



**POLİMER ESASLI BETON KAPLAMALARININ  
ADERANS VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Ibrahim ALAMERİ**

**Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU**

**Doktora Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**2022**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**POLİMER ESASLI BETON KAPLAMALARININ ADERANS VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

(Experimental and Analytical Investigation on the Bonding and Mechanical Properties of  
Polymer Concrete Overlays)

DOKTORA TEZİ

Ibrahim ALAMERİ

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

Erzurum

Temmuz, 2022

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

---

POLİMER ESASLI BETON KAPLAMALARININ ADERANS VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Doç.Dr. Meral OLTULU danışmanlığında, Ibrahim Abdullah Ali AL-AMERI tarafından hazırlanan bu çalışma, 18/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / -oy çokluğu** (.../...) ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç.Dr. Meral OLTULU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Derya TEKİN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN**

**Enstitü Müdürü**

Aslı ıslak imzalıdır

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Doç. Dr. Meral OLTULU* danışmanlığında sunulan “*Polimer Esaslı Beton Kaplamalarının Aderans ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi*” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	14	30
Kuramsal Temeller	20	30
Materyal ve Yöntem	13	35
Araştırma Bulguları	12	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	12	25

*Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ibrahim ALAMERİ	Doç. Dr. Meral OLTULU
18.7.2022	18.7.2022
İmza:Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun ....../.../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun ....../.../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Araştırmanın gerçekleşmesinde büyük bir anlayış ve sabırla bana yardımcı olan, çalışmalarımı izleyen ve yönlendiren hocam Sayın Doç. Dr. Meral OLTULU'ya en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Çalışmaya katkıda bulunan tez komitesi üyeleri Sn Prof. Dr. Derya TEKİN'e ve Sn Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL teşekkürü bir borç bilirim.

SEM ve FTIR analizlerinde göstermiş olduğu yardım ve destekleri için Erzurum Teknik Üniversitesinden Sn. Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya,

Beni yetiştirdikleri ve bu seviyeme gelmemde verdikleri emek için sevgili Babam Abdullah'a, Annem Zehra'ya,

Çalışmalarım sırasında uzak kaldığım kızım İlham'a içtenlikle teşekkür ederim.

Ibrahim ALAMERİ

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

## POLİMER ESASLI BETON KAPLAMALARININ ADERANS VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Ibrahim ALAMERİ

Danışman: Doç. Dr. Meral OLTULU

**Amaç:** Bu çalışmada mermer tozu, silis dumanı ve nano silikon dioksit ( $n\text{-SiO}_2$ ) içeren polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, beton ile aderans dayanımı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir.

**Yöntem:** Bu çalışma başlıca dört aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama; literatür araştırmasına dayanarak atık ve nano malzemeler içeren polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin tespitini, ikinci aşama; SEM/EDS ve FTIR testleri yapılarak polimer kompozitlerin mikro yapısının incelenmesini, üçüncü aşama; polimer kompozitlerin eğimli kesme ve yarmada çekme deneyleri yapılarak beton ile arasında oluşturduğu aderans dayanımının ölçümlerini, dördüncü aşama; ABAQUS yazılımı kullanılarak, sonlu elemanlar modeli ile basınç, eğilmede çekme, yorulma ve aderans deneylerinin sonuçlarını içermektedir. Mekanik özelliklerinin tespitinde mermer tozu polyester reçinenin ağırlıkça %20, 25, 30 ve 40'ı oranlarında, silis dumanı ağırlıkça %2,5, 5, 7,5 ve 10'u oranlarında ve  $n\text{-SiO}_2$  ağırlıkça %0,5, 1, 1,5 ve 2'si oranlarında kullanılarak toplam 21 grup polimer kompozit üretilmiştir. Aderans özelliğinin belirlenmesinde ise mekanik özelliklerin tespit edildiği optimum orana göre belirlenen toplam 6 grup kompozit numune üretilmiştir.

**Bulgular:** Polimer kompozitlere, farklı tane boyutlarındaki silika esaslı malzemelerin ilave edilmesinin, kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir. Kullanılan malzemeler ile üretilen PM30, PS5, PN1, PM30N1 ve PS5PN1 grupları, yapılan deneylerde en iyi mekanik performansı göstermiştir. Polimer ve beton arasındaki aderansı belirlemek için bu gruplara eğimli kesme ve yarmada çekme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarından hareketle Mohr-Coulomb daireleri yapışma kuvveti ve içsel sürtünme açılarının bulunmasında kullanılmıştır. Yalnızca polimer içeren gruba kıyasla, aderans dayanımında PM30, PS5, PM30N1, PS5N1 ve PN1 gruplarında sırasıyla %40, 77, 256, 116 ve 128 oranında artış gözlenmiştir. Yapılan deneylerin sonlu elemanlar yöntemi ile ABAQUS yazılımı ile modellenmesi yapılmıştır. ABAQUS'te elde edilen sayısal eğriler ile deneysel veriler iyi bir şekilde uyumlu çıkmıştır.

**Sonuç:** Tekli veya ikili mermer tozu, silis dumanı ve  $n\text{-SiO}_2$  içeren polimer kompozit gruplarından, kontrol grubuna göre PM30, PS5, PN1, PM30N1 ve PS5PN1 grupları en iyi mekanik performans göstermiş olup bu grupların beton ile arasında oluşturduğu aderans dayanımı da kontrole göre daha iyi değerler almıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aderans, atık malzemeler, iç yapı analizi, mekanik özellikler, nano- $\text{SiO}_2$ , polimer kaplamaları, sonlu elemanlar yöntemi.

Temmuz 2022, 119 sayfa

## ABSTRACT

### DOCTORAL DISSERTATION

#### EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION ON THE BONDING AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER CONCRETE OVERLAYS

Ibrahim ALAMERİ

Supervisor: Assoc. Prof. Meral OLTULU

**Purpose:** In this study, the mechanical properties and adherence strength of polymer composites containing marble powder, silica fume and nano-silica (n-SiO<sub>2</sub>) were investigated experimentally and analytically.

**Method:** This study consists of four main stages. The first stage includes the measurements of the mechanical properties of polymer composites containing waste and nanomaterials based on the literature. The second stage includes examining the microstructure of polymer composites by performing SEM/EDS and FTIR tests. The third stage includes measurements of the bond strength between polymer composites and concrete by performing slant shear and splitting tensile tests. The fourth stage includes the validation of compressive, fatigue, flexural and bond test results with the finite element model using ABAQUS software. In determining the mechanical properties, a total of 21 groups of polymer composites were produced by replacing polyester resin with 20, 25, 30 and 40% by weight of marble powder, 2,5, 5, 7,5 and 10% by weight of silica fume, and 0,5, 1, 1,5 and 2% by weight of nano-silica. In determining the bond strength, a total of 6 groups were produced by using the optimum ratio determined in the mechanical properties of marble dust, silica fume and nano-silica powders.

**Findings:** The results of the experiments showed that the addition of different sizes of silica-based materials to polymer composites significantly improved the strength and other mechanical properties. Among the materials used, the PM30, PS5, PN1, PM30N1 and PS5PN1 groups showed the best mechanical performance. In order to measure the bond strength between polymer and concrete, slant shear and splitting tensile tests were used. Based on the experimental results, Mohr-Coulomb circles were used to find the adhesion and internal friction angles. In comparison to the neat polymer sample, the bond strength was improved by 40, 77, 256, 116 and 128% for PM30, PS5, PM30N1, PS5N1, and PN1, respectively. Compression and bond tests were modeled with the finite element method in ABAQUS software. The numerical curves obtained in ABAQUS and the experimental data were well matched.

**Results:** Among the polymer composite groups containing sole or combined marble dust, silica fume and nano-silica, the PM30, PS5, PN1, PM30N1, and PS5PN1 groups showed the best mechanical performance in comparison to the control group. In addition, the bond strength formed by these groups with concrete showed better values compared to the control.

**Keywords:** Bond, waste materials, microstructure analysis, mechanical properties, nano-SiO<sub>2</sub>, polymer overlays, finite element method.

July 2022, 119 Pages

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....	xiii
GİRİŞ.....	1
Amaç .....	4
Kapsam.....	4
KURAMSAL TEMELLER.....	6
Köprü Tabliyelerinde Kullanılan Kaplama Türleri.....	6
Asfalt Kaplamaları .....	6
Takviyeli portland çimentolu beton (PCC) kaplama .....	7
Takviyesiz polimer modifiyeli beton (PMC) kaplama.....	8
İnce kaplamalar (Polimer kaplamalar) .....	9
Polimer Kompozit Kaplamanın Performansını Etkileyen Faktörler .....	10
Bağlayıcı reçine.....	11
Epoksi esaslı polimer kompozit kaplamalar .....	11
Polyester esaslı polimer kompozit kaplamalar.....	12
Metakrilat esaslı polimer kompozit kaplamalar .....	12
Pekiştirici (Dağılı) faz .....	13
Polimer kompozitlerin karıştırma yöntemleri .....	16
Yüzey hazırlama işlemleri.....	16
Yerleştirme yöntemleri.....	16
Kür .....	18
Beton Onarımında Aderansın Önemi.....	18
Aderans Ölçüm Yöntemleri .....	19
Genel yöntemler .....	19

Eğimli kesme testi .....	21
Yarmada çekme testi .....	22
Literatür Özeti .....	23
Polimer matris özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar .....	23
Polimer kaplamalı beton çalışmaları .....	26
MATERYAL ve YÖNTEM .....	30
Materyal .....	30
Agrega .....	30
Çimento .....	31
Mermer tozu .....	31
Silis dumanı .....	32
Nano-silika (n-SiO <sub>2</sub> ) .....	32
Polyester reçine .....	33
Karma suyu .....	34
Akışkanlaştırıcı .....	34
Deneylerde kullanılan aletler .....	34
Betoniyer .....	35
Mini slump .....	35
Kalıplar .....	35
Yöntem .....	38
Kompozitlerin üretimi .....	38
Kompozitlerin sertleşme öncesi yayılma testi .....	44
Fiziko-mekanik testler .....	44
Aderans testleri .....	47
Mohr-Coulomb analizi .....	48
Enstrümental analiz teknikleri .....	50
Sonlu elemanlar analizi .....	51
ARAŞTIRMA BULGULARI .....	57
Kompozitlerin Sertleşme Öncesi Yayılma Sonuçları .....	57
Fiziko-Mekanik Sonuçları .....	57
Yoğunluk .....	57
Ultrases geçiş hızı (UGH) .....	59
Dinamik elastisite modülü .....	61
Basınç dayanımı .....	62
Eğilmede çekme dayanımı .....	65

Tokluk .....	67
Elastisite modülü değerleri.....	68
İç Yapı Analizi .....	69
SEM/EDS analizi .....	69
FTIR analizi .....	72
Aderans Analizi.....	74
Eğimli kesme testi.....	74
Yarmada çekme testi.....	76
Mohr-Coulomb Analizi.....	77
Sonlu Elemanlar Analizi .....	80
Model geğerliliği .....	80
Eğilmede çekme testi modellemesi.....	82
Histeresis döngüleri.....	89
Eğimli kesme testi modeli.....	90
SONUÇ ve ÖNERİLER .....	93
KAYNAKLAR.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	104

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Kaplama Seçim Kriterleri .....	10
<b>Tablo 2.</b> Polimer Kompozit Kaplamalar İçin Epoksi, Polyester ve Metakrilat Bağlayıcıların Tipik Özellikleri.....	12
<b>Tablo 3.</b> Plastik Dolgu Maddelerinin Kimyasal Sınıfları .....	14
<b>Tablo 4.</b> Aderans Testi Türleri.....	20
<b>Tablo 5.</b> Agregaların Tane Yoğunluk, Su Emme ve Yüzey Nemi Oranları .....	30
<b>Tablo 6.</b> Çimento, Silis Dumanı ve Mermer Tozunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	31
<b>Tablo 7.</b> N-SiO <sub>2</sub> Özellikleri .....	33
<b>Tablo 8.</b> Polyester Reçine Özellikleri .....	34
<b>Tablo 9.</b> Polimer Kompozit Karışım Oranları (% ağırlıkça) .....	39
<b>Tablo 10.</b> Beton Karışım Oranları .....	41
<b>Tablo 11.</b> Grupların Fiziko-Mekanik Özellikleri.....	58
<b>Tablo 12.</b> Eğimli Kesme Testi Sonuçları.....	75
<b>Tablo 13.</b> Sprinkel and Ozyıldırım Tarafından Bildirilen Aderans Dayanım Kaliteleri .....	75
<b>Tablo 14.</b> Yarmada Çekme Testi Sonuçları.....	77
<b>Tablo 15.</b> Sonlu Elemanlar Temas Etkileşim Özellikleri .....	91

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. (a) Genel ve Sandviç kaplamalar (b) Takviyeli PCC kaplamalar (c) Takviyesiz PMC kaplamalar (d) İnce kaplamalar .....	7
Şekil 2. Polimer kaplama uygulamaları .....	10
Şekil 3. Farklı aderans dayanımı testlerinin şematik gösterimi .....	20
Şekil 4. Eğimli kesme testi .....	22
Şekil 5. Yarmada çekme testi: a) kübik numune; b) silindirik numune .....	22
Şekil 6. Kullanılan agregalar .....	30
Şekil 7. Mermer tozu .....	32
Şekil 8. Silis dumanı .....	32
Şekil 9. Nano-silika (n-SiO <sub>2</sub> ) .....	32
Şekil 10. N-SiO <sub>2</sub> parçacıklarının SEM görüntüleri .....	33
Şekil 11. Polyester reçine .....	33
Şekil 12. Elekler .....	34
Şekil 13. Betoniyer .....	35
Şekil 14. Mini slump .....	35
Şekil 15. Küp ve silindir kalıplar .....	36
Şekil 16. Basınç ve eğilmede çekme dayanımı test cihazları .....	36
Şekil 17. Ultrases hızı ölçüm cihazı .....	37
Şekil 18. Taramalı Elektron Mikroskobu .....	37
Şekil 19. FTIR Cihazı .....	38
Şekil 20. Polimer kompozit üretme işlemleri .....	39
Şekil 21. Polimer kompozit grupları .....	40
Şekil 22. Örnek hazırlama ve test işlemleri .....	41
Şekil 23. Eğimli kesme ve yarmada çekme testi örneklerinin boyutları .....	42
Şekil 24. Numune hazırlama ve test prosedürü .....	43
Şekil 25. Numune görüntüleri .....	43
Şekil 26. Hookean bölgesi olan malzemelerin elastisite modülü .....	46
Şekil 27. Tokluk denklemi ve görsel olarak tanımı .....	47
Şekil 28. Eğimli kesme testinde uygulanan kuvvetler .....	47
Şekil 29. Yarmada çekme test prosedürü .....	48
Şekil 30. Mohr-Coulomb konseptini kullanan göçme zarfı .....	50

Şekil 31. ABAQUS'ta çekme-kayma kohezyonlu malzeme yasası.....	52
Şekil 32. Sonlu elemanlar modeli ve yükleme/sınır koşulları.....	53
Şekil 33. Polimer kompozitlerin tipik monotonik gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	54
Şekil 34. Saf polyster kompozit için monotonik gerilme-birim deformasyon eğrisi .....	55
Şekil 35. FEMA 461'e göre yükleme koşulları.....	56
Şekil 36. Polimer kompozitlerin yayılma testi .....	57
Şekil 37. Polimer kompozitlerin yoğunluk değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri.....	58
Şekil 38. Numunelerin ultrases geçiş hızı (UGH) değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri .....	60
Şekil 39. UGH ve yoğunluk arasındaki ilişki.....	60
Şekil 40. Polimer kompozitlerin dinamik elastisite modülü değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri .....	62
Şekil 41. Polimer kompozitlerin ortalama basınç dayanımı sonuçları ve kontrole göre değişim yüzdeleri .....	63
Şekil 42. Polimer kompozitlerin basınç gerilme-birim deformasyon eğrileri.....	64
Şekil 43. Grupların yükleme-zaman eğrisi.....	65
Şekil 44. Grupların zaman-birim şekil değiştirme ilişkisi.....	65
Şekil 45. Polimer kompozitlerin eğilmeye çekme dayanımı ve kontrole göre değişim yüzdeleri .....	67
Şekil 46. Polimer kompozitlerin tokluk değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri .....	68
Şekil 47. Polimer kompozitlerin elastisite modülü değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri .....	69
Şekil 48. SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	72
Şekil 49. Kobalt oktoat, MEKP ve UP için kimyasal yapısı.....	73
Şekil 50. Kompozitlerin FTIR analiz diyagramları.....	73
Şekil 51. Eğimli kesme altında yük-deplasman eğrileri.....	75
Şekil 52. Eğimli kesme testi sonuçları .....	76
Şekil 53. Yarmada çekme testi sonuçları .....	77
Şekil 54. Kesme-normal gerilim etkileşim diyagramları, yapışma mukavemeti ve iç sürtünme açıları .....	78
Şekil 55. Eğimli kesme ve yarma çekme testlerinden sonra numunelerin kırılma yüzeyleri ..	79
Şekil 56. Referans numunesi için ABAQUS basınç testi analiz sonuçları .....	80
Şekil 57. Polimer kompozitler için deneysel veriler ve sonlu eleman analiz verileri .....	81
Şekil 58. Polimer kompozitler için sonlu eleman analizi sonuçları .....	82
Şekil 59. XFEM analiz sonuçları .....	88

<b>Şekil 60.</b> Eğilmede çekme testinin deneysel ve sayısal analiz sonuçları .....	89
<b>Şekil 61.</b> Eğilmede çekme testinin yük-deplasman eğrileri .....	89
<b>Şekil 62.</b> Polimer kompozitlerin çekme-basınç histerezis döngüleri .....	90
<b>Şekil 63.</b> Eğimli kesme testinin deneysel ve sayısal sonuçları .....	92



## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation
AC	: Asfalt Beton
ACI	: American Concrete Institute
ANP	: Alüminyum nano parçacıkları
ASTM	: American Society for Testing and Materials
C	: Yapışma kuvveti
CH	: kalsiyum hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını spektroskopisi
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektros
ILSS	: Tabaka arası kayma mukavemeti
M	: Mermer tozu
MEKP	: Methyl ethyl ketone peroxide
MWCNT	: Çok duvarlı karbonlu nano tüpler
NC	: Normal Beton
n-SiO <sub>2</sub>	: Nano silikon dioksit
PC	: Polimer kompozit
PCC	: Portland çimentolu beton
PET	: Polietilen tereftalat
PMC	: Polimer Modifiyeli Beton
PP	: Polipropilen
SD	: Silis dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO <sub>2</sub>	: Silikon dioksit
SNP	: Silika nano parçacıkları
TGA	: termal gravimetrik analizi
UGH	: Ultrases geçiş hızı
Φ	: İç sürtünme açısı

## GİRİŞ

Beton, düşük maliyeti, uygulama kolaylığı ve yüksek basınç dayanımı gibi özelliklerinden dolayı tüm dünyada yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Bununla birlikte, birçok mevcut betonarme yapının onarıma veya iyileştirmeye ihtiyacı vardır. Çünkü bu yapılarda, kötü tasarım, uygulama hataları ve maruz kaldığı çevresel ve mekanik etkiler nedeniyle hasarların oluşabileceği ve yük taşıma kapasitelerinin azalabileceği bilinmektedir (Oltulu and Alameri 2019).

Hasarlı betonun yerine yeni beton uygulamalarının yapılması en yaygın onarım yöntemidir. Çatlak, korozyon veya kusur gibi hasarlar olduğunda betonu tamir etmek için çatlak veya boşluklu alanlara enjeksiyon, yüzey işleme ve kusurlu malzeme/alanın değiştirilmesi (kaplama) gibi çoklu onarım yöntemleri bulunmaktadır. Beton onarım yöntemleri arasında, kaplamalar, genellikle en ekonomik ve hızlı seçenektir. Kaplamaların temel amacı, yük taşıma kapasitesini eski haline getirerek ve yapının zararlı çevresel etkilere karşı korunmasını sağlayarak yıpranmış beton yapıların ömrünü uzatmaktır (ACI 546R 2004).

Yapılan çalışmalardan hareketle genelde kaplama türlerini sıralayacak olursak; normal betonların yanısıra ultra yüksek performanslı lifli beton (Tayeh *et al.* 2013; Carbonell Muñoz *et al.* 2014), metakaolin esaslı jeopolimer (Alanazi *et al.* 2016), geri dönüştürülmüş agregalı beton (Ceia *et al.* 2016), lateks ve polipropilen içeren kendiliğinden yerleşen beton (Diab *et al.* 2017), epoksi tabaka (Yeon *et al.* 2019), metakaolin içeren beton (Mirmoghtadaei *et al.* 2015) ve metakaolin ile silis dumanı içeren beton (Mohammadi *et al.* 2014) gibi performans özellikleri daha iyi malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir.

Günümüzde termoset reçine ile üretilen polimer kompozitler, geleneksel beton onarımlarında ve ayrıca beton köprü tabliyelerinin kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Reis and Ferreira 2004; Wang *et al.* 2019). İnşaat mühendisliğinde, polimer kompozitlerin hızlı kürlenmesi, yüksek mukavemeti, yüksek sünekliği, çelik ve beton yüzeylere üstün yapışması, su geçirmezliği, kimyasal direnci ve yüksek mekanik özelliklerinin olması diğer yapı malzemelerine oranla onları daha popüler ve cazip hale getirmiştir (Reis and Ferreira 2004; Elalaoui *et al.* 2018; Douba *et al.* 2019).

Polimer kompozitler içerisinde, epoksiler ve polyesterler gibi termoset polimerler ve akrilikler gibi termoplastik polimerler bağlayıcı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Guru

*et al.* 2019; Kinvi-Dossou *et al.* 2019; Krishnan *et al.* 2020; Akaluzia *et al.* 2020; Kalusuraman *et al.* 2020; Khan *et al.* 2020). 1960'larda, polyester reçine kaplamaları üretilmeye başlamış ve polyester ile agregadan oluşan kompozitler de aynı tarihte ortaya çıkmıştır (ACI 548.5R 2016). ACI 548.1R 1997; ACI 546R 2004; ACI 548.5R 2016'da belirtildiği gibi polyesterler, esas olarak köprü ve otopark güvertelerinde, nakliye endüstrisindeki yapılarda beton veya çelik yüzeylere uygulamalarda kullanılan bir polimer kompozit malzemesi olmuştur.

Polyester reçineler, tehlikeli olmayan malzemeler olarak sınıflandırılır (Lithner *et al.* 2011); bu nedenle inşaat mühendisliği uygulamaları ve uzun vadeli hizmetler için güvenlidir. Beton yapıları onarmak için polyester kompozitler kullanıldığında, genellikle yüksek mukavemete ulaşırlar. Köprü tabliyeleri veya döşemeleri için polyester kompozit kaplamalar, yaygın olarak kullanılan epoksiye kıyasla düşük maliyeti nedeniyle de popülerdir (Miller 2005; Kumar 2016).

Lane and Jalinoos 2016 çalışmalarında, ABD'de 2013 yılında kullanılan ilk on kaplamadan birinin polyester kaplama olduğunu bildirmişlerdir. ABD'de, 1989 ve 2007 yılları arasında, yirmi üç köprü tabliyesi, toplam 80646 m<sup>2</sup>'lik alan polyester polimer kompozitle kaplanmıştır (Anderson *et al.* 2013).

Polimer kompozit performansı, dolgu maddeleri veya lifler eklenerek artırılmaktadır. Lif, atık malzeme ve nano katkı maddeleri eklenerek polyester veya epoksi reçineye dayalı harç veya betonun mekanik özelliklerinin araştırıldığı birçok araştırma projesi bulunmaktadır (Jo *et al.* 2008; Jurumenha and Reis 2010; Lokuge and Aravinthan 2013; Daghash *et al.* 2016; Elalaoui *et al.* 2018; Alameri and Oltulu 2020; Dębska *et al.* 2020). Ayrıca çimento matrisli kompozitlerde mermer tozu ve silis dumanının, ince agregalarla kısmen değiştirilerek kullanıldığı da görülmektedir (Poon *et al.* 2006; Ashish *et al.* 2016; Ulubeyli *et al.* 2016; Alyousef *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2020).

Önceki çalışmalarda, mermer tozu ve silis dumanı dolgu maddelerinin geleneksel betonun performansını değiştirmeye yardımcı olabileceği sonucundan hareketle mermer tozu, uçucu kül ve silis dumanı gibi atık maddelerin son zamanlarda polimer kompozitlerin özelliklerini iyileştirmek için de kullanımı araştırılmalıdır. Tercih edilen bu atık maddelerin kullanımının çevresel ve ekonomik avantaj sağlayacağı ve mevcut polyester kompozit kaplama sistemlerinin performansını arttıracığı düşünülmektedir. Ayrıca mermer tozu katkılı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri hakkında çok az çalışma bulunmaktadır (Gürü *et al.* 2007; Barbuta *et al.* 2017; Mansour *et al.* 2017; Choudhary *et al.* 2019). Bunun yanında silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> içeren polimer kompozitlerin mekanik özellikleri hakkında literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Polimerlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için son zamanlarda yeni teknoloji ürünleri kullanılmaktadır. Bu yeni ürünler; çok duvarlı karbon nanotüpler, silika ve alümina nanopartiküller gibi nanofaz bir yapı eklenerek elde edilebilir (Yesilata *et al.* 2009; Zamanian *et al.* 2013; Wang *et al.* 2019; Zheng *et al.* 2020; He *et al.* 2020). Çoğu durumda nano ölçekli parçacıklar, örneğin nano-SiO<sub>2</sub>, geleneksel boyutlu hallerinden daha iyi özelliğe sahip olmaktadır (Shih *et al.* 2006; Morote-Martínez *et al.* 2008; Torgal and Jalali 2011; Ruban *et al.* 2013; Sikora *et al.* 2015, 2015; Starost *et al.* 2017; Alameri and Oltulu 2020).

N-SiO<sub>2</sub> , polimer matrisin dayanıklılığını, elastisite modülünü ve yanıcılığa karşı etkinliğini iyileştirmek için sıklıkla kullanılır (Torgal and Jalali 2011; Ruban *et al.* 2013; Starost *et al.* 2017). Polyester kompozitlere nano malzemelerin eklenmesi, mevcut polyester kompozitlerin performansını arttırmaktadır. Literatürde belirtildiği gibi son yıllarda farklı boyutta faz katkıları (toz, parçacık, lifler) eklenerek oluşturulmuş polimer kompozitler üzerine çalışmalar yapılmıştır ve bu çalışmalardan olumlu gelişmeler elde edilmiştir. Farklı boyut ve içeriğe sahip katkı malzemelerinin iyileştirici etkilerini belirlemek, istenen koşullar altında doğru katkı malzemesinin seçimini sağlar.

Onarım malzemelerinin mevcut bir betona uygulanmasındaki kritik sorun, onarım ile orijinal malzeme arasında geliştirilmesi gereken aderanstır (Bentz *et al.* 2018). Onarım sistemi üç fazlı bir kompozit sistem olarak düşünülebilir: Alt tabaka, kaplama ve yapıştırma bölgesi. Buradaki yapıştırma bölgesi, aderans düzleminin arayüzüne ve çevresine karşılık gelir. Aderans alanı, sisteme uygulanan gerilmelere dayanabilmelidir. Polyester reçinelerin performansı epoksilere benzer, ancak pürüzsüz yüzeylere yapışmaları daha zayıftır (Grantham and Majorana 2009), Bu nedenle polyester kompozitlerin betonla olan aderans performansının iyileştirilmesi, farklı boyutlarda çeşitli faz malzemeleri eklenerek yapılabilir.

Literatürde polimer kompozitler ile betonun aderansı üzerine farklı boyutta tozların etkilerinin detaylıca araştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Tez çalışmasında kullanılmış olan mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub>, mekanik ve aderans özelliklerini en iyi hale getirebilecek, polimer ile iyi uyum sağlayan, homojen karışabilen ve düşük maliyetli olması gibi olumlu özellikleri açısından tercih edilmiş malzemelerdir.

Bu çalışmada, mermer tozu, silis dumanı ve nano-SiO<sub>2</sub> tozlarının tekli kullanımlarının yanında birleşik kullanımlarının mineral katkılı polimer kompozitlerin mekanik ve beton ile aderans özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması, literatürdeki boşluğun doldurulmasına ilaveten, ileri özelliklere sahip polimer kompozit üretilmesi çabalarına da destek olacaktır.

## Amaç

Çalışmanın amaçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Mikrometre ve nanometre boyutlarında tozların; (mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub>) tekli ve çoklu kullanımıyla yüksek performans özelliklerine sahip polimer kompozitler geliştirmek,
- Üretilen polimer kompozitlerin basınç altında gerilme/birim deformasyon özelliklerini ve betonla aderansını araştırmak,
- Kayma-normal gerilme etkileşim diyagramları çizmek ve iç sürtünme açısının yanı sıra kohezyon değerini Mohr-Coulomb kavramıyla belirlemek,
- Kompozitlerin enstrümental analiz teknikleri (SEM/EDS ve FTIR) ile iç yapısını incelemek,
- Yapılan deneylerin sonlu elemanlar yöntemi ile ABAQUS yazılımı kullanılarak deneysel verilerle uyumlu modellemesini yapmak amaçlanmaktadır.

## Kapsam

Yukarıda belirtilen amaçları gerçekleştirmek için yürütülen bu çalışma kapsamında beş ana aşama gerçekleştirilmiştir:

- Ön denemeler: Atık ve nano tozların polyester kompozitlerinde kullanımına yönelik tecrübelerin noksanlığı göz önünde bulundurularak çalışmada tozların oranlarını belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan denemelerde farklı oranda seçilen mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> tozlarının optimum oranlarının belirlenmesi, homojen karışım sağlanabilmesi üzerine denemeler gerçekleştirilmiştir.
- Mekanik Testler: Bu kapsamda üretilen polyester kompozit grupların basınç ve eğilmede çekme dayanımları incelenmiştir. Mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> tozlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi standart yaşta tek eksenli basınç deneyinden hareketle tahribatlı olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrisinden, maksimum basınç dayanımı, tokluk ve elastisite modülü belirlenmiştir. Ultrases hızı ölçümleri ile tahribatsız deneyler yapılmıştır. Bu testte grupların dalga geçiş süresi, hızı ve dinamik elastisite modülleri belirlenmiştir. Maksimum eğilmede çekme dayanımı değeri, üç nokta eğilme testi kullanılarak belirlenmiştir.
- İy yapı çalışmaları (Enstrümental analizler): Bu kapsamda kompozitlerin mikroyapısı ve yüzey yapısı hakkında detaylı bilgi almak amacıyla Taramalı Elektron

Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi yapılmıştır. Ayrıca, kimyasal bileşiklerin fonksiyonel gruplarını tanımlamak için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi yapılmıştır.

- Aderans Testleri: Bu kapsamda, normal beton ve polyester tabakaları arasındaki aderans dayanımını araştırmak için eğimli kesme ve yarmada çekme testleri uygulanmıştır. Numunelere 28. günde eğimli kesme ve yarmada çekme testleri uygulanarak aderans dayanımı belirlenmiştir.
- Sonlu Elemanlar Analizi: Bu kapsamda, analitik modellemede ABAQUS yazılımı kullanılarak, basınç dayanımı, yorulma, eğilmede çekme dayanımı ve eğimli kesme testleri yapılmıştır. Polimer ve beton grupları, tek eksenli basınç testlerinde ölçülen yapısal gerilme-birim deformasyon eğrisi kullanılarak doğrusal olmayan bir elastik-plastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Eğimli kesme testlerini simüle etmek için polimer kompozitlerinin üst kısmına deplasman uygulanmıştır. Yük-birim deformasyon eğrileri simülasyonlardan çıkarılmış ve eğimli kesme testlerinde gözlemlenenlerle karşılaştırılmıştır.

## KURAMSAL TEMELLER

Mevcut köprü tabliyeleri üzerinde kaplama oluşturulması; tabliye yenilemesi ve hizmet ömürlerinin uzatılması gerekliliğinden dolayı son dönemlerde oldukça önemli hale gelmiştir. Kaplamalar, sürüşü kolaylaştırmak için ve bazı durumlarda kayma direncini iyileştirmek için iyi bir alternatiftir.

Ayrıca, daha dayanıklı bir aşınma yüzeyi sağlamak ve eritici tuzlara karşı koruyucu bir katman sağlamak adına yeni bir köprünün üzerine bir tabliye kaplaması yerleştirilebilir. Kaplama dışarıdan gelebilecek bozucu etmen girişini önlediği için tabliyeye daha uzun hizmet ömrü ve sürdürülebilirlik sağlayabilir.

Kaplamalar, yapısal durumu iyi olan, ancak aşırı kullanım, kamyonların darbe yüklemesi veya diğer zorlu çevresel koşullar nedeniyle üst katman hasarına uğrayan mevcut tabliyelerde önleyici bakım olarak da kullanılabilir. Tüm tabliye yapısal olarak sağlamsa ve yapı bir süre daha zorlu unsurlara maruz kalmaya devam edecekse, kaplama hizmet ömrünü uzatmaya yardımcı olabilir ve uzun vadeli dayanıklılık performansını uygun maliyetli bir şekilde artırabilir.

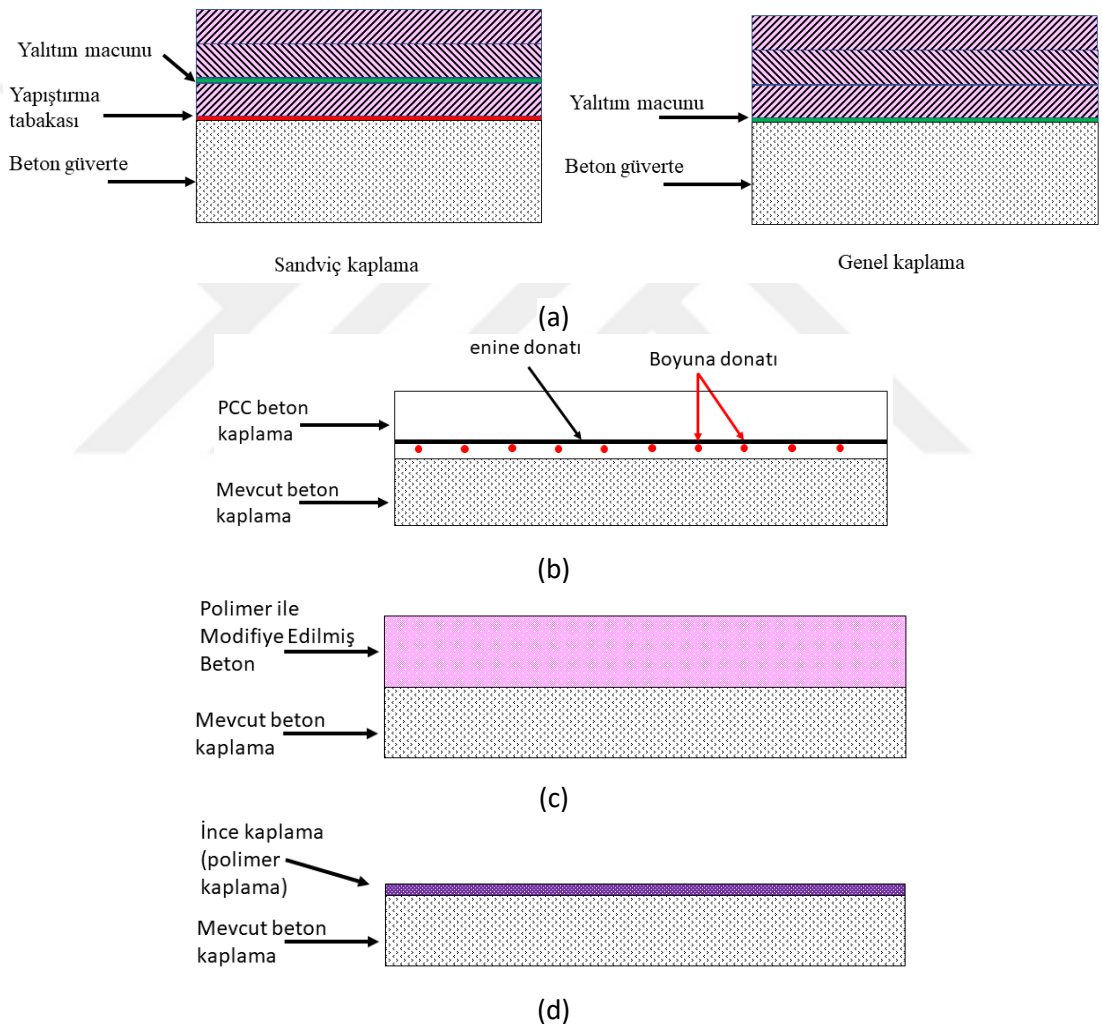
Hâlihazırda, köprülerde önleyici bakım olarak dört kaplama türü kullanılmaktadır: Asfalt, takviyeli Portland çimentolu beton (PCC), takviyesiz polimer ile modifiye edilmiş beton (PMC) ve ince kaplamalardır (Polimer kaplamalar). Türler arasındaki ayrım, birçok faktöre bağlıdır, çünkü her bir kaplama türü farklı uygulamalar için uygundur, yapı için farklı faydalar sağlar ve bazen yapıya özgü kriterler nedeniyle özelliklerini sınırlandırmak gerekir. Her sınıf için malzemeler, uygulama ve özel hususların yanı sıra bunların beklenen ömrü, ortalama maliyeti ve köprülerde yaklaşık kullanım sıklığı aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır (Knight *et al.* 2004).

### **Köprü Tabliyelerinde Kullanılan Kaplama Türleri**

#### **Asfalt Kaplamaları**

Hâlihazırda önleyici bakım olarak iki tür asfalt beton kaplama kullanılmaktadır: Bunlar genel kaplama ve sandviç kaplamadır. Her ikisi de asfalt ve sızdırmazlık maddesi (kauçuk-cam elyaf-bitüm-polyester membran) içermektedir. Bu kaplama seçeneklerinin tümü için tipik olarak kullanılan asfalt, D sınıfı olarak sınıflandırılır. Bu asfalt sınıfı, mineral agrega (ağırlıkça yaklaşık %94.0) ve asfalt çimentosundan (ağırlıkça yaklaşık %6) oluşur.

Sandviç kaplama, Şekil 1a'da gösterildiği gibi, dolgu macununun ilk iki asfalt tabakası arasında yerleştirildiği üç asfalt katmandan oluşur, bu yüzden sandviç kaplama terimi kullanılır. Benzer şekilde, genel kaplama, Şekil 1a'da gösterildiği gibi, dolgu macununun köprü tabliyesi ile ilk asfalt beton tabaka arasında yerleştirildiği üç asfalt katmandan oluşur. Her iki asfalt kaplaması, asfalt tabakaları ve tabakalar arası madde kombinasyonu ile köprü tabliyesine koruma sağlar. Bu kombinasyon, köprü tabliyesini ömrünü kısaltabilecek su ve klorür gibi malzemelerden korur. İki yöntem arasında seçim yaparken göz önünde bulundurulması gereken en önemli noktalardan biri, uygulama sırasında beklenen şantiye koşullarıdır. İnşaat trafiği kaynaklı bozulmaların belirli problemler oluşturabileceği özel durumlar için yöntemlerden uygun olanı tercih edilebilir (Knight *et al.* 2004).



**Şekil 1.** (a) Genel ve Sandviç kaplamalar (b) Takviyeli PCC kaplamalar (c) Takviyesiz PMC kaplamalar (d) İnce kaplamalar

### **Takviyeli portland çimentolu beton (PCC) kaplama**

Takviyeli bir PCC kaplaması, bir kat enine ve boyuna takviye çeliği ile monolitik bir PCC kaplamasından oluşur. Takviyeli beton kaplamalar, üç genel durumda önleyici bakım (bazen yapısal onarımlar) olarak kullanılır. İlk olarak, köprü yapısında ek inşaat (iyileştirme,

genişletme veya güvenlik arttırımı) yapılırken, tabliye için iyi bir koruma ve yapısal stabilite ve direnç sağlar. İkinci olarak, tabliyenin büyük bir kısmının (genellikle %50 veya daha fazlasının) onarımına ihtiyacı olduğu durumlarda üçüncüsü, eski köprülerin onarımında kullanımı gerekebilir.

Genellikle, takviyeli PCC köprü tabliye kaplamaları için C30 sınıfı bir beton karışımı kullanılır. Bu tip kaplama için kullanılan normal bir kesit Şekil 1b'de gösterilmektedir. Tamamlandıktan sonra, bu tip kaplama ve mevcut beton katmanları beraber çalışan kompozit bir şekilde davranacaktır. Bu tür önleyici bir tabaka oluşumu, kalınlığı düşük geçirgenliği nedeniyle tabliyeyi korur ve ayrıca ek yapısal direnç sağlar.

Eski köprü tabliyelerinde, takviyeli beton kaplama kullanımını gerektiren üç temel neden sayılabilir. Eski tabliyeler bugün tasarlanan ve inşa edilen tabliyelerden daha ince enkesitlerden oluştuğundan, donatının üstünde mevcut standartların gerektirdiğinden daha yetersiz bir kaplamaya sahip olduğundan, korozyona nispeten dayanıksız mevcut betonarme demiri içerme olasılığından dolayı kaplamaya ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, eski ancak uygun ve kullanışlı köprüler için, beton kaplama, ilave yapısal bütünlük sağlamanın yanısıra önleyici bakım olarak da uygulanabilir (Knight *et al.* 2004).

### **Takviyesiz polimer modifiyeli beton (PMC) kaplama**

Takviyesiz PMC kaplamaları, otoyol köprü tabliyelerinde önleyici bakım için kullanılabilir başka bir seçenektir. PMC, polimer katkılı tipik bir beton karışımı olarak geliştirilebilir. Bu tür karışımların ilavesi, kaplama uygulamalarında ilgili beton özelliklerini geliştirebilir. Bu özellikler, daha yüksek basınç dayanımını, mevcut betona ve betonarme demirine daha iyi bağlanmayı, su ve klorür çözeltilerine karşı daha dayanıklı olmayı ve geliştirilmiş donma-çözülme direncini içerebilir.

Genellikle bu karışımlarda, hızlı bir donma sağlayan ve böylece trafik akışı yeniden başlamadan önce kaplamanın sertleşmesi için gerekli süreyi kısaltan bir beton karışımı elde etmek için CEM III türü çimento kullanılmaktadır. Bu tip kaplama genellikle, Şekil 1c'de gösterildiği üzere hazırlanmış bir köprü tabliyesinin üstüne uygulanan 40 mm kalınlığında bir PMC katmanından oluşur. Takviyeli PCC kaplamasının aksine, bu kaplama takviye çeliği içermez.

PMC kaplamaları, daha önce açıklandığı üzere, kalınlıkları ve iyileştirilmiş özellikleri sayesinde orijinal köprü tabliyesi için koruma sağlar. Bu tip kaplama, birkaç durumda, örneğin ilave ölü yükten kaçınılması gerektiğinde (takviyeli beton kaplama veya asfalt kaplamalara karşı) veya kaplamanın kısa bir süre içinde tamamlanması gerektiğinde (diğer kaplama

seçeneklerine kıyasla CEM III türü çimento kullanıldığında daha hızlı sonuç) kullanılabilir (Knight *et al.* 2004).

### **İnce kaplamalar (Polimer kaplamalar)**

21. yüzyılda, termoset reçine ile birbirine bağlanmış agregalardan oluşan polimer kompozitler, geleneksel beton onarımlarında ve beton köprü tabliyelerinin kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Reis and Ferreira 2004; Wang *et al.* 2019). İnşaat mühendisliğinde polimer kompozit uygulamaları, diğer inşaat malzemelerine kıyasla hızlı kürlenme, yüksek mukavemet, mevcut malzemelerle mükemmel yapışma, su geçirmezlik, kimyasal direnç ve geleneksel betona göre yüksek mekanik özellikleri nedeniyle popüler ve çekici hale gelmiştir (Reis and Ferreira 2004; Elalaoui *et al.* 2018).

Polimer kompozitler, pahalı bir kaplama malzemesidir. Polimer türüne bağlı olarak geleneksel Portland çimento betonundan iki kat, lateksle modifiye edilmiş betondan daha pahalı olabilir. Ancak çoğu araştırmacı beton köprü tabliyesi onarımları için polimer kompoziti seçmekte ve bunun bir kaplama malzemesi olarak sağladığı avantajlarının maliyetindeki artıştan daha önemli olduğuna dikkat çekmektedirler (Smith 1991).

Polimer kompozit kaplama, sadece tabliye yüzeyinin aşınma ve kayma direncini iyileştirmez; aynı zamanda çelik donatı korozyonuna karşı da koruma sağlar. Portland çimentosu içermeyen polimer kompozit, su, eritici tuzlar ve korozyonu hızlandırabilecek kimyasallara karşı sızdırmazdır. Bu koruyucu kabiliyet, gelecekteki köprü tabliyesi bakım ve onarım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Polimer kompozit kaplama aynı zamanda trafik aksamasını da en aza indirir.

Kaplama yönetmeliklere uygun kalınlıkta uygulanmakta ve 2 saat gibi kısa bir sürede kürlenmektedir (Şekil 1d). Ayrıca polimer kompozit kaplaması çok ince olduğu için, destek tabliyesine minimum ölü yük bindirmektedir. Daha kalın, daha ağır çimento esaslı kaplamalar bazen bir tabliyenin dizayn yüklerini aşılabilmekte bu kaplamaların yerleştirilmesi ve iyileştirilmesi de bir hafta veya daha uzun sürebilmektedir (Smith 1991). Yapının hareketli yük kapasitesi, üzerine her kaplama yerleştirildiğinde kontrol edilmelidir. Deneyime ve ekonomiye dayalı olarak, Tablo 1, bir köprü tabliyesi kaplaması kullanımında, Portland çimento betonu (PCC) ve polyester beton arasında seçim kriterlerini göstermektedir. Köprü üzerinde polimer kaplama uygulamaları Şekil 2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Polimer kaplama uygulamaları

**Tablo 1.** Kaplama Seçim Kriterleri

Kaplama Kalınlığı	Materyal	Yüzey hazırlığı	Avantajlar	Dezavantajlar	Özel Hususlar
19- 75 mm	Polyester	Aşındırıcı püskürtmeli temizleme	Yaklaşık 4 saatte trafiğe açık, Sızdırmaz	Yerleştirme sırasında neme duyarlı olması, yüksek maliyet	10 mm maksimum agrega boyutu
75 mm veya daha büyük	PCC	Yaklaşık 6 mm tabliye betonu kaldırma	Düşük maliyetli	Trafiğe açılmadan önce 7 günlük kür gerektirmesi	26 mm maksimum agrega boyutu

Polimer kompozitlerde, hem epoksiler ve polyesterler gibi ısıyla sertleşen polimerler hem de akrilikler gibi termoplastik polimerler bağlayıcı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Guru *et al.* 2019; Kinvi-Dossou *et al.* 2019; Kalusuraman *et al.* 2020; Khan *et al.* 2020; Krishnan *et al.* 2020; Akaluzia *et al.* 2020). Polyester reçineler, tehlikeli olmayan malzemeler olarak kategorize edilir (Lithner *et al.* 2011), bu nedenle inşaat mühendisliği uygulamaları ve uzun vadeli hizmetler için güvenlidir. Beton yapıları onarmak için polyester kompozitler kullanıldığında, genellikle yüksek mukavemete ulaşılacak ve ara tabakada alt tabaka beton malzemeleriyle güçlü bir aderans oluşturacaktır. Köprü tabliyeleri veya döşemeleri için polyester kompozit kaplamalar, yaygın olarak kullanılan epoksiye kıyasla polyesterin düşük maliyeti nedeniyle de popülerdir (Miller 2005; Kumar 2016).

### **Polimer Kompozit Kaplamanın Performansını Etkileyen Faktörler**

Polimer kompozitlerin fiziksel özellikleri Portland çimentolu betonunkinden önemli ölçüde farklı olduğundan uygulama prosedürleri de farklılık gösterir. Bir polimer kompozit kaplama yerleştirilmeden önce, mühendisler ve müteahhitler bu prosedürleri ve polimer kompozitin özelliklerini tam olarak belirlemelidirler. Polimer kompozit kaplamanın başarısı

için en uygun bağlayıcı reçine ve agrega seçimi, yüzey hazırlığı, uygun karıştırma ve yerleştirme teknikleri önemli parametrelerdir. Aşağıda bu faktörler detaylıca açıklanmıştır.

### **Bağlayıcı reçine**

Polimer kompozitlerin iki ana bileşeni olan bağlayıcı reçine ve agrega, malzemenin dayanıklılığına ve koruyucu özelliklerine katkı sağlamaktadır. İki bileşenli bağlayıcı reçine; polimerik reçine (genellikle bir epoksi veya polyester) ve bir katalizör veya sertleştirici içerir. Bu matrisin çimentolu matrizen farkları; daha güçlü olması, hızlı sertleşmesi, darbe ve aşınmaya dayanıklı olması, hafifliği, dış ortam şartlarına dayanıklılığı, diğer katmanlara iyi yapışması, su, eritici tuz ve kimyasal sızdırmaması şeklinde sıralanabilir.

Çeşitli kimyasal bağlayıcılar farklı kimyasal bileşimlere sahip olduklarından sertleşmemiş ve sertleşmiş özellikleri farklılık gösterir. Polimer bağlayıcıların sertleşmemiş özellikleri arasında viskozite, jel süresi (çalışma ömrü) ve parlama noktası sıcaklığı bulunur. Polimer bağlayıcıların önemli sertleşmiş özellikleri arasında basınç dayanımı, çekme dayanımı, termal genleşme katsayıları, geçirgenlik, elastisite modülü ve aderans dayanımı yer alır. Kurlenme ve sertleşme özellikleri de ortam sıcaklığına bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. AASHTO ve ACI tarafından yayınlanan standartlarda, polimer kaplamalar için farklı tipteki bağlayıcıların malzeme özellikleri üzerine öneriler sunulmuştur. Literatürde bulunan farklı polimer beton bağlayıcıların sertleşmemiş ve sertleşmiş malzeme özellikleri aşağıda sunulmuştur.

### **Epoksi esaslı polimer kompozit kaplamalar**

Epoksi, genellikle iki bileşenin kimyasal reaksiyonundan oluşan bir bileşik sınıfı için genel bir terimdir: bir epoksi reçinesi ve bir sertleştirme maddesi, tipik olarak ağırlıkça 1:1 ile 1:3 arasında değişen oranlarda birleştirilir.

Epoksi bağlayıcılar kullanılarak oluşturulan kaplamalar tipik olarak yüksek aderans dayanımına ve düşük başlangıç büzülmesine sahiptir ve yüksek alkaliniteye sahip ortamlardan etkilenmez; bu nedenle, beton yüzey uygulamaları için uygundur.

Epoksi kaplamalar tipik olarak çok katmanlı yöntem kullanılarak yerleştirilir. Epoksi esaslı polimer beton kaplamaların kullanıldığı pek çok uygulamanın astar kullanımını gerektirmediği belirtilmektedir. Bununla birlikte, kaplamanın uygulanmasından önce çatlakları kapatmak için düşük viskoziteli epoksiler kullanılabilir (ACI 548.5R 2016).

Polimer kaplamalar için epoksi bağlayıcıların tipik özellikleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

## Polyester esaslı polimer kompozit kaplamalar

Polyester bağlayıcılar iki bileşenli sistemlerden oluşmaktadır. Bunlar, polyester reçinesi ve tipik olarak organik peroksit olan küçük bir doz promotör/başlatıcıdır. Polyester reçinenin özellikleri, bağlayıcı sistemin genel özelliklerini kontrol ederken, başlatıcının tipi sadece kütle oranını etkiler (ACI 548.5R 2016). Polimer beton kaplamalar için polyester bağlayıcıların tipik özellikleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

Polyester bazlı polimer kaplamaların kürlenmesi ve mukavemet kazanımı hızlı olabilir. Aromatik bir bileşik olan stirenin varlığı nedeniyle, polyester bazlı kaplamalar uygulama sırasında güçlü bir koku üretir. Tipik olarak, polyester sistemlerde astar kullanımı gereklidir; en yaygın olarak yüksek moleküler ağırlıklı metakrilat (HMWM) kullanılır. Astar malzemesi için polyester bağlayıcı üreticisinin tavsiyelerine uyulmalıdır.

## Metakrilat esaslı polimer kompozit kaplamalar

Metakrilat bağlayıcılar iki bileşenli sistemlerden oluşmaktadır. Bunlar, metil metakrilat (MMA) reçinesi ve tipik olarak organik peroksit başlatıcı malzemesidir. MMA monomer reçinedeki ana bileşendir. Metakrilat kaplamalar ince bir kaplama oluşturmak için agregalarla birleştirilir (ACI 548.5R 2016). Polimer beton kaplamalar için metakrilat bağlayıcıların tipik özellikleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

Kaplama ile beton alt tabaka arasındaki bağı artırmak için metakrilat kaplamalarla birlikte metakrilat astarlar gereklidir. MMA’nın ıslak koşullara duyarlılığı nedeniyle, kaplama uygulanmadan önce beton yüzeyinin tamamen kuru olması gerekir.

**Tablo 2.** Polimer Kompozit Kaplamalar İçin Epoksi, Polyester ve Metakrilat Bağlayıcıların Tipik Özellikleri (ACI 548.5R 2016)

Özellik		Epoksi	Polyester	Metakrilat	Test Metodu
Viskozite		700 ila 2500 cps	100 ila 400 cps	40 ila 150 cps	ASTM D2556
Sertleşmemiş	Jelleşme zamanı	15 ila 45 dak.	15 ila 45 dak.	10 ila 30 dak.	ASTM C881
	Parlama noktası	minimum 93°C	minimum 38°C	minimum 8°C	ASTM D3278
	7 günlük çekme dayanımı	14 – 34,5 MPa	12 – 34,5 MPa	7 - 14 MPa	ASTM D638
Sertleşmiş	Çekme uzaması	%30 - %70	%30 - %70	%30 - %70	ASTM D638
	Elastisite modülü	900 MPa maksimum	900 MPa maksimum	520 MPa maksimum	ASTM D695

**Tablo 2.** (devamı)

	minimum 7 MPa (3 saatlik) 34,5 MPa (24 saatlik)	minimum 7 MPa (3 saatlik) 34,5 MPa (24 saatlik)	minimum 7 MPa (3 saatlik) 34,5 MPa (24 saatlik)	ASTM C579, Method B
Basınç dayanımı				
Aderans gücü	minimum 1,7 MPa	minimum 1,7 MPa	minimum 1,7 MPa	ASTM C1583
28 günde hızlı klorür geçirgenlik testi	maksimum 100 kulomb	maksimum 100 kulomb	maksimum 100 kulomb	AASHTO T277 / ASTM C1202

### **Pekiştirici (Dağılı) faz**

Takviyeli polimer kompozitlerde, matris mekanik yüklemeye maruz kalan ana elemandır ve partiküllerle doldurmanın temel amacı genellikle malzemenin elastisite modülünü arttırmaktır. Dolgu ayrıca termofiziksel özellikleri, elektriksel ve manyetik özellikleri iyileştirmek, sürtünme aşınmasını azaltmak ve malzemenin yanıcılığını azaltmak için de kullanılır (Tcherdyntsev 2021).

Orijinal formlarındaki polimer malzemeler, kullanımlarını önemli ölçüde sınırlayan düşük dayanım, sertlik ve düşük çalışma sıcaklığı gibi bir takım dezavantajlara sahiptir. Bu özellikleri geliştirmek için araştırmacılar, polimerleri çeşitli dolgu maddeleri ile güçlendirmeye ve bunlara dayalı kompozit malzemeler oluşturmaya çalışmaktadırlar. Başlangıçta dolgu maddelerinin temel amacı, polimer kompozitin maliyetini azaltmak olmasına rağmen günümüzde ise güçlendirilmiş polimer kompozitlerdeki dağılı faz; fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikler açısından önemli rol üstlenmektedir.

Yüksek mukavemetli kompozitler elde etmek için matristen dolguya yükün yüksek transferinin sağlanması gerekir. Bu yetenek, dolgu maddesinin polimer matrisine yapışma seviyesi ile belirlenir. Dolgunun polimere yapışması şu şekilde sağlanabilir (Tcherdyntsev 2021):

- kimyasal etkileşim şeklinde;
- dolgu ve matrisin mekanik yapışması şeklinde ve
- elektrostatik ve Van Der Waals kuvvetleri sayesinde.

Dolgu maddesinin ve matrisin mekanik yapışmasından kaynaklanan yapışma, dolgu yüzeyinin geometrisine ve polimerin özelliklerine (polimerin kimyasal yapısı, moleküler yapının düzenliliği, uyum özellikler ve polimer zincirlerinin dallanması vb. gibi) bağlıdır.

Ayrıca mekanik yapışma, malzemelerin termofiziksel özelliklerindeki farklılıktan etkilenir. Örneğin, kompozit malzemenin soğutulması sırasında, polimerin ve dolgu

maddesinin lineer termal genişleme katsayıları arasındaki fark, termal genişlemelerin oluşmasına yol açabilir. Dolgu maddesi ile polimer matris arasında kimyasal ve mekanik etkileşimlerin yokluğunda, dolguyu polimerden çekmek için gereken enerji, yapışmayı sağlayan elektrostatik ve Van Der Waals kuvvetlerinden oluşur (Tcherdyntsev 2021).

Genel bir sınıflandırma olarak, dolgu maddeleri inorganik veya organik maddeler olarak kimyasal sınıflara göre alt gruplara ayrılabilir (Tablo 3). Polimerler, inorganik veya organik takviye malzemeleri ile farklı konsantrasyonlarda karıştırılır. Uzun lifler veya şeritler durumunda, takviye fazı sürekli bir morfolojiye sahiptir. Bu, genellikle yüksek performanslı polimer kompozitler olarak sınıflandırılan fiber takviyeli termosetlerin durumudur. Kısa lifler (yani, uzunlukları < 3 cm), pullar, trombositler, küreler veya düzensiz şekiller gibi süreksiz dolgu maddeleri eklemek de mümkündür. Genel olarak, bu malzemeler düşük performanslı polimer kompozitler olarak sınıflandırılır (Pegoretti and Dorigato 2019).

Süreksiz dolgu maddeleri, polimer matrislerin mekanik özelliklerini iyileştirebilir. İnorganik takviye edici dolgu maddeleri genellikle matristen daha sert ve daha kırılğan olduğundan, özellikle parçacık/matris arayüzeyi yakınında matris gerilmesinde genel bir azalma beklenir. Sonuç olarak, mikro dolgular polimerin arayüzey bölgesinde, gerilimi azaltır ve sertliği artırır.

**Tablo 3.** Plastik Dolgu Maddelerinin Kimyasal Sınıfları (Pegoretti and Dorigato 2019)

<b>Kimyasal sınıflar</b>	<b>Örnek</b>
<b>İnorganikler</b>	
oksitler	Cam (lifler, küreler ve pullar), MgO, SiO <sub>2</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve ZnO
hidroksitler	Al(OH) <sub>3</sub> ve Mg(OH) <sub>2</sub>
tuzlar	CaCO <sub>3</sub> , BaSO <sub>4</sub> , CaSO <sub>4</sub> , fosfatlar ve hidrotalsit
silikatlar	Talk, mika, kaolin, volastonit, MMT, feldspat ve asbest
metaller	Bor ve çelik
<b>Organikler</b>	
Karbon, grafit	Karbon/grafit lifler ve pullar, CNTs ve CB
Doğal polimerler	Selüloz lifleri, odun unu ve lifleri, keten, pamuk, sisal ve Nişasta
sentetik polimerler	Poliamid, polyester, aramid ve polivinil alkol lifleri

Dolgu maddelerinin en çok kullanılanları aşağıda verilmiştir:

### ***Kalsiyum karbonat***

Kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), plastik takviye için en önemli dolgu maddelerinden biridir ve dünya çapında yıllık üretimi 10 milyon tonun üzerindedir. Doğal öğütülmüş kalsiyum karbonat (GCC) olarak bulunabilir veya sentetik olarak türetilebilir. GCC en yaygın olanıdır ve 0,5 ile 100  $\mu\text{m}$  arasında bir boyut aralığında mevcuttur. Ucuz üretim süreci ve düşük maliyeti sayesinde termoplastiklerde, termosetlerde ve elastomerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan, sentetik (çökeltilmiş) kalsiyum karbonat genellikle nanometrik boyutlara (100 nm'nin altında) sahiptir (Pegoretti and Dorigato 2019; Tcherdyntsev 2021).

### ***Metal oksitler***

Matrislerin mekanik stabilitesini geliştirmek için özel olarak tasarlanmış, metal oksit mikropartikülleri ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vb.) ile doldurulmuş polimer kompozitler üzerinde çeşitli çalışma örnekleri bulunmaktadır.

Metal oksit mikropartikülleri arasında silika ( $\text{SiO}_2$ ) muhtemelen en önemlisidir. Kristal silika, hemen hemen tüm maden yataklarında bulunabileceği için yeryüzündeki en yaygın mineraldir. 20'den fazla kristal silika faz arasında, polimer kompozit uygulamaları için en önemlileri kuvars, novasit ve kristobalittir. Silika mikropartiküllerin üretimi temel olarak özütleme, ezme, büyük safsızlıkların uzaklaştırılması, kurutma, öğütme ve sınıflandırma yoluyla gerçekleştirilir (Pegoretti and Dorigato 2019; Tcherdyntsev 2021).

### ***Cam boncuklar***

Cam boncuklar (veya mikro küreler) hem termoplastik hem de termoset matrislerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yoğunlukları 0,1 ile 2,5  $\text{g/cm}^3$  arasında değişen katı halde içi boş veya dolu olabilirler. Cam boncukların en-boy oranının bire yakın olduğu düşünüldüğünde, yerleştirildikleri polimer matrisin mekanik özellikleri üzerinde sadece sınırlı bir etki sağlayabilirler. Bununla birlikte, cam mikro kürelerin eklenmesi, polimer matrislerin işlenebilirliğini ve boyutsal stabilitesini güçlü bir şekilde iyileştirebilir. Ayrıca, içi boş küreler kullanılırsa, kompozitin yoğunluğunda da dikkate değer bir azalma elde edilebilir. Cam boncuk ilavesinin polimerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, büyük ölçüde partikül boyutuna, hacim oranına ve yüzey işlemine bağlı olmakla birlikte olumlu etkilenen mekanik özellikleri genellikle elastisite modülü, basınç dayanımı ve bazı durumlarda çekme dayanımıdır. Genel olarak kopma uzaması ve darbe dayanımlarının düşmesine sebep olur (Pegoretti and Dorigato 2019; Tcherdyntsev 2021).

## **Polimer kompozitlerin karıştırma yöntemleri**

Düşük kaliteli polimer kaplamalar çoğu zaman yanlış karıştırma yöntemlerinin yani bağlayıcı bileşenlerin ve dağılı fazın yetersiz karıştırılması sonucu oluşmaktadır. Bağlayıcı bileşenlerinin üretici tarafından araştırmalarla belirtilen oranlarda karıştırılması önemlidir. Bileşenler karıştırıldıktan sonra, polimer kompozitte sertleşene kadar devam eden bir kimyasal reaksiyon başlar. Karışım oranlarındaki herhangi bir değişiklik ve bileşenlerin homojen karıştırılmaması; dayanımı düşük, kürlenmemiş bir kaplama ile sonuçlanabilir. Eğer önceden karıştırılmış (hazır) kaplama yerleştirme yöntemi kullanılacaksa, dağılı faz, hazır polimer bağlayıcıya eklenmelidir. Polimer kompozit bileşenleri, geleneksel bir beton veya harç karıştırıcıda toplu olarak karıştırılabilir. Ancak, bileşenleri otomatik olarak oranlayan, karıştıran ve dağıtan bir makine kullanımı ile daha iyi bir kalite kontrolü mümkün olabilmektedir (Smith 1991).

## **Yüzey hazırlama işlemleri**

Polimer kompozitlerin performansını etkileyen bir diğer parametre de yüzey hazırlama işlemleridir. Polimer kompozitler, normalde beton alt tabakaya güçlü bir aderansla bağlanabilmektedir. Ancak bu aderans, yüzey kirleticileri veya kusurlu beton tarafından zayıflayabilir. Bunun önlenmesi için kaplama uygulanmadan önce boya, sıva, yağ, lastik izleri ve katran gibi yüzey kirletici maddelerin temizlenmesi gerekir. Ayrıca, tahribatsız test yöntemleri kullanılarak alt tabakada oluşmuş olabilecek herhangi bir delaminasyon veya diğer sorun yaratabilecek durumlar kontrol edilmelidir. Bu alanlar düzeltilmeli ve uygun yama malzemeleri ile onarılmalıdır. Herhangi bir donatı çubuğu aşınmış veya hasar görmüşse, bunlar da onarılmalı veya değiştirilmelidir.

Tabliye yüzeyi aderansı artırmak için pürüzlendirilmelidir. Bunu yapmanın en etkili yöntemlerinden biri, vakum ünitesi olan bir kumlama makinesi kullanmaktır. Kumlama makineleri, kalıntı bırakmadan yüzeyi derinlemesine ve hızlı bir şekilde pürüzlendirir. Kum püskürtme de etkili bir yöntem olabilir, ancak toz üretir ve üst katmanın yeterince bağlanmasını engelleyebilecek kum kalıntısı bırakabilir. Kaplama uygulanmadan önce, bir süpürge, rulo, silecek veya püskürtme ekipmanı kullanarak hazırlanan tabliye yüzeyine astar uygulanmalıdır. Astar, bağlayıcı görevi görerek kaplama-beton aderansını kuvvetlendirir. Polimer kompozit kaplama uygulamaları için özel üretilmiş astarlar da mevcuttur (Smith 1991).

## **Yerleştirme yöntemleri**

Polimer kaplamaları uygulamak için genellikle iki yöntem kullanılır (Smith 1991):

### ***Önceden karıştırma veya bulamaç yöntemi***

Bu yöntemde, bağlayıcı bileşenler ve agrega önceden karıştırılır. Karışım bir mala, perdah malası veya titreşimli beton mastarı kullanılarak; sıkıştırma, yüzey profili ve bitirme gerekliliklerini karşılamak için astarlanmış tabliye yüzeyine uygulanır. Belirtilen minimum uygulama kalınlığını oluşturmak için şap düzleştiricileri kullanılır. Polimer kompozit, Portland çimento betonundan farklı reolojik özelliklere sahip olduğundan, polimer kompozitlerin daha iyi işlenmesi için yüzey düzeltme işlemi sonu ekipmanlarının değiştirilmesi gerekebilir. Polimer kompoziti yerleştirmek için tasarlanmış mekanik şap araçları mevcuttur. Kaplama yerleştirildikten hemen sonra hiçbir ıslak nokta görünmeyene kadar ilave agrega yayılır. Agregaya ıslak bağlayıcıya yapışarak kaymayan bir yüzey oluşturur. Kaplama kuruduktan sonra bağlanmamış agrega süpürülür.

### ***Build up metodu***

Önceden karıştırılmış ve katman haline getirilmiş yöntemin aksine, bu uygulamada kaplamanın ardışık katmanlara yerleştirilmesi ve ardından her katmanın bir sonraki katman uygulamasından önce sertleşmesine izin verilmesini içerir. Ayrıca, agreganın reçine bağlayıcı ile önceden karıştırılmayıp bunun yerine, bağlayıcı, hazırlanan tabliye yüzeyine rulo, süpürge veya püskürtme ekipmanı ile uygulanır, daha sonra bağlayıcı faz jelleşmeye başlamadan önce agrega, ıslak bağlayıcı üzerine yayılır.

Bağlayıcı fazı karıştırmak için kürekli bir karıştırıcı kullanılır veya elle karıştırma yapılır. Bu seçeneklerin yanısıra, bağlayıcı bileşenlerini otomatik olarak oranlayan, karıştıran ve püskürterek uygulayan ekipmanlar da mevcuttur. Bağlayıcı uygulandıktan sonra, bir kürek veya mekanik yayıcı kullanılarak agrega hızlıca yayılır. Yayma işlemi sırasında, ıslak bağlayıcıya basmaktan kaçınılmalıdır. Agreganın çok fazla olması gözenekli bir kaplama elde edilmesine, çok az olması ise çok reçineli düz ve kaygan alanlar elde edilmesine sebep olur. Reçine sertleştikten sonra fazla agrega temizlenir.

İlk kaplama katmanının tamamen kuruması beklenir, ardından ikinci ve üçüncü kaplama katmanları aynı uygulama süreci tekrarlanarak yerleştirilir. Toplam kaplama kalınlığı minimum 10mm olmalıdır. Minimum kalınlığa ulaşmak için gerekirse başka bir katman uygulanabilir. Bu yerleştirme yöntemlerinin her ikisi de, düzgün bir şekilde yürütüldüğünde, iyi performanslı kaplamalarla sonuçlanır.

Yerleştirme yöntemi seçiminden önce üretim esnasında ortamda su, nem bulunması durumunda, yağmur vb. gibi, polimer kompozit uygulamalarından kaçınılmalıdır. Polimer

reçineler suya duyarlı olduğundan kaplama, sertleşme zamanı gelmeden ıslanırsa, tam mukavemete ulaşamayabilir.

Yerleştirme yöntemi seçiminde göz önünde bulundurulması gereken birincil faktörler, kaplanacak tabliye yüzeyinin boyutu ve durumu ile maruz kaldığı trafik yoğunluğudur. Yüzeyleri çok aşınmamış veya çok trafik almayan küçük köprü tabliyeleri için, build up yöntemi genellikle daha ekonomiktir. Bu yöntem daha fazla zaman alır ancak daha az ekipman gerektirir. Düz olmayan veya aşınmış tabliye yüzeylerinde veya betonun çöküntüler halinde aşındığı beton dolgulu çelik ızgara platformlarında önceden karıştırılmış polimer kompozit kullanılır. Polimer kompozit düz bir yüzey profili oluşturacak ve çöküntüleri dolduracaktır. Önceden karıştırılmış yöntem aynı zamanda, kaplamanın tek geçişte yerleştirilmesine izin verdiği için büyük kurulumlar veya yoğun trafik alan yüzeyler için en iyi seçimdir. Bu, birden çok katman kurma ihtiyacını ortadan kaldırarak kesinti süresini en aza indirir.

### **Kür**

Polimer kaplamalar, geleneksel Portland çimento beton kaplamalarından çok daha hızlı kürlenir. Ancak, kaplama trafiğe açılmadan önce polimerin yeterince kürlenmesine izin verilmezse hasar meydana gelebilir. Kürlenme süresi, sıcaklık koşullarına ve kullanılan polimer türüne bağlı olarak değişir. Genel olarak, ortam sıcaklığı ne kadar yüksekse, kürlenme süresi o kadar kısadır. Örneğin, 37°C’de, kaplama 1 ila 3 saat 24°C’de 2 ila 6 saat içinde trafiğe açılabilir. Uygulamada en önemli husus kaplamanın hazır olduğunun doğrulanmasıdır, bu yöntem çok basit olmakla beraber kaplamanın üzeri bir aşındırıcı ile kontrol edilerek kaplamada iz olmaması durumunda muhtemelen trafiğe hazır kabul edilmektedir (Smith 1991).

### **Beton Onarımında Aderansın Önemi**

Paylaşılan yüzey alanı ile temas halinde olan iki malzeme arasında ayrılmaya karşı direnç oluşur bu kuvvet, her atomun bir diğerine birleşme derecesi olarak tanımlanır. Diğer taraftan, aderans kuvveti birbirine eklenmiş yüzeyler arası gerçekleşen ve yapışkan malzemeyi bağlandığı alt katmandan ayırmak için gereken gerilme cinsinden ölçülen bağlılık miktarıyla tanımlanmaktadır. Beton yapının onarılmasından ve yeni bir katmanın yerleştirilmesinden sonra, alt katmanın hasarlı kısmı zaten kaldırıldığı ve işin gereksinimlerine göre yeni katman tasarlanıp yerleştirildiği için her iki katmanda da yeterli dayanım olmalıdır. Her iki katman da yeterli dayanıma sahip olmasına rağmen, arayüz hala hasarlara karşı savunmasızdır ve sistemin en zayıf halkası ve hassas parçasıdır.

Her iki katmanın farklı esneklik katsayıları vardır, bu nedenle aynı yüke maruz kalan her bir katman farklı gerilmeler gösterdiğinden arayüz bu farka dayanabilmelidir. Sıcaklık

gerilmeleri için de aynı problem mevcuttur. Arayüz, sistemdeki süreksizlik düzlemi olduğu için tüm bu ekstra kuvvetlere maruz kalır ve katmanların bütünlüğünü korumaya yetecek dirence sahip olması gerekir. Bu nedenle, bir onarım malzemesinden beklenen en temel özellik, ara yüze en iyi şekilde bağlanmasıdır. Aderans test etmek kaplama malzemesinin seçiminde çok önemlidir. Aderans gücünü ve kalitesini anlamak için birçok test yöntemi vardır. Bu yöntemlerin detaylıca irdelenmesi gerekmektedir (Bakhsh 2010).

## **Aderans Ölçüm Yöntemleri**

### **Genel yöntemler**

İyi aderans özelliği beton kaplamalarda monolitik hareket sağlamak için anahtar faktördür. Arayüz aderans testlerinin sonuçları ve yorumlanması büyük ölçüde kullanılan test yöntemine bağlıdır. Yaygın aderans test yöntemleri; arayüz kesme, burma ve çekme testlerini içermektedir. Farklı test yöntemleriyle elde edilen arayüz kesme dayanımı değerleri test sonuçları; numune boyutuna, test kurulumuna, yükleme hızı gibi faktörlere bağlı olduğundan önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Araştırmacılar, onarılan beton ara yüzeylerinde aderans dayanımı kavramını genelleştirmek için farklı arayüz testlerini kırılma kriteri ile ilişkilendirmeye çalışmışlardır (Espeche and León 2011).

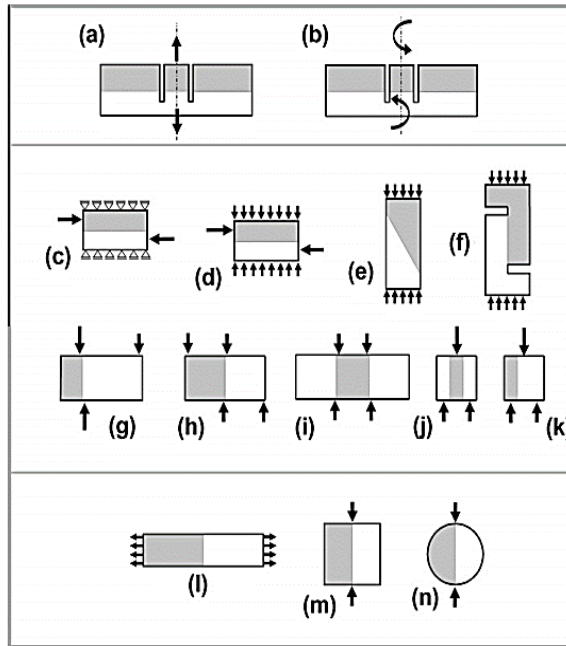
Aderans dayanımı testleri, ara yüzey gerilmelerini üretmek için kullanılan yöntemlere göre de sınıflandırılabilir. Çekme, saf kesme, kesme ve basınç temelli testler olmak üzere üç temel test sistemi vardır. Şekil 3'te görülebileceği gibi birinci grup çekme-kopma testini (a), doğrudan çekme testini (l) ve yarmada çekme testini (m, n) içerir. İkinci grup daha çok olup burulma aderans testini (b), doğrudan kesme testini (c), modifiye edilmiş dikey kesme aderans testini veya kompakt kesme testini (f), itme testi veya itme küpü (j), çift yüzeyli kesme testi (k) ve giyotin testi (g, h, i) gibi testleri içerir. Üçüncü grup testler, eğimli kesme testi (e) ve kesme-basınç testinden (d) oluşur. Burada saf kesme testleri olarak belirtilen birçok testteki (Şekil 3'te ikinci grup) koşulların teorik olarak saf bir kesme durumu üretmekten uzak olduğunu belirtmekte fayda vardır. Çünkü, bu tür kesme testleri eğilme momenti kuvvetlerine neden olabileceği için doğrusal elastik sınırlı element modelleri ile değerlendirildiğinde, ana gerilme eğrilerinde bu değerler görülebilmektedir (Espeche and León 2011).

Emmons 1992, eğimli kesme testi veya doğrudan kesme yöntemi ile elde edilen aderans dayanımı değerlerinin genellikle doğrudan çekme sonuçlarından daha yüksek olduğunu belirtmektedir. Deneysel ara yüz testlerine dayanarak, eğimli kesme testi ve çekme testi sonuçları arasında doğrusal bir korelasyon sunulmuştur. Ara yüzey kesme gerilmeleri ölçümünde burulma testleri için geliştirilmiş bir aparat kullanan Silfwerbrand, 2003, ortalama

kesme gerilmesi ile çekme gerilmesi arasındaki oranın 1,9 ile 3,1 arasında değiştiğini ve püskürtme betonda bu oranın 2 ile 7 arasında değiştiğini göstermiştir.

Momayez *et al.* 2005, 13 grup numune üzerinde çekme, ayırma prizmaları, çift yüzeyli kesme (doğrudan kesme) ve eğimli kesme testleri gerçekleştirmiştir. Ölçülen aderans dayanımının büyük ölçüde kullanılan test yöntemine bağlı olduğu ve iki farklı testle elde edilen aderans dayanımı oranlarının 8 kat kadar farklılık gösterebileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, test yöntemleri arasında sırayla eğimli kesme, çift yüzeyli kesme (saf kesme), yarma ve çekme testlerindeki aderans dayanımının azalmakta olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bu yöntemlerden “eğimli kesme testi” ve “yarmada çekme testi”nin kullanımı diğerlerine göre daha yaygındır. Bu testlerin daha çok kabul görmesi; test sistemlerinin kurulumunun ve uygulamasının kolay olması, sonuçların güvenilirliği ve daha sorunsuz elde edilebilmesinden dolayıdır. İki yöntemin önemi dikkate alınarak “eğimli kesim testi” ve “yarmada çekme testi” yöntemleri daha ayrıntılı olarak irdelenmiştir.



Şekil 3. Farklı aderans dayanımı testlerinin şematik gösterimi (Espeche and León 2011)

Tablo 4. Aderans Testi Türleri

Sembol	Test Adı
a	Çekme-kopma testi
b	Burulma aderans testi
c	Doğrudan kesme testi
d	Kesme-basınç testi
e	Eğimli kesme testi
f	Modifiye edilmiş dikey kesme testi veya kompakt kesme testi

**Tablo 4.** (devamı)

g	Giyotin testi
h	Giyotin testi
ı	Giyotin testi
j	ıtme testi veya ıtme küpü testi
k	çift yüzeyli kesme testi
l	Doğrudan ekme testi
m	Yarmada ekme testi
n	Yarmada ekme testi

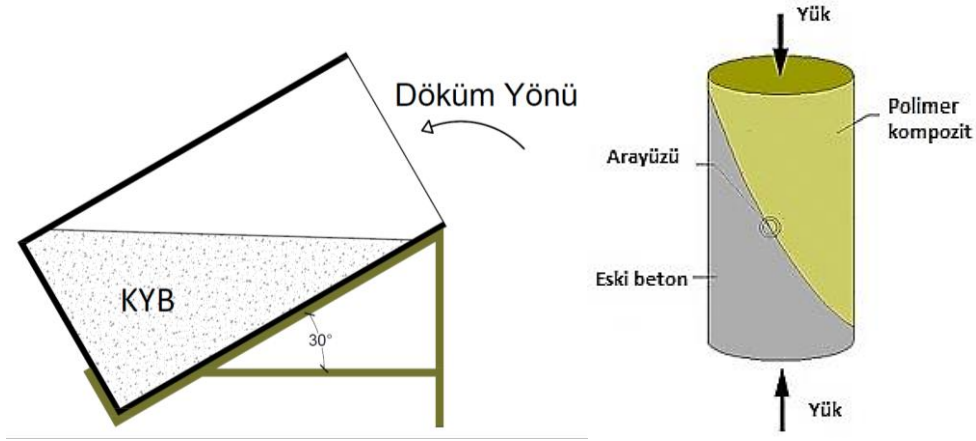
### Eğimli kesme testi

Eğimli Kesme Testi, ara yüzeyde basınç ve kesme gerilmelerinin olduğu karma bir aderans testi türüdür. Bu test, onarım malzemelerinin test edilmesi için İngiliz Standardı BS 6319 1990'da detaylı olarak açıklanmıştır. ASTM C882 / C882M 2020, aynı test yöntemi ile aderans ölçümü prosedürünü de içermektedir.

Pek çok çalışma, alt katman ve kaplama arasındaki aderans dayanımını araştırmak için eğimli kesme testini kullanmıştır (Jlio *et al.* 2006; Tayeh *et al.* 2013; Zanotti *et al.* 2014; Mohammadi *et al.* 2014; Mirmoghtadaei *et al.* 2015; Alanazi *et al.* 2016; Ceia *et al.* 2016; Diab *et al.* 2017; Douba *et al.* 2019; Yeon *et al.* 2019). Test, ortak basınç dayanımı testi fikrine dayanmaktadır. Basınç testlerinde, eğim düzlemindeki kesme çatlaklarından dolayı beton kırılması meydana gelebilir. Yatay yöndeki kırılma düzleminin açısı teorik olarak 50° ile 70° arasındadır, bu nedenle 60° uygun bir aı olarak seçilebilir. Bu nedenle, bu test yönteminde arayüz aynı açıyla eğimli olacak şekilde yerleştirilir ve sisteme basınç kuvveti uygulanır (Momayez *et al.* 2005).

Eğimli kesme testinde, sertleştirilmiş alt tabakanın alt yarı bölümü yataydan 60°'de çapraz olarak dökülür. Alt parça (eski malzeme) tam dayanım kazandıktan sonra, üst parça (yeni malzeme) tam bir silindir oluşturacak şekilde üzerine dökülür. Silindir, kırılana kadar yüklemeye tabi tutulur (Momayez *et al.* 2005). Kırılma düzlemindeki kesme gerilmesi (Denk. 2.1) kullanılarak hesaplanır. şekil 4, eğimli kesme testi için numune hazırlama ve yükleme yönünü göstermektedir.

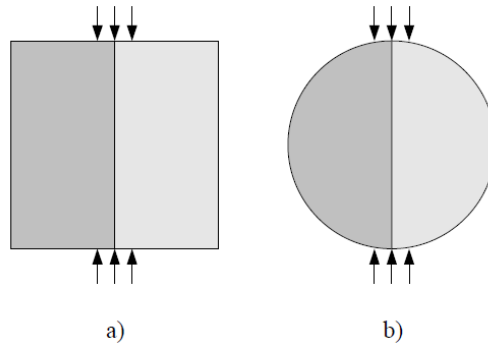
$$\text{Aderans Dayanımı} = [\text{Maksimum Yük}] / [\text{Eğimli yüzey alanı}] \quad (1)$$



Şekil 4. Eğimli kesme testi

#### Yarmada çekme testi

Yarmada çekme testi, Şekil 5, iki malzeme arasındaki aderans dayanımını ölçmek için kullanılır. Yarmada çekme testi, dolaylı çekme testlerinden biridir. Standart bir test olarak ASTM C496 2017 tarafından benimsenmiştir. (Tayeh *et al.* 2013; Hussin *et al.* 2015; Alanazi *et al.* 2016), alt tabaka ve kaplama arasındaki aderans dayanımını incelemek için yarmada çekme testini kullanmıştır.



Şekil 5. Yarmada çekme testi: a) kübik numune; b) silindirik numune

Bu testte, kompozit numune, arayüze paralel bir yönde iki karşıt basınç kuvveti uygulanarak test edilir. Poisson etkisi nedeniyle, arayüzeyde gerilime bağlı kırılma oluşmaktadır.

Bazı referanslar bu kategoriyi bir "Çekme Testi" türü olarak kabul ederler. Çünkü kırılma çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. Normal çekme testine kıyasla bu yöntemi kullanmanın avantajlarından biri, numune geometrisinin çok basit olması ve testin hazırlanmasının kolay olmasıdır. Yarmada çekme dayanımı denklem (2) ile hesaplanır:

$$\sigma = 2P / \pi A \quad (2)$$

$\sigma$  = yarmada çekme dayanımı, MPa;

$P$  = uygulanan yük, kN;

ve  $A$  = aderans düzlemi alanı,  $\text{mm}^2$ .

Bağ kırılma zarfı, yarmada çekme sonuçlarıyla birleştirilen eğimli kesme testi sonuçları ile beraber kullanılarak elde edilebilir. Bu testlerin kombinasyonu, Mohr-Coulomb konsepti kullanılarak da tahmin edilebilir. Bu kavram daha önce (Santos *et al.* 2007; Hussin *et al.* 2015) tarafından tanıtılmıştır. Mohr-Coulomb konseptini kullanmak, kesme-normal gerilme etkileşim diyagramları çizilmesine ve yapışma kuvveti ( $C$ ) değerinin yanı sıra iç sürtünme açılarının ( $\phi$ ) elde edilmesine yardımcı olur.

## Literatür Özeti

### Polimer matris özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar

Gürü *et al.* 2007, polyester matrisli kompozit malzeme üretmek için çeşitli miktarlarda uçucu kül, mermer tozu ve baz malzeme olarak polyester, sertleştirici olarak metil etil keton peroksit ve hızlandırıcı olarak kobalt naftanatlar kullanmışlardır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemek için üç nokta eğilme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Sertleştirici, hızlandırıcı ve polyester miktarları sabit tutulmuş ve sadece uçucu kül/mermer tozu oranı değiştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, uçucu kül/mermer tozu oranı 1/3'e kadar artarken, kompozit malzemelerin mukavemet ve sertliğinin arttığını göstermiştir.

Raja and Kumaravel 2015, silis dumanı partikülleri ile güçlendirilmiş Naylon 66'nın özelliklerini araştırmışlardır. Ağırlıkça %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında silis dumanı kullanılarak gruplar üretilmiştir. Isıl bozulma sıcaklığı (HDT), çekme, eğilmede çekme, basınç ve darbe dayanımı testleri yapılmıştır. Test sonuçları, Naylon 66-silis dumanı içeren kompozitlerin gelişmiş mekanik ve HDT özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak Naylon 66 içeren grupların iyi fiziksel yapışma homojen dağılımını doğrulamıştır.

Sikora *et al.* 2015, n-SiO<sub>2</sub>'nin çapının (100 nm ve 250 nm) ve miktarının (çimento ağırlığının %1, 3, 5'i) polimer-çimento harçlarının kıvamı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, n-SiO<sub>2</sub> ilavesinin puzolanik reaksiyonu hızlandırmak için büyük bir potansiyele sahip olduğunu, böylece CH ile daha fazla reaksiyona girdiğini C-S-H dönüşümünü arttırdığını ve polimer-çimento harçlarının mekanik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. N-SiO<sub>2</sub> partiküllerinin yüksek su talebi kıvamı olumsuz etkilemekte n-SiO<sub>2</sub>'nin daha ince parçacıkları daha etkili görünmektedir ve taze harçların kıvamında daha az soruna neden olmaktadır.

Kaştan and Okan 2016, polimer malzemelere ilave edilen nano katkıların çekme mukavemetine olan etkisi üzerinde yapılan çalışmaları özetlemiştir. Yapılan incelemeler

sonucunda nano katkıların polimerlerin çekme mukavemetini doğrudan etkilediğini görmüşlerdir. Çekme mukavemeti için optimum oran genellikle %2-5 aralığı olarak bulunmuştur.

Barbuta *et al.* 2017, epoksi polimer beton elde etmek için mermer atıklarını kullanmışlardır. Bu tür atıkların polimer betonunun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İlave olarak mermer tozunun farklı oranlarda (%12,8, 13, 16, 16,2) kullanımı ve mermer atıklarının agrega olarak kullanılması şeklinde iki tip beton hazırlamışlardır. Mekanik özellikleri (basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı) deneysel olarak belirlemişler ve epoksi polimer betonunun özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Mermerin agrega olarak kullanıldığında daha yüksek mekanik özellik değerlerini verdiğini ortaya çıkarmışlardır. Epoksi polimer betona ilave olarak mermerin dozajı ve inceliğinin, mekanik özelliklerin değerlerini etkilediğini belirlemişlerdir.

Mansour *et al.* 2017, atık mermer ve alfa lifleri içeren polimer betonun performansını incelemiştir. Bağlayıcı olarak ortoftalik polyester kullanılmıştır. Mermer tozu %3, 5, 10, 20, 30 oranlarında ilave edilmiş ve mekanik özellikleri tespit etmek için üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Eğilme testi sonuçları, %20 mermer içeren betonun diğer gruplara göre daha güçlü ve rijit olduğunu göstermiştir.

Fallah and Nematzadeh 2017, farklı miktarlarda polipropilen (PP) ve makropolimerik (MP) liflerin, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> içeren yüksek dayanımlı betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Toplamda, basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, su emme ve gözeneklilik parametrelerinin değerlendirmek için 28 farklı test grubu üretilmiştir. Beton karışım tasarımında ağırlıkça kullanılma yüzdesi 1, 2 ve 3 olan n-SiO<sub>2</sub> ve 8, 10 ve 12 olan silika dumanı kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları, n-SiO<sub>2</sub> ve silis dumanının eklenmesinin ardından betonun mekanik özelliklerinde ve dayanıklılığında bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

Çınar and Kar 2018, PET (polietilen tereftalat) şişeler ve mermer tozu kullanarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Bu kompozit malzemenin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerine etkisi incelenmiştir. PET/Mermer tozundan elde edilen kompozitler, atık PET malzemedenden daha iyi özellikler göstermiştir.

Sharma and Patnaik 2018, atık mermer tozunun elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için ağırlıkça %0 ila %30 arasında değişen dolgu içeriğine sahip kompozitleri, vakum destekli reçine transfer kalıplama kullanılarak hazırlamışlardır. Dolgu malzemesinin karma kompozitlerin boşluk içeriği, çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) ve ısı iletkenliği

üzerindeki etkileri optimal koşullar altında deneysel olarak analiz edilmiştir. Ağırlıkça %30'a kadar mermer tozu ilavesi eğilmede çekme dayanımını, ILSS'yi ve termal iletkenliği arttırdığı ancak çekme dayanımını azalttığı görülmüştür.

Awad and Abdellatif 2019, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) matrisinde takviye olarak mermer tozu parçacıkları kullanarak yeni bir kompozit malzeme elde etmişlerdir. Mermer tozu partiküllerinin farklı ağırlık yüzdelerinin (%10-50) mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi araştırılmıştır. Öte yandan, mermer tozu parçacıklarının morfolojisini ve elementel bileşimini incelemek için enerji dağılımlı X-ışını spektrometrisi (SEM-EDS) ile taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. LDPE matrisine mermer tozu partiküllerinin eklenmesiyle LDPE kompozitlerinin mekanik ve termal özelliklerinin (eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve sertlik gibi) iyileştirildiği tespit edilmiştir.

Awad *et al.* 2019, polipropilen (PP) matriste takviye malzemeleri olarak mermer tozu parçacıklarının kullanılabilme kabiliyetini araştırmışlardır. Farklı parçacık boyutlarının (35-1350 µm) ve mermer tozu parçacıklarının (ağırlıkça %10-70) termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, toz partiküllerinin termal gravimetrik analizi (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) çalışılmıştır. Toz parçacıklarının PP matrisine eklenmesiyle kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinin (eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı, elastisite modülü ve sertlik gibi) iyileştirildiği tespit edilmiştir. PP matrisine mermer tozu ilavesinin eğilmede çekme dayanımını ağırlıkça %40'a kadar arttırdığı bulunmuştur. Bu oranın üzerinde toz partiküllerinin yığılması ve eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Choudhary *et al.* 2019, epoksi reçine kompozit malzemelerle mermer tozu ağırlıkça %0, 10, 20, 30 dolgulu cam elyafı imal etmek için vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) tekniğini benimsemiştir. Çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, tabakalar arası kesme dayanımı (ILSS) ve kırılma tokluğu gibi bazı mekanik özellikler incelenmiştir. Çekme modülü, ağırlıkça %20 mermer tozu içeren grupta %10 ve %30 içeren gruplara göre daha fazla artış göstermiştir. Eğilmede çekme dayanımı ve eğilme modülü, kompozitte ağırlıkça %20'ye kadar mermer tozunun dahil edilmesiyle gelişme gösterirken, tabakalar arası kesme mukavemetinde (ILSS) ağırlıkça %30'a kadar gelişme göstermiştir.

Ince *et al.* 2020, mermer tozu ince agrega olarak ile üretilmiş çimento ve silis dumanı bağlayıcı içeren numuneleri incelemişlerdir. Basınç dayanımı, su penetrasyon derinliği, gözeneklilik, sülfat saldırısına direnç ve donma/çözülme döngüsüne karşı direnç gibi önemli fiziksel özellikler 1 yıllık bir süre boyunca değerlendirilmiştir. Çimento hidrasyonu ve puzolanik reaksiyona atfedilen mikroyapısal gelişme, taramalı elektron mikroskobu

kullanılarak 28 gün ve 1 yılda görüntülenmiştir. Mermer tozunun eklenmesi, uzun vadede betonun tuz kristalleşmesini ve donma ve çözülme direncini büyük ölçüde iyileştirmiş ve basınç dayanımında sadece küçük bir azalma gözlemlenmiştir.

Shukla *et al.* 2020, %0, 5, 10, 15 ve 20 mermer tozu ve %0,5, 1, 1,5 oranlarında çelik tel içeren C16/20 sınıfı beton üretmiştir. Basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları 7 ve 28 günlük test edilmiştir. Çalışma, normal betona ve diğer oranlara göre en yüksek mekanik dayanımı sergileyen %1 çelik lif ve %15 mermer tozunun çimento ile değiştirilmesini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu oranının ötesinde, dayanımda büyük ölçüde azalma olmuştur.

Öztürk *et al.* 2020, çift yönlü E-cam elyafı bazlı epoksi reçine kompozitlerinin erozyonlu aşınma davranışı üzerine silis dumanı ve çinko oksit dolgu maddelerinin etkisini araştırmışlardır. Kompozitlerdeki silis dumanı ve çinko oksit dolgu maddelerinin miktarı, ağırlıkça %0 ile 16 aralığında değiştirilmiştir. İki tip dolgu maddesi karşılaştırıldığında, silis dumanı ile doldurulmuş kompozitler, çinko oksit dolgu kompozitlerden daha iyi erozyon direnci göstermiştir. Ağırlıkça %16 silis dumanı ile doldurulmuş kompozit en iyi erozyon direncini sunarken, en yüksek erozyon oranı ağırlıkça %16 çinko oksit ile doldurulmuş kompozitte elde edilmiştir.

Bu çalışmalardan, polimerin mermer tozu, n-SiO<sub>2</sub>, nano alümina gibi bir filler maddesi içeren halinin içermeyene göre daha yüksek dayanım ve sertlik değerlerine sahip olacağı tahmine edilmekte ve özellikleri en iyileyen oranların belirlenmesine ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

### **Polimer kaplamalı beton çalışmaları**

Hussin *et al.* 2015, normal beton (NC) ve polimer beton (PC) alt tabakası arasındaki bağlanma mukavemetini değerlendirmek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Öğütülmüş palmye yağı yakıt külünün (GPOFA), aderans dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak için polimer betona PC-GPOFA mikro dolgu maddesi olarak dahil edilmiştir. Karşılaştırma için, örneğin kalsiyum karbonat (PC CaCO<sub>3</sub>), silis kumu (PC Kumu) ve öğütülmemiş POFA (PC UPOFA) dolgusu gibi diğer PC içeren dolgu maddeleri hazırlanmıştır. İki tabaka arasındaki aderansı araştırmak için basınç altında eğimli kesme ve yarmada çekme testleri yapılmıştır. Kritik durum yüzeyi (pürüzsüz yüzey) hazırlandıktan sonra aderansı mohr-coulomb teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, GPOFA içeren polimer kompozitlerinin normal betona aderansı iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, polimer betonun normal betona kendiliğinden aderans özelliği mohr-coulomb analizinde kolayca tanımlanabilir.

Özel and Baydar 2016, çalışmalarında beton yüzeyi ile polimerin aderans özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla C30/37 sınıfı beton gruplarında, eğilme ve yarmada çekme deneylerini uygulamışlardır. Böylece elde edilen numunelerin kırılma yüzeylerinde yüzey pürüzlülüklerini belirlemişlerdir. Her bir parçayı polimer beton ile kaplamış, tekrar eğilme ve yarmada çekme deneyine tabii tutmuşlardır. Polimer beton üretiminde, matris olarak iki farklı reçine türü (polyester ve vinilester), faz malzeme olarak ise standart CEN kumu (%0 - 50 ve 100 oranlarında) kullanmışlardır. Polimer betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde faz malzemesinin türü kadar matris/faz malzemesi oranının da etkili olduğu, aderans özelliklerinde ise polimer beton bileşenlerinin yüzey karakteristiğinden daha fazla etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

López-Carreño *et al.* 2017, Normal Beton (NC) ve Asfalt Betonu (AC) alt katmanları ile Kendiliğinden Yerleşen Yüksek Performanslı Beton (SCHPC) kaplamalar arasındaki bağ gücünü incelemişlerdir. Toplamda, 8 arayüz doğrudan çekme, saf kesme ve basınç eğimli kesme testleri altında test edilmiştir. Sonuçlar, SCHPC kaplamasının NC ve AC alt tabakaları üzerine doğrudan dökülmesinin, analiz edilen diğer işlemlere benzer veya daha yüksek mukavemetler oluşturduklarını göstermiştir.

Douba *et al.* 2017b, polimer betonun çelik yüzeyle aderans dayanımı üzerinde nanopartiküllerin önemini incelemişlerdir. Polimer betonun bir çelik alt tabakaya aderansının nasıl etkilendiğini incelemek için çok duvarlı karbonlu nano tüpler (MWCNT), alüminyum nanoparçacıklar (ANP) ve silika nanoparçacıkları (SNP) içeren polimer epoksi malzemesinin kullanarak aderans kuvvetini belirlemek için eğimli kesme testlerini (slant shear test) tercih etmişlerdir. Sonuçta, nanomalzemelerin polimer betonun çelik alt tabakaya aderansını arttırdığı görülmüştür.

Haber *et al.* 2018, köprü güvertesi beton alt katmanları üzerinde kaplama olarak UHPC sınıfı malzemelerin aderans davranışını ve performansını incelemişlerdir. Çalışma, laboratuvar testleri, saha testleri ve mikroyapısal analizlerden oluşmaktadır. Laboratuvar testleri ile farklı alt tabaka yüzey hazırlıkları, UHPC ve alt tabaka betonu arasındaki doğrudan çekme aderans kuvvetini incelemiştir. Yüzey pürüzlülüğünün bileşik eylem ve yatay kayma transferi için kritik olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, yüzey pürüzlendirmesi şiddetle tavsiye edilmiştir.

Abo Sabah *et al.* 2019, onarım malzemesi olarak yeni Green Universiti Sains Malaysia Takviyeli Beton (GUSMRC) ile mevcut normal beton alt tabaka (NC) arasındaki arayüzey aderans gücünü iki yüzey işleme yöntemi (kanal açma ve kumlama metodları) kullanarak araştırmışlardır. Aderans dayanımı, 7, 28 ve 90. günlerde basınç altında eğimli kesme, yarmada çekme ve çekme testleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, NC/GUSMRC kompozitinin aderans

mukavemetinin, özellikle kumlama yüzey işlemi ile son derece yüksek olduğunu göstermiştir. Basınç altında eğimli kesme testinde, kumlama yüzey işlemine sahip numuneler, kanal açma yüzey işlemine sahip olanlardan yaklaşık 1,5 kat daha yüksek eğimli kesme mukavemeti göstermiştir.

Sadromtazi and Khoshkbijari 2019, tarafından iki farklı modifiye polimer (Stiren Bütadien Reçine (SBR) esaslı ve Akriolik esaslı polimerler) ve farklı yüzdelerde silis dumanı içeren polimer modifiye betonun alt tabaka betonuna aderans mukavemeti araştırılmıştır. Aderans değerlendirmesi için iki farklı yöntem (Pull-off testi ve “çift kesme testi” olarak da adlandırılan Push-out testi) kullanılmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Maksimum aderans, çimento ağırlığının %20’si ile polimer karışımında meydana gelmiştir. SBR bazlı polimer modified kompozit, diğer modifiye beton tiplerinden daha güçlü bağlanma göstermiştir.

Fu *et al.* 2020, beton ile işlenmiş ahşap arasındaki aderansın kesme mukavemetini belirlemek için bir test yöntemi belirlemişlerdir. Çalışma, iki tip epoksi ile yapıştırılmış beton ve işlenmiş ahşap kompozit bağlantılar üzerinde analitik hesaplara ve deneysel testlere dayanmaktadır. Numuneler, yaygın olarak kullanılan iki test düzeneği, çift kesme testleri ve basınç-kesme testleri altında test edilmiştir. Sonuç, dikkate alınan bağ uzunlukları ve araştırılan yapıştırıcı tiplerinden bağımsız olarak, deneysel sonuçlar ile kesme mukavemeti ile elde edilen kırılma modları arasında önemli bir istatistiksel fark olmadığını göstermiştir. Ayrıca, çekme-koparma kesme testi kurulumu kullanılırken normal dayanımlı beton ile işlenmiş ahşap arasındaki bir bağ hattının kesme dayanımını belirlemek için 50 mm’lik bir bağlantı uzunluğu önerilmiştir.

Li *et al.* 2021, farklı yoğunluğa sahip kendiliğinden genleşen polimer ile farklı dayanıma sahip beton arasında normal basıncın kesme aderansı özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için doğrudan kesme testleri kullanılmıştır. Polimer-beton arayüzey aderans testleri, modifiye edilmiş doğrudan kesme test cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kırılma modlarının ve aderans mukavemetinin, daha düşük polimer yoğunluğuna sahip numuneler için normal basınçtan büyük ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Belirli bir normal basınç için, polimer yoğunluğu arttıkça aderans gücü lineer olarak artmaktadır. Son olarak, betonda numune kırılması için aderans mukavemetini değerlendirmede bir sonlu eleman modeli önerilmiş ve test sonuçları ile doğrulanmıştır.

Tang *et al.* 2021, ara yüzey pürüzlülüğü açısından beton alt katman ile asfalt kaplama arasındaki bağlanma performansını araştırmışlardır. İlk olarak C50 sınıfı beton plakalar imal edilmiştir. Asfalt betonları %4 hava boşluğu içeriği ile kaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, pürüzlülüğün ortalama karekökü ve fraktal boyutu içeren pürüzlülük parametreleri, görüntü

tekniki ve yüzey rekonstruksiyonundan elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü parametreleri ile doğrudan kesme mukavemeti arasındaki ilişkiler nicel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün fraktal boyutla doğrusal olarak arttığını göstermektedir.

Polimer kompozitlerin, mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde, betonla aderansını arttırmada, homojen karışabilen, düşük maliyetli bir kompozit üretiminin araştırıldığı bu çalışmada mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> içeren polimer kompozitlerin kullanımı hakkında literatürde çok sınırlı bilgi vardır. Ayrıca, üretilen kompozitlerin modellenmesinin de yapıldığı bir çalışma literatürde olmamakla beraber çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılarak sonuçlar karışılaştırılmıştır.

Çalışmamızda metodu kısmında anlatılan farklı oranlarda mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> seçilerek 21 kompozit grubu üretilmiştir. Yoğunluk, ultrases dalga hızı, dinamik elastisite modülü, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, tokluk ve elastisite modülü gibi fiziko-mekanik zellikler, SEM/EDS ve FTIR gibi iç yapı özellikleri ve basınç altında eğimli kesme ve yarmada çekme gibi aderans deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve sonuçlar karışılaştırılmıştır.

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Materyal

Bu çalışmada çimento esaslı (kendiliğinden yerleşen beton) ve polimer esaslı yapı malzemeleri üretilmiş olup kendiliğinden yerleşen beton üretmek için çimento, agrega ve akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Polimer kompozit üretiminde ise epoksi ile karşılaştırıldığında düşük maliyeti nedeniyle doymamış polyester malzemesi seçilmiştir.

### Agrega

Çalışmada kullanılan agrega; 0–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm ve 16–25 mm olmak üzere beş farklı tane sınıfına ayrılmıştır (Şekil 6). Kullanılan agregaların tane yoğunluğu, su emme ve yüzey nemi şeklindeki fiziksel özellik deneyleri TS EN 1097-6 2015'e yapılmış ve değerleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 6. Kullanılan agregalar

Tablo 5. Agregaların Tane Yoğunluk, Su Emme ve Yüzey Nemi Oranları

Kullanılan agrega boyutları (mm)	Tane yoğunluğu (K.Y.D.) (gr/cm <sup>3</sup> )	Su emmesi (%)	Yüzey nemi (%)
0-2	2,686	1,77	1,8
2-4	2,671	1,75	1,1
4-8	2,652	1,92	1,0
8-16	2,664	1,56	0,8
16-25	2,678	1,36	0,7

## Çimento

Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN 197-1 2012 ve TS EN 196-1 2016 standartlarına uygun olan CEM II/A-M (P-LL) 42,5R tipi Portland çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Çimento, Silis Dumanı ve Mermer Tozunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Bileşen (%)	CEM II/A-M 42.5R	Silis dumanı	Mermer tozu
SiO <sub>2</sub>	17,60	88,8	14,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,45	0,17	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,08	0,11	4,90
CaO	60,02	1,01	-
MgO	2,29	0,88	-
SO <sub>3</sub>	2,67	0,42	-
Kızdırma kaybı	8,49	2,40	-
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,19	-
K <sub>2</sub> O	0,63	5,08	-
Na <sub>2</sub> O+0,658K <sub>2</sub> O	0,63	-	-
Cl	0,01	-	-
Ölçülemeyen	0,54	1,48	-
Serbest CaO	0,69	-	-
CaCO <sub>3</sub>	-	-	57,4
Katkı	19,90	-	-
<b>Fiziksel özellikleri</b>			
Özgül ağırlığı	3,01	2,36	2,70
Özgül yüzeyi (cm <sup>2</sup> /g)	4403	302	-
Basınç dayanımı (MPa)	51,03	-	-
Mohs sertliği	-	-	3,5-4
Görünür gözeneklilik (%)	-	-	1,11

## Mermer tozu

Çalışmada faz malzeme olarak kullanılacak atık mermer tozu Afyonkarahisar ili'den temin edilmiş olup Şekil 7'de gösterilmiştir. Atık mermer tozuna ait özellikler Tablo 6'da verilmiştir.



**Şekil 7.** Mermer tozu

### **Silis dumanı**

Deneyleerde kullanılan silis dumanı Antalya Elektrometalurji İşletmesi'nden temin edilmiş olup Şekil 8'de gösterilmiştir. Ortalama tanecik boyutu 0,1µm olan silis dumanının özgül ağırlığı 2,2 olup kimyasal özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.



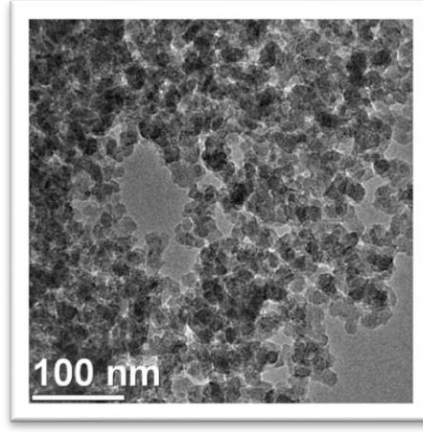
**Şekil 8.** Silis dumanı

### **Nano-silika (n-SiO<sub>2</sub>)**

Bu çalışmada, Nanografi firmasından alınmış olan amorf yapılı nanopartikül şeklindeki silikon dioksit (SiO<sub>2</sub>) kullanılmıştır (Şekil 9). Silikon dioksidin özellikleri Tablo 7'de özetlenmiş ve SEM görüntüleri Şekil 10'da gösterilmektedir.



**Şekil 9.** Nano-silika (n-SiO<sub>2</sub>)



**Şekil 10.** N-SiO<sub>2</sub> parçacıklarının SEM görüntüleri

**Tablo 7.** N-SiO<sub>2</sub> Özellikleri

Özellikler	Değer			
Saflık (%)	99,5+			
Renk	Beyaz			
Ortalama parçacık boyutu (nm)	15-35			
Özgül yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	150-550			
Yığın yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	<0,1			
Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,2			
Elemental analysis (%)	Fe	Ca	Ti	Na
	0,002	0,007	0,012	0,003

### Polyester reçine

Bu çalışmada kullanılan doymamış polyester reçine Boytek Reçine Boya ve Kimya San. Tic. A.Ş. firmadan alınmıştır (Şekil 11). Genel özellikleri Tablo 8’de listelenmiştir. Birim ağırlığı 1,113 gr/cm<sup>3</sup> dür.



**Şekil 11.** Polyester reçine

**Tablo 8.** Polyester Reçine Özellikleri

Test	Method	Değer
Renk	ISO 2211	Açık gri, Opak
Yoğunluk	ISO 1675	1,353 g/cm <sup>3</sup>
Asit Değeri	ISO 2114	11 mg KOH/g
Vizkozite 1 Brookfield	ISO 2555	1450 cp
Jel süresi	ISO 2535	16 dak.
Monomer Oranı	-	%33
Parlama Noktası	Abel - Pernsky	34°C

### **Karma suyu**

Beton üretiminde TS EN 1008 2013 Standardı kapsamında olan Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

### **Akışkanlaştırıcı**

TS EN 934-2 2014 Türk standardına uygun olan modifiye polikarboksilat esaslı polimer yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcının yoğunluğu  $1,10 \pm 0,02$  kg/l, 20°C ve rengi açık kahverengidir.

### **Deneylerde kullanılan aletler**

#### ***Elekler***

Deneylerde, Şekil 12’de gösterildiği gibi, TS1226 1996’ya uygun 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 25mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.



**Şekil 12.** Elekler

## **Betonyer**

Çalışmada, Şekil 13'te gösterildiği gibi, ELE firmasının ürettiği 60 dm<sup>3</sup> kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılarak beton üretimi yapılmıştır.



**Şekil 13.** Betonyer

## **Mini slump**

Çalışmada, Şekil 14'te gösterildiği gibi, Kompozitlerin akışkanlığını test etmek için bir mini çökme deneyi yapılmıştır (ASTM C 359 2021).



**Şekil 14.** Mini slump

## **Kalıplar**

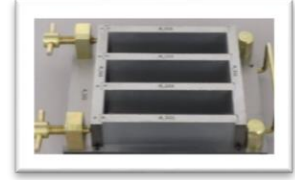
Deneylerde, Şekil 15'te gösterildiği gibi, TS EN 12390-1 2014'e uygun 100×200 mm boyutlarında silindir, 50×50×50 mm boyutlarında harç kalıpları ve 40×40×160 mm kiriş kalıpları kullanılmıştır.



a) 50 x 50 x 50 mm boyutlarında harç kalıpları



(b) 100 x 200 mm boyut silindir kalıpları



(c) 40 x 40 x 160 mm kiriş kalıpları

**Şekil 15.** Küp ve silindir kalıplar

### ***Basınç test presi***

Sertleşmiş beton deneylerinden, grupların basınç ve eğilmede çekme mukavemetlerinin belirlenmesinde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında bulunan BESMAK marka tipinde 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 16). Basınç deneyleri esnasında sabit bir yükleme hızı 0,4 MPa/sn alınmıştır. Bu yükleme hızı TS EN 12390-3 2012’da belirtilen aralık (0,2-1 MPa/s) içinde kalmaktadır. Eğilmede çekme ise sabit bir yükleme hızı 0,04 MPa/sn alınmıştır. Bu yükleme hızı TS EN 12390-5 2019’da belirtilen aralık (0,04-0,06 MPa/s) içinde kalmaktadır.



**Şekil 16.** Basınç ve eğilmede çekme dayanımı test cihazları

### ***Ultrases hızı ölçüm cihazı***

Bu test, polimer kompozit gruplardaki ultrases hızını ölçmek için kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacına ulaşmak için 54 kHz dalga üreten bir dijital ultrases hızı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ultrases hızı ölçüm cihazı doğrudan iletim, yarı doğrudan iletim ve yüzey iletim test yöntemlerinde kullanılabilir. Bu çalışmada, doğrudan iletim yöntemi Şekil 17’de gösterildiği gibi kullanılmıştır. Ultrases dalgalar hava veya vakum içinden geçmediği için,

transdüserler ve polimer kompozit yüzey arasındaki boşlukları doldurmak için ultrason jeli kullanılmıştır.



**Şekil 17.** Ultrases hızı ölçüm cihazı

#### ***Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDS):***

Çalışmada seçilen gruplardan SEM/EDS ile görüntü alınmıştır. Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 18) kullanılmıştır. Analizler, Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM merkezinde yaptırılmıştır. SEM görüntüleri 1000x-20000x arasında büyütme faktörü ile alınmıştır.



**Şekil 18.** Taramalı Elektron Mikroskobu

#### ***Fourier Transform Kızılötesi Spektrofotometre cihazı (FTIR)***

Çalışmada seçilen gruplardan basınç dayanımında kırılan parçaların üzerinde FT-IR analizi uygulanmıştır. Grupların kızılötesi spektrumunun belirlenmesinde Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM merkezinde bulunan FTIR cihazı kullanılmıştır (Şekil 19). FTIR spektrumları, 400 ila 4400  $\text{cm}^{-1}$  aralığında IR spektrometresi ile analiz edilmiştir.



**Şekil 19.** FTIR Cihazı

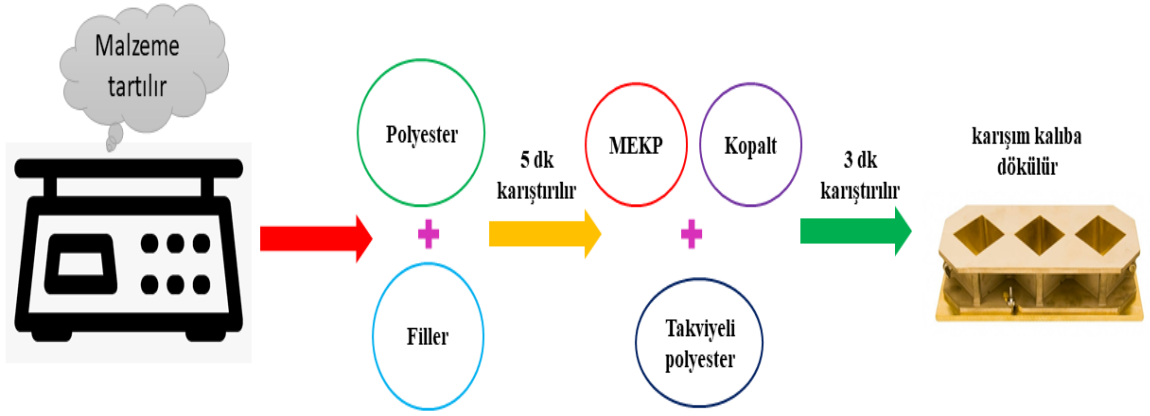
## Yöntem

### Kompozitlerin üretimi

Bu çalışmada, doymamış polyester reçine kullanılmıştır. Polyesterin sağlıklı bir şekilde tamamen sertleşmesini sağlamak için kimyasal bir sertleştirici MEK Peroksit kullanılmaktadır. MEKP miktarı 1 kg Polyester başına 10-25g arasında kullanılması önerilmekte olup bu çalışmanın ön deneylerinde 1 kg Polyester başına 10g MEKP kullanılmasına ön denemelerle karar verilmiştir. Sertleştiricinin daha hızlı ayrışmasına ve reaksiyona girmesine izin vermek için kobalt oktoat kullanılmaktadır. Genellikle, 1 kg Polyester başına kullanım miktarı 1,5-2g arasındadır ve bu çalışmanın ön denemelerinden hareketle bu miktar 1 kg Polyester başına 2g kobalt olarak belirlenmiştir (Polat ve Oltulu 2019).

Yapılan literatür incelemesinde mermer tozu %50'ye, silis dumanı %20'ye ve n-SiO<sub>2</sub> %1,25'e kadar kullanıldığı görülmüştür (Raja and Kumaravel 2015; Fallah and Nematzadeh 2017; Çınar and Kar 2018; Choudhary *et al.* 2019; Awad and Abdellatif 2019; Ince *et al.* 2020; Öztürk *et al.* 2020; Shukla *et al.* 2020; Singh *et al.* 2021). Bu çalışmalardan da hareketle homojen karışımı sağlayabilen, mekanik performansı yüksek ve betonla iyi aderansı gösteren kompozitleri üretebilmek için kullanılması gereken mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> oranları ön denemelerle belirlenmiştir. Polimer kompozit üretme işlemleri aşağıdaki gibi özetlenmiş ve üretim işlemleri Şekil 20'de gösterilmiştir:

1. Dolgu malzemesi, MEKP, Kobalt ve polyester reçinesi hassas bir şekilde tartılır.
2. Dolgu malzemesi ve polyester reçinesinin homojen karışımını elde etmek için 5 dakika boyunca elle karıştırılır.
3. Takviyeli polyester reçinesine MEKP ve Kobalt ilave edilerek 3 dakika boyunca karıştırılır.
4. Tüm karışım kalıba dökülür ve sertleşene kadar beklenir.



**Şekil 20.** Polimer kompozit üretme işlemleri

Üretilen kompozit gruplarını kodlarken mermer tozu; M ile silis dumanı; S ile ve nano-SiO<sub>2</sub>; N ile kısaltılmıştır. Kullanım oranları bu kısaltmalardan sonra verilmiştir. Örnek kompozit grup kısaltmaları aşağıda verilmiştir.

**Örnek:**

P (Ref.): referans polimer kompozit

PM20: içeriğinde %20 oranında mermer tozu bulunan polimer kompozit

PS5: içeriğinde %5 oranında silis dumanı bulunan polimer kompozit

PM30N0,5: içeriğinde %30 oranında mermer tozu ve %0.5 oranında nano-SiO<sub>2</sub> bulunan polimer kompozit

PS5N0,5: içeriğinde %5 oranında silis dumanı ve %0.5 oranında nano-SiO<sub>2</sub> bulunan polimer kompozit

Tablo 9, üç tip dolgu maddesi olarak silis dumanı, mermer tozu ve n-SiO<sub>2</sub> içeren çeşitli polimer kompozitlerinin karıştırma oranlarını göstermektedir. Toplamda 21 grup kompozit üretilmiş, her grupta basınç ve ultrases testler için üçer tane 50×50×50 mm küp ve eğilmede çekme testi için üçer tane 40×40×160 mm boyutlu prizma hazırlanmıştır. Şekil 21’de, grupların örnek gösterimleri verilmiştir. Şekil 22, örnek hazırlama ve test işlemini göstermektedir.

**Tablo 9.** Polimer Kompozit Karışım Oranları (% ağırlıkça)

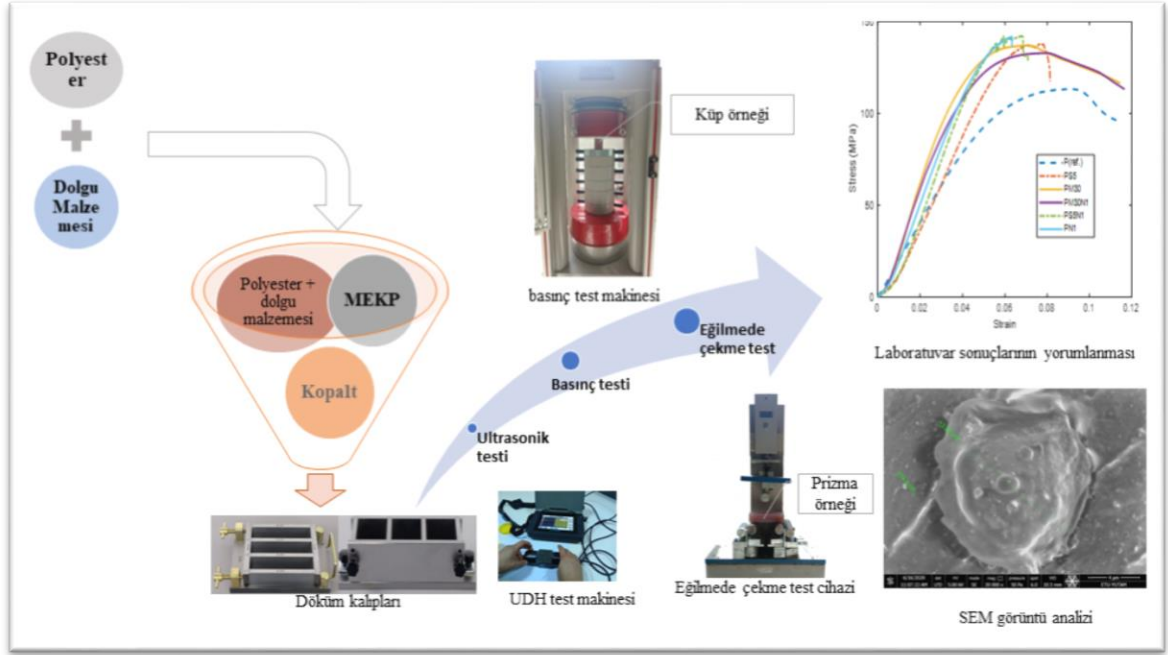
Grup kodu	Doymamış Polyester reçinesi	Mermer tozu (M)	Silis dumanı (S)	n-SiO <sub>2</sub> (N)
P (Ref.)	100,0	-	-	-
PM20	80,0	20,0	-	-
PM25	75,0	25,0	-	-
PM30	70,0	30,0	-	-
PM40	60,0	40,0	-	-
PS2,5	97,5	-	2,5	-

**Tablo 9.** (devamı)

PS5	95,0	-	5,0	-
PS7,5	92,5	-	7,5	-
PS10	90,0	-	10,0	-
PN0,5	99,5	-	-	0,5
PN1	99,0	-	-	1,0
PN1,5	98,5	-	-	1,5
PN2	98,0	-	-	2,0
PM30N0,5	69,5	30,0	-	0,5
PM30N1	69,0	30,0	-	1,0
PM30N1,5	68,5	30,0	-	1,5
PM30N2	68,0	30,0	-	2,0
PS5N0,5	94,5	-	5,0	0,5
PS5N1	94,0	-	5,0	1,0
PS5N1,5	93,5	-	5,0	1,5
PS5N2	93,0	-	5,0	2,0



**Şekil 21.** Polimer kompozit grupları



**Şekil 22.** Örnek hazırlama ve test işlemleri

Polimer kompozit ile beton arasındaki aderans dayanımını ölçmede iki parçalı 100×200 mm’lik silindir numuneler üretilmiştir. Üst tabakayı polimer kompozit oluştururken, alt tabakayı kendiliğinden yerleşen beton oluşturmaktadır. Kendiliğinden yerleşen C50/60 beton TS EN 206 2015 standardına göre tasarlanmıştır. Üretilen beton malzeme miktarı Tablo 10’da verilmiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasından da hareketle en iyi homojen karışım ve en iyi mekanik performansa sahip polyester kompozitler üretebilmek için uygun mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> oranları seçilmiştir.

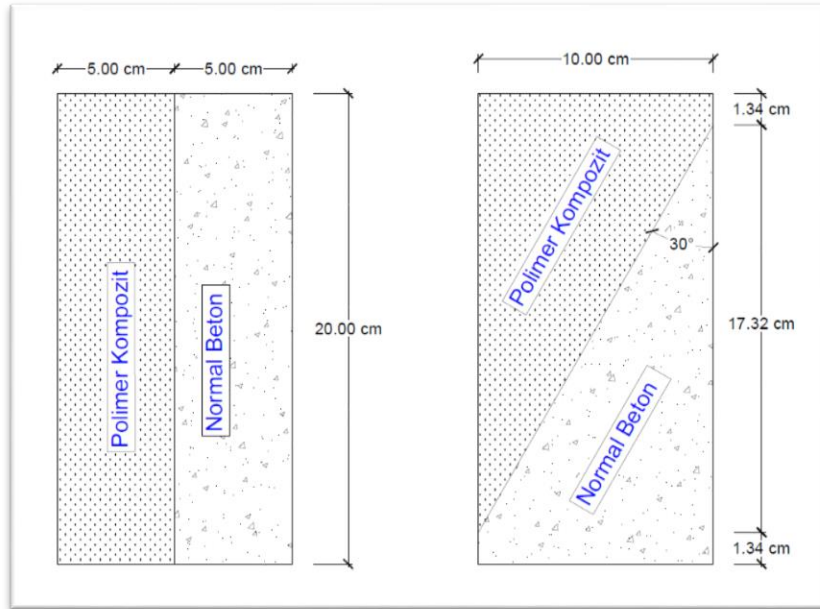
**Tablo 10.** Beton Karışım Oranları

Bileşim	Miktar (kg/m <sup>3</sup> )
Çimento	488,0
Su	202,4
0-2	503,5
2-4	165,9
Agrega 4-8	248,7
8-16	580,6
16-25	165,9
Akışkanlaştırıcı	4,9

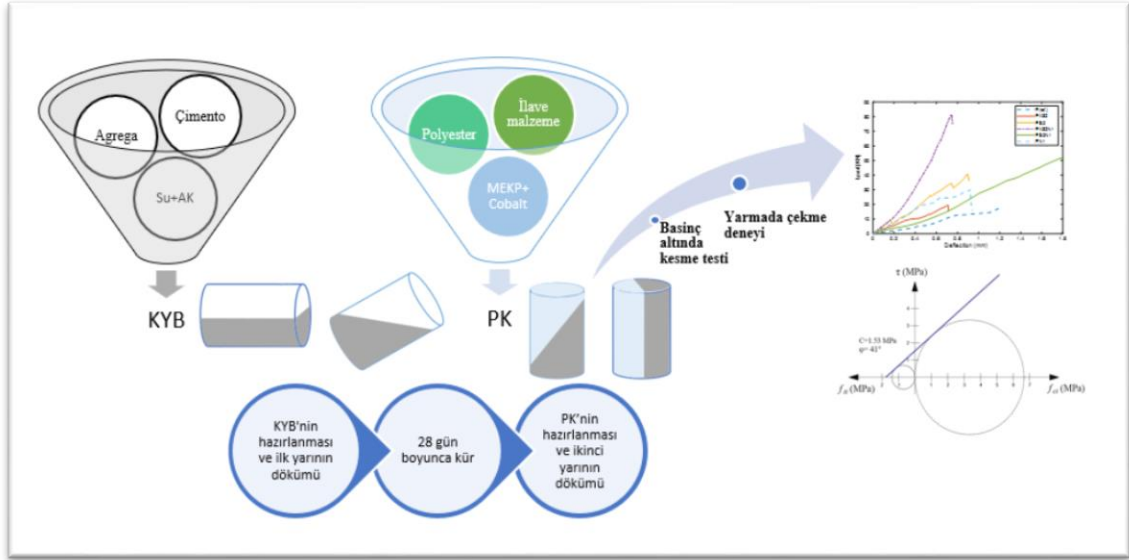
Basınç altında kesme testi grupları için alt parçayı üretmek üzere, silindir kalıbının ilk yarısı, dikey eksenden 30° eğimli bir düzlemde C50/60 sınıfı kendiliğinden yerleşen beton ile doldurulmuştur. Numuneler üretildikten 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış ve TS EN 12390-2 2019 standardına uygun olarak (20 ± 2)°C’deki suda bekletilmiştir. Bundan sonra, numunelerin

üst kısmı, en iyi sonuç alınan oranlarda dolgu malzemeleri (silis dumanı, mermer tozu ve n-SiO<sub>2</sub>) ile takviye edilmiş bir polimer kompoziti ile doldurulmuştur. Polimer kompozitler, 100×200 mm silindir numuneler oluşturmak üzere yarısı normal beton olan numuneler üzerine dökülmüştür.

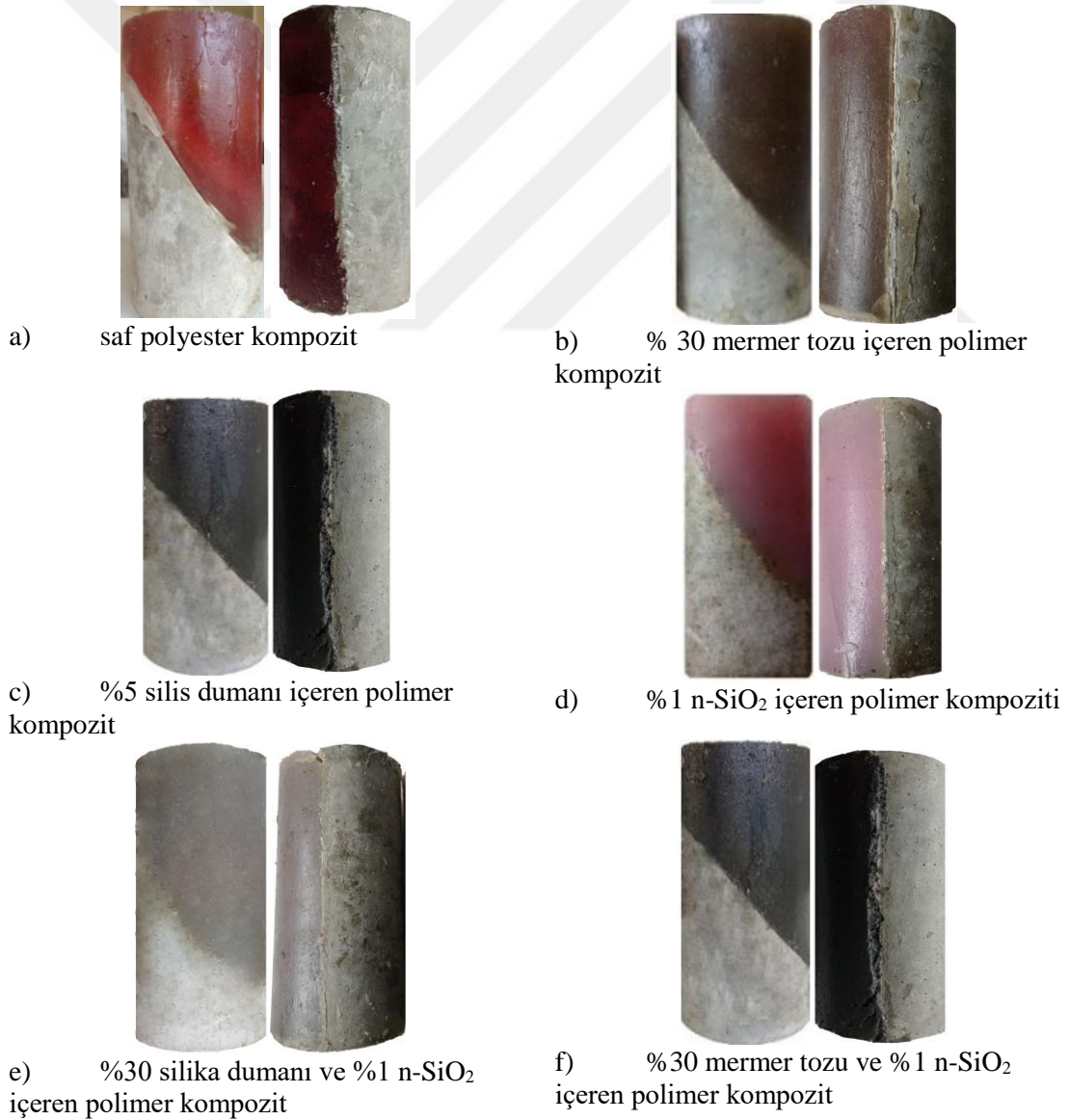
Yarmada çekme testi grupları için ise, silindir kalıbının ilk yarısı kendiliğinden yerleşen betonla yatay bir şekilde doldurulmuş, daha sonra ikinci yarısı takviyeli polimer kompozitleri üzerine doldurulmuştur. Şekil 23, basınç altında kesme ve yarmada çekme test gruplarının boyutlarını göstermektedir. 6 grupta toplam 48 numune hazırlanmış olup, her grupta yarmada çekme kesme testi için dört adet 100×200 mm silindir ve yarmada çekme testi için dört adet 100×200 mm silindir numune üretilmiştir. Şekil 24’te numune hazırlama ve test prosedürü özetlenmiştir. Şekil 25, eklenen materyalin rengini göstermek için rastgele seçilen bir silindiri göstermektedir.



**Şekil 23.** Eğimli kesme ve yarmada çekme testi örneklerinin boyutları



Şekil 24. Numune hazırlama ve test prosedürü



Şekil 25. Numune görüntüleri

## **Kompozitlerin sertleşme öncesi yayılma testi**

Kaplama tabakasının akışkanlığı, eski ve yeni tabakalar arasındaki yapışma mukavemetini önemli ölçüde etkilmektedir. Bu amaçla üretilen kompozitlerin akışkanlıklarını karşılaştırmak için mini çökme testi uygulanmıştır. Şekil 14'te görüldüğü gibi mini çökme konisi kompozit ile doldurulmuş ve yayılan kompozitin çapı ölçülmüştür.

## **Fiziko-mekanik testler**

### ***Yoğunluk deneyi***

Yoğunluk, "birim hacim başına kütle" olarak da bilinir. Yoğunluğu elde etmek için kütle ( $m_i$ ) hacme ( $V_i$ ) bölünür. Bu teknik, numunelerin boşluksuz ve düz bir yüzeye sahip olmasından dolayı kullanılmıştır. Tüm numuneler 0.1g hassasiyette tartılmıştır ve daha sonra kütle değerleri hacimlerine bölünmüştür (Denk. 3). Bu çalışmada, polimer kompozitlerin yoğunluğu 28 gün sonra ölçülmüştür.

$$\rho_{(g/cm^3)} = \frac{m_i}{V_i} \times 100 \quad (3)$$

### ***Ultrases geçiş hızı deneyi***

Bu testle polimer kompozit numunelerde ultrases geçiş hızının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bunu başarmak için 54 kHz dalga üreten bir dijital ultrases hızı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada doğrudan iletim yöntemi kullanılmıştır. Ultrases dalgalar hava veya vakum içinden geçmediği için, transdüserler ile polimer kompozit yüzey arasındaki boşlukları doldurmak için bir ultrason jel kullanılmıştır. Ultrases dalgaların polimer kompozit gruplar boyunca aktarılması için gereken süre ASTM E494 2020 standardına göre belirlenmiştir. Dönüştürücüler arasındaki mesafe, polimer kompozit grup genişliğine eşit olan 5 cm'dir. Dalga hızı, grup genişliği ölçülen zamana bölünerek hesaplanmıştır. Polimer kompozitler üzerinde her bölümde üç kez uzunlamasına dalga ölçümü yapılmıştır.

### ***Dinamik elastisite modülü deneyi***

Çekme veya basınç altında kompozitin statik elastisite modülü aksel yüklemeye altında gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusal kısmının eğimi olarak verilmektedir. Ancak, statik elastisite modülleri yüklemeye hızına ve basınç dayanımının mertebesine göre farklı değerler alabilir ve çizilen doğruların bir miktarı orjinden geçemeyebilir. Daha güvenilir bir değer olarak da  $E_d$  ile gösterilen Dinamik Elastisite Modülü tanımı geliştirilmiştir. Ölçümlerden elde edilen dalga hızı ve yoğunluk, dinamik elastisite modülünü (Denk. 3.2) elde etmek için kullanılmıştır.

Polyester kompozitlerin Poisson oranı (Krevelen and Nijenhuis 2009) tarafından bildirildiği üzere 0,36 olarak kullanılmıştır.

$$E = \frac{V_{long}^2 \times \rho \times (1+v) \times (1-2v)}{1-v} \quad (4)$$

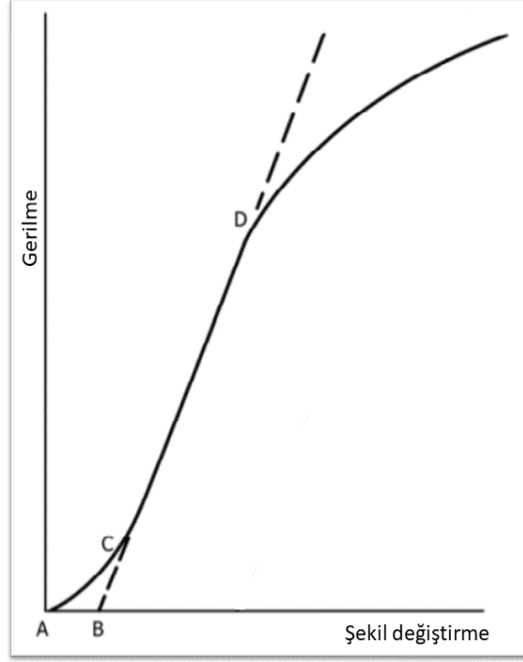
Burada,  $V_{long}$  uzunlamasına dalga hızı,  $\rho$  malzeme yoğunluğu,  $E_d$  dinamik elastisite modülü ve  $\mu$  malzeme Poisson oranıdır.

### ***Elastisite modülü deneyi***

Elastisite modülü, polimer kompozitlerin sertliğini karakterize eden ana parametrelerden biridir ve matristeki dolgu maddesinin bileşimi, şekli ve konsantrasyonunun yanı sıra dolgu parçacıkları ile matris arasındaki arayüzün türünden güçlü bir şekilde etkilenir (Pinto *et al.* 2015). Bu çalışmada, polimer kompozitlerin elastisite modülü D638 2014 standardına göre hesaplanmıştır.

Şekil 26'da gösterildiği gibi bu standarda göre, taban bölgesi (AC), numunenin gevşekliği ve hizalanması veya oturması nedeniyle malzemenin özelliğini temsil etmemektedir. Elastisite modülünün doğru değerlerini elde etmek için, bir Hookean (doğrusal) davranış bölgesi sergileyen bir malzeme durumunda, CD bölgesi, deformasyon ekseninde teğet çizilerek şekil değiştirme eksenini kestiği nokta bu kesişme noktası (B), tüm uzantıların veya deformasyonların ölçülmesi gereken düzeltilmiş sıfır deformasyon noktasıdır.

Elastisite modülü, CD çizgisi (veya uzantısı) boyunca herhangi bir noktadaki gerilmenin aynı noktadaki (B noktasından ölçülen, sıfır deformasyon olarak tanımlanan) deformasyona bölünmesiyle belirlenebilir (D638 2014).



**Şekil 26.** Hookean bölgesi olan malzemelerin elastisite modülü (D638 2014)

### ***Basınç ve eğilmede çekme deneyi***

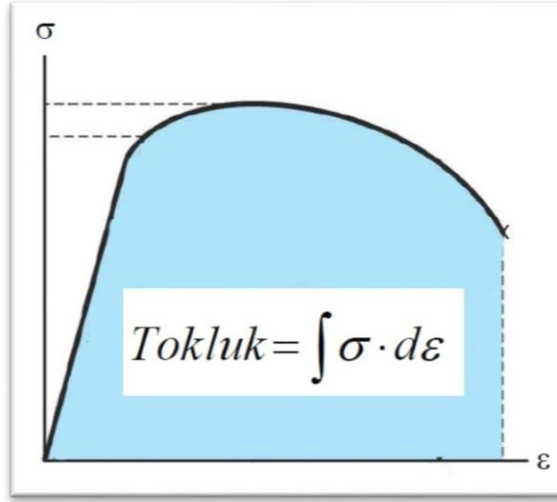
Bu çalışmada, 3000 kN kapasiteli çift çerçeveli basınç-eğilme testi makinesi kullanılmıştır. Deplasman sensörü 0,001 mm hassasiyete sahiptir. Basınç ve eğilme çekme deneyleri sırasıyla TS EN 12390-3 2012 ve TS EN 12390-5 2019 standartlarına göre yapılmıştır. Basınç testinde yük, 0,4 MPa/s'lik sabit bir basınçta uygulanmıştır. Grupların eğilmede çekme dayanımı tespit edilmesinde üç noktalı yükleme yapan hidrolik pres kullanılmıştır. Eğilmede çekme testi için ise 0,04 MPa/s'lik sabit bir basınç hızında uygulanmıştır.

### ***Tokluk***

Tokluk, bir malzemenin enerji emmesi ve kırılmadan plastik olarak deforme olması yeteneğidir. Bu çalışmada, basınç gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin altındaki alan entegre edilerek tokluk hesaplanmıştır (Denk 5). Bu amaçla MATLAB yazılımı kullanılmıştır (Şekil 27).

$$\frac{\text{enerji}}{\text{hacim}} = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon \quad (5)$$

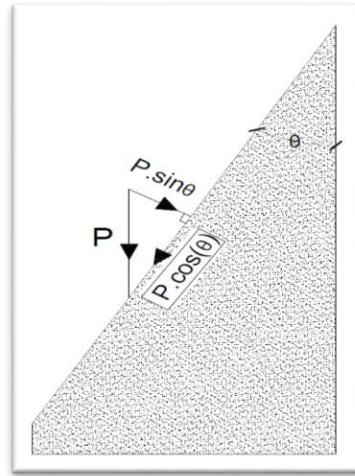
Burada,  $\varepsilon$  şekil değiştirme,  $\varepsilon_f$  kırım birim şekil değiştirme ve  $\sigma$  gerilmeyi göstermektedir.



**Şekil 27.** Tokluk denklemi ve görsel olarak tanımı

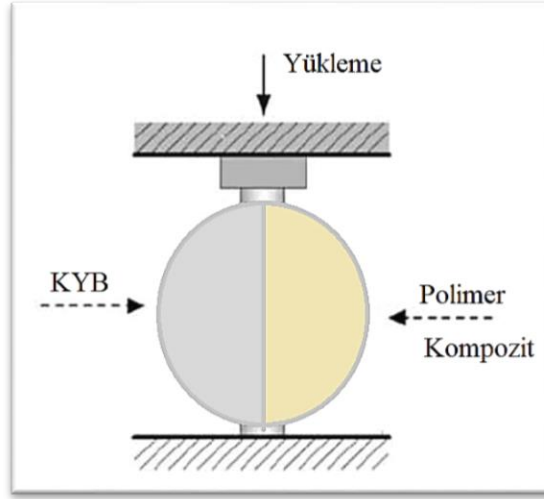
### Aderans testleri

Bu çalışmada, normal ve polimer kompozit tabaka arasındaki aderans gücünü araştırmak için basınç yükü altında eğimli kesme ve yarmada çekme testleri uygulanmıştır. Bu testler çeşitli malzemelerin (Örneğin eski beton ile yeni beton ve polimer kompozit ile demir) arasında aderans dayanımı bulmak için kullanılmıştır. Ancak polimer ile beton arasındaki aderans dayanımını incelenmek için kullanılmamıştır. Bu test türünün seçilme sebebi deney düzeneği basit olduğundan ve parametrelerin saptanmasında hassas sonuçlar verdiği için yaygın kullanıma sahip olmasındandır. Bu çalışmada, ASTM C882 / C882M 2020’de önerildiği gibi basınç yükü altında eğimli kesme testi yapılmıştır. Şekil 28’de gösterildiği gibi, temas planındaki toplam kesme gerilmesi, kesme kuvvetinin  $P \cdot \cos(\theta)$  eğik alanına bölünmesiyle bulunmuştur.



**Şekil 28.** Eğimli kesme testinde uygulanan kuvvetler

Yarmada çekme deneyleri ise TS EN 12390-6 2010 standardına göre yapılmıştır (Şekil 29). Yarmada çekme testinde 0,04 MPa/s’lik sabit bir yükleme hızı uygulanmıştır.



**Şekil 29.** Yarmada çekme test prosedürü

### Mohr-Coulomb analizi

Efektif bağ durumunda, birleşim noktası düzensiz bir kesme, basma ve çekme gerilmesi dağılımına maruz kalır. Yükleme durumu karmaşıktır ve herhangi bir bağ katının kalınlığından oldukça etkilenir. Bir birleşim noktası göçmesi durumunda, arayüzdeki global gerilmeler basınç ve kesmedir ve Coulomb kırılma kriteri nihai mukavemeti tanımlamak için kullanılabilir.

$$\tau = c + \mu\sigma \quad (6)$$

Burada,  $\tau$  birleşme yerindeki kesme gerilmesi;  $\sigma$  normal gerilme;  $c$  görünen kohezyon;  $\mu$  sürtünme katsayısıdır.

Bu ifade, Şekil 30'daki kesintisiz düz çizgi ile temsil edilir ve eğim, birleşim noktasının sürtünme açısı ile tanımlanır:  $\phi = \text{ark tan } \mu$ . Sürtünme katsayısı  $\mu$ , beton yüzeyinin pürüzlülüğünün bir fonksiyonudur ve deneysel çalışmalar, bunun bağlayıcı maddelerden etkilendiğini göstermektedir. Şekil 30'da düz çizginin kayma gerilmesi eksenine kesilmesiyle temsil edilen  $c$  kohezyonunun çevresel koşullardan, yüzey hazırlığından, yükleme süresinden ve bağ katlarının kullanımından etkilendiği görülmektedir.

Şekil 30'daki kompozit silindirdeki kuvvetlerin dengesinden, boyuna veya tek eksenli mukavemete ( $f_c$ )  $\alpha$  açısı olan bir birleşim noktasındaki normal ve kesme gerilmeleri şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma = f_c \cos^2 \alpha \quad (7)$$

$$\tau = f_c \sin \alpha \cos \alpha \quad (8)$$

(6), (7) ve (8) denklemlerinden, zayıf düzlem tarafından yönetilen kompozit silindirin basınç dayanımı:

$$f_c = c \frac{1+\tan^2 \alpha}{\tan \alpha - \mu} \quad (9)$$

Belirli bir beton ve koşullar için sabit bir  $c$  değeri varsayılarak, denklem (9)'ten minimum  $f_c$ 'ye karşılık gelen en kritik birleşim noktasının açısı şu şekilde verilir:

$$\alpha_{\text{crit}} = \arctan(\mu + \sqrt{\mu^2 + 1}) \quad (10)$$

(10) numaralı denklemdeki  $\alpha_{\text{crit}}$  ile, (3.7) numaralı denklemdeki kompozitin minimum basınç dayanımı şöyle olacaktır:

$$f_{c\text{min}} = c \frac{1+(\mu+\sqrt{\mu^2+1})^2}{\sqrt{\mu^2+1}} \quad (11)$$

Trigonometrik ilişkiler aracılığıyla ve  $\mu = \tan \theta$  yapmak suretiyle, (9) ve (11) denklemleri plastisite teorisinde yaygın olan aşağıdaki formları alabilir:

$$f_c = \frac{c \cos \phi}{\cos \alpha \sin(\alpha - \phi)} \quad (12)$$

$$f_{c\text{min}} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (13)$$

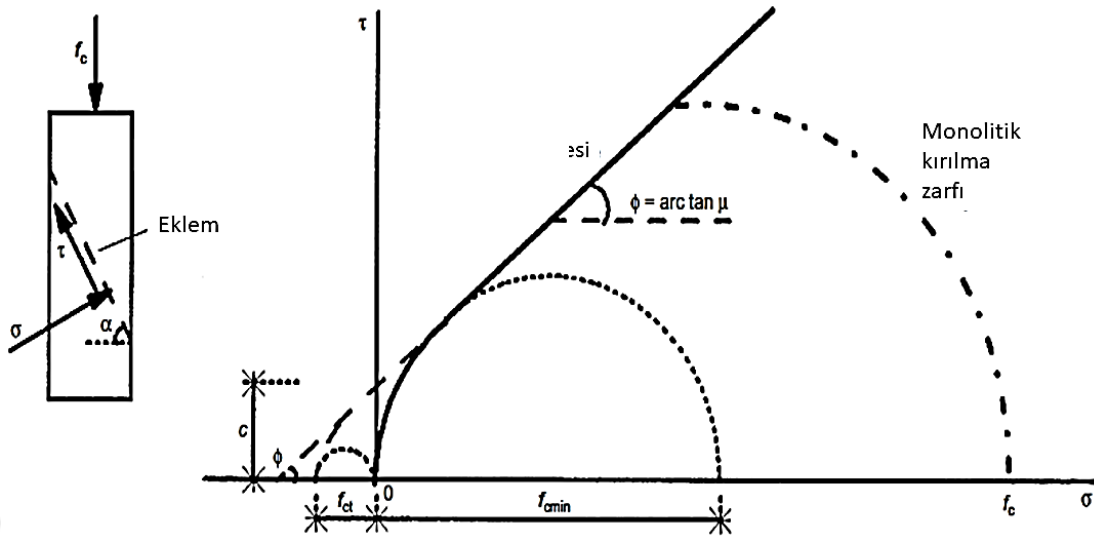
Coulomb kriterine göre, birleşim noktasındaki kayma göçmesi, Şekil 30'da düz çizgi ile grafik olarak gösterilen denklem (6) ile tanımlanan kesme ve normal gerilmelerin kombinasyonuna maruz kalan bir kesit üzerinde gerçekleşir. Sınırlı bir beton çekme dayanımı varsayılırsa, çekme bölgesindeki yenilme zarfı, merkezi  $\sigma$  ekseninde olan ve  $(f_{ct}, 0)$  koordinatlarına sahip noktayı içeren düz çizgiye teğet bir kısmi daire haline gelir.

Düz çizginin  $\phi$  eğimi ve  $c$  kesişimi olduğu için, bu çizginin  $f_{c\text{min}}$  çaplı Mohr dairesine teğet olduğu kanıtlanabilir, minimum basınç dayanımı denklemler (11) veya (13) tarafından verilir ve Şekil 30'da noktalı olarak gösterilir.

Tasarımda olağan olan beton çekme dayanımı ihmal edilirse, birleşim noktası göçmeleri için değiştirilmiş Coulomb kriteri,  $\theta$  eğimli düz bir çizgi ve  $c$  kesişim noktası ve hem düz çizgiye hem de dikey eksene teğet olan ve çapı  $f_{c\text{min}}$  olan bir dairenin ilk yayı olarak basitleştirilir. Bu zarf, Şekil 30'da düz bir çizgi ile temsil edilmektedir.

Bu çalışmada, polimer kompozit ve beton yüzeylerde göçme zarfını belirlemek için Mohr-Coulomb kriteri kullanılmıştır. Önceki çalışmalar (Santos *et al.* 2007; Saldanha *et al.* 2013; Clímaco and Regan 2015; Hussin *et al.* 2015), bağ göçme zarfını elde etmek için basınç yükü altında eğimli kesme ve yarmada çekme testi sonuçlarını kullanmışlardır. Şekil 30'da gösterildiği gibi, hem kesme ( $\sigma; \tau$ ) hem de çekme ( $f_t$ ) cinsinden aderans mukavemeti, sırasıyla

basınç altında kesme ve yarmada çekme testlerinden değerlendirilmiştir. Daha sonra, ara yüzün saf kayma mukavemeti ( $\tau_0$ ) Mohr-coulomb konsepti kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 30. Mohr-Coulomb konseptini kullanan göçme zarfı (Clímaco and Regan 2015)

#### Enstrümental analiz teknikleri

##### *Görüntüleme analiz teknikleri (SEM/EDS)*

SEM/EDS tekniği, malzemelerin mikroyapısı ve yüzey yapısı hakkında detaylı bilgi almak için yaygın olarak kullanılmaktadır. SEM’de görüntü yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların grup üzerine odaklanması bu elektron demetinin grup yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve grup atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışını tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Bu çalışmada Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM merkezinde Quanta FEG 250 tarama elektron mikroskobu kullanılarak SEM görüntüleri ve EDS spektrumları alınmıştır. 250x-20000x arasında büyütme faktörü ile SEM görüntüleri alınmıştır.

##### *Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)*

FTIR matematiksel Fourier dönüşümü yöntemi ile ışığın infrared yoğunluğuna karşı dalga sayısını ölçen bir kimyasal analitik yöntemdir. IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından soğurulmaktadır. Matematiksel Fourier dönüşümü spektroskopisinde ışıma şiddeti, zamanın bir fonksiyonu olarak alınır. Her boyunu ayrı ayrı tarama gerekmeksizin hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilebilir. Bu yöntem ile, moleküler bağ karakterizasyonu yapılarak; katı, sıvı, gaz veya çözelti halindeki organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri ve yapının aromatik ya da alifatik olup olmadığı belirlenebilir. Çalışmada

seçilen gruplardan basınç dayanımında kırılan parçaların üzerinde FTIR analizi uygulanmıştır. Grupların kızılötesi spektrumunun belirlenmesinde Erzurum Teknik Üniversitesi YÜTAM merkezinde bulunan FTIR cihazı kullanılmıştır. FTIR spektrumları, 400 ila 4400  $\text{cm}^{-1}$  aralığında IR spektrometresi ile analiz edilmiştir.

### **Sonlu elemanlar analizi**

Sonlu elemanlar metodu (SE), mühendislik ve matematiksel modellerde sıklıkla kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. SE, özellikle yapı statikliği, akışkanlar mekaniği, ısı aktarımı ve elektrik potansiyeli problemlerinde kullanılır; yöntem, özellikle iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemleri ve sınır değer problemlerinin çözümünde uygulanır.

SE, esasta geniş bir sistemi sonlu eleman adı verilen daha küçük bileşenlere ayırır: bu, denklemin çözüldüğü uzayın ayrıklaştırılarak küçük bölgelere bölünmesi ile gerçekleştirilir. Sınır değer probleminin bu formülasyonu sonucu bir cebirsel denklem sistemi elde edilir, bu sistem daha sonra Rayleigh–Ritz veya Galerkin metodu gibi değişkenli metodlar ile çözülür. Bu metodlarda sonuçlar temel fonksiyonlar (basis function) cinsinden elde edilir: diğer bir deyişle bu fonksiyonlar kullanılarak asıl çözümün interpolasyonu yapılır.

Bu çalışmada, sayısal modellemede ABAQUS yazılımı kullanılarak basınç testi, eğilmede çekme testi, yorulma testi ve basınç yükü altında eğimli kesme testi yapılmıştır. Polyester grupları, tek eksenli basınç testlerinde ölçülen gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon kullanılarak doğrusal olmayan bir elastik-plastik malzeme olarak tanımlanmıştır. Her eleman tipi için farklı örgü boyutları kullanılmıştır. Basınç testi için sınır şartları, numune tabandan sabitlemiş (yani,  $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ ) ve üst kısmına deplasman uygulanmıştır. Üç noktalı çekme testi için, kırılma sürecini simüle etmek için  $40 \times 40 \times 160$  mm'lik dikdörtgen prizma numunesi Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) kullanılarak modellenmiştir. Numuneler basit mesnetli kiriş olarak modellenmiş ve orta noktada deplasman uygulanmıştır.

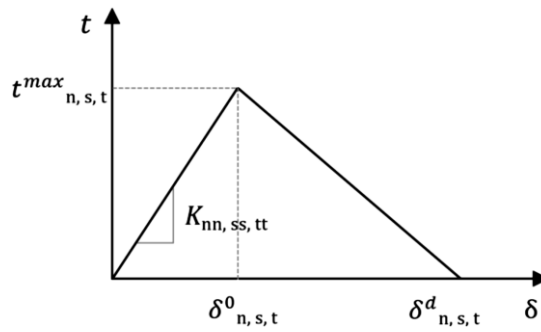
Eğimli kesme testinde, polyester kompozitler doğrusal olmayan elastik-plastik malzeme olarak tanımlanmış olup betonun tam elastik bir malzeme olduğu varsayılmıştır. Numunenin altına sabit bir rijit silindir plaka yerleştirilirken, numunenin üstüne sadece dikey yönde hareket eden serbest bir silindir plaka yerleştirilmiştir. Eğimli kesme testlerini simüle etmek için üst rijit silindir plakaya deplasman uygulanmıştır. Simülasyonlardan yük-deplasman eğrileri çıkarılmış olup eğimli kesme testlerinde gözlemlenenlerle karşılaştırılmıştır.

Polyester kompozitler ve beton arasındaki teması tanımlamak için sıfır kalınlıkta kohezif bir temas elemanı (zero thickness cohesive element) tanımlanmıştır. Şekil 31'de

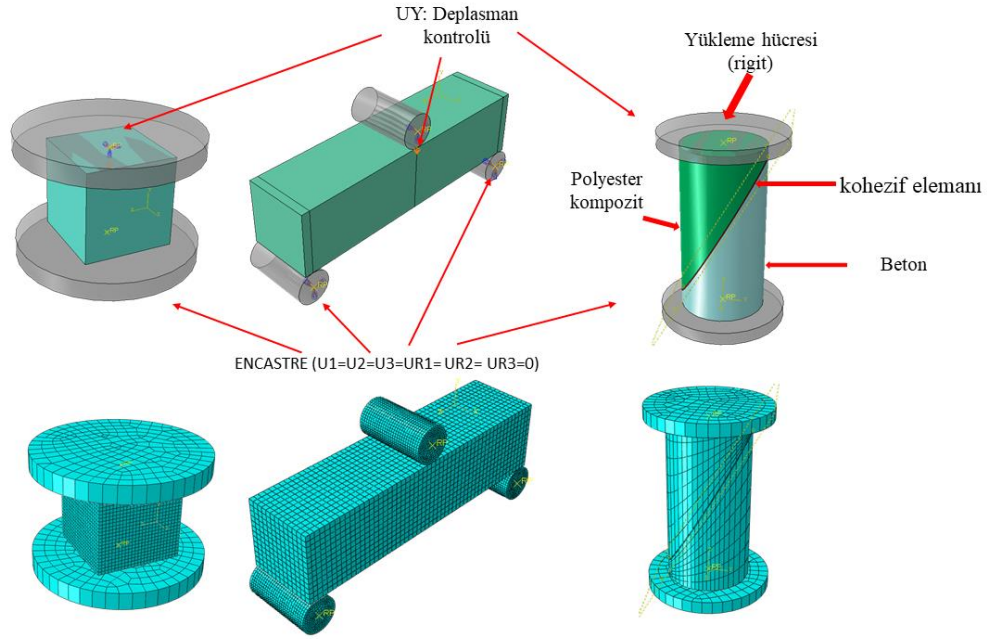
gösterildiği gibi temas elemanını tanımlamak için çift doğrusal kesme gerilimi-kayma ilişkisi kullanılmıştır. Bu ilişki, saf düzlem içi kesme kırılması moduna (mod II) dayanmaktadır ve ABAQUS'ta hasar ve kohezif davranış etkileşimi kullanılarak tanımlanmıştır.

Kohezif elemanı, iki eğik kesme test parçası arasındaki ara yüzey sertliği ( $K_t$ ) tarafından yönetilen gerilme-kayma eğrisinin ilk eğimini karakterize eder. Hasar unsuru ise üç bileşen kullanılarak öngörülmüştür; başlatma, evrim ve stabilizasyon (initiation, evolution and stabilization). İlk olarak, hasar başlangıcı, gerilme-kayma eğrisinin zirvesi ile karakterize edilen kayma kırılma modundaki ( $\tau_u$ ) maksimum nominal gerilmeyi temsil eder. İkinci olarak, bu modeldeki hasar gelişimi, stres-kayma eğrisi altındaki alanı gösteren mod II'deki ( $G_{II}$ ) kritik enerji salınım hızına dayalı olarak kullanılmıştır. Son olarak, hasar stabilizasyonu enerji dağıtım modülünü temsil eder ve viskozite katsayısı ( $V$ ) tarafından yönetilir. Genel olarak, düşük  $V$  değerleri hızlı enerji salınımını ifade eder ve eğimli kesme testindeki göçme ani olduğundan, tüm modeller için sabit bir düşük değer olan 0,001 seçilmiştir.  $\tau_u$ ,  $G_{II}$ ,  $V$  ve  $K_t$  değerleri, sonlu elemanlar simülasyonunun deneysel doğrulaması ve bu parametreler için geri çözüme yoluyla belirlenmiştir.

Gerilme-birim deformasyon eğrileri simülasyonlardan elde edilerek ve deneysel testlerde gözlemlenen davranışla karşılaştırılmıştır. Şekil 32, testlerin sonlu eleman modellerini ve bunun yükleme ve sınır koşullarını göstermektedir.



Şekil 31. ABAQUS'ta çekme-kayma kohezyonlu malzeme yasası



**Şekil 32.** Sonlu elemanlar modeli ve yükleme/sınır koşulları

### ***Gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon modeli***

Günümüzde karmaşık simülasyonlar, deneylerle bilgisayar modellerini oluşturmak ve doğrulamak için uygun girdileri gerektirmektedir. Basit simülasyonlar için, çift doğrusal gerilme-birim deformasyon eğrisinin kullanılması, sıradan kullanılabilir sonuçlar elde etmek için yeterlidir. Ancak elastik ve plastik kısımları ile mühendislik gerilme-birim deformasyon eğrisi dikkate alınarak en kesin sonuçlar elde edilir. Mühendislik gerilme-birim deformasyon eğrisi, deneysel testlerden kolaylıkla elde edilebilir. ABAQUS yazılımında, sonlu elemanlar yöntemini kullanan diğer programlarda olduğu gibi, gerilme-birim deformasyon verileri doğru bir şekilde girilmelidir, yani malzemelerin gerçek gerilme-birim deformasyon özelliklerini kullanmaktadır. Mühendislik ve gerçek gerilme-birim deformasyon eğrileri arasındaki dönüşüm basitçe logaritmik denklemlerle yapılabilir. Bu prosedür elastik bölgede ve kısmen plastik bölgede, akma noktasından nihai dayanım noktasına kadar kullanılabilir (Petrík and Ároch 2019).

Uygulanan yükün numunelerin geçerli kesit alanına bölünmesi olarak tanımlanan gerçek gerilme ( $\sigma$ ), yükün orijinal kesit alanına bölünmesi olan nominal ( $s$ ) gerilmeden önemli ölçüde farklı olmaktadır.

Bir çekme numunesinin ilk ve son uzunlukları sırasıyla  $l_0$  ve  $l$  olarak gösterilirse, mühendislik birim deformasyon ( $e$ )  $(l - l_0)/l_0$  oranına eşittir, gerçek birim deformasyon ( $\epsilon$ ) ise,  $d\epsilon$  artışı  $dl/l$  oranına eşit olacak şekilde tanımlanır. Burada  $dl$  uzunluktaki artış miktarıdır.

Çekme testi sırasında, uzunluktaki  $l_0$ 'dan  $l$ 'ye olan değişim ile belirtilen toplam gerçek birim deformasyon şu şekildedir:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + e) \quad (14)$$

Benzer şekilde, test esnasında yüksekliği  $h_0$ 'dan  $h$ 'ye düşürülen bir grubun basınç altında, mühendislik birim deformasyon  $e = (h_0 - h)/h_0$  büyüklüğündeyken gerçek birim deformasyonu şu şekildedir:

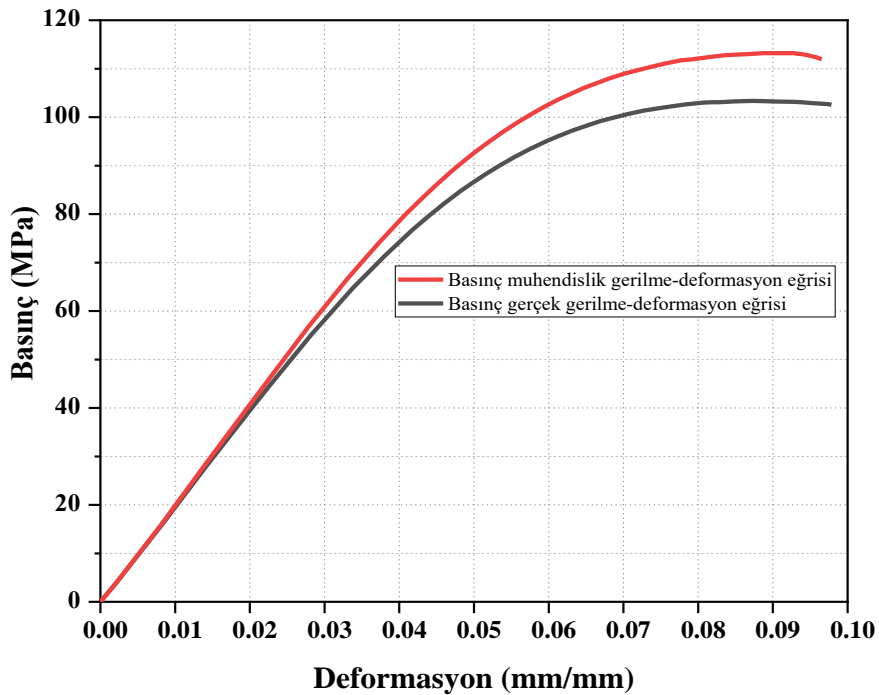
$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) = -\ln(1 - e) \quad (15)$$

Plastik bölgede birim deformasyon devam ederken, gerçek gerilme, çekme testi esnasında mühendislik gerilmesinden daha yüksek ve basınç altında mühendislik gerilmesinden daha düşüktür. Ancak, gerçek birim deformasyon, çekmedeki mühendislik birim deformasyonundan daha düşük ve birim deformasyon ilerledikçe basınçta mühendislik birim deformasyonundan daha yüksektir.

Sıkıştırılmaz bir malzeme için, nominal gerilme ( $s$ ) ile gerçek gerilme ( $\sigma$ ) arasındaki ilişki kolayca şu şekilde gösterilir:

$$s = \sigma \exp(\mp \varepsilon) \quad (16)$$

Burada, üst işaret çekme ve alt işaret basınca karşılık gelir (Chakrabarty 2010). Referans polyster kompozit grubunun mühendislik ve gerçek gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 33'te gösterilmektedir.

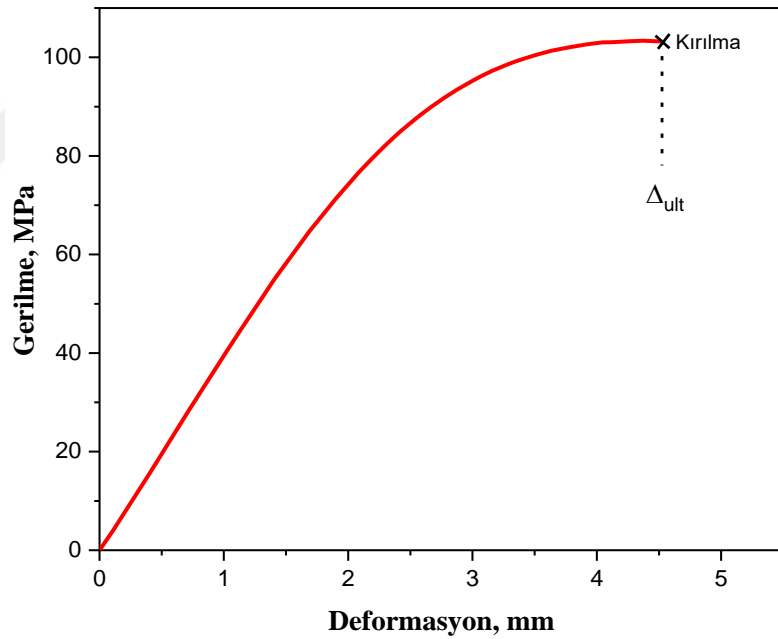


Şekil 33. Polimer kompozitlerin tipik monotonik gerilme-birim deformasyon eğrisi

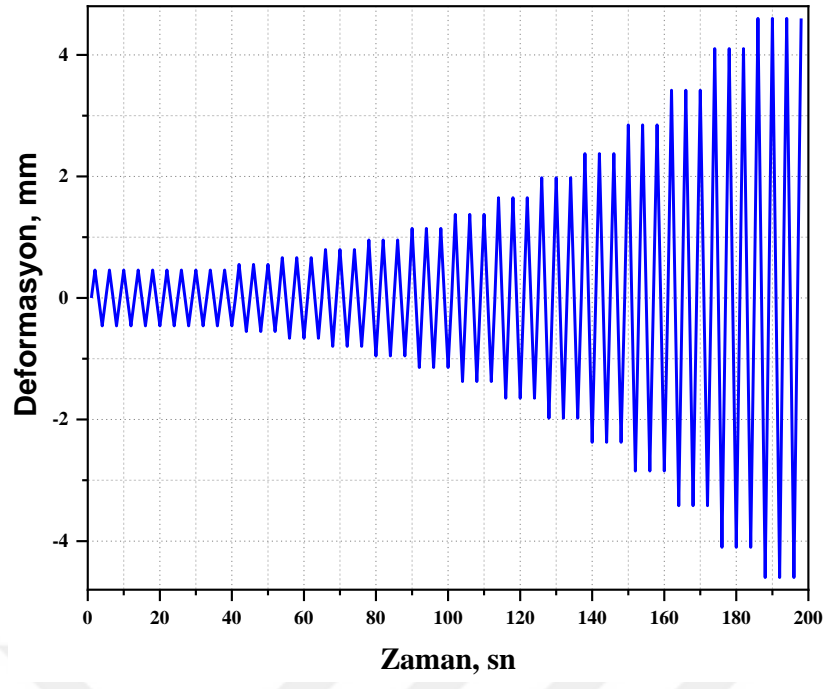
### Yükleme koşulları

Bu çalışmada FEMA 461 2007 tarafından önerilen yüklem koşulları kullanılmıştır. Polyester kompozitlerin yüklem protokolü eğrisini elde etmek için aşağıdaki adımlar kullanılmıştır:

- Polimer kompozitler üzerinde monotonik gerilme- birim deformasyon testi yapılır (Şekil 34). Daha sonra, numunelerin tam hasara uğradığı birim deformasyon ( $\Delta_{ult}$ ) tahmin edilir. Döngüsel test nihai birim deformasyonun 1/10'unda başlatılır,  $\Delta_1 = \Delta_{ult}/10$ . Döngüsel testin ilk adımında, 10 döngü birim deformasyon genliği  $\Delta_1$  uygulanır.
- Döngüsel testin 2'inci aşaması için, birim deformasyon genliği %20 artırılır ( $\Delta_2 = 1,2\Delta_1$ ). Örnekler üç döngüsel birim deformasyon genliğine,  $\Delta_2$  tabi tutulur.
- Sonraki her adım için, birim deformasyon genliği %20 artırılır ve numune üç birim deformasyon döngüsüne tabi tutulur. Döngüsel test, numune tamamen hasar görene kadar bu şekilde devam eder. Kısaca yüklem koşulları şekil 35'te gösterilmektedir.



Şekil 34. Saf polyester kompozit için monotonik gerilme-birim deformasyon eğrisi



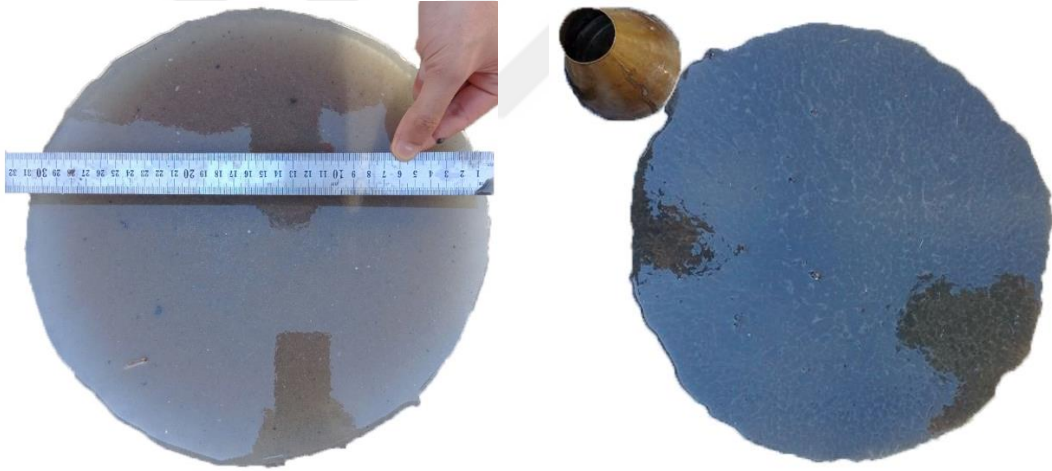
Şekil 35. FEMA 461'e göre yükleme koşulları

## ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölüm, deneylerden elde edilen bulguları ve bulgulardan hareketle yapılan değerlendirmeleri içermektedir. Polimer kompozit sonuçları, mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> içeren kompozitler için ayrı ayrı ele alınmış olup tozların bu kompozitler üzerindeki tekli ve ikili etkisi, kompozitlerin mekanik performansı, enstrümental analizi ve sonlu elemanlar yöntemlerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile incelenmiştir.

### Kompozitlerin Sertleşme Öncesi Yayılma Sonuçları

Şekil 36'da görüldüğü gibi polyester kompozitlerin yayılma çapı ölçülmüş olup referans grubu ile karşılaştırılmıştır. Referans grubu için maksimum yayılma çapı 36 cm iken, PM30, PS5, PM30N1 ve PS5N1 grupları için sırasıyla 35, 34, 32 ve 30 cm'dir. Bu sonuçlar, polyester reçineye dolgu maddelerinin eklenmesinin kompozitlerin akışkanlığını azalttığını göstermektedir.



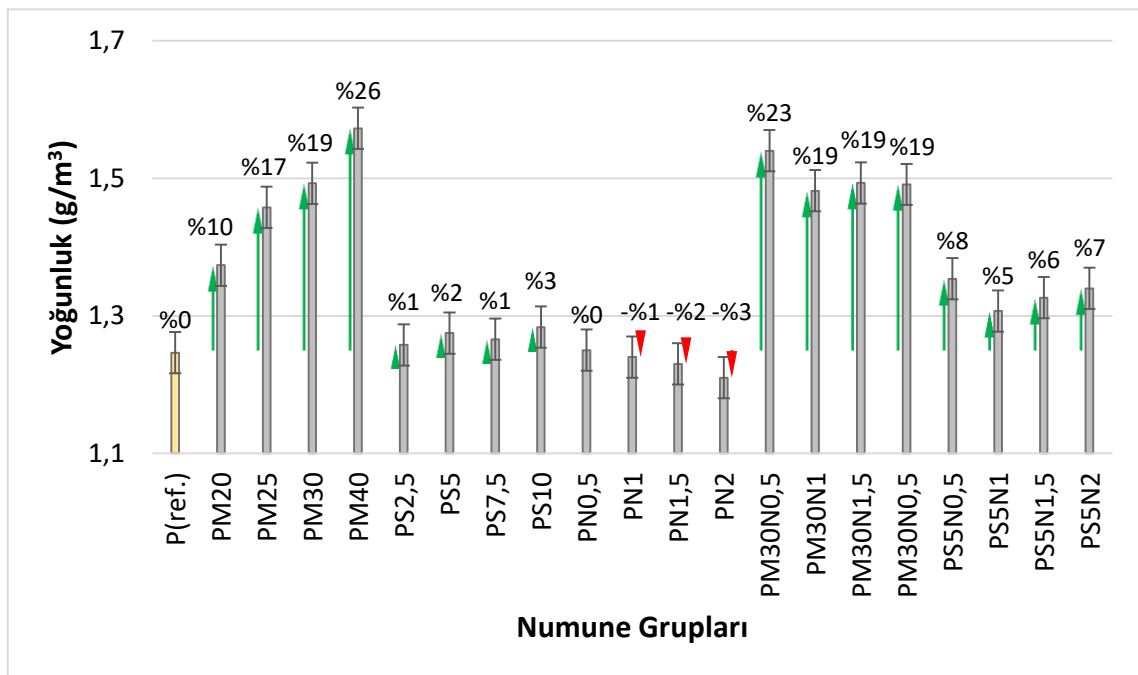
Şekil 36. Polimer kompozitlerin yayılma testi

### Fiziko-Mekanik Sonuçları

#### Yoğunluk

Yoğunluk değer sonuçları Tablo 11'de, yoğunluk değer grafiği ise Şekil 37'te verilmiştir. Sonuçlara bakılınca mermer tozu ilave edilmesinin, yüksek mermer tozu yoğunluğu (2,7 g/cm<sup>3</sup>) nedeniyle polimer kompozitlerin yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, mermer tozu parçacıkları grupların gözenekliliğini azaltmıştır. PM20, PM25, PM30 ve PM40 grupları için yoğunluk değerleri sırasıyla %10, 17, 19 ve 26

oranlarında kontrole göre artmıştır. Mermer tozu içeren grupların yoğunluğu mermer tozu miktarı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Öte yandan, silis dumanı içeren grupların yoğunluğu, saf polyester gruplarına kıyasla biraz daha artmıştır. PS2,5, PS5, PS7,5 ve PS10 grupları için yoğunluk değerleri sırasıyla %1, 2, 1 ve 3 oranlarında kontrole artış göstermiştir. Bu, silis dumanının yoğunluğunun polyester reçineye yakın olması ile açıklanabilir. Ayrıca, silis dumanı gruplarının toplam gözenekliliğinde küçük bir azalma olmuştur. Yalnızca n-SiO<sub>2</sub> içeren numunelerin yoğunluğunda küçük bir azalma olmuştur. N-SiO<sub>2</sub> yoğunluğu polyester reçineye kıyasla daha küçük olduğundan böyle bir sonuç elde edilmiştir. N-SiO<sub>2</sub> içeren gruplarda toplam azalma %1-3 arasındadır bu düşük oran eklenen nano-toz miktarının çok az olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 37. Polimer kompozitlerin yoğunluk değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri

Tablo 11. Grupların Fiziko-Mekanik Özellikleri

Grup kodu	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	UDH (m/s)	Dinamik elastisite modülü (GPa)	Basınç dayanımı (MPa)	Eğilmeye çekme dayanımı (MPa)	Tokluk (MJ·m <sup>-3</sup> )	Elastisite modülü (GPa)
P (Ref.)	1,25	2420	4,36	103,90	32,00	9,15	2,04
PM20	1,37	2539	5,25	142,30	35,60	8,59	2,88
PM25	1,46	2597	5,86	134,80	24,30	9,83	2,25
PM30	1,49	2593	5,96	142,60	32,50	11,96	3,54
PM40	1,57	2683	6,72	139,90	39,80	9,10	3,83
PS2,5	1,26	2475	4,59	123,60	54,10	5,59	2,00
PS5	1,27	2462	4,58	146,50	47,70	6,58	2,54

**Tablo 11.** (devamı)

PS7,5	1,27	2534	4,85	137,60	37,50	5,39	3,50
PS10	1,28	2415	4,44	126,80	21,80	5,44	2,60
PN0,5	1,25	2578	4,94	136,8	46,60	4,37	3,02
PN1	1,24	2565	4,85	141,8	43,00	5,05	3,17
PN1,5	1,23	2525	4,67	121,4	46,60	2,86	3,28
PN2	1,21	2578	4,78	120,2	40,00	3,14	3,03
PM30N0,5	1,54	2552	5,97	119,3	50,60	11,18	3,01
PM30N1	1,48	2614	6,02	135,60	45,80	11,85	3,53
PM30N1,5	1,49	2566	5,84	134,70	44,00	13,21	3,45
PM30N2	1,49	2579	5,90	124,30	47,70	11,04	3,16
PS5N0,5	1,35	2445	4,80	111,50	55,80	3,46	2,90
PS5N1	1,31	2506	4,89	143,10	55,40	5,81	3,25
PS5N1,5	1,33	2492	4,91	134,60	44,20	6,34	3,34
PS5N2	1,34	2513	5,04	126,50	51,10	4,55	3,11

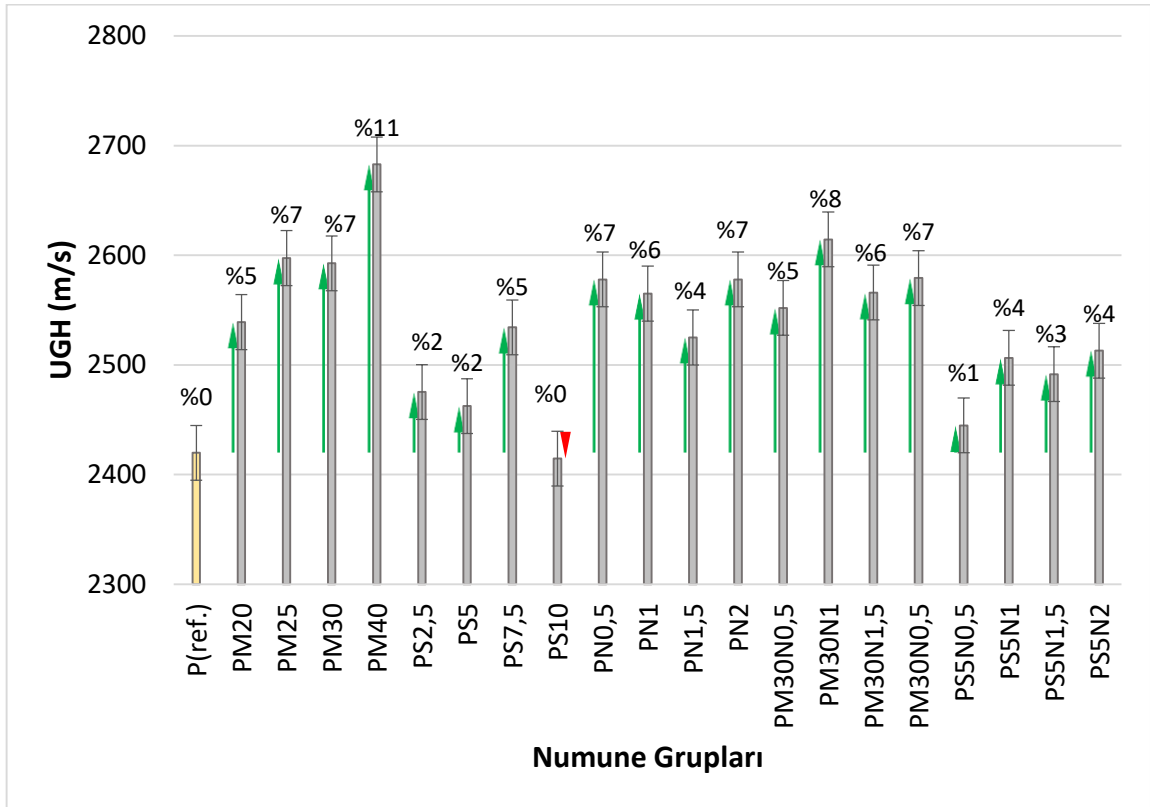
#### Ultrases geçiş hızı (UGH)

Ultrases geçiş hızı sonuçları, Tablo 11’de ve grafiği ise Şekil 38’de gösterilmiştir. Mermer tozu (PM) içeren gruplarda, mermer tozunun oranı arttıkça, dalga hızının da artmış olduğu gözlenmiştir. PM20, PM25, PM30 ve PM40 grupları için UGH değerleri sırasıyla %5, 7, 7 ve 11 oranlarında artmıştır. PM oranlarındaki bu artışın nedeni numunelerin yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur. Silis dumanı partikülleri, polyester reçinesine yakın bir yoğunluk değerine sahip olduğundan, dalga hızı tüm silis dumanı gruplarında referans grubuna yakın olmuştur.

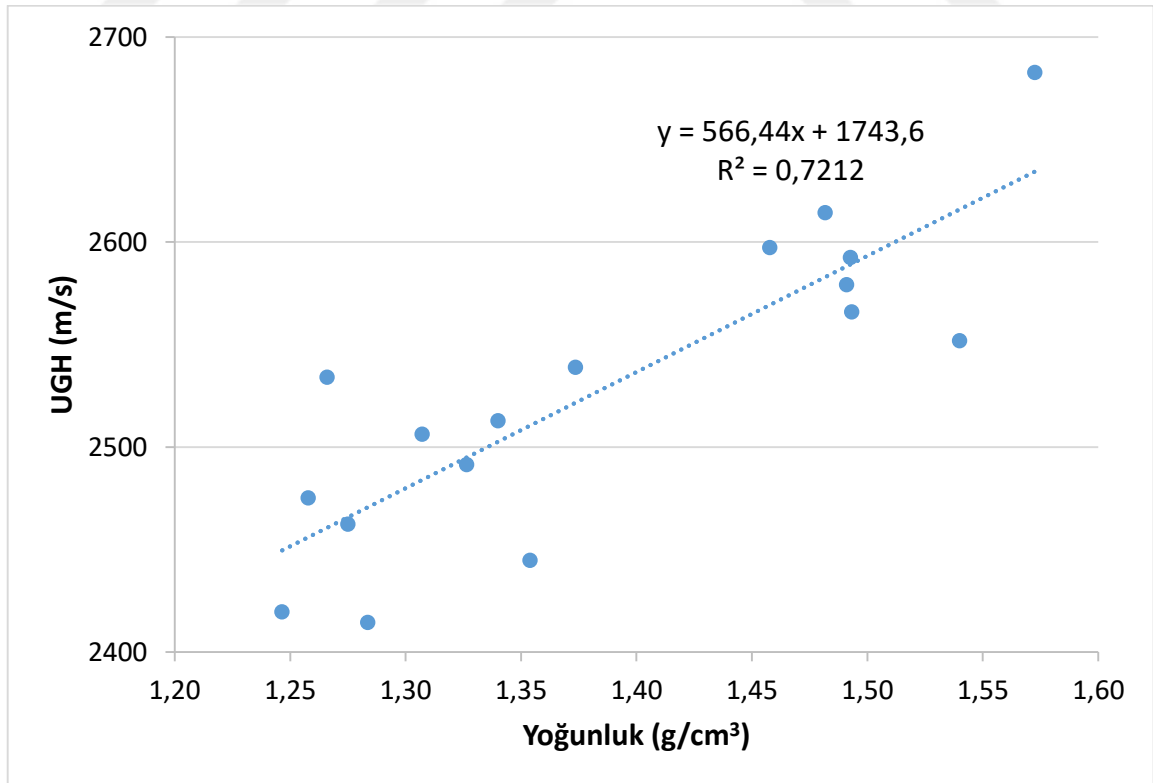
Silis dumanını % 7,5 kadar ilave ettiğimizde, gruplarındaki dalga hızı artmış, daha sonra çok küçük bir azalma gözlenmiştir. PS2,5, PS5, PS7,5 ve PS10 grupları için UGH değerleri sırasıyla %2, 2, 5 ve 0’dır. Bunun nedeni, yüksek silis duman içeriğine sahip olan grupların daha yoğun olmasıdır. Ek olarak, silis dumanı %7,5’tan fazla ilave edildiğinde, topaklanma ve daha büyük parçacıklar oluşturmaktadır. Böylece, büyük parçacıklar, matristeki gözenek sayısını arttırmış ve bu da grup boyunca dalga hareket süresini arttırmıştır.

Polimer kompozitlere n-SiO<sub>2</sub>’nın tek olarak veya mermer tozu/silis dumanı ile kombinasyon halinde ilave edilmesi, tüm polimer kompozitlerin UGH değerini arttırmıştır. Bunun başlıca nedeni, n-SiO<sub>2</sub>’nin gözenekleri doldurma ve mikroyapıyı geliştirme yeteneğine sahip olmasıdır. Mermer tozu içeren örneklerde %1 n-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi en yüksek dalga hızını vermiştir. Silis dumanı içeren polimer kompozit gruplarında ise, %1 ve %2 n-SiO<sub>2</sub> ilave

edildiğinde UGH değerleri maksimum olmuştur. Yoğunluk ve UGH arasındaki korelasyon Şekil 39’da gösterilmektedir. Yoğunluk ve dalga hızı için varyans oranı 0,7212 hesaplanmıştır.



Şekil 38. Numunelerin ultrases geçiş hızı (UGH) değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri



Şekil 39. UGH ve yoğunluk arasındaki ilişki

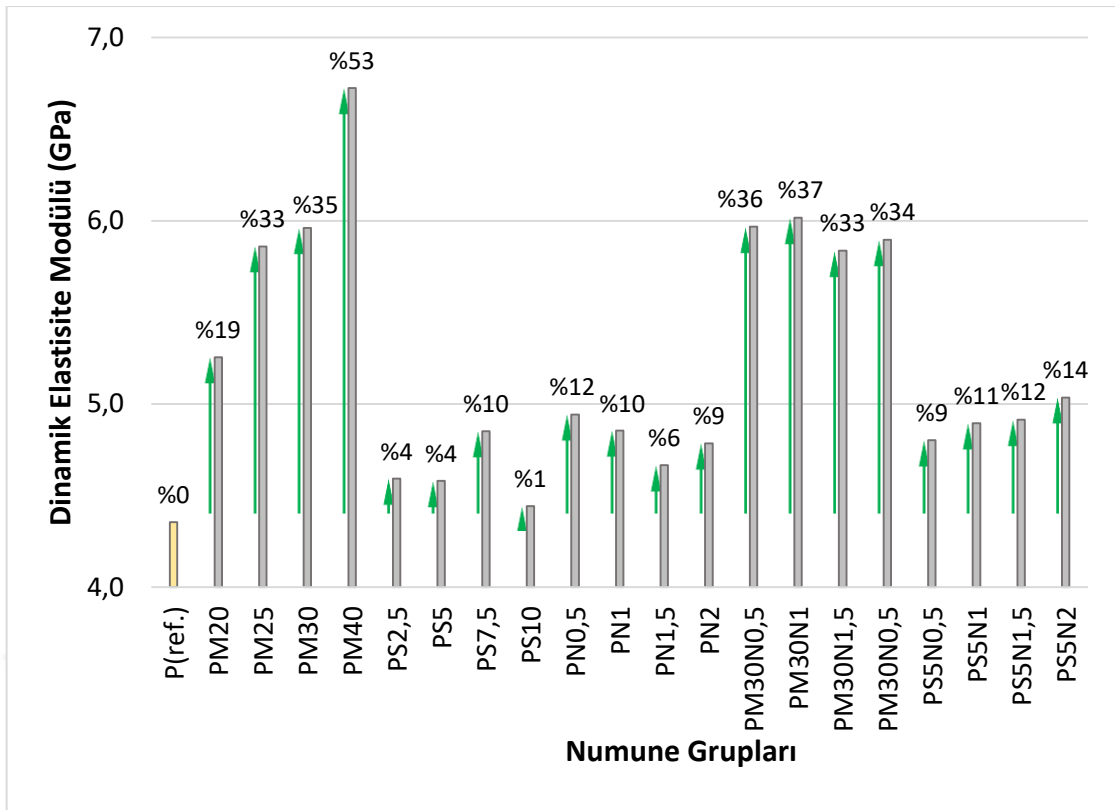
## Dinamik elastisite modülü

Şekil 40 ve Tablo 11, grupların dinamik elastisite modülünü göstermektedir. Polimer kompozitlere mermer tozu ilave edilmesiyle dinamik elastisite modülü önemli ölçüde etkilenmiştir. PM20, PM25, PM30 ve PM40 grupları için dinamik elastisite modülü değerleri sırasıyla %19, 33, 35 ve 53 oranlarında artmıştır. Mermer tozu miktarı, dinamik elastisite modülü ile doğrusal orantılıdır; mermer tozu miktarı arttıkça, dinamik elastisite modülü de artmıştır. Bunun nedeni, gruplarda mermer tozu ilave miktarı arttıkça, grupların yoğunluğunun yanı sıra UGH değerleri de yükselmiştir.

Silis dumanı içeren gruplarda, tüm grupların yoğunluğu ve UGH değerleri küçük miktarda artış göstermiştir. Bu nedenle dinamik elastisite modülünde %10'a kadar bir artış meydana gelmiştir. PS2,5, PS5, PS7,5 ve PS10 grupları için dinamik elastisite modülü değerlerinde kontrole göre sırasıyla %4, 4, 10 ve 1 artış meydana gelmiştir.

Tekli n-SiO<sub>2</sub> içeren örneklerde, dinamik elastisite modülünde küçük bir değişiklik olmuştur, bunun nedeni kullanılan n-SiO<sub>2</sub> miktarı UGH değerleri arttırmıştır. PN0,5, PN1, PN1,5 ve PN2 grupları için dinamik elastisite modülünde kontrole göre sırasıyla %12, 10, 6 ve 9 artış meydana gelmiştir.

Mermer tozlu n-SiO<sub>2</sub> içeren numunelerde dinamik elastisite modülü değerleri hemen hemen aynı olmuştur. Öte yandan, silis dumanlı n-SiO<sub>2</sub> içeren numunelerde n-SiO<sub>2</sub>'nin eklenmesi ile dinamik elastisite modülünde bir artış gözlenmiştir. PS5N0,5, PS5N1, PS5N1,5 ve PS5N2 grupları için dinamik elastisite modülü değerleri sırasıyla %9, 11, 12 ve 14 oranlarında artış göstermiştir. Bunun nedeni, silis dumanı parçacıklarının küçük olması ve nano-parçacıkların daha küçük boşlukları doldurması ve daha kompakt bir kompozit oluşturmasıdır.



**Şekil 40.** Polimer kompozitlerin dinamik elastisite modülü değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri

### Basınç dayanımı

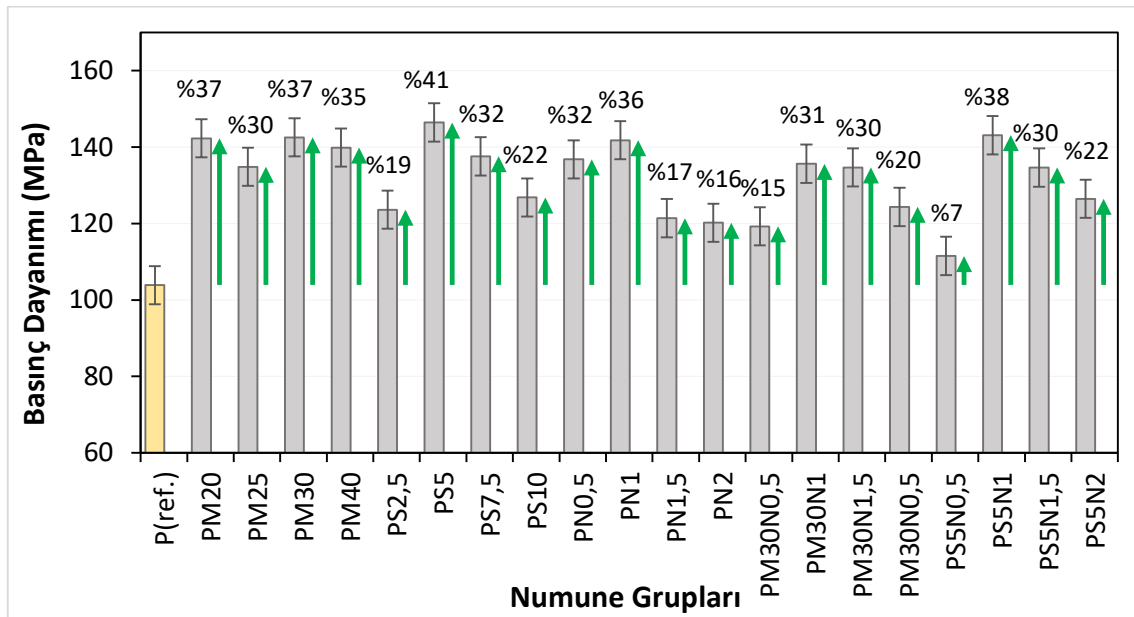
Basınç dayanım değerleri Tablo 11’de verilmiştir. Şekil 42 (a-f)’de saf polysterin yanı sıra mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> ilave edilmiş polyster kompozitlerin basınç altında gerilme-birim deformasyon eğrilerini göstermektedir. Silis dumanı/n-SiO<sub>2</sub> veya silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> ile ilave edilmiş polimer kompozitlerde gerilme, birim deformasyon ile doğrusal olarak artmış ve ardından numunelerde gevrek bir kırılma davranışı göstermiştir. Öte yandan, sadece mermer tozu ilave edilmiş grupların kırılma deformasyonu, silis dumanı ilave edilmiş veya saf polimer gruplarına kıyasla yaklaşık %50 daha büyük bir deformasyon göstermiştir. Mermer tozu ve n-SiO<sub>2</sub> ilave edilmiş polimer kompozitler ise, saf polimer gruplarına göre %20 daha büyük bir kırılma deformasyonu göstermiştir. Artan deformasyon, sünek malzemelerin bariz bir özelliğidir. Bu, sadece mermer tozu ve/veya mermer tozu ile n-SiO<sub>2</sub> ilaveli polimer kompozitlerinin, harici yüke maruz kaldıklarında daha fazla deformasyonla daha fazla enerji emdiği anlamına gelir. Başka bir deyişle, nano-partiküllerin polimer kompozitlere ilave edilmesinin, grupların kırılması sırasında çatlak yolunu etkileyebileceğinden, tokluk performansını artırabildiğini göstermektedir (Zhao *et al.* 2017).

Polimer kompozitlerinin gerilme-birim deformasyon eğrilerinin üç bölgeye ayrılabilirdiği de gösterilmektedir. İlk olarak, "taban bölgesi" adı verilen doğrusal olmayan bir bölge oluşmaktadır. Bu bölge, numunelerin yüklenmesi esnasında oluşur ve saf polimer için birim

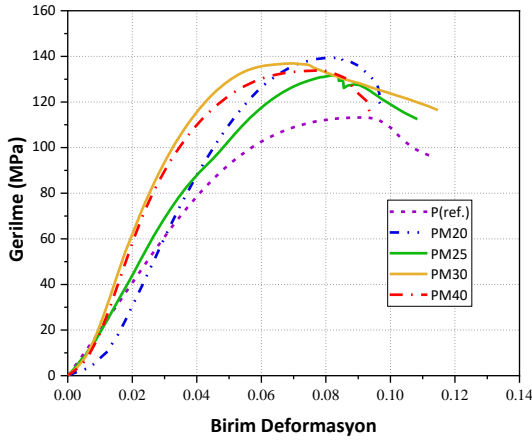
deformasyon değerinin %3'üne kadar ve güçlendirilmiş polimer kompozitler için %10'u kadardır. İkinci bölge doğrusal bir ilişkiye sahiptir. Bu bölgeden sonra kompozitlerin üçüncü bölgesi yani kırılma bölgesi meydana gelmektedir.

Basınç dayanım değerleri Tablo 11'de özetlenmiş ve Şekil 41'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %30'a kadar mermer tozu içeren numunelerin basınç dayanımında artış olduğu gözlenmiştir, ardından %40 mermer tozu içeren gruplarda küçük bir düşüş gözlenmiştir. Benzer şekilde, %5'e kadar silis dumanı içeren numuneler basınç dayanımında bir artış göstermiş ve daha yüksek silis dumanı oranına sahip gruplarda bir azalma gözlenmiştir. Silis dumanı parçacıkları mikro boyutlu olduğundan, %5'in üzerindeki oranlar, matris içinde topaklanma eğilimindedir. Bu topaklanmış parçacıklar, matris içinde basınç dayanımını doğrudan etkileyen zayıf alanlara neden olmaktadır.

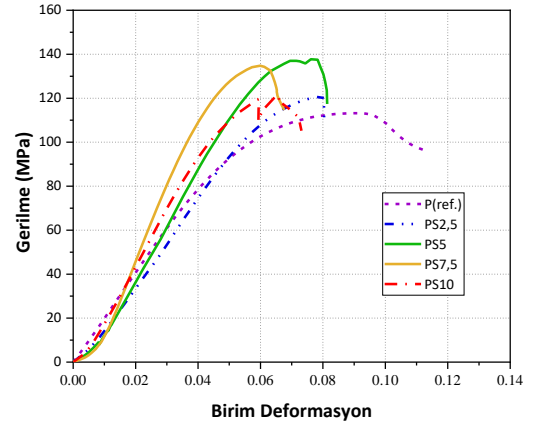
Polimer kompozitlere n-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi örneklerin basınç dayanımını arttırmış ve en iyi sonuçlar %1 n-SiO<sub>2</sub> içeren gruplarda gözlenmiştir. Atık malzemelerin nano-partiküller ile kombine etkisini incelemek için optimum mermer tozu/silis dumanı oranlarına n-SiO<sub>2</sub> ilave edilmiştir. En iyi basınç dayanımı değerinin %1 n-SiO<sub>2</sub> ilave edilen grupta gözlendiğini göstermiştir. N-SiO<sub>2</sub>'nin mermer tozu/silis dumanı parçacıklarına eklenmesinin, sadece mermer tozu/silis dumanı gruplarına kıyasla dayanımda bir miktar azalma gösterdiği söylenebilmekte bunun nedeninin, SEM görüntülerinden (Şekil 48 e ve f) gözlemlendiği gibi, n-SiO<sub>2</sub>'nin topaklanma ve daha büyük parçacıkları oluşturma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır.



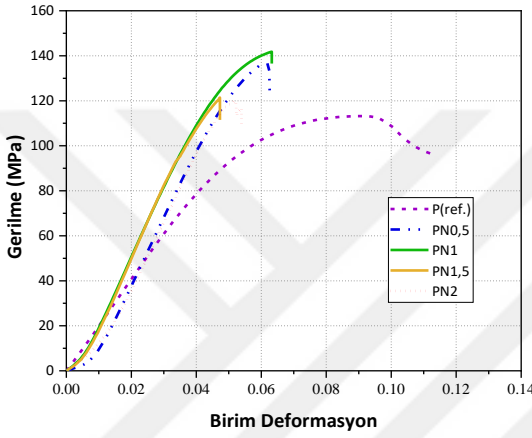
Şekil 41. Polimer kompozitlerin ortalama basınç dayanımı sonuçları ve kontrole göre değişim yüzdeleri



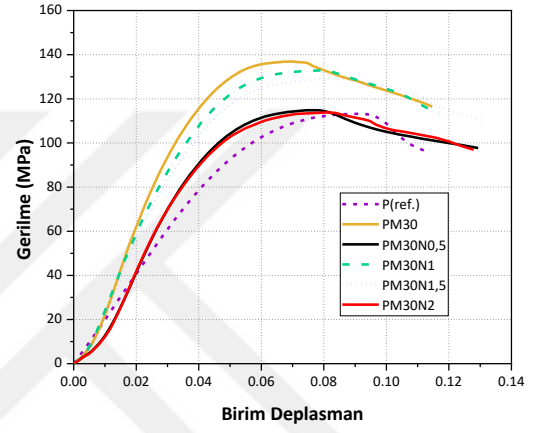
a) Mermer tozu içeren grupların gerilme-birim deformasyon eğrileri



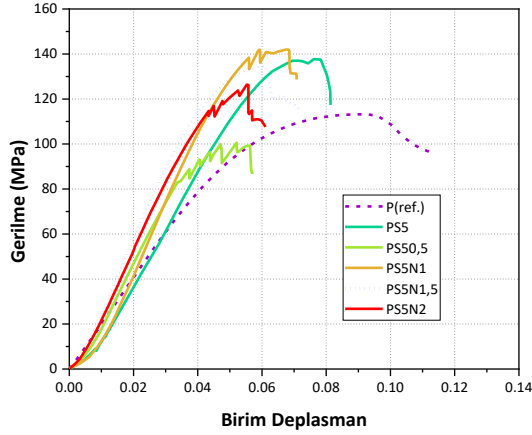
b) Silis dumanı içeren grupların gerilme-birim deformasyon eğrileri



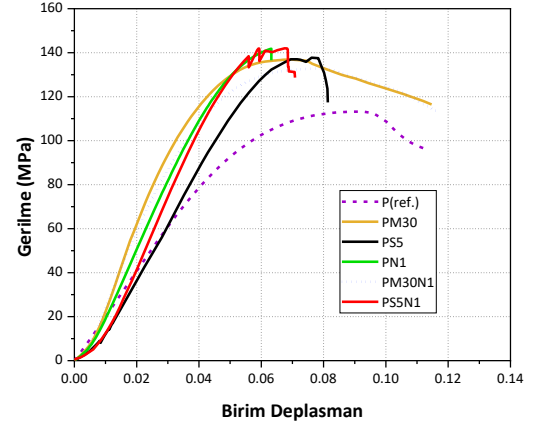
c) N-SiO<sub>2</sub> içeren grupların gerilme-birim deformasyon eğrileri



d) %30 Mermer tozlu n-SiO<sub>2</sub> içeren grupların gerilme-birim deformasyon eğrileri



e) %5 Silis dumanlı n-SiO<sub>2</sub> içeren grupların gerilme-birim deformasyon eğrileri



f) Tüm gruplardan optimum örneklerin gerilme-birim deformasyon eğrileri

**Şekil 42.** Polimer kompozitlerin basınç gerilme-birim deformasyon eğrileri

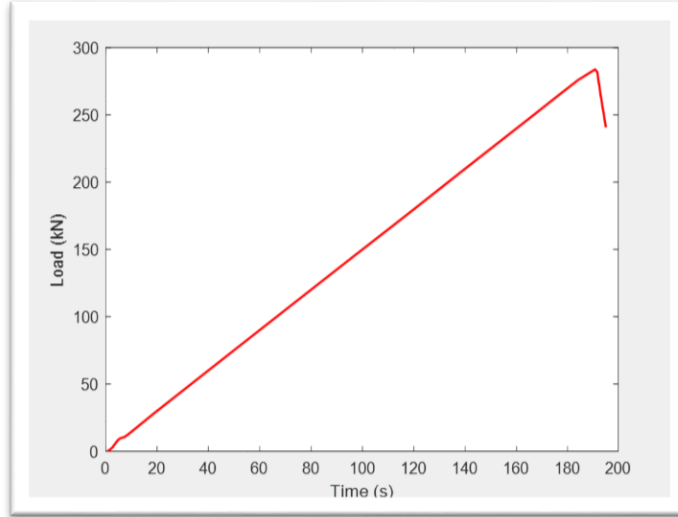
Saf polyester kompozitlerin tipik yükleme-zaman ve deformasyon-zaman eğrileri, sırasıyla Şekil 43 ve Şekil 44'te gösterilmektedir. Bu eğriler, diğer tüm kompozitler için benzer eğilimler göstermiştir. Saf polyester kompozitin gerilme-zaman eğrisinin en iyi uyum modeli,

genel Gauss modeline (Denk. 4.1) göre hesaplanmıştır. Katsayılar %95 güven aralığında hesaplanmış ve uyum iyiliği indekslerinin SSE, R-kare, düzeltilmiş R-kare ve RMSE için sırasıyla 0,000125, 0,9961, 0,9956 ve 0,00189 olduğu bulunmuştur.

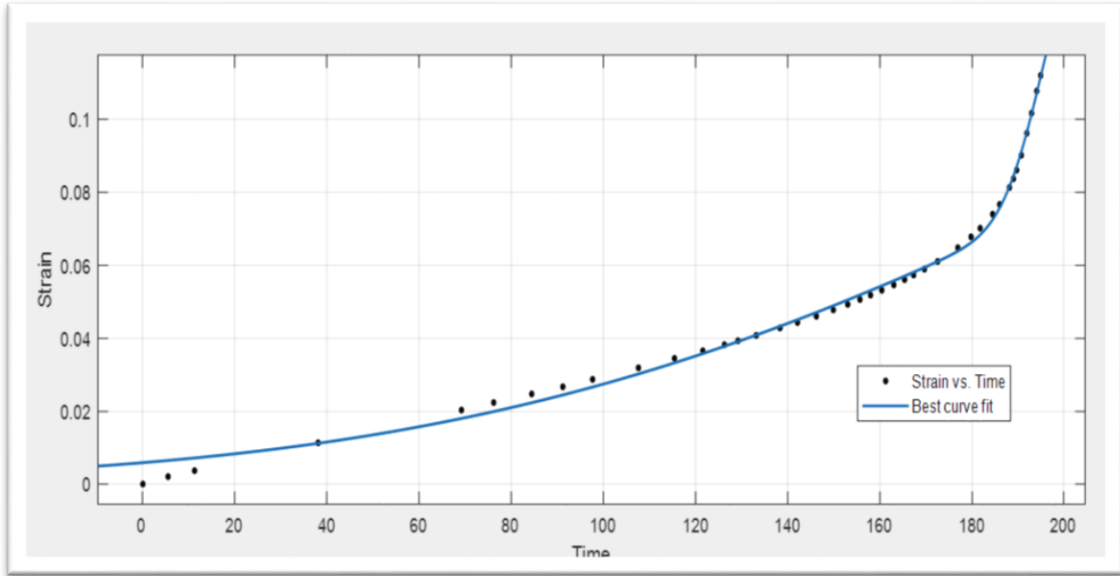
$$f(x) = a_1 * \exp(-((x - b_1)/c_1)^2) + a_2 * \exp(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2) \quad (17)$$

Burada,

$$a_1 = 0,06476, b_1 = 203,7, c_1 = 11,89, a_2 = 0,1394, b_2 = 353,1, c_2 = 198,7$$



Şekil 43. Grupların yüklemeye-zaman eğrisi



Şekil 44. Grupların zaman-birim şekil değiştirme ilişkisi

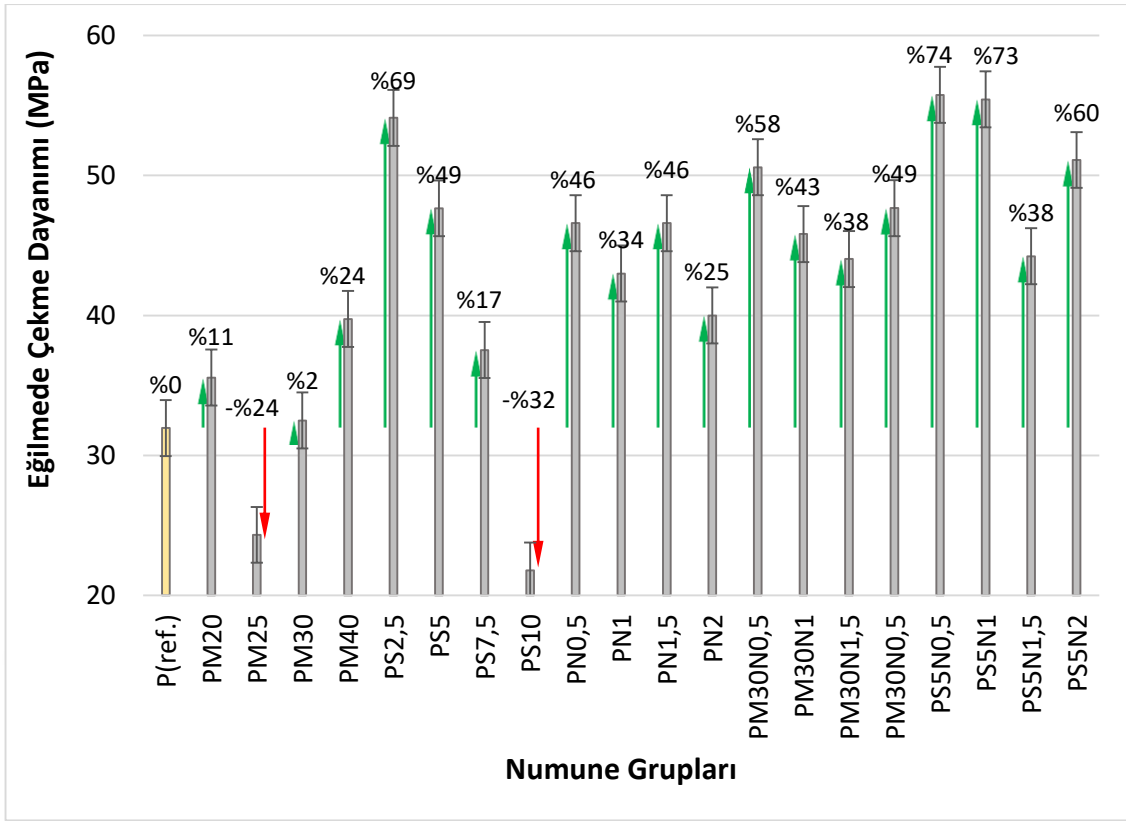
#### Eğilmeye çekme dayanımı

Üç noktalı eğilme testi sonuçları Tablo 11'de özetlenmiş ve Şekil 45'te gösterilmektedir. P(ref.) ile karşılaştırıldığında PM20, PM30 ve PM40 gruplarında sırasıyla

%11, %2 ve %24'lük bir artış meydana gelirken, PM25'in eğilmede çekme dayanımlarında %24 oranında azalma meydana gelmiştir. PM40 grubunda, gerilmeler partikül ve matris arayüzünden aktarılarak maksimum gerilme dayanımı elde edilmiştir. Silis dumanı gruplarında ise eğilmede çekme dayanımı silis oranı artmasıyla azalmıştır. Saf polyester grubuna göre, PS2,5, PS5, PS7,5 gruplarında sırasıyla %69, 49 ve 17'lik bir artış meydana gelirken, PS10'nin eğilmede çekme dayanımlarında %32 oranında azalma meydana gelmiştir.

Tek n-SiO<sub>2</sub> ilavesinin eğilmede çekme dayanımını arttırdığını göstermiştir. PN0,5, PN1, PN1,5 ve PN2 grupları için sırasıyla %46, 34, 46 ve 25'lik bir artış gözlenmiştir. %0,5 nano-partikül kullanımıyla maksimum eğilmede çekme dayanımı değerlerini vermiştir. Polimer kompozitin eğilmede çekme dayanımındaki artış, gerilmelerin daha güçlü n-SiO<sub>2</sub> parçacıklarına aktarılmasından kaynaklanmaktadır. N-SiO<sub>2</sub>, gerilmenin çoğunu polimer reçine matrisinden neredeyse daha fazla taşır. Polimer matrisi ve nano-parçacıklar arasındaki arayüz yapışmanın çok önemli olduğu zayıf yapışmanın yük aktarımının başarısız olmasına sebep olduğu söylenebilir (Alameri and Oltulu 2020, 2021). N-SiO<sub>2</sub> mermer tozu veya silis dumanı/mermer tozu ile kombinasyon halinde eğilmede çekme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. %30 mermer tozlu n-SiO<sub>2</sub> içeren numunelerde eğilmede çekme dayanımı PM30N0,5, PM30N1, PM30N1,5, PM30N2, grupları için sırasıyla %58, 43, 38 ve 49 oranlarında bir artış meydana getirmiştir. Öte yandan, %5 silis dumanlı n-SiO<sub>2</sub> içeren numunelerde eğilmede çekme dayanımı PS5N0,5, PS5N1, PS5N1,5, PS5N2, grupları için sırasıyla kontrole göre %74, 73, 38 ve 60 oranlarında bir artış göstermiştir. Bunun nedeni, silis dumanı parçacıklarının küçük olması ve nano-parçacıkların daha küçük boşlukları doldurması ve daha kompakt bir kompozit oluşturmasıdır.

Bulunan sonuçları desteklemek için yapılan görüntüleme tekniklerinden SEM analizinde (Şekil 48), güçlendirilmiş polimer kompozitlerin pürüzlü bir kırılma yüzeyine sahip olduğunu, güçlendirilmemiş polimer kompozitlerin ise düzgün (pürüzsüz) bir kırılma yüzeyine sahip olduğu görülmüştür. Gruplar eğilme yüküne maruz kaldığında, filler maddeler çatlak yayılmasını önlemektedir. Bunun nedeni, çatlak ucunun filler dolgularla karşılaşım yolunu değiştirebilmesidir. Bu nedenle kompozitler için hasar sürecinde daha fazla kırılma enerjisine ihtiyaç duyulur. Öte yandan, güçlendirilmemiş gruplar pürüzsüz kırılma yüzeyine sahip olur, bu durum mikro çatlağın daha kolay yayıldığını gösterir ve bu da mukavemeti zayıflatır (Zhao *et al.* 2017).



Şekil 45. Polimer kompozitlerin eğilimde çekme dayanımı ve kontrole göre değişim yüzdeleri

### Tokluk

Sonuçlar Tablo 11 ve Şekil 46'da özetlenmiştir. Genel olarak, polimer kompozitler grubu mermer tozunun ilavesi kompozitlerin sünekliliğini arttırmıştır. Saf polyester ile karşılaştırıldığında PM25 ve PM30 gruplarında sırasıyla %7 ve %31'lik bir artış meydana gelirken, PM20'nin tokluğunda %6 oranında azalma meydana gelmiştir. Polyester reçinelere %30 mermer toz dolgusu eklendiğinde en yüksek tokluk değeri elde edilmiştir. Bunun nedeninin, mermer tozunun matris içinde homojen olarak dağılması ve mermer tozunun bu kullanım oranından fazlasının matriste zayıf bölgeler oluşturması olarak düşünülmektedir.

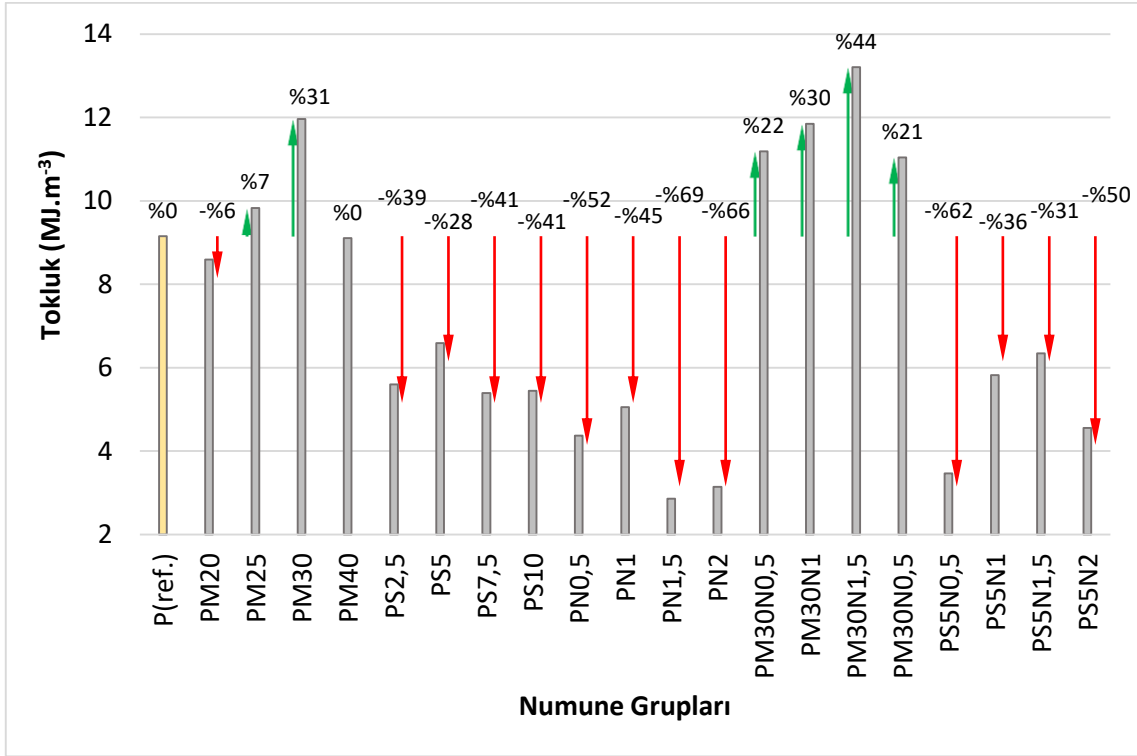
Silis dumanının polyester reçinesine eklenmesi, kompozitlerin gevrekliğini önemli ölçüde artmıştır, yani silis dumanı oranı arttıkça tokluk değeri azalmıştır. PS2,5, PS5, PS7,5 ve PS10 grupları için tokluk değerlerinde sırasıyla kontrole göre %39, 28, 41 ve 41 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

Silis dumanına benzer şekilde, sadece n-SiO<sub>2</sub> ilavesi daha gevrek kompozitler elde edilmiştir. PN0,5, PN1, PN1,5 ve PN2 grupları için tokluk değerlerinde sırasıyla %52, 45, 69 ve 66 oranlarında azalma belirlenmiştir.

Mermer tozlu n-SiO<sub>2</sub> içeren polyester kompozitlerin tokluğu önemli ölçüde artmış, PM30N0,5, PM30N1, PM30N1,5 ve PM30N2 grupları için tokluk değerlerinde sırasıyla %22, 30, 44 ve 21 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Mermer tozlu gruplara %1,5 oranında n-

SiO<sub>2</sub> ilavesi optimum değer olarak belirlenmiş, bu sonucun, mermer tozunun polyester kompozit matrislerinde çatlak sapması ve plastik deformasyon gibi çeşitli sertleştirme mekanizmalarına neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Silis dumanlı polyester kompozitlere n-SiO<sub>2</sub> ilavesinin daha yüksek bir elastisite modülüne, ancak daha düşük bir uzama yüzdesine yol açtığı gözlenmiştir. PS5N0,5, PS5N1, PS5N1,5 ve PS5N2 grupları için tokluk değerlerinde sırasıyla %62, 36, 31 ve 50 oranlarında azalma meydana gelmiştir.



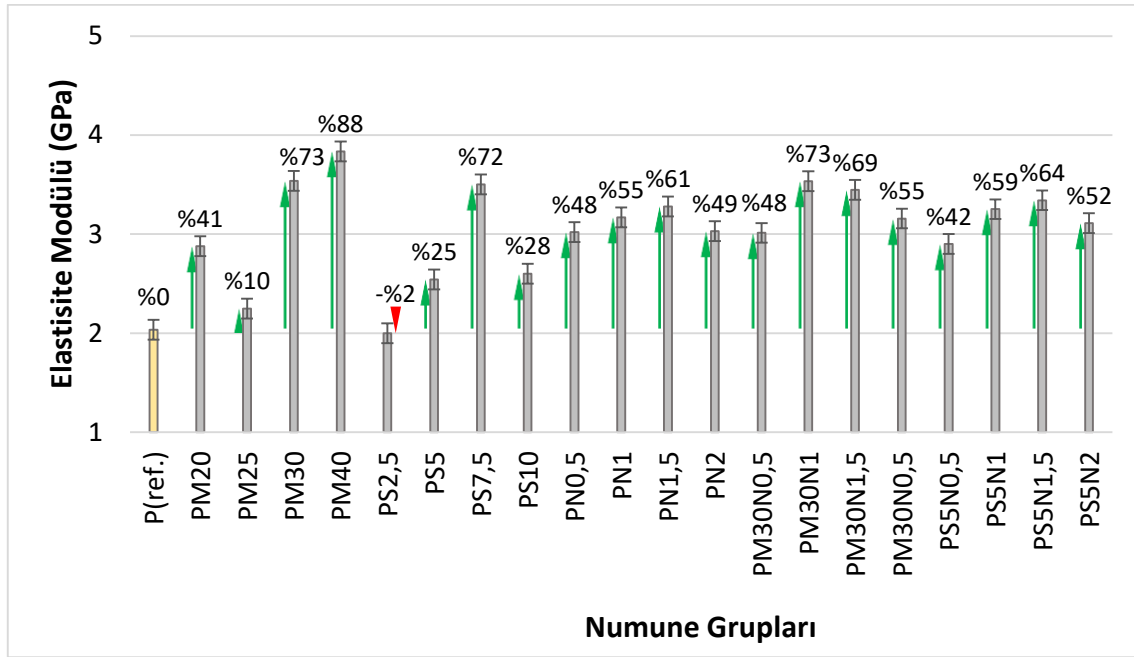
Şekil 46. Polimer kompozitlerin tokluk değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri

#### Elastisite modülü değerleri

Tablo 11 ve Şekil 47’de listelenen sonuçlar, polimer kompozitlerin elastisite modülü değerlerini göstermektedir. Polimer kompozitlere mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> eklenmesinin numunelerin elastisite modülünü arttırdığı görülmektedir. Bu artışın sebebi ise dolgu maddelerinin kristal bir yapıya sahip olmasıdır. Polimer kompozit fazında artan kristalinite, daha yüksek bir elastisite modülü oluşturabilir. Çünkü kristal faz, amorf fazdan daha serttir (Rothon 2003).

Polyester kompozitlere mermer tozu ilavesi PM20, PM25, PM30 ve PM40 grupları için elastisite modüllerini sırasıyla %41, 10, 73 ve 88 oranlarında artırmıştır. Silis dumanı içeren gruplarda elastisite modülü PS5, PS 7,5 ve PS10 için sırasıyla %25, 72 ve 28 oranlarında artarken, PS2,5 grubunda %2 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, tek n-SiO<sub>2</sub> ilavesi, kompozitlerin elastisite modülünü %48 ile %61 oranları arasında artırmıştır.

N-SiO<sub>2</sub>'ların mermer tozu/silis dumanına ilave edilmesi ile elastisite modülünde artış görülmüş, en yüksek elastisite modülü PM30N1 ve PS5N1,5 gruplarında sırasıyla %73 ve %64 oranlarında kontrole göre artış yüzdesi ile elde edilmiştir. Kompozitlere sadece n-SiO<sub>2</sub>'nın ve/veya silis dumanı ile kombinasyon halinde eklenmesinin daha yüksek bir elastisite modülü, ancak daha düşük bir uzama yüzdesi oluşturduğu görülmüştür. Bu sonuç, dolgu maddelerinin varlığı nedeniyle kompozitin davranışının sünekten gevrek davranışa doğru değiştiği anlamına gelmektedir.



Şekil 47. Polimer kompozitlerin elastisite modülü değerleri ve kontrole göre değişim yüzdeleri

## İç Yapı Analizi

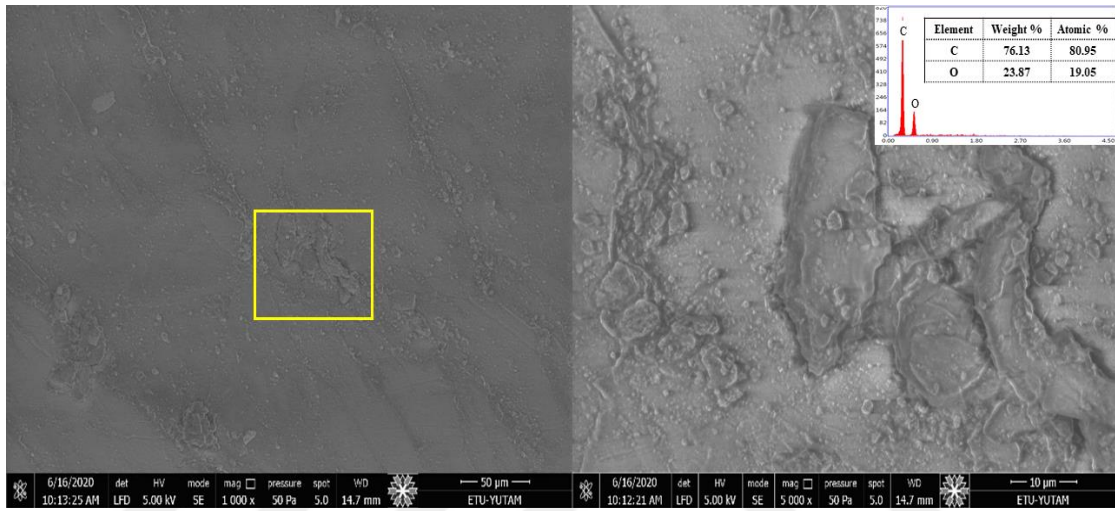
### SEM/EDS analizi

Fiziko-mekanik özellikler incelendiğinde en iyi performans gösteren polimer kompozitler P(ref), PM30, PS5, PN1, PM30N1 ve PS5N1 için bu davranışın açıklanmasında iç yapısal olarak görüntülenme analizlerinden taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDS) yapılmıştır. Şekil 48 (a-f) SEM/EDS görüntüleri gösterilmektedir.

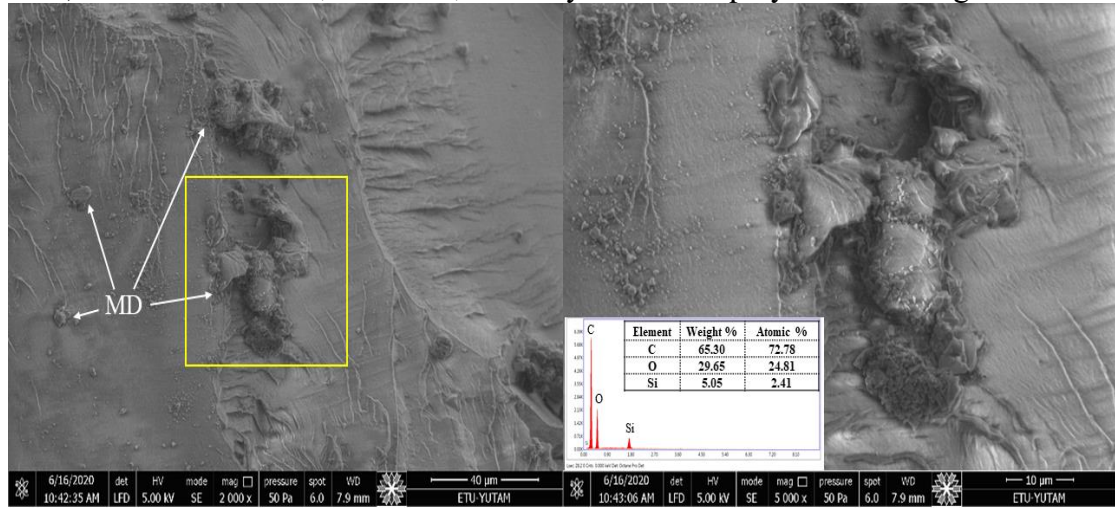
Şekil 48a'da gösterildiği gibi saf polyester kompozitlerin diğer kompozit yüzeylerine göre daha pürüzsüz bir görüntüde olduğu gözlenmiştir. Şekil 48 (b ve e)'den görüldüğü üzere, mermer toz parçacıklarının küresel olmayan düzensiz bir formda olduğu, şekil ve boyut bakımından önemli bir çeşitlilik sergilediği görülmektedir. Ayrıca, polyester reçinedeki mermer toz parçacıklarının homojen olarak dağıldığı ve dolgu maddesi ile matris arasındaki arayüzeyin iyi olduğu gösterilmiştir. Silis dumanı içeren polimer kompozitlerin (PS5 ve PS5N1) kırılma yüzeylerinin camsı görünümde olduğu ve bu da malzemenin oldukça kırılma eğilimli davranışa sahip

olduğunu doğrulamaktadır. SEM görüntüleri, silis dumanı ile polimer matrisi arasındaki güçlü bağ oluşumunu ve silis dumanının matriste iyi dağılımını kanıtlamaktadır. Mermer tozu/silis dumanı içeren kompozitlerde n-SiO<sub>2</sub> ilavesinin bazı gruplarda topaklanmaya sebep olduğu ve Şekil 48 (e) ve (f)'de gösterildiği gibi daha büyük tanecikler oluşturduğu söylenebilir.

Saf polimer ve güçlendirilmiş polimer kompozitler için EDS spektrumunun kantitatif analizinde, yüksek bir oksijen ve karbon içeriği tesbit edilmiştir. Ayrıca içeriğinde silikon dioksit (SiO<sub>2</sub>), alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve magnezyum oksit (MgO) de küçük miktarlarda mevcuttur.

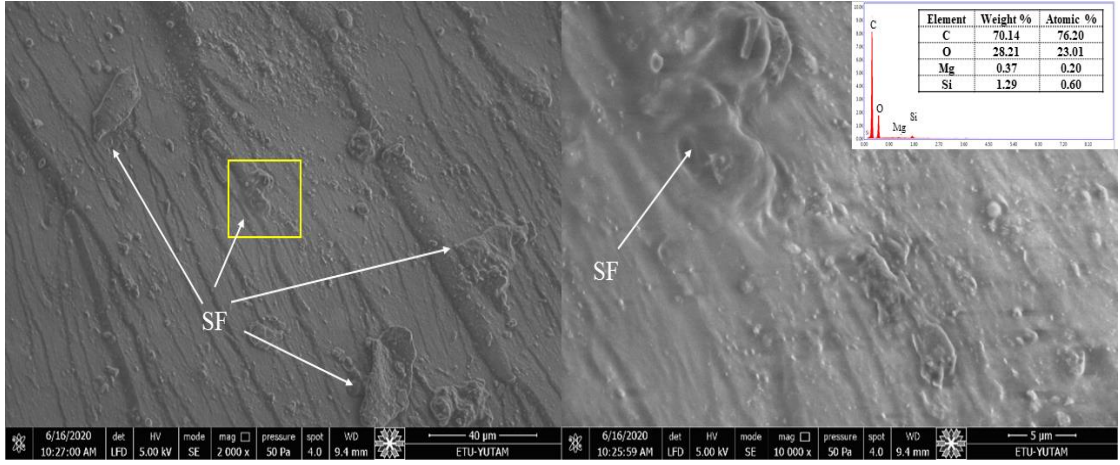


a) EDS analizi ile 1,000x ve 5,000x büyütmede saf polyesterin SEM görüntüleri

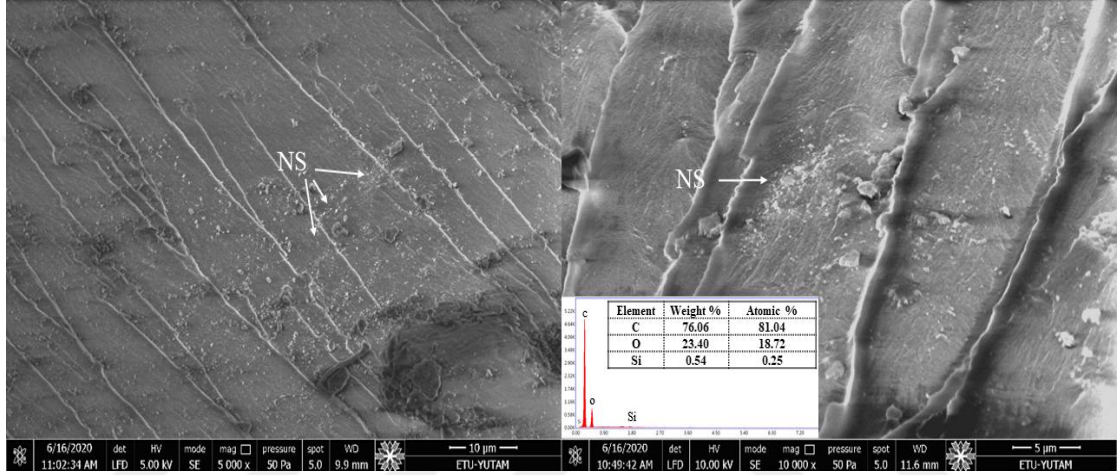


b) EDS analizi ile 2,000x ve 5,000x büyütmede PM30'un SEM görüntüleri

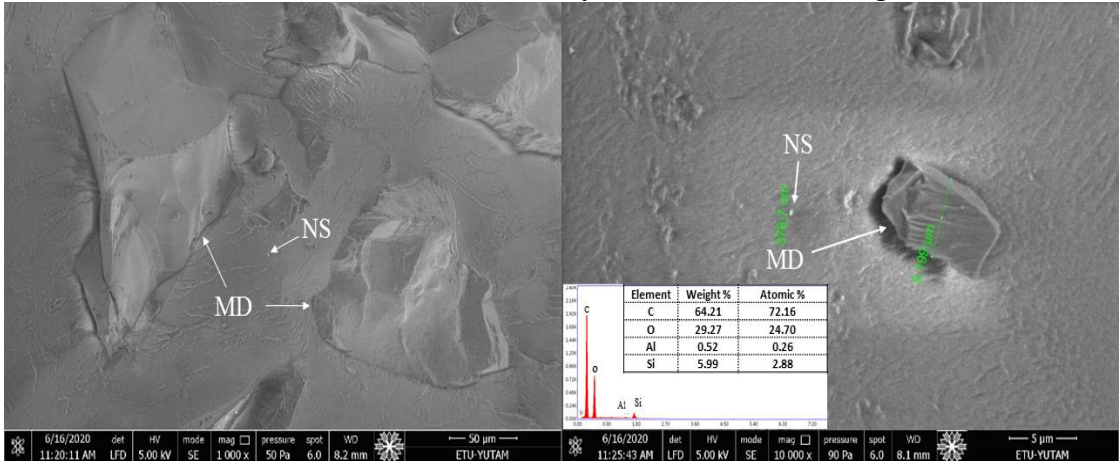
Şekil 48. SEM görüntüleri ve EDS analizleri (devam)



c) EDS analizi ile 2,000x ve 10,000x büyütmede PS5'in SEM görüntüleri

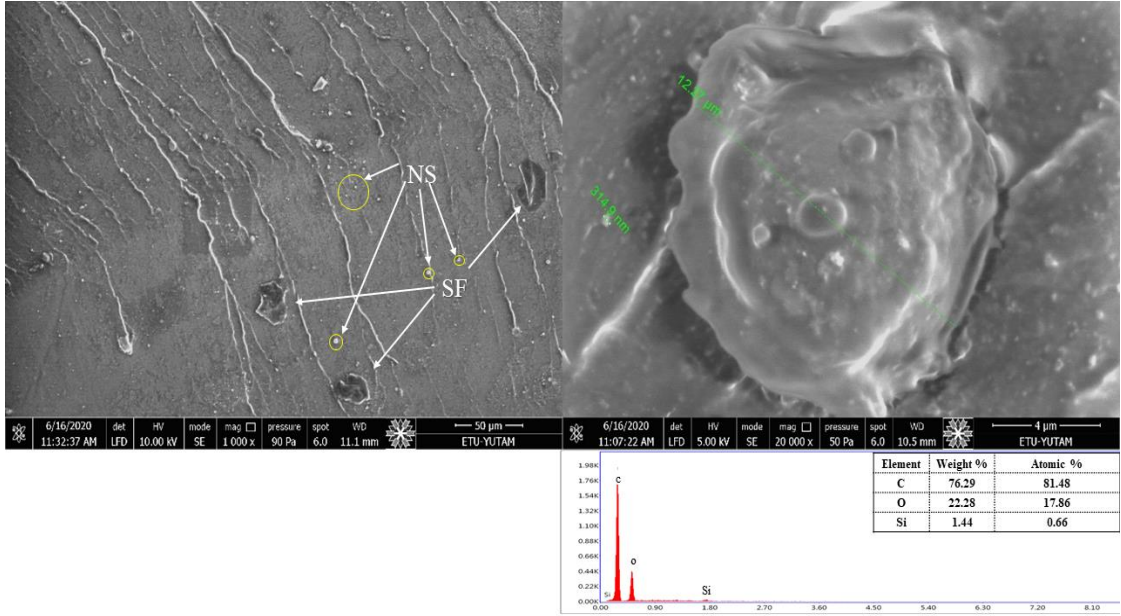


d) EDS analizi ile 5,000x ve 10,000x büyütmede PN1'in SEM görüntüleri



e) EDS analizi ile 5,000x ve 10,000x büyütmede PM30N1'in SEM görüntüleri

Şekil 48. SEM görüntüleri ve EDS analizleri (devam)



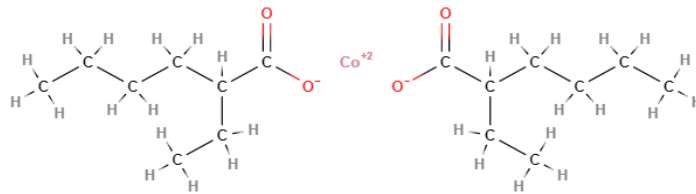
f) EDS analizi ile 5,000x ve 10,000x büyütmede PS5N1'in SEM görüntüleri

Şekil 48. SEM görüntüleri ve EDS analizleri

### FTIR analizi

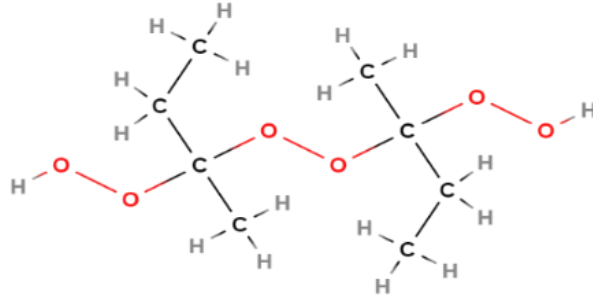
FTIR, kimyasal bileşiklerin fonksiyonel gruplarını tanımlamak için kullanılır. Şekil 49'da, polimer matrisi üretmek için kullanılan doymamış polyester, kobalt oktoat ve metil etil keton peroksidin (MEKP) kimyasal yapısı gösterilmektedir. FTIR spektrumu, güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş polimer kompozitler için elde edilmiş ve Şekil 50'de gösterilmiştir.

3730, 3650, 2360, 1680 ve 1450  $\text{cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyonlar sırasıyla OH, C – H, O – C = O, C = C, and CH = CH gerilmesinden kaynaklanmaktadır. Ester grubu 1720  $\text{cm}^{-1}$ 'de görünür ancak geçiş metal komplekslerinin elektron konfigürasyonu nedeniyle 2360  $\text{cm}^{-1}$ 'a kaymıştır. Polyester astarlar, karboksilat bağ oluşumu yoluyla çoklu metal oksitlerle kimyasal olarak etkileşime girer (Fockaert *et al.* 2020). Numunelerden elde edilen sonuçlara göre yüksek oranda mineral içeren (silis gibi) mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> katkıları ile absorpsiyonun arttığı ve en yüksek absorpsiyon değerlerine mermer tozu içeren polyester kompozitlerde rastlandığı gözlenmiştir.

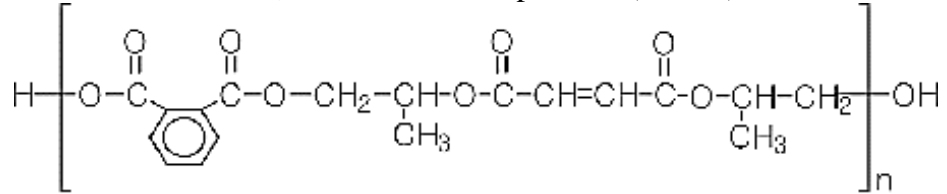


a) Kobalt oktoat

Şekil 49. Kobalt oktoat, MEKP ve UP için kimyasal yapısı (devam)

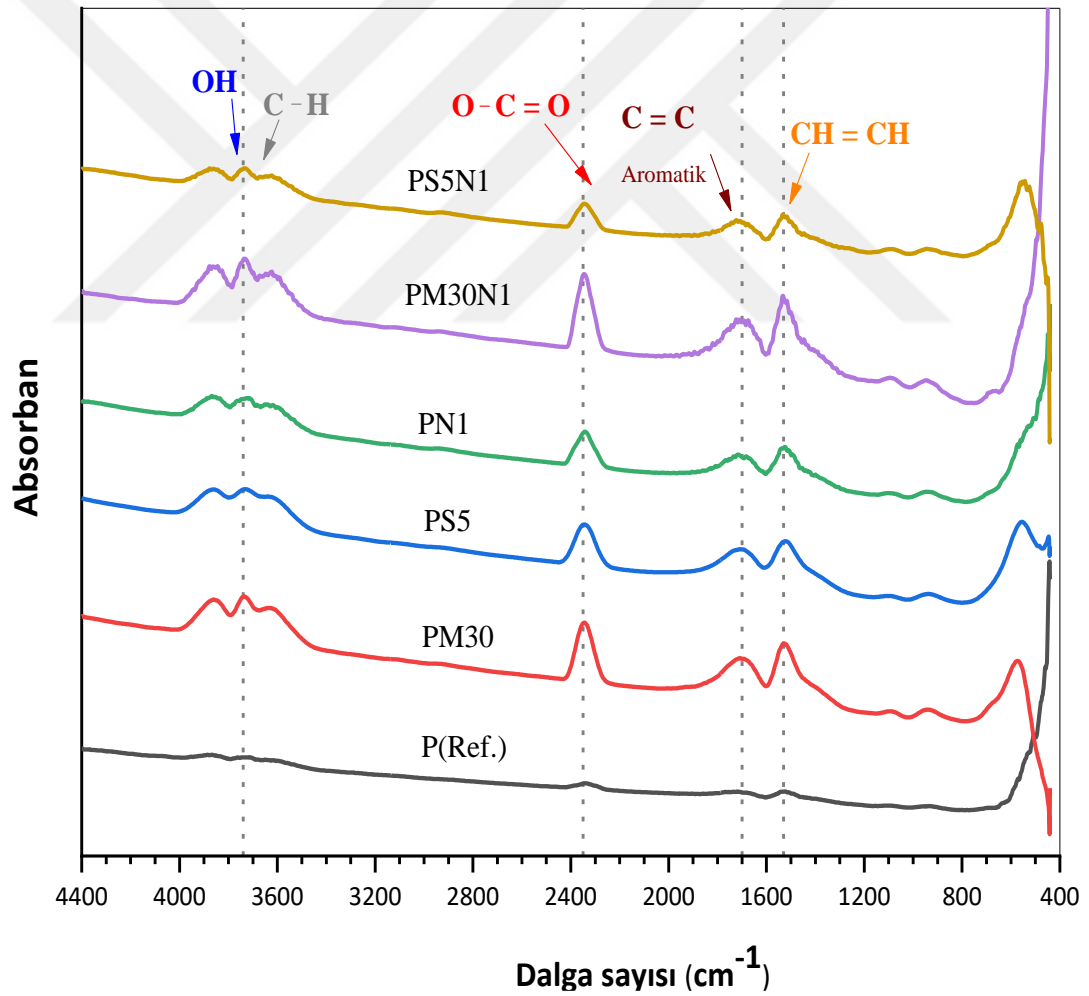


b) Metil etil keton peroksit (MEKP)



c) Doymamış polyester reçine (UP)

Şekil 49. Kobalt oktoat, MEKP ve UP için kimyasal yapısı



Şekil 50. Kompozitlerin FTIR analiz diyagramları

## Aderans Analizi

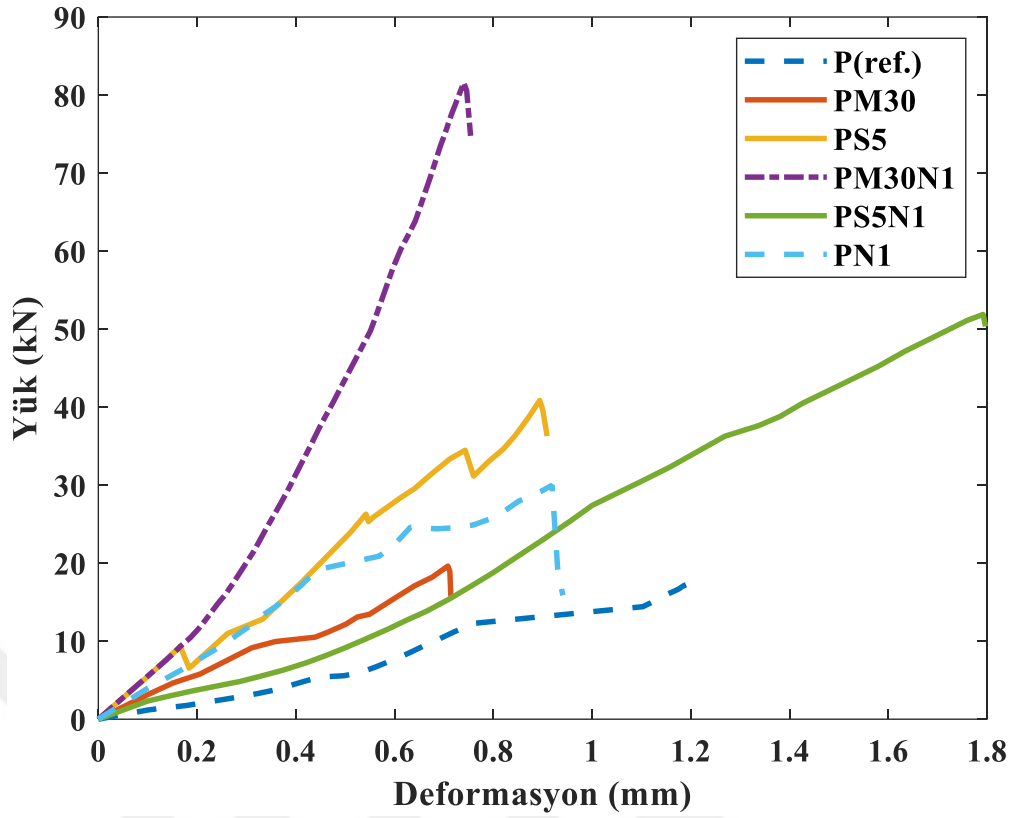
### Eğimli kesme testi

Eğimli kesme testlerinin sonuçları Şekil 51 ve 52’de gösterilmiş ve Tablo 12’de özetlenmiştir. Yük-deplasman eğrilerine bakıldığında (Şekil 51), PS5N1 grubunun daha sünek olması dışında tüm gruplar için kırılma bir davranış göstermektedir. Polimer kompozitler ile KYB arasındaki yüzeyde kırılma gerçekleşmiş ve bu da yapışkan kopmanın meydana geldiğini desteklemiştir (Şekil 55).

Sprinkel and Ozyildirim 2000 yaptıkları çalışmada, aderans dayanımı seviyesini Tablo 13’te listelendiği gibi mükemmel, çok iyi, iyi, orta ve zayıf olmak üzere beş sınıfa ayırmıştır. Yüzey hazırlıklarının türüne bakılmaksızın, KYB ve polimer kompozitlerin arasındaki aderans, Sprinkel ve Ozyildirim tarafından bildirildiği üzere genellikle "iyi ile mükemmel" aralığında olmuştur.

Eğimli kesme testi sonucunda, kesme gerilmeleri P(ref.), PM30, PS5, PN1, PS5N1 ve PM30N1 grupları için 1,45, 1,56, 3,28, 2,45, 4,24 ve 6,66 MPa değerlerini almıştır. Tüm gruplar referans grubuna kıyasla iyi aderans sonuçları göstermiş olup en yüksek aderans dayanımı PM30N1 grubunda (kontrole göre %459 oranıyla) gözlenmiştir. Saf polyesterin yüzeyi, SEM görüntülerinde gösterildiği gibi, güçlendirilmiş polyester kompozitlere göre daha pürüzsüz ve daha gevrek kırılma şeklindedir (Şekil 48a). Farklı boyutlarda silika bazlı dolgu maddelerinin ilave edilmesi, polimer kompozit yüzeylerin pürüzlülüğünü arttırmıştır (Şekil 48b-f). Bu nedenle yapışma mukavemetini doğrudan etkilemiş ve takviyeli polyesterlerde saf polyestere göre daha yüksek bir yapışma mukavemetini oluşturmuştur.

Tekli mikro ve nano boyutlu malzemelerin ilave edilmesi göçme yükünü arttırmış ancak göçme yer deplasmanını azaltmıştır. Mermer tozu içeren grubun saf polyester kompozit grubuna göre en düşük yapışma gücüne sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, polyester kompozit ile beton arasındaki en yüksek yapışma gücüne sahip temas yüzeyinin mermer tozu eklenmesi ile yapışma özelliğinin azalması ve kopmaya karşı daha zayıf bir yüzeyin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



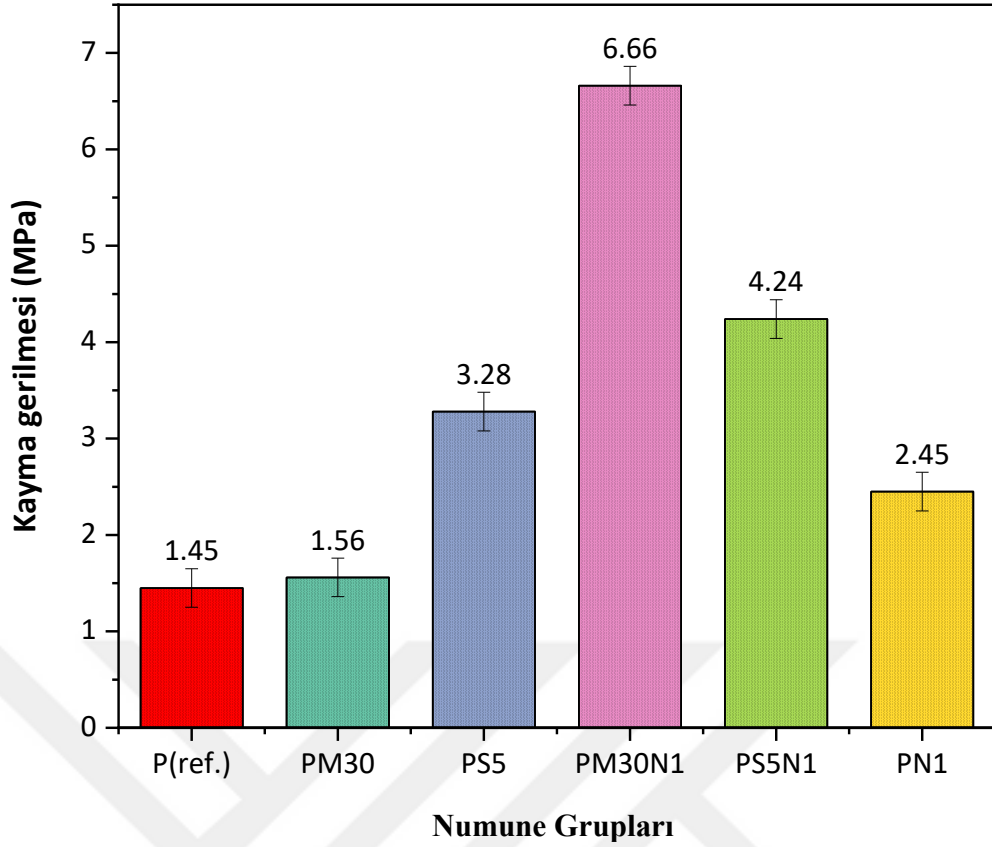
Şekil 51. Eğimli kesme altında yük-deplasman eğrileri

Tablo 12. Eğimli Kesme Testi Sonuçları

PC tabakası	P (kN)	$P_{ci}=P/\cos(30)$ (kN)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$f_{ci}$ (MPa)
P(ref.)	17,74	20,48	14137	1,45
PM30	19,11	22,06	14137	1,56
PS5	40,15	46,35	14137	3,28
PM30N1	81,57	94,17	14137	6,66
PS5N1	51,87	59,89	14137	4,24
PN1	30,00	34,64	14137	2,45

Tablo 13. Sprinkel and Ozyildirim Tarafından Bildirilen Aderans Dayanım Kaliteleri

Değer	Dayanım kalitesi
~ 2,1 MPa (300 psi)	mükemmel
1,7 to 2,1 MPa (250 to 299 psi)	çok iyi
1,4 to 1,7 MPa (200 to 249 psi)	iyi
0,7 to 1,4 MPa (100 to 199 psi)	orta
0 to 0,7 MPa (0 to 99 psi)	zayıf



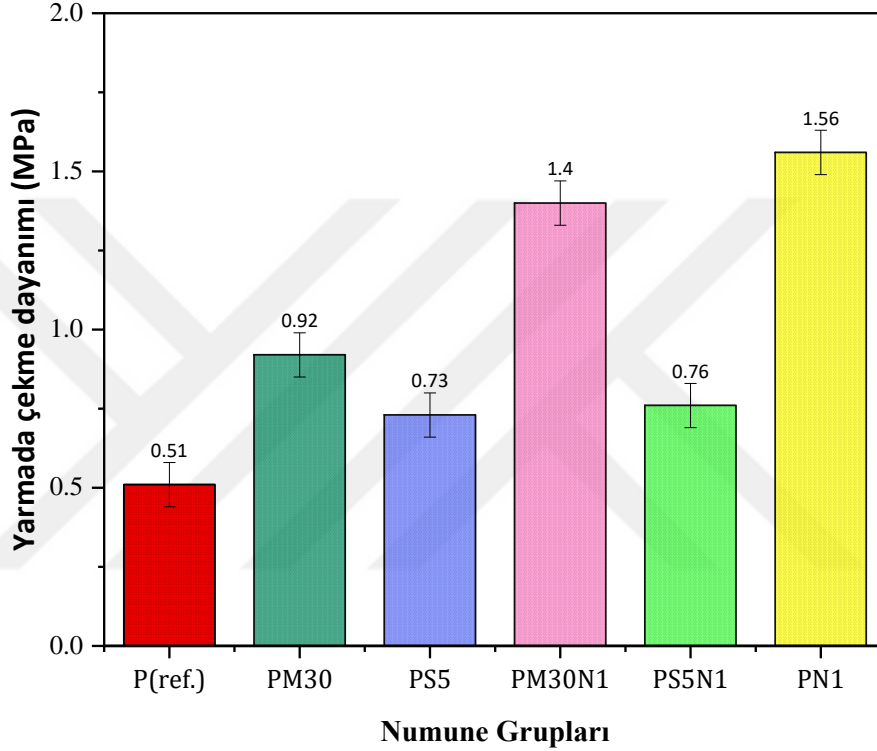
Şekil 52. Eğimli kesme testi sonuçları

#### Yarmada çekme testi

Yarmada çekme testi sonuçları Tablo 14’te özetlenmiş ve Şekil 53’te gösterilmiştir. Genel olarak, farklı boyutlardaki dolgu malzemeleri ilavesinin yarmada çekme gerilmeleri altında aderans mukavemetini arttırdığı gözlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı P(ref.), PM30, PS5, PN1, PM30N1 ve PS5N1 grupları için 0,51, 0,92, 0,73, 1,56, 1,4 ve 0,76 MPa değerlerini almıştır. Eğimli kesme testine benzer şekilde, tüm gruplar, polimer kompozit ile KYB arasındaki arayüzeyden kırılmış ve bu da yapışkan kopmanın meydana geldiğini göstermiştir. Yarmada çekme testinde, tüm gruplar referans grubuna göre daha iyi aderans kuvveti göstermiş, PN1 ve PM30N1 grupları için sırasıyla %306 ve %275 oranlarında artış görülmüştür. Bu artış, beton yüzeye iyi bir yapışma sağlayan artan yüzey pürüzlülüğü ve süneklik ile açıklanabilir. Eğimli kesme testinden farklı olarak, sadece silis dumanı veya n-SiO<sub>2</sub> ile silis dumanı beraber ilave edilmesi, yarmada çekme mukavemetinde küçük bir artış sağlamıştır. Bunun nedeni, silis dumanı içeren polyesterin pürüzlülüğünün, SEM görüntülerinde (Şekil 48c ve f) gösterildiği gibi mermer tozu içeren polyesterinkinden daha az olmasıdır.

**Tablo 14.** Yarmada Çekme Testi Sonuçları

Polimer Alt tabaka	P (kN)	fs (MPa)
P(ref.)	16	0,51
PM30	29	0,92
PS5	23	0,73
PM30N1	44	1,40
PS5N1	24	0,76
PN1	49	1,56

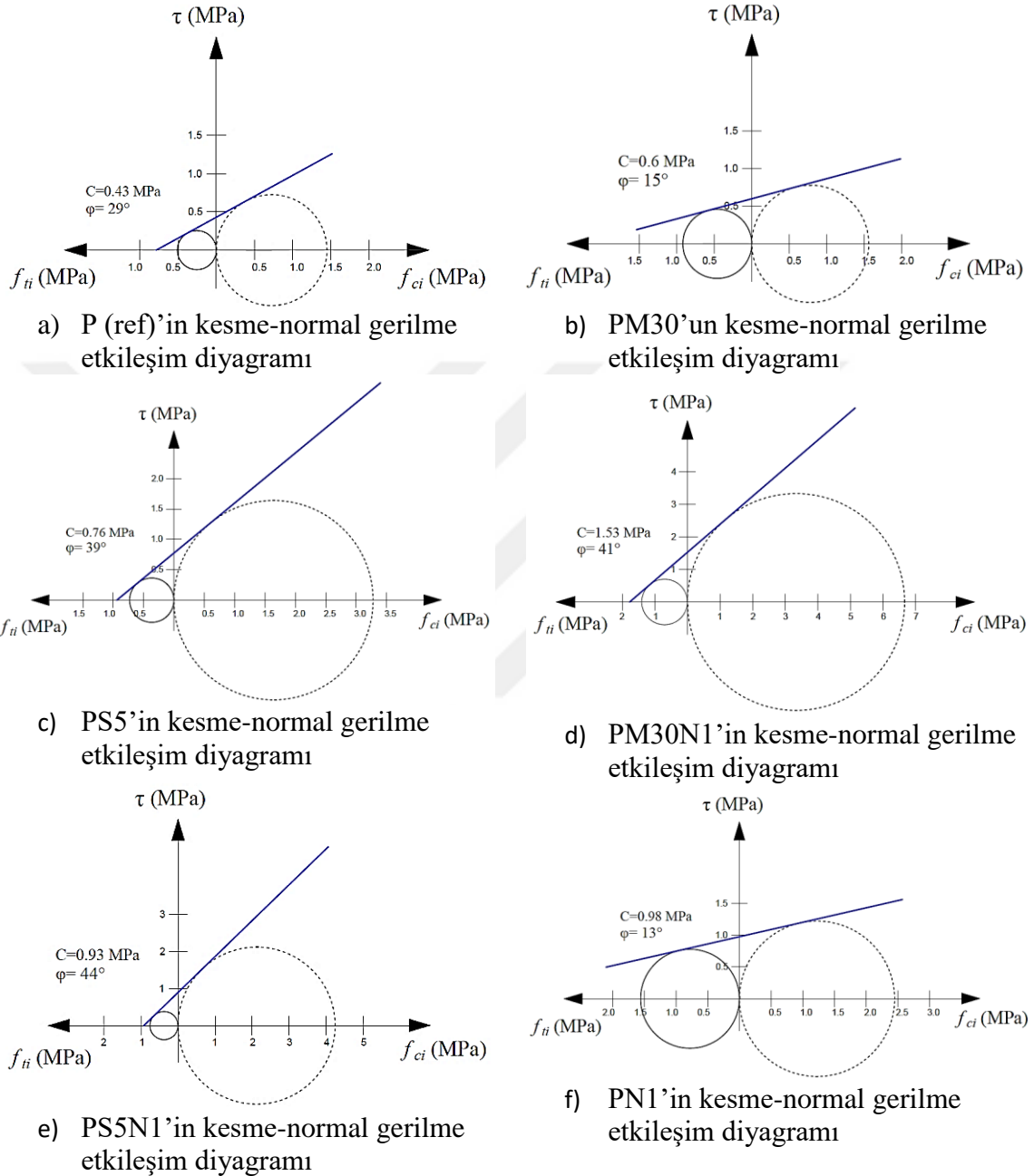


**Şekil 53.** Yarmada çekme testi sonuçları

### Mohr-Coulomb Analizi

Bu çalışmada, kesme-normal gerilme etkileşim diyagramları, kohezyon ve iç sürtünme açısı Mohr-Coulomb teorisi kullanılarak belirlenmiştir. Mohr-Coulomb dairelerini çizmek için eğimli kesme ve yarma çekme testlerinin sonuçları kullanılmıştır. Şekil 54a-f, her grup için kesme-normal gerilme etkileşim diyagramını, kohezyon kuvvetini ve iç sürtünme açısını göstermektedir. Minimum kohezyon kuvvetinin referans grubunda (saf polyeester) olduğu ve en yüksek değeri ise PM30N1 grubunda olduğu açıkça görülmüştür. PM30, PS5, PM30N1, PS5N1 ve PN1, sırasıyla 0,6, 0,76, 1,53, 0,93 ve 0,98 MPa'lık saf kesme dayanımı ile betona üstün yapışma özelliğine sahiptir. Referans grubuna kıyasla, yapışma mukavemeti PM30, PS5, PM30N1, PS5N1 ve PN1 için sırasıyla %40, 77, 256, 116 ve 128 oranlarında artacak şekilde gelişim göstermiştir. Sadece n-SiO<sub>2</sub> veya mermer tozu/silis dumanı ile kombinasyon halinde

kullanımı, grupların yapışma mukavemetini önemli ölçüde artırmıştır. Benzer şekilde, PM30 ve PN1 grupları dışındaki saf polyester grubuna kıyasla tüm kompozitler için iç sürtünme açısı artmıştır. PM30 ve PN1'deki iç sürtünme açılarındaki azalma, yapışma mukavemetindeki bir artışla ilişkilendirilmiş, bu da kohezif davranışta olumlu bir artışın olduğuna işaret etmektedir.



**Şekil 54.** Kesme-normal gerilim etkileşim diyagramları, yapışma mukavemeti ve iç sürtünme açıları

Şekil 55'te görüldüğü gibi saf polyester numunelerin kırılma yüzeylerinin diğerlerine göre düzgün olduğu görülmektedir.



(a) P(ref.)



(b) PM30



(c) PS5



(d) PM30N1



(e) PS5N1



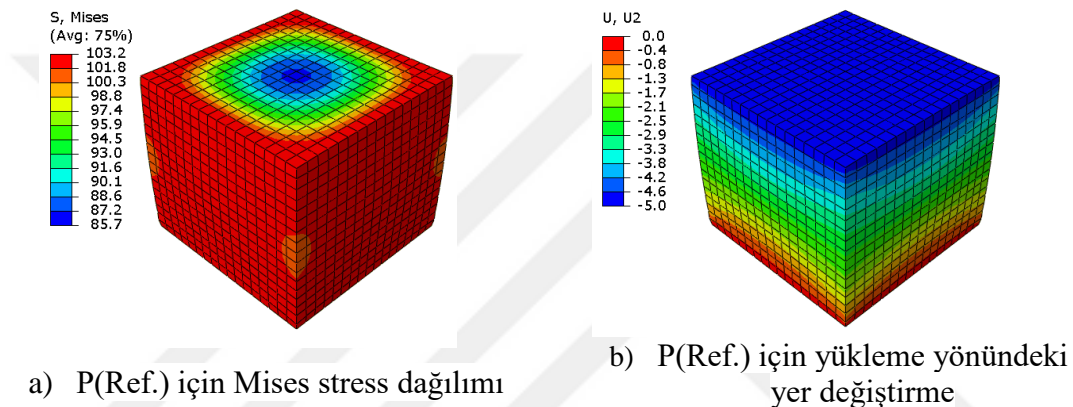
(a) PN1

Şekil 55. Eğimli kesme ve yarma çekme testlerinden sonra numunelerin kırılma yüzeyleri

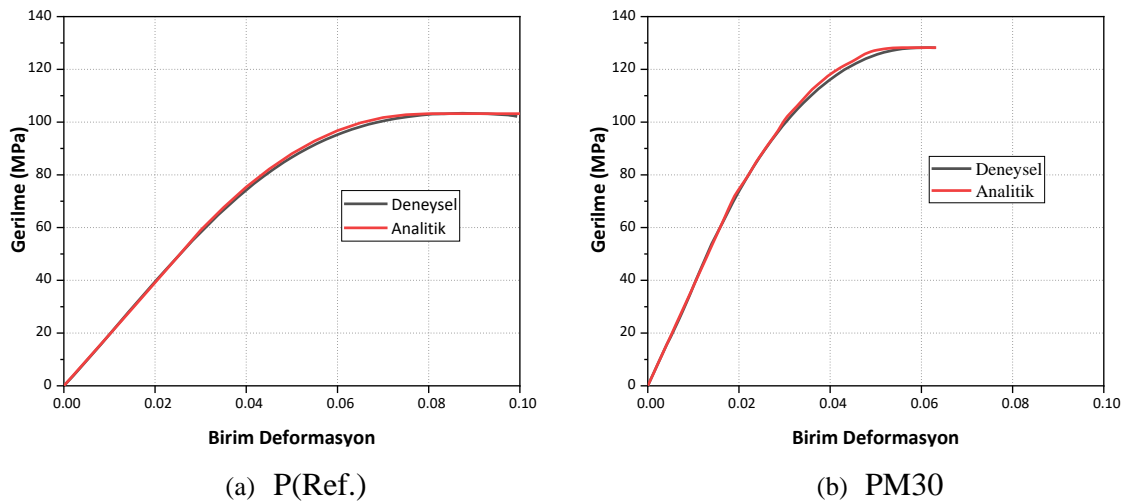
## Sonlu Elemanlar Analizi

### Model geçerliliği

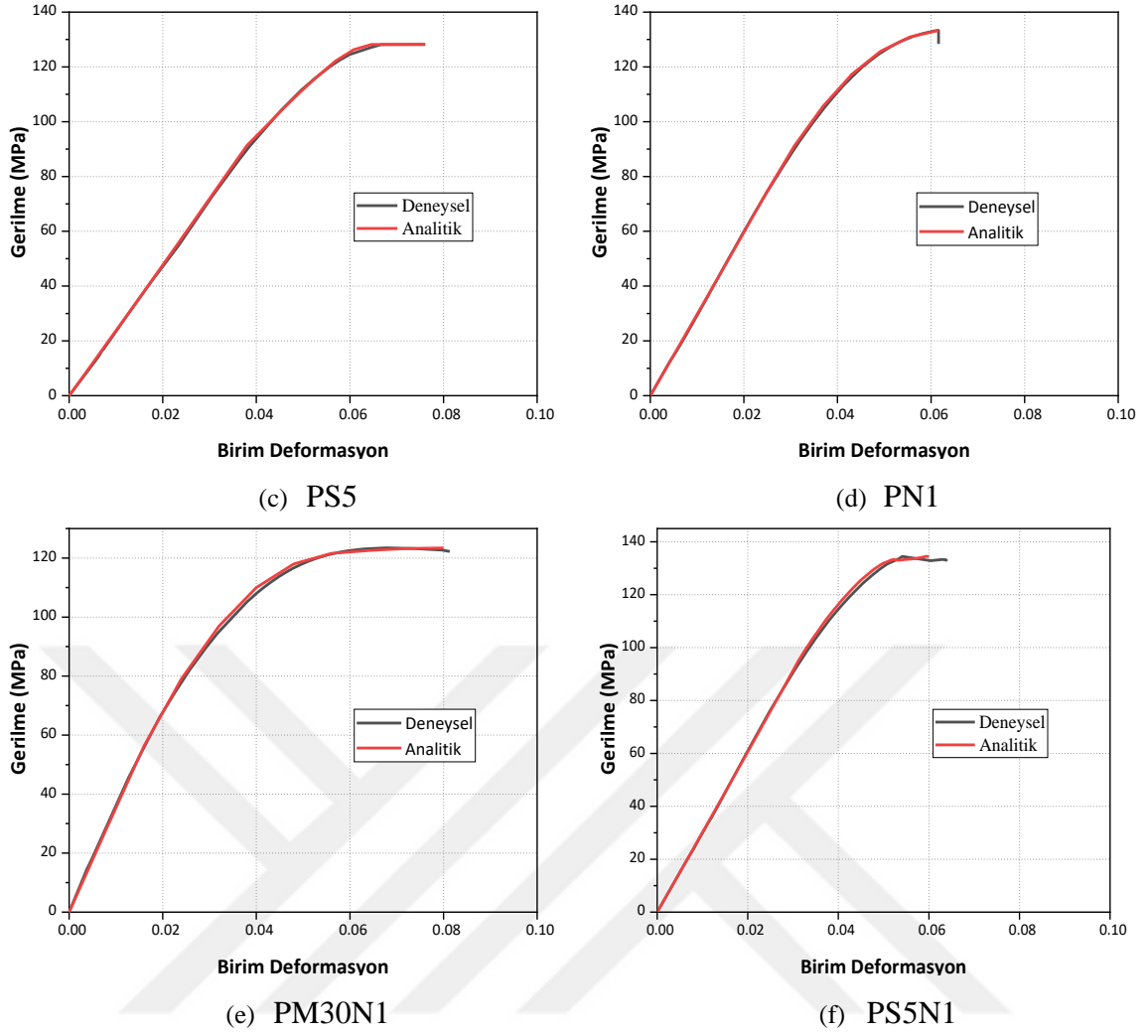
Referans polyster kompozitin yükleme yönündeki Mises gerilmeleri ve yer değiştirme değerleri Şekil 56'da gösterilmektedir. Bu modellerde, polimer kompozitlerin basınç dayanımı testi sonuçları alınarak sayısal analizi ABAQUS sonlu eleman yazılımı ile yapılmış ve elde edilen model eğrileri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 57a-f). Analiz sonuçları ise Şekil 58'de özetlenmiştir. ABAQUS'ta hesaplanan sayısal eğriler deneysel olanlarla iyi bir uyum göstermektedir. Kısaca kalibre edilmiş ve doğrulanmış model kullanılarak benzer polyster grupları üzerinde veya farklı faz malzemeli gruplar üzerinde, düşük maliyetle ve daha kısa sürede farklı testler gerçekleştirmek mümkün olabileceği söylenebilir.



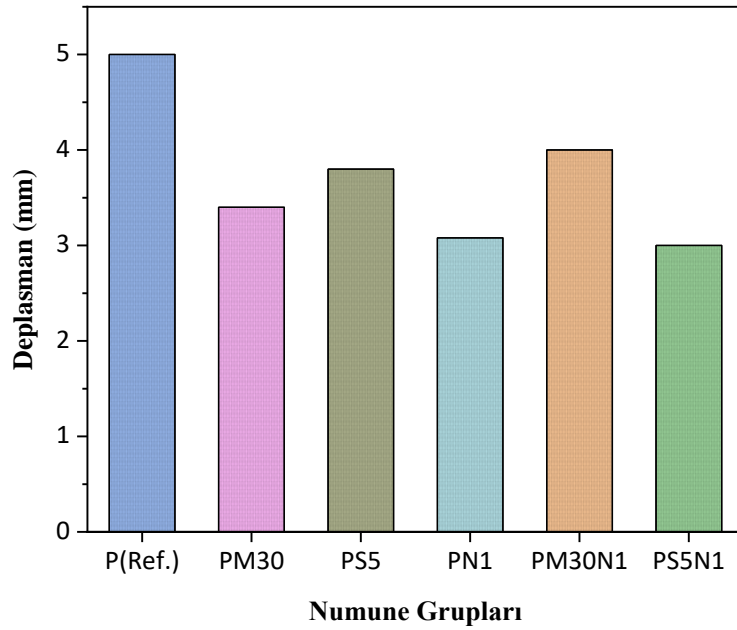
Şekil 56. Referans numunesi için ABAQUS basınç testi analiz sonuçları



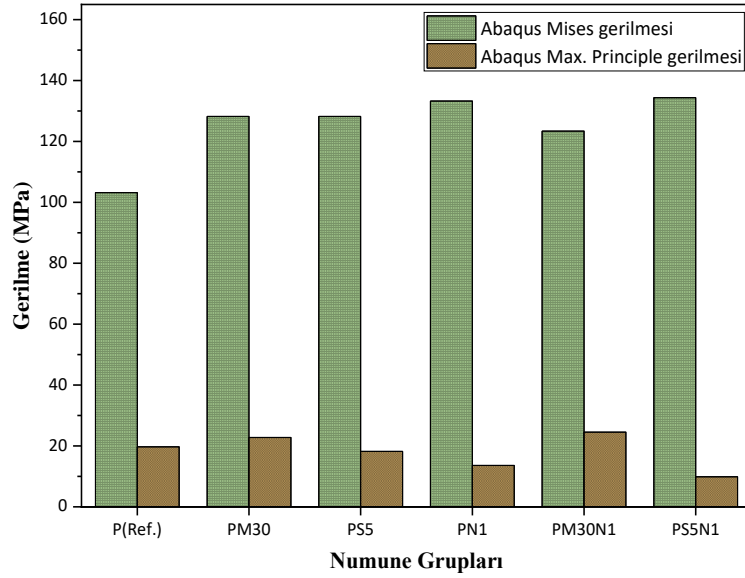
Şekil 57. Polimer kompozitler için deneysel veriler ve sonlu eleman analiz verileri (devam)



Şekil 57. Polimer kompozitler için deneysel veriler ve sonlu eleman analiz verileri



Şekil 58. Polimer kompozitler için sonlu eleman analizi sonuçları (devam)

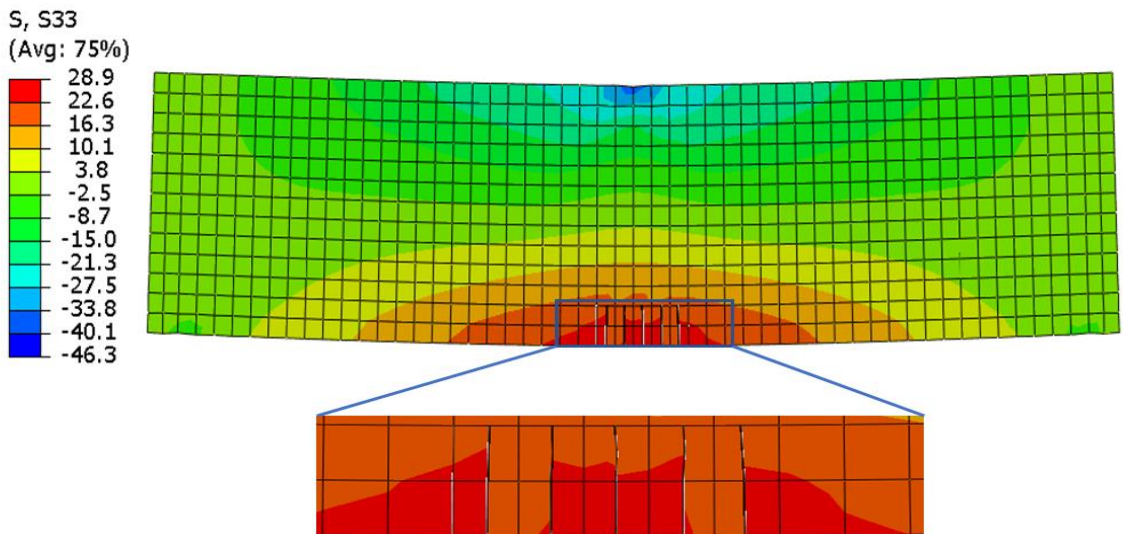


**Şekil 58.** Polimer kompozitler için sonlu eleman analizi sonuçları

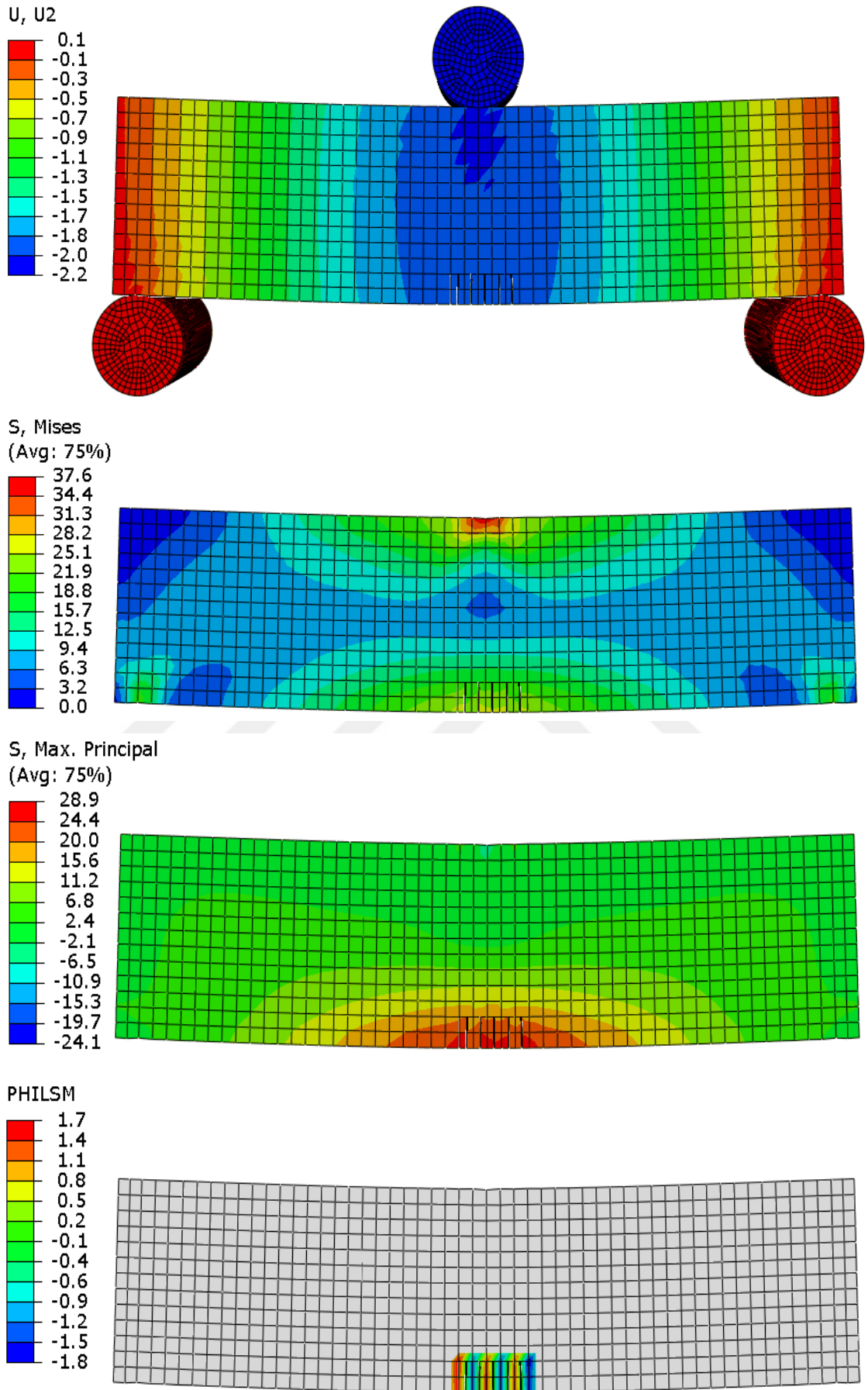
### Eğilmeye çekme testi modellemesi

Genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi (XFEM) (Belytschko and Black 1999) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, birliğin bölünmesi kavramına dayanır ve özel yer değiştirme fonksiyonlarını kullanarak serbestlik derecelerini zenginleştirerek sonlu bir elemanda süreksizliklerin varlığına izin verir (Li *et al.* 2017). Şekil 59a-f, yükleme yönünde saf ve güçlendirilmiş polyester kompozitlerin gerilme dağılımlarını göstermektedir. Gerilme alanları tekdüze ve homojendir. Maksimum gerilim numunenin ortasında yoğunlaşmış ve maksimum değerler çatlak bölgesine yakın olmuştur. Çatlaklar, gerilme bölgesinden başlamış ve basınç bölgesine doğru yayılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonuçları ile yük-deplasman eğrileri sırasıyla şekil 60 ve 61’da gösterilmektedir.

#### (a) P(ref.) analiz sonuçları

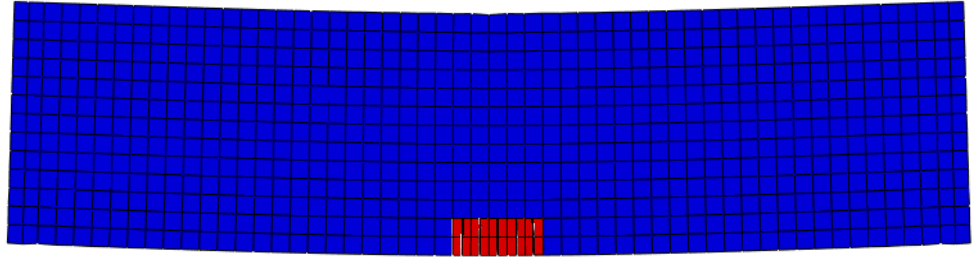
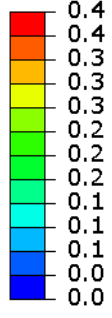


**Şekil 59.** XFEM analiz sonuçları (devam)



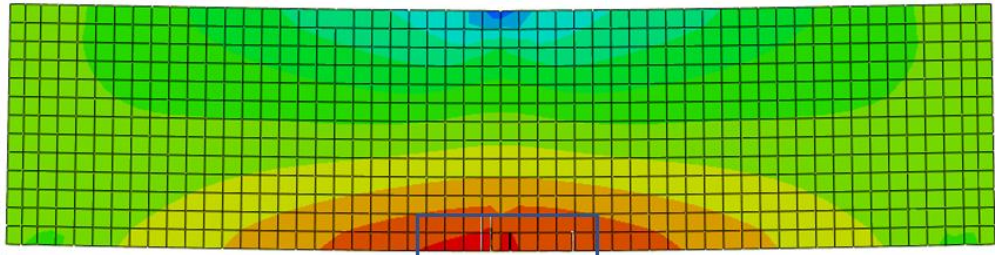
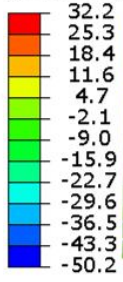
Şekil 59. XFEM analiz sonuçları (devam)

STATUSXFEM  
(Avg: 75%)

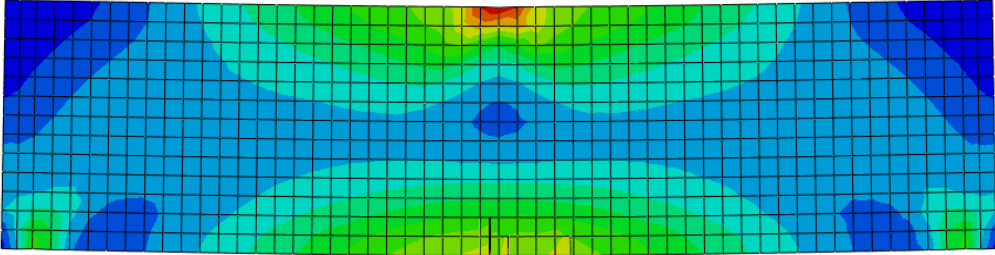
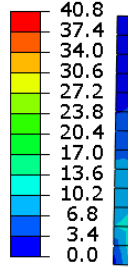


(b) PM30 analiz sonuçları

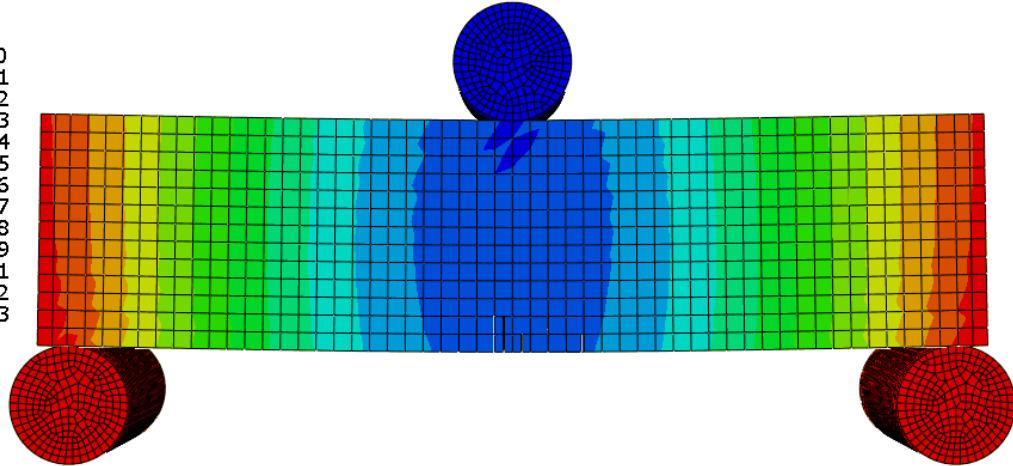
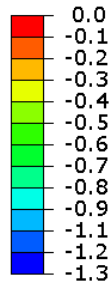
S, S33  
(Avg: 75%)



S, Mises  
(Avg: 75%)

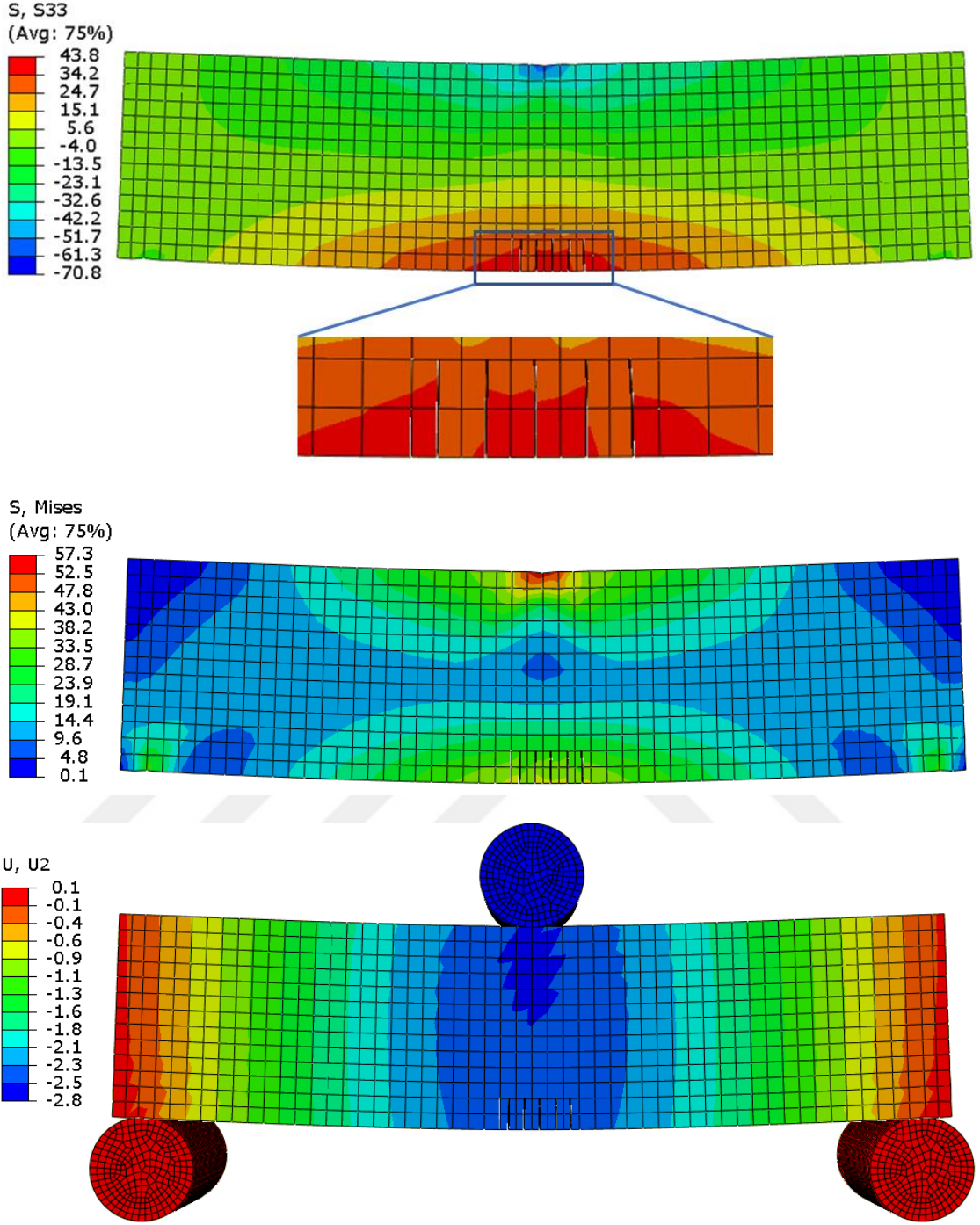


U, U2



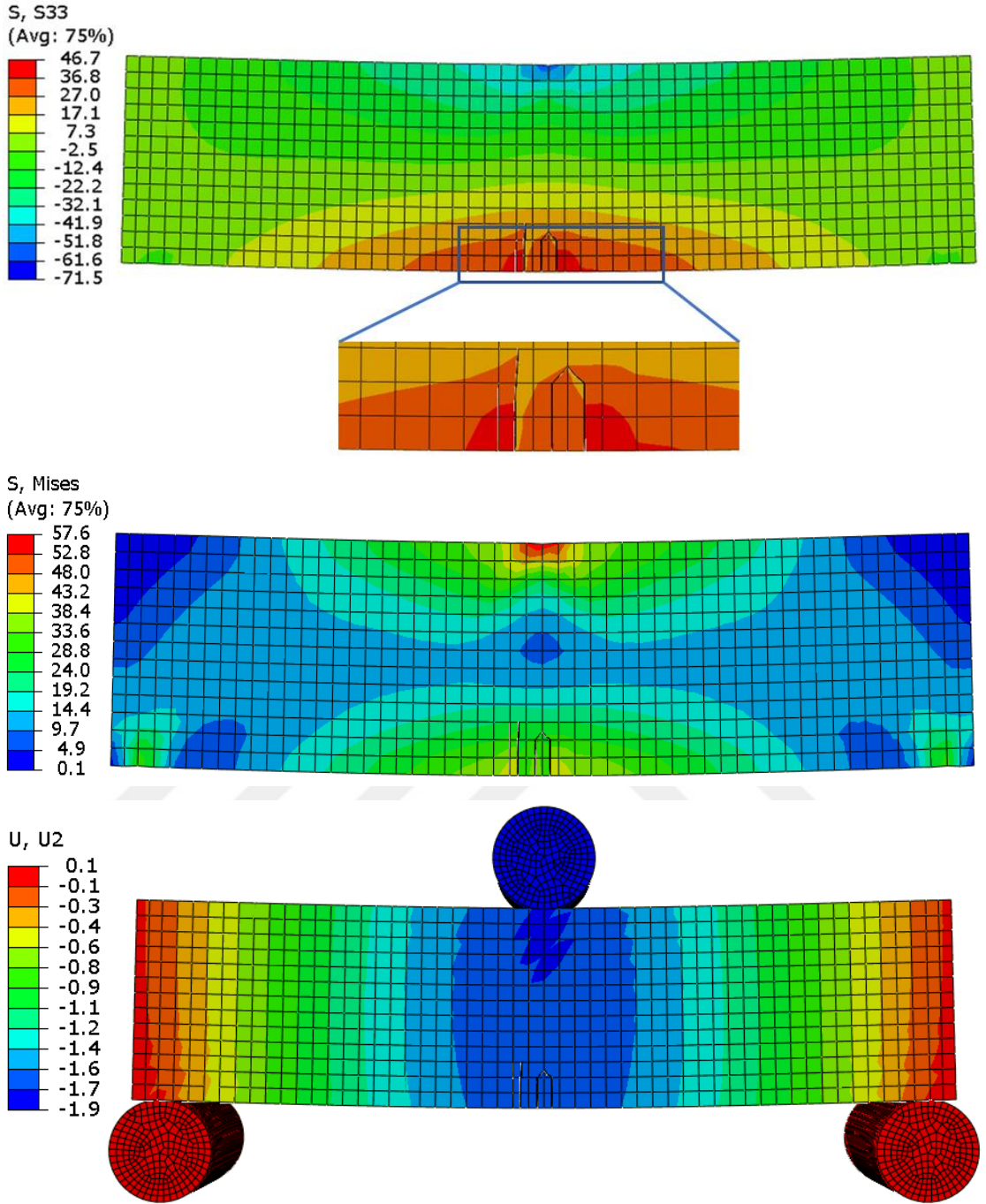
Şekil 59. XFEM analiz sonuçları (devam)

(c) PS5 analiz sonuçları



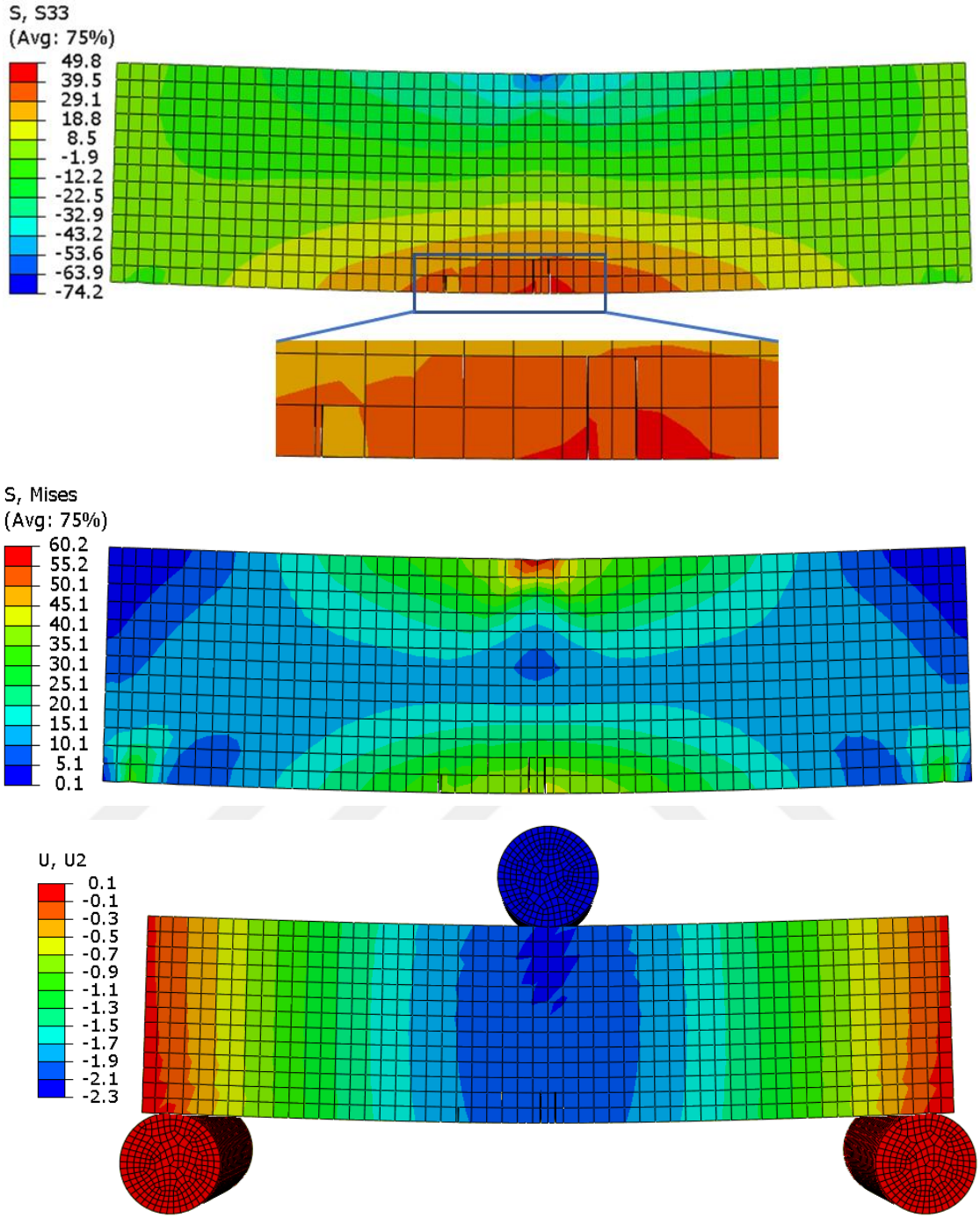
Şekil 59. XFEM analiz sonuçları (devam)

(d) PM30N1 analiz sonuçları



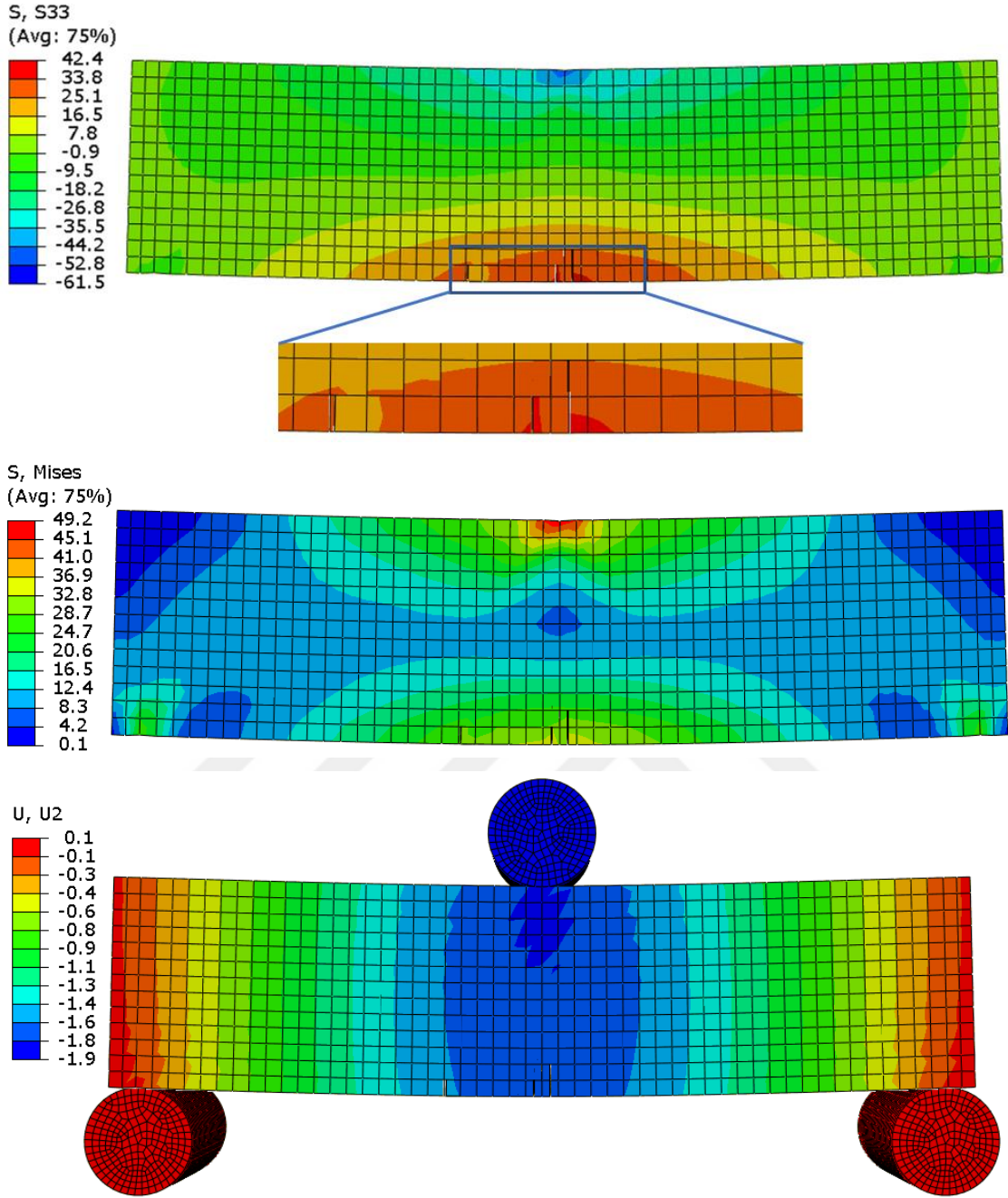
Şekil 59. XFEM analiz sonuçları (devam)

(e) PS5N1 analiz sonuçları

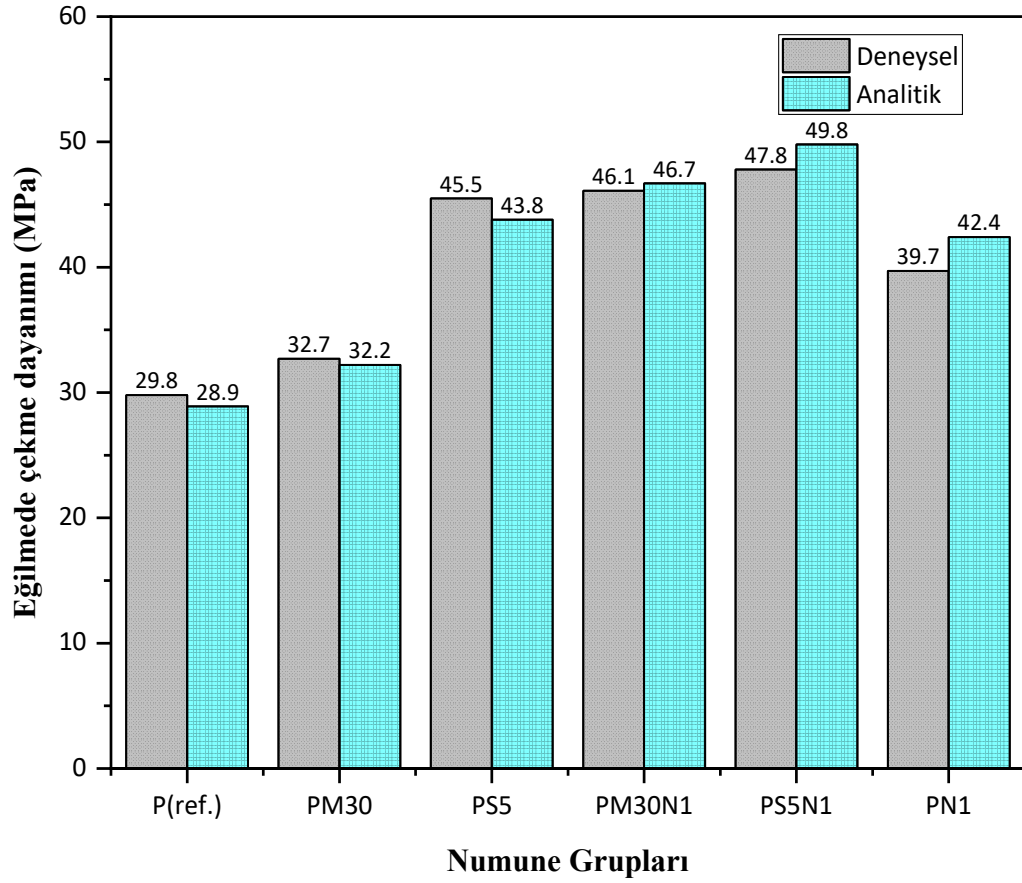


Şekil 59. XFEM analiz sonuçları (devam)

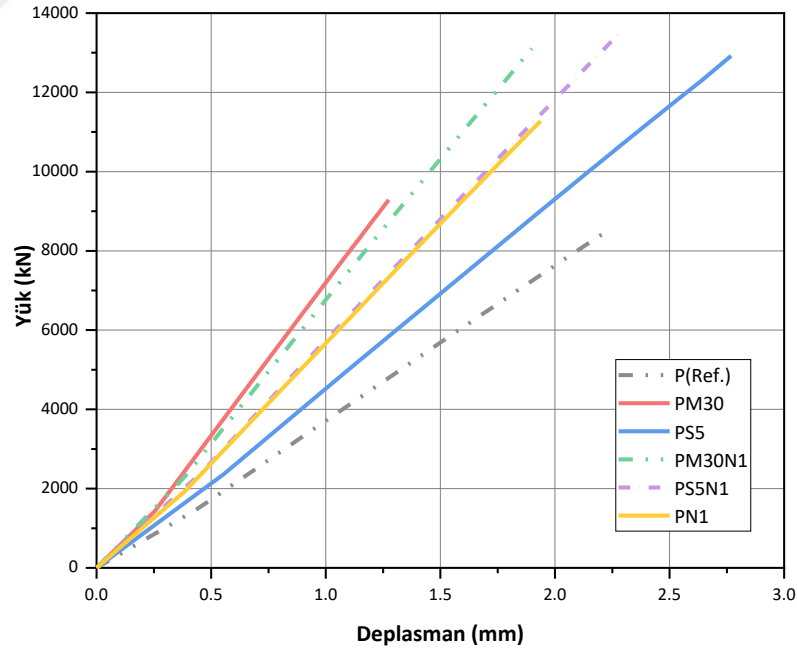
(f) PNI analiz sonuçları



Şekil 59. XFEM analiz sonuçları



Şekil 60. Eğilmede çekme testinin deneysel ve sayısal analiz sonuçları

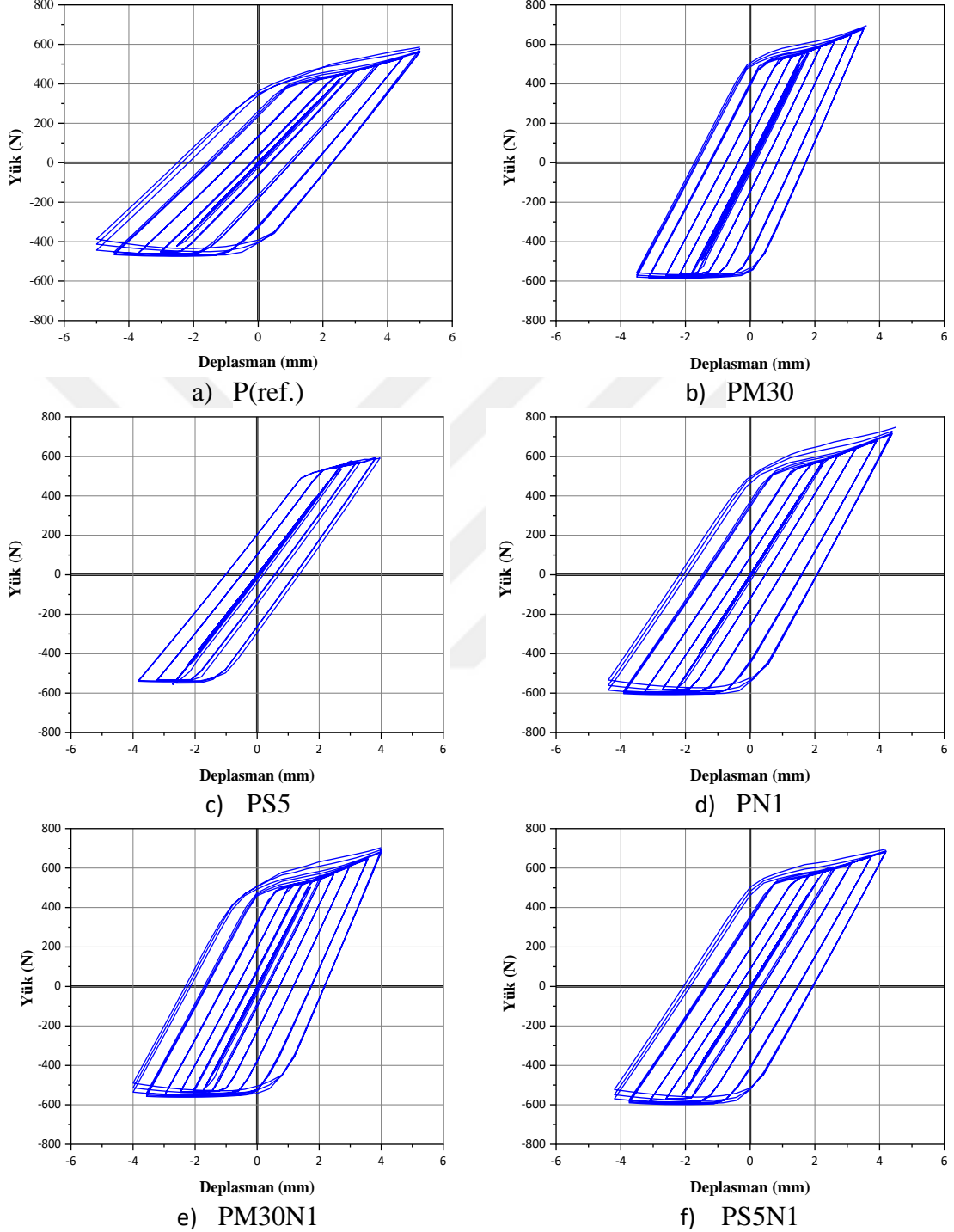


Şekil 61. Eğilmede çekme testinin yük-deplasman eğrileri

### Histeresis döngüleri

ABAQUS yazılımında deformasyon kontrollü çekme-basınç yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Histeresis döngüleri deformasyon ve reaksiyon kuvveti açısından elde edilmiş ve Şekil 62 (a-f)'de gösterilmiştir. Genel olarak, tek atık mermer tozu ilave edilen

numuneler ve n-SiO<sub>2</sub> ile beraber kullanıldığı numuneler silis dumanı/n-SiO<sub>2</sub> ile güçlendirilmiş numunelere göre daha sünek davranış göstermiştir. Benzer şekilde, tek mermer tozu veya mermer tozu ile n-SiO<sub>2</sub> içeren polyester kompozitler yorulma yüklemeleri (döngüsel yükleme) altında büyük deformasyonlar göstermiştir.



Şekil 62. Polimer kompozitlerin çekme-basınç histerezis döngüleri

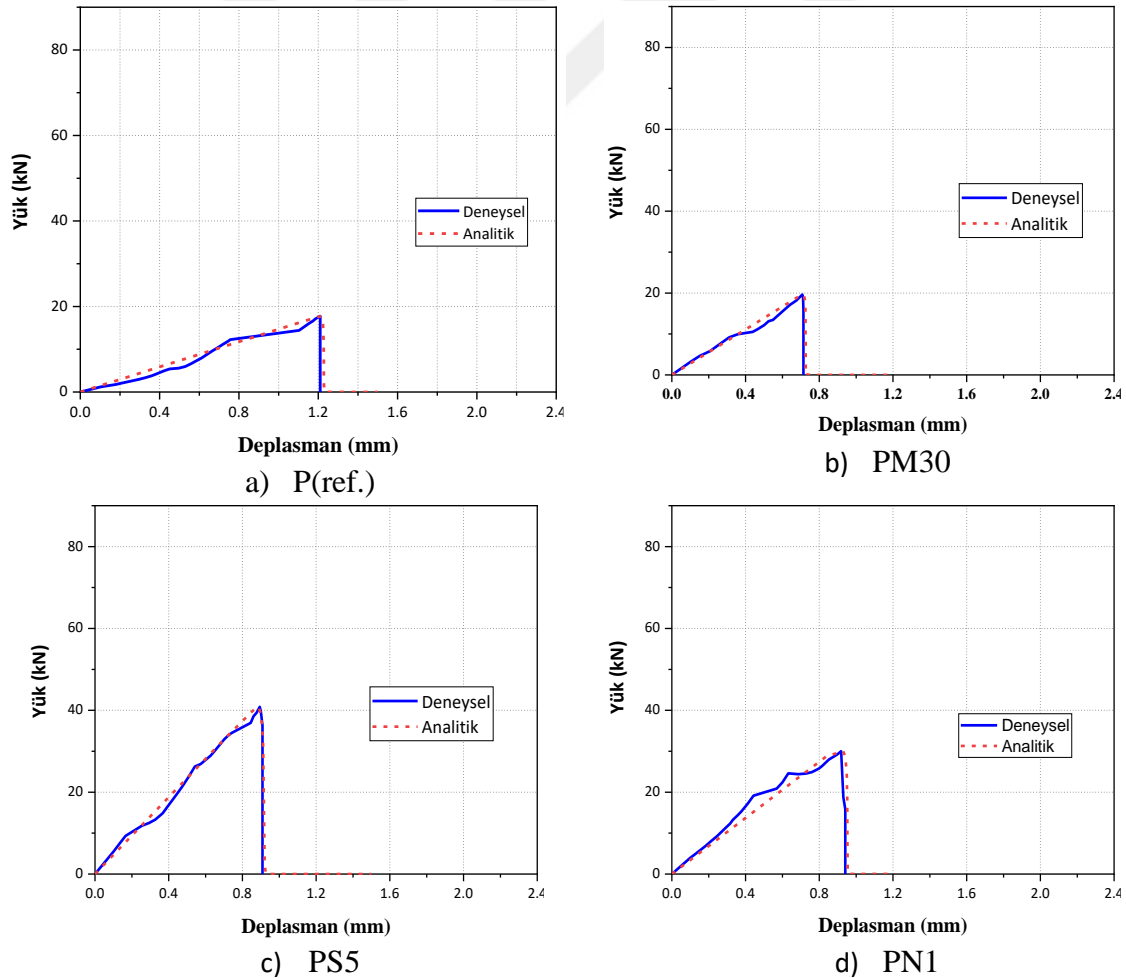
### Eğimli kesme testi modeli

Polyester kompozitler ve beton arasındaki teması tanımlamak için sıfır kalınlıkta kohezif bir temas elemanı tanımlanmıştır. Sonlu eleman temas etkileşim özellikleri, kohezyon

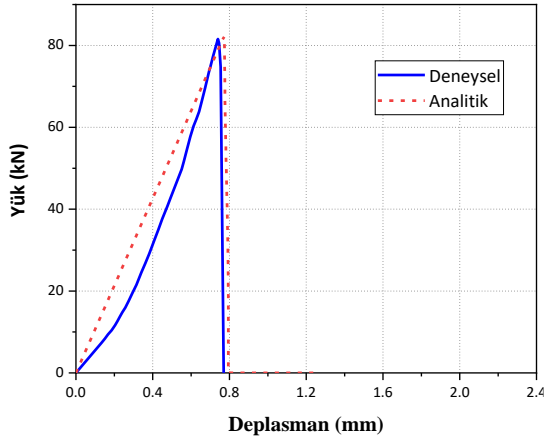
ve hasar modeli değerleri tahmin edilmiş ve simülasyondan elde edilen yük-deformasyon eğrisi deneysel olanla eşleşene kadar bir deneme yanılma döngüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 15, sonlu elemanlar temas etkileşim özelliklerini özetlemektedir. Şekil 63, seçilen karışımların FE modelini ve eğimli kesme testinin yük-deformasyon eğrilerini göstermektedir.

**Tablo 15.** Sonlu Elemanlar Temas Etkileşim Özellikleri

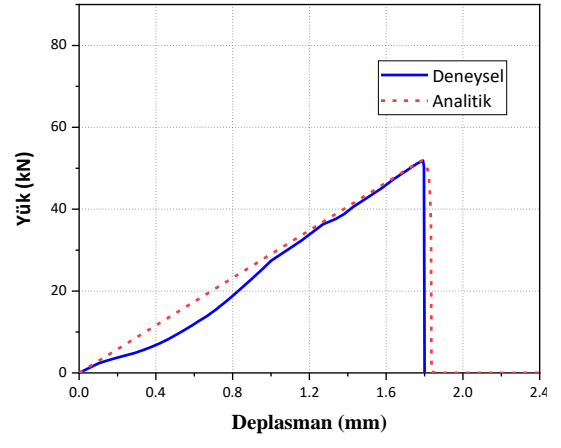
Numune Grupları	Kohezif davranışı		Hasar	
	Kesme temas sertliği ( $K_t$ ), MPa/mm	Maksimum kesme gerilimi ( $\tau_u$ ), MPa	Kırılma enerjisi ( $G_{II}$ ), N/mm	Viskozite Katsayısı ( $\nu$ )
P(ref.)	1,05	1,05	0,55	0,001
PM30	2,00	1,17	0,37	
PS5	4,10	2,75	1,05	
PN1	2,62	1,87	0,81	
PM30N1	11,5	6,22	1,70	
PS5N1	2,15	3,10	2,45	



**Şekil 63.** Eğimli kesme testinin deneysel ve sayısal sonuçları (devam)



e) PM30N1



f) PS5N1

Şekil 63. Eğimli kesme testinin deneysel ve sayısal sonuçları



## SONUÇ ve ÖNERİLER

Polimer esaslı beton kaplamalarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için farklı silika esaslı dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bu amaçla, farklı oranlarda, milimetre boyutlu mermer tozu, mikro boyutlu silis dumanı ve nano boyutlu SiO<sub>2</sub> matrisin (polyester) yerine tekli ve ikili kombinasyonlar halinde ilave edilmiştir. Güçlendirilmiş polimer kompozitlerin aderansını yani betona yapışma mukavemetini ölçmek için basınç altında eğimli kesme testi ve yarmada çekme testi kullanılmıştır. Ek olarak, normal beton ve güçlendirilmiş polimer kompozitler arasındaki aderans davranışı, Mohr-Coulomb konsepti kullanılarak da incelenmiştir.

Mermer tozu, silis dumanı ve nano-SiO<sub>2</sub> tozlarının polimer kompozitlerine ilave edilmesi ile kompozitlerin mekanik özellikleri ve beton ile aderans mukavemeti üzerinde bariz olumlu etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Örneğin, 28. gün sonundaki dayanımlarda PM, PS, PN, PMN ve PSN grupların sırayla %37, 41, 36, 31, 38 oranlarında artış göstermiş; beton ile aderans dayanımında ise, sırasıyla, %8, 126, 359, 192 ve 69 artış görülmüştür. Tozlar, kırma yüzeyinin pürüzsüzlüğünü ve matrisin sertliği artırarak iç yapıyı iyileştirmiştir. Bununla birlikte özellikler tozların etkisi toz türü, miktarı ya da tekli veya ikili kullanımına bağlı olarak değişmiştir. Deneysel testleri doğrulamak için, saf/güçlendirilmiş polyester kompozitlerin basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, çekme-basınç yorulma dayanımı ve basınç altında eğimli kesme testleri sonlu elemanlar simülasyonu ile incelenmiştir. Aşağıda, bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar özetlenmiştir:

1. Polyester, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> yoğunlukları hemen hemen aynı olduğundan, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> içeren polimer kompozitlerin yoğunluğu birbirine yakın olmuştur. Ancak, mermer tozu içeren polimer kompozitlerin yoğunluğu, mermer tozunun yüksek yoğunluğu nedeniyle diğer örneklere göre %26 en fazla yüksek olmuştur.
2. UGH mermer tozu oranının artmasıyla artmıştır. Öte yandan, silis dumanını %7.5 kadar ilave ettiğimizde, ultrases dalga hızı artmış, daha sonra çok küçük bir azalma gözlenmiştir. Miktarı çok az olan n-SiO<sub>2</sub>'nin eklenmesi ile UGH çok az miktarda etkilenmiştir.
3. Mermer tozu, silis dumanı veya n-SiO<sub>2</sub>'nin polimer kompozitlere ilave edilmesi, tüm grupların basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmış ve optimum kullanıma

oranlarının sırasıyla mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> için %30, 5 ve 1 olarak seçilmesi uygun görülmüştür.

4. Mermer tozu, silis dumanı ve n-SiO<sub>2</sub> oranını artıkça grupların elastisite modülü artmıştır. Sırasıyla gruplar içinde PM30, PS7,5, PN1, PM30N1 ve PS5N1.5 gruplarında maksimum artış gözlenmiştir.
5. Grupların eğilmede çekme dayanımı sonuçları, sadece n-SiO<sub>2</sub> içeren grupların çekme dayanımında bir artış oluşturduğunu açıkça göstermiştir.
6. Eğimli kesme testinin sonucu, farklı boyutlardaki silika esaslı dolgu malzemeleriyle güçlendirilmiş polimer kompozitlerin, saf polyester kompozitlere kıyasla mükemmel bir aderans mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir.
7. Eğimli kesme testinin yük deformasyon eğrileri, n-SiO<sub>2</sub> ve mermer tozu ilavesinin düşük deformasyonda büyük yük taşıdığını, ancak n-SiO<sub>2</sub> ile silis dumanı içeren grupların büyük deformasyona karşılık düşük yük taşıyabildiğini açıkça göstermiştir.
8. Yarmada çekme mukavemeti sonuçları, dolgu malzemelerinin tüm grupların çekme mukavemetini arttırdığını ve SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi kırık yüzeyin pürüzlülüğünden dolayı PN1, PM30N1 ve PS5N1 gruplarında en yüksek değer aldığını göstermiştir.
9. Mohr-Coulomb zarf eğrileri, aderans mukavemetinin yanı sıra iç sürtünme açısının takviye malzemeleri eklenerek artırıldığını ve PM30N1 grubunda gözlemlenen en iyi aderans mukavemeti ve iç sürtünme değerlerinin olduğunu göstermiştir.
10. ABAQUS'ta yapılan sonlu eleman analizi sayesinde, sonlu eleman modelinin sonuçları deneysel sonuçlarla uyumludur. Saf/güçlendirilmiş polyester kompozit grupların tek eksenli çekme-basma yorulma davranışını başarıyla tahmin edebilmiştir. Önümüzdeki çalışmalarda, farklı matris ve dolgu malzemeleri farklı boyutlarda düşük maliyetle ve daha kısa sürede farklı testler denenerek çalışmanın ileri aşamaları gerçekleştirilebilir.

Konu üzerinde çalışma yapacak araştırmacılar için;

- i. Mekanik özelliklerdeki değişikliklerin farklı kütleme yöntemleri, farklı mineral atık katkı malzemeleri ve farklı nano-tozlarla incelenmesi,
- ii. Donma-çözülme, sülfat, asit atakları vb. dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi,
- iii. Farklı reçine türlerinin (örneğin Epoksi) mermer tozu, silis dumanı ve nanomalzemeler ile mekanik ve aderans özelliklerinin incelenmesi.

- iv. Telli fırçalama, kum püskürtme ve su jeti yöntemleri gibi farklı yüzey işleme yöntemlerinin etkisinin incelenmesi,
- v. Fiber gibi farklı faz takviyeli polimer kompozitlerin mekanik ve aderans özelliklerinin incelenmesi, gibi konuların çalışılması tavsiye edilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Abo Sabah, S. H., Hassan, M. H., Muhamad Bunnori, N., and Megat Johari, M. A., 2019. Bond strength of the interface between normal concrete substrate and GUSMRC repair material overlay. *Construction and Building Materials*, 216, 261–271.
- ACI 546R, 2004. *Concrete Repair Guide*. American Concrete Institute, USA.
- ACI 548.1R, 1997. *Guide for the Use of Polymers in Concrete*. American Concrete Institute, USA.
- ACI 548.5R, 2016. *Guide for Polymer Concrete Overlays*. American Concrete Institute, USA.
- Akaluzia, R. O., Edoziuno, F. O., Adediran, A. A., Odoni, B. U., Edibo, S., and Olayanju, T. M. A., 2020. Evaluation of the effect of reinforcement particle sizes on the impact and hardness properties of hardwood charcoal particulate-polyester resin composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Alameri, I., and Oltulu, M., 2020. Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes. *Applied Nanoscience*, 10, 4087–4102.
- Alameri, I., and Oltulu, M., 2021. Bond Strength Between Concrete Substrate and Reinforced Polyester Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(1), 56–65.
- Alanazi, H., Yang, M., Zhang, D., and Gao, Z. (Jerry)., 2016. Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar. *Cement and Concrete Composites*, 65, 75–82.
- Alyousef, R., Benjeddou, O., Soussi, C., Khadimallah, M. A., and Mustafa Mohamed, A., 2019. Effects of Incorporation of Marble Powder Obtained by Recycling Waste Sludge and Limestone Powder on Rheology, Compressive Strength, and Durability of Self-Compacting Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*; Hindawi.
- Anderson, K. W., Uhlmeyer, J. S., Russell, M., and Simonson., 2013. *Polyester Polymer Concrete Overlay (Tech Report WA-RD 797.1)*. Washington. USA.
- Ashish, D. K., Verma, S. K., Kumar, R., and Sharma, N., 2016. Properties of concrete incorporating sand and cement with waste marble powder. *Advances in Concrete Construction*, 4(2), 145–160.
- ASTM C496, 2017. *Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- ASTM C882 / C882M, 2020. *Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear*. ASTM International.
- ASTM E494, 2020. *Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials*. ASTM International.
- Awad, A. H., and Abdellatif, M. H., 2019. Assessment of mechanical and physical properties of LDPE reinforced with marble dust. *Composites Part B: Engineering*, 173, 106948.
- Awad, A. H., El-gamasy, R., A. Abd El-Wahab, A., and Hazem Abdellatif, M., 2019. Mechanical behavior of PP reinforced with marble dust. *Construction and Building Materials*, 228, 116766.

- Bakhsh, K. N., 2010. Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs. Master Degree Thesis, Royal Institute of Technology (KTH).
- Barbuta, M., Șerbănoiu, A. A., Cadere, C., and Helepciuc, C. M., 2017. Effects of Marble Waste on Properties of Polymer Concrete. *Advanced Engineering Forum*; Trans Tech Publications Ltd.
- Belytschko, T., and Black, T., 1999. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45(5), 601–620.
- Bentz, D. P., De la Varga, I., Muñoz, J. F., Spragg, R. P., Graybeal, B. A., Hussey, D. S., Jacobson, D. L., Jones, S. Z., and LaManna, J. M., 2018. Influence of substrate moisture state and roughness on interface microstructure and bond strength: Slant shear vs. pull-off testing. *Cement and Concrete Composites*, 87, 63–72.
- BS 6319, 1990. Testing of resin and polymer/cement compositions for use in construction. UK.
- Carbonell Muñoz, M. A., Harris, D. K., Ahlborn, T. M., and Froster, D. C., 2014. Bond Performance between Ultrahigh-Performance Concrete and Normal-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(8), 04014031.
- Ceia, F., Raposo, J., Guerra, M., Júlio, E., and de Brito, J., 2016. Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, 109, 139–145.
- Chakrabarty, J., 2010. *Applied Plasticity*, Second Edition. Springer Science and Business Media.
- Choudhary, M., Singh, T., Sharma, A., Dwivedi, M., and Patnaik, A., 2019. Evaluation of some mechanical characterization and optimization of waste marble dust filled glass fiber reinforced polymer composite. *Materials Research Express*, 6(10), 105702.
- Çınar, M. E., and Kar, F., 2018. Characterization of composite produced from waste PET and marble dust. *Construction and Building Materials*, 163, 734–741.
- Clímaco, J. C. T. S., and Regan, P. E., 2015. Evaluation of bond strength between old and new concrete in structural repairs. *Magazine of Concrete Research*.
- D638, 2014. Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. USA
- Daghash, S. M., Soliman, E. M., Kandil, U. F., and Reda Taha, M. M., 2016. Improving Impact Resistance of Polymer Concrete Using CNTs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(4), 539–553.
- Dębska, B., Lichołai, L., Silva, G. J. B., and Altoé Caetano, M., 2020. Assessment of the Mechanical Parameters of Resin Composites with the Addition of Various Types of Fibres. *Materials*, 13(6), 1378.
- Diab, A. M., Abd Elmoaty, A. E. M., and Tag Eldin, M. R., 2017. Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 73–82.
- Douba, A., Emiroglu, M., Kandil, U. F., and Reda Taha, M. M., 2019. Very ductile polymer concrete using carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 196, 468–477.
- Douba, A., Genedy, M., Matteo, E. N., Kandil, U. F., Stormont, J., and Reda Taha, M. M., 2017. The significance of nanoparticles on bond strength of polymer concrete to steel. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 74, 77–85.

- Elalaoui, O., Ghorbel, E., and Ouezdou, M. B., 2018. Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 192, 233–239.
- Emmons, P. H. 1992. *Concrete repair and maintenance illustrated: Problem analysis; Repair Strategy; Techniques*. John Wiley and Sons. Kingston, MA
- Espeche, A. D., and León, J., 2011. Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1222–1235.
- Fallah, S., and Nematzadeh, M., 2017. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 132, 170–187.
- FEMA 461., 2007. *Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Fockaert, L. I., Pletincx, S., Ganzinga-Jurg, D., Boelen, B., Hauffman, T., Terryn, H., and Mol, J. M. C., 2020. Chemisorption of polyester coatings on zirconium-based conversion coated multi-metal substrates and their stability in aqueous environment. *Applied Surface Science*, 508, 144771.
- Fu, Q., Yan, L., and Kasal, B., 2020. Testing methods for shear strength of bond line between concrete and different types of engineered wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102, 102671.
- Grantham, M., and Majorana, C., 2009. *Concrete solutions: Proceedings of the [Third] International Conference on Concrete Solutions, Padua, Italy, 22 - 25 June 2009*. CRC Press, Balkema.
- Gürü, M., Tekeli, S., and Akin, E., 2007. Manufacturing of Polymer Matrix Composite Material Using Marble Dust and Fly Ash. *Key Engineering Materials*, 336–338, 1353–1356.
- Guru, S., Amritphale, S. S., Mishra, J., and Joshi, S., 2019. Multicomponent red mud-polyester composites for neutron shielding application. *Materials Chemistry and Physics*, 224, 369–375.
- Haber, Z. B., Munoz, J. F., De la Varga, I., and Graybeal, B. A., 2018. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing. *Construction and Building Materials*, 190, 1056–1068.
- He, Y., Wu, D., Zhou, M., Liu, H., Zhang, L., Chen, Q., Yao, B., Yao, D., Jiang, D., Liu, C., and Guo, Z., 2020. Effect of MoO<sub>3</sub>/carbon nanotubes on friction and wear performance of glass fabric-reinforced epoxy composites under dry sliding. *Applied Surface Science*, 506, 144946.
- Hussin, M. W., A. Khalid, N. H., Ismail, M., A. Ismail, M., Mohamed, A., A. Rashid, A. S., Ariffin, N. F., Abdul Shukor Lim, N. H., and Samadi, M., 2015. Polymer Concrete To Normal Concrete Bond Strength: Mohr-Coulomb Theory. *Jurnal Teknologi*, 77(16).
- Ince, C., Hamza, A., Derogar, S., and Ball, R. J., 2020. Utilisation of waste marble dust for improved durability and cost efficiency of pozzolanic concrete. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122213.
- Jo, B.-W., Park, S.-K., and Park, J.-C., 2008. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2281–2291.

- Júlio, E. N. B. S., Branco, F. A. B., Silva, V. D., and Lourenço, J. F., 2006. Influence of added concrete compressive strength on adhesion to an existing concrete substrate. *Building and Environment*, 41(12), 1934–1939.
- Jurumenha, M. A. G., and Reis, J. M. L., 2010. Fracture mechanics of polymer mortar made with recycled raw materials. *Materials Research*, 13(4), 475–478.
- Kalusuraman, G., Siva, I., Munde, Y., Selvan, C. P., Kumar, S. A., and Amico, S. C., 2020. Dynamic-mechanical properties as a function of luffa fibre content and adhesion in a polyester composite. *Polymer Testing*, 87, 106538.
- Kaştan, A., and Okan, O., 2016. Polimer Matrisli Kompozitlerin Çekme Mukavemetine Nano Katkıların Etkisi. *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4(1), 35–41.
- Khan, Z. I., Arsad, A., Mohamad, Z., Habib, U., and Zaini, M. A. A., 2020. Comparative study on the enhancement of thermo-mechanical properties of carbon fiber and glass fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Kinvi-Dossou, G., Matadi Boumbimba, R., Bonfoh, N., Garzon-Hernandez, S., Garcia-Gonzalez, D., Gerard, P., and Arias, A., 2019. Innovative acrylic thermoplastic composites versus conventional composites: Improving the impact performances. *Composite Structures*, 217, 1–13.
- Knight, M. L., Wilson, G. S., Seger, W. J., and Mahadevan, S., 2004. Overlay Types Used as Preventive Maintenance on Tennessee Bridge Decks. *Transportation Research Record*, 1866(1), 79–84.
- Kumar, R., 2016. A Review on Epoxy and Polyester Based Polymer Concrete and Exploration of Polyfurfuryl Alcohol as Polymer Concrete. *Journal of Polymers; Hindawi*.
- Lane, S., and Jalinoos, F., 2016. FHWA LTBP Summary—Current Information on the Use of Overlays and Sealers (FHWA-HRT-16-079). FHWA Publication.
- Li, M., Khelifa, M., and El Ganaoui, M., 2017. Mechanical characterization of concrete containing wood shavings as aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 587–596.
- Li, X., Wang, F., Fang, H., Zheng, D., and Fu, Y., 2021. Bond Behavior between Concrete and Self-Expansion Polymer Material under Normal Pressures. *Advances in Civil Engineering*, 2021, e6675102.
- Lithner, D., Larsson, Å., and Dave, G., 2011. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of The Total Environment*, 409(18), 3309–3324.
- Lokuge, W., and Aravinthan, T., 2013. Effect of fly ash on the behaviour of polymer concrete with different types of resin. *Materials and Design*, 51, 175–181.
- López-Carreño, R.-D., Pujadas, P., Cavalaro, S. H. P., and Aguado, A., 2017. Bond strength of whitetoppings and bonded overlays constructed with self-compacting high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 835–845.
- Mansour, R., El Abidine, R. Z., and Brahim, B., 2017. Performance of polymer concrete incorporating waste marble and alfa fibers. *Advances in Concrete Construction*, 5(4), 331.
- Miller, M., 2005. *Polymers in Cementitious Materials*. iSmithers Rapra Publishing.
- Mirmoghtadaei, R., Mohammadi, M., Ashraf Samani, N., and Mousavi, S. 2015. The impact of surface preparation on the bond strength of repaired concrete by metakaolin containing concrete. *Construction and Building Materials*, 80, 76–83.

- Mohammadi, M., Mir Moghtadaei, R., and Samani, N., 2014. Influence of silica fume and metakaolin with two different types of interfacial adhesives on the bond strength of repaired concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 141–150.
- Momayez, A., Ehsani, M. R., Ramezani-pour, A. A., and Rajaie, H., 2005. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 748–757.
- Morote-Martínez, V., Pascual-Sánchez, V., and Martín-Martínez, J. M., 2008. Improvement in mechanical and structural integrity of natural stone by applying unsaturated polyester resin-nanosilica hybrid thin coating. *European Polymer Journal*, 44(10), 3146–3155.
- Oltulu, M., and Alameri, I., 2019. The Mechanical Properties of Concrete with Red Mud (Bauxite Residue) and Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at High Temperatures. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(6), 4692–4701.
- Özel, C., ve Baydar, U., 2016. Onarım Ve Güçlendirmede Kullanılan Polimer Betonların Aderans Özelliklerinin Beton Yüzey Karakteristikleri İle İlişkileri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(3), 46–61.
- Öztürk, B., Gedikli, H., and Kılıçarslan, Y. S., 2020. Erosive wear characteristics of E-glass fiber reinforced silica fume and zinc oxide-filled epoxy resin composites. *Polymer Composites*, 41(1), 326–337.
- Pacheco-Torgal, F., and Jalali, S., 2011. Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 582–590.
- Pegoretti, A., and Dorigato, A., 2019. Polymer Composites: Reinforcing Fillers. Pp. 1–72 in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, edited by John Wiley & Sons, Inc. Wiley.
- Petrík, A., and Ároch, R., 2019. Usage of true stress-strain curve for FE simulation and the influencing parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 566, 012025.
- Pinto, D., Bernardo, L., Amaro, A., and Lopes, S., 2015. Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites Using Alumina as Reinforcement—A Review. *Journal of Nano Research*, 30, 9–38.
- Polat, H., and Oltulu, M., 2019. Atık Mermer Tozu Katkili Polimer Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. II. Uluslararası Battalgazi multidisipliner çalışmalar kongresi, Malatya, Turkey.
- Poon, C. S., Kou, S. C., and Lam, L., 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20(10), 858–865.
- Raja, V. L., and Kumaravel, A., 2015. Studies on Physical and Mechanical Properties of Silica Fume-Filled Nylon 66 Polymer Composites for Mechanical Components. *Polymers and Polymer Composites*, 23(6), 427–434.
- Reis, J. M. L., and Ferreira, A. J. M., 2004. A contribution to the study of the fracture energy of polymer concrete and fibre reinforced polymer concrete. *Polymer Testing*, 23(4), 437–440.
- Rothon, R. N., 2003. *Particulate-filled polymer composites* (2nd ed). Rapra Technology.
- Ruban, Y. J. V., Mon, S. G., and Roy, D. V. 2013. Mechanical and thermal studies of unsaturated polyester-toughened epoxy composites filled with amine-functionalized nanosilica. *Applied Nanoscience*, 3(1), 7–12.

- Sadromomtazi, A., and Khoshkbijari, R. K., 2019. Determination and Prediction of Bonding Strength of Polymer Modified Concrete (PMC) as the Repair Overlay on the Conventional Concrete Substrate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(3), 1141–1149.
- Sai Krishnan, G., Ilayaperumal, K., Ganesh Babu, L., Kumar, S., Sathish, B., and Sanjana, R., 2020. Investigation on the physical and mechanical characteristics of demostachya bipinnata reinforced with polyester composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Saldanha, R., Júlio, E., Dias-da-Costa, D., and Santos, P., 2013. A modified slant shear test designed to enforce adhesive failure. *Construction and Building Materials*, 41, 673–680.
- Santos, P. M. D., Júlio, E. N. B. S., and Silva, V. D., 2007. Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1688–1695.
- Sharma, A., and Patnaik, A., 2018. Experimental Investigation on Mechanical and Thermal Properties of Marble Dust Particulate-Filled Needle-Punched Nonwoven Jute Fiber/Epoxy Composite. *JOM*, 70(7), 1284–1288.
- Shih, J.-Y., Chang, T.-P., and Hsiao, T.-C., 2006. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering: A*, 424(1), 266–274.
- Shukla, A., Gupta, N., and Kishore, K., 2020. Experimental investigation on the effect of steel fiber embedded in marble dust based concrete. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2938–2945.
- Sikora, P., Łukowski, P., Cendrowski, K., Horszczaruk, E., and Mijowska, E., 2015. The Effect of Nanosilica on the Mechanical Properties of polymer-Cement Composites (PCC). *Procedia Engineering*, 108, 139–145.
- Silfwerbrand, J., 2003. Shear bond strength in repaired concrete structures. *Materials and Structures*, 36(6), 419–424.
- Singh, S., Dwivedi, S. P., Kumar, A., Anand, V., Vikram Singh, V., and Tauqueer Ansari, M. d., 2021. A critical review on the utilization of waste PET and marble dust in the development of composite material. *Materials Today: Proceedings*.
- Smith, A. 1991., Overlaying concrete bridge decks with polymer concrete. 13(4), 325–332.
- Sprinkel, M. M., and Ozyildirim, C. 2000. Evaluation of high performance concrete overlays placed on Route 60 over Lynnhaven Inlet in Virginia (FHWA/VTRC 01-R1.). Article FHWA/VTRC 01-R1,.
- Starost, K., Frijns, E., Laer, J. V., Faisal, N., Egizabal, A., Elizetxea, C., Nelissen, I., Blázquez, M., and Njuguna, J., 2017. The effect of nanosilica (SiO<sub>2</sub>) and nanoalumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) reinforced polyester nanocomposites on aerosol nanoparticle emissions into the environment during automated drilling. *Aerosol Science and Technology*, 51(9), 1035–1046.
- Tang, Z., Huang, F., and Peng, H., 2021. Effect of 3D roughness characteristics on bonding behaviors between concrete substrate and asphalt overlay. *Construction and Building Materials*, 270, 121386.
- Tayeh, B. A., Bakar, B. H. A., Johari, M. A. M., and Voo, Y. L., 2013. Evaluation of Bond Strength between Normal Concrete Substrate and Ultra High Performance Fiber Concrete as a Repair Material. *Procedia Engineering*, 54, 554–563.
- Tcherdyntsev, V., 2021. Reinforced Polymer Composites. *Polymers*, 13(4), 564.
- TS EN 196-1., 2016. Çimento deney metotları—Bölüm 1: Dayanım tayini. TSE., Ankara.

- TS EN 197-1., 2012. Çimento—Bölüm 1: Genel çimentolar—Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE., Ankara.
- TS EN 206., 2015. Beton—Özellik, performans, imalât ve uygunluk. TSE., Ankara.
- TS EN 934-2., 2014. Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton katkıları- Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. TSE., Ankara.
- TS EN 1008., 2013. Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. TSE., Ankara.
- TS EN 1097-6., 2015. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler—Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-1., 2014. Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-2., 2019. Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabii tutulması. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-3., 2012. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-5., 2019. Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. TSE., Ankara.
- TS EN 12390-6., 2010. Beton—Sertleşmiş beton deneyleri—Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. TSE., Ankara.
- TS1226. 1996., Deney elekleri-Metal levhalı yuvarlak veya kare delikli. TSE., Ankara.
- Ulubeyli, G. C., Bilir, T., and Artir, R., 2016. Durability Properties of Concrete Produced by Marble Waste as Aggregate or Mineral Additives. *Procedia Engineering*, 161, 543–548.
- Van Krevelen, D. W., and Te Nijenhuis, K., 2009. Properties of Polymers Their Correlation with Chemical Structure ; their Numerical Estimation and Prediction from Additive Group Contributions. Elsevier Science and Technology Books.
- Wang, J., Dai, Q., Guo, S., and Si, R., 2019. Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlays. *Construction and Building Materials*, 203, 469–480.
- Yeon, J., Song, Y., Kim, K. K., and Kang, J., 2019. Effects of Epoxy Adhesive Layer Thickness on Bond Strength of Joints in Concrete Structures. *Materials*, 12(15), 2396.
- Yesilata, B., Isıker, Y., and Turgut, P., 2009. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1878–1882.
- Zamaniah, M., Mortezaei, M., Salehnia, B., and Jam, J. E. 2013., Fracture toughness of epoxy polymer modified with nanosilica particles: Particle size effect. *Engineering Fracture Mechanics*, 97, 193–206.
- Zanotti, C., Banthia, N., and Plizzari, G., 2014. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. *Cement and Concrete Research*, 63, 117–126.
- Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J., and Sun, B., 2020. Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 241, 117980.

- Zhao, S., Liang, W., Wang, Z., and Lei, H., 2017. Effect of nano-silica modification on the tensile property of SMA/GF/CF/epoxy super hybrid woven fabric composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 32(6), 1293–1300.
- Zheng, Y., Chen, L., Wang, X., and Wu, G., 2020. Modification of Renewable Cardanol onto Carbon Fiber for the Improved Interfacial Properties of Advanced Polymer Composites. *Polymers*, 12(1), 45.



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
<b>Adı Soyadı:</b>	Ibrahim Alameri
<b>Doğum tarihi:</b>	
<b>Doğum Yeri:</b>	
<b>Uyruğu:</b>	
<b>Adres:</b>	
<b>Tel:</b>	
<b>E-mail:</b>	
Eğitim	
<b>Lise:</b>	Kuveyt Lisesi
<b>Lisans:</b>	Sana'a Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
<b>Yüksek lisans:</b>	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı (2017)
<b>Doktora:</b>	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
<b>İngilizce:</b>	Çok iyi
<b>Türkçe:</b>	Çok iyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Araştırma Görevlisi Sana'a Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Mühendislik odası Sana'a Şubesi, Yemen	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Ibrahim Alameri and meral Oltulu, Mechanical properties of polymer composites reinforced by silica-based materials of various sizes, Applied Nanoscience, 10, 4084-4102. 2. Ibrahim Alameri and meral Oltulu, Bond Strength Between Concrete Substrate and Reinforced Polyester Composites, Journal of Materials Engineering and Performance, 30, 56-65.	