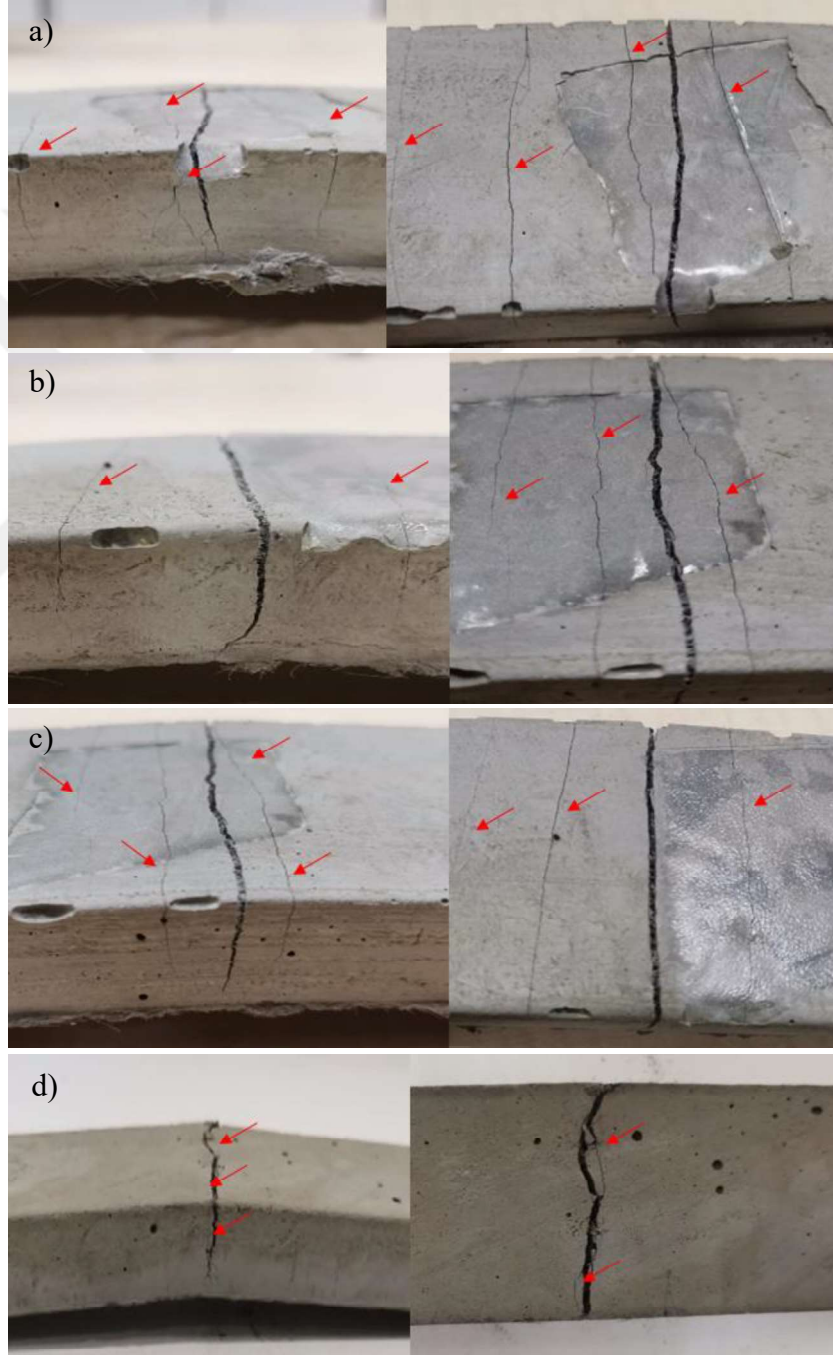
Şekil 4.11 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin tokluk indisi değerleri.

4.5.1.2. Hasar desenleri

Üretilen numunelerin eğilme deneyleri sonrası ortaya çıkan tipik hasar ve çatlak durumları Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Sadece maksimum moment bölgesinde oluşan çatlaklar dikkate alınmış ve çatlak analizi için 35 mm x 80 mm boyutlu bir alan tüm serilerde seçilerek karakterizasyon için kullanılmıştır. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, ECC'nin çatlak desenleri, Şekil 4.10'da sunulan eğilme dayanımı-deformasyon eğrileri ile tutarlıdır. Ayrıca, tüm karışımlar için deformasyon sertleşmesi özellikleriyle ilişkili çoklu çatlaklar açıkça gözlemlenebilmektedir. Bölüm 4.4.1.1'de tespit edildiği üzere, en iyi eğilme performansı ile tutarlı olacak şekilde 1 SMA-2 PVA karışımında daha homojen dağılmış çatlakların ortaya çıktığı görülmektedir.

Eğilme yükünün kaldırılmasından sonra kompozitlerin çatlak genişliği ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.3'te özetlenmiştir. Analiz için üç ayrı ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. Bilindiği üzere, çoğu mikro çatlak, eğilme yükünün kaldırılmasıyla genellikle kapanabilmektedir ve bu nedenle gerçek çatlak genişlikleri kaydedilen çatlak genişliklerinden daha küçük olabilmektedir (Zhong and Zhang, 2021; Li ve diğ., 2001). Sonuçlar değerlendirildiğinde, 0 SMA-2 PVA karışımında %4.32 standart sapma değeriyle doğrulandığı üzere çok daha kararlı ve stabil bir davranış ortaya çıkmıştır. Öte yandan, karışıma SMA lif eklendikçe kompozitin çatlak genişliği küçülmektedir, bu durumda çatlak köprüleme kapasitesinin lif-matris arayüzünün özelliklerinden etkilendiği söylenebilmektedir. ECC

karışımların kırılmış yüzeylerinin morfolojisi (Şekil 4.13), liflerin çoğunun dışarı çekildiğini ortaya koymaktadır, bu da lifler ve matris arasındaki bağ kuvvetinin lif kopmasını önlemek için yeterli olduğunu gösterir. Bu tür lif-matris ara yüz davranışı, gerilim transferini mümkün kılacak ve çatlak büyümesini kısıtlayacak olan çekme davranışını geliştirmek için önemlidir (Zhong ve Zhang, 2021). SMA lifleri yükleme sırasında çekme davranışı gösterse de, özellikle düşük lif dozajında çatlak kontrol performanslarının çok yüksek olmadığı görülmüştür.

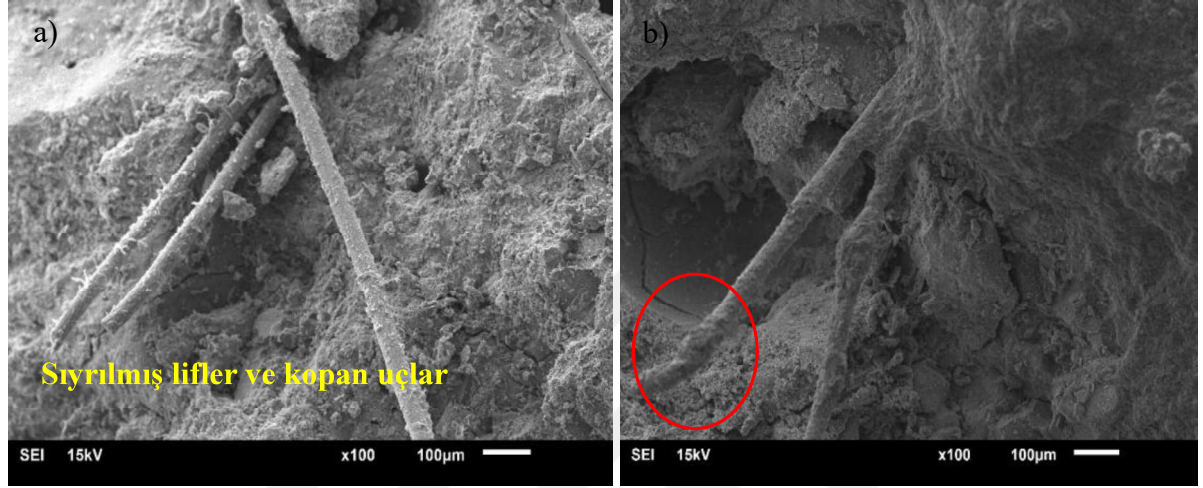


Şekil 4.12 a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.50 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA için hasar desenleri.

Tablo 4.3 SMA ve PVA lif ilaveli ECC'nin eğilme testindeki çatlak genişlikleri.

	0 SMA-2 PVA	0.25 SMA-2 PVA	0.5 SMA-2 PVA	1 SMA-2 PVA
Çatlak genişliği (μm)	350.8 (4.32)*	330.2 (7.93)*	292.6(13.15)*	160.3 (9.74)*

*Parantez içindeki değerler standart sapmalardır.

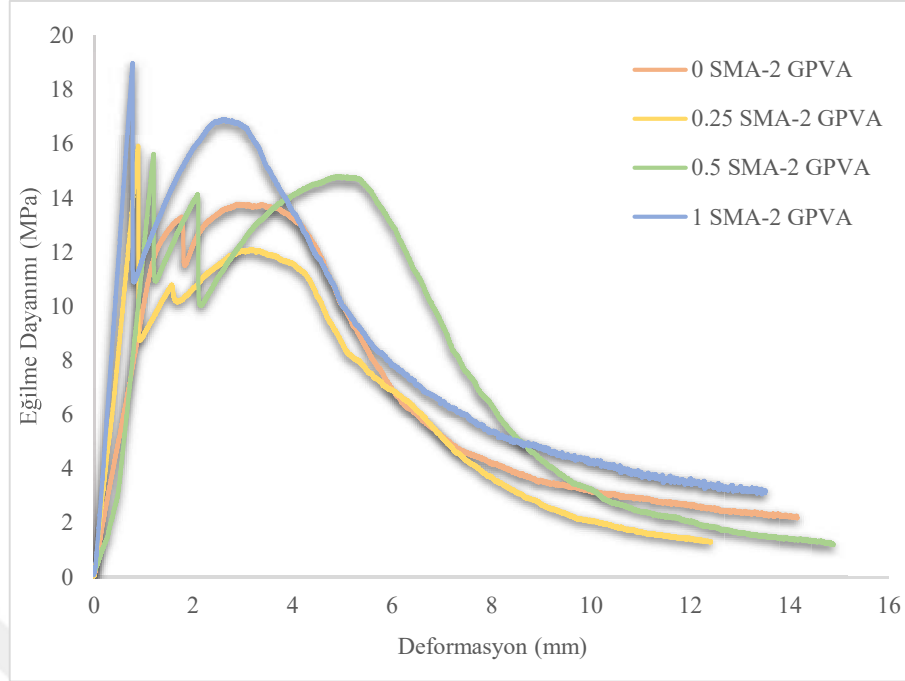


Şekil 4.13 a) 0 SMA-2 PVA ve b) 1 SMA-2 PVA karışımları için eğilme yükü sonrası kırılma yüzeyindeki liflerin durumu.

4.5.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

4.5.2.1. Eğilme dayanımı ve tokluk

GPVA ve SMA ilaveli ECC'nin 28. gündeki eğilme davranışları Şekil 4.14'te görülmektedir. Eğilme dayanımı deney sonuçları da Tablo 4.4'te özetlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek eğilme dayanımı (18.97 MPa) 1 SMA-2 GPVA karışımı için elde edilmiştir. Eğilme dayanımları GPVA ile üretilen referans karışımla (0 SMA-2 GPVA) kıyaslandığında 0.25 SMA-2 GPVA, 0.5 SMA-2 GPVA ve 1 SMA-2 GPVA karışımları için sırasıyla %16, %13 ve %38 oranlarında artmıştır. Sonuçlar incelendiğinde tüm karışımların deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak davranışı sergilediği görülmektedir.



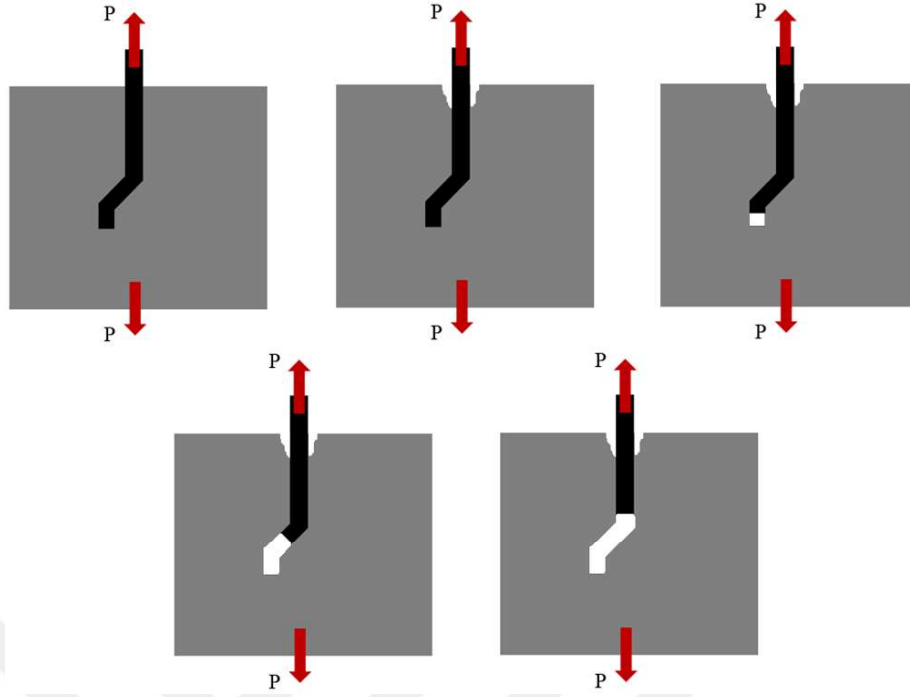
Şekil 4.14 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin eğilme dayanımı sonuçları.

Tablo 4.4 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin üç noktalı eğilme test sonuçları.

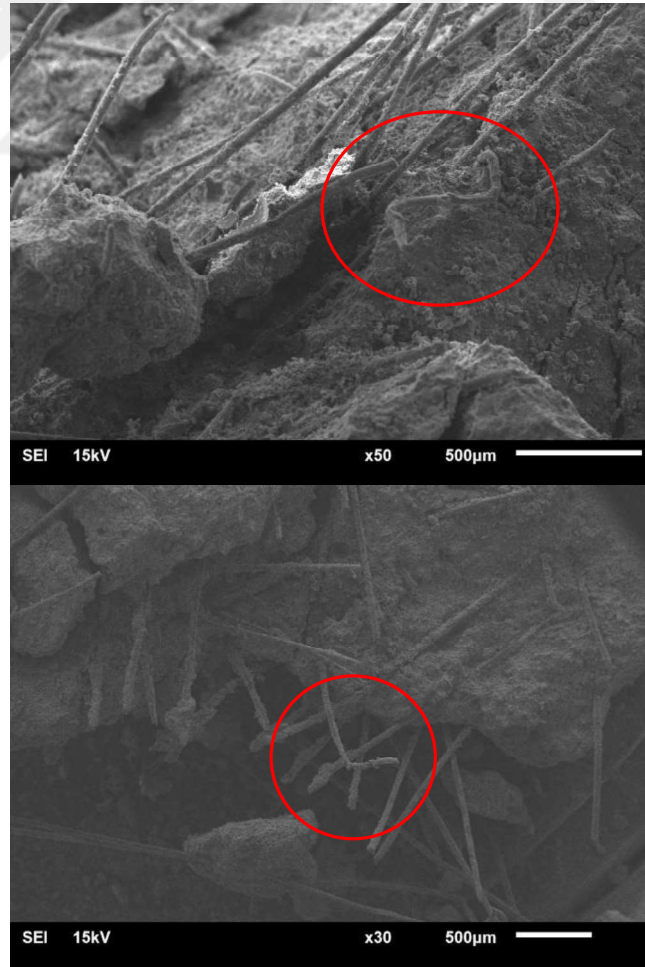
	0 SMA- 2 GPVA	0.25 SMA- 2 GPVA	0.5 SMA- 2 GPVA	1 SMA- 2 GPVA
Eğilme dayanımı (MPa)	13.77	15.92	15.62	18.97
Orta açıklık deplasman (mm)	2.9093	0.8942	1.2031	0.7796
Şekil değiştirme (%)	0.29	0.09	0.12	0.08

Not: Tablodaki orta açıklık deplasman ve şekil değiştirme değerleri maksimum yüke karşılık gelen değerlerdir.

PVA liflerin yüzeylerinin nanoteknolojik olarak modifiye edilmesiyle elde edilen GPVA'lı liflerle üretilen kompozitlerde daha iyi performansın elde edilmesinin nedeninin, çatlak köprüleyen SMA liflerin matristen yük altında sıyrılması sırasında harcanan enerjiye ek olarak, nano grafit ile modifiye edilmiş PVA liflerin sıyrılmayı zorlaştıran kancalı uç gibi davranarak yük altında plastik deformasyonu ile ilave enerji harcaması olduğu düşünülmektedir. Bu davranış Şekil 4.15'te temsili olarak gösterilmiştir. Yapılan mikro yapısal analizlerden elde edilen SEM görüntüleri de (Şekil 4.16) bu öngörüü desteklemektedir.

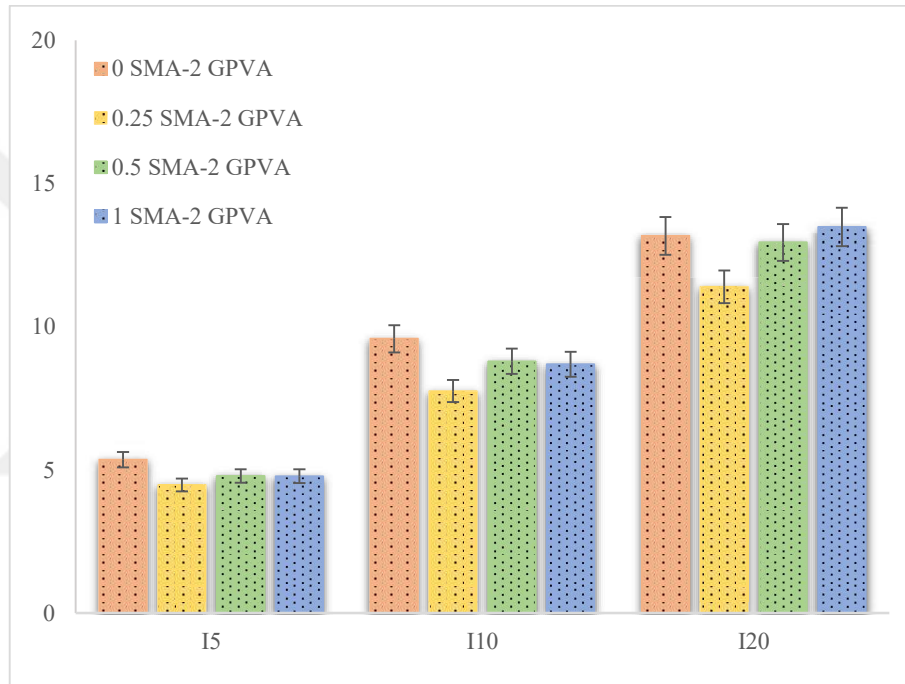


Şekil 4.15 Temsili GPVA lif davranışı.



Şekil 4.16 GPVA liflerin davranışının incelendiği SEM görüntüleri.

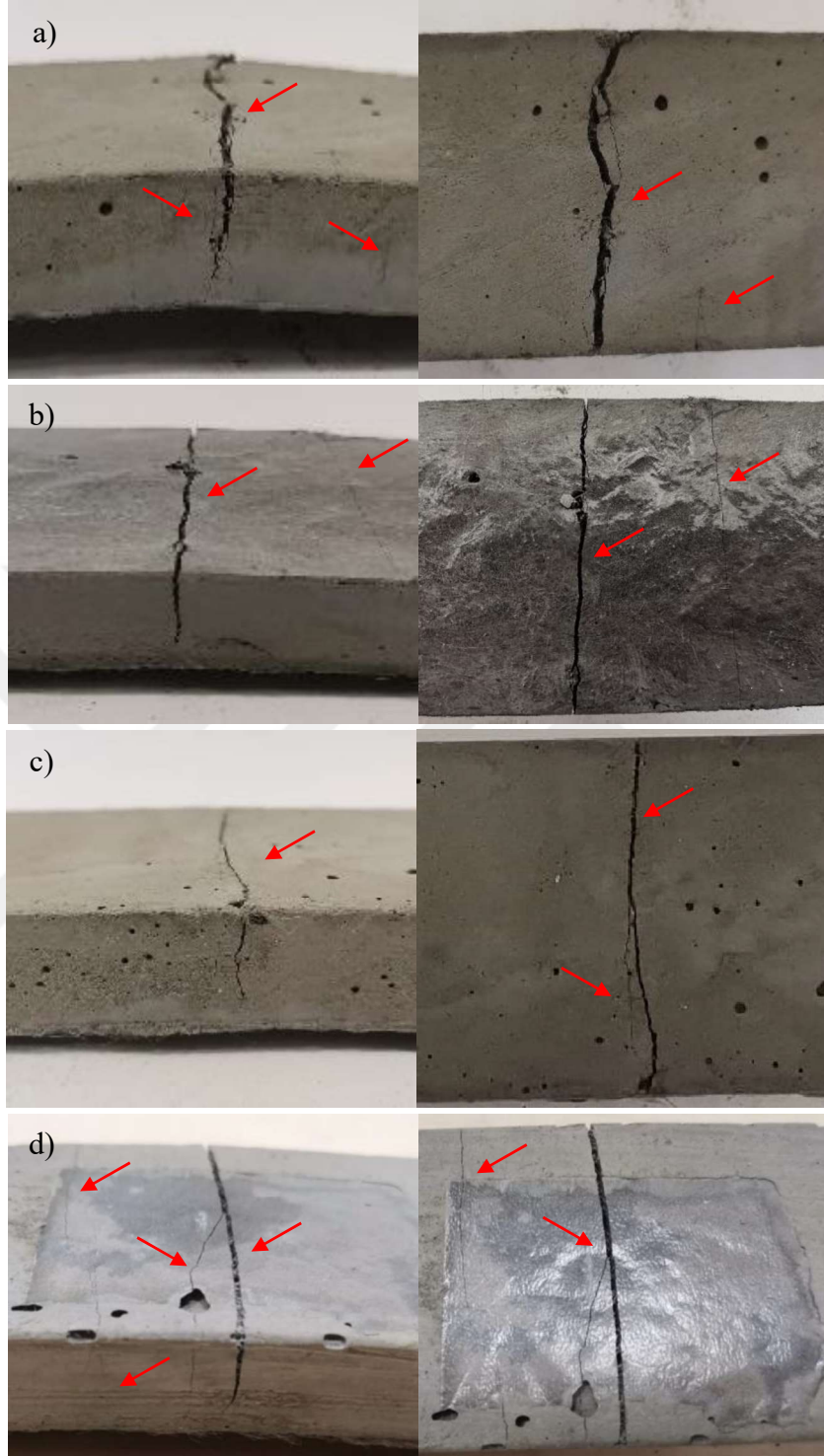
Eğilme deneyi sonuçlarından Şekil 4.17’deki tokluk indisleri hesaplanmıştır. GPVA ve SMA liflerin kullanıldığı ECC karışımlar için tokluk indisleri karşılaştırıldığında, 0 SMA-2 GPVA karışımı için sadece I5 ve I10 değerleri beklenen sınırı karşılamaktadır ancak diğer karışımlar için I5, I10 ve I20 değerlerinin hiçbiri 5, 10 ve 20 sınırına ulaşamamıştır. Bu da GPVA ve SMA lifler ile üretilen tüm ECC kompozitlerin daha farklı bir davranış sergilediğini göstermektedir. PVA ve SMA ilaveli ECC karışımlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmesiyle birlikte davranışta birden fazla pik noktalar meydana gelmiştir. Bu da Şekil 4.14’teki eğilme dayanımı-deformasyon grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 4.17 SMA ve GPVA lif ilaveli ECC’nin tokluk değerleri.

4.5.2.2. Hasar desenleri

Şekil 4.18, GPVA ve SMA lif ilaveli ECC karışımların eğilme yüklemesi sonrası kırılma modellerini göstermektedir. Bu karışımlar için de PVA ve SMA ilaveli karışımlarda olduğu gibi sadece maksimum moment bölgesinde oluşan çatlaklar dikkate alınarak inceleme ve analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.18 a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA için hasar desenleri.

Şekil 4.18’de görülen çatlama desenleri incelendiğinde, PVA ve SMA ilaveli ECC’ler ile benzer şekilde GPVA ve SMA ilaveli ECC’lerde de çatlakların stabil ve gözle yapılan incelemelerde mikron düzeyinde çoklu çatlakların var olduğu görülmektedir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, ECC’nin çatlak desenleri, Şekil 4.14’da sunulan eğilme dayanımı-deformasyon

eğrileri ile tutar olmakla beraber altı çizilmesi gereken önemli noktalardan biri GPVA ve SMA içeren ECC'li kompozitler de PVA ve SMA içeren kompozitlere göre belirgin ikincil piklerin varlığıdır. Bu davranışın PVA liflerde yapılan nanoteknolojik yüzey iyileştirmesinin lif üzerindeki gerilme dağılımını daha uniform hale getirmesinin ve buna bağlı olarak da artan SMA lif ilavesi de daha ileri derecede sinerji yaratmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Eğilme yükünün kaldırılmasından sonra kompozitlerin çatlak genişliği ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.5'te özetlenmiştir. Tablodaki sonuçlar da incelendiğinde sınırlı da olsa GPVA ve SMA lifli kompozitlerde genel olarak çatlak genişliklerin de bir azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5 SMA ve GPVA lif ilaveli ECC'nin eğilme testindeki çatlak genişlikleri.

	0 SMA- 2 GPVA	0.25 SMA- 2 GPVA	0.5 SMA- 2 GPVA	1 SMA- 2 GPVA
Çatlak genişliği (μm)	338.4 (4.63)*	321.7 (6.13)*	257.3 (11.12)*	147.2 (8.54)*

*Parantez içindeki değerler standart sapmalardır.

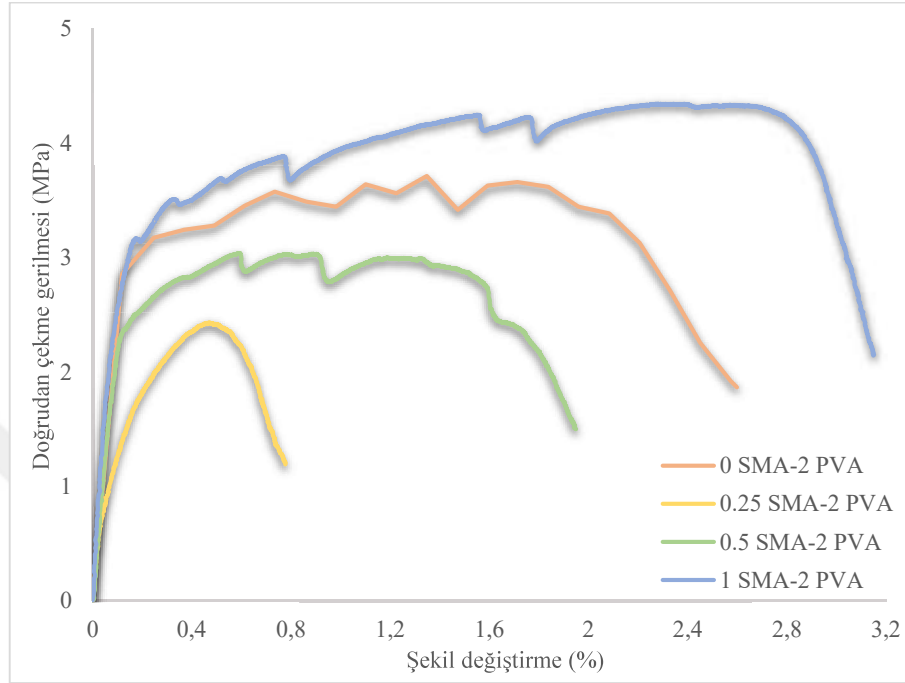
4.6. Doğrudan Çekme Davranışı

4.6.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

PVA ve SMA ilaveli ECC'nin doğrudan çekme testlerinden elde edilen çekme gerilmesi-şekil değiştirmesi grafikleri Şekil 4.19'da gösterilmektedir. PVA ve SMA liflerin miktarı, özellikleri ve lif ile çevreleyen matris arasındaki kimyasal bağın eğrilerin şeklini etkileyecek temel parametreler olduğu bilinmektedir (Li, 2019). Ayrıca numunelerin ECC olarak değerlendirilebilmesi için hem eğilmede çekme altında, hem de doğrudan çekme altında deformasyon sertleşmesi göstermesi gerekmektedir.

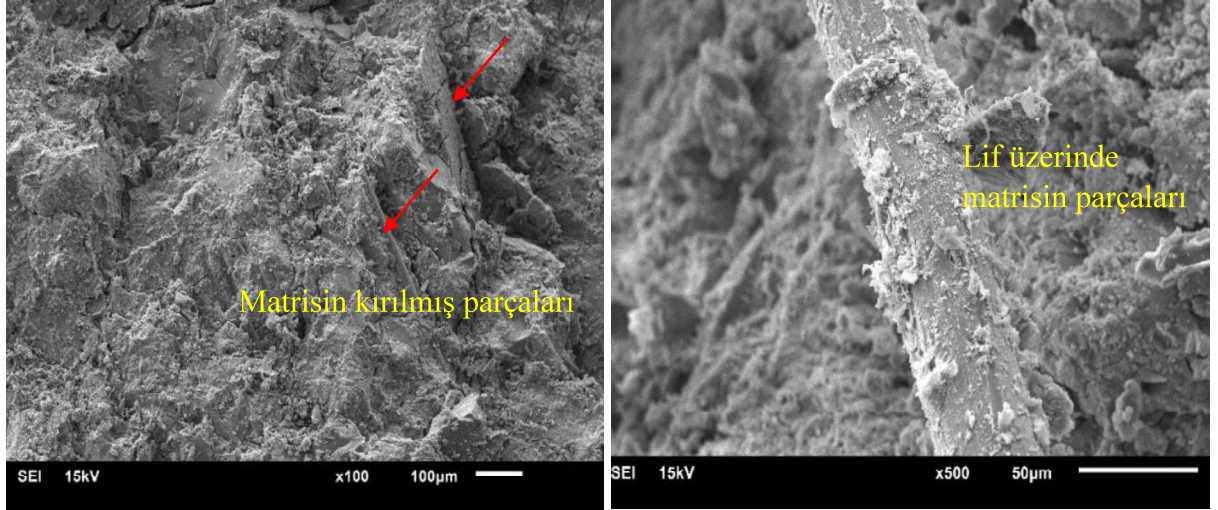
Şekil 4.19'da görüldüğü gibi, 0.25 SMA-2 PVA karışımı enerji bazlı indislerin (maksimum tamamlayıcı kırılma enerjisi/çatlak ucu tokluğu) düşük oranına atfedilebilen (Nematollahi ve diğ., 2017) doymuş bir deformasyon sertleşmesi davranışı gereksinimlerini karşılayamamaktadır. %0.5 SMA lif ilaveli ECC, referans numuneye göre daha düşük bir çekme dayanımına sahiptir, bu da bu lif oranının da uygun bir oran olmadığını göstermektedir. %1 SMA ilaveli ECC sadece deformasyon sertleşmesi davranışı göstermekle kalmayıp, aynı zamanda referans numuneden daha yüksek bir çekme dayanımına sahiptir. Bu nedenle, doğrudan çekme yüklemesi altında, en uygun SMA lif içeriği (%1) ile PVA ve SMA liflerin

ECC'nin çatlak kontrol davranışını geliştirmek için sinerjistik bir etki üretebildiği söylenebilmektedir. Ayrıca, bu tezde seçilen yüksek dozda uçucu külün lif köprüleme etkisinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğu inanılmaktadır.

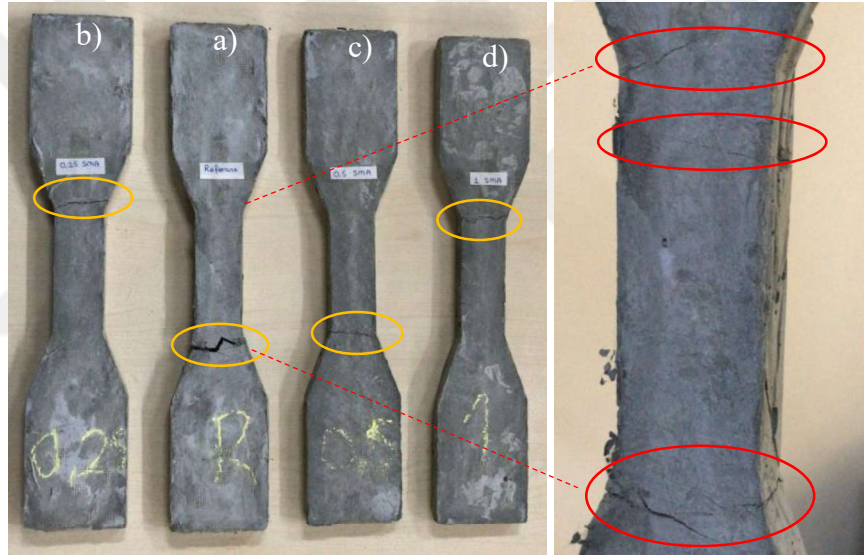


Şekil 4.19 PVA ve SMA ilaveli ECC'nin doğrudan çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 4.20, 1 SMA-2 PVA karışımının çekme yüklemesi kırılma yüzeylerindeki lif morfolojisinin SEM görüntülerini göstermektedir. İncelenen SEM görüntülerinde SMA liflerin kolayca çekilip sıyrılmasını engelleyen belirgin matris parçalarının olduğu görülmektedir. Bu da uygun lif içeriğine sahip ECC'lerde daha yüksek çekme özellikleri ve daha düşük çatlak genişlikleri ile sonuçlanmıştır. Tek eksenli doğrudan çekme testi altında tüm numunelerin kırılmasının dar kesit bölgesinde meydana geldiği de görülmüştür. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi, 1 SMA-2 PVA karışımında, en iyi çekme performansı ile tutarlı olarak, daha düzgün dağılmış çatlaklar bulunmaktadır.



Şekil 4.20 ECC’deki çekme yüklemesi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

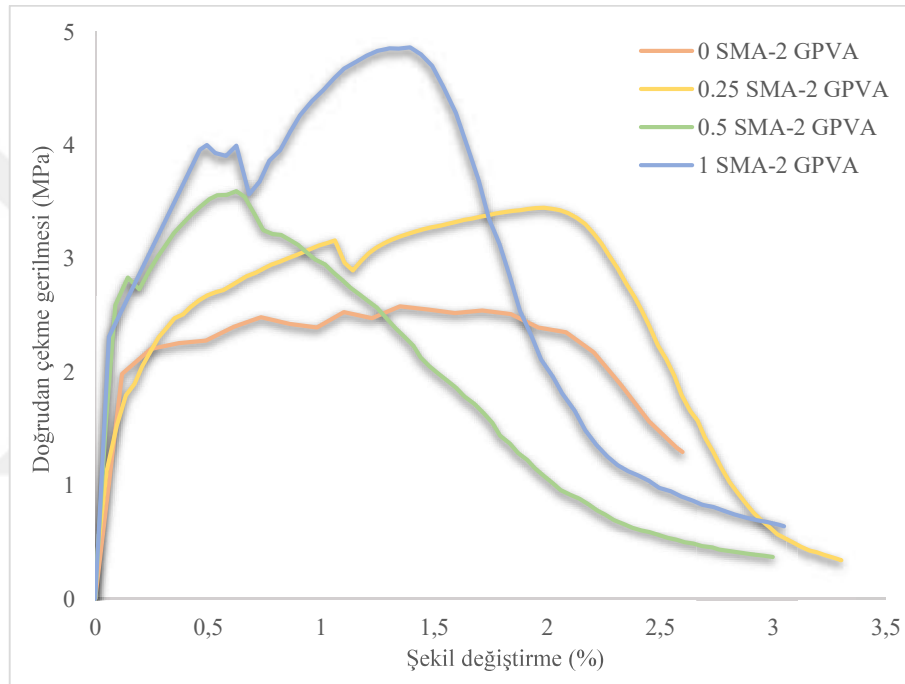


Şekil 4.21 Doğrudan çekme yüklemesi altında a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.5 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA’nın kırılma davranışı.

4.6.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

GPVA ve SMA ilaveli ECC’nin doğrudan çekme testlerinden elde edilen çekme gerilmesi-şekil değiştirmesi eğrileri Şekil 4.22’de gösterilmektedir. Bu numunelerin de ECC olarak değerlendirilebilmesi için hem eğilmede çekme altında, hem de doğrudan çekme altında deformasyon sertleşmesi gösterip göstermediği incelenmiştir. Çünkü eğilme deneyi ile sehimsertleşmesi davranışının gözlemlendiği bir kompozitin doğrudan çekme etkisinde de deformasyon sertleşmesi davranışı göstereceğinin garantisi yoktur. Diğer bir deyişle eğilmede sehimsertleşmesi gösteren bir kompozit, çekmede deformasyon yumuşaması davranışı gösterebilir. Şekil 4.22’de görülen sonuçlar incelendiğinde, SMA lif miktarı arttıkça GPVA ile üretilen

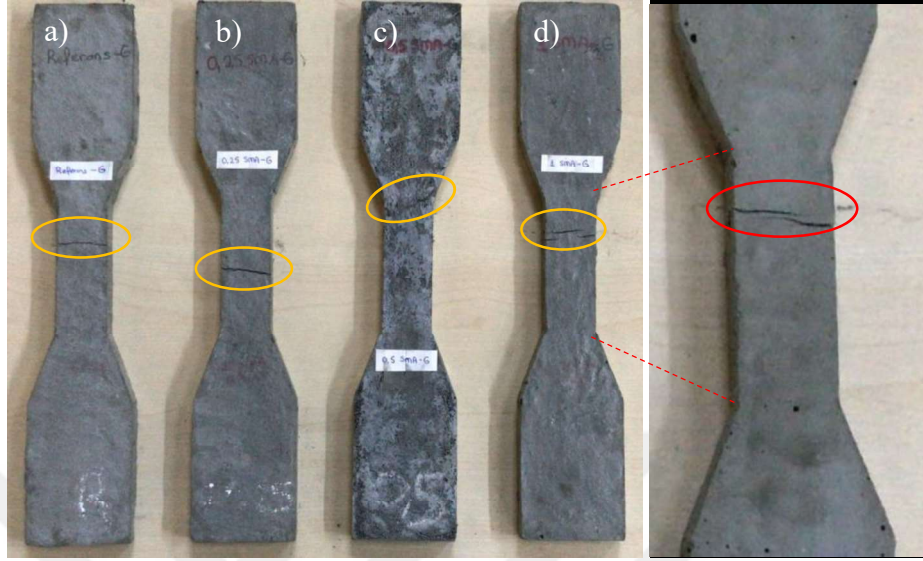
ECC'lerin doğrudan çekme dayanımları artmıştır. Referans karışımla (0 SMA-2 GPVA) karşılaştırıldığında 0.25 SMA-2 GPVA, 0.5 SMA-2 GPVA ve 1 SMA-2 GPVA karışımlarında doğrudan çekme dayanımı sırasıyla %33.6, %39.4 ve %88.4 oranında artmıştır. Karışımların hepsi deformasyon sertleşmesi davranışı gereksinimlerini karşılayabilmiştir, bu nedenle tüm karışımların ECC davranışına sahip olduğu söylenebilmektedir. Böylece GPVA ve SMA ilaveli ECC'lerde de doğrudan çekme yüklemesi altında, hem maksimum gerilmeyi hem de deformasyon sertleşmesi davranışını gösterdiği için en uygun SMA lif içeriğinin %1 olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.22 GPVA ve SMA ilaveli ECC'nin doğrudan çekme gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri.

PVA, GPVA ve SMA ilavesi ile üretilen tüm karışımlarda tek eksenli doğrudan çekme testi altında en uygun SMA lif yüzdesi % 1 olarak belirlenmiştir. 1 SMA-2 PVA ve 1 SMA-2 GPVA numuneleri karşılaştırıldığında da sadece PVA'nın yüzeyinin kaplanması ile %11.9'luk bir artış elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.23'te görüldüğü gibi, GPVA ve SMA ilaveli tüm numunelerin kırılmasının da dar kesit bölgesinde meydana geldiği görülmektedir. Naaman ve Reinhardt (2006) tarafından yapılan bir sınıflandırmada da görülebileceği üzere, çekme duktilitesi değeri %2'yi aşan ECC kompozitler yapısal onarım (structural repair) uygulamalarında kullanılabilir. Dolayısıyla PVA liflerin yüzeyinin nanografitle modifikasyonu sonucu çekme sünekliği açısından önemli artışlar sağlanarak SMA liflerle sinerji oluşturulmuş ve

GPVA-SMA hibrit üretimiyle ortaya çıkan ECC'ler syructural repair için kullanılabilecek kompozitler olarak ortaya çıkmıştır.

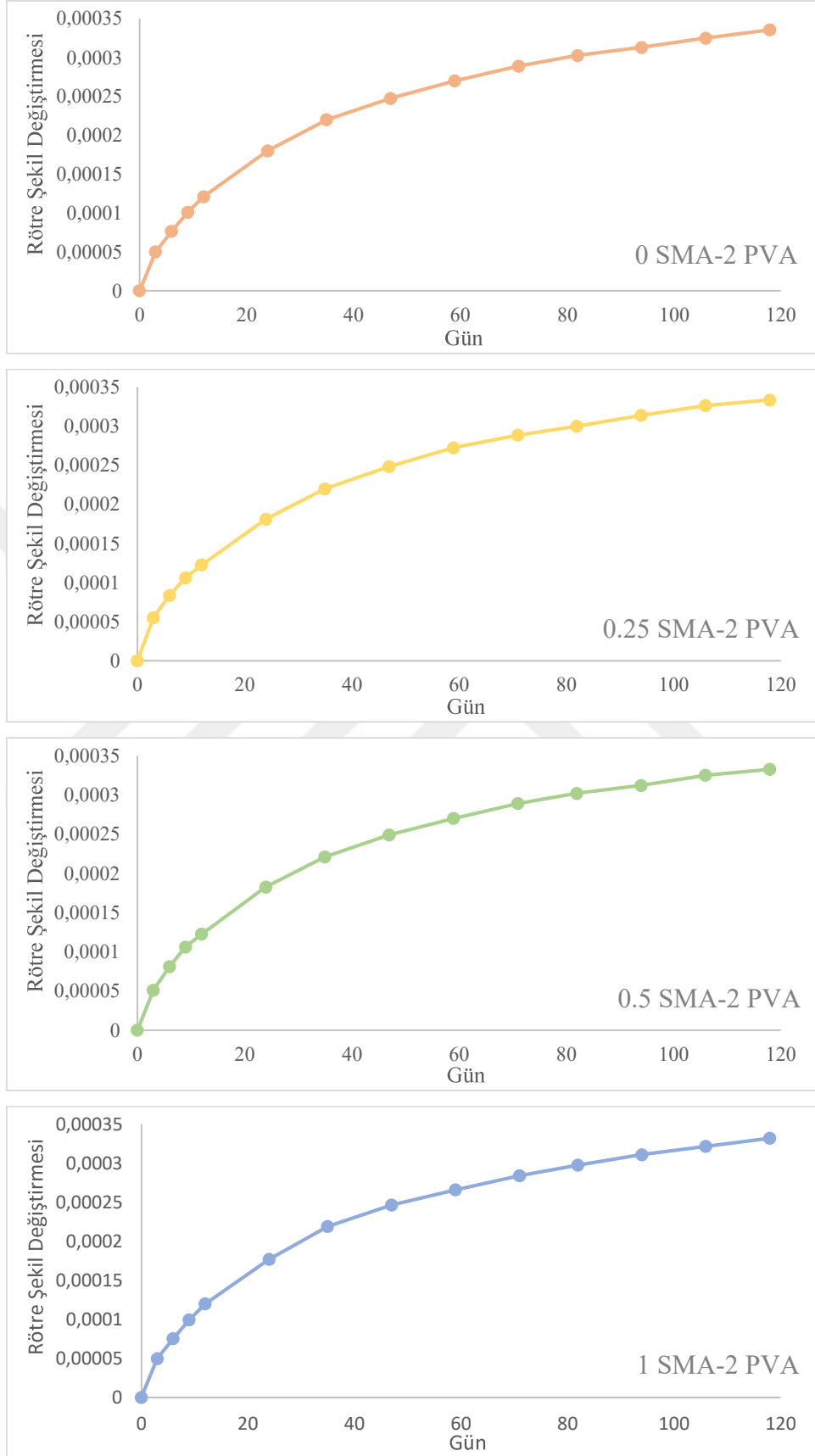


Şekil 4.23 Doğrudan çekme yüklemesi altında a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA'nın kırılma davranışı.

4.7. Kuruma Rötresi

4.7.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

PVA ve SMA ilaveli ECC karışımların 118 güne kadar olan kuruma rötresi sonuçları Şekil 4.24'te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Kuruma rötresi nem kaybından dolayı meydana gelen hacimsel azalmayı ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre tüm karışımlar için benzer büzülme verileri elde edilmiştir, SMA lif miktarının değişimiyle kuruma rötresinde maksimum %1 azalış meydana gelmiştir. 118 gün sonundaki kuruma rötresi değerleri 0.000332- 0.0003355 arasında şekil değiştirme olarak elde edilmiştir. Böylece PVA ilaveli ECC'lerde SMA lifin kullanılmasının kuruma rötresi açısından bir sorun oluşturmadığı görülmektedir.

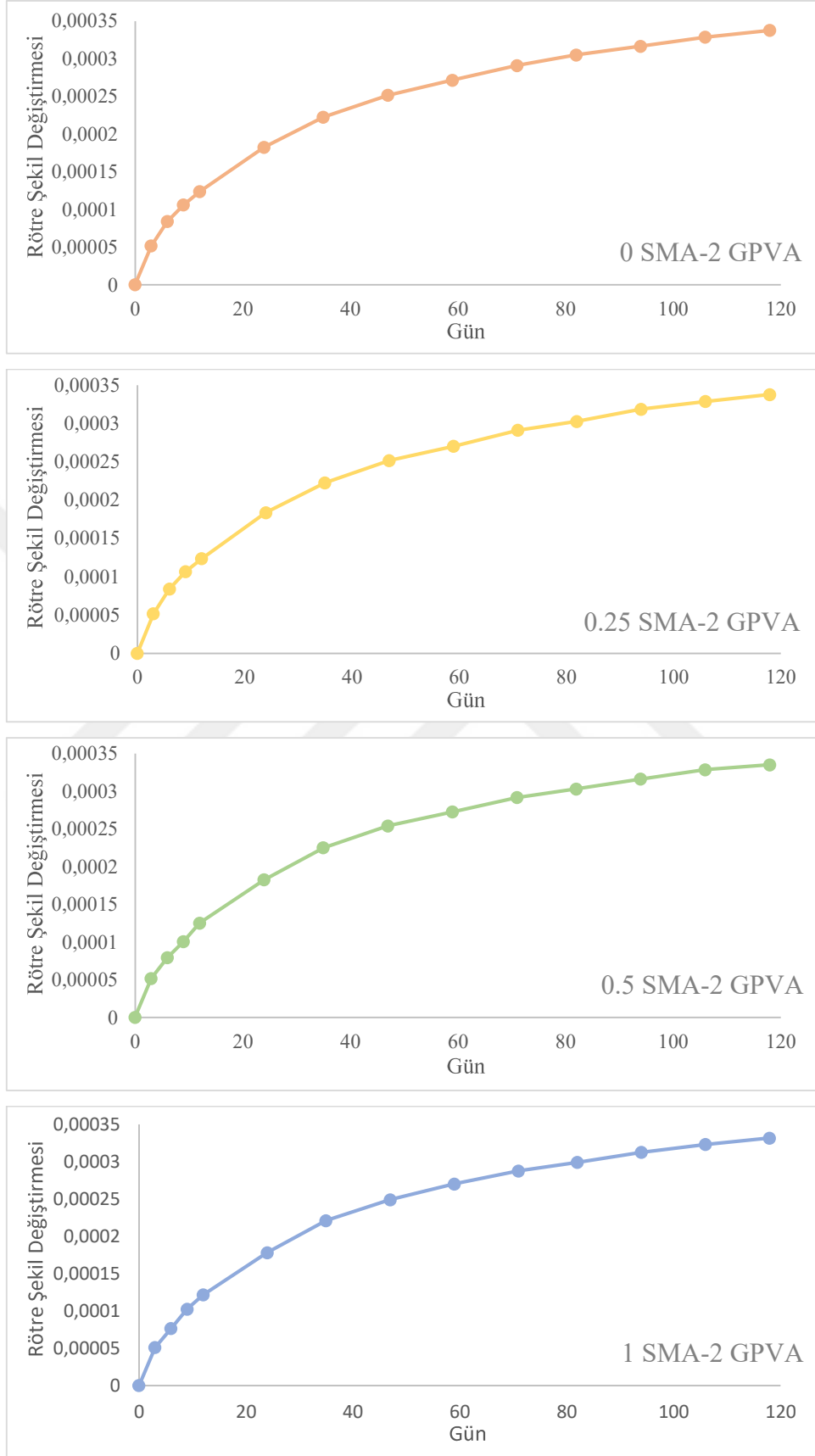


Şekil 4.24 PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin kuruma rötresi sonuçları.

4.7.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

GPVA ve SMA ilaveli ECC karışımların 118 güne kadar olan kuruma rötresi sonuçları Şekil 4.25'te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre GPVA ve SMA ile üretilen ECC karışımlarda da benzer büzülme verileri elde edilmiştir. SMA lif miktarının artmasıyla kuruma rötresinde maksimum %1.8 azalış meydana gelmiştir. 118 gün sonundaki kuruma rötresi değerleri 0.0003315- 0.0003375 arasında şekil değiştirme olarak elde edilmiştir. SMA-PVA ve SMA-GPVA ile üretilen ECC karışımlar karşılaştırıldığında GPVA ve SMA ilaveli ECC'lerde referansta küçük de olsa daha fazla kuruma rötresi elde edilmesine rağmen %1 SMA ilavesi ile daha düşük bir kuruma rötresi elde edilmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde ECC'lerde SMA lifin kullanılmasının kuruma rötresi açısından bir sorun oluşturmadığı, PVA veya GPVA kullanımının da önemli bir farklılığa neden olmadığı görülmektedir.

Ayrıca ECC karışımlarda iri agrega kullanılmaması sebebiyle bir problem olarak ortaya çıkabileceği düşünülen rötrenin üretilen kompozitler için kabul edilebilir değerler içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak elde edilen davranış incelendiğinde büzülme davranışının uzun vadeli devam edebileceği, ancak bu davranışın zamana bağlı negatif ivme ile yavaşlayarak belirli bir değerde sabitleneceği görülmektedir.

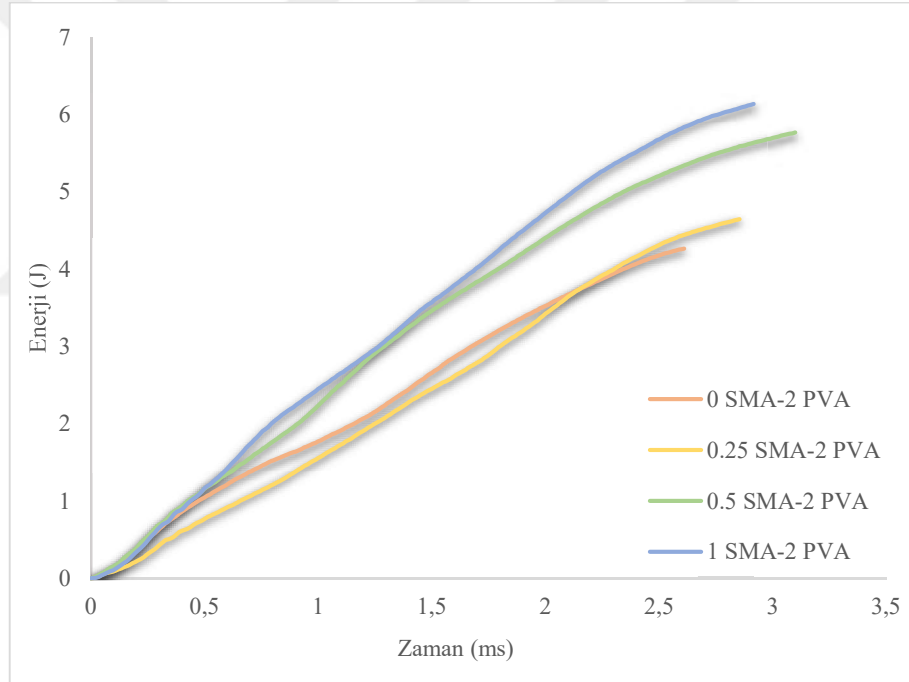


Şekil 4.25 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin kuruma rötresi sonuçları.

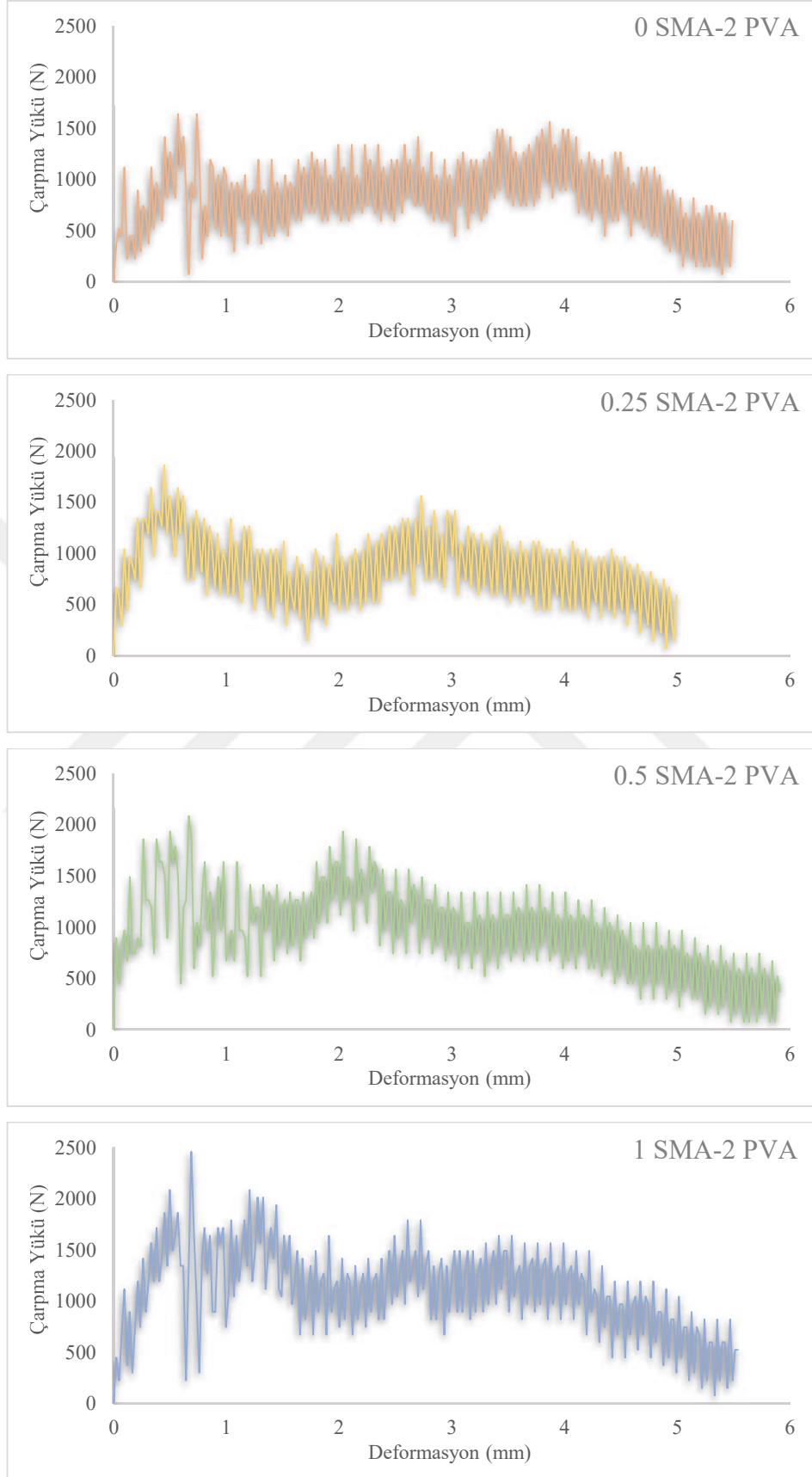
4.8. Ağırlık Düşürmeli Çarpma Analizi

4.8.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

Kompozitler üzerinde tekrarsız ağırlık düşürmeli çarpma deneyi gerçekleştirilmiş ve numunelere ait Enerji-Zaman eğrileri Şekil 4.26'da, Yük-Deformasyon eğrileri Şekil 4.27'de sunulmuştur. Numunelerden elde edilen maksimum darbe yükü ve bu değere karşılık gelen deformasyon sonuçlarının ortalama değerleri Tablo 4.6'daki gibidir. Grafikler ve sonuçlar incelendiğinde PVA ve SMA ilaveli ECC'de SMA lif miktarı arttıkça maksimum çarpma yükünde artış meydana gelmiştir. Referans kompozit ile karşılaştırıldığında %0.25, %0.5 ve %1 SMA ilavesi ile maksimum çarpma yükü sırasıyla %13.5, %27.2 ve %50 artmıştır. Kırılma enerjileri incelendiğinde de %1 SMA ilaveli ECC'nin kırılma enerjisi referans numuneye göre %44 daha fazladır.



Şekil 4.26 PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin enerji-zaman grafikleri.



Şekil 4.27 PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin çarpma yükü-deformasyon grafikleri.

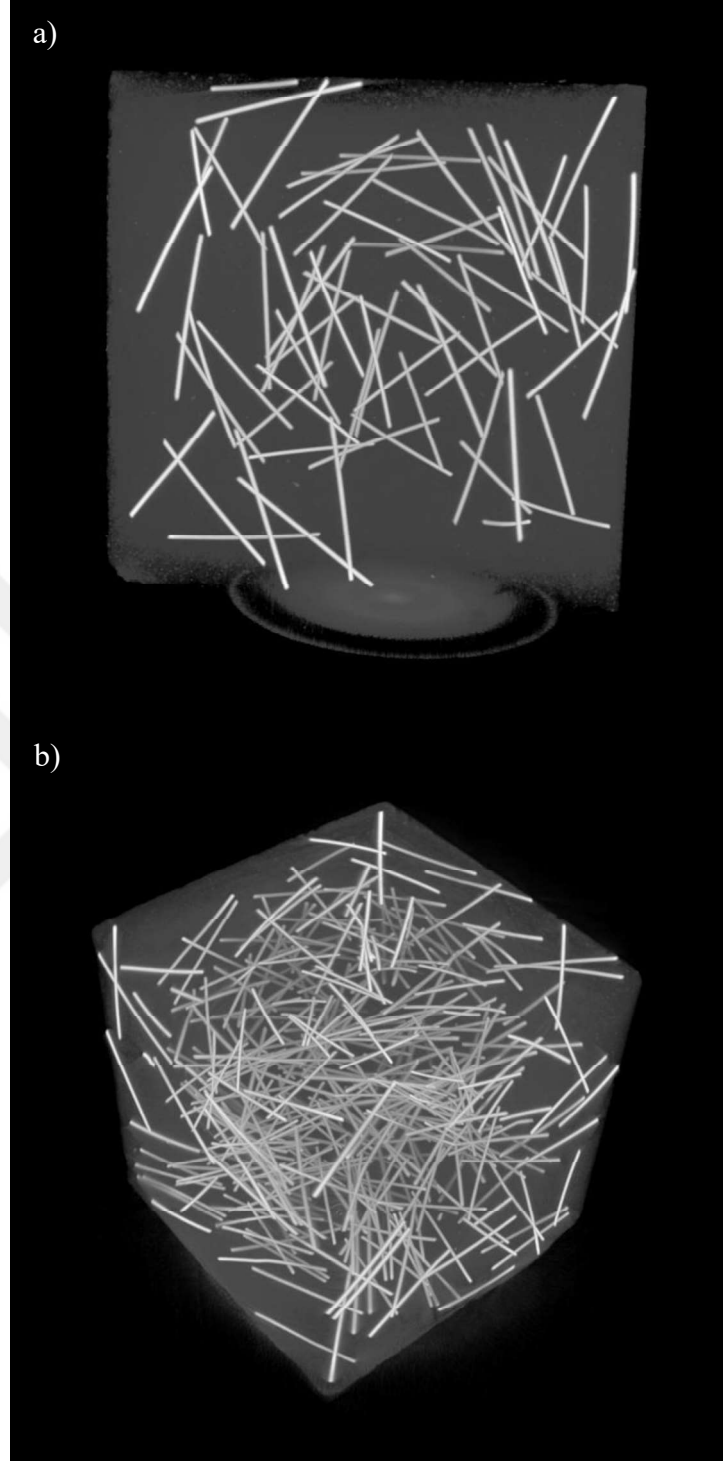
Tablo 4.6 PVA ve SMA ilaveli ECC'lerin ağırlık düşürmeli çarpma deneyi sonuçları.

	Maksimum Çarpma Yüğü (N)	Deformasyon (mm)	Enerji (J)
0 SMA-2 PVA	1639.5	0.739	4.264
0.25 SMA-2 PVA	1860.8	0.450	4.644
0.5 SMA-2 PVA	2085.4	0.667	5.765
1 SMA-2 PVA	2459.3	0.689	6.134

Not: Deformasyon değerleri maksimum yüğe karşılık gelen değerlerdir.

Gerilme-deformasyon eğrileri malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olduğundan ve çarpma yüklemelerinde yük tüm kompozitler için aynı olduğundan (düşen ağırlık, düşme yüksekliği ve yerçekimi ivmesi), elde edilen maksimum yük farklılıklarının dinamik rijitlik farklılığından kaynaklandığı düşünülebilmektedir. Bu açıdan sonuçlar incelendiğinde, SMA lif miktarı arttıkça dinamik rijitliğin arttığı ve en yüksek çarpma yükü değerine sahip 1 SMA-2 PVA kompozitinin en yüksek rijitliğe sahip olduğu söylenebilmektedir.

Bilgisayarlı Mikro CT Analizi ile elde edilen 1000'den fazla görüntü kullanılarak kompozitlerdeki SMA liflerin makro ölçekte dağılımı 3 boyutlu model üzerinden incelenebilmektedir. Şekil 4.28'de görülen 3 boyutlu modeller incelendiğinde, SMA lif miktarının artması durumunda dahi liflerin kompozit içinde homojen bir şekilde dağıldığı çok net görülmektedir. Bu homojen lif dağılımı da PVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerdeki SMA lif miktarının artmasıyla artan rijitlik artışını desteklemektedir.



Şekil 4.28 a) %0.25 ve b) %1 SMA lif ilaveli numunelerdeki SMA lif dağılımının 3 boyutlu modelleri.

4.8.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

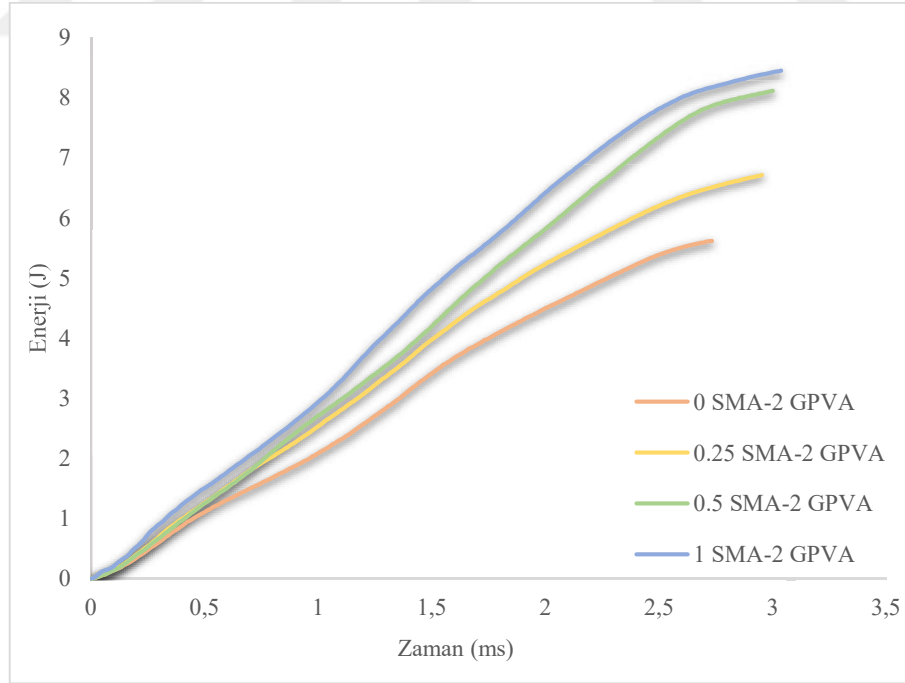
GPVA ve SMA lifler ile üretilen ECC kompozitler üzerinde gerçekleştirilen tekrarsız ağırlık düşürmeli çarpma deneyi sonucunda numunelerden elde edilen maksimum darbe yükü ve bu değere karşılık gelen deformasyon sonuçlarının ortalama değerleri Tablo 4.7'deki gibidir.

Ayrıca Enerji-Zaman eğrileri Şekil 4.29'da, Yük-Deformasyon eğrileri Şekil 4.30'da görülmektedir. Grafikler ve sonuçlar incelendiğinde GPVA ve SMA ilaveli ECC'de de SMA lif miktarı arttıkça maksimum çarpma yükünde artış meydana gelmiştir. Referans ECC (0 SMA-2 GPVA) ile karşılaştırıldığında %0.25, %0.5 ve %1 SMA ilavesi ile maksimum çarpma yükü sırasıyla %4.5, %22.9 ve %37.9 artmıştır. Böylece maksimum çarpma yüklerine göre dinamik rijitliği en yüksek karışımın 1 SMA-2 GPVA olduğu da söylenebilmektedir. Kırılma enerjileri açısından da %1 SMA ilaveli ECC'nin kırılma enerjisi referans numuneye göre %50 daha fazladır.

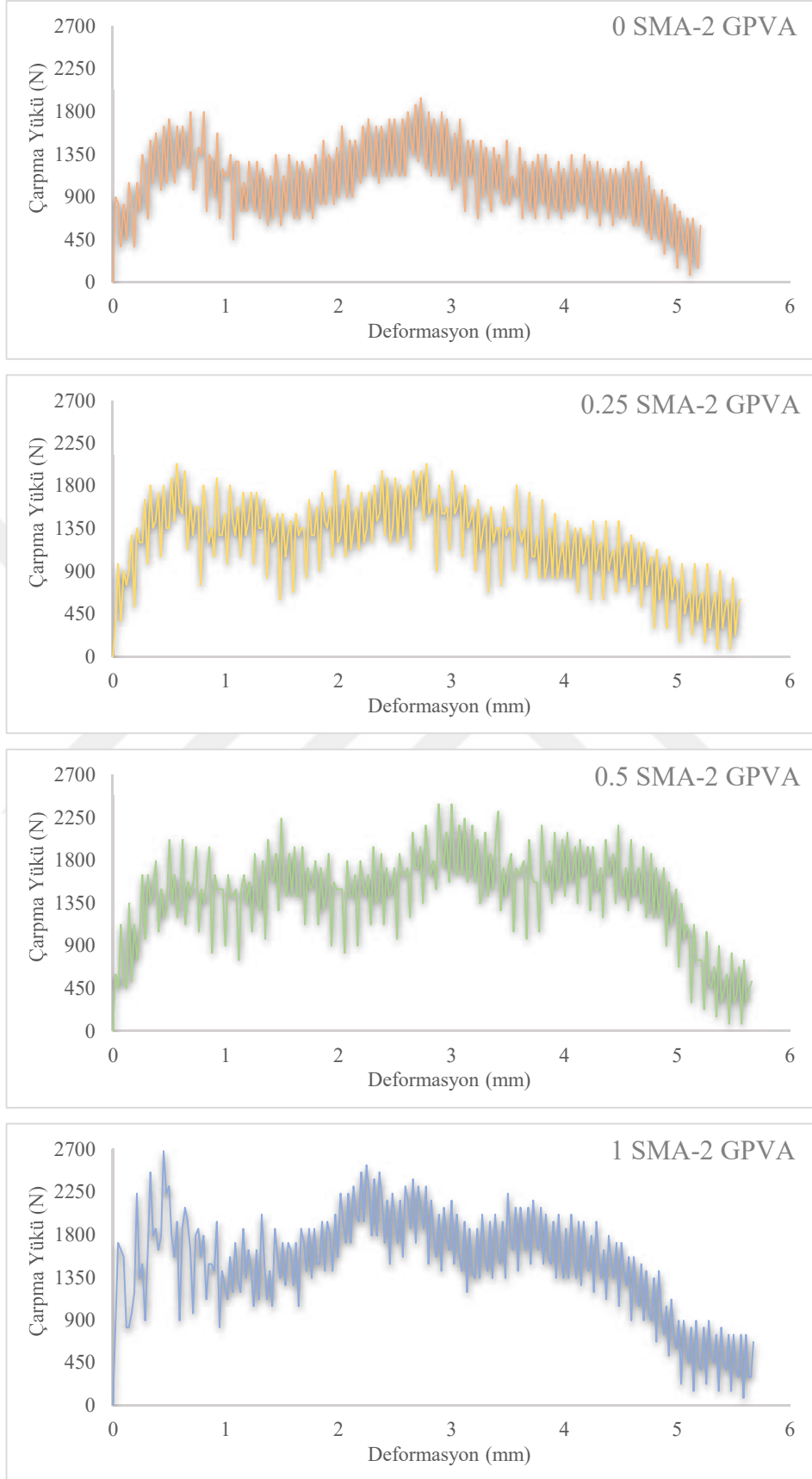
Tablo 4.7 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'lerin ağırlık düşürmeli çarpma deneyi sonuçları.

	Maksimum Çarpma Yüğü (N)	Deformasyon (mm)	Enerji (J)
0 SMA-2 GPVA	1943.5	2.729	5.616
0.25 SMA-2 GPVA	2030.5	2.779	6.711
0.5 SMA-2 GPVA	2389.1	2.889	8.108
1 SMA-2 GPVA	2679.6	0.450	8.446

Not: Deformasyon değerleri maksimum yüke karşılık gelen değerlerdir.



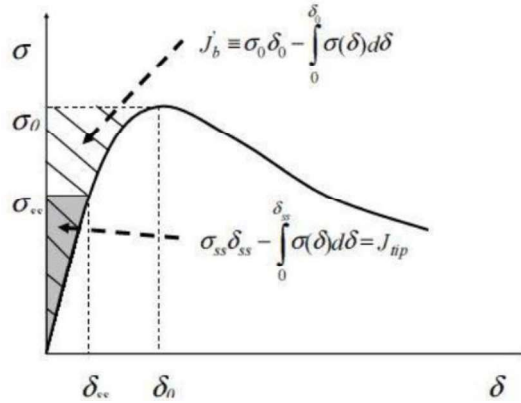
Şekil 4.29 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin enerji-zaman grafikleri.



Şekil 4.30 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC kompozitlerin çarpma yükü-deformasyon grafikleri.

PVA ve SMA ilaveli ECC'ler ile GPVA ve SMA ilaveli ECC'ler karşılaştırdığımızda da; sadece PVA yerine GPVA kullanımı ile %0, %0.25, %0.5 ve %1 SMA ilaveli karışımlar kıyaslandığında maksimum çarpma yükünde sırasıyla %18.5, %9.1, %14.6 ve %9 artış meydana gelmiştir. Böylece ağırlık düşürmeli çarpma yüklemesi açısından SMA lif ilavesinin de yüzeyi iyileştirilmiş GPVA lif ilavesinin de karşıladığı çarpma yükünü ve böylece rijitliği arttırdığı söylenebilmektedir.

Yüksek performanslı lifli kompozitlerde çoklu çatlak davranışının elde edilebilmesi için Şekil 4.31'deki çatlak uç tokluğunun (J_{tip}) lif köprüleme gerilmesi ile çatlak açıklığı eğrisinden hesaplanan tamamlayıcı enerjiden (J_b') daha az olması gerekir. Yani $J_b' > J_{tip}$ şartının sağlanması gereklidir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde PVA liflerde nanoteknolojik olarak yapılan yüzey modifikasyonu (hidrofobik yüzey iyileştirmesi) sonucunda liflerin yüzey pürüzlülük değerleri artmış ve buna bağlı olarak da daha düşük bir arayüzey kimyasal aderans (G_d) ve daha yüksek bir arayüzey sürtünme aderansının (τ_0) ortaya çıktığı düşünülmektedir. Dolayısıyla tüm bu mikromekanik parametrelerdeki değişim de J_b' değerinde yükselişe ve devamında çekme süneklik kapasitesinde belirgin artışa yol açmıştır. Buna bağlı olarak, kompozitlerin çarpma yüklemesi altındaki davranış farklılığı ortaya çıkmıştır.



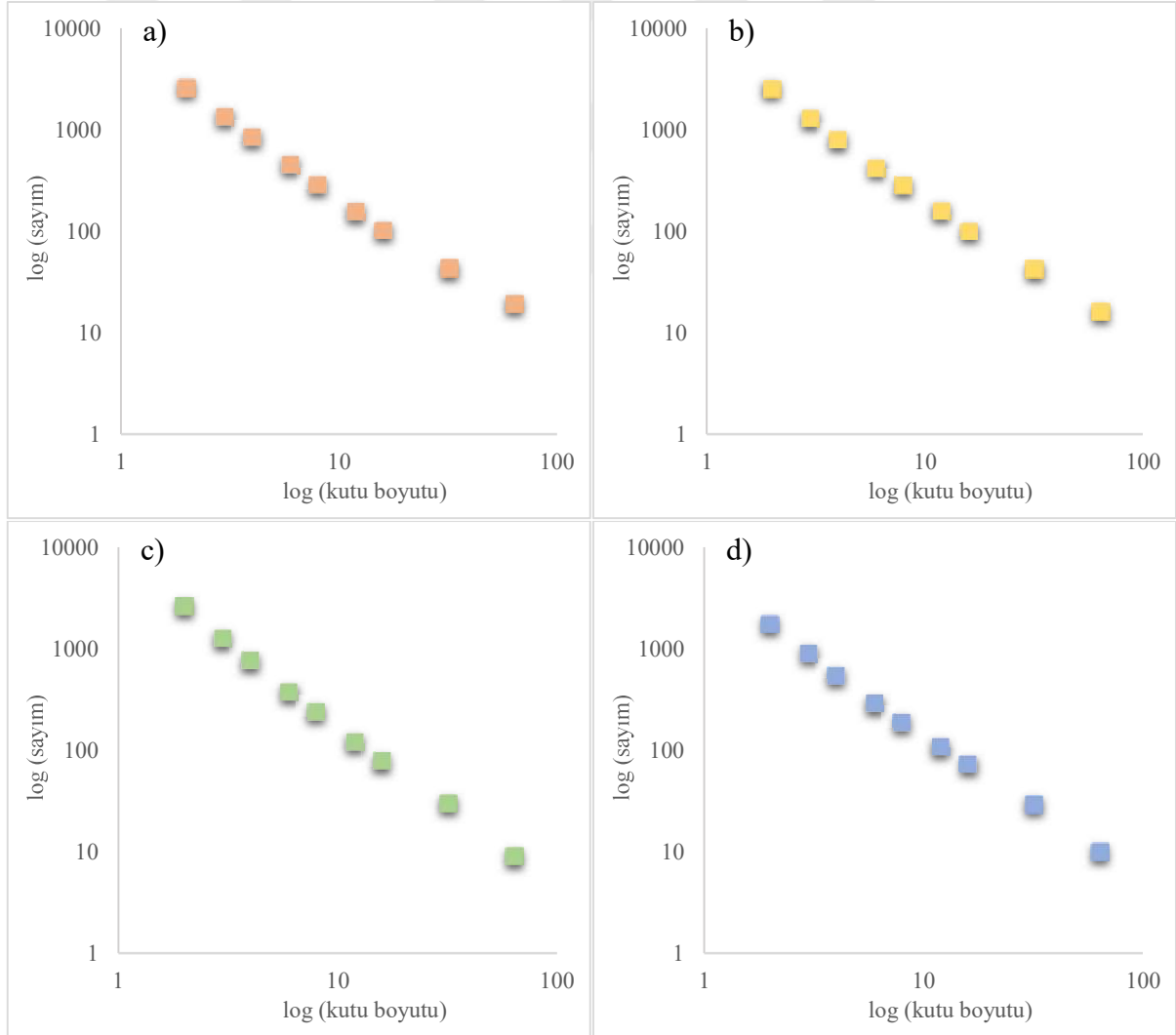
Şekil 4.31 Lif köprüleme gerilmesi ve çatlak açıklık genişliği grafiği (Kına ve Türk, 2017).

4.9. Dijital Görüntü İşleme ve 3D Fraktal Çatlak Analizi

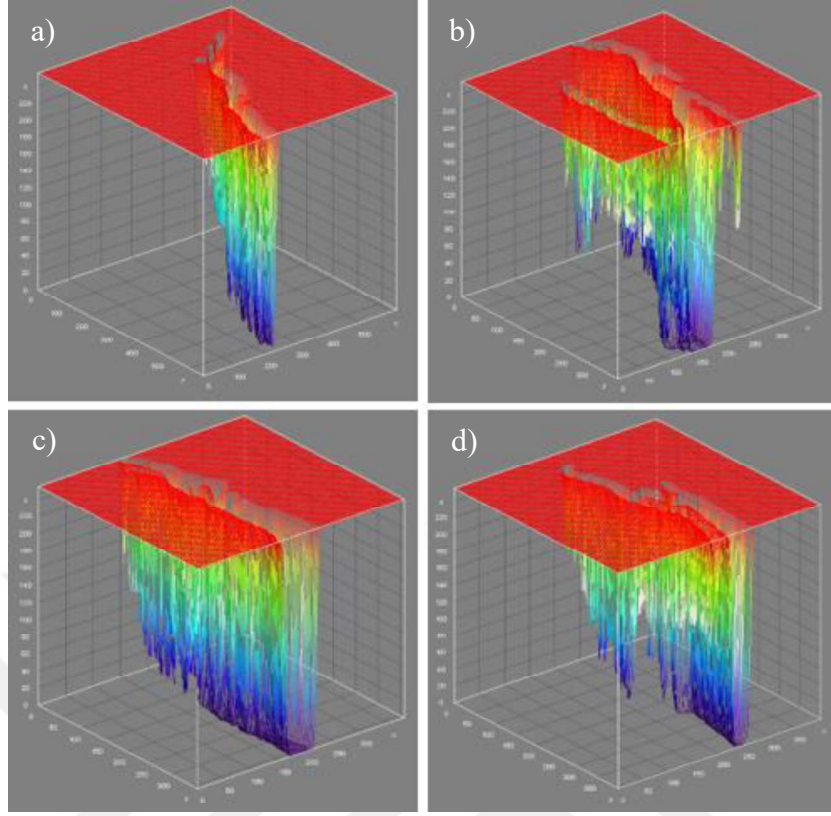
Mikro ve makro ölçekli eğilme/kırılma davranışını ilişkilendirmek için, eğilme yüklemesine maruz kalmış numunelerin yüzey çatlakları incelenmiştir. Daha sonra bu çatlaklarda Fraktal analiz yapılarak çatlak haritaları oluşturulmuştur ve Image J programı kullanılarak kompozitlerin fraktal boyut değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca çatlakların 3 boyutlu sayısallaştırılmış görüntüleri de elde edilmiştir.

4.9.1. PVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

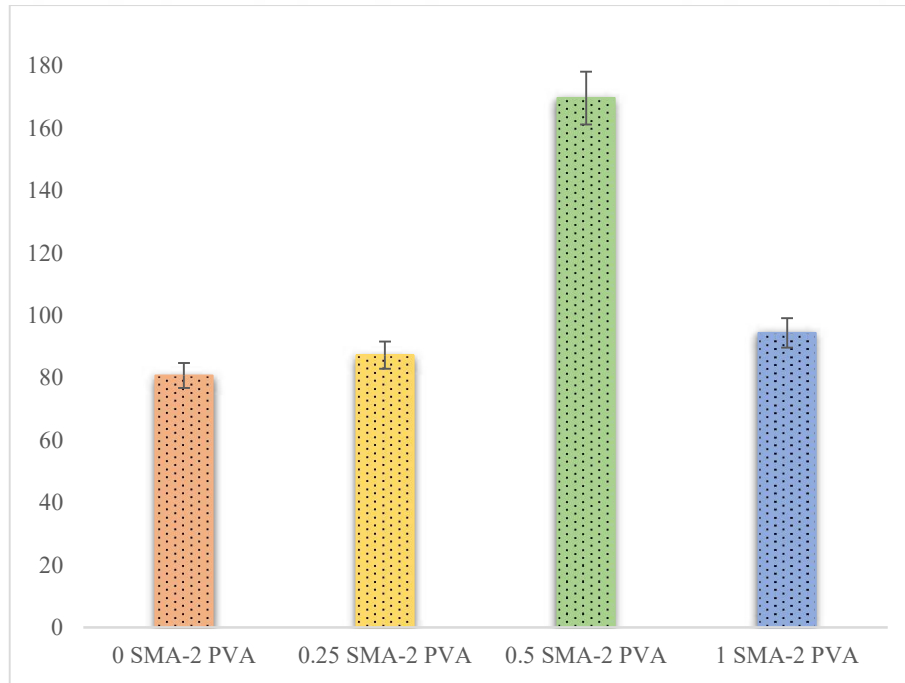
PVA ve SMA ilaveli ECC'lerin Fraktal analiz sonucu elde edilen Fraktal boyut değerleri Şekil 4.32'de sunulmuştur. Analiz ile elde edilen çatlak hasarlarının 3 boyutlu görüntüleri de Şekil 4.33'te görülmektedir. Eğilme yükü altındaki yüzey çatlaklarının dağılan kırılma enerjisi (W_s/G_f) değerleri de Fraktal boyut değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.34'te görülen kırılma enerjisi değerleri incelendiğinde, W_s/G_f değerinin referans karışımına kıyasla yüksek elastisite modülüne sahip SMA lifin eklenmesiyle arttığı görülmektedir. Referans ECC karışımının W_s/G_f değeri ile karşılaştırıldığında, kırılma enerjisi (W_s/G_f) %0.25, %0.5 ve %1 SMA liflerinin eklenmesiyle sırasıyla %9, %109 ve %16 artmıştır. En yüksek kırılma enerjisi %0.5 SMA lifleri ile güçlendirilmiş kompozit olarak kaydedilmiştir. Fraktal boyut ve kırılma enerjisi bulguları makro ölçekte eğilme performansı ile uyumludur.



Şekil 4.32 a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.5 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA kompozitlerin Fraktal boyut grafikleri.



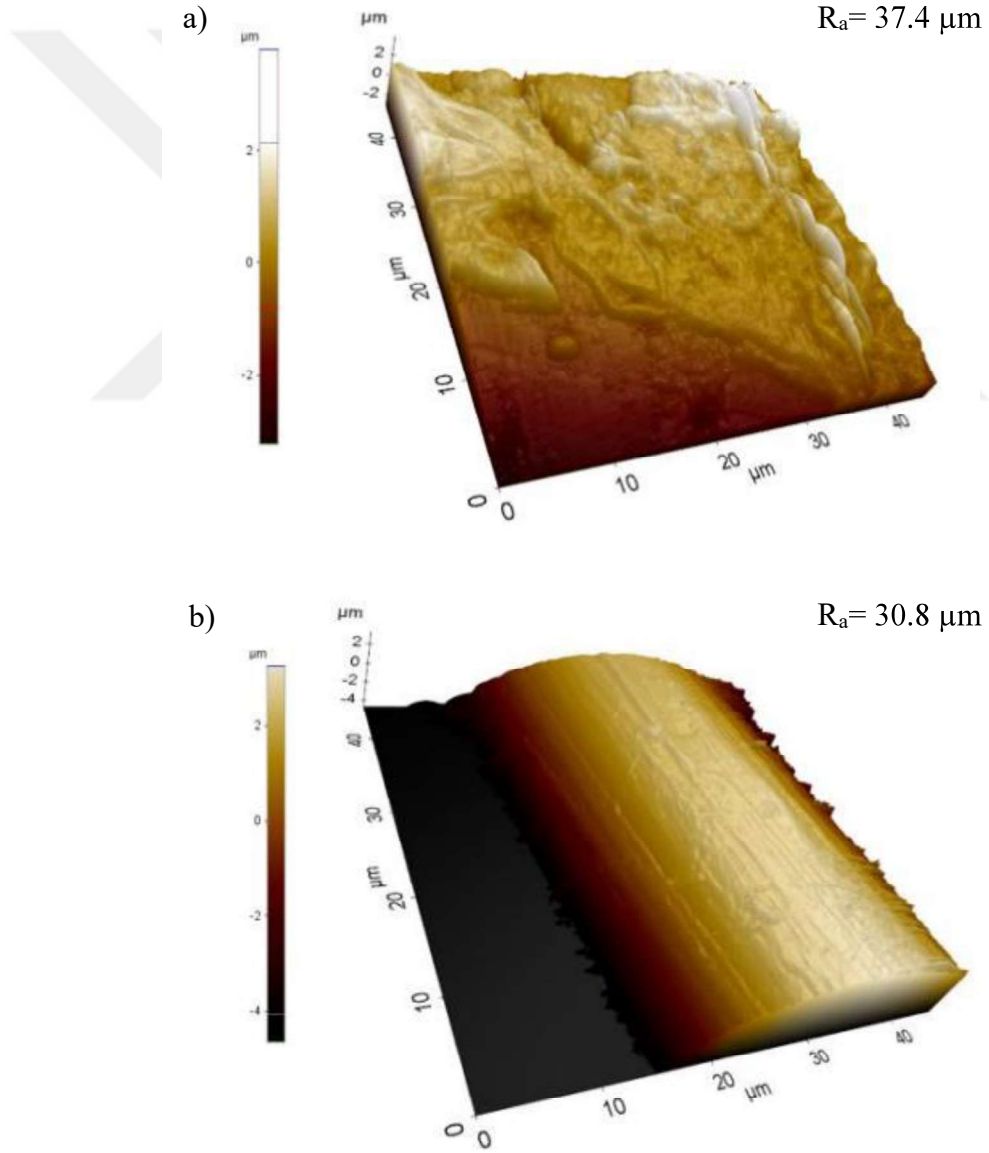
Şekil 4.33 a) 0 SMA-2 PVA, b) 0.25 SMA-2 PVA, c) 0.5 SMA-2 PVA ve d) 1 SMA-2 PVA kompozitlerin 3 boyutlu çatlak görüntüleri.



Şekil 4.34 PVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin kırılma enerjisi.

Daha yüksek fraktal boyut ve SMA lif içeriğinin artmasıyla dağılan yüzey çatlaklı kırılma enerjisi, PVA ve SMA liflerinin hibritleşmesiyle ortaya çıkan sinerjinin neticesinde yüzey

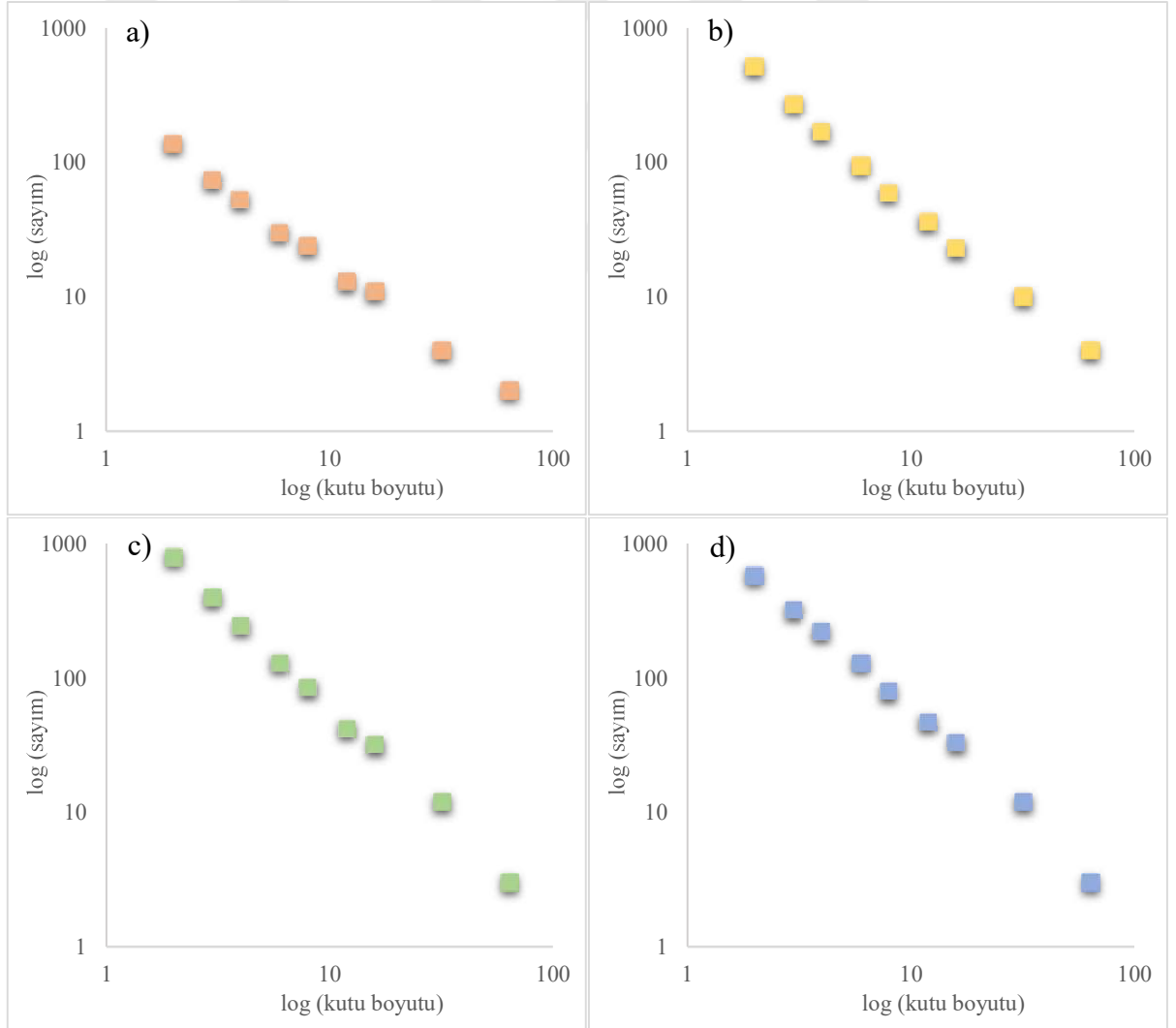
pürüzlülüğündeki artışa bağlanabilir. Yüzey pürüzlülüğündeki bir artış, kıvrımlılığın artmasıyla çatlak yolunun uzamasına yol açacaktır (Najim ve Hall, 2013). Dolayısıyla, PVA lif ilaveli ECC'ye daha fazla SMA lif eklenmesinin, lif yüzeyine yapışmış çimento matrisi etrafında gelişen çatlak yolunun uzamasına neden olabileceği sonucuna varılabilmektedir. SMA liflerin süperelastik özelliğinin bu davranışın ortaya çıkmasında çok etkili olduğu düşünülmektedir. Bu da eğilme yüklemesi altında gerinim gevşemesi sağlayabilir. Şekil 4.35, AFM analizinden elde edilen PVA ve SMA liflerin yüzey pürüzlülüğünü göstermektedir ve yüzey pürüzlülüklerindeki farklılık fraktal boyutlar ile 3 boyutlu sayısallaştırılmış çatlak yüzey profillerinde gözlemlenen farklılıkları açıklamaktadır.



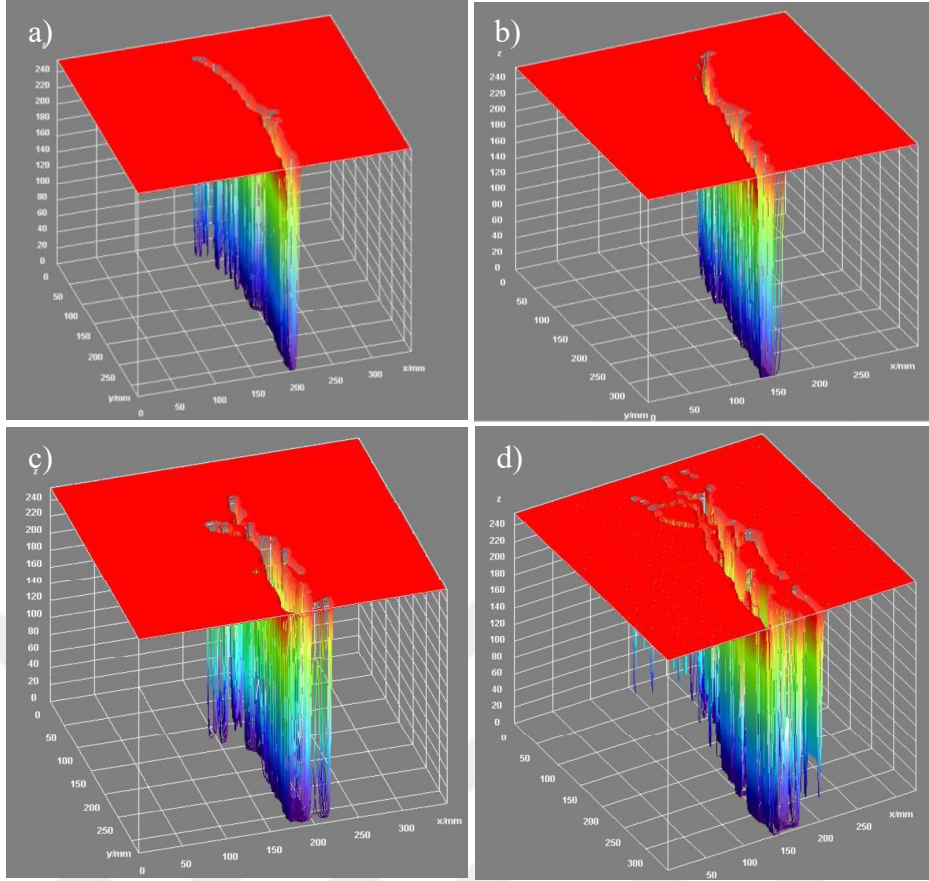
Şekil 4.35 a) SMA ve b) PVA liflerin yüzey pürüzlülük profilleri.

4.9.2. GPVA ve SMA ilaveli ECC için sonuçlar

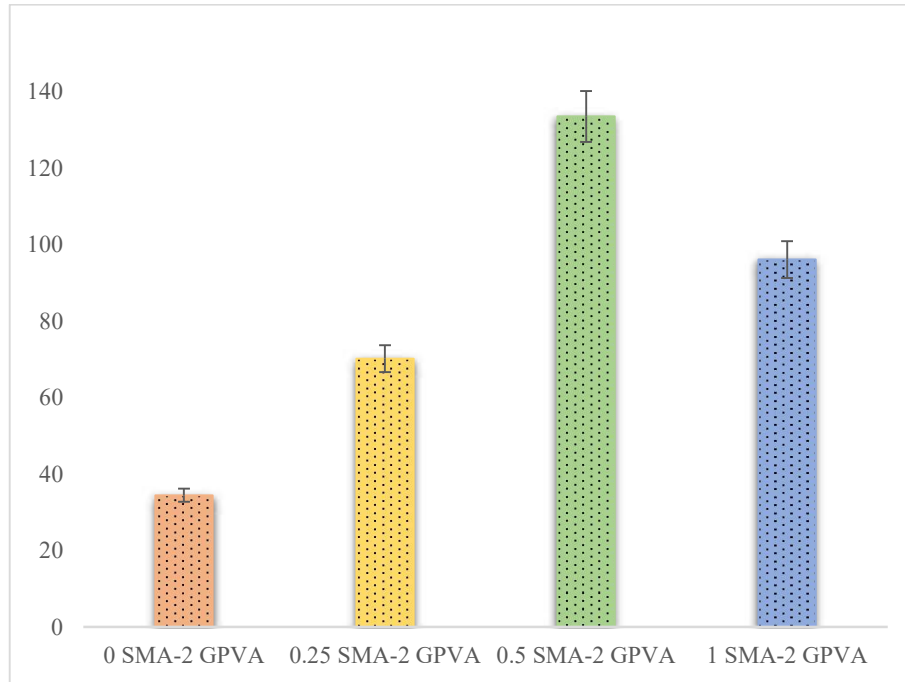
GPVA ve SMA ilaveli ECC'lerin Fraktal analiz sonucu elde edilen Fraktal boyut değerleri Şekil 4.36'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Analiz ile elde edilen çatlak hasarlarının 3 boyutlu görüntüleri de Şekil 4.37'de görülmektedir. Fraktal boyut değerleri kullanılarak hesaplanan ve yüzey çatlaklarından elde edilen kırılma enerjisi (W_s/G_f) değerleri de Şekil 4.38'de sunulmuştur. Kırılma enerjisi değerleri incelendiğinde, W_s/G_f değerinin referans karışımına kıyasla SMA lifin eklenmesiyle arttığı görülmektedir. Referans ECC karışımının W_s/G_f değeri ile karşılaştırıldığında, kırılma enerjisi (W_s/G_f) %0.25, %0.5 ve %1 SMA liflerinin eklenmesiyle sırasıyla %104, %288 ve %179 artmıştır. En yüksek kırılma enerjisi PVA ve SMA ilaveli ECC'lerde de olduğu gibi %0.5 SMA lifleri ile güçlendirilmiş kompozit olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.36 a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA kompozitlerin Fraktal boyut grafikleri.

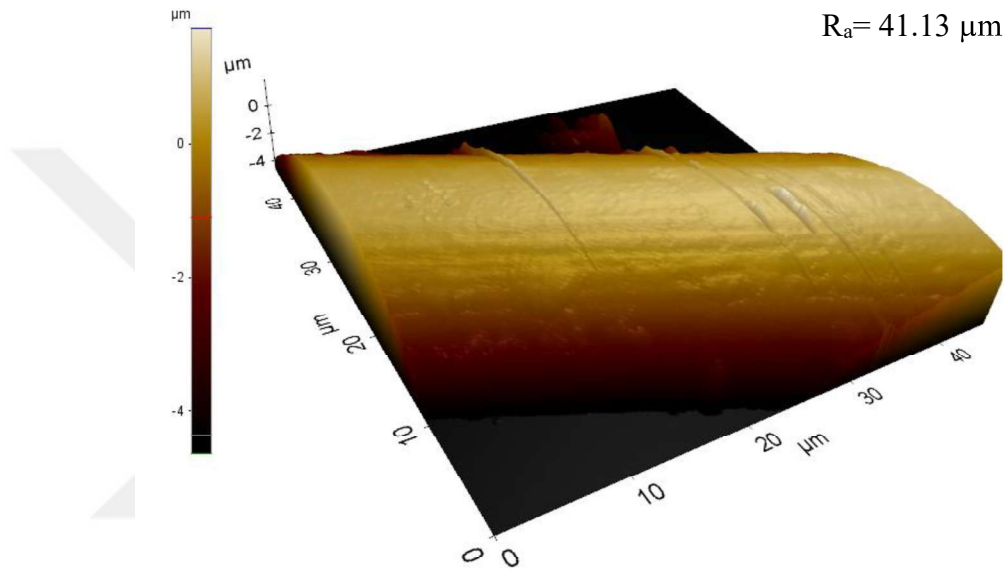


Şekil 4.37 a) 0 SMA-2 GPVA, b) 0.25 SMA-2 GPVA, c) 0.5 SMA-2 GPVA ve d) 1 SMA-2 GPVA kompozitlerin 3 boyutlu çatlak görüntüleri.



Şekil 4.38 GPVA ve SMA lif ilaveli ECC'nin kırılma enerjisi.

SMA ve PVA lifler için elde edilen AFM analizleri incelendiğinde SMA lifin yüzeyinin PVA life göre çok daha pürüzlü olduğu ve yüzey pürüzlülüğünün bir ölçüsü olan R_a değerinin SMA lif için daha büyük olduğu Şekil 4.35'te sunulmuştur. Şekil 4.39'da görülen GPVA lifin yüzey pürüzlülük profili incelendiğinde de GPVA lifin PVA life göre daha büyük bir R_a değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yük altında daha büyük enerji yutabilme kapasitesine sahip olmasına imkan verebileceği şeklinde yorumlanabilmektedir. Deneysel sonuçlar da bunu destekler niteliktedir.

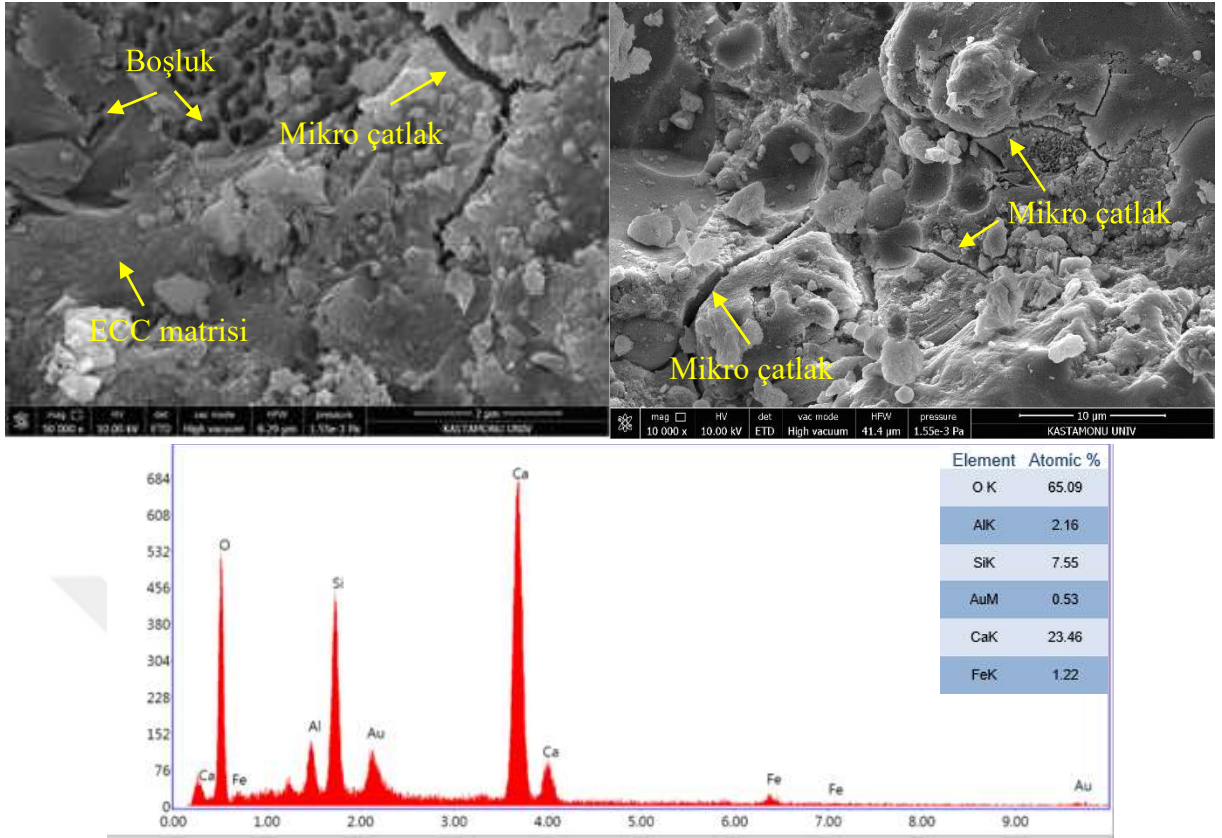


Şekil 4.39 GPVA lifin yüzey pürüzlülük profili.

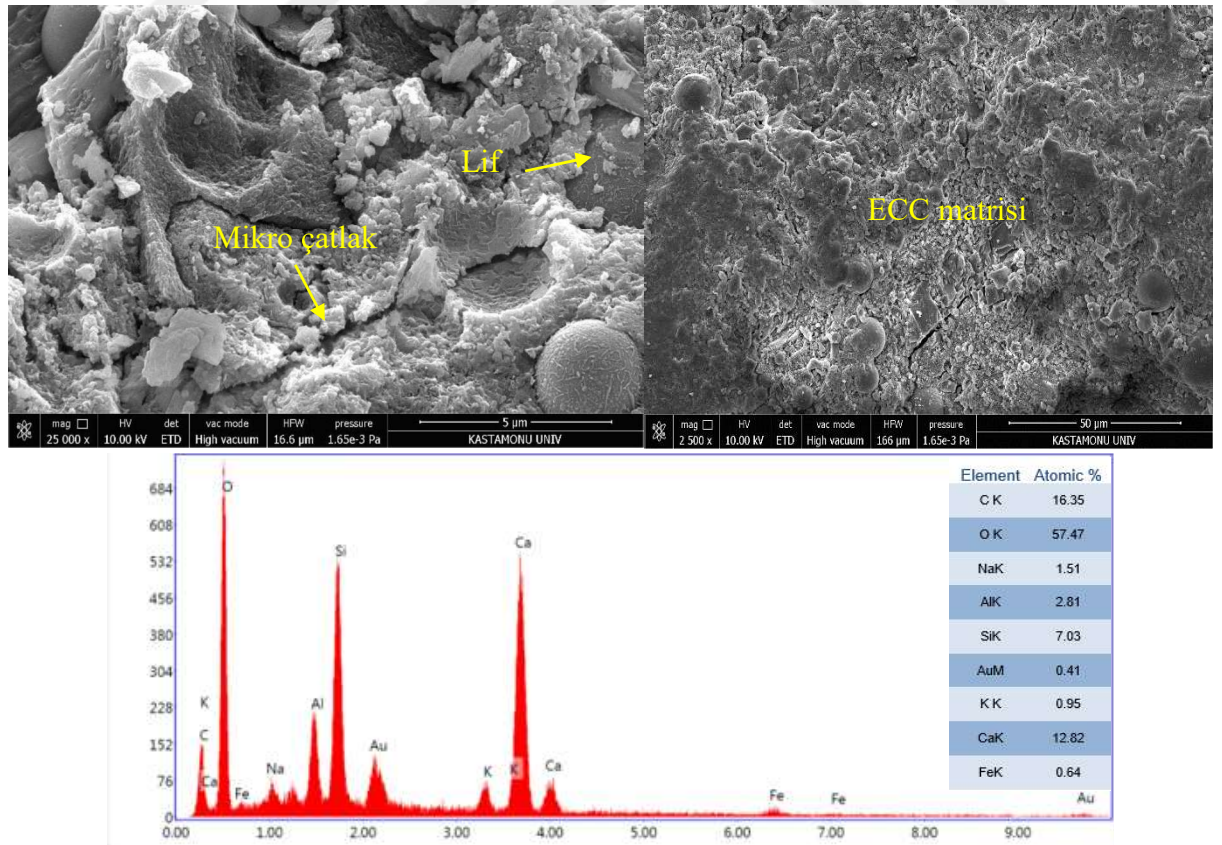
4.10. Mikroyapısal İncelemeler ve 3D Kırılma Yüzeyi Topoğrafik Analizi

4.10.1. SEM analizi

PVA, GPVA ve SMA lifler ile üretilen kompozitlerin yük altında kırılan parçaları üzerinden mikroyapısal incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.40-4.43'te sunulmuştur. Numunelerin mikrograflarında görüldüğü gibi, PVA esaslı referans ECC matrisinin kompakt olmakla beraber yer yer gözenekler ve mikro çatlaklar içerdiği görülmüştür. SMA lif ilavesinin matris kompaktlığı üzere önemli bir etkisi olmamakla beraber lif-matris ara yüzeylerinin de homojen ve tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Lif miktarının artması kompozit içerisindeki takviye elemanın yüzey alanını arttırmaktadır, ancak buna bağlı olarak lifler üzerindeki tortulaşmış matris yüzdesini azaltmaktadır. Buna bağlı olarak da ara yüzeylere ait porozite değerinin arttığı ve boşluklar oluştuğu gözlenmiştir.

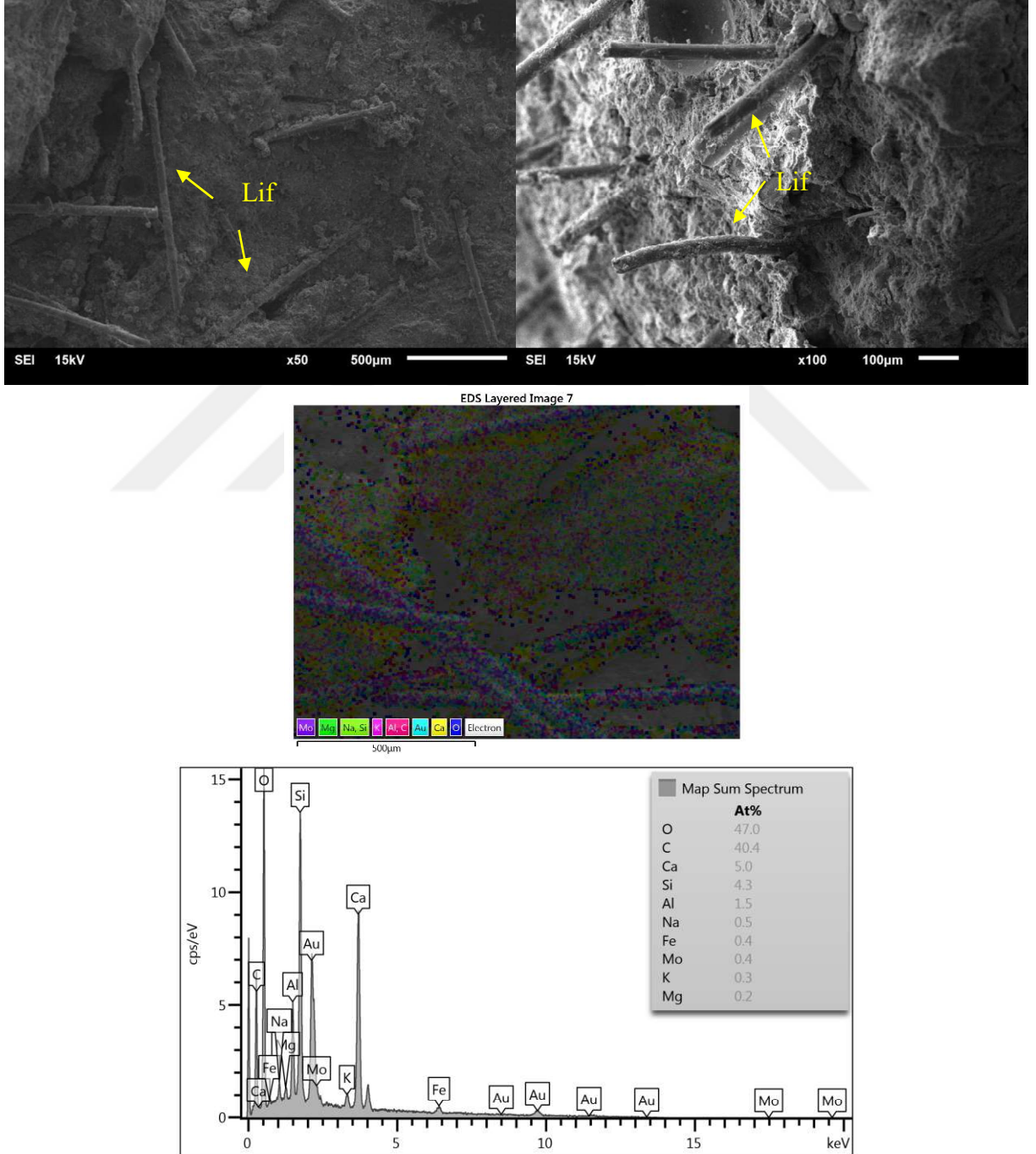


Şekil 4.40 0 SMA-2 PVA numunesinin SEM mikro-görüntüleri.



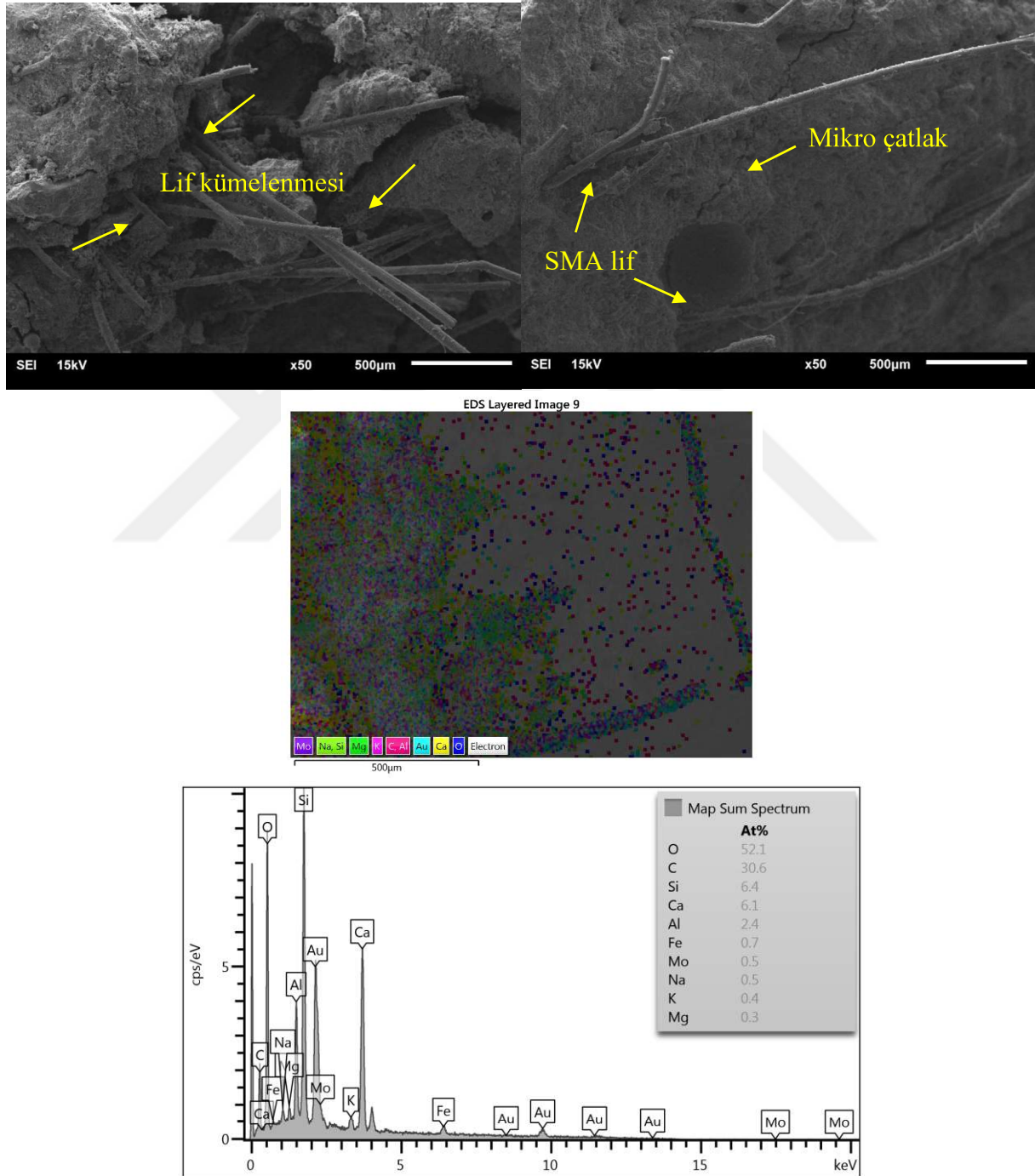
Şekil 4.41 1 SMA-2 PVA numuneninin SEM mikro-görüntüleri.

0 SMA- 2 GPVA serisine ait SEM mikro görüntüleri (Şekil 4.42’de) incelendiğinde; PVA liflerin yüzeyinin nanografitle kaplanmasının liflerin matris ile olan aderansını arttırdığı, kancalı bir lif gibi davranarak matristen sıyrılmasını zorlaştırdığı ve lifler üzerinde matris parçacıklarının da tutunmasını kolaylaştırdığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde bir davranışın da mekanik davranıştaki iyileşmenin mikroyapısal açıdan açıklanmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.42 0 SMA-2 GPVA numunesinin EDS analizi.

GPVA'lı serilere %1 SMA lif eklenmesiyle üretilen kompozitlere ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri de Şekil 4.43'te gösterilmiştir. GPVA ve SMA lif hibridizasyonun bir sinerji yaratabildiği ve SMA liflerin lif-matris ara yüzeylerinde çatlakları başarılı bir şekilde engelleyebildiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde bu kompozitlerde matrisin kompaktlığının da yeteri kadar iyi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.43 1 SMA-2 GPVA numunenin EDS analizi.

Bunlara ek olarak, %1 SMA lif ilavesi ile beraber liflerin mikro yapıda kümелendiği SEM görüntülerinde gözlenmiştir. Bu lif kümelenmelerin zayıf noktalar yarattığı ve çatlak lokalleşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Referans numunelerle kıyaslandığında %1 SMA lif ilavesiyle mekanik dayanımdaki azalmanın da bu mikro yapısal zayıflıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.10.2. 3D temassız (non-contact) lazer tarayıcı profilometre ile kırılma yüzeylerinin analizi

Kırılma yüzeyleri, kırılmanın mikro mekanizmasının ortaya çıkarılmasında ve çimento esaslı kompozitlerin hasar mekaniği özelliklerinin değerlendirilmesinde son derece önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, üretilen kompozitlerin kırılma pürüzlülüğünün kantitatif analizi üç boyutlu (3D) temassız lazer tarayıcı bir profilometre ile gerçekleştirilmiştir. Profil noktaları, kırılma düzlemi boyunca her 20 μm 'de, 0.3 μm yükseklikte çözünürlük ve 2 mm/sn tarama hızıyla kaydedilmiştir. Yapılan bu profil ölçümleri sırasında ölçüm uzunlukları sonuçların karşılaştırılmasına imkan vermek amacıyla tüm numuneler için sabit tutulmuştur.

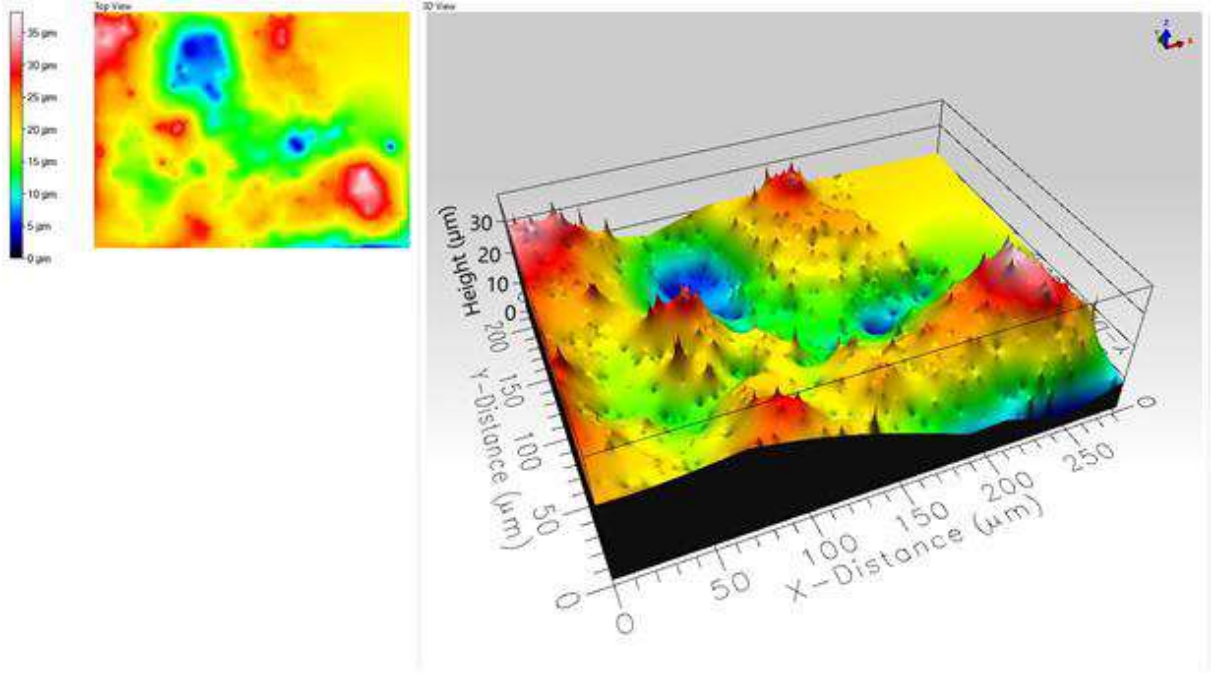
Her bir karışım için 'tüm yüzeyin pürüzlülük değerleri (S_a)' hesaplanmıştır. Her bir seri için üç okuma değerinin ortalaması alınarak sunulmuştur. Hesaplanan bu değerler sonrasında statik ve dinamik yükler altında kırılma enerjisi ile mikro yapısal özellik ilişkisini ortaya koymak için değerlendirilmiştir.

4.10.2.1. PVA lif ilaveli numunelerin değerlendirilmesi

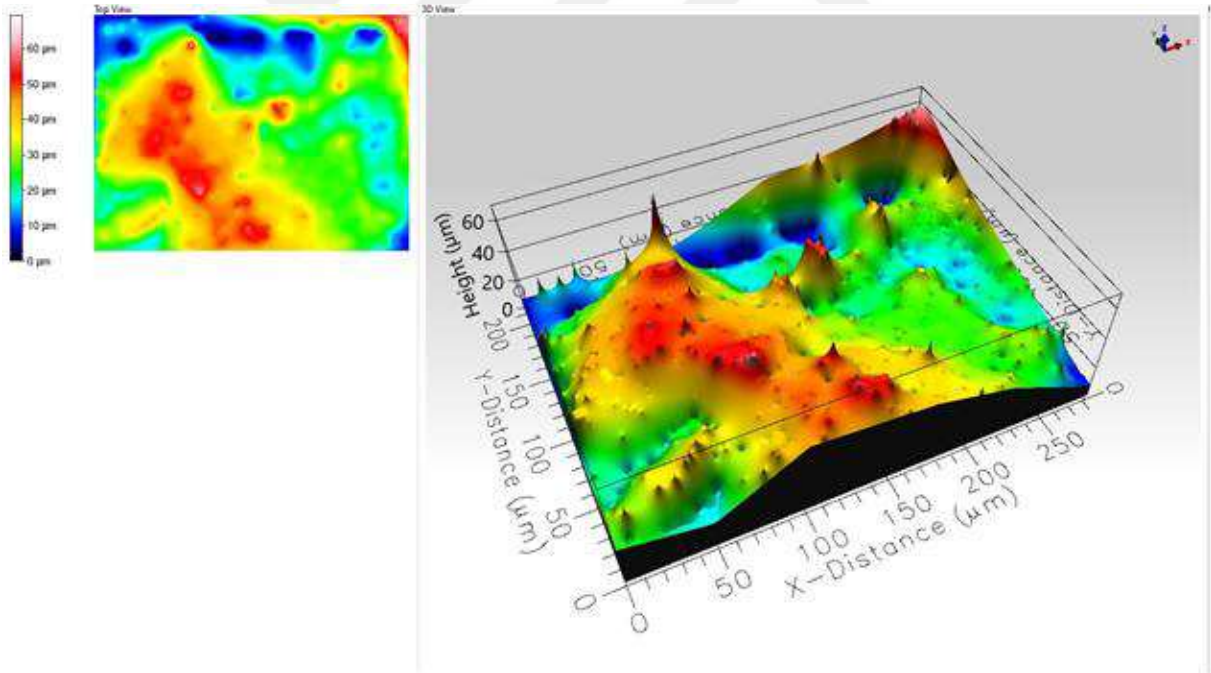
PVA ve SMA lif hibridizasyonu ile üretilen kompozitlere ait kırılma yüzeyinin pürüzlülüğünü ifade eden S_a değerleri Tablo 4.8'de sunulmuştur. 3D kırılma yüzey topoğrafyaları da Şekil 4.44-4.47'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8 PVA-SMA ilaveli kompozitlerin S_a değerleri.

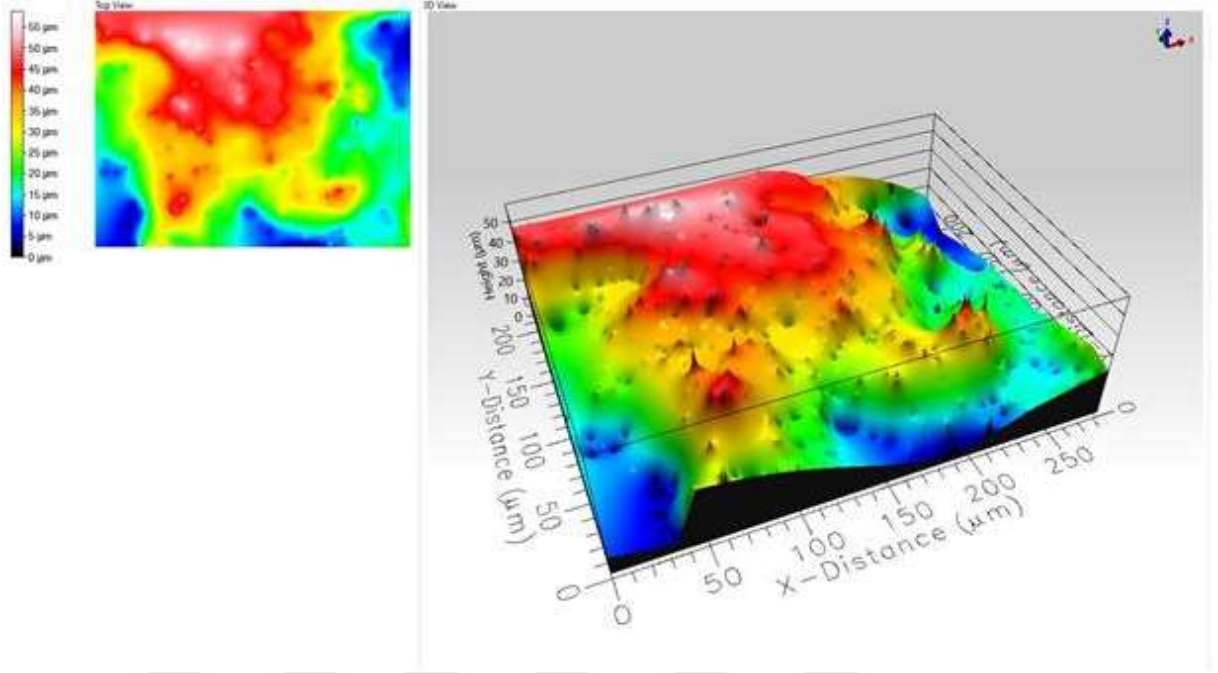
	S_a (μm)
0 SMA-2 PVA	4.27
0.25 SMA-2 PVA	9.82
0.5 SMA-2 PVA	11.23
1 SMA-2 PVA	13.29



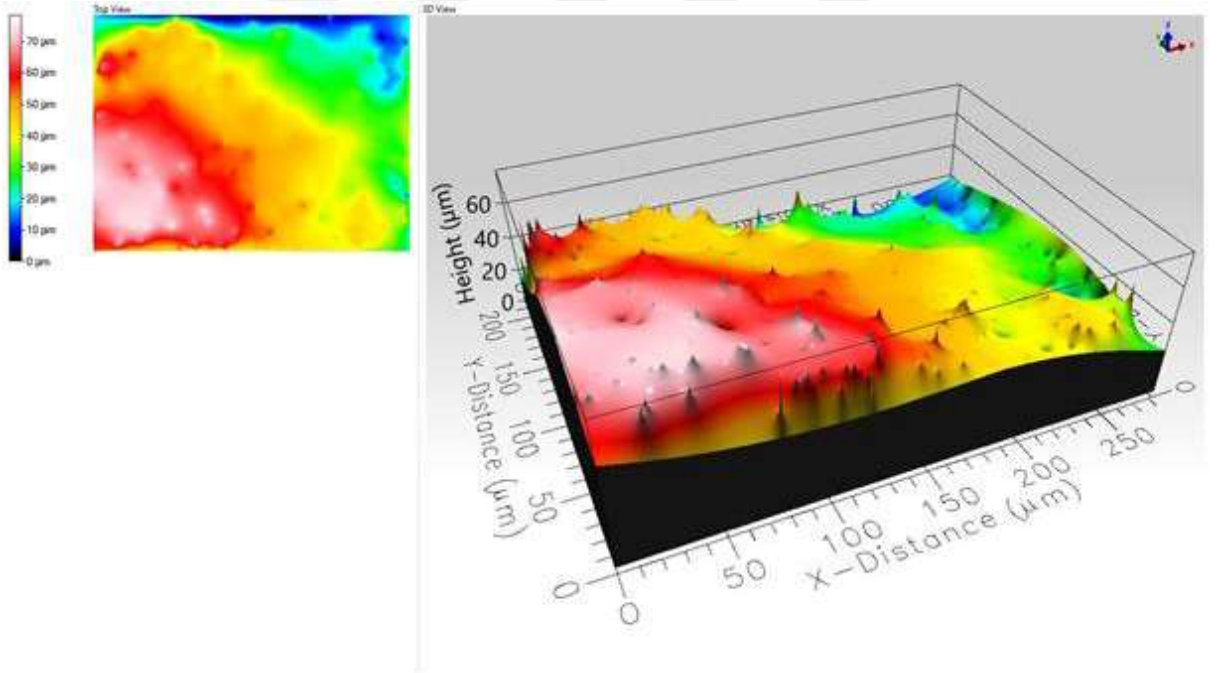
Şekil 4.44 0 SMA-2 PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.



Şekil 4.45 0.25 SMA-2 PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.



Şekil 4.46 0.5 SMA-2PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.



Şekil 4.47 1 SMA-2PVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.

Sonuçlar incelendiğinde SMA lif yüzdesinin artışıyla S_a (yüzey pürüzlülük) değerleri belirgin bir artış göstermiştir. Referans numuneyle (0 SMA-2 PVA) karşılaştırıldığında %0.25 SMA lif ilavesiyle S_a değerinde %129.98, %0.5 SMA lif ilavesiyle S_a değerinde %163 ve %1 SMA lif ilavesiyle S_a değerinde %211.24 artış elde edilmiştir.

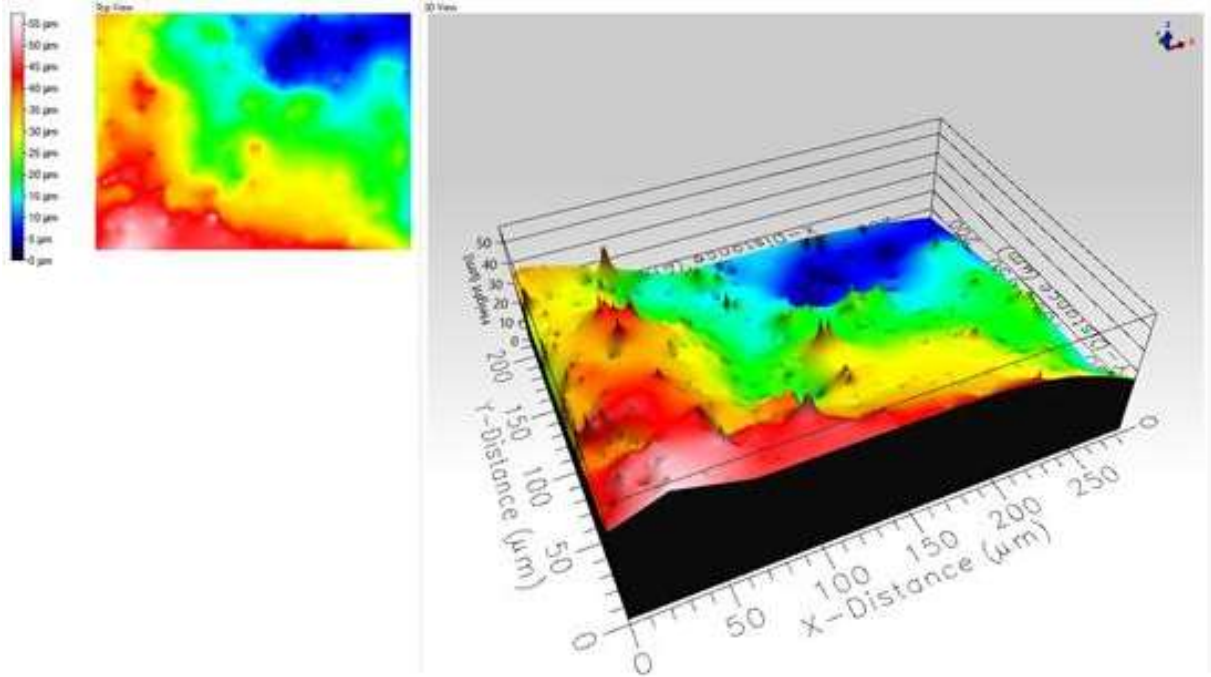
Wu ve diğ. (2001) tarafından ortaya konan teoriye göre, kompozitin yük altında kırılma sırasında ortaya çıkan kırılma enerjisinin mikro-pürüzlülük değerlerindeki artışa bağlı olarak arttığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular da bu teoriyi destekler nitelikte olup S_a değerleri ile kırılma enerjisi arasındaki ilişki bir sonraki bölümde detaylı olarak ele alınacaktır. Bunlara ek olarak, SMA lif olmadan üretilen referans kompozitte çimento matrisi ile lif arasındaki yüksek rijitlik farkının daha yüksek plastik deformasyonu önleyip daha az kıvrımlı (tortuosity) bir çatlak yüzeyinin mikro düzeyde ortaya çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Buna karşın, SMA lif içeriğinin artması ile mikro düzeyde bu rijitlik farkları ortadan kalkmış ve daha kıvrımlı bir kırılma yüzeyi ortaya çıkmıştır.

4.10.2.2. GPVA lif ilaveli numunelerin değerlendirilmesi

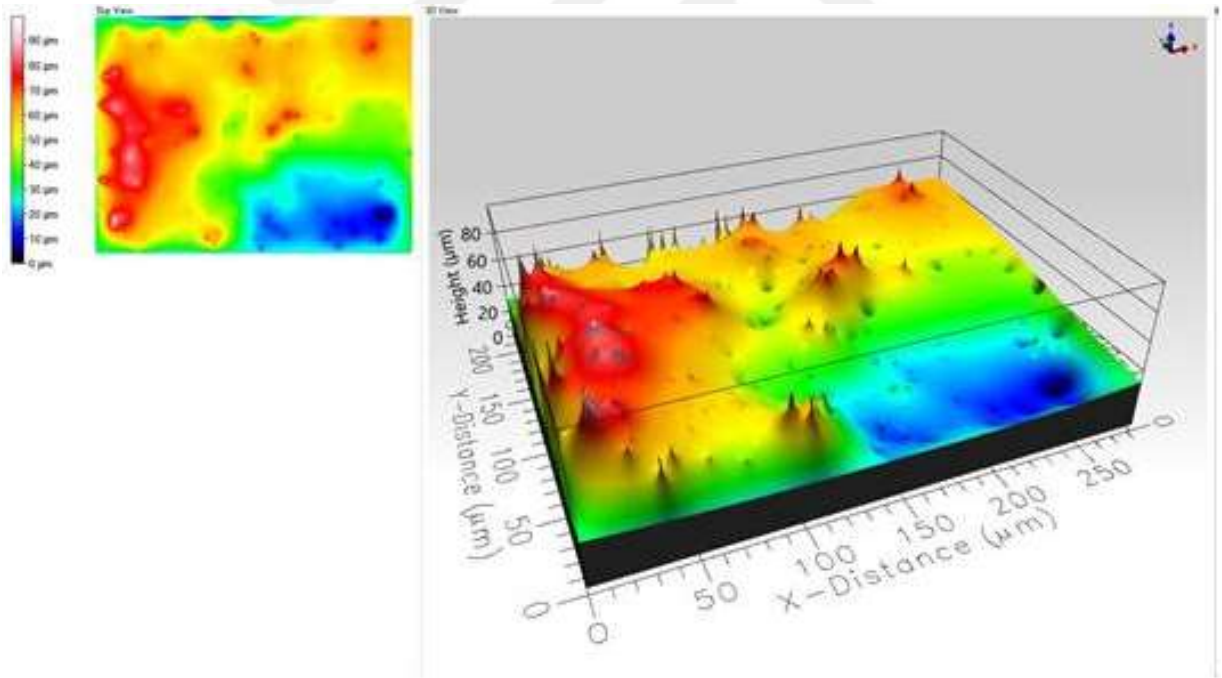
GPVA ve SMA lif hibridizasyonu ile üretilen kompozitlere ait kırılma yüzeyinin pürüzlülüğünü ifade eden S_a değerleri Tablo 4.9'da sunulmuştur. 3D kırılma yüzey topoğrafyaları da Şekil 4.48-4.51'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde PVA-SMA hibrit lifli ECC kompozitlere benzer bir trend GPVA-SMA hibrit lifli kompozitlerde de ortaya çıkmış olup, SMA lif yüzdesinin artışıyla S_a değerlerinde önemli artışlar kaydedilmiştir. Referans numuneyle (0 SMA-2 GPVA) kıyaslandığında %0.25 SMA lif ilavesiyle S_a değerinde %44.72, %0.5 SMA lif ilavesiyle S_a değerinde %96.81 ve %1 SMA lif ilavesiyle S_a değerinde %187.45 artış elde edilmiştir.

Tablo 4.9 GPVA-SMA ilaveli kompozitlerin S_a değerleri.

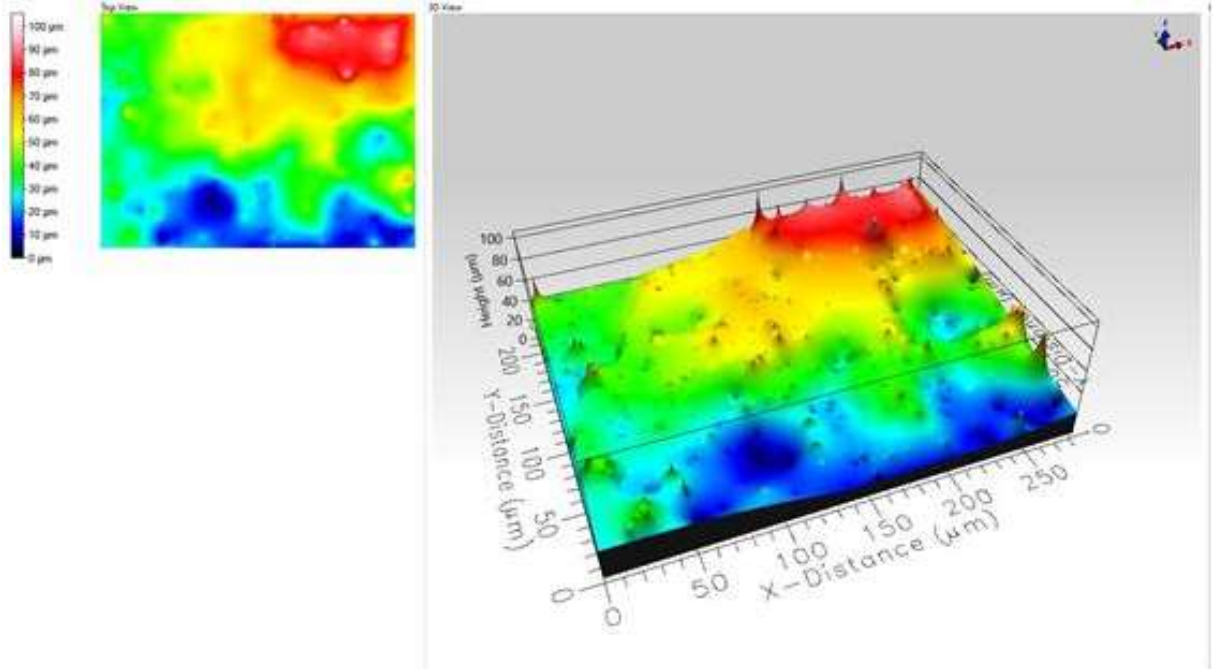
	S_a (μm)
0 SMA-2 GPVA	10.04
0.25 SMA-2 GPVA	14.53
0.5 SMA-2 GPVA	19.76
1 SMA-2 GPVA	28.86



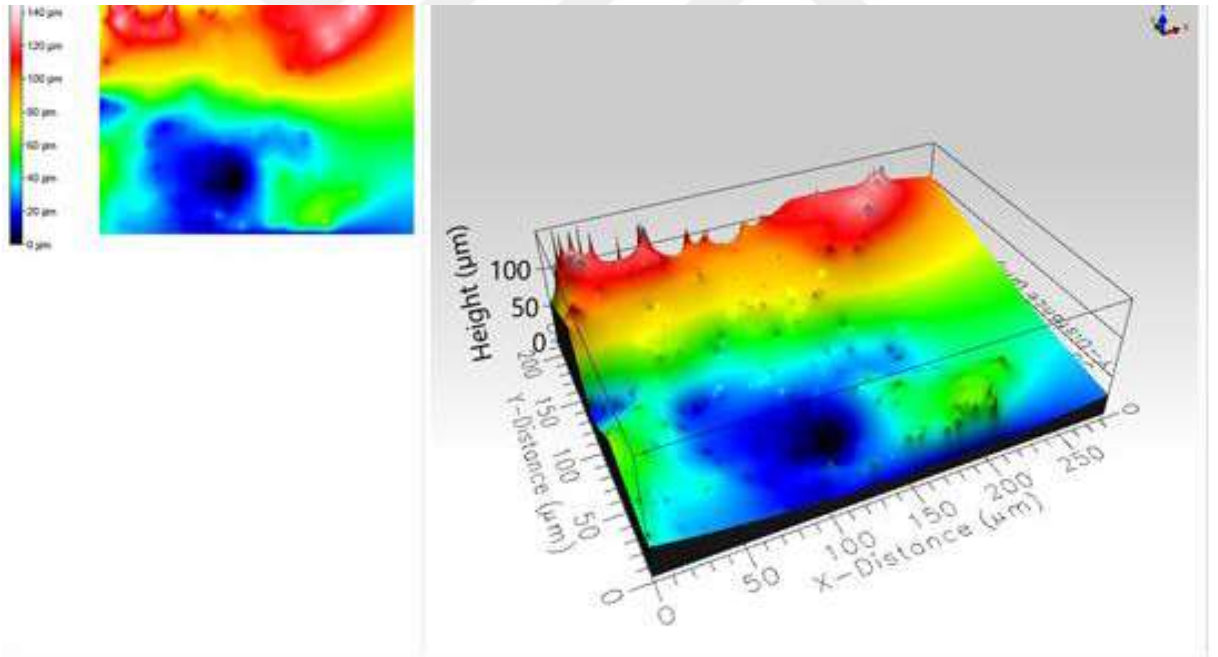
Şekil 4.48 0 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.



Şekil 4.49 0.25 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.



Şekil 4.50 0.5 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.



Şekil 4.51 1 SMA-2 GPVA kompozitine ait 3D yüzey topoğrafyası.

Sonuçlara ilişkin çok önemli bir bulgu da PVA lif yüzeyinde nanoteknolojik olarak yapılan iyileştirmenin S_a değeri üzerinde çok önemli bir artışa sebep olması olmuştur. 0 SMA-2 PVA kompozitle kıyaslandığında, 0 SMA-2 GPVA kompozitin yaklaşık 2.5 kat daha büyük bir S_a değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu değişimin, PVA lif yüzeyinin nano modifikasyonunun

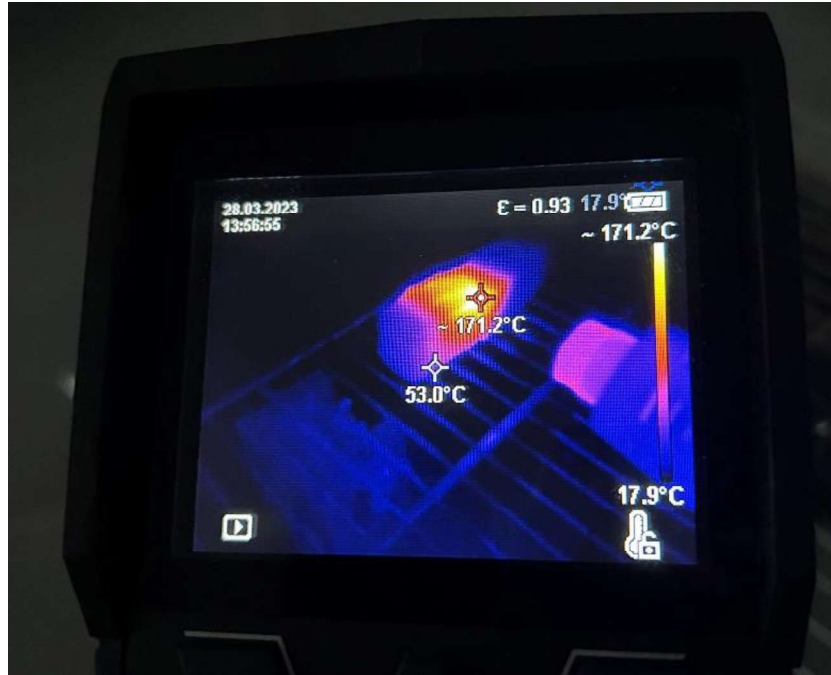
lif-matris ara yüzey aderansı üzerinde yaptığı olumlu iyileşmenin bir yansıması olduğu düşünülmektedir. Çünkü iyileşmiş ara yüzey çimento hamurunu daha dayanıklı hale getirdiği (S_a değerindeki artışla) ve buna bağlı olarak mikro düzeyde temas noktalarının etkileşimini arttırdığı için çok daha kıvrımlı bir çatlak yüzeyi oluşturmuştur.



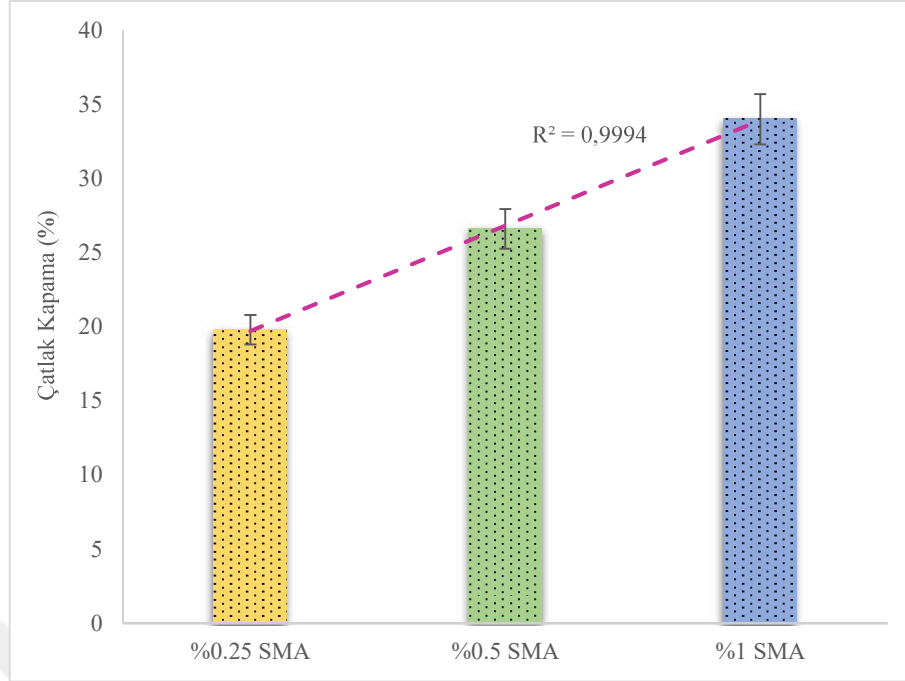
5. TARTIŞMA

Bu tezin amacı doğrultusunda yüzeyi nano grafitle iyileştirilmiş PVA liflerin ve SMA liflerin kompozitteki etkinliği ile mikro ve makro ölçek özellikler arasındaki ilişkiler bu bölümde detaylı incelenmiştir.

SMA liflerin etkinliğini belirlemek için eğilme yüklemesi ile oluşan çatlaklar üzerinden, SMA liflerin şekil hafıza özelliğini aktif edebilecek ısı uygulanarak kompozitlerde çatlak iyileştirme özelliği incelenmiştir. Isı uygulaması Şekil 5.1’de görüldüğü gibi termal kamera kullanılarak kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir ve numuneler üzerinde ölçülen sıcaklık değerinin ortalama 170 °C olduğu belirlenebilmiştir. Isı uygulama işlemi öncesi ve sonrasındaki çatlak genişlikleri ölçülerek çatlakların kapanma yüzdeleri hesaplanmıştır. Sonuçlar da Şekil 5.2’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, deney sonrası oluşan çatlak boyutları %0.25 SMA ilavesi ile %19.8, %0.5 SMA ilavesi ile %26.6 ve %1 SMA ilavesi ile %34 oranında azalmıştır. Eğilim çizgisinin R^2 değerinin 1’e çok yakın olması da SMA lif miktarı ile çatlak boyutlarındaki azalmanın doğrusal olarak ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.



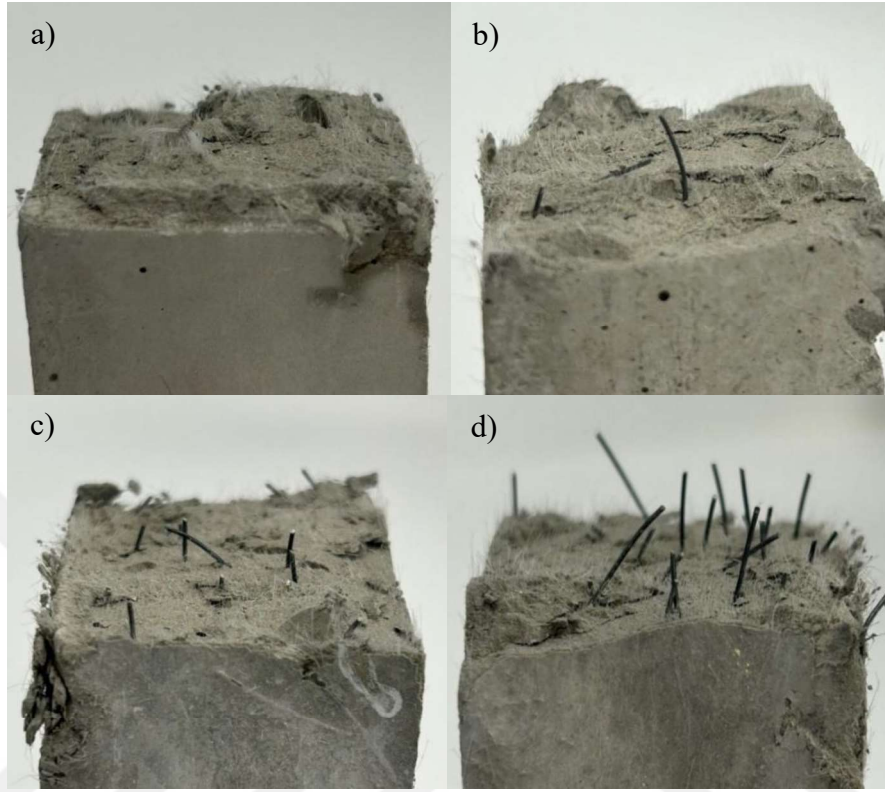
Şekil 5.1 Çatlak iyileştirme sırasında uygulanan ısı kontrolü.



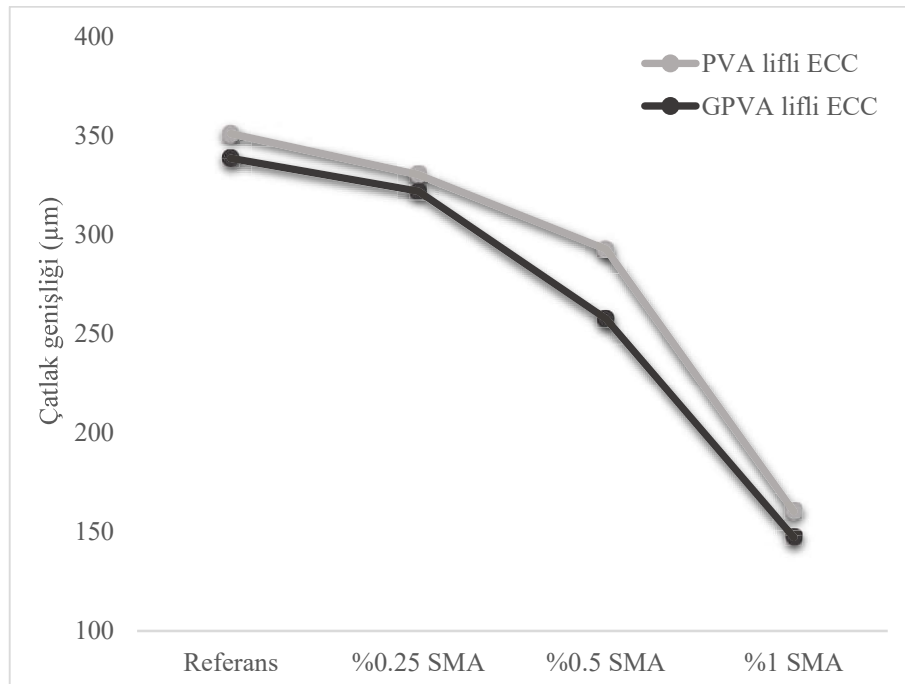
Şekil 5.2 SMA lif miktarına göre çatlak iyileştirme sonuçları.

Şekil 5.3'te kompozitin kırılma yüzeyindeki SMA liflerin lif oranına göre dağılımı sunulmuştur. Bu yüzeyler incelendiğinde, SMA lif miktarının arttıkça kırılma yüzeyinde daha fazla SMA lifin düzgün bir şekilde dağılabildiği ve dolayısıyla da birim hacimde daha fazla sayıda lif bulunduğu anlamına gelmektedir. Çatlamış kesitlerde liflerin yüzey alanları ile sıyrılmaya karşı koyacağı dikkate alındığında, SMA lif miktarındaki artışla doğru orantılı artan çatlak iyileşme özelliği sayesinde, daha yüksek oranlardaki SMA lif miktarı ile daha yüksek çatlak iyileşme kapasitesi elde edilebileceği düşünülebilmektedir. Şekil 5.4 ise PVA lif ilaveli ECC ile GPVA lif ilaveli ECC'lerde sadece SMA lif ilavesiyle çatlak boyutlarında meydana gelen değişimi göstermektedir. Görüldüğü gibi hem PVA lifin hem de GPVA lifin kullanıldığı kompozitte SMA lif ilavesi ile çatlak boyutlarında azalma meydana gelmiştir. Ayrıca SMA'ların uygulanan ısıyla birlikte atomik ve mikro ölçekte ikizlenme ve kayma mekanizmaları ile deforme edilebilir olmasının da çatlak iyileştirme mekanizmasına katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Böylece SMA liflerin hem çatlak boyutlarında azalma, hem de oluşan çatlakları iyileştirme özellikleriyle ECC'de aktif bir şekilde kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yüzeyi nanoteknolojik yöntemlerle iyileştirilmiş GPVA lifinin kullanımı ile de PVA life göre çatlak boyutları açısından azalma elde edilmiştir. Bu da statik temas açısının PVA lifin yaklaşık 82.36° iken GPVA lifin yaklaşık 98.93°'e çıkması ve GPVA lifin yüzeyinin pürüzlülüğünün daha fazla olması ile sağlanmıştır. Böylece hem GPVA lifin

hem SMA lifin ECC’de kullanılmasıyla çatlak boyutlarında ve iyileşmesinde avantajlar elde edilmiştir.

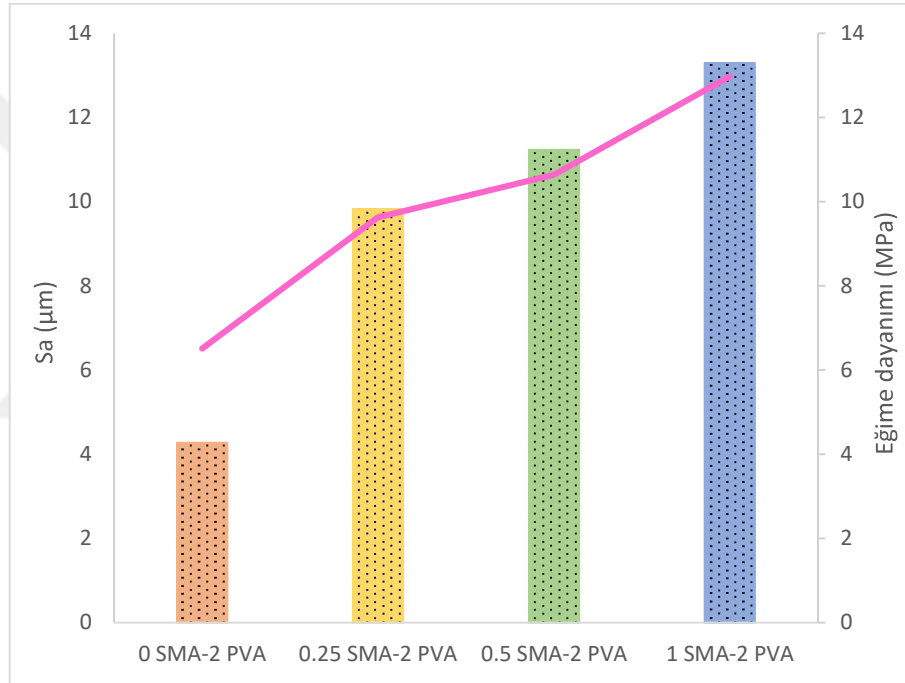


Şekil 5.3 a) %0, b) %0.25, c) %0.5 ve d) %1 SMA lif yüzdesine göre kırılma yüzeyleri.

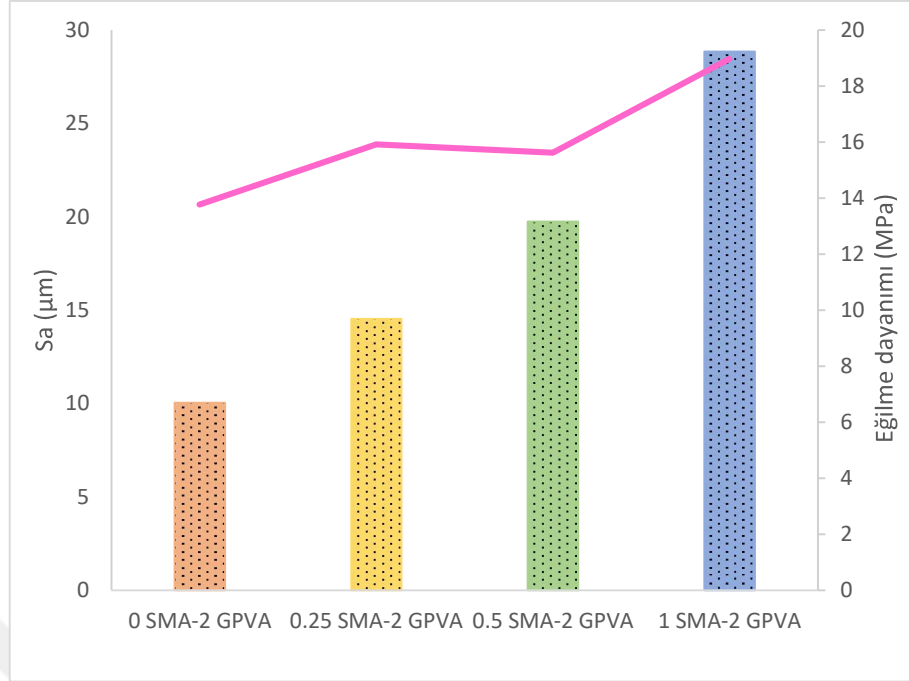


Şekil 5.4 SMA lif ilavesiyle PVA ve GPVA lifli ECC’lerde çatlak boyutları.

3D temassız lazer tarayıcılı profilometre ile kırılma yüzeylerinin analizinden elde edilen kırılma yüzeyinin pürüzlülüğü (S_a) eğilme dayanımları ile Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da görüldüğü gibi birlikte değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kırılma yüzey pürüzlülüğü artmasıyla eğilme dayanımının değeri de artış göstermektedir. Ayrıca lif yüzeyinin nano modifikasyonunun (GPVA içeren serilerde) mikro ölçekte temas noktalarının etkileşimini artırmasının bir sonucu olarak çok daha kıvrımlı bir çatlak yüzeyi (daha yüksek S_a değerleri) ve lif-matris ara yüzey aderansı üzerinde yaptığı olumlu iyileşmenin bir sonucu olarak daha yüksek eğilme değerleri elde edildiği de görülmektedir. Bu da tezin amacına uygun olarak GPVA lifinin de SMA lifinin de kompozitte etkin olarak rol aldığını göstermektedir.

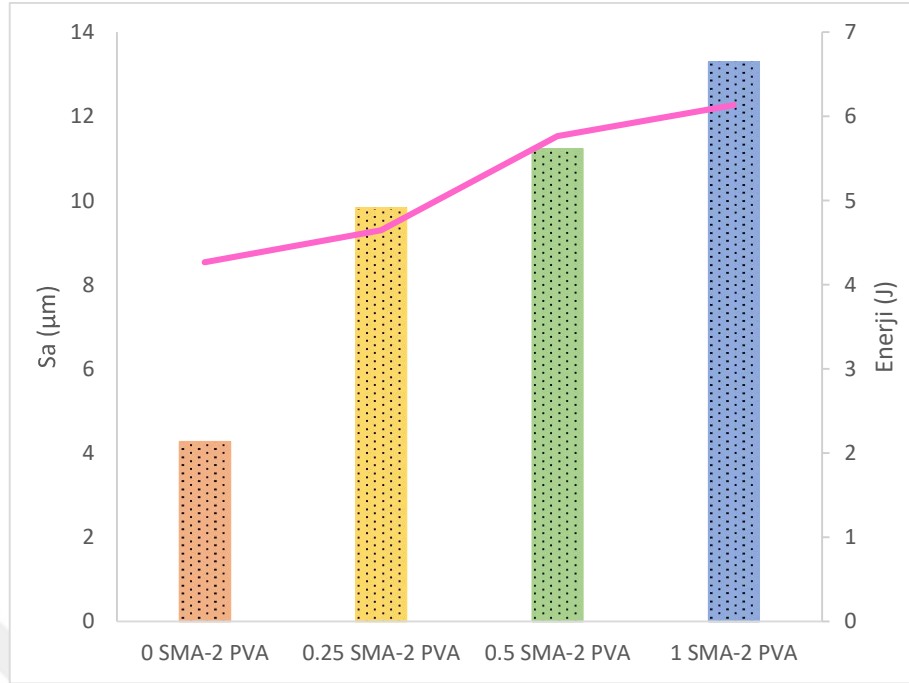


Şekil 5.5 PVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve eğilme dayanımı ilişkisi.

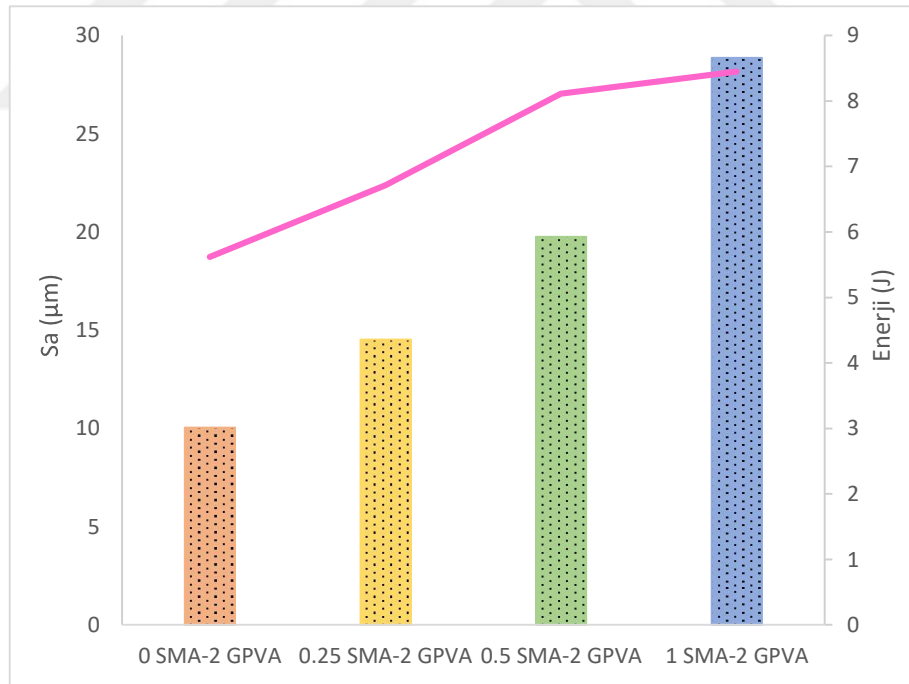


Şekil 5.6 GPVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve eğilme dayanımı ilişkisi.

Çopuroğlu (2005)'nin çalışmasında önerildiği üzere çimento esaslı malzemelerin çekme mukavemeti kontrolünde olan hasar davranışlarının açıklanmasında global çekme dayanımı tek başına yeterli olmayıp, mikro ölçekte lokal mikro-mekaniksel özelliklerinin değerlendirilmesi de gerekmektedir. Bu kapsamda bir mikro-mekaniksel parametre olan kırılma yüzey pürüzlülüğünün kompozitlerinin çarpma davranışlarının anlaşılmasında kullanılması son derece gerçekçi olacaktır. 3D temassız lazer tarayıcıli profilometre ile kırılma yüzeylerinin analizinden elde edilen kırılma yüzeyinin pürüzlülüğü (S_a) ve ağırlık düşürmeli çarpma deneyindeki enerjiler Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de görüldüğü gibi birlikte değerlendirildiğinde, belirli bir lif yüzdesine kadar hem PVA-SMA içeren serilerde hem de GPVA-SMA içeren serilerde, aralarında güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir. SMA lif miktarı arttıkça dinamik rijitliğin arttığı çarpma yüklemelerindeki artış ile yorumlanabildiği gibi, buna paralel olarak GPVA ve SMA lif ilavesi ile dinamik yükler altında da enerji yutabilme kapasitesinin geliştiği kırılma yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilerek sunulmuştur.

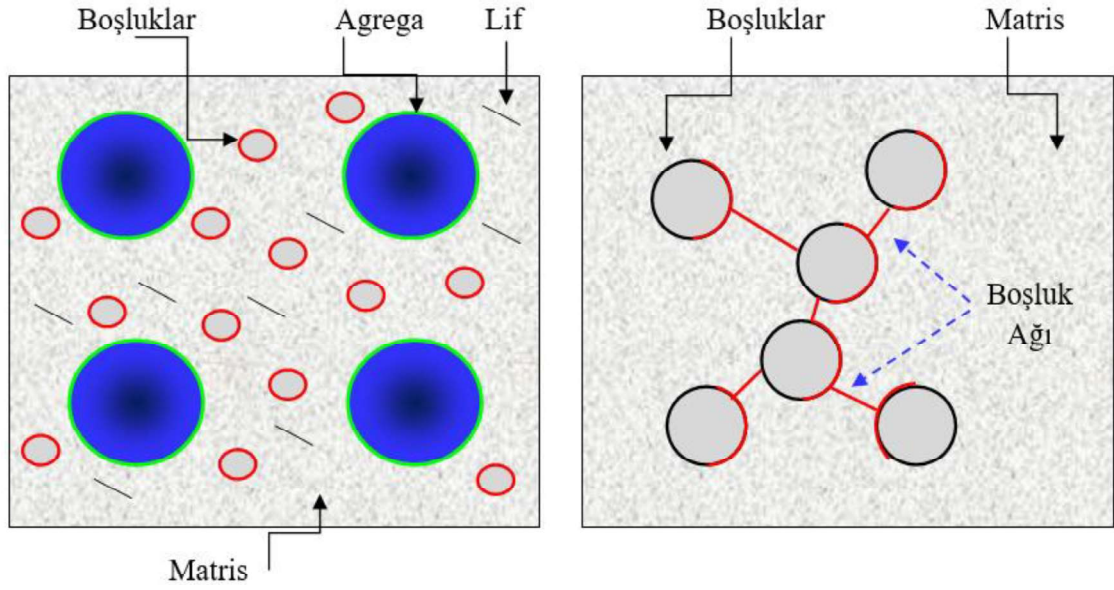


Şekil 5.7 PVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve çarpma enerjisi ilişkisi.



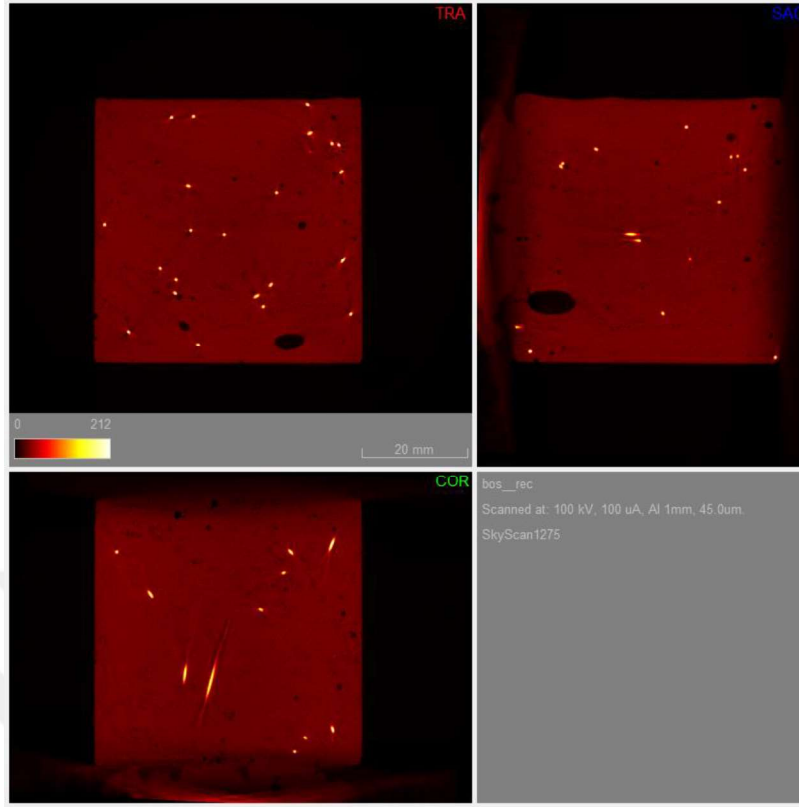
Şekil 5.8 GPVA ve SMA lif ilaveli kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğü ve çarpma enerjisi ilişkisi.

Çarpma yüklemesi gibi kısa süreli ve şiddetli dinamik yüklemelerin mikro ölçekte ortalama boşluk çapını arttırabildiği ve birbirine bağlı boşlukların kümelenmesine ve irileşmesine neden olabileceği bilinmektedir (Şekil 5.9). Böyle bir durumda mikro düzeyde parçacıklar arasındaki temas alanları azalacak ve bu da plastik deformasyonların etkinliğini kısmen azaltarak makro düzeyde absorbe edilen enerji miktarını etkileyecektir. Bu da özellikle belli bir lif yüzdesinin üstünde lif içeren serilerde S_a ile çarpma enerjisi arasındaki korelasyonun doğrusallığının bozulmasını açıklamada yardımcı olacaktır.

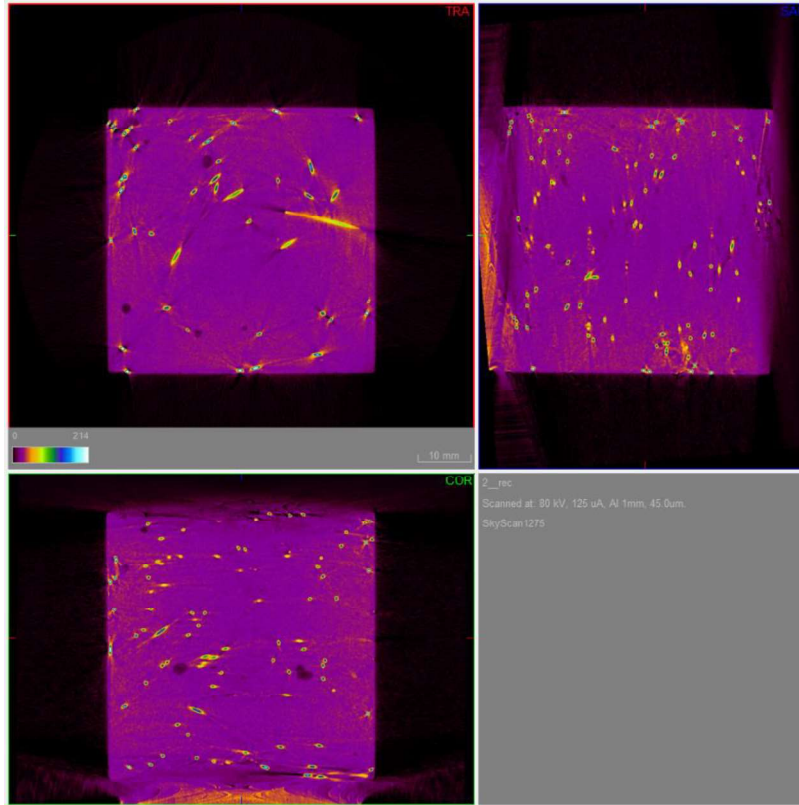


Şekil 5.9 Yük altında boşluk kümelenmesinin sistematik gösterimi (Erdem, 2012).

Şekil 5.10'da çarpma analizi sonrasında Mikro CT analizi gerçekleştirilen referans numunesindeki içyapı içerisinde boşlukların kümeleşmesi ve irileşmesi görülebilmektedir. Bu boşluklar çevresinde artan gerilme yığılmaları ve çatlak lokalleşmelerin makro ölçekte çarpma yüklemesi altında reaksiyon kuvveti ve absorbe edilen enerji miktarlarının düşük kalmasına sebep olacağı düşünülmektedir. Buna karşın %1 SMA lif ilaveli ECC kompozitte liflerin hibridizasyonu ve yüksek yüzey pürüzlülüğü (AFM analizleri ile ispatlandığı üzere) mikro düzeyde boşluk bağlantılarını azaltıcı bir etkiye sebep vererek (Şekil 5.11) daha yüksek bir çarpma reaksiyon kuvveti ve enerji absorbe edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.10 Mikro CT analiz ile elde edilen referans numunenin içyapı görüntüsü.



Şekil 5.11 Mikro CT analiz ile elde edilen %1 SMA lif ilaveli numunenin içyapı görüntüsü.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, yüzey özellikleri yenilikçi ve nanoteknolojik esaslı bir yöntem ile iyileştirilen PVA lifler ile havacılık ve uzay, robotik teknoloji ve sağlık gibi alanlarda üstün özellikleri literatürdeki çalışmalarla kanıtlanmış olan şekil hafızalı alaşımların (NiTi esaslı) tasarlanmış çimento esaslı kompozitler (ECC) içerisinde kullanımı ile yenilikçi ve kendini iyileştiren hibrit lif takviyeli (PVA ve SMA lif) ve ultra yüksek performanslı kompozit malzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- * Bu tez çalışmasının en önemli bulgularından biri, PVA liflerin yüzeyinin nanoteknolojik esaslarla nano grafitle kaplanması neticesinde hidrofobiklik derecesinin arttığının statik kontak açısı ölçümleriyle ispatlanması olmuştur. Bunun bir sonucu olarak, GPVA lif içeren numunelerin mekanik ve mikro-mekaniksel özelliklerinde önemli derecede artışlar sağlanabilmiştir.
- * Benzer şekilde, PVA liflerin yüzeylerinin nanoteknolojik olarak modifiye edilmesiyle elde edilen GPVA'lı liflerle üretilen kompozitlerde daha iyi eğilme performansının elde edilmesinin nedeninin, nano grafit ile modifiye edilmiş PVA liflerin sıyrılmayı zorlaştıran kancalı uç gibi davranarak yük altındaki plastik deformasyonuyla ilave enerji harcaması olduğu düşünülmektedir. 0 SMA-2 PVA kodlu ECC karışımı ile kıyaslandığında 0 SMA-2 GPVA kodlu ECC karışımının eğilme dayanımı yaklaşık %211.85'lik artış göstermiştir.
- * Sonuçlar incelendiğinde PVA, GPVA ve SMA lifler arasında genel olarak sinerjik bir tepki yaratılabilmektedir. ECC'de SMA lif ilavesi %0.5'ten fazla olduğunda kompozitlerin basınç dayanımında düşüşler olsa da, eğilme yüklemeleri altında ECC'de SMA liflerin varlığı, artık (residual) çatlak genişliğini SMA içermeyen %2 PVA lifli ECC'ninkine kıyasla etkili bir şekilde ve %54.3 kadar azaltabildiği gözlemlenmiştir.
- * ECC'nin çatlama mukavemeti, açıklık ortası yer değiştirmesi, nihai şekil değiştirme dahil olmak üzere eğilme özellikleri, SMA lif dozajının artmasıyla önemli ölçüde iyileşmiştir. Hibrit lifli (%2 PVA ve %1 SMA) ECC karışımlar doymuş çoklu çatlama özelliklerinin yanı sıra güçlü çekme şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemiş,

ancak 0.25 SMA-2 PVA karışımın şekil değiştirme sertleşmesi davranışı gereksinimlerini tam olarak karşılamadığı tespit edilmiştir.

- ✱ 3D optik profilometre kullanılarak literatürde ilk defa ECC kompozitlerin yüzey topoğrafyası analizleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, SMA lif yüzdesinin artışıyla S_a (yüzey pürüzlülük) değerlerinin hem PVA hem de GPVA içeren kompozitlerde belirgin bir artış göstermiş olduğu tespit edilmiştir. %1 SMA lif ilavesiyle S_a değerlerinde referans numunelerle kıyaslandığında GPVA ve PVA içeren ECC'lerde sırasıyla %187.45 ve %211.24 artış elde edilmiştir.
- ✱ PVA lif yüzeyinin nano modifikasyonunun sağladığı en önemli avantajlardan birinin de, yüzey iyileşmesi ile plastik deformasyona karşı direncin arttığı ve buna bağlı olarak çok daha kıvrımlı bir çatlak yüzeyi oluştuğu tespit edilmiştir.
- ✱ Dinamik testler göz önüne alındığında, hem PVA hem de GPVA ve SMA ilaveli ECC'de SMA lif miktarı arttıkça maksimum çarpma yükünde artış meydana gelmiştir. Referans ECC (0 SMA-2 GPVA) ile karşılaştırıldığında %0.25, % 0.5 ve %1 SMA ilavesi ile maksimum çarpma yükü sırasıyla %4.5, %22.9 ve %37.9 artmıştır. SMA-PVA serileri ile kıyaslandığında da GPVA-SMA lifli kompozitler daha iyi performans sergilemiştir. Böylece maksimum çarpma yüklerine göre dinamik rijitliği en yüksek karışımın 1 SMA-2 GPVA olduğu da söylenebilmektedir.
- ✱ Çarpma yüklemesi altında absorbe edilen enerjiler dikkate alındığında, GPVA lifler ile üretilen referans numunesi PVA lifler ile üretilen referans numunesine kıyasla yaklaşık %18'lik bir artış sağlamıştır. Bununla birlikte hem PVA hem de GPVA liflerde artan SMA lif ilavesine bağlı olarak %60'lara varan artışlar sağlanabilmiştir.
- ✱ Arayüzey kimyasal aderans (G_d) ve arayüzey sürtünme aderansı (τ_0) gibi mikromekanik parametrelerde, liflerde yapılan yüzey modifikasyonu (hidrofobik yüzey iyileştirmesi) sonucunda değişim ve devamında da çekme süneklik kapasitesinde belirgin artış olduğu tespit edilmiştir. Çarpma yüklemesi gibi dinamik yüklerde davranışı kontrol eden bu temel parametrelere karışım tasarımlarında dikkat edilmesi son derece faydalı olacaktır.
- ✱ SMA liflerin şekil hafıza özelliğini aktive etmek ve kendini iyileştirebilmesi için uygulanan ısı işlemler neticesinde, hem PVA lifin hem de GPVA lifin kullanıldığı kompozitte SMA lif ilavesi ile çatlak boyutlarında azalma meydana gelmiştir. Böylece SMA liflerin hem çatlak boyutlarında azalma, hem de oluşan çatlakları iyileştirme özellikleriyle ECC'de aktif bir şekilde kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yüzeyi

nanoteknolojik yöntemlerle iyileştirilmiş GPVA lifinin kullanımı ile de PVA life göre çatlak boyutları açısından azalma elde edilmiştir.

- * Kırılma yüzeyleri üzerinde görüntü işleme tekniği ve Fraktal Analizi konsepti kullanarak yapılan analizler neticesinde, PVA lif ilaveli ECC'ye daha fazla SMA lif eklenmesinin, SMA liflerin süperelastik özellikleri sebebiyle lif yüzeyine yapışmış çimento matrisi etrafında gelişen çatlak yolunun uzamasına neden olabileceği sonucu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak fraktal boyut ve W_s/G_f değerlerinde önemli değişimler olmuştur.

ECC'nin toplam maliyetinin %80'inden fazlasını PVA lif üretim maliyetinin oluşturduğu çok iyi bilinmektedir. Ancak bu tez çalışması kapsamında PVA lif yüzey özelliklerinde yapılan nanoteknolojik iyileştirme neticesinde kompozitlerin statik ve dinamik performansında çok önemli iyileşmeler sağlanabilmiştir. Buna ek olarak, kompozitlerin üretimi sırasında yüksek oranda endüstriyel bir atık malzeme olan uçucu kül de çimento katkı maddesi (supplementary cementing material) olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla, üretilen kompozitlerin gömülü (embodied) enerji ve karbon emisyon değerleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Tüm bu hususlar göz önüne alındığında, mühendislik ve sürdürülebilirlik özelliklerinde sağlanan bu avantajların ECC'nin yüksek üretim maliyetini tolere edebilecek yeterlilikte olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında analiz edilen karışımlar, 3D yazıcı teknolojisi ile konutların basılması sürecinde kullanılabilir. İlerleyen süreçlerde buna yönelik yapılacak çalışmalar konut türü yapıların üretim teknolojisinin geliştirilmesini sağlayacak, ayrıca kolay taşınabilen, hızlı bir şekilde monte edilebilen ve genel afetler sonrası kullanılabilecek yapılara da sahip olma imkanı sağlayabilecektir. Buna ek olarak; SEM, 3D Optik Profilometre, Atomik Kuvvet Mikroskobu ve Mikro-CT gibi ileri görüntüleme teknikleri kullanılarak elde edilen mikro yapısal veriler ve ECC karışımların mekanik ve dinamik test sonuçları, ECC karışımlarının kırılma hasarını simüle ve tahmin etmeye yarayacak bir mikromekanik model geliştirmede kullanılabilir. Benzer şekilde, elde edilen deneysel sonuçları, özellikle de çatlak analizlerini derin öğrenme, makine öğrenmesi ve yapay zeka teknolojileri ile entegre edecek ileri çalışmalar son derece kıymetli olacaktır.

KAYNAKLAR

Abdulridha, A., Palermo, D., Foo, S., Vecchio, F.J., 2013, Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 49, 893–904.

Alam, M.S., Moni, M., Tesfamariam, S., 2012, Seismic overstrength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebar, *Engineering Structures*, 34(1), 8–20.

Ali, M.A.E.M., 2017, *Tensile and impact behaviour of shape memory alloy fibre reinforced engineered cementitious composites*, Doktora, The University of Western Ontario.

Ali, M.A.E.M., Nehdi, M.L., 2016a, Experimental investigation on mechanical properties of shape memory alloy fibre-reinforced ECC composite, *11th International Conference on Civil and Architecture Engineering ICCAE-11*, 19-21 Nisan, Military Technical College, Mısır, 1–11.

Ali, M.A.E.M., Nehdi, M.L., 2016b, Mechanical performance of hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite incorporating NiTi-SMA short fibres, *Resilient Infrastructure*, 1–4 Haziran, Londra, MAT-717, 1-8.

Ali, M.A.E.M., Nehdi, M.L., 2017, Innovative crack-healing hybrid fibre reinforced engineered cementitious composite, *Construction and Building Materials*, 150, 689-702.

Ali, M.A.E.M., Soliman, A.M., Nehdi, M.L., 2017, Hybrid-fiber reinforced engineered cementitious composite under tensile and impact loading, *Materials & Design*, 117, 139–149.

Aslani, F., Liu, Y., Wanga, Y., 2019, The effect of NiTi shape memory alloy, polypropylene and steel fibres on the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 215, 644–659.

ASTM C1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2017.

ASTM C1275-16, Standard Test Method for Monotonic Tensile Behavior of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Solid Rectangular Cross-Section Test Specimens at Ambient Temperature, 2018.

ASTM C157, Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete, 2017.

ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, 2021.

ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2021.

ASTM F2063, Standard Specification for Wrought Nickel-Titanium Shape Memory Alloys for Medical Devices and Surgical Implants, 2018.

Blankson, M.A., Erdem, S., 2015, Comparison of the effect of organic and inorganic corrosion inhibitors on the rheology of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 77, 59-65.

Chen, W., Lin, B., Feng, K., Cui, S., Zhang, D., 2022, Effect of shape memory alloy fiber content and preloading level on the self-healing properties of smart cementitious composite (SMA-ECC), *Construction and Building Materials*, 341, 127797.

Choi, E., Hu, J.W., Lee, J.H., Cho, B.S., 2015a, Recovery stress of shape memory alloy wires induced by hydration heat of concrete in reinforced concrete beams, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(1), 29–37.

Choi, E., Kim, D.J., Youn, H., 2015b, Repairing cracks developed in mortar beams reinforced by cold-drawn NiTi or NiTiNb SMA fibers, *Smart Materials and Structures*, 24(12), 1–13.

Cladera, A., Oller, E., Ribas, C., 2014, Pilot experiences in the application of shape memory alloys in structural concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014084.

Çankaya, N., Sökmen, Ö., 2021, Polimerler-kil nanokompozitlerinde kullanılan bazı yüzey analiz yöntemleri, *Teknik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 20-32.

Çivici, F., 2006, Çelik lif donatılı betonun eğilme tokluğu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 183-188.

Çopuroğlu, O., 2005, *The characterisation, improvement and modelling aspects of frost salt scaling of cement-based materials with high slag content*, Doktora, The Technical University of Delft.

Dehghani, A., Aslani, F., 2020, The synergistic effects of shape memory alloy, steel, and carbon fibres with polyvinyl alcohol fibres in hybrid strain-hardening cementitious composites, *Construction and Building Materials*, 252, 119061.

Dilibal, S., 2017, Nikel-titanyum şekil bellekli alaşımların süperelastik davranışına ısıtılmanın etkisi, *Politeknik Dergisi*, 20(3), 623-627.

Erdem, S., 2012, *Impact load-induced microstructural damage of concrete made with unconventional aggregates*, Doktora, University of Nottingham.

Guo, L.P., Sun, W., Zheng, K.R., Chen, H.J., Liu, B., 2006, Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research*, 37(2), 242-250.

Gürbüz, E., 2018, *MikroPCM içeren tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin mekaniksel ve darbe davranışlarının araştırılması*, Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Khakimova, E., Sherif, M.M., Ozbulut, O.E., Harris, D.K., Ozyildirim, H.C., 2015, Experimental investigations on shape memory alloy fiber reinforced concrete, *6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, 1-2 Ağustos, University of Illinois, Amerika Birleşik Devletleri, 1-8.

Kına, C., Türk, K., 2017, Mikromekanik olarak tasarlanmış çimento esaslı kompozitin (ECC) kendiliğinden iyileşmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 115-126.

Kim, D.J., Kim, H.A., Chung, Y.S., Choi, E., 2014, Pullout resistance of straight NiTi shape memory alloy fibers in cement mortar after cold drawing and heat treatment, *Composites: Part B*, 67, 588-594.

- Kim, D.J., Kim, H.A., Chung, Y.S., Choi, E., 2016a, Pullout resistance of deformed shape memory alloy fibers embedded in cement mortar, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(2), 249–260.
- Kim, M.K., Kim, D.J., Chung, Y.S., Choi, E., 2016b, Direct tensile behavior of shape-memory-alloy fiber-reinforced cement composites, *Construction and Building Materials*, 102(1), 462–470.
- Kumar, P. K., Lagoudas, D.C., 2008, *Introduction to Shape Memory Alloys*, Shape Memory Alloys, In: Lagoudas, D.C. (ed.), Springer, 1–51.
- Kumar, P., Sachan, A.K., Shanker, R., Rawat, A., 2016, Parametric study of shape memory alloy in concrete, *Structural Engineering Convention SEC-2016*, 21-23 Aralık, 1028–1033.
- Lee, J.H., Lee, K.J., Choi, E., 2018, Flexural capacity and crack-closing performance of NiTi and NiTiNb shape-memory alloy fibers randomly distributed in mortar beams, *Composites Part B*, 153, 264–276.
- Li, V.C., 2003, On engineered cementitious composites (ECC): A review of the material and its applications, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215–230.
- Li, V.C., 2019, *Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure*, Springer, Almanya, ISBN: 978-3-662-58437-8.
- Li, V.C., Wang, S., Wu, C., 2001, Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC), *ACI Materials Journal*, 98(6), 483–492.
- Li, X., Li, M., Song, G., 2015, Energy-dissipating and self-repairing SMA-ECC composite material system, *Smart Materials and Structures*, 24(2), 1–15.
- Lin, J.X., Song, Y., Xie, Z.H., Guo, Y.C., Yuan, B., Zeng, J.J., Wei, X., 2020, Static and dynamic mechanical behavior of engineered cementitious composites with PP and PVA fibers, *Journal of Building Engineering*, 29, 101097.
- Memry Corporation, 2017, *Introduction to Nitinol*, Saes Group, 3 Berkshire Boulevard, Bethel, CT 06801.

Mu, T., Liu, L., Lan, X., Liu, Y., Leng, J., 2018, Shape memory polymers for composites, *Composites Science and Technology*, 160, 169-198.

Naaman, A.E., Reinhardt, H.W., 2006, Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response, *Materials and Structures*, 39, 547–555.

Najim, K.B., Hall, M.R., 2013, Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete (SCRC), *Materials and Structures*, 46, 2029-2043.

Nehdi, M.L., Ali, M.A.E.M., 2019, Experimental and numerical study of engineered cementitious composite with strain recovery under impact loading, *Applied Sciences*, 9(5), 994, 1-27.

Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., Yang, E.H., 2017, Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite, *Construction and Building Materials*, 131, 552-563.

Otsuka, K., Wayman, C.M., 1998, *Shape memory materials*, Cambridge University Press, Birleşik Krallık.

Özkan, Ş., 2017, *Bazalt lifli çimento esaslı kompozitlerin yapısal olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi*, Doktora, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özkan, Ş., Demir, F., 2020, The hybrid effects of PVA fiber and basalt fiber on mechanical performance of cost effective hybrid cementitious composites, *Construction and Building Materials*, 263, 120564.

Saiidi, M.S., Sadrossadat-Zadeh, M., Ayoub, C., Itani, A., 2007, Pilot study of behavior of concrete beams reinforced with shape memory alloys, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 454-461.

Scrivener, K.L., Pratt, P.L., 1986, A preliminary study of the microstructure of the cement/sand bond in mortars, *Proceedings of 8th International Congress of the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, 466-471.

- Shajil, N., Srinivasan, S.M., Santhanam, M., 2013, Self-centering of shape memory alloy fiber reinforced cement mortar members subjected to strong cyclic loading, *Materials and Structures*, 46(4), 651–661.
- Shajil, N., Srinivasan, S.M., Santhanam, M., 2015, An experimental study on self-centering and ductility of pseudoelastic shape memory alloy (PESMA) fiber reinforced beam and beam-column joint specimens, *Materials and Structures*, 49(3), 783–793.
- Sherif, M.M., Khakimova, E.M., Özbulut, O.E., Harris, D.K., Özyıldırım, H.C., 2018, Behavior of mortar beams with randomly distributed superelastic shape memory alloy fibers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(4), 684–695.
- Soe, K.T., Zhang, Y.X., Zhang, L.C., 2013, Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels, *Composite Structures*, 104, 320–330.
- Şahmaran, M., Anıl, Ö., Lachemi, M., Yıldırım, G., Ashour, A. F., Acar, F., 2015, Effect of corrosion on shear behavior of reinforced engineered cementitious composite beams, *ACI Structural Journal*, 112(6), 771-782.
- Şahmaran, M., Erdem, T.K., Yaman, İ.Ö., 2012, *Sürdürülebilir kalkınma için mikromekanik olarak tasarlanmış şekil değiştirme sertleşmesi gösteren yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozitler*, TÜBİTAK Proje No: 108M495, 1-253.
- Şimşek, O., 2011, *Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, ISBN: 978-975-02-1688-6.
- TS EN 12504-4, Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, 2021.
- TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, 2012.
- TS EN 459-2, Yapı kireci - Bölüm 2: Deney yöntemleri, 2021.
- Wierschem, N., Andrawes, B., 2010, Superelastic SMA-FRP composite reinforcement for concrete structures, *Smart Materials and Structures*, 19(2), 025011.

- Wu, K., Yan, A., Yao, W., Zhang, D., 2001, Effect of metallic aggregate on strength and fracture properties of HPC, *Cement and Concrete Research*, 31(1), 113-118.
- Wu, Z., He, X., Zhang, Y., 2011, Steel beam-to-column connections using martensite shape memory alloys, *Advanced Materials Research*, 243–249, 662–665.
- Yang, E.H., Li, V.C., 2010, Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model, *Construction and Building Materials*, 24(2), 130-139.
- Yıldırım, G., 2016, *Sürdürülebilir altyapılar için yeni nesil akıllı çimento bağlayıcılı kompozit malzemelerin geliştirilmesi*, Doktora, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldırım, G., Keskin, Ö.K., Keskin, S.B., Şahmaran, M., 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.
- Zhong, H., Zhang, M., 2021, Effect of recycled tyre polymer fibre on engineering properties of sustainable strain hardening geopolymer composites, *Cement and Concrete Composites*, 122, 104167.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

4802180025-Ezgi GÜRBÜZ

ORJİNALLIK RAPORU

% **13**

BENZERLİK ENDEKSİ

% **12**

İNTERNET KAYNAKLARI

% **3**

YAYINLAR

% **3**

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1

acikbilim.yok.gov.tr

İnternet Kaynağı

% **4**

2

Submitted to The Scientific & Technological
Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

% **1**

3

dspace.gazi.edu.tr

İnternet Kaynağı

% **1**

4

avesis.istanbulc.edu.tr

İnternet Kaynağı

% **1**

5

tez.sdu.edu.tr

İnternet Kaynağı

% **1**

6

dergipark.org.tr

İnternet Kaynağı

% **1**

7

Chi-Hui Tsou, Lei Zhao, Chen Gao, Hong Duan
et al. "Characterization of Network bonding
created by intercalated functionalized
graphene and polyvinyl alcohol in
nanocomposite films for reinforced
mechanical properties and barrier
performance", Nanotechnology, 2020

<% **1**

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Ezgi GÜRBÜZ



KURUM İZNİ YAZILARI

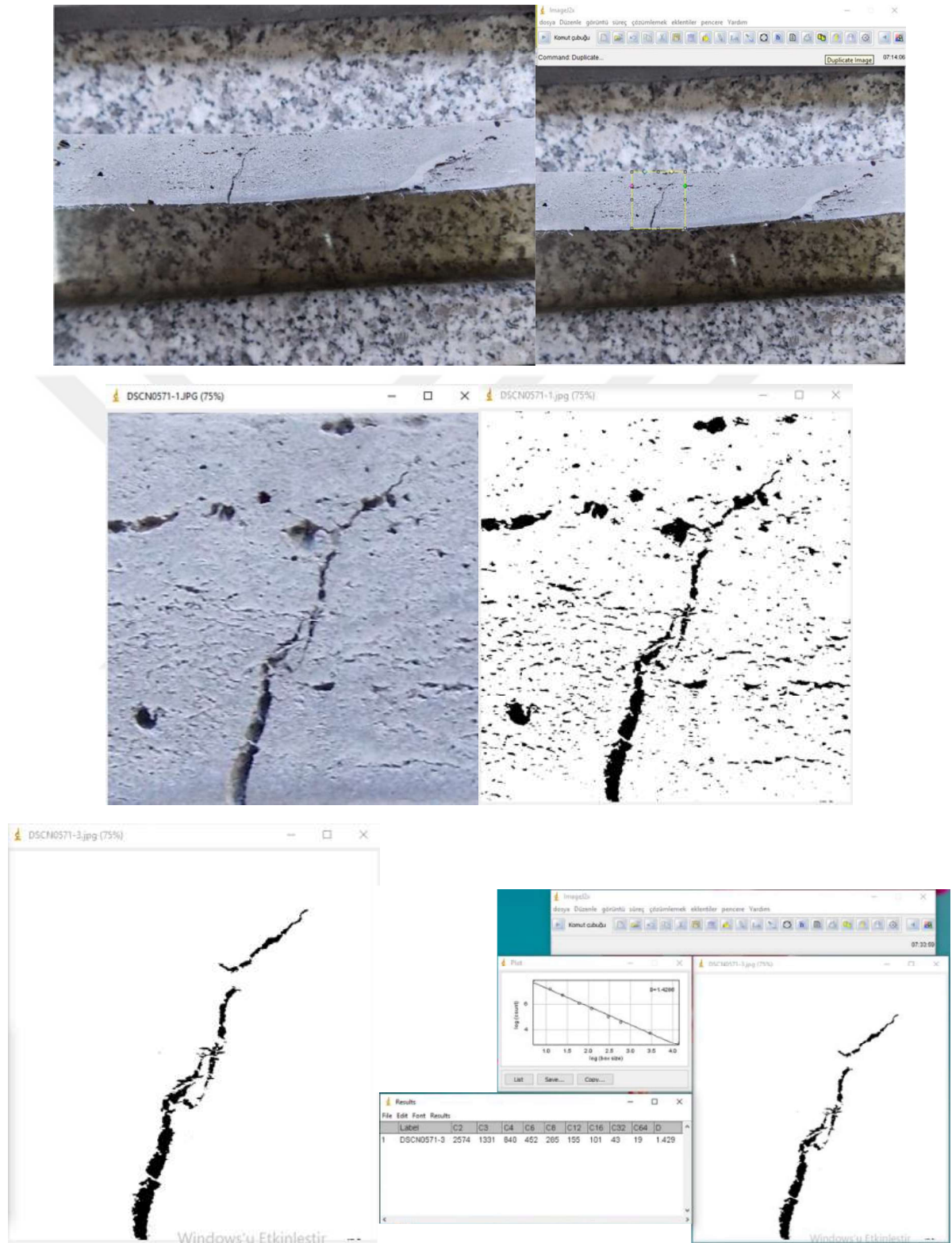
Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

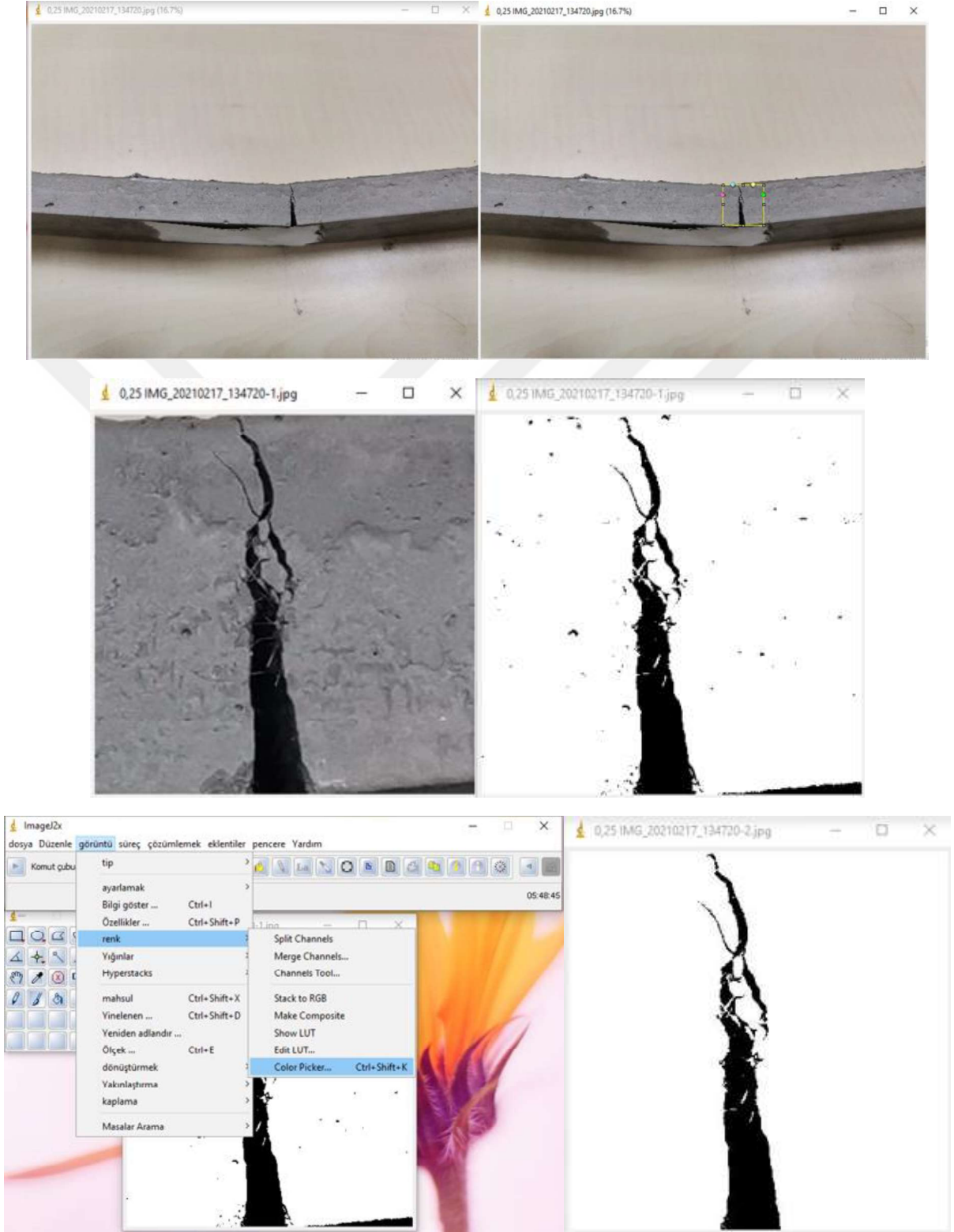
Ezgi GÜRBÜZ



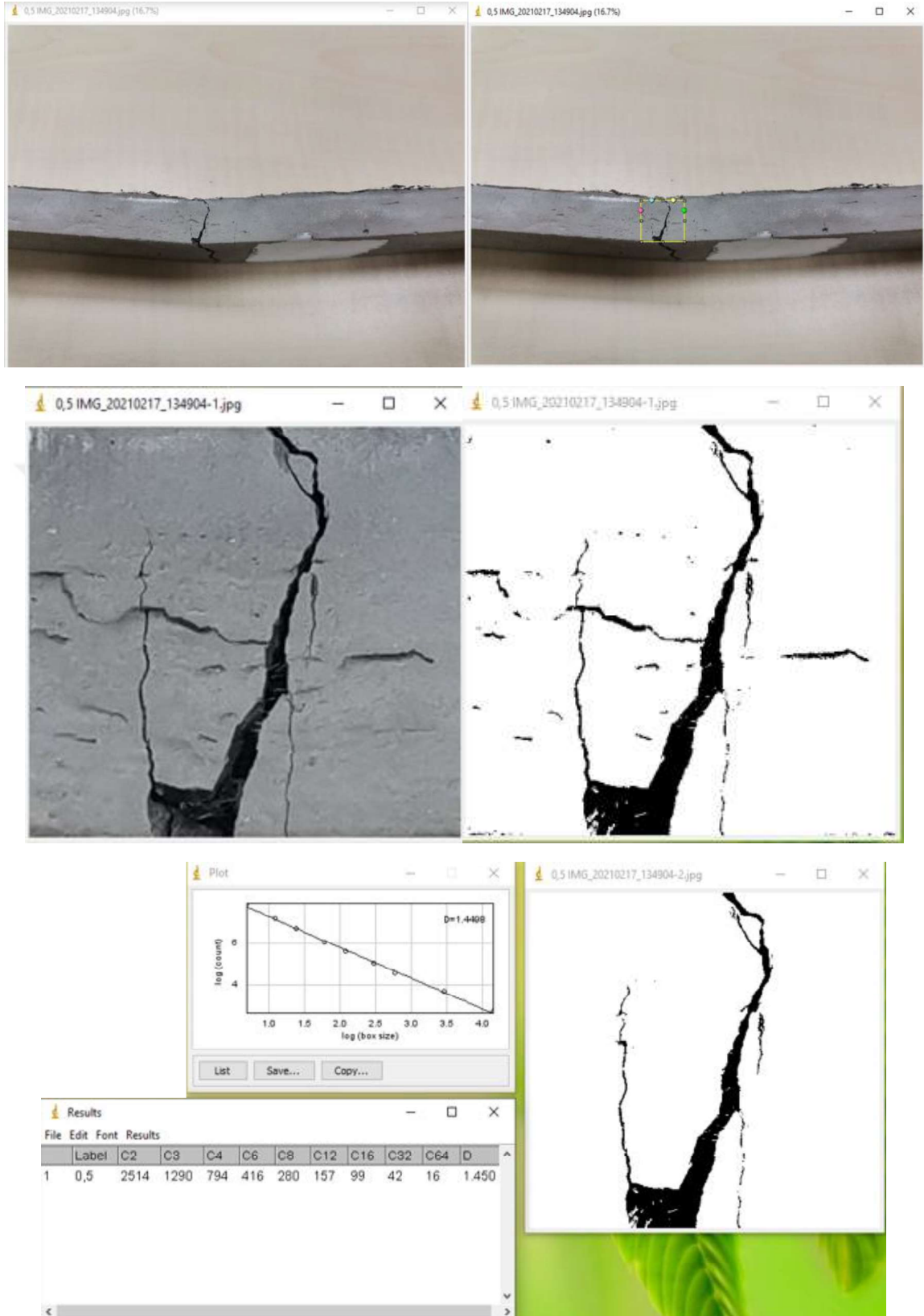
EKLER



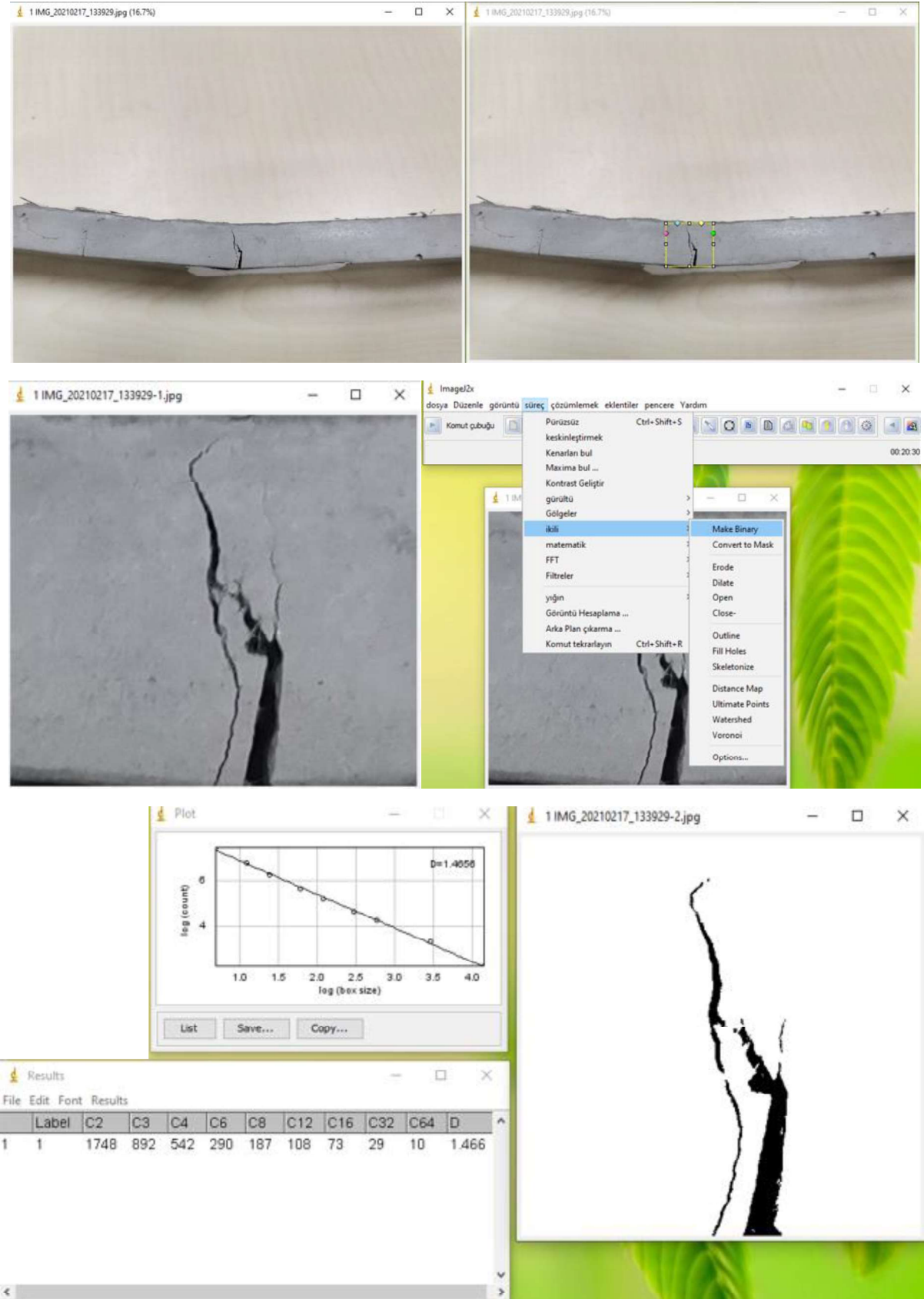
0 SMA-2 PVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



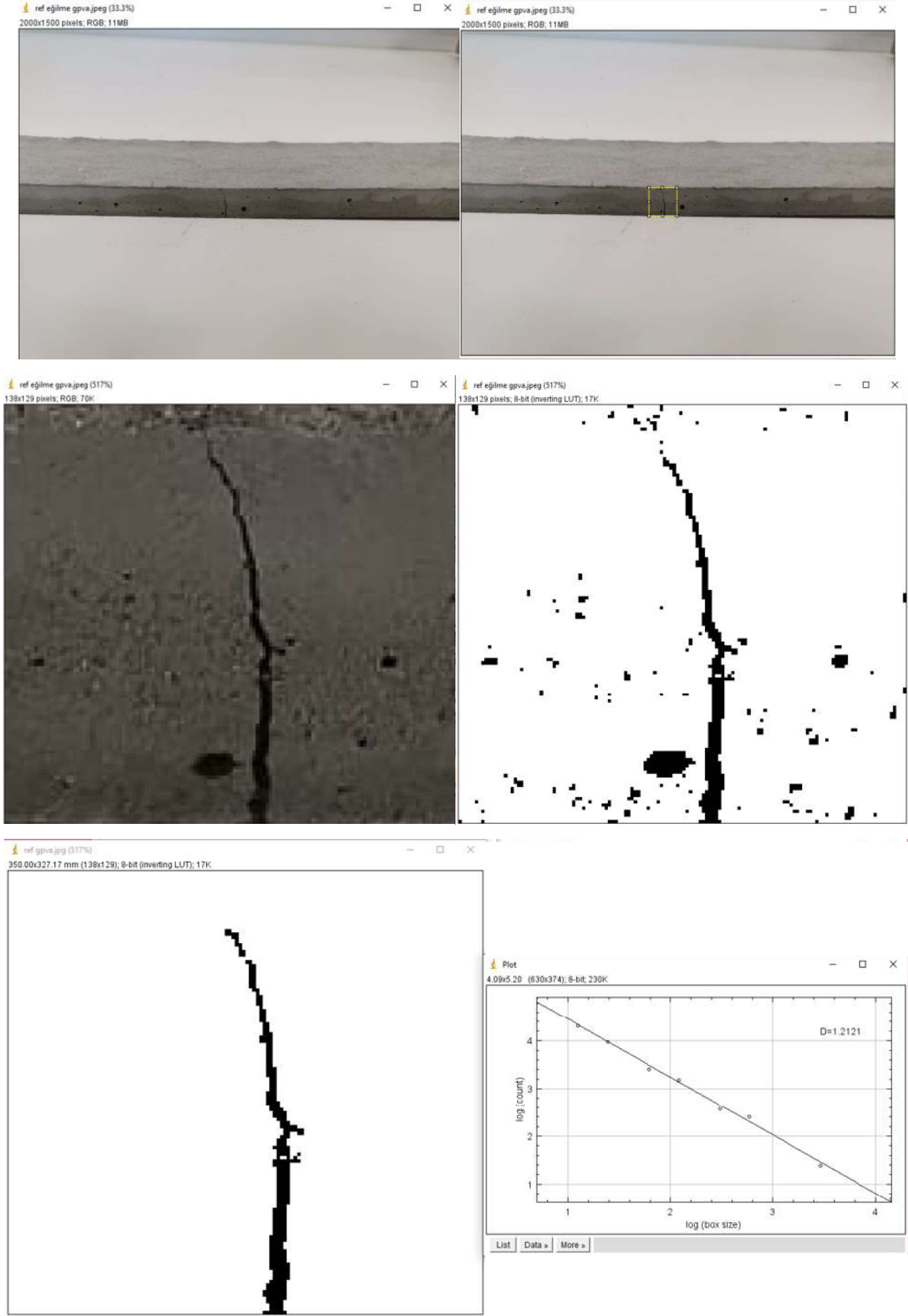
0.25 SMA-2 PVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



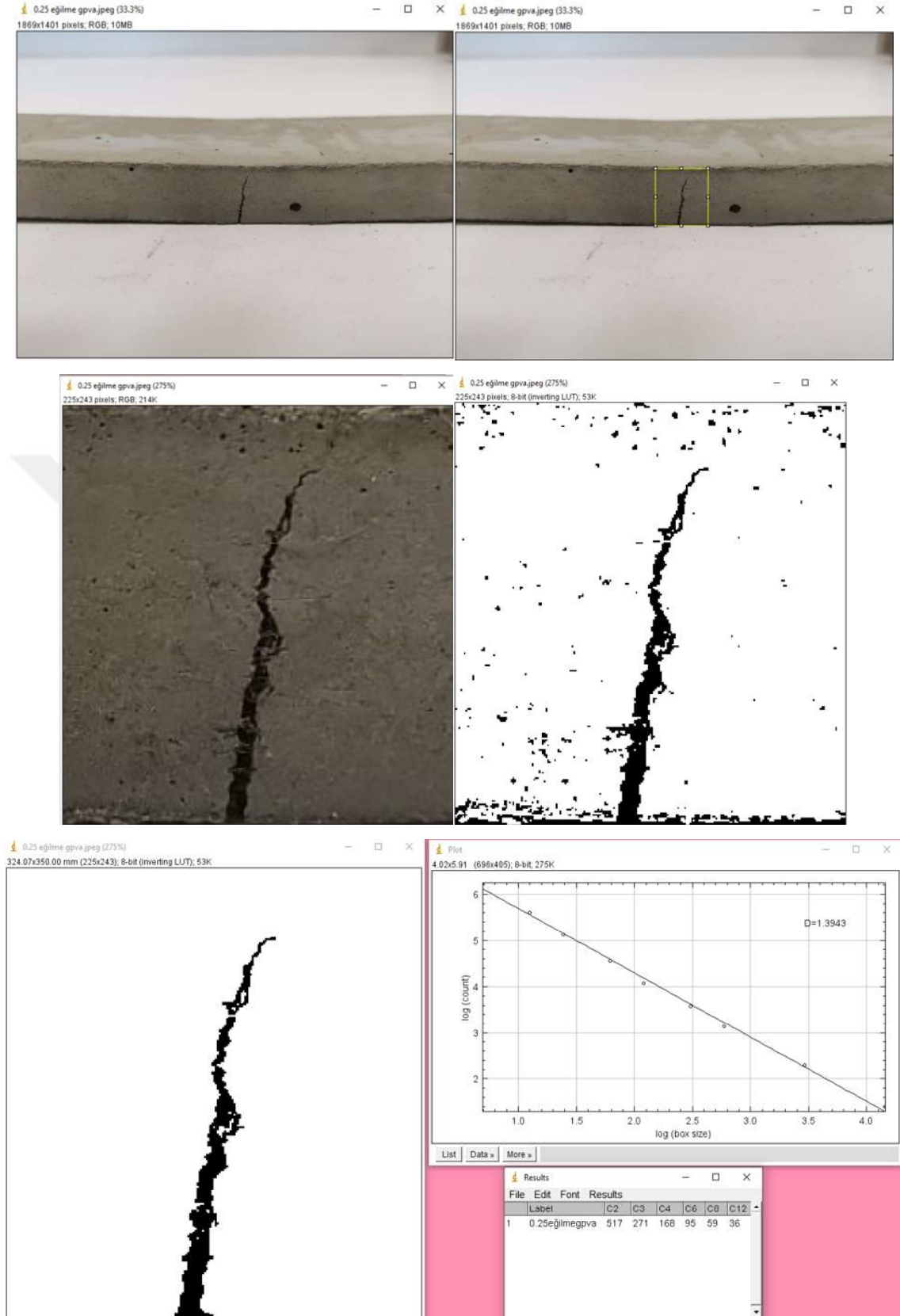
0.5 SMA-2 PVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



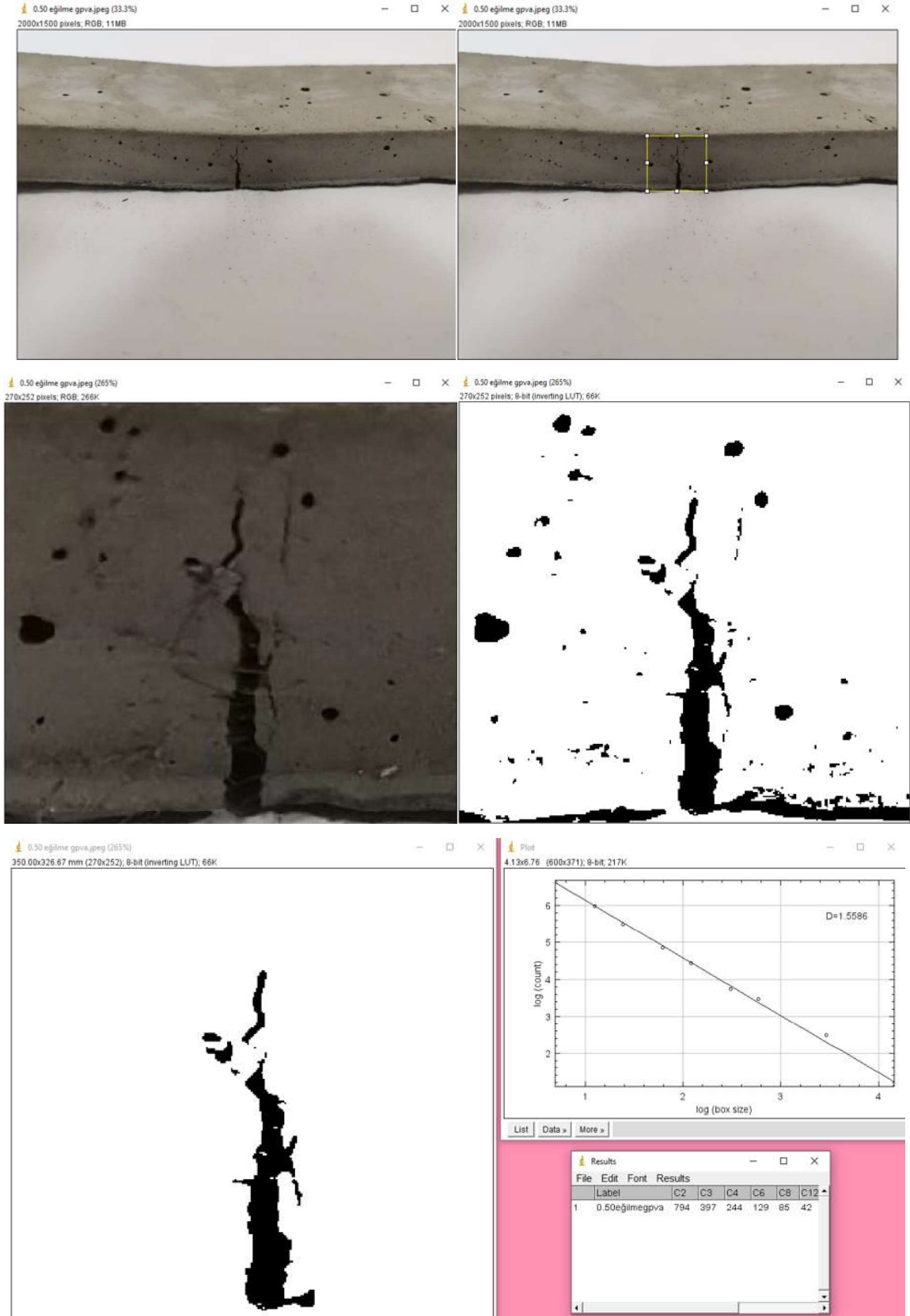
1 SMA-2 PVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



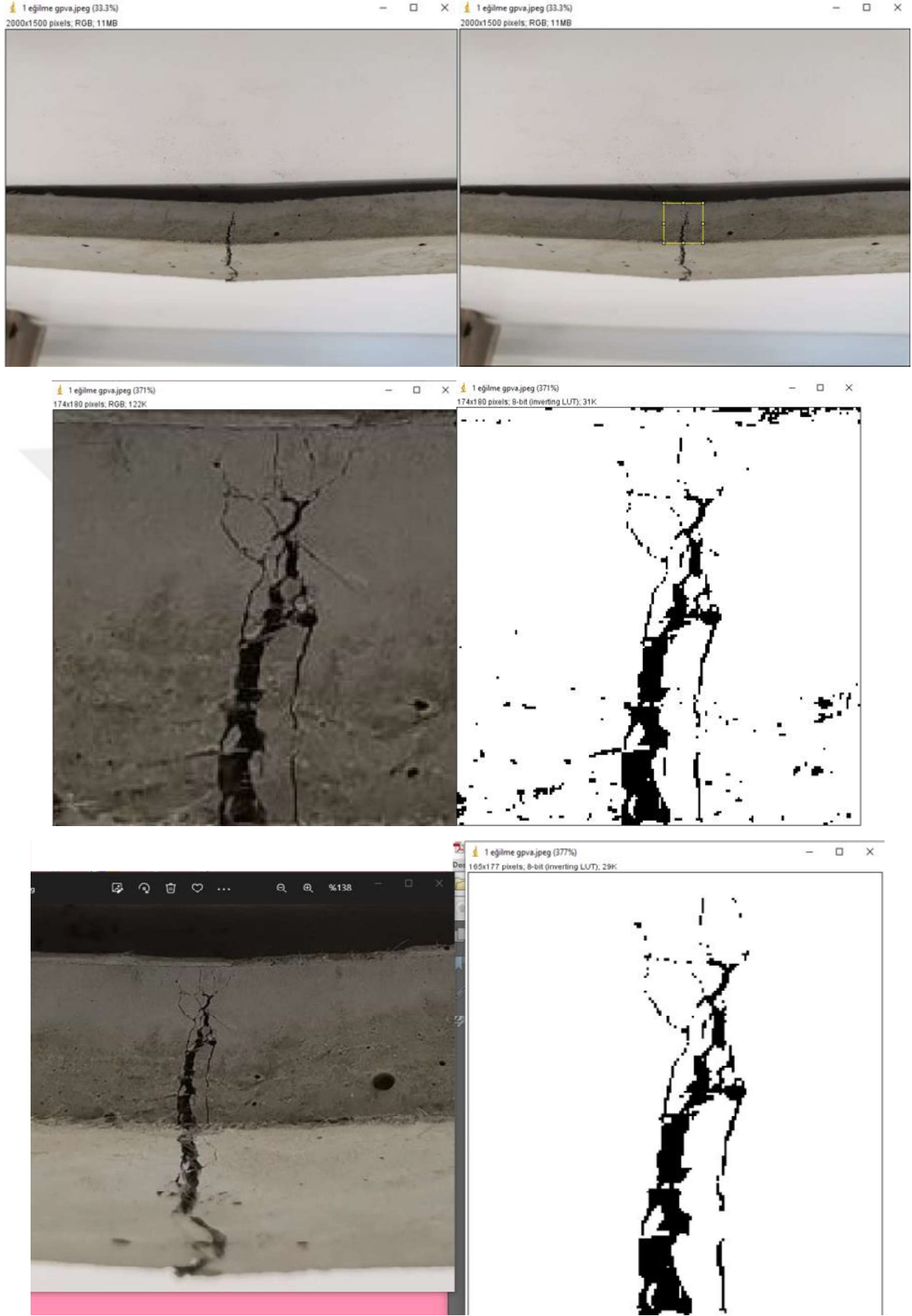
0 SMA-2 GPVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



0.25 SMA-2 GPVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



0.5 SMA-2 GPVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI



1 SMA-2 GPVA SERİSİ FRAKTAL ANALİZ ADIMLARI