



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ATIK KAÜÇUK KATKILI ÖN GERİLMELİ
POLİMER KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hakkı EKEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

09 -2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hakkı EKEM tarafından hazırlanan “Atık Kauçuk Katkılı Ön Gerilmeli Polimer Kompozit Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 09/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Emin SALUR
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Abdullah ASLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hakkı EKEM

Tarih: 09/09/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK KAÜÇUK KATKILI ÖN GERİLMELİ POLİMER KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hakkı EKEM

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2025, 83 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Doc. Dr. Abdullah ASLAN
Doc. Dr. Emin SALUR

Tez çalışmasının ana hedefi, hurda lastiklerden elde edilen geri dönüştürülmüş atık kauçuk partiküllerinin polimer bileşimine katılarak değerlendirilmesi, ön gerilmeli elemanlar ile performansının artırılarak çevreye duyarlı, dayanıklı yeni nesil bir malzeme geliştirilmesidir.

Çalışma kapsamında, belirli oranlarda atık kauçuk partikülleri, epoksi reçine ile karıştırılarak elde edilen farklı karışım oranlarına sahip küp numuneler üzerinde Shore HL sertlik ölçümleri ile Arşimet prensibine dayalı yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. İkinci aşamada, belirli oranlarda atık kauçuk partikülleri içeren kiriş numuneler içerisine yerleştirilen çelik elemanlara belirli oranlarda ön gerilme uygulanarak elde edilen numuneler üzerinde darbeli çekiç testi ve üç nokta eğilme testi uygulanmıştır.

Yapılan testlerden elde edilen sonuçlara göre atık kauçuk oranının artması ile referans numuneye göre malzemenin dayanımında %30–35, tokluk değerinde %25-28, elastisite modülünde %5-36, doğal frekansta %7-19 azalma gözlenmiştir. damping değerinde ise %8-18 artış görülmüştür. Ön gerilme oranının ise referans numuneye göre malzeme dayanımında %10-20, elastisite modülünde %14-20 azalmaya sebep olduğu, doğal frekansta belirgin bir etkiye sahip olmadığı, damping üzerinde ise sınırlı bir etkisi olup $\pm$ %5 değerinde olduğu tespit edilmiştir. Tokluk değerinde ise referans numuneye

göre %5-18 artış gözlenmiştir. Ölçülen yoğunluk referans numuneye kıyasla %0,5 civarında azalmıştır. %10 ve %15 kauçuk oranlarında sertlik ölçümünde referans numuneye göre %5 civarında azalma gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık kauçuk, Mekanik Özellikler, Ön Gerilme, Polimer Kompozit



ABSTRACT

MS THESIS

DEVELOPMENT OF PRE-STRESSED POLYMER COMPOSITE WITH WASTE RUBBER ADDITIVES AND INVESTIGATION OF ITS MECHANICAL PROPERTIES

Hakkı EKEM

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2025, 83 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Assoc. Dr. Abdullah ASLAN
Assoc. Dr. Emin SALUR**

The main objective of the thesis is to utilize recycled waste rubber particles obtained from scrap tires by incorporating them into polymer compositions and to develop a new generation of environmentally friendly, durable material by enhancing its performance with pre-stressed elements.

As part of the study, Shore HL hardness measurements and density measurements based on the Archimedes principle were conducted on cube samples with different mixing ratios obtained by mixing specific proportions of waste rubber particles with epoxy resin. In the second stage, rebound tests and three-point bending tests were performed on samples obtained by applying pre-stress to steel elements placed within beam samples containing specific proportions of waste rubber particles.

According to the results obtained from the tests, with increasing waste rubber ratio, a %30–35 decrease in strength, %25–28 decrease in toughness value, %5–36 decrease in elastic modulus, and %7–19 decrease in natural frequency of the material was observed compared to the reference sample. An %8–18 increase in damping value was observed. It was found that the pre-stressing ratio caused a %10–20 decrease in material strength and %14–20 decrease in elastic modulus compared to the reference sample, did not have a significant effect on natural frequency, and had a limited effect on damping,

with a value of $\pm 5\%$. A 5–18% increase in toughness value was observed compared to the reference sample. The measured density decreased by around 0.5% compared to the reference sample. At 10% and 15% rubber ratios, a 5% decrease in hardness measurements was observed compared to the reference sample.

Keywords: Waste Rubber, Mechanical Properties, Pre-stressed, Polymer Composite



ÖNSÖZ

Tez hazırlama sürecimde bilgi birikimi, tecrübesi ve akademik desteğiyle bana yol gösteren ve rehberlik eden, çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN' e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca darbeli çekiç testlerinin yapılmasında destek olan Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Selim TARİH'e, üç nokta eğilme testlerinde yardımcı olan Arş. Gör. Taner COŞKUN'a, deneysel çalışmalarım için gerekli olan malzeme ve ekipman desteğini sağlayan İmaş Mak. San. A.Ş. Ar-Ge merkezi ve yöneticilerine teşekkür ederim.

Süreç boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım.

Hakkı EKEM
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Kompozit Malzemeler	2
1.1.1. Kompozit malzemelerin matris türlerine göre sınıflandırması.....	3
1.1.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarının şekil ve yerleştirilme biçimine göre sınıflandırması.....	4
1.1.2.1.Süreksiz fiber takviyeli kompozitler.....	4
1.1.2.2.Sürekli fiber takviyeli kompozitler.....	4
1.1.2.3.Parçacık takviyeli kompozitler	5
1.2.Polimerler ve Yapısı	7
1.2.1.Polimerin sınıflandırılması	8
1.2.1.Polimerin özellikleri	11
1.3. Atık Lastikler.....	12
1.3.1. Lastiğin Tanımı ve Yapısı	12
1.3.2. Atık lastikler ve zararları	13
1.4. Ön Gerilmeli Elemanlar.....	21
1.4.1.Ön gerilme yöntemleri.....	24
1.4.2. Ön gerilme metodunun avantajları	26
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
3.1. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	33
3.1.1. Atık kauçuk	33
3.1.2. Epoksi reçine	34

3.1.3. Doğrultulmuş yay çeliği	34
3.1.4. Kalıp ayırıcı yağ	34
3.1.6. Kalıplar	35
3.1.7. Sınıflandırma Elekləri.....	35
3.1.8. Ölçüm Cihazları.....	36
3.2. Yapılan Deneyler ve Hesaplamalar	36
3.2.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin elastisite modülünün hesaplanması	36
3.2.2. Minimum ve kritik fiber hacim oranlarının hesaplanması	37
3.2.3. Sıyırılma testi.....	39
3.2.4. Arşimet terazisi ile yoğunluk ölçümleri	40
3.2.5. Sertlik ölçümleri	43
3.2.6. Darbeli Çekiç Testi.....	44
3.2.7. Üç Nokta Eğilme Testi	46
4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	48
4.1 Sıyırılma testi sonuçları	48
4.2 Arşimet terazisi ile yoğunluk ölçüm sonuçları	50
4.3 Sertlik ölçüm sonuçları.....	53
4.4 Darbeli çekiç testi sonuçları	55
4.5 Üç nokta eğilme testi sonuçları	58
4.6 İstatistiksel değerlendirme	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
5.1 Sonuçlar	68
5.2 Öneriler	70
KAYNAKLAR	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V_{fmin}	: Minimum Fiber Hacim Oranı
V_{fcr}	: Kritik Fiber Hacim Oranı
d	: Dolgu Malzemesi Çapı
l	: Dolgu Malzemesi Uzunluğu
E_c	: Kauçuk Takviyeli Epoksi Matris Elastisite Modülü
E_f	: Fiber (Ön Gerilme Elemanı) Elastisite Modülü
E_{fk}	: Dolgu Malzemesi (Atık Kauçuk) Elastisite Modülü
E_m	: Epoksi Matris Elastisite Modülü
ζ	: Şekil Faktörü
η	: Kontrast Oranı
V_{fk}	: Dolgu (Atık Kauçuk) Oranı
σ_m	: Epoksi Akma Mukavemeti
σ_f	: Fiber (Ön Gerilme Elemanı) Akma Mukavemeti
ϵ_{mmax}	: Kauçuk Takviyeli Epoksi Matris Birim Uzama Oranı
ϵ_{fmax}	: Fiber (Ön Gerilme Elemanı) Birim Uzama Oranı
P	: Bir İstatistiksel Testin Sonucunun İstatistiksel Olarak Anlamlı Olup Olmadığını Belirlemek İçin Kullanılan Bir Değer
R^2	: Regresyon Tahminlerinin Gerçek Veri Noktalarına Ne Kadar Yakın Olduğunun İstatistiksel Ölçüsü

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
TDF	: Lastikten Türetilmiş Yakıt

1. GİRİŞ

Polimer kompozitler, son yıllarda hafiflik, dayanıklılık ve yüksek performans gereksinimlerini karşılamak amacı ile endüstrinin farklı alanlarında yoğun olarak kullanılan bir malzeme grubu haline gelmiştir. Bir kompozit malzeme olan polimer beton, önemli bir alternatif malzeme olarak dikkat çekmektedir. Polimer betonlar, düşük geçirgenlik, yüksek kimyasal direnç, darbe dayanımı ve esneklik gibi özellikleri ile sadece inşaat sektöründe değil, özellikle endüstriyel makineler, CNC tezgâhları, yüksek performans gerektiren makineler, ölçüm cihazları vb. alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Polimer beton sistemlerinin geleneksel imalat malzemelerine kıyasla daha düşük çekme mukavemetine sahip olması, endüstriyel uygulamalarda bazı sınırlamaları beraberinde getirmektedir. Bu sorunun aşılması ve mekanik performansın iyileştirilmesi amacıyla, ön gerilmeli çelik donatılar ile kompozit yapının güçlendirilmesi mümkün hale gelmektedir. Ön germe uygulamaları, çatlak kontrolü, deformasyonun azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Endüstrideki gelişmeler ve nüfusun hızla artması, doğal kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği ve atık yönetimi gibi sorunları beraberinde getirmekte ve bu sorunlar giderek daha ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin doğaya bırakılması, çevre kirliliği açısından büyük bir tehdit oluşturmakta, geri dönüşüm ve sürdürülebilir malzeme üretimi ise bu sorunların çözümü için kritik bir öneme sahip olmaktadır. Bu durum, atık malzemelerin inşaat, otomotiv ve makine sektörlerinde kullanımının önünü açarak yenilikçi çözümlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Özellikle son yıllarda artan atık lastik miktarı, tüm dünyada çevre kirliliği açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Ömrünü tamamlamış lastikler, doğada biyolojik olarak çözünebilen bir malzeme olmadığından, toprak, su ve hava kirliliğine neden olmakta ve çevre üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler yıllar boyu devam etmektedir. Bu sorunun çözümü için atık lastiklerin geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, çevre kirliliğine alternatif bir çözüm olarak gündeme gelmiştir.

1.1.Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde birleştirilmesiyle elde edilen, üstün özelliklere sahip yeni bir malzeme türüdür. Bu sayede, bileşenlerde tek başına bulunmayan bazı özelliklerin iyileştirilerek daha iyi mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler gösteren malzemeler elde edilmiş olur. (Zor, 2024)

Kerpiç, bu konuda iyi bir örnek olarak verilebilir. Killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler kerpicingin mukavemetini ve elastikliğini artırmaktadır. 1950’li yıllardan itibaren endüstride kullanılmaya başlanan liflerle takviye edilmiş sentetik reçinelere en bilinen örnek olarak “cam elyaf takviyeli polyester (CTP)” gösterilebilir.

Kompozit malzemeler, sahip oldukları bazı üstün özellikler sayesinde diğer malzemelere kıyasla birçok avantajlar sunar. Yüksek kimyasal ve mekanik dayanım, uzun ömür, hafiflik gibi üstün nitelikler, kompozitlerin özellikle mühendislik ve inşaat gibi alanlarda tercih edilmesinde etkili olan başlıca faktörlerdir. (Zor, 2024)

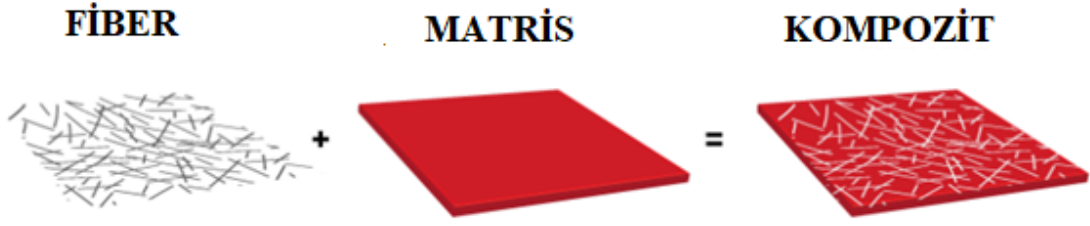
Kompozit malzemeler genel olarak iki ana bileşenden oluşur.

Matris

Kompozitin ana yapısını oluşturur. Takviyeleri bir arada tutar. Plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlakların ilerlemesini engelleyici bir rol oynar ve böylece kompozit malzemenin kopmasını geciktirir. Matris malzemesi olarak genellikle polimerler (epoksi, polyester, vinil ester), metal veya seramik malzemeler kullanılır. (Zor, 2024)

Takviye malzemesi

Kompozit malzemenin fiziksel özelliklerini ve yük taşıma kapasitesini artırarak, malzemenin dayanıklılığını geliştirir. Takviye malzemesi olarak genellikle elyaf, partikül, whisker (ince kristaller) kullanılır. (Zor, 2024)



Şekil 1.1.Kompozit malzemelerin yapısı (Zor, 2024)

1.1.1. Kompozit malzemelerin matris türlerine göre sınıflandırması

Metal matris kompozitler

Bu tür kompozit malzemelerde temel yapı, metal esaslı bir matristen oluşur ve genellikle seramik kökenli bir takviye fazı içerir. Seramiklerin yüksek elastikiyet modülü ile metallerin sünek davranışı bir araya getirilerek; aşınmaya dirençli, kırılma tokluğu yüksek ve basma dayanımı güçlü kompozitler elde edilir. Metal matris kompozitler, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. (Zor, 2024)

Seramik matris kompozitler

Seramikler çok sert ve kırılgan yapıya sahip malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılıkları ile düşük yoğunlukları önemli avantajlar sunar. Ancak, ısı şok dirençleri ve toklukları düşüktür. Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B₄C, cBN, TiC, TiB, TiN ve AlN gibi bileşikler bu gruba örnek olarak verilebilir. Bu tür bileşikler, ihtiyaca göre tek başlarına ya da birlikte kullanılarak seramik matrisli kompozit malzemeler üretilir. Bu kompozitler özellikle çeşitli askeri donanımlarda ve uzay araçlarının yapısal parçalarında tercih edilir. Ayrıca, seramik matrise seramik fiber takviyesi yapılmasıyla daha yüksek mukavemet ve tokluk değerlerine ulaşılabilir. (Zor, 2024)

Polimer matris kompozitler

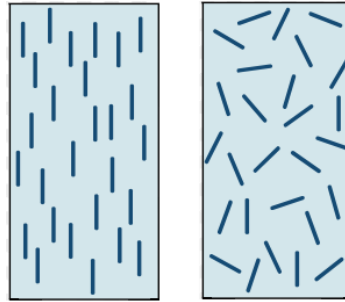
Polimer matrisli kompozitler, genellikle sürekli fiberlerle takviye edilmiş olarak kullanılırlar. Polimer matrisler, termoset ve termoplastik olmak üzere iki ana gruba

ayrılır. Özellikle epoksi ve polyester reçineleri içeren matrisler en yaygın olanlardır. Bu malzemelerde takviye elemanı olarak cam elyafı, karbon elyafı, kevlar ve bor elyafı gibi fiberler kullanılır. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde el yatırması, filament sarma, kalıplama, pultrüzyon, enjeksiyon ve ekstrüzyon gibi yöntemler tercih edilir. Hafif yapıları sayesinde otomotiv ve taşımacılık sektörlerinde, korozyon dayanımları nedeniyle denizcilik alanında, yanmazlık özelliklerinden dolayı da otomotiv iç mekân uygulamalarında ve spor ekipmanlarında yaygın olarak kullanılırlar. (Zor, 2024)

1.1.2. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarının şekil ve yerleştirilme biçimine göre sınıflandırması

1.1.2.1. Süreksiz fiber takviyeli kompozitler

Süreksiz fiber takviyeli kompozit malzemelerde, takviye elemanı olarak genellikle kısa kesilmiş ve talaş formunda olan lifler kullanılmaktadır. Bu liflerin çapları çoğunlukla birkaç mikrometre (μm) mertebesinde ve boyutları birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişkenlik gösterebilir. Liflerin bu boyut aralığında olması, onların partikül yerine fiber (lif) olarak sınıflandırılabilmesi için yeterli kabul edilmektedir. Lifin süreksiz yapısı, malzemenin izotropik özellikler göstermesini sağlarken, üretim süreçlerinde kolaylık ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır.



Şekil 1.2. Süreksiz fiber takviyeli kompozit malzeme (Zor, 2024)

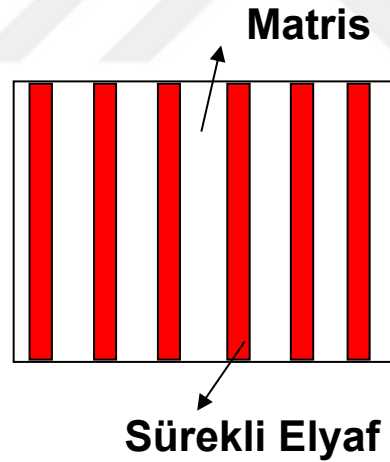
1.1.2.2. Sürekli fiber takviyeli kompozitler

Günümüzde kompozit malzeme teknolojisinde en yaygın ve etkili takviye elemanları arasında sürekli fiberler yer almaktadır. Bu tür fiberler, matris fazı içerisine

kesintisiz şekilde ve genellikle doğrusal olarak yerleştirilen ince lifler şeklinde bulunur. Sürekli fiberler, üretim sürecinde tel sarma gibi tekniklerle kesilmeden, iplik formunda elde edilmekte ve bu haliyle kompozit üretiminde kullanılmaktadır.

Kompozit malzemenin mekanik performansını artırabilmek amacıyla, kullanılan fiber takviyelerin bazı temel özelliklere sahip olması beklenir. Bunlar arasında düşük yoğunluk, yüksek elastik modül, yüksek çekme mukavemeti ve yüksek sertlik yer almaktadır.

Sürekli elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olarak tercih edilmesinin temel sebepleri arasında; küçük çaplarda üretilmeleri ve buna bağlı olarak iç yapı tane boyutlarının küçük olması nedeniyle malzeme kusurlarının en aza indirgenmiş olması yer alır. Bu sayede, lifler üstün mikroyapısal özelliklere sahip olup, yüksek elastisite modülü ve çekme mukavemeti sunarlar. Ayrıca, liflerin boy/çap oranının yüksek olması, matris tarafından elyaflara daha etkin yük transferi sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, kompozit malzemenin genel dayanım performansını önemli ölçüde artırmaktadır. (Zor, 2024)



Şekil 1.3.Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme (Zor, 2024)

1.1.2.3.Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, bir matris fazı içerisine mikroskobik veya makroskobik boyutlardaki partiküllerin dağıtılması yoluyla elde edilir. Bu tür kompozitler, makro düzeyde izotropik özellik gösterir; yani, tüm yönlerde benzer

mekanik davranış sergilerler. Kompozit sistemin mukavemeti, kullanılan parçacıkların mekanik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir.

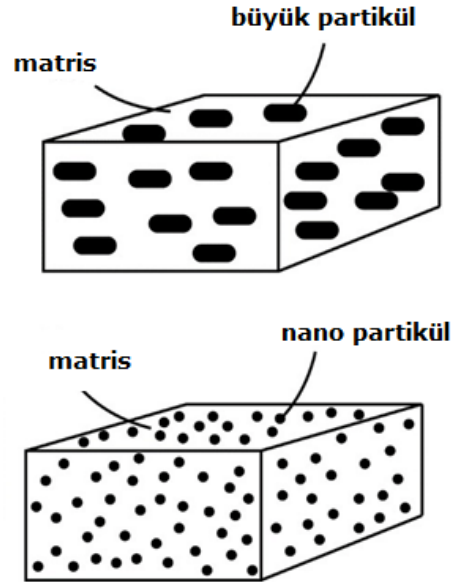
Takviye partikülleri farklı boyut aralıklarında olabilir. Eğer parçacık boyutu nanometre ölçeğinde ise, bu tür kompozit sistemler *nanokompozit* olarak adlandırılmaktadır. Parçacıklar genellikle iki temel formda kullanılır:

Büyük parçacık takviyesi: Bu tür yapılarda yük, matris ve parçacık tarafından birlikte taşınır. Bu tip parçacıklara örnek olarak agrega verilebilir.

Küçük parçacık takviyesi: Bu tür yapılarda ise, küçük boyutlu parçacıklar (genellikle $<1 \mu\text{m}$), dislokasyon hareketlerini sınırlandırarak kompozit malzemenin mukavemetini artırır. Alümina (Al_2O_3) ve silisyum karbür (SiC) gibi seramik partiküller bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır.

Parçacık takviyeli kompozitlerin en sık karşılaşılan türü, plastik matris içerisine metal parçacıkların entegre edildiği sistemlerdir. Bununla birlikte, metal matrisli sistemlerde seramik parçacık kullanımı, özellikle sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir. Bu tür yapılar, uçak motor parçaları gibi ileri teknoloji gerektiren alanlarda kullanıma uygundur.

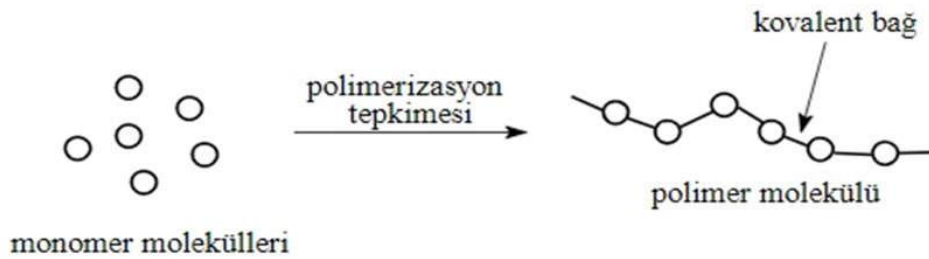
Bu tip kompozitlerin döküm yöntemiyle üretimi ekonomik olmasına rağmen, üretim sürecinde bazı zorluklar da mevcuttur. Özellikle matris eriyiğinin viskozitesinin düşük olması, parçacıkların yeterli derecede ıslatılmasını ve matris içerisinde homojen olarak dağılmasını güçleştirmektedir. Parçacık takviyeli kompozitler, üretim maliyeti açısından sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre daha avantajlıdır; ancak, mekanik özellikler bakımından sürekli elyaf takviyeli sistemler genellikle daha üstün performans sergilemektedir. (Zor, 2024)



Şekil 1.4.Parçacık takviyeli kompozit malzeme (Zor, 2024)

1.2.Polimerler ve Yapısı

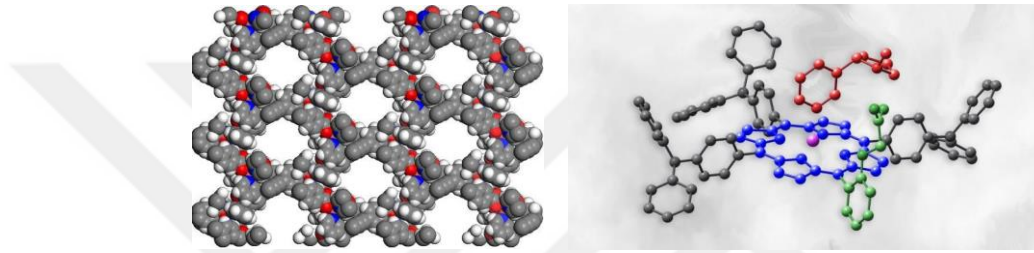
Polimerler, çok sayıda küçük moleküllerin (monomerlerin) birbirleriyle kovalent bağlar aracılığıyla birleşmesi sonucu oluşan büyük moleküllerdir. Bu süreç, polimerizasyon olarak bilinir ve uygun koşullar altında gerçekleşir. Polimerizasyon tepkimesi sırasında, monomerler birbirleriyle kimyasal bağ yaparak polimer moleküllerinin oluşumunu sağlar. (şekil 1.5) Sonuç olarak, polimerler yüksek moleküler ağırlığa sahip, uzun zincirli yapılar olarak karakterize edilirler. (Gökbaşı, 2021)



Şekil 1.5.Monomer moleküllerin polimerizasyon tepkimeleriyle birbirine bağlanarak polimer moleküllere dönüşümü (Gökbaşı, 2021)

Bir polimer zincirinde binlerce hatta milyonlarca monomer bir araya gelerek uzun makromolekülleri oluşturur. (şekil 1.6) Bu zincirlerin birbirleriyle oluşturduğu kimyasal bağlar, polimer malzemenin mekanik ve termal özellikleri ile davranışlarını belirleyen temel faktörlerdir. Polimerler denildiğinde genellikle organik polimerler akla gelse de inorganik polimerler de geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Suni polimerlerin, son 40-50 yıl içerisinde hızlı bir gelişim göstermesi ve metaller gibi yaygın olarak kullanılmaya başlanması, bu malzemelerin ekonomik avantajları, hafiflikleri, kolay işlenebilme özellikleri ve yüksek kimyasal korozyon direncine sahip olmaları gibi özelliklerine dayanmaktadır. (Akın, 2017).



Şekil 1.6. Polimerin yapısı

1.2.1. Polimerin sınıflandırılması

Polimerler, genel olarak *doğal* ve *doğal olmayan* (yapay) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir:

Yapay polimerler (plastikler, polietilen, naylon vb.)

Yapay polimerler, sentetik ve yarı sentetik olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. *Sentetik polimerler*, yüksek moleküler ağırlığa sahip moleküllerin kimyasal yollarla sentezlenmesiyle elde edilir. En yaygın örneklerden biri, basit yapısı ile polietilendir. *Yarı sentetik polimerler* ise, doğal polimerlerin kimyasal modifikasyonu ile üretilir. Bu grupta, doğal selülozdan türetilen rejenere selüloz ve diğer selüloz türevleri tipik örnekler arasında yer alır. (Gökbaşı, 2021)

Doğal polimerler (selüloz, doğal kauçuk, protein, nişasta vb.)

Doğal polimerler, doğada doğal yollarla oluşan polimerlerdir. Bu sınıfta, doğal kauçuk, nişasta ve selüloz gibi bileşikler ön plana çıkar. Ayrıca, *biyopolimerler* olarak adlandırılan ve birçok biyolojik fonksiyon için önemli olan proteinler, nükleik asitler (DNA, RNA) ve enzimler de doğal polimerler arasında yer alır. (Gökbaşı, 2021)

Kimyasal açıdan polimerler, *organik* ve *inorganik* olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır:

Organik polimerler

Organik polimerlerin ana zincir yapısında, karbon atomu başta olmak üzere oksijen, hidrojen, azot ve halojen atomları bulunur. Bu polimerler, karbon bazlı kimyasal bağlar üzerinden yapılandırılmıştır ve günümüzde en yaygın kullanılan polimer türleridir.

İnorganik polimerler

İnorganik polimerlerde ise, ana zincir üzerinde karbon atomu yerine silisyum, germanyum, fosfor gibi elementler yer alır. Bu polimerler, periyodik cetvelin IV-VI gruplarında yer alan elementlerle yapılandırılır ve organik polimerlere kıyasla farklı kimyasal özelliklere sahip olabilirler.

Polimerler fiziksel olarak 3 gruba ayrılabilirler:

Termoplastikler

Termoplastikler, ısıtıldığında eriyerek yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Bu tür polimerlerde, zincirler genellikle doğrusal (lineer) veya dallanmış yapıya sahiptir. Termoplastik malzemeler, ısıl işlem altında sıvı hale gelerek, çeşitli kalıplarda şekillendirilebilir ve daha sonra soğutularak sertleştirilir. Bu özellik, termoplastiklerin üretim süreçlerinde geniş bir esneklik sağlar. (Yıldırım, 2019).

Elastomerler

Elastomer, kauçuk özelliği gösteren polimerlere verilen genel bir isimdir. Elastomerler, uygulanan çekme kuvveti ile yüksek oranda uzayabilir ve kuvvet kaldırıldığında hızla eski şekillerine geri dönerler. Bu özellik, elastomerlerin, boyutlarının 5 katına kadar uzayabilmesi ve sonra eski durumlarına dönebilmesi ile tanımlanır. Elastomerler, genellikle esnek, dayanıklı ve deformasyona karşı dirençli malzemeler olarak bilinirler.

Termoset plastikler

Termoset plastikler, polimer zincirleri arasında yoğun çapraz bağların (ağ yapılar veya yanıl bağlar) bulunduğu, ısı etkisi ile eritilmesi mümkün olmayan veya çok güç olan plastik türleridir. Termoset plastiklere örnek olarak epoksi, polyester, fenolik, silikon, poliamid, bismaleimid, amino reçineler, poliüretanlar ve polieterler (poliepoksitler) verilebilir. (Yıldırım, 2019).

Epoksi reçine: Epoksi reçineleri, yapılarında karbon atomları içeren polimer matrislerdir. Birden fazla epoksit grubunun birleşmesiyle oluşan bu malzeme, açık renkte, koyu olmayan sıvı formda bulunur. Epoksi reçinesine uygulanan kürleme işlemi, malzemenin sıcaklık dayanımını 150-200°C seviyelerine kadar artırabilmektedir. Epoksi reçinesi, kullanımı sıvı halde olmakla beraber kürlendikten sonra suya, asitlere ve alkalilere karşı dirençli bir yapıya sahip olup, bu özelliklerini uzun süre boyunca korur. Ayrıca, temizlenmesi kolay, mekanik dayanımı yüksek bir malzeme olarak, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (Akın, 2017).

Polyester reçine: "Polyester" terimi, Yunanca "çok" anlamına gelen *poly* ve organik tuz anlamına gelen *ester* kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir. Bu terim, çok sayıda organik tuzu tanımlamak için kullanılır. Polyester reçineleri de karbon atomları içeren polimer matrislerdir. Polyesterin temel yapısı, doymuş asitlerle veya alternatif olarak glükol ile modifiye edilen bileşenler aracılığıyla şekillenir. Kürleme işlemi ile bu bileşiklerin esnekliği artırılabilir ve kopma mukavemeti iyileştirilebilir. Polyester reçineleri, nemi dışarı atma yeteneği, düşük maliyet, düşük viskozite ve iyi dış etki

dayanımı gibi özelliklere sahiptir ve bu yüzden pek çok endüstriyel alanda tercih edilmektedir (Akın, 2017).

1.2.1. Polimerin özellikleri

Polimer malzemeler, birçok endüstriyel uygulamada önemli avantajlar sunarak işlerin kolaylaştırılmasına olanak tanır. Bu malzemelerin kullanımını mümkün kılan bir dizi özellikleri bulunmaktadır. Polimerlerin hafifliği, işlenebilirliğinin kolay olması, korozyona karşı yüksek dirençleri, elektrik ve ısı yalıtkanlık özellikleri ile kaliteli yüzeylerin elde edilmesine uygun olmaları gibi avantajlar, polimerleri en çok tercih edilen malzemelerden biri haline getirmektedir. Günümüz teknolojisinde polimerler, makine, uçak, elektrik, elektronik, ev aletleri gibi çeşitli sektörlerde tercih edilen bir malzeme sınıfı haline gelmiştir. Bunun yanı sıra, günlük hayatta sıkça kullanılan tekstil, mobilya, inşaat sektörleri, kaplama ve sentetik yapıştırıcı üretimi, kırtasiye ve ambalaj malzemelerinin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. (Gökbaşı, 2021).

Aşağıda, polimerlerin genel özelliklerine ilişkin detaylı bilgiler sunulmuştur:

- Polimer malzemeler, elektriksel ve ısı yalıtkanlık özelliklerine sahiptir. Bu özellik, polimerlerin iç bağlarının kovalent olmasından kaynaklanmaktadır.
- Polimerler, makaslama kuvvetlerine karşı hassas olup, kaymaya karşı düşük dayanım sergilerler. Ancak, genel olarak yüksek basınç ve çekme dayanımları elde edilebilmektedir.
- Polimer malzemeler, kimyasal etkenlere karşı yüksek dayanım gösterirler. Özellikle asitlere ve bazlara karşı dirençli olmalarına rağmen, organik çözücülere karşı dayanıksızdırlar. Bu çözücüler, aseton, eter, glycol vb. maddelerdir. Ayrıca, kloroform plastikler üzerinde etkili bir çözücü olarak bilinmektedir. Bir polimerin belirli bir çözücüye karşı dayanıklılığı, özellikle çözücü ile temas ettiği süreçler sırasında incelenir. Bu süreçte, alev alma, dumanın rengi, kokusu ve alevin rengi gibi faktörler, polimerin özelliklerini tanımlamak için faydalı bilgiler sunar.
- Polimerler, yüksek sıcaklık derecelerine karşı genellikle hassastır. Bazı polimer çeşitleri 300-400°C'ye kadar dayanabilirken, çoğu polimer, 80°C civarındaki sıcaklıklarda deformasyona uğramaktadır.

- Polimerler genellikle düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir.
- Polimer malzemeler, değişik renk seçenekleri ve çeşitliliğe sahiptir. Renklendirme olanakları oldukça geniştir.
- Polimerlerin kullanımı ve işlenebilirliği kolaydır. Bu özellikleri, polimerlerin geniş bir yelpazede kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Yıldırım, 2019).

Çizelge 1.1. Polimerlerin mekanik özellikleri (Akın, 2017)

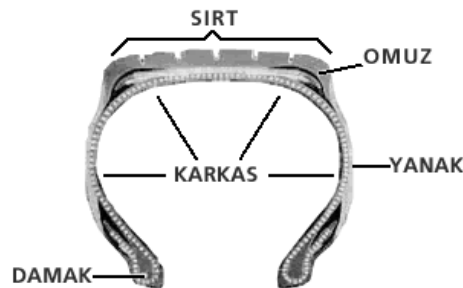
Özellikler	Saf Polyester	Cam Lifli, Donatılı Polyester
Yoğunluk (kg/dm ³)	1.1 ~ 1.15	1.5 ~ 2.0
Eğilme Mukavemeti (N/mm ²)	55 ~ 120	350 ~ 450
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	22 ~ 70	280 ~ 350
Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	150	200 ~ 400
Elastisite Modülü (N/mm ²)	2500 ~ 3500	7000 ~ 15000

1.3. Atık Lastikler

1.3.1. Lastiğin Tanımı ve Yapısı

Araç lastiği, belirli sıcaklık ve basınç koşullarında, kontrollü sürelerle pişirme (vulkanizasyon) işlemine tabi tutulan kauçuk esaslı bir hava yastığıdır. İçerdiği basınçlı hava sayesinde motorlu veya motorsuz taşıtların hareketini mümkün kılan bu yapı, kullanım alanı ve amacına bağlı olarak farklı boyut, şekil ve yapısal özelliklerde tasarlanmaktadır (Gökbaşı, 2021).

Bir araç lastiği; sırt (diş), omuz, yanak, topuk (damak) ve karkas (gövde) olmak üzere beş temel yapı katmanından oluşmaktadır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Araç lastiğinin iç yapısı (Ulusoy, 2021)

- Sırt: Lastiğin zeminle temas eden kısmı,
- Omuz: Kauçuğun kalın kısmından meydana gelen yanak ile sırtın birleşim kısmı
- Yanak: Lastiğin yan yüzeyi olup esneklik sağlayan kısım,
- Topuk (Damak) bölgesi: Lastiğin jantla birleştiği kısım,
- Karkas: Polyester kord bezinden üretilen, lastiğin alt ucundaki bir damak telinden diğerine uzayan destek bölgesi (Gökbaşı, 2021)

Lastiğin üretiminde kullanılan temel hammaddeler; karbon siyahı, yapay kauçuk, doğal kauçuk, çelik, dolgu malzemeleri, vulkanizasyon hızlandırıcıları, tekstil kuşaklar ile ozonlaştırmayı engelleyen kimyasal katkı maddelerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin türü ve oranları, lastiğin kullanım amacına göre farklılık göstermektedir. Çizelge 1.2. de binek ve kamyon tipi lastiklere ait bileşim oranları ayrıntılı biçimde sunulmuştur (Akın, 2014).

Çizelge 1.2. Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları (Akın, 2017)

Bileşim (Ağırlık %'si)	Binek Lastiği	Kamyon Lastiği
Doğal kauçuk	14	27
Yapay kauçuk	27	14
Karbon siyahı	28	28
Çelik	9,6-15	9,6-15
Bez kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar, ozonlaştırmayı engelleyici maddeler	16-17	16-17
Ortalama Ağırlık (kg)	6,5-10	54

1.3.2. Atık lastikler ve zararları

Araçtan sökülen ve faydalı ömrünü tamamlayarak tekrar kullanılabilirlik özelliğini yitirmiş, orijinal ya da kaplanmış olmasına bakılmaksızın yeniden araç üzerinde kullanım imkânı bulunmayan lastikler ile üretim sürecinde oluşan ıskarta lastikler, literatürde “atık lastik” olarak tanımlanmaktadır. Bu tür lastikler, “ömrünü tamamlamış lastik” veya kısaca “ÖTL” şeklinde de adlandırılmaktadır (Türkben, 2019).

Petrol türevi plastik poşetler, içecek şişeleri, hazır gıda ambalajları, kereste ve mobilya atıkları, teneke kutular, seramik kırıkları, atık beton molozları, cam materyaller ile kullanım dışı kalmış araç lastikleri ve kauçuk türevleri, endüstriyel katı atıklar içerisinde yer almaktadır (Gökbaşı, 2021).

Lastikler, sahip oldukları yüksek moleküler yapıya sahip kauçuk esaslı bileşenleri nedeniyle çevresel etkilere karşı yüksek direnç göstermekte ve bu durum, doğada çözünmelerini oldukça güçleştirmektedir. Bu nedenle işlevselliğini yitirmiş lastiklerin geri dönüşüm süreçlerine dâhil edilmemesi, uzun vadede çevre kirliliğine ciddi katkılar sunmaktadır. Ayrıca, atık lastiklerin içyapılarındaki yanıcı maddeler nedeniyle yüksek sıcaklıkta yangın riski oluşturmaları ve bu durumun büyük hacimli duman salımları ile sonuçlanabilmesi, özellikle stok alanlarında kontrolsüz biçimde biriken atık lastikleri çevresel açıdan ciddi bir tehdit haline getirmektedir (Gökbaşı, 2021).

Atık lastikler, kimyasal açıdan oldukça kararlı bir yapıya sahip olduklarından dolayı doğrudan toksik etkileri sınırlıdır; ancak kontrolsüz şekilde çevreye bırakılmaları ya da gelişigüzel yakılmaları durumunda çevre kirliliğine neden olarak ekosistem üzerinde ciddi tehditler oluşturabilmektedir. Özellikle kontrol altına alınması gereken yangınlar sırasında kullanılan suyun yanı sıra yağmur suları, lastik içeriğinde yer alan zararlı bileşiklerin toprağa sızmasına zemin hazırlayarak toprak ve yeraltı suyu kirliliğine yol açmaktadır. (Gökbaşı, 2021)

Atık lastiklerin çevresel açıdan en zararlı etkilerinden biri, bu lastiklerin yakılması sırasında ortaya çıkan ağır metaller, toksik gazlar ve yağ kalıntılarının hava, su ve toprak sistemlerine karışmasıdır. Bunun yanı sıra, atık lastiklerin su tutma kapasitelerinin yüksek olması, sivrisinek, böcek ve insan sağlığı açısından tehlike arz eden diğer parazitlerin üremesi için uygun bir ortam oluşturmakta, ayrıca bu alanlar kemirgenler ve yılanlar gibi canlılar için de doğal bir yuva haline gelmektedir (Ulusoy, 2021).

Uluslararası Kanseri Araştırmaları Ajansı (IARC) tarafından yapılan çalışmalarda, lastik üretiminde kullanılan işlenmiş naftenik ve aromatik extender yağlarının, deney hayvanlarının derisiyle temas etmesi sonucu deri kanseri oluşumuna yol açtığı tespit edilmiştir. Aynı maddelerin insanlarda da alerjik cilt reaksiyonlarına neden olduğu gözlemlenmiştir (Akın, 2014).

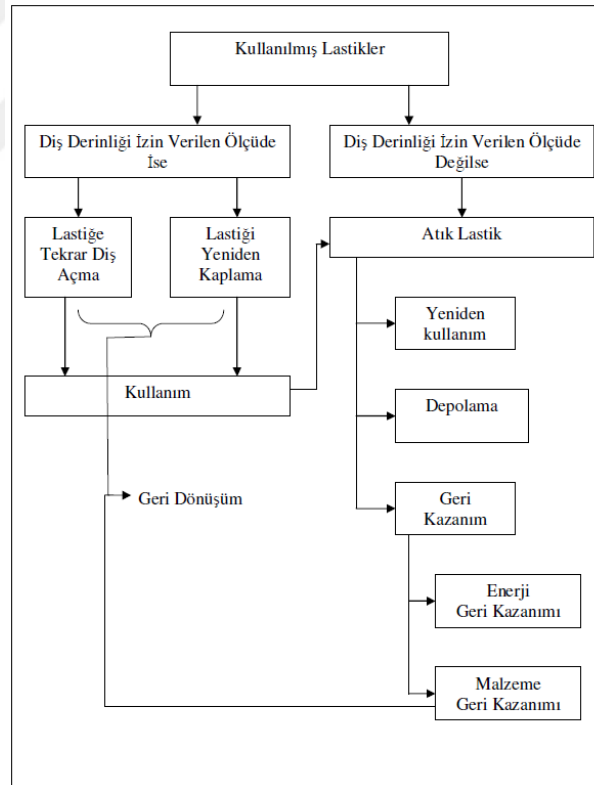
Tüm bu çevresel ve sağlık temelli olumsuz etkiler göz önünde bulundurulduğunda, atık lastiklerin geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı, sürdürülebilir çevre yönetimi açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş kauçuk materyalleri, ekonomik değeri olan alternatif hammadde kaynağı olarak düşünülmelidir. (Türkben, 2019).

Atık lastiklerin düzensiz ve kontrolsüz şekilde yığılması, yalnızca çevresel riskler oluşturmakla kalmayıp, aynı zamanda kentsel ve kırsal alanlarda görsel kirliliğe de neden olmakta, böylece çevrenin estetik değerini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle

lastiklerin iç yapısında bulunan çelik tellerin ekonomik değeri nedeniyle, bu lastikler kontrolsüz biçimde yakılarak geri kazanılmaya çalışılmakta; bu durum hem toprak hem de yeraltı suyu ve atmosfer üzerinde ciddi kirlilik etkileri yaratmaktadır. (Akın, 2017).

1.3.3. Atık lastiklerin geri dönüşümü

Atık lastiklerin yönetiminde ise uygulanan yöntemler, ekonomik maliyetler, teknik altyapı olanakları ve endüstriyel gereksinimlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Günümüzde atıkların çevresel etkilerini en aza indirmek amacıyla benimsenen **atık yönetimi hiyerarşisi**, genel olarak beş aşamadan oluşmaktadır: atığın oluşumunun engellenmesi ve azaltılması, yeniden kullanım, geri dönüşüm, atıktan enerji geri kazanımı ve en son çare olarak depolama. Bu hiyerarşik yaklaşım, atıkların çevreye olan zararlarını minimize etmeyi ve kaynakların daha verimli kullanımını hedeflemektedir. (Akın, 2017).



Şekil 1.8. Atık lastik yönetimi

Avrupa'da atık araç lastiklerinin yönetimine ilişkin veriler, bu atıkların farklı yöntemlerle değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. Buna göre, atık lastiklerin %26'sı düzenli atık depolama sahalarında muhafaza edilmekte, %24'ü enerji üretiminde ısı

kaynağı olarak kullanılmakta, %9'u ise dış ülkelere ihraç edilmektedir. Ayrıca, atık lastiklerin %14'ü çeşitli işlemlerden geçirilerek tekrar kullanıma sunulmakta; %25'i ise başta yol yapımı ve dolgu olmak üzere inşaat sektöründe değerlendirilmektedir. (Gökbaşı, 2021).

Yeniden kullanım

“Yeniden kaplama” ya da “yeniden üretim” olarak da adlandırılan kaplama işlemi, kullanım ömrünü tamamlamamış lastiklerin yeniden değerlendirilmesini ve ömürlerinin uzatılmasını amaçlayan önemli bir uygulamadır. Pek çok lastik, faydalı ömrünü tamamlamadan, çeşitli nedenlerle kullanım dışı kalmakta ve atık statüsüne geçmektedir. Bu tür lastikler, ikinci el olarak depolanmakta ve gerekli bakım ve onarım işlemlerinin ardından tekrar kullanılabilir hâle getirilmektedir

Kaplama işlemi temel olarak iki farklı teknikle gerçekleştirilir: **soğuk kaplama** ve **sıcak kaplama**. Her iki yöntemde de, lastiğin aşınmış sırt kısmı yenilenmekte ve böylece lastik yeniden işlevsel duruma getirilmektedir. Kaplama işleminden sonra, üretilen lastiklerin kalite güvencesi açısından çeşitli denetim ve test süreçlerinden geçirilerek ulusal ve uluslararası standartlara uygunluğu teyit edilmektedir.

Yeniden kaplama yöntemi, özellikle büyük ebatlı ticari taşıt lastikleri için yeni lastik teminine göre daha düşük maliyetli bir alternatif sunmaktadır. Aynı zamanda, bu yöntem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayarak, kauçuk bazlı atık miktarının azaltılmasına da önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. (Ulusoy, 2021).

Geri dönüşüm

Atık lastiklerin geri dönüşümü, lastiğin ve bileşenlerinin belirli işlemlerle orijinal formuna yeniden getirilmesi ya da lastiğin parçalanarak içerdiği metal, elyaf ve diğer materyallerin ayrıştırılması sürecidir. Bu işlem, hem çevresel etkilerin azaltılması hem de ekonomik açıdan değerli malzemelerin yeniden kullanıma kazandırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bir otomobil atık lastiğinin ortalama ağırlığı yaklaşık olarak 9.1 kg'dır. Bu lastiğin içerdiği materyallerin yaklaşık %35'i doğal kauçuk ve %65'i sentetik kauçuk olmak üzere, geri kazanılabilir kauçuk oranlarından oluşmaktadır (Gökbaşı, 2021).

Çizelge 1.3. Atık lastiklerden elde edilecek ana ürünlerin yüzdelik değerleri (Gökbaşı, 2021)

Ürün	Kamyon Lastiği (%)	Endüstriyel Araç Lastiği (%)	Otomobil Lastiği (%)
Kauçuk Kırıntısı	70	78	70
Çelik	27	15	15
Elyaf ve Diğer Kalıntılar	3	7	15

Depolama

Depolama, en eski bertaraf yöntemlerinden birisidir. Günümüzde depolama alanlarının sınırlı olması, depolama işleminin taşıma maliyetlerinin yüksekliği ve bu maliyetin ekonomik açıdan verimli kaynakların kullanılmaması şeklinde değerlendirilmesi, bu yöntemin dezavantajları arasında yer almaktadır. Ayrıca, atıkların biriktirilmesi ilerleyen süreçlerde çevre kirliliği oluşturabilecek büyük bir soruna yol açabilmektedir.

Depolama sahalarında atıkların uzun süre bekletilmesi sırasında, içerdikleri katkı maddeleri, özellikle düşük moleküler yapıya sahip olanlar, zamanla atık yüzeyinden sızarak çevreye, özellikle hava, su ve toprak ortamlarına difüze olmaktadır. Bu sızıntılar, hava ve su kirliliğine yol açmanın yanı sıra, toprakta bulunan yararlı mikroorganizmaları öldürmekte ve bu da yeni hastalıkların ortaya çıkmasına, dolayısıyla sağlık sorunlarının yayılmasına neden olmaktadır (Akın, 2017).

Enerji geri kazanımı

Atık lastiklerin geri dönüşümünde öne çıkan yöntemlerden biri, bu lastiklerin enerji üretiminde hammadde olarak kullanılmasıdır. Kıyılmış lastiklerden elde edilen yakıt, uluslararası sınıflandırmada *Lastikten Türetilmiş Yakıt* (TDF) olarak adlandırılmakta olup, yüksek enerji içeriğiyle dikkat çekmektedir. TDF, birçok katı yakıttan daha homojen bir enerji dağılımına sahip olup, özellikle kalorifik değeri daha düşük olan kömürle karşılaştırıldığında, enerji verimliliği açısından tercih edilen bir alternatif haline gelmektedir. Atık lastiklerin kalorifik değeri yaklaşık 32 MJ/kg olup, bu değer, onları kömür gibi geleneksel yakıtlara kıyasla daha verimli bir enerji kaynağı yapmaktadır (Ulusoy, 2021).

Atık lastiklerin enerji üretiminde kullanılması, aynı zamanda ekonomik açıdan da avantajlar sunmaktadır. TDF'nin üretim maliyeti, fosil yakıtlar olan doğal gaz, kömür ve

petrol gibi kaynaklarla kıyaslandığında belirgin bir şekilde daha düşük olup, bu durum ekonomik açıdan cazip bir alternatif oluşturur (Ulusoy, 2021). Ayrıca, lastiklerin yüksek ısı değeri ve düşük maliyeti, endüstride enerji kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılmalarını sağlamaktadır. Atık lastikler, özellikle çimento fabrikalarında, kömür yerine tercih edilerek, daha düşük sülfür içeriği ve eşdeğer enerji verimliliği sağlamakta, bu da çevresel etkileri azaltırken enerji üretim maliyetlerini düşürmektedir (Akın, 2017).

Malzeme geri kazanımı

Atık lastikler, çeşitli bileşenlerden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu bileşenlerin hammadde olarak yeniden değerlendirilmesi amacıyla farklı geri dönüşüm yöntemleri uygulanmaktadır. Bunlardan biri, atık lastiklerin elektrik ark fırınlarında kullanılması yöntemidir. Atık lastikler, içerdiği çelik sayesinde, yüksek karbonlu çelik üretiminde kullanılabilir. Bu işlem, genellikle 1650°C'nin üzerinde sıcaklık sağlayabilen elektrik ark fırınlarında gerçekleştirilir (Anonim, 2006). Atık lastiklerin yakıt olarak kullanılan kısmı, enerji üretiminde kullanılırken, içeriğindeki karbon ve çelik, yeni çelik üretiminde hammadde olarak değerlendirilir. Ancak, bu işlem yüksek maliyetli olup, ekonomik açıdan genellikle tercih edilen bir seçenek değildir (Gökbaşı, 2021).

Bir diğer önemli geri dönüşüm yöntemi **piroliz** işlemidir. Piroliz, oksidatif olmayan koşullar altında yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen, kimyasal bağları parçalayan termokimyasal bozunma ile organik maddenin kimyasal bileşimini ve fiziksel fazını geri dönüşümsüz bir şekilde değiştiren bir süreçtir. **Lastik pirolizi**, atık lastikleri değerli yakıt ürünlerine, özellikle piroliz yağı, karbon siyahı ve hidrokarbon gazı gibi bileşenlere dönüştüren bir işlemdir. Bu işlem, inert bir atmosferde, 300-900 °C arasında değişen sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bir araç lastiğinden ortalama olarak yaklaşık 4 litre yağ, 3 kg karbon siyahı, 1,5 kg gaz, 1 kg çelik ve kül elde edilmektedir. Piroliz işlemi, kapalı bir reaktörde gerçekleştirilmesi ve çoğu ürünün yeniden değerlendirilmesi nedeniyle, yanma işlemine kıyasla çevresel etkiler açısından daha sürdürülebilir ve çevre dostudur (Ulusoy, 2021).

Devulkanizasyon işlemi, kauçuğun yeniden karıştırılabilir, işlenebilir ve vulkanize edilebilir hale getirilmesi amacıyla uygulanan mekanik, ısı ve kimyasal süreçleri ifade eder. Bu işlemin temel amacı, kauçuğun yapısındaki karbon-kükürt bağlarının kırılmasıdır. Devulkanizasyon sonucu elde edilen kauçuk, **rejenere kauçuk**

olarak adlandırılmakta olup, mekanik özellikleri orijinal vulkanize kauçuğa göre daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu nedenle, rejenere kauçuğun kullanımı sınırlıdır. (Türkben, 2019).

Ülkemizde en yaygın malzeme geri kazanım yöntemlerinden biri, ömrünü tamamlamış lastiklerin taneciklerinin küçültülerek farklı alanlarda yeniden kullanılmasıdır. Bu süreçte, atık lastikler genellikle bütün, parçalanmış, granül ya da toz formunda değerlendirilmekte ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. İlk adım olarak, atık lastiklerin küçük parçalara ayrılması gerekmektedir. Bu işlem, iki temel yöntemle gerçekleştirilir:

- **Parçalama (Shredding):** Atık lastiklerin büyük parçalara ayrılması süreci.
- **Cryogenic method:** Çok düşük sıcaklıklarda lastiklerin küçük parçalara ayrılmasını sağlayan yöntem.

Kırılma işlemi sonucunda elde edilen malzemeler, genellikle parça, granül ve toz (pudra) şeklinde kategorize edilmektedir. Bu geri dönüşüm sürecinin amacı, elde edilen bu malzemelerin, yeni üretilen diğer malzemelerin hammaddesi olarak kullanılmasını sağlamaktır (Akın, 2017).

1.3.4. Atık lastiklerin kullanım alanları

Atık lastiklerin bazı Kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Oyun parkları alanları
- Motorlu spor alanları
- Kıyılarda gemilerin temas noktalarında
- Toprak erozyonu engelleme
- Zeminin su oymasına karşı köprü ayaklarının kaplanması
- Araç park alanları
- Su ortamlarında canlı yaşamının gelişmesi için bentik alanda. (Akın, 2017)

Tanecik boyutu küçültülmüş kauçuğun en yaygın kullanım alanlarından biri **inşaat sektörüdür**. Yapılan araştırmalar, kauçuğun özellikle asfalt üretiminde kullanılmasının, asfaltın kalitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Kauçuk ilavesi, asfaltın düşük sıcaklıkta çatlamasını ve yüksek sıcaklıkta oluşan tekerlek izlerini azaltmakta, ayrıca buzlanmaya karşı daha etkili bir çözüm sunmaktadır. Kauçuklu asfalt,

trafikteki ses kirliliğini de azaltırken, asfaltın kullanım ömrünü uzatma özelliğiyle dikkat çekmektedir.

Benzer şekilde, kauçuk kullanılmış betonlarla yapılan çalışmalar, bu betonların ısı ve ses yalıtımında verimlilik artışı sağladığını ortaya koymuştur. Kauçuklu betonların ısı iletim katsayısı, aynı ağırlıktaki normal betonlara kıyasla daha düşük çıkmakta, bu betonlar ayrıca sektörde kullanılan diğer iyi ısı yalıtım özelliklerine sahip betonlarla benzer yoğunluk ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmaktadır (Türkben, 2019).

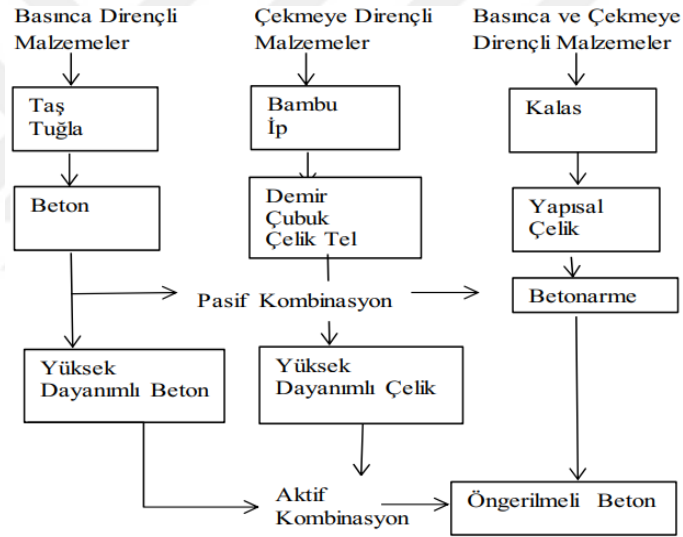
Bununla birlikte tanecik boyutu küçültülmüş kauçuğun bazı kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Erişilebilirlik rampaları, patikalar ve kaldırımlar
- Hayvan bakım ürünleri
- Suni çim
- Döşeme ve paspaslar
- Yeşil yollar
- Peyzaj ve kauçuk malç
- Dış cephe kaplaması, kaldırım taşları ve fayans
- Oyun alanı yüzey kaplaması
- Spor alanları yüzey kaplaması
- Trafik ile ilgili ürünler. (Ulusoy, 2021)

1.4. Ön Gerilmeli Elemanlar

Ön gerilmeli elemanlar olarak betonarme sistemler yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle konu öngerilmeli beton sistemler üzerinden anlatılmıştır.

Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi genel hatlarıyla Şekil 1.9’da verilmiştir. İlk dönemlerde, basınca dayanıklı malzeme olarak taş ve tuğla tercih edilmiştir. Zamanla bu malzemelerin yerini beton ve yüksek dayanımlı beton almıştır. Çekme kuvvetlerine karşı dayanım sağlayan malzemeler ise başlangıçta bambu ve ip gibi doğal kaynaklı malzemeler iken, ilerleyen dönemlerde yerlerini demir, çelik ve yüksek dayanımlı çelik gibi endüstriyel malzemelere bırakmıştır. Hem basınç hem de çekme kuvvetlerine karşı dayanıklı malzemeler olarak ise betonarme ve yapısal çelik kullanılmaya başlanmıştır (Palancı, 2022).



Şekil 1.9. İnşaat malzemelerinin gelişimi

Beton, sahip olduğu düşük maliyet, kolay uygulanabilirlik, mimari esneklik, yüksek basınç dayanımı ve yangına karşı direnç gibi özellikleri sayesinde yapı sektöründe en yaygın kullanılan malzemelerden birisidir. Bununla birlikte, betonun çekme dayanımının basınç dayanımına kıyasla oldukça düşük olması (yaklaşık 1/10 ila 1/12 oranında), bu malzemenin doğrudan çekme etkisine maruz kalan yapı elemanlarında kullanımını sınırlamaktadır. Bu problemin giderilmesi amacıyla beton içerisine belli bir oranda çelik donatı yerleştirilerek hem çekme hem de basınç yüklerine karşı daha performanslı olan betonarme sistemler geliştirilmiştir (Doğan, 2022).

Betonarme yapılarda karşılaşılan; inşa süresinin kısaltılması, yapı elemanlarının ağırlığının azaltılması, düşük gerilme düzeylerinde oluşan çatlakların kontrol altına alınması ve kalıp maliyetlerinin düşürülmesi gibi çeşitli mühendislik sorunlarına çözüm arayışları, öngerilmeli beton teknolojisinin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Doğan, 2022)

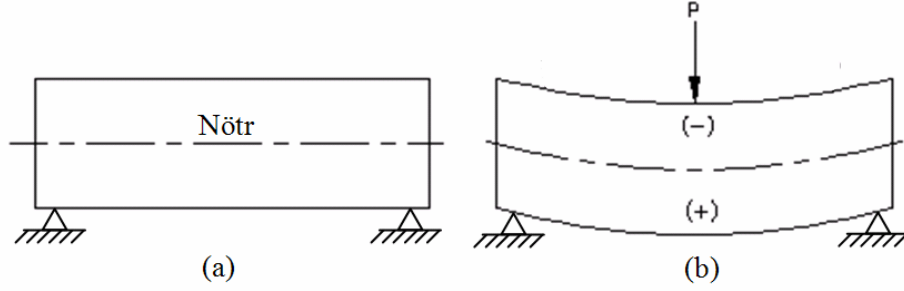
Öngerilmeli beton, TS3233'e göre "öngerilmeli beton, elemana gelecek yüklerin etkilerinin çeliğin gerilmesi ile istenilen şekilde dengelendiği betondur" şeklinde tanımlanmaktadır. (Doğan,2022)

Başka bir ifadeyle, öngerilmeli beton; yapı ömrü boyunca maruz kalabileceği tüm yükleri karşılayacak şekilde, istenen büyüklükteki gerilmelerin önceden yapı sistemine uygulanmasıyla elde edilen beton türüdür. Bu beton türü, çelik ve betonun aktif bir şekilde kombinasyonu ile oluşturulmakta ve her iki malzemenin mekanik özelliklerinden maksimum düzeyde yararlanılmasını sağlamaktadır. Uygulanan bu yöntem, betonun çekme gerilmesine karşı olan zayıf yönlerini önemli ölçüde azaltmış ve böylece öngerilmeli betonun mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmasına imkân sağlamıştır. Güvenilir öngerilme tekniklerinin geliştirilmesi, yapısal beton alanında dikkate değer bir yenilik olarak değerlendirilmektedir (Palancı, 2022).

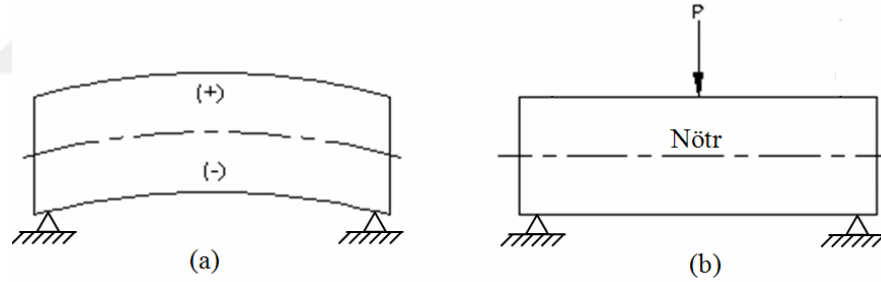
Öngerilmeli beton ile klasik betonarme sistemler arasındaki temel farklılıklardan biri, uygulanan imalat yöntemine dayanmaktadır. Betonarme imalat tekniğinde, donatılar kalıplar içerisine yerleştirilir ve üzerine beton dökülerek yapı elemanı oluşturulur. Bu yöntemde kullanılan çelik donatı, pasif konumda olup betona herhangi bir ön gerilme uygulamaz. Buna karşılık, öngerilmeli beton sisteminde yüksek dayanımlı çelik donatılar aktif bir bileşen olarak görev alır ve beton üzerine istenen düzeyde basınç gerilmeleri uygular. Bu uygulama, çekme dayanımı düşük olan beton ile çekme dayanımı yüksek olan çeliğin birlikte etkin bir biçimde çalışmasını mümkün kılarak, ideal bir birleşim sağlar (Palancı, 2022).

Kare kesitli bir ön yüksüz beton kirişin davranışını incelediğimizde, kirişin kendi ağırlığından kaynaklanan gerilmeler hariç, başlangıçta kirişin gerilmemiş olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 1.10.a). Bu durumda kirişin üzerine bir yük uygulandığında, yükün etki ettiği tarafta basınç gerilmesi, karşı tarafta ise çekme gerilmesi oluşacaktır (Şekil 1.10.b). Eğer kiriş ön gerilme teknikleriyle (ön germe veya sonradan germe) donatılırsa, yani yüklemeden önce kirişin kuvvet uygulanan yüzeyinde çekme ve diğer yüzeyinde ise basınç gerilmeleri oluşturulabilirse (Şekil 1.11.a), yük uygulandığında kirişte Şekil 1.10.b' de oluşan basınç ve çekme gerilmeleri oluşmayacak veya bu

gerilmeler daha düşük değerlerde oluşacaktır (Şekil 1.11.b). Dolayısıyla öngerilmeli yapı elemanı ön gerilmesiz yapı elemanına göre daha fazla bir yükü taşıyabilecek kapasiteye sahip olur veya aynı yük etkisi altında öngerilmeli kirişin kesiti ön gerilmesiz kirişin kesitinden daha küçük olacaktır. Ön gerilme, kirişin taşıma kapasitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda taşıyıcı elemanın kesitini küçülterek yapının toplam ağırlığını, dolayısı ile maliyetini de azaltır (Özer, 2010).

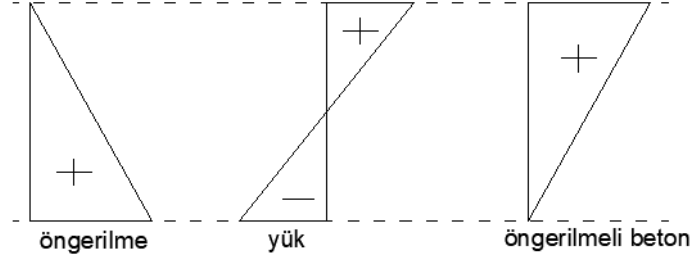


Şekil 1.10. Ön gerilmesiz bir kirişin, (a) yüksüz (kütlesi ihmal edilmiş) ve (b) P yükü uygulanmış durumu



Şekil 1.11. Ön gerilmeli kirişin, (a) yüksüz ve (b) P yükü uygulanmış durumu

Basit mesnetli bir kiriş açıklığının tam ortasında dış yüklerden dolayı meydana gelen çekme gerilmesinin, kirişe bir ön gerilme kuvveti verilmesi yoluyla ortadan kaldırılması Şekil 1.12 de verilmiştir. Burada basit kirişin açıklığının ortasında dış yük etkisi ile kesitin alt kısımlarında çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kirişe ön germe tekniği ile ön gerilme kuvveti verildiği zaman, çekme gerilmelerinin kaybolduğu görülmektedir (Doğan, 2022).



Şekil 1.12. Öngerilmeli basit kirişin açıklık ortasındaki gerilme dağılımı

1.4.1.Ön gerilme yöntemleri

Öngerilmeli beton üretimi, iki ana yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, ön gerilme işleminin hangi aşamada gerçekleştirildiğine bağlı olarak adlandırılmaktadır. Önerilme çeliği, beton dökümünden önce veya sonra gerilerek bu iki yöntem arasında ayırım yapılır. Eğer çelik, beton dökümünden önce gerilmişse, bu işleme "ön germe" adı verilir. Diğer yandan, çelik beton dökümünden sonra gerilirse, bu yöntem "son germe" olarak tanımlanır (Palancı, 2022).

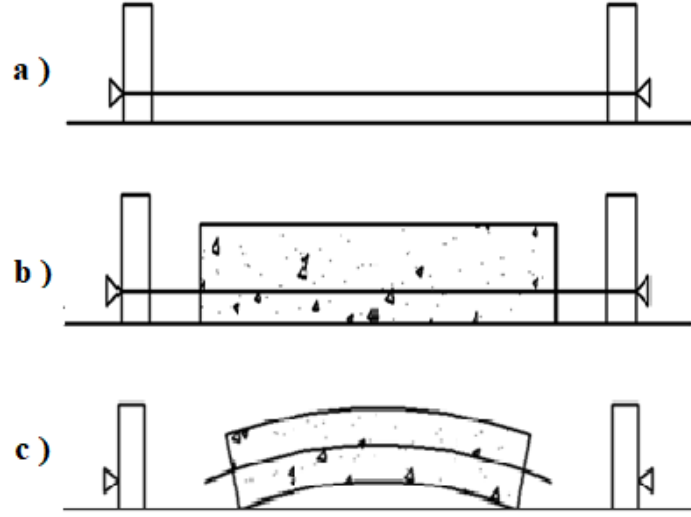
Ön germe yöntemi

Ön germe yöntemi, ön germe kablosunun beton dökümünden önce gerilmesi işlemine dayanmaktadır. Bu süreçte, kalıp içerisine yerleştirilen ön germe kablosunun bir ucu sabitlenirken, diğer ucu hidrolik piston yardımıyla gerilir. Ardından, taze beton, ön germe kablolarının gerdirilmiş olduğu kalıplar içerisine dökülür ve betonun sertleşme süreci başlar. Beton yeterli basınç dayanımına ulaştığında, pistona bağlı olan ön germe kablosunun pistondaki bağlantı noktası yavaşça serbest bırakılır. Bu işlemle birlikte, kablodaki gerilme, donatı ve beton arasındaki aderans etkisiyle betona aktarılır. Bu yöntem, özellikle prefabrik eleman üretimi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Doğan, 2022).

Ön germe işlem sırası aşağıdaki şekildedir:

- Beton dökülmeden önce kablolar hesaplanan bir değere kadar gerilirler. (Şekil 1.13.a)
- Kablolar gerilmiş bir şekildeyken kalıp içerisine beton dökülür (Şekil 1.13.b)
- Beton, gerekli kür işlemlerinin tamamlanmasının ardından mukavemet kazanır ve gerilmiş durumda bulunan kablolar, kalıp yanlarından kesilir. Bu

aşamada, kablolarda uygulanan çekme kuvveti, betonda basınç gerilmeleri oluşturur (Şekil 1.13.c). Sonuç olarak, bu durum ön gerilmeli betonun yukarı doğru sehim yapmasına yol açar. Ancak, servis yüklerinin etkisiyle, bu sehim azalabilir veya tamamen ortadan kalkabilir (Palancı, 2022).



Şekil 1.13. Ön germe işlem sırası

Son germe yöntemi

Son germe yöntemi, betonun dökülüp yeterli mukavemeti kazandıktan sonra, ön germe kablolarının gerilmesiyle kirişe ön gerilme uygulama işlemidir. Bu yöntem, genellikle köprüler, döşeme tabliyeleri, otoparklar, silolar, stadyumlar, su tankları, nükleer yapılar ve çeşitli sanayi yapıları gibi büyük ve ağır yapısal elemanların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son germe yöntemi, ilk olarak öngermeli elemanın uygulanacağı kalıbın düzgün bir şekilde temizlenip yağlanmasıyla başlar. Ardından, betonarme projeye uygun olarak düz donatılar montajlanır ve bu donatılar, içerisinde ön germe kablosu kılıflarını barındıran ince cidarlı borularla yerlerine yerleştirilir. Beton döküm işleminden önce, serbest bir durumda ya da beton istenilen dayanımı kazandıktan sonra, kılıfların içerisine ön germe kabloları yerleştirilir. Kablolar gerildikten sonra, uçları ankrajlanarak sabitlenir. Bu aşamadan sonra, ön germe kablosu ile kılıflar arasında kalan boşluklar, özel olarak formüle edilmiş bir harç malzemesi ile doldurulur. Bu harç malzemesi, ön germe kablosu

ile çevresindeki beton arasında güçlü bir aderans oluşmasını sağlar. Bu uygulama sayesinde, öngerilmeli elemanlar çatlamaya karşı daha dayanıklı hale gelir ve donatının korozyona uğrama riski minimum seviyelere indirilir. (Doğan, 2022)

1.4.2. Ön gerilme metodunun avantajları

Ön gerilmeli beton, yapı malzemelerindeki teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır ve yüksek mukavemetli beton ile çelik bileşenlerinin birleşimiyle oluşturulmaktadır. Günümüzde, beton ve çeliğin aktif bir şekilde kullanıldığı öngerilmeli beton, birçok yapısal avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar, aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Ön gerilmeli beton sayesinde büyük açıklıklar kolaylıkla geçilebilmektedir.
- Malzemenin tamamen elastik olarak çalışması sağlanarak, yapının daha verimli performans göstermesi mümkün olmaktadır.
- Çatlakların tamamen ortadan kaldırılması, yapıların daha güvenli hale gelmesini sağlar.
- Kesitin tüm yüksekliğinin verimli şekilde kullanılmasıyla narin ve estetik elemanlar tasarlanabilir ve kesit boyutları küçültülerek ekonomik kazanç elde edilir.
- Prefabrike üretimle kalıp maliyetlerinden tasarruf sağlanabilir.
- Yüksek akma dayanımına sahip çelik kullanımı, ön gerilmeli beton elemanlarında daha az donatı kullanılmasını sağlar.
- Yüksek mukavemetli beton ve çelik kullanımı, elemanların ağırlığını azaltarak büyük açıklıkların ekonomik bir şekilde geçilmesine olanak tanır (Oflozoğlu, 2007).

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Akın (2017) yaptığı çalışmada, polimer betonların özelliklerinde atık lastik kullanımının etkisini incelemiş, polyester reçine kullanarak ürettiği numuneler üzerinde Schmidt yüzey sertliği, aşınma, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyleri yapmış ve yaptığı değerlendirmede atık lastik oranının artması ile eğilme ve basınç dayanımının azalarak, işlenebilirlik ve süneklik değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Aydın (2015) yaptığı çalışmada, epoksi reçinede atık lastik tozunu dolgu malzemesi olarak kullanmıştır. Çalışmada 2 tür epoksi reçine: bisfenol-A (NPEL 128) ve bisfenol-A/F (NPEF 164X) ile 4 tür atık lastik karışımı kullanılarak dolgu maddesi miktarının ve epoksi reçine türünün kompozit özelliklerine etkisi incelenmiştir. Lastik atığı (LA) epoksi reçineye kütlece %10-%50 oranlarında ilave edilmiştir. LA için en uygun kütle seviyesi NPEF için %10, NPEL için %20 olarak belirlenmiştir. Kompozitlerin çekme dayanımı ve Young modülü değerlerinin saf epoksiye göre kritik LA seviyelerinde sırasıyla %21,8-33,8 ve %33,6-58,8 olarak arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca LA oranı arttıkça kompozitin sertliğinin azaldığını belirlemiştir.

Türkben (2019) yaptığı çalışmada, matris malzemesi olarak NPER 450, NPEK114, NPER133L olmak üzere 3 çeşit epoksi reçine, dolgu malzemesi olarak da EPDM kauçuğu tozu ile araba, traktör, kamyon ve otobüs olmak üzere 4 farklı taşıt lastiğinden elde edilen atık lastik tozu (LA) kullanmıştır. Epoksi reçineye kütlece %10-50 oranlarında LA ve EPDM ilave ederek dolgu maddesi miktarının ve epoksi reçine türünün kompozit özelliklerine etkisini incelemiştir. Sonuç olarak LA kompozitlerinin mekanik ve termal özellikleri EPDM kompozitlerinden yüksek bulunmuştur. En uygun dolgu malzemesi oranları EPDM için %20, LA için %30 olarak belirlenmiştir.

Yel (2022) yaptığı çalışmada, polimer matrisli kompozit numunelerde geri dönüştürülmüş atık kauçuk granüllerini dolgu malzemesi olarak kullanmış, matris malzemesi olarak ise polyester reçine kullanmıştır. Açık kalıplama yöntemi ile farklı karışım oranlarında elde edilen numuneler üzerinde Charpy ve sertlik testleri yapılmış, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile numunelerin morfolojik özellikleri incelenmiştir. Atık kauçuk granüllerinin polyester reçinenin akma ve çekme

dayanımlarını düşürdüğü, sünekliğini ise artırdığı görülmüştür. Morfolojik incelemelerde ise atık kauçuk granülleri ile polyester reçinenin ara yüzey yapışmasının zayıf olduğu ve bu nedenle dolgu malzemesi olarak kullanılacak atık kauçuk granüllerinin uygun şekilde işlenmesi gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Gökbaşı (2021) yaptığı çalışmada, çelik lifli polimer betonların mekanik özelliklerindeki değişimin incelenmesini amaçlamıştır. Bunun için geri dönüştürülmüş atık araç lastiği (AL) parçacıklarının dolgu maddesinin (D) (ince agrega) bir kısmı, atık lastik tellerinden elde edilen atık çelik liflerin (AÇL) ise endüstriyel çelik lifin (EÇL) bir kısmı ile ikame etmek suretiyle polimer beton numuneleri üretmiştir. Yaptığı deneylerde atık lastik kullanımının polimer betonun dayanımını azalttığı, atık çelik lif ve endüstriyel çelik lif kullanımının ise polimer betonun sünekliğini artırdığı sonucuna ulaşmıştır.

Öztürk (2019) yaptığı çalışmada, matris malzeme olarak epoksi reçine, dolgu malzemesi olarak reçinenin rijitliğini artırmak için bazalt granüller ve silis kumu tanecikleri kullanmış, yapının mukavemetini arttırmak ve lif yönü bulunan bir form oluşturmak amacıyla cam elyaf takviyesi ile kompozit yapıyı desteklemiştir. Farklı karışım oranlarına sahip numuneler üzerinde yaptığı titreşim sönümleme ve çekme testleri ile endüstriyel kullanıma uygun ve ideal mekanik özelliklere en yakın sonuçlara ulaşmayı sağlayan malzeme bileşim oranlarını belirlemiştir.

Ateş (1994) yaptığı çalışmada, polimer betonun makina yapım malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Öncelikle polimer beton için malzeme bileşenlerini belirlemiş, bu bileşenleri kullanarak farklı tane büyüklükleri, dolgu malzemeleri grupları ve bağlayıcı oranlarındaki hazırladığı numuneler üzerinde; basma, eğilme eğilme-yorulma ile sönüm deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre mekanik özellikleri ve çok iyi olan sönüm özellikleriyle polimer betonun birçok alanda geleneksel yapı malzemelerine alternatif olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Ğuma (2019) yapmış olduğu çalışmada, pultrüzyon metodu ile üretilen GFRP kutu profillerin içerisine polimer beton doldurarak elde ettiği malzemenin mekanik özelliklerini incelemiştir. Matris malzemesi olarak Polyester reçine, dolgu malzemesi olarak doğal kum ve mıcır kullanarak ürettiği polimer betonu, farklı kesit ve boyutlardaki GFRP kutu profiller içerisine doldurularak elde ettiği hibrit numuneler üzerinde yaptığı

deneylerde numunelerin basınç ve eğilme testleri altındaki davranışlarını, yük taşıma kapasitelerini, deformasyonları ve toklularındaki değişimi analiz etmiştir. Deneyler neticesinde numunelerin hibrit tasarım oluşumundan kaynaklı birçok avantaja sahip olmasının yanında, bileşen malzemelerine göre daha üstün fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiği sonucuna ulaşmıştır.

Yıldırım (2019) yaptığı çalışmada, cam lifi ve cam tozunu polimer betona aynı hacimlerde ilave edilerek, polimer betonun mekanik dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla %0,1, %0,5, %1 oranında cam lifi ve cam tozu ikame etmiştir. Cam lifi ve cam tozu katkılı betonların, katkı oranlarına bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Ulusoy (2021) yaptığı çalışmada, atık lastiğin betonda agrega ile kullanımını incelemiştir. Bunun için farklı yüzdelerde (%0, %10, %20 ve %30) hacimce agrega ikamesi (yer değiştirme) yapıp atık lastik parçaları kullanılarak, farklı su/çimento oranları ile değişik beton karışımları elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda atık lastik agregalı betonun basınç dayanımında iyileşme olmadığı, ısı iletkenliğinin azaldığı ve aşınma direncinin iyileştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Deredas vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada stiren-bütadien kauçuk (SBR) ile katkılı polimer beton ve SBR katkısının polimer betonun dinamik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak, polimerin dinamik özelliklerini detaylandırmak için 0 ila 2000 Hz arasında deneysel modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar, %30 SBR'ye sahip numunenin en düşük titreşim genlik değerine sahip olduğunu, %20 ve %30 SBR'ye sahip numunelerin ise sönüm oranı için en yüksek değerlere sahip olduğunu göstermiştir. İkinci aşamada, numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için basma ve eğilme testleri yapılmıştır. Her iki durumda da, %30 SBR numuneleri için malzeme mukavemetinde en yüksek düşüş tespit edilmiştir. Buna rağmen, polimer betondaki SBR miktarının arttırılması, sönüm oranını iyileştirerek titreşim genliğini azaltmıştır.

Oflazoğlu (2007) yaptığı çalışmada narin ve narin olmayan öngerilmeli beton kolonların tasarımını yapan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hazırlanmış olduğu bu program ile eksenel yük - moment değerlerini yüksek doğrulukla hesaplamış ve eksenel yük - moment etkileşim diyagramını bu program vasıtası ile elde etmiştir. Literatürde

mevcut olan bazı örneklerin bu program vasıtası ile yapılan çözümlerinden elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Özer (2010) yaptığı çalışmada, kaynaklı birleştirme metodu ile içten öngerilmeli çelik I-kirişler üreterek eğilme davranışlarını incelemek ve uygulanan ön gerilmenin/kaynaklı birleştirmenin kirişlerde oluşturduğu kalıcı/kalıntı gerilmeleri belirlemek için araştırmalar yapmıştır. Ürettiği kirişlere üç nokta eğilme testi uygulamıştır. Plastik deformasyonun başladığı en yüksek eğilme yükü ve akma dayanımı 200 MPa öngerilmeli kirişte elde edilmiş ve kirişin eğilme yükünün yaklaşık %16, akma dayanımının ise yaklaşık %14 arttırılabileceğini tespit etmiştir.

Doğan (2010) yaptığı çalışmada, farklı yüksekliklere (100 cm, 120 cm ve 150 cm) sahip çeşitli tipteki öngerilmeli betonarme kirişlerin tek açıklıklı statik davranışları incelenmiştir. Analizler, ilgili ulusal ve uluslararası standartlar ile yönetmelikler doğrultusunda gerçekleştirilmiş; kesit tesirleri, yeterli öngerme halatı miktarı ve bu halatların kiriş üzerindeki yerleşimi detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Ayrıca, öngerme kayıpları, taşıma kapasitesi kontrolleri, yatay mukavemet koşulları ile maksimum ve minimum donatı miktarları belirlenmiştir. Farklı kiriş tiplerine uygulanan çeşitli yükleme ve öngerme kombinasyonlarının sonuçları karşılaştırılmış; bu sayede farklı gerilme durumlarında öngerilmeli kirişlerin yapısal davranışları analiz edilmiştir.

Palancı (2022) yaptığı çalışmada, teorik ve deneysel olarak öngerilmeli I kesitli sürekli kirişlerin analizini ve tasarımını gerçekleştirerek kirişlerin eğilmeye göre davranışlarını incelemiştir. İki adedini normal beton, bir adedini ise normal beton ve çelik lif katkılı olarak hazırladığı kirişler son germeli ve aderanslı olarak üretilmiştir. Deneylerde üzerindeki yük kademeli olarak arttırılarak kirişlerin taşıma gücü değerleri ve açıklık ortasındaki yük deplasman değerleri belirlenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Jafari ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada lastik katkılı polimer betonun (PC) mekanik davranışını incelemişlerdir. PC'deki ince ve iri agregaların yerine sırasıyla öğütülmüş ve kırılmış kauçuk kullanılmıştır. Sonuçlar, lastik katkısının PC'nin işlenebilirliğini azalttığını ve karışımın gözenekliliğini ve hava içeriğini artırdığını; ancak maliyeti ve yoğunluğu azalttığını ve sünekliği iyileştirdiğini göstermiştir. Öğütülmüş kauçuk içeren PC, kırılmış kauçuğa göre daha düşük darbe hızına ve daha yüksek

sönümlleme özelliklerine sahiptir. Ayrıca, lastik katkılı PC'nin mekanik özellikleri için optimum koşulları belirlemek amacıyla Taguchi yöntemi kullanılmış ve ardından ANOVA, etki seviyelerinin ve parametrelerin etkileşiminin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Yapılan çalışmalara dayanarak lastik katkılı PC'nin onarım ve rehabilitasyon uygulamaları için uygun bir aday olabileceği sonucuna varılmıştır.

Shao ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada, sırasıyla %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında ince, orta ve iri kauçuk parçacıkları eklenmiş epoksi beton üzerinde basınç, eğilme, yırtılma ve şekil değiştirme deneyleri yapmışlardır. Ayrıca, lastik katkılı epoksi beton, iki sıradan beton kısa kirişi "yapıştırmak" için onarım malzemesi olarak kullanılmış ve bağ gerilme dayanımı testi yapılmıştır. Sonuçlar, epoksi betonun onarım malzemesi olarak gerekli olan yeterli ara yüzey mukavemetini korurken, lastiğin epoksi beton içinde deforme edilebilirliği artırmaya yardımcı olduğunu ve bunun da epoksi betonun sertliğini dengelemeye faydalı olduğunu ortaya koymuştur.

Abu-Jdayil ve arkadaşları (2016) yapmış oldukları çalışmada, kabul edilebilir mekanik performansa sahip bir yalıtım malzemesi olarak polyester-kauçuk kompoziti formüle ederek geliştirmeyi amaçlamışlardır. Kauçuk parçacık oranının bir polyester kompozitin basınç ve çekme dayanımları üzerindeki etkisini belirlemek için 8 farklı konsantrasyon (hacimce %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40) belirlemişlerdir. Deneysel sonuçlar, kauçuk parçacıklarının polyester matrisle karıştırılmasının, kompozitin basınç ve çekme dayanımlarını azalttığını ortaya koymuştur. Lastik oranı arttıkça ve lastiğin polyester reçinesine karşı düşük hidrofilitesi nedeniyle, lastik parçacıkları ile polyester arasındaki çapraz bağlanma derecesi azalmakta ve bu da kompozitin dayanımlarında belirgin bir azalmaya yol açmaktadır. Diğer taraftan, araştırılan tüm lastik içerikleri için, lastik parçacıklarının boyutu büyüdükçe, kompozitin dayanımı ve elastisite modülü azalmaktadır. Lastik parçacıkları eklemek mekanik özellikleri azaltsada, hazırlanan kompozitler, mevcut yalıtım malzemeleriyle karşılaştırıldığında üstün mekanik gerilme dayanımları (22.8–1.25 MPa) ve basınç dayanımı (79.5–8.42 MPa) sergilemektedir.

Zhang ve arkadaşları (2024) yapmış oldukları çalışmada, yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve mükemmel yorulma direncine sahip olan karbon fiber ve aramid fiber kullanarak, farklı fiber tiplerinin ön gerilmeli beton kirişlerin yorulma performansı

üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, çeşitli fiber tiplerine sahip 12 ön gerilmeli beton kiriş üzerinde eğilme ve sabit genlikli yorulma testleri yapılmıştır. Sonuçlar, fiber takviyeli betonun kullanımının kiriş bileşenlerinin yorulma ömrünü ve kalıntı gerilme taşıma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Özellikle, karbon fiber, aramid fiber ve hibrit fiberle takviye edilen kirişlerin kalıntı gerilme taşıma kapasiteleri sırasıyla %58,6, %49,5 ve %64,9 oranında artmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneylerde kullanılan atık kauçuk ve epoksi reçinenin kimyasal ve mekanik özellikleri anlatılmış, farklı atık kauçuk ve ön gerilme oranlarının malzeme davranışına etkileri incelenmiştir. Ayrıca, deney numunelerinin hazırlanışına yönelik aşamalar detaylı bir şekilde açıklanmış olup, deney sürecinde izlenen yöntemler, kullanılan ekipmanlar ve belirlenen standartlara uygunluk ele alınmıştır. Bununla birlikte, gerçekleştirilen eğilme ve sıyrılma testlerine ilişkin deney setlerinin bileşenleri, test koşulları ve ölçüm süreçleri detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında, deney numunelerinin mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik olarak darbeli çekiç testi, üç noktadan eğilme testi ve sıyrılma testi, fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için de Arşimet terazisi ve sertlik ölçüm testleri uygulanmıştır. Bu testlerin gerçekleştirilebilmesi için, epoksi reçine, öğütülmüş atık kauçuk (hurda araç lastiğinden elde edilen) ve doğrultulmuş yay çeliği kullanılmıştır.

3.1.1. Atık kauçuk

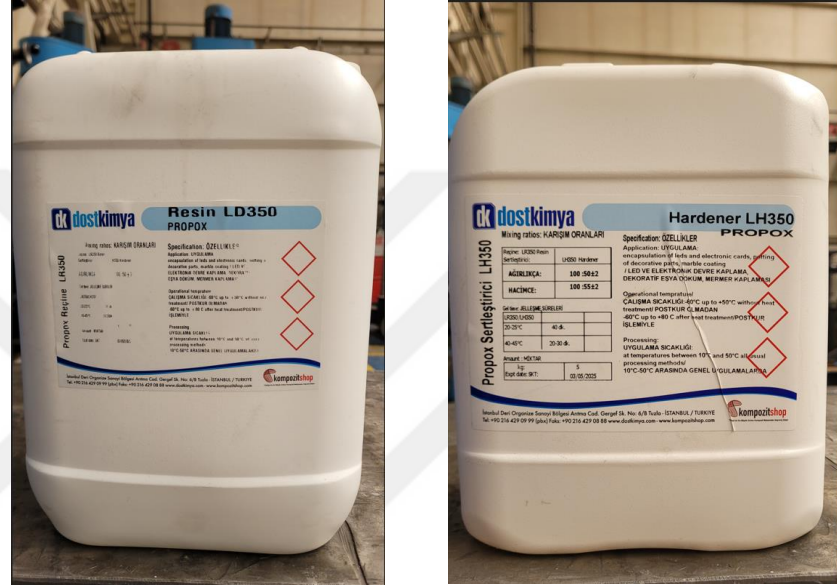
Deneysel çalışmalarda, Barutçular Geri Dönüşüm San. Tic. Ltd. ŞTİ (Konya/Türkiye) firmasından temin edilen ve Şekil 3.1’de gösterilen hurda araç lastiklerinin geri dönüşümünden elde edilen öğütülmüş atık kauçuk kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Öğütülmüş atık kauçuk

3.1.2. Epoksi reçine

Deney numunelerinin hazırlanmasında, Dost Kimya San. Tic. Ltd. ŞTİ (İstanbul/Türkiye) firması tarafından imalatı yapılan ve Şekil 3.2'de gösterilen Propox Epoksi Reçine LD350 ve sertleştirici olarak Propox Sertleştirici LH350 kullanılmıştır. Söz konusu ürünler İMAŞ MAK. A.Ş. tarafından seri imalatla kullanılmakta olan ürünlerdir.



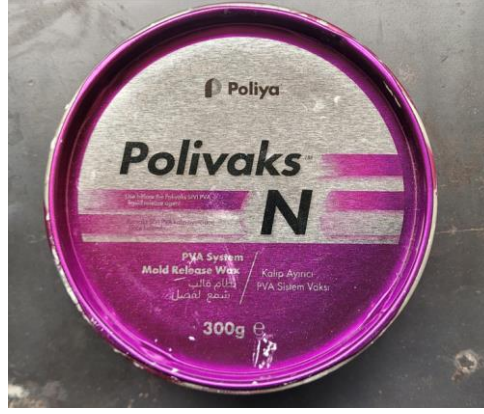
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici

3.1.3. Doğrultulmuş yay çeliği

Deney numunelerinin hazırlanmasında, Yaytek San. Tic. Ltd. ŞTİ (Konya/Türkiye) firması tarafından tedarik edilen, Ø4 mm ölçüsünde rulodan açılarak doğrultulmuş EN 10270-1 standardına uygun SM kalite yay çeliği kullanılmıştır.

3.1.4. Kalıp ayırıcı yağ

Küp ve kiriş formundaki deney numunelerinin, döküldükleri kalıptan kolay ayrılabilmesi amacıyla kalıp yüzeyleri döküm işleminden önce yağlanmıştır. Bu amaçla Poliya Polivaks N marka kalıp ayırıcı yağ kullanılmıştır (Şekil 3.3)



Şekil 3.3. Kalıp ayırıcı yağ

3.1.6. Kalıplar

Küp ve kiriş formundaki deney numunelerinin imalatlarının yapılabilmesi amacıyla küp numuneler için yüzeyleri laminant kaplı ahşap malzemeden 52x52x52 mm küp numune ölçülerinde 9 gözlü, kiriş numuneler için 6061 kalite alüminyum plakadan 30x20x250 mm kiriş numune ölçülerinde 6 gözlü kalıplar imal edilmiştir. Kalıpların imalatı İmaş Mak. A.Ş. Arge Merkezi bünyesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Küp ve kiriş numunelerin hazırlanması için imal edilen kalıplar

3.1.7. Sınıflandırma Elekları

Küp ve kiriş formundaki deney numunelerinin imalatında kullanılacak olan atık kauçuk granüllerinin sınıflandırılması için 3 mm ve 2 mm delik çapında elekler kullanılmıştır. Bu elekler, İmaş Mak. A.Ş. Arge Merkezi bünyesinde bulunmaktadır.



Şekil 3.5. Sınıflandırma elekleri

3.1.8. Ölçüm Cihazları

Küp ve kiriş formundaki deney numunelerinin imalatlarında kullanılan malzemelerin ağırlıklarının ölçülmesinde Necklife 1108-2 marka hassas terazi, yüzey sertliği ölçümlerinde Time A092906110 marka dijital portatif sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar İmaş Mak. A.Ş. Arge Merkezi bünyesinde bulunmaktadır.



Şekil 3.6. Hassas terazi ve portatif sertlik ölçüm cihazı

3.2. Yapılan Deneyler ve Hesaplamalar

3.2.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin elastisite modülünün hesaplanması

Bu çalışmada matris malzemesi olarak epoksi reçine, takviye malzemesi olarak çeşitli karışım oranlarında atık kauçuk granülleri kullanılmıştır. Elde edilen parçacık takviyeli polimer kompozit malzemenin elastisite modülünün hesaplanmasında **Halpin – Tsai modeli** esas alınmıştır.

Halpin-Tsai modeli, kompozit malzemelerin elastik (özellikle elastisite modülü) özelliklerini tahmin etmek için kullanılan bir modeldir. Özellikle fiber takviyeli kompozitlerde, matris ve takviye malzemelerinin geometrik ve mekanik özelliklerine göre kompozitin genel mekanik davranışını hesaplamak için kullanılır.

$$\eta = \frac{E_{fk}/E_m - 1}{E_{fk}/E_m + \xi} \quad (3.1)$$

$$\xi = 2x \frac{l}{d} \quad (3.2)$$

$$E_c = E_m \cdot \left(\frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot V_{fk}}{1 - \eta \cdot V_{fk}} \right) \quad (3.3)$$

Burada kauçuk granülleri için $l = d$ kabulü ile $E_{fk} = 10 \text{ Mpa}$, $E_m = 4000 \text{ Mpa}$, $V_{fk} = \% 20$ oranı için Denklem 3.1, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 kullanılarak $\eta = -0.49$ ve $E_c = 2913 \text{ Mpa}$ değerleri hesaplanmıştır.

3.2.2. Minimum ve kritik fiber hacim oranlarının hesaplanması

Bir kompozit malzeme mukavemet açısından değerlendirilecek olursa, matrisi fiber ile takviye etmekteki temel amaç, matrise göre daha dayanıklı bir malzeme elde etmektir. Fiber oranının belli bir sınır değerinin altında kalması durumunda kompozit malzemenin mukavemeti, matris malzemenin mukavemetinden daha düşük olur. Verimli bir kompozit malzeme elde edebilmek için bu sınır değerinin hesaplanması ve bu değer üzerinde kalacak şekilde bir tasarım yapılması gerekmektedir.

Fiber oranı çok az olduğunda fiberler yük taşımaz ve başlangıçta hemen kopar. Fiber oranı yeterli seviyede olursa fiberler başlangıçta hemen kopmaz ve yük taşır. Fiberlerin bu yük taşıma sınırındaki hacimsel oranı “minimum fiber hacim oranı (V_{fmin})” olarak tanımlanır ve Denklem 3.4 ile hesaplanır.

$$V_{fmin} = \frac{E_m(\varepsilon_{mmax} - \varepsilon_{fmax})}{E_f \varepsilon_{fmax} + E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}} \quad (3.4)$$

Bu durumda fiberlerin yük taşıma şartı $V_f > V_{fmin}$ olarak tanımlanır.

Kompozit malzemeden dayanım açısından verim alınabilmesi için fiberlerin yük taşıması yeterli değildir. Kompozit mukavemeti, matris mukavemetinden daha büyük olmalıdır, bu da fiber oranının belirli bir sınır değerden daha yüksek olması ile sağlanabilir. Bu sınır değer “kritik fiber hacim oranı (V_{fcr})” olarak tanımlanır ve Denklem 3.5. ile hesaplanır.

$$V_{fcr} = \frac{E_m(\epsilon_{m_{max}} - \epsilon_{f_{max}})}{\epsilon_{f_{max}}(E_f - E_m)} \quad (3.5)$$

Bu durumda kompozitten verim alma şartı $V_f > V_{fcr}$ olarak tanımlanır.

Deney numunelerinde kullanılacak olan ön gerilme elemanlarını matris malzeme içerisinde sürekli fiber takviye olarak düşünebiliriz. Bu durumda

$$E_m = E_c = 2913 \text{ MPa}$$

$$E_f = 210.000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 70 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = 1000 \text{ MPa}$$

Değerleri kullanılarak

$$\epsilon_{m_{max}} = \sigma_m / E_m \text{ eşitliğinden, } \epsilon_m = 0,025 \text{ mm/mm}$$

$$\epsilon_{f_{max}} = \sigma_f / E_f \text{ eşitliğinden, } \epsilon_{f_{max}} = 0,0048 \text{ mm/mm değerlerine ulaşılmıştır.}$$

Sonuç olarak,

$$\text{Denklem 3.4 kullanılarak } V_{f_{min}} = \% 5,31$$

$$\text{Denklem 3.5 kullanılarak } V_{f_{cr}} = \% 5,69 \text{ değerleri hesaplanmıştır.}$$

Yukarıda anlatıldığı üzere kompozit malzemeden verim alınabilmesi için

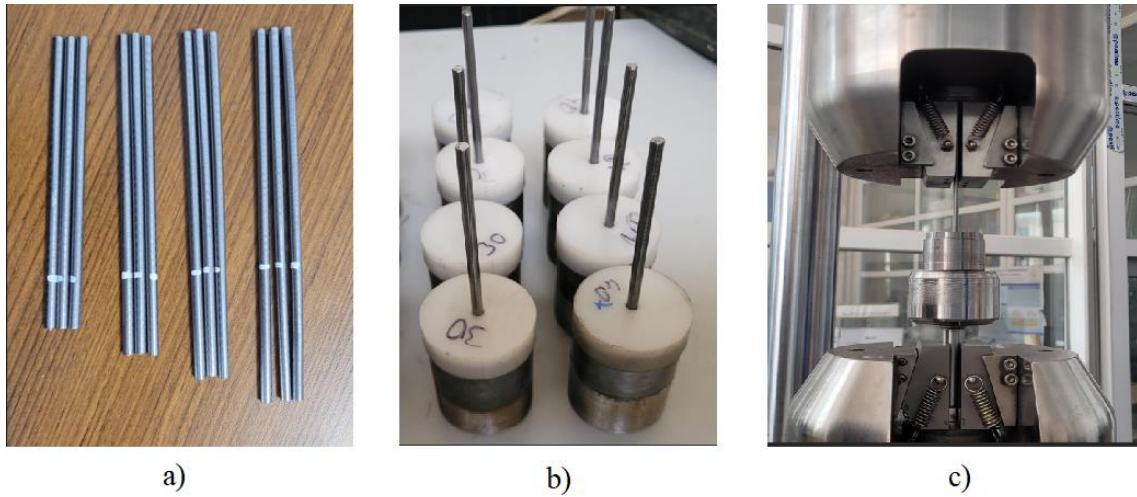
$V_f > V_{fcr}$ şartı sağlanmış olmalıdır. Kiriş numunenin kesit ölçüsü, yapılacak olan üç nokta eğilme testini de dikkate alarak 30x20 mm olarak belirlenmiştir. Kiriş numune içerisinde $n = 3$ adet ön gerilme elemanı kullanılacaktır. Bunun için gerekli olan ön gerilme elemanı tel çapı:

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{n}{b \cdot h} \geq V_{fcr} \text{ eşitliğinden } d \geq 3.81 \text{ mm hesaplanmıştır. Buradan tel çapı } d = 4 \text{ mm seçilmiştir.}$$

3.2.3. Sıyırılma testi

Fiber sıyırılma testi, lif takviyeli kompozit malzemelerde, lif ile matris (genellikle bir polimer reçine) arasında oluşan ara yüzey bağ dayanımını belirlemek için kullanılan bir deneysel yöntemdir. Bu testte, epoksi reçine içerisine yerleştirilen farklı batma uzunluklarındaki çelik çubuklar üzerinde çekme testi uygulanarak sıyırılma durumlarına göre kritik fiber uzunluğu belirlenmiştir. Bu amaç için öncelikle içerisine epoksi reçine doldurulacak olan Ø30 mm iç çapına ve 50 mm derinliğine sahip bir ucu kapalı çelik kovanlar imal edilmiştir. Çelik çubukları bu kovanın tam merkezinde konumlandırabilmek amacı ile merkezi Ø4 mm ölçüsünde delinmiş ve teflondan imal edilmiş kapaklar kullanılmıştır. Söz konusu çelik kovanın dış çapı Ø40 mm ölçüsünde olup bu ölçü çekme test makinesinin çenelerinin arasına sığmayacağı için kovanların dışına M4 vida dişi açılmış, buraya da çekme test makinesine uygun bir aparat tasarlanıp monte edilerek çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

Üretici firma tavsiyesine uygun olarak 2:1 oranında epoksi reçine ve sertleştirici ayrı bir kapta 3 dk. süre ile karıştırılarak kovanların içerisine doldurulmuştur. Çelik çubuklar kovanların içerisine 10, 20, 30 ve 40 mm batma derinliğine göre yerleştirilerek her bir gruptan 7 tekrar olacak şekilde toplam 28 numune hazırlanmıştır. Bu işlemlerden önce çelik çubukların yüzey temizliği etil alkol ile yapılmıştır. Numuneler 24 saat bekletildikten sonra çekme test cihazı kullanılarak TSE EN 12390-5 (2019) standardına göre 10, 20, 30 ve 40 mm batma derinliğindeki numuneler için sıyırılma testleri yapılmıştır. Şekil 3.7.a’da batma seviyeleri işaretlenmiş çubuk numuneler, Şekil 3.7.b’de çubuk numunelerin kovanlara dökülmüş epoksi reçine içerisine yerleştirilmiş hali, Şekil 3.7.c’de çekme test cihazında yapılan sıyırılma testi görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.7. Kullanılan çelik çubuklar, sıyrılma numuneleri ve çekme test cihazında yapılan sıyrılma testi

3.2.4. Arşimet terazisi ile yoğunluk ölçümleri

Bu test için gerekli olan küp numunelerin üretilmesi için yukarıda bahsedilen ahşap kalıp kullanılmıştır. Numunelerde kullanılacak atık kauçuk oranları hacimce sırası ile %0, %5, %10, %15 ve %20 olacak şekilde belirlenmiştir. Bunun için gerekli olan karışım oranları hesaplanarak çizelge 3.1 de verilmiştir.

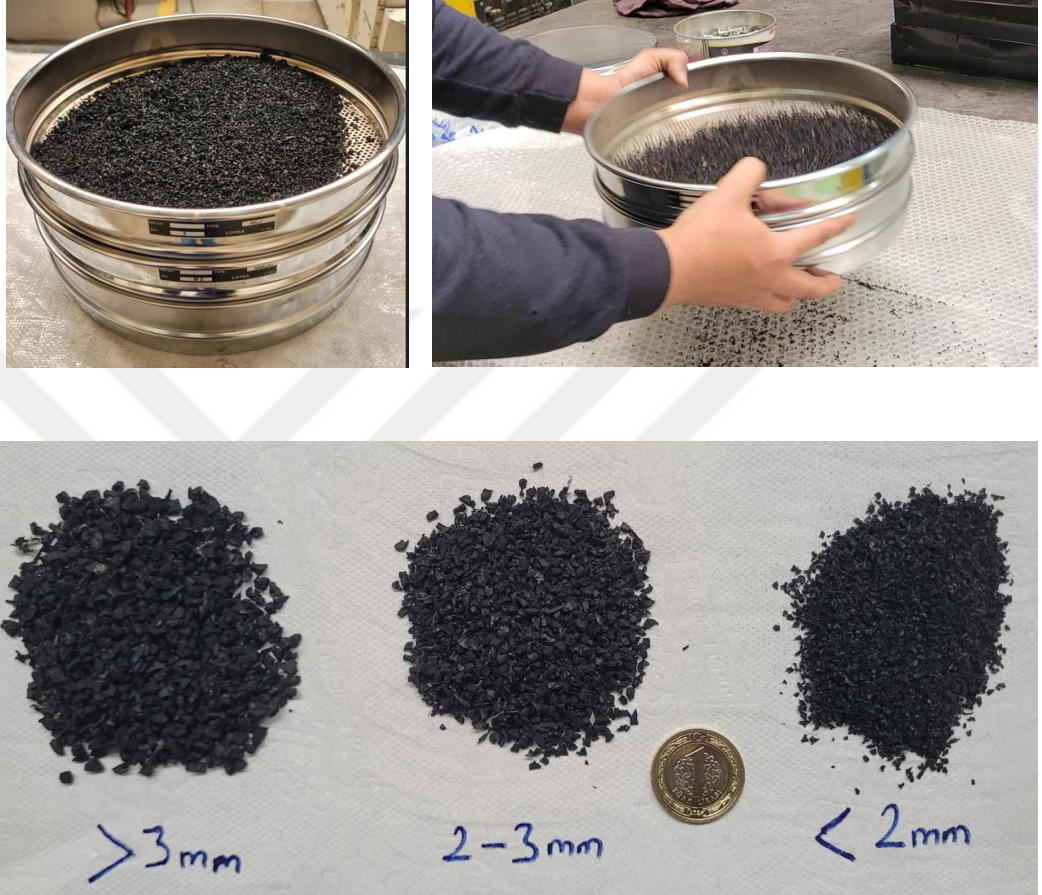
Çizelge 3.1. Küp numune için gerekli olan malzeme miktarları

Küp Numune (52x52x52 mm)					
Atık Kauçuk (%vol)	Epoksi Reçine (%vol)	Atık Kauçuk (gr)	Epoksi Reçine (gr)	Epoksi (gr)	Sertleştirici (gr)
0	100	0.0	154.7	103.1	51.6
5	95	6.5	146.9	98.0	49.0
10	90	13.1	139.2	92.8	46.4
15	85	19.6	131.5	87.6	43.8
20	80	26.2	123.7	82.5	41.2

Gerekli olan küp numunelerin üretimi süreci aşağıdaki işlem adımları ile gerçekleştirilmiştir:

- Atık kauçuk granüllerinin eleklerden geçirilerek sınıflandırılması. Bunun için delik çapları 3 mm ve 2 mm olan elekler kullanılmıştır. Elekler, 3 mm olan yukarıda olacak şekilde üst üste yerleştirilerek Atık kauçuk granülleri el yordamı ile eleme işlemine tabi tutulmuştur. 3 mm'den büyük olan granüller

üst elekte kalmış, 2 mm'den küçük olan granüller ise diğer eleğin altına geçmiştir. İki eleğin arasında kalan granüller deneylerde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Söz konusu granüllerin boyutu $3 \text{ mm} \geq d \geq 2 \text{ mm}$ aralığındadır. (Şekil 3.8)



Şekil 3.8. Atık kauçuk eleme işlemi

- Kullanılacak olan atık kauçuk ve epoksi miktarları, hassas terazi ile tartılarak hazırlanmıştır. Epoksi ve sertleştirici ayrı bir kapta 3 dk boyunca karıştırılarak epoksi reçine elde edilmiştir. (Şekil 3.9)



Şekil 3.9. Atık kauçuk ve epoksi reçine karışımlarının hazırlanması

- Hazırlanan epoksi reçine atık kauçuk granülleri karıştırılıp kalıba döküldüğü zaman yoğunluk farkından dolayı kauçuk granüllerinin dibe çöktüğü gözlenmiştir. Bu nedenle karışımı yapılan epoksi reçinenin termometre ile sıcaklık ölçümleri yapılarak jelleşme sürecinden hemen önce karışım yapılarak kalıba dökümü yapılmıştır. Bu şekilde nispeten daha homojen karışım elde edilmiş olmakla birlikte dezavantaj olarak numune içerisinde bir miktar hava kabarcığı oluşmuştur (Şekil 3.10)



Şekil 3.10. Hazırlanan karışımın kalıba dökülmesi

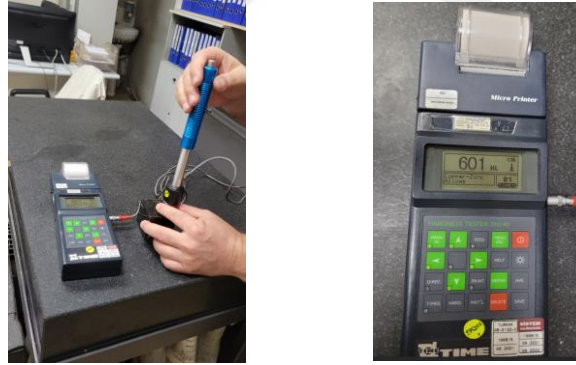
- Numuneler 24 saat bekledikten sonra kalıptan çıkarılarak İmaş mak. Arge merkezi bünyesinde hazırlanan test düzeneğinde yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Burada arşimed prensibine göre deney numunesinin taşıdığı suyun ağırlığı, deney numunesinin hacmine eşittir. ($\rho_{su} = 1 \text{ g/cm}^3$). Dolayısı ile numunenin havadaki ağırlığının taşan suyun ağırlığına oranı, numunenin yoğunluğunu verecektir. (Şekil 3.11)



Şekil 3.11. Hazırlanan numunelerin hacim ölçümü

3.2.5. Sertlik ölçümleri

Yukarıda anlatıldığı şekilde hazırlanan küp şeklindeki numunelerin yüzeylerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Malzeme, portatif sertlik ölçme cihazının kütüphanesinde tanımlı olmadığı için en yakın bakır – çinko alaşımı seçilip HL sertlik biriminde ölçüm yapılmıştır. (Şekil 3.12)



Şekil 3.12. Deney numunelerin sertlik ölçümlerinin yapılması

3.2.6. Darbeli Çekiç Testi

Darbeli çekiç testleri ve üç nokta eğilme testlerini gerçekleştirebilmek için kiriş numuneler hazırlanmıştır. Bu testler için gerekli olan kiriş numunelerin üretilebilmesi için yukarıda bahsedilen alüminyum kalıp kullanılmıştır. Numunelerde kullanılacak atık kauçuk oranları küp numunelerde olduğu gibi hacimce sırası ile %0, %5, %10, %15 ve %20 olacak şekilde belirlenmiştir. Kiriş numunelerin içerisine yerleştirilecek olan 3 adet ön gerilme elemanının hacimlerini de dikkate alarak gerekli olan karışım oranları hesaplanmış ve Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kiriş numuneler için gerekli olan malzeme miktarları

Kiriş Numune (30x20x250 mm)					
Atık Kauçuk (%vol)	Epoksi Reçine (%vol)	Atık Kauçuk (gr)	Epoksi Reçine (gr)	Epoksi (gr)	Sertleştirici (gr)
0	100	0.0	154.6	103.1	51.5
5	95	6.5	146.9	97.9	49.0
10	90	13.1	139.2	92.8	46.4
15	85	19.6	131.4	87.6	43.8
20	80	26.1	123.7	82.5	41.2

Kiriş numuneler içerisine yerleştirilecek olan ön gerilme elemanlarına uygulanacak olan ön gerilme değerleri, akma mukavemetinin sırası ile %0, %20, %40 ve %60'ı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu ön gerilmelerin uygulanabilmesi için ön gerilme elemanlarının her iki tarafına M4 diş açılmış, elemanlar aparat içerisine birer taraflarından sabitlenmiş, diğer taraflarından M4 somunlar vasıtası ile sıkıştırılarak boylarının uzaması sağlanmıştır (Şekil 3.13). İstenilen ön gerilme değerine ulaşılabilmesi için olması gereken uzama miktarları hesaplanarak Çizelge 3.3 de verilmiştir. Gerekli olan kiriş numunelerin üretimi süreci aşağıdaki işlem adımları ile gerçekleştirilmiştir:

Çizelge 3.3. Ön gerilme değerlerine karşılık gelen uzama miktarları

Ön Gerilme Oranı (%)	Ön Gerilme Kuvveti (N)	Ön Gerilme Altında Uzama (mm)	Toplam Ön Gerilme Kuvveti (kN)
20	2513.27	0.25	7.54
40	5026.55	0.51	15.08
60	7539.82	0.76	22.62

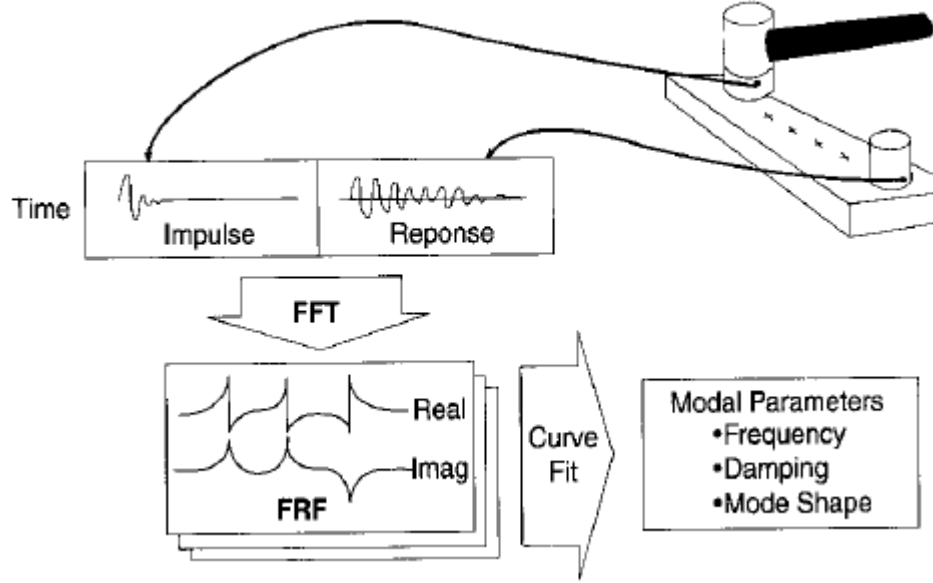
- Yukarıda anlatıldığı gibi ön gerilme elemanları bir tarafından sabitlenecek şekilde kalıp içerisine yerleştirilmiş, diğer uçlarından M4 somunlar yardımıyla ön gerilme uygulanmıştır. İstenilen ön gerilme değerine ulaşıldığı Çizelge 3.3 de verilen uzama değerleri ile kontrol edilmiştir. Bunun için komparatör saati kullanılmıştır. (Şekil 3.13)



Şekil 3.13. Ön germe işleminin uygulanması

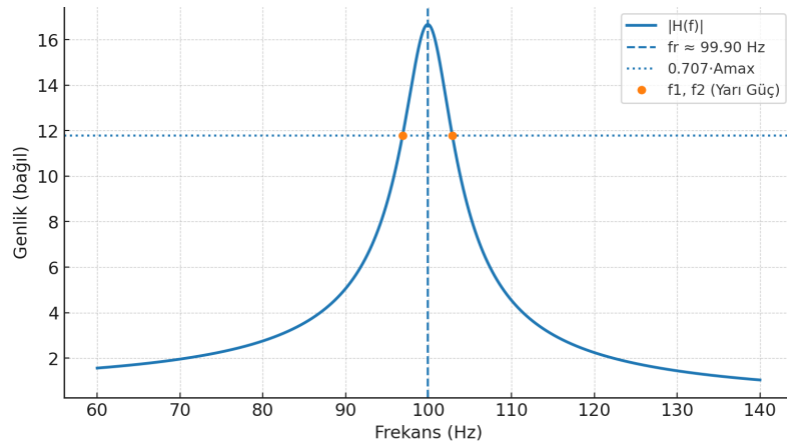
- Küp numunelerin üretiminde anlatıldığı şekilde öğütülmüş atık kauçuk eleklerden geçirilerek sınıflandırılmış ve $3 \text{ mm} \geq d \geq 2 \text{ mm}$ aralığında granüller elde edilmiştir.
- Kullanılacak olan atık kauçuk ve epoksi miktarları, hassas terazi ile tartılarak hazırlanmıştır. Epoksi ve sertleştirici ayrı bir kapta 3 dk boyunca karıştırılarak epoksi reçine elde edilmiştir.
- Küp numunelerin üretiminde anlatıldığı şekilde epoksi reçinenin jelleşme sürecinden hemen önce karışım yapılarak ön gerilme elemanlarının yerleştirildiği kalıba dökümü yapılmıştır.
- Numuneler 24 saat bekledikten sonra kalıptan çıkarılarak testlere hazır hale getirilmiştir.

Darbeli çekiç testleri, yarı güç yöntemine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yarı güç yöntemi, darbeli çekiç (modal) testlerinde tepe yapan bir frekans yanıt fonksiyonundan (FRF) sönüm oranını pratik ve güvenilir biçimde çıkarmak için kullanılan en yaygın yaklaşımdır. Darbeli çekiç testi için tipik deney düzeneği Şekil 3.14 de verilmiştir. Numune üzerine çekiç ile darbe uygulanır, ivmeölçer titreşim cevabını kaydeder, sinyaller analiz cihazına gönderilir.



Şekil 3.14. Darbeli çekiç testi düzeneği

Tek serbestlik dereceli, hafif sönümlü bir sistemde rezonans çevresindeki FRF tepe genişliği sönümle orantılıdır. FRF üzerinde rezonans frekansı (f_r) ve yarı güç frekansları (f_1 , f_2) işaretlenir. (Şekil 3.15) Genliğin $1/\sqrt{2}$ oranına düştüğü noktalar yarı güç frekanslarıdır. Yarı güç yöntemi ile sönüm oranı formülü $\zeta = (f_2 - f_1) / (2 \times f_r)$ şeklindedir.



Şekil 3.15. Yarı güç yöntemi

3.2.7. Üç Nokta Eğilme Testi

Üç nokta eğilme testleri, ASTM D7264 standardına uygun olarak KTUN makine mühendisliği bölümü malzeme laboratuvarındaki test makinesinde yapılmıştır. Bunun

için İmaş Mak. arge merkezi bünyesinde bir test aparatı tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Kiriş açıklığı 195 mm ve test hızı 5 mm/dk seçilerek tüm numuneler üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. (şekil 3.16)



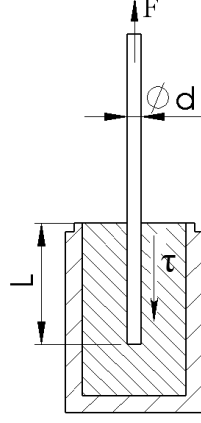
şekil 3.16. Üç nokta eğilme testinin yapılması

Toplam 60 adet test numunesi sırasıyla üç nokta eğilme testine tabi tutularak elde edilen veriler excel formatına çevrilmiş, kuvvet – uzama grafikleri çıkarılmıştır. Elde edilen veri seti üzerinden her bir numune için F_{max} , tokluk ve elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. %0, %5, %10, %15 ve %20 Kauçuk oranları ve her bir kauçuk oranı için %0, %20, %40, ve %60 ön gerilme oranları için F_{max} , tokluk ve elastisite modülü değerlerinin ortalama değerleri ve standart sapmaları hesaplanarak sonuçlar Chauvenet kriterine göre değerlendirilmiştir.

4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 Sıyrılma testi sonuçları

Test numunesinin kesit görünüşü Şekil 4.1 de verilmiştir.



Şekil 4.1. Test numunesinin kesit görünümü

Silindirik bir kesite sahip fiber ile matris arasında oluşan ara yüzey kayma gerilmesi denklem 4.1 ile, fiber malzemenin akma mukavemeti denklem 4.2 ile hesaplanır.

$$\tau = \frac{F_{max}}{d \cdot \pi \cdot L_{min}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{ak} = \frac{4 \cdot F_{max}}{\pi \cdot d^2} \quad (4.2)$$

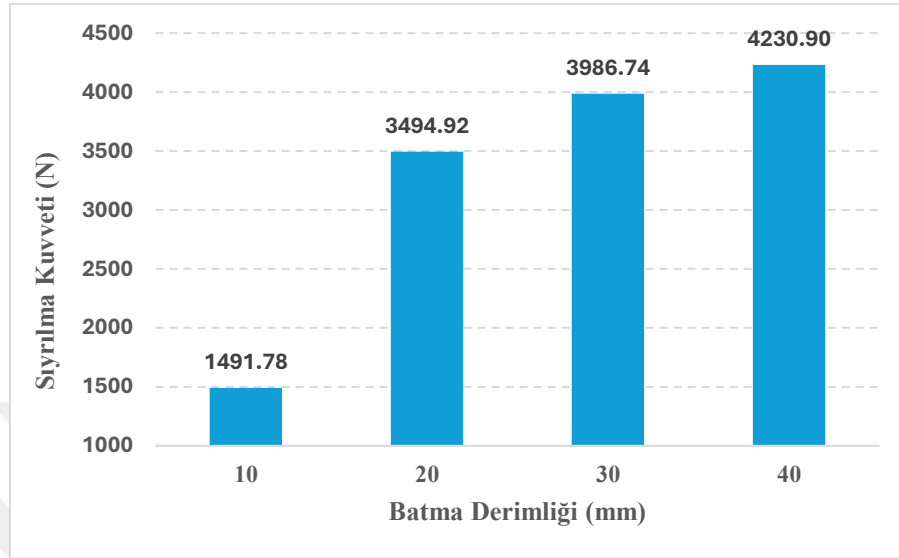
Kompozit malzemenin dayanımının lifin dayanımından daha yüksek olması durumunda gerekli olan L_{min} kritik boyunun hesabı için denklem 4.1 ve 4.2 kullanılarak kuvvetler dengesi yazılırsa

$$\tau \cdot \pi \cdot d \cdot L_{min} = \frac{\sigma_{ak} \cdot \pi \cdot d^2}{4}$$

Buradan denklem 4.3 elde edilir.

$$L_{min} = \frac{\sigma_{ak} \cdot d}{4 \cdot \tau} \quad (4.3)$$

Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar Chauvenet kriterine göre değerlendirilmiş ve her bir batma derinliğine karşı gelen maksimum sıyırılma kuvveti değerlerinin ortalaması Şekil 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4.2. 10, 20, 30 ve 40 mm batma derinlikleri için maksimum sıyırılma kuvveti değerleri

Şekil 4.2 de verilen değerler ve denklem 4.3 kullanılarak hesaplanan $L_{min.}$ ve τ değerleri Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 10, 20, 30 ve 40 mm batma derinlikleri için hesaplanan $L_{min.}$ ve τ değerleri

Fiber Çapı (mm)	4	4	4	4
Batma Derinliği (mm)	10	20	30	40
Sıyırılma Kuvveti (N)	1491.78	3494.92	3986.74	4230.90
Standart Sapma	155.90	226.94	919.60	61.34
Fiber Akma Muk.(MPa)	1000	1000	1000	1000
Yapışma Muk. (MPa)	11.87	13.91	10.58	8.42
L_{min} (mm)	84.24	71.91	94.56	118.81

Batma derinliği arttıkça fiberin epoksi matris ile temas yüzeyi artar. Temas yüzeyindeki bu artış, daha geniş bir bağ alanı oluşturduğundan sıyırılma kuvveti de artar. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar bu durumu doğrulamakta, batma derinliği arttıkça sıyırılma kuvveti de 1491,78 N dan 4230,90 N a yükselmektedir.

Ara yüzey kayma mukavemeti değerlerinde ise azalma gözlenmektedir. Bunun başlıca nedenleri, batma derinliği arttıkça yük, fiber boyunca eşit dağılmamakta, uç

bölgelerde daha fazla kayma gerilmesi yoğunlaşmakta, lif uzunluğu arttıkça, ara yüzeyde oluşan mikro çatlaklar nedeniyle etkin bağ dayanımı düşmektedir. Sonuç olarak batma derinliğinin artması ile birim yüzey başına ortalama bağ dayanımı azalmaktadır.

Teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre, mevcut batma derinlikleri (10–40 mm), çeliğin kopması için gerekli olan kritik batma derinliklerinin (70–120 mm arası) altında kalmaktadır. Hiçbir durumda mevcut batma derinliği, fiberin kopması için gerekli olan minimum değeri aşmadığı için liflerde kopma olmamış, tüm deneylerde sıyrılarak ayrılma gerçekleşmiştir. Yapılan incelemede numunelerin sıyrılma yüzeylerinde büyük çoğunlukla epoksi kalıntısı tespit edilememiştir. (Şekil 4.3) Bu da bağlantının doğrudan kohezif tarzında olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte numunelerin serbest yüzeylerinde deformasyonun kolay olması nedeniyle takviye elamanlarının numunelere battığı son nokta civarlarında eser miktarda epoksi reçine kalıntısı gözlenmiştir. Bu da takviye ve matris arasında zayıf da olsa bir kuvvet aktarımının mümkün olduğunu göstermektedir. Bu kuvvet aktarımının çoğunlukla reçinenin kurlenmesi sırasında oluşan büzüşmenin neden olduğu sürtünme etkisi ile ilde edildiği kanaatine varılmıştır. Ayrıca bundan sonraki testler için üretilecek olan giriş numunelerin uzunluğunun $L \geq 118.81$ mm olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.3. Sıyrılma test numunesi yapışma yüzeyi

4.2 Arşimet terazisi ile yoğunluk ölçüm sonuçları

Yukarıda anlatılan şekilde her karışım oranı için 9 olmak üzere toplam 45 numune hazırlanarak yoğunluk ölçümleri yapıp yine her bir karışım oranı için ortalaması alınmış, sonuçlar Chauvenet kriterine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca karışım oranlarından yola

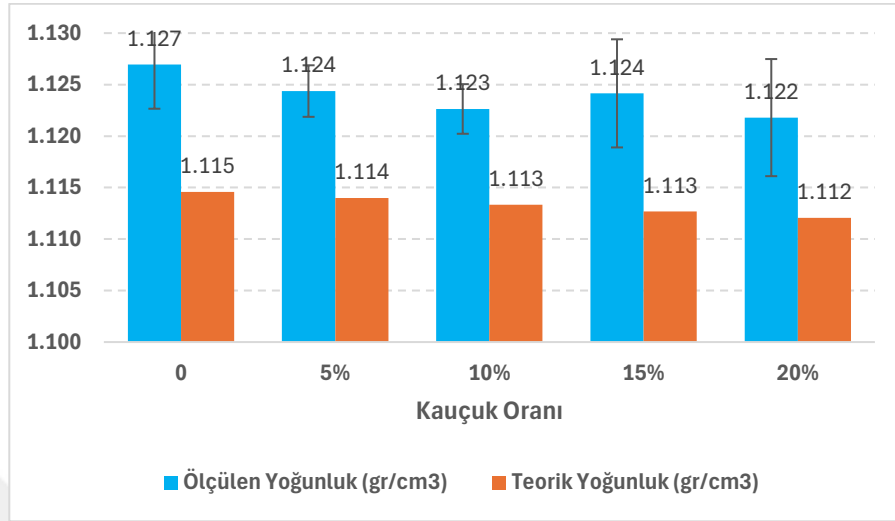
çıkılarak numunelerin teorik yoğunluk değerleri hesaplanmış ve her iki değer Şekil 4.4 de verilmiştir.

Karışımında kullanılan atık kauçuğun yoğunluğu epoksi reçine ve sertleştiriciden daha düşük olduğu için, üretilen numunelerdeki kauçuk miktarı arttıkça karışımın ortalama yoğunluğunun azalması beklenen bir sonuçtur. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ölçülen yoğunluk 1,127 g/cm³'ten 1,122 g/cm³'e kadar azalmış, referans numuneye kıyasla %0,5 civarında düşüş gözlenmiştir. Bu sonuç kauçuk katkısının beklenen etkisini göstermektedir.

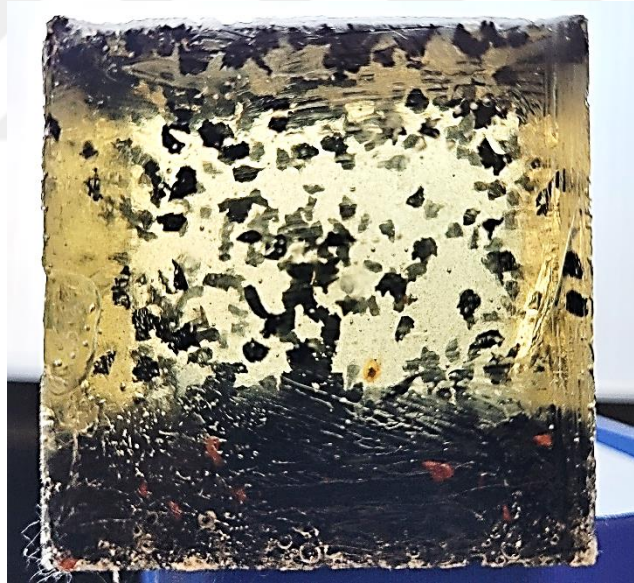
Teorik yoğunluklar, bileşen yoğunlukları üzerinden “ideal karışım” varsayımıyla hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarda ölçülen yoğunluk değerleri teorik değerlerden daha yüksek bulunmuştur. Bunun temel nedeni epoksi–sertleştirici sisteminde gerçekleşen polimerizasyon reaksiyonu sırasında meydana gelen hacim büzülmesidir. Reaksiyon sonrası moleküller arasındaki mesafeler küçülmekte, böylece kütle sabit kalırken hacim azalmaktadır. Bu durum, tüm numunelerde ölçülen yoğunluğun teorik yoğunluktan %0,8–1,1 daha yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Eğer karışımında gözenek (hava boşluğu) oluşmuş olsaydı, ölçülen yoğunluk değerinin teorik değerlerden daha düşük çıkması beklenirdi. Numunelerde de herhangi bir gözenek oluşumu gözlenmemiştir. (Şekil 4.5) Ancak her durumda ölçülen yoğunluk daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, kauçuğun matris içinde boşluk oluşturmada homojen şekilde dağılabildiğini, gözenek oluşmadığını veya oluşsa bile sonuçlara etki edecek mertebede olmadığını, yoğunluk farkı üzerindeki esas etkinin ise kimyasal reaksiyon sonucu oluşan hacim büzülmesinden kaynaklandığını göstermektedir. (Şekil 4.6)

%15 karışım oranlı numunede yoğunlukta bir miktar artış gözlenmiştir. Bu sonuç ölçüm hatalarından (tartım hassasiyeti, suyun kabın içerisindeki kapiller etkisi vb.) kaynaklanmış olabilir. Bununla birlikte kauçuk partikülleri, polimerizasyon sırasında hacim büzülmesini farklı oranlarda etkileyebilir. Orta seviyedeki (%15) kauçuk oranı, sistemde partikül–matris etkileşimini artırarak daha sıkı bir paketlenme sağlamış olabilir. Epoksi reçinenin katılaşması sırasında sisteme sonradan ilave edilen kauçuk partikülleri katılaşacak olan reçinenin katılaşma düzenine etki edebilmektedir. Kauçuk partiküllerinin atık malzeme olması nedeniyle kaotik şekli ve içeriği de yoğunluk üzerinde belirli bir

varyasyona sebep olmuş olabilir. Anılan nedenlerle söz konusu yoğunluk artışının makul olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.4. Deney numunelerinin ortalama yoğunlukları



Şekil 4.5. Numunenin genel görünüşü



Şekil 4.6. Numunelerin üst yüzeyinde oluşan hacim büzülmesi (çöküntü)

4.3 Sertlik ölçüm sonuçları

Numunelerin döküm yapılan yüzeyleri çok pürüzlü olduğundan ve taban yüzeylerde kauçuk oranı görece daha fazla olduğundan bu yüzeyler hariç tutularak geriye kalan 4 yüzeyin her birinden 6 ayrı noktadan sertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm sonuçların ortalaması alınarak sonuçlar Chauvenet kriterine göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar özet olarak Şekil 4.7 de verilmiştir.

Kauçuk, epoksi reçineye oranla daha yumuşak bir malzeme olduğu için kauçuk oranının artması ile numunelerin sertliğinin azalması beklenir. Burada saf matris (%0) ile düşük oranlı katkı (%5) arasında sertlik değerleri bakımından anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Bu durum, düşük orandaki kauçuğun matris yapısını etkileyecek kritik bir seviyeye ulaşmaması ile açıklanabilir. Kauçuk parçacıkları muhtemelen epoksi fazına gömülüp dolgu gibi davranmakta ve bu nedenle sertlik değeri üzerinde kayda değer bir etkisi olmamaktadır. Dolayısıyla düşük katkı seviyelerinde kauçuğun sertlik üzerinde istatistiksel olarak anlamlılığı ispatlanamayan ve ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir.

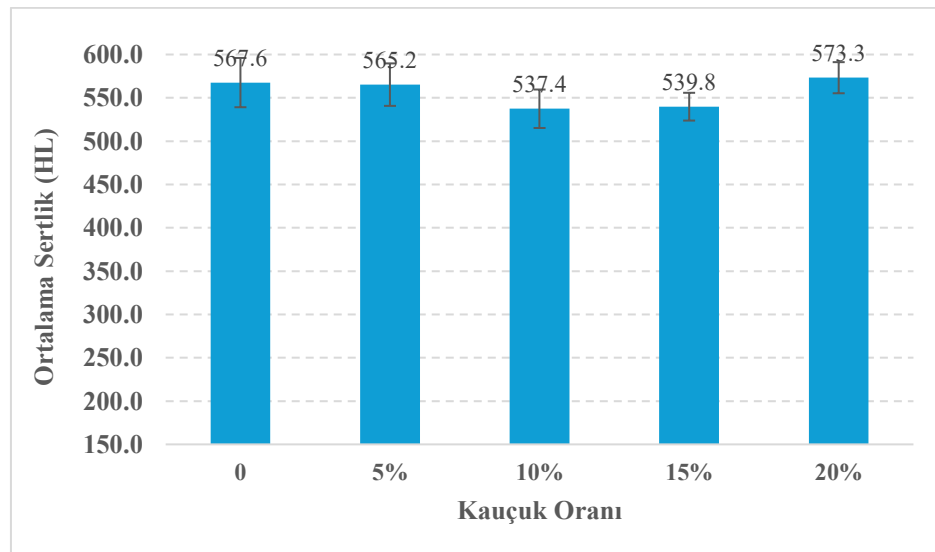
%10 ve %15 kauçuk oranlarında ise sertlikte referans numuneye göre %5 civarında belirgin bir düşüş görülmektedir. Ortalama sertlik değerleri bu aralıkta yaklaşık 537–540 HL seviyelerine gerilemiştir. Özellikle kauçuğun düşük elastisite modülü ve matris ile arasındaki aderans problemleri, mikro ölçekte süreksizlikler ve boşluk oluşumuna sebep olmakta, kauçuğun yumuşak ve elastik yapısı baskın hale gelerek sertliği düşürmektedir. Bir diğer etki de ara yüzeyde yeterli bağlanmanın sağlanamaması nedeniyle yük transferi zayıflatmakta ve böylece malzemenin makro ölçekte sertlik direnci azalmaktadır. Aydın (2015) tarafından yapılan çalışmada atık lastik oranının

artması ile kompozit malzemenin sertlik değerin saf epoksi malzemeye göre azaldığı rapor edilmiştir. Bir başka çalışmada ise polyester reçine içerisine eklenen kauçuk granüllerinin kompozitin sertliğini düşürdüğü tespit edilmiştir. (Yel 2022). Literatürdeki bu veriler, çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir.

10% ve 15% oranları arasında farkın küçük olması, bu bölgenin bir denge noktası olabileceğini düşündürmektedir.

%20 oranına çıkıldığında ise sertlik değerinde artış gözlenmiş, başlangıç değerlerini de aşacak şekilde 573.3 HL değerine ulaşılmıştır. Yüksek kauçuk miktarının matris içerisinde daha homojen dağılması, boşluk oranını azaltarak yapıyı daha kompakt hale getirmiştir. Kritik seviyeden sonra kauçuk daha düzenli dağılmış, lokal zayıf bölgeler azalmıştır. Yük transferinin daha düzenli gerçekleşmesi ve kauçuk–matris arasındaki etkileşimlerin farklı bir faz dengesi oluşturması da sertlik artışını açıklayan muhtemel nedenler arasındadır.

Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, atık kauçuk katkısının yüzey sertliği üzerindeki etkisinin nonlinear olduğu, kauçuk katkılı kompozitlerin sertlik davranışının yalnızca katkı oranına değil aynı zamanda parçacıkların dağılımına, ara yüzey bağlanmasına ve mikro yapısal yoğunluğa bağlı olarak şekillendiği söylenebilir. Atık kauçuk partiküllerin sahip olduğu boyutsal ve şekilsel değişiklikler de sonuçlar üzerinde etkili olmuştur.



Şekil 4.7. Deney numunelerin ortalama sertlik ölçüm sonuçları

4.4 Darbeli çekiç testi sonuçları

Yukarıda anlatılan şekilde elde edilen kırış numuneler üzerinde öncelikle darbeli çekiç testi uygulanmıştır. Her bir numune üzerinde 6 farklı noktadan ölçümler yapılmış, toplam 60 numuneden elde edilen doğal frekans ve damping değerlerinin ortalamaları alınarak sonuçlar Chauvenet kriterine göre değerlendirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda doğal frekanslarla ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 4.8 de verilmiştir.

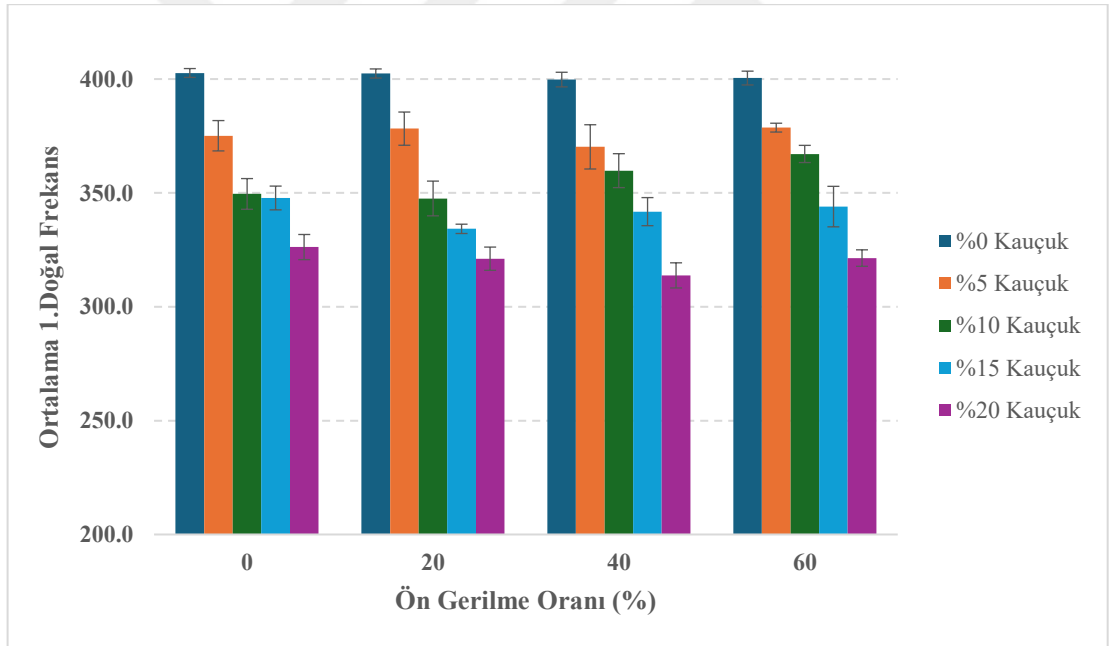
Doğal frekans, bir sistemin bir kez uyarıldığında, dışarıdan sürekli bir kuvvet uygulanmasa bile kendi yapısal özelliklerinden dolayı salındığı frekanstır. Doğal frekans rijitlik ile doğru, kütle ile ters orantılıdır. Dolayısıyla, bir sistemin rijitliği arttığında doğal frekansı yükselmekte, kütlesi arttığında ise doğal frekansı düşmektedir. Doğal frekansın mühendislik açısından önemi, sistemlerin dinamik davranışlarının güvenli tasarımı ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle rezonans olgusu, dış zorlayıcı frekansın sistemin doğal frekansına yaklaşması durumunda titreşim genliğinin hızla büyümesine neden olur. Bu durum, yapısal hasarlara ve performans kayıplarına yol açabileceğinden doğal frekans, dinamik analizlerde kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilir.

Sonuçlar incelendiğinde, kauçuk oranının artışıyla birlikte tüm ön gerilme seviyelerinde doğal frekans değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmektedir. Azalma miktarının referans numune ile karşılaştırıldığı zaman %7-%19 aralığında olduğu görülmüştür. %0 kauçuk içeren numunelerde en yüksek doğal frekans değerleri elde edilirken, %20 kauçuk katkılı numunelerde en düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum, kauçuk ilavesiyle kompozitin elastisite modülünün azalmasına ve dolayısıyla rijitliğin düşmesine bağlanabilir. Rijitlik, bir yapının veya malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirençtir. Dolayısı ile elastisite modülündeki düşüş, sistemin rijitliğini azaltarak doğal frekansı düşürmektedir. Darbeli çekiç testinde kullanılan numunelerin geometrik ölçüleri aynı olmasına rağmen kauçuk oranları önceki deneysel çalışmalarda belirlendiği gibi yoğunluğu etkilediğinden, numunelerin kütlelerinde bir miktar değişim olmakla birlikte rijitlikteki değişim daha yüksek oranda gerçekleştiği için doğal frekanstaki değişimde baskın etki rijitlik azalmasıdır.

Deneysel sonuçlara göre kauçuk oranının artması ile doğal frekans azalmaktadır. Deredas ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada matris malzeme olarak epoksi reçine

kullanılan polimer betonlarda ağırlıkça %30 atık kauçuk ilavesi ile doğal frekans değerinin %40,7 azaldığını rapor etmişlerdir. Dolayısı ile bu çalışmada elde edilen sonuç literatür ile uyum göstermektedir.

Ön gerilme oranının artışı ise doğal frekans üzerinde sınırlı bir etki göstermiştir. İncelenen %0–%60 ön gerilme aralığında doğal frekansta belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Referans numune ile kıyaslandığında %1 civarında sınırlı bir azalma mevcuttur. Bunun temel nedeni, kauçuk katkılı polimerlerin nonlineer deformasyon davranışdır. Kauçuk oranının neden olduğu rijitlik kaybı, ön gerilmenin frekansı artırıcı olası etkisini baskılamış ve bu nedenle ön gerilmenin etkisi ikincil düzeyde kalmıştır. Darbeli çekiç testinde elde edilen değerler 1. Doğal frekans değerleridir. Dolayısı ile daha yüksek mertebeden rezonans bölgelerinde ön gerilmenin etkisinin olup olmadığı tespit edilememiştir.



Şekil 4.8. Deney numunelerin ortalama doğal frekans değerleri

Damping (sönümleme), bir sistemin titreşim veya salınım sırasında sahip olduğu mekanik enerjinin zamanla azalması sürecidir. Bir malzemenin veya yapının titreşim enerjisini ne kadar hızlı sönümlediğini gösterir. Mühendislikte titreşim kontrolü, yorulma dayanımı, güvenlik ve konfor açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle malzemelerin damping kapasitelerinin artırılması önemli bir tasarım kriteridir.

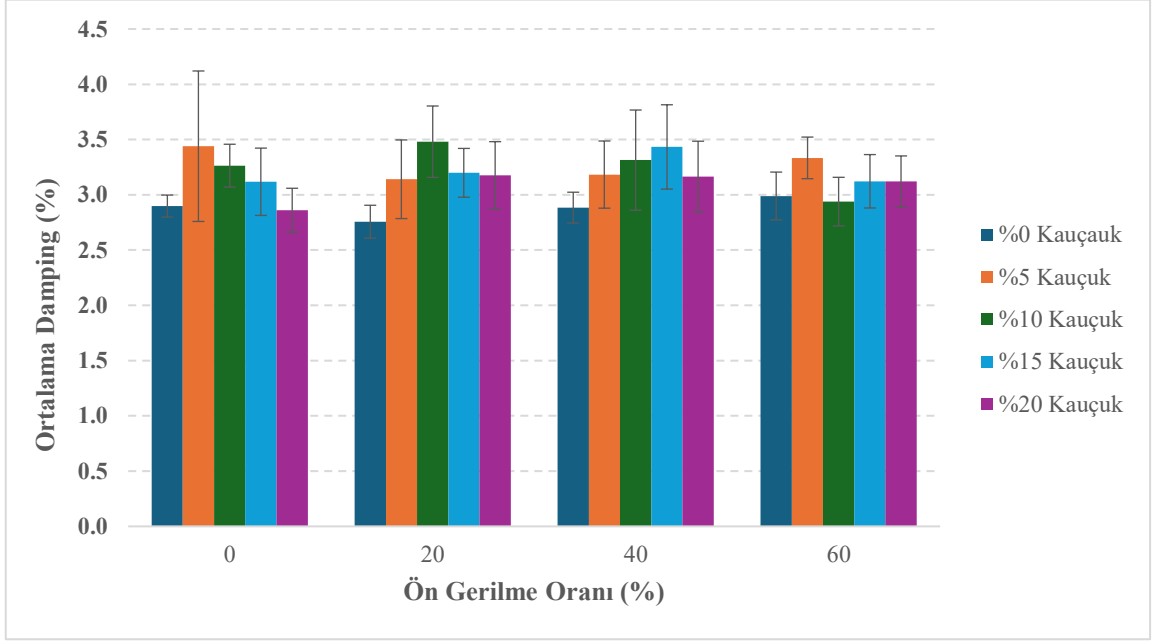
Yapılan ölçümler sonucunda damping ile ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 4.9 da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kauçuk oranının artması ile genelde dampingin arttığı, dolayısı ile malzemeye enerji sönümleme özelliği kazandırdığı söylenebilir. Gözlemlenen artış referans numune dikkate alındığında %8-%18 aralığında gerçekleşmiştir. Epoksi reçine gibi termoset polimerler sert, rijit ve gevrek yapıdadır. Bu nedenle titreşim enerjisini sönümleme kapasiteleri düşüktür. Kauçuk ise viskoelastik bir malzemedir. Hem elastik hem de viskoz davranış gösterir. Titreşim veya yük altında elastik kısım enerjiyi depolar, viskoz kısım enerjiyi ısıya dönüştürerek kaybeder. Bu bakımdan kauçuk katkısının damping kapasitesini artırması beklenir.

Deneyisel bulgular, %5-%15 aralığında kauçuk katkısının damping üzerinde optimum iyileştirici etkiye sahip olduğunu; ancak %20 katkı seviyesinde matris sürekliliğinin bozulmasına bağlı olarak damping kapasitesinde düşüş yaşandığını ortaya koymuştur. Literatürde matris malzeme olarak epoksi reçine kullanılan polimer betonlarda ağırlıkça %30 atık kauçuk ilavesi ile damping oranının arttığı, 1,44'ten 4,65 değerine ulaştığı rapor edilmiştir. (Deredas ve ark., 2021) Dolayısı ile literatürdeki bu bilgi çalışmada elde edilen sonuç ile örtüşmektedir.

Ön gerilmesiz numunelerde ise kauçuk oranının artması ile (%5-%20) dampingde düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni, yüksek kauçuk oranlarının matris sürekliliğini bozması, arayüzey bağlarını zayıflatması ve mikro seviyede boşluk oluşumunu artırmasıdır. Damping mekanizması esas olarak viskoelastik deformasyon ve arayüzey sürtünmelerine dayandığından, bu mekanizmaların yeterince aktive olamadığı koşullarda kauçuk katkısının faydası tam anlamıyla ortaya çıkmamaktadır. Ön gerilme uygulandığında kauçuk parçacıkları ile matris arasındaki arayüz bölgeleri yük altına daha etkin girer, kayma deformasyonları aktive olur ve damping artışı gerçekleşir. Ancak ön gerilme yoksa bu mekanizma devreye girmediği için damping katkısı sınırlı kalır.

Ön gerilme oranının etkisi değerlendirildiğinde, artan ön gerilme seviyelerinin damping kapasitesi üzerinde sınırlı bir değişime yol açtığı belirlenmiştir. Referans numune dikkate alındığında bu değişim $\pm\%5$ seviyesindedir. Düşük ve orta seviyelerdeki ön gerilmelerin, mikro yapıda kayma deformasyonlarını kolaylaştırarak enerji sönümlemeye katkı sağladığı; ancak yüksek ön gerilme oranlarında matrisin rijitliğinin baskın hale gelmesi nedeniyle bu etkinin azaldığı söylenebilir.

Yukarıda anlatılan homojensizlikler, kauçuğun kaotik yapısı v.b belirsizlikler nedeniyle bu parametrelerin sönüm üzerine etkisi ancak istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu durum, bölüm 4.6 da açıklanmıştır. Burada da görüleceği üzere ön gerilme ve kauçuk oranlarının damping üzerindeki etkisi anlamlı bulunmamıştır.



Şekil 4.9. Deney numunelerin ortalama damping değerleri

4.5 Üç nokta eğilme testi sonuçları

Darbeli çekiç testlerinden sonra deney numuneleri üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Mesnet açıklığı 195 mm ayarlanarak 5 mm/dk. basma hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda toplam 60 numuneden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek numunelere ait ortalama F_{max} , (Şekil 4.12) ortalama tokluk (Şekil 4.13) ve ortalama elastisite modülü (Şekil 4.14) değerleri elde edilmiştir.

Ortalama F_{max} sonuçları incelendiğinde, kauçuk oranının artması ile dayanımın düştüğü görülmektedir. Referans numune ile kıyaslandığında Ortalama F_{max} değeri kauçuk oranının artması ile %30–%35 oranında azalmaktadır. Bu nedenle kauçuk katkısının matris yapıyı mukavemet yönünden zayıflattığı söylenebilir. Bu durumun,

kauçuğun polimer matris içerisinde rijit ve sürekli bir yapı oluşturmamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Kauçuk parçacıkları, daha yumuşak ve elastik bir faz oluşturarak kuvvet aktarımında zayıf bölgeler oluşturmaktadır. Bu nedenle, matris içinde gerilme yığılmalarına yol açarak çatlak ilerlemesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum deney numunelerinin çatlağın oluşup ilerlediği yüzeylerde kauçuk partiküllerinin ortaya çıkması ile de doğrulanmaktadır. (Şekil 4.10) Sonuç olarak kauçuk miktarı arttıkça mekanik dayanım azalır; düşük katkıları (%5–10) nispeten tolere edilebilirken yüksek katkıları (%15–20) yapıyı zayıflatmaktadır.

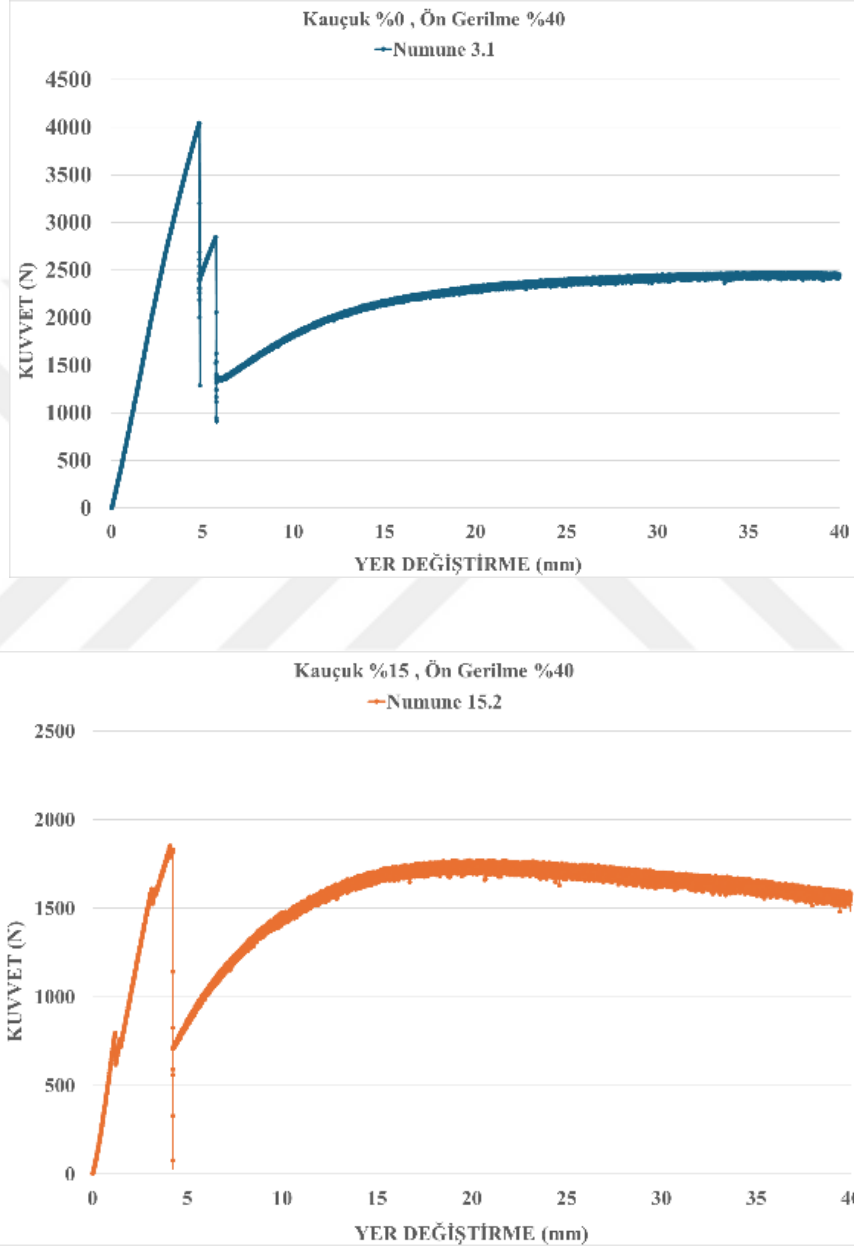
Yel (2022) yaptığı çalışmada polyester reçinesine ağırlıkça 100:15 oranında atık kauçuk eklenmesinin polyester reçinesinin çekme dayanımını %16,19 a varan oranda azalttığı sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca epoksi reçineye ağırlıkça %50 Epdm kauçuk katılması durumunda çekme mukavemetinin %33-40 azaldığı literatürde rapor edilmiştir. (Türkben, 2019). Literatürdeki bu veriler çalışmada elde edilen sonuçlarla uyumludur.



Şekil 4.10. Deney numunesinin kırılma yüzeyi, fiberler deney sonrası kesilmiştir.

Ön gerilme oranının etkisi değerlendirildiğinde ise, düşük seviyelerdeki (%20) ön gerilmenin özellikle kauçuk içermeyen numunelerde maksimum yük kapasitesini %15 civarında artırdığı görülmüştür. Bu durum, malzeme içerisindeki gevşek bölgelerin ön gerilme ile sıkışması ve yük aktarım yollarının daha etkin hale gelmesiyle açıklanabilir. Ancak ön gerilme oranı %40 ve üzeri değerlere ulaştığında, malzeme başlangıçtan itibaren yüksek bir gerilme altında yüke maruz kaldığı için elastik deformasyon rezervi

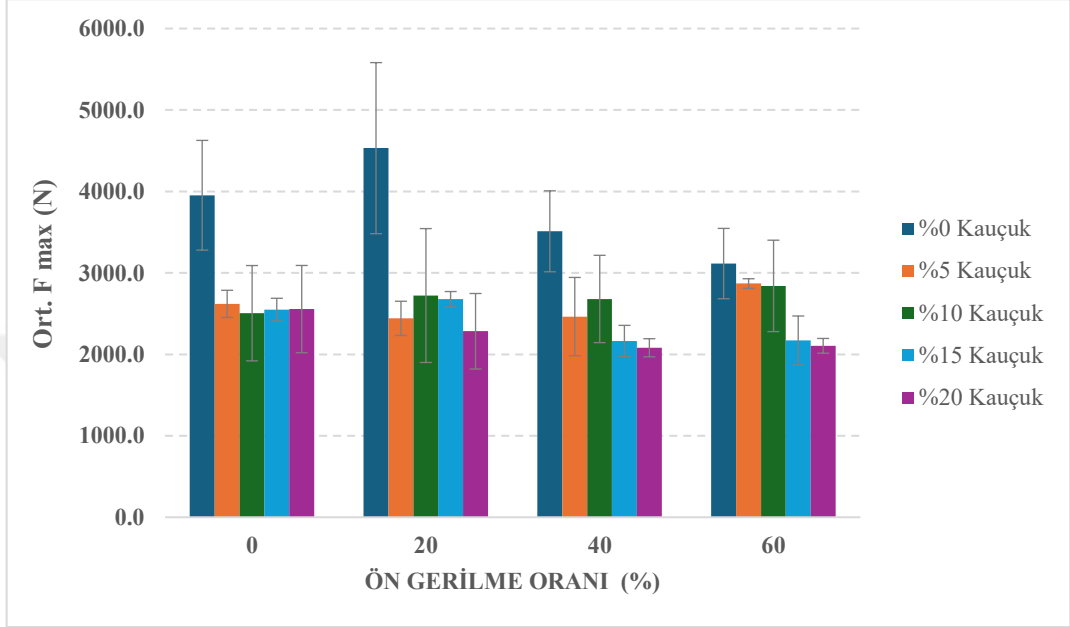
azalmış ve kırılma daha düşük ilave yüklerde gerçekleşmiştir. Bu etki kauçuk katkılı numunelerde daha da belirginleşmiş ve F_{max} düşüşünü hızlandırmıştır. Gözlemlenen bu düşüş referans numuneye oranla %10-%20 aralığında gerçekleşmiştir. Bu durum F_{max} olduğu noktanın daha düşük yer değiştirme değerinde oluşması ile de gözlenmiştir. (Şekil 4.11)



Şekil 4.11. Kauçuk oranındaki artış ile F_{max} yer değiştirme değerinin düşmesi

Sonuç olarak; kauçuk katkısı arttıkça mekanik dayanım azalmaktadır. Düşük katkıları (%5–10) malzemeye sınırlı bir mukavemet sağlayabilse de yüksek katkı oranları

(%15–20) mekanik performansı ciddi şekilde zayıflatmaktadır. Ön gerilme oranı açısından ise optimum değer %20 civarında olup, daha yüksek ön gerilme seviyeleri malzemenin yük taşıma kapasitesini olumsuz etkilemektedir. Bu bakımdan ön gerilme uygulamalarında %20 seviyesi tavsiye edilmektedir.



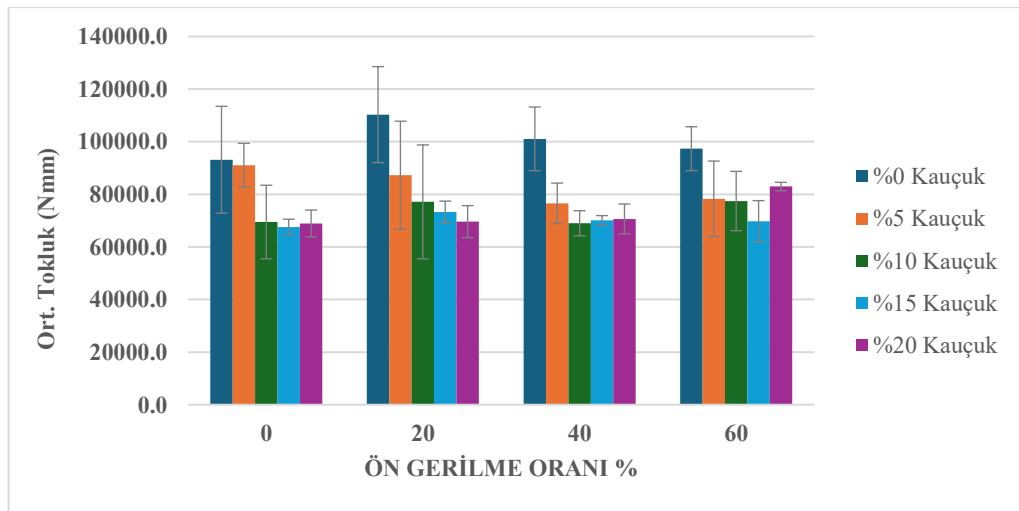
Şekil 4.12. Deney numunelerin ortalama F max değerleri

Normalde tokluk değerinin belirlenebilmesi için çekme testi yapılması daha doğru sonuç verir fakat elimizdeki numuneler eğilme testi numuneleri olduğu için üç nokta eğilme testi sonucunda ölçmüş olduğumuz tokluk değeri, eğilme yükü altındaki tokluk değeridir. Eğilme durumunda yapının bir kısmı çekmeye, bir kısmı da basmaya zorlandığı için homojen olmayan bir durum söz konusudur. Bu nedenle tokluk konusunda sağlıklı bir değerlendirme yapmak çok mümkün olmamakla birlikte yine de elimizdeki verilerle bir sonuca ulaşmaya çalışılmıştır. Tokluk temelde mukavemete ve şekil değiştirebilme kabiliyetine bağlıdır. Bir önceki sonuçlarda kauçuk oranının artması ile F_{max} değerinin azaldığı, dolayısı ile mukavemetin azaldığı görülmüştü. Bu açıdan bakıldığında kauçuk oranının artması ile tokluğun azalması beklenir. Sonuçlar incelendiğinde genel trend olarak kauçuk oranının artması ile ortalama tokluk değerinin azaldığı, referans numune dikkate alındığında bu azalmanın %25-%28 oranında olduğu görülmüştür. (Şekil 4.13.) Epoksi polimer, gevrek bir malzeme olmasına rağmen yüksek elastisite modülü sayesinde çatlak ilerlemesine karşı belirli bir direnç sergilerken, kauçuk fazı daha düşük mukavemetli ve yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğundan yük taşıma

kabiliyetini sınırlandırmaktadır. Yukarıda bahsedilen homojensizlikler, mikro seviyedeki boşluklar, aderans problemleri, kauçuğun kaotik yapısı vb. belirsizlikler tokluk üzerinde farklı derecelerde etkileri olan faktörler olarak tanımlanabilir.

Ön gerilme etkisi incelendiğinde, kauçuk içermeyen ve düşük oranda kauçuk içeren numunelerde ön gerilmenin artması ile tokluğun arttığı görülmektedir. Bu artış, kauçuksuz referans numuneye göre %20 ön gerilme seviyesinde %18 mertebesinde. Bunun nedeni, ön gerilmenin malzeme içinde mikro çatlakların ilerlemesini geciktirmesi ve gerilme dağılımını iyileştirmesidir. Ancak kauçuk oranı arttığında, bu iyileştirici etkinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Çünkü yüksek oranda kauçuk içeren numunelerde zaten matris yapısı çok sayıda düşük mukavemetli bölgeye sahiptir ve ön gerilme uygulaması bu yapısal zayıflığı telafi edememektedir.

Sonuç olarak kauçuk oranı arttıkça tokluğun azalması, temel olarak rijit matrisin yerini düşük elastisite modüllü elastik fazın alması, bunun da yük taşıma kapasitesini ve çatlak ilerlemesine karşı direnci azaltması ile açıklanabilir. Yani kauçuk katkısı malzemenin şekil değiştirmeye olan direncini azaltmakta, buna karşın yer değiştirme miktarını artırmaktadır. Belirtilen her iki faktör de ortalama tokluğa etki etmekle birlikte direncin azalmış olması daha baskın etki göstererek ortalama tokluğun düşmesine neden olmaktadır. Var olan belirsizlikler burada da net bir yorum yapmayı güçleştirmektedir. Bununla birlikte, yüksek tokluk gerektiren uygulamalarda kauçuk oranının sınırlı tutulması (%5–%10), ön gerilmenin ise %20–%40 aralığında olması değerlendirilmiştir.



Şekil 4.13. Deney numunelerin ortalama tokluk değerleri

Sekant modülü, kauçuk, polimer kompozitler gibi doğrusal davranış göstermeyen (nonlinear) malzemelerin gerilme–şekil değiştirme (σ – ϵ) eğrisi üzerinden tanımlanan bir elastisite modülü türüdür. Sekant modülü, eğrinin başlangıç noktası ($\sigma=0$, $\epsilon=0$) ile herhangi bir çalışma noktası (σ_i , ϵ_i) arasında çizilen doğrunun eğimi olarak tanımlanır. Bu çalışmada üç nokta eğilme testlerinden elde edilen Ortalama F_{max} değerinin %25 i referans alınarak sekant elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, kauçuk oranı arttıkça sekant elastisite modülü belirgin şekilde azalmaktadır. (Şekil 4.14) Bu azalma referans model dikkate alındığında %5-%36 aralığında gerçekleşmiştir. Düşük kauçuk oranlarında (%0-%5) malzeme yüksek rijitlik göstermekte, ancak %15 ve %20 gibi yüksek oranlarda elastisite modülünde ciddi kayıplar meydana gelmektedir. Özellikle düşük ön gerilme seviyelerinde %5 kauçuk katkısı optimum davranış sergilerken, yüksek ön gerilme oranlarında (%60) %10 kauçuk katkısı nispeten daha dengeli sonuçlar vermektedir. Buna karşın %15 ve üzeri kauçuk katkılarında rijitlikte keskin düşüşler gözlemlendiğinden yapısal uygulamalar için uygun değildir.

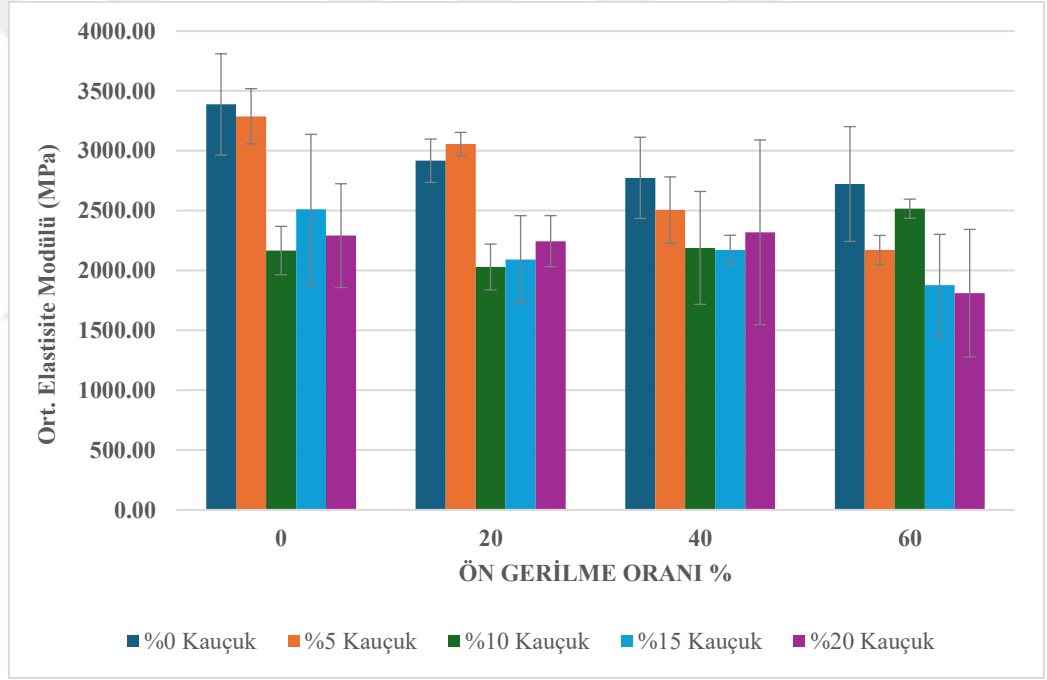
Türkben (2019) yaptığı çalışmada, epoksi reçineye ağırlıkça %50 epdm kauçuk katılması durumunda elastisite modülünün %30-34 civarında azaldığı sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca literatürde polyester reçineye ağırlıkça %20 oranında atık kauçuk granülleri eklenmesi ile elastisite modülünde %62 oranında azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. (Abu-Jdayil ve ark., 2016)., Çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki bu sonuçlarla paralellik göstermektedir.

Kauçuk oranının artmasıyla birlikte sekant elastisite modülünde belirgin bir düşüş gözlenmesinin temel nedeni, düşük elastisite modülüne sahip kauçuk fazının epoksi matris içerisinde hacimsel olarak artması ve epoksi reçineye oranla daha fazla şekil değiştirebilmesidir. Kauçuk fazı, matrisin rijitliğini doğrudan azaltmakta ve gerilme–şekil değiştirme eğrisinde daha belirgin bir nonlinear davranışa neden olmaktadır. Bu durum, özellikle küçük şekil değiştirmelerden itibaren eğrinin eğimini düşürmekte ve sekant modülünü azaltmaktadır.

Ön gerilme oranı da sekant elastisite modülü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Genel eğilim olarak, ön gerilme oranı arttıkça modül değerlerinde azalma

gözlenmektedir. Azalma miktarı, referans model ile kıyaslandığı zaman %14-%20 aralığında değişmektedir. Bunun nedeni, ön gerilmenin malzeme içerisinde başlangıç deformasyonu yaratması ve yük-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal olmayan bölgesinin daha erken devreye girmesidir. Bu durum, özellikle kauçuk katkılı numunelerde daha belirgin hale gelmektedir. Düşük ön gerilme seviyelerinde (%0–20) rijitlik daha yüksek ve eğri daha doğrusal iken, yüksek ön gerilme oranlarında (%40–60) eğri daha yatık hale gelmekte ve sekant modülü düşmektedir.

Sonuç olarak, kauçuk fazının düşük elastisite modülüne sahip olması ve epoksi matris içerisinde hacimsel olarak artması yük taşıma kapasitesini sınırlandırmaktadır. Buna ek olarak, ön gerilmenin etkisiyle malzeme daha erken nonlinear davranış göstermekte, bu da sekant modülünün azalmasına yol açmaktadır.



Şekil 4.14. Deney numunelerin ortalama elastisite modülü değerleri

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürde atık lastik katkılı polimer esaslı malzemeler üzerine yapılmış çeşitli araştırmalarla kıyaslandığında genel bir uyum göstermektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmada incelenen ön gerilme parametresi, literatürde fazla ele alınmamış olup, kauçuk katkısının davranışını farklı gerilme koşullarında değerlendirmesi açısından özgün bir katkı sunmaktadır.

4.6 İstatistiksel değerlendirme

Yapılan tüm deneyler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi amacı ile kauçuk oranı ve ön gerilme oranının ortalama F_{max} , ortalama tokluk, ortalama elastisite modülü, ortalama doğal frekans ve ortalama damping parametrelerine bağımlılığını analiz etmek için lineer ve kuadratik olmak üzere iki model oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde regresyon analizi uygulanmıştır. Analiz, Minitab yazılımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kauçuk oranı (X) ve ön gerilme oranı (Y) olmak üzere bu modeller aşağıda verilmiştir:

Lineer model: $Ax+By$, bu modelin girdi değerleri Çizelge 4.2 de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Lineer ve kuadratik modeller için girdi değerleri

X %	Y %	Ortalama F_{max}	Ortalama Tokluk	Ortalama E	Ort. Doğal Frekans	Ortalama Damping
0	0	3953.4	93131.0	3387.47	402.67	2.90
0	20	4531.9	110294.3	2916.89	402.44	2.76
0	40	3511.0	101070.9	2773.81	399.78	2.88
0	60	3114.8	97333.6	2722.52	400.44	2.99
5	0	2619.9	91082.5	3287.96	375.11	3.44
5	20	2442.1	87264.0	3056.28	378.22	3.14
5	40	2464.1	76560.0	2505.10	370.22	3.18
5	60	2869.6	78284.0	2170.54	378.67	3.33
10	0	2505.4	69459.5	2166.72	349.56	3.26
10	20	2722.4	77119.3	2028.99	347.56	3.48
10	40	2680.1	69003.1	2188.58	359.78	3.31
10	60	2840.9	77445.0	2516.28	367.11	2.94
15	0	2549.3	67579.2	2511.29	347.78	3.12
15	20	2676.8	73257.5	2091.33	334.22	3.20
15	40	2163.9	70126.8	2171.94	341.78	3.43
15	60	2170.0	69794.2	1876.68	344.00	3.12
20	0	2555.6	68921.3	2291.27	326.22	2.86
20	20	2283.8	69589.2	2244.66	321.11	3.18
20	40	2080.8	70628.6	2318.85	313.78	3.16
20	60	2105.2	82947.1	1810.26	321.39	3.12

Lineer modelin regresyon analizi sonuçları Çizelge 4.3 de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Lineer model için regresyon analizi sonuçları

	X (p-değeri)	Y (p-değeri)	R ²
Ortalama F _{max}	0	0.248	%60.06
Ortalama Tokluk	0	0.841	%61.69
Ortalama E	0	0.009	%66.25
Ortalama Doğal Frekans	0	0.593	%96.15
Ortalama Damping	0.318	0.985	% 5.87

Sonuçlar incelendiğinde, kauçuk oranının artması ile Ortalama F_{max}, Ortalama Tokluk, Ortalama E, ve Ortalama doğal frekans değerlerinin negatif yönde etkilendiği görülmektedir. Ön gerilme oranının ise Ortalama E üzerinde sınırlı bir etkisi olup diğer parametrelere doğrudan bir etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca kauçuk ve ön gerilme oranlarındaki değişimin Ortalama Damping üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır.

Kuadratik model $Ax+By+Cx^2+Dy^2+Exy$, bu modelin girdi değerleri Çizelge 3.2 de verilmiştir. Regresyon analizi sonuçları Çizelge 4.4 de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kuadratik model için regresyon analizi sonuçları

	X (p-değeri)	Y (p-değeri)	X ² (p-değeri)	Y ² (p-değeri)	X*Y (p-değeri)	R ²
Ortalama F _{max}	0.003	0.764	0.035	0.878	0.784	%71.40
Ortalama Tokluk	0	0.82	0	0.723	0.133	%85.73
Ortalama E	0.006	0.158	0.104	0.714	0.352	%73.87
Ortalama Doğ. Frek.	0	0.233	0.194	0.103	0.7	%97.17
Ortalama Damping	0.007	0.58	0.004	0.404	0.603	%50.23

Sonuçlar incelendiğinde, kauçuk oranının artması ile Ortalama F_{max}, Ortalama Tokluk, Ortalama E, ve Ortalama doğal frekans değerlerinin negatif yönde etkilendiği görülmektedir. Ön gerilme oranının ise tüm parametreler üzerinde anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca kauçuk ve ön gerilme oranlarındaki değişimin Ort. Damping üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. P değerleri incelendiğinde kauçuk oranı ile ön gerilme oranı arasında çapraz etkileşim olmadığı görülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kuadratik model lineer modele kıyasla daha anlamlı ve güvenilir sonuçlar sunmuştur. Özellikle Tokluk ve Doğal Frekans parametrelerinde açıklama gücü çok yüksektir. Yüksek R² değerleri ve anlamlı bulunan

ikinci dereceden terimler, incelenen malzemenin mekanik davranışlarının doğrusal olmayan karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, mekanik ve dinamik özelliklerin tahmininde kuadratik modelin tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Ancak her iki model de damping parametresinin tahmini için yeterli güvenilirlik seviyesi sağlamamaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, atık kauçuk katkılı ön gerilmeli polimer betonların mekanik ve dinamik özellikleri kapsamlı bir deneysel çalışma ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, hurda lastiklerden elde edilen geri dönüştürülmüş kauçuk partiküllerinin polimer matrisine katılmasıyla hem çevre dostu hem de yapısal performansı artırılmış malzemeler geliştirmektir. Deneyler, farklı kauçuk oranları (%0, %5, %10, %15, %20) ve ön gerilme seviyeleri (%0, %20, %40, %60) altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Yük taşıma kapasitesi incelendiğinde kauçuk katkı oranının artışı ile mekanik dayanımda azalma olduğu tespit edilmiştir. %0 kauçuk, tüm ön gerilme seviyelerinde en yüksek değerleri elde etmiş ve özellikle %20 ön gerilme oranında en yüksek değere ulaşmıştır. Ancak kauçuk katkısı %20'ye çıktığında bu değer yaklaşık yarıya düşmüştür. Orta düzey katkılar (%10), özellikle yüksek ön gerilme seviyelerinde dayanımı kısmen koruyarak diğer katkı oranlarına göre daha iyi performans sergilemiştir. Bu durum, optimum katkı oranının belirli uygulamalarda %10 civarında olabileceğini göstermektedir.

Tokluk değerleri malzemenin enerji sönümleme kapasitesinin bir göstergesidir. Sonuçlar, kauçuk miktarı arttıkça tokluğun genelde azaldığını ortaya koymuştur. %0 Kauçuk katkılı numune %20 ön gerilmeye en yüksek tokluğa sahipken, %10 ve %15 katkılı numuneler daha düşük seviyelerde kalmıştır. Beklenmedik bir şekilde, %20 katkılı numune yüksek ön gerilmeye toparlanma eğilimi göstermiş ve %10–15 katkılı numuneleri geride bırakmıştır. Bu, kauçuk katkısının belirli koşullarda enerji sönümleme kapasitesine olumlu etkiler yapabileceğine işaret etmektedir.

Kauçuk katkısının artışıyla elastisite modülünde azalma gözlenmiştir. %0 ve %5 katkılı numuneler en yüksek rijitliği sergilemiştir. Ön gerilme oranı arttıkça genel olarak modül değerlerinde kısmi azalmalar kaydedilmiştir. Bu durum, kauçuk partiküllerinin rijitliği düşüren bir faz oluşturduğunu göstermektedir.

Malzemenin dinamik özellikleri incelendiğinde kauçuk katkısının doğal frekansı düşürdüğü gözlenmiştir. %0 katkılı numuneler yaklaşık 400 Hz civarında iken, %20

katkıda bu değer 320 Hz civarına gerilemiştir. Ön gerilme seviyesinin doğal frekans üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.

Damping oranları yaklaşık %3 civarında değişmiş, %10 ve %15 katkılı numuneler en yüksek enerji sönümleme kapasitesine ulaşmıştır. Ön gerilmenin damping üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Bu bulgu, orta düzey kauçuk katkısının titreşim ve gürültü azaltma açısından avantajlı olabileceğini göstermektedir.

Sertlik ölçümleri düşük katkı oranlarında (%0–%5) önemli değişiklik göstermemiştir. Ancak %10 ve %15 katkı oranlarında belirgin bir düşüş gözlenirken, %20 katkıda beklenmedik bir artış meydana gelmiş ve sertlik başlangıç değerinin üzerine çıkmıştır. Bu durum atık kauçuk katkısının yüzey sertliği üzerinde nonlineer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Kauçuk katkılı kompozitlerin sertlik davranışının katkı oranı dışında parçacıkların dağılımı, ara yüzey bağlanması, mikro yapısal yoğunluk ve atık kauçuk partiküllerin boyutsal ve şekilsel değişiklikleri gibi faktörlere de bağlı olduğu değerlendirilmiştir.

Yoğunluk ölçümleri ile ilgili yapılan testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, polimerizasyon reaksiyonu sonucunda oluşan hacimsel büzülme nedeniyle ölçülen yoğunluk değerleri, teorik hesaplamalarda elde edilen yoğunluk değerlerinden %0,8–1,1 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç, pratikte boyutsal kararlılığın önemli olduğu otomotiv, savunma sanayi v.b uygulamalarda hacimsel büzülmenin önemli bir tasarım parametresi olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Malzemenin yük altında gösterdiği davranış incelendiğinde, ilk önce uygulanan yükün epoksi tarafından taşındığı, kauçuk etkisinin ise ilerleyen yük değerlerinde devreye girdiği değerlendirilmiştir. Mukavemet açısından, kauçuk oranı %10'un üzerine çıkmamak ve ön gerilme oranı en az %20 olmak şartıyla geliştirilen malzemenin, yüksek dayanım gerektirmeyen, yapısal elemanlarda kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Bu sayede maliyette %10 iyileştirme katkısı sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Titreşim, darbe azaltma performansının öne çıktığı uygulamalarda ise orta düzey kauçuk katkısı (%10–%15) optimum sonuçlar vermekte olup, döşeme sistemleri, kaplama malzemeleri ve prefabrik elemanlar gibi enerji sönümleme kapasitesinin önemli olduğu alanlarda kullanımının uygun olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

5.2 Öneriler

- Orta düzey kauçuk katkısı (%10–%15) enerji sönümleme kapasitesi açısından avantaj sağlamaktadır. Titreşim azaltma veya tokluk istenen yapılarda bu katkı oranları değerlendirilebilir.
- %20 katkılı numunelerde gözlenen sertlik artışı, sistemin doğrusal olmayan davranış sergilediğini düşündürmektedir. Elde edilen bu sonucun nedeni, mikro yapı incelemeleri ve farklı bağlayıcı/kauçuk tipleri ile desteklenerek araştırılabilir.
- Epoksi reçine ve kauçuğun yoğunluk farkından dolayı %15 kauçuk oranının altındaki numunelerde istenen derecede homojen bir yapı elde etmek mümkün olmamıştır. Gelecek çalışmalarda bu konu dikkate alınarak homojen bir karışım elde etme metotları üzerinde daha fazla araştırma yapılabilir.
- Bu çalışmada partikül boyutu $3 \text{ mm} \geq d \geq 2 \text{ mm}$ aralığındaki atık kauçuk granülleri ve matris olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Farklı boyut ve şekillerde kauçuk partiküllerinin, farklı polimer bağlayıcılar ve katkı maddelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Geliştirilen ön germe aparatında boyutsal problemlerden dolayı ön gerilme elemanlarında çekme gerilmesi yanında bir miktar da burulma gerilmesi ortaya çıkmıştır. Burulma gerilmesinin sonuçlar üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Gelecek çalışmalarda daha farklı ön germe metotları/aparatları geliştirilerek burulma etkisinin ortadan kaldırılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Yapılan çalışmalarda ön gerilme oranının mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Bunun bir nedeni olarak ön gerilme elemanlarının yüzeyinin pürüzsüz olması, dolayısı ile yapışma mukavemetin bu konuda etkisi olduğu söylenebilir. Gelecek çalışmalarda ön gerilme elemanlarının yüzey pürüzlüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisi de araştırma konusu olabilir.

- Yoğunluk ölçümleri ile gözlenen hacimsel büzülme nedeni ile malzemede oluşabilecek iç gerilmeler ve mikro çatlaklar üzerinde araştırmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Abu-Jdayil, B., Hussain, A., ve Ark., 2016, Investigation on the mechanical behavior of polyester-scrap tire composites, *Construction and Building Materials*, Vol. 127, 896 – 903
- Akın, M. H., 2017, Polimer Betonların Özelliklerinde Atık Lastik Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Ateş, E., 1994, Epoksi Polimer Betonun Makina Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Aydın, P., 2025, Lastik Atığının Kompozit Yapımında Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Deredas, K., Kepczak, N., ve Urbaniak, M., 2021, Influence Of Doping With Styrene-Butadiene Rubber On Dynamic And Mechanical Properties Of Polymer Concrete, *Composite Structures*, Vol. 268, 113998
- Doğan, E. C., 2022, Öngerilmeli Kirişlerin Deplasman Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Yozgat
- Gökbaşı, F., 2021, Çelik Lifli Polimer Betonların Mekanik Davranışı Üzerine Geri Dönüştürülmüş Araç Lastiği Parçacıkları Ve Liflerinin Birleşik Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- Jafari, K., Toufigh, V., 2017, Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 155, 495 – 510
- Ğuma, Ö., 2019, Kare Kesitli Gfrp Kutu Profillerin İçerisine Polimer Beton Doldurularak Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya.
- Oflazoğlu, M. Z., 2007, Öngerilmeli Beton Kolonların Analiz Ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana
- Özer, A., 2010, Öngerilme Tekniği İle Çelik I- Kiriş Üretimi, Eğilme Davranışı Ve Kalıntı Gerilmelerin Araştırılması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara
- Öztürk, H. O., 2019, Tezgah Gövdesi İçin Mineral Kompozit Malzemesinin Mekanik Ve Titreşim Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Palancı, P., 2022, Öngerilmeli Sürekli Kirişlerin Analiz Ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana

- Shao, J., Zhu, H., ve Ark., 2020, Effect of waste rubber particles on the mechanical performance and deformation properties of epoxy concrete for repair, *Construction and Building Materials*, Vol. 241, 118008
- Türkben, M., 2019, Lastik Atığının Epoksi Kompozitte Dolgu Maddesi Olarak Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Ulusoy, A., 2021, Atık Lastik Agregası İçeren Normal Ve Yüksek Dayanımlı Betonların Aşınma ve Termal İletkenlik Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa
- Yel, F., 2022, Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde Atık Lastik Granüllerinin Dolgu Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
- Yıldırım, Y. F., 2019, Cam Lifi Ve Cam Tozunun Polimer Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya.
- Zhang, J., Wang, M., ve Ark., 2024, Fatigue performance and damage of partially prestressed concrete beam with fiber reinforcement, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 21, e03665
- Zor, M., 2024, Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler, <https://mehmetzor.com/dersler/kompozit-malzemelerle-ilgili-genel-bilgiler-sunum-dosyasi/Kompozitler-Hakkinda-Genel-bilgiler.pptx>
- Zor, M., 2024, Kompozit Malzeme Mekanik Ders Notları, <https://mehmetzor.com/dersler/kompozit-malzeme-mekanigi/kompozit-malzeme-mekanigi-ders-notlari//kompozitdersnotlari-mzor-Agustos2025.pdf>