T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIK ARAÇ LASTİKLERİNİN POLİMERLERLE KOMPOZİTLENEREK ÇEVRE DOSTU YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİ

Canan KAYA ŞAHİN

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EKİM 2026

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

ATIK ARAÇ LASTİKLERİNİN POLİMERLERLE KOMPOZİTLENEREK ÇEVRE DOSTU YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİ

Tez Yazarı
Canan KAYA ŞAHİN

Danışman
Doç. Dr. Mehrzad MOHABBI

EKİM 2026
BİNGÖL

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Atık Araç Lastiklerinin Polimerlerle Kompozitlenerek Çevre Dostu Yapı Malzemesi Üretimi

Yazarı: Canan KAYA ŞAHİN

İlk Teslim: 29.09.2026

Savunma: 15.10.2026

TEZ ONAYI

Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

		İmza
Danışman:	Doç. Dr. Mehrzad MOHABBI Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Senem YILMAZ ÇETİN Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Sadık VAROLGÜNEŞ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Doç. Dr. Murat DENER
Enstitü Müdürü

BEYAN

Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım "Atık Araç Lastiklerinin Polimerlerle Kompozitlenerek Çevre Dostu Yapı Malzemesi Üretimi" Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

15.10.2026

Canan KAYA ŞAHİN

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden elde edilen granüllerin farklı polimer bağlayıcılarla kompozit hâle getirilerek yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi araştırılmıştır. Çalışma sürecinde granül dağılımı, bağlayıcı türü, mekanik davranış, mikroyapı ve ısıl karakterizasyon birlikte ele alınmıştır. Atık lastiklerin yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak değil, uygun tasarım ve doğrulama ile katma değerli bir mühendislik malzemesine dönüştürülebilecek ikincil hammadde olarak değerlendirilmesi bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmuştur.

Araştırmanın planlanması ve yürütülmesi süresince bilimsel bilgi ve deneyimiyle yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Mehrzad Mohabbi'ye teşekkür ederim.

Tezde kullanılan atık lastik granüllerinin teminindeki destekleri için AKO ÖTL Geri Dönüşüm ve AKO Lastik Kaplama Fabrikası yetkililerine, Genel Müdür Sayın Önder Kılıç'a ve Teoman Aydemir'e; polimer malzemelerin temini ve teknik katkıları için GENTAŞ KİMYA SAN. ve TİC. PAZ. A.Ş.'den Atabey Avunduk'a, FLOKSER Kimya'dan Dr. Nesrin Oğuz'a ve Erdem Yün'e teşekkür ederim. Numune üretim çalışmalarında Bingöl Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü laboratuvarlarını kullanmama imkân sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nuri Kolak'a; laboratuvar çalışmaları, malzeme hazırlığı, kalıplama ve numune üretim aşamalarındaki destekleri için İnşaat Mühendisliği son sınıf öğrencilerine teşekkür ederim.

Tez çalışmamı mesleki görevlerimle birlikte sürdürebilmem için gerekli izin ve kolaylıkları sağlayan, süreç boyunca gösterdiği anlayış ve destekle çalışmalarımın ilerlemesine katkıda bulunan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Bingöl Sanayi ve Teknoloji İl Müdürü Sayın Mehmet Mesut İlhan'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Mekanik ve ileri karakterizasyon çalışmalarının yürütülmesine imkân sağlayan ilgili üniversite ve laboratuvar birimlerine; mesleki bilgi ve tecrübesiyle tez sürecime destek olan kardeşim, Kaya Mühendislik İnşaat Mühendisi Kadir Kaya'ya; bu süreçte anlayışı, sabrı ve desteğiyle her zaman yanımda olan eşime ve aileme gönülden teşekkür ederim.

Canan KAYA ŞAHİN
BİNGÖL, 2026

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... İV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET ..... Vİİİ
ABSTRACT ..... İX
ŞEKİLLER LİSTESİ X
TABLOLAR LİSTESİ ..... Xİİ
EKLER LİSTESİ ..... XİV
SİMGELER VE KISALTMALAR XV

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 4

2.1. Ömrünü Tamamlamış Araç Lastikleri ve Malzeme Geri Kazanımı 4
2.2. Yapı Sektöründe Kaynak Tüketimi, Çimento ve Sürdürülebilir Malzeme Yaklaşımı 6
2.3. Yapı Malzemelerinde Performans Gereksinimleri ve İşlevsel Kullanım Alanları 7
2.4. Atık Lastiklerin Yapı ve İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı 8
2.5. Çimento Esaslı Atık Lastik Kompozitleri ve Polimer Esaslı Sistemlere Geçiş 10
2.6. Atık Lastik-Polimer Kompozit Sistemleri 11
2.6.1. Polimerlerin Temel Sınıflandırılması ve Tezde Kullanılan Bağlayıcıların Konumu 11
2.6.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Tez Malzemesinin Konumu 12
2.6.3. Epoksi Esaslı Atık Lastik Kompozitleri 12
2.6.4. Poliüretan Esaslı Atık Lastik Kompozitleri 14
2.6.5. Doymamış Polyester Esaslı Atık Lastik Kompozitleri 15
2.6.6. Fenolik/Novolak Esaslı Atık Lastik Kompozitleri 16
2.6.7. Tezde Kullanılan Polimer Bağlayıcıların Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi 17
2.7. Granül Boyutu ve Tane Boyutu Dağılımının Etkisi 18
2.8. Kauçuk-Polimer Ara Yüzeyi ve Mikroyapı 19
2.9. Fiziksel ve Mekanik Performansın Değerlendirilmesi 20
2.9.1. Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlık 20
2.9.2. Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV) 20
2.9.3. Basınç Dayanımı ve Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışı 21
2.9.4. Eğilme Davranışı 22
2.9.5. Tokluk ve Enerji Yutma Davranışı 22
2.9.6. Fiziksel, Mekanik ve Mikroyapısal Bulguların Birlikte Değerlendirilmesi 23
2.10. Mikroyapısal, Spektroskopik ve Termal Karakterizasyon 23
2.10.1. SEM ile Mikroyapısal İnceleme 23
2.10.2. EDS ve Element Haritalama 24
2.10.3. ATR-FTIR Spektroskopisi 24
2.10.4. TGA ve DTG ile Termal Karakterizasyon 25
2.10.5. Mikroyapısal, Spektroskopik ve Termal Bulguların Birlikte Değerlendirilmesi 25
2.10.6. Isıl İletkenlik ve Dayanımın Birlikte Değerlendirilmesi 26
2.11. Geleneksel ve Alternatif Yapı Malzemeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme 27
2.12. Literatürün Genel Değerlendirilmesi, Araştırma Boşluğu ve Tezin Özgün Katkısı 28

3. MATERYAL VE METOT 30

3.1. Kullanılan Malzemeler ... 31
3.1.1. Atık Araç Lastiği Granülleri ... 32
3.1.2. Poliüretan Bağlayıcı ... 32
3.1.3. Epoksi Reçine Sistemi ... 33
3.1.4. Novolak Fenolik Reçine ve Hekzamin ... 33
3.1.5. Doymamış Polyester, MEKP ve Kobalt Hızlandırıcı ... 33
3.1.6. Yardımcı Malzemeler ve Laboratuvar Güvenliği ... 33
3.2. Deney Tasarımı, Granül Karışımları ve Reçeteler ... 34
3.2.1. Granül Karışım Tasarımları ... 35
3.2.2. Tane Boyutu Dağılımının Deney Tasarımındaki Yeri ... 35
3.2.3. Ana Reçine/Bağlayıcı Oranının Belirlenmesi ... 35
3.2.4. Basınç, UPV ve σ–ε Ana Seri Reçeteleri ... 36
3.2.5. Eğilme Numunelerinin Reçeteleri ... 37
3.2.6. Üretilen Numune Sayısı ve Deney Grupları ... 37
3.2.7. Kompozitlerin 1 m³ İçin Teorik Hammadde Miktarı ve Maliyet Analizi ... 38
3.3. Kompozit Numunelerin Üretimi ... 39
3.3.1. Üretim Laboratuvarları ve Kullanılan Donanım ... 39
3.3.2. Kalıp Hazırlığı ... 40
3.3.3. Tartım ve Karıştırma ... 40
3.3.4. Kalıplama ve Sıkıştırma ... 41
3.3.5. İlk Sertleşme, Kür Süreci ve Deney Yaşları ... 42
3.3.6. Eğilme Numunelerinin Hazırlanması ... 44
3.3.7. Ön Basınç Numunesi ve Nihai σ–ε Numunelerinin Ayrımı ... 44
3.3.8. Isıl İletkenlik Numunelerinin Üretimi ... 45
3.4. Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV) Ölçümleri ... 46
3.5. Mekanik Deneyler ... 48
3.5.1. Bingöl Ön Basınç Deneyi ... 48
3.5.2. Atatürk Üniversitesi Gerilme–Birim Şekil Değiştirme (σ–ε) Deneyleri ... 49
3.5.3. Gerilme–Birim Şekil Değiştirme (σ–ε) Eğrileri ... 50
3.5.4. Tepe Sekant Modülü ... 51
3.5.5. Tokluk ve Enerji Yutma ... 51
3.5.6. Eğilme Deneyi ... 52
3.6. SEM–EDS ve Element Haritalama ... 53
3.7. ATR-FTIR Spektroskopisi ... 54
3.8. Termogravimetrik Analiz (TGA/DTG) ... 55
3.9. Isıl İletkenlik Ölçümleri ... 56
3.9.1. Basınç Dayanımı–Isıl İletkenlik Performans İndeksi ... 58
3.10. Verilerin İşlenmesi ve Karşılaştırmalı Değerlendirme ... 58
3.10.1. Mekanik–Mikroyapısal Entegrasyon Yaklaşımı ... 60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA ... 62
4.1. Basınç Mukavemeti Bulguları ... 62
4.1.1. Deney Yaşları ve 28 Günlük Referansın Seçilmesi ... 66
4.2. Nihai %20 ve 28 Günlük Deney Matrisinin Genel Değerlendirilmesi ... 68
4.3. Eğilme Mukavemeti Bulguları ... 69
4.4. Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV) Bulguları ... 70
4.5. Granül Düzenine Göre Mekanik Performansın Karşılaştırılması ... 71
4.6. UPV, Basınç ve Eğilme Mukavemetleri Arasındaki İlişkiler ... 73

4.6.1. UPV–Basınç Mukavemeti İlişkisi ... 73
4.6.2. Eğilme Mukavemetinin UPV ve Basınçla İlişkisi ... 76
4.7. Gerilme–Birim Şekil Değiştirme Davranışı ... 77
4.7.1. Epoksi Bağlayıcılı Numuneler ... 78
4.7.2. Novolak–Hekzamin Bağlayıcılı Numuneler ... 78
4.7.3. Poliüretan Bağlayıcılı Numuneler ... 79
4.7.4. Polyester Bağlayıcılı Numune ... 80
4.8. SEM Mikroyapı Bulguları ... 81
4.9. EDS Spektrumları ve Element Haritalama Bulguları ... 85
4.10. ATR-FTIR Bulguları ... 88
4.11. Tokluk ve Tepe Sekant Modülünün Değerlendirilmesi ... 91
4.11.1. Tokluk ve Enerji Yutma Kapasitesi ... 91
4.11.2. Tepe Sekant Modülü ve Elastisite Modülü Açısından Değerlendirme ... 94
4.11.3. Rijitlik–Tokluk İlişkisinin Birlikte Değerlendirilmesi ... 95
4.12. Mekanik ve Mikroyapısal Bulguların Bütünleşik Değerlendirilmesi ... 97
4.13. Termogravimetrik Analiz (TGA/DTG) Bulguları ve Bütünleşik Değerlendirme ... 98
4.14. Isıl İletkenlik Bulguları ... 102
4.14.1. Basınç Dayanımı–Isıl İletkenlik İlişkisinin Değerlendirilmesi ... 105
4.15. Bulguların Literatürle Karşılaştırmalı Tartışılması ve Bölümün Genel Değerlendirmesi ... 107

5. SONUÇLAR ... 109

5.1. Mekanik ve Fiziksel Performansa İlişkin Temel Sonuçlar ... 109
5.2. Termal ve Çoklu Karakterizasyon Sonuçlarının Birlikte Değerlendirilmesi ... 110
5.3. Potansiyel Kullanım Yönleri ve Çalışmanın Sınırları ... 112
5.4. Genel Sonuç ... 114

ÖNERİLER ... 115
KAYNAKLAR ... 117
EKLER ... 124
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Atık Araç Lastiklerinin Polimerlerle Kompozitlenerek Çevre Dostu Yapı Malzemesi Üretimi

Canan KAYA ŞAHİN

Yüksek Lisans Tezi

BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Ekim 2026, Sayfa: xvi + 124

Atık araç lastiklerinin yapı malzemelerine dönüştürülmesi, kaynakların yeniden değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada epoksi, poliüretan, novolak–hekzamin ve doymamış polyester bağlayıcılar, dört granül düzeninde karşılaştırılmıştır. Dayanım ve deformasyon davranışının bağlayıcı türü ile granül düzeninin birlikte etkisine bağlı olduğu araştırılmıştır. Oluşturulan 16 formülasyon için 3, 28 ve 90 günlük basınç deneylerinin her birine 48 adet olmak üzere toplam 144 basınç numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca 48 eğilme ve 16 ısıl iletkenlik numunesi üretilmiş; ana deney programındaki toplam numune sayısı 208 olmuştur. Basınç sonuçlarında deney yaşları arasında Friedman testiyle anlamlı fark saptanmamış ($p = 0,983$); 28 gün ortak mekanik karşılaştırma yaşı olarak kullanılmıştır. Ana bağlayıcı oranı granül kütlesine göre %20 tutulmuştur. Ultrasonik geçiş hızı, 13 gerilme–birim şekil değiştirme kaydı, SEM/EDS, ATR-FTIR ve temsilci TGA/DTG analizleri birlikte değerlendirilmiştir. Isıl iletkenlik karşılaştırması, üretilen 16 plaka içinden dört bağlayıcının K4 düzenine ait raporlanan dört ölçümle sınırlandırılmıştır. Epoksi–K1, 8,21 MPa basınç ve 2,21 MPa eğilme dayanımıyla öne çıkmıştır. Poliüretan–K4, 6,29 MPa basınç ve 1,94 MPa eğilme dayanımıyla geniş görünür deformasyon aralığı göstermiştir. Novolak–hekzamin–K2 dayanım, K3 ise tepe sekant rijitliği bakımından belirginleşmiştir. Polyester mevcut reçetede daha düşük mekanik değerler vermiştir. K4 kompozitlerinin 20 °C'deki ısıl iletkenliği 0,1486–0,1998 W/(m·K) aralığında bulunmuş; en düşük değer poliüretanda ölçülmüştür. Sonuçlar, özellikle poliüretan esaslı esnek derz ve sismik ara elemanların araştırılmasını desteklemiş; doğrudan izolatör uygunluğu ve yangın güvenliği doğrulanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık araç lastiği, polimer kompozit, mekanik davranış, mikroyapı, termal analiz, ısıl iletkenlik

ABSTRACT

Development of an Environmentally Friendly Construction Material from Waste Tire–Polymer Composites

Canan KAYA ŞAHİN

Master's Thesis

BINGOL UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering
October 2026, Pages: xvi + 124

Recovering waste tires for construction materials can support resource reuse. This study compared epoxy, polyurethane, novolac–hexamine and unsaturated polyester binders across four granule arrangements. The combined influence of binder type and granule arrangement on strength and deformation was investigated. The 16 formulations required 48 compression specimens at each of 3, 28 and 90 days, totaling 144 compression specimens. Additionally, 48 flexural specimens and 16 thermal-conductivity specimens were produced, giving 208 specimens in the main experimental program. The Friedman test detected no significant age effect on compressive strength ($p = 0.983$); 28 days was adopted as the common mechanical comparison age. The main binder content was 20% of granule mass. Ultrasonic pulse velocity, 13 stress–strain records, SEM/EDS, ATR-FTIR and representative TGA/DTG analyses were evaluated together. Thermal comparison was restricted to the four reported K4 measurements among the 16 plates produced. Epoxy–K1 achieved 8.21 MPa compressive and 2.21 MPa flexural strength. Polyurethane–K4 reached 6.29 and 1.94 MPa, respectively, with a broad apparent deformation range. Novolac–hexamine–K2 showed favorable strength, whereas K3 exhibited higher peak secant stiffness. Polyester showed lower mechanical performance under the investigated formulation. Thermal conductivity of the K4 composites ranged from 0.1486 to 0.1998 W/(m·K) at 20 °C, with the lowest value measured for polyurethane. The findings support further investigation of flexible joints and seismic interface elements, particularly polyurethane-based systems; direct isolator suitability and fire safety were not established.

Keywords: End-of-life tire, polymer composite, mechanical behavior, microstructure, thermal analysis, thermal conductivity

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Deneysel çalışmanın genel akış şeması 30

Şekil 3.2. Temel malzemelerin ve kalıp ekipmanlarının laboratuvar görünümü 31

Şekil 3.3. Atık lastik granüllerinin fraksiyonları ve laboratuvar görünümleri 32

Şekil 3.4. Polimer bağlayıcılar ve numune üretiminde kullanılan kalıplar 34

Şekil 3.5. K4 karışımındaki granül fraksiyonlarının tasarım kütle payları 35

Şekil 3.6. Numune üretim çalışmalarından laboratuvar görünümleri 40

Şekil 3.7. Tartım, karıştırma donanımı ve karışım hazırlığı 41

Şekil 3.8. Kalıp hazırlığı, karışım yerleştirme ve sıkıştırma 42

Şekil 3.9. Kalıp sıkıştırma ve elle kumandalı laboratuvar düzenekleri 42

Şekil 3.10. İlk sertleşme ve termal kürde kullanılan etüv/kabin 43

Şekil 3.11. Üretilen kompozitler ile ön basınç ve nihai σ–ε numuneleri 45

Şekil 3.12. Isıl iletkenlik numunesi olarak üretilen kompozit plaka örneğinin yüzey görünümü 46

Şekil 3.13. UPV prob–numune teması ve laboratuvar uygulamaları 47

Şekil 3.14. Basınç deney düzeneği ve bilgisayar destekli izleme alanının genel görünümü 48

Şekil 3.15. Basınç deneyi cihazı, numune yerleşimi ve sonuç ekranı 48

Şekil 3.16. Basınç deneyi sırasında numune yerleşimi ve yükleme görünümü 49

Şekil 3.17. Atatürk Üniversitesinde gerçekleştirilen σ–ε deneyinde kullanılan yükleme düzeneği ve veri toplama sistemi 50

Şekil 3.18. Eğilme deney düzeneği ve numunenin yerleştirilmesi 52

Şekil 3.19. Eğilme deneyi için üretilen prizmatik numuneler 52

Şekil 3.20. SEM/EDS laboratuvarı ve kullanılan SEM cihazı 53

Şekil 3.21. ATR-FTIR analizlerinde kullanılan PerkinElmer Spectrum 100 FT-IR spektrometresi 54

Şekil 3.22. TGA/DTG analizlerinde kullanılan PerkinElmer STA 6000 cihazı 55

Şekil 4.1. Bağlayıcı türü ve granül düzenine göre %15 ve %20 basınç mukavemeti sonuçlarının karşılaştırılması 64

Şekil 4.2. Basınç deneyi sonrasında örnek kompozit numunede gözlenen makroskopik hasar görünümü 66

Şekil 4.3. Bağlayıcı türü ve granül düzenine göre eğilme mukavemeti sonuçları 69

Şekil 4.4. Bağlayıcı türü ve granül düzenine göre UPV sonuçları 70

Şekil 4.5. Dört bağlayıcı sisteminde granül düzenine göre %20 ve 28 günlük basınç mukavemeti sonuçları 71

Şekil 4.6. Dört bağlayıcı sisteminde granül düzenine göre eğilme mukavemeti sonuçları 72

Şekil 4.7. Bağlayıcı sistemlerine göre UPV–basınç mukavemeti ilişkileri ve doğrusal eğilimler 75

Şekil 4.8. Tüm %20 ve 28 günlük numuneler birlikte değerlendirildiğinde UPV–basınç mukavemeti ilişkisi 75

Şekil 4.9. Epoksi bağlayıcılı numunelerin granül düzenine göre gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri 78

Şekil 4.10. Novolak–hekzamin bağlayıcılı numunelerin granül düzenine göre gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri 79

Şekil 4.11. Poliüretan bağlayıcılı numunelerin granül düzenine göre gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri 80

Şekil 4.12. Polyester bağlayıcılı temsilci numunenin gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi 81

Şekil 4.13. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 100× SEM karşılaştırması 82

Şekil 4.14. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 250× SEM karşılaştırması 82

Şekil 4.15. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 1000× SEM karşılaştırması 83

Şekil 4.16. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 2500× SEM karşılaştırması 83

Şekil 4.17. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 5000× SEM karşılaştırması 84

Şekil 4.18. Poliüretan, epoksi ve novolak–hekzamin sistemlerinin 10.000× SEM karşılaştırması 84

Şekil 4.19. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerine ait EDX/EDS spektrumlarının karşılaştırılması 86

Şekil 4.20. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinde ortak elementlerin SEM/EDS haritalama karşılaştırması 87

Şekil 4.21. Atık lastik kauçuğu, epoksi sertleştiricisi ve poliüretan ATR-FTIR spektrumlarının alt alta karşılaştırılması 89

Şekil 4.22. Novolak–hekzamin ve polyester ATR-FTIR spektrumlarının alt alta karşılaştırılması 90

Şekil 4.23. Gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi altında kalan görünür yükleme işi alanı 92

Şekil 4.24. Numunelerin kayıt sonuna kadar hesaplanan görünür yükleme işi yoğunluklarının karşılaştırılması 94

Şekil 4.25. Numunelerin görünür tepe sekant modülü değerlerinin karşılaştırılması 95

Şekil 4.26. Görünür tepe sekant modülü ile görünür yükleme işi yoğunluğu arasındaki ilişki 96

Şekil 4.27. Bağlayıcı sistemlerinin normalize edilmiş TGA eğrileri 99

Şekil 4.28. Bağlayıcı sistemlerinin DTG eğrileri 101

Şekil 4.29. K4 kompozitlerinin ısıl iletkenlik katsayılarının karşılaştırılması 104

Şekil 4.30. K4 kompozitlerinin basınç dayanımı–ısıl iletkenlik dağılımı ve sabit indeks düzeyleri 106

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Tez çalışmasında kullanılan temel malzemeler ve tedarik bilgileri 31

Tablo 3.2. Atık lastik granüllerinin tane boyutu sınıfları 32

Tablo 3.3. Polimer bağlayıcıların raporlanan temel teknik özellikleri ve ana %20 reçeteleri 34

Tablo 3.4. Granül karışım tasarımları ve 800 g esasındaki gerçek tartım miktarları 35

Tablo 3.5. %20 ana seri için kullanılan karışım reçeteleri 36

Tablo 3.6. Eğilme numunelerinde kullanılan karışım reçeteleri 37

Tablo 3.7. 1 m³ kompozit için teorik hammadde miktarları ve maliyetleri 38

Tablo 3.8. Kompozitlerin C30/37 hazır beton ile maliyet karşılaştırması 39

Tablo 3.9. Bağlayıcı sistemlerine göre üretim ve ilk sertleşme/kür koşulları 44

Tablo 3.10. Nihai deney tasarımındaki 16 malzeme kombinasyonu ve UPV sonuçları 47

Tablo 3.11. SEM görüntüleme koşullarının cihaz kayıtlarına göre özeti 54

Tablo 3.12. EDS ve ATR-FTIR analizlerinde kullanılan kayıtlı ölçüm koşulları 55

Tablo 3.13. Mekanik deneylerde kullanılan yöntem referansları ve uygulanan temel koşullar 60

Tablo 4.1. Bağlayıcı türü, granül düzeni ve ana reçine/bağlayıcı oranına göre basınç mukavemeti sonuçları 63

Tablo 4.2. 3, 28 ve 90 günlük basınç mukavemetleri 67

Tablo 4.3. %20 bağlayıcı oranlı ve 28 günlük ana deney matrisinin mekanik ve UPV sonuçları 68

Tablo 4.4. UPV ile %20 ve 28 günlük basınç mukavemeti arasındaki korelasyon ve doğrusal regresyon göstergeleri 74

Tablo 4.5. UPV–eğilme ve basınç–eğilme ilişkilerine ait Pearson korelasyonları 76

Tablo 4.6. EDS raporunda doğrudan verilen seçilmiş ortak elementlerin yarı nicel karşılaştırması (wt.%) 86

Tablo 4.7. Bağlayıcı sistemlerinde öne çıkan nihai mekanik ve UPV sonuçlarının özeti 92

Tablo 4.8. σ–ε eğrilerinden elde edilen maksimum gerilme, şekil değiştirme, tepe sekant modülü ve tokluk değerleri 93

Tablo 4.9. Bağlayıcı sistemlerinin mekanik, σ–ε/enerji yutma ve mikroyapısal açıdan bütünleşik özeti 97

Tablo 4.10. TGA/DTG değerlendirmesinden elde edilen temel ısıl göstergeler 99

Tablo 4.11. Temsilci numunelerde %10–%100 kütle kaybı eşiklerine karşılık gelen sıcaklıklar 100

Tablo 4.12. DTG tepe sıcaklığındaki ve deney sonundaki kalan kütleler 100

Tablo 4.13. K4 kompozitlerinin ısıl iletkenlik katsayıları ve hesaplanan katman dirençleri 103

Tablo 4.14. K4 kompozitlerinin basınç dayanımı–ısıl iletkenlik performans indeksleri 105

Tablo 5.1. Bağlayıcı sistemlerinin mekanik ve termal performansının bütünleşik özeti 111

Tablo 5.2. Deneysel performans profiline dayalı potansiyel kullanım yönleri ve gerekli ek doğrulamalar 113

Tablo E1.1. Bu ekteki tematik tabloların okuma haritası 124

Tablo E1.2. ÖTL geri kazanımı ve yapı malzemelerinde kullanım yaklaşımlarının karşılaştırmalı özeti 125

Tablo E1.3. Çimento esaslı atık lastik çalışmalarından polimer bağlı sistemlere geçişi açıklayan temel çalışmalar 127

Tablo E1.4. Epoksi esaslı atık lastik kompozitlerine ilişkin seçilmiş çalışmalar 130

Tablo E1.5. Poliüretan esaslı atık lastik kompozitlerine ilişkin seçilmiş çalışmalar 132

Tablo E1.6. Doymamış polyester esaslı atık lastik kompozitlerine ilişkin seçilmiş çalışmalar 134

Tablo E1.7. Fenolik/novolak–kauçuk sistemleri ve ilgili üretim rotaları 135

Tablo E1.8. Granülometri, yüzey işlemi, devulkanizasyon ve kauçuk–matris ara yüzeyine ilişkin çalışmalar 136

Tablo E1.9. Mekanik davranış, gerilme–birim şekil değiştirme, süneklik ve enerji yutmaya ilişkin çalışmalar 138

Tablo E1.10. UPV, titreşim, çevrimsel davranış, derz ve sismik uygulamalara ilişkin çalışmalar 139

Tablo E1.11. SEM/EDS, FTIR ve mikroyapısal karakterizasyona ilişkin seçilmiş çalışmalar 140

Tablo E1.12. TGA/DTG, ısıl iletkenlik, yangın ve yüksek sıcaklık davranışına ilişkin çalışmalar 142

Tablo E1.13. Çevresel etki, yaşam döngüsü, sürdürülebilirlik ve ekonomik değerlendirmeye ilişkin çalışmalar 145

Tablo E1.14. Literatürde belirlenen araştırma boşlukları ve bu tez çalışmasının karşılığı 147

Tablo E1.15. Tez sonuçları ile en yakın literatür eğilimlerinin doğrudan karşılaştırmalı özeti 148

EKLER LİSTESİ

Sayfa

Ek- 1: Atık Lastik Esaslı Kompozitlere İlişkin Literatürün Tematik ve Karşılaştırmalı Özeti 124

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_0 : Başlangıç yükleme alanı (mm^2)
b : Eğilme numunesinin kesit genişliği (mm)
d : Isıl iletkenlik numunesinin kalınlığı (m)
d_{ref} : Ortak karşılaştırma için seçilen referans kalınlık (m)
$E_{sec,p}$: Görünür tepe sekant modülü (MPa)
F : Uygulanan yük (N)
F_{maks} : Kayıtlı maksimum yük (N)
h : Eğilme numunesinin kesit yüksekliği (mm)
h_0 : Başlangıç basınç numunesi yüksekliği (mm)
I : Basınç dayanımı–ısıl iletkenlik performans indeksi (MPa·m·K/W)
k, λ : Isıl iletkenlik katsayısı [W/(m·K)]
L : Ultrasonik geçiş yolu (m)
ℓ : Eğilme mesnet açıklığı (mm)
m_0 : TGA eğrisinin ilk kaydedilen kütlesi (mg)
n : Veri çifti sayısı
r : Pearson korelasyon katsayısı
R^2 : Belirleme katsayısı
R_{25} : 25 mm referans kalınlık için hesaplanan ısıl direnç (m^2·K/W)
R(T) : TGA'da başlangıca göre kalan kütle (%)
R_λ : Numune katmanının ısıl direnci (m^2·K/W)
t : Ultrasonik geçiş süresi (s)
T_5 : Yüzde 5 kütle kaybına karşılık gelen sıcaklık (°C)
T_{10} : Yüzde 10 kütle kaybına karşılık gelen sıcaklık (°C)
T_{50} : Yüzde 50 kütle kaybına karşılık gelen sıcaklık (°C)
T_{max} : En yüksek kütle kaybı hızının sıcaklığı (°C)
U_t : Kayıt sonuna kadar görünür yükleme işi yoğunluğu (MJ/m^3)
V : Ultrasonik geçiş hızı (m/s)
Δh : Yükleme yönündeki cihaz deplasmanı (mm)
ε : Cihaz deplasmanından türetilen görünür birim şekil değiştirme (–)
ε_{tepe} / ε_{son} : Maksimum gerilmedeki / kayıt sonundaki görünür birim şekil değiştirme (–)
ρ : Yoğunluk; birim hacim kütlesi (kg/m^3)
σ / σ_f : Nominal basınç / eğilme gerilmesi (MPa)
σ_c : Basınç mukavemeti (MPa)

Kısaltmalar

ATR-FTIR : Zayıflatılmış toplam yansımalı Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
DMA : Dinamik mekanik analiz
DSC : Diferansiyel taramalı kalorimetri
DTG : Türev termogravimetri
EDS / EDX : Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
ELT : End-of-Life Tire / ömrünü tamamlamış lastik
EP : Epoksi
EPDM : Etilen propilen dien monomer kauçuğu

GTR : Ground Tire Rubber / öğütülmüş lastik kauçuğu
HDPE : Yüksek yoğunluklu polietilen
LOI : Sınırlayıcı oksijen indeksi
MDI : Metilen difenil diizosiyanat
MEKP : Metil etil keton peroksit
NBR : Akrilonitril bütadien kauçuğu
NCO : İzosiyanat fonksiyonel grubu
NDT : Tahribatsız muayene
ÖTL : Ömrünü tamamlamış lastik
PF : Fenolik reçine
PU : Poliüretan
SBR : Stiren bütadien kauçuğu
SEI : İkincil elektron görüntüleme
SEM : Taramalı elektron mikroskobu
TGA : Termogravimetrik analiz
UP : Doymamış polyester
UPV : Ultrasonik geçiş hızı
UV : Ultraviyole
VOC : Uçucu organik bileşikler
WD : SEM çalışma mesafesi

1. GİRİŞ

Sanayileşme, kentleşme, nüfus artışı ve tüketim alışkanlıklarındaki değişim, doğal kaynaklar ve enerji üzerindeki baskıyı artırırken sera gazı emisyonları ile atık oluşumunu da küresel ölçekte büyütmektedir. Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli, insan faaliyetlerinin atmosfer, okyanus ve kara sistemlerinde ısınmaya neden olduğunu ve iklim değişikliğinin doğal ve beşerî sistemler üzerinde çok yönlü riskler oluşturduğunu ortaya koymaktadır (IPCC, 2023). Bu çerçeve, üretim ve tüketim süreçlerinde emisyonların azaltılmasını, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve atıkların ikincil hammadde olarak yeniden ekonomik döngüye kazandırılmasını sürdürülebilirlik açısından temel bir gereklilik hâline getirmektedir.

İklim değişikliği; aşırı hava olayları, su kaynakları, ekosistemler, yerleşimler ve altyapı üzerinde birbirine bağlı riskler oluşturmaktadır (IPCC, 2023). Yapılı çevrenin bu süreçteki rolü yalnız binaların kullanım aşamasındaki enerji tüketimiyle sınırlı değildir; malzeme üretimi, hammadde çıkarımı, inşaat, bakım, yenileme ve kullanım ömrü sonu süreçleri de toplam çevresel etkiye katkıda bulunmaktadır. Yapı ve inşaat sektörüne ilişkin güncel küresel değerlendirmeler, kaynak verimliliği, düşük karbonlu malzeme çözümleri ve döngüsel malzeme kullanımının önemini vurgulamaktadır (UNEP ve GlobalABC, 2026).

Çevresel etkilerin azaltılması gereği, yüksek miktarda doğal hammadde ve enerji kullanan yapı sektörünü doğrudan ilgilendirmektedir. Özellikle çimento üretiminde klinkerleşme için gerekli yüksek sıcaklıkların sağlanması ve kireç taşının kalsinasyonu sırasında CO_2 açığa çıkması, çimento esaslı malzemelerin çevresel etkisinin azaltılmasına yönelik araştırmaları önemli hâle getirmiştir. Küresel çimento emisyonları ve azaltım stratejileri üzerine çalışmalar; klinker oranının azaltılması, malzeme verimliliği, alternatif bağlayıcılar ve ikincil hammaddelerin daha etkin kullanımını temel araştırma eksenleri arasında göstermektedir (Gartner, 2004; Andrew, 2018; Miller vd., 2018; Scrivener vd., 2018; Habert vd., 2020). Atıkların yapı ürünlerine yeniden kazandırılması da bu daha geniş döngüsel malzeme yaklaşımının bir parçası olarak ele alınmaktadır (Bozorgmehr Nia ve Shafei, 2025; Castillo vd., 2025; UNEP ve GlobalABC, 2026).

Bu tezde başlıkta kullanılan "çevre dostu" nitelemesi, ÖTL'nin ikincil hammadde olarak malzeme döngüsüne kazandırılması yönündeki yaklaşımı ifade etmektedir. Kompozitlerin yaşam döngüsü temelli net çevresel üstünlüğü, mevcut deney programında yaşam döngüsü değerlendirmesi, emisyon, liç/VOC ve kullanım sonu analizleri yapılmadığından nicel olarak doğrulanmış bir sonuç olarak sunulmamaktadır.

Bu bağlamda kullanım ömrünü tamamlamış araç lastikleri önemli bir atık grubunu oluşturmaktadır. Araç lastikleri; doğal ve sentetik kauçuklar, karbon siyahı, çelik, tekstil lifleri, yağlar ve çeşitli katkı maddelerinden oluşan karmaşık mühendislik ürünleridir. Kullanım sırasında gerekli dayanıklılığı sağlayan vulkanize ve çapraz bağlı kauçuk yapı, kullanım ömrü sonunda

malzemenin yeniden işlenmesini güçleştirmektedir. Kontrolsüz depolama, yangın ve çevresel yayılım gibi riskler nedeniyle ÖTL'lerin uygun yönetimi ve geri kazanımı önem taşımaktadır (Amari vd., 1999; Ramarad vd., 2015; Mohajerani vd., 2020). Türkiye'deki mevzuat ve strateji belgeleri ile uluslararası teknik rehberler de ÖTL'lerin çevreyle uyumlu yönetimini, geri kazanımını ve döngüsel ekonomi içinde değerlendirilmesini destekleyen bir çerçeve sunmaktadır (Anonim, 2006; Basel Convention, 2011; Anonim, 2015; Anonim, 2025a; Anonim, 2025b).

Atık lastiklerin inşaat mühendisliğinde değerlendirilmesine yönelik uygulamalar; yol ve geoteknik dolgular, zemin iyileştirme, drenaj tabakaları, kauçuk modifiyeli asfaltlar, titreşim ve ses sönümleyici katmanlar ile çimento esaslı kompozitler gibi farklı alanlara yayılmıştır (Mohajerani vd., 2020). Çimento esaslı beton ve harçlarda lastik granüllerinin doğal agreganın bir bölümünün yerine kullanılması önemli bir geri kazanım yaklaşımı olmakla birlikte, kauçuğun düşük rijitliği ve çimento hamuruyla sınırlı ara yüzey uyumu mekanik performansı etkileyebilmektedir. Literatürde kauçuk ilavesinin yoğunluğu ve rijitliği azaltabildiği, deformasyon ve enerji sönümleme davranışını değiştirebildiği; yüksek ikame oranlarında ise basınç dayanımında kayıplar oluşabildiği bildirilmiştir (Siddique ve Naik, 2004; Thomas ve Gupta, 2016).

Atık lastik granüllerinin polimer bağlayıcılarla bir araya getirilmesi, çimento esaslı uygulamalardan farklı bir geri kazanım yolu sunmaktadır. Polimer matris, granüllerin sürekliliğini sağlarken kauçuk fazı kompozite düşük yoğunluk, deformasyon kapasitesi ve enerji yutma potansiyeli kazandırabilmektedir. Bununla birlikte nihai davranış; bağlayıcı kimyası, granül boyutu ve dağılımı, kauçuk miktarı, boşluk yapısı, üretim koşulları ve kauçuk-polimer ara yüzeyinin ortak etkisiyle şekillenmektedir (Ramarad vd., 2015; Sienkiewicz vd., 2017; Hejna vd., 2020). Ara yüzey uyumunun geliştirilmesi bu nedenle atık lastik-polimer kompozitlerinin temel araştırma alanlarından biri olmuştur (Kaynak vd., 2003; Phiri vd., 2021).

Epoksi, poliüretan ve doymamış polyester esaslı atık lastik kompozitleri üzerine yapılan çalışmalar, aynı kauçuk fazının farklı matrislerde farklı dayanım, deformasyon, mikroyapı ve termal davranış gösterebildiğini ortaya koymuştur (Revelo vd., 2021; Yıldızhan vd., 2022; Türkben vd., 2023). Fenolik/novolak sistemlerinde kauçuk fazı ile reçine ve kür yapısının mekanik ve termal davranışı etkileyebildiği de bildirilmiştir (Derakhshandeh vd., 2008). Bununla birlikte epoksi, poliüretan, novolak–hekzamin ve polyester bağlayıcıların aynı atık lastik granül sistemi ve ortak granül düzenleri içinde birlikte karşılaştırıldığı çalışmaların sınırlı olması, bu tezde izlenen deneysel yaklaşımın temel gerekçelerinden birini oluşturmuştur.

Çalışmanın araştırma varsayımı, kompozit performansının yalnız bağlayıcı türüne veya yalnız granül boyutuna indirgenemeyeceği; bağlayıcı kimyası ile granül düzeninin birlikte mekanik dayanım, deformasyon, göreli rijitlik, enerji yutma, ultrasonik dalga iletimi, mikroyapı ve ısıl bozunma davranışını değiştireceği yönünde kurulmuştur. Buna bağlı olarak tüm bağlayıcılar için tek bir evrensel granülometri optimumu bulunmayacağı, yüksek dayanımın yüksek enerji yutma

veya yüksek termal kararlılıkla zorunlu olarak aynı kombinasyonda ortaya çıkmayacağı varsayılmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden elde edilen kauçuk granüller 0,5-1,2 mm, nominal 5 mm, 5-10 mm ve 10-20 mm olmak üzere dört fraksiyonda değerlendirilmiştir. Bağlayıcı olarak tek komponentli poliüretan, iki komponentli epoksi, novolak fenolik reçine-hekzamin ve doymamış polyester sistemleri kullanılmıştır. Dört bağlayıcı ile K1 ince, K2 orta, K3 ince+orta ve K4 dört fraksiyonlu granül düzenlerinin oluşturduğu 4×4 deney matrisi üzerinden 16 ana kombinasyon hazırlanmış; ana karşılaştırmalar granül kütlesine göre %20 ana bağlayıcı içeren ve 28 günlük referans deney yaşındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Kompozitlerin performansı basınç ve üç noktalı eğilme deneyleri, ultrasonik geçiş hızı ve gerilme–birim şekil değiştirme kayıtlarıyla belirlenmiş; bu eğrilerden tepe sekant modülü ve karşılaştırmalı yükleme işi yoğunluğu alanları türetilmiştir. Mekanik sonuçlar SEM/EDS ve element haritalama ile mikroyapısal açıdan, ATR-FTIR ile kimyasal parmak izi açısından ve temsilci TGA/DTG analizleriyle ısıl bozunma davranışı açısından desteklenmiştir. Ayrıca K4 granül düzenindeki dört plakanın ısıl iletkenliği ölçülmüş ve aynı karışım düzenine ait basınç dayanımlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Böylece çalışma, dayanım, rijitlik, deformasyon, enerji yutma, mikroyapı, ısıl kararlılık ve ısı iletimini birlikte ele alarak atık lastik-polimer kompozitlerinin yapı malzemesi potansiyelini karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden elde edilen kauçuk granüllerin yapı malzemelerinde ve özellikle polimer matrisli kompozitlerde değerlendirilmesine ilişkin literatür, tezde uygulanan deneysel tasarımla doğrudan ilişkili bir çerçevede incelenmiştir. Literatür seçimi yapılırken yalnız atık lastik içeren herhangi bir çalışmaya yer vermek yerine; granül boyutu ve dağılımı, termoset bağlayıcı türü, granül-matris ara yüzeyi, basınç ve eğilme davranışı, gerilme–birim şekil değiştirme ilişkisi, enerji yutma, ultrasonik geçiş hızı, SEM/EDS, ATR-FTIR, TGA/DTG ve ısıl iletkenlik gibi bu tezde ölçülen veya yorumlanan değişkenlerle bağlantı kurabilen çalışmalar önceliklendirilmiştir.

İncelenen yayınlar, atık lastik kauçuğunun tek başına bir 'dayanım artırıcı katkı' olarak tanımlanamayacağını göstermektedir. Kauçuk fazın düşük rijitliği ve yüksek deformasyon kapasitesi; matrisin kimyası, bağlayıcı miktarı, parçacık boyutu, yüzey durumu, sıkıştırma ve boşluk yapısıyla birlikte kompozitin dayanım, rijitlik, süneklik, enerji yutma, ısıl kararlılık ve mikroyapı özelliklerini değiştirmektedir. Bu nedenle literatür taraması, yalnız maksimum basınç dayanımlarını sıralayan bir yaklaşım yerine yapı-işlem-özellik-performans ilişkisini esas alan karşılaştırmalı bir sentez biçiminde düzenlenmiştir (Ramarad vd., 2015; Hejna vd., 2020; Yan vd., 2026).

Bölümün ilk kısmında ÖTL yönetimi, yapı sektöründe kaynak verimliliği ve atık lastiğin inşaat mühendisliğindeki kullanım biçimleri ele alınmış; devamında çimento esaslı sistemler ile polimer bağlı sistemler arasındaki temel farklar açıklanmıştır. Tezin deneysel omurgasını oluşturan epoksi, poliüretan, doymamış polyester ve novolak–hekzamin sistemleri ayrı başlıklar altında değerlendirilmiş; granülometri, ara yüzey, mekanik davranış ve çoklu karakterizasyon yöntemleriyle kurulan ilişkiler daha sonra ortak bir sentezde birleştirilmiştir. Son alt bölümde ise literatürdeki araştırma boşluğu, tezde uygulanan 4×4 bağlayıcı-granül matrisi ve çoklu deney yaklaşımıyla ilişkilendirilmiştir.

2.1. Ömrünü Tamamlamış Araç Lastikleri ve Malzeme Geri Kazanımı

Araç lastikleri; doğal ve sentetik kauçuklar, karbon siyahı ve silika gibi dolgu maddeleri, çelik kord, tekstil takviyesi, yağlar, kükürt ve çok sayıda katkı maddesinin birlikte çalıştığı, yüksek performanslı çok bileşenli ürünlerdir. Vulkanizasyonla oluşan üç boyutlu çapraz bağlı kauçuk ağı, lastiğe servis sırasında gerekli elastikiyet ve aşınma direncini kazandırırken kullanım ömrü sonunda yeniden eritilip şekillendirilmesini güçleştirir. Bu nedenle ÖTL geri kazanımı, termoplastik atıklardaki basit eriyik yeniden işleme yaklaşımından farklı olarak mekanik küçültme,

devulkanizasyon, yüzey aktivasyonu, piroliz veya enerji geri kazanımı gibi çeşitli yolları içermektedir (Amari vd., 1999; Ramarad vd., 2015).

Bu tez açısından en önemli geri kazanım yolu, lastiğin temel kauçuk yapısını tamamen parçalamadan mekanik olarak granül hâline getirilmesi ve yeni bir kompozitin ana taneli fazı olarak kullanılmasıdır. Mekanik parçalama işlemleri, çelik ve tekstil bileşenlerinin ayrılmasıyla farklı tane boyutlarında granül veya toz ürünler oluşturabilmektedir. Ancak 'atık lastik granülü' tek tip bir malzeme değildir; parçalama yöntemi, nominal tane boyutu, parçacık şekli, yüzey pürüzlülüğü, kalan tekstil/metal miktarı ve özgül yüzey alanı, sonraki kompozit davranışını etkileyen değişkenlerdir (Lapkovskis vd., 2020).

Literatürde enerji geri kazanımı ve piroliz önemli yönetim seçenekleri olarak ele alınmakla birlikte, polimer kompozit üretimi malzemenin fiziksel yapısını ve içerdiği gömülü enerjiyi daha uzun süre ekonomik döngüde tutabilen bir malzeme geri kazanımı yaklaşımıdır. Bununla birlikte, polimer bağlayıcı kullanılması çevresel üstünlüğü kendiliğinden garanti etmez. Bağlayıcının miktarı, üretim enerjisi, ürünün hizmet ömrü, emisyonları, kullanım sonu senaryosu ve ikame ettiği geleneksel malzeme birlikte değerlendirilmelidir. Mohajerani vd. (2020) tarafından vurgulanan liç ve çevresel maruziyet konusu, yapı ürünlerine geçişte yalnız mekanik performansın yeterli olmadığını göstermektedir.

Güncel derlemelerde ortaklaşan görüş, yüksek değerli geri kazanımın anahtarının yalnız daha fazla atık kullanmak değil, atık faz ile matris arasındaki uyumu geliştirerek hedef uygulamaya uygun özellik seti elde etmek olduğu yönündedir. Yan vd. (2026), atık lastik kauçuğunun termoset ve termoplastik matrislerde performansının ara yüzey modifikasyonu, parçacık boyutu ve matris seçimiyle belirgin biçimde değişebildiğini göstermiştir. Bu çerçeve, aynı kauçuk kaynağını dört farklı termoset bağlayıcı ve dört granül düzeniyle karşılaştıran mevcut tezin temel bilimsel gerekçelerinden biridir.

Sonuç olarak ÖTL'nin kompozit malzemelerde kullanımı, atık miktarını azaltan tek yönlü bir çevre uygulaması değil; kauçuk fazın düşük yoğunluk, elastikiyet ve enerji sönümleme özelliklerini yeni bir malzeme sistemine aktarmaya yönelik bir malzeme tasarımı problemidir. Bu nedenle sonraki bölümlerde çevresel gerekçe ile mühendislik performansı birbirinden ayrılmadan, fakat birbirinin yerine de geçirilmeden ele alınmıştır.

ÖTL geri kazanım literatürü, mekanik parçalama ve malzeme geri kazanımından devulkanizasyon ve yeni polimer sistemlerine kadar uzanan çok katmanlı bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Türkiye ölçeğindeki güncel değerlendirmeler ve yönetim çalışmaları, geri kazanım seçeneklerinin çevresel etki, uygulanabilirlik ve ürün değeriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Sugözü ve Mutlu, 2009; Durna vd., 2020; Akca Güler vd., 2025). Mekanik küçültme, granül karakterizasyonu ve devulkanizasyon ise ikincil kauçuk hammaddesinin

özelliklerini doğrudan belirleyen süreçlerdir (Fukumori vd., 2002; Karabörk ve Akdemir, 2013; Lapkovskis vd., 2020).

Atık kauçuğun yeniden kullanımına ilişkin daha geniş kaynaklar, kauçuğun yalnız enerji geri kazanımı için değil, yüksek katma değerli yeni malzemeler için de değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Kauçuk geri dönüşüm teknolojilerinin gelişimi, yüksek GTR içerikli malzemeler ve daha çevreci geri kazanım yaklaşımları bu dönüşümün temel başlıklarıdır (De vd., 2005; Formela, 2022; Wiśniewska vd., 2023; Laftah ve Wan Abdul Rahman, 2025).

2.2. Yapı Sektöründe Kaynak Tüketimi, Çimento ve Sürdürülebilir Malzeme Yaklaşımı

Yapı sektörü çok büyük miktarlarda mineral hammadde, enerji ve bağlayıcı tüketen bir sektördür. Çimento üretiminde klinkerin oluşturulması yüksek sıcaklık gerektirdiği ve kireçtaşının kalsinasyonu doğrudan CO_2 açığa çıkardığı için, düşük karbonlu yapı malzemeleri literatüründe klinker miktarının azaltılması, ikincil hammaddelerin kullanılması ve performans başına malzeme tüketiminin düşürülmesi temel stratejiler arasında yer almaktadır (Gartner, 2004; Scrivener vd., 2018).

Bu tez çimento esaslı bir malzeme geliştirmemekle birlikte, yapı malzemelerinde kaynak verimliliği tartışması açısından önemlidir. Atık lastik granüllerinin yüksek oranda ana katı faz olarak kullanılması, doğal agregaya dayalı bir malzemeden farklı bir hammadde yaklaşımı oluşturur. Bununla birlikte polimer bağlayıcılar da fosil kaynaklı ve enerji yoğun ürünlerdir. Bu nedenle polimer bağlı bir atık kompozitin 'çevre dostu' olarak değerlendirilmesi yalnız atık içerme oranına dayandırılmamalıdır; bağlayıcı tüketimi, ürün ömrü, hedeflenen işlev ve kullanım sonu seçenekleri de dikkate alınmalıdır.

Literatürde sürdürülebilir malzeme tasarımı giderek 'en düşük ilk çevresel yük' yaklaşımından 'gerekli işlevi en az toplam kaynakla ve yeterli hizmet ömrüyle sağlama' yaklaşımına yönelmektedir. Bu bakış, tezde bağlayıcı sistemlerin yalnız maksimum dayanımına göre değil, deformasyon, enerji yutma, termal davranış, üretilebilirlik ve potansiyel kullanım yönleriyle birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Dolayısıyla burada çimento literatürü, polimer kompozitin üstünlüğünü önceden kabul etmek için değil, yapı malzemesi seçiminde çevresel iddiaların yaşam döngüsü perspektifiyle sınırlandırılması gerektiğini göstermek için kullanılmıştır.

Bu yaklaşım aynı zamanda tez sonuçlarının kullanım alanlarına aktarılmasında önem taşımaktadır. Örneğin yüksek bağlayıcı tüketimiyle elde edilen küçük bir dayanım artışı çevresel veya ekonomik açıdan rasyonel olmayabilir; buna karşılık daha düşük dayanımlı ancak yüksek atık içeriği, düşük yoğunluk ve yeterli enerji yutma sağlayan bir kompozit, taşıyıcı olmayan belirli uygulamalarda anlamlı olabilir. Bu nedenle sürdürülebilirlik ve mühendislik performansı birlikte fakat ayrı ölçütler olarak değerlendirilmelidir.

Yapı malzemelerinin çevresel değerlendirmesinde yalnız üretim aşamasına odaklanmak yeterli değildir. Atık lastiğin deprem dayanımı, hafiflik veya işlevsel özellikler amacıyla yapılarda kullanılmasına ilişkin yaşam döngüsü çalışmaları, teknik fayda ile çevresel yükün birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024). Benzer biçimde düşük karbonlu çimento ve eko-verimli bağlayıcı literatürü, malzeme seçiminin toplam kaynak ve emisyon etkileriyle birlikte ele alınmasını desteklemektedir (Gartner, 2004; Scrivener vd., 2018).

2.3. Yapı Malzemelerinde Performans Gereksinimleri ve İşlevsel Kullanım Alanları

Bir yapı malzemesinin uygunluğu yalnız basınç dayanımıyla tanımlanamaz. Taşıyıcı bir eleman için dayanım, rijitlik, yorulma ve uzun süreli deformasyon öncelikli iken; zemin kaplaması, darbe azaltıcı karo, koruyucu panel, akustik eleman veya titreşim sönümleyici bileşenlerde deformasyon kapasitesi, enerji yutma, kalıcı deformasyon, aşınma, kayma direnci, yoğunluk ve yangın davranışı daha belirleyici olabilir. Atık lastik kauçuğunun en belirgin özelliği yüksek elastik deformasyon ve viskoelastik sönümleme potansiyeli olduğundan, bu malzemeyi klasik mineral agregayla aynı performans mantığı içinde değerlendirmek eksik kalmaktadır.

Semlali Aouragh Hassani vd. (2020) ve Revelo vd. (2021) gibi poliüretan bağlı lastik kompozit çalışmaları, mekanik dayanımın kullanım alanına özgü deformasyon ve kalıcı şekil değiştirme göstergeleriyle birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymuştur. Esnek karo ve benzeri ürünlerde amaç yüksek beton dayanımına ulaşmak değil; yeterli bütünlük, darbe azaltma, tekrarlı yük altında kararlılık ve güvenli deformasyon davranışı sağlamaktır. Bu yaklaşım, tezde poliüretan sisteminin geniş birim şekil değiştirme ve enerji yutma özelliklerinin ayrı bir performans karakteri olarak değerlendirilmesiyle doğrudan örtüşmektedir.

Polyester-lastik kompozitlerinde de benzer bir çok ölçütlü değerlendirme gereklidir. Abu-Jdayil vd. (2016a) yoğunluk ve ısıl özellikler bakımından lastik ilavesinin işlevsel avantajlar sağlayabildiğini; Akın ve Polat (2022) ise mekanik dayanım azalsa bile deformasyon karakterinin değişebildiğini göstermiştir. Bu nedenle bir malzeme sistemi yalnız düşük basınç dayanımı nedeniyle tüm yapı uygulamalarından dışlanmamalı, ancak düşük dayanım da göz ardı edilerek uygulama önerisi yapılmamalıdır. Hedef uygulama ile performans gereksiniminin eşleştirilmesi gerekir.

Tezde potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesinde bu yaklaşım esas alınmıştır. Basınç ve eğilme dayanımları kayıtlı deney koşullarındaki yük taşıma düzeyini; gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri rijitlik ve deformasyon karakterini; eğri altı alan yükleme işi yoğunluğunu; UPV dalga iletim davranışını; SEM/EDS mikroyapı ve yerel element dağılımını; ATR-FTIR kimyasal parmak izini; TGA/DTG sıcaklıkla bozunma profilini; ısıl iletkenlik ise sıcaklık farkı altındaki ısı iletimini tamamlayıcı biçimde açıklamaktadır. Bu çoklu veri yapısı, hedef işlev için uygun performans profilinin belirlenmesine olanak sağlar.

Atık lastik içeren yapı ürünlerinde ısıl, akustik ve titreşim davranışı da bağımsız tasarım ölçütleri olarak ele alınmaktadır. Kauçuk içeren beton ve kompozitlerde ısıl direnç, ses yutma ve titreşim sönümleme üzerine derlemeler ile deneysel çalışmalar, tane boyutu, boşluk yapısı, ürün kalınlığı ve matris türünün işlevsel performansı etkileyebildiğini göstermektedir (Corredor-Bedoya vd., 2017; Bala ve Gupta, 2021; Pongsopha vd., 2022; Cimbola vd., 2024; Wijesinghe vd., 2025).

Ruiz vd. (2026), atık lastik granülü, geri dönüştürülmüş agrega ve poliüretan bağlayıcı içeren kompozitleri, bölme duvarı ile çevresindeki taşıyıcı çerçevenin etkileşimini azaltmaya yönelik sismik ara eleman yaklaşımı içinde incelemiştir. Çalışmada ısıl ve akustik özellikler uygulama gereksinimleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Bu örnek, esnek birleşim bölgelerinin araştırılması için bir dayanak sağlamakta; farklı reçetelerden üretilen mevcut kompozitlerin aynı sismik performansı gösterdiğini veya temel altı deprem izolatörü olarak uygun olduğunu kanıtlamamaktadır.

Yüksek atık içerikli yalıtım ve panel uygulamalarında devulkanize kauçuk, poliüretan köpük, lifli çimento ve farklı kompozit matrisler kullanılarak ısıl ve/veya akustik performans araştırılmıştır (Hittini vd., 2021; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Nezili vd., 2026). Ürün performansının çevresel boyutuyla birlikte değerlendirilmesi ise yaşam döngüsü çalışmalarıyla desteklenmektedir (Yılmaz vd., 2018; Prieto-Quintana vd., 2026). Hızlandırılmış yaşlandırma çalışmalarının da gösterdiği gibi, servis ömrü boyunca özelliklerin korunması ayrıca doğrulanması gereken bir parametredir (Benjak vd., 2024).

2.4. Atık Lastiklerin Yapı ve İnşaat Mühendisliğinde Kullanımı

Atık lastiklerin inşaat mühendisliğinde kullanımı, bütün lastiklerin dolgu veya bariyer olarak kullanımından mikron boyutundaki kauçuk tozunun bağlayıcılı kompozitlere katılmasına kadar geniş bir ölçek aralığını kapsamaktadır. Çimento esaslı beton ve harç, asfalt, yol temel-alt temel tabakaları, geoteknik dolgular, drenaj sistemleri, akustik ürünler, sismik yalıtım ve polimer bağlı kaplama/karo sistemleri bu uygulamaların başlıcalarıdır (Mohajerani vd., 2020).

Bu geniş kullanım alanı, lastiğin tek bir mekanik özellik üzerinden tanımlanamayacağını göstermektedir. Geoteknik dolgularda düşük birim ağırlık, sismik uygulamalarda deformasyon ve sönüm, akustik ürünlerde viskoelastik enerji kaybı ve gözenek yapısı, esnek zeminlerde darbe emme, polimer betonlarda ise bağlayıcı-granül etkileşimi öne çıkmaktadır. Dolayısıyla atık lastik granülünün yapı malzemesi içindeki görevi, hedef ürüne göre agrega, dolgu, elastik faz veya ana taneli iskelet biçiminde değişebilmektedir.

Klasik kauçuklu beton literatürü, doğal agreganın bir bölümünün lastikle değiştirilmesiyle yoğunluk ve rijitliğin genellikle azaldığını, yüksek lastik oranlarında basınç ve çekme dayanımındaki kayıpların belirginleşebildiğini ortaya koymuştur (Siddique ve Naik, 2004; Thomas ve Gupta, 2016). Bununla birlikte bu olumsuz mekanik eğilime rağmen darbe direnci, deformasyon

kapasitesi ve bazı titreşim/sönüm özelliklerinde iyileşmeler bildirilmiştir. Bu durum, atık lastik kullanımında 'dayanım kaybı = başarısız malzeme' biçimindeki tek boyutlu yorumun neden yetersiz olduğunu göstermektedir.

Polimer bağlı sistemler, çimento esaslı sistemlerden farklı olarak kauçuk granüllerinin polimer film veya matris ile birbirine bağlandığı, hidratasyon gerektirmeyen ve bağlayıcı kimyasının mekanik/termal davranışı güçlü biçimde belirlediği kompozitlerdir. Revelo vd. (2021) tarafından geliştirilen esnek PU-lastik karolar, yüksek atık içeriğinin sanayi ölçeğine yakın bir üründe değerlendirilebildiğini göstermesi bakımından bu tez için özellikle önemlidir. Ancak aynı çalışma, granülometri, bağlayıcı miktarı, yoğunluk ve çevresel performansın birlikte ele alınması gerektiğini de göstermektedir.

Mevcut tez, bu literatür içinde doğal agreganın küçük bir kısmını lastikle ikame eden bir beton çalışmasından ayrılmaktadır. Lastik granülleri kompozitin ana taneli fazını oluşturmuş; polimer bağlayıcı ise granüller arasında bütünlük sağlayan matris olarak kullanılmıştır. Bu nedenle çimento esaslı kauçuklu betonlardan elde edilen genel eğilimler doğrudan sayısal karşılaştırma için değil, kauçuğun düşük rijitlik, deformasyon ve ara yüzey etkilerini anlamaya yardımcı bir referans çerçevesi olarak değerlendirilmiştir.

Kauçuklu beton literatürünün tarihsel gelişimi, lastik parçacıklarının doğal agrega veya dolgu yerine kullanılmasının yoğunluk, dayanım ve deformasyon davranışını birlikte değiştirdiğini göstermektedir (Eldin ve Senouci, 1993; Topçu, 1995; Khatib ve Bayomy, 1999; Güneyisi vd., 2004; Li vd., 2004; Ganjian vd., 2009). Daha sonraki çalışmalar, yüzey/ara yüzey düzenlemeleri, yüksek kauçuk oranları ve tane boyutu dağılımının performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur (Pelisser vd., 2011; Su vd., 2015; Raffoul vd., 2016).

Güncel derlemeler ve deneysel çalışmalar, atık lastik içeren çimento esaslı sistemlerde taze özellikler, dayanım, dayanıklılık ve mikroyapı arasındaki ilişkilerin çok değişkenli olduğunu vurgulamaktadır (Roychand vd., 2020; Hamdi vd., 2021; İpek vd., 2022; Zhang vd., 2023). Kauçuğun tamamen doğal agrega yerine kullanıldığı hafif ürünler ve geri dönüştürülmüş kauçuk agregalı kompozitler de özel amaçlı yapı ürünleri açısından araştırılmıştır (Medina vd., 2018; Sambucci ve Valente, 2021).

Atık lastiğin geopolimer harçlarda alternatif agrega olarak değerlendirilmesi ve yüksek sıcaklık altında kauçuk/geri dönüştürülmüş bileşen içeren betonların incelenmesi, araştırma alanının geleneksel Portland çimentosu sistemlerinin ötesine genişlediğini göstermektedir (Mohabbi ve Bulsu, 2026; Ayhan vd., 2026). Bu geniş çerçevede kauçuklu betonla ilgili temel derlemeler, mevcut polimer bağlı kompozitlerin karşılaştırmalı yorumlanmasında referans oluşturmaktadır (Siddique ve Naik, 2004; Thomas ve Gupta, 2016; Mohajerani vd., 2020).

Ecemiş vd. (2025), farklı boyutlardaki atık lastik agregaları ile geri kazanılmış çelik liflerin birlikte kullanıldığı çimento esaslı betonlarda mekanik ve mikroyapısal davranışı incelemiştir.

Kauçuk miktarı ve lif dozajının birlikte değerlendirilmesi, çok bileşenli karışımlarda tek bir değişken üzerinden genelleme yapılmaması gerektiğini desteklemiştir. Bu çimentolu ve lifli sistem, mevcut tezdeki çimentosuz polimer matrisli kompozitlerle doğrudan eşdeğer kabul edilmemiştir.

2.5. Çimento Esaslı Atık Lastik Kompozitleri ve Polimer Esaslı Sistemlere Geçiş

Çimento esaslı kauçuklu kompozitler, atık lastiğin yapı malzemelerinde değerlendirilmesine ilişkin en geniş literatür grubunu oluşturur. Bu sistemlerde kauçuk çoğunlukla doğal ince veya iri agreganın belirli oranlarda yerine kullanılmaktadır. Kauçuk ile çimento hamuru arasındaki hidrofilik-hidrofobik uyumsuzluk, düşük elastisite modülü ve yüzey pürüzlülüğü/kimyası, geçiş bölgesinin özelliklerini ve mekanik davranışı belirgin biçimde etkileyebilmektedir.

Çok sayıda çalışma, kauçuk oranı arttıkça basınç ve çekme dayanımında azalma eğilimi olduğunu; buna karşılık yoğunluğun azalabildiğini, deformasyon kapasitesi ve darbe davranışının değişebildiğini göstermiştir (Siddique ve Naik, 2004; Thomas ve Gupta, 2016). Yüzey işlemleri ve mineral katkılar, kauçuk-çimento ara yüzeyini iyileştirmek için yaygın biçimde araştırılmıştır. Bu sonuçlar, kauçuğun mekanik davranışının yalnız kendi düşük rijitliğiyle değil, matrise yük aktarımının niteliğiyle birlikte kontrol edildiğini göstermektedir.

Aksoy (2021), 0–4 mm boyutundaki atık lastiği ince agrega yerine hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanmış; çimento hacminin %1 ve %2'si düzeyinde polyester veya stiren-bütadien (SBR) polimeri eklenen betonları incelemiştir. Basınç, yarmada çekme, su emme, donma-çözülme ve SEM değerlendirmelerinin birlikte kullanılması, mekanik davranışın iç yapı ve dayanıklılıkla ilişkilendirilmesine örnek oluşturmuştur. Bununla birlikte bu malzeme, polimer katkılı çimento esaslı betondur; mevcut tezdeki çimentosuz, granüllerin doğrudan reçineyle bağlandığı kompozitle aynı sınıfta değildir. Dolayısıyla bu çalışmadaki agrega ikame yüzdeleri ve çimentoya göre tanımlanan polimer katkı oranları, mevcut tezde granül kütlesine göre verilen %20 ana bağlayıcı oranıyla eşdeğer kabul edilmemiştir.

Polimer bağlı atık lastik kompozitleri ise kimyasal olarak farklı bir sınıftadır. Bu sistemlerde granüller arasındaki bağ, çimento hidratasyon ürünleri yerine termoset veya elastomerik polimer matris tarafından sağlanır. Polimerin ıslanabilirliği, viskozitesi, kürlenme mekanizması ve elastik modülü; granüller arasındaki boşlukların dolma biçimini ve yük aktarımını doğrudan etkiler. Bu nedenle çimento esaslı kauçuklu betonlardaki sayısal optimum oranların epoksi, PU, polyester veya fenolik sistemlere doğrudan taşınması uygun değildir.

Bununla birlikte çimento esaslı literatürden çıkarılabilecek iki temel ilke polimer sistemleri için de geçerlidir. Birincisi, kauçuk miktarı ve tane boyutu ile mekanik özellikler arasında evrensel tek yönlü bir ilişki bulunmamasıdır. İkincisi, ara yüzey ve boşluk yapısının makroskopik dayanım üzerinde güçlü etkisidir. Bu iki ilke, tezde aynı granül düzenlerinin dört farklı bağlayıcıyla

karşılaştırılmasının ve mekanik sonuçların SEM/EDS, ATR-FTIR, UPV ve TGA ile birlikte yorumlanmasının bilimsel temelini güçlendirmektedir.

2.6. Atık Lastik-Polimer Kompozit Sistemleri

Bu bölümde önce polimer ve kompozit malzemelerin sınıflandırılması açıklanmış, ardından tezde kullanılan dört bağlayıcı ailesine ilişkin literatür değerlendirilmiştir.

2.6.1. Polimerlerin Temel Sınıflandırılması ve Tezde Kullanılan Bağlayıcıların Konumu

Polimer matrisli kompozitlerde matrisin termoplastik, termoset veya elastomerik karakteri işleme biçimini ve kullanım performansını doğrudan etkiler. Termoplastikler ısıtıldığında eriyip yeniden şekillenebilirken, termosetler kürlenme sonrasında üç boyutlu çapraz bağlı yapı oluşturur ve yeniden eritilemez. Araç lastiği kauçuğu da vulkanizasyon nedeniyle çapraz bağlı elastomerik bir fazdır. Bu nedenle atık lastik granülünün termoset bir bağlayıcıyla birleştirilmesi, kauçuk fazı ile kürlenmiş bağlayıcı fazın ara yüzey etkileşimine dayanan heterojen bir kompozit oluşturur.

Tezde kullanılan epoksi, doymamış polyester ve novolak-fenolik sistemler termoset karakterlidir. Kullanılan tek komponentli MDI esaslı poliüretan bağlayıcı ise kürlenme sonrasında elastomerik/termoset benzeri çapraz bağlı ağ oluşturan daha esnek bir matris davranışı göstermektedir. Bu bağlayıcıların kimyasal yapıları, viskoziteleri, kürlenme mekanizmaları ve nihai rijitlikleri birbirinden farklıdır. Dolayısıyla aynı granülometri ve aynı nominal ana bağlayıcı oranında dahi granüllerin ıslanması, boşlukların dolması, ara yüzey gerilmesi ve yük aktarımı farklılaşabilir.

Hejna vd. (2020), termoset-WTR sistemlerinde reçine türünün sonuçları belirleyen ana değişkenlerden biri olduğunu vurgulamıştır. Bu tezde dört bağlayıcının ortak bir granül matrisi üzerinde karşılaştırılması, literatürde çoğunlukla ayrı çalışmalar hâlinde incelenen matris etkisini aynı deneysel çerçevede görünür kılmaktadır.

Tezde kullanılan bağlayıcıların konumlandırılmasında genel polimer ve kompozit malzeme kaynakları da temel kavramsal çerçeveyi sağlamaktadır. Termoset reçinelerin çapraz bağlanma yapısı, kompozitlerde matris-takviye ilişkisi ve polimer betonların farklı reçine sistemlerine bağlı davranışı klasik ve güncel başvuru kaynaklarında ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır (Ohama, 1995; Hull ve Clyne, 1996; Goodman, 1998; Forsdyke ve Starr, 2002; Callister ve Rethwisch, 2020; Palamarchuk vd., 2024). Epoksi/fenolik, doymamış polyester ve poliüretan sistemlerinin kimyasal ve işleme özellikleri bağlayıcılar arasındaki farklılığın bilimsel temelini oluşturur (Szycher, 2012; Takeichi ve Furukawa, 2012; Jones, 2017; Li vd., 2025).

2.6.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ve Tez Malzemesinin Konumu

Kompozit malzemeler, farklı fazların tek başlarına sağlayamadıkları bir özellik kombinasyonunu elde etmek amacıyla bir araya getirildiği heterojen sistemlerdir. Geleneksel lif takviyeli kompozitlerde taşıyıcı faz çoğunlukla yüksek rijitlikli lifler iken, atık lastik-polimer kompozitlerinde kauçuk granüller yüksek modüllü bir takviye gibi davranmaz. Kauçuk, düşük rijitlikli ve yüksek deformasyonlu taneli faz; polimer ise granüller arasında bağ ve süreklilik sağlayan matristir.

Bu nedenle tez malzemesinin performansı 'takviye verimi' kavramından çok, granül paketlenmesi, matris sürekliliği, ara yüzey bütünlüğü, boşluk yapısı ve iki fazın deformasyon uyumu üzerinden açıklanmalıdır. Granül oranı yüksek olduğunda sistem, klasik reçine zengin partikül kompozitlerden farklı olarak tanelerin temas ettiği ve polimerin bu iskeleti birbirine bağladığı bir aglomere kompozit karakteri gösterebilir. Bu yapı, özellikle PU karo literatüründeki yüksek atık içerikli ürünlere yakındır (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Revelo vd., 2021).

2.6.3. Epoksi Esaslı Atık Lastik Kompozitleri

Epoksi reçineler yüksek aderans, düşük kür büzülmesi, iyi kimyasal dayanım ve görece yüksek rijitlikleri nedeniyle yapısal yapıştırıcılar, polimer betonlar ve kompozit matrisler için yaygın bağlayıcılardır. Bununla birlikte saf epoksilerin gevrek kırılma eğilimi, elastomerik parçacıklarla tokluk artırma çalışmalarının temel gerekçelerinden biridir. Atık lastik kauçuğu, düşük maliyetli elastomerik faz olarak bu amaçla araştırılmıştır.

Kaynak vd. (2001), öğütülmüş atık lastik kauçuğu ile toklaştırılmış epoksi sistemlerinde kırılma yüzeylerini SEM fraktografisiyle inceleyerek kauçuk parçacıklarının çatlak ilerlemesi ve ara yüzey ayrılması üzerindeki rolünü göstermiştir. Aynı araştırma grubunun silan bağlayıcı ajanları kullandığı sonraki çalışmada, kauçuk-epoksi ara yüzeyinin iyileştirilebildiği ve ara yüzey kalitesinin kompozit davranışını belirgin biçimde etkilediği bildirilmiştir (Kaynak vd., 2003). Bu iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, epoksi içinde kauçuk etkisinin yalnız parçacık miktarıyla değil, ara yüzey durumu ve kırılma mekanizmasıyla birlikte ele alınması gerektiği görülmektedir.

Aoudia vd. (2017), mikrodalga ile kısmen devulkanize edilen GTR'nin epoksi matrise katılmasında FTIR ve SEM bulgularının daha iyi ara yüzey bütünlüğüyle uyumlu olduğunu ve devulkanize GTR içeren kompozitlerin mekanik performansının işlenmemiş GTR içerenlere göre gelişebildiğini göstermiştir. Bu sonuç, kauçuk yüzeyinin kimyasal/enerjetik durumunun termoset matrisle yük aktarımında belirleyici olabileceğini doğrular.

Türkben (2019), 106 μm'den küçük atık lastik ve EPDM tozlarını üç farklı ticari epoksinin 1:1 oranlı ikili karışımlarında kütlece %10–50 aralığında dolgu olarak değerlendirmiştir. Numunelere 80 °C'de 24 saat kür uygulanmış; SEM ve XRD incelemeleri, çekme, sertlik ve azot

atmosferinde TGA deneyleriyle tamamlanmıştır. İncelenen reçine karışımları arasında poliüretanla modifiye epoksi ile bisfenol-A esaslı epoksinin birlikte kullanıldığı NPER 133L–NPEK 114 sistemi öne çıkmış; çalışma kendi deney koşulları için atık lastikte %30, EPDM'de %20 dolgu düzeyini uygun bulmuştur. Bu sonuçlar, aynı kauçuk esaslı dolgunun farklı epoksi matrislerinde farklı dağılım ve performans göstermesi bakımından bağlayıcı kimyasının önemini desteklemiştir.

Türkben'in (2019) mikron boyutundaki toz dolgulu epoksi sistemleri ile bu tezdeki milimetre boyutunda ve yüksek granül içerikli kompozitler; parçacık ölçeği, faz oranı, reçine formülasyonu ve kür koşulları bakımından ayrılmıştır. Ayrıca poliüretanla modifiye epoksi, bu çalışmada kullanılan bağımsız tek komponentli poliüretan bağlayıcının karşılığı olarak değerlendirilmemiştir. Bu nedenle söz konusu tezde önerilen dolgu oranları mevcut reçetelere doğrudan aktarılmamış; karşılaştırma, matris seçimi ve parçacık dağılımının sonuçları birlikte belirlemesi üzerinden kurulmuştur.

Türkben vd. (2023), farklı epoksi sistemlerinde geri dönüştürülmüş lastik ve EPDM atıklarının mekanik ve termal özellikleri değişik biçimde etkilediğini göstermiştir. Aynı atık fazı kullanıldığı hâlde matris tipinin performans sıralamasını değiştirmesi, tezde epoksinin diğer bağlayıcılarla aynı granül düzeninde karşılaştırılmasının önemini desteklemektedir. Daha güncel epoksi çalışmalarında da yüzey işleminin su alma, çekme dayanımı ve modül üzerindeki etkisinin karmaşık olduğu; her kimyasal işlemin otomatik olarak bütün özellikleri iyileştirmediği görülmüştür (Sugiman vd., 2023).

Bu literatür çerçevesinde epoksi sisteminden beklenen temel davranış yüksek bağlayıcı rijitliği ve iyi yüzey ıslatması sayesinde yüksek dayanım; kauçuk faz nedeniyle ise saf epoksiye göre daha belirgin deformasyon ve enerji yutma potansiyelidir. Ancak ince granüllerde artan özgül yüzey alanı bağlayıcı gereksinimini yükseltebilir. Bu nedenle epoksi için granül boyutu optimumu, dayanım ile yeterli yüzey kaplama/ara yüzey bütünlüğü arasındaki dengeyle belirlenmelidir.

Epoksi-GTR literatürü, atık lastiğin epoksi içinde dolgu/taneli faz olarak kullanılmasından basınç, dayanıklılık ve ara yüzey modifikasyonuna kadar genişlemektedir. Lastik atığının epoksi kompozitlerde dolgu olarak değerlendirilmesi ve farklı kauçuk/epoksi sistemlerinin karşılaştırılması, reçine kimyası ile kauçuk fazının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir (Ahmetli vd., 2014; Aydın vd., 2014; Valášek ve Müller, 2014; Türkben vd., 2023).

Epoksi sistemlerinde yüzey işlemi, çatlak saptırma, basınç davranışı ve uzun süreli/dış etkilere dayanıklılık ayrı araştırma eksenleri olarak ele alınmıştır (Kaynak vd., 2001; Kaynak vd., 2003; Aoudia vd., 2017; Wang vd., 2019; Shahapurkar vd., 2023; Sugiman vd., 2023). Bu kaynaklar, tezde epoksi sonuçlarının yalnız maksimum mukavemet üzerinden değil, deformasyon, mikroyapı ve ara yüzey bütünlüğüyle birlikte yorumlanmasını desteklemektedir.

2.6.4. Poliüretan Esaslı Atık Lastik Kompozitleri

Poliüretanlar kimyasal formülasyona bağlı olarak sert köpükten elastomere kadar çok geniş bir mekanik davranış aralığı gösterebilen polimerlerdir. Atık lastik granüllerini bağlamak için kullanılan elastomerik PU sistemleri, granüllerle benzer deformasyon kabiliyetine sahip olmaları nedeniyle esnek karo, spor/oyun alanı yüzeyi ve darbe azaltıcı ürünlerde yaygın olarak araştırılmıştır.

Semlali Aouragh Hassani vd. (2020), geri dönüştürülmüş lastik parçacıkları ve poliüretan bağlayıcıdan üretilen kompozitlerde yüzey halojenleme işleminin kauçuk yüzey pürüzlülüğünü artırarak bağlayıcı etkileşimini geliştirebildiğini göstermiş; SEM ve FTIR bulgularını basınç, gevşeme ve kalıcı deformasyon sonuçlarıyla birlikte değerlendirmiştir. Çalışmanın önemli yönü, PU-lastik sistemlerinde nihai ürün performansının yalnız maksimum yük değil, tekrarlı/kalıcı deformasyon ve ara yüzey bütünlüğüyle tanımlanmasıdır.

Revelo vd. (2021), atık lastik tozu/granülü ve PU reçineden esnek karolar üretmiş; granülometri ve kauçuk içeriğini yoğunluk, mekanik davranış, mikroyapı, TGA ve çevresel testlerle birlikte incelemiştir. Çalışma, yüksek atık içerikli PU-lastik kompozitlerin düşük yük düzeyli duvar kaplaması, yumuşak zemin ve bariyer benzeri uygulamalarda gerçek ürün mantığıyla değerlendirilebildiğini göstermesi nedeniyle mevcut tez için en doğrudan karşılaştırma kaynaklarından biridir.

PU/GTR literatürü son yıllarda köpük sistemlerine de genişlemiştir. Hejna vd. (2024a) GTR içeren PU köpüklerinde parçacık modifikasyonu ile hücre yapısı, mekanik özellikler ve emisyonlar arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Nezili vd. (2026) ise kimyasal ön işlem görmüş GTR'nin esnek PU köpüklerinin mekanik, termal ve akustik özellikleri üzerindeki etkisini ele almıştır. Bu çalışmalar farklı PU sınıflarına ait olmakla birlikte, ortak olarak ara yüzey uyumunun ve parçacık yüzey durumunun performans üzerinde güçlü etkisini doğrulamaktadır.

Olszewski vd. (2022), modifiye atık lastik içeren esnek poliüretan köpüklerde dolgunun hidroksil gruplarının reaksiyon stokiyometrisine katkısını incelemiştir. Formülasyonun bu katkı dikkate alınarak düzenlenmesi, basınç dayanımını ve mekanik enerji göstergelerini geliştirirken ısıl bozunmanın başlangıç sıcaklığında aynı yönde bir iyileşme sağlamamıştır. Bu sonuç, poliüretan sistemlerinde mekanik performans ile termal bozunmanın ayrı ölçütler olarak değerlendirilmesini desteklemektedir. Köpük yapısı ve işlenmiş dolgu kullanımı nedeniyle çalışma, mevcut granül bağlı kompozitlerle doğrudan sayısal karşılaştırmadan çok formülasyon–özellik ilişkisini açıklamak için değerlendirilmiştir.

Tez açısından PU sisteminin en önemli bilimsel özelliği, yüksek bağlayıcı rijitliği yerine geniş deformasyon aralığında yük taşıma ve enerji sönümleme kapasitesidir. Bu nedenle PU sonuçları epoksi veya fenolik sistemlerle yalnız maksimum basınç dayanımına göre

karşılaştırılmamalı; gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi, kalıcı deformasyon potansiyeli ve enerji alanı gibi göstergelerle birlikte değerlendirilmelidir.

PU-GTR sistemleri esnek karo, polimer harç, köpük ve panel gibi farklı ürün geometrilerinde incelenmiştir. Geri dönüştürülmüş lastik parçacıklarının PU bağlayıcıyla birleştirilmesi; granülometri, gözenek yapısı, mekanik tepki ve dayanıklılık açısından farklı araştırmalarda değerlendirilmiştir (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Jiang vd., 2021; Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2022). GTR'nin PU köpüklere ve akustik/işlevsel ürünlere aktarılması da matris esnekliği ile ara yüzeyin birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Hejna vd., 2024a; Nezili vd., 2026; Prieto-Quintana vd., 2026). Poliüretan kimyasının geniş mekanik davranış aralığı bu uygulamaların temelini oluşturur (Szycher, 2012).

Poliüretan–GTR köpüklerinde alev geciktirici kullanımı, termal bozunma ile yangın tepkisinin ayrı değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Kosmela vd. (2024), alev geciktiriciyle modifiye edilen GTR içeren köpüklerde oksijen indeksi ve konik kalorimetre ölçümlerini mekanik ve ısıl iletkenlik sonuçlarıyla birlikte incelemiştir. Hejna vd. (2024b) ise nanokillerin alev geciktirici sistemle birlikte etkisini araştırmıştır. Bu çalışmaların hücresel yapısı ve katkıları mevcut tezden farklıdır; burada yalnız azot altında yürütülen TGA/DTG sonuçlarından yangın performansı çıkarılmamasının yöntemsel dayanağı olarak değerlendirilmiştir.

2.6.5. Doymamış Polyester Esaslı Atık Lastik Kompozitleri

Doymamış polyester reçineler düşük viskozite, kolay kalıplanabilirlik, oda sıcaklığına yakın koşullarda katalizör/hızlandırıcı ile kürlenebilme ve görece düşük maliyet gibi nedenlerle polimer beton ve dolgu kompozitlerinde yaygın matrislerdir. Buna karşılık işlenmemiş lastik granülü ile polyester arasındaki ara yüzey uyumu sınırlı olabildiğinden, kauçuk miktarı arttıkça dayanım kaybı sık raporlanan bir eğilimdir.

Abu-Jdayil vd. (2016a) polyester-lastik kompozitlerinin ısıl ve fiziksel özelliklerini incelemiş; lastik parçacıklarının yoğunluk ve ısıl iletkenliği azaltarak yalıtım amaçlı kullanım potansiyeli oluşturabildiğini göstermiştir. Aynı araştırma grubunun mekanik çalışmasında (Abu-Jdayil vd., 2016b), kauçuk oranı yükseldikçe basınç/çekme dayanımı ve elastisite modülünün genel olarak azaldığı, parçacık boyutunun da mekanik sonuçlarda etkili olduğu bildirilmiştir.

Akın ve Polat (2022), polyester esaslı polimer betonlarda farklı reçine oranları ve 0-1 mm ile 0-4 mm lastik fraksiyonlarını karşılaştırmış; reçine miktarı arttıkça mekanik özelliklerin gelişebildiğini, atık lastik oranı arttıkça dayanımın genellikle düştüğünü, ancak özellikle düşük reçine oranlarında sünekliğin artabildiğini göstermiştir. Çalışmada UPV ve gerilme–birim şekil değiştirme değerlendirmelerinin birlikte kullanılması, mevcut tezin fiziksel ve mekanik sonuçları ortak çerçevede ele alması bakımından önemlidir.

Yıldızhan vd. (2022), atık lastik granül/polyester kompozitlerinde çekme ve morfolojik özellikleri incelemiş; işlenmemiş kauçuk granülünün çekme ve akma dayanımını düşürürken uzama ve sünekliği artırdığını, SEM görüntülerinde ise zayıf ara yüzey yapışmasının belirgin olduğunu bildirmiştir. Bu bulgu, polyester sistemindeki düşük mekanik performansın yalnız reçinenin malzeme özelliğiyle değil, granül-matris ara yüzeyinin sürekliliğiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmalar polyesterin atık lastik kompozitlerinde tamamen elverişsiz bir bağlayıcı olduğunu değil, yüzey işlemi, bağlayıcı miktarı, boşluk kontrolü ve granülometri optimizasyonuna daha yüksek duyarlılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla tezde polyesterin diğer üç sistemden daha düşük mekanik sonuçlar vermesi durumunda, yorumun 'polyester zayıftır' biçiminde genellenmesi yerine mevcut reçete ve işlenmemiş granül ara yüzeyiyle sınırlandırılması gerekir.

Doymamış polyester sistemlerinde, reçinenin polimer betonlarda yaygın kullanımı ile GTR ilavesinin mekanik ve fiziksel sonuçları birlikte değerlendirilmelidir. Polyester polimer ve polimer betonların temel davranışı ile doymamış polyester reçinelerin malzeme özellikleri, atık lastik eklenmiş sistemlerin yorumlanması için referans sağlamaktadır (Vipulanandan ve Paul, 1993; Jones, 2017). Atık lastik-polyester çalışmalarında ise parçacık boyutu, reçine oranı, ara yüzey ve termal/fiziksel özelliklerin mekanik sonuçlarla birlikte değiştiği bildirilmiştir (Abu-Jdayil vd., 2016a; Abu-Jdayil vd., 2016b; Akın ve Polat, 2022; Yıldızhan vd., 2022).

Lastik parçacıklarının reçine reaksiyonuna olası etkisi, doğrudan ara yüzey gözlemiyle karıştırılmamalıdır. Florez vd. (2021), geri dönüştürülmüş lastik parçacıkları varlığında stirenin radikal kütle polimerizasyonunu DSC ile incelemiş; Meimaroglou vd. (2022) bu sistemin peroksit başlatıcılı reaksiyonları için kinetik bir model geliştirmiştir. Bu sonuçlar, lastiğin bileşenlerinin reaksiyon kinetiğini etkileyebileceğini göstermiştir; ancak çalışmalar mevcut TP100–MEKP–kobalt reçetesinin kürünü doğrudan ölçmemiştir. Dolayısıyla bu tezde polyesterin düşük dayanımı, kanıtlanmış radikal giderme veya kür inhibisyonu sonucu olarak sunulmamıştır.

2.6.6. Fenolik/Novolak Esaslı Atık Lastik Kompozitleri

Fenolik reçineler yüksek çapraz bağ yoğunluğu, ısıl kararlılık ve kömürleşme eğilimleri nedeniyle ısıya dayanıklı kompozitler, sürtünme malzemeleri ve yüksek sıcaklık bağlayıcıları için önemli termosetlerdir. Novolak reçineler kendi başlarına termoplastik benzeri düşük molekül ağırlıklı ön polimerler olup hekzamin gibi kürleyicilerle üç boyutlu fenolik ağ yapısına dönüştürülür. Bu kür kimyası, epoksi ve polyesterden farklı bir mekanik ve termal profil oluşturur.

Atık lastik granülü ile doğrudan novolak–hekzamin matrisin kullanıldığı yapı malzemesi çalışmaları epoksi, PU ve polyester literatürüne göre sınırlıdır. Bu nedenle doğrudan karşılaştırılabilir kaynak sayısı azdır. Derakhshandeh vd. (2008), SBR/NBR kauçukları ile novolak

tip fenolik reçine karışımlarında fenolik reçine miktarı ve kür bileşenlerinin mekanik, termal ve morfolojik özellikleri belirgin biçimde değiştirdiğini göstermiştir. Çalışma atık lastik kullanmamakla birlikte kauçuk-fenolik ağ etkileşimini anlamak için doğrudan malzeme bilimi temeli sağlar.

He vd. (2015), HDPE/GTR esaslı termoplastik vulkanizatlarda fenolik reçine ve dikumil peroksit içeren karma kür sistemini incelemiş; fenolik reçinenin çapraz bağlanmayı ve mekanik özellikleri geliştirebildiğini, FTIR-ATR ve SEM bulgularının çapraz bağ/morfoloji değişimleriyle uyumlu olduğunu bildirmiştir. Bu sistem mevcut tezdeki novolakın doğrudan matris olarak kullanımından farklıdır; bu nedenle sayısal sonuçları karşılaştırmak uygun değildir. Ancak fenolik reçinenin GTR içeren sistemlerde çapraz bağ ve morfolojiyi değiştiren aktif bir kimyasal bileşen olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.

Tamayo vd. (2021), novolak fenolik reçine, atık lastik parçacıkları ve mineral/metal bileşenler içeren fren balatalarında parçacık boyutu ile öğütme yönteminin sürtünme ve aşınma davranışını etkilediğini göstermiştir. Çalışma, atık lastiğin fenolik matris içinde değerlendirilebildiğine somut bir örnek sağlamaktadır. Bununla birlikte çok bileşenli balata reçetesi ve sürtünme amaçlı deney koşulları, mevcut tezdeki yüksek granül içerikli yapı kompozitlerinden farklı olduğundan bu yayın genel malzeme yaklaşımı bağlamında ele alınmıştır.

Tezin özgün yönlerinden biri, novolak–hekzamin bağlayıcının yüksek lastik içerikli taneli bir kompozitte epoksi, PU ve polyesterle aynı granül matrisinde karşılaştırılmasıdır. Literatürün sınırlı olması nedeniyle novolak sonuçlarının yorumunda aşırı genellemeden kaçınılmalı; özellikle tepe sekant modülü, enerji yutma ve TGA kalıntısı gibi sonuçlar kendi deney koşulları ve kürlenme biçimi içinde değerlendirilmelidir.

Fenolik/novolak sistemlerinin değerlendirilmesinde reçine-kauçuk etkileşimi ve kür kimyası özellikle önemlidir. Kauçuk/fenolik reçine karışımlarında kür bileşenlerinin mekanik, termal ve morfolojik özelliklere etkisi ile GTR içeren sistemlerde fenolik reçinenin çapraz bağlanmaya katkısı literatürde gösterilmiştir (Derakhshandeh vd., 2008; He vd., 2015). Epoksi ve fenol-formaldehit reçinelerinin temel kimyasal yapısı ve kür davranışı, novolak–hekzamin sisteminin diğer termosetlerden ayrıldığı noktaları açıklamaya yardımcı olmaktadır (Takeichi ve Furukawa, 2012).

2.6.7. Tezde Kullanılan Polimer Bağlayıcıların Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

Dört bağlayıcı sistemi literatür temelinde karşılaştırıldığında, tek bir performans ekseninde evrensel bir üstünlük sıralaması oluşturmak bilimsel olarak uygun değildir. Epoksi yüksek rijitlik, aderans ve yapısal bütünlük potansiyeliyle; PU yüksek deformasyon ve enerji sönümleme kapasitesiyle; polyester düşük viskozite ve kolay işlenebilirlikle; novolak-fenolik sistemler ise

yüksek çapraz bağ ve ısıl kararlılık potansiyeliyle öne çıkar. Bununla birlikte bu özelliklerin tamamı reçete, kür koşulu ve granül-matris ara yüzeyi tarafından değiştirilebilir.

Ramarad vd. (2015), Hejna vd. (2020) ve Yan vd. (2026) tarafından yapılan geniş kapsamlı değerlendirmeler, GTR içeren polimer sistemlerinde parçacık boyutu, yüzey modifikasyonu, dolgu oranı, matris polaritesi, çapraz bağlanma ve işleme koşullarının sonuçları birlikte belirlediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle aynı kauçuk granülün farklı polimerlerde farklı optimum granül düzeni göstermesi beklenebilir.

Mevcut tezde bağlayıcıları aynı %20 ana bağlayıcı düzeyi ve aynı 28 günlük karşılaştırma çerçevesinde incelemek, literatürde farklı araştırmalara dağılmış matris etkisini ortak bir deney tasarımında değerlendirme olanağı sağlamaktadır. Ancak yardımcı sertleştirici/katalizörlerin sistemlere göre farklı olması ve bağlayıcı kimyalarının farklı stokiyometri gerektirmesi nedeniyle, 'eşit %20' ifadesi kimyasal olarak eşit toplam polimer kütlesi anlamına gelmemektedir. Bu ayrım, sonuçların yorumunda bağlayıcı türünü yalnız kütle oranından ibaret bir değişken olarak görmemek açısından önemlidir.

2.7. Granül Boyutu ve Tane Boyutu Dağılımının Etkisi

Granül boyutu, atık lastik-polimer kompozitlerinde hem geometrik paketlenmeyi hem de kimyasal/fiziksel ara yüzey alanını değiştiren temel bir parametredir. İnce granüller birim kütle başına daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğundan, matris ile temas alanını artırabilir; ancak aynı zamanda bütün yüzeyin yeterli biçimde kaplanabilmesi için daha fazla bağlayıcı gerektirebilir. İri granüller daha düşük toplam ara yüzey alanına sahip olmakla birlikte, taneler arasında daha büyük boşluklar veya gerilme yoğunlaşmaları oluşturabilir.

Geniş tane boyutu dağılımında küçük taneler daha büyük granüller arasındaki boşlukların bir bölümünü doldurarak paketlenmeyi iyileştirebilir. Buna karşılık kauçuk taneler mineral agregalar gibi rijit ve düzgün geometrili olmadığından klasik agrega paketleme ilkelerinin birebir uygulanması uygun değildir. Tanelerin elastik deformasyonu, yüzey pürüzlülüğü ve bağlayıcının viskozitesi, gerçek paketlenme yapısını etkiler.

Revelo vd. (2021) PU-lastik karolarda granülometrinin yoğunluk ve mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu; Akın ve Polat (2022) polyester polimer betonlarda 0-4 mm lastik fraksiyonunun 0-1 mm fraksiyona göre bazı sonuçlarda avantaj sağlayabildiğini göstermiştir. Bu bulgular, en küçük parçacığın her zaman en yüksek dayanımı vermediğini ve granül boyutu optimumunun matris türüne göre değişebildiğini göstermektedir.

Tezde K1 ince, K2 orta, K3 ince+orta ve K4 dört fraksiyonlu karışımların aynı bağlayıcı sistemleri içinde karşılaştırılması, tane boyutunun yalnız tek bir ortalama çapla değil dağılım karakteriyle ele alınmasını sağlamaktadır. Epoksi gibi görece rijit bir matriste ince tanelerin yüksek temas alanı yararlı olabilirken, PU gibi esnek bir matris geniş dağılımdaki geometrik

uyumsuzlukları daha iyi tolere edebilir. Novolak ve polyester sistemlerinde ise granülometri etkisi, bağlayıcı ıslatması ve boşluk yapısı tarafından farklı biçimde sınırlandırılabilir.

Bu nedenle literatürden çıkarılan temel sonuç, 'optimum granül boyutu' ifadesinin bütün bağlayıcılar için ortak bir sabit olmadığıdır. Uygun granülometri, bağlayıcının viskozitesi, kür mekanizması, granül yüzey enerjisi, sıkıştırma koşulu ve hedef performansla birlikte belirlenmelidir.

Granül boyutu etkisinin yalnız termosetlerle sınırlı olmadığı, farklı polimer ve çimento matrislerinde de parçacık boyutu ile dağılımın morfoloji ve mekanik davranışı değiştirebildiği görülmektedir (Su vd., 2015; Fazli ve Rodrigue, 2021). ÖTL'nin parçalanması ve GTR üretimi üzerine çalışmalar, fraksiyon tanımının ve parçacık morfolojisinin kompozit tasarımında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Karabörk ve Akdemir, 2013; Lapkovskis vd., 2020).

2.8. Kauçuk-Polimer Ara Yüzeyi ve Mikroyapı

Atık lastik granülü-polimer ara yüzeyi, kompozitin yük aktarımı ve kırılma davranışını belirleyen en kritik bölgelerden biridir. Vulkanize lastik yüzeyi düşük yüzey enerjili, kimyasal olarak görece inert ve çok sayıda katkı içeren heterojen bir yapıya sahiptir. Epoksi, polyester ve fenolik gibi daha polar termosetlerle işlenmemiş kauçuk arasındaki fiziksel/kimyasal uyum sınırlı olabilir. PU sistemlerinde kimyasal yapı daha esnek olsa da ara yüzey kalitesi yine yüzey temizliği, pürüzlülük ve bağlayıcının ıslatma kabiliyetine bağlıdır.

SEM incelemelerinde zayıf ara yüzey; granül çevresinde boşluk, granül sıyrılması, düzgün ayrılma yüzeyi veya çatlağın ara yüzeyi takip etmesi gibi morfolojilerle işaret edilebilir. Buna karşılık pürüzlü kırılma, matris kalıntılarıyla kaplı granül yüzeyi ve dolambaçlı çatlak yolu daha güçlü mekanik kilitlenme veya daha karmaşık kırılma süreciyle uyumlu olabilir. Ancak SEM görüntüsü lokal bir bölgeyi temsil eder ve doğrudan aderans kuvveti ölçmez. Bu nedenle mikroyapı yorumları mekanik sonuçları destekleyen nitel kanıt olarak kullanılmalıdır.

Kaynak vd. (2001), epoksi-GTR sisteminde kauçuk parçacığı-matris ara yüzeyinin ve çatlak saptırma mekanizmalarının kırılma davranışını etkileyebildiğini göstermiştir. Aoudia vd. (2017) devulkanizasyonla elde edilen daha uyumlu GTR yüzeyinin epoksi içinde daha iyi mikroyapısal bütünlük ve mekanik performansla ilişkilendirilebildiğini göstermiştir. Hejna vd. (2020) ise termoset-WTR sistemlerinde silanlama, oksidasyon, halojenleme ve diğer uyumlulaştırma stratejilerinin ara yüzeyi geliştirebileceğini kapsamlı biçimde özetlemiştir.

Bununla birlikte yüzey işleminin etkisi kullanılan kimyasala ve matrise bağlıdır. Sugiman vd. (2023), NaOH ve stearik asit işlemlerinin GTR/epoksi kompozitlerde su alma, çekme dayanımı ve elastisite modülünü farklı yönlerde etkileyebildiğini göstermiştir. Bu sonuç, ara yüzey iyileştirmesinin tek bir işlem parametresine indirgenemeyeceğini; ıslanabilirlik, yüzey enerjisi, parçacık hasarı ve matris kimyasının birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Mevcut tezde granüllere özel bir kimyasal yüzey işlemi uygulanmamıştır. Bu durum bir sınırlılık olmakla birlikte, dört farklı bağlayıcının işlenmemiş aynı tür granül yüzeyi üzerindeki göreli davranışını karşılaştırabilme avantajı sağlar. Bu nedenle SEM/EDS ve ATR-FTIR sonuçlarından 'kimyasal aderans kuvveti' türetilmemiş; mikroyapısal süreklilik, boşluk ve kırılma morfolojisi mekanik verilerle birlikte değerlendirilmiştir.

İşlenmemiş GTR yüzeyinin farklı matrislerle uyumunu geliştirmek için kimyasal aşındırma, oksidasyon, UV ve diğer yüzey modifikasyonları araştırılmıştır (Shanmugharaj vd., 2005; Phiri vd., 2021). Daha güncel çalışmalar, radyasyon veya kimyasal yüzey işlemlerinin ara yüzey ve mekanik özellikler üzerinde etkili olabileceğini, ancak etkinin işlem-matris kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir (Sugiman vd., 2023; Martínez-Barrera vd., 2026).

2.9. Fiziksel ve Mekanik Performansın Değerlendirilmesi

Bu bölümde fiziksel ve mekanik performans; yoğunluk, dayanım, deformasyon ve ultrasonik ölçüm başlıkları altında değerlendirilmiştir.

2.9.1. Yoğunluk ve Birim Hacim Ağırlık

Kauçuk granüllerin birçok mineral agregadan daha düşük yoğunluklu olması, atık lastik içeren kompozitlerin birim hacim kütlesini düşürebilir. Ancak ölçülen yoğunluk yalnız bileşenlerin özgül yoğunluklarının sonucu değildir; granül paketlenmesi, sıkıştırma, bağlayıcının boşluk doldurma kabiliyeti ve kürlenme sırasında oluşan hacimsel değişimler de toplam boşluk oranını ve görünen yoğunluğu etkiler.

Abu-Jdayil vd. (2016a) ve Revelo vd. (2021), sırasıyla polyester ve PU esaslı sistemlerde kauçuk içeriği/granülometrinin yoğunlukla ilişkili olduğunu göstermiştir. Düşük yoğunluk bazı uygulamalarda hafiflik avantajı sağlasa da tek başına yüksek kalite göstergesi değildir. Çok düşük yoğunluk aynı zamanda yetersiz sıkıştırma veya yüksek açık boşluk oranının işareti olabilir.

Yoğunluk, UPV ve mikroyapı bulgularını birlikte yorumlamak için yararlı bir fiziksel göstergedir. Bununla birlikte bu tezde kompozit numunelere ait doğrudan yoğunluk ölçüm sonuçları raporlanmamıştır. Dolayısıyla numunelerin hafifliği veya boşluk oranı nicel olarak belirlenmiş bir sonuç olarak sunulmamış; bu alt bölüm literatür ve kavramsal çerçeve ile sınırlandırılmıştır.

2.9.2. Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV)

UPV, malzeme içinden geçen elastik dalganın belirli bir yol uzunluğunu katetme süresine dayanan tahribatsız bir değerlendirme yöntemidir. Betonlarda yüksek UPV çoğu zaman daha yoğun ve sürekliliği yüksek iç yapı ile ilişkilendirilir. Ancak polimer-kauçuk kompozitlerinde farklı

fazların elastik modülleri, yoğunlukları ve viskoelastik sönüm özellikleri birbirinden çok farklı olduğundan, UPV'nin doğrudan basınç dayanımına dönüştürülmesi uygun değildir.

Akın ve Polat (2022), polyester esaslı polimer betonlarda UPV ile mekanik özellikleri birlikte incelemiş ve reçine/kauçuk oranının bu göstergeleri aynı anda değiştirdiğini göstermiştir. Bu tür çalışmalar, UPV'nin mekanik sonuçların yerine geçen bir test değil, iç yapı ve faz dağılımına ilişkin tamamlayıcı bir veri olduğunu göstermektedir.

Genovés vd. (2022), mikronize atık lastik içeren polimer kompozitlerde ultrasonik dalga hızı, akustik empedans ve sönüm özelliklerini incelemiştir. Çalışmadaki lastik dolgulu epoksi serisi, parçacık içeriğinin dalga yayılımını değiştirebildiğini göstermiştir. Bu bulgu, UPV'nin fazların elastik özellikleri ve viskoelastik davranışlarıyla birlikte yorumlanmasını desteklemektedir. Parçacık ölçeği, numune geometrisi ve ölçüm frekansı mevcut deneylerden farklı olduğundan sonuçlar doğrudan bir UPV–dayanım dönüşüm bağıntısı olarak kullanılmamıştır.

Tezde dört bağlayıcı sisteminin rijitlikleri farklı olduğu için, bağlayıcılar arası UPV farklarının yalnız boşluk oranıyla açıklanması doğru değildir. Yüksek UPV daha rijit bir sürekli fazdan, daha az boşluktan veya farklı dalga yolundan kaynaklanabilir. Bu nedenle UPV-basınç korelasyonu polimer grubu etkisi ayrıştırılarak ve düşük örnek sayısının sınırlılığı belirtilerek değerlendirilmelidir.

2.9.3. Basınç Dayanımı ve Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Davranışı

Basınç dayanımı, kompozitin yük taşıma kapasitesini belirleyen temel mekanik göstergelerden biridir. Bununla birlikte yüksek kauçuk içeriğine sahip kompozitler belirgin doğrusal olmayan deformasyon gösterebildiğinden, yalnız maksimum gerilme değeri malzemenin tüm mekanik davranışını açıklamaz. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin başlangıç eğimi, tepe gerilme, tepe şekil değiştirme, tepe sonrası dal ve kayıtlı son deformasyon birlikte incelendiğinde rijitlik, süneklik ve enerji yutma açısından daha kapsamlı bilgi elde edilir.

Abu-Jdayil vd. (2016b) polyester-lastik kompozitlerinde kauçuk miktarı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünde azalma bildirmiştir. Akın ve Polat (2022) ise polyester polimer betonlarda atık lastiğin dayanımı azaltabilmesine karşın düşük reçine oranlarında sünekliği artırabildiğini göstermiştir. Bu bulgular, rijitlik/dayanım ile deformasyon kapasitesinin aynı yönde değişmek zorunda olmadığını ortaya koymaktadır.

PU-lastik kompozitlerinde daha geniş deformasyon aralığı beklenebilir; Semlali Aouragh Hassani vd. (2020) bu nedenle basınç, gevşeme ve kalıcı deformasyon ölçütlerini birlikte ele almıştır. Epoksi ve fenolik sistemlerde ise daha yüksek matris rijitliği, yüksek tepe gerilme ve göreli rijitlik sağlayabilir; fakat ara yüzey zayıflığı veya gevrek kırılma enerji yutma kapasitesini sınırlayabilir. Tezde gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinin bağlayıcı türüne göre karşılaştırılması bu farklı mekanik karakterleri ayırmak açısından önemlidir.

2.9.4. Eğilme Davranışı

Eğilme yüklemesi, numunenin bir yüzünde çekme diğer yüzünde basınç gerilmeleri oluşturduğu için granül-matris ara yüzeyine ve çatlak ilerleme mekanizmasına basınç deneyinden daha farklı duyarlılık gösterir. Atık lastik içeren kompozitlerde düşük modüllü kauçuk faz ve ara yüzey süreksizlikleri çekme tarafındaki çatlak başlangıcını etkileyebilir; buna karşılık elastik granüller çatlak yolunu saptırabilir veya yerel deformasyonu artırabilir.

Epoksi-GTR kırılma çalışmalarında kauçuk parçacıklarının çatlak saptırma ve ara yüzey ayrılması gibi mekanizmaları değiştirdiği gösterilmiştir (Kaynak vd., 2001). Polyester-GTR çalışmalarında ise zayıf ara yüzeyin çekme/eğilme benzeri gerilme durumlarında mekanik kaybı artırabildiği SEM bulgularıyla desteklenmiştir (Yıldızhan vd., 2022).

Bu nedenle tezde basınç ve eğilme maksimumlarının aynı granül düzeninde oluşup oluşmaması önemli bir karşılaştırma ölçütüdür. Aynı bağlayıcı için hem basınç hem eğilmede öne çıkan granül düzeni, farklı gerilme durumlarında daha dengeli yük aktarımına işaret edebilir; farklı optimumların oluşması ise kırılma mekanizması ve ara yüzey duyarlılığının değiştiğini gösterebilir.

2.9.5. Tokluk ve Enerji Yutma Davranışı

Tokluk kavramı literatürde farklı deney bağlamlarında kullanılmaktadır. Kırılma mekaniğindeki KIC gibi çatlak ilerleme parametreleri ile gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi altında kalan toplam enerji alanı aynı büyüklük değildir. Bu tezde enerji yutma, basınç gerilme–birim şekil değiştirme eğrisinin kayıtlı son deformasyona kadar altında kalan yükleme işi alanı olarak ele alınmıştır ve birim hacim başına mekanik enerji yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu büyüklük, yükleme sırasında malzemeye aktarılan işi göstermekte; net olarak sönümlenen enerji ile doğrudan eşdeğer kabul edilmemektedir.

Kauçuk fazın yüksek deformasyon kabiliyeti enerji yutmayı artırma potansiyeline sahip olsa da toplam alan yalnız deformasyon büyüklüğüne bağlı değildir. Yüksek gerilme seviyesinin geniş bir deformasyon aralığında sürdürülebilmesi gerekir. Bu nedenle düşük dayanımlı fakat çok deformasyonlu bir numune ile yüksek dayanımlı fakat erken kırılan bir numune farklı enerji alanları gösterebilir.

Akın ve Polat (2022) atık lastiğin belirli polyester polimer beton reçetelerinde sünekliği artırabildiğini; Kaynak vd. (2001) epoksi sisteminde ara yüzey ve çatlak saptırma mekanizmalarının kırılma tokluğunu etkileyebildiğini göstermiştir. PU karo literatürü ise tekrarlı yük, gevşeme ve kalıcı deformasyonun darbe azaltıcı ürünler açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020). Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, enerji yutma kapasitesinin hedef uygulama açısından bağımsız ve anlamlı bir performans göstergesi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

2.9.6. Fiziksel, Mekanik ve Mikroyapısal Bulguların Birlikte Değerlendirilmesi

Fiziksel, mekanik ve mikroyapısal bulguların birlikte değerlendirilmesi, bağlayıcı ve granül düzeninin yük taşıma, deformasyon ve iç yapı üzerindeki etkilerini ortak bir çerçevede karşılaştırmaya olanak sağlamaktadır.

Türkben vd. (2023) aynı geri dönüştürülmüş kauçuk fazının farklı epoksi sistemlerinde mekanik ve termal özellikleri farklı biçimde etkileyebildiğini; Revelo vd. (2021) PU-lastik kompozitlerinde granülometri, yoğunluk, mikroyapı ve termal davranışın birlikte değiştiğini göstermiştir. Bu tür çoklu karakterizasyon yaklaşımları, tezde sonuçların tek bir maksimum değer üzerinden sıralanmaması gerektiğini desteklemektedir.

Bu nedenle literatür sentezinden çıkan yöntemsel ilke, performansın dayanım, rijitlik, deformasyon, yükleme işi yoğunluğu, iç yapı, ısıl kararlılık ve ısı iletimi bakımından birlikte değerlendirilmesidir. Tezin Bölüm 4 ve 5'inde bu ölçütleri bir araya getiren karşılaştırmalı bir yorumlama çerçevesi kullanılmıştır.

Fiziksel ve mekanik performansın birlikte değerlendirilmesi, farklı bağlayıcı sistemlerinde ortak bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Polyester sistemlerinde basınç-UPV-σ–ε ilişkisi, PU sistemlerinde basınç/deformasyon ve gözenek yapısı, epoksi sistemlerinde basınç ve dayanıklılık, farklı araştırmalarda birlikte ele alınmıştır (Wang vd., 2019; Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Jiang vd., 2021; Akın ve Polat, 2022; Jiang vd., 2022; Shahapurkar vd., 2023). Benzer biçimde farklı epoksi sistemleri ile polyester-GTR morfolojisi üzerine çalışmalar, bağlayıcı türünün ve ara yüzeyin sonuçları ayrı yönlerde değiştirebildiğini göstermektedir (Yıldızhan vd., 2022; Türkben vd., 2023).

2.10. Mikroyapısal, Spektroskopik ve Termal Karakterizasyon

Bu bölümde mikroyapısal, spektroskopik ve termal karakterizasyon yöntemleri ile bu yöntemlerin tez bulgularının yorumlanmasındaki yeri ele alınmıştır.

2.10.1. SEM ile Mikroyapısal İnceleme

SEM, atık lastik-polimer kompozitlerinde granül-matris geçiş bölgesini, boşlukları, mikroçatlakları, granül sıyrılması izlerini ve kırılma yüzeyi topografyasını doğrudan gözlemlemeye yarayan temel mikroyapı yöntemlerinden biridir. Düşük büyütmeler genel dağılım ve makroboşlukları, yüksek büyütmeler ise ara yüzey sürekliliği ve yerel kırılma morfolojisini değerlendirmeye yardımcı olur.

Kaynak vd. (2001), epoksi/GTR sistemlerinde fraktografik SEM incelemesini kırılma mekanizmalarının yorumunda kullanmıştır. Yıldızhan vd. (2022) polyester/GTR kompozitlerinde zayıf ara yüzey yapışmasını SEM ile göstermiş; Revelo vd. (2021) PU-lastik kompozitlerde granül

dağılımı ve bağlayıcı sürekliliğini ürün performansıyla ilişkilendirmiştir. Bu üç farklı matris türünde SEM'in ortak rolü, mekanik davranışın mikroyapısal açıklamasını güçlendirmektir.

Bununla birlikte SEM görüntüsü sınırlı bir alanı temsil eder ve seçilen kırılma yüzeyi tüm numunenin istatistiksel yapısını doğrudan vermez. Bu nedenle görüntülerden doğrudan porozite yüzdesi, tüm numunenin aderans kuvveti veya kimyasal bağ miktarı çıkarılmamalıdır. Nicel boşluk analizi için görüntü analizi veya mikro-BT gibi tamamlayıcı yöntemler gereklidir.

2.10.2. EDS ve Element Haritalama

EDS, SEM ile birlikte seçilen mikrobölgelerde bulunan elementlerin karakteristik X-ışını sinyallerini kullanarak yarı nicel bileşim bilgisi sağlar. Atık lastik granüllerinde karbonun yanı sıra Zn, Si, S ve çeşitli mineral katkılardan kaynaklanan elementler bulunabildiğinden, EDS spektrumları ve haritaları kauçuk fazı ile matris bölgelerinin ayrımını destekleyebilir.

EDS'nin önemli sınırlılığı, ölçümün lokal olması ve hafif elementler ile yüzey/topografi etkilerine duyarlılığıdır. Bu nedenle belirli bir elementin yüksek çıkması doğrudan daha iyi mekanik aderans veya daha yüksek dayanım anlamına gelmez. Tezde EDS, SEM'de görülen morfolojik bölgelerin element dağılımını destekleyen tamamlayıcı veri olarak değerlendirilmiştir; mekanik sonuçlarla doğrudan doğrusal ilişki kurulmamıştır.

2.10.3. ATR-FTIR Spektroskopisi

FTIR spektroskopisi, moleküler bağların titreşimlerine karşılık gelen karakteristik soğurma bölgelerini belirleyerek polimerlerin kimyasal parmak izini ortaya koyar. ATR aksesuarı, katı ve heterojen polimer örneklerinin minimum numune hazırlığıyla analiz edilmesine olanak sağlar. Atık lastik ve bağlayıcı sistemlerinde C-H, C=O, N-H, C-O/C-N ve aromatik/fenolik titreşim bölgeleri matris türüne göre farklılık gösterebilir.

Aoudia vd. (2017) FTIR'ı mikrodalga devulkanizasyonunda S-S/C-S bağlarındaki değişimleri değerlendirmek için kullanmış; He vd. (2015) GTR içeren fenolik kür sisteminde FTIR-ATR bulgularını çapraz bağlanma davranışıyla ilişkilendirmiştir. Colom vd. (2024) FTIR ve DTGA'yı birlikte kullanarak farklı devulkanizasyon işlemlerinin GTR yapısındaki değişimleri takip etmiştir.

Mevcut tezde ATR-FTIR spektrumları başlangıç kauçuğu ve bağlayıcı sistemlerinin karakteristik kimyasal bölgelerini karşılaştırmak için kullanılmıştır. Spektrumda bant bulunması veya şiddet değişimi tek başına yeni bir granül-matris kimyasal bağının oluştuğunu kanıtlamaz. Yeni bağ oluşumu iddiası için kontrol numuneleri, pik ataması, kimyasal reaksiyon mekanizması ve gerektiğinde XPS/NMR gibi ek teknikler gerekir. Bu nedenle FTIR bulguları, mekanik ve SEM sonuçlarını kimyasal bağlamda destekleyen veri olarak sınırlandırılmıştır.

2.10.4. TGA ve DTG ile Termal Karakterizasyon

Termogravimetrik analiz, numunenin kontrollü atmosfer altında sıcaklığa bağlı kütle değişimini ölçer. TGA eğrisi toplam kütle kaybını; DTG eğrisi ise kütle kaybı hızındaki maksimumları ve üst üste binen bozunma basamaklarını daha görünür hâle getirir. Atık lastik-polimer kompozitlerinde T_5 ve T_{10} gibi erken kütle kaybı sıcaklıkları, ana bozunma aralığı, DTG maksimum sıcaklığı ve yüksek sıcaklıktaki kalıntı oranı temel karşılaştırma göstergeleridir.

Atık lastik kauçuğu çok bileşenli olduğu için termal bozunma tek bir saf polimer piki biçiminde gerçekleşmez. Doğal kauçuk, SBR/BR, yağlar ve diğer organik bileşenlerin bozunma aralıkları birbirine yakın/örtüşen bölgelerde görülebilir; karbon siyahı ve inorganik katkılar inert atmosferde önemli kalıntı bırakabilir. Bu nedenle kompozit TGA eğrisindeki piklerin bağlayıcı ve kauçuk faz katkıları birlikte düşünülmelidir.

Revelo vd. (2021) PU-lastik karo sisteminde TGA'yı ürün karakterizasyonunun bir parçası olarak kullanmış; Türkben vd. (2023) farklı epoksi sistemlerinin geri dönüştürülmüş kauçukla birlikte mekanik ve termal davranışını karşılaştırmıştır. Hejna vd. (2020) termoset-WTR literatüründe termal kararlılığın matris kimyası, kauçuk içeriği, çapraz bağlanma ve ara yüzey işlemlerinden etkilenebildiğini vurgulamıştır. Colom vd. (2024) ise DTGA'nın kauçuk yapı değişimlerini izleme gücünü göstermiştir.

TGA sonuçlarının yorumunda önemli bir metodolojik sınır, yüksek T_5/T_{10} veya yüksek DTG maksimumunun doğrudan 'yangına dayanıklı yapı malzemesi' anlamına gelmemesidir. TGA küçük numunede inert veya kontrollü atmosfer altında kütle kaybını ölçer; gerçek yangın performansı için tutuşma, alev yayılımı, ısı salım hızı, duman oluşumu ve oksijen indeksi gibi ayrı deneyler gerekir. Benzer şekilde yüksek kalıntı oranı da tek başına daha yüksek mekanik performans anlamına gelmez.

Tezde TGA/DTG, epoksi, PU, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin termal bozunma profillerini karşılaştıran tamamlayıcı bir karakterizasyon olarak ele alınmıştır. Termal göstergeler mekanik sonuçlarla birlikte yorumlanmış, ancak mekanik üstünlük ile termal üstünlüğün aynı sistemde zorunlu olarak birleşmediği kabul edilmiştir. Bu yaklaşım literatürdeki çoklu özellik değerlendirmesiyle uyumludur.

2.10.5. Mikroyapısal, Spektroskopik ve Termal Bulguların Birlikte Değerlendirilmesi

SEM, EDS, ATR-FTIR ve TGA/DTG aynı fiziksel olguyu ölçmeyen, birbirini tamamlayan tekniklerdir. SEM yüzey/morfoloji, EDS yerel element bileşimi, ATR-FTIR kimyasal fonksiyonel grup parmak izi ve TGA/DTG sıcaklığa bağlı kütle kaybı hakkında bilgi verir. Bu tekniklerin güçlü biçimde bütünleştirilmesi, her birinin sınırlarının korunmasına bağlıdır.

SEM'de gözlenen ara yüzey süreksizlikleri ile düşük mekanik dayanımın birlikte bulunması, mikroyapı ve mekanik davranış arasında tutarlı bir ilişkiye işaret edebilir; ancak tek bir görüntü dayanım değişiminin nicel nedenini belirlemez. Benzer biçimde yüksek TGA kalıntısı, numunenin bileşimine ve analiz atmosferine bağlı olarak kömürleşmiş ve inorganik fazlarla ilişkili olabilir. Bu kalıntı, elastisite modülü veya yangın performansının doğrudan ölçüsü değildir.

Bu nedenle tezde çoklu karakterizasyonun amacı tek bir nedensellik zinciri üretmek değil, farklı ölçüm ölçeklerinde gözlenen eğilimlerin birbirini destekleyip desteklemediğini sınamaktır. Bu yaklaşım, farklı ölçüm tekniklerinin kanıt sınırlarını koruyarak daha tutarlı ve bilimsel olarak savunulabilir bir sonuç dili sağlar.

Çoklu karakterizasyon yaklaşımının literatürdeki karşılıkları; FTIR/DTGA ile kauçuk yapısının izlenmesi, SEM/FTIR ile ara yüzey değişimlerinin değerlendirilmesi ve TGA'nın mekanik-morfolojik sonuçlarla birlikte kullanılması biçiminde görülmektedir (Derakhshandeh vd., 2008; He vd., 2015; Hejna vd., 2020; Revelo vd., 2021; Türkben vd., 2023; Colom vd., 2024). Bu çalışmalar, tezde SEM/EDS, ATR-FTIR ve TGA/DTG'nin birbirinin yerine geçmeyen tamamlayıcı kanıt katmanları olarak ele alınmasını desteklemektedir.

2.10.6. Isıl İletkenlik ve Dayanımın Birlikte Değerlendirilmesi

Isıl iletkenlik katsayısı (λ), malzemenin sıcaklık farkı altındaki ısı iletimini nicel olarak tanımlamaktadır. Atık lastik–polimer kompozitlerinde ısı iletimi; bağlayıcı türü, kauçuk granüllerin boyutu ve dağılımı, yoğunluk, boşluk yapısı ve ara yüzey temaslarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Bu nedenle basınç veya eğilme dayanımındaki sıralama, ısıl iletkenlik sıralamasını tek başına belirlememektedir (Abu-Jdayil vd., 2016a; Colom vd., 2023; Cimbola vd., 2024).

Cimbola vd. (2024), atık lastik granülleri ve poliüretan bağlayıcıyla üretilen panellerde granül boyutu ve panel kalınlığının etkilerini incelemiş ve 0,10–0,20 W/(m·K) aralığında ısıl iletkenlik ölçmüştür. Aynı bağlayıcı/kauçuk oranıyla karşılaştırılan gruplarda, daha ince granüllü paneller daha yüksek porozite, daha düşük elastisite modülü ve daha düşük ısıl iletkenlik göstermiştir. Çalışma, yalıtım davranışı ile mekanik rijitliğin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Colom vd. (2023), öğütülmüş atık lastik ve poliüretan bağlayıcı içeren kompozitlerin ısıl ve akustik özelliklerini araştırmış; incelenen numunelerde 0,117–0,189 W/(m·K) aralığında ısıl iletkenlik bildirmiştir. Daha düşük porozite ve daha yüksek yoğunluk, daha yüksek ısıl iletkenlikle ilişkilendirilmiştir. Bu bulgu, katı fazlar arasındaki temasın ve boşluk yapısının ısı iletimi üzerindeki etkisini desteklemektedir; ancak farklı reçetelerde aynı ilişkinin büyüklüğünün korunacağı anlamına gelmemektedir.

Abu-Jdayil vd. (2016a), doymamış polyester matrisine hacimce %0–40 oranlarında atık lastik ekleyerek kompozitlerin ısıl ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Çalışmada ısıl iletkenlik

0,113–0,144 W/(m·K) aralığında bulunmuş; lastik içeriği ve parçacık boyutundaki artışla yoğunluk ve ısıl iletkenlikte azalma bildirilmiştir. Bu sonuçlar, poliüretan dışındaki polimer matrislerde de karışım tasarımının ısı iletimini etkilediğini göstermiştir.

Dębska vd. (2019), epoksi harçlarda kumun hacimce %0–100 oranlarında atık lastik granülleriyle değiştirilmesinin mekanik ve ısıl özelliklere etkisini incelemiştir. Isıl iletkenlik, lastik içermeyen karışımda 0,204 W/(m·K) iken kumun tamamının lastikle değiştirildiği karışımda 0,114 W/(m·K) olarak ölçülmüştür. Lastik içeriğindeki artışla basınç ve eğilme dayanımlarında azalma görülmesi, ısı iletimi ile mekanik yeterliliğin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu çalışma, epoksi esaslı atık lastik kompozitleri için karşılaştırma sağlamaktadır; ancak kum ikame oranı, reçine miktarı ve deney koşulları mevcut tezdeki granül esaslı karışımlarla aynı değildir.

Bu çalışmalar, atık lastik–polimer kompozitlerini benzer bir malzeme ailesi içinde değerlendirmek için deneysel dayanak sağlamaktadır. Bununla birlikte bağlayıcı türü ve oranı, granül dağılımı, üretim yöntemi, yoğunluk, nem, deney sıcaklığı ve ölçüm koşulları farklılaşabildiğinden, bildirilen aralıklar doğrudan bir ürün üstünlüğü sıralamasına dönüştürülmemelidir. Isıl performans karşılaştırmasının mekanik yeterlilikle birlikte yürütülmesi, hedeflenen kullanımın gereksinimlerini değerlendirmek açısından daha açıklayıcıdır.

Nowak vd. (2023), atık kauçuk içeren betonları değerlendirirken basınç dayanımının ısıl iletkenliğe oranını ortak bir performans göstergesi olarak kullanmıştır. Bu yaklaşım, belirli bir ısıl iletkenlik düzeyinde daha yüksek dayanımı veya belirli bir dayanım düzeyinde daha düşük ısıl iletkenliği öne çıkarmaktadır. İndeks, asgari dayanım gereksinimini tek başına doğrulamadığından kullanım koşullarıyla birlikte ele alınmalıdır. Söz konusu çalışma betonlara ait olup, bu tezde deneysel değerlerin aktarılması için değil, Bölüm 3.9.1'de tanımlanan değerlendirme yönteminin dayanağı olarak kullanılmıştır.

2.11. Geleneksel ve Alternatif Yapı Malzemeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme

Literatür karşılaştırmasında en önemli metodolojik hata, farklı malzeme sınıflarını yalnız tek bir dayanım değeri üzerinden sıralamaktır. Normal beton, polimer beton, kauçuklu beton, esnek PU karo ve yüksek kauçuk içerikli polimer kompozitler farklı bağlayıcı mekanizmalarına, yoğunluklara ve hedef kullanım alanlarına sahiptir. Bu nedenle sayısal dayanım değerlerinin doğrudan üstünlük sıralaması oluşturmak için kullanılması çoğu durumda yanıltıcıdır.

Yüksek kauçuk içerikli polimer kompozitlerin karşılaştırılmasında, malzemenin hedeflenen işlevi ve bağlayıcı karakteri birlikte dikkate alınmalıdır. Esnek PU karolar için deformasyon ve kalıcı şekil değiştirme; daha rijit kaplama veya panel sistemleri için mekanik bütünlük; yalıtım amaçlı kompozitlerde ise ısıl iletkenlik ve gerekli dayanım birlikte ele alınmaktadır (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Revelo vd., 2021; Abu-Jdayil vd., 2016a). Bu çerçevede mevcut

tezdeki kompozitlerin potansiyel uygulamaları, hedef ürüne özgü performans gereksinimleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu kullanım yönleri doğrudan ürün sertifikasyonu veya saha kullanım onayı anlamına gelmez. Gerçek uygulama öncesinde darbe, yorulma, aşınma, kalıcı deformasyon, su emme, donma-çözülme, UV, yangın, VOC/liç, boyutsal kararlılık ve uzun dönem yaşlandırma deneyleri hedef ürün standardına göre tamamlanmalıdır. Literatürde de yüksek atık içeriğinin mühendislik kullanımı, ancak hedef uygulamaya özgü performans doğrulamasıyla birlikte anlam kazanmaktadır.

Bu nedenle tezin katkısı 'betondan daha iyi bir malzeme' üretmek biçiminde değil, atık lastiğin yüksek oranda ana taneli faz olduğu kompozitlerde bağlayıcı türü ve granülometrinin çoklu performans üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak ortaya koymak biçiminde tanımlanmalıdır.

2.12. Literatürün Genel Değerlendirilmesi, Araştırma Boşluğu ve Tezin Özgün Katkısı

Literatür, atık lastik kauçuğunun polimer matrislerde değerlendirilmesine ilişkin geniş bir bilgi birikimi sunmakla birlikte, çalışmaların çoğu tek bir matris türü, belirli bir parçacık boyutu veya sınırlı bir performans grubu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Epoksi–GTR çalışmaları ara yüzey ve mekanik davranışa, poliüretan–GTR çalışmaları esnek ürün ve deformasyon davranışına, polyester–GTR çalışmaları mekanik ve ısıl özelliklere, fenolik sistemler ise çapraz bağ ve termal davranışa odaklanmaktadır. Bu dört bağlayıcı sınıfının aynı lastik granülü kaynağı ve ortak granül düzenleri altında karşılaştırıldığı çalışmalar ise sınırlıdır.

Türkben (2019) farklı epoksi sistemlerinde kauçuk tozu ve dolgu miktarını; Aksoy (2021) ise çimento esaslı lastik agregalı betonlarda polimer katkısını incelemiştir. Bu tez, lastiğin polimerlerle ilk kez kullanıldığı iddiasına dayanmamaktadır. Çalışmanın özgün yönü; dört farklı bağlayıcı sistemini aynı granül kaynağı, aynı K1–K4 düzeni ve ortak deney yaklaşımı içinde karşılaştırmasıdır.

Granülometri literatüründe ince parçacıkların yüksek özgül yüzey alanı, geniş tane dağılımlarının ise geometrik paketlenme açısından avantaj sağlayabildiği bildirilmektedir. Ancak baskın etkinin bağlayıcı viskozitesi, ıslanabilirlik, matris rijitliği ve kürlenme mekanizmasıyla değişebildiği görülmektedir. Bu nedenle tezde K1–K4 granül düzenleri her bağlayıcı için aynı tanımlarla kullanılmış ve sonuçlar bağlayıcı bazında karşılaştırılmıştır.

Mekanik karşılaştırmada yalnız maksimum dayanım değerleri kullanılmamış; tepe şekil değiştirme, kayıt sonu deformasyonu, tepe sekant modülü ve yükleme işi alanı da birlikte değerlendirilmiştir. Böylece rijitlik, deformasyon kapasitesi ve yükleme işi aynı kavram gibi ele alınmamış; her bağlayıcının farklı mekanik karakteri ayrı göstergeler üzerinden yorumlanmıştır.

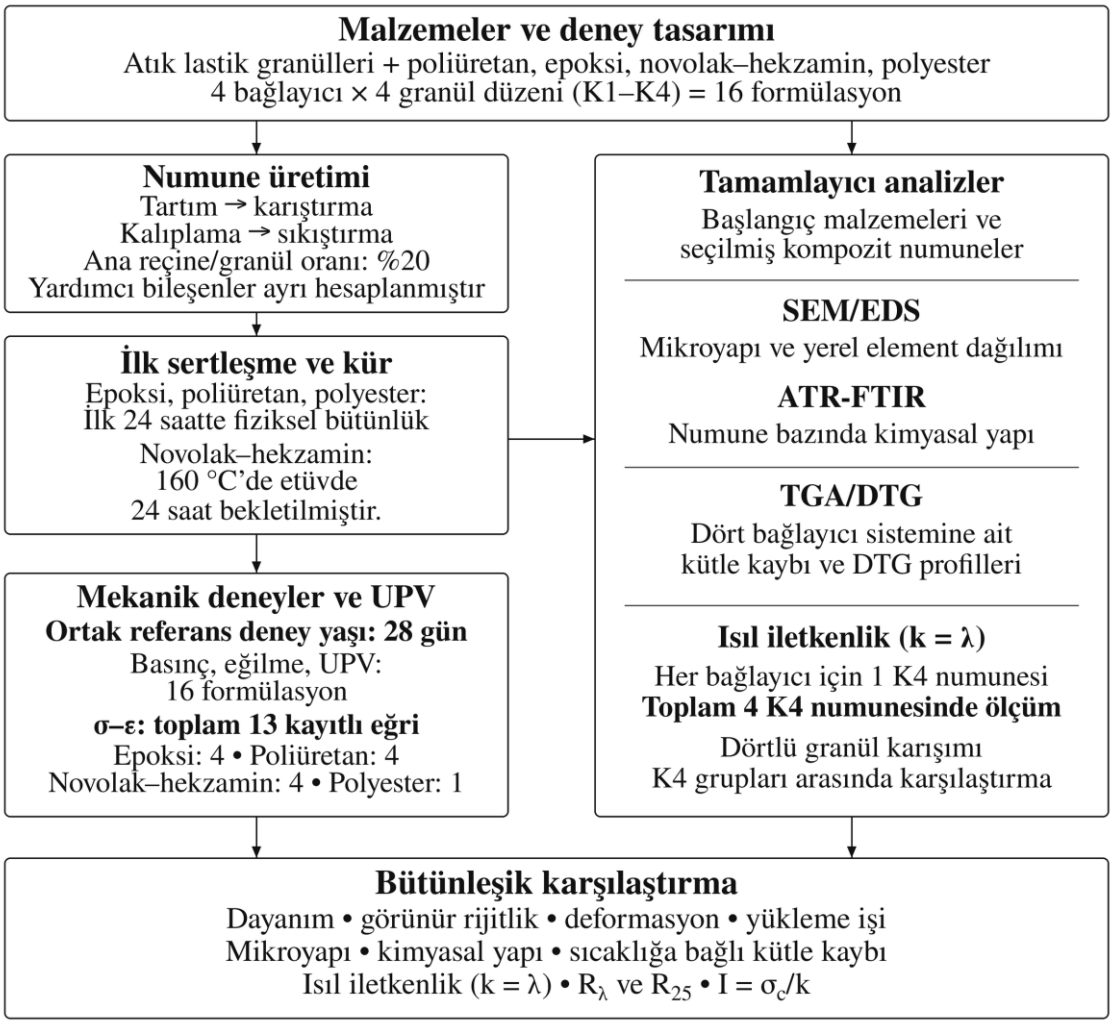
Tezin özgün katkısı; atık araç lastiği granüllerini epoksi, poliüretan, novolak–hekzamin ve doymamış polyester bağlayıcılarla dört ortak granül düzeninde karşılaştırması ve basınç, eğilme, UPV ve σ–ε bulgularını SEM/EDS, ATR-FTIR, TGA/DTG ve ısıl iletkenlik sonuçlarıyla birlikte değerlendirmesidir. K4 kompozitleri için basınç dayanımı/ısıl iletkenlik indeksinin hesaplanması da mekanik ve ısıl performansın aynı formülasyon düzeyinde birlikte okunmasına imkân vermiştir.

Literatürün tematik ve karşılaştırmalı özeti, çalışma kapsamları ve bu tezi destekleyen yönleriyle birlikte EK-1'de sunulmuştur.

Güncel derleme ve bibliyometrik çalışmalar, atık lastik esaslı kompozitlerde matris seçimi, ara yüzey uyumu, kullanım alanına özgü doğrulama ve uzun dönem performansın hâlen temel araştırma başlıkları arasında olduğunu göstermektedir (Ramarad vd., 2015; Sienkiewicz vd., 2017; Hejna vd., 2020; Castillo vd., 2025; Yan vd., 2026).

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde hammaddeler, granül karışımları, numune üretimi, kür koşulları ve deney yöntemleri açıklanmıştır. Dört bağlayıcı ile dört granül düzeni, 16 formülasyon oluşturmuştur. Ana bağlayıcı oranı granül kütlesinin %20'sidir; yardımcı bileşenler bu orana dâhil değildir. Basınç deneyleri 3, 28 ve 90 günde yürütülmüş; ana mekanik karşılaştırmada 28 gün esas alınmıştır. σ–ε değerlendirmesi 13 kayıtlı eğriyi kapsamıştır. Isıl iletkenlik için 16 plaka üretilmiş; sonuçlar dört K4 ölçümü üzerinden karşılaştırılmıştır. Ana karşılaştırmalardaki veri kapsamı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmanın genel akış şeması

Bu tezde polimer bağlayıcı terimi, granüller arasında süreklilik sağlayan polimer matris fazını ifade etmiştir. Atık lastik granülleri ise önceden vulkanize edilmiş, çapraz bağlı taneli kauçuk

fazıdır. Dört sistem arasındaki karşılaştırma yalnız polimer adını değil, yardımcı bileşenleri ve üretim/kür koşullarıyla birlikte kullanılan formülasyonu kapsamıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Kompozitlerin taneli fazını kullanım ömrünü tamamlamış araç lastiklerinden elde edilen kauçuk granüller, bağlayıcı fazını ise poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve doymamış polyester sistemleri oluşturmuştur. Temel malzemeler ve tedarik bilgileri Tablo 3.1'de özetlenmiştir. Malzemelere ilişkin teknik özelliklerde üretici teknik bilgi ve güvenlik bilgi formlarındaki doğrulanmış değerler esas alınmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan temel malzemeler, granüller, polimer bağlayıcılar ve kalıp ekipmanlarının laboratuvar ortamındaki genel görünümü Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan temel malzemelerin ve kalıp ekipmanlarının laboratuvar ortamındaki genel görünümü

Tablo 3.1. Tez çalışmasında kullanılan temel malzemeler ve tedarik bilgileri

Malzeme	Ürün / tanım	Üretici / tedarikçi	Çalışmadaki işlevi
Atık lastik granülü	0,5–1,2 mm; 5 mm; 5–10 mm; 10–20 mm	AKO ÖTL Geri Dönüşüm / AKO Lastik Kaplama	Ana taneli kauçuk fazı
Poliüretan	CREANATE 110-10 A	FLOKSER Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Tek komponentli polimer bağlayıcı
Epoksi	CREACASE EPNT 350 A+B	FLOKSER Group Sanayi ve Ticaret A.Ş.	İki komponentli polimer bağlayıcı
Novolak	GENFEN 9025P	GENTAŞ KİMYA SAN. ve TİC. PAZ. A.Ş.	Fenolik reçine bağlayıcı
Hekzamin	İlave kürleyici bileşen	GENTAŞ KİMYA SAN. ve TİC. PAZ. A.Ş.	Novolak sisteminde ilave kürleyici
Doymamış polyester	TP100 döküm tipi polyester	Turkuaz Polyester Reçine Kimya Sanayi Ticaret A.Ş.	Polimer bağlayıcı
MEKP	Metil etil keton peroksit	Turkuaz Polyester Reçine Kimya Sanayi Ticaret A.Ş.	Polyester kürleyicisi
Kobalt hızlandırıcı	Kobalt esaslı hızlandırıcı	Turkuaz Polyester Reçine Kimya Sanayi Ticaret A.Ş.	Polyester hızlandırıcısı

3.1.1. Atık Araç Lastiği Granülleri

Kauçuk granüller AKO ÖTL Geri Dönüşüm tarafından tane boyutlarına göre ayrılmış ve her fraksiyon ayrı olarak laboratuvara ulaştırılmıştır. Laboratuvar aşamasında yeniden bir tane boyutu sınıflandırması yapılmamış; tedarik edilen dört fraksiyon G1–G4 olarak kodlanmıştır. G2 fraksiyonu kayıtlarda nominal 5 mm olarak tanımlandığından, alt ve üst elek sınırı bilinmeyen bu grup için ek bir tane boyu aralığı varsayılmamıştır. Kullanılan fraksiyonlar ve K4 karışımındaki kütle karşılıkları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Atık lastik granüllerinin tane boyutu sınıfları

Kod	Tane boyutu	Tanım	K4 içinde 800 g toplam granüldeki miktar
G1	0,5–1,2 mm	İnce	200 g
G2	5 mm	Orta	200 g
G3	5–10 mm	İri	200 g
G4	10–20 mm	En iri	200 g

Atık lastik granüllerinin dört tane boyutu fraksiyonu ve laboratuvar ortamındaki toplu görünümü Şekil 3.3'te verilmiştir.



(a) G1-G4 fraksiyonlarının karşılaştırmalı görünümü



(b) İri fraksiyona örnek



(c) İnce fraksiyona örnek

Şekil 3.3. Atık lastik granüllerinin tane boyutu fraksiyonları ve laboratuvar görünümleri

3.1.2. Poliüretan Bağlayıcı

Poliüretan numunelerde FLOKSER tarafından üretilen CREANATE 110-10 A kullanılmıştır. Ürün çözücü içermeyen, tek komponentli, nemle kürlenen ve MDI esaslı bir poliüretan prepolimerdir. Üretici teknik bilgi formunda 25 °C'de yoğunluk 1,10±0,10 g/cm³, viskozite 6750±750 mPa·s, NCO içeriği %9,5±0,5 ve katı madde miktarı %99±1 olarak verilmiştir. Nihai reçetede poliüretan miktarı granül kütlesinin %20'si olarak uygulanmıştır. Laboratuvar kullanımında üretici güvenlik talimatları esas alınmıştır.

3.1.3. Epoksi Reçine Sistemi

Epoksi numunelerde CREACASE EPNT 350 iki komponentli sistem kullanılmıştır. A komponenti epoksi reçine, B komponenti sertleştiricidir ve üretici kütlece A:B = 100:50 oranını önermektedir. A komponentinin 25 °C'de yoğunluğu 1,075±0,075 g/cm³ ve viskozitesi 800±200 mPa·s; B komponentinin yoğunluğu 1,075±0,025 g/cm³ ve viskozitesi 400±100 mPa·s olarak kayıtlıdır. Ana %20 reçetede 800 g granül için 160 g A ve 80 g B komponenti kullanılmıştır.

3.1.4. Novolak Fenolik Reçine ve Hekzamin

Novolak numunelerde GENTAŞ KİMYA SAN. ve TİC. PAZ. A.Ş. tarafından üretilen GENFEN 9025P toz novolak reçine kullanılmıştır. Teknik bilgi formunda serbest fenol miktarı <%0,3, erime aralığı 90–95 °C, 45 µm altındaki partikül oranı en az %90 ve ürün bünyesindeki hekzamin içeriği %8,50–9,50 olarak verilmiştir. Çalışmada ürünün kendi hekzamin içeriğine ek olarak novolak kütlesinin %10'u oranında ayrıca hekzamin ilave edilmiştir. Buna göre 800 g granül için 160 g GENFEN 9025P ve 16 g ilave hekzamin kullanılmıştır.

3.1.5. Doymamış Polyester, MEKP ve Kobalt Hızlandırıcı

Polyester numunelerde Turkuaz Polyester TP100 döküm tipi doymamış polyester reçine kullanılmıştır. Ürün, üretici tanımında ortoftalik esaslı, tiksotropik olmayan ve hızlandırıcı içermeyen döküm tipi bir polyester olarak belirtilmiştir. Nihai reçetede polyester miktarı granül kütlesinin %20'si alınmış; MEKP polyester reçine kütlesinin %4'ü, kobalt hızlandırıcı ise %0,4'ü olarak uygulanmıştır.

3.1.6. Yardımcı Malzemeler ve Laboratuvar Güvenliği

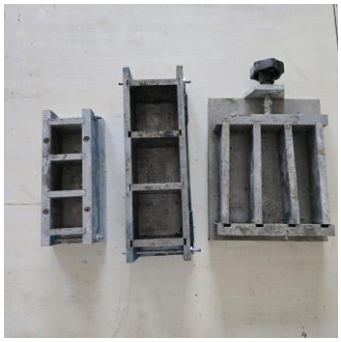
Numune üretiminde metal kalıpların temas yüzeylerine vaks esaslı kalıp ayırıcı uygulanmış, sıkıştırma sırasında yükün yüzeye daha düzenli aktarılması için MDF kapak ve plakalar kullanılmıştır. UPV ölçümlerinde prob–numune temasını iyileştirmek amacıyla kuplaj jeli kullanılmıştır. Reaktif polimerler, sertleştiriciler ve katalizörlerle çalışılırken üretici teknik bilgi ve güvenlik bilgi formlarındaki temas, havalandırma, depolama ve kişisel korunma uyarıları esas alınmıştır. Çalışmada kullanılan polimer bağlayıcılar ile temel kalıp düzenekleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



(a) Bağlayıcıların hazırlanması



(b) Metal ve MDF kalıplar



(c) Metal kalıpların üstten görünümü

Şekil 3.4. Polimer bağlayıcılar ve numune üretiminde kullanılan kalıp düzenekleri

Bağlayıcıların tezde raporlanan teknik özellikleri ve ana reçeteleri Tablo 3.3'te birlikte sunulmuştur.

Tablo 3.3. Polimer bağlayıcıların raporlanan temel teknik özellikleri ve ana %20 reçeteleri

Sistem	Ürün	Seçilmiş teknik özellikler	Ana %20 reçetesi
Poliüretan	CREANATE 110-10 A	Tek komponentli; MDI esaslı; ρ = 1,10±0,10 g/cm³; viskozite 6750±750 mPa·s; NCO %9,5±0,5	Granül kütlesinin %20'si
Epoksi	CREACASE EPNT 350	İki komponentli; A:B = 100:50; viskozite A 800±200, B 400±100 mPa·s	160 g A + 80 g B / 800 g granül
Novolak	GENFEN 9025P	Toz; serbest fenol <%0,3; erime 90–95 °C; ürün bünyesinde hekzamin %8,50–9,50	160 g novolak + 16 g ilave hekzamin / 800 g granül
Polyester	TP100	Ortoftalik; tiksotropik olmayan; hızlandırıcısız; viskozite 400–600 cps	160 g TP100 + 6,4 g MEKP + 0,64 g kobalt / 800 g granül

3.2. Deney Tasarımı, Granül Karışımları ve Reçeteler

Bağlayıcı türünün yanı sıra tane boyutu dağılımının etkisini incelemek amacıyla dört temel granül düzeni tanımlanmıştır. Kodlama sistemi tez boyunca değişmeden kullanılmıştır. K1 yalnız ince fraksiyonu, K2 yalnız orta fraksiyonu, K3 ince ve orta fraksiyonların eşit kütleli karışımını, K4 ise dört fraksiyonun eşit kütleli olarak birlikte bulunduğu karışımı ifade etmektedir.

3.2.1. Granül Karışım Tasarımları

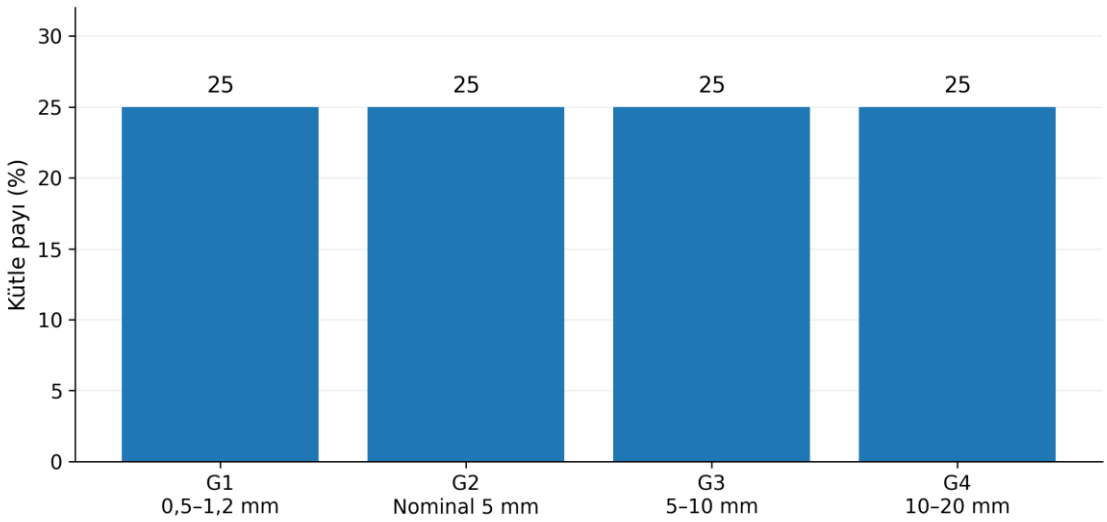
K1–K4 karışımlarının granül bileşimi, kütle oranları ve 800 g esasındaki tartım miktarları Tablo 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Granül karışım tasarımları ve 800 g esasındaki gerçek tartım miktarları

Karışım kodu	Granül bileşimi	Oran	800 g için tartım miktarı
K1	G1	%100	800 g
K2	G2	%100	800 g
K3	G1+G2	%50+%50	400+400 g
K4	G1+G2+G3+G4	%25 + %25 + %25 + %25	200 + 200 + 200 + 200 g

3.2.2. Tane Boyutu Dağılımının Deney Tasarımındaki Yeri

K1 ve K2 tek fraksiyonları, K3 eşit kütleli ince–orta karışımı, K4 ise dört fraksiyonlu karışımı temsil etmiştir. K4'te G1, G2, G3 ve G4 fraksiyonları kütlece %25'er kullanılmıştır. G2 yalnız nominal 5 mm olarak tanımlanmış ve laboratuvar elek analizi raporlanmamıştır. Bu nedenle kümülatif yüzde-geçen eğrisi oluşturulmamış; Şekil 3.5'te yalnız tasarımda kullanılan fraksiyonların kütle payları gösterilmiştir. Bu gösterim bir elek analizi sonucu değildir.



Şekil 3.5. K4 karışımındaki granül fraksiyonlarının tasarım kütle payları

3.2.3. Ana Reçine/Bağlayıcı Oranının Belirlenmesi

Ön formülasyon aşamasında ana reçine/bağlayıcı miktarı granül kütlesine göre %10, %15 ve %20 düzeylerinde denenmiştir. %10 düzeyi ön üretim ve ilk bütünlük gözlemleriyle değerlendirilmiş; sayısal mekanik karşılaştırmalar %15 ve %20 serilerinde yürütülmüştür. Olası

taşıyıcı olmayan kullanımlar için yaklaşık 5–10 MPa basınç dayanımı çalışma hedefi olarak belirlenmiştir; bu aralık genel bir mevzuat veya ürün standardı sınırı değildir. Bazı %15 reçeteler bu hedefin alt sınırına ulaşmış olmakla birlikte, sonraki karşılaştırmalı program için granül kütlesine göre %20 ana bağlayıcı ortak referans düzeyi olarak seçilmiştir. %20 üzerinde reçete denenmediğinden bu oran, tüm formülasyonlar için kanıtlanmış mekanik, ekonomik veya çevresel optimum olarak sunulmamıştır. Yardımcı sertleştirici, kürleyici ve katalizörler sistem reçetesine göre ayrıca eklenmiş ve toplam reaktif sistem miktarı ana bağlayıcı oranından ayrılmıştır.

3.2.4. Basınç, UPV ve σ–ε Ana Seri Reçeteleri

Nihai deney tasarımı dört bağlayıcı ile dört granül düzeninden oluşan 16 malzeme kombinasyonunu kapsamıştır. Ana %20 reçeteler Tablo 3.5'te verilmiştir. Buradaki sayı, bağımsız tekrarların veya tüm deneylerde kullanılan fiziksel numunelerin toplamı değil, farklı formülasyonların sayısıdır. σ–ε değerlendirmesinde 7×7×5 cm gerçek geometriye ait 13 kayıtlı eğri bulunmaktadır; polyester için dört granül düzenini ayrı ayrı temsil eden dört σ–ε kaydı mevcut değildir.

Tablo 3.5. %20 ana seri için kullanılan karışım reçeteleri

Bağlayıcı sistemi	Granül	Ana bağlayıcı	İlave bileşen(ler)
Poliüretan	800 g	160 g CREANATE 110-10 A	–
Epoksi	800 g	160 g EPNT 350 A	80 g EPNT 350 B
Novolak	800 g	160 g GENFEN 9025P	16 g ilave hekzamin
Polyester	800 g	160 g TP100	6,4 g MEKP + 0,64 g kobalt

Tablo 3.5'teki tartımlardan hesaplandığında yardımcı bileşenler dâhil toplam bağlayıcı sistemi/granül kütlesi oranı poliüretanda %20,00, epokside %30,00, novolak–hekzaminde %22,00 ve polyesterde %20,88'dir. Başlangıç toplam karışım kütlesi içindeki karşılıkları sırasıyla %16,67, %23,08, %18,03 ve %17,27'dir. Bunlar reçete hesabıdır; kürlenmiş numunenin bileşim veya yoğunluk ölçümü değildir. Bu nedenle bağlayıcılar arası farklılıklar, yalnız kimyasal türün tek başına etkisi olarak yorumlanmamıştır.

3.2.5. Eğilme Numunelerinin Reçeteleri

Eğilme numuneleri için 600 g toplam granül esas alınmış ve bağlayıcı ile yardımcı bileşen oranları ana seriyle aynı tutulmuştur. Aynı 4×4 malzeme kombinasyonunu temsil edecek biçimde 16×4×4 cm boyutlarındaki prizmatik numuneler hazırlanmıştır. K1 için 600 g G1, K2 için 600 g G2, K3 için 300 g G1 + 300 g G2, K4 için ise her fraksiyondan 150 g kullanılmıştır. Buradaki 600 g, reçetenin tanımlandığı granül esas miktarıdır; tek bir prizmatik numunenin ölçülmüş kütlesi olarak kullanılmamıştır. Eğilme serisi için 600 g granül esasındaki bağlayıcı ve yardımcı bileşen miktarları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Eğilme numunelerinde kullanılan karışım reçeteleri

Bağlayıcı sistemi	Granül	Ana bağlayıcı	İlave bileşen(ler)
Poliüretan	600 g	120 g CREANATE 110-10 A	–
Epoksi	600 g	120 g EPNT 350 A	60 g EPNT 350 B
Novolak	600 g	120 g GENFEN 9025P	12 g ilave hekzamin
Polyester	600 g	120 g TP100	4,8 g MEKP + 0,48 g kobalt

3.2.6. Üretilen Numune Sayısı ve Deney Grupları

Dört bağlayıcı sistemi ile dört granül düzeninin birleşiminden 16 farklı formülasyon oluşturulmuştur. Her formülasyon için 3, 28 ve 90 günlük deney yaşlarının her birinde üç ayrı basınç numunesi hazırlanmıştır. Böylece her deney yaşı için 48, üç deney yaşı için toplam 144 basınç numunesi üretilmiştir. Basınç deneyi tahribatlı olduğundan aynı fiziksel numune farklı yaşlarda yeniden kullanılmamıştır. Eğilme deneyleri için her formülasyondan üçer adet olmak üzere 48 prizmatik numune; ısıl iletkenlik programı için dört bağlayıcının K1–K4 düzenlerinden birer adet olmak üzere 16 plaka hazırlanmıştır. Ana deney programında toplam 144 + 48 + 16 = 208 fiziksel numune üretilmiştir.

UPV ölçümleri, 28 günlük basınç grubundaki 48 numunede basınç deneyinden önce gerçekleştirilmiş; UPV için ayrı bir numune grubu üretilmemiştir. Her formülasyondaki üç numune arasında UPV değeri en yüksek olan numune karşılaştırma için seçilmiştir. Isıl iletkenlik için üretilen 16 plaka ile tezde sonuçları sunulan dört K4 ölçümü ayrı tutulmuştur; K1–K3 plakalarına ait ölçüm sonucu bu tezde raporlanmamıştır. Ön deneme numuneleri ve mevcut numunelerden karakterizasyon için alınan küçük parçalar, ana programa ait 208 adetlik toplamın dışında değerlendirilmiştir.

3.2.7. Kompozitlerin 1 m³ İçin Teorik Hammadde Miktarı ve Maliyet Analizi

Çalışmada kullanılan ana reçeteler esas alınarak kompozitlerin 1 m³ hacim için teorik hammadde gereksinimleri hesaplanmıştır. Ölçeklemede, 800 g atık lastik granülü esaslı ana karışımın üç adet 70×70×50 mm numunenin üretiminde kullanıldığı kabul edilmiştir. Üç numunenin toplam hacmi 0,000735 m³ olup, reçetelerin 1 m³ hacme dönüştürülmesinde 1.360,54 ölçekleme katsayısı kullanılmıştır. Bu hesap deney reçetesinin geometrik hacme göre teorik büyütülmesini göstermekte olup, seri üretimde oluşabilecek fire, sıkıştırma farkı ve proses kayıplarını kapsamamaktadır.

Maliyet hesabında atık lastik granülü için 18,00 TL/kg; poliüretan için 332,47 TL/kg; epoksi sistemi için 552,97 TL/kg; GENFEN 9025P novolak için 108,72 TL/kg; ilave hekzamin için 93,90 TL/kg; TP100 polyester için 113,67 TL/kg; MEKP için 327,60 TL/kg ve kobalt hızlandırıcı için 580,16 TL/kg değerleri esas alınmıştır. Novolak ve hekzamin fiyatları tedarikçi bildirimine, diğer değerler ise 16.10.2026 tarihli güncel piyasa/rayiç verilerine dayandırılmıştır (AYK, 2026; Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2026; TCMB, 2026; Türksaş, 2026; Yücel Kompozit, 2026; Kompozit Pazarı, 2026a,b). Teorik hammadde miktarları ve maliyetleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. 1 m³ kompozit için teorik hammadde miktarları ve maliyetleri

Sistem	Granül (kg/m³)	Bağlayıcı ve yardımcı bileşenler (kg/m³)	Toplam hammadde maliyeti (TL/m³)
Poliüretan	1.088,44	217,69 PU	91.965,39
Epoksi	1.088,44	217,69 A + 108,84 B	200.153,47
Novolak–hekzamin	1.088,44	217,69 novolak + 21,77 hekzamin	45.303,89
Polyester	1.088,44	217,69 TP100 + 8,71 MEKP + 0,87 kobalt	47.693,40

Not: Değerler, deneyde kullanılan reçetelerin 1 m³ hacme teorik olarak ölçeklenmesiyle elde edilmiştir. Hesaplanan maliyetler yalnız hammadde maliyetini temsil etmekte; işçilik, enerji, ekipman, nakliye ve seri üretim giderlerini içermemektedir.

Hesaplanan değerler bağlayıcı sisteminin toplam hammadde maliyeti üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Novolak–hekzamin yaklaşık 45.304 TL/m³ ile en düşük, polyester yaklaşık 47.693 TL/m³ ile ikinci en düşük teorik hammadde maliyetini vermiştir. Poliüretan için yaklaşık 91.965 TL/m³, epoksi için ise yaklaşık 200.153 TL/m³ maliyet hesaplanmıştır. Novolak–hekzamin sisteminde uygulanan 160 °C'de 24 saatlik termal kürün enerji gideri bu hammadde hesabına dâhil değildir. Kompozitlerin C30/37 hazır betonla maliyet karşılaştırması Tablo 3.8'de sunulmuştur.

Tablo 3.8. Kompozitlerin C30/37 hazır beton ile maliyet karşılaştırması

Malzeme	Yaklaşık maliyet (TL/m³)	C30/37 hazır betona göre maliyet
C30/37 hazır beton	3.191,25	1,0
Novolak–hekzamin kompozit	45.303,89	14,2 kat
Polyester kompozit	47.693,40	14,9 kat
Poliüretan kompozit	91.965,39	28,8 kat
Epoksi kompozit	200.153,47	62,7 kat

Not: C30/37 hazır beton için 2026 Eylül resmî malzeme birim fiyatı esas alınmıştır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2026a). Karşılaştırma, yalnız birim hacim hammadde maliyetini göstermekte olup eşdeğer taşıyıcı performans karşılaştırması değildir.

Maliyet karşılaştırması, geliştirilen kompozitlerin geleneksel betonun doğrudan hacimsel ikamesi olarak değil, farklı mühendislik özelliklerinden yararlanılabilecek özel uygulamalar için değerlendirilmesinin daha uygun olduğunu göstermektedir. Epoksi–K1, 8,21 MPa ile ana mekanik matriste en yüksek basınç dayanımını vermiş; ancak epoksi sistemi en yüksek teorik hammadde maliyetine sahip olmuştur. Poliüretan–K4 ise 6,29 MPa basınç dayanımı, 1,94 MPa eğilme dayanımı, geniş görünür deformasyon davranışı ve 0,1486 W/(m·K) ısıl iletkenlik değeriyle özellikle esnek ara elemanlar, dilatasyon bölgeleri, panel birleşimleri ile darbe ve titreşim azaltıcı uygulamalar açısından daha işlevsel bir performans profili sunmuştur. Bu nedenle ekonomik değerlendirme, tek başına TL/m³ değeri yerine hedef kullanım için gerekli mekanik ve termal performansla birlikte ele alınmıştır.

3.3. Kompozit Numunelerin Üretimi

Kompozitler reçete hazırlığı, kalıp hazırlığı, karıştırma, yerleştirme, sıkıştırma ve bağlayıcıya özgü ilk sertleşme/kür aşamalarıyla üretilmiştir.

3.3.1. Üretim Laboratuvarları ve Kullanılan Donanım

Numune üretimleri Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarları ile Bingöl Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Üretimde hassas terazi, laboratuvar tipi mekanik mikser ve elektrikli el mikseri, 7×7×7 cm metal kalıplar, 16×4×4 cm prizmatik eğilme numuneleri için üç gözlü metal kalıplar, ısıl iletkenlik plakaları için MDF'den hazırlanmış 15×20×3 cm kalıplar, MDF kapaklar, mengene tipi sıkıştırma düzenekleri, manometreli hidrolik pres ve ilk sertleşme ve kür işlemleri için etüv/kabin kullanılmıştır. Epoksi, poliüretan ve polyester sistemlerinde etüv/kabin düşük laboratuvar sıcaklıklarında ilk sertleşmede oda sıcaklığına yakın koşulları korumak için kullanılmış; novolak–hekzamin numuneleri ise mengene ile sabitlenmiş kalıplar içinde etüvde 160

°C’de 24 saat bekletilerek termal küre tabi tutulmuştur. Ön deneme ve farklı geometri çalışmalarında kullanılan numuneler nihai 16 kombinasyonluk karşılaştırma matrisiyle karıştırılmamıştır.

Numune üretim çalışmalarından laboratuvar görünümleri Şekil 3.6’da sunulmuştur.



(a) Hidrolik pres ve çalışma ekibi



(b) Laboratuvar üretim çalışmaları



(c) Karışım hazırlama çalışması



(d) Numune hazırlığı

Şekil 3.6. Numune üretim çalışmalarından laboratuvar görünümleri

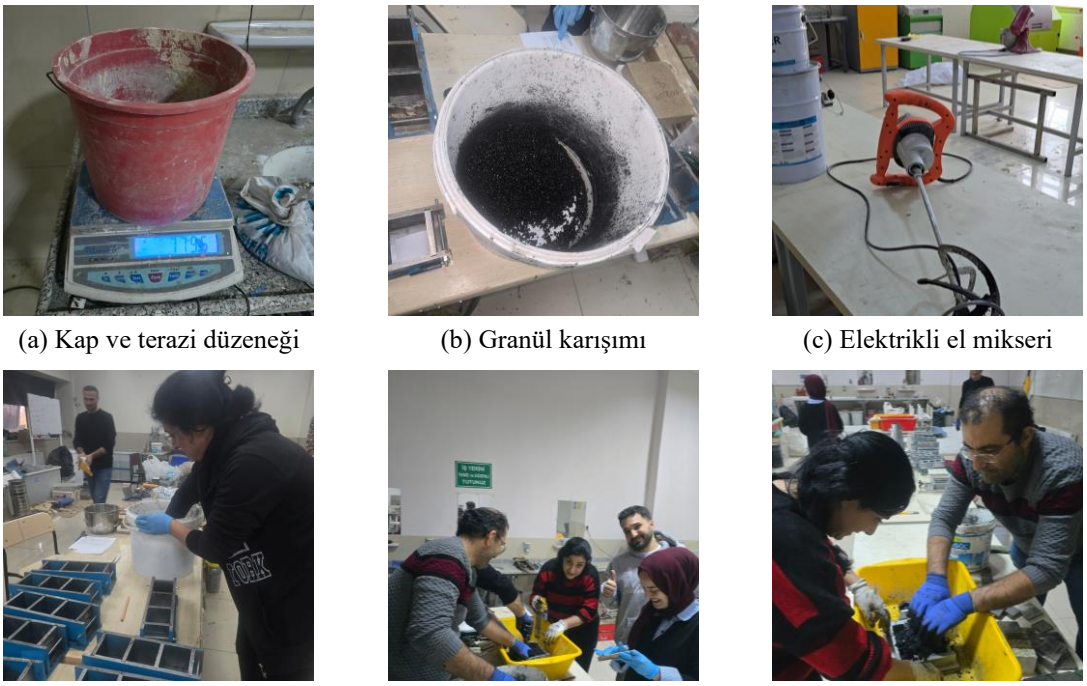
3.3.2. Kalıp Hazırlığı

Üretim öncesinde metal ve MDF kalıplar temizlenmiş, numunenin kalıptan ayrılmasını kolaylaştırmak amacıyla temas yüzeylerine vaks esaslı kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Numune ölçüsüne uygun üst kapak ve plakalar kullanılmış ve karışım kalıba yerleştirildikten sonra sıkıştırma yükü bu kapaklar üzerinden aktarılmıştır. Kalıp boyutları ve üretim sonrasında ölçülen gerçek numune boyutları, ilgili deney geometrisi kapsamında ayrı ayrı belirtilmiştir. Kalıp düzeneklerinden örnekler Şekil 3.4 ve Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

3.3.3. Tartım ve Karıştırma

Granül fraksiyonları ve polimer bileşenleri ilgili reçetelerde verilen kütlelerde hassas terazide ayrı ayrı tartılmıştır. Polimer bileşenleri sistem reçetesine göre hazırlanmış ve granüllerle birleştirilmiştir. Tüm karışımlara 3 dakika mekanik karıştırma uygulanmış; işlem sonunda granül yüzeylerinin bağlayıcıyla görsel olarak homojen kaplandığı kontrol edilmiştir. Poliüretan tek komponentli olarak; epoksi A ve B komponentleri kütlece 100:50 oranında; polyester TP100,

MEKP ve kobalt hızlandırıcıyla; novolak sistemi ise GENFEN 9025P ve ilave hekzaminle hazırlanmıştır. Mikser devri ve karıştırma sıcaklığı bağımsız olarak doğrulanmış sayısal kayıtlarla belirlenmediğinden kontrollü deney değişkenleri olarak verilmemiştir. Tartım düzeni, karıştırma donanımı ve karışım hazırlama aşamalarından görünümler Şekil 3.7'de sunulmuştur.



(a) Kap ve terazi düzeneği (b) Granül karışımı (c) Elektrikli el mikseri

(d) Karışım hazırlama (e) Bileşenlerin karıştırılması (f) Homojenleştirme

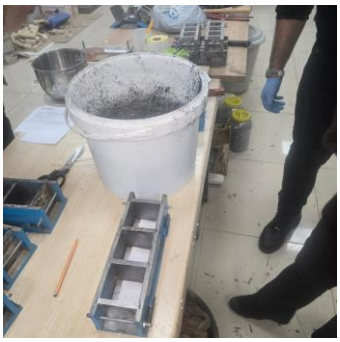
Şekil 3.7. Numune üretiminde tartım, karıştırma donanımı ve karışım hazırlığından görünümler

3.3.4. Kalıplama ve Sıkıştırma

Homojenleştirilen karışımlar kalıplara kademeli olarak yerleştirilmiş ve numune geometrisine uygun üst kapak ve plakalar üzerinden sıkıştırılmıştır. Bingöl Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu laboratuvarındaki manometreli hidrolik presin göstergesi yaklaşık 15 bar (1,5 MPa) seviyesine getirilmiş; referans kalıp düzenindeki bu uygulamada karışım yüksekliğinde yaklaşık 2 cm azalma gözlenmiştir. Piston alanı ve kalıp içi gerilme dönüşümü belirlenmediğinden bu değer, numuneye etkiyen gerçek basınç gerilmesi olarak kullanılmamış ve hidrolik sistem göstergesi olarak kaydedilmiştir.

Seri numune üretimini sürdürebilmek ve etüvde işlem gören numuneleri kalıp içerisinde sıkıştırılmış durumda tutabilmek amacıyla, pres uygulamasında gözlenen sıkışma davranışı ve numune geometrisi esas alınarak mengenelerle kademeli sıkıştırma ve sabitleme uygulanmıştır. Presle gözlenen yaklaşık 2 cm yükseklik azalması, referans uygulamaya ait olup bütün kalıp geometrilerine uygulanan sabit bir kalınlık azalması değildir. Bu yöntemde presle elde edilen sıkışma düzeyine yaklaşılması ve ulaşılan geometrinin ilk sertleşme/kür süresince korunması amaçlanmıştır. Mengene uygulaması için pres basıncına eşdeğer bir basınç değeri ölçümle

doğrulanmamıştır. Isıl plakaların raporlanan son kalınlıkları Bölüm 3.3.8'de ve Tablo 4.13'te verilmiştir. Kalıplama ve sıkıştırma fotoğrafları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



(a) Karışım kabı ve metal kalıplar



(b) Kalıp hazırlığı



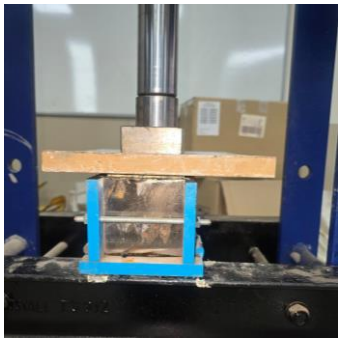
(c) Karışımın yerleştirilmesi



(d) Kalıba karışım yerleştirme



(e) Yerleştirme ayrıntısı



(f) Kalıp ve üst plaka

Şekil 3.8. Kompozit üretiminde kalıp hazırlığı, karışım yerleştirme ve sıkıştırma uygulamaları

Kalıbın üst plaka ile sıkıştırılmasına ve elle kumandalı laboratuvar düzeneğine ait görünümler Şekil 3.9'da sunulmuştur.



(a) Üst plaka ile kalıp sıkıştırma



(b) Elle kumandalı laboratuvar düzeneği

Şekil 3.9. Kalıp sıkıştırma ve elle kumandalı laboratuvar düzeneklerinden görünümler

3.3.5. İlk Sertleşme, Kür Süreci ve Deney Yaşları

Bu çalışmanın üretim koşullarında epoksi, poliüretan ve polyester numunelerin ilk 24 saat içinde kalıptan çıkarılabilir fiziksel bütünlük ve ilk sertliğe ulaştığı gözlenmiştir. Bu gözlem,

reaksiyonun veya kürün bütünüyle tamamlandığını gösteren bağımsız bir ölçüm değildir. Düşük laboratuvar sıcaklıklarında etüv/kabin, bu üç sistem için oda sıcaklığına yakın koşulları korumak amacıyla kullanılmış; yüksek sıcaklıkta ilave termal kür uygulanmamıştır. Novolak–hekzamin numuneleri etüvde 160 °C'de 24 saat bekletilerek termal küre tabi tutulmuştur. İlk sertleşme/kür işlemi ile deney yaşı birbirinden ayrılmış; 28 gün zorunlu bir kür süresi değil, ana deneylerin ortak karşılaştırma yaşı olarak tanımlanmıştır. Etüv/kabinin görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir.

Novolak–hekzamin sisteminde kalıplar etüv işlemi boyunca mengene ile sabit tutulmuştur. Etüvdeki 160 °C ve 24 saatlik işlem sıcak presleme değildir; bu aşamada numuneye 2 MPa sıcak pres basıncı uygulanmamıştır. Hidrolik pres göstergesi ile numuneye doğrudan etkiyen sıkıştırma gerilmesi birbirinin yerine kullanılmamıştır.



(a) İlk sertleşmede oda koşullarını sağlayan etüv/kabin



(b) Kabin içindeki kalıp ve ekipmanların görünümü

Şekil 3.10. İlk sertleşme ve novolak–hekzamin termal küründe kullanılan etüv/kabinin dış ve iç görünümü

Bağlayıcılara göre üretim, ilk sertleşme/kür ve deney yaşı ayrımı Tablo 3.9'da özetlenmiştir. Tablodaki kalıplama ve 28 günlük deney yaşı bilgileri mekanik seriye aittir. Üç gözlü metal kalıplar eğilme numunelerinde kullanılmış; ısıl plakalar için hazırlanan MDF kalıplar Bölüm 3.3.8'de açıklanmıştır.

Tablo 3.9. Bağlayıcı sistemlerine göre üretim ve ilk sertleşme/kür koşulları

Sistem	Karıştırma	Kalıplama / sıkıştırma	İlk sertleşme / kür ve deney hazırlığı
Poliüretan	Mekanik homojenleştirme; 3 dakika mekanik karıştırma	Metal kalıp; MDF kapak; ağırlıklı olarak mengene ile sıkıştırma ve sabitleme	İlk 24 saatte gözlenen fiziksel bütünlük; mekanik deneylerde 28 gün ortak referans yaşı.
Epoksi	A+B bileşenleri ve granülün mekanik homojenleştirilmesi; 3 dakika mekanik karıştırma	Metal kalıp; MDF kapak; ağırlıklı olarak mengene ile sıkıştırma ve sabitleme	İlk 24 saatte gözlenen fiziksel bütünlük; mekanik deneylerde 28 gün ortak referans yaşı.
Novolak–hekzamin	Toz reçine + ilave hekzamin + granülün homojenleştirilmesi; 3 dakika mekanik karıştırma	Metal kalıp; MDF kapak; mengene ile sıkıştırma ve sabitleme	Etüvde 160 °C'de 24 saat bekletilmiştir. 28 gün ortak referans deney yaşıdır.
Polyester	TP100 + MEKP + kobalt + granülün homojenleştirilmesi; 3 dakika mekanik karıştırma	Metal kalıp; MDF kapak; ağırlıklı olarak mengene ile sıkıştırma ve sabitleme	İlk 24 saatte gözlenen fiziksel bütünlük; mekanik deneylerde 28 gün ortak referans yaşı.

3.3.6. Eğilme Numunelerinin Hazırlanması

Eğilme numuneleri, her gözü 16×4×4 cm boyutlarında olan üç gözlü metal kalıplarda hazırlanmıştır. Dört polimer bağlayıcı ve dört granül düzeninden oluşan aynı 4×4 malzeme matrisi eğilme serisinde de korunmuştur. Tartım, karıştırma, kalıba yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri ilgili bağlayıcı reçetesine göre uygulanmıştır. Mekanik deney sonrasında elde edilen kırılmış küçük parçalar, gerekli görülen mikroyapısal incelemelerde numune parçası olarak değerlendirilmiştir.

3.3.7. Ön Basınç Numunesi ve Nihai σ–ε Numunelerinin Ayrımı

Ana deney matrisinden ayrı olarak Bingöl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğünde 10×10×10 cm kalıp kullanılmış; kalıplama, sıkıştırma ve ilk sertleşme sonrasında ön basınç deneyinde kullanılan numunenin gerçek boyutları 9,9×9,9×8 cm olarak ölçülmüştür. Gerilme–birim şekil değiştirme (σ–ε) çalışmasında kullanılan metal kalıp 7×7×7 cm olup, sıkıştırma ve ilk sertleşme/kür sonrasında deney numunelerinin gerçek boyutları 7×7×5 cm olarak belirlenmiştir. Ana tasarım 16 malzeme kombinasyonundan oluşmuştur; nihai σ–ε karşılaştırması ise erişilebilir 13 kayıtlı eğriyle sınırlandırılmıştır. Bu iki numune geometrisi birbirinden bağımsız değerlendirilmiş ve sonuçları eşdeğer kabul edilmemiştir. Üretilen kompozitler ile ön basınç ve nihai σ–ε numunelerinden görünümler Şekil 3.11'de verilmiştir.



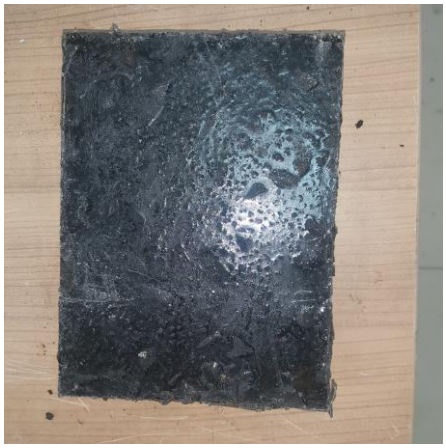
Şekil 3.11. Üretilen kompozitler ile ön basınç ve nihai σ–ε numunelerinden görünümler

3.3.8. Isıl İletkenlik Numunelerinin Üretimi

Isıl iletkenlik deney programı için poliüretan, polyester, epoksi ve novolak–hekzamin bağlayıcıların her birinde K1, K2, K3 ve K4 granül düzenlerinden birer plaka hazırlanmış; böylece toplam 16 plaka üretilmiştir. Plakalar, MDF'den hazırlanmış 15×20×3 cm nominal ölçülü kalıplarda oluşturulmuştur. Bu tezde raporlanan ısıl karşılaştırma, her bağlayıcının K4 düzenindeki bir plakasına ait toplam dört ölçüme dayandırılmıştır. K4 düzeninde G1, G2, G3 ve G4 fraksiyonları eşit kütle paylarıyla kullanılmış; ana reçine/bağlayıcı oranı granül kütlesine göre %20 olarak tanımlanmıştır.

Isıl iletkenlik ölçümü raporlanan K4 plakalarının üretiminde 2100 g granül esaslı K4 reçetesi kullanılmıştır. Dört granül fraksiyonu eşit kütle paylarıyla tanımlanmış; G1, G2, G3 ve G4 fraksiyonlarının her biri 525 g olarak hesaplanmıştır. Granül kütlesine göre %20 ana reçine/bağlayıcı oranı, bu reçete esası için 420 g ana bağlayıcıya karşılık gelmektedir. Yardımcı bileşen miktarları, Tablo 3.5'teki sistem oranları esas alınarak ana bağlayıcı kütlesinden ayrı hesaplanmıştır.

Sıkıştırma ve ilk sertleşme/kür sonrasında ölçüm raporlarında verilen plaka kalınlıkları poliüretan için 29,0 mm, polyester için 25,7 mm, epoksi için 23,8 mm ve novolak–hekzamin için 23,1 mm'dir. Bu değerler, kalıbın 30 mm nominal yüksekliğinden ayrı olarak değerlendirilmiştir. Üretilen kompozit plaka örneğinin yüzey görünümü Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Isıl iletkenlik numunesi olarak üretilen kompozit plaka örneğinin yüzey görünümü

3.4. Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV) Ölçümleri

Üretilen kompozitlerin iç yapısal sürekliliğini ve numuneler arası göreli homojenliği tahribatsız olarak değerlendirmek amacıyla ultrasonik geçiş hızı (UPV) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nihai karşılaştırmada dört bağlayıcı sistemi ve dört granül düzeninden oluşan 16 kombinasyonluk ana matris esas alınmıştır. Her kombinasyonun 28 günlük basınç grubundaki üç numunesinde ölçüm yapılarak toplam 48 numune UPV bakımından değerlendirilmiştir. Aynı formülasyona ait üç numune arasından en yüksek UPV değerini veren numune seçilmiş; raporlanan UPV değeri bu seçilen numuneye ait olup üç numunenin ortalaması olarak kullanılmamıştır. UPV, basınç dayanımının doğrudan karşılığı olarak değil; bağlayıcı rijitliği, iç boşluk yapısı ve granül–matris sürekliliğiyle birlikte yorumlanan tamamlayıcı bir gösterge olarak kullanılmıştır.

$$V = \frac{L}{t} \tag{3.1}$$

Burada V ultrasonik geçiş hızını (m/s), L prob yüzeyleri arasındaki geçiş uzunluğunu (m) ve t dalga geçiş süresini (s) ifade etmektedir. UPV sonuçları basınç mukavemetinin doğrudan karşılığı olarak değil, kompozit iç yapısal sürekliliğini destekleyen tamamlayıcı tahribatsız ölçüm olarak değerlendirilmiştir. UPV ölçüm uygulamasına ait özgün laboratuvar fotoğrafları Şekil 3.13'te verilmiştir.



(a) Prob–numune teması (b) UPV ölçüm uygulaması (c) UPV çalışma alanı

Şekil 3.13. UPV ölçümlerinde prob–numune teması, cihaz kullanımı ve laboratuvar uygulamasından görünümler

Ana tasarımdaki 16 kombinasyon ve seçilen numunelere ait UPV değerleri Tablo 3.10'da birlikte gösterilmiştir. UPV ölçümleri, 28 günlük basınç grubundaki 48 numune üzerinde yapılmıştır.

Tablo 3.10. Nihai deney tasarımındaki 16 malzeme kombinasyonu ve UPV sonuçları

No	Bağlayıcı sistemi	Granül grubu	UPV (m/s)
1	Poliüretan	K1 – G1 (ince)	550
2	Poliüretan	K2 – G2 (orta)	560
3	Poliüretan	K3 – G1+G2 (ince+orta)	844
4	Poliüretan	K4–G1+G2+G3+G4 (dört fraksiyon)	1153
5	Epoksi	K1 – G1 (ince)	1044
6	Epoksi	K2 – G2 (orta)	980
7	Epoksi	K3 – G1+G2 (ince+orta)	1586
8	Epoksi	K4 – G1+G2+G3+G4 (dört fraksiyon)	2012
9	Novolak–hekzamin	K1 – G1 (ince)	612
10	Novolak–hekzamin	K2 – G2 (orta)	1337
11	Novolak–hekzamin	K3 – G1+G2 (ince+orta)	1418
12	Novolak–hekzamin	K4 – G1+G2+G3+G4 (dört fraksiyon)	852
13	Polyester	K1 – G1 (ince)	188
14	Polyester	K2 – G2 (orta)	192
15	Polyester	K3 – G1+G2 (ince+orta)	206
16	Polyester	K4 – G1+G2+G3+G4 (dört fraksiyon)	260

Not: Ölçümler, her formülasyonun 28 günlük basınç grubundaki üç numunesi üzerinde, toplam 48 numunede gerçekleştirilmiştir. Tabloda üçlü setin en yüksek UPV değerini veren numunesi gösterilmiş; değerler ortalama olarak sunulmamıştır. Yüksek UPV tek başına yüksek basınç veya eğilme dayanımı anlamına gelmemektedir.

3.5. Mekanik Deneyler

Mekanik deneyler basınç, eğilme ve gerilme–birim şekil değiştirme davranışını karşılaştırmak amacıyla yürütülmüştür. Ana değerlendirmede granül kütlesine göre %20 ana bağlayıcı içeren 28 günlük numuneler esas alınmıştır. Diğer deney yaşlarına ilişkin kayıtların kapsamı Bölüm 4.1.1'de açıklanmıştır. σ–ε verileri 7×7×5 cm gerçek geometriye ait 13 kayıtlı eğri üzerinden değerlendirilmiştir. Basınç deney düzeneği ve bilgisayar destekli izleme alanının genel görünümü Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. Basınç deney düzeneği ve bilgisayar destekli izleme alanının genel görünümü

3.5.1. Bingöl Ön Basınç Deneyi

Bingöl Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü İnşaat Laboratuvarında 10×10×10 cm kalıp kullanılmış ve kalıplama, sıkıştırma ve ilk sertleşme sonrasında gerçek boyutları 9,9×9,9×8 cm olarak ölçülen numune üzerinde ön basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney, ana karşılaştırmalı 16 kombinasyonluk matristen önce numunenin basınç altındaki genel davranışını ve deney düzenini ön değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Bu nedenle ön deney sonucu, nihai 28 günlük ve %20 bağlayıcı oranlı ana seri sonuçlarının eşdeğer tekrarı olarak kullanılmamıştır.

Bingöl ön basınç deneyinde deney cihazı, sonuç ekranı ve numunenin yükleme tablaları arasındaki konumuna ilişkin deney görselleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilmiştir.



(a) Deney sonuç ekranı



(b) Numunenin yükleme tablaları arasındaki görünümü

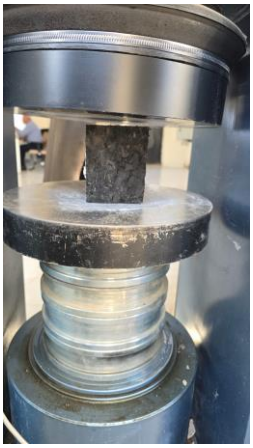


(c) Deney cihazının genel görünümü

Şekil 3.15. Basınç deneyinde kullanılan deney düzeneği ve cihaz ekranı: (a) deney sonuç ekranı, (b) numunenin yükleme tablaları arasındaki görünümü, (c) deney cihazının genel görünümü



(a) Deney düzeneğinde numunenin yerleştirilmesi



(b) Numunenin basınç tablaları arasındaki yakın görünümü

Şekil 3.16. Basınç deneyi sırasında numunenin yerleştirilmesi ve yükleme görünümü: (a) deney düzeneğinde numunenin yerleştirilmesi, (b) numunenin basınç tablaları arasındaki yakın görünümü

3.5.2. Atatürk Üniversitesi Gerilme–Birim Şekil Değiştirme (σ–ε) Deneyleri

Gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi amacıyla 7×7×7 cm metal kalıplarda üretilen ve nihai gerçek boyutları 7×7×5 cm olan 28 günlük numuneler Atatürk Üniversitesinde tek eksenli basınç altında test edilmiştir. Deneylerde, yük ve deplasman verilerinin bilgisayar destekli olarak kaydedildiği tek eksenli basınç test düzeneği kullanılmıştır. ISO 604:2002 ve ASTM D695-26 standartlarındaki (ISO, 2002; ASTM International, 2026) basınç gerilmesi ve deformasyon ilkeleri yöntem referansı olarak alınmış; numunelerin kauçuk–polimer kompozit ve standart dışı geometriye sahip olması nedeniyle hesaplamalarda gerçek numune boyutları esas alınmıştır.

Numuneler yükleme tablaları arasına merkezlenmiş ve tek eksenli basınç yükü altında test edilmiştir. Deney dosyalarında yük, zaman ve pozisyon/deplasman verileri kaydedilmiştir. Basınç gerilmesi gerçek başlangıç yükleme alanı üzerinden hesaplanmıştır. Deney düzeneği ve bilgisayar destekli veri toplama sistemi Şekil 3.17'de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{3.2}$$

Burada σ basınç gerilmesini (MPa), F uygulanan basınç yükünü (N) ve A_0 numunenin başlangıç yükleme alanını (mm^2) ifade etmektedir.



Şekil 3.17. Atatürk Üniversitesinde gerçekleştirilen σ–ε deneyinde kullanılan yükleme düzeneği ve veri toplama sistemi

3.5.3. Gerilme–Birim Şekil Değiştirme (σ–ε) Eğrileri

Gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri, 70 × 70 × 50 mm gerçek boyutlu numunelerin yük ve cihaz pozisyon/deplasman kayıtlarından oluşturulmuştur. Yük, 70 × 50 mm yüzeyden uygulandığı için başlangıç yükleme alanı A_0 = 3500 mm² ve yükleme doğrultusundaki başlangıç yüksekliği h_0 = 70 mm olarak alınmıştır. Böylece nominal gerilme σ = F/3500 ve görünür birim şekil değiştirme ε = Δh/70 bağıntılarıyla, F newton ve Δh milimetre biriminde kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrı bir numune ekstansometresi kullanılmadığından ε, numune deformasyonuna ek olarak cihaz esnekliği, temas/oturma ve kayma etkilerini içerebilir. Dolayısıyla ε, tepe sekant modülü ve eğri alanı aynı deney düzenindeki karşılaştırmalı görünür göstergelerdir; yerel gerinim veya standart Young modülü değildir. Gerilme, anlık kesit alanından değil başlangıç alanından hesaplanan nominal basınç gerilmesidir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'te ε boyutsuz görünür birim şekil değiştirmeyi, Δh cihazın kaydettiği yükleme yönü deplasmanını ve h_0 başlangıç numune yüksekliğini ifade etmektedir. Bu tezde "maksimum gerilme", kayıtlı yükleme aralığında ulaşılan en yüksek nominal gerilmedir. Tepe sonrası düşüşün gözlenmediği ve maksimumun kayıt sonuna denk geldiği eğriler için bu değer, doğrulanmış nihai kırılma dayanımı veya son deformasyon kapasitesi olarak yorumlanmamıştır.

Cihazın ilk veri işleme ayarında kullanılan 50 mm yükseklik yerine, fiziksel yükleme yönüne uygun 70 mm esas alınarak 13 eğrinin görünür birim şekil değiştirme ekseni yeniden hesaplanmıştır. Aynı kayıtlı gerilme–deplasman yolu için görünür birim şekil değiştirme ve yükleme işi yoğunluğu 50/70 oranında, tepe sekant modülü ise 70/50 oranında değişmiştir. Bu düzeltme, ana basınç ve eğilme sonuçlarının veya 3, 28 ve 90 günlük deney yaşı karşılaştırmasının yeniden tanımlanması değildir.

3.5.4. Tepe Sekant Modülü

Gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinin belirgin doğrusal olmayan karakter göstermesi ve başlangıçtaki çok küçük şekil değiştirme bölgesinde bütün numuneler için eşit yoğunlukta veri noktası bulunmaması nedeniyle klasik Young elastisite modülü bütün seriler için doğrudan karşılaştırmalı bir malzeme sabiti olarak raporlanmamıştır. Bunun yerine, aynı veri işleme yaklaşımı içinde göreli rijitlik eğilimini göstermek amacıyla orijin ile maksimum gerilme noktası arasındaki sekantın eğimi tepe sekant modülü olarak tanımlanmıştır.

$$E_{sec,p} = \frac{\sigma_{maks}}{\varepsilon_{tepe}} \tag{3.4}$$

Tepe sekant modülü, klasik Young modülünün yerine geçen bir malzeme sabiti olarak değil; aynı geometri, cihaz ve veri işleme yöntemiyle elde edilen numunelerin göreli rijitlik davranışını karşılaştıran bir gösterge olarak kullanılmıştır. Cihaz deplasmanına dayalı ε hesabı nedeniyle bu değerlerin mutlak elastisite modülü olarak yorumlanmaması özellikle esas alınmıştır.

3.5.5. Tokluk ve Enerji Yutma

Bu tezde "tokluk/enerji yutma" başlığı altında raporlanan U_t, nominal basınç gerilmesi ile cihaz deplasmanından türetilen görünür birim şekil değiştirme eğrisinin kayıt sonuna kadar altındaki alandır. Bu büyüklük, başlangıç hacmi başına karşılaştırmalı yükleme işi yoğunluğunu ifade eder. Boşaltma veya çevrimsel deney yapılmadığından geri kazanılabilir enerji ile kalıcı olarak sönümlenen enerji ayrılmamıştır. U_t; histerezis enerjisi, dinamik sönüm katsayısı veya kırılma mekaniğindeki KIC ile eşdeğer değildir. Cihaz ve temas etkileri ile farklı kayıt sonu deformasyonlarının sonuçları etkilediği dikkate alınmıştır. Sürekli tanım Denklem (3.5)'te, ayrık veriler için trapez hesabı Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$U_t = \int_0^{\varepsilon_{son}} \sigma(\varepsilon)\, d\varepsilon \tag{3.5}$$

$$U_t \approx \Sigma_i \left[(\sigma_i + \sigma_{i+1})/2\right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \tag{3.6}$$

Gerilme MPa ve birim şekil değiştirme boyutsuz olduğundan alanın birimi MPa olup MJ/m³ ile eşdeğerdir. Her eğri kendi kayıt sonuna kadar integre edilmiştir. Kayıt sonu deformasyonları aynı olmadığından alan sıralaması doğrudan bir malzeme sabiti sıralaması değildir; kayıt aralığıyla birlikte okunmuştur.

3.5.6. Eğilme Deneyi

Üç noktalı eğilme deneyleri 16×4×4 cm prizmatik numunelerde, dört bağlayıcı ve dört granül düzeninden oluşan malzeme tasarımı üzerinden değerlendirilmiştir. ISO 178:2019, üç noktalı yükleme yaklaşımı için yöntem referansı olarak alınmıştır (ISO, 2019). Bu tezdeki kesit boyutları standart numune geometrisiyle özdeş değildir. Üç noktalı yüklemede kullanılan nominal eğilme gerilmesi bağıntısı Denklem (3.7)'de verilmiştir. Mesnet açıklığı, yükleme hızı ve her sonuca ait ham maksimum yükler sayısal olarak raporlanmadığından, eğilme sonuçları uyarlanmış üç noktalı yükleme yöntemi kapsamında değerlendirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.18'de, eğilme deneyi için üretilen prizmatik numune örnekleri Şekil 3.19'da gösterilmiştir.

$$\sigma_f = \frac{3\,F_{maks}\,\ell}{2\,b\,h^2} \tag{3.7}$$

Burada σ_f nominal eğilme gerilmesi (MPa), F_{maks} maksimum yük (N), ℓ mesnet açıklığı (mm), b kesit genişliği (mm) ve h kesit yüksekliğidir (mm). Büyük sehim, kesme etkisi ve granül boyutu/kesit oranının bu nominal gerilme yorumunu sınırlandırdığı dikkate alınmıştır.



(a) Eğilme deney düzeneği (b) Numunenin yerleştirilmesi (c) Laboratuvar uygulaması

Şekil 3.18. Eğilme deney düzeneği ve numunenin yerleştirilmesinden görünümler



(a) Eğilme deneyi için üretilen prizmatik numune örnekleri (b) Eğilme deneyinde kullanılan prizmatik numunelerin genel görünümü

Şekil 3.19. Eğilme deneyi için üretilen prizmatik numune örnekleri

3.6. SEM–EDS ve Element Haritalama

SEM/EDS analizlerinin gerçekleştirildiği Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı ile kullanılan JEOL JSM-6510 taramalı elektron mikroskobuna ait özgün fotoğraflar Şekil 3.20'de verilmiştir.



(a) Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı



(b) JEOL JSM-6510 taramalı elektron mikroskobu

Şekil 3.20. SEM/EDS analizlerinin gerçekleştirildiği laboratuvar ve kullanılan SEM cihazı

Kompozitlerde granül–polimer ara yüzeyi, boşluklar, yüzey süreksizlikleri ve kırılma morfolojisini incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Analizler Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan JEOL JSM-6510 cihazında gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri 20 kV hızlandırma geriliminde, SEI modunda ve yüksek vakum altında alınmıştır. Bu yöntem mekanik davranışı doğrudan ölçmek için değil, basınç ve UPV sonuçlarını açıklayabilecek mikroyapısal göstergeleri belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

SEM incelemesi için her polimer matris serisinin 28 günlük basınç dayanımı en yüksek olan kombinasyonu öncelikli olarak seçilmiştir. Seçilen gruplar Epoksi–K1 (8,21 MPa), Poliüretan–K4 (6,29 MPa), Novolak–hekzamin–K2 (6,29 MPa) ve Polyester–K4 (1,35 MPa) olmuştur. Bu amaçlı seçim, 16 kombinasyonun tamamının rastgele veya eşit kapsamda görüntülendiği anlamına gelmemektedir. Tekil görüntü dışa aktarımlarının tümünde K kodu korunmadığından, seçim stratejisi ile her mikrografın cihaz düzeyindeki izlenebilirliği ayrı değerlendirilmiştir. EDS analiz bölgeleri de tüm SEM görüntüleriyle birebir eşlenmiş kabul edilmemiştir.

Elementel bileşimin destekleyici olarak değerlendirilmesi amacıyla EDS spektrumları ve element haritaları alınmıştır. EDS spektrumları 20 kV hızlandırma geriliminde, 35° take-off açısı ve 60 s canlı sayım süresinde; haritalama kayıtları 1443,8 s canlı sayım süresinde elde edilmiştir. SEM görüntülerindeki çalışma mesafeleri doğrudan cihaz kayıtlarından alınmıştır. EDS ve haritalama sonuçları seçilen mikro bölgelerdeki element dağılımını göstermek amacıyla

kullanılmıştır. SEM görüntülerinden aktarılan büyütme, çalışma mesafesi ve görüntüleme koşulları Tablo 3.11'de özetlenmiştir.

Tablo 3.11. SEM görüntüleme koşullarının cihaz kayıtlarına göre özeti

Bağlayıcı sistemi	Büyütme aralığı	Çalışma mesafesi (WD)	Hızlandırma gerilimi / görüntüleme
Poliüretan	×40–×10.000	18 mm	20 kV; SEI / yüksek vakum
Epoksi	×40–×10.000	21 mm	20 kV; SEI / yüksek vakum
Novolak–hekzamin	×40–×10.000	15 mm (haritalama 16 mm)	20 kV; SEI / yüksek vakum
Polyester	×30–×5.000	21 mm	20 kV; SEI / yüksek vakum

3.7. ATR-FTIR Spektroskopisi

Kauçuk ve polimer sistemlerdeki karakteristik fonksiyonel grupların ve bağ yapılarının karşılaştırılması amacıyla ATR-FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında PerkinElmer Spectrum 100 FTIR spektrometresi ve Universal ATR aksesuarı kullanılarak yapılmıştır. Merkezi Laboratuvar kayıtlarında kauçuk, epoksi sertleştiricisi, novolak–hekzamin, poliüretan ve polyester olarak adlandırılan beş örneğin spektrumları bulunmaktadır. Ham spektrumlar 4000–400 cm^{-1} aralığında, 4 cm^{-1} çözünürlük ayarında ve yüzde geçirgenlik (%T) çıktısı olarak kaydedilmiştir.

FTIR analizi morfolojiyi değil moleküler bağlara ait karakteristik soğurma bantlarını karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Ham spektrum verileri ortak eksen sisteminde düzenlenmiş ve karakteristik pik konumları ile göreli şiddet farklılıkları değerlendirilmiştir. FTIR bulguları mekanik ve SEM–EDS sonuçlarını destekleyici kimyasal karakterizasyon verisi olarak ele alınmıştır. Kullanılan ATR-FTIR cihazının özgün laboratuvar fotoğrafı Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. ATR-FTIR analizlerinde kullanılan PerkinElmer Spectrum 100 FT-IR spektrometresi

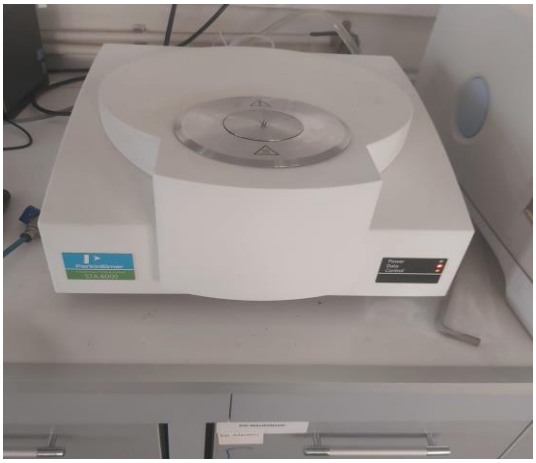
EDS ve ATR-FTIR için tezde raporlanan ölçüm koşulları Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12. EDS ve ATR-FTIR analizlerinde kullanılan kayıtlı ölçüm koşulları

Analiz	Cihaz / aksesuar	Temel ölçüm koşulu	Kayıt süresi / çıktı
EDS spektrumu	SEM ile birlikte EDS sistemi	20 kV; take-off açısı 35°	60 s canlı sayım
EDS element haritalama	SEM ile birlikte EDS sistemi	20 kV	1443,8 s canlı sayım
ATR-FTIR	PerkinElmer Spectrum 100 / Universal ATR	4000–400 cm^{-1}; 4 cm^{-1}	%T spektrumu

3.8. Termogravimetrik Analiz (TGA/DTG)

Bağlayıcı–kauçuk sistemlerinin sıcaklığa bağlı kütle kaybını karşılaştırmak amacıyla termogravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde PerkinElmer STA 6000 cihazı kullanılmış; yazılım/platform tanımı kayıtlarda STA 6000/8000 olarak yer almıştır. Epoksi, novolak–hekzamin ve poliüretanın sayısal kayıtları, 20,0 mL/dk azot akışı altında 30–800 °C sıcaklık programı ve 20 °C/dk ısıtma hızını doğrulamaktadır. Polyester grafiğinde azot ve 20,0 mL/dk gaz akışı bilgisi bulunmakla birlikte ısıtma hızı ve programın tamamı ayrıca doğrulanamamıştır. Değerlendirmede program sıcaklığı yerine kaydedilen numune sıcaklığı kullanılmıştır. Cihazın özgün laboratuvar fotoğrafı Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. TGA/DTG analizlerinde kullanılan PerkinElmer STA 6000 cihazı

TGA analizi mekanik deneylerdeki 4×4 matrisin tamamına uygulanmamıştır. Dosya adları epoksi+sertleştirici ve novolak+hekzamin örneklerinin ince granüllü temsilci numuneler olduğunu göstermektedir; poliüretan kaydının K1–K4 granül kodu belirtilmemiştir. Epoksi, novolak–hekzamin ve poliüretan için sayısal ham TXT kayıtları kullanılmıştır. Polyesterin ham sayısal kaydı bulunmadığından cihaz grafiğinin sıcaklık ve kütle eksenleri kalibre edilerek eğri sayısallaştırılmış;

bu sisteme ait sonuçlar yaklaşık (≈) olarak sunulmuştur. Grafik sayısallaştırması, ham sayısal kaydın ölçüm çözünürlüğünü sağlamamaktadır.

Her eğrinin ilk kaydedilen kütlesi m_0 kabul edilmiş; kalan kütle $R(T)=100\cdot m(T)/m_0$ ve kütle kaybı $K(T)=100-R(T)$ olarak hesaplanmıştır. Epoksi, novolak–hekzamin ve poliüretan için m_0 sırasıyla 10,2092; 10,5101 ve 12,3603 mg; polyester için yaklaşık 11,25 mg'dır. Ham dosya başlığındaki numune ağırlığı alanı ile eğri kütlesi uyuşmadığından normalizasyon doğrudan eğri verisine dayandırılmıştır. T_5 ve T_{10} yanında %10'luk aralıklarla %100'e kadar kütle kaybı eşikleri incelenmiş; her eşik için ilk geçişi çevreleyen iki nokta arasında doğrusal enterpolasyon uygulanmıştır. Deney aralığında görülmeyen eşikler "—" olarak belirtilmiş, kayıt dışına ekstrapolasyon yapılmamıştır.

DTG eğrileri bütün sistemlerde aynı işlemle elde edilmiştir: aynı sıcaklıktaki kayıtlar ortalanmış, normalize kütle 0,25 °C aralıklı ortak ızgaraya doğrusal enterpolasyonla aktarılmış ve 41 noktalı, üçüncü dereceden Savitzky–Golay işlemiyle $-dR/dT$ (%/°C) hesaplanmıştır. Filtre kenarları dışındaki en yüksek kayıp hızı DTG T_{max} olarak alınmış; bu sıcaklıktaki kalan kütle ile kayıt sonundaki kalıntı ayrı ayrı raporlanmıştır. T_{max}, türev işleme yöntemine bağlı bir tepe göstergesidir; T_5/T_{10} ise belirli kayıp eşikleridir ve teğet yöntemiyle belirlenen bozunma başlangıç sıcaklığıyla özdeş değildir.

TGA/DTG inert atmosferdeki kütle kaybını ölçtüğünden bir numunenin yük taşıma işlevini hangi sıcaklıkta kaybettiğini tek başına belirlemez. Camsı geçiş, yumuşama ve sıcaklığa bağlı rijitlik değişimi için DSC/DMA veya sıcaklık altında mekanik deneyler; yangın tepkisi için ilgili yangın deneyleri gerekir. Azot altında kalan kütle karbonlu ve inorganik bileşenleri birlikte içerebilir; bütünüyle kül, bozulmamış polimer veya korunmuş mukavemet olarak yorumlanmamıştır (Schott, 2026).

3.9. Isıl İletkenlik Ölçümleri

Isıl iletkenlik, bir malzemenin sıcaklık farkı etkisiyle ısıyı iletme özelliğidir. Bu özelliği nicel olarak tanımlayan ısıl iletkenlik katsayısı literatürde k veya λ ile gösterilir ve W/(m·K) biriminde ifade edilir. Metin ve tablolarda λ simgesi, performans grafiğinin yatay ekseninde ise aynı katsayıyı ifade eden k (=λ) gösterimi kullanılmıştır. Aynı kalınlık ve sıcaklık farkında, diğer koşullar da aynı olduğunda, daha düşük λ değeri daha düşük iletim ısı akısına ve daha yüksek katman ısıl direncine karşılık gelir (U.S. Department of Energy, 1992). Bu çalışmada ısıl iletkenlik ölçümleri, atık lastik–polimer kompozitlerinin ısı iletim davranışını karşılaştırmak ve ısı yalıtımı açısından değerlendirilmesine veri sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Isıl iletkenlik ölçümleri, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (TAUM), Thermtest HFM-100 ısıl parametreler ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın ısı akış ölçer (Heat Flow Meter, HFM) sistemi, ASTM C518, ISO 8301 ve EN 12667

standartlarında tanımlanan ölçüm yaklaşımına dayanmaktadır (Erciyes Üniversitesi TAUM, t.y.; Thermtest, t.y.). Ölçüm prensibi, numunenin sıcaklığı kontrol edilen iki paralel plaka arasına yerleştirilmesine ve kalınlık doğrultusundaki kararlı ısı akısının izlenmesine dayanmaktadır. Isıl iletkenlik, ısı akısı, plaka sıcaklık farkı ve numune kalınlığından Fourier yasası kullanılarak belirlenmektedir (Thermtest, t.y.).

Cihaz, elektrikli ısıtma-soğutma, otomatik numune kalınlığı ölçümü ve bilgisayar destekli kayıt sistemine sahiptir. TAUM cihaz tanıtımında tipik ısıl iletkenlik aralığı 0,005–0,5 W/(m·K), doğruluk %2 ve tekrarlanabilirlik ±%1'den düşük olarak bildirilmiştir. Ortalama sıcaklık çalışma aralığı −15 ile 65 °C, plaka sıcaklık aralığı −20 ile 70 °C, termokupl hassasiyeti 0,01 °C ve tipik ölçüm süresi 30–60 dakika olarak verilmiştir. Aynı tanıtımda en küçük numune boyutu 150×150×10 mm, en büyük numune boyutu ise 300×300×100 mm olarak belirtilmiştir (Erciyes Üniversitesi TAUM, t.y.). Bu değerler cihazın teknik özelliklerini tanımlamakta olup deney numunelerine özgü ölçüm belirsizliği veya gerçekleşen ölçüm süresi olarak kullanılmamıştır.

Ölçümler, Bölüm 3.3.8'de üretimi ve boyutları açıklanan dört K4 plakası üzerinde 20 °C ortalama numune sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu değer, analizde esas alınan ortalama sıcaklığı ifade etmekte olup tek bir plakanın sıcaklığı veya plakalar arasındaki sıcaklık farkı değildir. Isıl direnç hesaplarında 30 mm nominal kalıp yüksekliği yerine bu bölümde belirtilen rapor kalınlıkları esas alınmıştır. Değerlendirmede laboratuvar raporlarındaki üst ve alt plaka sıcaklıkları, zamana bağlı ısı akısı grafikleri ve nihai λ değerleri kullanılmıştır. Her bağlayıcı için tek K4 ölçüm raporu bulunmakta olup ısıl sonuçlar K1–K3 gruplarına genellenmemiştir.

Laboratuvar tarafından raporlanan λ değerleri, 20 °C ortalama numune sıcaklığındaki ölçüm sonuçları olarak değerlendirilmiş; sayısal değerlere ayrıca sıcaklık düzeltmesi uygulanmamıştır. Bağımsız tekrar ve numuneye özgü ölçüm belirsizliği bilgileri bulunmadığından dört K4 grubunun ısıl ve mekanik sonuçları betimleyici olarak karşılaştırılmıştır. Isıl plakaların ölçüm yaşı raporlarda açıkça belirtilmediğinden, mekanik deneylerle aynı yaşta oldukları varsayılmamıştır.

Malzeme karşılaştırmasında, sıcaklık gradyanı altında ısı iletimini karakterize eden λ esas alınmıştır. Raporlanan kalınlıktaki katmanın alan esaslı ısıl direnci, kararlı ve tek boyutlu ısı iletimi yaklaşımıyla $R_\lambda = d/\lambda$ bağıntısından hesaplanmıştır (U.S. Department of Energy, 1992). Kalınlık metre, direnç m²·K/W biriminde verilmiştir. Bu büyüklük yalnız kompozit katmana ait olup yüzey dirençlerini ve diğer yapı katmanlarını içermemiştir.

Numunelerin raporlanan kalınlıkları farklı olduğundan, geometrik kalınlık bakımından ortak karşılaştırma için $d_{ref} = 0{,}025$ m referans kalınlığı seçilmiş ve $R_{25} = d_{ref}/\lambda = 0{,}025/\lambda$ değerleri hesaplanmıştır. Bu hesapta raporlanan etkin λ değerlerinin aynı malzeme yapısı ve koşullarında geçerli kaldığı varsayılmıştır. Böylece yalnız karşılaştırma kalınlığı ortaklaştırılmış; üretimden ve heterojenlikten kaynaklanabilecek farklılıkların giderildiği ileri sürülmemiştir. Referans dirençler

yeni deneysel ölçüm olarak değerlendirilmemiş, λ üzerinden yapılan karşılaştırmayı destekleyen hesaplama sonuçları olarak sunulmuştur.

3.9.1. Basınç Dayanımı–Isıl İletkenlik Performans İndeksi

Basınç dayanımı ve ısıl iletkenliğin birlikte değerlendirilmesi için literatürde kullanılan dayanım/ısıl iletkenlik oranı yardımcı performans indeksi olarak tanımlanmış ve Denklem (3.8)'de verilmiştir (Nowak vd., 2023).

$$I = \frac{\sigma_c}{\lambda} \tag{3.8}$$

Burada σ_c basınç dayanımı (MPa), λ (=k) ısıl iletkenlik katsayısı [W/(m·K)] ve I boyutlu performans indeksidir (MPa·m·K/W). Sabit λ değerinde dayanımın artması, sabit dayanımda ise λ değerinin azalması indeksi yükseltmektedir. Yüksek bir indeks, seçilen oran bakımından avantajı göstermekte; hedef uygulamanın asgari dayanım ve katman ısıl direnci koşullarını tek başına doğrulamamaktadır.

İndeks hesabında K4 plakalarının ısıl iletkenlik değerleri, aynı bağlayıcı ve K4 karışımına ait ayrı mekanik numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarıyla formülasyon düzeyinde eşleştirilmiştir. Tablo 4.3 ve Tablo 4.13'ten alınan dört veri çifti kullanılmıştır. İndeks, raporlanan dayanım ve ısıl iletkenliğin birlikte karşılaştırılmasına hizmet eden boyutlu bir göstergedir; korelasyon katsayısı veya standart ürün uygunluk ölçütü olarak kullanılmamıştır. Yatay ekseni k (=λ), düşey ekseni σ_c olan dağılım grafiğinde sabit indeks düzeyleri $\sigma_c = I \cdot k$ bağıntısıyla gösterilmiştir. Sonuçlar Bölüm 4.14.1'de sunulmuştur.

3.10. Verilerin İşlenmesi ve Karşılaştırmalı Değerlendirme

Deney verileri bağlayıcı türü ve granül dağılımı temelinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Nihai mekanik değerlendirmelerde granül kütlesine göre %20 ana reçine/bağlayıcı oranı ve 28 günlük deney yaşı esas alınmıştır. UPV, basınç ve eğilme mukavemeti, σ–ε davranışı, tepe sekant modülü ve enerji yutma göstergeleri; SEM/EDS, element haritalama ve ATR-FTIR bulgularıyla birlikte yorumlanmıştır. TGA/DTG sonuçları seçilmiş temsilci numunelerden, ısıl iletkenlik sonuçları ise dört K4 plakasından elde edilen ayrı veri grupları olarak değerlendirilmiştir. Farklı deneyler aynı fiziksel özelliği ölçmediğinden sonuçlar birbirinin doğrudan eşdeğeri veya nedensel kanıtı olarak kabul edilmemiştir.

Friedman testi, aynı birimlerin veya eşleştirilmiş blokların üç ya da daha fazla koşuldaki sonuçlarını karşılaştırmak için kullanılan, sıralamalara dayalı parametrik olmayan bir yöntemdir. Normal dağılım varsayımına dayanmadan, koşullar arasında sistematik bir farklılık bulunup bulunmadığını değerlendirir. Ölçümler sıralanabilir olduğunda, her blokta aynı koşullar yer

aldığında ve bloklar birbirinden bağımsız olduğunda kullanılır. Bu yönüyle, tekrarlı ölçüm veya eşleştirilmiş deney düzenlerinde parametrik varsayımlara dayanmayan bir karşılaştırma seçeneğidir (Friedman, 1937).

Bu çalışmada test, 3, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarındaki yaş etkisini incelemek için uygulanmıştır. Eşleştirme aynı fiziksel numuneyi değil, aynı bağlayıcı–granül formülasyonunu ifade etmektedir; farklı yaşlarda farklı basınç numuneleri test edilmiştir. Tablo 4.2'deki 16 formülasyon blok, üç deney yaşı ise karşılaştırılan koşul olarak alınmış; her formülasyonun üç yaşa ait raporlanan değeri kendi içinde sıralanmıştır. Dolayısıyla analizdeki n = 16, üretilen 144 basınç numunesini değil, karşılaştırmaya alınan formülasyon sayısını göstermektedir. Ham numune tekrarlarının tamamı yerine Tablo 4.2'deki formülasyon düzeyi değerler kullanıldığından, test bu veri kapsamıyla yorumlanmıştır.

Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0{,}05$ olarak belirlenmiştir. Sıfır hipotezi, deney yaşları arasında sistematik bir fark bulunmadığı yönündedir; $p < 0{,}05$ olması hâlinde en az bir yaşın farklı olduğu değerlendirilir. Anlamlı sonuç alınırsa farklılaşan yaşlar uygun çoklu karşılaştırmalarla incelenebilir. Bu tezde $p = 0{,}983 > 0{,}05$ bulunduğundan anlamlı bir yaş farkı saptanmamıştır. Bu sonuç, yaşların kesin olarak eşdeğer olduğunu veya kimyasal kürün tamamlandığını kanıtlamaz; 28 günün ortak karşılaştırma yaşı olarak kullanılmasını destekleyen istatistiksel bir değerlendirmedir.

FTIR spektrumları ortak eksende düzenlenerek başlangıç malzemelerinin karakteristik bantları karşılaştırılmıştır. K4 granül dağılımı, üretimde kullanılan dört fraksiyonun eşit kütle paylarıyla gösterilmiş; laboratuvar elek analizi veya kümülatif yüzde-geçen sonucu olarak sunulmamıştır.

UPV–basınç, UPV–eğilme ve basınç–eğilme ilişkileri Tablo 4.3'teki eşlenik 28 günlük değerlerden Pearson korelasyon katsayısı ile incelenmiştir. Bağlayıcı başına dört farklı granül düzeni ve bütün matris için 16 veri çifti kullanılmıştır. Bağlayıcılar arasındaki ortalama düzey farkının toplu korelasyona etkisini incelemek amacıyla her değişkenden kendi bağlayıcı grubunun ortalaması çıkarılmış ve merkezlenmiş 16 çift için korelasyon yeniden hesaplanmıştır. Bu işlem bir nedensellik testi veya bağımsız tekrar analizi olarak yorumlanmamıştır. Isıl iletkenlik için dört K4 veri çifti performans indeksi karşılaştırmasında kullanılmış; her bağlayıcının K4'e ait λ değeri K1–K3 düzenlerine çoğaltılarak korelasyon üretilmemiştir.

Mekanik ve ultrasonik deneylerde başvurulan yöntem standartları ile bunların bu çalışmadaki sınırlı kullanım biçimi Tablo 3.13'te açıklanmıştır.

Tablo 3.13. Mekanik deneylerde kullanılan yöntem referansları ve uygulanan temel koşullar

Deney	Yöntem referansı	Tezde kullanım biçimi	Uygulanan temel koşul
UPV	EN 12504-4:2021; ASTM C597-22	Doğrudan geçiş ve V = L/t ilkeleri polimer–kauçuk kompozite uyarlanmıştır; tam beton standardı uygunluğu iddia edilmemiştir.	Doğrudan geçiş; kuplaj jeli; gerçek geçiş uzunluğu; V=L/t
Basınç	EN 12390-3:2019; TS EN 12390-4:2019; ISO 604:2002; ASTM D695-26	Merkezleme, kesintisiz yükleme, maksimum yük/gerçek alan ve pres yeterliliği ilkeleri uyarlanmıştır.	Ön basınç: 10×10×10 cm kalıptan elde edilen 9,9×9,9×8 cm gerçek numune; σ–ε: 7×7×5 cm gerçek numune; tek eksenli yükleme; $\sigma=F/A_0$
Eğilme	ISO 178:2019	Üç noktalı eğilme yöntemi referans alınmıştır; farklı numune geometrisi nedeniyle uyarlanmış yöntem olarak raporlanmıştır.	Üç noktalı eğilme; 16×4×4 cm prizmatik numuneler

3.10.1. Mekanik–Mikroyapısal Entegrasyon Yaklaşımı

Mikroyapı analizleri mekanik deneylerden bağımsız bir görüntüleme çalışması olarak değil, bağlayıcı türüne bağlı mukavemet ve deformasyon davranışını açıklayan tamamlayıcı veri grubu olarak değerlendirilmiştir. Her bağlayıcı sistemi için basınç ve eğilme mukavemeti, σ–ε eğrisi, tepe sekant modülü ve enerji yutma davranışı; aynı sisteme ait SEM morfolojisi, EDS/element haritalama ve ATR-FTIR bulgularıyla birlikte ele alınmıştır.

SEM numune seçimi her bağlayıcının basınç dayanımı en yüksek kombinasyonuna yöneltilmiştir; seçim hedefleri Bölüm 3.6'da verilmiştir. Bununla birlikte SEM/EDS kayıtlarının bütün tekil görüntü ve analiz bölgelerinde K1–K4 etiketleri korunmadığından, mikrograflar ve EDS sonuçları üzerinden K koduna özgü nicel bir nedensellik kurulmamıştır. ATR-FTIR, seçilmiş başlangıç malzemelerinin kimyasal parmak izini sağlamıştır. TGA ve ısıl iletkenlik örnek eşleştirmeleri ise sırasıyla Bölüm 3.8 ve 3.9'da tanımlanan veri kapsamıyla sınırlandırılmıştır.

SEM görüntülerinin karşılaştırılmasında granül dağılımı ve homojenlik, polimer matrisin kauçuk granülü sarma durumu, granül–matris ara yüzeyindeki boşluk veya ayrılmalar, gözenek ve mikroçatlaklar, granül sıyrılması izleri ile kırılma yüzeyi morfolojisi temel inceleme ölçütleri olarak kullanılmıştır. Düşük büyütmeli görüntüler genel morfoloji ve boşluk dağılımı, orta büyütmeli görüntüler granülün matris içerisindeki yerleşimi, yüksek büyütmeli görüntüler ise ara yüzey sürekliliği ve mikro-kusurlar açısından değerlendirilmiştir.

EDS spektrumları ve element haritaları SEM görüntülerindeki morfolojik bölgelerin elementel bileşimini desteklemek amacıyla kullanılmış, bu sonuçlardan doğrudan kimyasal bağ kuvveti veya mekanik aderans değeri türetilmemiştir. ATR-FTIR spektrumları bağlayıcı

sistemlerinin karakteristik fonksiyonel gruplarını ve bant farklılıklarını ortaya koyan kimyasal yapı verisi olarak değerlendirilmiş, tek başına dayanım veya aderans ölçütü olarak yorumlanmamıştır.

Ana tasarımdaki 16 sayısı farklı formülasyonları, Bölüm 3.2.6'da açıklanan 208 sayısı ise ana programda üretilen fiziksel numuneleri göstermektedir. Basınç deneyleri için her yaşta 48 numune kullanılmış olmakla birlikte, tekrarların ham sonuçları bu tezde aynı ayrıntıyla sunulmadığından formülasyonlar için yeni bir standart sapma veya güven aralığı hesaplanmamıştır. Yaş karşılaştırması Tablo 4.2'deki 16 eşleştirilmiş formülasyona; korelasyonlar 16 formülasyonun raporlanan değerlerine; σ–ε değerlendirmesi 13 eğriye dayandırılmıştır. TGA/DTG için dört temsilci profil, ısıl iletkenlik için üretilen 16 plaka içinden raporlanan dört K4 ölçümü ayrı veri kapsamları olarak ele alınmıştır.

Mevcut deney kayıtlarında bütün testler için yükleme hızı, eğilme mesnet açıklığı, UPV cihaz modeli/transdüser frekansı ve ölçüm tekrar sayısı gibi cihaz ve kurulum bilgileri aynı ayrıntı düzeyinde bulunmadığından yalnız doğrulanabilen koşullar raporlanmıştır. Bu nedenle Tablo 3.13'te verilen standartların ölçüm, yükleme ve hesaplama ilkeleri, tam uygunluk iddiası kurulmadan yöntem referansı olarak esas alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Bölüm 3'te tanımlanan deneysel program kapsamında üretilen atık araç lastiği granülü-polimer kompozitlerinden elde edilen mekanik, ultrasonik, gerilme–birim şekil değiştirme, mikroyapısal, kimyasal ve termal bulgular bütünleşik olarak değerlendirilmiştir. Nihai mekanik karşılaştırmaların ana eksenini dört bağlayıcı sistemi (poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve doymamış polyester) ile dört granül düzeninin [K1: ince, K2: orta, K3: ince+orta ve K4: dört fraksiyonlu karışım] oluşturduğu 4×4 deney matrisi meydana getirmiştir. Ana sonuçların yorumunda granül kütlesine göre %20 ana reçine/bağlayıcı içeren ve 28 günlük referans deney yaşındaki numuneler esas alınmıştır. TGA/DTG için seçilmiş temsilci numuneler, ısıl iletkenlik için ise dört K4 plakası Bölüm 3'te açıklanan ayrı veri kapsamları olarak değerlendirilmiştir.

Ana reçine/bağlayıcı oranının etkisini göstermek amacıyla üretim sürecinde elde edilen %15 ve %20 serileri yardımcı karşılaştırma olarak kullanılmıştır. Bu oranlar granül kütlesine göre ana reçine/bağlayıcı miktarını ifade etmekte; sertleştirici, hekzamin, MEKP ve kobalt gibi yardımcı bileşenler sistem reçetesine göre ayrıca eklenmektedir. Yardımcı %15-%20 karşılaştırması, nihai 28 günlük %20 deney matrisinin yerine geçirilmemiş; yalnız ana reçine/bağlayıcı miktarının aynı granül düzenindeki basınç mukavemetine etkisini açıklamak için kullanılmıştır. Polyester sistemi nihai programda yalnız %20 düzeyinde bulunduğundan %15-%20 karşılaştırmasına dahil edilmemiştir.

Bulgular önce basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti ve UPV bakımından ayrı ayrı incelenmiş; daha sonra granülometri-bağlayıcı etkileşimi, UPV–basınç–eğilme ilişkileri, σ–ε davranışı, enerji yutma/tokluk ve tepe sekant modülü üzerinden bütünleştirilmiştir. Mekanik sonuçlar SEM morfolojisi, EDS/element haritalama, ATR-FTIR, TGA/DTG ve ısıl iletkenlik bulgularıyla ilişkilendirilmiştir. Farklı deney yöntemlerinin aynı fiziksel özelliği ölçmediği dikkate alınmış; korelasyonlar nedensellik kanıtı olarak sunulmamış, mikroyapı görüntülerinden doğrudan aderans kuvveti ve TGA'dan doğrudan yangın dayanımı sonucu çıkarılmamıştır.

4.1. Basınç Mukavemeti Bulguları

Basınç mukavemeti sonuçları bağlayıcı türü ve granül düzeninin kompozit davranışı üzerinde birlikte etkili olduğunu göstermiştir. Ön serilerde %15 ve %20 bağlayıcı oranları arasında yapılan karşılaştırma Tablo 4.1'de verilmiştir. Nihai değerlendirmede esas alınan %20 ve 28 günlük değerler aynı tabloda ayrıca görünür tutulmuştur. %15 serisinin her ölçümüne ait deney yaşı ve bağımsız tekrar bilgisi aynı kapsamda sunulmadığından bu yardımcı karşılaştırma kontrollü tek değişkenli nedensellik kanıtı olarak kullanılmamıştır.

Tablo 4.1. Bağlayıcı türü, granül düzeni ve ana reçine/bağlayıcı oranına göre basınç mukavemeti sonuçları

Bağlayıcı	Granül düzeni	%15 (MPa)	%20 (MPa)	%15→%20 değişim (%)
Poliüretan	İnce	3,00	5,00	66,7
Poliüretan	Orta	3,10	3,80	22,6
Poliüretan	İnce + orta	1,56	2,79	78,8
Poliüretan	Dörtlü karışım	4,50	6,29	39,8
Epoksi	İnce	5,60	8,21	46,6
Epoksi	Orta	4,50	7,00	55,6
Epoksi	İnce + orta	2,90	5,55	91,4
Epoksi	Dörtlü karışım	2,20	3,54	60,9
Novolak–hekzamin	İnce	2,51	2,61	4,0
Novolak–hekzamin	Orta	6,01	6,29	4,7
Novolak–hekzamin	İnce + orta	3,98	4,63	16,3
Novolak–hekzamin	Dörtlü karışım	2,58	2,91	12,8
Polyester	İnce	–	1,22	–
Polyester	Orta	–	1,28	–
Polyester	İnce + orta	–	1,33	–
Polyester	Dörtlü karışım	–	1,35	–

Not: Ana karşılaştırmalı yorumlar granül kütlesine göre %20 ana reçine/bağlayıcı oranlı ve 28 günlük numuneler üzerinden yapılmıştır. Yardımcı kürleyici/sertleştirici bileşenler bu yüzdeye dahil edilmemiştir. Polyester serisi yalnız %20 oranında değerlendirilmiştir.

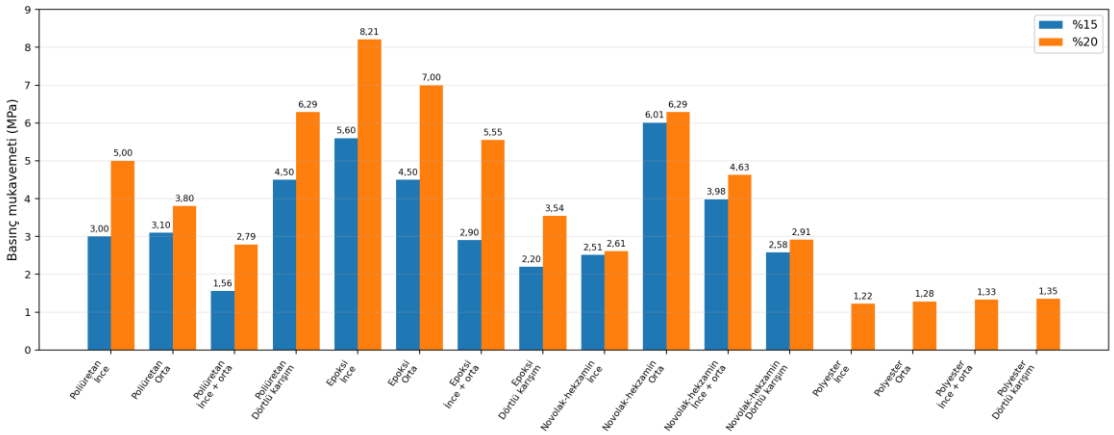
Poliüretan sisteminde %20 bağlayıcı oranında en yüksek basınç mukavemeti 6,29 MPa ile K4 dörtlü karışımda elde edilmiştir. K1, K2 ve K3 gruplarında sırasıyla 5,00, 3,80 ve 2,79 MPa ölçülmüştür. %15'ten %20'ye geçiş bütün granül düzenlerinde artış oluşturmuş; artış oranı K1'de %66,7, K2'de %22,6, K3'te %78,8 ve K4'te %39,8 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, poliüretanda bağlayıcı miktarının artmasının basınç mukavemetini desteklediğini, ancak artışın büyüklüğünün granül düzenine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.

Epoksi sisteminde en yüksek nihai basınç mukavemeti 8,21 MPa ile K1 ince granül grubunda belirlenmiştir. K2, K3 ve K4 gruplarında sırasıyla 7,00, 5,55 ve 3,54 MPa değerleri elde edilmiştir. %15'ten %20'ye geçişte bütün epoksi gruplarında artış görülmüş; en yüksek oransal artış K3 grubunda %91,4 olmuştur. Bununla birlikte %20 serisi içindeki K1>K2>K3>K4 sıralaması, bağlayıcı miktarının tek başına belirleyici olmadığını ve granül paketlenmesi ile ara yüzey sayısının epoksi matriste önemli rol oynadığını göstermiştir.

Novolak–hekzamin sisteminde %20 serisinin en yüksek basınç mukavemeti 6,29 MPa ile K2 orta granül grubunda ölçülmüştür. K1, K3 ve K4 gruplarında sırasıyla 2,61, 4,63 ve 2,91 MPa elde edilmiştir. K3 grubundaki %15 değeri 3,98 MPa iken %20 değeri 4,63 MPa'ya yükselmiş ve artış

%16,3 olarak belirlenmiştir. Bu sistemde bağlayıcı oranına duyarlılık epoksi ve poliüretana göre daha sınırlı kalmış, granül düzeninin etkisi daha belirgin hâle gelmiştir.

Polyester sisteminde %20 bağlayıcı oranında basınç mukavemeti K1'den K4'e doğru 1,22; 1,28; 1,33 ve 1,35 MPa olarak belirlenmiştir. Değerlerin dar bir aralıkta kalması, mevcut polyester formülasyonunda granülometri değişiminin basınç mukavemetine etkisinin diğer üç bağlayıcı sistemine göre daha sınırlı olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.1. Bağlayıcı türü ve granül düzenine göre %15 ve %20 basınç mukavemeti sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.1'deki yardımcı %15–%20 karşılaştırmasında, poliüretan ve epoksi sistemlerindeki dayanım artışı novolak–hekzamindekine göre daha belirgindir. Artışın büyüklüğü granül düzenine göre değişmiştir. Polyester yalnız %20 oranında incelendiğinden bu bağlayıcı için %15 sütunları verilmemiştir.

%15 ve %20 ana reçine/bağlayıcı oranları birlikte değerlendirildiğinde, bağlayıcı miktarındaki artışın mekanik davranışı tek başına açıklamadığı görülmüştür. Bağlayıcının artması granül yüzeylerinin daha etkin kaplanmasına, granüller arasında daha sürekli bir matris oluşmasına ve yük aktarım alanının genişlemesine katkı sağlayabilmektedir; ancak bu etkinin büyüklüğü granül boyutu, özgül yüzey alanı, paketlenme, boşluk yapısı ve matris–kauçuk ara yüzeyinin niteliğine bağlıdır. Termoset–atık lastik sistemlerine ilişkin derlemelerde de parçacık boyutu, kauçuk oranı, matris türü ve ara yüzey uyumunun mekanik performansı birlikte kontrol ettiği vurgulanmaktadır (Ramarad vd., 2015; Hejna vd., 2020). Bu nedenle %15'ten %20'ye geçişte gözlenen farklı artış oranları, yalnız daha fazla polimer kullanılmasının değil, her bağlayıcının ilgili granül düzeniyle oluşturduğu farklı iç yapının sonucu olarak yorumlanmıştır.

Epoksi sisteminde K1 ince granül grubunun %20 bağlayıcı oranında 8,21 MPa ile en yüksek basınç mukavemetine ulaşması, ince granüllerin yüksek özgül yüzey alanı ile epoksi matrisi

arasında daha geniş bir temas alanı oluşturabilmesiyle uyumludur. Bununla birlikte ince granül kullanımında toplam yüzey alanının artması bağlayıcı gereksinimini de yükseltmektedir. Bu nedenle K1 sonucunun yalnız 'ince tane etkisi' olarak değil, mevcut %20 epoksi reçetesi altında granül yüzeylerinin yeterli ölçüde ıslanması ve granüller arası matris sürekliliğinin korunmasıyla birlikte değerlendirilmesi daha uygundur. Epoksi–GTR çalışmalarında ara yüzey bütünlüğü, çatlak saptırma ve granül–matris etkileşiminin mekanik davranış üzerinde belirleyici olabildiği gösterilmiştir (Kaynak vd., 2001; Kaynak vd., 2003; Aoudia vd., 2017). Buna karşılık K4 grubunda basınç mukavemetinin 3,54 MPa'ya düşmesi, geniş tane dağılımının epoksi gibi görece rijit bir matriste her durumda avantaj sağlamadığını ve iri taneler/çoklu ara yüzeyler çevresinde yerel gerilme yığılmalarının etkili olabileceğini düşündürmüştür.

Poliüretan sisteminde K4 dörtlü granül düzeninin 6,29 MPa ile en yüksek basınç mukavemetini vermesi, epoksi sisteminden farklı bir granülometri–matris etkileşimine işaret etmektedir. Dört fraksiyonlu karışımda küçük tanelerin iri granüller arasındaki boşlukların bir bölümünü doldurması paketlenmeye katkı sağlayabilirken, daha esnek poliüretan matris farklı boyuttaki granüller arasındaki geometrik uyumsuzlukları daha iyi tolere edebilmiştir. PU–atık lastik çalışmalarında granülometri, gözenek yapısı, matris sürekliliği ve deformasyon kapasitesinin birlikte mekanik davranışı etkilediği bildirilmiştir (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2021; Jiang vd., 2022). Bu nedenle PU–K4 sonucu 'geniş granülometri her durumda daha iyidir' biçiminde genellenmemiş, kullanılan poliüretan bağlayıcı ve mevcut üretim koşullarına özgü bir optimum olarak değerlendirilmiştir.

Novolak–hekzamin sisteminde K2 orta granül grubunun 6,29 MPa ile öne çıkması, çok ince tanelerde artan toplam yüzey alanının bağlayıcı gereksinimi ile çok geniş granül dağılımında oluşabilecek yerel süreksizlikler arasında orta tane boyutunun daha dengeli bir yapı oluşturmuş olabileceğini düşündürmektedir. Fenolik reçine–kauçuk sistemlerinde reçine miktarı, kür bileşenleri ve çapraz bağlanma durumunun mekanik ve morfolojik özellikleri önemli ölçüde değiştirebildiği bildirilmiştir (Derakhshandeh vd., 2008). K2 sonucu, kullanılan reçete ve etüvde 160 °C'de 24 saatlik termal kür koşullarında incelenen granül düzenleri arasındaki en yüksek mekanik değer olarak değerlendirilmiştir.

Polyester serisinde K1–K4 arasında basınç mukavemetinin 1,22–1,35 MPa gibi dar bir aralıkta kalması, mevcut formülasyonda granülometri etkisinin matris–granül ara yüzeyi ve boşluk yapısına kıyasla ikincil kaldığını düşündürmüştür. Polyester–atık lastik kompozitlerinde kauçuk miktarı ve parçacık boyutunun dayanım ve modülü etkileyebildiği, işlenmemiş kauçuk yüzeyinde zayıf ara yüzey bağlanmasının mekanik performansı sınırlayabildiği raporlanmıştır (Abu-Jdayil vd., 2016b; Akın ve Polat, 2022; Yıldızhan vd., 2022). Bu değerlendirme, tezde daha sonra sunulan SEM görüntülerinde polyester sisteminde gözlenen heterojen ve açık boşluklu bölgelerle aynı

yöndedir; ancak SEM'in lokal bir gözlem olması nedeniyle bu uyum nedensellik kanıtı olarak değil, mekanik bulguyu destekleyen mikroyapısal bir gösterge olarak ele alınmıştır.

Basınç deneyi sonrasında kaydedilen örnek numune görünümü Şekil 4.2'de sunulmuştur. Numune yüzeyinde makroskopik çatlaklar ve bölgesel parça ayrılmaları gözlenmiştir. Görsel, yükleme sonrasındaki hasar durumunu nitel olarak örneklemektedir.



Şekil 4.2. Basınç deneyi sonrasında örnek kompozit numunede gözlenen makroskopik hasar görünümü

4.1.1. Deney Yaşları ve 28 Günlük Referansın Seçilmesi

İstatistiksel değerlendirmede 16 eşleştirilmiş kombinasyona ait üç deney yaşı karşılaştırılmıştır. Friedman testi sonucunda deney yaşları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır (χ^2 = 0,033; p = 0,983). Bu bulgu, deney yaşlarının eşdeğerliğini kanıtlamamakta; mevcut verilerde istatistiksel olarak belirlenebilir bir yaş farkı görülmediğini göstermektedir.

Basınç deneyleri, 3, 28 ve 90 günlük yaşların her biri için ayrı üretilen 48 numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üç yaş için toplam 144 basınç numunesi kullanılmış; Tablo 4.2'de her formülasyonun ilgili yaşta raporlanan dayanımı sunulmuştur. Friedman karşılaştırması, Bölüm 3.10'da açıklanan formülasyon düzeyindeki eşleştirme esasına dayandırılmıştır.

Tablo 4.2. 3, 28 ve 90 günlük basınç mukavemetleri

Sistem	Granül düzeni	3 gün Ölçülen (MPa)	28 gün Referans (MPa)	90 gün Ölçülen (MPa)
Poliüretan	K1 – İnce	4,99	5,00	5,03
	K2 – Orta	3,82	3,80	3,79
	K3 – İnce + orta	2,77	2,79	2,78
	K4 – Dörtlü karışım	6,30	6,29	6,34
Epoksi	K1 – İnce	8,18	8,21	8,27
	K2 – Orta	7,04	7,00	6,97
	K3 – İnce + orta	5,54	5,55	5,51
	K4 – Dörtlü karışım	3,57	3,54	3,55
Novolak–hekzamin	K1 – İnce	2,60	2,61	2,62
	K2 – Orta	6,31	6,29	6,25
	K3 – İnce + orta	4,59	4,63	4,61
	K4 – Dörtlü karışım	2,92	2,91	2,94
Polyester	K1 – İnce	1,22	1,22	1,23
	K2 – Orta	1,29	1,28	1,28
	K3 – İnce + orta	1,32	1,33	1,32
	K4 – Dörtlü karışım	1,36	1,35	1,35

İstatistiksel değerlendirme	
Deney yaşı / analiz	**Sonuç**
3 gün ortalaması	3,9888 MPa
28 gün ortalaması (referans)	3,9875 MPa
90 gün ortalaması	3,9900 MPa
Friedman testi (n = 16 eşleştirilmiş kombinasyon)	$\chi^2 = 0{,}033$; $p = 0{,}983$

Bu bulgular doğrultusunda 28 günlük deney yaşı, bağlayıcı–granül kombinasyonlarının ortak koşullarda karşılaştırılması için referans alınmıştır. Bu seçim, 28 günlük dayanımın diğer yaşlardan üstün olduğunu veya polimerlerin 28 gün kürlenmesi gerektiğini göstermemektedir. Basınç, eğilme ve gerilme–birim şekil değiştirme (σ–ε) deneyleri 28 günlük numuneler üzerinden değerlendirilmiş; σ–ε eğrilerinden türetilen görünür tepe sekant modülü ve yükleme işi yoğunluğu da aynı referans çerçevesinde yorumlanmıştır. İstatistiksel yaş karşılaştırması yalnız basınç mukavemetine ilişkindir.

4.2. Nihai %20 ve 28 Günlük Deney Matrisinin Genel Değerlendirilmesi

Nihai değerlendirmede dört bağlayıcı ve dört granül düzeninden oluşan 16 ana kombinasyon aynı ana reçine/bağlayıcı oranı (%20) ve aynı deney yaşı (28 gün) altında karşılaştırılmıştır. Bu eşitlik, yardımcı sertleştirici/kürleyiciler nedeniyle toplam bağlayıcı sistemi kütlesinin dört reçetede eşit olduğu anlamına gelmemektedir. Bu yaklaşım, bağlayıcı formülasyonu ile granül düzenini ortak bir değerlendirme çerçevesinde incelemeyi sağlamıştır. Basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti ve UPV sonuçları Tablo 4.3'te birlikte sunulmuştur.

Tablo 4.3. %20 bağlayıcı oranlı ve 28 günlük ana deney matrisinin mekanik ve UPV sonuçları

Bağlayıcı	Granül düzeni	Basınç mukavemeti (MPa)	Eğilme mukavemeti (MPa)	UPV (m/s)
Poliüretan	İnce	5,000	1,330	550
Poliüretan	Orta	3,800	1,218	560
Poliüretan	İnce + orta	2,790	0,660	844
Poliüretan	Dörtlü karışım	6,290	1,940	1153
Epoksi	İnce	8,210	2,210	1044
Epoksi	Orta	7,000	1,820	980
Epoksi	İnce + orta	5,550	1,220	1586
Epoksi	Dörtlü karışım	3,540	0,840	2012
Novolak–hekzamin	İnce	2,610	0,540	612
Novolak–hekzamin	Orta	6,290	1,380	1337
Novolak–hekzamin	İnce + orta	4,630	0,690	1418
Novolak–hekzamin	Dörtlü karışım	2,910	0,582	852
Polyester	İnce	1,220	0,240	188
Polyester	Orta	1,280	0,200	192
Polyester	İnce + orta	1,330	0,230	206
Polyester	Dörtlü karışım	1,350	0,220	260

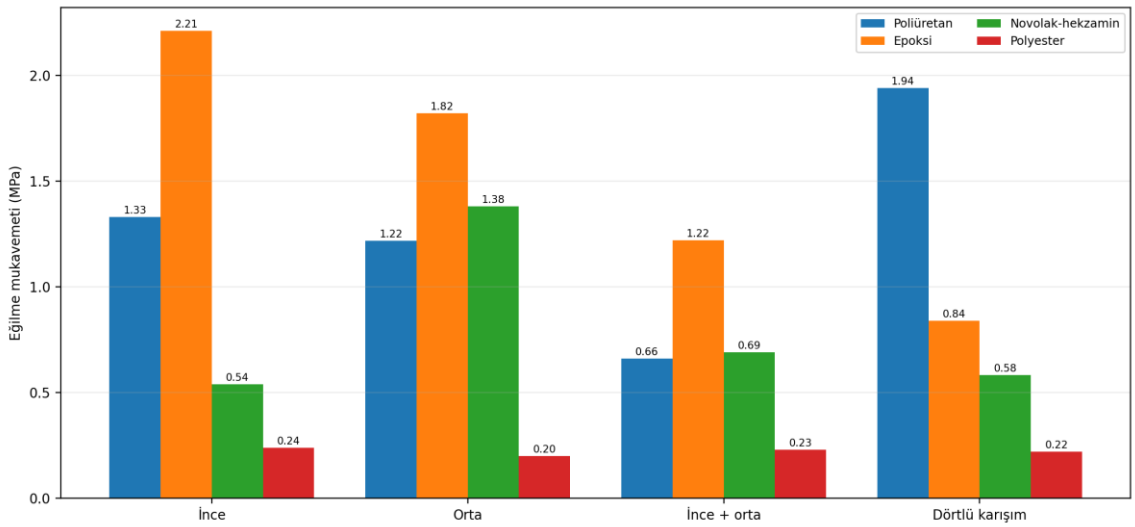
Not: Bu tablo ana deney sonuçlarını, Tablo 4.8 ise σ–ε kayıtlarından aktarılan parametreleri göstermektedir.

Nihai 4×4 matris birlikte değerlendirildiğinde bağlayıcı türünün granülometri etkisini yönlendirdiği açıkça görülmektedir. Aynı %20 ana bağlayıcı düzeyinde epoksi K1, poliüretan K4 ve novolak–hekzamin K2 gruplarının öne çıkması, tek bir tane boyutu dağılımının bütün polimerler için ortak optimum olmadığını göstermektedir. Bu bulgu, atık lastik-polimer kompozitlerinde parçacık boyutunun etkisinin matris viskozitesi, ıslatma kabiliyeti, rijitlik, kür mekanizması ve ara yüzey uyumu ile birlikte değiştiğini bildiren literatürle uyumludur (Ramarad vd., 2015; Hejna vd., 2020; Revelo vd., 2021). Dolayısıyla tez sonuçlarının temel mesajı yalnız en yüksek basınç değerini

veren karışımı seçmek değil, bağlayıcı–granül etkileşiminin her sistem için ayrı bir performans profili oluşturduğunu ortaya koymaktır.

4.3. Eğilme Mukavemeti Bulguları

Eğilme mukavemeti sonuçları basınç mukavemetiyle genel olarak benzer, ancak granül düzenine özgü farklılıklar içeren bir eğilim göstermiştir. Epoksi sisteminde en yüksek eğilme mukavemeti 2,21 MPa ile K1 ince granül grubunda; poliüretanda 1,94 MPa ile K4 dörtlü karışımda; novolak–hekzaminde 1,38 MPa ile K2 orta granül grubunda ve polyesterde 0,24 MPa ile K1 ince granül grubunda elde edilmiştir. Granül düzenlerine ait karşılaştırma Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Bağlayıcı türü ve granül düzenine göre eğilme mukavemeti sonuçları

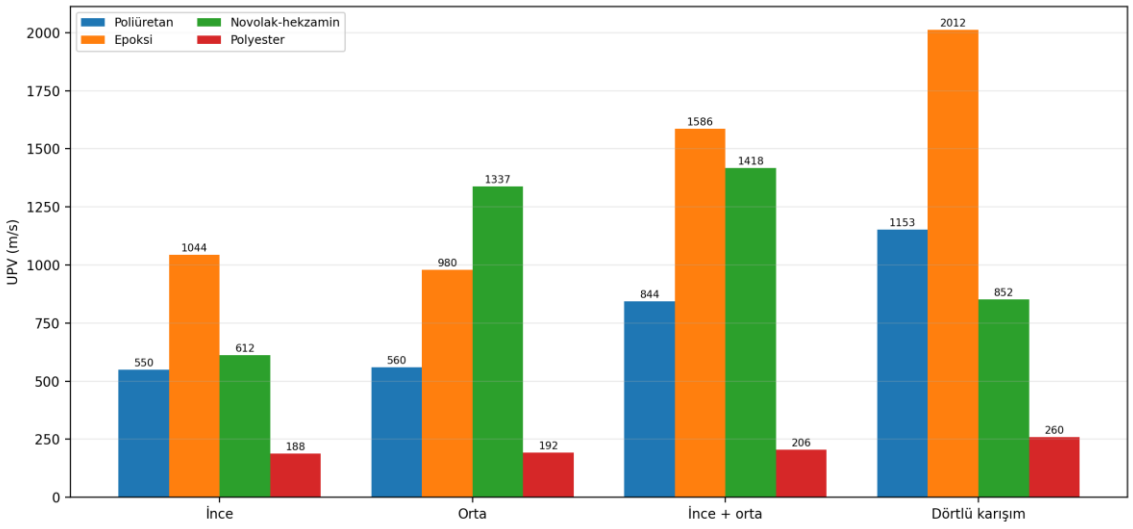
Eğilme ve basınç bulguları, kauçuk fazın düşük rijitliği ve yüksek deformasyon kapasitesinin granül–matris ara yüzeyindeki gerilme aktarımına etkisi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Eğilme sonuçları bu nedenle σ–ε ve mikroyapı bulgularıyla birlikte yorumlanmıştır.

Eğilme yüklemesinde numunenin alt bölgesinde çekme, üst bölgesinde basınç gerilmeleri oluştuğundan, granül–matris ara yüzeyindeki süreksizlikler ve çatlak başlangıç bölgeleri basınç deneyine göre daha belirgin hâle gelebilmektedir. Bu nedenle epoksi–K1, PU–K4 ve novolak–K2 gruplarında basınç ve eğilme maksimumlarının aynı granül düzeninde oluşması, söz konusu kombinasyonların farklı gerilme durumlarında kendi bağlayıcı sistemleri içinde daha dengeli bir yük aktarımı sağlamış olabileceğini düşündürmektedir. Epoksi–GTR sistemlerinde kauçuk parçacıklarının çatlak ilerleme yolunu ve ara yüzey ayrılmasını değiştirebildiği (Kaynak vd., 2001), polyester–GTR sistemlerinde ise zayıf ara yüzey yapışmasının çekme/eğilme benzeri gerilme durumlarında mekanik kayıpla birlikte görülebildiği bildirilmiştir (Yıldızhan vd., 2022).

Polyester sisteminde basınç mukavemetinin K4'e doğru hafif artmasına karşın en yüksek eğilme mukavemetinin K1'de elde edilmesi, aynı granül düzeninin basınç ve çekme ağırlıklı eğilme durumlarında aynı mekanik avantajı sağlamadığını göstermektedir. Bu ayrışma, paketlenme ile ara yüzey kontrollü çatlak başlangıcının farklı yükleme türlerinde farklı ağırlık kazanabileceğine işaret etmektedir. Benzer biçimde atık lastik içeren polimer ve çimento esaslı kompozitlerde mekanik sonuçların yalnız tek bir yükleme türüyle değerlendirilmesinin yetersiz olduğu ve dayanım–deformasyon dengesinin uygulamaya göre birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Thomas ve Gupta, 2016; Revelo vd., 2021; Akın ve Polat, 2022). Bu nedenle eğilme sonuçları tezde basınç, σ–ε ve SEM bulgularını tamamlayan bağımsız bir mekanik performans ekseni olarak kullanılmıştır.

4.4. Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV) Bulguları

UPV ölçümleri kompozitlerin iç yapısal sürekliliği, boşluk yapısı ve dalga iletim yoluna ilişkin tamamlayıcı tahribatsız veri sağlamıştır. Poliüretan sisteminde UPV değerleri 550–1153 m/s, epokside 980–2012 m/s, novolak–hekzaminde 612–1418 m/s ve polyesterde 188–260 m/s aralığında değişmiştir. Sistemler Şekil 4.4'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4. Bağlayıcı türü ve granül düzenine göre UPV sonuçları

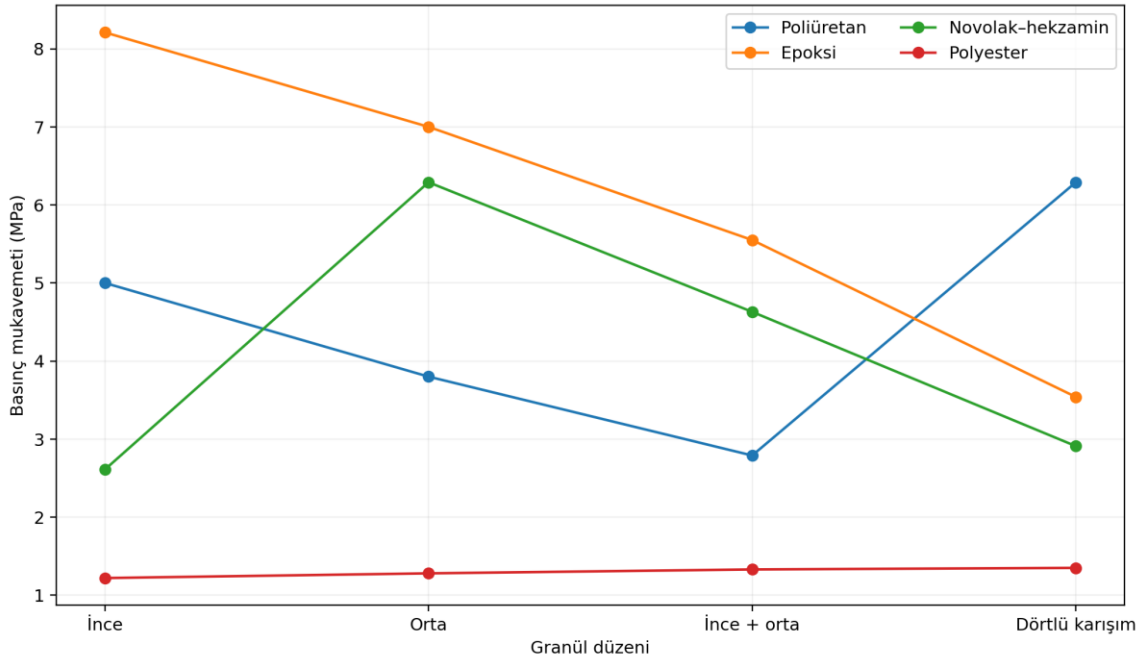
Epoksi sisteminde K4 grubu 2012 m/s ile bütün deney matrisi içindeki en yüksek UPV değerini vermesine karşın, aynı grubun basınç mukavemeti 3,54 MPa'da kalmıştır. Buna karşılık epoksi–K1 grubu 8,21 MPa ile sistemin en yüksek basınç mukavemetine ulaşmış, ancak UPV değeri 1044 m/s olarak ölçülmüştür. Novolak–hekzaminde en yüksek UPV 1418 m/s ile K3 grubunda, en yüksek basınç ve eğilme mukavemetleri ise K2 grubunda elde edilmiştir. Poliüretan

sisteminde K4 grubunun hem mekanik hem de UPV sonuçlarında sistem içi maksimumu vermesi ise bağlayıcıya özgü bir uyum göstermiştir.

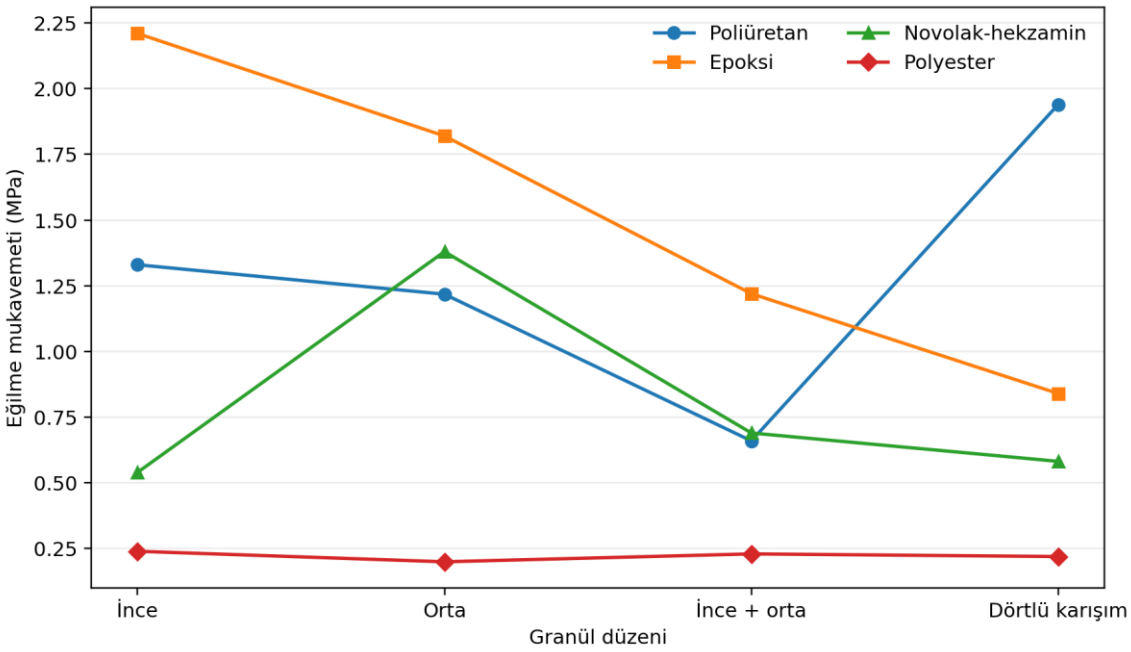
UPV'nin basınç mukavemetiyle birebir örtüşmemesi, kauçuk–polimer kompozitlerin çok fazlı yapısıyla birlikte değerlendirilmiştir. Dalga hızı; fazların elastik özellikleri, aralarındaki akustik empedans farkı, granül–matris temasları, boşluklar ve dalga iletim yolundan etkilenmektedir. Polyester esaslı polimer betonlarda da UPV ve mekanik özelliklerin reçine oranı ile kauçuk tane boyutundan birlikte etkilendiği bildirilmiştir (Akın ve Polat, 2022). Bu nedenle UPV, mevcut kompozitlerde iç yapısal sürekliliği destekleyen tamamlayıcı bir gösterge olarak kullanılmıştır.

4.5. Granül Düzenine Göre Mekanik Performansın Karşılaştırılması

Dört bağlayıcı sisteminin %20 ve 28 günlük serileri aynı granül düzenleri üzerinden karşılaştırıldığında, granülometrinin etkisinin bağlayıcı türüne göre yön değiştirdiği görülmüştür. Şekil 4.5'te basınç mukavemeti, Şekil 4.6'da ise eğilme mukavemeti eğilimleri granül düzenine göre birlikte izlenmiştir.



Şekil 4.5. Dört bağlayıcı sisteminde granül düzenine göre %20 ve 28 günlük basınç mukavemeti sonuçları



Şekil 4.6. Dört bağlayıcı sisteminde granül düzenine göre eğilme mukavemeti sonuçları

Epoksi sisteminde ince granül düzeninin öne çıkması, yüksek özgül yüzey alanının yeterli bağlayıcı varlığında daha geniş granül–matris temas alanı oluşturmasıyla ilişkilendirilmiştir. Epoksi gibi görece rijit bir termoset matriste granül boyutunun ve ara yüzey sayısının artması çatlak ilerleme yolunu ve gerilme yığılmalarını değiştirebilmektedir. Kaynak vd. (2001) tarafından epoksi–kauçuk sistemlerinde ara yüzey kalitesi ve çatlak saptırma mekanizmalarının kırılma davranışını etkileyebildiği bildirilmiştir.

Poliüretan sisteminde K4 dörtlü karışımın hem basınç hem eğilme mukavemetinde öne çıkması, geniş tane dağılımı ile esnek matris karakterinin birlikte olumlu rol oynayabileceğini düşündürmüştür. Farklı boyuttaki granüllerin birlikte bulunması küçük fraksiyonların iri granüller arasındaki boşlukları kısmen doldurmasına katkı sağlayabilmekte; poliüretanın daha esnek yapısı ise geometrik uyumsuzlukları daha rijit termosetlere göre daha iyi tolere edebilmektedir. Revelo vd. (2021) ile Jiang vd. (2022) poliüretan bağlı lastik kompozitlerinde granülometri, gözenek yapısı ve bağlayıcı özelliklerinin mekanik davranışı birlikte etkilediğini bildirmiştir.

Novolak–hekzamin sisteminde orta granül K2 grubunun öne çıkması, çok ince tanelerde artan yüzey alanı gereksinimi ile çok geniş dağılımda oluşabilen yerel geometrik süreksizlikler arasında daha dengeli bir durum oluştuğunu düşündürmüştür. Polyester sisteminde ise dört granül düzenindeki mekanik değerlerin dar aralıkta kalması, mevcut formülasyonda granülometri avantajının ara yüzey ve boşluk yapısı tarafından sınırlandırıldığını göstermiştir. Abu-Jdayil vd. (2016b) ile Yıldızhan vd. (2022) polyester–atık lastik sistemlerinde ara yüzey uyumsuzluğunun mekanik performansı sınırlandırabildiğini bildirmiştir.

Granül boyutu etkisi iki karşıt mekanizma üzerinden değerlendirilebilir: ince taneler özgül yüzey alanını ve polimerle temas olasılığını artırırken bağlayıcı gereksinimini yükseltmekte; geniş tane dağılımı ise paketlenmeyi iyileştirebilmekle birlikte farklı boyutlar arasındaki temas bölgelerinde yerel süreksizlikler oluşturabilmektedir. Hangi mekanizmanın baskın olduğu matrisin viskozitesi, deformasyon kabiliyeti ve ara yüzey uyumuna bağlıdır. Ramarad vd. (2015) ve Hejna vd. (2020) parçacık boyutu ve matris uyumunun polimer–kauçuk kompozitlerinde birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamış; Revelo vd. (2021) ve Akın ve Polat (2022) ise farklı matrislerde granülometri değişiminin mekanik sonuçları aynı yönde etkilemediğini göstermiştir. Mevcut K1–K4 sonuçları bu matrise bağlı davranışı doğrudan desteklemektedir.

Epoksi için K1'in, PU için K4'ün ve novolak–hekzamin için K2'nin öne çıkması, granülometri optimizasyonunun bağlayıcıdan bağımsız yapılamayacağını göstermektedir. Özellikle K4 geniş dağılımının PU'da avantaj sağlarken epokside basınç ve eğilme bakımından daha düşük kalması, geometrik paketlenme kazancının matris rijitliği ve ara yüzey davranışı tarafından dengelenebildiğini düşündürmektedir. Bu sonuç, tezde önerilen 'tek bir evrensel optimum granülometri yoktur' yaklaşımını mekanik veriler üzerinden güçlendirmektedir.

4.6. UPV, Basınç ve Eğilme Mukavemetleri Arasındaki İlişkiler

Bu bölümde, ana deney matrisinden elde edilen UPV, basınç ve eğilme mukavemeti sonuçları arasındaki ilişkiler birlikte incelenmiştir.

4.6.1. UPV–Basınç Mukavemeti İlişkisi

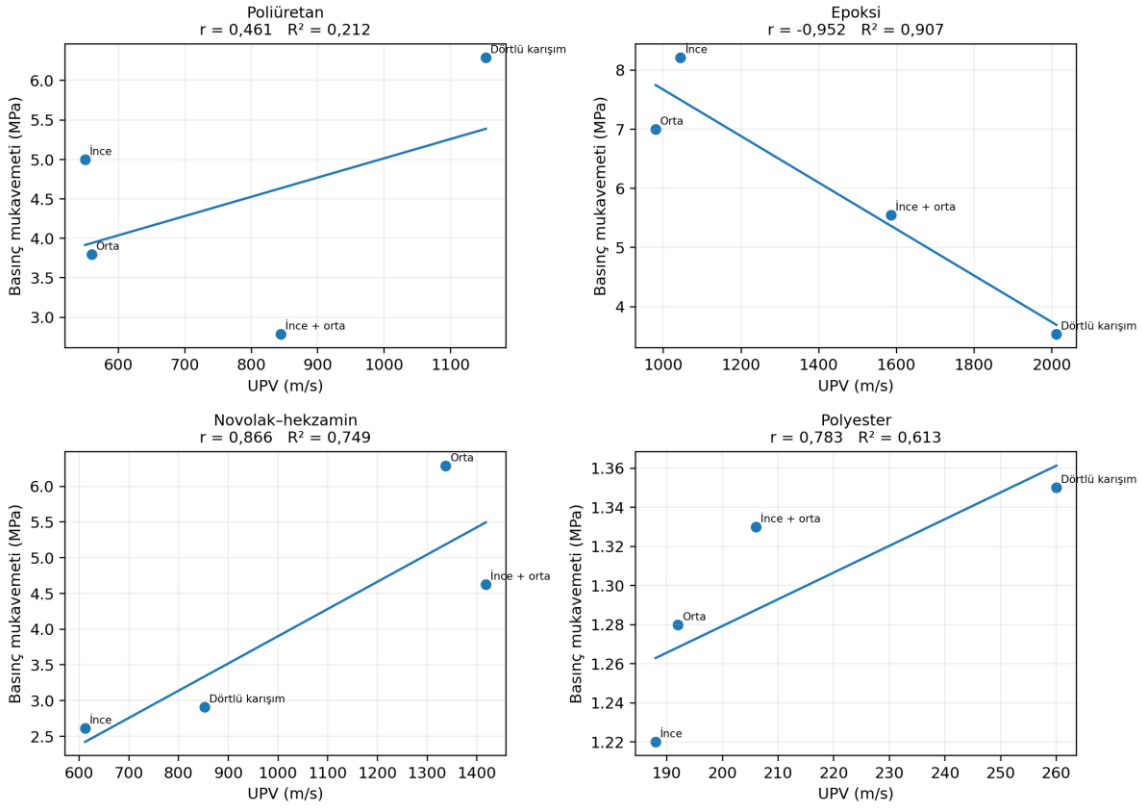
UPV ile basınç mukavemeti arasındaki ilişkinin yönünü ve doğrusal açıklama gücünü belirlemek amacıyla her bağlayıcı sisteminin dört granül düzenine ait %20 ve 28 günlük sonuçları üzerinde Pearson korelasyon katsayısı (r) ve doğrusal regresyonun belirleme katsayısı (R^2) hesaplanmıştır. Her bağlayıcı için yalnız dört veri çifti bulunduğundan bu katsayılar genellenebilir bir tahmin modeli olarak değil, mevcut deney setindeki eğilimin tanımlanması amacıyla kullanılmıştır. Bağlayıcı içi eğilimler Şekil 4.7'de, bütün veri çiftleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Hesaplanan korelasyon ve belirleme katsayıları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. UPV ile %20 ve 28 günlük basınç mukavemeti arasındaki korelasyon ve doğrusal regresyon göstergeleri

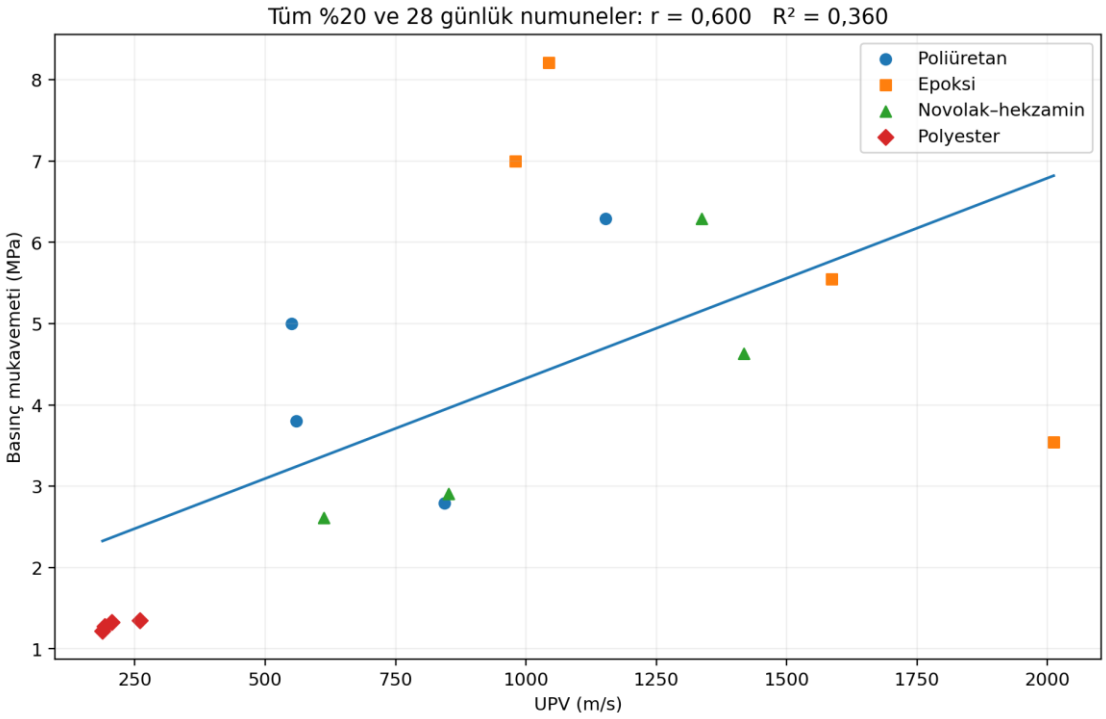
Bağlayıcı sistemi	n	Pearson r	R^2	Değerlendirme
Poliüretan	4	0,461	0,212	Zayıf–orta pozitif eğilim
Epoksi	4	-0,952	0,907	Güçlü fakat ters yönlü eğilim
Novolak–hekzamin	4	0,866	0,749	Pozitif eğilim; mekanik ve UPV maksimumları farklı
Polyester	4	0,783	0,613	Pozitif eğilim; mukavemet aralığı çok dar
Tüm veriler	16	0,600	0,360	Polimerler arası kümelenmeden etkilenen orta düzey genel ilişki
Polimer içi merkezlenmiş	16	-0,078	0,006	Ortak doğrusal ilişki yok denecek kadar zayıf

Poliüretanda r=0,461 ve R^2=0,212 ile zayıf–orta pozitif eğilim görülürken, epokside r=-0,952 ve R^2=0,907 ile güçlü fakat ters yönlü bir ilişki ortaya çıkmıştır. Novolak–hekzaminde K3 basınç değeri 4,63 MPa kullanıldığında r=0,866 ve R^2=0,749 elde edilmiştir. Polyesterde r=0,783 ve R^2=0,613 bulunmuş olmakla birlikte, basınç mukavemetinin yalnız 1,22–1,35 MPa aralığında değişmesi nedeniyle bu ilişki genellenebilir bir malzeme bağıntısı olarak değerlendirilmemiştir.

Tüm 16 veri birlikte ele alındığında r=0,600 ve R^2=0,360 bulunmuştur. Ancak bu orta düzey görünen genel ilişki, farklı polimer gruplarının birbirinden farklı UPV ve mukavemet seviyelerinde kümelenmesinden etkilenmiştir. Her polimer grubunun kendi ortalaması çıkarılarak yalnız grup içi değişim incelendiğinde r=-0,078 ve R^2=0,006 düzeyine düşmüştür. Başka bir ifadeyle polimer türü etkisi ayrıştırıldığında UPV değişiminin basınç mukavemeti değişimini ortak bir doğrusal modelle açıklama gücü yok denecek kadar azdır. Bu nedenle tez kapsamında UPV'den genel basınç mukavemeti tahmini yapan bir eşitlik önerilmemiştir.



Şekil 4.7. Bağlayıcı sistemlerine göre UPV–basınç mukavemeti ilişkileri ve doğrusal eğilimler



Şekil 4.8. Tüm %20 ve 28 günlük numuneler birlikte değerlendirildiğinde UPV–basınç mukavemeti ilişkisi

Korelasyon katsayıları her bağlayıcı için yalnız dört granül düzenine dayandığından betimleyici niteliktedir. Ayrıca mevcut kayıt setinde tüm kombinasyonlar için bağımsız tekrar ve dağılım istatistikleri aynı kapsamda bulunmadığından p-değeri, güven aralığı veya istatistiksel anlamlılık yorumu yapılmamıştır. Bu yaklaşım, küçük örneklemli eğilimlerin genellenebilir bir tahmin bağıntısı gibi sunulmasını önlemek amacıyla benimsenmiştir.

Epoksi–K4'ün yüksek UPV'ye karşın daha düşük basınç mukavemeti göstermesi, dalga iletim özellikleri ile kırılma direncinin farklı yapısal özelliklere duyarlı olduğunu düşündürmüştür. Genovés vd. (2022), mikronize geri dönüştürülmüş lastik içeren polimer kompozitlerde faz bileşiminin ultrasonik hız ve sönüm davranışını değiştirdiğini göstermiştir. Bu çalışma, mevcut UPV eğilimlerinin fiziksel yorumunu desteklemekte; farklı parçacık boyutu ve ölçüm koşulları nedeniyle doğrudan bir dayanım tahmin bağıntısı sağlamamaktadır.

4.6.2. Eğilme Mukavemetinin UPV ve Basınçla İlişkisi

UPV ile eğilme mukavemeti ve basınç ile eğilme mukavemeti arasındaki ilişkiler aynı 16 kombinasyon üzerinden hesaplanmış ve Tablo 4.5'te verilmiştir. Grup içi hesaplamalarda n=4 bağımsız deney tekrarı değil, K1–K4 reçetelerine ait dört veri çiftidir. Bütün matriste basınç–eğilme ilişkisi güçlü ve pozitif (r=0,959), UPV–eğilme ilişkisi ise orta düzeyde pozitif (r=0,479) bulunmuştur.

Tablo 4.5. UPV–eğilme ve basınç–eğilme ilişkilerine ait Pearson korelasyonları

Veri grubu	n	r (UPV–eğilme)	r (basınç–eğilme)
Poliüretan	4	0,464	0,970
Epoksi	4	−0,945	0,987
Novolak–hekzamin	4	0,621	0,925
Polyester	4	−0,079	−0,286
Bütün kombinasyonlar	16	0,479	0,959
Bağlayıcı içinde merkezlenmiş	16	−0,191	0,955

Not: Hesaplar Tablo 4.3'teki eşlenik ölçüm değerlerinden yapılmıştır. Merkezlemede her değişkenden kendi bağlayıcı grubunun ortalaması çıkarılmıştır. Katsayılar betimleyicidir; nedensellik veya yeni numuneler için doğrulanmış dayanım tahmin denklemi değildir.

Bağlayıcı grupları aynı eğilimi göstermemiştir. Epokside UPV–eğilme katsayısı −0,945 iken poliüretanda 0,464, novolak–hekzaminde 0,621 ve polyesterde −0,079'dur. Epoksi–K1'den K4'e geçildiğinde UPV 1044'ten 2012 m/s'ye yükselirken eğilme mukavemeti 2,21'den 0,84 MPa'ya, basınç mukavemeti ise 8,21'den 3,54 MPa'ya düşmüştür. Bu nedenle yüksek UPV bütün sistemlerde yüksek mukavemet anlamına gelmemektedir. Ultrasonik hızın elastik özelliklere, yoğunluğa, boşluklara ve dalga iletim yoluna duyarlı olması bu ayrımın fiziksel temelini

oluşturmaktadır; UPV'den mukavemet tahmini ancak malzemeye özgü doğrulama ile yapılabilir (ASTM International, 2022; Evident, t.y.).

Basınç–eğilme katsayıları epoksi, poliüretan ve novolak–hekzaminde 0,925–0,987 aralığında pozitif bulunmuştur. Polyesterin −0,286 değeri, yalnız dört düzen ve dar bir eğilme aralığına (0,20–0,24 MPa) dayandığından ters yönlü genel bir malzeme yasası şeklinde yorumlanmamıştır. Bağlayıcı içi merkezlemeden sonra basınç–eğilme korelasyonu 0,955 düzeyinde kalırken UPV–eğilme korelasyonu −0,191'e gerilemiştir. Böylece toplu UPV–eğilme ilişkisinin bir bölümü bağlayıcı gruplarının farklı ortalama düzeylerinden kaynaklanmış; mekanik ve ultrasonik sonuçların grup bazında birlikte okunması gerektiği görülmüştür.

4.7. Gerilme–Birim Şekil Değiştirme Davranışı

Basınç deneyi sırasında kaydedilen yük-deplasman verileri, Bölüm 3'te tanımlanan gerçek numune kesit alanı ve başlangıç yüksekliği kullanılarak σ–ε verilerine dönüştürülmüştür. Deformasyon ayrı bir ekstansometre yerine cihazın pozisyon/deplasman kaydından elde edildiğinden, burada verilen ε, tepe sekant modülü ve eğri altı enerji alanı mutlak standart malzeme sabitleri olarak değil; aynı deney sistemi altındaki numunelerin karşılaştırmalı deformasyon, göreli rijitlik ve enerji yutma davranışını değerlendiren göstergeler olarak yorumlanmıştır.

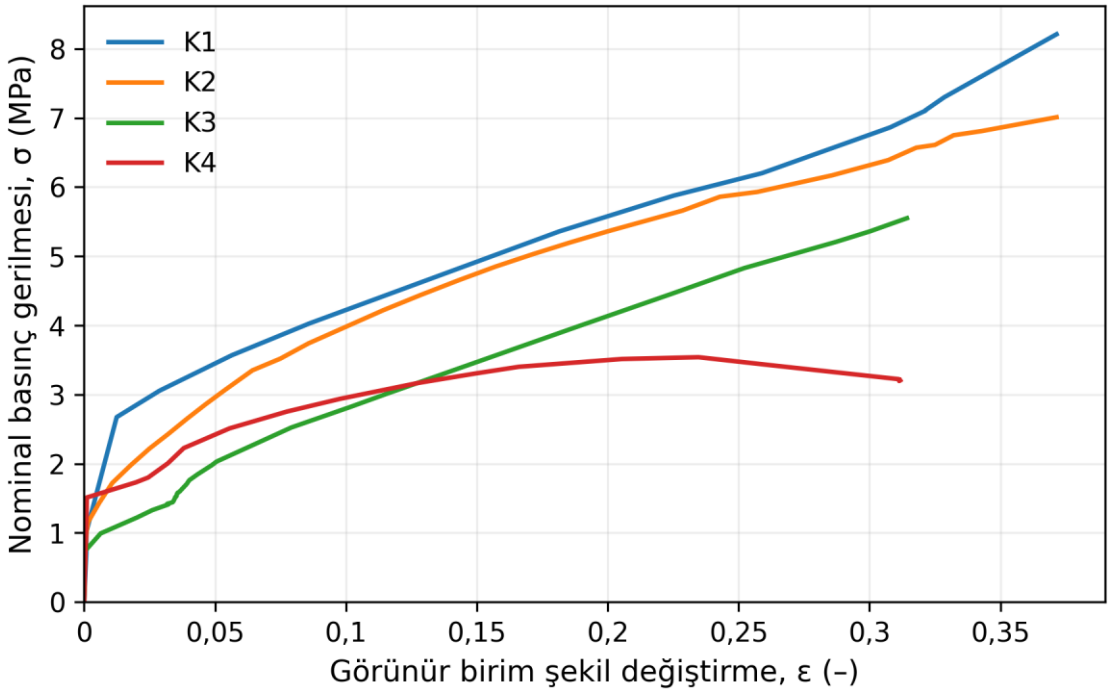
Epoksi, novolak–hekzamin ve poliüretan sistemlerinin her biri için K1–K4 olmak üzere dörder eğri; polyester için tek temsilci eğri değerlendirilmiştir. Böylece σ–ε veri seti 13 eğriden oluşmuştur. Polyester temsilcisinin K kodu güvenilir biçimde eşleştirilemediğinden granül düzenleri arasında polyester σ–ε karşılaştırması yapılmamıştır. Her eğrinin maksimumu kayıtlı nominal gerilme düzeyini, son noktası ise deney kaydının ulaştığı görünür deformasyonu göstermektedir. Bu iki noktanın aynı olması, gerçek kırılmanın veya nihai deformasyon sınırının belirlendiği anlamına gelmemektedir.

σ–ε eğrilerinin birlikte okunması, yalnız maksimum gerilmenin değil bu gerilmenin hangi deformasyon düzeyinde ve ne kadar geniş bir şekil değiştirme aralığında taşındığının da önemli olduğunu göstermektedir. Kauçuk fazın düşük rijitliği ve yüksek deformasyon kapasitesi nedeniyle eğriler başlangıçtan itibaren doğrusal olmayan bir karakter sergilemiş; bu durum klasik Young modülü yerine göreli rijitlik göstergesi olarak tepe sekant modülünün kullanılmasının temel gerekçesini oluşturmuştur. Atık lastik içeren polimer sistemlerinde dayanım ile deformasyonun aynı yönde değişmek zorunda olmadığı; matris türü, kauçuk miktarı ve ara yüzey durumunun süneklik/rijitlik dengesini değiştirebildiği literatürde de gösterilmiştir (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Akın ve Polat, 2022; Türkben vd., 2023).

4.7.1. Epoksi Bağlayıcılı Numuneler

Epoksi–K1 kaydında en yüksek nominal gerilme 8,210 MPa olup bu değer ε=0,371 olan son kayıt noktasında elde edilmiştir. K2, K3 ve K4 kayıtlarında maksimumlar sırasıyla 7,00, 5,55 ve 3,54 MPa'dır. K1–K3 için maksimum ile kayıt sonu çakıştığından tepe sonrası kırılma davranışı bu kayıtlarla belirlenmemiştir. K4'te maksimum ε≈0,235'da oluşmuş ve ε≈0,312'ya kadar azalan dal kaydedilmiştir. Epoksi eğrileri Şekil 4.9'da sunulmuştur.

Epoksi–K1 ve K2 kayıtlarında görece yüksek gerilmeler ile geniş kayıt aralığının birlikte bulunması, hesaplanan yükleme işi alanlarının yüksekliğiyle uyumludur. K1 için 8,210 MPa son noktadaki maksimumdur; bütün deformasyon aralığında sabit taşınmış bir gerilme değildir. Kaynak vd. (2001, 2003) kauçuk–epoksi sistemlerinde ara yüzey ve çatlak ilerleme mekanizmalarının önemini göstermiştir. Ancak burada kırılma mekaniği veya boşaltma deneyi yapılmadığından 1,968 MJ/m³ alan, çatlak tokluğu veya tamamı sönümlenmiş enerji olarak yorumlanmamıştır.



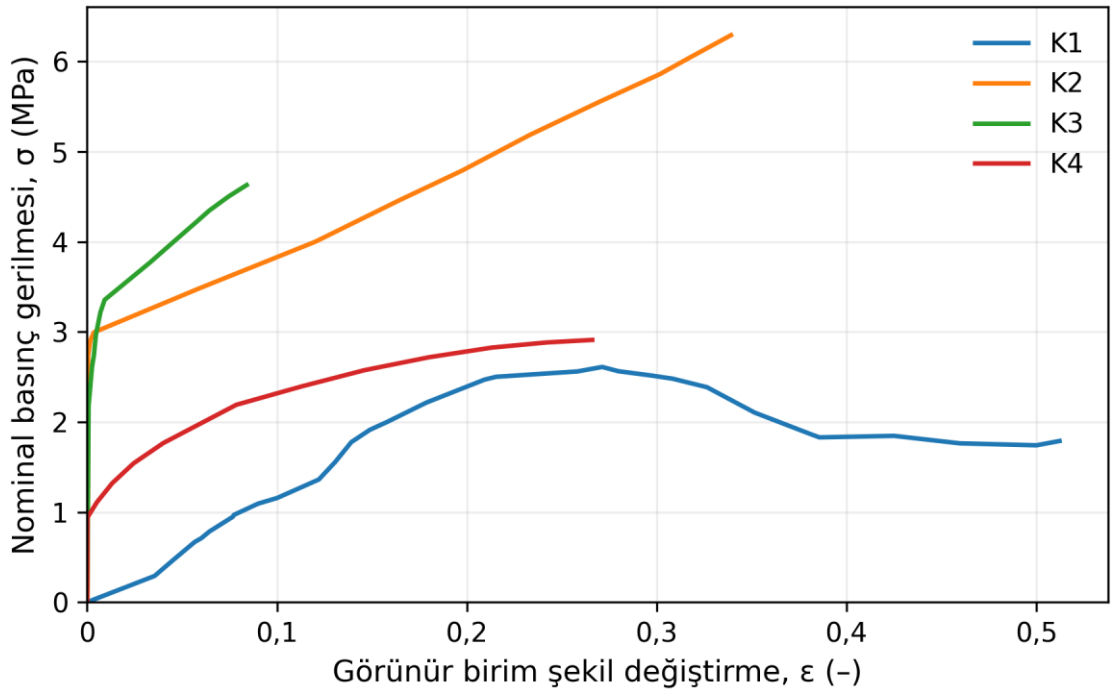
Şekil 4.9. Epoksi bağlayıcılı numunelerin granül düzenine göre gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri

4.7.2. Novolak–Hekzamin Bağlayıcılı Numuneler

Novolak–hekzamin–K2 kaydı ε=0,339 olan son noktada 6,292 MPa maksimum nominal gerilmeye ulaşmıştır. K3 kaydında 4,629 MPa maksimum ε≈0,084 olan son noktadadır. K3'ün düşük kayıt sonu deformasyonu, tek başına gerçek kırılma deformasyonunun veya gevrekliğin

kanıtı değildir. K1 kaydında maksimum 2,610 MPa'dan sonra ε≈0,512'ye kadar azalan dal bulunurken K4'ün kayıtlı maksimumu 2,910 MPa'dır. İlgili eğriler Şekil 4.10'da verilmiştir.

Novolak–hekzamin–K3 için raporlanan 55,086 MPa tepe sekant modülü, düşük tepe deformasyonunda ulaşılan 4,629 MPa maksimumdan türetilmiştir; 0,326 MJ/m³ alan ise ε≈0,084'de sonlanan kayıtla sınırlıdır. Bu nedenle yüksek görünür sekant eğimi ve düşük kayıt alanı birlikte değerlendirilmiş, bunlar bağımsız Young modülü veya tam kırılma enerjisi olarak sunulmamıştır. Fenolik/kauçuk sistemlerinde reçete ve kür koşullarının mekanik–termal davranışı değiştirdiği literatürde bildirilmiştir (Derakhshandeh vd., 2008). Bu tezde novolak–hekzamin numuneleri etüvde 160 °C'de 24 saat bekletilerek termal küre tabi tutulmuş; kür derecesi bağımsız olarak nicel biçimde doğrulanmadığından mekanizma yorumu bu sınırla tutulmuştur.

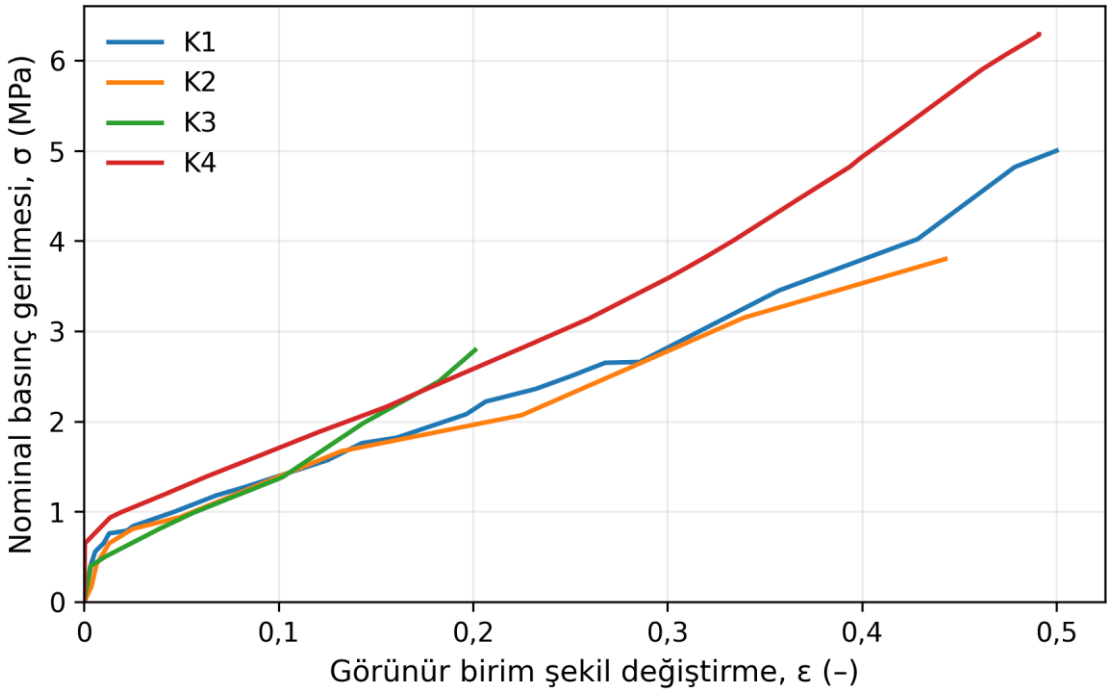


Şekil 4.10. Novolak–hekzamin bağlayıcılı numunelerin granül düzenine göre gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri

4.7.3. Poliüretan Bağlayıcılı Numuneler

Poliüretan–K4 kaydında 6,290 MPa maksimum nominal gerilme ε≈0,491 olan son noktada elde edilmiştir. K1 kaydı 5,000 MPa maksimumla ε=0,500'e ulaşmış; K2 ve K3 kayıtlarının maksimumları sırasıyla 3,800 ve 2,791 MPa olmuştur. Bu değerler geniş görünür deformasyon aralıklarına işaret etmiştir; cihaz deformasyonu, oturma ve sıkışma etkileri nedeniyle gerçek elastik uzama veya geri kazanılabilir deformasyon olarak yorumlanmamıştır. Poliüretan eğrileri Şekil 4.11'de sunulmuştur.

Poliüretan–K4'ün 6,290 MPa maksimuma ε≈0,491'de ulaşması ve bu kayıt boyunca 1,581 MJ/m³ alan vermesi, gerilme düzeyi ile deformasyon aralığının birlikte değerlendirilmesini sağlamıştır. PU–atık lastik literatüründe gevşeme, kalıcı deformasyon ve tekrarlı yük davranışı da önemlidir (Semlali Aouragh Hassani vd., 2020; Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2021). Mevcut tek yönlü yükleme kayıtları ise bu özellikleri ölçmemiştir; darbe veya titreşim sönümleme performansı ayrıca doğrulanması gereken bir kullanım yönü olarak bırakılmıştır.



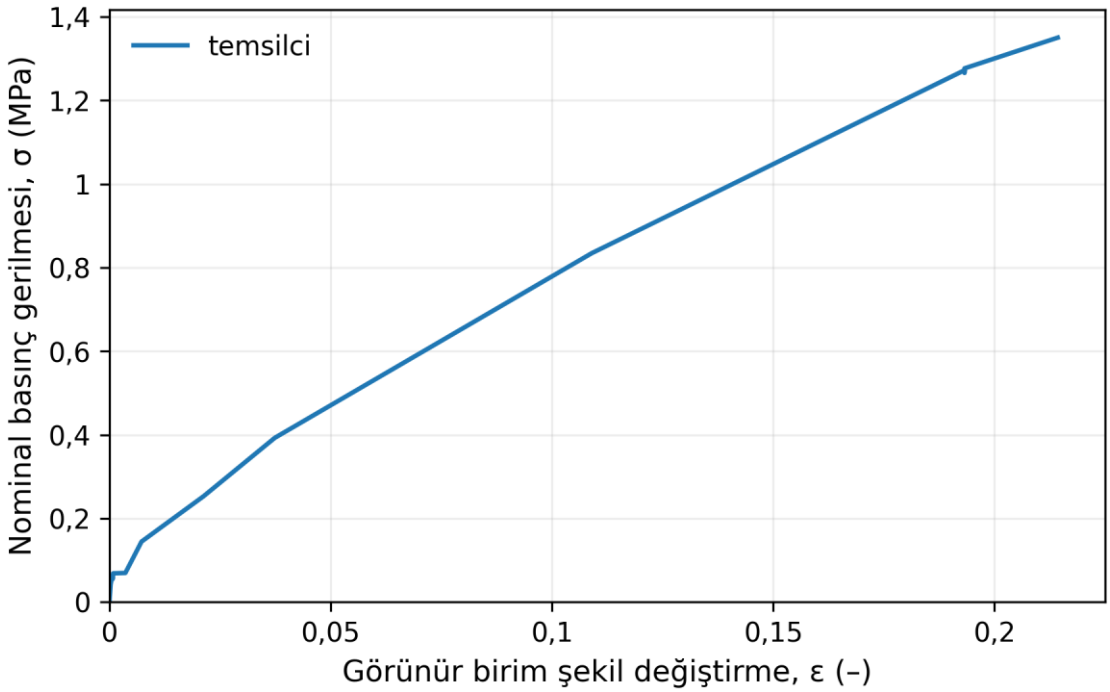
Şekil 4.11. Poliüretan bağlayıcılı numunelerin granül düzenine göre gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri

4.7.4. Polyester Bağlayıcılı Numune

Polyester sistemine ait temsilci σ–ε eğrisi 1,350 MPa maksimum gerilme ve ε≈0,214 tepe şekil değiştirmesi göstermiştir. Eğrinin hem gerilme düzeyi hem de altında kalan alanı epoksi, novolak–hekzamin ve poliüretan serilerinin büyük bölümünden daha düşük kalmıştır. Bu sonuç, mevcut polyester formülasyonunda yalnız maksimum dayanımın değil, kayıt sonuna kadar hesaplanan yükleme işi yoğunluğunun da daha düşük kaldığını göstermiştir. Polyester verisi tek temsilci eğri olarak bulunduğundan granül düzenleri arasında σ–ε temelli ayrıntılı karşılaştırma yapılmamıştır. Bu eğri Şekil 4.12'de verilmiş; son kayıt noktasındaki maksimum, doğrulanmış nihai kırılma sınırı olarak kabul edilmemiştir.

Polyester temsilci σ–ε eğrisinin daha düşük gerilme düzeyi ve daha sınırlı enerji alanı, basınç ve eğilme deneylerinde gözlenen düşük mekanik performansla aynı yöndedir. Polyester–GTR

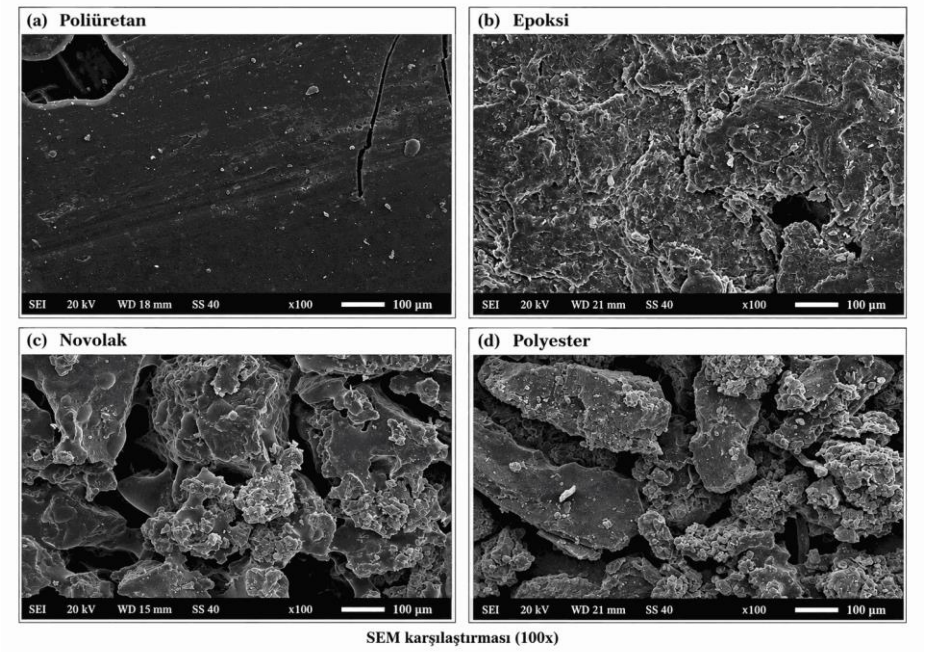
çalışmalarında kauçuk oranı, parçacık boyutu ve zayıf ara yüzey yapışmasının dayanım ve elastisite modülünü düşürebildiği, buna karşın bazı reçetelerde deformasyon karakterinin değişebildiği bildirilmiştir (Abu-Jdayil vd., 2016b; Akın ve Polat, 2022; Yıldızhan vd., 2022). Mevcut tezde yalnız tek temsilci polyester σ–ε kaydı bulunduğu için bu eğri granül düzenleri arasında genellenmemiş; polyester sisteminin diğer bağlayıcılara göre karşılaştırmalı deformasyon profilini destekleyen sınırlı bir veri olarak kullanılmıştır.



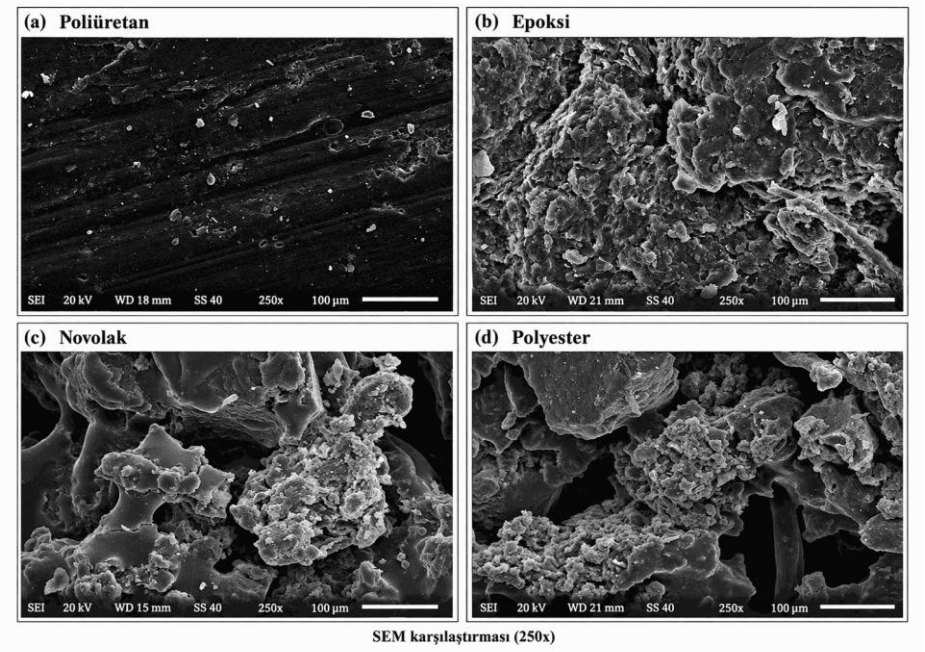
Şekil 4.12. Polyester bağlayıcılı temsilci numunenin gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi

4.8. SEM Mikroyapı Bulguları

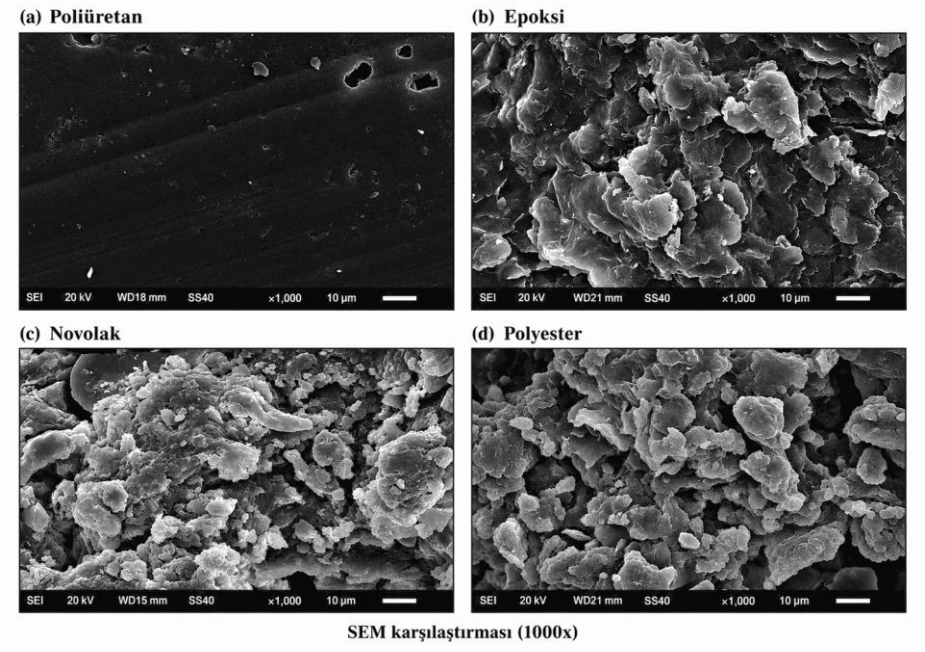
Dört polimer matris sisteminin SEM görüntüleri düşük, orta ve yüksek büyütmelerde karşılaştırılmıştır. Numune seçimi, her seride basınç dayanımı en yüksek kombinasyonlara yöneltilmiştir: Epoksi–K1, Poliüretan–K4, Novolak–hekzamin–K2 ve Polyester–K4. Değerlendirmede yüzey sürekliliği, boşluklar, granül–matris geçiş bölgeleri ve kırılma yüzeyi morfolojisi dikkate alınmıştır. Görüntüler yerel alanları göstermiş ve mekanik aderans kuvveti ölçümü olarak kullanılmamıştır. Tekil dışa aktarım etiketlerinin tamamında K kodu bulunmaması nedeniyle seçim stratejisi, her mikrograf için bağımsız olarak doğrulanmış K eşleştirmesi anlamına gelmemektedir. Karşılaştırma Şekil 4.13–4.18'de verilmiştir.



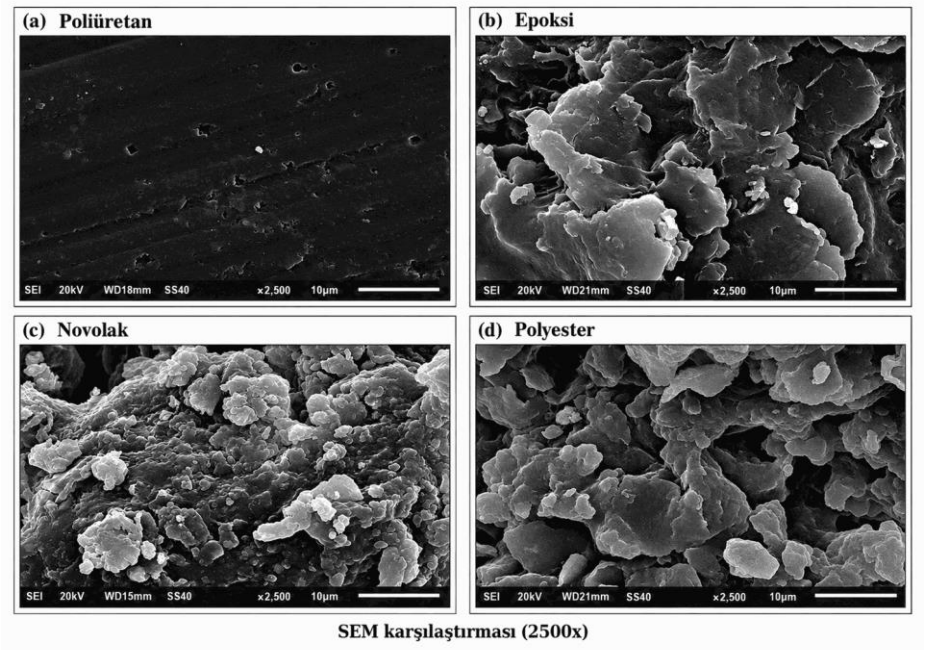
Şekil 4.13. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 100× SEM karşılaştırması



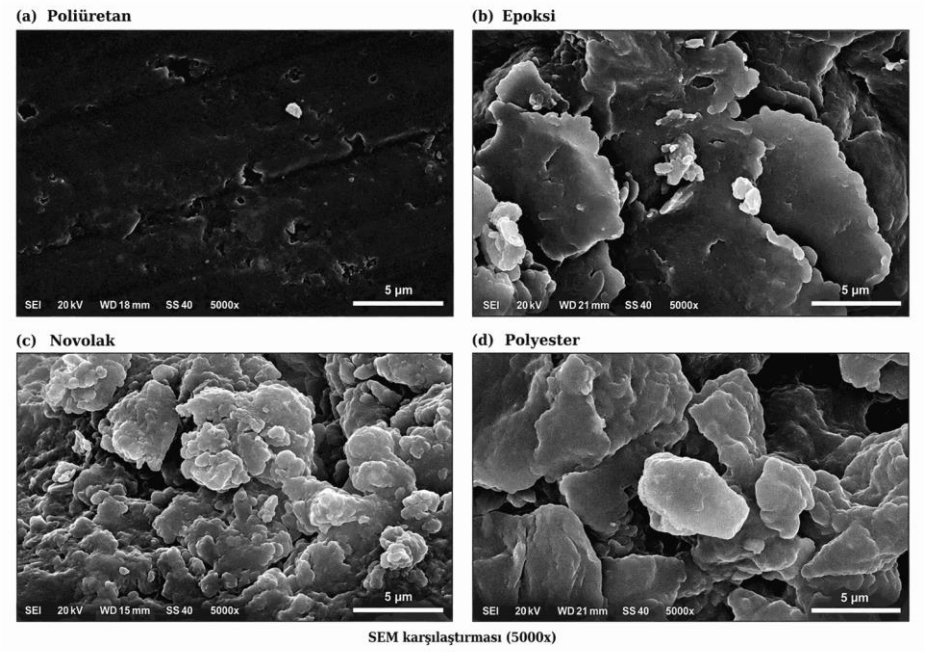
Şekil 4.14. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 250× SEM karşılaştırması



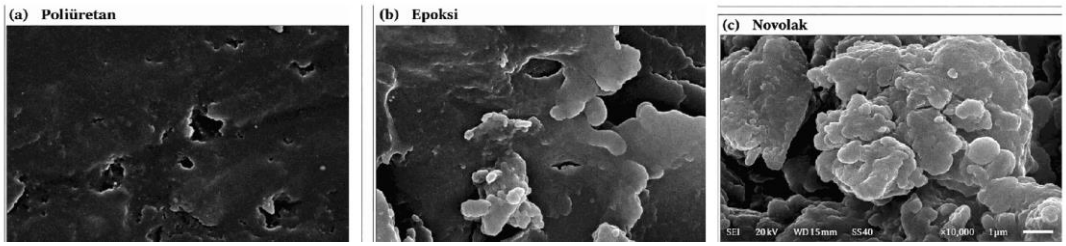
Şekil 4.15. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 1000× SEM karşılaştırması



Şekil 4.16. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 2500× SEM karşılaştırması



Şekil 4.17. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinin 5000× SEM karşılaştırması



Şekil 4.18. Poliüretan, epoksi ve novolak–hekzamin sistemlerinin 10.000× SEM karşılaştırması

Epoksi temsilci SEM alanlarında pürüzlü, katmanlı ve karmaşık kırılma topografyası izlenmiştir. Bu gözlem, epoksi sistemindeki mekanik sonuçlarla bağlayıcı sınıfı düzeyinde birlikte değerlendirilmiştir; görüntünün doğrudan Epoksi–K1 numunesine ait olduğu varsayılmamıştır. Kauçuk–epoksi literatüründe ara yüzey ve çatlak yolunun mekanik davranışı etkilediği bildirilmiştir (Kaynak vd., 2001, 2003). Ancak mevcut görüntülerden kimyasal aderans artışı veya nicel çatlak enerjisi türetilmemiştir.

Poliüretan temsilci alanlarında görece sürekli matris bölgeleri ve yerel mikro boşluklar gözlenmiştir. PU–K4'ün yüksek mekanik/UPV değerleri aynı bağlayıcı sisteminin ayrı deney sonuçlarıdır; SEM görüntüsü K4'e doğrudan eşleştirilmediğinden bu maksimumun mikroyapısal

nedeni kanıtlanmış sayılmamıştır. Literatürde PU–lastik sistemlerinde granülometri, bağlayıcı ve gözenek yapısının ortak etkisi vurgulanmıştır (Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2022).

Novolak–hekzamin temsilci alanlarında granüler ve kümelenmiş yüzey bölgeleri görülmüştür. SEM yüzey topografyası rijitliği doğrudan ölçmediğinden görüntüler "rijit morfoloji" biçiminde nicel bir mekanik özellik olarak tanımlanmamıştır. K2'nin 6,29 MPa basınç ve 1,38 MPa eğilme sonucu, örnek eşleştirme sınırı korunarak aynı bağlayıcı sisteminin mekanik performansıyla birlikte değerlendirilmiştir (Hejna vd., 2020).

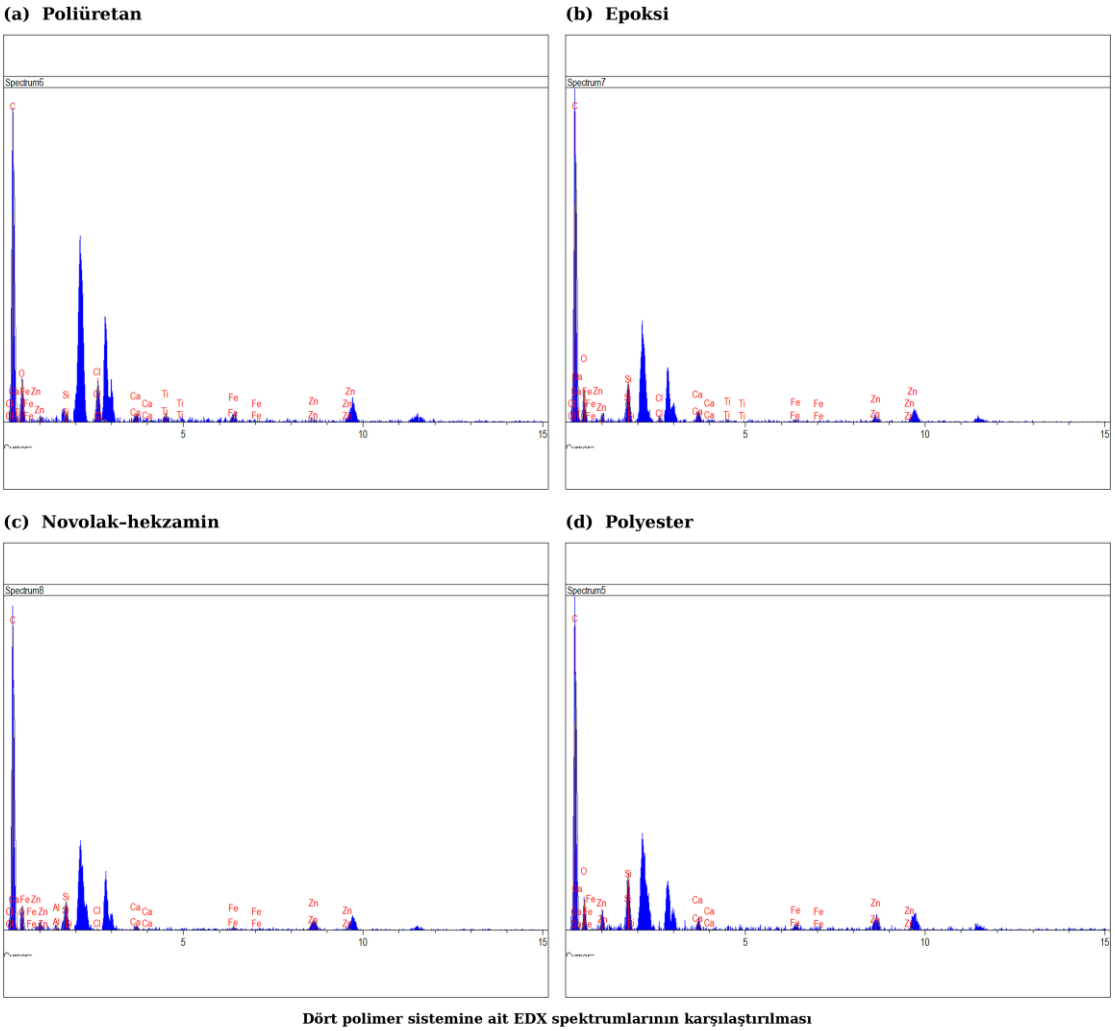
Polyester sisteminde daha heterojen, düzensiz ve açık boşluklu bölgeler izlenmiştir. Basınç mukavemetinin 1,22–1,35 MPa ve eğilme mukavemetinin 0,20–0,24 MPa aralığında kalması, gözlenen mikroyapısal heterojenlikle aynı yönde bir bulgu olarak değerlendirilmiştir. Yıldızhan vd. (2022) işlenmemiş atık lastik granüllerinin polyester matriste ara yüzey uyumsuzluğu oluşturabildiğini; Abu-Jdayil vd. (2016b) ise parçacık boyutu ve kauçuk oranının polyester–lastik kompozitlerinin mekanik özelliklerini etkilediğini bildirmiştir.

Pürüzlü epoksi yüzeyleri, görece sürekli poliüretan bölgeleri ve heterojen polyester alanları, bağlayıcı sistemleri arasında yerel morfoloji farklılıkları bulunduğunu göstermiştir. Bu gözlemler, mekanik sonuçlarla nitel olarak birlikte okunmuştur; ancak K kodları eşlenmediği için belirli bir karışımın maksimum dayanımı bu görüntülerle doğrudan açıklanmamıştır. Literatürdeki ara yüzey ve kırılma yorumları karşılaştırmalı çerçeve sağlamıştır (Kaynak vd., 2001, 2003; Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2022; Yıldızhan vd., 2022).

Mikroyapı sonuçları ayrıca yüzey modifikasyonunun gelecek çalışmalar açısından neden önemli olduğunu göstermektedir. GTR yüzeyinin düşük yüzey enerjisi ve kimyasal olarak görece inert karakteri, polar termosetlerle ara yüzey uyumunu sınırlayabilmektedir; oksidasyon, kimyasal aşındırma ve diğer yüzey aktivasyon yöntemlerinin matris–kauçuk etkileşimini geliştirebildiği geniş derlemelerde belirtilmiştir (Hejna vd., 2020; Phiri vd., 2021). Bununla birlikte yüzey işlemlerinin bütün mekanik ve fiziksel özellikleri aynı yönde değiştirmediği de raporlandığından (Sugiman vd., 2023), mevcut SEM bulguları belirli bir yüzey işlemini doğrudan önermekten çok, ara yüzey optimizasyonunun kontrollü deneylerle ele alınması gerektiğine işaret etmektedir.

4.9. EDS Spektrumları ve Element Haritalama Bulguları

Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerine ait EDX/EDS spektrumları dört bağlayıcı için karşılaştırılmıştır. EDS sonuçları lokal ve yarı nicel nitelikte olduğundan analiz edilen bölgenin elementel bileşimini destekleyen veri olarak kullanılmış; doğrudan aderans kuvveti veya bütün numune hacminin mutlak bileşimi biçiminde yorumlanmamıştır. Spektrumlar Şekil 4.19'da, seçilmiş ortak elementlerin değerleri Tablo 4.6'da sunulmuştur.



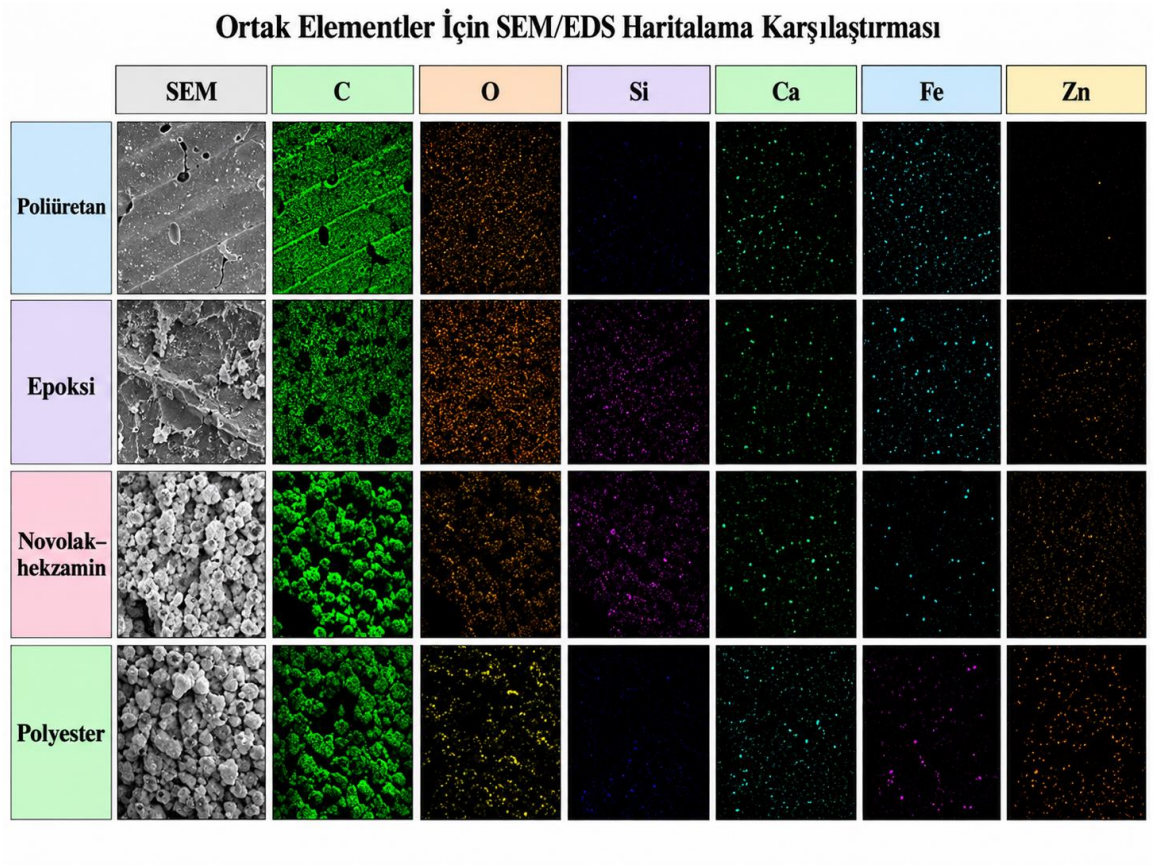
Şekil 4.19. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerine ait EDX/EDS spektrumlarının karşılaştırılması

Tablo 4.6. EDS raporunda doğrudan verilen seçilmiş ortak elementlerin yarı nicel karşılaştırması (wt.%)

Sistem	O	Si	Ca	Fe	Zn
Poliüretan	23,912	0,724	0,864	1,839	1,495
Epoksi	19,717	3,084	1,202	0,665	3,879
Novolak–hekzamin	17,000	2,499	0,574	0,839	7,176
Polyester	17,091	4,107	0,922	1,259	7,400

Oksijen içeriği poliüretanda %23,912 ile en yüksek düzeyde ölçülmüştür. Si içeriği polyesterde %4,107, Zn içeriği ise polyester ve novolak–hekzamin sistemlerinde sırasıyla %7,400 ve %7,176 olarak belirlenmiştir. Bu farklılıklar bağlayıcı kimyasının yanında ölçüm bölgesindeki kauçuk fazı, lastik üretiminden gelen mineral katkılar ve lokal heterojenlikle birlikte değerlendirilmiştir. Tek bir elementin yüksek veya düşük olmasının mekanik performansı doğrudan

açıkladığı kabul edilmemiştir. Tablo 4.6 yalnız beş seçilmiş elementi içerdiğinden satır toplamları %100 değildir; bu alt küme yeniden %100'e normalize edilmemiştir. Element haritaları Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester sistemlerinde ortak elementlerin SEM/EDS haritalama karşılaştırması

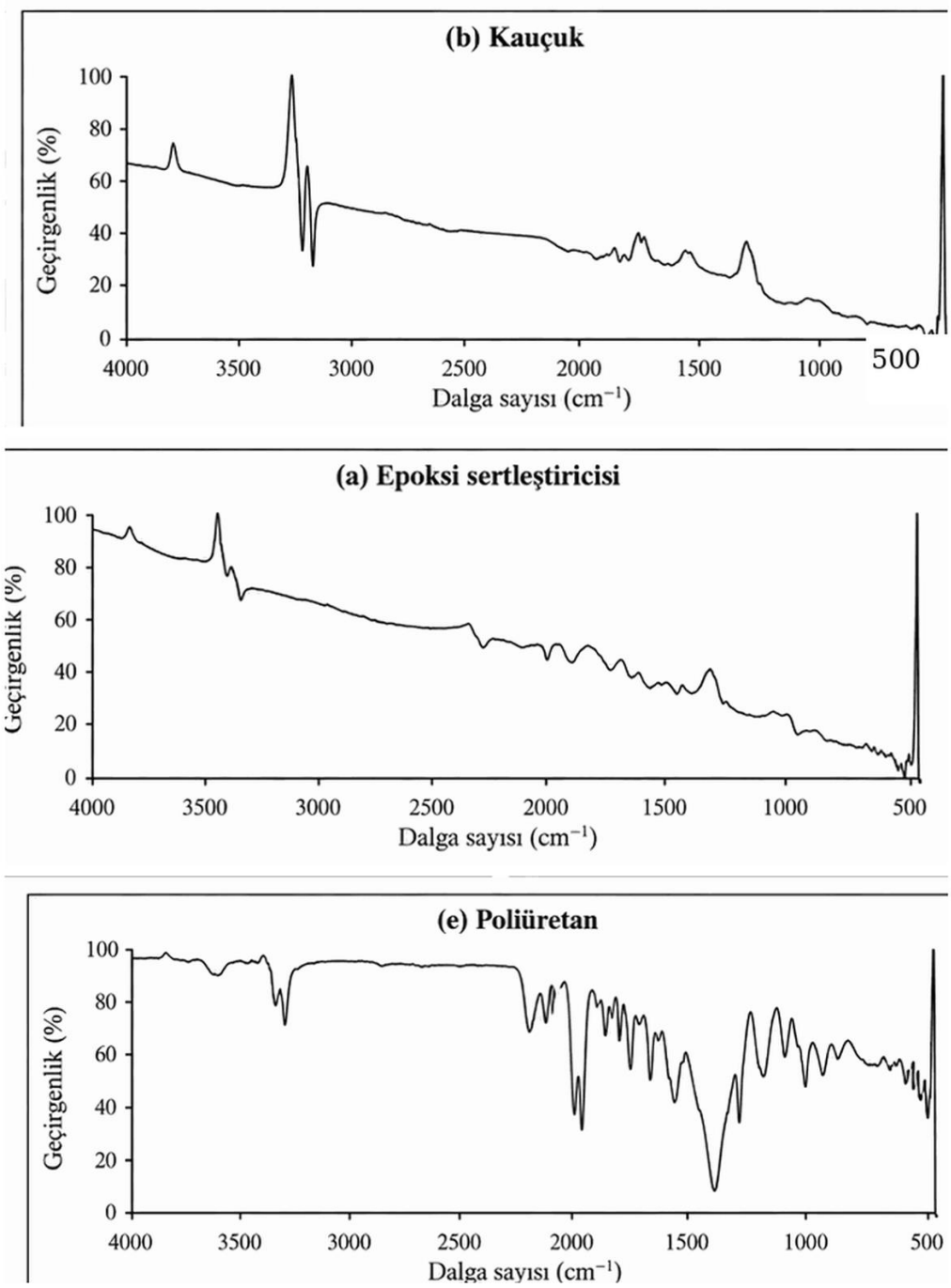
Element haritalarında karbon sinyalinin bütün sistemlerde yaygın olduğu, Zn ve diğer inorganik elementlerin ise bağlayıcı ve incelenen lokal bölgeye göre farklı yoğunluklarda dağıldığı görülmüştür. Haritalama bulguları SEM'de gözlenen morfolojik bölgelerin bileşimini desteklemiş; mekanik performansla doğrudan doğrusal ilişki kurulmamıştır.

EDS spektrumları ve element haritaları yorumlanırken elementlerin kaynağı ile mekanik performans arasında doğrudan bir neden–sonuç ilişkisi kurulmamıştır. Karbon sinyalinin tüm sistemlerde yaygın olması hem organik polimer matrislerin hem de kauçuk fazın karbon temelli yapısıyla uyumludur. Zn, S, Si ve Ca gibi elementler ise lastik üretiminde kullanılan vulkanizasyon bileşenleri ve mineral dolguların yanı sıra incelenen lokal bölgenin bileşimine bağlı olarak değişebilmektedir. Atık lastik granülünün çok bileşenli ve heterojen yapısı, EDS'de bağlayıcılar arasında görülen farklılıkların yalnız polimer kimyasıyla açıklanmasını engellemektedir (Ramarad vd., 2015; Hejna vd., 2020).

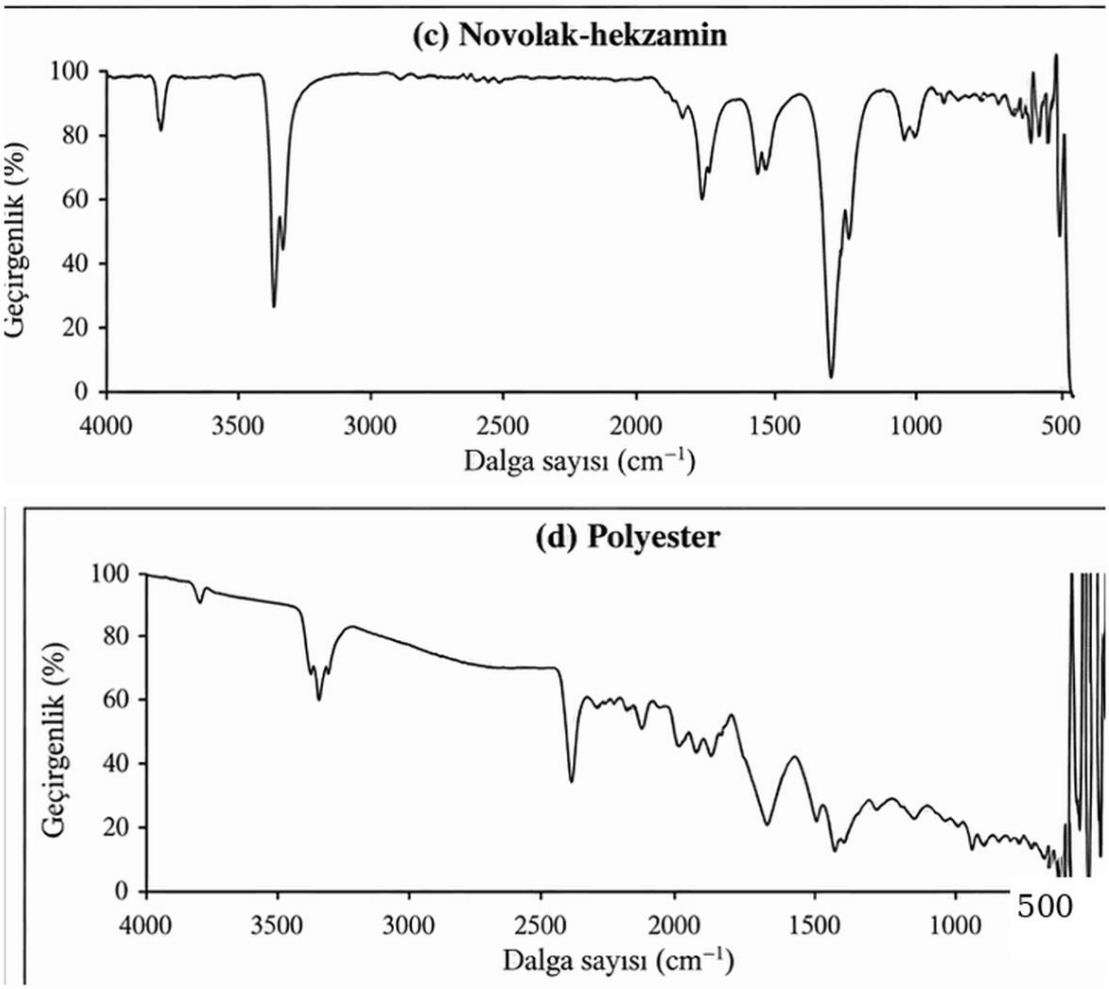
Element haritalamada bir sinyalin geniş alana yayılması, söz konusu elementin seçilen görüntü alanında daha sürekli dağıldığını; kümelenmiş sinyaller ise lokal zenginleşmeleri gösterebilir. Ancak EDS'nin etkileşim hacmi, yüzey topografyası ve ölçüm bölgesine duyarlı olması nedeniyle harita homojenliği doğrudan kimyasal bağ kuvveti veya daha yüksek aderans anlamına gelmez. Bu nedenle element haritalama sonuçları, SEM'de görülen granül–matris bölgelerinin bileşimini desteklemek ve kauçuk kökenli/mineral katkılı bölgelerin dağılımını görsel olarak izlemek amacıyla kullanılmıştır. Özellikle mekanik olarak yüksek performans gösteren epoksi veya PU sistemlerinde belirli bir element dağılımının doğrudan dayanım nedeni olduğu iddia edilmemiş; morfoloji, element dağılımı ve mekanik davranış yalnız bütünleşik ve nitel bir çerçevede ilişkilendirilmiştir.

4.10. ATR-FTIR Bulguları

Atık lastik kauçuğu ve kullanılan bağlayıcı sistemlerine ait ATR-FTIR spektrumları 4000–400 cm^{-1} aralığında yüzde geçirgenlik (%T) biçiminde değerlendirilmiştir. Spektrumların aynı dalga sayısı yöneliminde alt alta sunulması, karakteristik bant bölgelerinin örnekler arasında karşılaştırılmasını kolaylaştırmıştır. Spektrumlar Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de sunulmuştur. "Epoksi sertleştiricisi" kaydı kürlenmiş epoksi–kauçuk kompozitinin spektrumu olarak kabul edilmemiştir.



Şekil 4.21. Atık lastik kauçuğu, epoksi sertleştiricisi ve poliüretan ATR-FTIR spektrumlarının alt alta karşılaştırılması



Şekil 4.22. Novolak–hekzamin ve polyester ATR-FTIR spektrumlarının alt alta karşılaştırılması

Atık lastik kauçuğu spektrumunda yaklaşık 3000–2800 cm^{-1} aralığındaki alifatik C–H titreşim bölgeleri belirginleşmiştir. Polyester örneğinde yaklaşık 1700 cm^{-1} çevresindeki güçlü karbonil bölgesi ve 1300–1000 cm^{-1} aralığındaki ester ilişkili bantlar dikkat çekmiştir. Poliüretan spektrumunda N–H/C–H bölgeleri ile karbonil ve C–O/C–N titreşimlerinin bulunduğu orta dalga sayısı bölgesinde birden fazla bant gözlenmiştir. Novolak–hekzamin spektrumu fenolik/aromatik yapıyla uyumlu bantlar sergilerken epoksi sertleştiricisi farklı bir spektral parmak izi göstermiştir.

ATR-FTIR kayıtları, başlangıç malzemeleri ve bağlayıcı sistemlerinin karakteristik kimyasal parmak izlerini göstermiştir. Spektrum şiddeti ve bant farklılıkları ATR teması, yüzey durumu, bileşim ve örtüşen bantlardan etkilenebildiğinden, mevcut kayıtlardan kür derecesi veya granül–matris aderans kuvveti hesaplanmamıştır. Bu bulgular, mekanik ve SEM sonuçlarındaki farklılıkları matris kimyası bağlamında yorumlamak için kullanılmıştır. Ara yüzeyde yeni bağ oluşumunun incelenmesi için aynı malzemenin kür öncesi ve sonrası spektrumlarının uygun kontrollerle karşılaştırılması gerekmektedir.

4.11. Tokluk ve Tepe Sekant Modülünün Değerlendirilmesi

Gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinden iki tamamlayıcı mekanik parametre türetilmiştir: görünür σ–ε eğrisinden elde edilen yükleme işi yoğunluğu ve doğrusal olmayan davranış için göreli rijitlik göstergesi olarak kullanılan tepe sekant modülü. Bu iki parametre birlikte değerlendirilerek yüksek rijitlik ile yüksek tokluğun aynı mekanik özellik olmadığı gösterilmiştir.

4.11.1. Tokluk ve Enerji Yutma Kapasitesi

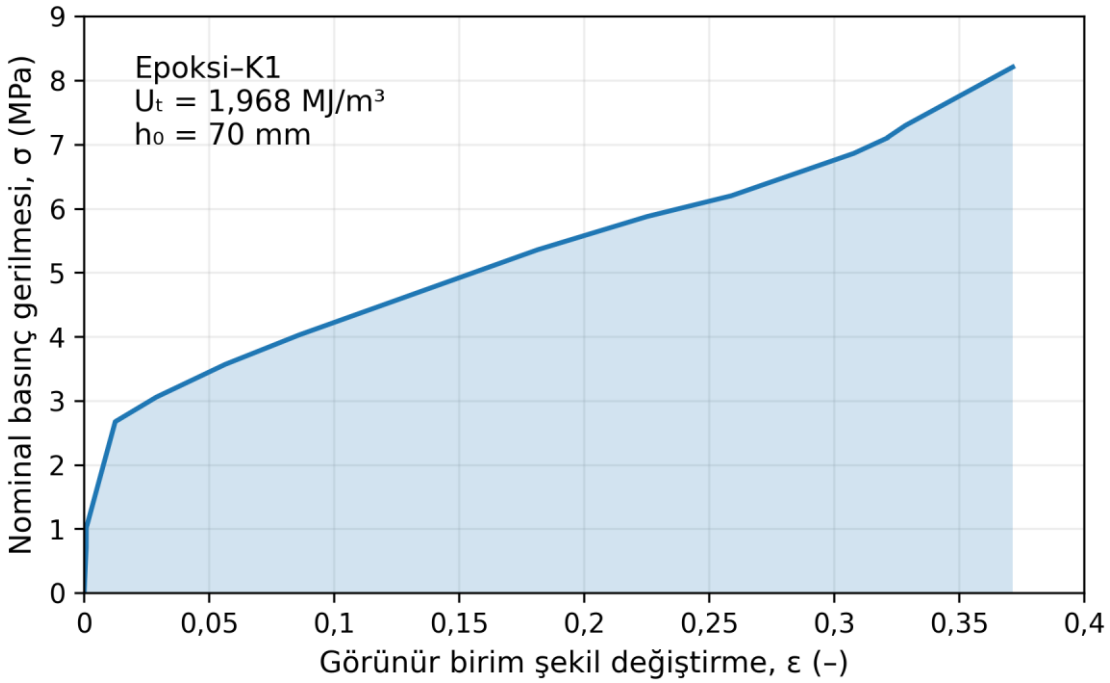
Bu bölümde U_t, Bölüm 3'te tanımlanan görünür σ–ε eğrisinin kayıt sonuna kadar altındaki karşılaştırmalı yükleme işi yoğunluğudur. "Tokluk/enerji yutma" adlandırması bu operasyonel tanımla kullanılmıştır; KIC kırılma tokluğu, histerezis enerjisi veya yalnız kalıcı olarak sönümlenen enerji anlamına gelmez. Sürekli tanım Denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$U_t = \int_0^{\varepsilon_{son}} \sigma(\varepsilon)\, d\varepsilon \tag{4.1}$$

Deneysel eğriler ayrık veri noktalarından oluştuğundan alan hesabı trapez yöntemiyle sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

$$U_t \approx \Sigma_i \left[(\sigma_i + \sigma_{i+1})/2\right] (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \tag{4.2}$$

Gerilme MPa, birim şekil değiştirme boyutsuz olduğundan hesaplanan alan MJ/m³ cinsinden ifade edilmiştir. İntegrasyon her eğrinin kayıtlı son noktasına kadar sürdürülmüştür. Kayıt sonu deformasyonları yaklaşık 0,084–0,512 arasında değiştiğinden Tablo 4.8'deki alanlar aynı deformasyon sınırına ait değildir. Sonuçlar, kayıt sınırları ve cihaz deplasmanının etkisiyle birlikte karşılaştırılmıştır. Alan tanımı Şekil 4.23'te, ana mekanik özet Tablo 4.7'de, eğri parametreleri Tablo 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Gerilme–birim şekil değiştirme eğrisi altında kalan görünür yükleme işi alanı

Tablo 4.7. Bağlayıcı sistemlerinde öne çıkan nihai mekanik ve UPV sonuçlarının özeti

Sistem	Öne çıkan granül düzeni	Basınç (MPa)	Eğilme (MPa)	UPV (m/s)	Kısa değerlendirme
Epoksi	K1 – İnce	8,21	2,21	1044	Yüksek mukavemet ve en yüksek toplam enerji yutma
Poliüretan	K4 – Dörtlü	6,29	1,94	1153	Yüksek deformasyon kapasitesi ve dengeli mekanik/UPV davranışı
Novolak–hekzamin	K2 – Orta	6,29	1,38	1337	Orta granülde dengeli mekanik performans
Polyester	K4 basınç/UPV; K1 eğilme	1,35	0,24	260	Düşük mekanik düzey; granül etkisi sınırlı

Tablo 4.8. σ–ε eğrilerinden elde edilen maksimum gerilme, şekil değiştirme, tepe sekant modülü ve tokluk değerleri

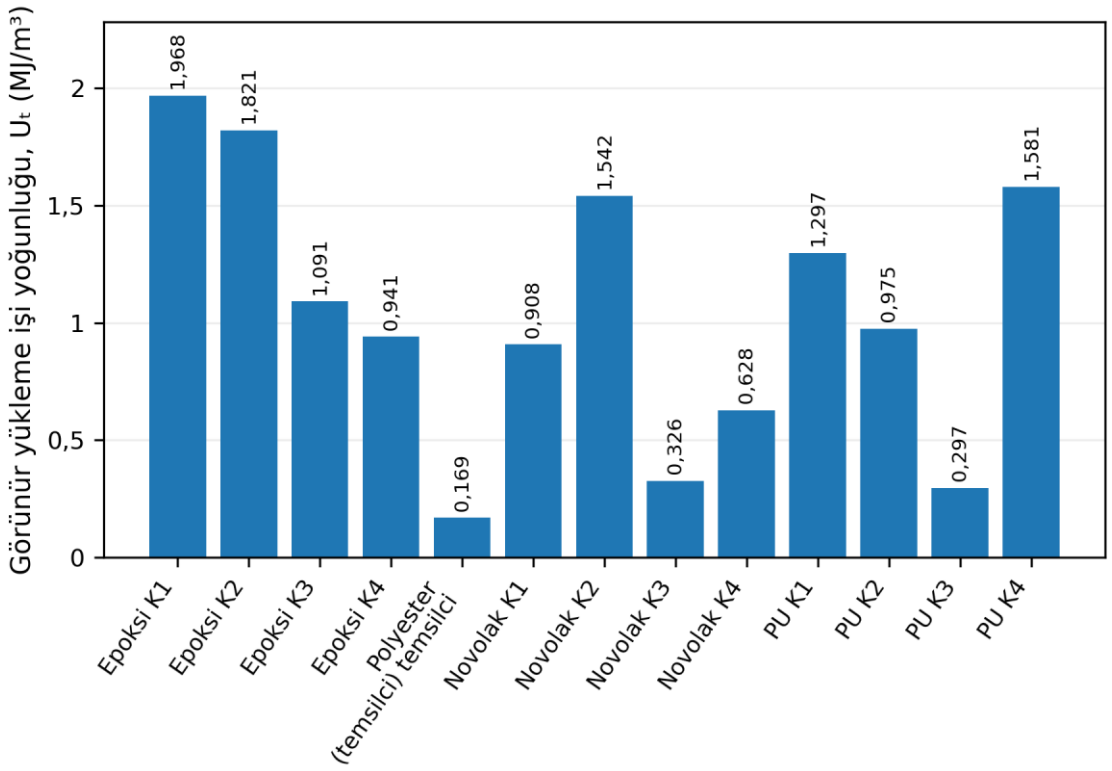
Seri	σ_{maks} (MPa)	ε_{tepe} (–)	ε_{son} (–)	$E_{sec,p}$ (MPa)	U_t (MJ/m³)
Epoksi – İnce	8,210	0,371	0,371	22,104	1,968
Epoksi – Orta	7,000	0,371	0,371	18,846	1,821
Epoksi – İnce+Orta	5,550	0,314	0,314	17,659	1,091
Epoksi – Dörtlü	3,540	0,235	0,312	15,085	0,941
Polyester	1,350	0,214	0,214	6,300	0,169
Novolak – İnce	2,610	0,271	0,512	9,620	0,908
Novolak – Orta	6,292	0,339	0,339	18,551	1,542
Novolak – İnce+Orta	4,629	0,084	0,084	55,086	0,326
Novolak – Dörtlü	2,910	0,266	0,266	10,937	0,628
PU – İnce	5,000	0,500	0,500	10,000	1,297
PU – Orta	3,800	0,443	0,443	8,581	0,975
PU – İnce+Orta	2,791	0,201	0,201	13,887	0,297
PU – Dörtlü	6,290	0,491	0,491	12,811	1,581

Epoksi–K2 için tepe sekant modülü, σ_{maks}=7,000 MPa ve ε_{tepe}=0,371 değerleri kullanılarak 18,846 MPa olarak hesaplanmıştır. U_t=1,821 MJ/m³ değeri kayıtlı eğri alanını ifade etmektedir.

Not: Esec,p görünür tepe sekant modülünü, U_t kayıt sonuna kadar hesaplanan görünür yükleme işi yoğunluğunu göstermektedir. Hesaplarda h_0 = 70 mm kullanılmıştır. Tablodaki görünür birim şekil değiştirmeler gösterim amacıyla üç ondalık basamağa yuvarlanmıştır; modül ve alan hesapları yuvarlatılmamış kayıt değerlerine dayandırılmıştır. Maksimum gerilmenin kayıt sonuna karşılık geldiği serilerde nihai kırılma sınırı belirlenmiş sayılmamıştır.

Mevcut kayıt aralıkları içinde en yüksek alan Epoksi–K1'de 1,968 MJ/m³'tür. Bunu Epoksi–K2 (1,821 MJ/m³), PU–K4 (1,581 MJ/m³) ve Novolak–K2 (1,542 MJ/m³) izlemiştir. Bu sıralama yalnız maksimum gerilmenin değil, kayıt boyunca izlenen gerilme yolunun ve integrasyon aralığının ortak sonucudur. Novolak–K3 alanının 0,326 MJ/m³ olması, ε≈0,084'de sonlanan daha kısa kayıtla birlikte okunmuştur. Alanlar Şekil 4.24'te karşılaştırılmıştır.

Enerji alanı tek bir tepe gerilmeden veya tek başına yüksek deformasyondan belirlenemez. Bununla birlikte farklı kayıt sonu deformasyonlarında hesaplanan alanlardan koşulsuz bir malzeme tokluğu sıralaması çıkarmak da uygun değildir. Bu tezdeki karşılaştırma kayıt kapsamıyla sınırlandırılmıştır. Ortak bir deformasyon sınırına kadar integrasyon, tepe öncesi/sonrası alanların ayrılması ve boşaltma–yeniden yükleme deneyleri, yükleme işi ile gerçek enerji sönümlemesini ayırmak için gerekli tamamlayıcı değerlendirmelerdir.



Şekil 4.24. Numunelerin kayıt sonuna kadar hesaplanan görünür yükleme işi yoğunluklarının karşılaştırılması

4.11.2. Tepe Sekant Modülü ve Elastisite Modülü Açısından Değerlendirme

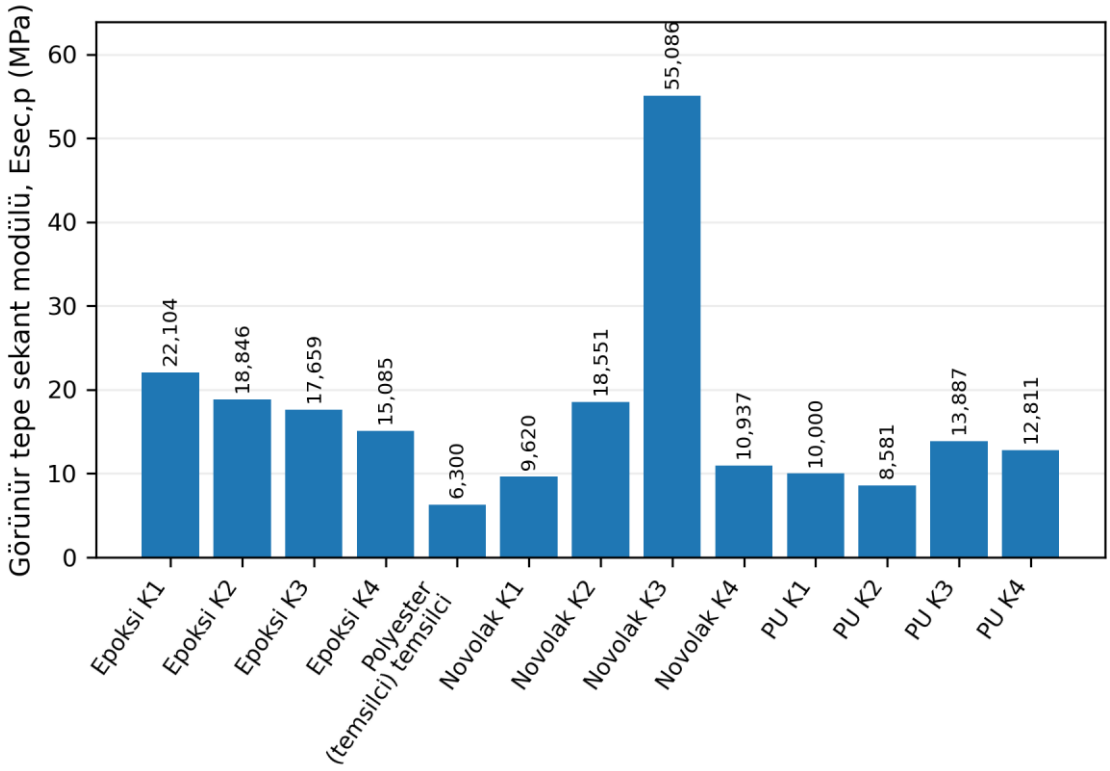
Gerilme–birim şekil değiştirme eğrileri belirgin doğrusal olmayan karakter gösterdiğinden ve başlangıçtaki çok küçük şekil değiştirme bölgesinde bütün seriler için eşit yoğunlukta veri noktası bulunmadığından klasik Young elastisite modülü bütün numuneler için güvenilir ve doğrudan karşılaştırılabilir bir parametre olarak raporlanmamıştır. Bunun yerine her eğride orijin ile maksimum gerilme noktası arasındaki sekantın eğimi "tepe sekant modülü" olarak tanımlanmıştır.

$$E_{sec,p} = \frac{\sigma_{maks}}{\varepsilon_{tepe}} \tag{4.3}$$

Tepe sekant modülü klasik Young modülünün yerine geçen bir malzeme sabiti olarak değil, aynı veri işleme yaklaşımı içinde numunelerin göreli rijitlik eğilimini karşılaştıran bir gösterge olarak kullanılmıştır. Bu ayrım, kauçuk granül içeren, yüksek deformasyon gösterebilen ve başlangıçtan itibaren doğrusal olmayan davranış sergileyen kompozitlerin yorumlanmasında önemlidir.

En yüksek $E_{sec,p}$ değeri 55,086 MPa ile Novolak–İnce+Orta serisinde belirlenmiştir. Bu seriyi 22,104 MPa ile Epoksi–İnce, 18,846 MPa ile Epoksi–Orta ve 18,551 MPa ile Novolak–Orta

izlemiştir. Poliüretan serilerinde tepe sekant modülleri 8,581–13,887 MPa aralığında kalırken polyester temsilci numunesinde 6,300 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar poliüretanın düşük/orta göreli rijitliğine karşın geniş görünür deformasyon aralığına, Novolak–İnce+Orta serisinin ise yüksek göreli rijitliğine karşın daha düşük kayıt sonu deformasyonuyla temsil edildiğini göstermiştir. Tepe sekant modülleri Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Numunelerin görünür tepe sekant modülü değerlerinin karşılaştırılması

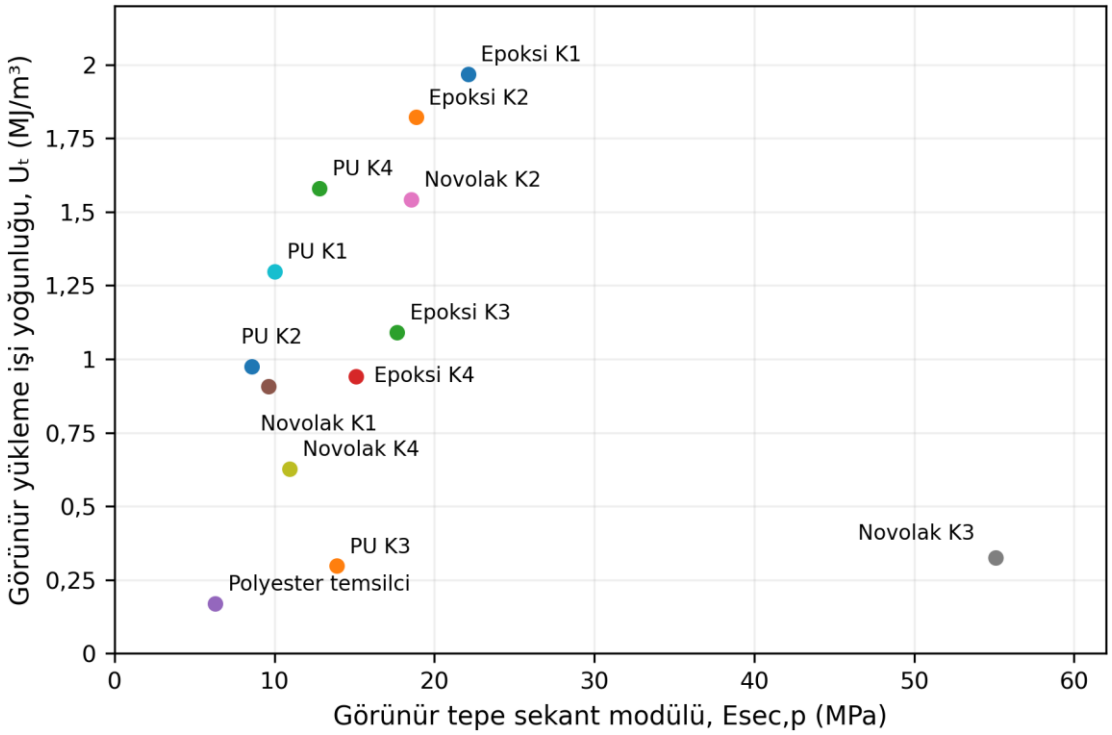
Tepe sekant modülü, maksimum gerilmenin bu noktadaki görünür birim şekil değiştirmeye oranıdır ve paydadaki deformasyona duyarlıdır. Novolak–K3 için 4,629 MPa maksimum gerilme, yaklaşık 0,084 tepe birim şekil değiştirmesi ve 55,086 MPa görünür tepe sekant modülü elde edilmiştir. Tabloda yuvarlanmış ε değerinin kullanılması, yuvarlatılmamış kayıtla hesaplanan modülden küçük bir fark oluşturabilir. Bu parametre, başlangıçtaki küçük gerinim bölgesinde ekstansometreyle belirlenen Young modülü değildir; cihaz ve temas etkileri nedeniyle karşılaştırmalı görünür rijitlik olarak kullanılmıştır.

4.11.3. Rijitlik–Tokluk İlişkisinin Birlikte Değerlendirilmesi

Tepe sekant modülü ile tokluk birlikte değerlendirildiğinde iki parametre arasında zorunlu ve tek yönlü bir bağıntı bulunmadığı görülmüştür. Novolak–İnce+Orta serisi 55,086 MPa ile en

yüksek tepe sekant modülünü göstermesine karşın yalnız 0,326 MJ/m³ tokluk değerine ulaşmıştır. Buna karşılık Epoksi–İnce serisi 22,104 MPa tepe sekant modülü ile daha düşük bir rijitlik göstergesine sahip olmasına rağmen 1,968 MJ/m³ ile bütün seriler içindeki en yüksek enerji yutma kapasitesini vermiştir. PU–Dörtlü serisi de 12,811 MPa düzeyindeki daha düşük tepe sekant modülüne karşın 1,581 MJ/m³ tokluk göstermiştir.

Bu karşılaştırma, kayıtlı maksimuma göre hesaplanan sekant eğimi ile kayıt sonuna kadar integre edilen alanın farklı büyüklükler olduğunu göstermiştir. Alanlar farklı son deformasyonlara ait olduğundan gözlenen ayrışma malzemenin tek başına içsel tokluğu veya dinamik sönümleme davranışının ölçümü olarak genellenmemiştir. İki göstergenin birlikte gösterimi Şekil 4.26'da sunulmuştur.



Şekil 4.26. Görünür tepe sekant modülü ile görünür yükleme işi yoğunluğu arasındaki ilişki

Rijitlik–tokluk karşılaştırması, hedef uygulamaya göre performans ölçütünün değişmesi gerektiğini göstermektedir. Yüksek göreli rijitlik boyutsal kararlılığın veya düşük deformasyonun önemli olduğu bir uygulamada avantaj sağlayabilirken, darbe/titreşim sönümleme veya enerji soğurma beklenen bir üründe daha geniş deformasyon aralığı ve yüksek eğri alanı öncelik kazanabilir. Bu nedenle Novolak–İnce+Orta serisinin yüksek $E_{sec,p}$ değeri tek başına üstünlük göstergesi olarak değerlendirilmemiş; Epoksi–İnce ve PU–Dörtlü serilerinin daha yüksek enerji yutma değerleriyle birlikte ele alınmıştır. Böylece mekanik seçim kriteri tek bir modül veya

mukavemet değerinden çok, hedef işlev için gerekli rijitlik–deformasyon–enerji dengesine dayandırılmıştır.

4.12. Mekanik ve Mikroyapısal Bulguların Bütünleşik Değerlendirilmesi

Mekanik deneyler, UPV, σ–ε davranışı, SEM/EDS ve ATR-FTIR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde dört bağlayıcı sisteminin birbirinden farklı performans profilleri oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle sonuçların yalnız "en yüksek basınç mukavemeti" üzerinden sıralanması, malzemenin deformasyon, enerji yutma ve mikroyapısal davranışını göz ardı etmektedir. Bütünleşik değerlendirme Tablo 4.9'da özetlenmiştir.

Tablo 4.9. Bağlayıcı sistemlerinin mekanik, σ–ε/enerji yutma ve mikroyapısal açıdan bütünleşik özeti

Sistem	Mekanik açıdan öne çıkan düzen	Basınç / eğilme (MPa)	σ–ε / enerji özeti[1]	Mikroyapısal ve bütünleşik yorum
Epoksi	K1 – İnce	8,21 / 2,21	U_t=1,968; $E_{sec,p}$=22,104	Pürüzlü/karmaşık kırılma; yüksek mekanik ve enerji performansı
Poliüretan	K4 – Dörtlü	6,29 / 1,94	$\varepsilon_{tepe}\approx$0,491; U_t=1,581	Görece sürekli matris; yüksek deformasyon ve dengeli performans
Novolak–hekzamin	K2 – Orta	6,29 / 1,38	U_t=1,542; $E_{sec,p}$=18,551	Granüler/kümelenmiş morfoloji; orta granülde en yüksek mekanik değerler
Polyester	K4 basınç / K1 eğilme	1,35 (K4) / 0,24 (K1)	Temsilci eğri (K kodu yok); U_t=0,169; $E_{sec,p}$=6,300	Heterojen/açık boşluklu; mevcut formülasyonda düşük mekanik performans

U_t birimi MJ/m³, $E_{sec,p}$ birimi MPa'dır. SEM gözlemleri bağlayıcı sistemini temsil eder; K kodlarıyla tam eşlenik değildir. Polyester maksimumları farklı granül düzenlerine aittir.

Epoksi sistemi, K1 ince granül grubunda 8,21 MPa basınç ve 2,21 MPa eğilme mukavemeti ile nihai mekanik matrisin en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Aynı seri 1,968 MJ/m³ ile tüm σ–ε serileri içindeki en yüksek toplam enerji alanını vermiştir. Bununla birlikte epoksi–K4 grubunun en yüksek UPV değerine sahip olması, iç yapısal dalga iletim sürekliliği ile maksimum mukavemetin aynı granül düzeninde oluşmasının zorunlu olmadığını göstermiştir.

Poliüretan sistemi K4 dörtlü granül grubunda basınç, eğilme ve UPV bakımından kendi sisteminin en yüksek sonuçlarını birlikte vermiştir. σ–ε eğrisinde $\varepsilon_{tepe}\approx$0,491 düzeyine ulaşması ve 1,581 MJ/m³ enerji yutması, poliüretanın öne çıkan özelliğinin yalnız mukavemet değil geniş deformasyon aralığı olduğunu göstermiştir. Bu özellik, darbe ve titreşim sönümleme gibi deformasyon kapasitesinin önemli olduğu işlevler bakımından ileri araştırma potansiyeli sunmakta;

ancak doğrudan uygulama uygunluğu için çevrimsel yükleme, yorulma ve uzun süreli dayanıklılık deneyleri gerekmektedir.

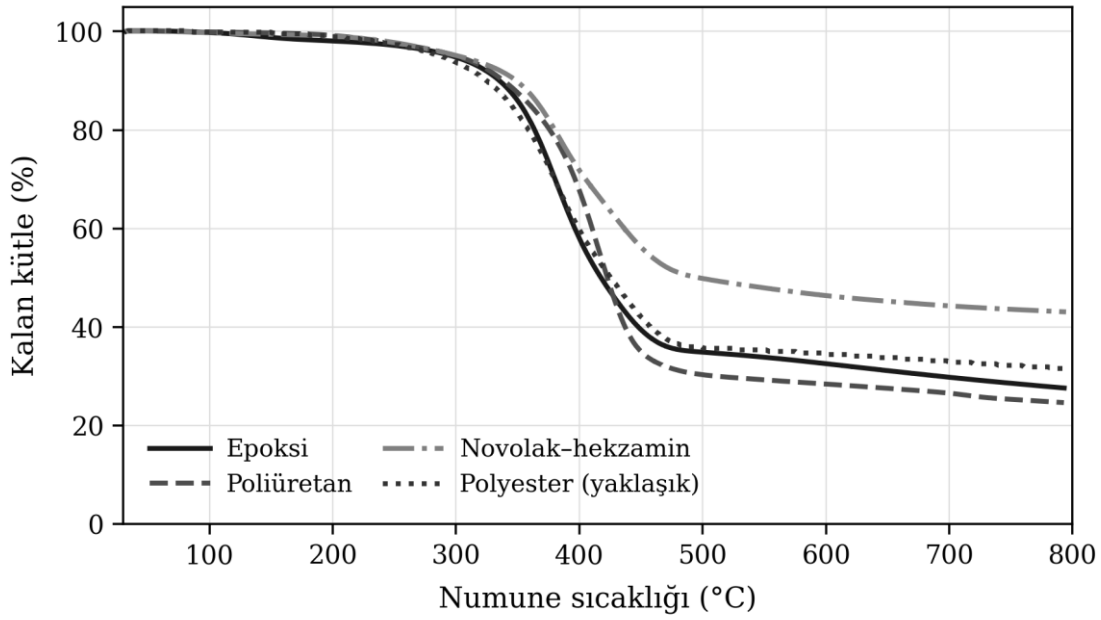
Novolak–hekzamin sistemi mekanik olarak K2 orta granül grubunda öne çıkmıştır. Buna karşılık K3 ince+orta seri 55,086 MPa ile tüm σ–ε serileri içindeki en yüksek tepe sekant modülünü göstermesine rağmen tokluğu 0,326 MJ/m³'te kalmıştır. Bu durum, aynı bağlayıcı sisteminde dahi granül düzeninin rijitlik ve enerji yutma dengesini farklı yönlerde değiştirebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, novolak–hekzamin numunelerine etüvde 160 °C'de 24 saat termal kür uygulanan bu tez koşulları için geçerlidir; novolak–hekzamin sisteminin genel optimum performansı olarak yorumlanmamıştır.

Polyester sistemi mevcut formülasyonuyla basınç, eğilme, UPV, tokluk ve tepe sekant modülü bakımından daha düşük düzeyde kalmıştır. SEM'de gözlenen heterojen ve açık boşluklu bölgeler bu sonuçlarla aynı yönde değerlendirilmiştir. Granül düzenleri arasında basınç mukavemeti farkının dar olması, performans iyileştirmesinde önceliğin yalnız granülometri optimizasyonundan ziyade granül–polyester ara yüzeyi ve matris sürekliliğinin geliştirilmesi olduğunu düşündürmüştür.

Bu çoklu veri setinin en önemli yönü, farklı deneylerin birbirini 'doğrulayan eşdeğer ölçümler' olarak değil, farklı özellikleri açıklayan tamamlayıcı kanıt katmanları olarak kullanılmasıdır. UPV iç yapısal dalga iletimini, SEM/EDS lokal morfoloji ve bileşimi, ATR-FTIR kimyasal parmak izini, σ–ε türevleri ise deformasyon–rijitlik–enerji karakterini açıklamaktadır. Bu nedenle bir deneydeki maksimumun başka bir deneyde aynı kombinasyonda tekrarlanmaması bir tutarsızlık değil, malzemenin çok boyutlu performansının doğal sonucudur. Literatürde de atık lastik-polimer kompozitlerinin matris, granülometri, ara yüzey ve işleme koşullarına bağlı çoklu özellik dengesiyle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Ramarad vd., 2015; Hejna vd., 2020; Yan vd., 2026).

4.13. Termogravimetrik Analiz (TGA/DTG) Bulguları ve Bütünleşik Değerlendirme

TGA/DTG bulguları dört bağlayıcı sisteminin temsilci numunelerinde kütle kaybı eşikleri, en yüksek kayıp hızının sıcaklığı ve kalan kütle üzerinden karşılaştırılmıştır. Epoksi, poliüretan ve novolak–hekzamin sayısal ham kayıtlardan; polyester ise cihaz grafiğinin sayısallaştırılmasından değerlendirilmiştir. Deney koşulları ve ortak hesaplama yöntemi Bölüm 3.8'de açıklanmıştır. Normalize kütle eğrileri Şekil 4.27'de, DTG eğrileri Şekil 4.28'de; temel göstergeler, %10–%100 kayıp eşikleri ve kalıntı miktarları sırasıyla Tablo 4.10, 4.11 ve 4.12'de verilmiştir. Sonuçlar bütün K1–K4 düzenlerine ait tam bir 4×4 termal matris olarak yorumlanmamıştır.



Şekil 4.27. Bağlayıcı sistemlerinin normalize edilmiş TGA eğrileri

Tablo 4.10. TGA/DTG değerlendirmesinden elde edilen temel ısıl göstergeler

Bağlayıcı sistemi	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	DTG T_{max} (°C)	Son kalıntı (%)	Veri niteliği
Epoksi	297,1	335,3	381,0	27,6	Ham sayısal veri
Poliüretan	300,7	338,7	417,0	24,7	Ham sayısal veri
Novolak–hekzamin	301,9	348,8	385,5	43,1	Ham sayısal veri
Polyester	≈288	≈325	≈387	≈31,6	Grafikten yaklaşık

Not: İlk kaydedilen kütle %100 alınmıştır. T_5 ve T_{10} sırasıyla %5 ve %10 kütle kaybı eşikleridir. DTG T_{max} ortak −dR/dT işleminden elde edilen tepe sıcaklığıdır. Son kalıntı her eğrinin kayıt sonuna aittir; gerçek son numune sıcaklıkları Tablo 4.12'de verilmiştir. Polyesterin bütün değerleri grafik çözünürlüğüyle sınırlı yaklaşık sonuçlardır.

T_{50} epoksi için 417,7 °C, novolak–hekzamin için 496,9 °C, poliüretan için 422,7 °C ve polyester için yaklaşık 425 °C olarak belirlenmiştir. Novolak–hekzamin %60, polyester %70 kütle kaybına ulaşmamıştır. Epoksi ve poliüretanda %70 kayıp sırasıyla 693,3 ve 512,8 °C'de görülmüş; hiçbir numunede %80, %90 veya %100 kütle kaybı kaydedilmemiştir. Dolayısıyla bu kayıtlar üzerinden tam kütle kaybına ait bir sıcaklık tanımlanmamıştır. Kütle kaybı eşiklerine karşılık gelen sıcaklıklar Tablo 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11. Temsilci numunelerde %10–%100 kütle kaybı eşiklerine karşılık gelen sıcaklıklar

Kütle kaybı (%)	Kalan kütle (%)	Epoksi (°C)	Novolak–hekzamin (°C)	Poliüretan (°C)	Polyester (°C)
10	90	335,3	348,8	338,7	≈325
20	80	363,8	380,1	376,1	≈359
30	70	380,3	405,2	396,6	≈380
40	60	396,4	436,6	410,5	≈400
50	50	417,7	496,9	422,7	≈425
60	40	447,9	—	437,2	≈458
70	30	693,3	—	512,8	—
80	20	—	—	—	—
90	10	—	—	—	—
100	0	—	—	—	—

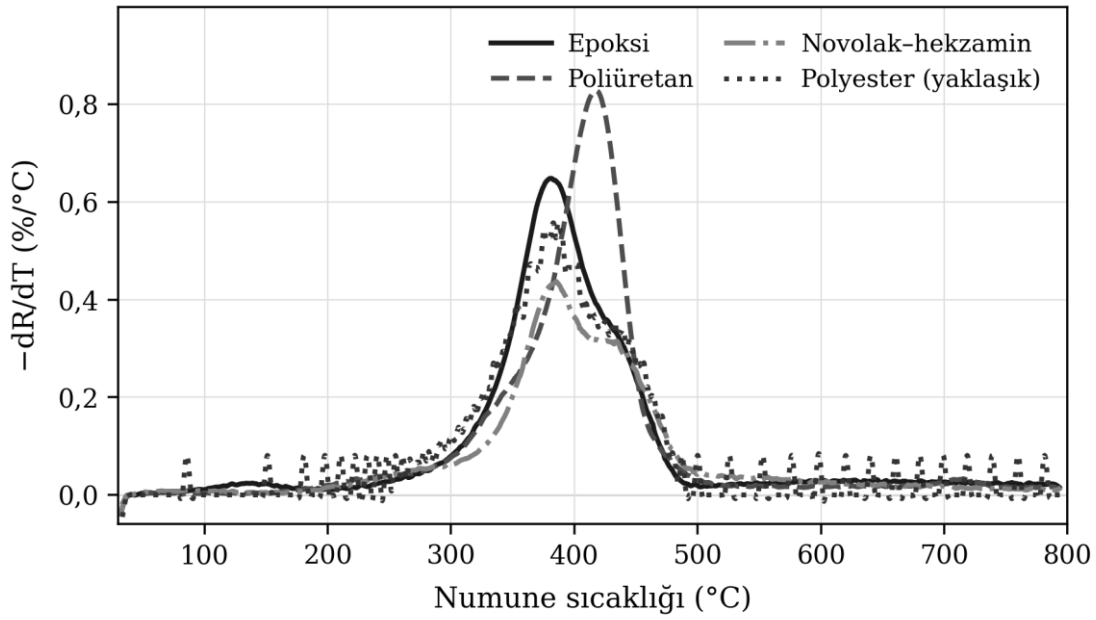
Not: Sıcaklıklar başlangıç kütlesine göre belirtilen kaybın ilk kez gerçekleştiği noktadan doğrusal enterpolasyonla elde edilmiştir. "—", ilgili eşik değerinin kaydedilen deney aralığında görülmediğini ifade eder; sıfır sıcaklık veya sonsuz ısıl dayanım anlamına gelmez. ≈: Grafikten yaklaşık.

Tablo 4.12. DTG tepe sıcaklığındaki ve deney sonundaki kalan kütleler

Bağlayıcı sistemi	DTG T_{max} (°C)	T_{max}'ta kalan kütle (%) / (mg)	Son numune sıcaklığı (°C)	Son kalan kütle (%) / (mg)
Epoksi	381,0	69,6 / 7,104	793,5	27,6 / 2,822
Poliüretan	417,0	54,7 / 6,758	793,0	24,7 / 3,050
Novolak–hekzamin	385,5	77,7 / 8,165	794,8	43,1 / 4,528
Polyester	≈387	≈66,2 / ≈7,45	≈795	≈31,6 / ≈3,56

Not: Yüzde değerleri her numunenin kendi ilk kayıt kütlesine göre normalize edilmiştir; mutlak mg miktarları başlangıç kütlesinden de etkilenir. DTG tepesindeki kütle ile deney sonu kalıntısı farklı büyüklüklerdir. Kalan kütle oranı, korunmuş mukavemet oranı değildir.

T_5 değerleri epoksi, poliüretan ve novolak–hekzamin için sırasıyla 297,1; 300,7 ve 301,9 °C, polyester için yaklaşık 288 °C'dir. T_{10} bakımından novolak–hekzamin 348,8 °C ile en yüksek değeri vermiş; poliüretan 338,7 °C, epoksi 335,3 °C ve polyester yaklaşık 325 °C düzeyinde kalmıştır. En yüksek DTG T_{max} ise 417,0 °C ile poliüretanda belirlenmiştir; diğer tepe sıcaklıkları epoksi için 381,0 °C, novolak–hekzamin için 385,5 °C ve polyester için yaklaşık 387 °C'dir. Bu sıcaklıklarda kalan kütle epokside %69,6, novolak–hekzaminde %77,7, poliüretanda %54,7 ve polyesterde yaklaşık %66,2'dir (Tablo 4.12). Tepe sıcaklığı kütlenin tamamen yok olduğu sıcaklık değildir.



Şekil 4.28. Bağlayıcı sistemlerinin DTG eğrileri

Novolak–hekzamin temsilci numunesinin yaklaşık %43,1 ile en yüksek son kalıntıyı vermesi, fenolik esaslı sistemlerin karbonlu kalıntı oluşturma eğilimiyle uyumlu bir gözlemdir (Derakhshandeh vd., 2008; Hejna vd., 2020). Çalışmada novolak–hekzamin numunelerine etüvde 160 °C'de 24 saat termal kür uygulanmıştır. Bununla birlikte kür derecesi bağımsız bir yöntemle nicel olarak doğrulanmadığından, yüksek kalıntı oranı doğrudan yangın dayanımı veya optimum kürlenme kanıtı olarak yorumlanmamıştır.

Epoksi sisteminin K1 ince granül grubunda en yüksek basınç (8,21 MPa), eğilme (2,21 MPa) ve enerji yutma (1,968 MJ/m³) değerlerini vermesine rağmen T_{10} ve DTG T_{max} bakımından termal serinin en yüksek değerine ulaşmaması, mekanik performans üstünlüğü ile termal bozunma göstergelerinin eş anlamlı olmadığını ortaya koymuştur. Geri dönüştürülmüş lastik içeren farklı epoksi sistemlerinde matris kimyasının mekanik ve termal özellikleri birlikte değiştirebildiği Türkben vd. (2023) tarafından da gösterilmiştir.

Poliüretan temsilci TGA kaydında DTG T_{max} 417,0 °C, son kalıntı %24,7 olarak belirlenmiştir. Mekanik deneylerde PU–K4 kaydı geniş görünür deformasyon ve 1,581 MJ/m³ alan vermiştir. Ancak TGA örneğinin K kodu bilinmediğinden bu iki sonuç aynı fiziksel numunenin veya kesin olarak aynı formülasyonun eşlenik performansı olarak birleştirilmemiştir. Bunlar yalnız poliüretan bağlayıcı sistemi düzeyinde tamamlayıcı bulgular olarak sunulmuştur. Literatürde benzer çoklu karakterizasyon yaklaşımları bulunmaktadır (Revelo vd., 2021; Semlali Aouragh Hassani vd., 2020).

Polyester sistemi, mekanik deneylerde 1,22–1,35 MPa basınç, 0,20–0,24 MPa eğilme ve temsilci σ–ε serisinde 0,169 MJ/m³ enerji yutma ile daha düşük düzeyde kalmış; SEM'de heterojen

ve açık boşluklu bölgeler gözlenmiştir. TGA'da yaklaşık T_5 ve T_{10} değerlerinin de diğer üç sisteme göre daha düşük olması aynı malzeme sisteminde mekanik ve ısıl sınırlılıkların birlikte bulunduğunu göstermiş, ancak bu eşzamanlılık nedensel bir bağ olarak yorumlanmamıştır. Polyester-atık lastik kompozitlerinde ara yüzey uyumsuzluğu ve morfolojik süreksizliklerin mekanik davranışı sınırlayabildiği Yıldızhan vd. (2022) tarafından; lastik miktarı ve parçacık özelliklerinin polyester esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel/ısıl özelliklerini etkilediği Abu-Jdayil vd. (2016a, 2016b) ile Akın ve Polat (2022) tarafından bildirilmiştir.

TGA/DTG verileri mekanik, UPV, SEM/EDS, ATR-FTIR ve ısıl iletkenlik sonuçlarını tamamlayan bir karakterizasyon verisi sağlamıştır. Kütle kaybı göstergelerinden malzemenin doğrudan taşıma gücünü kaybettiği sıcaklık çıkarılmamıştır. Sıcaklıkla değişen mekanik davranış için DSC/DMA ve sıcaklık altında mekanik deneyler, yangın tepkisi için ise uygun yangın deneyleri ayrıca önerilmiştir.

TGA/DTG göstergelerinin her biri ısıl bozunmanın farklı bir yönünü temsil etmektedir. T_5 ve T_{10} belirli erken kütle kaybı eşiklerini, T_{50} başlangıç kütlesinin yarısının kaybedildiği sıcaklığı, DTG T_{max} ana bozunma hızının en yüksek olduğu sıcaklığı, son kalıntı ise yüksek sıcaklık sonunda uçucu olmayan/karbonlaşmış ve inorganik bileşenlerin toplamını yansıtmaktadır. Bu nedenle novolak–hekzaminin yüksek T_{10} ve kalıntı oranı ile poliüretanın daha yüksek DTG T_{max} değeri birbirine zıt sonuçlar değildir; farklı termal olayları göstermektedir. Termoset–WTR sistemlerinde matris kimyası, kauçuk bileşimi ve çapraz bağ yapısının TGA eğrisi ve kalıntı üzerinde etkili olduğu daha önce bildirilmiştir (Derakhshandeh vd., 2008; Hejna vd., 2020; Türkben vd., 2023).

Mekanik ve termogravimetrik sonuçlar farklı sıralamalar vermiştir: epoksi–K1 mekanik dayanım ve kayıtlı enerji alanında, novolak–hekzamin T_{10} ve kalıntı oranında, poliüretan ise DTG T_{max} bakımından öne çıkmıştır. Olszewski vd. (2022), atık lastik içeren esnek poliüretan köpüklerde formülasyon değişikliklerinin mekanik özellikleri iyileştirirken ısıl bozunma başlangıcını düşürebildiğini göstermiştir. Köpük yapısı ve lastik modifikasyonu mevcut kompozitlerden farklı olmakla birlikte bu bulgu, mekanik ve ısıl bozunma göstergelerinin ayrı değerlendirilmesini desteklemektedir. İnert azot atmosferindeki bu sonuçlar yangın dayanımı veya alev geciktiricilik göstergesi olarak kullanılmamıştır.

4.14. Isıl İletkenlik Bulguları

K4 dörtlü karışımından üretilen numunelerin 20 °C ortalama numune sıcaklığında elde edilen ısıl iletkenlik sonuçları Tablo 4.13'te verilmiştir. İncelenen raporlarda λ değerleri 0,1486–0,1998 W/(m·K) aralığında değişmiştir. En düşük değer poliüretan, en yüksek değer ise novolak–hekzamin sisteminde elde edilmiştir. Raporlanan değerlerin küçükten büyüğe sıralaması poliüretan < polyester < epoksi < novolak–hekzamin şeklinde belirlenmiştir. Poliüretanın λ değeri novolak–hekzamininkinden yaklaşık %25,6 daha düşük bulunmuştur. Bu fark ısı iletim katsayısının

karşılaştırmasını ifade etmiş; aynı oranda yapı ölçeğinde enerji tasarrufu veya istatistiksel olarak doğrulanmış bir üstünlük şeklinde yorumlanmamıştır.

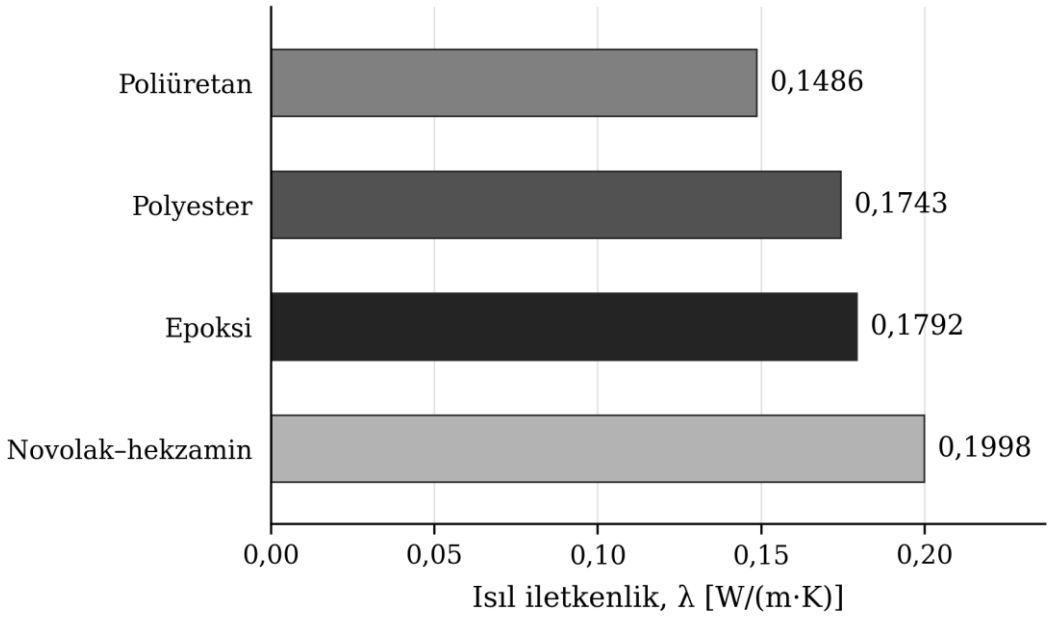
Tablo 4.13. K4 kompozitlerinin ısıl iletkenlik katsayıları ve hesaplanan katman dirençleri

K4 kompoziti	**Ölçülen kalınlık d (mm)**	**λ [W/(m·K)]**	**R_λ Raporlanan d için (m²·K/W)**	**R_{25} 25 mm için hesaplanan (m²·K/W)**
Poliüretan–K4	29,0	0,1486	0,1952	0,1682
Polyester–K4	25,7	0,1743	0,1474	0,1434
Epoksi–K4	23,8	0,1792	0,1328	0,1395
Novolak–hekzamin–K4	23,1	0,1998	0,1156	0,1251

Not: Tüm numuneler K4 dörtlü granül karışımıdır. Ölçümler Thermtest HFM-100 cihazıyla 20 °C ortalama numune sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. λ ve d laboratuvar raporlarından alınmıştır. R_λ raporlanan kalınlık, R_{25} ortak 25 mm referans kalınlık için hesaplanmıştır; dirençler yalnız kompozit katmana aittir. Her bağlayıcı için tek K4 sonucu bulunduğundan ve bağımsız tekrar/numuneye özgü ölçüm belirsizliği sunulmadığından karşılaştırma betimleyicidir.

Isıl iletkenlik katsayılarının karşılaştırması Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Poliüretan–K4 numunesinin λ değeri polyesterden yaklaşık %14,7, epoksiden %17,1 ve novolak–hekzaminden %25,6 düşüktür. Tablo 4.13'teki R_λ değerlerinin karşılaştırılmasında numune kalınlıklarının 23,1–29,0 mm arasında değiştiği de dikkate alınmalıdır; yüksek R_λ yalnız bağlayıcı kimyasına bağlanamaz.

Ortak 25 mm referans kalınlık için hesaplanan R_{25} değerleri 0,1251–0,1682 m²·K/W aralığında değişmiştir. En yüksek hesaplanmış direnç poliüretan, en düşük değer novolak–hekzamin–K4 grubunda elde edilmiştir. Sabit referans kalınlıkta direnç doğrudan λ'nın tersine bağlı olduğundan, bu sıralama ısıl iletkenlik sonuçlarının hesaplamalı karşılığı olarak değerlendirilmiş ve bağımsız ikinci bir deneysel bulgu sayılmamıştır.



Şekil 4.29. K4 kompozitlerinin ısıl iletkenlik katsayılarının karşılaştırılması

Isıl iletkenliğin düşük olması, aynı kalınlık ve sıcaklık farkında iletim yoluyla gerçekleşen ısı geçişinin azalması bakımından değerlendirilmiştir. Cimbola vd. (2024), atık lastik granülü ve poliüretan bağlayıcı içeren panellerde 0,1–0,2 W/(m·K) aralığında ısıl iletkenlik bildirmiştir. Aynı çalışmada, aynı bağlayıcı/kauçuk oranıyla karşılaştırılan gruplarda ince granüllü panellerin daha yüksek porozite, daha düşük elastisite modülü ve daha düşük ısıl iletkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Mevcut sonuçların bu aralıkta bulunması benzer malzeme ailesiyle karşılaştırma olanağı sağlamıştır. Bununla birlikte bu tezde ısıl ölçüm yapılan numunelerin yoğunluğu ve toplam boşluk oranı eşlenik olarak belirlenmediğinden, bağlayıcılar arasındaki λ farkı doğrudan poroziteye veya yoğunluğa bağlanmamıştır.

Dębska vd. (2019), atık lastik agregası içeren epoksi kompozitlerde ısıl iletkenliği mekanik dayanımla birlikte incelemiş ve yaklaşık 0,11–0,20 W/(m·K) aralığında değerler bildirmiştir. Bu aralık mevcut sonuçların benzer bir malzeme sistemi içinde değerlendirilmesini desteklemekle birlikte, farklı karışım oranları ve deney koşulları nedeniyle sayısal eşdeğerlik olarak yorumlanmamıştır.

SEM bulguları, mekanik ve ısıl davranışı etkileyebilecek boşluk yapısı, mikroçatlaklar ve ara yüz sürekliliği bakımından birlikte değerlendirilmiştir. Benzer bileşim, nem ve sıcaklık koşullarında boşlukların azalması ve katı fazlar arasındaki temasın iyileşmesi yük aktarımını destekleyebilmekle birlikte, ısı iletim yollarını da artırabilmektedir. Colom vd. (2023), atık lastik–poliüretan kompozitlerinde incelenen numune grupları için daha düşük porozite ve daha yüksek yoğunluğun daha yüksek ısıl iletkenlikle ilişkili olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle mukavemet artışının doğrudan ısıl iletkenlikte azalmaya yol açtığı genellenmemiştir. SEM görüntülerinin yerel

gözlemler sunması ve SEM kayıtlarının K4 ısıl numuneleriyle granül kodu düzeyinde eşleştirilmesinin doğrulanmaması nedeniyle bütün numuneye ait nicel porozite, çatlak yokluğu veya sayısal bir SEM–λ bağıntısı türetilmemiştir. Mikroyapı, mekanik ve termal bulguların nitel yorumunu desteklemek amacıyla kullanılmıştır.

4.14.1. Basınç Dayanımı–Isıl İletkenlik İlişkisinin Değerlendirilmesi

K4 dörtlü granül karışımlarının 20 °C ortalama numune sıcaklığında ölçülen ısıl iletkenlik katsayıları, aynı formülasyonların 28 günlük basınç dayanımlarıyla eşleştirilmiştir. Bölüm 3.9.1'de tanımlanan $I=\sigma_c/\lambda$ ($=\sigma_c/k$) bağıntısıyla hesaplanan performans indeksleri Tablo 4.14'te verilmiştir. Eşleştirme aynı bağlayıcı ve granül düzenini temsil eden ayrı fiziksel numuneler üzerinden yapılmıştır.

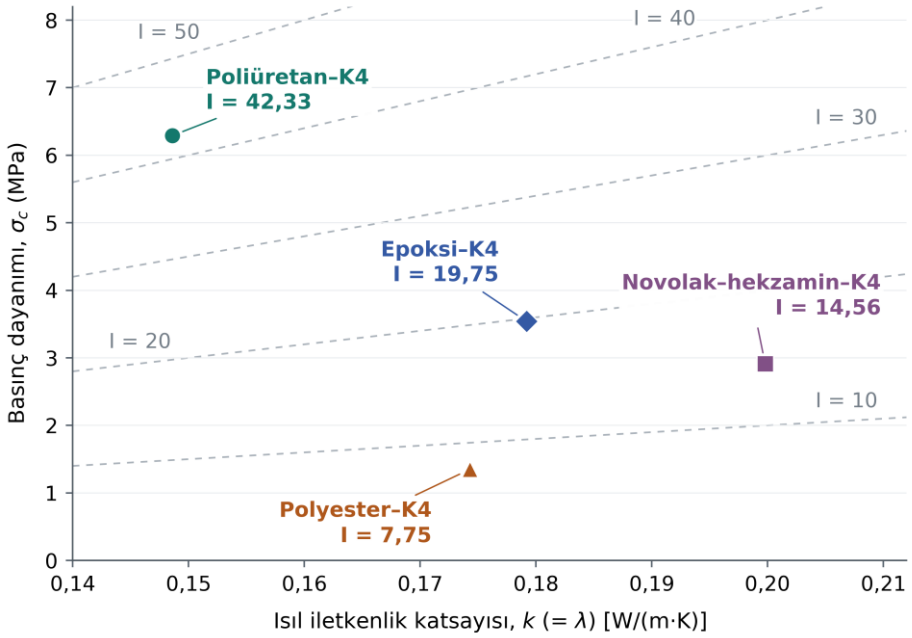
Tablo 4.14. K4 kompozitlerinin basınç dayanımı–ısıl iletkenlik performans indeksleri

K4 kompoziti	Basınç dayanımı σ_c (MPa)	Isıl iletkenlik k (=λ) [W/(m·K)]	Performans indeksi I (MPa·m·K/W)
Poliüretan–K4	6,29	0,1486	42,33
Epoksi–K4	3,54	0,1792	19,75
Novolak–hekzamin–K4	2,91	0,1998	14,56
Polyester–K4	1,35	0,1743	7,75

Not: Basınç dayanımları Tablo 4.3'teki 28 günlük K4 değerleri, k (=λ) değerleri Tablo 4.13'teki K4 plaka sonuçlarıdır. İndeksler raporlanan değerlerden hesaplanmış ve iki ondalık basamağa yuvarlatılmıştır. Sıralama yalnız bu dört K4 formülasyonunu kapsamaktadır.

Performans indeksi poliüretan–K4, epoksi–K4, novolak–hekzamin–K4 ve polyester–K4 için sırasıyla 42,33; 19,75; 14,56 ve 7,75 MPa·m·K/W olarak hesaplanmıştır. Poliüretan–K4, 6,29 MPa basınç dayanımı ve 0,1486 W/(m·K) ısıl iletkenlik katsayısıyla bu dört K4 kompoziti arasında en yüksek dayanımı ve en düşük ısıl iletkenliği birlikte sağlamıştır. Dolayısıyla raporlanan sonuçlar ve tanımlanan indeks bakımından dayanım–ısıl iletkenlik dengesinin en elverişli olduğu kompozit poliüretan–K4 olarak belirlenmiştir. Hedef uygulama için yeterli taşıma ve ısıl performansın değerlendirilmesinde asgari dayanım, eleman geometrisi ve katman ısıl direnci koşulları ayrıca gözetilmelidir.

Şekil 4.30'da yatay eksen ısıl iletkenlik katsayısını k (=λ), düşey eksen basınç dayanımını σ_c göstermektedir. Kesikli doğrular $\sigma_c=I\cdot k$ bağıntısıyla hesaplanan sabit indeks düzeyleridir. Daha yüksek dayanım ve daha düşük ısıl iletkenliğin birlikte bulunduğu bileşimler grafiğin sol üst yönünde yer almaktadır. Dört nokta, K4 formülasyonları arasında betimleyici bir karşılaştırma sunmaktadır.



Şekil 4.30. K4 kompozitlerinin basınç dayanımı–ısıl iletkenlik dağılımı ve sabit indeks düzeyleri

Bu sıralama, 16 kombinasyonlu ana mekanik matriste epoksi–K1'in 8,21 MPa ile en yüksek basınç dayanımını vermesiyle çelişmemektedir: performans indeksi yalnız ısıl verisi bulunan dört K4 formülasyonunu karşılaştırmaktadır. Örneğin epoksi–K4, polyester–K4'e yakın ısıl iletkenliğe karşın daha yüksek basınç dayanımı nedeniyle daha yüksek indeks vermiştir. Böylece benzer ısıl iletkenlik değerlerine sahip kompozitlerin mekanik açıdan farklılaşabildiği gösterilmiştir.

UPV, ısıl iletkenlik ve mukavemeti tamamlayan ayrı bir ölçüm büyüklüğü olarak değerlendirilmiştir. Bağlayıcıya göre değişen UPV–mukavemet ilişkileri Bölüm 4.6'da açıklanmıştır. K4'e ait dört ısıl ölçüm K1–K3 düzenlerine çoğaltılmamış; bu veri kapsamından genellenebilir bir UPV–ısıl iletkenlik veya eğilme–ısıl iletkenlik modeli türetilmemiştir.

TGA/DTG ile karşılaştırmada novolak–hekzamin sisteminin en yüksek T_{10} ve son kalıntı oranını göstermesine karşın en yüksek λ değerine sahip olduğu görülmüştür. Poliüretanın K4 plakasında en düşük λ, ayrı TGA temsilcisinde ise en yüksek DTG T_{max} elde edilmiştir. Bu bulgular ısı iletim davranışı ile sıcaklığa bağlı kütle kaybının farklı özellikleri temsil ettiğini göstermiştir. Ayrıca TGA'daki bozunma göstergeleri camsı geçiş ve mekanik yumuşama sıcaklıklarıyla eşdeğer kabul edilmemiştir; bu ayrım aynı polimerin TGA, DSC ve DMA ile birlikte incelendiği deneysel çalışmalarda da gösterilmiştir (Schott, 2026). Böylece ısıl iletkenlik, mekanik ve termogravimetrik sonuçlar malzeme seçimini tamamlayan farklı performans göstergeleri olarak değerlendirilmiştir.

4.15. Bulguların Literatürle Karşılaştırmalı Tartışılması ve Bölümün Genel Değerlendirmesi

Literatürde atık lastik içeren polimer kompozitlerin mekanik ve termal davranışının yalnız kauçuk miktarına değil; parçacık boyutu ve morfolojisi, matris türü, ara yüzey uyumu, boşluk yapısı ve kürlenme/çapraz bağlanma koşullarına bağlı olduğu vurgulanmaktadır (Ramarad vd., 2015; Hejna vd., 2020). Mevcut çalışmada epoksi, poliüretan ve novolak–hekzamin sistemlerinin farklı granül düzenlerinde mekanik maksimum göstermesi ve temsilci TGA göstergelerinin de aynı sırayı izlememesi, tek bir evrensel granülometri veya tek bir performans ölçütüyle genelleme yapılamayacağını desteklemiştir.

Epoksi–kauçuk sistemlerinde ara yüzey kalitesi ve çatlak ilerleme mekanizmasının mekanik tepkiyi belirlediği Kaynak vd. (2001) tarafından bildirilmiştir. Türkben vd. (2023) farklı epoksi sistemleriyle geri dönüştürülmüş kauçuk kompozitlerinin mekanik ve termal davranışının matris sistemine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu tezde Epoksi–K1 grubunun yüksek basınç/eğilme mukavemeti ve yüksek enerji alanı, SEM'deki pürüzlü kırılma morfolojisiyle birlikte değerlendirildiğinde epoksi–ince granül kombinasyonunun mevcut deney koşullarında dengeli bir mekanik davranış oluşturduğu görülmüştür.

Türkben'in (2019) çekme deneylerinden belirlediği Young modülü ile bu tezde basınç deneyinin cihaz deplasmanından hesaplanan tepe sekant modülü farklı ölçüm büyüklükleridir. Bu iki gösterge aynı birimle ifade edilse de doğrudan sayısal üstünlük karşılaştırması yapılmamıştır. Benzer biçimde, Türkben'in 106 μm'den küçük tozlarla elde ettiği dağılım ve termal davranış sonuçları, mevcut granüllü sistemlerin aynı düzeyde dayanım veya bozunma sıcaklığı vermesinin kanıtı olarak kullanılmamıştır. Karşılaştırmanın ortak noktası, kauçuk fazının etkisinin matris formülasyonundan ve üretim koşullarından bağımsız değerlendirilememesidir.

Poliüretan bağlı lastik kompozitlerinde Revelo vd. (2021), Semlali Aouragh Hassani vd. (2020) ve Jiang vd. (2022) granülometri, kauçuk miktarı, gözenek yapısı ve poliüretan matris özelliklerinin performansı birlikte etkilediğini bildirmiştir. Mevcut çalışmada PU–K4 grubunun basınç, eğilme ve UPV bakımından sistem içi maksimuma ulaşması ve $\varepsilon \approx 0{,}491$ düzeyindeki yüksek deformasyon kapasitesi, esnek matris ile geniş granül dağılımının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemiştir.

Polyester–atık lastik sistemlerinde Abu-Jdayil vd. (2016b), Akın ve Polat (2022) ve Yıldızhan vd. (2022) kauçuk parçacıklarının matrisle uyumu, tane boyutu ve ara yüzey özelliklerinin mekanik davranış üzerinde belirleyici olduğunu bildirmiştir. Bu tezde polyester serisinin hem mukavemet hem enerji yutma bakımından düşük sonuçlar vermesi ve SEM'de daha heterojen/açık boşluklu yapı göstermesi literatürde bildirilen ara yüzey sınırlamalarıyla uyumlu bulunmuştur.

Novolak–hekzamin bağlı atık lastik granülü sistemleri için doğrudan aynı deney matrisini kullanan yayınların sınırlı olması, bu tezde elde edilen karşılaştırmalı sonuçların özgün yönlerinden biridir. K2 orta granül grubunda 6,29 MPa basınç ve 1,38 MPa eğilme mukavemeti elde edilmesi, K3 ince+orta grubunda ise çok yüksek tepe sekant modülüne karşın düşük tokluk görülmesi, fenolik matris–granül etkileşiminin yalnız maksimum dayanım üzerinden açıklanamayacağını ortaya koymuştur.

Bölüm genelindeki sonuçlar, mekanik dayanım, göreli rijitlik, kayıtlı enerji alanı, ısıl iletkenlik ve ısıl bozunma göstergelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Epoksi mekanik dayanım ve enerji alanıyla; poliüretan geniş görünür deformasyon aralığı, en yüksek DTG T_{max} ve K4 grupları içindeki en düşük ısıl iletkenlik ile en yüksek performans indeksiyle öne çıkmıştır. Novolak–hekzamin, granül düzenine duyarlı rijitlik–enerji dengesi ve yüksek T_{10}/kalıntı profili; polyester ise mevcut formülasyondaki daha düşük mekanik ve yaklaşık T_5–T_{10} değerleriyle değerlendirilmiştir. UPV, SEM/EDS, ATR-FTIR, TGA/DTG ve ısıl iletkenlik bulguları, yöntem ve örnek kapsamları dikkate alınarak mekanik sonuçları tamamlayan veri grupları olarak kullanılmıştır.

Son dönem literatürü, atık lastik kullanımının yalnız mekanik performans değil; ısıl-akustik işlevler, yaşlanma, yaşam döngüsü ve hedef ürün performansı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024; Benjak vd., 2024; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Wijesinghe vd., 2025; Prieto-Quintana vd., 2026). Bu bağlamda mevcut tez sonuçları, doğrudan ürün uygunluğu iddiası yerine bir sonraki doğrulama deneylerini yönlendiren bağlayıcıya özgü performans profilleri olarak değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu bölümde, Bölüm 3'te tanımlanan deneysel yöntemler ve Bölüm 4'te sunulan mekanik, UPV, σ–ε, SEM/EDS, ATR-FTIR, TGA/DTG ve ısıl iletkenlik bulguları birlikte değerlendirilerek çalışmanın temel sonuçları ortaya konmuştur. Nihai mekanik karşılaştırmalar granül kütlesine göre %20 ana reçine/bağlayıcı içeren ve 28 günlük referans deney yaşındaki 4×4 deney matrisi üzerinden yapılmış; TGA/DTG sonuçları seçilmiş temsilci numunelerden, ısıl iletkenlik sonuçları ise dört K4 plakasından elde edilen veriler olarak kullanılmıştır. Sonuçlar tek bir "en iyi bağlayıcı" sıralaması oluşturmak yerine, hedeflenen işlev açısından dayanım, deformasyon, göreli rijitlik, enerji yutma, iç yapısal süreklilik, mikroyapı ve ısıl kararlılık arasındaki denge temelinde yorumlanmıştır.

5.1. Mekanik ve Fiziksel Performansa İlişkin Temel Sonuçlar

Epoksi sistemi K1 ince granül düzeninde 8,21 MPa basınç ve 2,21 MPa eğilme mukavemeti ile ana deney matrisindeki en yüksek mekanik değerlere ulaşmıştır. Aynı seri 1,968 MJ/m³ toplam eğri alanı ile σ–ε verilerinden hesaplanan en yüksek enerji yutma göstergesini vermiştir. Buna karşılık epoksi-K4 grubunun 2012 m/s ile en yüksek UPV değerine ulaşmasına rağmen basınç mukavemetinin 3,54 MPa'da kalması, dalga iletim sürekliliği ile maksimum mekanik dayanımın bu kompozitlerde zorunlu olarak aynı granül düzeninde oluşmadığını göstermiştir.

Poliüretan sistemi K4 dörtlü granül düzeninde 6,29 MPa basınç, 1,94 MPa eğilme ve 1153 m/s UPV ile kendi sistemi içindeki mekanik ve ultrasonik maksimumları birlikte vermiştir. εtepe≈0,491 ve 1,581 MJ/m³ yükleme işi alanı, poliüretan matrisin bu çalışmadaki ayırt edici yönünün yalnız maksimum dayanım değil, yükü geniş bir deformasyon aralığında sürdürebilmesi olduğunu göstermiştir.

Novolak–hekzamin sistemi K2 orta granül düzeninde 6,29 MPa basınç ve 1,38 MPa eğilme ile incelenen granül düzenleri içindeki en yüksek mekanik değerleri vermiştir. Buna karşılık K3 ince+orta seri 55,086 MPa ile tüm σ–ε serileri içindeki en yüksek tepe sekant modülüne ulaşmış, fakat enerji yutma değeri yalnız 0,326 MJ/m³'te kalmıştır. Böylece yüksek göreli rijitliğin yüksek enerji yutma ile eşdeğer olmadığı doğrudan deney verileriyle gösterilmiştir.

Polyester sistemi mevcut reçetede 1,22–1,35 MPa basınç, 0,20–0,24 MPa eğilme, 188–260 m/s UPV ve temsilci σ–ε serisinde 0,169 MJ/m³ yükleme işi alanı ile daha düşük performans düzeyinde kalmıştır. SEM'de gözlenen heterojen ve açık boşluklu morfoloji de bu mekanik sonuçlarla birlikte değerlendirilmiş; mevcut reçetenin ara yüzey ve matris sürekliliği bakımından geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ana mekanik sonuçlar, granül kütlesine göre %20 ana bağlayıcı içeren 16 kombinasyonun 28 günlük değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. 28 gün zorunlu kür süresi değil, ortak referans deney yaşıdır. Tablo 4.2'deki 3, 28 ve 90 günlük eşleştirilmiş basınç değerlerinde Friedman testiyle anlamlı yaş farkı saptanmamıştır (χ^2=0,033; p=0,983). Anlamlı fark bulunmaması istatistiksel eşdeğerliğin veya kimyasal kürün tamamlandığının kanıtı olarak yorumlanmamıştır.

UPV–eğilme ilişkisi bütün matriste r=0,479 olmakla birlikte bağlayıcı içinde merkezlenmiş veride −0,191'e düşmüştür. Basınç–eğilme ilişkisi ise bütün matriste 0,959, merkezlenmiş veride 0,955 olarak bulunmuştur. Bu ayrım, UPV'nin mukavemet yerine tek başına kullanılmaması ve bağlayıcıya özgü değerlendirme yapılması gerektiğini desteklemiştir. Granül düzenleri arasındaki bu ilişkiler bağımsız tekrar verisine dayalı genellenebilir tahmin modelleri olarak sunulmamıştır.

5.2. Termal ve Çoklu Karakterizasyon Sonuçlarının Birlikte Değerlendirilmesi

TGA/DTG sonuçlarında epoksi için T_5=297,1 °C, T_{10}=335,3 °C, DTG T_{max}=381,0 °C ve %27,6 son kalıntı; poliüretan için sırasıyla 300,7 °C, 338,7 °C, 417,0 °C ve %24,7; novolak–hekzamin için 301,9 °C, 348,8 °C, 385,5 °C ve %43,1 elde edilmiştir. Polyester için grafikten yaklaşık T_5≈288 °C, T_{10}≈325 °C, DTG T_{max}≈387 °C ve %31,6 son kalıntı belirlenmiştir. Son değerler her kaydın kendi son numune sıcaklığına aittir. %100 kütle kaybı hiçbir sistemde görülmemiş; tepe sıcaklığı ve son kalıntı birbirinden ayrı göstergeler olarak değerlendirilmiştir.

Termal göstergeler tek bir sistemin her ölçütte üstün olmadığını göstermiştir. Novolak–hekzamin T10 ve son kalıntı oranında, poliüretan ise ana bozunma tepe sıcaklığında öne çıkmıştır. Epoksinin mekanik ve yükleme işi performansındaki üstünlüğü TGA göstergelerinde aynı biçimde tekrarlanmamış; mekanik dayanım ile ısıl bozunma karakterinin farklı özellikler olduğu sonucuna varılmıştır.

K4 dörtlü karışımlarının 20 °C ortalama numune sıcaklığındaki ısıl iletkenlik ölçümlerinde poliüretan, polyester, epoksi ve novolak–hekzamin için sırasıyla 0,1486; 0,1743; 0,1792 ve 0,1998 W/(m·K) elde edilmiştir. Poliüretan–K4 en düşük λ değerini vermiştir. Dört K4 grubunun basınç dayanımlarıyla yapılan eşleştirmede performans indeksi poliüretan–K4 için 42,33; epoksi–K4 için 19,75; novolak–hekzamin–K4 için 14,56 ve polyester–K4 için 7,75 MPa·m·K/W olarak hesaplanmıştır. Poliüretan–K4, bu dört formülasyon arasında yüksek dayanım ve düşük ısıl iletkenliği en elverişli biçimde birlikte sağlamıştır. Sonuçlar, ısıl ölçümü bulunmayan K1–K3 kombinasyonlarına genellenmemiştir.

Ortak 25 mm referans kalınlık için hesaplanan katman dirençlerinde poliüretan–K4, 0,1682 m²·K/W ile en yüksek değeri vermiştir. Bu hesap, ısıl iletkenlik bulgularının ortak kalınlıkta yorumlanmasını desteklemiştir. Performans indeksi ise mekanik ve ısıl özellikleri formülasyon düzeyinde birlikte karşılaştırmış; Tablo 4.14 ve Şekil 4.30'da sunulmuştur. İndeksin yüksek olması,

hedef uygulamanın asgari dayanım ve ısıl performans gereksinimleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Sistemlerin mekanik açıdan öne çıkan granül düzenleri, ayrı TGA/DTG temsilcileri ve K4 plakalarının ısıl iletkenlik sonuçları Tablo 5.1'de birlikte özetlenmiştir. Bu kapsamda mekanik maksimumların granül kodu ile ısıl ölçümlerin K4 kodu birbirinden ayrılmıştır.

Tablo 5.1. Bağlayıcı sistemlerinin mekanik ve termal performansının bütünleşik özeti

Sistem	**Mekanik açıdan öne çıkan düzen**	**Basınç / eğilme (MPa)**	**U_t / $E_{sec,p}$**	**Temsilci TGA / K4 ısıl iletkenlik**	**Bütünleşik sonuç**
Epoksi	K1 - İnce	8,21 / 2,21	1,968 MJ/m³ / 22,104 MPa	T_{10} 335,3 °C; T_{max} 381,0 °C; %27,6 kalıntı; λ(K4) 0,1792	En yüksek basınç/eğilme ve enerji alanı.
Poliüretan	K4 - Dörtlü	6,29 / 1,94	1,581 MJ/m³ / 12,811 MPa	T_{10} 338,7 °C; T_{max} 417,0 °C; %24,7 kalıntı; λ(K4) 0,1486	Geniş deformasyon; yüksek T_{max}; en düşük λ.
Novolak–hekzamin	K2 - Orta	6,29 / 1,38	1,542 MJ/m³ / 18,551 MPa	T_{10} 348,8 °C; T_{max} 385,5 °C; %43,1 kalıntı; λ(K4) 0,1998	En yüksek T_{10} ve kalıntı; granül düzenine duyarlı rijitlik.
Polyester	K4 basınç / K1 eğilme	1,35 / 0,24	0,169 MJ/m³ / 6,300 MPa	T_{10} ≈325 °C; T_{max} ≈387 °C; ≈%31,6 kalıntı; λ(K4) 0,1743	Düşük mekanik düzey; ara yüzey iyileştirme gereksinimi.

Not: Mekanik maksimumlar belirtilen granül düzenlerine; TGA değerleri ayrı temsilci ölçümlere, λ değerleri ise her sistemin K4 plakasına aittir. Her satır eşlenik tek bir fiziksel numuneyi göstermez. λ birimi W/(m·K), ortalama ısıl ölçüm sıcaklığı 20 °C'dir. Polyesterin basınç maksimumu K4, eğilme maksimumu K1'dedir; σ–ε temsilcisinin K kodu belirtilmemiştir. Polyester TGA sonuçları grafikten yaklaşıktır. U_t farklı kayıt sonu deformasyonlarına ait görünür yükleme işi alanını, $E_{sec,p}$ tepe sekant eğimini ifade eder.

SEM/EDS ve ATR-FTIR sonuçları mekanik ve TGA verilerini açıklayan tamamlayıcı kanıtlar olarak kullanılmıştır. SEM, epokside pürüzlü/karmaşık kırılma topografyası; poliüretanda görece daha sürekli matris bölgeleri; novolak–hekzaminde granüler/kümelenmiş morfoloji ve polyesterde heterojen-açık boşluklu yapı göstermiştir. EDS lokal ve yarı nicel element dağılımı, ATR-FTIR ise başlangıç malzemeleri ve bağlayıcı sistemlerinin kimyasal parmak izini sağlamıştır. Bu analizlerden doğrudan aderans kuvveti, yeni ara yüzey bağının nicel kanıtı veya bütün numune hacmine ait mutlak bileşim sonucu çıkarılmamıştır.

TGA azot atmosferinde kütle kaybını değerlendirdiğinden sonuçlar yangın dayanımı veya alevlenebilirlik göstergesi olarak kullanılmamıştır. Benzer biçimde cihaz deplasmanından türetilen σ–ε, tepe sekant modülü ve enerji alanı değerleri standart ekstansometre temelli malzeme sabitleri olarak değil, bu tezde aynı deney düzeni altında karşılaştırmalı davranış göstergeleri olarak kabul

edilmiştir. Bu sınırlamaların açık biçimde tanımlanması, farklı deneylerden elde edilen sonuçların birbirinin yerine geçirilmesini önlemiştir.

5.3. Potansiyel Kullanım Yönleri ve Çalışmanın Sınırları

Bu tezde gerçekleştirilen deneyler, bir malzemenin doğrudan taşıyıcı yapı elemanı veya ticari ürün olarak kullanılabilmesi için gerekli bütün standart performans, güvenlik ve uzun süreli dayanıklılık kriterlerini kapsamamaktadır. Bu nedenle aşağıdaki alanlar kesin uygulama önerisi değil, elde edilen mekanik-termal profile ve benzer literatür uygulamalarına dayalı ileri doğrulama yönleri olarak değerlendirilmiştir. Aynı nedenle "çevre dostu" nitelemesi, ÖTL'nin ikincil hammadde olarak değerlendirilmesi yönündeki yaklaşımı ifade etmekte; yaşam döngüsü temelli net çevresel üstünlük iddiası oluşturmamaktadır.

Çalışmanın başlıca deneysel sınırları; bazı yöntemlerde tüm kombinasyonlar için bağımsız tekrarların ve dağılım istatistiklerinin aynı kapsamda bulunmaması, σ–ε deformasyonunun ayrı ekstansometre yerine cihaz deplasmanından türetilmesi, TGA'nın tam 4×4 matrise değil seçilmiş temsilci örneklere uygulanması, polyester TGA'sında ham sayısal verinin bulunmaması, ısıl iletkenliğin her bağlayıcı için tek K4 raporuyla sınırlı olması ve bağımsız tekrar/ölçüm belirsizliğinin sunulmaması, SEM/EDS'nin lokal alanları temsil etmesi ve ATR-FTIR kayıtlarının ara yüzey bağ kuvvetini doğrudan ölçmemesidir. Ayrıca novolak–hekzamin numuneleri etüvde 160 °C'de 24 saat bekletilerek termal küre tabi tutulmuş olmakla birlikte, tek bir kür sıcaklığıyla çalışılmış ve kür derecesi bağımsız olarak nicel biçimde doğrulanmamıştır; bu nedenle kür koşullarının mekanik ve termal sonuçlara etkisi ayrı bir değişken olarak değerlendirilmemiştir. Formülasyon sayısı ile deney başına fiziksel numune/tekrar sayısı ayrıştırılmış; yardımcı bileşenler dâhil bağlayıcı miktarı, farklı sıkıştırma uygulamaları ve standart dışı geometri bağlayıcılar arası karşılaştırmanın sınırları olarak kabul edilmiştir.

Bağlayıcıların farklı performans profilleri, hedeflenen işlev temelinde değerlendirilmiştir. Poliüretan–K4'ün 6,29 MPa basınç dayanımı, 1,94 MPa eğilme dayanımı, geniş görünür deformasyon aralığı ve 0,1486 W/(m·K) ısıl iletkenliği, esnek ara elemanların geliştirilmesi için araştırmaya değer bir profil oluşturmuştur. Esnek hareket ve dilatasyon derzlerinde dolgu/ara parça, duvar–kolon/kiriş arasında deformasyon uyumlayıcı şerit, prefabrik panel birleşimleri ve darbe/titreşim azaltıcı katmanlar bu kapsamda değerlendirilebilir. Derz elemanı tasarımında göreli harekete izin verilmesi ve ayrılması gereken yapı parçaları arasında istenmeyen yük aktarımı oluşturulmaması ayrıca incelenmelidir.

Aynı malzeme ailesi, deprem etkileri altında çalışacak sismik ara elemanlar ve izolatör prototiplerinin malzeme geliştirme araştırmalarında da ele alınabilir. Özellikle bölme duvarı–taşıyıcı çerçeve etkileşimini azaltan esnek birleşim elemanları, mevcut deneysel profile daha yakın bir araştırma yönüdür. Bununla birlikte bu tezde çevrimsel yükleme, histerezis, tam ölçekli izolatör

veya sarsma tablası deneyi yapılmamıştır. Bu nedenle elde edilen basınç ve yükleme işi sonuçları, yapısal deprem izolatörü yeterliliği ya da depremde çatlak ve göçmenin önlenmesi olarak yorumlanmamıştır. Taşıyıcı sistem altında kullanılacak bir izolatör için düşey yük taşıma, çevrimsel yatay kesme, kararlılık, bağlantı bütünlüğü ve ölçekli sistem davranışı ayrıca doğrulanmalıdır. Potansiyel kullanım yönleri ve gerekli ek doğrulamalar Tablo 5.2'de özetlenmiştir.

Tablo 5.2. Deneysel performans profiline dayalı potansiyel kullanım yönleri ve gerekli ek doğrulamalar

Sistem	Bu tezde öne çıkan özellik	Potansiyel araştırma/uygulama yönü	Uygulama öncesi gerekli doğrulamalar
Epoksi	Yüksek basınç/eğilme dayanımı; kayıt aralığı içinde yüksek yükleme işi alanı	Yapısal olmayan rijit panel, koruyucu kaplama ve modüler kompozit eleman	Çekme, kesme, aderans, çevrimsel yük, darbe, yorulma, yangın ve yüksek sıcaklık
Poliüretan	Geniş görünür deformasyon; K4'te en düşük λ ve en yüksek I	Esnek derz dolgusu/ara parça; duvar–çerçeve ve panel birleşimi; sismik ara eleman ve izolatör prototipi araştırmaları	Çekme/kesme; düşey yük altında çevrimsel yatay hareket; histerezis, sönüm, kalıcı deformasyon; kararlılık ve tam ölçekli deneyler
Novolak–hekzamin	Granül düzenine duyarlı rijitlik; yüksek T10 ve kalıntı oranı	Rijit yapısal olmayan levha/panel; sıcaklığa maruz kalan elemanlar için malzeme araştırmaları	Kür optimizasyonu, çekme/kesme, DSC/DMA, sıcaklıkta ve soğutma sonrasında mekanik deney, yangın ve yaşlandırma
Polyester	Mevcut reçetede daha düşük mekanik düzey; heterojen ara yüzey	Öncelikle ara yüzey/reçete geliştirme; ardından düşük gerilmeli yapısal olmayan ürünler	Yüzey işlemi, boşluk azaltma, çekme/kesme, aderans, mekanik tekrar, su emme ve termal deneyler

Bölüm 3.2.7'de verilen maliyet karşılaştırması, kompozitlerin betonun genel hacimsel ikamesi yerine hedeflenen özel işlevlere göre değerlendirilmesi gerektiğini ekonomik açıdan da desteklemiştir.

Bu tezde dört K4 kompozitinin ısıl iletkenliği ölçülmüş; akustik ve dinamik titreşim performansı ise deneysel olarak belirlenmemiştir. Bu nedenle esnek karo, ara katman veya sönümleyici eleman gibi uygulamalarda akustik ve titreşim davranışı ayrı deneylerle doğrulanması gereken özellikler olarak değerlendirilmiştir.

Atık lastiğin kompozit içinde kullanılması tek başına çevresel güvenlik veya yaşam döngüsü üstünlüğü kanıtı olarak kabul edilmemiştir. Granüllerin bağlayıcı içinde tutulduğu nihai ürün için liç, VOC/emisyon, yaşlandırma sonrası salım, kullanım ömrü ve kullanım sonu senaryolarının ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

Doğrudan çekme ve kesme dayanımları bu tez kapsamında ölçülmemiştir. Bu özellikler, mevcut basınç veya eğilme sonuçlarından doğrudan belirlenemez. Aynı reçetelerden, malzemenin tane boyutu ve deformasyon kapasitesine uygun deney geometrilerinde ayrı numuneler hazırlanmalı; çekme kuvveti–uzama ve kesme kuvveti–kayma kayıtlarından dayanım, rijitlik, kopma uzaması ve ara yüzey bütünlüğü değerlendirilmelidir. Deney geometrisi ve yöntem standardı hedef ürün ile malzemenin rijit/elastomerik karakterine göre seçilmelidir.

5.4. Genel Sonuç

Dört bağlayıcı ve dört granül düzeni birlikte değerlendirildiğinde aynı granül düzeninin bütün sistemlerde en iyi sonucu vermediği görülmüştür. Epoksi–K1 8,21 MPa basınç ve 2,21 MPa eğilme ile ana mekanik matriste en yüksek değerlere ulaşmış; poliüretan–K4 6,29 MPa basınç ve 1,94 MPa eğilme ile kendi sistemi içinde öne çıkmıştır. Novolak–hekzaminde K2 dayanım, K3 ise tepe sekant rijitliği açısından belirginleşmiş; polyester serisi mevcut reçetede daha düşük mekanik düzeyde kalmıştır.

K4 plakalarında ısıl iletkenlik 0,1486–0,1998 W/(m·K) aralığında ölçülmüş ve en düşük değer poliüretan–K4'te elde edilmiştir. Aynı K4 formülasyonlarının basınç dayanımı/ısıl iletkenlik indeksleri poliüretan, epoksi, novolak–hekzamin ve polyester için sırasıyla 42,33; 19,75; 14,56 ve 7,75 MPa·m·K/W olmuştur. TGA/DTG sonuçlarında ise novolak–hekzamin yüksek T10 ve kalıntı oranıyla, poliüretan ana DTG tepe sıcaklığıyla öne çıkmıştır. Bu sonuçlar mekanik dayanım, deformasyon, rijitlik ve termal göstergelerin aynı özelliği temsil etmediğini açık biçimde göstermiştir.

Bu tezin özgünlüğü, aynı atık lastik granülü kaynağını dört farklı polimer bağlayıcı ve dört ortak granül düzeni altında karşılaştırması; mekanik sonuçları UPV, σ–ε, SEM/EDS, ATR-FTIR, TGA/DTG ve ısıl iletkenlikle birlikte okumasıdır. Elde edilen sonuçlar tek bir 'en iyi' malzeme seçmek yerine kullanım amacına göre farklı performans profilleri ortaya koymuştur. Epoksi daha yüksek mekanik dayanım isteyen yapısal olmayan rijit elemanlar için, poliüretan–K4 ise deformasyon ve enerji sönümleme gerektiren esnek ara elemanlar için araştırılmaya değer bir profil göstermiştir. Novolak–hekzamin rijitlik ve termal davranış bakımından, polyester ise reçete ve ara yüzey iyileştirmesi gereksinimi bakımından farklılaşmıştır.

ÖNERİLER

Çalışmanın deneysel bulguları esas alınarak, malzeme geliştirme ve hedef uygulamaların doğrulanması için aşağıdaki araştırmalar önerilmiştir:

Ara yüzey ve reçete optimizasyonu: Özellikle polyesterde granül yüzey işlemi, uyumlaştırıcı, bağlayıcı oranı ve K1–K4 granül düzenlerinin etkileşimi kontrollü deney tasarımıyla incelenmelidir. Dayanım artışı, bağlayıcı tüketimi ve üretim koşulları birlikte değerlendirilmelidir.

Çekme ve kesme davranışı: Uygun geometrili ayrı numunelerde çekme kuvveti–uzama ve kesme kuvveti–kayma eğrileri elde edilmeli; çekme/kesme dayanımı, kopma uzaması ve rijitlik belirlenmelidir. Derz ve birleşimlerde kompozitin kendi dayanımı ile temas yüzeyinin aderansı ayrı incelenmelidir.

Çevrimsel yükleme ve histerezis: Yükleme–boşaltma–yeniden yükleme deneyleriyle kuvvet–yer değiştirme ve uygun gerilme–birim şekil değiştirme histerezis eğrileri çıkarılmalıdır. Çevrim alanından sönümlenen enerji; çevrimler arasında rijitlik kaybı, kalıcı deformasyon ve eşdeğer viskoz sönüm değerlendirilmelidir. Yüksek tek yönlü yükleme işi, histerezis enerjisi olarak kabul edilmemelidir.

Deprem derzleri ve izolatör araştırmaları: Öncelikle poliüretan–K4 kullanılarak esnek derz ve duvar–çerçeve ara elemanı prototipleri araştırılmalıdır. İzolatör geliştirme çalışmalarında düşey yük altında tekrarlı yatay kesme, farklı hareket genlikleri ve hızları, bağlantı bütünlüğü ve kararlılık incelenmeli; tam ölçekli birleşim ve uygun sarsma tablası deneyleriyle sistem düzeyinde doğrulama yapılmalıdır.

Yangın tepkisi: TGA/DTG sonuçları, oksijen indeksi (LOI), tutuşma, alev yayılımı, ısı salım hızı ve duman oluşumu deneyleriyle tamamlanmalıdır. Hedef uygulama bir derz veya panel sistemi olduğunda, gerekli yangına dayanım değerlendirmesi malzeme örneğiyle sınırlı kalmadan birleşim/sistem düzeyinde yapılmalıdır.

Yüksek sıcaklıkta mekanik performans: Belirlenen sıcaklık ve bekletme sürelerinde basınç, çekme ve kesme davranışı; soğutma sonrasında ise kalan dayanım, rijitlik ve boyutsal kararlılık ölçülmelidir. DSC/DMA ve ısıl genleşme ölçümleriyle yumuşama, camsı geçiş ve bozunma birbirinden ayrılmalıdır.

Numune tekrarları ve istatistiksel raporlama: Üretilen basınç ve eğilme numunelerinin tekil sonuçları formülasyon ve deney yaşı kodlarıyla birlikte sunulmalı; ortalama, standart sapma ve güven aralıkları bu ham kayıtlardan hesaplanmalıdır. Yaş karşılaştırmasında formülasyon düzeyi eşleştirme ile fiziksel numune tekrarı birbirine karıştırılmamalıdır.

Deformasyon, yorulma ve darbe: Ekstansometre veya temassız optik ölçümle numune deformasyonu cihaz/temas etkilerinden ayrılmalıdır. Uygun küçük gerinim bölgesinde modül,

DMA ile depolama/kayıp modülleri ve tan δ belirlenmeli; darbe ve yorulma deneyleriyle özelliklerin tekrarlı yük altında korunması incelenmelidir.

Isıl iletkenlik ve ortak performans: Üretilen K1–K3 plakalarının ısıl sonuçları da K4 ile aynı ölçüm çerçevesinde raporlanmalı; bağımsız tekrarlar, yoğunluk, boşluk oranı ve belirsizlik bilgileriyle karşılaştırma genişletilmelidir. Basınç dayanımı–ısıl iletkenlik indeksi, ölçümü bulunmayan gruplara veri çoğaltılarak aktarılmamalıdır.

Mikroyapı ve çevresel dayanıklılık: SEM görüntü analizi veya mikro-BT ile boşluk ve granül–matris temas yapısı nicelleştirilmelidir. Su, ıslanma–kuruma, donma–çözülme, UV, sıcaklık çevrimi ve kimyasal ortam sonrasında mekanik özelliklerin korunma oranları değerlendirilmelidir.

Akustik, maliyet ve sürdürülebilirlik: Ses yutma, titreşim geçirgenliği ve dinamik rijitlik ayrıca ölçülmelidir. Ürün ölçeğinde işçilik, enerji, kalıp, nakliye ve fire maliyetleri; özellikle novolak–hekzaminin termal kür enerjisi hesaba katılmalıdır. Yaşam döngüsü, VOC/liç, hizmet ömrü ve kullanım sonu seçenekleri birlikte incelenmelidir.

KAYNAKLAR

Abu-Jdayil, B., Mourad, A. H. and Hussain, A. (2016a). Thermal and physical characteristics of polyester-scrap tire composites. Construction and Building Materials, 105, 472-479. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.180

Abu-Jdayil, B., Mourad, A.-H. I. and Hussain, A. (2016b). Investigation on the mechanical behavior of polyester-scrap tire composites. Construction and Building Materials, 127, 896-903. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.138

Ahmetli, G., Gungor, A. and Kocaman, S. (2014). Epoxy composites based on inexpensive tire waste filler. AIP Conference Proceedings, 1599, 346-349. https://doi.org/10.1063/1.4876849

Akca Güler, T., Yüksekdağ, A., Köse Mutlu, B. ve Koyuncu, İ. (2025). Atık lastiklerin yönetimi, geri dönüştürülmesi ve çevresel etkileri üzerine bir derleme. Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik, 26(1), 1-8.

Akhtar, A. Y. and Tsang, H.-H. (2024). A comparative life cycle assessment of recycled tire rubber applications in sustainable earthquake-resistant construction. Resources, Conservation and Recycling, 211, 107860. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107860

Akın, M. H. and Polat, R. (2022). The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress-strain properties of polyester-based polymer concretes. Construction and Building Materials, 325, 126741. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126741

Aksoy, S. R. (2021). Atık lastik katkılı farklı polimer içeren betonların özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

Aktaş, D. (2020). Araç lastik tozlarının çevresel etkisinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Amari, T., Themelis, N. J. and Wernick, I. K. (1999). Resource recovery from used rubber tires. Resources Policy, 25, 179-188. https://doi.org/10.1016/S0301-4207(99)00025-2

Andrew, R. M. (2018). Global CO_2 emissions from cement production. Earth System Science Data, 10, 195-217. https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018

Anonim. (2006). Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği. 25 Kasım 2006 tarih ve 26357 sayılı Resmî Gazete.

Anonim. (2015). Atık Yönetimi Yönetmeliği. 2 Nisan 2015 tarih ve 29314 sayılı Resmî Gazete.

Anonim. (2025a). Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (2025-2028). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.

Anonim. (2025b). Ulusal Atık Yönetimi Stratejisi ve Planı (2025-2035). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.

Aoudia, K., Azem, S., Aït Hocine, N., Gratton, M., Pettarin, V. and Seghar, S. (2017). Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. Waste Management, 60, 471–481. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051

ASTM International. (2022). ASTM C597-22, Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. https://doi.org/10.1520/C0597-22

ASTM International. (2026). ASTM D695-26, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. https://doi.org/10.1520/D0695-26

Aydın, P., Güngör, A. ve Ahmetli, G. (2014). Lastik atığının epoksi kompozitte dolgu maddesi olarak kullanımı [Sözlü bildiri]. 2. Ulusal Kauçuk Kongresi, 28–29 Kasım 2014, İstanbul.

Ayhan, E., Değer, M. K. and Doğruyol, M. (2026). Mechanical and microstructural performance of concrete incorporating waste tire rubber and recycled steel fibers under elevated temperatures. Polymers, 18(14), 1681. https://doi.org/10.3390/polym18141681

AYK. (2026). 2026 Nisan fiyat listesi: poliüretan esaslı yapıştırıcılar ve Polbinder granül bağlayıcısı. https://ayk.com.tr/api/static/documents/2026%20Nisan%20Fiyat%20Listesi%20G%C3%B6rselsiz.pdf (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Bala, A. and Gupta, S. (2021). Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire rubber: A review. Construction and Building Materials, 299, 123939. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123939

Basel Convention. (2011). Revised technical guidelines for the environmentally sound management of used and waste pneumatic tyres. Revised final version (31 October 2011), adopted by decision BC-10/6, Basel Convention, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.

Benjak, P., Tomaš, M., Ptiček Siročić, A., Brnardić, I., Florijanić, F. and Grčić, I. (2024). The role of TiO2 during the accelerated aging of recycled rubber tiles. Chemistry, 6(5), 1111-1132. https://doi.org/10.3390/chemistry6050065

Bozorgmehr Nia, S. and Shafei, B. (2025). Carbon footprint reduction through repurposing solid wastes into sustainable construction materials: A state-of-the-art review. Cleaner and Responsible Consumption, 18, 100310. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100310

Callister, W. D. Jr. and Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA.

Castillo, R., Alva, A., París-Viviana, O. and Bosch, M. (2025). A systematic bibliometric review analysis of research on the use of waste rubber tyres in building and construction materials and their applications. Polymers, 17(18), 2480. https://doi.org/10.3390/polym17182480

CEN. (2021). EN 12504-4:2021, Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Cimbola, Z., Crnoja, A., Barišić, I. and Netinger Grubeša, I. (2024). Evaluation of the applicability of waste rubber in insulation panels with regard to its grain size and panel thickness. Materials, 17(21), 5251. https://doi.org/10.3390/ma17215251

Colom, X., Girbau, J., Marin, M., Formela, K., Saeb, M. R., Carrillo, F. and Cañavate, J. (2023). New approach in the reuse of modified ground tire rubber as thermal and acoustic insulation to be used in civil engineering. Journal of Material Cycles and Waste Management, 25, 3557–3566. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01778-6

Colom, X., Saeb, M. R. and Cañavate, J. (2024). Microstructural phenomena in ground tire rubber (GTR) devulcanized via combined thermochemomechanical and microwave processes monitored by FTIR and DTGA assisted by other techniques. Express Polymer Letters, 18(9), 950-961. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2024.72

Corredor-Bedoya, A. C., Zoppi, R. A. and Serpa, A. L. (2017). Composites of scrap tire rubber particles and adhesive mortar-noise insulation potential. Cement and Concrete Composites, 82, 45-66.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2026a). 10.130.1506 C30/37 gri normal hazır beton harcı, 2026 Eylül birim fiyatı: 3.191,25 TL/m³. Yüksek Fen Kurulu birim fiyat verileri (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2026b). 15.150.1006 C30/37 gri normal hazır betonun pompa ile dökülmesi ve nakli, 2026 Eylül birim fiyatı: 4.330,10 TL/m³. Yüksek Fen Kurulu birim fiyat verileri (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

De, S. K., Isayev, A. I. and Khait, K. (2005). Rubber Recycling. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.

Dębska, B., Lichołai, L. and Miąsik, P. (2019). Assessment of the applicability of sustainable epoxy composites containing waste rubber aggregates in buildings. Buildings, 9(2), 31. https://doi.org/10.3390/buildings9020031

Derakhshandeh, B., Shojaei, A. and Faghihi, M. (2008). Effects of rubber curing ingredients and phenolic-resin on mechanical, thermal, and morphological characteristics of rubber/phenolic-resin blends. Journal of Applied Polymer Science, 108(6), 3808-3821.

Durna, E., Koz, G. ve Genç, N. (2020). Türkiye'de ömrünü tamamlamış lastiklerin yönetiminde en uygun bertaraf seçeneğinin PROMETHEE ve bulanık PROMETHEE yöntemi ile belirlenmesi. Politeknik Dergisi, 23(4), 915-927.

Ecemiş, A. S., Yildizel, S. A., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Aksoylu, C., Madenci, E. and Özkılıç, Y. O. (2025). Sustainable concrete with waste tire rubber and recycled steel fibers: Experimental insights and hybrid PINN–CatBoost prediction. Polymers, 17(21), 2910. https://doi.org/10.3390/polym17212910

Eldin, N. N. and Senouci, A. B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering, 5(4), 478-496.

Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM). (t.y.). Isıl parametreler ölçüm test cihazı. https://taum.erciyes.edu.tr/tr/isil-parametreler-olcum-test-cihazi (Erişim tarihi: 13 Ekim 2026).

Evident. (t.y.). Measuring elastic modulus using thickness and flaw inspection solutions. Application Notes. https://ims.evidentscientific.com/en/applications/elastic-modulus-measurement (Erişim tarihi: 9 Ekim 2026).

Fazli, A. and Rodrigue, D. (2021). Effect of ground tire rubber (GTR) particle size and content on the morphological and mechanical properties of recycled high-density polyethylene (rHDPE)/GTR blends. Recycling, 6(3), 44.

Florez, D., Hoppe, S., Hu, G.-H. and Meimaroglou, D. (2021). Radical bulk polymerization of styrene in the presence of rubber particles from recycled tires: A kinetic study using DSC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 143, 3073–3084. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09701-z

Formela, K. (2022). Waste tire rubber-based materials: Processing, performance properties and development strategies. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 5(4), 234-247.

Forsdyke, K. L. and Starr, T. F. (2002). Thermoset Resins. Rapra Technology Limited, Shrewsbury, UK.

Friedman, M. (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. Journal of the American Statistical Association, 32(200), 675–701. https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522

Fukumori, K., Matsushita, M., Okamoto, H., Sato, N., Suzuki, Y. and Takeuchi, K. (2002). Recycling technology of tire rubber. JSAE Review, 23, 259-264.

Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. Construction and Building Materials, 23, 1828-1836.

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to low-CO_2 cements. Cement and Concrete Research, 34(9), 1489-1498.

Genovés, V., Fariñas, M. D., Pérez-Aparicio, R., Saiz-Rodríguez, L., Valentín, J. L. and Álvarez-Arenas, T. G. (2022). Micronized recycle rubber particles modified multifunctional polymer composites: Application to ultrasonic materials engineering. Polymers, 14(17), 3614. https://doi.org/10.3390/polym14173614

Goodman, S. H. (1998). Handbook of Thermoset Plastics. Noyes Publications, USA.

Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement and Concrete Research, 34, 2309-2317.

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A. and Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, 1, 559-573.

Hamdi, A., Abdelaziz, G. and Farhan, K. Z. (2021). Scope of reusing waste shredded tires in concrete and cementitious composite materials: A review. Journal of Building Engineering, 35, 102014.

Hancharoen, K., Kamhangrittirong, P. and Suwanna, P. (2024). Improvement of natural fiber cement composite for roofing applications through addition of waste tire rubber: An investigation of the physical, mechanical, thermal, and acoustic properties. Cleaner Materials, 13, 100265.

He, M., Li, Y., Qiao, B., Ma, X., Song, J. and Wang, M. (2015). Effect of dicumyl peroxide and phenolic resin as a mixed curing system on the mechanical properties and morphology of TPVs based on HDPE/ground tire rubber. Polymer Composites, 36(10), 1907-1916.

Hejna, A., Korol, J., Przybysz-Romatowska, M., Zedler, Ł., Chmielnicki, B. and Formela, K. (2020). Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers - A review. Waste Management, 108, 106-118.

Hejna, A., Kosmela, P., Olszewski, A., Zedler, Ł., Formela, K., Skórczewska, K., Piasecki, A., Marć, M., Barczewski, R. and Barczewski, M. (2024a). Management of ground tire rubber waste by incorporation into polyurethane-based composite foams. Environmental Science and Pollution Research, 31, 17591-17616.

Hejna, A., Kosmela, P., Olszewski, A. and Żukowska, W. (2024b). The input of nanoclays to the synergistic flammability reduction in flexible foamed polyurethane/ground tire rubber composites. Materials, 17(21), 5344. https://doi.org/10.3390/ma17215344

Hittini, W., Mourad, A.-H. I. and Abu-Jdayil, B. (2021). Utilization of devulcanized waste rubber tire in development of heat insulation composite. Journal of Cleaner Production, 280, 124492.

Hull, D. and Clyne, T. W. (1996). An Introduction to Composite Materials. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

ISO. (2002). ISO 604:2002, Plastics - Determination of compressive properties. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO. (2019). ISO 178:2019, Plastics - Determination of flexural properties. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

İpek, S., Mermerdaş, K., Ulusoy, A. ve Işıker, Y. (2022). Atık lastiklerin, beton üretiminde agrega olarak kullanımının betonun taze ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(3), 982-999.

Jiang, W., Zhu, H., Haruna, S. I., Shao, J., Yu, Y. and Wu, K. (2022). Mechanical properties and freeze-thaw resistance of polyurethane-based polymer mortar with crumb rubber powder. Construction and Building Materials, 352, 129040.

Jiang, W., Zhu, H., Haruna, S. I., Zhao, B., Shao, J. and Yu, Y. (2021). Effect of crumb rubber powder on mechanical properties and pore structure of polyurethane-based polymer mortar for repair. Construction and Building Materials, 309, 125169.

Jones, F. R. (2017). Unsaturated polyester resins. Brydson's Plastics Materials, 8th ed., 743-772.

Karabörk, F. ve Akdemir, A. (2013). Atık taşıt lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 29(1), 29-40.

Kaynak, C., Celikbilek, C. and Akovali, G. (2003). Use of silane coupling agents to improve epoxy-rubber interface. European Polymer Journal, 39, 1125-1132.

Kaynak, C., Sipahi-Sağlam, E. and Akovalı, G. (2001). A fractographic study on toughening of epoxy resin using ground tyre rubber. Polymer, 42, 4393-4399.

Khatib, Z. K. and Bayomy, F. M. (1999). Rubberized Portland cement concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 11(3), 206-213.

Kompozit Pazarı. (2026a). MEK-P Sertleştirici KP60 ürün ve fiyat bilgisi. https://kompozitpazari.com/urun/mek-p-sertlestirici-kp60/ (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Kompozit Pazarı. (2026b). EGECat KobaltOkt %6 ürün ve fiyat bilgisi. https://kompozitpazari.com/urun/egecat-kobaltokt-6/ (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Kosmela, P., Sałasińska, K., Kowalkowska-Zedler, D., Barczewski, M., Piasecki, A., Saeb, M. R. and Hejna, A. (2024). Fire-retardant flexible foamed polyurethane (PU)-based composites: Armed and charmed ground tire rubber (GTR) particles. Polymers, 16(5), 656. https://doi.org/10.3390/polym16050656

Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2026). 10.300.2152 iki bileşenli epoksi esaslı zemin kaplama öncesi astar, 2026 Eylül malzeme birim fiyatı: 552,97 TL/kg. KTB birim fiyat verileri (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Laftah, W. A. and Wan Abdul Rahman, W. A. (2025). A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. Materials Advances, 6, 4992-5010. https://doi.org/10.1039/D5MA00463B

Lapkovskis, V., Mironovs, V., Kasperovich, A., Myadelets, V. and Goljandin, D. (2020). Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods. Recycling, 5(4), 32.

Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C. and Huang, B. (2004). Development of waste tire modified concrete. Cement and Concrete Research, 34, 2283-2289.

Li, X., Gu, J., Xu, Y., Li, S. and Zhang, R. (2025). Review of component materials and diverse applications of polymer concrete. Materials, 18(12), 2745.

Martínez-Barrera, G., Camacho-Gutiérrez, H. O., Villa-Moreno, R. and Martínez-López, M. (2026). Enhancing polymer composites through addition of waste tire rubber particles modified by gamma radiation. Polymer Composites, 47(15), 13502-13513. https://doi.org/10.1002/pc.71167

Medina, N. F., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. and Raffoul, S. (2018). Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. Construction and Building Materials, 188, 884-897.

Meimaroglou, D., Florez, D. and Hu, G.-H. (2022). A kinetic modeling framework for the peroxide-initiated radical polymerization of styrene in the presence of rubber particles from recycled tires. Chemical Engineering Science, 248, 117137. https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117137

Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A. and Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. Cement and Concrete Research, 114, 115-124.

Mohabbi, M. and Bulsu, E. (2026). Evaluation of waste tire rubber as an alternative aggregate in geopolymer mortars. Buildings, 16(9), 1751.

Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J. V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M. T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. and Maghool, F. (2020). Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. Resources, Conservation and Recycling, 155, 104679.

Nezili, Y., El Aboudi, I., Mdarhri, A., He, D., Zaghrioui, M., Brosseau, C. and Bai, J. (2026). Effect of a pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of recycled ground tire rubber/polyurethane foam composites. Polymer Engineering & Science, 66(5), 3258-3270. https://doi.org/10.1002/pen.70419

Nowak, J., Jaskulski, R., Kubissa, W., Matusiak, B. and Banach, M. (2023). On the need for a paradigm change in the valuation of concrete with waste materials based on the example of concrete with crumb rubber. Sustainability, 15(5), 3928. https://doi.org/10.3390/su15053928

Ohama, Y. (1995). Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey.

Olszewski, A., Kosmela, P., Żukowska, W., Wojtasz, P., Szczepański, M., Barczewski, M., Zedler, Ł., Formela, K. and Hejna, A. (2022). Insights into stoichiometry adjustments governing the performance of flexible foamed polyurethane/ground tire rubber composites. Polymers, 14(18), 3838. https://doi.org/10.3390/polym14183838

Palamarchuk, A., Yudaev, P. and Chistyakov, E. (2024). Polymer concretes based on various resins: Modern research and modeling of mechanical properties. Journal of Composites Science, 8(12), 503.

Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A. and Bernardin, A. M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. Journal of Cleaner Production, 19(6-7), 757-763.

Phiri, M. M., Phiri, M. J., Formela, K. and Hlangothi, S. P. (2021). Chemical surface etching methods for ground tire rubber as sustainable approach for environmentally-friendly composites development - A review. Composites Part B: Engineering, 204, 108429.

Pongsopha, P., Sukontasukkul, P., Zhang, H. and Limkatanyu, S. (2022). Thermal and acoustic properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete. Results in Engineering, 13, 100333.

Prieto-Quintana, D., De-Pascale, B., Rodríguez-Hernández, J. and Castro-Fresno, D. (2026). Performance evaluation and LCA of porous polyurethane mixtures with crumb rubber. International Journal of Pavement Engineering, 27(1), 2666868.

Raffoul, S., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M. and Medina, N. F. (2016). Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. Construction and Building Materials, 124, 391-404.

Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, A. L. and Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. Progress in Materials Science, 72, 100-140.

Revelo, C. F., Correa, M., Aguilar, C. and Colorado, H. A. (2021). Composite materials made of waste tires and polyurethane resin: A case study of flexible tiles successfully applied in industry. Case Studies in Construction Materials, 15, e00681.

Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Youssf, O. and Mills, J. E. (2020). A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. Construction and Building Materials, 237, 117651.

Ruiz, Á., Pallarés, F. J., Alba, J., Agüero, A. and Pallarés, L. (2026). Thermal and acoustic characterization of recycled ground tyre rubber and aggregate seismic isolator. Buildings, 16(1), 101. https://doi.org/10.3390/buildings16010101

Sambucci, M. and Valente, M. (2021). Ground waste tire rubber as a total replacement of natural aggregates in concrete mixes: Application for lightweight paving blocks. Materials, 14(24), 7493.

Schott, J. (2026). Thermal analysis of heat shrink tubing. Application Note TA498. TA Instruments/Waters Corporation. https://www.tainstruments.com/pdf/literature/TA498.pdf

Scrivener, K. L., John, V. M. and Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, 114, 2-26.

Semlali Aouragh Hassani, F.-Z., Ouarhim, W., El Achaby, M., Tamraoui, Y., Bensalah, M.-O., Rodrigue, D., Bouhfid, R. and Qaiss, A. E. K. (2020). Recycled tires shreds based polyurethane binder: Production and characterization. Mechanics of Materials, 144, 103351.

Shahapurkar, K., Kiran, M. C., Alamir, M. A., Tirth, V., Alarifi, I. M. and Chenrayan, V. (2023). Quasi-static compressive behaviour of epoxy composites reinforced with crumb rubber. Polymers and Polymer Composites, 31, 1-9.

Shanmugharaj, A. M., Kim, J. K. and Ryu, S. H. (2005). UV surface modification of waste tire powder: Characterization and influence on polypropylene/waste powder composites. Polymer Testing, 24, 739-745.

Siddique, R. and Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview. Waste Management, 24, 563-569.

Sienkiewicz, M., Janik, H., Borzędowska-Labuda, K. and Kucińska-Lipka, J. (2017). Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review. Journal of Cleaner Production, 147, 560-571.

Su, H., Yang, J., Ling, T.-C., Ghataora, G. S. and Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. Journal of Cleaner Production, 91, 288-296.

Sugiman, S., Rizaldi, D., Mulyanto, A., Nurchayati, N., Kaliwantoro, N. and Wijana, M. (2023). Water absorption and tensile properties of ground tire rubber/epoxy composites: Effect of surface treatment. Plastics, Rubber and Composites, 52(4), 216-226.

Sugözü, İ. ve Mutlu, İ. (2009). Atık taşıt lastikleri ve değerlendirme yöntemleri. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1(1), 35-46.

Szycher, M. (2012). Szycher's Handbook of Polyurethanes. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Takeichi, T. and Furukawa, N. (2012). Epoxy resins and phenol-formaldehyde resins. Polymer Science: A Comprehensive Reference, 5, 723-751.

Tamayo, A., Rubio, F., Pérez-Aparicio, R., Saiz-Rodríguez, L. and Rubio, J. (2021). Preparation and properties of sustainable brake pads with recycled end-of-life tire rubber particles. Polymers, 13(19), 3371. https://doi.org/10.3390/polym13193371

Thermtest. (t.y.). Frequently asked questions: Heat Flow Meter. https://thermtest.com/faq (Erişim tarihi: 13 Ekim 2026).

Thomas, B. S. and Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1323-1333.

Topçu, İ. B. (1995). The properties of rubberized concretes. Cement and Concrete Research, 25, 304-310.

Türkben, M. (2019). Lastik ve EPDM kauçuğu atıklarının kompozit malzemede kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

Türkben, M., Kocaman, S., Özmeral, N., Soydal, U., Cerit, A. and Ahmetli, G. (2023). Sustainable production of recycled rubber waste composites with various epoxy systems: A comparative study on mechanical and thermal properties. Industrial Crops and Products, 195, 116490.

Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB). (2026). 16 Ekim 2026 gösterge niteliğindeki döviz satış kurları: USD 49,4204 TL; EUR 55,4110 TL. Günlük döviz kurları (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Türksaş. (2026). Halı saha granül fiyatları 2026: SBR, EPDM ve m² tüketimi. https://www.turksas.com/hali-saha-granul-fiyatlari/ (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

U.S. Department of Energy. (1992). DOE fundamentals handbook: Thermodynamics, heat transfer, and fluid flow (Volume 2 of 3, DOE-HDBK-1012/2-92). U.S. Department of Energy, Washington, DC. https://www.energy.gov/documents/doe-hdbk-1012-92vol2

United Nations Environment Programme (UNEP) and Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). (2026). Global Status Report for Buildings and Construction 2025–2026: Building fast. Falling short. UNEP, Nairobi.

Valášek, P. and Müller, M. (2014). EPDM rubber material utilization in epoxy composite systems. Agronomy Research, 12(1), 291-298.

Vipulanandan, C. and Paul, E. (1993). Characterization of polyester polymer and polymer concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 5(1), 62-82.

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.

Wijesinghe, K. A. P., Lanarolle, G., Gunasekara, C., Law, D. W., Hidallana-Gamage, H. D. and Wang, L. (2025). Thermal and acoustic performance of solid waste incorporated cement based composites: An analytical review. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 25, 106. https://doi.org/10.1007/s43452-025-01160-3

Wiśniewska, P., Haponiuk, J. T., Colom, X. and Saeb, M. R. (2023). Green approaches in rubber recycling technologies: Present status and future perspective. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11(24), 8706-8726.

Yan, J., Lan, T., Zu, L., Dong, S., Liu, S., Hou, B., Liu, J., Bao, X., Zhang, P. and Xie, J. (2026). Performance and application research of waste tire rubber in novel composite materials. ChemistrySelect, 11(7), e06640. https://doi.org/10.1002/slct.202506640

Yang, Y.-L., Zhang, T., Chen, Y., Wang, C.-J. and Cai, G.-J. (2025). A comprehensive review on application of scrap tire rubber for sustainable thermal insulation material in civil engineering. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 217, 115727. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115727

Yıldızhan, Ş., Yel, F., Akar, M. A. ve Kumlu, U. (2022). Tensile and morphological properties of waste tire rubber granule/polyester polymer matrix composite. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 37(3), 773-780.

Yılmaz, E., Arslan, H., Subaşı, S., Uğur, L. O. ve Bideci, A. (2018). Geri dönüştürülmüş lastik atık ikameli poliüretan dolgulu kompozit panellerin yaşam döngüsü değerlendirmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4), 1224-1233.

Yücel Kompozit. (2026). Döküm tipi polyester reçine ürünleri: Polyester TP100 230 kg fiyat bilgisi. https://shop.yucelkompozit.com.tr/recineler-polyester-recine-dokum-tipi-polyester-recine (Erişim tarihi: 16 Ekim 2026).

Zhang, P., Wang, X., Wang, J. and Zhang, T. (2023). Workability and durability of concrete incorporating waste tire rubber: A review. Journal of Renewable Materials, 11(2), 745-776.

EKLER

EK- 1: ATIK LASTİK ESASLI KOMPOZİTLERE İLİŞKİN LİTERATÜRÜN TEMATİK VE KARŞILAŞTIRMALI ÖZETİ

Bu ek, tezin kaynakçasında yer alan çalışmalara dayanarak literatür temelini desteklemek ve incelenen çalışmaların malzeme sistemi, deney koşulları, temel bulguları ve tez çalışmasıyla ilişkilerini karşılaştırmalı biçimde göstermek amacıyla hazırlanmıştır. Tablolar, tezdeki Literatür Taraması bölümünün konu sırasını izlemekte; sayısal veya yöntemsel olarak doğrudan karşılaştırılamayan çalışmalar için karşılaştırma sınırı özellikle korunmaktadır.

Kaynaklar; ÖTL geri kazanımı, çimentolu ve polimer bağlı sistemler, epoksi, poliüretan, polyester, fenolik/novolak, granülometri ve ara yüzey, mekanik davranış, UPV/dinamik/sismik uygulamalar, mikroyapısal-spektroskopik karakterizasyon, termal/yangın davranışı ve çevresel-ekonomik değerlendirme başlıklarında gruplanmıştır.

Tablo E1.1. Bu ekteki tematik tabloların okuma haritası

Tablo grubu	Ana soru	Okuma amacı
Tablo E1.2–1.3	ÖTL yapı malzemelerine nasıl taşındı?	Geri kazanım çerçevesi ve çimentolu sistemlerden polimer bağlı sisteme geçiş
Tablo E1.4–1.7	Dört bağlayıcı ailesi literatürde nasıl davranıyor?	Epoksi, PU, polyester ve novolak/fenolik sistemleri ayrı değerlendirmek
Tablo E1.8–1.9	Granülometri ve mekanik davranış nasıl ilişkilendiriliyor?	Ara yüzey, tane boyutu, dayanım, deformasyon ve enerji yutmayı birlikte okumak
Tablo E1.10–1.12	İşlevsel ve ileri karakterizasyon ne söylüyor?	UPV, dinamik/sismik, SEM/EDS/FTIR, ısıl iletkenlik, yangın ve yüksek sıcaklık
Tablo E1.13–1.15	Tezin literatürdeki yeri nedir?	Sürdürülebilirlik, araştırma boşluğu ve doğrudan tez–literatür karşılaştırması

Tablo E1.2. ÖTL geri kazanımı ve yapı malzemelerinde kullanım yaklaşımlarının karşılaştırmalı özeti

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Amari vd. (1999)	Resource recovery from used rubber tires	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Bu nedenle ÖTL geri kazanımı, termoplastik atıklardaki basit eriyik yeniden işleme yaklaşımından farklı olarak mekanik küçültme, devulkanizasyon, yüzey aktivasyonu, piroliz veya enerji geri kazanımı gibi çeşitli yolları içermektedir (Amari vd., 1999; Ramarad vd., 2015).	Kaynağın malzeme tanımı ve işlem bağlamı korunur. Genel başvuru bilgisi, belirli bir reçetenin dayanım veya ürün uygunluğu deneyi yerine kullanılmaz.
Fukumori vd. (2002)	Recycling technology of tire rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Mekanik küçültme, granül karakterizasyonu ve devulkanizasyon ise ikincil kauçuk hammaddesinin özelliklerini doğrudan belirleyen süreçlerdir (Fukumori vd., 2002; Karabörk ve Akdemir, 2013; Lapkovskis vd., 2020).	Kaynağın malzeme tanımı ve işlem bağlamı korunur. Genel başvuru bilgisi, belirli bir reçetenin dayanım veya ürün uygunluğu deneyi yerine kullanılmaz.
Karabörk ve Akdemir (2013)	Atık taşıt lastiklerinin parçalanması ve lastik tozunun karakterizasyonu	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	ÖTL'nin parçalanması ve GTR üretimi üzerine çalışmalar, fraksiyon tanımının ve parçacık morfolojisinin kompozit tasarımında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Karabörk ve Akdemir, 2013; Lapkovskis vd., 2020).	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.
Lapkovskis vd. (2020)	Crumb rubber as a secondary raw material from waste rubber: A short review of end-of-life mechanical processing methods	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	ÖTL'nin parçalanması ve GTR üretimi üzerine çalışmalar, fraksiyon tanımının ve parçacık morfolojisinin kompozit tasarımında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (Karabörk ve Akdemir, 2013; Lapkovskis vd., 2020).	Ortalama, seçilmiş maksimum ve model tahmini ayrılır; ortak deformasyon sınırı olmadan enerji üstünlüğü genellenmez.

Tablo E1.2. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Formela (2022)	Waste tire rubber-based materials: Processing, performance properties and development strategies	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Kauçuk geri dönüşüm teknolojilerinin gelişimi, yüksek GTR içerikli malzemeler ve daha çevreci geri kazanım yaklaşımları bu dönüşümün temel başlıklarıdır (De vd., 2005; Formela, 2022; Wiśniewska vd., 2023; Laftah ve Wan Abdul Rahman, 2025).	Derleme, birincil deneylerin yeniden sayımı değildir; mekanizma için kullanılan kaynağın özgün deneyine dönülür.
Castillo vd. (2025)	A systematic bibliometric review analysis of research on the use of waste rubber tyres in building and construction materials and their applications	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Güncel derleme ve bibliyometrik çalışmalar, atık lastik esaslı kompozitlerde matris seçimi, ara yüzey uyumu, kullanım alanına özgü doğrulama ve uzun dönem performansın hâlen temel araştırma başlıkları arasında olduğunu göstermektedir (Ramarad vd., 2015; Sienkiewicz vd., 2017; Hejna vd., 2020; Castillo vd., 2025; Yan vd., 2026).	Derleme, birincil deneylerin yeniden sayımı değildir; mekanizma için kullanılan kaynağın özgün deneyine dönülür.
Akca Güler vd. (2025)	Atık lastiklerin yönetimi, geri dönüştürülmesi ve çevresel etkileri üzerine bir derleme	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Türkiye ölçeğindeki güncel değerlendirmeler ve yönetim çalışmaları, geri kazanım seçeneklerinin çevresel etki, uygulanabilirlik ve ürün değeriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Sugözü ve Mutlu, 2009; Durna vd., 2020; Akca Güler vd., 2025).	Derleme, birincil deneylerin yeniden sayımı değildir; mekanizma için kullanılan kaynağın özgün deneyine dönülür.

Not: Bu tablo, ÖTL'nin mekanik küçültmeden yüksek katma değerli yapı uygulamalarına uzanan literatür çerçevesini özetler.

Tablo E1.3. Çimento esaslı atık lastik çalışmalarından polimer bağlı sistemlere geçişi açıklayan temel çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Eldin ve Senouci (1993)	Rubber-tire particles as concrete aggregate	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kauçuklu beton literatürünün tarihsel gelişimi, lastik parçacıklarının doğal agrega veya dolgu yerine kullanılmasının yoğunluk, dayanım ve deformasyon davranışını birlikte değiştirdiğini göstermektedir (Eldin ve Senouci, 1993; Topçu, 1995; Khatib ve Bayomy, 1999; Güneyisi vd., 2004; Li vd., 2004; Ganjian vd., 2009).	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.
Khatib ve Bayomy (1999)	Rubberized Portland cement concrete	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kauçuklu beton literatürünün tarihsel gelişimi, lastik parçacıklarının doğal agrega veya dolgu yerine kullanılmasının yoğunluk, dayanım ve deformasyon davranışını birlikte değiştirdiğini göstermektedir (Eldin ve Senouci, 1993; Topçu, 1995; Khatib ve Bayomy, 1999; Güneyisi vd., 2004; Li vd., 2004; Ganjian vd., 2009).	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.
Güneyisi vd. (2004)	Properties of rubberized concretes containing silica fume	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kauçuklu beton literatürünün tarihsel gelişimi, lastik parçacıklarının doğal agrega veya dolgu yerine kullanılmasının yoğunluk, dayanım ve deformasyon davranışını birlikte değiştirdiğini göstermektedir (Eldin ve Senouci, 1993; Topçu, 1995; Khatib ve Bayomy, 1999; Güneyisi vd., 2004; Li vd., 2004; Ganjian vd., 2009).	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.

Tablo E1.3. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Ganjian vd. (2009)	Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kauçuklu beton literatürünün tarihsel gelişimi, lastik parçacıklarının doğal agrega veya dolgu yerine kullanılmasının yoğunluk, dayanım ve deformasyon davranışını birlikte değiştirdiğini göstermektedir (Eldin ve Senouci, 1993; Topçu, 1995; Khatib ve Bayomy, 1999; Güneyisi vd., 2004; Li vd., 2004; Ganjian vd., 2009).	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.
Raffoul vd. (2016)	Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Daha sonraki çalışmalar, yüzey/ara yüzey düzenlemeleri, yüksek kauçuk oranları ve tane boyutu dağılımının performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur (Pelisser vd., 2011; Su vd., 2015; Raffoul vd., 2016).	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.
Ramarad vd. (2015)	Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Ramarad vd. (2015), Hejna vd. (2020) ve Yan vd. (2026) tarafından yapılan geniş kapsamlı değerlendirmeler, GTR içeren polimer sistemlerinde parçacık boyutu, yüzey modifikasyonu, dolgu oranı, matris polaritesi, çapraz bağlanma ve işleme koşullarının sonuçları birlikte belirlediğini ortaya koymaktadır.	Derleme, birincil deneylerin yeniden sayımı değildir; mekanizma için kullanılan kaynağın özgün deneyine dönülür.

Tablo E1.3. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Hamdi vd. (2021)	Scope of reusing waste shredded tires in concrete and cementitious composite materials: A review	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Güncel derlemeler ve deneysel çalışmalar, atık lastik içeren çimento esaslı sistemlerde taze özellikler, dayanım, dayanıklılık ve mikroyapı arasındaki ilişkilerin çok değişkenli olduğunu vurgulamaktadır (Roychand vd., 2020; Hamdi vd., 2021; İpek vd., 2022; Zhang vd., 2023).	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.
Aksoy (2021)	Atık lastik katkılı farklı polimer içeren betonların özelliklerinin incelenmesi	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Aksoy (2021), 0–4 mm boyutundaki atık lastiği ince agrega yerine hacimce %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanmış; çimento hacminin %1 ve %2'si düzeyinde polyester veya stiren-bütadien (SBR) polimeri eklenen betonları incelemiştir.	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.

Not: Çimentolu sistemler, bu tezdeki polimer bağlı kompozitlerle doğrudan sayısal eşdeğer kabul edilmemiş; ortak ara yüzey, rijitlik ve deformasyon eğilimlerini anlamak için kullanılmıştır.

Tablo E1.4. Epoksi esaslı atık lastik kompozitlerine ilişkin seçilmiş çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Kaynak vd. (2001)	A fractographic study on toughening of epoxy resin using ground tyre rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kaynak vd. (2001), epoksi/GTR sistemlerinde fraktografik SEM incelemesini kırılma mekanizmalarının yorumunda kullanmıştır.	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Kaynak vd. (2003)	Use of silane coupling agents to improve epoxy-rubber interface	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Aynı araştırma grubunun silan bağlayıcı ajanları kullandığı sonraki çalışmada, kauçuk-epoksi ara yüzeyinin iyileştirilebildiği ve ara yüzey kalitesinin kompozit davranışını belirgin biçimde etkilediği bildirilmiştir (Kaynak vd., 2003).	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Aoudia vd. (2017)	Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Aoudia vd. (2017) FTIR'ı mikrodalga devulkanizasyonunda S-S/C-S bağlarındaki değişimleri değerlendirmek için kullanmış; He vd. (2015) GTR içeren fenolik kür sisteminde FTIR-ATR bulgularını çapraz bağlanma davranışıyla ilişkilendirmiştir.	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.
Dębska vd. (2019)	Assessment of the applicability of sustainable epoxy composites containing waste rubber aggregates in buildings	Epidian 5 epoksi, Z-1 sertleştirici (reçinenin %10'u); kumun hacimce %0–100 ikamesi. Kontrol: 1620 g kum + 405 g reçine + 40,5 g sertleştirici. Laboratuvarda 7 gün; 40×40×160 mm eğilme ve kırılmış prizma yarılarında basınç. PN-EN 196-1:2006; NETZSCH HFM436 ile 300×300×10 mm ısıl numune.	Tam kum ikamesinde basınç 25,07 MPa; eğilme 7,12 MPa. Ölçülen yoğunluk kontrol 1,99, tam ikame 1,04 g/cm³. Tablo 3'teki 1,20 g/cm³ model girdisidir; ölçümle birleştirilmez.	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.

Tablo E1.4. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Shahapurkar vd. (2023)	Quasi-static compressive behaviour of epoxy composites reinforced with crumb rubber. Polymers and Polymer Composites, 31, 1-9	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Epoksi sistemlerinde yüzey işlemi, çatlak saptırma, basınç davranışı ve uzun süreli/dış etkilere dayanıklılık ayrı araştırma eksenleri olarak ele alınmıştır (Kaynak vd., 2001; Kaynak vd., 2003; Aoudia vd., 2017; Wang vd., 2019; Shahapurkar vd., 2023; Sugiman vd., 2023).	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Sugiman vd. (2023)	Water absorption and tensile properties of ground tire rubber/epoxy composites: Effect of surface treatment	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Epoksi sistemlerinde yüzey işlemi, çatlak saptırma, basınç davranışı ve uzun süreli/dış etkilere dayanıklılık ayrı araştırma eksenleri olarak ele alınmıştır (Kaynak vd., 2001; Kaynak vd., 2003; Aoudia vd., 2017; Wang vd., 2019; Shahapurkar vd., 2023; Sugiman vd., 2023).	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Türkben vd. (2023)	Sustainable production of recycled rubber waste composites with various epoxy systems: A comparative study on mechanical and thermal properties	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Türkben vd. (2023) aynı geri dönüştürülmüş kauçuk fazının farklı epoksi sistemlerinde mekanik ve termal özellikleri farklı biçimde etkileyebildiğini; Revelo vd. (2021) PU-lastik kompozitlerinde granülometri, yoğunluk, mikroyapı ve termal davranışın birlikte değiştiğini göstermiştir.	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.

Not: Epoksi literatürü; ara yüzey, kırılma, yüzey işlemi, basınç ve su alma davranışlarını birlikte göstermektedir.

Tablo E1.5. Poliüretan esaslı atık lastik kompozitlerine ilişkin seçilmiş çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Semlali Aouragh Hassani vd. (2020)	Recycled tires shreds based polyurethane binder: Production and characterization	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Semlali Aouragh Hassani vd. (2020), geri dönüştürülmüş lastik parçacıkları ve poliüretan bağlayıcıdan üretilen kompozitlerde yüzey halojenleme işleminin kauçuk yüzey pürüzlülüğünü artırarak bağlayıcı etkileşimini geliştirebildiğini göstermiş; SEM ve FTIR bulgularını basınç, gevşeme ve kalıcı deformasyon sonuçlarıyla birlikte değerlendirmiştir.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Revelo vd. (2021)	Composite materials made of waste tires and polyurethane resin: A case study of flexible tiles successfully applied in industry	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Revelo vd. (2021) PU-lastik karolarda granülometrinin yoğunluk ve mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu; Akın ve Polat (2022) polyester polimer betonlarda 0-4 mm lastik fraksiyonunun 0-1 mm fraksiyona göre bazı sonuçlarda avantaj sağlayabildiğini göstermiştir.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Jiang vd. (2021)	Effect of crumb rubber powder on mechanical properties and pore structure of polyurethane-based polymer mortar for repair	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Literatürde PU–lastik sistemlerinde granülometri, bağlayıcı ve gözenek yapısının ortak etkisi vurgulanmıştır (Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2022).	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Jiang vd. (2022)	Mechanical properties and freeze-thaw resistance of polyurethane-based polymer mortar with crumb rubber powder	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Literatürde PU–lastik sistemlerinde granülometri, bağlayıcı ve gözenek yapısının ortak etkisi vurgulanmıştır (Revelo vd., 2021; Jiang vd., 2022).	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Olszewski vd. (2022)	Insights into stoichiometry adjustments governing the performance of flexible foamed polyurethane/ground tire rubber composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Olszewski vd. (2022), modifiye atık lastik içeren esnek poliüretan köpüklerde dolgunun hidroksil gruplarının reaksiyon stokiyometrisine katkısını incelemiştir.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.

Tablo E1.5. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Hejna vd. (2024a)	Management of ground tire rubber waste by incorporation into polyurethane-based composite foams	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Hejna vd. (2024a) GTR içeren PU köpüklerinde parçacık modifikasyonu ile hücre yapısı, mekanik özellikler ve emisyonlar arasındaki ilişkiyi incelemiştir.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Nezili vd. (2026)	Effect of a pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of recycled ground tire rubber/polyurethane foam composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Nezili vd. (2026) ise kimyasal ön işlem görmüş GTR'nin esnek PU köpüklerinin mekanik, termal ve akustik özellikleri üzerindeki etkisini ele almıştır.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Prieto-Quintana vd. (2026)	Performance evaluation and LCA of porous polyurethane mixtures with crumb rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Son dönem literatürü, atık lastik kullanımının yalnız mekanik performans değil; ısıl-akustik işlevler, yaşlanma, yaşam döngüsü ve hedef ürün performansı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024; Benjak vd., 2024; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Wijesinghe vd., 2025; Prieto-Quintana vd., 2026).	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.

Not: PU literatürü mekanik dayanımla birlikte deformasyon, kalıcı şekil değiştirme, gözenek yapısı, akustik/ısıl davranış ve ürün ölçeğini öne çıkarmaktadır.

Tablo E1.6. Doymamış polyester esaslı atık lastik kompozitlerine ilişkin seçilmiş çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Abu-Jdayil vd. (2016a)	Thermal and physical characteristics of polyester-scrap tire composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Abu-Jdayil vd. (2016a) ve Revelo vd. (2021), sırasıyla polyester ve PU esaslı sistemlerde kauçuk içeriği/granülometrinin yoğunlukla ilişkili olduğunu göstermiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Abu-Jdayil vd. (2016b)	Investigation on the mechanical behavior of polyester-scrap tire composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Abu-Jdayil vd. (2016b) polyester-lastik kompozitlerinde kauçuk miktarı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünde azalma bildirmiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Akın ve Polat (2022)	The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress-strain properties of polyester-based polymer concretes	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Akın ve Polat (2022), polyester esaslı polimer betonlarda UPV ile mekanik özellikleri birlikte incelemiş ve reçine/kauçuk oranının bu göstergeleri aynı anda değiştirdiğini göstermiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Yıldızhan vd. (2022)	Tensile and morphological properties of waste tire rubber granule/polyester polymer matrix composite	Reçine:granül 100:0/5/10/15; Tablo 2'de kütle/hacim esası açık etiketlenmemiş. %0,2 wt. hızlandırıcı ve granül sonrası 10 dakika, %2 wt. sertleştirici sonrası 10 dakika. Açık kalıp, 24 saat oda kürü. Çekme 250×25×2,5 mm ALŞA; SEM ve Vickers yöntemi.	P → P-WTG15: çekme 62,00 → 51,96 MPa; uzama %1,95 → %2,35. Tedarikçi kürlenmiş reçine dayanımı 65 MPa, deneysel kontrol 62 MPa'dır. İşlenmemiş granül ara yüzeyi zayıf olarak değerlendirilmiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.

Not: Polyester çalışmalarında lastik oranı, granül boyutu, çekme/basınç davranışı, süneklik ve ara yüzey kalitesi temel karşılaştırma değişkenleridir.

Tablo E1.7. Fenolik/novolak–kauçuk sistemleri ve ilgili üretim rotaları

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Derakhshandeh vd. (2008)	Effects of rubber curing ingredients and phenolic-resin on mechanical, thermal, and morphological characteristics of rubber/phenolic-resin blends	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	SBR/NBR–novolak karışımlarında fenolik reçine miktarı ve kür bileşenleri mekanik, termal ve morfolojik özellikleri değiştirmiştir. Çalışma atık lastik içermediğinden, kauçuk–fenolik ağ etkileşimi açısından değerlendirilmiştir.	Fenolik balata, termoplastik vulkanizat ve granül yapı kompoziti ayrılır; sıcak pres basıncı etüv kürüne taşınmaz.
He vd. (2015)	Effect of dicumyl peroxide and phenolic resin as a mixed curing system on the mechanical properties and morphology of TPVs based on HDPE/ground tire rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	HDPE/GTR esaslı termoplastik vulkanizatlarda fenolik reçine ve dikumil peroksit içeren karma kür sistemi incelenmiştir. Çapraz bağlanma ve mekanik özelliklerdeki gelişim, FTIR-ATR ve SEM bulgularıyla birlikte değerlendirilmiştir.	Fenolik balata, termoplastik vulkanizat ve granül yapı kompoziti ayrılır; sıcak pres basıncı etüv kürüne taşınmaz.
Tamayo vd. (2021)	Preparation and properties of sustainable brake pads with recycled end-of-life tire rubber particles	Novolak F109; grafit, cam lifi, çelik, barit ve alümina. Lastiksiz referansta %10 fenolik. A60 grubunda %1–20 wt. lastik; ortalama 330 µm (nominal 470). Oda sıcaklığında 20 MPa/1 dakika; basınç korunarak 180 °C/10 dakika, ardından 200 °C/4 saat. Çap 34×5 mm, ikişer numune; pin-on-disc.	Yoğunluklar: lastiksiz 2,90; A60/03 2,78; A60/20 2,20 g/cm³. Yaklaşık %3 lastik, yayının kendi tribolojik değerlendirmesinde öne çıkmıştır; genel optimum değildir.	Bağlayıcı ailesi ortak olsa da çok bileşenli fren balatası ile granül yapı kompoziti farklı ürünlerdir. Çalışma, fenolik bağlayıcının üretim/uygulama örneğidir; tez için yapı derzi, yangın veya izolatör uygunluğu kanıtı değildir.
Takeichi ve Furukawa (2012)	Epoxy resins and phenol-formaldehyde resins. Polymer Science: A Comprehensive Reference, 5, 723-751	Bu kayıt kitap / kitap bölümü niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Epoksi ve fenol-formaldehit reçinelerinin temel kimyasal yapısı ve kür davranışı, novolak–hekzamin sisteminin diğer termosetlerden ayrıldığı noktaları açıklamaya yardımcı olmaktadır (Takeichi ve Furukawa, 2012).	Fenolik balata, termoplastik vulkanizat ve granül yapı kompoziti ayrılır; sıcak pres basıncı etüv kürüne taşınmaz.

Not: Doğrudan yüksek granül içerikli novolak–hekzamin yapı kompoziti literatürü sınırlıdır; bu nedenle tabloda mekanizma ve üretim açısından en yakın fenolik/kauçuk çalışmaları yer almaktadır.

Tablo E1.8. Granülometri, yüzey işlemi, devulkanizasyon ve kauçuk–matris ara yüzeyine ilişkin çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Aoudia vd. (2017)	Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Aoudia vd. (2017) FTIR'ı mikrodalga devulkanizasyonunda S-S/C-S bağlarındaki değişimleri değerlendirmek için kullanmış; He vd. (2015) GTR içeren fenolik kür sisteminde FTIR-ATR bulgularını çapraz bağlanma davranışıyla ilişkilendirmiştir.	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.
Kaynak vd. (2003)	Use of silane coupling agents to improve epoxy-rubber interface	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Aynı araştırma grubunun silan bağlayıcı ajanları kullandığı sonraki çalışmada, kauçuk-epoksi ara yüzeyinin iyileştirilebildiği ve ara yüzey kalitesinin kompozit davranışını belirgin biçimde etkilediği bildirilmiştir (Kaynak vd., 2003).	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Kaynak vd. (2001)	A fractographic study on toughening of epoxy resin using ground tyre rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kaynak vd. (2001), epoksi/GTR sistemlerinde fraktografik SEM incelemesini kırılma mekanizmalarının yorumunda kullanmıştır.	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Fazli ve Rodrigue (2021)	Effect of ground tire rubber (GTR) particle size and content on the morphological and mechanical properties of recycled high-density polyethylene (rHDPE)/GTR blends	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Granül boyutu etkisinin yalnız termosetlerle sınırlı olmadığı, farklı polimer ve çimento matrislerinde de parçacık boyutu ile dağılımın morfoloji ve mekanik davranışı değiştirebildiği görülmektedir (Su vd., 2015; Fazli ve Rodrigue, 2021).	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.

Tablo E1.8. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Shanmugharaj vd. (2005)	UV surface modification of waste tire powder: Characterization and influence on polypropylene/waste powder composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	İşlenmemiş GTR yüzeyinin farklı matrislerle uyumunu geliştirmek için kimyasal aşındırma, oksidasyon, UV ve diğer yüzey modifikasyonları araştırılmıştır (Shanmugharaj vd., 2005; Phiri vd., 2021). Daha güncel çalışmalar, radyasyon veya kimyasal yüzey işlemlerinin ara yüzey ve mekanik özellikler üzerinde etkili olabileceğini, ancak etkinin işlem-matris kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir (Sugiman vd., 2023; Martínez-Barrera vd., 2026).	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.
Martínez-Barrera vd. (2026)	Enhancing polymer composites through addition of waste tire rubber particles modified by gamma radiation	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.		Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.

Not: Bu çalışmalar, tane boyutu etkisinin tek başına okunamayacağını; yüzey durumu, bağlayıcı uyumu ve prosesle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo E1.9. Mekanik davranış, gerilme–birim şekil değiştirme, süneklik ve enerji yutmaya ilişkin çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Shahapurkar vd. (2023)	Quasi-static compressive behaviour of epoxy composites reinforced with crumb rubber. Polymers and Polymer Composites, 31, 1-9	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Epoksi sistemlerinde yüzey işlemi, çatlak saptırma, basınç davranışı ve uzun süreli/dış etkilere dayanıklılık ayrı araştırma eksenleri olarak ele alınmıştır (Kaynak vd., 2001; Kaynak vd., 2003; Aoudia vd., 2017; Wang vd., 2019; Shahapurkar vd., 2023; Sugiman vd., 2023).	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Akın ve Polat (2022)	The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress-strain properties of polyester-based polymer concretes	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Akın ve Polat (2022), polyester esaslı polimer betonlarda UPV ile mekanik özellikleri birlikte incelemiş ve reçine/kauçuk oranının bu göstergeleri aynı anda değiştirdiğini göstermiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Abu-Jdayil vd. (2016b)	Investigation on the mechanical behavior of polyester-scrap tire composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Abu-Jdayil vd. (2016b) polyester-lastik kompozitlerinde kauçuk miktarı arttıkça basınç dayanımı ve elastisite modülünde azalma bildirmiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Semlali Aouragh Hassani vd. (2020)	Recycled tires shreds based polyurethane binder: Production and characterization	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Semlali Aouragh Hassani vd. (2020), geri dönüştürülmüş lastik parçacıkları ve poliüretan bağlayıcıdan üretilen kompozitlerde yüzey halojenleme işleminin kauçuk yüzey pürüzlülüğünü artırarak bağlayıcı etkileşimini geliştirebildiğini göstermiş; SEM ve FTIR bulgularını basınç, gevşeme ve kalıcı deformasyon sonuçlarıyla birlikte değerlendirmiştir.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.

Not: Maksimum dayanım ile deformasyon/enerji yutma aynı performans ölçütü değildir; tezdeki σ–ε yorumları bu ayrım gözetilerek değerlendirilmiştir.

Tablo E1.10. UPV, titreşim, çevrimsel davranış, derz ve sismik uygulamalara ilişkin çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Genovés vd. (2022)	Micronized recycle rubber particles modified multifunctional polymer composites: Application to ultrasonic materials engineering	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Genovés vd. (2022), mikronize atık lastik içeren polimer kompozitlerde ultrasonik dalga hızı, akustik empedans ve sönüm özelliklerini incelemiştir.	Monoton eğri alanı dinamik sönüm değildir. Serbest zemin, mesnet ve derz sistemi ayrılır; öneri ürün uygunluğu sayılmaz.
Bala ve Gupta (2021)	Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire rubber: A review	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Kauçuk içeren beton ve kompozitlerde ısıl direnç, ses yutma ve titreşim sönümleme üzerine derlemeler ile deneysel çalışmalar, tane boyutu, boşluk yapısı, ürün kalınlığı ve matris türünün işlevsel performansı etkileyebildiğini göstermektedir (Corredor-Bedoya vd., 2017; Bala ve Gupta, 2021; Pongsopha vd., 2022; Cimbola vd., 2024; Wijesinghe vd., 2025).	Monoton eğri alanı dinamik sönüm değildir. Serbest zemin, mesnet ve derz sistemi ayrılır; öneri ürün uygunluğu sayılmaz.
Ruiz vd. (2026)	Thermal and acoustic characterization of recycled ground tyre rubber and aggregate seismic isolator	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Ruiz vd. (2026), atık lastik granülü, geri dönüştürülmüş agrega ve poliüretan bağlayıcı içeren kompozitleri, bölme duvarı ile çevresindeki taşıyıcı çerçevenin etkileşimini azaltmaya yönelik sismik ara eleman yaklaşımı içinde incelemiştir.	Monoton eğri alanı dinamik sönüm değildir. Serbest zemin, mesnet ve derz sistemi ayrılır; öneri ürün uygunluğu sayılmaz.
Akhtar ve Tsang (2024)	A comparative life cycle assessment of recycled tire rubber applications in sustainable earthquake-resistant construction	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Son dönem literatürü, atık lastik kullanımının yalnız mekanik performans değil; ısıl-akustik işlevler, yaşlanma, yaşam döngüsü ve hedef ürün performansı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024; Benjak vd., 2024; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Wijesinghe vd., 2025; Prieto-Quintana vd., 2026).	Monoton eğri alanı dinamik sönüm değildir. Serbest zemin, mesnet ve derz sistemi ayrılır; öneri ürün uygunluğu sayılmaz.

Not: Bu tablo, tezde potansiyel kullanım alanı olarak belirtilen esnek derz ve sismik ara eleman araştırmalarının hangi ek deneylerle doğrulanması gerektiğini görünür kılar.

Tablo E1.11. SEM/EDS, FTIR ve mikroyapısal karakterizasyona ilişkin seçilmiş çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Kaynak vd. (2001)	A fractographic study on toughening of epoxy resin using ground tyre rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kaynak vd. (2001), epoksi/GTR sistemlerinde fraktografik SEM incelemesini kırılma mekanizmalarının yorumunda kullanmıştır.	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.
Aoudia vd. (2017)	Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Aoudia vd. (2017) FTIR'ı mikrodalga devulkanizasyonunda S-S/C-S bağlarındaki değişimleri değerlendirmek için kullanmış; He vd. (2015) GTR içeren fenolik kür sisteminde FTIR-ATR bulgularını çapraz bağlanma davranışıyla ilişkilendirmiştir.	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.
Colom vd. (2024)	Microstructural phenomena in ground tire rubber (GTR) devulcanized via combined thermochemomechanical and microwave processes monitored by FTIR and DTGA assisted by other techniques	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Colom vd. (2024) FTIR ve DTGA'yı birlikte kullanarak farklı devulkanizasyon işlemlerinin GTR yapısındaki değişimleri takip etmiştir.	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.
Sugiman vd. (2023)	Water absorption and tensile properties of ground tire rubber/epoxy composites: Effect of surface treatment	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Epoksi sistemlerinde yüzey işlemi, çatlak saptırma, basınç davranışı ve uzun süreli/dış etkilere dayanıklılık ayrı araştırma eksenleri olarak ele alınmıştır (Kaynak vd., 2001; Kaynak vd., 2003; Aoudia vd., 2017; Wang vd., 2019; Shahapurkar vd., 2023; Sugiman vd., 2023).	Kauçuk/granül oranının paydası, sertleştirici, geometri ve deney yaşı eşleştirilmeden dayanım oranı ile üstünlük kurulmaz.

Tablo E1.11. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Yıldızhan vd. (2022)	Tensile and morphological properties of waste tire rubber granule/polyester polymer matrix composite	Reçine:granül 100:0/5/10/15; Tablo 2'de kütle/hacim esası açık etiketlenmemiş. %0,2 wt. hızlandırıcı ve granül sonrası 10 dakika, %2 wt. sertleştirici sonrası 10 dakika. Açık kalıp, 24 saat oda kürü. Çekme 250×25×2,5 mm ALŞA; SEM ve Vickers yöntemi.	P → P-WTG15: çekme 62,00 → 51,96 MPa; uzama %1,95 → %2,35. Tedarikçi kürlenmiş reçine dayanımı 65 MPa, deneysel kontrol 62 MPa'dır. İşlenmemiş granül ara yüzeyi zayıf olarak değerlendirilmiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Semlali Aouragh Hassani vd. (2020)	Recycled tires shreds based polyurethane binder: Production and characterization	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Semlali Aouragh Hassani vd. (2020), geri dönüştürülmüş lastik parçacıkları ve poliüretan bağlayıcıdan üretilen kompozitlerde yüzey halojenleme işleminin kauçuk yüzey pürüzlülüğünü artırarak bağlayıcı etkileşimini geliştirebildiğini göstermiş; SEM ve FTIR bulgularını basınç, gevşeme ve kalıcı deformasyon sonuçlarıyla birlikte değerlendirmiştir.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.
Martínez-Barrera vd. (2026)	Enhancing polymer composites through addition of waste tire rubber particles modified by gamma radiation	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Daha güncel çalışmalar, radyasyon veya kimyasal yüzey işlemlerinin ara yüzey ve mekanik özellikler üzerinde etkili olabileceğini, ancak etkinin işlem-matris kombinasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir (Sugiman vd., 2023; Martínez-Barrera vd., 2026).	Granül boyutu yanında yüzey, bağlayıcı oranı ve işlem rotası izlenir; TGA/FTIR değişimi tek başına aderans veya yararlı devulkanizasyon değildir.

Not: Mikroyapı ve spektroskopi sonuçları, mekanik veriyi açıklayan tamamlayıcı kanıt olarak değerlendirilmiş; tek başına nicel aderans veya yeni kimyasal bağ kanıtı sayılmamıştır.

Tablo E1.12. TGA/DTG, ısıl iletkenlik, yangın ve yüksek sıcaklık davranışına ilişkin çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Cimbola vd. (2024)	Evaluation of the applicability of waste rubber in insulation panels with regard to its grain size and panel thickness	PU yapıştırıcı; Tablo 1'de 0,5–2 ve 2–3,5 mm, ayrıca %35 ince + %65 iri. Dokuz karışım, 10/15/20 mm panel; ilk altı reçetede yapıştırıcı/lastik %4,41, son üçte %7,91. 80–130 °C'de karıştırma; hedef kalınlığa sıkıştırma. Porozite, modül, ısıl iletkenlik ve ses yalıtımı.	Çalışma genelinde λ=0,10–0,20 W/(m·K). İnce gruplarda yüksek porozite ve daha düşük modül/λ eğilimi. İri fraksiyon metinde 2,5–3 mm, Tablo 1'de 2–3,5 mm: farklılık korunmuştur.	Tezin değeri, makalenin çalışma aralığı içindedir. Bu durum eşdeğer reçete veya daha iyi yalıtım kanıtı değildir: oran, fraksiyon, yoğunluk, sıcaklık ve kalınlık eşleştirilmeden üstünlük sıralaması yapılmaz.
Abu-Jdayil vd. (2016a)	Thermal and physical characteristics of polyester-scrap tire composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Abu-Jdayil vd. (2016a) ve Revelo vd. (2021), sırasıyla polyester ve PU esaslı sistemlerde kauçuk içeriği/granülometrinin yoğunlukla ilişkili olduğunu göstermiştir.	Çekme, eğilme ve basınç aynı büyüklük değildir; cam elyaflı veya işlevlendirilmiş sistemler ayrıca tanımlanır.
Colom vd. (2023)	New approach in the reuse of modified ground tire rubber as thermal and acoustic insulation to be used in civil engineering	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Colom vd. (2023), öğütülmüş atık lastik ve poliüretan bağlayıcı içeren kompozitlerin ısıl ve akustik özelliklerini araştırmış; incelenen numunelerde 0,117–0,189 W/(m·K) aralığında ısıl iletkenlik bildirmiştir.	Aynı sıcaklık, yoğunluk, nem, kalınlık ve yöntem kontrol edilir. Aralık içinde bulunma, eşdeğer reçete veya ürün onayı değildir.
Hittini vd. (2021)	Utilization of devulcanized waste rubber tire in development of heat insulation composite	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Yüksek atık içerikli yalıtım ve panel uygulamalarında devulkanize kauçuk, poliüretan köpük, lifli çimento ve farklı kompozit matrisler kullanılarak ısıl ve/veya akustik performans araştırılmıştır (Hittini vd., 2021; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Nezili vd., 2026).	Aynı sıcaklık, yoğunluk, nem, kalınlık ve yöntem kontrol edilir. Aralık içinde bulunma, eşdeğer reçete veya ürün onayı değildir.

Tablo E1.12. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Ayhan vd. (2026)	Mechanical and microstructural performance of concrete incorporating waste tire rubber and recycled steel fibers under elevated temperatures	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Atık lastiğin geopolimer harçlarda alternatif agrega olarak değerlendirilmesi ve yüksek sıcaklık altında kauçuk/geri dönüştürülmüş bileşen içeren betonların incelenmesi, araştırma alanının geleneksel Portland çimentosu sistemlerinin ötesine genişlediğini göstermektedir (Mohabbi ve Bulsu, 2026; Ayhan vd., 2026).	Kütle kaybı, alev yayılması, ısı salımı ve artık mekanik dayanım ayrı özelliklerdir; T10 yangın sınıfı olarak kullanılmaz.
Hejna vd. (2024b)	The input of nanoclays to the synergistic flammability reduction in flexible foamed polyurethane/ground tire rubber composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Hejna vd. (2024b) ise nanokillerin alev geciktirici sistemle birlikte etkisini araştırmıştır.	Kütle kaybı, alev yayılması, ısı salımı ve artık mekanik dayanım ayrı özelliklerdir; T10 yangın sınıfı olarak kullanılmaz.
Kosmela vd. (2024)	Fire-retardant flexible foamed polyurethane (PU)-based composites: Armed and charmed ground tire rubber (GTR) particles	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Kosmela vd. (2024), alev geciktiriciyle modifiye edilen GTR içeren köpüklerde oksijen indeksi ve konik kalorimetre ölçümlerini mekanik ve ısıl iletkenlik sonuçlarıyla birlikte incelemiştir.	Kütle kaybı, alev yayılması, ısı salımı ve artık mekanik dayanım ayrı özelliklerdir; T10 yangın sınıfı olarak kullanılmaz.

Tablo E1.12. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Yang vd. (2025)	A comprehensive review on application of scrap tire rubber for sustainable thermal insulation material in civil engineering	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Son dönem literatürü, atık lastik kullanımının yalnız mekanik performans değil; ısıl-akustik işlevler, yaşlanma, yaşam döngüsü ve hedef ürün performansı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024; Benjak vd., 2024; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Wijesinghe vd., 2025; Prieto-Quintana vd., 2026).	Aynı sıcaklık, yoğunluk, nem, kalınlık ve yöntem kontrol edilir. Aralık içinde bulunma, eşdeğer reçete veya ürün onayı değildir.
Nezili vd. (2026)	Effect of a pre-treatment on the mechanical and acoustic properties of recycled ground tire rubber/polyurethane foam composites	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Nezili vd. (2026) ise kimyasal ön işlem görmüş GTR'nin esnek PU köpüklerinin mekanik, termal ve akustik özellikleri üzerindeki etkisini ele almıştır.	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.

Not: Isıl iletkenlik ve TGA sonuçları ile yangın/yüksek sıcaklık performansı birbirinden ayrılmıştır; gerçek yangın uygunluğu için ayrı testler gerekir.

Tablo E1.13. Çevresel etki, yaşam döngüsü, sürdürülebilirlik ve ekonomik değerlendirmeye ilişkin çalışmalar

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Akhtar ve Tsang (2024)	A comparative life cycle assessment of recycled tire rubber applications in sustainable earthquake-resistant construction	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Son dönem literatürü, atık lastik kullanımının yalnız mekanik performans değil; ısıl-akustik işlevler, yaşlanma, yaşam döngüsü ve hedef ürün performansı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024; Benjak vd., 2024; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Wijesinghe vd., 2025; Prieto-Quintana vd., 2026).	Monoton eğri alanı dinamik sönüm değildir. Serbest zemin, mesnet ve derz sistemi ayrılır; öneri ürün uygunluğu sayılmaz.
Bozorgmehr Nia ve Shafei (2025)	Carbon footprint reduction through repurposing solid wastes into sustainable construction materials: A state-of-the-art review	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Katı atıkların yapı malzemelerine yeniden kazandırılması, karbon ayak izinin azaltılması ve döngüsel malzeme kullanımı çerçevesinde değerlendirilmiştir.	Atık oranı tek başına çevresel üstünlük değildir; işlevsel birim, sistem sınırı, enerji ve kullanım ömrü korunur.
Habert vd. (2020)	Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, 1, 559-573	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Çimento ve betonun çevresel etkileri; klinker oranının azaltılması, malzeme verimliliği, alternatif bağlayıcılar ve ikincil hammaddeler üzerinden ele alınmıştır.	Atık oranı tek başına çevresel üstünlük değildir; işlevsel birim, sistem sınırı, enerji ve kullanım ömrü korunur.
Prieto-Quintana vd. (2026)	Performance evaluation and LCA of porous polyurethane mixtures with crumb rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Son dönem literatürü, atık lastik kullanımının yalnız mekanik performans değil; ısıl-akustik işlevler, yaşlanma, yaşam döngüsü ve hedef ürün performansı bakımından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Akhtar ve Tsang, 2024; Benjak vd., 2024; Hancharoen vd., 2024; Yang vd., 2025; Wijesinghe vd., 2025; Prieto-Quintana vd., 2026).	Köpük, termoplastik PU ve tek bileşenli granül bağlayıcısı ayrılır; hücre/yoğunluk ve çevrimsel koşullar kontrol edilir.

Tablo E1.13. (Devamı)

Yazar–Yıl	Çalışma / malzeme sistemi	Yöntem ve deney kapsamı	Temel bulgu	Tez çalışmasını destekleyen yönü
Nowak vd. (2023)	On the need for a paradigm change in the valuation of concrete with waste materials based on the example of concrete with crumb rubber	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Nowak vd. (2023), atık kauçuk içeren betonları değerlendirirken basınç dayanımının ısıl iletkenliğe oranını ortak bir performans göstergesi olarak kullanmıştır.	Çimento, doğal agrega, lif ve su/bağlayıcı etkileri ayrılır. C30 sınıfı ile doğrudan eşdeğer taşıyıcı performans kurulmaz.
Akca Güler vd. (2025)	Atık lastiklerin yönetimi, geri dönüştürülmesi ve çevresel etkileri üzerine bir derleme	Bu kayıt derleme niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Türkiye ölçeğindeki güncel değerlendirmeler ve yönetim çalışmaları, geri kazanım seçeneklerinin çevresel etki, uygulanabilirlik ve ürün değeriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Sugözü ve Mutlu, 2009; Durna vd., 2020; Akca Güler vd., 2025).	Derleme, birincil deneylerin yeniden sayımı değildir; mekanizma için kullanılan kaynağın özgün deneyine dönülür.
Basel Convention (2011)	Revised technical guidelines for the environmentally sound management of used and waste pneumatic tyres	Bu kayıt kurumsal rapor / el kitabı niteliğindedir; bağımsız malzeme deneyi veya tek bir karışım sonucu olarak kullanılmamıştır.	Kullanılmış ve atık pnömatik lastiklerin çevreyle uyumlu yönetimi için teknik bir çerçeve sunar. Tezde, ÖTL yönetimi ve geri kazanımının kurumsal dayanağı olarak kullanılmıştır.	Atık oranı tek başına çevresel üstünlük değildir; işlevsel birim, sistem sınırı, enerji ve kullanım ömrü korunur.
Andrew (2018)	Global CO_2 emissions from cement production	Birincil tam metinden reçete, numune ve deney koşulları bu özete aktarılmamıştır.	Küresel çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 emisyonlarını ele alır. Tezde, yapı sektöründe alternatif bağlayıcı ve ikincil hammadde kullanımının çevresel gerekçesini desteklemektedir.	Atık oranı tek başına çevresel üstünlük değildir; işlevsel birim, sistem sınırı, enerji ve kullanım ömrü korunur.

Not: Atık içeriği tek başına çevresel üstünlük değildir; yaşam döngüsü, üretim enerjisi, emisyon, kullanım ömrü ve maliyet birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo E1.14. Literatürde belirlenen araştırma boşlukları ve bu tez çalışmasının karşılığı

Literatürde görülen boşluk	Literatürdeki durum	Bu tez çalışmasının katkısı	İleri doğrulama gereksinimi
Aynı WTR kaynağında çoklu bağlayıcı karşılaştırması	Çalışmalar çoğunlukla tek bağlayıcı veya tek ürün ailesine odaklanmaktadır.	Epoksi, PU, novolak–hekzamin ve polyester aynı K1–K4 granül düzenleri altında karşılaştırılmıştır.	Bağımsız tekrar sayısını artıran faktöriyel tasarım ve çok değişkenli istatistik.
Granülometri etkisinin sistem-özgü oluşu	Literatürde tane boyutu etkisi matris, oran ve prosesle değişmektedir.	Epokside K1, PU'da K4, novolakta K2; polyesterde farklı mekanik ölçütlerde farklı K düzenleri öne çıkmıştır.	Tüm K1–K4 için yoğunluk, porozite, ısıl iletkenlik ve dinamik mekanik analiz.
Dayanım–deformasyon ayrımı	Kauçuklu sistemlerde yüksek dayanım ile yüksek deformasyon/enerji yutma her zaman birlikte artmamaktadır.	σ–ε eğrilerinden görünür tepe sekant eğimi ve yükleme işi yoğunluğu ayrı göstergeler olarak değerlendirilmiştir.	Ekstansometre/DIC, çevrimsel yükleme, histerezis ve ortak deformasyon sınırında enerji analizi.
UPV'nin polimer kompozitlerde yorumlanması	UPV; boşluk, matris rijitliği ve akustik empedansın birleşik etkisidir.	Epoksi–K4 en yüksek UPV'yi verirken en yüksek basınç dayanımı Epoksi–K1'de elde edilmiştir.	Yoğunluk/porozite eşlemesi, tekrar ölçümü ve standartlaştırılmış frekans/temas koşulları.
Mikroyapı–mekanik ilişkisinin nicelleştirilmesi	SEM çoğunlukla nitel açıklama sağlamaktadır.	SEM/EDS; mekanik, UPV ve termal bulguları açıklayan tamamlayıcı kanıt olarak kullanılmıştır.	Nicel görüntü analizi, mikro-BT ve ara yüzey aderans deneyleri.
Yangın ve yüksek sıcaklık	TGA sonuçları gerçek yangın performansıyla karıştırılabilmektedir.	T5/T10, DTG Tmax ve kalıntı oranları ayrı raporlanmış; yangın uygunluğu iddia edilmemiştir.	LOI, koni kalorimetresi, duman/ısı salımı ve yüksek sıcaklık sonrası mekanik testler.
Sismik/derz uygulama doğrulaması	Atık lastik sistemlerinde dinamik/sismik uygulamalar ayrı prototip ve çevrim testleri gerektirir.	PU–K4, geniş deformasyon profili nedeniyle esnek derz ve sismik ara eleman araştırmaları için aday olarak değerlendirilmiştir.	Çekme, kesme, çevrimsel kesme, histerezis, yorulma, aderans ve tam ölçekli derz/mesnet prototipleri.
Çevresel ve ekonomik doğrulama	Atık içeriği tek başına net çevresel üstünlük göstermemektedir.	Teorik 1 m^3 hammadde maliyeti hesaplanmış; LCA üstünlüğü iddia edilmemiştir.	LCA, VOC/liç, üretim enerjisi, kullanım ömrü ve kullanım sonu senaryoları.

Tablo E1.15. Tez sonuçları ile en yakın literatür eğilimlerinin doğrudan karşılaştırmalı özeti

Tezdeki bulgu	Tez değeri / gözlem	En yakın literatür eğilimi	Temsilci kaynaklar	Karşılaştırmalı sonuç
Epoksi–K1 mekanik performans	8,21 MPa basınç; 2,21 MPa eğilme	Epoksi/GTR sistemlerinde matris rijitliği ve ara yüzey kalitesi dayanım/tokluk davranışını güçlü biçimde etkiler.	Kaynak vd. (2001, 2003); Dębska vd. (2019); Türkben vd. (2023)	Yüksek dayanım eğilimi uyumludur; reçete, oran, geometri ve deney yaşı farklı olduğundan sayısal üstünlük kurulmaz.
PU–K4 çoklu performans	6,29 MPa basınç; 1,94 MPa eğilme; λ=0,1486 W/(m·K); geniş görünür deformasyon	PU/GTR literatürü esnek karo/panel, deformasyon, akustik/ısıl işlev ve ara yüzey davranışını birlikte öne çıkarır.	Semlali Aouragh Hassani vd. (2020); Revelo vd. (2021); Cimbola vd. (2024); Nezili vd. (2026)	PU–K4, beton benzeri yüksek dayanımdan çok esnek ve işlevsel ara eleman araştırmaları için anlamlıdır.
Novolak–hekzamin	K2: 6,29 MPa basınç, 1,38 MPa eğilme; T10=348,8 °C; kalıntı %43,1	Fenolik/novolak sistemlerde kür kimyası ve ısıl ağ yapısı mekanik ve termal profili belirgin biçimde değiştirir.	Derakhshandeh vd. (2008); He vd. (2015); Tamayo vd. (2021)	Mekanik ve termal göstergeler ayrı okunmalıdır; yüksek TGA kalıntısı yangın sınıfı değildir.
Polyester serisi	Basınç 1,22–1,35 MPa; eğilme 0,20–0,24 MPa	İşlenmemiş GTR/polyester sistemlerinde ara yüzey zayıflığı ve artan kauçuk oranı dayanım kaybıyla ilişkilendirilmektedir.	Abu-Jdayil vd. (2016a,b); Akın ve Polat (2022); Yıldızhan vd. (2022)	Düşük değerler "polyester genel olarak zayıftır" biçiminde değil, mevcut reçete ve işlenmemiş ara yüzeyle sınırlandırılmalıdır.
UPV–dayanım ilişkisi	Epoksi–K4 UPV=2012 m/s; basınç 3,54 MPa. Epoksi–K1 basınç maksimumu 8,21 MPa.	Polimer/kauçuk sistemlerinde ultrasonik iletim boşluk, matris ve faz sürekliliğinden etkilenir.	Genovés vd. (2022)	UPV tek başına dayanım dönüştürme aracı değildir; tamamlayıcı iç yapı göstergesidir.
SEM/EDS ve ara yüzey	Bağlayıcıya göre farklı kırılma morfolojileri; polyesterde daha heterojen/açık boşluklu görünüm	Ara yüzey süreksizliği, parçacık çekilmesi ve yüzey işlemi mekanik davranışla ilişkilidir.	Kaynak vd. (2001, 2003); Aoudia vd. (2017); Yıldızhan vd. (2022)	Nitel mikroyapı gözlemleri mekanik sonucu destekler; tek görüntü nicel porozite/aderans kanıtı değildir.
Isıl iletkenlik	K4 gruplarında 0,1486–0,1998 W/(m·K); en düşük PU–K4	Atık lastik içeren panel/kompozitlerde düşük λ; yoğunluk, gözenek, tane boyutu ve matrisle değişir.	Cimbola vd. (2024); Colom vd. (2023); Abu-Jdayil vd. (2016a)	PU–K4 değeri benzer malzeme ailesindeki aralıklarla uyumludur; K1–K3'e genellenmez.
Sismik/derz araştırma yönü	PU–K4 geniş deformasyon profili nedeniyle aday	Geri dönüştürülmüş lastik içeren sismik ara elemanlarda ısıl/akustik özellikler ve çevresel etkiler de incelenmektedir.	Ruiz vd. (2026); Akhtar ve Tsang (2024)	Mevcut tez doğrudan izolatör uygunluğu kanıtlamaz; yalnız ileri prototip araştırması için aday malzeme profili sunar.

Genel değerlendirme: Bu tablolar, tezdeki literatür anlatımını tekrar etmek yerine okuyucunun çalışmaları aynı bakış açısıyla karşılaştırmasını amaçlamaktadır. "Tez çalışmasını destekleyen yönü" sütunu, kaynakların sonuçlarını tez verileriyle koşulsuz eşitlemez; matris, oran, numune, deney yöntemi ve üretim farklarının karşılaştırma sınırı olduğu kabul edilmiştir.