



T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İĞDE ÇEKİRDEĞİ UNU VE KALSİT KATKILI GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ABS HİBRİT KOMPOZİTLERİN YÜZER
GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ UYGULAMALARI İÇİN MEKANİK
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA AKYOL

OCAK

MUSTAFA AKYOL

**YENİLENEBİLİR ENERJİ VE
UYGULAMALARI**

OCAK 2026

**İĞDE ÇEKİRDEĞİ UNU VE KALSİT KATKILI GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
ABS HİBRİT KOMPOZİTLERİN YÜZER GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ
UYGULAMALARI İÇİN MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Mustafa AKYOL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI ANABİLİM DALI**

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAZAN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2026

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Mustafa AKYOL tarafından hazırlanan “İğde Çekirdeği Unu Ve Kalsit Katkılı Geri Dönüştürülmüş ABS Hibrit Kompozitlerin Yüzer Güneş Enerji Santrali Uygulamaları İçin Mekanik Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr.Üyesi Hakan KAZAN

Konstrüksiyon Ve İmalat Anabilim Dalı, Amasya Üniveristesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Doç. Dr. Halil Burak KAYBAL

Endüstriyel Tasarım Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniveristesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Canan ORAL

Devreler Ve Sistemler Anabilim Dalı, Amasya Üniveristesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 22/01/2026

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa AKYOL

22.01.2026

İĞDE ÇEKİRDEĞİ UNU VE KALSİT KATKILI GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ABS
HİBRİT KOMPOZİTLERİN YÜZER GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ UYGULAMALARI
İÇİN MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa AKYOL

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2026

ÖZET

Bu çalışma, yüzer güneş enerjisi santrallerinde (YGES) kullanılan yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemesine yönelik sürdürülebilir, yüksek katma değerli ve çevre dostu bir alternatif geliştirme başarısını ortaya koymaktadır. Atık 3D yazıcı akrilonitril bütadiyen stiren (ABS) plastiklerinin geri dönüştürülmesiyle elde edilen bu yeni hibrit kompozit, özellikle düşük dolgu oranlarında sergilediği teknik performansla döngüsel ekonomi için güçlü bir model sunmaktadır. Deneysel sonuçlar, %5 gibi düşük dolgu oranlarında polimer matrisinin sürekliliğinin başarıyla korunduğunu ve yaklaşık 28,5 MPa çekme dayanımı ile %1,65 kopma uzaması gibi tatmin edici mekanik değerlere ulaşıldığını göstermiştir. Özellikle %10 dolgu oranında kopma uzamasının %1,75 seviyesine yükselmesi, çalışmanın özgün bir bulgusu olan iğde çekirdeği ununun "doğal bir plastikleştirici" olarak matrise hareket kabiliyeti kazandırdığını ve kalsitin neden olduğu gevrekleşmeyi başarıyla dengelediğini kanıtlamaktadır. ASTM D570 standardına göre 41 gün boyunca üç farklı ortamda (arıtma, deniz ve saf su) gerçekleştirilen su emme testlerinde; numunelerin en kararlı yapıyı arıtma suyunda sergilediği, deniz suyunda ise çözünmüş tuzların osmotik etkisiyle su difüzyonunun sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle %5 ve %10 katkı oranına sahip hibrit kompozitlerin sucul ortamlardaki düşük su tutma kapasitesi, geliştirilen formülasyonların gerçek saha koşullarında uzun ömürlü kullanım potansiyeline sahip olduğunu bilimsel olarak doğrulamaktadır. Çalışmanın en dikkat çekici başarılarından biri de, %95 oranında atık ABS içeren kompozisyonun elde ettiği 5,031 kJ/m²'lik darbe dayanımıdır. Bu değer, geri dönüştürülmüş HDPE'nin (6,46 kJ/m²) performansı ile kıyaslanabilir ve birçok endüstriyel uygulama için rekabetçi bir eşikte yer almaktadır. Sonuç olarak bu çalışma; atık malzemelerin nitelikli bir mühendislik ürününe dönüştürülebileceğini göstermiş; geliştirilen malzemenin YGES platformları gibi yapısal alanlarda HDPE'ye karşı ekonomik, teknik açıdan yeterli ve ekolojik bir alternatif olduğunu güçlü verilerle ortaya koymuştur.

Sayfa Adedi : 86
Anahtar Kelimeler : Yüzer GES, ABS, HDPE
Danışman : Dr. Öğr.Üyesi Hakan KAZAN

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF OLEASTER SEED
FLOUR AND CALCITE ADDED RECYCLED ABS HYBRID COMPOSITES FOR
FLOATING SOLAR ENERGY POWER PLANT APPLICATIONS

(M. Sc. Thesis)

Mustafa AKYOL

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2026

ABSTRACT

This study demonstrates the success of developing a sustainable, high value-added, and environmentally friendly alternative to high-density polyethylene (HDPE) material used in floating solar power plants (FSPP). This novel hybrid composite, obtained by recycling waste 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastics, offers a strong model for the circular economy, particularly with its technical performance at low filler ratios. Experimental results showed that the continuity of the polymer matrix was successfully maintained at filler ratios as low as 5%, achieving satisfactory mechanical values such as approximately 28.5 MPa tensile strength and 1.65% elongation at break. Specifically, the increase in elongation at break to 1.75% at a 10% filler ratio proves that oleaster seed flour, a unique finding of the study, acts as a "natural plasticizer," imparting mobility to the matrix and successfully counteracting the embrittlement caused by calcite. Water absorption tests conducted for 41 days in three different environments (treatment water, seawater, and pure water) according to the ASTM D570 standard revealed that the samples exhibited the most stable structure in treatment water, while in seawater, water diffusion remained limited due to the osmotic effect of dissolved salts. In particular, the low water retention capacity of hybrid composites with 5% and 10% additive ratios in aquatic environments scientifically confirms that the developed formulations have the potential for long-term use in real-world field conditions. One of the most remarkable achievements of the study is the impact strength of 5,031 kJ/m² obtained by the composition containing 95% waste ABS. This value is comparable to the performance of recycled HDPE (6.46 kJ/m²) and is at a competitive threshold for many industrial applications. In conclusion, this study demonstrates that waste materials can be transformed into a high-quality engineering product; and strongly proves that the developed material is an economical, technically adequate, and ecological alternative to HDPE in structural areas such as high-voltage power generation platforms.

Number of pages : 86

Keywords : Floating PV, ABS, HDPE

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Hakan KAZAN

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde, başından sonuna kadar desteğini hiç esirgemeyen, yol gösterici önerileriyle sürekli motivasyon veren çok kıymetli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAZAN'a içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, bu süreç boyunca bana her koşulda destek olan, sabır gösteren ve daima güven veren değerli eşim Emine AKSU AKYOL'a ve sevgili oğullarım Tevfik Eymen AKYOL ile Yusuf Kayra AKYOL'a en derin şükranlarımı sunarım. Çalışmam sırasında teknik destek ve katkı sağlayan, her türlü yardımı büyük bir özveriyle sunan Mazhar Zorlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Plastik Teknolojisi Alan Şefi Sayın Mustafa YILMAZ'a, Gebze PAGEV Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Alan Şefi Sayın Özkan CANTÜRK'e ve DÜDERİ BOYA VE KİMYEVİ MADDELER SAN. TİC. LTD. ŞTİ. firmasının sahibi Sayın Ahmet DÜDERİ Bey'e, ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGE DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması.....	2
2. YÜZER GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİ	15
2.1. Yüzer Güneş Enerji Santralleri Tarihsel Gelişimi.....	15
2.2. Dünyada Yüzer Güneş Enerji Santralleri.....	16
2.3. Türkiye’de Yüzer Güneş Enerji Santralleri.....	19
2.4. Yüzer Güneş Enerji Tesisi.....	21
2.5. Yüzer Fotovoltaik Sistemleri Oluşturan Öğeler.....	22
2.5.1. FV sistem.....	23
2.5.2. Yüzer platform.....	24
2.5.3. Yüzdürücü sistem (duba).....	26
2.5.4. Panel taşıyıcı duba.....	27
2.5.5. Yürüme yolu dubası.....	28
2.5.6. Diğer duba türleri.....	29
2.6. Sabitleme Sistemi.....	29
2.7. Elektriksel Bağlantı.....	30
2.8. Şebeke Bağlantı Sistemi.....	31

	Sayfa
2.9. YGES Avantajları ve Dezavantajları.....	32
2.9.1. YGES avantajları.....	32
2.9.2. YGES dezavantajlar.....	33
3. PLASTİK MALZEMELER.....	35
3.1. Elastomerler.....	38
3.2. Termosetler.....	39
3.3. Termoplastikler.....	39
3.3.1. Polietilen.....	42
3.3.2. Düşük yoğunluklu polietilen.....	46
3.3.3. ABS.....	46
3.4. Diğer Ürünler.....	53
3.4.1. Kalsit.....	54
3.4.2. İğde çekirdeği.....	55
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	56
4.1. Malzeme Temini.....	56
4.2. Kompozit Malzeme Üretim Süreci.....	56
4.3. İzod (Çentikli) Darbe Testi.....	62
4.4. Çekme Testi.....	64
4.5. Su Emilim Testi.....	68
5.SONUÇLAR.....	73
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ülkelerin yüzer güneş santral kapasitesi... ..	17
Çizelge 2.2. Türkiyede kurulu YGES tesisleri.....	21
Çizelge 4.1. ABS ve HDPE için yapılan literatür çalışması.....	67
Çizelge 4.2. Su emilim testi literatür tarama sonuçları.....	72



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Plastiklerin sınıflandırılması	38
Şekil 4.1. ISO 527-2 göre numune boyutları	65
Şekil 4.2. Çekme test eğrisi	67
Şekil 4.3. Arıtma suyu su emilim testi.....	69
Şekil 4.4. Deniz suyu emilim testi	70
Şekil 4.5. Saf su emilim testi	71

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Dezhou Dingzhuang YGES tesisi	18
Resim 2.2. İstanbul Büyükçekmece YGES	19
Resim 2.3. İstanbul Pendik marina YGES.....	20
Resim 2.4. Keban barajı üzerine kurulan 1 MW YGES	21
Resim 2.5. FV panel.....	23
Resim 2.6. Yüzer GES platformu	24
Resim 2.7. YGES taşıyıcı platform.....	25
Resim 2.8. İtalya Solarolo YGES tesisi.....	26
Resim 2.9. Yüzer FV sistemler için tasarlanan panel taşıyıcı duba	28
Resim 2.10. Yüzer FV sistemler için tasarlanan yürüme yolu dubası	28
Resim 2.11. Solar evirici ve elektrik ekipmanlarının yüzdürüldüğü sistem.....	29
Resim 2.12. Yüzer FV sistemler için tasarlanan duba sabitleme sistemi	30
Resim 2.13. YGES kablolama sistemi.....	31
Resim 2.14. YGES solar evirici sistem.....	32
Resim 3.1. Plastik malzemelerdeki bağ çeşitleri	36
Resim 4.1. Atık ABS	56
Resim 4.2 Kırma makinesi.....	57
Resim 4.3. Kırık ABS	58
Resim 4.4. Schneider öğütme makinesi.....	58
Resim 4.5. Toz ABS	59
Resim 4.6. Hassas terazide ABS.....	60
Resim 4.7 Ekstrüder makinesi ekstrüder ısı bölgeleri	60

Resim 4.8. Enjeksiyon makinesi ve ısı bölgeleri	61
Resim 4.9. Çentik cihaz ve darbe cihazı.....	62
Resim 4.10. Kompozit numuneler	65
Resim 4.11. Çekme test cihazı.....	67



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
ABS	akrilonitril bütadien stiren
AEEE	atık elektrikli ve elektronik eşyalar
ASTM	Amerikan test ve materyal cemiyeti
CCR	kalsiyum karbür kalıntısı
dB(A)	desibel (gürültü seviyesi birimi)
FDM	eriyik yığma modelleme
FPV	yüzer fotovoltaiik
FSF	yüzer güneş çiftliği
FTIR	fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
GES	güneş enerji santrali
GPa	gigapascal
HDPE	yüksek yoğunluklu polietilen
HES	hidroelektrik santrali
ISO	uluslararası standartlar teşkilatı
kJ/m^2	birim yüzey alanına düşen enerji
FV	fotovoltaiik
SEM	taramalı elektron mikroskobu
YGES	yüzer güneş enerji santrali

1.GİRİŞ

Enerji ihtiyacının sürekli artması ve fosil yakıtların doğa üzerindeki olumsuz etkileri, dünya ülkelerini sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji alternatiflerine yöneltmektedir. Bununla birlikte değişen iklim koşulları ve artan dünya nüfusu, su kaynaklarının idareli kullanımını ve yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlerin geliştirilmesini bir gereklilik haline getirmiştir. Artan enerji ihtiyacını karşılarken bir yandan da gezegenin geleceğini güvence altına almanın tek yolu, yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesidir. Bu zorunluluk, söz konusu sektördeki yatırımların son 15 yılda ivmelenerek artmasının temel nedenini oluşturur.

Fosil yakıt rezervlerinin kısıtlı doğası ve bu kaynakların kullanımının yol açtığı ciddi ekolojik tahribat, enerji paradigmasında bir dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilir ve çevreyle uyumlu 'yeşil' enerji teknolojilerine yönelik artan bir yönelim ve söz konusu sistemlerin önemi hakkındaki toplumsal farkındalık düzeyinin yükseldiği gözlemlenmektedir (Derkowski, Dziurka, Antonowicz, Chuda-Kowalska, and Mirski, 2024). Bundan dolayı, mevcut konjonktürde, yenilenebilir enerji kaynaklarına sermaye tahsisi, artık yalnızca bir tercih olmaktan çıkıp; devletler, özel sektör kuruluşları ve toplumsal yapılar için stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir.

Yenilenebilir enerji teknolojileri arasında en yaygın olarak istifade edilen sistemler; rüzgâr türbinleri, fotovoltaik paneller ve hidroelektrik santralleri olarak sıralanmaktadır. Bu temel kaynaklara ek olarak, biyokütle ve jeotermal enerji de yaygın kullanılan diğer sürdürülebilir alternatifler arasında yer almaktadır. Hali hazırda enerji alanında en çok paya sahip yenilenebilir enerji kaynağı güneş enerjisidir. En az paya sahip olan ise dalga enerjisidir (Kuliński, Walkiewicz, Dukarska, Dziurka and Mirski, 2023).

Fotovoltaik (FV) sistemlerin, çevresel açıdan sürdürülebilir bir enerji profili sunması ve uzun operasyonel dayanıklılığa sahip olması, bu teknolojinin küresel enerji üretimindeki penetrasyonunu (yaygınlaşmasını) hızlandıran temel etkenlerdendir. Enerji üretim verimliliğindeki sürekli iyileşmeler ve birim maliyetlerde gözlemlenen belirgin optimizasyon eğilimi, güneş enerjisi santrallerini (GES) ekonomik açıdan giderek daha rekabetçi bir seçenek haline getirmekte ve bu durum, söz konusu santrallerin yaygın olarak benimsenmesini teşvik etmektedir. Yüzer FV Sistemler, fotovoltaik panellerin doğrudan su yüzeylerine (göller, rezervuarlar vb.) monte edilmesini içeren yenilikçi bir uygulama olarak dikkat çekmektedir. Bu sistemler, özellikle kara tabanlı kurulumlar için alan kısıtlamaları gibi önemli zorlukların üstesinden gelmede umut verici bir stratejik çözüm sunmaktadır (Cagle, ve diğerleri. 2020).

Fotovoltaik sistemlerin su yüzeylerine entegrasyonu olarak tanımlanan yüzer güneş santralleri, 2000'lerin ikinci yarısındaki başlangıcından itibaren küresel çapta en hızlı yayılan güneş enerjisi çözümleri arasında yer almaktadır. Yüzer GES'lerin kara tabanlı santrallere kıyasla; arazi tasarrufu sağlaması, daha yüksek verim getirmesi, buharlaşmayı önleyerek su kaybını azaltması, hibrit sistemlere entegrasyonu ve çevresel faydalarından dolayı tercih sebebi olduğu söylenebilir (Sachin, ve diğerleri. 2021).

1.1. Literatür Taraması

Yüzer Güneş Enerji Santralleri (YGES), su kütleleri üzerine konumlandırılan ve genellikle ankraj (demirleme) sistemleriyle zemine sabitlenen yüzer yapılar üzerine entegre edilmiş fotovoltaik panel sistemleridir. Yüzer platform, bu FV modüllerini su yüzeyinden belirli bir yükseklikte taşıma ve destekleme işlevini görür (Pande, Athawale, Malkhandale, Narwade, 2024). Genel bir yüzer platform konfigürasyonu, sistemi taşıyan ana dubalar ve personel geçişini sağlayan yürüme yolu dubalarını içermektedir (Şençiçek, 2017). Yüzer güneş enerjisi sistemlerinde platform üretimi için yaygın olarak Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) malzeme tercih edilmektedir. Bu tercihin temel nedenleri; malzemenin ultraviyole (UV) ışınlarla karşı yüksek direnç göstermesi, korozyona (paslanmaya) uğramaması, yüksek çekme mukavemetine sahip olması, düşük bakım maliyeti sunması ve geri dönüştürülebilir bir yapıda olmasıdır (Sahu, Yadav and Sudhakar, 2016).

HDPE, su geçirmezlik ve kimyasal direnç özellikleri nedeniyle birçok farklı alanda tercih edilir. Geri dönüştürülmüş plastiklerin kalitesi, saf malzemelere kıyasla uzun vadeli performans açısından sınırlıdır; bundan dolayı, katkı maddeleri ve uyumlaştırıcılarla iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu durum polimerin geri dönüşümü alanında özellikle ilgi çekici hale gelmektedir çünkü polimer atıkları mekanik özelliklerinde değer kaybı göstermektedir ve polimer atıkları ile doğal elyaflardan kompozit üretimi düşük maliyet ve gelişmiş özellikleri bir araya getiren bir malzeme ile sonuçlanabilir (Moreno and Saron, 2017).

Sahu ve Sudhakar (2019) yaptığı çalışmada uygun özellikleri nedeniyle seçilen bimodal HDPE malzemenin üretilen numuneler, 1152 saate kadar hızlandırılmış UV yaşlandırma testine tabi tutulmuştur. Test süresince malzemenin çekme dayanımı, kopma uzaması, maksimum yük taşıma kapasitesi, darbe dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikleri periyodik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, UV maruziyeti sonrası çekme dayanımının (23.22 MPa'dan 14.64 MPa'ya) ve maksimum yük taşıma kapasitesinin (955.16 N'dan 1000 saat sonra 637.81 N'a) azaldığını, ancak malzemenin hala yük taşıyabildiğini göstermiştir. Kopma uzaması önemli ölçüde düşmesine rağmen (%6.24 esneklik korunmuştur), darbe dayanımında belirgin bir değişiklik olmamış, sertlik ise artmıştır. Çalışma, bimodal HDPE'nin mekanik özelliklerinin hızlandırılmış UV maruziyetinden önemli ölçüde etkilenmediği ve bu malzemenin yüzer güneş paneli sistemlerinde panelleri ve diğer ekipmanları taşımak için güvenli olduğu sonucuna varmıştır (Sahu and Sudhakar, 2019).

HDPE malzeme, UV ışınlarına maruz kaldığında, fotooksidasyon adı verilen ve zincir kopması ile sonuçlanan kimyasal bir bozunma süreci başlar. Bu süreçte, polimerin ana iskeletini oluşturan kimyasal bağlar parçalanır ve daha kısa molekül zincirleri meydana gelir. Bunun doğal bir sonucu olarak da malzemenin ortalama molekül ağırlığında kayda değer bir düşüş gözlemlenir (Hsueh, Fairbrother, Kim and Sung, 2020). Işınımsal bozunma ilerledikçe, malzemenin elastiklik modülü yükselir; bu durum malzemede giderek artan bir sertleşme ve gevrek bir yapı oluştuğunu gösterir. Bu kırılğan yapı, rüzgâr veya dalga gibi dinamik kuvvetlerin etkisi altında çatlakların hem oluşmasına hem de ilerlemesine karşı son derece duyarlı hale gelir (Mendes, Rufino, Paula, and Torres, 2003). Bu fiziksel dönüşümle birlikte, fotooksidatif süreçler neticesinde malzemenin kimyasal yapısında karbonil ve hidroperoksit gibi yeni işlevsel gruplar oluşur. Söz konusu gruplar, polimerin kimyasal

yapısında meydana gelen bozulmanın açık bir kanıtıdır. Nihayetinde, bu kimyasal ve fiziksel değişimlerin toplam etkisi, HDPE platformun mekanik özelliklerinde bir düşüşe yol açar; malzeme esnekliğini yitirir, darbe dayanımı azalır ve son aşamada yapısal bütünlüğü bozulur (Mendes ve diğerleri. 2003).

HDPE, kimyasal yapısı itibarıyla UV ışınlarına karşı doğal bir dayanıklılık göstermez. Herhangi bir katkı maddesi içermeyen saf hali, güneş ışığına maruz kaldığında polimer zincirlerinde hızlı bir bozunma başlar ve malzeme mekanik niteliklerini kaybeder. Bu sebeple, açık hava kullanımına yönelik HDPE ürünlerin UV stabilizatörleri gibi özel katkı maddeleri ile desteklenmesi zaruridir (Charoensri, Shin and Park, 2023).

Bu stabilizatörler, ultraviyole enerjisini soğurarak veya zararsız bir ısı formuna dönüştürerek polimer zincirlerinin bozunmasını önler. Stabilizatörlerin bulunmaması veya zamanla etkinliklerini kaybetmeleri halinde, UV kaynaklı fotooksidasyon reaksiyonları hız kazanır ve malzemenin darbe mukavemeti başta olmak üzere temel mekanik özelliklerinde hızlı bir bozulma görülür. Bu durum, HDPE platformların hizmet ömrünün ve yapısal güvenilirliğinin, büyük ölçüde söz konusu kimyasal katkıların performansına ve dayanıklılığına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır (Koriem, Ollick and Elhadary, 2021).

HDPE platformlar, özellikle hizmet ömrünün ilk aşamalarında ve maliyet verimliliği sağlamak amacıyla dolgu maddeleri katılarak üretildiklerinde, darbe dayanımlarında kayda değer bir düşüş sergileyebilir. Bunun somut bir örneği olarak, çift modlu HDPE'nin UV ışınlarına maruz kaldığı ilk 500 saatlik dönemde, polimer içindeki düşük moleküler ağırlığa sahip zincirlerin hızlı ayrışması sonucu darbe mukavemetinde ölçülebilir bir azalma tespit edilmiştir (Sahu, Yadav and Sudhakar, 2016). Üretim ekonomisi sağlamak veya sertlik kazandırmak hedefiyle HDPE ana yapısına katılan talk ve kalsit gibi mineral katkıları, malzemenin tokluk performansını önemli ölçüde düşürmektedir. Araştırma bulguları, söz konusu dolgu malzemelerinin hem çentikli hem de çentiksiz darbe direncinde kayda değer düşüşlere neden olduğunu ve malzemeyi gevrek hale getirdiğini ortaya koymaktadır (Özkan, 2020).

Rüzgâr ve dalganın neden olduğu dinamik yükler altında çalışan yüzer platformlarda yorulma analizleri zorunluluk arz etmektedir. Göl ve rezervuar gibi korunmuş su yapıları için optimize edilmiş mevcut HDPE tasarımlarının aksine, dalgalı deniz koşullarında bu hafif modüler yapıların yorulma ömrü kayda değer bir tasarım endişesi oluşturmaktadır (Zhang, Dai, Ang and Lim, 2024). Söz konusu yorulma, malzemenin mikroskobik ölçekte zaman içinde hasar biriktirmesi sonucu dayanım kaybına uğraması ve nihayetinde tasarım sınırlarının oldukça altındaki yüklerle karşılaştığında dahi bütünlüğünü yitirmesi anlamına gelmektedir (Janbandhu, Kumar and Deshmukh, 2022). Yapısal yorulma tehlikesi en çok platform elemanlarının birleşim bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Yapılan nümerik analiz çalışmaları, yüzer cisimler ile giriş sistemleri arasındaki bağlantı noktalarında 150-298 MPa düzeyinde aşırı gerilim konsantrasyonları belirlemiştir. Bu gerilim değerleri, mühendislik plastiklerinin büyük bölümünün akma sınırını aşacak düzeyde olup, kritik bağlantı lokasyonlarında geri dönüşü olmayan deformasyonlara veya yapısal bütünlüğün aniden kaybolmasına neden olarak sistemin tamamen çökmesine varan sonuçlar doğurabilmektedir (Choi, Huh, Lee, Son and Park, 2023).

Deniz suyunun bünyesindeki tuzlar ve diğer kimyasallar, HDPE'deki yıpranma sürecini tetikleyici bir rol oynayabilir. Özellikle okyanus gibi yüksek tuzluluk oranına sahip ortamlara kurulması planlanan YGES platformlarındaki malzeme seçimi, IEC 61701 numaralı Tuz Sisi Korozyon Testi de dahil olmak üzere evrensel standartları karşılayan özel sertifikasyonları gerektirmektedir (Sahu ve diğerleri. 2016). Saf HDPE yüzeyleri, su ortamlarında mikrobiyal tutunmaya ve biyofilm oluşumuna karşı yüksek derecede duyarlıdır. Yapılan araştırmalar, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Escherichia coli* gibi yaygın bakterilerin HDPE üzerinde rahatlıkla yerleşip biyofilm katmanları oluşturabildiğini ortaya koymuştur. Başlangıçta mikro boyuttaki bu oluşum, ilerleyen süreçte alg ve midye gibi daha büyük organizmaların yerleşimine olanak sağlayarak makro boyutta kirlenmeye yol açar. Bu biyolojik birikim, platformun ağırlığını artırarak yüzdürme kapasitesini düşürür ve ileri safhalarda platformun batmasına kadar varabilecek riskler doğurabilir (Sahai, Singh and Sharma, 2024). Bu biyolojik birikim, sürekli bakım ihtiyacını beraberinde getirerek işletme maliyetlerinde artışa neden olur. Sahu ve ekibinin bir araştırmasında, denizel ortamda biyofouling'e maruz kalan HDPE numunelerinde %0,75'lik bir kütle azalışı tespit edilmiştir. Bu ağırlık kaybı, uzun vadeli etkileri içerisinde malzeme yüzeyinde bozulmaya ve mekanik dayanımın azalmasına yol açan bir etken olarak değerlendirilmektedir. Daha da önemlisi, *Pseudomonas aeruginosa* gibi belirli mikroorganizma türleri polimer yapıyı bir karbon

kaynağı olarak parçalayabilme yeteneğine sahiptir. Saf HDPE'nin antimikrobiyal direnç sergilememesi, problemin kontrol altına alınabilmesi için çinko oksit (ZnO) gibi fonksiyonel katkı maddelerinin kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır (Charoensri, Shin and Park, 2023).

Moleküler ağırlık kaybı, malzemenin en önemli mekanik özelliklerinden biri olan süneklik performansında ciddi bir düşüşe yol açarak yapısal bütünlüğü tehdit eder. Sahu ve Sudakar'ın (2019) yaptığı bir çalışmada, Deniz suyu etkisine maruz bırakılan HDPE örneklerinde, kopma anındaki uzama miktarının %75,81'den %52,81'e düştüğü belirlenmiştir. Ortaya çıkan %30'luk süneklik kaybı, malzemenin deformasyon sırasında enerji soğurma yeteneğinin ciddi ölçüde zayıfladığının bir göstergesidir. Bu süneklik azalışı, malzemenin mekanik karakterini esnek bir davranıştan kırılğan bir yapıya doğru evriltir (Sahu A. K. ve Sudhakar K., 2019). Uzun vadeli çevresel maruziyet sonucunda HDPE, tüm esnekliğini kaybederek adeta "mekanik olarak işlevsiz" bir duruma gelebilmektedir (Mendes ve diğerleri. 2003).

YGES platformlarının hidrodinamik performans analizinde kullanılan konvansiyonel yazılım araçları genellikle lineer dalga teorisi prensiplerine dayanmaktadır. Bu yaklaşım sakin su koşullarında geçerli olsa da yüksek dalga yükseklikleri ve sığ su gibi ekstrem durumların modellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu durum, "dalga çarpması" gibi doğrusal olmayan ve oldukça tehlikeli etkilerin tasarım aşamasında ihmal edilmesi sonucunu doğurabilir. Dalga çarpması, büyük bir dalganın platform gövdesine ani ve şiddetli teması ile gerçekleşir. Bu fenomen, platformda anlık olarak aşırı yüksek gerilim konsantrasyonları meydana getirir. Analiz sonuçları, bu tür olayların 10.87 MPa'ya varan Von Mises gerilme değerleri üretebildiğini göstermektedir. Sünekliğini kaybederek gevrekleşen ve darbe mukavemeti düşen bir HDPE malzeme söz konusu olduğunda, bu seviyedeki ani gerilim yüklenmeleri yapısal bütünlüğü tehdit eden ciddi bir risk oluşturur (Yue, Peng, Wang, Tan and Zhou, 2025).

Katmanlı imalat teknolojisi, parçaları üretmek için malzeme ekleme prensibiyle çalıştığından, malzemenin belirli bölgelerini talaş kaldırarak uzaklaştıran geleneksel yöntemlere kıyasla doğası gereği daha sürdürülebilirdir ve önemli ölçüde daha az malzeme israfına yol açar (Ahmad and Yahya, 2023). Bu verimli yaklaşım, geri dönüşüm uygulamalarıyla bir araya geldiğinde; kaynakların verimli kullanımı, atık oluşumunun en aza indirilmesi ve nihayetinde sürdürülebilir bir döngüsel ekonominin desteklenmesi

açısından son derece ümit verici bir potansiyel taşımaktadır (Olawumi, Oladapo, Ikumapayi and Akinyoola, 2023). Sorunun boyutlarını kavramak için küresel verileri incelemek yeterli olacaktır: 2019 yılında dünya genelinde 370 milyon ton civarında plastik üretimi kaydedilmiş ve aynı dönemde her yıl yaklaşık 12,7 milyon ton plastik atığın okyanuslara ulaştığı tahmin edilmiştir (Cañado, ve diğerleri. 2022). Bu bağlamda, atık plastikleri 3D baskı için bir hammaddeye dönüştürmek, hem çevresel bir zorunluluğa yanıt vermekte hem de yeni ekonomik değer yaratmaktadır. 3D baskı operasyonları da kendi içinde atık üretir. Ancak baskı hataları, destek malzemeleri ve kullanılmayan filament parçaları gibi bu atıklar, kapalı döngülü bir sistemde yüksek saflıkta malzeme kaynağı olarak kolaylıkla geri kazanılabilir (Mikula, ve diğerleri. 2021). Eriyik Yığma Modelleme (FDM) gibi popüler 3D baskı yöntemlerinde, desteğe ihtiyaç duyan karmaşık tasarımlar için üretilen yapılar, işlevlerini tamamladıktan sonra çıkarılarak doğrudan çöpe gider. Benzer şekilde, deneme süreçlerinde veya ayar problemleri nedeniyle oluşan hatalı baskılar da önemli ölçüde atık oluşumuna neden olur (Nadagouda, Ginn and Rastogi, 2020). Hızlı prototipleme, temel uygulama alanlarından biri olarak tasarım döngülerindeki verimliliği artırsa da, bu durum kısa ömürlü ve genelde atılacak plastik nesnelerin üretimindeki artışı da beraberinde getirmektedir. Ayrıca Tıpkı diğer plastik mamuller gibi, 3D baskı teknolojisiyle üretilmiş parçalar da ömürlerini tamamladıklarında atık akışına katılmaktadır. (Olawumi, 2023).

Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), katmanlı imalat yöntemleri içerisinde en yaygın kullanılan FDM tekniğinde özel bir konuma sahiptir. FDM prosesi, temel olarak termoplastik bir filamentin ergitilerek yarı sıvı hale getirilmesi ve bir ekstrüzyon başlığı yardımıyla tabaka tabaka biriktirilmesi prensibiyle çalışır. ABS'nin bu üretim metoduna gösterdiği olağanüstü uyum; ısı kararlılığı, işlenebilirlik kolaylığı ve yüksek mekanik performansı sayesinde, prototip üretiminden nihai kullanım amaçlı fonksiyonel bileşenlerin imalatına uzanan geniş bir üretim yelpazesinde çığır açıcı bir rol oynamıştır (Mikula, 2021).

FDM prosesi, bir polimer filamentin ısıtılmış bir ekstrüder kafaya beslenmesiyle başlar. Filament, cam geçiş sıcaklığının üzerinde ısıtılarak yarı ergimiş hale getirilir ve kontrollü bir şekilde ince bir nozülde ekstrüde edilir. Yarı sıvı haldeki malzeme, daha önce depozite edilmiş katmanın üzerine yerleştirilir ve soğuyarak katılaşır, bu işlem her seferinde bir katman olmak üzere parçanın kademeli olarak inşasını sağlar (Shafaat and Ashtiani, 2021).

Amorf bir termoplastik kopolimer olan Akrilonitril Bütadien Stiren , akrilonitril, bütadien ve stirenin polimerleşmesiyle sentezlenir. Malzemenin sahip olduğu üstün ve çok yönlü performans, bu üç monomerin birleşiminden doğan sinerjik etkinin bir sonucudur (Deshmukh, Kulkarni, Srivats, Bhanushali and More, 2024).

ABS, stiren bileşeninin sağladığı avantajla ergimiş halde üstün bir akışkanlık gösterir ve bu da işlenebilirliğini kolaylaştırır. Enjeksiyon kalıplamada sergilediği düşük büzülme oranı ise, üretilen parçaların tasarım aşamasındaki ölçülerle birebir uyumlu olmasını garanti ederek olağanüstü bir boyutsal hassasiyet sunar (Rahimi, Esfahanian and Moradi, 2014).

ABS'yi benzer polimerlerden polistiren ile stiren akrilonitril reçinesi (PS, SAN gibi) üstün kılan temel özelliklerden biri, nemli ortamlarda mekanik bütünlüğünü kaybetmemesidir. Diğerleri nemden olumsuz etkilenip kırılma eğilimindeyken, ABS, Notomi vd. (1999) tarafından tanımlanan "çatlak ucu koruma" mekanizması sayesinde tokluğunu büyük oranda muhafaza eder. Bu mekanizmada, nemin tetiklediği daha geniş bir gerilim-beyazlama bölgesi ve bu bölgedeki mikro boşluklar, çatlak ilerleme enerjisini emerek kırılmayı engeller. Bu sayede ABS, zorlu çevre koşulları için tercih edilen güvenilir bir malzeme olma avantajı sağlar (Notomi, Kishimoto, Shibuya and Koizumi, 1999). Boldizar ve Möller'in (2003) öncü çalışması, ABS'nin performans kaybını açıklarken SAN matrisinin kimyasal bir bozulmadan ziyade 'fiziksel yaşlanma' sürecine dikkat çeker. SAN fazı kimyasal olarak olsa da, maruz kaldığı ısı döngüleri, polimer zincirlerinin yavaş yavaş daha dengeli bir konfigürasyona doğru yeniden düzenlenmesine sebep olur. Bu içsel bir sıkışma sürecidir ve malzemenin içindeki 'serbest hacmin' azalmasına, dolayısıyla da yoğunluğunun ve sertliğinin artmasına yol açar. Malzemenin uzama kabiliyetindeki bu azalmanın arkasında bu fiziksel yaşlanma yatar. Ancak, ekstrüzyon gibi bir işlem sırasında uygulanan mekanik kuvvetler, bu sıkışmış yapıyı gevşeterek süreci kısmen tersine çevirebilir (Boldizar and Moller, 2003).

Malzemeye bütadien bileşeni tarafından sağlanan bu çarpma tokluğu, beklenmedik darbelere ve şok etkilerine karşı olağanüstü bir dayanım göstermesinin temel nedenidir. Bu mekanik üstünlük, güvenlik ve uzun ömür gerekliliklerinin en üst düzeyde olduğu; otomotiv tamponları, iç döşemeler, koruyucu kasklar ve elektronik muhafazalar gibi kritik uygulamalar için vazgeçilmez bir niteliktir (Deshmukh, 2024).

Akrilonitrilin katkısı sayesinde ABS, birçok kimyasal maddeye ve yağa karşı üstün direnç sergilemektedir. Malzeme aynı zamanda geniş sıcaklık aralıklarında özelliklerini koruyabilme kabiliyetiyle, çeşitli endüstriyel koşullarda güvenle kullanılabilir (Deshmukh , 2024).

ABS, mühendislik uygulamalarında ve günlük ürünlerde en yaygın kullanılan termoplastiklerden biri olarak öne çıkar. Bu malzeme, üstün işlenebilirlik kabiliyeti, yüksek darbe direnci, mükemmel yüzey işlem özellikleri (boyanabilirlik ve parlatılabilirlik) ve geniş çalışma sıcaklığı aralığı gibi üstün özelliklere sahiptir. Malzeme aynı zamanda iyi derecede çekme mukavemeti, yüksek rijitlik ve kimyasal kararlılık sunar. Tüm bu teknik avantajlarını uygun maliyetle birleştiren ABS, endüstriyel üretimde fiyat-performans dengesi en yüksek polimerler arasında yer alarak otomotivden beyaz eşyaya, elektronik cihaz kabuklarından oyuncak üretimine kadar çok geniş bir kullanım alanı bulur (Zenkiewicz, ve diğerleri. 2009).

ABS polimeri, dayanıklılık, sertlik, üstün yüzey parlaklığı, boyutsal stabilite ve rijitlik gibi özellikleri dengeli bir biçimde sunar. Polistirene (PS) kıyasla daha üstün darbe direnci, gelişmiş kimyasal dayanım ve benzer ısı çarpılma sıcaklığı değerleriyle öne çıkar. Malzeme aynı zamanda opak bir yapıya sahiptir. ABS'nin kimyasal direnci asit ve bazlara karşı yüksek olmakla birlikte, aromatik bileşikler, klorlu çözücüler, esterler, ketonlar ve aldehitlere karşı zayıftır. Ayrıca ultraviyole ışınlarına karşı da direnci sınırlıdır (Kutz, 2015).

Li ve Cai (2011) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma, ABS temel mekanik karakterizasyonu üzerine odaklanmıştır. Araştırmacılar, malzemenin çekme mukavemetinin 30-50 MPa aralığında değişkenlik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu bulgular, enjeksiyon kalıplama sıcaklığı, soğutma hızı ve kalıp tasarımı gibi imalat parametrelerinin, nihai ürünün mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır (Li and Cai, 2011).

Osswald ve meslektaşlarının 2019 yılında yayınlanan kapsamlı araştırması, ABS'nin darbe tokluğu değerlerinin 15-25 kJ/m² aralığında olduğunu belgelemiştir. Bu yüksek darbe direnci, malzemenin otomotiv iç donanım parçaları, koruyucu kasklar ve dayanıklı tüketim malları gibi ani darbelere ve şok yüklemelere maruz kalabilecek uygulamalarda tercih edilmesinin temel nedenlerinden birini oluşturmaktadır (Osswald, Baur and Rudolph, 2019).

Wicks ve arkadaşları (2007) ile Ziemian ve arkadaşları (2012) tarafından bildirilen deneysel veriler, ABS'nin sırasıyla 35-50 MPa çekme mukavemeti ve 10-20 kJ/m² darbe dayanımı sergilediğini göstermektedir. Bu mekanik özellikler, polimerin hem mukavemet hem de tokluk gerektiren mühendislik uygulamalarına uygunluğunu kanıtlamaktadır. Ancak, nihai mekanik performansın, polimer matrisine eklenen dolgu maddeleri, takviyeler ve özellikle enjeksiyon kalıplama basıncı, eriyik sıcaklığı gibi üretim koşullarından önemli ölçüde etkilendiği not edilmelidir (Wicks, Jones, Pappas and Wicks, 2007).

Hossain ve arkadaşları (2014) ile Huang ve Singamneni (2015) , erimiş yığılma modelleme tekniği ile üretilen ABS numunelerinin mekanik davranışını detaylı olarak incelemişlerdir. Çalışmalar, malzemenin elastisite modülünün 1.5-2.5 GPa (Hossain, Ramos, Espalin, Perez and Wicker, 2014) ve 1.6-2.1 GPa (Huang) aralıklarında değiştiğini ortaya koymuştur (Huang and Singamneni, 2015). Bu geniş aralık, tabaka kalınlığı, dolgu yoğunluğu, baskı yönü ve nozzle sıcaklığı gibi FDM proses parametrelerinin, malzemenin rijitliği ve dolayısıyla stres altındaki deformasyon davranışı üzerinde doğrudan etkisi olduğunu kanıtlamaktadır. İstenen mekanik özelliklere ulaşmak için bu parametrelerin optimizasyonunun kritik önemi vurgulanmıştır.

Torrado ve arkadaşları (2015) ile Chacon ve arkadaşları (2017), ABS'nin eğilme kuvvetleri altındaki performansını ve sünekliğini araştırmışlardır. Torrado, 55-75 MPa eğilme mukavemeti, 2-3 MPa eğilme modülü ve %10-30 arası kopma uzaması değerleri bildirirken (Torrado, ve diğerleri. 2015); Chacon 50-70 MPa eğilme mukavemeti ve 2.2-2.8 MPa eğilme modülü tespit etmiştir. Eğilme özellikleri, malzemenin yük altında bükülmeye direncinin göstergesi olup, konsol, kiriş veya yüke maruz kalan muhafazalar gibi uygulamalar için hayati öneme sahiptir. Ölçülen kopma uzaması değerleri ise malzemenin gözle görülür bir plastik deformasyon aşamasından sonra kırıldığını, yani sünek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu da ABS'ye, darbe enerjisini emme ve ani kırılmalara karşı direnç gibi ek bir avantaj sağlamaktadır (Chacón, Caminero, García-Plaza and Núñez, 2017).

FDM tekniğiyle üretilmiş, birden fazla kez geri dönüştürülmüş ABS malzemelerdeki mekanik performans düşüşünün temel nedeni, polimer zincirlerindeki kimyasal bozulmadan ziyade yapısal kusurlardır. Cress ve meslektaşlarının (2021), 337 farklı numune üzerinde yürüttüğü kapsamlı araştırma, çoklu geri dönüşüm süreçlerinin neden olduğu mekanik özellik kaybının ana kaynağını bu şekilde ortaya koymaktadır (Cress, ve diğerler. 2021).

Geri dönüşüm sürecinde kullanılan imalat yönteminin nihai ürün özelliklerine nasıl yön verdiğini kavramak adına, enjeksiyon kalıplama tekniği ile yürütülen araştırmaları incelemek öğretici bir perspektif sunar. Rahimi ve ekibinin 2014 yılında ABS malzemesiyle gerçekleştirdiği çalışma, bu duruma çarpıcı bir örnek teşkil etmektedir. Araştırmada, enjeksiyon kalıplama yoluyla işlenen geri dönüştürülmüş ABS'de beklenenin aksine bir davranış gözlemlenmiştir: malzemenin çekme ve eğilme mukavemetinde hafif bir iyileşme kaydedilirken, darbe direncinin ise ciddi oranda azaldığı tespit edilmiştir. Bu zıt sonuçlar, her bir işlemin malzeme yapısında farklı değişikliklere yol açtığını ortaya koymaktadır. FDM metodunun içsel bir sorunu olan gözeneklilik ve tabaka bağlanma kusurları, enjeksiyon kalıplamanın ise polimer zincirlerinde sebep olduğu yönsel dizilim (oryantasyon), geri dönüştürülmüş polimerin mekanik davranışını birbirinden belirgin şekilde farklılaştıran temel etmenler olarak öne çıkmaktadır (Rahimi, 2014).

Liang ve Gupta (2021), mekanik özellikler üzerine yaptıkları bir araştırmada, %85 saf ABS ve %15 atık ABS'den oluşan karışımın çekme mukavemetini incelemiş ve bu karışımın dayanım değerlerinin saf ABS'ye kıyasla oldukça benzer olduğunu gözlemlemişlerdir (Liang and Gupta, 2001).

Perez ve ekibinin (2010) yaptığı çalışmada, ABS malzemesi defalarca (10 kez) geri dönüştürülmüş ve bu işlemlerin malzemenin akış özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları tekrarlanan geri dönüşüm döngüleri sonucunda malzemenin eriyik akış indekisinde (MFI) bir artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Mekanik dayanım testlerinde ise, geri dönüştürülmüş ABS'nin çekme mukavemetinin saf malzemeden çok az farklılık gösterdiği, hatta neredeyse aynı seviyede kaldığı tespit edilmiştir. Araştırmacılar, bu beklenmedik dayanıklılığın ardındaki nedeni, ABS'nin kimyasal yapısında bulunan ve bozulmaya karşı direnç gösteren güçlü stiren-akrilonitril (SAN) kopolimer bağlarına bağlamışlardır (Perez, ve diğerleri. 2010).

Wang ve ekibinin (2015) araştırmalarında, elektrik-elektronik atığı kaynaklı ABS plastiğinin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla epoksi temelli bir geri dönüşüm katkı maddesi (Joncryl-ADR-4370) kullanılmış ve bu modifiye edilmiş atık malzemenin performansı saf ABS ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneylerde, %0,3, %0,5, %0,7 ve %0,9 oranlarında katkı maddesi ilave edilen numuneler test edilmiştir. Sonuçlar, katkı maddesinin mekanik özellikler üzerinde kayda değer bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Darbe dayanımı, saf malzemedeki 11.6 kJ/m² değerinden, atık ABS'de 2.1 kJ/m²'ye kadar düşmüş; ancak %0,7'lik katkı oranı ile bu değer 6.3 kJ/m² seviyesine yükselmiştir. Benzer şekilde, çekme dayanımında da saf ABS'nin 38.7 MPa değerine karşılık, atık malzeme 20 MPa ölçülmüş, %0,9 katkı maddesi ile ise dayanım 43.7 MPa gibi saf malzemenin de üzerinde bir seviyeye ulaşmıştır. Bu bulgular, uygun türde ve orandaki bir akışkanlaştırıcı katkı maddesi ile işlem görmüş atık ABS'nin, sadece geri kazanılmakla kalmayıp, bazı mekanik özellikler bakımından saf ABS'nin yerini alabilecek kalitede ürünlerde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır (Wang, ve diğerleri. 2015).

Samoylenko ve arkadaşlarının 2023 yılında yaptığı çalışmada, sanayi atığı kalsiyum karbür kalıntısı (CCR) kullanılarak geri dönüştürülmüş ABS'nin mekanik özellikleri incelenmiş olup, %20 CCR katkısıyla malzemenin elastikiyet modülünde 1,62 GPa'dan 1,95 GPa'ya önemli bir artış gözlenirken, buna karşılık çekme dayanımında belirli bir azalış tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, endüstriyel atıklarla güçlendirilmiş geri dönüştürülmüş ABS'nin, rijitlik gerektiren özel uygulamalar için mekanik profilinin özelleştirilebileceğini ortaya koymaktadır (Samoylenko, Rodygin and Ananikov, 2023).

Mantaux ve ekibi (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ABS malzemesi ekstrüzyon ve kimyasal işlemlerden oluşan bir geri dönüşüm sürecine tabi tutulmuş ve sonrasında malzemenin performansı çeşitli testlerle değerlendirilmiştir. Yapılan mekanik test sonuçları, 6 ve 12 aylık yaşlandırma işlemine maruz bırakılan geri dönüştürülmüş ABS'nin çekme dayanımının, saf malzeme ile karşılaştırılabilir seviyelerde kaldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, aynı yaşlandırma koşullarının malzemenin darbe dayanımı üzerinde çok daha belirgin bir etkisi olmuş ve bu özellikte yaklaşık %50'lik bir azalma gözlemlenmiştir (Mantaux, ve diğerleri. 2004).

Boldizar ve Möller (2003), ABS malzemesinin tekrar işleme ve hızlandırılmış yaşlandırma koşulları altındaki bozunma davranışını sistematik olarak inceleyen bir araştırma yürütmüşlerdir. Çalışma kapsamında, malzeme ekstrüzyon yöntemiyle geri dönüştürülmüş ve 90°C’de 72 saat süreyle yaşlandırılmıştır. Araştırmacılar, ekstrüzyon döngüsü sayısının, yaşlandırma işleminin ve bu iki faktörün birlikte malzemenin eriyik akış indeksi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yaşlandırma işlemi sonrasında numunelere frezeleme ve delme işlemleri uygulanmış ve ardından tekrar ekstrüzyondan geçirilmiştir. Ekstrüzyon işlemi 200-230°C sıcaklık aralığında, 100 dev/dak vida hızında ve 20x0.8 mm ölçülerindeki bir kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular, sadece yaşlandırma veya sadece geri dönüşüm işlemlerinin malzemenin akış özellikleri üzerinde kayda değer bir farklılık oluşturmadığını göstermiştir. Ancak, her iki işlemin birlikte uygulandığı durumlarda, dördüncü geri dönüşüm döngüsünden itibaren eriyik akış indeksinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, yaşlandırma süresince malzemenin kopma uzamasında önemli bir azalma tespit edilmiş; bu değer başlangıçtaki %30 seviyesinden, 235. Saatin sonunda %5 seviyelerine kadar düştüğü belgelenmiştir (Boldizar and Moller, 2003).

ABS’nin termal kararlılığı, 90°C ve 120°C sıcaklıklarda gerçekleştirilen hızlandırılmış yaşlandırma testleri ile araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, 120°C’deki ısı maruziyetinin, kritik bir süre aşıldığında, polimerin darbe direncinde geri dönüşü olmayan bir zayıflamaya yol açtığını göstermiştir. Söz konusu mekanik performans düşüşünün arka planında, yüzeyde meydana gelen ve polimer zincirlerinin parçalanması/çapraz bağlanması gibi süreçlerle karakterize edilen bozulmalar yatmaktadır. ABS’nin maruz kaldığı bu termo-oksidatif aşınma, sıcaklığa bağımlı bir reaksiyon kinetiği sergilemekte; dolayısıyla düşük sıcaklıklarda (90°C) malzeme bütünlüğündeki ve mekanik davranışındaki olumsuz değişimler, yüksek sıcaklıklara kıyasla çok daha az şiddetli seyretmektedir (Tiganis, Burn, Davis and Hill, 2002).

Yapılan araştırmada (Ahn ve arkadaşları, 2002), FDM ile üretilen ABS’lerin mekanik performansının, aynı malzemenin enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş haline göre belirgin şekilde daha düşük olduğunu, çekme dayanımının tipik olarak %65-72 bandında seyrettiğini ortaya koymuştur. Bu karşılaştırmalı sonuç, enjeksiyon kalıplamanın, FDM parçalarının niteliklerini ölçmek için bir mihenk taşı olarak benimsenmesine neden olmuştur (Ahn, Montero, Odell, Roundy and Wright, 2002).

Yapılan araştırmada, saf Polikarbonat (PC), saf ABS ve PC/ABS polimer alaşımının, UV ışınlarının etkisiyle moleküler zincir yapılarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışma kapsamında her üç malzeme grubu da toplam 96 saat boyunca UV yaşlandırma testine tabi tutulmuş ve bu süreç, polimer zincirlerindeki kimyasal bağ dönüşümlerini izlemek amacıyla 8 farklı zaman aralığında Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi analizi ile takip edilmiştir. Deneyler sonucunda, UV kaynaklı bozulmanın ve zincir yapısındaki kimyasal değişikliklerin en belirgin şekilde, malzeme karışımı içerisindeki ABS fazında meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, ABS bileşeninin UV radyasyonuna karşı polikarbonata kıyasla daha hassas olduğunu ve bozunma süreçlerinin başlıca bu bölgede yoğunlaştığını ortaya koymaktadır (Fan, Li, Yang and Chen, 2017).

Atık elektrikli ve elektronik eşyalar (AEEE) kaynaklı plastik atıklar arasında büyük bir paya sahip olan ABS'nin geri dönüştürölmesi, çevresel açıdan gerekli bir uygulama olmanın ötesinde, aynı zamanda ekonomik açıdan da cazip bir seçenek sunmaktadır. Ponnappalli (2017) çalışmasında, geri dönüştürölmüş ABS granüllerin kilogram fiyatının yaklaşık 6,6 ABD doları seviyesinde olduğunu, ancak aynı malzemenin 3D yazıcı filamentine dönüştürölmesi durumunda kilogram fiyatının 22 ABD dolarına kadar yükselebildiğini ortaya koymaktadır. Bu belirgin fiyat farkı, atık ABS'nin yeniden hammadde olarak üretim süreçlerine kazandırılması için güçlü bir ekonomik teşvik oluşturmaktadır (Ponnappalli, 2020).

2.YÜZER GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİ

Yüzer Güneş Enerji Sistemleri, teknolojik ilerlemeler ve sürdürülebilir enerji ihtiyaçları doğrultusunda mühendislik perspektifiyle tasarlanan yenilikçi çözümler olarak 21. yüzyılın başlarında ortaya çıkmıştır. Bu sistemler, arazi kullanımını minimize etmesi, su kaynaklarının buharlaşma kayıplarını azaltması ve çeşitli su yüzeylerine adapte edilebilmesi gibi avantajlarla öne çıkmaktadır.

Fotovoltaik panellerin su üzerinde yüzen platformlara entegre edilmesiyle oluşturulan Yüzer Güneş Santralleri, baraj gölleri, endüstriyel rezervuarlar, atık su arıtma tesisleri ve hatta denizel ortamlar gibi farklı su kaynaklarında kurulum imkânı sunarak geleneksel kara tabanlı sistemlere kıyasla esnek bir altyapı sağlamaktadır.

Yüzer Güneş Teknolojileri, arazi maliyetlerini sıfıra indirmesi, su ekosistemlerini koruyucu etkisi ve enerji üretiminde verimliliği artırması nedeniyle küresel ölçekte giderek yaygınlaşan bir enerji üretim modeli haline gelmiştir. Özellikle tarımsal sulama havuzları veya maden ocakları gibi atıl su alanları, bu sistemler için ideal konumlar olarak değerlendirilmektedir.

2.1.Yüzer Güneş Enerji Santralleri Tarihsel Gelişimi

Başlangıçta güneş fotovoltaik panelleri, zemin veya çatı montajı şeklinde kara üzerinde uygulanırken, giderek daha fazla ülkede su rezervuarları, göller ve barajlar gibi korunaklı sularda yüzen sistemlerin kurulmasına yönelik girişimler başlamıştır. Bu gelişmenin arkasında, küresel enerji talebinin düşük karbon kaynaklarına yönelmesi ve Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2020 raporunda belirtildiği gibi, yenilenebilir enerji kaynaklarının 2025 yılına kadar güç kapasitesi artışının %95'ini karşılayabileceği beklentisi yatmaktadır (IEA, 2020).

İlk YGES uygulamaları çoğunlukla göller ve rezervuarlar gibi korunaklı sularda denenmiştir. Bu sistemlerin korunaklı ortamlarda güvenilir biçimde enerji üretebildiğini göstermiştir (Kim, Oh and Park, 2019). Zamanla, YGES teknolojileri dalga ve rüzgâr gibi çevresel etkilere dayanacak şekilde modüler ve elastik yapılarda geliştirildi (Liu H., Kumar A. and Reindl T. 2020). HDPE malzemeden yapılan modüler YGES sistemlerinin dalga etkisi altındaki dayanımını sonlu eleman simülasyonları ile analiz etmiş ve bu yapıların maksimum gerilmelere karşı güvenle çalışabileceğini ortaya koymuştur (Dai, ve diğerleri. 2020).

Son dönemde ise YGES teknolojileri açık deniz ortamlarına taşınmaya başlamıştır. Singapur gibi kıyı şehirlerinde, YGES'lerin açık deniz kurulumu planlanmakta ve bu kapsamda çeşitli modelleme ve tasarım analizleri yapılmaktadır (Golroodbari and van Sark, 2020). Özellikle soğuk deniz suyunun FV panellerini serin tutması sayesinde, bu sistemlerin kara tabanlı güneş tarlalarına kıyasla yaklaşık %13 daha fazla enerji üretimi sağladığı bildirilmektedir. Veraart vd. (2020) ise Hollanda açıklarındaki Kuzey Denizi'nde yüzer güneş çiftliklerinin deniz yosunu üretimi gibi çok amaçlı kullanımlar için entegre edilebileceğini göstermiştir.

2.2. Dünyada Yüzer Güneş Enerji Santralleri

Dünyada yüzer güneş enerjisi sistemlerinin uygulanmasına yönelik ilk örnek, 2007 yılında Japonya'nın Aichi Eyaleti'nde konumlanmış bir hidroelektrik santralinin rezervuar alanı üzerine kurulan 20 kW kapasiteli pilot tesis ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu proje, Japonya Ulusal İleri Endüstriyel Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST) tarafından yürütülmüş olup, FV performans parametrelerinin su ve hava soğutma teknikleri kullanılarak karşılaştırmalı analizini amaçlamaktadır. Sistemin hidroelektrik altyapı ile entegre edilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının sinerjik kullanımına dair öncü bir yaklaşım sunarak, sonraki dönemlerdeki çoklu enerji üretim modellerine referans teşkil etmiştir (Trapani and Santafe, 2015).

Dünyadaki kurulu güneş enerjisi kapasitesine bakıldığında, Doğu Asya ülkelerinin bu alanda öncü bir konumda olduğu görülmektedir. Özellikle Çin hem toplam kapasitesi hem de devasa ölçekli tesisleri ile küresel anlamda liderliğini sürdürmektedir. Bu kapsamda, Çin'in Anhui eyaletinde bulunan ve CECEP-CielveTerre tarafından işletilen yüzer güneş enerjisi santrali, dünyanın bu alandaki en yüksek kapasiteli tesislerinden biridir. Yaklaşık 70 MW'lık kurulu gücü ile santral, su yüzeyini verimli bir şekilde kullanarak temiz enerji üretiminde önemli bir örnek teşkil etmektedir (Bulut, Kaplanoğlu ve Geylani, 2018).

Kuzey Amerika, Asya ve Afrika kıtalarının yüzer güneş enerjisi santrali potansiyeli oldukça yüksek olmakla birlikte, bu potansiyeli fiiliyata dökme ve teknolojiyi yaygınlaştırma konusunda başı Asya ülkeleri, özellikle de Çin çekmektedir. Küresel ölçekte, Çin'deki mevcut YGES kurulumları, dünyadaki toplam yüzer güneş enerjisi kapasitesinin yaklaşık %73'ünü oluşturarak, ülkenin bu alanda ne denli baskın bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır (Günler, 2021).

Fransız Ciel ve Terre firması, geliştirdiği "Hydrelío" adlı yüzer platform tasarımıyla, Japonya'daki Yamakura Baraj Gölü'nde 13.7 MW kapasiteli bir projeyi hayata geçirerek sektörde önemli bir kilometre taşı oluşturmuştur. Bu tesis, uzun bir süre boyunca dünyanın en büyük yüzer GES'leri arasında yer almış ve Hydrelío teknolojisinin uygulanabilirliğini kanıtlamıştır (Desai, Wagh and Shinde, 2017).

İtalya'nın Bubano bölgesinde kurulu, şebekeye bağlı ticari bir 500 kWp gücündeki YGES ve bu sistemin 3 boyutlu şematik tasarımı incelenmiştir. İlgili çalışmada, geliştirilen bu sistem ile enerji verimliliğinin %20-25 oranında artırıldığı iddia edilmektedir.

Çizelge 2.1. Ülkelerin yüzer güneş santral kapasitesi (Günler, 2021)

Ülke	Toplam Kapasite (MW)
Çin	376,50
Japonya	22,66
Birleşik Krallık	9,33
Güney Kore	6
Avusturalya	4

Japonya ve Güney Kore gibi ülkeler, deniz tabanlı yüzer güneş enerjisi sistemlerinin teknik ve çevresel uygunluğunu değerlendirmek amacıyla araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerine yoğunlaşmıştır. Öte yandan, Avustralya ve Hindistan gibi yüksek sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalan bölgelerde, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini hedefleyen ve buharlaşma kayıplarını azaltmaya odaklanan hibrit enerji üretim sistemleri üzerine multidisipliner araştırma çabaları öne çıkmaktadır. Hindistan özelinde ise, artan enerji maliyetlerine karşı alternatif üretim modelleri geliştirmek ve mevcut 44 GW'lık hidroelektrik kapasitesinin rezervuar alanlarını entegre sistemlerle değerlendirmek üzere politikalar tasarlanmaktadır. Bu stratejik hedef doğrultusunda, ülke 2017 sonrası dönemde hidroelektrik santrallerin yanı sıra su kanalları üzerinde kurulum olanaklarını araştıran projeleri de kapsayacak şekilde yenilenebilir enerji altyapısını çeşitlendirme stratejisini genişletmiştir. Söz konusu girişimler hem enerji verimliliğini artırma hem de su kaynaklarının korunmasına yönelik entegre çözümlerin geliştirilmesi açısından dikkat çekicidir (The World Bank, 2018).

Dünya genelinde faaliyet gösteren en büyük yüzer güneş enerjisi santrali, Çin'in Dezhou Dingzhuang bölgesinde 320 MW kurulu güç kapasitesine sahip olarak konumlandırılmıştır. Bu tesis hem teknolojik altyapısı hem de ölçek bakımından sektörde öncü bir rol üstlenmektedir (Yıldız ve Akgul, 2023).



Resim 2.1. Dezhou Dingzhuang YGES tesisi

2.3. Türkiye’de Yüzer Güneş Enerji Santralleri

Türkiye'deki ilk yüzer fotovoltaik sistem, Temiz Yaratıcı Teknolojiler (TYT) firması ile TÜBİTAK iş birliği kapsamında 2014 yılında Mersin'in Mut ilçesinde yer alan Azmak 2 Hidroelektrik Santrali (HES) rezervuar alanına tesis edilmiştir. Bahsi geçen proje, küresel ölçekte bir hidroelektrik santral rezervuarı üzerine konumlandırılan ilk entegre yüzer güneş enerjisi sistemi olarak literatürde yerini almıştır. Sistemin hidrolojik ve enerjetik sinerjisi sayesinde, rezervuardan yıllık 720 metrik ton su kaybının buharlaşma yoluyla gerçekleşmesi önlenerek kaynak verimliliği artırılmıştır (Polat, 2022).

İstanbul Enerji ve İstanbul su ve Kanalizasyon İşleri Müdürlüğü’nün (İSKİ) ortak projesi kapsamında, Büyükçekmece Gölü üzerine toplam kapasitesi 210 kW olan bir Yüzer Güneş Enerji Santrali kurulmuştur. Bu santral, 120 kW ve 90 kW gücünde olmak üzere iki farklı üniteden oluşmaktadır. Sistem, ilk aşamada 9 kW'lık bir prototip tesisin kurulumuyla test edilmiş, ardından farklı platform tasarımları ve montaj açıları kullanılarak nihai 210 kW'lık YGES devreye alınmıştır. Yüzer santrallerin performansını, geleneksel karasal sistemlerle doğrudan karşılaştırmak için aynı bölgeye

30 kW gücünde bir karasal GES de inşa edilmiştir. Projenin bilimsel olarak izlenmesi ve veri analizlerinin yapılması amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ile bir iş birliği protokolü imzalanmıştır (tr.tyt.com.tr).



Resim 2.2. İstanbul Büyükçekmece YGES (Polat, 2022)

2020 yılında İstanbul Pendik Marina'da hayata geçirilen YGES, 50 kW kurulu güce sahiptir. Santralin yüzer platformunun su yüzeyinden yüksekliği 60 cm olarak tasarlanmış olup, fotovoltaik panelleri taşıyan sistem, saatte 150 kilometre hıza ulaşan rüzgarlara dayanıklılık gösterecek şekilde inşa edilmiştir (Polat, 2022).



Resim 2.3. İstanbul Pendik marina YGES (Polat B., 2022)

Elâzığ'da bulunan Kuzova Pompaj Sulaması'nın enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla Devlet Su İşleri (DSİ), Keban Baraj Gölü üzerine yaklaşık 1 megavat (MW) kurulu gücünde bir Yüzer Güneş Enerji Santrali inşa etmiştir. Bu tesis, Türkiye'de yüzer güneş santralleri alanında atılmış öncü bir adım niteliğinde olup, Kuzova Yüzer GES AR-GE Projesi adıyla dikkat çekmektedir.

Keban Barajı'na dört ayrı blok halinde yerleştirilen santral, 6 dönümlük bir alana yayılan 1840 güneş panelinden oluşmaktadır. Söz konusu projenin, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından yürütülen Kuzova Pompaj Sulaması için gerekli elektriğin önemli bir bölümünü sağlaması planlanmaktadır. Sistemin devreye alınmasıyla, 7 farklı köyde yer alan toplam 4.783 hektar tarım arazisinin modern sulama yöntemleriyle desteklenmesi hedeflenmektedir. Santralin yıllık 1 milyon 806 bin kilovatsaat olarak öngörülen elektrik üretim kapasitesinin ise, güncel tarifeler üzerinden hesaplandığında yaklaşık 5,6 milyon TL'lik bir ekonomik değer oluşturması beklenmektedir (İletişim.gov.tr).



Resim 2.4. Keban barajı üzerine kurulan 1 MW YGES

Türkiye'de 2020 sonrası dönemde, yüzer GES projelerine ve bu alandaki yatırımlara olan ilgi belirgin şekilde artmıştır. Bu artışın temel sebeplerinden biri, yatırımcıların enerji maliyetlerini düşürmek amacıyla alternatif çözümler arayışına girmesidir. Yatırımcılar, kurdukları bu santrallerde öncelikle kendi enerji ihtiyaçlarını karşılamakta, üretilen fazla elektriği ise elektrik dağıtım şirketlerine satarak ek bir gelir elde etmektedir.

Çizelge 2.2. Türkiyede kurulu YGES tesisleri

İşletme Adı	Şehir	Kurulu Güç
Azmaç Yüzer GES	Mersin, Mut	20 kWp
Büyüçekmece Gölü Yüzer GES	İstanbul	240 kW
Kuzova Yüzer GES	Elazığ, Keban Barajı	1 MW
Pendik Marina Yüzer GES	İstanbul, Pendik Marina	41 kWp

2.4. Yüzer Güneş Enerji Tesisi

Günümüz mühendislik metodolojileri ve gelişen teknoloji, mevcut ve gelecekteki zorluklara kapsamlı çözümler sunma kapasitesine sahiptir. Bu yaklaşımların bir ürünü olan YGES, geleneksel arazi tabanlı fotovoltaik sistemlerinden ayrılan, sahada farklı bir uygulama sunarak yenilikçi avantajlar sağlayabilmektedir.

Yüzten güneş enerjisi çiftlikleri, kara yerine göller, rezervuarlar veya deniz gibi su yüzeylerine kurulan sistemler olup, FV modüllerinin özel yüzer platformlar üzerine yerleştirilmesiyle çalışmaktadır. Bu yapılar, büyük ölçekli güneş enerjisi üretimi için uygulanabilir ve etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Sree, ve diğerleri. 2022). YGES, temel işleyiş prensibi açısından karasal fotovoltaik sistemlerle benzerlik göstermekle birlikte, elektriksel düzeneklerinde belirgin farklılıklar sergilemektedir. Bu santral tipi, su yüzeyinde konumlandırılan bir yüzer platformun sabitletmesinin ardından, fotovoltaik panellerin taşıyıcı dubalar üzerine montajı suretiyle tesis edilmektedir. YGES kurulum alanları arasında barajlar, yapay göller, endüstriyel soğutma havuzları, atık su lagünleri, maden çukuru suları, denizler ve sulama havuzları yer alır. Yüzer fotovoltaik teknolojisi, enerji üretimi gerçekleştirirken aynı zamanda kıt karasal kaynakların korunmasına ve kullanılmayan su yüzeylerinin verimliliştirilmesine katkıda bulunur. Bu sistemlerin önemli bir diğer avantajı, panellerin oluşturduğu örtünün su yüzeyindeki evaporasyonu baskılaması ve böylece önemli miktarda suyun korunmasıdır. Literatür, bu korumanın doğal göl sistemlerinde %33, insan kaynaklı su depolama alanlarında ise %50 mertebelerine ulaşabildiğine işaret etmektedir (Mhaske, 2024).

YGES'lerde enerji üretim verimliliğini düşüren temel faktörlerden biri, fotovoltaik modül sıcaklıklarının üretici spesifikasyonlarındaki optimum değeri aşmasıdır. Güney Kore kaynaklı deneysel bir çalışma, rezervuar yüzeyine entegre edilen bu sistemlerde, paneller ile altlarındaki daha soğuk su kütlesi arasında gerçekleşen ısı transferi sayesinde modüllerin etkin bir şekilde soğutulduğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu araştırmanın doğrulanması halinde, yüzer FV santrallerin karasal FV sistemlere kıyasla daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sergileme potansiyeli bulunduğu ileri sürülebilir (Choi, 2014).

2.5.Yüzer Fotovoltaik Sistemleri Oluşturan Öğeler

Bir yüzer fotovoltaik santral yapısı; fotovoltaik paneller, panellerin su üstünde dengede kalmasını sağlayan yüzer duba sistemleri, çapa/bağlama düzenekleri ve elektrik altyapısı olmak üzere dört temel bileşenin entegrasyonu ile oluşur.

2.5.1. FV sistem

YGES kurulumlarında en yaygın kullanılan fotovoltaik teknoloji kristal silikon temellidir. Mevcut modüller iç su kütlelerinde yeterli işlevselliği korurken, sektörün okyanus tabanlı projelere doğru genişlemesi, modüllerin tuzlu suyun korozyif etkilerine karşı optimize edilmesini gerektirecektir.

Sonuç olarak, geleneksel metal çerçeve sistemlerinin, özelleştirilmiş polimerler veya seramik esaslı malzemeler gibi alternatiflerle değiştirilmesi kritik bir tasarım gerekliliğidir (Sahu, Yadav and Sudhakar, 2016). Bu bileşen, fotovoltaik panellerin birleştirilmesiyle oluşturulan modüler bir yapıdır. Kurulum sürecinde, paneller genellikle rezervuar yakınında konuşlandırılan geçici üretim alanlarına nakledilerek burada fotovoltaik modül grupları halinde montajı gerçekleştirilmektedir. Resim 2.5’de FV panel montajı gösterilmektedir.



Resim 2.5. FV panel

2.5.2.Yüzer Platform

Yüzer fotovoltaik, sistemlerin dalga dinamikleri altındaki yapısal tepkileri ve modüler konfigürasyonları incelenmektedir. Yüzen güneş santralleri, fotovoltaik panellerin su yüzeyinde dinamik stabilizasyonunu sağlayarak, modüler tasarımlarının fotovoltaik dizi taşıma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Dharma, ve diğerleri. 2022).

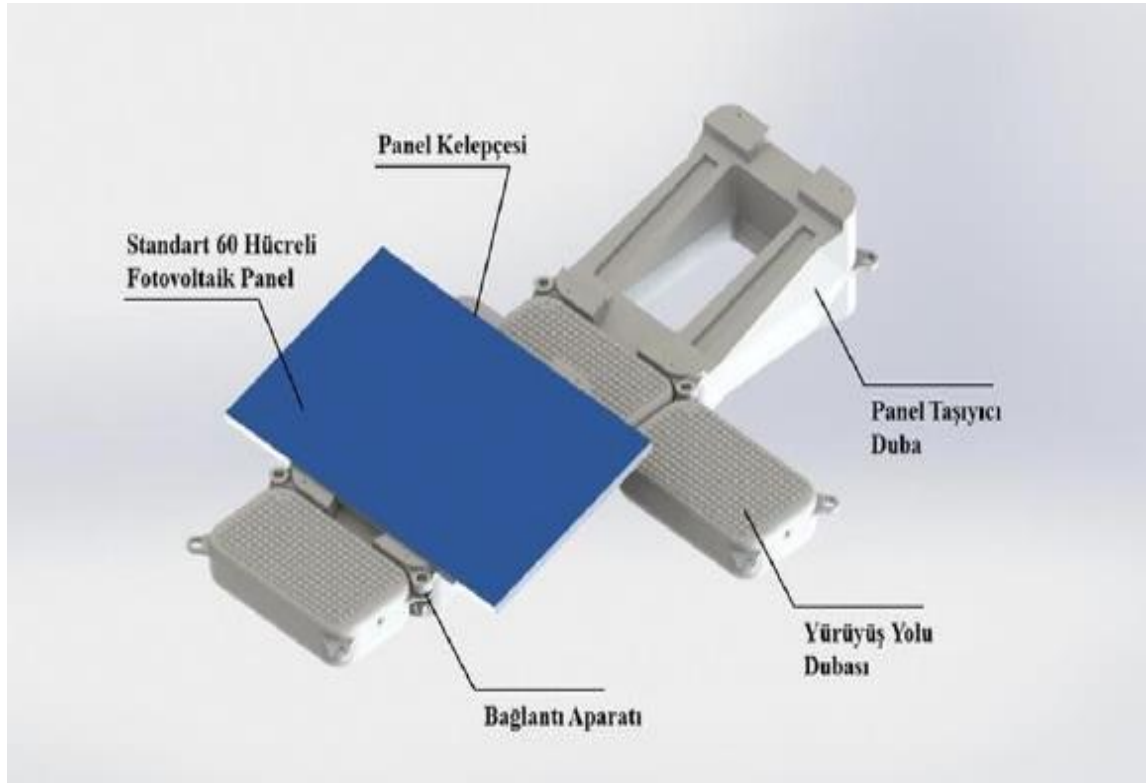
Yüzer platform malzemelerinin çevre dostu bileşimler içermesi, ultraviyole radyasyonuna karşı direnç göstermesi ve deniz suyunun korozyon etkilerine dayanıklılık sergilemesi kritik öneme sahiptir. Ayrıca, -60°C ile $+80^{\circ}\text{C}$ aralığındaki termal dalgalanmalara karşı mekanik bütünlüğünü koruyabilmelidir. Bu malzemelerden, su-karşıtı ortamda 30 yıllık servis ömrü boyunca yapısal performansını sürdürmesi beklenmekte olup, bu gereklilik hızlandırılmış yaşlandırma testleriyle doğrulanmalıdır (Bulut, 2018). Resim 2.6'de Yüzer GES platformu gösterilmektedir.



Resim 2.6. Yüzer GES platformu

Yüzer güneş enerji sistemlerinde kullanılan platformlar, genellikle FV modüllerini taşıyan ana duba ile personel erişimini sağlayan yürüyüş yolu dubasından meydana gelmektedir. Ancak küçük ölçekli uygulamalarda, maliyet ve alan optimizasyonu amacıyla bu iki işlev,

tek bir yüzer yapı üzerinde birleştirilebilmekte; böylece hem taşıyıcı hem de geçiş yolu görevini aynı modül üstlenmektedir. Resim 2.7. YGES taşıyıcı platform gösterilmektedir.



Resim 2.7. YGES taşıyıcı platform

Yürüme yolu dubaları, tesis içerisinde gerçekleştirilen kurulum faaliyetleri, düzenli bakım işlemleri, panel temizliği ve arıza onarımı gibi operasyonel gereksinimler esnasında personelin güvenli bir şekilde dolaşımını sağlamak üzere tasarlanmış fonksiyonel bileşenlerdir.

Fotovoltaik paneller, yüzer platformlar üzerine sabitlenerek karasal uygulamalardakine benzer bir montaj yaklaşımı sergilemektedir. Bu paneller, mekanik bağlantı elemanları kullanılarak dubalara tespit edilebileceği gibi, özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş bir yüzer taşıyıcı sistemin yapısına doğrudan entegre edilerek de konumlandırılabilir (Şençiçek, 2017).



Resim 2.8. İtalya solarolo YGES tesisi

Yüzer Güç Enerji Santrallerinin yaygınlaşması, daha yoğun yapılı tasarımlara yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarını teşvik etmektedir. Resim 2.8. YGES tesisi, 2009 yılında İtalya'da devreye alınmış olup 20 kW kurulu güç kapasitesine sahiptir. Fotovoltaik panellerin alt kısmında termal yönetim amacıyla havalandırma kanalları bulunur. Enerji verimliliğini artırmak için paneller 8° eğim açısıyla konumlandırılmıştır. Sistem bileşenlerine erişim ve bakım kolaylığı sağlanmıştır. Bu konfigürasyonu diğer sistemlerden ayıran temel özellik, fotovoltaik verimi maksimize etmek üzere güneş ışınımını takip edebilen bir dönel mekanizma içermesidir (Shinde, Nalbalwar and Deosarkar, 2019).

2.5.3.Yüzdürücü Sistem (Duba)

Küresel ölçekte kurulu Yüzer güneş enerjisi sistemlerinde, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden imal edilen yüzer platformlar, mekanik özellikleri ve ekonomik avantajları nedeniyle en yaygın şekilde benimsenen taşıyıcı yapı konumundadır. Bu sistem, modüllerin birbirine bağlanabilmesine olanak verecek şekilde tasarlanmaktadır.

Yüzer Sistem, başlıca yürüyüş yolu ve fotovoltaik şamandıraları olmak üzere iki tip yüzer modülden oluşmaktadır. Bu modüler yapılar, genellikle Young modülü 500 MPa olan HDPE malzemeden imal edilmektedir. Komşu modüller, eğilme modülü 10.000 MPa olan naylon pim bağlantı elemanları kullanılarak birbirine sabitlenir. Yüzer GES'ler olarak adlandırılan bu bağlı yüzer modül dizilerinin, sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen simülasyon analizlerine göre, dalga yükleri altında ortaya çıkan maksimum gerilmelere karşı yeterli dayanım gösterdiği tespit edilmiştir (Sree, 2022). Fotovoltaik panellerin taşınması için optimum ışıınım verimi dikkate alınarak 12° eğim açısıyla tasarlanan sistem, dizinin konumsal kararlılığını sağlamak amacıyla deniz tabanına sabitlenmiş çapa sistemleri ile donatılmıştır. Yapısal bütünlük analizleri, bu konfigürasyonun 20 yıllık hizmet ömrü boyunca 210 km/sa rüzgâr hızlarına karşı mekanik direnç gösterebileceğini doğrulamaktadır (Bulut, 2018).

2.5.4. Panel Taşıyıcı Duba

Güneş panellerinin yerleştirildiği yüzey, esas olarak bu panellerin ağırlığını taşıyan ve sistemin su yüzeyinde dengeli şekilde yüzmesini sağlayan bir yüzdürücü yapıdan oluşmaktadır. Bu yapı, karasal fotovoltaik sistemlerdeki taşıyıcı mimariye benzer biçimde tasarlanmış panel taşıyıcı şamandıralar üzerine entegre edilen sabitleme bileşenleri aracılığıyla modüllerin desteklenmesini mümkün kılar. Alternatif olarak, güneş panelleri herhangi bir ara bağlantı elemanına ihtiyaç duyulmaksızın, doğrudan bu amaçla özel olarak geliştirilmiş taşıyıcı şamandıralar üzerine de monte edilebilmektedir. Böylece sistem hem yapısal bütünlük hem de kurulum kolaylığı açısından optimize edilmekte; aynı zamanda su yüzeyindeki çevresel etkilere karşı da dayanıklı hale getirilmektedir (Şençiçek, 2017). Resim 2.9. Yüzer FV sistemler için tasarlanan panel taşıyıcı duba bulunmaktadır.



Resim 2.9. Yüzer FV sistemler için tasarlanan panel taşıyıcı duba

2.5.5.Yürüme Yolu Dubası

Yürüyüş yolu dubaları, teknik personelin; fotovoltaik modüllerin metal alaşımlı üst konstrüksiyonla desteklendiği FV şamandıraları üzerinde güvenli bir şekilde kurulum, denetim ve bakım faaliyetlerini yürütmesi için operasyonel erişim imkânı sağlamaktadır. Yüzer fotovoltaik sistemlerde kullanıma yönelik tipik bir yürüyüş yolu dubası konfigürasyonu, Resim 2.10’da Yüzer FV sistemler için tasarlanan yürüme yolu dubası gösterilmiştir.



Resim 2.10.Yüzer FV sistemler için tasarlanan yürüme yolu dubası

2.5.6.Diğer Duba Türleri

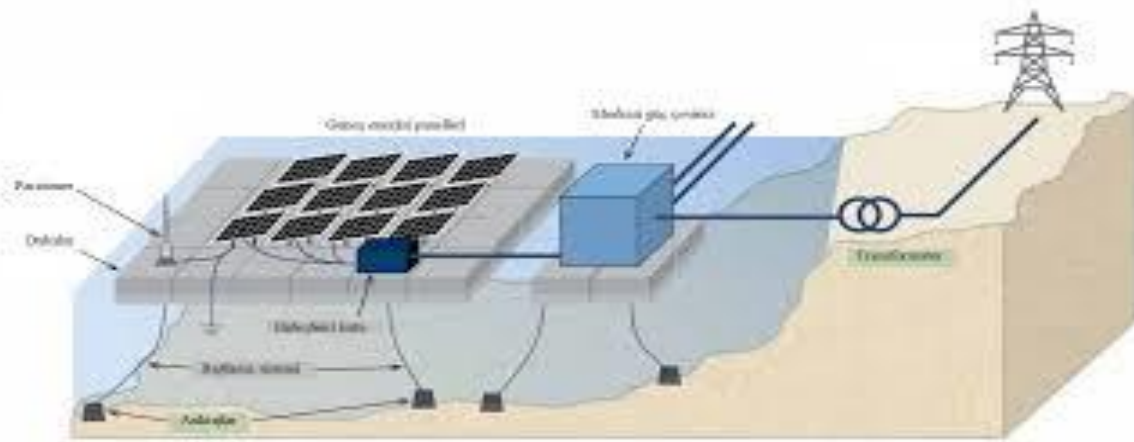
Yüzer FV tesislerinde elektrik ekipmanlarının platform üzerine entegrasyonu, Şekil 2.11'de görülen mukavemet-optimize dubalar ile mümkündür. Bu konfigürasyon, kablo kayıplarının minimize edilmesi ve operasyonel erişimin merkezileştirilmesi gibi avantajlar sunarken, malzemenin korozyon direnci sistem ömrünü desteklemektedir.



Resim 2.11. Solar evirici ve elektrik ekipmanlarının yüzdürüldüğü sistem

2.6.Sabitleme Sistemi

Demirleme altyapısı, konteynerlerin sabitlenmesine imkân veren kalıcı yapısal düzenekleri ifade eder. Bu kapsamda; rıhtı tesisleri, iskele konstrüksiyonları, çapa şamandıraları ve demirleme pontonları tipik uygulama örneklerini oluşturur. Yüzer fotovoltaik sistemlerde ise bu altyapı, platformun pozisyonel stabilitesini sağlayarak panel dizilimlerinin rotasyona uğramasını veya sürüklenmesini engeller. Derin su lokasyonlarında demirleme sistemlerinin kurulumu, artan maliyet ve uygulama zorluğu barındıran mühendislik problemleri yaratabilir. Söz konusu platformların demirlemesi, kıyıdaki sabitleme babalarına bağlanan ve modül köşe noktalarına entegre edilen poliamid tel halat sapanlar vasıtasıyla gerçekleştirilebilir (Sharma, Bharat and Debojyoti, 2015). Resim 2.12’de, yüzer enerji santrallerindeki tipik demirleme konfigürasyonunun teknik detaylarını belirtmektedir.



Resim 2.12.Yüzer FV sistemler için tasarlanan duba sabitleme sistemi

Yüzer FV panellerin gölgeleme elemanı olarak kullanıldığı durumlardaki enerji verimliliğinin değerlendirildiği bir çalışma, montaj sistemlerinin tasarım parametrelerinin, panellerin maruz kaldığı güneş ışınımı miktarını ve neticesinde enerji üretim verimliliğini nasıl etkileyebileceğine dair kritik veriler sunmaktadır. Yüzer uygulamalarda sabitleme düzeneklerinin optimizasyonu, panellerin ideal pozisyon ve yönelimde tutulmasını garanti ederek gölge etkisinin azaltılmasını ve enerji üretim potansiyelinin artırılmasını mümkün kılmaktadır (Cer, 2015).

2.7.Elektriksel Bağlantı

Fotovoltaik panellerde üretilen elektrik enerjisi, karaya iletilmek üzere aktarılır. Bu sayede elde edilen güç, şebekeye entegre edilebilir veya enerji depolama sistemlerinde muhafaza edilebilir. Mevcut yüzer güneş enerjisi tesislerinde, iletim kabloları su altına değil, yüzeyin üzerinden geçirilerek konumlandırılmıştır. Her ne kadar elektriksel bileşenlerin hiçbiri su altında bulunmasa da, sistemin güvenilirliği; uygun şekilde derecelendirilmiş kabloların ve IP67 koruma sınıfına sahip su geçirmez bağlantı kutularının kullanımını zorunlu kılmaktadır. İnvertörler ve batarya bankaları gibi kritik elektrik donanımları ise karada, kuru ve korunaklı bir ortamda tutulmaktadır. Sistemin uzun ömürlü olabilmesi için, yüksek sıcaklıklara dayanıklı, su geçirmez ve mekanik açıdan sağlam kablo seçimi esastır (Sahu, 2016). Resim 2.13. YGES kablolama sistemi görülmektedir.



Resim 2.13. YGES kablolama sistemi

Mesleki güvenlik eğitimlerinde sanal gerçeklik (SG) uygulamalarının entegrasyonu, yüzer fotovoltaik sistemlerdeki elektrik bağlantı işlemlerinin kurulum ve bakım aşamalarında ortaya çıkabilecek risklerin mitigasyonunda önemli bir katkı sağlayabilir. SG teknolojisi, teknisyen ve mühendisler, fiziksel tehlike içermeyen kontrollü bir simülasyon ortamında deneyimleme imkânı sunarak, FV güç sistemlerinin montajı ve bakımı sırasında karşılaşılabilecek potansiyel tehlikeler konusunda derinlemesine farkındalık ve risk algılama becerileri kazandırır. Bu metodoloji, yüzer FV tesislerindeki elektriksel bağlantı süreçlerinin emniyetli yönetimine doğrudan destek olmaktadır (Erten, 2023).

2.8.Şebeke Bağlantı Sistemi

Şebeke entegrasyon altyapısı, fotovoltaik eviriciler ve şebeke bağlantı ünitelerinden oluşmaktadır. Sistemde üretilen doğru akım (DC), özel DC kablolar aracılığıyla FV eviricilere iletilir. Eviricilerde alternatif akıma (AC) dönüştürülen enerji, şebekeye aktarılır. Konfigürasyon olarak, iki farklı FV eviricinin çıkış terminallerinden çıkan AC kablolar, tek bir alternatif akım panosunda (AC pano) toplanacak şekilde tasarlanmıştır (gelecek bilimde. Net, 2020). Resim 2.14. YGES solar evirici sistem görülmektedir.



Resim 2.14. YGES solar evirici sistem

2.9.YGES Avantajları ve Dezavantajları

Yüzer güneş enerjisi santrali sistemleri, enerji üretimi gibi faydaların yanı sıra su rezervuarlarından buharlaşmanın azaltılması gibi ek avantajlar sağlayabilse de, beraberinde belirli sınırlılıkları ve zorlukları da barındırmaktadır.

2.9.1.YGES Avantajları

Yüzer Güneş Enerji Sistemlerinin temel üstünlüklerinden biri, karasal alan kullanımı gerektirmeksizin su yüzeylerine konuşlandırılabilmesidir. Bu özellik, bitki örtüsünün tahrip edilmesi (ağaç kesimi/ot sökümü) gibi ekolojik müdahalelerin önüne geçer. YGES projelerinde kamulaştırma giderleri söz konusu olmadığı gibi, kurulumla ilişkin yasal izin süreçleri ve idari prosedürler de geleneksel karasal sistemlere kıyasla önemli ölçüde kısalmaktadır. (Yakutlu, 2020).

Yüzer güneş enerji sistemleri, kurulum alanı olan su yüzeyinde gölgeleme etkisi yaratarak buharlaşma oranını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, su yüzeyinden yansıyan güneş ışınları ve buharlaşma kaynaklı doğal soğutma etkisi, güneş panellerinin kara tabanlı sistemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda çalışmasına imkân tanır. Bu durum, fotovoltaik modüllerin enerji dönüşüm verimliliğini artırıcı yönde etki eder. Su yüzeyinde yer alan paneller, karasal ortamlara göre daha az toz birikimine maruz kaldığından dolayı temizlik sıklığı azalmakta, bu da dolaylı olarak sistem performansını olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca, yüksek maliyetli araziler kullanılmaksızın kurulum yapılması, bu arazilerin farklı sektörlerde değerlendirilmesini mümkün kılarken, ekonomik getirisi düşük olan su alanlarının enerji üretimi yoluyla değerlendirilebilmesini sağlar. Son olarak, su buharının soğutucu etkisi sayesinde panellerin aşırı ısınması önlenmekte ve sistemin genel verimliliği artırılmaktadır (Desai, 2017).

Güneş panelleri suyun üzerini kaplayıp gölge yaptığı için yosunların (alglerin) güneş alıp aşırı çoğalmasını engeller. (Günler, 2021). Karasal FV çiftliklerinin aksine, yüzer güneş santralleri lokalize ısınma (ısı adası etkisi) oluşturmaz. Geleneksel büyük ölçekli FV tesisleri mikro iklimde sıcaklık artışına yol açarken, su üstü sistemler bu termal dezavantajdan muafiyet gösterir. Ek olarak, yüzer FV teknolojisi karbon emisyonlarının hafifletilmesine katkı sağlar (Goswami, Sadhu, Goswami and Sadhu, 2019).

Yüzer fotovoltaik sistemlerde gölgelenme kaynakları, yalnızca panel-topoloji kaynaklı karşılıklı örtüşmelerle sınırlıdır. Eksternal gölge faktörleri bu konfigürasyonda etkisizdir. Sistem aynı zamanda modüler yapısı sayesinde hızlı devreye alma ve basit montaj avantajı sunar (Şahan, 2022).

2.9.2.YGES Dezavantajları

Su seviyesindeki artış, panellerin dalga, kasırga ve tsunami gibi doğal afetlerden zarar görme riskini artırmaktadır. Ayrıca, kurulumda kullanılan malzemelerin korozyona uğraması, sistemin genel kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Panel yüzeyindeki düşük nem oranı ile yüksek sıcaklık, negatif ısıl kayma etkisi yaratarak verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, suyun derinliklerinde yaşayan canlı türlerinin popülasyonunda azalma gözlenmesi de önemli bir dezavantajdır (Şencicek, 2017).

Yüzer güneş panellerinin daha geniş alanlara yayılmasını engelleyen başlıca iki sorun, yüksek kurulum bedeli ve bakım masraflarıdır. Bu sistemlerde enerji üretmenin maliyeti, özellikle ilk yıllarında, fosil yakıtlarla çalışan santrallere göre yaklaşık 10 kat daha pahalıya gelmektedir (Sharma, 2015).

Denize kurulan yüzer güneş enerji santralleri, geniş alan kaplamaları yüzünden gemi geçiş yollarını daraltabilir ve deniz trafiğini aksatabilir. Bu sorunu çözmek ve kazaları önlemek için, her projeye özgü olarak; gemi rotalarının yeniden düzenlenmesi, güvenli geçiş bölgelerinin belirlenmesi ve gerektiğinde özel deniz trafik kurallarının uygulanmasını içeren detaylı rota planları hazırlanır (Yakutlu, 2020).



3. PLASTİK MALZEMLER

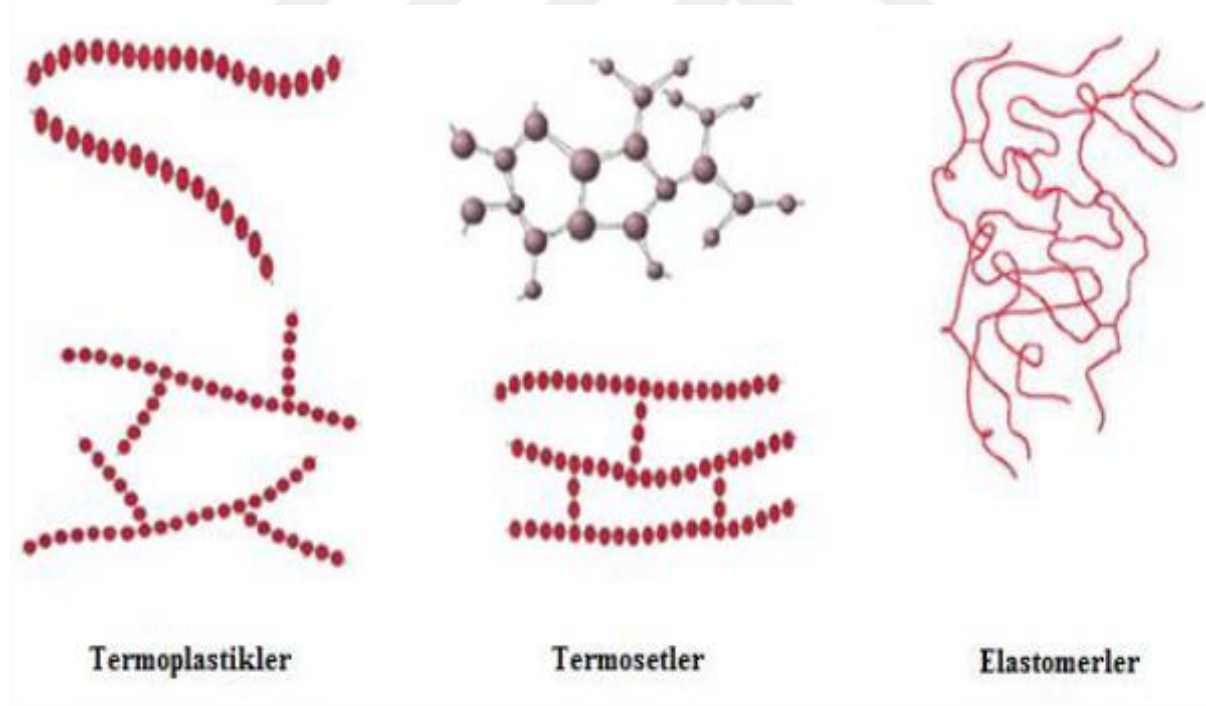
Plastikler, organik polimer yapısına sahip malzemelerdir ve normal oda koşullarında genellikle katı haldedir. Bu malzemeler, uygun sıcaklık ve basınç uygulanarak şekillendirilebilir. Polimerler, yüksek moleküler ağırlığa sahip büyük moleküllerdir ve 'monomer' adı verilen temel organik bileşiklerin birleşmesiyle sentezlenir. Tek tip monomer biriminden oluşan polimerler 'homopolimer', iki farklı monomer içerenler 'kopolimer', üç farklı monomer birimi barındıranlar ise 'terpolimer' olarak sınıflandırılır (Kaya, 2005).

Plastiklerin temelini oluşturan polimerler, kendine özgü makromoleküler ağ yapılarıyla dikkat çekerler. Bu polimer zincirleri, ısıya maruz kaldıklarında bir gevşeme ve birbirinden ayrılma süreci yaşarlar. Tersine, soğutulduklarında ise birbirlerine yeniden kenetlenerek katılaşırlar ve yapısal bütünlüklerini geri kazanırlar. Bu polimer zincirlerini bir arada tutan bağlar, güçlerine göre farklılık gösterir. En zayıf olanlar Van der Waals kuvvetleri veya London dispersiyon kuvvetleri gibi zayıf moleküller arası kuvvetler iken, hidrojen bağları ve dipol-dipol etkileşimleri gibi nispeten daha güçlü etkileşimler de bulunabilir. Bu bağların türü ve kuvveti, malzemenin nihai mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkiler (Güller ve Çobanoğlu, 1997).

Plastik malzemeler, düşük maliyet, hafiflik, yüksek mekanik mukavemet ve mükemmel kimyasal korozyon direnci gibi temel özellikleriyle öne çıkmaktadır. Ek olarak, üstün ısı ve elektrik yalıtım kabiliyetleri sergilerler. Bu malzemelerin temelini oluşturan polimerlerin gösterdiği olağanüstü çeşitlilik ve özelliklerin uyarlanabilirliği (tunability), malzeme mühendisliğinde kritik bir avantaj sağlar. Sonuç olarak, plastikler, tıbbi cihazlardan (protezler, tek kullanımlık malzemeler) ileri teknoloji bileşenlerine kadar, modern yaşamı ve endüstriyel ilerlemeyi şekillendiren çok geniş bir yelpazede sofistike ürünlerin imalatını mümkün kılmaktadır (Andrady and Neal, 2009).

Endüstriyel ve tüketici pazarında tüketim hacmi en yüksek olan polimerler arasında polipropilen (PP), polietilen (PE) ve polivinil klorür (PVC) öne çıkmaktadır. Özellikle HDPE ve PP, termoplastik aileye ait olmalarının sağladığı ergitilebilirlik ve yeniden şekillendirilebilirlik özellikleriyle, tüketici ürünleri pazarında yaygınlık göstermektedir. Bu termoplastiklerin aynı zamanda etkin geri dönüşüm akışlarına dahil edilebilmeleri, ambalaj malzemeleri başta olmak üzere çeşitli uygulamalarda yeniden kullanım potansiyellerini önemli kılmaktadır (Anto and Rejeesh, 2023).

Termoplastik polimerler, düşük yoğunluklu çapraz bağlanma (cross-linking) içeren moleküler yapıları sayesinde karakteristik esneklik özellikleri sergilerler. Bu malzemeler, ısı ve basınç etkisi altında geri dönüşümlü deformasyona uğrayabilmekte, ancak uygulanan termomekanik koşullar ortadan kalktığında orijinal konformasyonlarına (şekil hafızası) dönme eğilimi gösterirler. Termoplastikler, termosetler ve elastomerler arasındaki temel ayrım, zincirler arası bağlanma derecesi ve bağ tipi (fiziksel/kimyasal) ile belirlenen bu moleküler ağ topolojisidir. Resim 3.1. Plastik malzemelerdeki bağ çeşitleri görülmektedir.



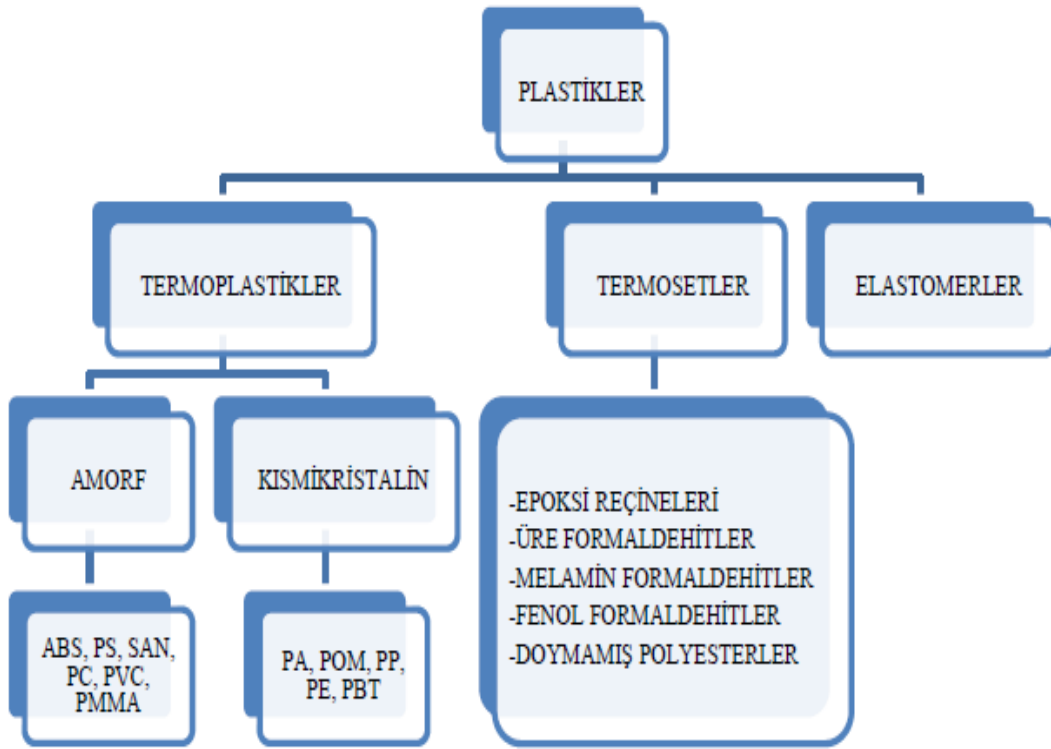
Resim 3.1. Plastik malzemelerdeki bağ çeşitleri

Küresel plastik üretiminin yaklaşık %75-80'lik kısmı, buzdolabı, çamaşır makinesi, televizyon gibi beyaz eşyaların yanı sıra otomotiv komponentleri, konut ve bahçe mobilyalarını içeren dayanıklı tüketim mallarına tahsis edilmektedir. Bu segment içerisinde, plastik variller, endüstriyel bidonlar ve çöp konteynerleri gibi uzun ömürlü ambalaj çözümleri ise yaklaşık %50'lik bir paya sahiptir (Kıralp, ve diğerleri. 2006).

Kontrolden çıkmış plastik atık yönetimi, toprak, iç su kaynakları ve okyanuslarda kirliliğe yol açarak çevresel bozulmaya ve insan sağlığı risklerine neden olmaktadır. Ek olarak, gıda ve içme suyu yoluyla insanlar ile diğer canlıların plastik nanopartiküllere maruz kalma oranındaki artış, bu partiküllerin uzun vadeli etkilerine dair belirsizliği derinleştirmektedir. Bu uygunsuz bertaraf yöntemleri, doğal ekosistemler üzerinde yıkıcı etkilere sahiptir ve plastik üretiminin artışı ile yakma işlemlerinden kaynaklanan karbondioksit salınımının yıllık artışı nedeniyle iklim değişikliğini beslemektedir (wwf, 2019).

Polimerik malzemelerin yeniden değerlendirilmesi (reuse) ve geri dönüşümü (recycling), kaynak verimliliğini artırarak çevresel ayak izlerini önemli ölçüde minimize etmekte ve birincil plastik hammaddelerine olan bağımlılığı azaltmaktadır. Bu süreçlerin etkin uygulanması sonucunda, tüketici sonrası (post-consumer) plastik atıklarından üretilen çok sayıda ticari ve kamusal ürün geliştirilmiştir. Bu ürün portföyü, iç mekân döşemeleri (halılar), süs eşyaları (vazolar), ofis/organizasyon ekipmanları (kâğıt toplama kutuları) ve açık alan mobilyaları (park bankları, piknik masaları) gibi çeşitli kategorileri kapsamaktadır (Kazemi, 2013).

Günlük dilde sıkça birbirinin yerine kullanılan plastik ve polimer terimleri, bilimsel açıdan farklı anlamlar taşır. Bir polimer, çok sayıda monomerin kovalent bağlarla birleşerek oluşturduğu büyük bir moleküldür. Yani polimer, malzemenin temel kimyasal yapısını tanımlar. Plastik ise, bir polimere belirli bir kullanım amacı doğrultusunda çeşitli katkı maddeleri (örneğin, renklendiriciler, stabilizatörler, dolgu maddeleri) eklenerek elde edilen bir malzemedir. Bu katkılar, polimerin mekanik, termal, optik ve kimyasal özelliklerini geliştirerek onu istenen uygulamaya uygun hale getirir. Kısacası, her plastik bir polimer içerir; ancak her polimer plastik değildir. Plastiklerin detaylı sınıflandırılması, ilgili tablo 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Plastiklerin sınıflandırılması

3.1.Elastormeler

Elastomerlerin en temel ve karakteristik özelliği, uygulanan mekanik deformasyon (sıkıştırma veya gerilme) sonrasında kalıcı şekil değişimine uğramadan orijinal konfigürasyonlarına geri dönebilme yeteneğidir. Bu üstün viskoelastik geri kazanım davranışı, bu malzemeleri günlük yaşamda ve endüstride yaygın olarak kullanılan çok sayıda ürünün temel bileşeni haline getirmektedir. Sentetik elastomer üretiminin endüstriyel ölçekteki ilk örneği, 1931 yılında ticarileştirilen neopren (polikloropren) kauçuğudur. Polimerizasyon teknolojilerindeki ilerlemelerle, özellikle 1950 sonrası dönemde, stiren-butadien kauçuğu (SBR), etilen-propilen dien monomeri (EPDM) ve nitril kauçuk (NBR) gibi çeşitli performans özelliklerine sahip sentetik kauçuk türleri geliştirilerek piyasaya sürülmüştür. Bununla birlikte, doğal kauçuk, sahip olduğu eşsiz mekanik dayanım, düşük ısı birikimi ve yüksek yırtılma direnci gibi yapısal üstünlükler nedeniyle endüstriyel geçerliliğini korumakta olup, küresel elastomer tüketimi içerisindeki payı yaklaşık %30 seviyesinde seyretmektedir (Saçak, 2005).

3.2. Termosetler

Termoset polimerler, kürlenme adı verilen kritik bir polimerizasyon süreci sonucunda meydana gelir. Bu süreçte, polimer zincirleri arasında yoğun çapraz bağlar oluğur ve bu da malzemenin kalıcı olarak sertleğmesine yol açar. Bu benzersiz çapraz bağlı yapı, termosetleri tekrar eritmeye karęı dayanıklı, çözünmez ve dolayısıyla geri dnğtrlemeyen malzemeler haline getirir. Nihai olarak ortaya çıkan bu özellikler, termosetlerin yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnç gerektiren zorlu uygulamalarda tercih edilmesinin temel nedenidir (Piatti and Rodrigues, 2005).

3.3. Termoplastikler

Termoplastik polimerler, ısıl iğlemler altında karakteristik bir reolojik davranığ sergiler. Bu malzemeler ısıtıldığında yumuğayarak şekillendirilebilir hale gelir ve soğutulduğunda sertleğerek mekanik mukavemet kazanır. En önemli özellikleri, bu ısıtma-soğutma döngülerinin fiziksel yapılarında kalıcı bir bozulmaya yol açmadan defalarca tekrarlanabilmesi ve her seferinde temel özelliklerini büyük lde muhafaza etmeleridir (Narlıoğlu, 2018).

Termoplastiklerin karakteristik özelliği olan tersinir faz değiğimi, bu polimerlerin cam geçiş veya erime sıcaklıklarının üzerinde ısıtılarak iğlenebilmesini sağlar. Artan moleküler hareketlilik sonucu viskoz bir sıvı haline gelen malzeme, enjeksiyon kalıplama prosesinde olduğu gibi yüksek basınç altında kalıp kavitesine doldurulur. Polimer zincirlerinin yeniden yönlenmesi ve katılağması, kontrollü soğutma ile sağlanır; böylece kalıp tasarımına uygun karmaşık geometrilerde ve yüksek hassasiyetle şekillendirilmiğ parçalar üretilir (Kangallı, 2007).

Termoplastik polimerler, ısıtıldıklarında yumuşayarak şekillendirilebilir hale gelen ve soğutulduklarında rijit bir yapıya kavuşan malzemelerdir. Bu ısıl döngü (yumuşama-sertleşme), moleküler yapıda kalıcı bir kimyasal bozulmaya yol açmadığından teorik olarak sınırsız sayıda tekrarlanabilir. Bu temel özellikleri nedeniyle, termoplastikler küresel plastik üretiminin büyük bölümünü oluşturur; örneğin ABD'de üretilen plastiklerin yaklaşık %80-90'ını bu sınıfa giren reçineler teşkil etmektedir. Şekillendirme işlemi genellikle malzemenin erime veya cam geçiş sıcaklığının üzerine çıkarılıp istenen forma getirilmesi ve ardından soğutularak kalıcı şeklinin kazandırılmasıyla gerçekleşir.

Bu malzemeler, üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturmalarına rağmen, zincirler arasında kovalent bağlarla doğrudan kimyasal bağlanma (çapraz bağlanma) meydana gelmez. Bu yapısal özellik, malzemenin son derece yüksek erime sıcaklığına ($>100^{\circ}\text{C}$) sahip olmasına katkıda bulunur. Sıcaklık bu kritik eşiğin üzerine çıkarıldığında, malzeme ergimeye başlar ve moleküler hareketliliğin artmasıyla belirgin bir plastik deformasyon kabiliyeti kazanarak şekil değiştirmeye elverişli hale gelir. Bu davranış, onun temel bir termoplastik karakter sergilediğini gösterir (Bilici, 2011).

Termoplastikler, diğer termoplastik türlerine kıyasla sundukları belirgin maliyet avantajı sayesinde endüstriyel alanda geniş bir kullanım alanı bulur. Bu uygun maliyet profili, malzemelerin çeşitli uygulamalarda yaygın olarak benimsenmesinin temel itici gücüdür. Morfolojik yapılarına göre termoplastikler, amorf (şekilsiz) ve yarı-kristalin (kısmen kristal) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Amorf termoplastiklerde, polimer zincirleri rastgele ve düzensiz bir moleküler düzen sergiler, bu da onlara genellikle şeffaf bir görünüm ve kendine özgü mekanik özellikler kazandırır. Buna karşılık, yarı-kristalin termoplastiklerde polimer zincirlerinin belirli bölgelerinde (kristalitler), zincirler sıkı paketlenmiş ve düzenli bir dizilim oluştururken, bu düzenli bölgeler düzensiz amorf fazlarla çevrilidir; bu ikili morfoloji, yarı-kristalin malzemelere özgü fiziksel ve mekanik özelliklerin kaynağını oluşturur (Akkurt, 2007).

Bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda şekillendirme işlemine tabi tutulduktan sonra soğumaya bırakıldığında orijinal formuna dönme eğilimi gösterir. Bu özellik, malzemenin şekil hafızası veya geri kazanım kabiliyeti olduğunu düşündürebilir. Ayrıca, bu malzemenin ihtiyaç duyulduğunda kaynaklanabilme özelliği de bulunmaktadır. Bu durum, malzemenin birleştirme ve onarım süreçlerinde esneklik sağladığını ve uygulama alanlarını genişlettiğini gösterir (Kıralp, 2006).

Plastik malzemeler, otomotiv endüstrisinden elektronik cihazlara, ayakkabı üretiminden tıbbi ekipman imalatına kadar uzanan son derece geniş bir uygulama spektrumunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çeşitlilik, her bir spesifik uygulama alanının gereksinimlerini karşılamak amacıyla malzeme özelliklerinin hedefli bir şekilde iyileştirilmesini veya özelleştirilmesini zorunlu kılmıştır. Sonuç olarak, farklı performans kriterlerine hitap eden çok sayıda türetilmiş plastik kompozisyon geliştirilmiştir. Dolayısıyla, belirli bir uygulama için optimum plastik malzemenin seçimi, aşağıdaki temel parametrelerin sistematik olarak değerlendirilmesini gerektiren kritik bir süreçtir:

1. **Uygulama Gereksiniminin Temeli:** Malzemenin hangi fonksiyonel veya yapısal ihtiyacı karşılayacağını net tanımlı.
2. **Servis Koşulları:** Malzemenin maruz kalacağı çevresel faktörler (sıcaklık, nem, kimyasallar, UV radyasyonu vb.) ve mekanik yüklemeler.
3. **Tasarım Kısıtlamaları ve Hedefi:** Ürün geometrisi, boyut toleransları, estetik gereklilikler ve nihai ürünün performans beklentileri.
4. **Mekanik Performans:** Çekme/ basma dayanımı, darbe direnci, sertlik, sürtünme/aşınma davranışı, yorulma ömrü gibi statik ve dinamik yük altındaki davranış özellikleri.
5. **Termal Özellikler:** Isı direnci sıcaklığı (HDT), termal genleşme katsayısı (CTE), ısı iletkenliği, yanmazlık (alev geciktirici) özellikleri.
6. **İşlenebilirlik:** Enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, termoform gibi üretim yöntemlerine uygunluk, akış özellikleri (reolojik davranış) ve şekillendirme verimliliği.
7. **Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm:** Malzemenin geri kazanım potansiyeli, geri dönüştürülmüş içerikle uyumluluk ve ilgili düzenlemelere uygunluk.
8. **Kompozit/Assemblage Uyumu:** Diğer malzemelerle (metal, seramik, diğer polimerler) birlikte kullanım veya yapıştırma/bağlantı durumundaki adezyon ve kimyasal/termal uyum (Kaya, 2005).

Endüstride yaygın olarak kullanılan bazı önemli termoplastik polimer örnekleri şunlardır:

1. Düşük Yoğunluklu Polietilen (DYPE veya LDPE): Esneklik, şeffaflık ve iyi darbe direnci ile karakterizedir. Ambalaj filmleri, torbalar ve kaplamalarda yaygındır.
2. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE veya HDPE): LDPE'ye kıyasla daha yüksek sertlik, mukavemet ve kimyasal dirence sahiptir. Şişe, bidon, boru ve oyuncak üretiminde kullanılır.
3. Polistiren (PS): Sert, kırılğan ve şeffaf (genel amaçlı PS) veya köpük formunda (EPS - Genleştirilmiş Polistiren) olabilir. Paketleme, tek kullanımlık ürünler ve yalıtım malzemelerinde tercih edilir.
4. Polipropilen (PP): İyi kimyasal direnç, yüksek ergime sıcaklığı ve yorulma dayanımı sunar. Otomotiv parçaları, tekstil lifleri (halı, kilim), mutfak eşyaları ve medikal cihazlarda kullanılır.
5. Polietilen Tereftalat (PET veya PETE): Yüksek mukavemet, bariyer özellikleri ve berraklığı ile öne çıkar. Özellikle içecek şişeleri, tekstil lifleri (polyester) ve gıda ambalajlarında kullanımı yaygındır.
6. Polivinil Klorür (PVC): Sert (uPVC) veya plastifiyan eklenerek esnek formlarda üretilebilir. Boru ve profil sistemleri, pencere doğramaları, kablo kılıfları, yer döşemeleri ve tıbbi tüpler gibi çeşitli uygulamalara sahiptir.

3.3.1. Polietilen (PE)

Polietilenin ilk sentezi, düşük yoğunluklu formda, 1884 yılında Kustavson tarafından gerçekleştirilmiştir. Zaman içinde, yüksek yoğunluklu, lineer ve orta yoğunluklu çeşitleri de geliştirilmiştir. (Erşen, 2011). Temel yapısının polimerler arasında en basit olması nedeniyle, polietilen (PE) dünya çapında en yaygın plastik malzeme konumundadır. Bu yaygınlık, literatürde diğer polimerlerden daha fazla ilgi görmesini sağlamıştır. PE'yi cazip kılan temel özellikler ise uygun fiyatının yanında, çok çeşitli frekanslarda mükemmel dielektrik performansı, güçlü kimyasal dayanım, işlenme kolaylığı, uzun ömür, esneklik ve belirli türlerinin ince film uygulamalarında ışık geçirgenliğidir (Vidakis, Petousis and Maniadi, 2021).

Ucuzluğu, üstün kimyasal dayanıklılığı ve çeşitli şekillendirme yöntemlerine uygunluğu sayesinde polietilen, son derece geniş kullanım yelpazesi olan bir malzemedir. Değişik yoğunluklarda üretilebilmesi de kullanım açısından ek bir avantaj sunar. Öte yandan, ısı karşısında yüksek oranda genleşme eğilimi, uzun süreli uygulamalarda kullanımını kısıtlayan bir faktördür.

3.3.1.1.Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), petrol türevlerinden üretilen bir termoplastik polietilen türüdür ve yaklaşık 0.941 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Moleküler yapısının düşük dallanma düzeyinde olması, moleküller arası etkileşimleri ve mekanik dayanımını artırır. HDPE; krom/silika, Ziegler-Natta ya da metallocene katalizörleri ile sentezlenebilir. Düşük yoğunluklu polietilene kıyasla yaklaşık dört kat daha sağlamdır. Yüksek dayanıklılık, kimyasal maddelere karşı direnç ve belirli bir esneklik sunar. HDPE; süt ve deterjan şişeleri, margarin kapları, çöp kutuları, su boruları gibi birçok ambalaj ve ürün yapımında tercih edilir. Ayrıca, oyuncak üretiminin önemli bir kısmında da kullanılır (Kanwal, ve diğerleri. 2023).

HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen), moleküler kütlesi yüksek olan, temel olarak karbon ve hidrojen içeren bir termoplastik hidrokarbondur. Hem HDPE hem de LDPE (Alçak Yoğunluklu Polietilen), etilen monomerlerinin polimerleşmesi sonucunda üretilir. Bu polimerin moleküler zinciri, yaklaşık 500.000 ila 1.000.000 karbon atomu uzunluğuna erişebilir ve bu moleküler boyut, HDPE'nin mekanik davranışını doğrudan etkiler. Yoğunluk açısından HDPE, LDPE'ye göre daha yüksek değerlere sahip olsa da, moleküler yapısı daha az dallanma gösterir. Bu daha düzenli ve düz zincir yapısı, HDPE'nin LDPE'den farklı olarak moleküller arasında daha güçlü etkileşimler kurmasını sağlar, bu da malzemeye daha yüksek bir mekanik mukavemet kazandırır. Sonuç olarak HDPE, LDPE ile karşılaştırıldığında daha sert, ışık geçirgenliği daha düşük (daha opak) ve daha yüksek sıcaklıklara karşı daha iyi direnç gösteren bir malzemedir. (Cheng, 2008).

Bu polietilen çeşidinin düşük basınç ve ısı koşullarında sentezlenebilmesi, geliştirilen yeni nesil katalizör teknolojileri sayesinde mümkün olmaktadır. Malzeme, doğrusal bir moleküler yapı sergiler ve zincir dallanması oldukça sınırlıdır. Bu moleküler özellik, yüksek bir kristalinite derecesine ulaşılmasını sağlar. Üretim süreci, süspansiyon polimerizasyonu, çözelti polimerizasyonu veya gaz fazı polimerizasyonu gibi farklı endüstriyel yöntemlerle

gerçekleştirilebilmektedir (Kangallı, 2007).

HDPE'nin kristalleşme derecesi, uygulanan soğutma hızından önemli ölçüde etkilenir. Düşük soğutma hızları, polimer zincirlerinin daha düzenli paketlenmesine izin vererek kristal yapı miktarını artırır. Buna karşılık, hızlı soğutma işlemleri kristalleşme oranını düşürür. Bu farklılıklar, malzemenin başlangıçtaki kristal yapısını ve dolayısıyla fiziksel niteliklerini değiştirebilir. Ek olarak, enjeksiyon kalıplama veya ekstrüzyon gibi işlemler sırasında eriyik haldeki polimerin farklı yönlerde akması, yönlü bir içyapı (anizotropi) oluşturur. Ortaya çıkan bu yönlendirilmiş yapı, malzemenin mekanik davranışında belirgin farklılıklara yol açar; örneğin akış yönünde mukavemet artarken enine yönde zayıflık görülebilir. Bu moleküler oryantasyon (yönlendirme), çekme dayanımı, çatlak ilerlemesine direnç, tokluk ve sertlik gibi mekanik performans özelliklerinin iyileşmesini sağlar (Düşünceli ve Çolak, 2007).

3.3.1.2.HDPE kompozitlerin özellikleri

HDPE kompozitleri, saf HDPE'nin mekanik, termal, elektriksel ve kimyasal performansını artırmak veya malzemeye yeni fonksiyonellikler kazandırmak amacıyla polimer matrisine lifler, nanoparçacıklar veya dolgu maddeleri gibi çeşitli katkıların eklenmesiyle üretilir. Bu kompozit malzemelerin nihai özellikleri, kullanılan katkı türüne, miktarına (içeriğine) ve uygulanan üretim/karıştırma yöntemlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. HDPE kompozitlerinin karakteristik özelliklerinden bazıları şunlardır:

Mekanik Mukavemet: Saf HDPE matrisine cam lifi, karbon lifi veya çeşitli mineral dolgular gibi katkı maddelerinin eklenmesiyle; malzemenin darbe direnci, çekme ve eğilme dayanımında önemli artışlar sağlanır. Bu mekanik özelliklerdeki iyileşme, HDPE kompozitlerinin yüksek dayanım gereksinimi olan uygulama alanlarında kullanımını mümkün kılar.

Kimyasal mukavemet: Saf HDPE'nin kimyasal direnci oldukça yüksektir ve bu özellik genellikle HDPE kompozit malzemeleri için de geçerliliğini korur. Bu direnç, HDPE kompozitlerin kimyasallara veya aşınmaya yol açan koşullara maruz kalınan uygulamalarda tercih edilmesini sağlar.

Geri dönüşüm: Tüketim sonrası polimerik ürünlerin geri dönüşümü hem çevresel ayak izini hem de ham plastik kullanımını düşürür. Fosil kaynaklı çoğu homopolimer plastik gibi, HDPE'nin geri kazanımı da görece basittir. Etkili bir toplama, sınıflandırma ve işleme altyapısıyla, bu atık plastikler sınırlı enerji girdisiyle taze ürünlere dönüştürülebilir. Termoplastik yapısı sayesinde hem saf HDPE hem de HDPE kompozitler defalarca ergitilip yeniden şekillendirilebilir; bu süreçte malzeme özelliklerinde ciddi bir bozulma yaşanmaz. Bu yeniden işlenebilirlik, HDPE ve kompozitlerini sürdürülebilir bir malzeme alternatifi haline getiren temel unsurdur (Jayaraman and Bhattacharya, 2004).

Tasarım ve maliyet: Yüksek yoğunluklu polietilen, uygun maliyetli bir polimer olarak öne çıkmaktadır. HDPE esaslı kompozitlerin imalatında, çeşitli dolgu veya takviye maddelerinin matrise dahil edilmesiyle, malzeme giderlerinde ciddi bir yükseliş olmadan performans nitelikleri daha da artırılabilir. Saflığı korunmuş HDPE'ye farklı katkı maddelerinin ekstrüzyon işlemiyle işlenmesi ve ardından enjeksiyon kalıplama tekniğiyle şekillendirilmesi sayesinde, çeşitli formlarda ve özgün uygulamalara yönelik bileşenler üretmek olanaklı hale gelmektedir (Callister and Rethwisch, 2020).

3.3.1.3.HDPE malzemenin mekanik özellikleri

Yüksek yoğunluklu polietilen, bilindiği üzere dikkate değer mekanik özelliklere sahip bir polimer türüdür. Ancak, HDPE'nin bu nitelikleri genellikle kullanım amacına ve üretim süreçlerine göre değişkenlik gösterebilir. HDPE'nin başlıca mekanik karakteristikleri şu şekilde özetlenebilir:

Akma direnci: HDPE'nin akma dayanımı genellikle belirgin şekilde yüksektir. Bu özellik, malzemenin belirli bir gerilme seviyesi altında kalıcı deformasyona uğramadan direnebilme kapasitesine işaret eder.

Kırılma direnci: Kopma mukavemeti, bir malzemenin kırılmadan önce dayanabileceği en yüksek gerilme seviyesini tanımlar. HDPE, bu kritik mekanik özellik bakımından genellikle yüksek değerlere sahiptir.

Young modülü: Yüksek yoğunluklu polietilenin, gerilime maruz kaldığında şekil değiştirip sonrasında orijinal biçimine dönme eğilimi gösteren bir malzeme olması nedeniyle, tipik

olarak düşük bir young modülüne sahip olduğu bilinir.

Darbe direnci: Bir malzemenin yüksek hızda stres uygulandığında kırılmaya karşı koyma yeteneğini tanımlamada iyi bir göstergedir. Yüksek darbe dayanımı mukavemetine sahip olan yüksek yoğunluklu polietilen, herhangi bir kırılma olmaksızın darbeleri ve enerjiyi başarılı bir şekilde emebilme kapasitesine sahiptir.

Sertlik: Yüksek yoğunluklu polietilenin sertliği genellikle orta düzeyde seyreder. Bu özelliğin üzerinde, kullanılan dolgu maddelerinin çeşidi ve oranı ile üretim parametreleri belirleyici bir etkiye sahiptir.

Isıl davranış: Yüksek yoğunluklu polietilen, belirli bir sıcaklık aralığında genel olarak tutarlı mekanik özellikler sergilemesine karşın, aşırı sıcaklıklara maruz kaldığında yumuşama eğilimi gösterebilir (Bartczak, 2005).

3.3.1.4. Düşük yoğunluklu polietilen

Gıda paketlemede yoğun olarak tercih edilen plastik poşetler (naylon torbalar), aynı zamanda tek kullanımlık örtüler ile tarım ve inşaat sektörlerinde de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu poşetler, atık plastikler içerisinde ağırlık bazında yaklaşık %16'lık bir paya sahiptir. Hacimsel olarak atık sahalarında çok büyük bir yer kaplamıyor gibi görünseler de bu ağırlık oranı dikkate değer derecede yüksektir. Amerika Birleşik Devletleri'nde bu poşetlerin geri dönüşüm süreci; elle ayrıştırılma, temizlenme, granül hâline getirilme, yıkanma ve son olarak paletlenme aşamalarını içermektedir. Ancak, orijinal poşetler üzerindeki baskı mürekkepleri, geri dönüştürülmüş malzemenin koyu bir renk almasına neden olmaktadır. (Güler ve Çobanoğlu, 1997).

3.3.2. Akrilonitril bütadiyen stiren (ABS)

ABS'nin sahip olduğu üstün mekanik dayanım, ısı direnç ve nispeten düşük işleme maliyetleri gibi özellikler, onu FDM tekniği de dâhil olmak üzere modern katmanlı imalat (3B yazdırma) süreçleri için ideal bir malzeme haline getirmiştir. Bu uyum, polimerin son dönemde sadece hızlı prototipleme aşamalarında değil, aynı zamanda son kullanıma yönelik dayanıklı ve kişiselleştirilmiş ürünlerin üretiminde de

vazgeçilmez bir konuma yükselmesine öncülük etmiştir (Olivera, Muralidhara, Venkatesh, Gopalakrishna and Vivek, 2016).

ABS plastiği, akrilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinin polimerizasyonu sonucu oluşan amorf bir termoplastik polimerdir. Her bir monomer, malzemenin nihai özelliklerine benzersiz bir katkı sağlamaktadır: Akrilonitril bileşeni, polimere yüksek termal kararlılık ve kimyasal/çevresel direnç kazandırır. Bütadien, malzemeye üstün darbe tokluğu ve özellikle düşük sıcaklıklarda süneklik kazandırarak çatlamaya karşı direnci artırır. Stiren ise polimere işlenebilirlik, rijitlik ve yüzey parlaklığı gibi özellikler kazandırmaktan sorumludur. Bu üç bileşenin optimize edilmiş oranlardaki kombinasyonu, ABS'yi mühendislik uygulamaları için son derece dengeli ve çok yönlü kılan üstün mekanik özellikleri ve işlenme kolaylığını beraberinde getirir.

ABS'nin endüstriyel anlamda bu denli yaygın bir kullanım alanı bulmasının temelinde, sahip olduğu bir dizi üstün özelliğin bir arada bulunması yatar. Malzemenin hafif olması, yüksek darbe dayanımı göstermesi, kolayca renklendirilebilmesi ve nispeten düşük sıcaklıklarda bile rahatlıkla işlenebilmesi, onu rakiplerine kıyasla öne çıkaran avantajlardandır. Bu çok yönlü performansı, ABS'yi otomotiv parçalarından dayanıklı tüketim mallarına, elektronik cihaz gövdelerinden eğitim ve oyuncak sektörlerine (LEGO parçaları gibi) kadar oldukça geniş bir yelpazede vazgeçilmez kılmıştır. Ayrıca, eriyik yığma modelleme (FDM) gibi katmanlı imalat süreçlerinde de sıklıkla tercih edilerek, hızlı prototiplemeden kişiselleştirilmiş üretime kadar pek çok yenilikçi uygulamanın merkezinde yer almaktadır (Vishwakarma, Pandey and Gupta, 2017).

ABS'nin mühendislik alanındaki üstün performansı ve başarısı, onu geleneksel polimerlerden kesin bir şekilde ayıran dengeli ve sinerjik özellik kombinasyonuna dayanır. Bu terpolimer, genellikle tek bir malzemede bulunması zor olan; yüksek sertlik, üstün darbe tokluğu ve iyi kimyasal direnç gibi çoğu zaman birbiriyle çelişen nitelikleri tek bir yapıda uzlaştırmayı başarır. Bu dengeli ve çok yönlü karakteri, ABS'yi otomotiv iç donanım parçalarından dayanıklı elektronik cihaz gövdelerine kadar uzanan geniş bir yelpazede, tasarımcı ve mühendislere hem mekanik bütünlük hem de üstün işleme kolaylığı sağlayan bir çözüm ortağı haline getirir. Nihayetinde, bu birleşik özellik seti, malzemeyi karmaşık tasarım ve dayanıklılık gerektiren mühendislik problemlerine yönelik en etkili ve verimli çözümlerden biri yapmaktadır.

ABS, mühendislik uygulamalarında tercih edilmesini sağlayan dengeli mekanik özellikleriyle öne çıkar. Aşağıdaki tablo, tipik bir enjeksiyon kalıplama sınıfı ABS'nin temel mekanik özellik değerlerini göstermektedir. Malzemenin sahip olduğu kauçuk faz, özellikle çentikli darbe testlerinde ortaya çıkan üstün tokluk değerleriyle, benzer amaçlı kullanılan diğer polimerlere kıyasla belirgin bir performans avantajı sağlar. Bu yapısal özellik, ABS'yi darbe dayanımının kritik olduğu uygulamalarda vazgeçilmez kılar (Olivera, 2016).

ABS malzemesinin ısı özellikleri, temelini oluşturan amorf yapıdan kaynaklanan ve yaklaşık 110°C civarında gözlemlenen belirgin bir camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ile tanımlanır. Bu kritik sıcaklık, polimerin rijit ve camsı halden, daha esnek ve kauçumsu bir duruma geçiş yaptığı noktadır. Kimyasal dayanım profili incelendiğinde ise ABS, seyreltik haldeki asit ve bazlara, ayrıca tuzlu su çözeltilerine karşı yüksek bir direnç sergiler. Buna karşılık, aseton benzeri organik çözücülerin yanı sıra aromatik hidrokarbonlar ve ester grubu kimyasallar tarafından aşınmaya veya çözünmeye karşı hassastır (Mirasadi, ve diğerleri. 2024).

ABS'den seri üretimle parça elde etmek için en yaygın kullanılan geleneksel teknik enjeksiyon kalıplamadır. Bu metodun işleyişi, polimerin ergitilerek sıvı akışkan formuna getirilmesi ve yüksek basınç uygulanarak bir kalıp içerisine zerk edilmesine dayanır. Sonrasında soğutma işlemiyle katı forma dönüştürülen parça kalıptan çıkarılır. FDM gibi katmanlı imalat teknikleriyle kıyaslandığında, bu yöntemle üretilen ürünler genellikle daha gelişmiş mekanik dayanım sergiler. Bu farkın arkasındaki temel sebep, enjeksiyon işlemindeki yoğun basıncın, malzemenin daha az gözenekli ve daha yüksek yoğunlukta bir iç yapıya sahip olmasını sağlamasıdır (Ahn, Montero, Odell, Roundy and Wright, 2002).

Üç boyutlu yazıcılardan kaynaklanan ABS atıkları, malzeme verimliliği açısından değerlendirilmesi gereken bir kaynak oluşturur. Fakat bu atıkların öğütülerek yeniden işlenmesi, termal degradasyon neticesinde polimerin moleküler yapısında hasara ve mekanik özelliklerde gerilemeye neden olur. Geri dönüştürülmüş ABS (rABS), özellikle darbe tokluğu ve süneklik açısından orijinal malzemenin performansına ulaşamaz. Bu çalışma kapsamında, rABS'nin mekanik performansını iyileştirmek için biyobazlı dolgu maddeleri ile güçlendirilmesi yaklaşımı benimsenmiştir (Kaiser, Schmid and Schlummer, 2018).

ABS'nin geri dönüşümünü zorlaştıran temel faktör, kullanım sırasında maruz kaldığı çevresel şartlardır. UV ışınimleri ve yüksek sıcaklıklar, malzeme içindeki bütadien kauçuğunun oksidatif hasara uğramasının başlıca nedenidir. Meydana gelen bu bozulma, ABS'nin çarpma direnci ve tokluk gibi temel mekanik özelliklerinde kayıpla sonuçlanır. Bu yüzden, geri dönüştürülmüş ABS çoğunlukla kırılmandır ve başlangıçtaki performans düzeyine ulaşamaz (Liu and Bertilsson, 1999).

3.3.2.1. ABS mekanik özellikleri

ABS malzemesi, yüksek çekme dayanımı ile birlikte belirgin bir süneklik sergiler. Bu özellik, malzemenin elastik bölgeyi aştıktan sonra dahi aniden kırılmak yerine, kalıcı şekil değiştirme kabiliyeti sayesinde bükülerek deforme olabildiği anlamına gelmektedir (Çulha, 2023).

ABS'nin geri dönüşümünde maruz kaldığı yüksek sıcaklık ve kesme kuvvetleri, özellikle polibütadien fazında tahribata neden olur. Bunun temel sebebi, polibütadienin yapı taşlarında bulunan ve ısıyla aktive olan çift bağlardır. Bu zayıf noktalar, ısınma sırasında ortamdaki oksijenle kolayca reaksiyona girerek, polimer zincirlerinin parçalanmasını başlatan hidroperoksit adlı kararsız moleküllerin ortaya çıkmasına sebep olur (Jung, 2025).

Kauçuğa esneklik veren polibütadien zincirleri, aşırı ısı veya kesme kuvveti nedeniyle birbirine sıkıca kenetlendiğinde (çapraz bağlandığında), doğal yapısı bozulur. Oluşan bu rijit ağ yapısı, malzemenin darbe enerjisini sönmüleme kapasitesini düşürür. Bu da malzemenin davranışını hızla değiştirerek; esnek ve dayanıklı olmaktan çıkıp, katı ve kırılğan bir hale gelmesine yol açar (Ponnapalli, 2020).

Geri dönüşüm koşullarında, polimer zincirlerinin parçalanması molekül ağırlığını düşürse ABS'nin mekanik özelliklerine en büyük zararı polibütadien fazındaki çapraz bağlanmalar verir. Bu bağlanmalar, esnek kauçuk fazının üç boyutlu sert bir ağ yapısına dönüşmesine neden olur. Sonuç olarak, malzemenin çarpma enerjisini emme kabiliyeti büyük ölçüde azalarak gevrek bir kırılma davranışı ortaya çıkar (Boldizar, and Moller, 2003).

Tekrarlanan enjeksiyon işlemleri, ABS'nin formülasyonundaki hayati katkı maddelerini (yağlayıcılar, antioksidanlar, stabilizatörler) yavaş yavaş tüketir. Yağlayıcıların azalması, polimer zincirleri arasındaki iç sürtünmeyi artırarak malzemenin akışkanlığını olumsuz etkiler ve işlenmesini zorlaştırır. Öte yandan, bozunma sürecinde serbest kalan stiren monomeri gibi uçucu bileşenler, malzemenin iç yapısında mikro boşluklar meydana getirir. Bu boşluklar mekanik mukavemeti düşürür ve oluşan herhangi bir çatlağın daha kolay yayılmasına zemin hazırlar (Rahimi, Esfahanian and Moradi, 2014).

Bozunmanın beklenen etkisi dayanım kaybı olsa da, bazen tam tersi görülebilir. Molekül zincirlerinin kısalması ve oluşan küçük bozunma ürünleri, polimer yapıyı daha sıkı ve düzenli hale getirerek çekme dayanımında hafif bir iyileşmeye sebep olabilir. Bu, bozunma ürünlerinin plastikleştirici etkisinden veya moleküller arası çekim kuvvetlerindeki değişimden kaynaklanır (Ventosinos, ve diğerleri. 2025).

%100 geri dönüştürülmüş ABS'nin darbe dayanımında %50'den başlayıp %86'ya varan ciddi kayıplar yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu radikal düşüş, malzemenin temel karakterinin "tok" (sünek) yapıdan "gevrek" (kırılgan) bir yapıya dönüşmesi anlamına gelir. Geri dönüşüm sürecindeki yüksek sıcaklık ve mekanik stres, ABS'nin esneklikten sorumlu polibütadien fazında geri dönüşü olmayan hasarlara yol açar; moleküler zincirlerin kopması ve çapraz bağlanmalar, malzemenin darbe enerjisini sönmüleme yeteneğini büyük ölçüde ortadan kaldırır. Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş ABS, ani darbeler karşısında esnemek yerine anında çatlayıp kırılabilir hale gelir ve bu durum onun yüksek performans gerektiren uygulamalarda doğrudan kullanımını ciddi şekilde kısıtlar (Budin, Hyie, Yussof and Ishak, 2020).

ABS'nin ikinci geri dönüşüm işlemleriyle darbe dayanımında %14 oranında bir düşüş gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu performans kaybı, polimer zincirlerinde meydana gelen kimyasal bozunmaların ve malzeme içi çapraz bağlanmaların bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Özellikle polibütadien fazında oluşan bu yapısal değişimler, malzemenin darbe enerjisini sönmüleme kapasitesini zayıflatmakta ve mekanik özelliklerde gözle görülür bir azalmaya yol açmaktadır. Geri dönüştürülmüş polimerlerin performansının anlaşılması ve malzemenin uygun uygulama alanlarının belirlenmesi açısından önemli bir veri oluşturmaktadır (Teixeira, Peres and Pacheco, 2023).

Isı, ABS plastiğinin yeniden işlenmesi sırasında bozunma hızını belirleyen en kritik faktördür. 220°C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda yapılan işlemlerde malzeme özellikleri büyük ölçüde korunabilirken, 260°C'yi aşan sıcaklıklarda esneklikten sorumlu olan polibütadien fazı hızla bozunmaya uğrar ve bu da darbe dayanımında ani düşüslere yol açar. Bunun yanı sıra, ekstrüzyon makinesindeki vida dönüş hızından kaynaklanan kesme kuvvetleri, malzemenin iç yapısındaki farklı bileşenlerin dağılımını ve birbiriyle etkileşimini doğrudan etkileyerek nihai mekanik performans üzerinde belirleyici rol oynar (Peydro, Juarez, Sanchez and Pla, 2014).

Araştırma sonuçları, saf ABS'ye ağırlıkça %20 ila %30 oranında geri dönüştürülmüş ABS (rABS) ilave edilmesinin mekanik performans üzerinde sınırlı ve kabul edilebilir bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Bu özgül karışım oranlarında, malzemenin darbe dayanımı ve çekme mukavemeti gibi kritik özelliklerdeki düşüşün yalnızca %5-10 bandında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu minimal kayıp seviyesi, nihai ürünün hala endüstriyel spesifikasyonları ve kalite standartlarını karşılayabildiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, bu oran aralığı, sürdürülebilirlik hedefleri ile mekanik performans gereksinimleri arasında optimal bir denge sağlayan pratik bir uygulama penceresi olarak değerlendirilmektedir (Scaffaro, Botta and Di Benedetto, 2012).

Geri dönüştürülmüş ABS (rABS) oranı %50 eşliğini aştığında, malzemenin darbe dayanımında kabul edilemez seviyelerde kayıplar oluştuğunu göstermektedir. Scaffaro'nun çalışmaları, %50 rABS içeren karışımların boyutsal stabilite (çekme) açısından en dengeli performansı sergilediğini, ancak bu kararlılığa rağmen mekanik mukavemetin kritik derecede zayıfladığını ortaya koymuştur. Bu durum, yüksek oranda geri dönüştürülmüş malzeme içeren karışımlarda çekme direnci ile mekanik dayanım arasında bir ödünleşim (trade-off) olduğunu açıkça gözler önüne sermektedir. Moleküler düzeyde, geri dönüşüm sürecinde oluşan zincir kırılmaları ve çapraz bağlanmaların, malzemenin enerji sönümleme kapasitesini büyük ölçüde azalttığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, %50'nin üzerindeki rABS karışımları, yapısal uygulamalar için uygun olmayan, mekanik açıdan zayıf bir kompozit malzeme ile sonuçlanmaktadır. Bu bulgular, endüstride geri dönüştürülmüş malzeme kullanım oranlarının belirlenmesinde mekanik performansın sınırlayıcı bir faktör olduğunu teyit etmektedir (Rahimi, 2014).

3.3.2.2. ABS kompozitlerinin özellikleri

Malzeme mühendisleri, ABS plastiğinin performansını iyileştirmek üzere üç temel strateji geliştirmiştir: diğer polimerlerle harmanlama, makro ölçekli lif takviyesi ve nano dolgu entegrasyonu. Bu yöntemlerin her biri polimer matrisinin iç yapısını ve arayüzey etkileşimlerini temelden değiştirerek kompozit malzemenin özelliklerini önemli ölçüde dönüştürür. Örneğin grafen veya karbon nanotüp gibi nano dolgular,

ABS'nin termal iletkenliğini artırarak elektronik soğutma uygulamalarında kullanım imkânı sağlarken (Sharma, Kapoor, Goyal and Jindal, 2020); cam elyafı takviyesi, enjeksiyon kalıplama parçalarda hem boyutsal kararlılığı hem de mekanik mukavemeti artırarak metal ikame potansiyeli yaratmaktadır (Shueb, ve diğerleri. 2025). Bu stratejiler, geliştirilmiş ısı yönetimi ve yapısal performans ihtiyaçlarına yönelik çözümler sunarak ABS'yi çeşitli endüstriyel uygulamalar için daha çekici hale getirmektedir.

Dolgu oranı, bir parçanın iç yapısında malzeme ile kaplanan hacmin yüzdesel ifadesi olup mekanik dayanımı doğrudan belirleyen temel parametrelerden biridir. Dolgu yoğunluğu ile parça mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki bulunmakta; dolgu oranı yükseldikçe malzemenin yük taşıma kapasitesi ve rijitliği artmaktadır. Bu bağlamda %100 dolgu oranı, kompozit malzemelerde teorik olarak ulaşılabilecek en yüksek çekme mukavemeti ve boyutsal kararlılık değerlerine karşılık gelmektedir. Bu prensip özellikle fiber takviyeli polimerler ve enjeksiyon kalıplama proseslerinde kritik önem taşımakta, iç yapıdaki boşlukların (void) minimize edilmesiyle malzemenin mekanik performansı optimize edilebilmektedir. Düşük dolgu oranları malzeme ve zamandan tasarruf sağlarken, mekanik performanstan ödün verilmesine neden olur (Çiçek, 2019).

ABS plastiğine karbon fiber veya kenevir gibi doğal liflerin dahil edilmesi, malzemenin başta rijitlik olmak üzere mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar. Lif takviyesi genellikle malzemenin elastisite modülünü yükselterek sertliğini artırır. Ancak bu kompozitlerin nihai mukavemeti, büyük ölçüde ABS matrisi ile takviye lifleri arasındaki ara yüzey bağlanmasının kalitesine bağlıdır; zayıf yapışma durumunda lifler etkin şekilde yük transferi yapamaz ve beklenen dayanım artışı sağlanamaz. Bu nedenle, yüksek performanslı kompozit üretiminde ara yüzey uyumluluğunu sağlamak için yüzey işlemleri ve uygun bağlayıcı ajanların kullanımı büyük önem taşımaktadır (Karaman, 2020).

Matris ile fiber arasında yetersiz bir bağlanma oluşması durumunda, yük aktarımı etkin biçimde sağlanamaz. Bu durum, kompozit malzemenin çekme dayanımının saf ABS'den daha düşük seviyelere inmesine yol açabilmektedir. Yapılan incelemeler, karbon fiber takviyeli kompozitlerde çekme mukavemetinin saf malzemeye kıyasla belirgin ölçüde düşebildiğini, buna karşılık elastisite modülünde kayda değer bir artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilen kırık yüzey analizleri, arayüzeydeki zayıf etkileşimi doğrulamakta; liflerin matris içinden kolayca ayrıldığını ve arayüzey bölgesinde boşlukların oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bu nedenle, fiber takviyeli ABS kompozitlerin tasarım ve üretim süreçlerinde, matris-lif ara yüzey uyumluluğunu artırmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Özenç, 2023).

Üretim parametrelerinden dolgu yoğunluğu, katman yönlendirmesi ve ekstrüzyon sıcaklığı gibi faktörlerin, üretilen parçaların çekme dayanımı ve sertlik değerleri üzerinde belirleyici rol oynadığı anlaşılmıştır. Bu parametrelerin sistematik olarak iyileştirilmesi, mühendislik gereksinimlerini karşılayan güvenilir ve performanslı ürünlerin imal edilmesine olanak sağlamaktadır. Kompozit malzeme sistemlerinde ise matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağlanma kalitesinin, nihai mekanik performans üzerinde en etkili unsur olduğu gözlemlenmiştir. Yetersiz ara yüzey etkileşimi, fiber takviyesinin sağladığı olası mukavemet artışını etkisiz hale getirerek malzeme dayanımının beklenenin altında kalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, yüzey modifikasyon teknikleri veya arayüzey uyumlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak ara yüzey bağlanmasının güçlendirilmesi, kompozit malzeme tasarımında hayati önem taşımaktadır.

3.4. Diğer Ürünler

Bu bölümde, tez çalışmasında dolgu maddesi olarak kullanılan kalsit minerali ve iğde çekirdeği ununa ilişkin genel tanımlamalar ve bu malzemelerin temel karakteristikleri yer almaktadır.

3.4.1. Kalsit

Kalsiyum karbonat (CaCO_3) olarak da bilinen kalsit, karbonatlı kayaların temel yapı taşı oluşturan bir mineraldir. Doğada çeşitli kristal formlarda bulunabilen bu mineral, saydam ve renksiz bir görünüme sahip olup camsı bir parlaklık sergiler. Sertlik değeri Mohs ölçeğinde 3, özgül ağırlığı ise yaklaşık 2,6-2,7 gr/cm^3 aralığındadır. Öğütülmesi kolay olduğundan, beyaz renkli ince bir toz formuna getirilebilir. Kalsiyum karbonat, termoplastik malzemelerin performansını iyileştirmek için yaygın şekilde kullanılan bir katkı maddesidir. Ulaşılabilirliğinin yüksek ve ekonomik olması, tercih edilme oranını artırmaktadır. Özellikle polipropilen, polietilen ve polivinil klorür gibi polimerlerde hem mekanik mukavemeti artırmak hem de üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla kalsit katkıları sıklıkla kullanılır (Zeren, 2013).

Kompozitlerin mekanik performansı, takviye elemanı ile polimer matris arasındaki arayüzey bağlarının niteliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu arayüzey etkileşimleri ise, her iki bileşenin fiziksel ve kimyasal niteliklerine, karışım içindeki yoğunluklarına ve kompozitin üretim yöntemine bağlı olarak şekillenir. Takviye malzemesinin yüzey kimyası ve reaktivitesi kontrol altına alınarak, matrisle olan bağ kuvveti artırılabilir; bu amaçla takviye yüzeyi çeşitli kimyasal işlemlerden geçirilebilir. Özellikle kalsiyum karbonat, yüksek polaritesi ve geniş yüzey alanı nedeniyle, kutupsuz yapıdaki bir polietilen matrisi içinde etkili bir şekilde dağılım göstermekte zorlanır. Bu uyumsuzluk, parçacıkların topaklanmasına (aglomerasyon) ve matris içinde mikro boşluklar oluşmasına yol açabilir. Ortaya çıkan bu heterojen yapı, malzemenin çatlama direncini zayıflatmakta ve genel mekanik mukavemetin düşmesine neden olmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için kalsiyum karbonat taneciklerinin yüzeyi stearik asit gibi maddelerle kaplanarak polimer matrisle daha uyumlu hale getirilebilir. Ayrıca, maleik anhidrit gibi uyumlaştırıcı ajanların kompozit yapıya eklenmesi de kalsiyum karbonatın polimer içinde homojen bir biçimde dağılmasını sağlayarak mekanik özellikleri iyileştirebilmektedir (Kundu, ve diğerleri. 2004).

3.4.2. İğde çekirdeği

Elaeagnus angustifolia L., yaygın olarak "Rus Zeytini", "Yabani Zeytin" veya "Oleaster" isimleriyle bilinen, Ilıgnagiller (*Elaeagnaceae*) familyasından bir türdür. Kış aylarında yapraklarını döken bu bitki, çalı veya küçük bir ağaç formunda gelişim gösterir. Yaklaşık 7 metreye ulaşabilen boyu, karakteristik gümüşü-yeşil yaprakları, üzerinde dikenler bulunan dalları ve hoş kokulu, aromatik çiçekleri ile ayırt edilir (Amiri, Baratian and Hosseinzadeh, 2016).

Elaeagnus angustifolia'nın anavatanı Asya ve Güney Avrupa olarak bilinmekte olup, Türkiye'de başta İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgeleri olmak üzere nehir yatakları boyunca uzanan riparian zonlar ve sulak koridorlar gibi alanlarda doğal yayılım göstermektedir. Bu türün ekolojik açıdan en dikkat çeken özelliği, zorlu çevre koşullarına karşı gösterdiği üst düzey uyum kapasitesidir. Tuzluluğa, kuraklığa ve şiddetli sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığı, onu marjinal ve kullanımı sınırlı tarım arazilerinin iyileştirilmesi ve değerlendirilmesi için öne çıkan bir tür haline getirmektedir (Akgül, ve Akça, 2020).

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, atık ABS esaslı hibrit kompozitlerin üretim aşamaları, kullanılan ham maddelerin hazırlık süreçleri ve numunelerin fiziksel ile mekanik özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan deneysel test prosedürleri detaylandırılmaktadır.

4.1. Malzeme Temini

Bu tez, deniz yapıları ve yüzer platformların geleceğinde daha sürdürülebilir bir malzeme ekosistemi oluşturmak adına, yaygın kullanılan Yüksek Yoğunluklu Polietilene güçlü bir aday olarak Akrilonitril Bütadien Stiren polimerinin yapısal ve ekolojik yetkinliğini değerlendirmektedir. Araştırmada kullanılan ABS malzemeler, hurda haline gelmiş 3D baskı ürünlerinden temin edilmiştir. Bu atık ürünler hem kendi laboratuvarımızdaki 3D yazıcılardan hem de sektörde faaliyet gösteren firmalarla yapılan iş birlikleri sonucunda, baskı kusurlarına sahip veya kullanım ömrünü tamamlamış numunelerden derlenmiştir.

4.2. Kompozit Malzeme Üretim Süreci

Kompozit malzeme üretiminde atık ABS'nin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, malzemeyi homojenize etmeyi ve işlenebilir bir forma sokmayı amaçlayan sistematik ön işlemleri gerektirmektedir. Çalışmanın bu ilk bölümü, atık ABS'nin ekstrüzyon yoluyla kompozit üretimi için uygun besleme stoğuna (granül) dönüştürülmesine odaklanmıştır. Süreç, malzemenin mekanik özelliklerini koruyarak boyutunun kontrollü bir şekilde azaltılmasıyla başlamıştır.



Resim 4.1. Atık ABS

Bu kapsamda, resim 4.1’de toplanmış atık ABS numuneleri öncelikle kaba parçalama için bir çeneli kırıcı veya düşük devirli granülatörden geçirilmiş; böylece düzensiz şekilli ve büyük parçalar, işleme alınabilecek daha küçük ve uniform parçacıklara ayrılmıştır. Elde edilen bu ara ürün, daha sonra ince öğütme işlemine tabi tutularak, ekstrüder besleme haznesinde akışı kolaylaştıracak ve erimeyi homojenleştirecek optimum boyut aralığında granüllere dönüştürülmüştür. Bu hazırlık aşaması, atık malzemenin kompozit formülasyonuna düzgün bir şekilde entegrasyonunun temelini oluşturmaktadır.



Resim 4.2. Kırma makinesi

Atık plastiklerin öğütme işlemi resim 4.2’de verilen kırma cihazında yapılırken, bu cihaz 18.5 kW motor gücüne ve 30x60 cm ölçülerinde besleme haznesine sahip endüstriyel bir kırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Beş bıçaktan oluşan sistemi ile saatte 220 kg işleme kapasitesine sahip olan bu makine, 500 devir/dakika hızında çalıştırılmıştır. Öğütme esnasında ölçülen gürültü seviyesi 90-95 dB(A) aralığında kaydedilmiştir.

Öğütme işlemi sonrasında elde edilen ve parçalanmış durumdaki atık ABS numuneleri, resim 4.3’te gösterilmektedir.



Resim 4.3. Kırık ABS

Parçalama işleminden sonra, teknik özellikleri Şekil 4.4'te görülen atık ABS numunelerini işlemeye uygun olan daha küçük parçaları öğütmek için kullanılan Shinder öğütücü makine kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Makinenin 80 x 100 mm²'lik kırma bölgesi açıklığı, başlangıç malzemesinin boyutuna uygun bir besleme imkânı sağlamıştır. Öğütme işleminin merkezinde yer alan 90 mm çapındaki rotor, 9 adet bıçak ile donatılmıştır ve bu yapı, 2 adet sabit stator bıçağı ile birlikte etkili bir kesme mekanizması oluşturmaktadır. Tüm sistem, 0.75 kW gücündeki bir motor tarafından tahrik edilmektedir. Nispeten hafif olan ve yaklaşık 20 kg ağırlığa sahip bu kompakt makine, yüksek kapasiteli endüstriyel modellere kıyasla daha küçük ölçekli laboratuvar çalışmaları için ideal bir verimlilik ve kullanım kolaylığı sunmaktadır.



Resim 4.4.Schneider öğütme makinesi

Parçalanmış ABS malzemelerin işlenmesinin bir sonraki aşaması, bu parçaların homojen bir kompozit karışımı için uygun boyuta getirilmesidir. Bu amaçla, malzeme Shinder marka öğütücüde işlenerek granül boyutuna yakın, ince bir partikül yapısına kavuşturulmuştur. Elde edilen bu öğütülmüş form, daha sonraki katkı malzemeleri ile karıştırma işlemine doğrudan hazır hale gelmiştir. İşlem sonucunda ulaşılan partikül boyutu ve görünüm, Şekil 4.5'te sunulmaktadır.



Resim 4.5.Toz ABS

Atık ABS malzemesi, ağırlıkça üç farklı kompozisyon oluşturacak şekilde karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu karışım oranları şu şekilde belirlenmiştir:

1. %95 öğütülmüş atık ABS + %2,5 kalsit + %2,5 iğde çekirdeği tozu,
2. %90 öğütülmüş atık ABS + %5 kalsit + %5 iğde çekirdeği tozu,
3. %80 öğütülmüş atık ABS + %10 kalsit + %10 iğde çekirdeği tozu.

Her bir karışım kompozisyonunun belirlenen oranlarda hazırlanabilmesi için bileşenler, resim 4.6'da görüldüğü gibi hassas terazi kullanılarak tartılmış ve birleştirilmiştir. Karışımın homojenliğini sağlamak amacıyla, öncelikle bileşenler elle karıştırılmış, ardından laboratuvar tipi bir döner karıştırıcıda 5 dakika boyunca mekanik olarak karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.



Resim 4.6. Hassas terazide ABS

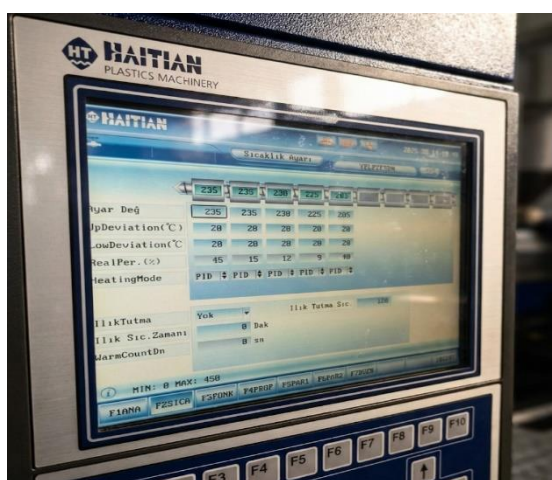
Öğütülmüş ve homojenleştirilmiş karışımların işlenebilir granüllere dönüştürülmesi, tek vidalı bir laboratuvar tipi compound ekstrüderi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon parametreleri, atık ABS'nin polimer yapısı ve doğal dolgu maddelerinin (kalsit ve iğde çekirdeği tozu) termal davranışları dikkate alınarak her bir kompozisyon grubu için ayrı ayrı optimize edilmiştir. Bu optimizasyonun temel amacı, malzemenin bozunmasını engelleyerek viskoziteyi kontrol altına almak ve dolgu maddelerinin polimer matris içinde etkin bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Bu nedenle, karışım bileşenlerinin tamamının eriyebileceği ve uygun akışkanlığa kavuşabileceği özel bir sıcaklık profili belirlenmiştir. Ekstrüder boyunca farklı ısıtma bölgeleri için ayarlanan bu kademeli sıcaklık değerleri sayesinde daha optimum hale getirilmiştir. Resim 4.8’de Ekstrüder Makinesi ve Ekstrüder ısı bölgeleri görülmektedir.



Resim 4.8. Ekstrüder ısı bölgeleri ve ekstrüder makinesi

Ekstrüder nozulundan sürekli bir şerit halinde çıkan erimiş polimer, boyutsal stabilizasyonu ve kristal yapıyı kontrol etmek amacıyla hemen bir su banyosundan geçirilerek hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Katılaştıran polimer şeridi, daha sonra otomatik bir pellet (granül) kesici yardımıyla standart boyutlarda küçük silindirik granüllere dönüştürülmüştür. Üretilen bu granüller, nemin malzeme özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yaratmaması ve sonraki aşama olan enjeksiyon kalıplama işleminde buhar oluşumunu engellemek için, nemi uzaklaştıran vakumlu alüminyum bariyerli özel poşetlerde muhafaza edilmiştir. Bu depolama yöntemi, granüllerin düşük nem seviyesini koruyarak nihai ürün kalitesini garanti altına almıştır.

Mekanik karakterizasyon testlerinde kullanılacak standart numunelerin üretimi için, ekstrüzyon ile elde edilen kompozit granüller, laboratuvar ölçekli bir enjeksiyon kalıplama makinesi ile işlenmiştir. İşlem sıcaklığı, ABS matrisinin optimal akışkanlığını sağlamak ve dolgu malzemelerinin (kalsit ve iğde çekirdeği unu) bozulmasını önlemek amacıyla 210°C olarak sabitlenmiştir. Enjeksiyon basıncı, tutma süresi ve soğutma zamanı gibi diğer kritik parametreler, numune geometrisine ve malzeme akış özelliklerine bağlı olarak optimize edilerek, her bir kompozit grubu için iç yapı bütünlüğü yüksek ve tekrarlanabilir test numunelerinin (örneğin, çekme çubukları ve darbe çubukları) üretimi sağlanmıştır. Bu numuneler, sonraki aşamada gerçekleştirilecek mekanik testlerde karşılaştırmalı veri elde edilmesine olanak tanımıştır. Resim 4.9. Isı bölgeleri ve Enjeksiyon makinesi görülmektedir.



Resim 4.9. Isı bölgeleri ve enjeksiyon makinesi

4.3. İzod (Çentikli) Darbe Testi

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen ABS numunelerinin çentikli darbe tokluğu, malzemenin kırılma davranışını karakterize etmek amacıyla ASTM D256 standardına uygun olarak bir Charpy test cihazı ile belirlenmiştir. Testler, 23°C'de ve öncelikle CEAST marka bir cihazla 8 mm kalınlık ve 4 mm genişlikte hazırlanan numunelerin geniş yüzeyine açılan standart V-tipi çentik sonrası efektif kalınlığı 2 mm'ye indirilmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan test düzeneği, 2,75 Joule enerji kapasitesine sahip bir sarkaçtan oluşmakta olup, sarkaç test öncesinde 150 derecelik bir açıyla kaldırılarak sabitlenmiş ve 9,84 m/s² olarak kabul edilen yerçekimi ivmesi dikkate alınarak yapılan enerji hesaplamaları ile numunelerin darbe direnci değerlendirilmiştir. Resim 4.12. Çentik cihazı ve Darbe test cihazı görülmektedir.



Resim 4.12. Çentik cihazı ve darbe test cihazı

Geri dönüştürülmüş Akrlonitril Bütadien Stiren (RABS) polimerinin mekanik performansını, özellikle de darbe dayanımını karakterize etmek amacıyla İzod darbe testi uygulanmıştır. Test prosedürü, polimer malzemelerin darbe tokluğunun belirlenmesi için uluslararası kabul görmüş olan ASTM D256 standardına titizlikle uygun olarak tasarlanmış ve yürütülmüştür. Numuneler, standardın öngördüğü geometrik toleranslar dahilinde, 10 mm'lik başlangıç genişliğine ve 4 mm'lik bir kalınlığa sahip olacak şekilde üretilmiştir. Kritik bir hazırlık aşaması olarak, her bir numunenin yüzeyine kontrollü bir şekilde 2 mm derinliğinde bir "V" çentik açılmıştır. Bu işlem, darbe kuvvetinin yoğunlaşacağı bir stres yükseltici oluşturmanın yanı sıra, numunenin test sırasındaki efektif genişliğini 8 mm'ye

düşürmüştür. Sonuç olarak, darbe yükünün uygulandığı net kesit alanı (kalınlık x çentik sonrası efektif genişlik), $4 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} = 32 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Bu hassas geometrik kontrol, elde edilen darbe enerjisi değerlerinin, malzemenin gerçek birim alan başına tokluk değerine (kJ/m^2 veya ft-lb/in^2) güvenilir bir şekilde dönüştürülmesine ve böylece RABS'in kırılma davranışına ve enerji soğurma kapasitesine dair nicel ve karşılaştırılabilir veriler sağlanmasına olanak tanımaktadır.

Yapılan testler neticesinde Çıkan sonuçlar şu şekildedir;

- | | | |
|--|---|-----------------------|
| 1.%95 atık ABS + %2,5 kalsit + %2,5 iğde çekirdeği unu | ➡ | 5,031 kJ/m^2 |
| 2 .%90 atık ABS+ %5 kalsit + %5 iğde çekirdeği unu | ➡ | 4,093 kJ/m^2 |
| 3 .%80 atık ABS + %10 kalsit + %10 iğde çekirdeği unu | ➡ | 2,156 kJ/m^2 |

ABS, polibütadien kauçuk fazı sayesinde darbe enerjisini plastik şekil değişimi yoluyla absorbe edebilen, sünek bir termoplastiktir. Kalsit (kalsiyum karbonat) gibi sert ve gevrek dolgu malzemeleri ise başlıca polimerin elastikiyet modülünü (sertliğini) yükseltmek için kullanılır. Fakat bu sert parçacıklar, polimer matrisi içinde gerilim yığılmalarına yol açan yoğunlaşma bölgeleri oluşturur. Darbe yükü altında çatlaklar, bu parçacık-matris ara yüzeylerinden başlayarak hızla ilerler. Dolayısıyla, dolgu miktarı arttıkça malzemenin sünekliği ve enerji absorplama kapasitesi azalır; bu durum darbe dayanımındaki düşüşle doğrudan bağlantılıdır. Kompozisyon 3'teki (%20 dolgu) darbe dayanımının, Kompozisyon 1'dekine (%5 dolgu) kıyasla %57'nin üzerinde bir azalma göstermesi, bu olgunun dikkat çekici bir kanıtıdır.

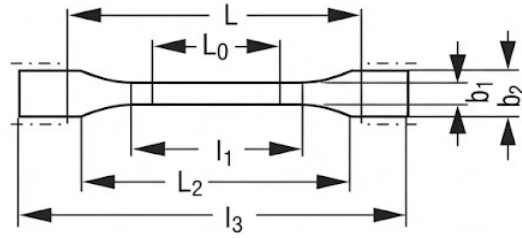
Kompozisyon 1 (%5 toplam dolgu), saf geri dönüştürülmüş ABS'den alınan $4,47 \text{ kJ/m}^2$ 'lik değeri aşarak $5,031 \text{ kJ/m}^2$ sonucu elde etmiştir. Bu bulgu, düşük oranlarda ve iyi dağılmış dolgu maddelerinin, çatlak ilerlemesini engellemek veya enerji sönümleme mekanizmalarını çeşitlendirmek (örneğin parçacık-matris ara yüzeyinden ayrılma veya parçacık çevresinde matrisin şekil değiştirmesi) yoluyla tokluğu belirli ölçüde artırabileceğine işaret etmektedir. İğde çekirdeği ununun bir plastikleştirici veya ara yüzey uyumlaştırıcı olarak işlev görmüş olması da bu iyileşmeye katkı sağlamış olabilir. Kompozisyon 3'te darbe dayanımının $2,156 \text{ kJ/m}^2$ 'ye gerilemesi, malzemenin artık belirgin biçimde gevrek bir karakter sergilediğini göstermektedir. %20 gibi yüksek bir dolgu oranında, parçacıklar birbirine yaklaşarak sürekli bir gevrek ağ yapısı oluşturabilir. Bu durumda, başlayan bir çatlak komşu parçacıklara hızla sıçrayarak kontrolsüz biçimde yayılır ve ani kırılmalara yol açar. Bu da malzemenin darbe enerjisini emme kabiliyetinin önemli ölçüde azaldığı anlamına gelir. Literatürdeki mevcut

çalışmalara göre, saf ABS'nin Izod darbe dayanımı $11,57 \text{ kJ/m}^2$, geri dönüştürülmüş ABS'ninki ise $9,78 \text{ kJ/m}^2$ olarak bildirilmiştir (Taşdelen, Bingöl, Yılmaz ve Kahramanerb, 2019). Ayrıca saf ABS ile Caco3 karışımı neticesinde yapılmış kompozite ait veriler %10 ila %30 arasında $4,5 \text{ kJ/m}^2$ 'den $2,8 \text{ kJ/m}^2$ 'ye doğru bir düşüş görülmüştür (Tang, 2002). Gene başka bir çalışmada % 2 ile % 20 arasında darbe dayanımı $8,5 \text{ kJ/m}^2$ 'den 4 kJ/m^2 'ye bir düşüş gözlenmiştir (Jiang, 2005). Saf HDPE'nin darbe dayanımı ise farklı kaynaklarda $8,5 \text{ kJ/m}^2$ (Akdoğan, 2020) ile $6,93 \text{ kJ/m}^2$ arasında değişmekte olup, geri dönüştürülmüş HDPE için bu değer $6,46 \text{ kJ/m}^2$ (Şengül, 2024) olarak verilmektedir. Bu bağlamda, %95 atık ABS içeren bir kompozisyonndan elde edilen $5,031 \text{ kJ/m}^2$ 'lik darbe dayanımı, özellikle geri dönüştürülmüş HDPE'nin performansı ile kıyaslanabilir düzeydedir. Bu nedenle, yüksek oranda atık ABS içeren malzemenin, birçok HDPE uygulamasında yeterli ve rekabetçi bir darbe direnci sergileyebileceği düşünülmektedir.

4.4.Çekme Testi

Çekme deneyleri için kullanılacak numuneler, enjeksiyon makinesinde, ISO 527-2 standardının 1B tipi numune ölçülerine uygun özel bir kalıp kullanılarak üretilmiştir. Bu işlem, bahsedilen üç farklı kompozisyon için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

ISO 527-2 standardı, çekme özelliklerinin belirlenmesi için temel bir uluslararası kılavuzdur. Esas olarak, başlangıçtaki kalınlığı 1 mm'den büyük olan, enjeksiyon veya presle kalıplanmış ya da levha/plakalardan işlenmiş rijit ve yarı rijit plastiklerin test edilmesi için geçerlidir (ISO, 2012). ISO 527-2 standardı, çekme testi sonuçlarının güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini sağlamak üzere, numunelerin özel bir "köpek kemiği" (dambıl) geometrisinde ve kontrollü koşullarda hazırlanmasını şart koşar; bu tasarım, gerilme yoğunluğunu numunenin geniş omuz kısımlarına yönlendirerek, deformasyon ve nihai kırılmanın daha dar olan ölçüm uzunluğu bölgesinde gerçekleşmesini garanti eder ve böylece malzemenin gerçek çekme özelliklerinin (çekme modülü, akma ve kopma değerleri) doğru bir şekilde belirlenmesine olanak tanır. Şekil 4.1'de ISO 527-2'ye ait çekme numune boyutları gösterilmiştir.



Standart	l_w mm	l_n mm	b_b mm	b_n mm	h mm	L_c mm	L mm	Geometrisi
İSÖ 527-2 1A	≥ 150	80 ± 2	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2 (preferred)	50 ± 0.5	115	
İSÖ 527-2 1B	≥ 150	60 ± 0.5	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2 (preferred)	50 ± 0.5	$l_2 + 5^3$ $l_2 = 106 \dots 120$	
İSÖ 527-2 1BA	≥ 75	30 ± 0.5	10 ± 0.5	5 ± 0.5	≥ 2	25 ± 0.5	$l_2^a + 2^b$ $l_2 = 58 \pm 2$	
İSÖ 527-2 1BB	≥ 30	12 ± 0.5	4 ± 0.2	2 ± 0.2	≥ 2	10 ± 0.2	$l_2 + 5^a$ $l_2 = 23 \pm 2$	
İSÖ 527-2 5A	≥ 75	25 ± 1	12.5 ± 1	4 ± 0.1	≥ 2	20 ± 0.5	50 ± 2	
İSÖ 527-2 5B	≥ 35	12 ± 0.5	6×0.5	2 ± 0.1	≥ 1	10 ± 0.2	20 ± 2	

Şekil 4.1. ISO 527-2 göre numune boyutları

ISO 527-2 1B standartlarında üretilmiş olan ABS kompozit çubuklarımız resim 4.13'te gösterilmektedir.



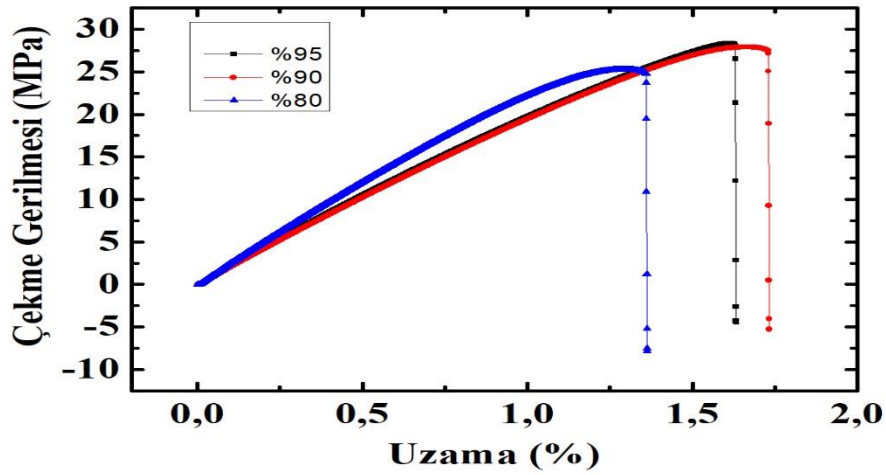
Resim 4.13. Kompozit numuneler

Çekme testleri, Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki tesislerde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde kullanılan ekipman, resim 4.14'de görülen, Shimadzu marka Autograph AGS-X serisi bir Universal (Evrensel) Mekanik Test Cihazı'dır. Söz konusu cihaz, 100 kN'luk yük kapasitesiyle metal, kompozit, seramik, beton, ahşap ve benzeri çeşitli malzemelerin çekme, basma ve eğme gibi mekanik özelliklerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Test yazılımı, maksimum ve minimum kuvvet değerleri, akma noktası (yield point), standart sapma, enerji absorpsiyonu gibi parametrelerin yanı sıra, önceden tanımlanmış bir uzamaya karşılık gelen yük değerini veya belirli bir yük altındaki uzama miktarını istatistiksel olarak hesaplayıp raporlayabilmektedir.



Resim 4.14. Çekme test cihazı

Gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda; atık ABS tabanlı kompozitlerin çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Kompozisyon 1 (%95 ABS) için çekme dayanımı 28,5 MPa, kopma uzaması %1,65 ve elastisite modülü 1,90 GPa olarak ölçülmüştür. Kompozisyon 2 (%90 ABS) numunesinde çekme dayanımı 27,5 MPa ve elastisite modülü 2,00 GPa değerine ulaşırken, kopma uzaması %1,75 olarak kaydedilmiştir. Son olarak, en yüksek dolgu oranına sahip Kompozisyon 3 (%80 ABS) numunesinde çekme dayanımı 25,5 MPa ve kopma uzaması %1,35'e gerilerken, elastisite modülünün 2,50 GPa seviyesine yükseldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.2.Çekme testi eğrisi

Literatürde ABS ve HDPE üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, çizelge 4.1’de listelenmiştir.

Çizelge 4.1 ABS ve HDPE için yapılan literatür çalışması

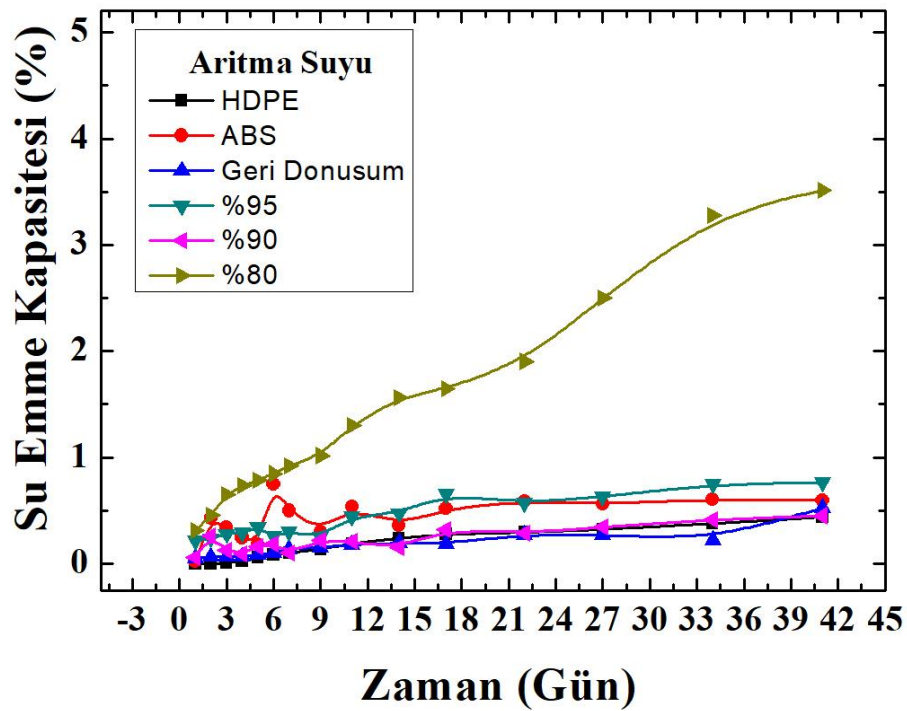
Malzeme	Kaynak	Üretim Yöntemi/Şartlar	Çekme Dayanımı (MPa)
Saf ABS	Vácha ve Borůvka (2017)	50 mm/dk yükleme hızı	40,12
Saf ABS	Manish ve ark. (2018)	-	44 - 50
Saf ABS	Janutėnienė ve ark. (2024)	3D Yazıcı	32,77
ABS/ %1 CaCO ₃	Meng ve ark. (2016)	3D Yazıcı	34
rABS	Manish ve ark. (2018)	-	35 - 40
rABS	Peydro ve ark. (2013)	-	41,58
rABS	Verbeeten ve ark. (2021)	5 mm/dak hız	32 - 36
rABS	Janutėnienė ve ark. (2024)	3D Yazıcı	31,27
Saf HDPE	Amjadi ve Fatemi (2020)	Enjeksiyon	17,8
Saf HDPE	Żenkiewicz ve Richert (2008)	Ekstrüzyon	36
Saf HDPE	Rezakalla ve Petrovna (2021)	-	27,55
rHDPE	Amjadi ve Fatemi (2020)	Enjeksiyon	19,0
rHDPE	Rezakalla ve Petrovna (2021)	-	26,44

Bu bilgiler ışığında Kompozisyon 1, yaklaşık 28,5 MPa ile en yüksek çekme dayanımı ve %1,65 kopma uzaması sergilemişti Düşük dolgu oranı, polimer matrisinin sürekliliğini büyük ölçüde korumasına izin vermiştir. Darbe testinde görülen "tokluk artışı" çekme dayanımında görülmesi de, malzemenin yapısal bütünlüğü korunmuştur. Ancak bu değer, literatürdeki rABS alt limiti olan 31,27 MPa'nın yaklaşık %9 altındadır. Bu durum, %5'lik düşük dolgu oranının bile polimer zincirleri arasında gerilim yığılma noktaları oluşturmaya başladığını gösterebilir iyi bir alternatif olacağını göstermiştir. Dolgu oranının %10'a çıkmasıyla çekme dayanımı yaklaşık 27,5 MPa değerine gerilerken, kopma uzamasının ilginç bir şekilde %1,75 seviyesine yükseldiği gözlemlenmiştir. Uzama miktarındaki bu sınırlı artış, darbe dayanımı metninizde belirttiğiniz "iğde çekirdeği ununun plastikleştirici rolü" ile açıklanabilir. Belirli bir konsantrasyonda iğde çekirdeği unu, kalsitin neden olduğu gevrekleşmeyi bir miktar dengeleyerek matrise sınırlı bir hareket kabiliyeti kazandırmış olabilir. Yine de dayanım, dolgu miktarındaki artışa bağlı olarak düşüş trendini sürdürmüştür. Çalışmanın en yüksek dolgu oranına sahip bu numunesi, yaklaşık 25,5 MPa çekme dayanımı ve %1,35 ile en düşük kopma uzamasını kaydederek malzemenin mekanik olarak en zayıf noktasını temsil etmiştir. Darbe dayanımı analizinde belirtilen "sürekli gevrek ağ oluşumu", çekme grafiğinde ani ve düşük uzamalı kopma ile kendini teyit etmektedir. %20 dolgu oranında, partiküller arası mesafe kritik seviyeye inmiş ve matris artık uygulanan çekme yükünü homojen bir şekilde dağıtamayarak arayüzeylerden ayrılmaya (debonding) başlamıştır.

4.5. Su Emilim Testi

ASTM D570 standardı, plastik malzemelerin nemli ortamlarda veya suya daldırıldıklarında gösterdikleri su alma davranışlarını değerlendirmek amacıyla oluşturulmuş ve bu alandaki en detaylı test yöntemini sunar. Söz konusu metot, malzemenin çeşidi, geometrik yapısı ve uygulama alanı gibi faktörlere bağlı olarak farklılaştırılmış test süreçlerini içerir. Analitik terazi, bu deneyin gerçekleştirilmesinde kilit rol oynayan bir ekipmandır. ASTM D570 standardı, kullanılacak terazinin ölçüm hassasiyetinin minimum 0,01 gram (0.1 mg) olmasını zorunlu kılar. Özellikle HDPE gibi su emilimi yalnızca yaklaşık %0.01 mertebesinde olan düşük emici malzemelerde, bu yüksek duyarlılık sonuçların güvenilirliği açısından vazgeçilmezdir (ASTM International, 2018).

Bu çalışmada, halihazırda yüzer güneş enerjisi sistemlerinde (yüzer GES) yaygın olarak kullanılan HDPE malzemeye alternatif geliştirmek amacıyla, ABS, geri dönüşüm ABS ve bu matrisler esas alınarak üretilen iğde çekirdeği tozu ve kalsit katkılı kompozitlerin su emme davranışları incelenmiştir. Kompozitler, ekstrüzyon yöntemiyle, iğde çekirdeği tozu ve kalsit eşit oranlarda olacak şekilde toplam %5, %10 ve %20 katkı içerecek biçimde hazırlanmıştır. Su emme ölçümleri, 7 günlük periyot boyunca; 1 gün arayla yapılan ölçümler, ardından 2, 3, 5 ve 7 gün aralıklarla ikişer defa gerçekleştirilen ilave ölçümlerle tamamlanmıştır. Şekil 4.3. arıtma suyunda toplam 41 günde gerçekleştirilen su emme test sonuçlarını göstermektedir.

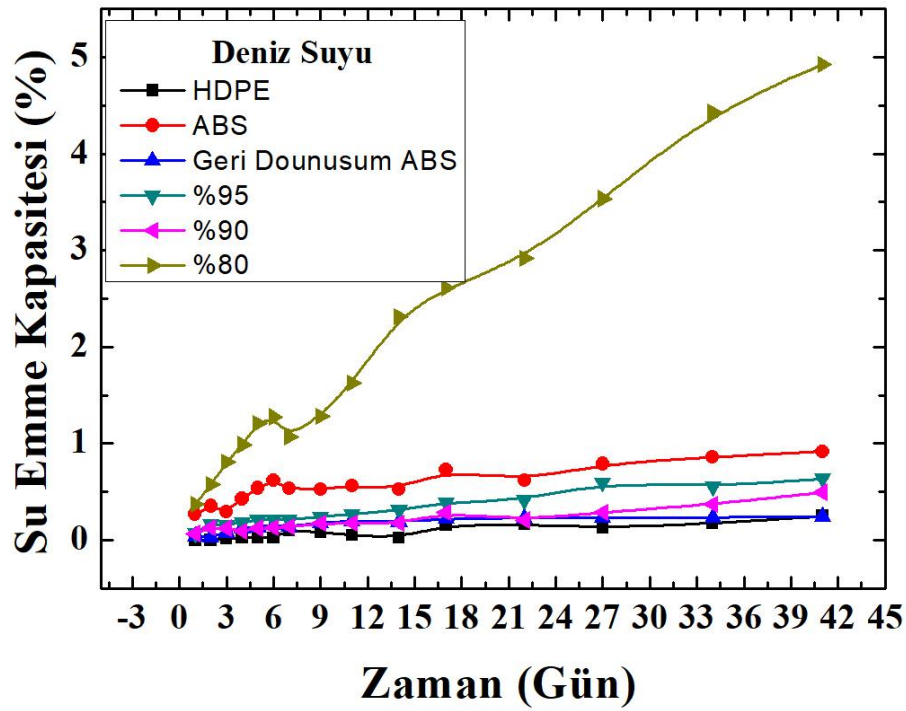


Şekil 4.3. Arıtılmış suyun emilim testi

Arıtma suyu ortamında gerçekleştirilen su emme testleri, tüm numuneler için en düşük su emme değerlerinin bu ortamda elde edildiğini göstermiştir. HDPE numuneler, test süresi boyunca oldukça düşük ve stabil bir su emme davranışı sergileyerek referans malzeme niteliğini korumuştur. Saf ABS ve geri dönüşüm ABS numuneleri, HDPE'ye kıyasla bir miktar daha yüksek su emme göstermiş olsa da, değerler sınırlı seviyelerde kalmıştır.

Katkılı ABS kompozitlerde, katkı oranına bağılı olarak kademeli bir su emme artışı gözlemlenmiştir. %5 katkıli kompozitler, arıtma suyu ortamında HDPE'ye oldukça yakın su emme değerleri sergilemiş ve uzun süreli maruziyette doygunluğa yakın bir davranış belirginleşmiştir. %10 katkıli kompozitlerde su emme miktarı artmış olmakla birlikte, artış kontrollü bir eğilim göstermiştir. %20 katkıli kompozitler ise arıtma suyunda dahi diğer numunelere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek su emme değerlerine ulaşmıştır.

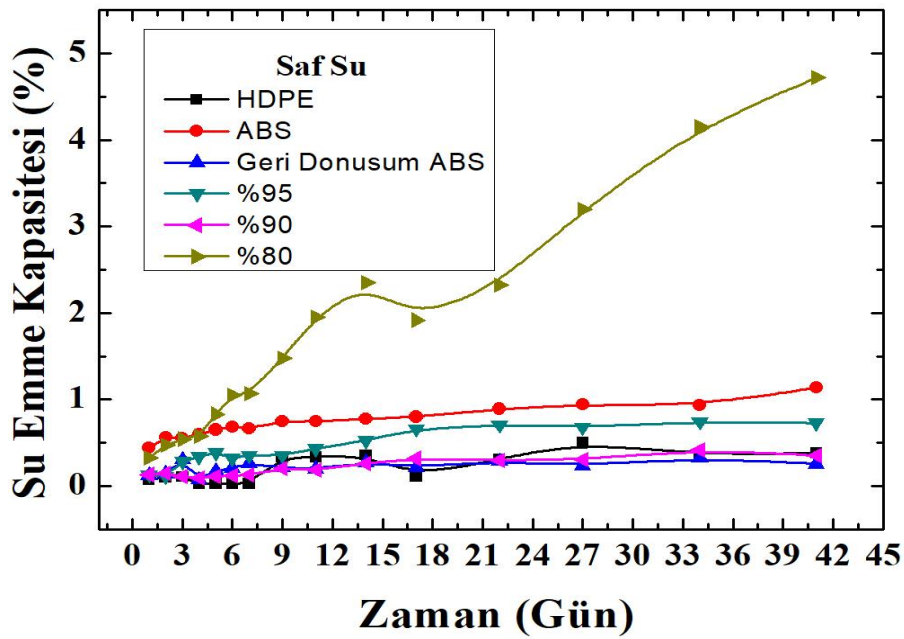
Şekil 4.4. aynı koşullar altında tüm malzemeler için gerçekleştirilen deniz suyu emilim sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.4. Deniz suyu emilim testi

Deniz suyu ortamında elde edilen sonuçlar, arıtma suyuna kıyasla daha yüksek, saf suya kıyasla ise daha düşük su emme değerleri ile karakterizedir. HDPE numuneleri, deniz suyunda da en düşük su emme kapasitesine sahip olup stabil davranışlarını sürdürmüştür. Saf ABS ve geri dönüşüm ABS numuneleri, HDPE'ye göre daha yüksek su emme göstermiştir; ancak bu artış, uzun süreli maruziyet boyunca sınırlı kalmıştır.

Katkılı kompozitlerde, katkı oranının artmasıyla birlikte su emme miktarının düzenli olarak yükseldiği görülmüştür. %5 katkılı kompozitler deniz suyu ortamında görece düşük su emme değerleri sergilerken, %10 katkılı kompozitlerde su emme miktarı daha belirgin hale gelmiştir. %20 katkılı kompozitler ise deniz suyunda en yüksek su emme değerlerine ulaşmıştır. Deniz suyunda bulunan çözünmüş tuzların, osmotik etki yoluyla su moleküllerinin polimer matrisine difüzyonunu kısmen sınırlandırdığı düşünülmektedir.



Şekil 4.5. Saf su emilim testi

Benzer şekilde Şekil 4.5. saf su ortamında gerçekleştirilen testlere ait sonuçları göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, saf su ortamında tüm numuneler için en yüksek su emme değerlerinin elde edildiği görülmektedir. HDPE numuneler, saf suya maruz kaldığında dahi düşük su emme kapasitesini koruyarak yüzer GES uygulamaları için uygunluğunu ortaya koymuştur. Saf ABS ve geri dönüşüm ABS numuneleri, HDPE'ye kıyasla daha yüksek su emme göstermiştir; ancak artış eğilimi zamana bağlı olarak sınırlı kalmıştır.

İğde çekirdeği tozu ve kalsit katkılı kompozitlerde, saf su ortamında katkı oranının etkisi daha belirgin hale gelmiştir. %5 katkılı kompozitlerde su emme artışı sınırlı seviyelerde kalırken, %10 katkılı kompozitlerde zamanla artan bir su emme eğilimi gözlemlenmiştir. %20 katkılı kompozitler ise saf su ortamında belirgin şekilde daha yüksek su emme değerlerine ulaşmış ve test süresi boyunca doygunluğa ulaşmamıştır. Bu davranış, iğde çekirdeği tozunun hidrofilik yapısının saf su ortamında daha etkin hale gelmesi ile ilişkilendirilebilir.

Çizelge 4.2. Su emilim testi literatür tarama sonuçları

Malzeme Türü	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Süresi	Su Emilim Oranı (%)	Kaynak
Saf ABS	24 saat	-	%0,27	Ramaraj (2006)
Saf ABS	24 saat	-	%4,77	Behera (2024)
Saf ABS	-	-	%0,80	Mishra, Negi ve Kar (2024)
rABS	-	-	%0,97	Mishra, Negi ve Kar (2024)
ABS	24 saat	37 gün	%7,11	Alam, Hassan ve Lee (2024)
SAF HDPE	24 saat	-	%0,015	Wilson ve Amgbari (2025)
SAF HDPE	-	-	%0,50	Rasib, Mariatti ve Atay (2021)
rHDPE	-	-	%0,27	Wilson ve Amgbari (2025)
rHDPE	24 saat	7 gün	%0,37	Chong vd. (2017)

Çizelge 4.2. Su emilim testi literatür tarama sonuçları saf HDPE (%0,015-%0,5) ve eklemeli imalatla üretilen ABS (%7,11-%9,54) verileriyle uyumlu olarak, grafiklerinizde saf HDPE her üç ortamda da en düşük su emilimiyle en dirençli yapıya sahiptir. Atık malzemelerden hazırladığınız hibrit karışımlarda, özellikle katkı oranı arttıkça (%80 gibi) su emiliminin saf suda %2'ye yaklaşması, geri dönüştürülmüş bileşenlerin ve dolguların literatürdeki beklentilere paralel şekilde su tutma kapasitesini artırdığını göstermektedir. Saf sudaki yüksek doygunluğa karşın deniz ve arıtma suyundaki daha stabil sonuçlar, geliştirdiğiniz formülasyonların farklı sucul ekosistemlerdeki dayanıklılığını optimize etmek adına güçlü bir bilimsel veri sunmaktadır. Bu bulgular, sürdürülebilir bir alternatif olarak sunduğunuz çalışmanızın teknik performansını, literatürdeki akademik verilerle tutarlı bir şekilde doğrulamaktadır.

5. SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmalar ve analizler neticesinde, atık ABS polimerinin kalsit ve iğde çekirdeği unu ile modifiye edilmesiyle elde edilen hibrit kompozitlerin, sürdürülebilir bir alternatif olarak literatür verileriyle genel bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Su emilimi testlerinde saf HDPE'nin her üç ortamda en dirençli yapı olduğu gözlemlenirken, geliştirilen hibrit karışımlarda katkı oranı arttıkça su tutma kapasitesinin de yükseldiği saptanmıştır. Bu durum, geri dönüştürülmüş bileşenlerin ve dolguların literatürdeki beklentilere paralel şekilde su emilimini artırıcı bir etki yarattığını göstermektedir. Bununla birlikte, numunelerin deniz ve arıtma suyunda saf suya oranla daha kararlı ve stabil sonuçlar vermesi, geliştirilen formülasyonların farklı sucul ekosistemlerdeki yapısal dayanıklılığını optimize etmek adına güçlü bir potansiyel sunduğunu kanıtlamaktadır.

Mekanik özellikler incelendiğinde, en düşük dolgu oranına sahip kompozisyonun en yüksek çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerini sergilediği görülmüştür. Düşük dolgu oranının polimer matrisindeki sürekliliği büyük ölçüde korumaya izin verdiği, ancak dolgu miktarının artmasıyla birlikte matris içerisindeki gerilim yığılma noktalarının çoğalmasına bağlı olarak dayanımda bir düşüş trendinin başladığı belirlenmiştir. Dolgu oranındaki artışla kopma uzamasında gözlenen sınırlı yükseliş, iğde çekirdeği ununun matris içerisinde kalsitin neden olduğu gevrekleşmeyi bir miktar dengeleyerek plastikleştirici bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Ancak en yüksek dolgu oranına ulaşıldığında, çekme dayanımının ve kopma uzamasının en düşük seviyelere gerilemesi, matris ile dolgu maddesi arasındaki etkileşimin zayıfladığını ve arayüzeylerden ayrılmaların başladığını doğrulamaktadır.

Darbe direnci açısından yapılan kıyaslamalarda, yüksek oranda atık ABS içeren kompozitlerin darbe dayanımının saf ve geri dönüştürülmüş ABS değerlerinin altında kaldığı görülmüştür. Buna karşın, elde edilen performansın geri dönüştürülmüş HDPE verileriyle kıyaslanabilir ve rekabetçi bir düzeyde olması dikkat çekicidir. Bu bulgu, geliştirilen malzemenin özellikle yüksek oranda atık içererek ekonomik ve çevreci bir avantaj sağlarken, birçok HDPE uygulama alanında teknik açıdan yeterli bir direnç sergileyebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, geliştirilen hibrit formülasyonlar hem mekanik yeterlilikleri hem de çevresel kararlılıkları ile sürdürülebilir malzeme teknolojileri ve özellikle yüzer platform tasarımları için akademik verilerle tutarlı, nitelikli bir alternatif sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, M. N. and Yahya, A. (2023). Effects of 3D printing parameters on mechanical properties of ABS samples. *Designs*, 7(6), 136.
- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257.
- Akdoğan, E. (2020). The effects of high density polyethylene addition to low density polyethylene polymer on mechanical, impact and physical properties. *European Journal of Technique*, 10(1), 25-37.
- Akgül, M. and Akça, M. (2020). The chemical and morphological properties of oleaster. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(2), 185–192.
- Akkurt, S. (2007). *Plastik malzeme bilimi, teknolojisi ve kalıp tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Alam, S., Hassan, M. T., Merrell, J. and Lee, J. (2024). Comparative analysis of water-induced response in 3D-printed SCF/ABS composites under controlled diffusion. *SAMPE Conference Proceedings*, Long Beach, CA, United States.
- Amiri Tehranizadeh, Z., Baratian, A. and Hosseinzadeh, H. (2016). Russian olive (*Elaeagnus angustifolia*) as a herbal healer. *Bioimpacts*, 6(3), 155–167.
- Amjadi, M. and Fatemi, A. (2020). Tensile behavior of high-density polyethylene including the effects of processing technique, thickness, temperature, and strain rate. *Polymers*, 12(9), 1857.
- Andrady, A. L. and Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984.
- Anto, T. and Rejeesh, C. R. (2023). Synthesis and characterization of recycled HDPE polymer composite reinforced with nano-alumina particles. *Materials Today: Proceedings*, 72(6), 3177–3182.
- Kanwal, H., Nadeem, H., Azeem, F., Rasul, I., Muzammil, S., Zubair, M., Imran, M., Afzal, M. and Siddique, M. H. (2023). Generation and impact of microplastics and nanoplastics from bioplastic sources.
- ASTM International. (2018). Standard test method for water absorption of plastics (ASTM D570-98).
- Baran, I. and Kasperek, M. (1989). Marine Turtles of Turkey; Status Survey 1988 and Recommendations For Conservation and Management, WWF Report, Heidelberg, 123-130.

- Bartczak, Z. (2005). Effect of chain entanglements on plastic deformation behavior of linear polyethylene. *Macromolecules*, 38, 7702–7713.
- Behera, B. K. (2024). Mechanical, viscoelastic, and biodegradability characteristics of ramie fibre-reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites. *Journal of Applied Polymer Science*.
- Bilici, M. K. (2011). *Polietilenin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Özellikleri*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Boldizar, A. and Moller, K. (2003). Degradation of ABS during repeated processing and accelerated ageing. *Polymer Degradation and Stability*, 81(2), 359–366.
- Budin, S., Hyie, K. M., Yussof, H. and Ishak, A. (2020). Investigation on mechanical properties of blend virgin and recycled acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) in injection molding. *Key Engineering Materials*, 833, 8–12.
- Bulut, M., Kaplanoglu, İ. ve Geylani, V. (2018). *Dünyada hidro yüzer GES projelerinin gelişimi ve Türkiye'deki potansiyeli* [Konferans bildirisi]. Güç Sistemleri Konferansı.
- Cagle, A. E., Armstrong, A., Exley, G., Grodsky, S. M., Macknick, J., Sherwin, J., & Hernandez, R. R. (2020). The land sparing, water surface use efficiency, and water surface transformation of floating photovoltaic solar energy installations. *Sustainability*, 12(19), 8154.
- Callister, W. D., Jr. and Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Cañado, N., Lizundia, E., Akizu-Gardoki, O., Minguez, R., Lekube, B., Arrillaga, A. and Iturrondobeitia, M. (2022). 3D printing to enable the reuse of marine plastic waste with reduced environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 2092–2107.
- Cer, S. T. (2015). *Gölgeleme bileşeni olarak kullanılan FV panellerin enerji etkinliğinin değerlendirilmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143–157.
- Charoensri, K., Shin, Y. J. and Park, H. J. (2023). Innovative HDPE composites enriched with UV stabilizer and diatomaceous earth/zinc oxide for enhanced seafood packaging and antimicrobial properties. *Polymers*, 15(22), 4577.
- Cheng, J. J. (2008). Mechanical and chemical properties of high density polyethylene: Effects of microstructure on creep characteristic. UWSpace.

- Chohan, J. S., Singh, R., Boparai, K. S., Penna, R. and Fraternali, F. (2017). Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications. *Composites Part B: Engineering*, 117, 138–149.
- Choi, S. M., Huh, J., Lee, S., Son, C. and Park, S. (2023). Effects of various inlet angles of wind and wave loads considering stress distributions in floating photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135876.
- Choi, Y. K. (2014). A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 8(10), 75–84.
- Chong, S., Pan, G.-T., Khalid, M., Yang, T. C.-K., Hung, S.-T. and Huang, C.-M. (2017). Physical and mechanical properties of recycled high-density polyethylene as 3D printing material. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 136–145.
- Cress, A. K., Huynh, J., Anderson, E. H., O’neill, R., Schneider, Y. and Keleş, Ö. (2021). Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Journal of Cleaner Production*, 279, 123689.
- Çiçek, Ö. Y. (2019). *Eriyik Yığılma Modelleme ile Üretilen ABS ve PLA Parçaların Mekanik Özelliklerinin Değişken Dolgu Oranlarında Karakterizasyonu ve Sayısal Modellenmesi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çulha, M. A. (2023). *Grafen takviyeli polipropilen (PP) akrilonitril bütadien stiren (ABS) mühendislik plastiklerin üretilmesi ve tribolojik incelenmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Dai, J., Zhang, C., Lim, H. V., Ang, K. K., Qian, X., Wong, J. L. H., Tan, S. T. and Wang, C. L. (2020). Design and construction of a floating modular photovoltaic system for water reservoirs. *Energy*, 191, 116549.
- Derkowski, A., Dziurka, D., Antonowicz, R., Chuda-Kowalska, M. and Mirski, R. (2024). Possibility of using wind turbine waste in particleboard manufacturing. *Polymers*, 16(9), 1210.
- Deshmukh, D., Kulkarni, H., Srivats, D. S., Bhanushali, S. and More, A. P. (2024). Recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS): A review. *Polymer Bulletin*, 81, 11361–11398.
- Düşünceli, N. ve Çolak, Ö. Ü. (2007). *İmalat yöntemlerinin yüksek yoğunluklu polietilen’in (YYPE) tek eksenli çekme davranışı üzerindeki etkisi*. 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı.
- Erten, B. (2023). *İş güvenliği eğitimlerinde sanal gerçeklik yaklaşımı: Fotovoltaik güç sistemleri*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Erşen, T. (2011). *Odun-Polietilen Karışımlarından Dumansız Yakıt Üretimi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Fan, X., Li, Z., Yang, Y. and Chen, M. (2017). FTIR analysis on aging characteristics of ABS/PC blend under UV-irradiation in air. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 184, 361–367.
- Golroodbari, S. Z. and van Sark, W. (2020). Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(9), 873–886.
- Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z. (1997). *Plastikler*. Ankara: Sağlık Bakanlığı Yay.
- Günler, A. (2021). Yüzer güneş santralleri hibrit uygulamaları. General Electric.
- Hossain, M. S., Ramos, J., Espalin, D., Perez, M. and Wicker, R. (2014). *Improving tensile mechanical properties of FDM-manufactured specimens via modifying build parameters*. In Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. The University of Texas at El Paso.
- Hsueh, H.-C., Fairbrother, A., Kim, J. H. and Sung, L. (2020). Micro-and macroscopic mechanical behaviors of high-density polyethylene under UV irradiation and temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 174, 109098.
- Huang, B. and Singamneni, S. (2015). Raster angle mechanics in fused deposition modelling. *Journal of Composite Materials*, 49(3), 363–383.
- İnternet: DSI Haber Detay. URL: <https://www.dsi.gov.tr/Haber/Detay/12128>. Son Erişim Tarihi: 15.12.2024.
- İnternet: Floatingsolar-hydrosolar. URL: <https://tr.tyt.com.tr/floatingsolar-hydrosolar>. Son Erişim Tarihi: 11.12.2024.
- İnternet: İletişim.gov.tr Haber Detay. URL: https://www.iletisim.gov.tr/turkce/yerel_basin/detay/tarim-ve-orman-bakani-yumakli-elazigda-kurulan-turkiyenin-ilk-yuzer-gunes-enerjisi-santralinde-incelemelerde-bulundu. Son Erişim Tarihi: 15.02.2025.
- İnternet: Yüzen Güneş Enerji Santralleri. (2025). URL: <https://gelecekbilimde.net/yuzen-gunes-enerji-santralleri/>. Son Erişim Tarihi: 30.05.2025.
- Janbandhu, M., Kumar, D. and Deshmukh, H. (2022). Design and analysis of floating solar panel mounting structure. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 13(3), 3473-3480.
- Janutėnienė, J., Vasylius, M., Tadžiėvas, A., Kartašovas, V., Šapalas, D. and Grigaliūnienė, S. (2024). Influence of recycling and UV exposure on the properties of 3D printing polymer materials. *Polymers*, 16(23), 3292.

- Jayaraman, K. and Bhattacharyya, D. (2004). Mechanical performance of woodfibre–waste plastic composite materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 41(4), 307–319.
- Jiang, L., Lam, Y. C., Tam, K. C., Chua, T. H., Sim, G. W., & Ang, L. S. (2005). Strengthening acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) with nano-sized and micron-sized calcium carbonate. *Polymer*, 46(2), 571–578.
- Jung, S. M. (2025). Recent Progress in Sustainable Recycling of Waste Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS) Plastics. *Sustainability*, 17(19), 8742.
- Kaiser, K., Schmid, M. and Schlummer, M. (2018). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 1.
- Kangallı, E. (2007). *Polietilen Atıklardan Elde Edilmiş Piroliz Sıvısının Polimerizasyonu*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karaman, E. (2020). *Büyük Hacimli 3 Boyutlu Yazıcı Tasarımı ve Eriyik Biriktirme Yöntemiyle Üretilen ABS Polimer Matrisli Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretim Parametrelerinin İncelenmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulama Bilimler Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kaya, F. (2005). *Ana hatlarıyla plastikler ve katkı maddeleri*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Kazemi Najafi, S. (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. *Waste Management*, 33(9), 1898–1905.
- Kim, S. M., Oh, M. and Park, H. D. (2019). Analysis and prioritization of the potential for floating photovoltaic systems in Korean reservoirs. *Applied Sciences*, 9(3), 395.
- Koriem, A., Ollick, A. M. and Elhadary, M. (2021). The effect of artificial weathering and hardening on mechanical properties of HDPE with and without UV stabilizers. *Alexandria Engineering Journal*, 60, 4167–4175.
- Kuliński, M., Walkiewicz, J., Dukarska, D., Dziurka, D. and Mirski, R. (2023). Properties of particle boards containing polymer waste. *Materials*, 16(13), 4774.
- Kundu, P. P., Biswas, J., Kim, H., Shim, S. E., Choe, S. and Lee, D. S. (2004). Effect of calcite and calcite/zeolite hybrid fillers on LLDPE and PP composites. *Advances in Polymer Technology*, 23(3), 211–218.
- Kutz, M. (2015). Mechanical engineers' handbook, volume 1: *Materials and engineering mechanics (4th ed.)*. John Wiley.
- Kıralp, S., Çamuroğlu, P., Özkoç, G., Baydemir, T., Erdoğan, S. ve Doğan, M. (2006). Plastikler. ODTÜ Yayıncılık.
- Li, J. and Cai, C. L. (2011). The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites. *Current Applied Physics*, 11(1), 50–54.

- Liang, R. and Gupta, R. K. (2001). The effect of residual impurities on the rheological and mechanical properties of engineering polymers separated from mixed plastics. *SPE ANTEC Technical Papers*, 3, 2753–2757.
- Liu, H., Kumar, A. and Reindl, T. (2020). *The dawn of floating solar - Technology, benefits and challenges*. In Proceedings of the World Conference on Floating Solutions (WCFS 2019) (pp. 373–383).
- Liu, X. and Bertilsson, H. (1999). Recycling of ABS and ABS/PC blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(3), 510–515.
- Manish, Gurjar, D., Sharma, S., Akash and Sarkar, M. (2018). A review on testing methods of recycled acrylonitrile butadiene-styrene. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 28296-28304.
- Mantoux, O., Chibalon, L., Aurrekoetxea, J., Puerto, A., Arostegi, A. and Urretibeascoa, I. (2004). Recycled study of end of line products made of ABS resin. *Journal of Material and Science Technology*, 24, 1.
- Mendes, L. C., Rufino, E. S., de Paula, F. O. C. and Torres, A. C. Jr. (2003). Mechanical, thermal and microstructure evaluation of HDPE after weathering in Rio de Janeiro City. *Polymer Degradation and Stability*, 79(3), 371–383.
- Meng, S., He, H., Jia, Y., Yu, P., Huang, B., & Chen, J. (2017). Effect of nanoparticles on the mechanical properties of acrylonitrile–butadiene–styrene specimens fabricated by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(9).
- Mhaske, A., Bhagat, N., Pimple, T. and Han, W. (2024). Literature on floating solar power plants. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 8(3).
- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoń, J., Moustakas, K., Chojnacka, K. and Witek-Krowiak, A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 12321–12333.
- Mirasadi, K., Rahmatabadi, D., Ghasemi, I., Khodaei, M., Baniassadi, M. and Baghani, M. (2024). Investigating the effect of ABS on the mechanical properties, morphology, printability, and 4D printing of PETG-ABS blends. *Macromolecular Materials and Engineering*.
- Mishra, V., Negi, S. and Kar, S. (2024). Three-dimensional printing with waste acrylonitrile butadiene styrene: Processing and characterization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 44(9-10).
- Nadagouda, M. N., Ginn, M. and Rastogi, V. K. (2020). A review of 3D printing techniques for environmental applications. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, 173-178.
- Narlıoğlu, N. (2018). *Kimyasal Olarak Modifiye Edilmiş Lignoselüloziklerden Termoplastik Kompozit Üretimi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

- Notomi, M., Kishimoto, K., Shibuya, T. and Koizumi, T. (1999). Effects of moisture absorption on fracture behaviors of acrylonitrile-butadiene-styrene resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 72(3), 435–442.
- Olawumi, M. A., Oladapo, B. I., Ikumapayi, O. M. and Akinyoola, J. O. (2023). Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing. *Science of The Total Environment*, 905, 167109.
- Olivera, S., Muralidhara, H. B., Venkatesh, K., Gopalakrishna, K. and Vivek, C. S. (2016). Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: A review. *Journal of Materials Science*, 51, 3657–3674.
- Osswald, T. A., Baur, E. and Rudolph, N. (2019). *Plastics handbook: The resource for plastics engineers*. Carl Hanser Verlag.
- Özenç, O. (2023). *Kenevir Partikül Takviyesinin Akrilonitril-Bütadien-Stiren (ABS) Amorf Polimerin Mekanik Davranışları Üzerine Etkilerinin Araştırılması*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.
- Özkan, Ö. F. (2020). *Talk ve kalsit ilavesinin YYPE'nin mekanik – kimyasal özelliklerine etkisi ve korige borular için uygulanabilirliği*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Patil Desai, S. S., Wagh, M. M. and Shinde, N. N. (2017). A review on floating solar photovoltaic power plants. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(6), 789.
- Perez, J. M., Vilas, J. L., Manuel, J., Arnaiz, S., Mijangos, F. and Bilbao, E. (2010). Effect of reprocessing and accelerated weathering on ABS properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(1), 71–78.
- Peydro, M. A., Parres, F., Crespo, J. E. and Navarro, R. (2013). Recovery of recycled acrylonitrile–butadiene–styrene, through mixing with styrene–ethylene/butylene–styrene. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8), 1268–1283.
- Peydro, M. A., Juarez, D., Sanchez-Caballero, S. and Pla, R. (2014). Study of the mechanical properties of recycled ABS and recovery through mixing with SEBS. *Annals of the Oradea University: Fascicle of Management and Technological Engineering*, 23(1).
- Piatti, T. M. and Rodrigues, R. A. F. (2005). *Plastics: Characteristics, uses, production and environmental impacts*. Federal University of Alagoas Press.
- Pinzon Moreno, D. and Saron, C. (2017). Low-density polyethylene waste/recycled wood composites. *Composite Structures*, 176, 1152–1159.
- Polat, B. (2022). *Hidroelektrik santrallerin baraj göllerinin yüzer güneş enerji santralleri ile enerji üretim potansiyelinin araştırılması*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Rahimi, M., Esfahanian, M. and Moradi, M. (2014). Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10), 2359–2365.
- Ramaraj, B. (2006). Mechanical and thermal properties of ABS and leather waste composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(4), 2623–2628.
- Rasib, S. Z. M., Mariatti, M. and Atay, H. Y. (2021). Effect of waste fillers addition on properties of high-density polyethylene composites: Mechanical properties, burning rate, and water absorption. *Polymer Bulletin*, 78(12), 6777–6795.
- Rezakalla, A. I. and Petrovna, S. T. (2021). Study of mechanical properties of recycled polyethylene of high and low density. *Materiale Plastice*, 58(4), 210–215.
- Sachin, J. M., Sagar, R., Ramesh, D., Nandan, T. G., Tejeshkiran, T., & Kumar, N. P. (2021). Design and implementation of floating solar power plant. Open Access *International Journal of Science & Engineering*, 6(2), 12–34.
- Saçak, M. (2005). *Polimer teknolojisi*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Sahai, S., Singh, D. K. and Sharma, V. K. (2024). Antimicrobial polymer composites with anti-biofouling properties for floating solar power plant applications: effect of zinc oxide nanoparticles. *Polymers from Renewable Resources*.
- Sahu, A., Yadav, N. and Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815–824.
- Sahu, A. K. and Sudhakar, K. (2019). Effect of UV exposure on bimodal HDPE floats for floating solar application. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 147–156.
- Samoylenko, D. E., Rodygin, K. S. and Ananikov, V. P. (2023). Sustainable application of calcium carbide residue as a filler for 3D printing materials. *Scientific Reports*, 13(1), 4410.
- Scaffaro, R., Botta, L. and Di Benedetto, G. (2012). Physical properties of virgin-recycled ABS blends: Effect of post-consumer content and of reprocessing cycles. *European Polymer Journal*, 48(3), 637–648.
- Shafaat, A. and Ashtiani, H. R. (2021). Influence processing parameters of FDM 3D printer on the mechanical properties of ABS parts. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 28(3), 250–257.
- Sharma, P., Bharat, M. and Debojyoti, S. (2015, November). Design parameters of 10kW floating solar power plant. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*, 2 (Special Issue 1).
- Sharma, V., Kapoor, S., Goyal, M. and Jindal, P. (2020). Enhancement of the mechanical properties of graphene based acrylonitrile butadiene styrene (ABS) nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 28(6).

- Shueb, M. I., Mohamad, N., Sapuan, S. Z., Khee, Y. S., Che Halin, D. S., Sandu, A. V. and Vitureanu, P. (2025). Graphene nanoplatelets reinforced ABS nanocomposite films by sonication-assisted cast film technique for emission shielding application. *Materials*, 18(11), 2645.
- Sidik, M., Mohamed, R. M., Baba, N. B. and Mohd, A. (2022). Water absorption study on kenaf/ABS composites. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 99(2), 180–186.
- Sree, D. K. K., Law, A. W.-K., Pang, D. S. C., Tan, S. T., Wang, C. L., Kew, J. H., Seow, W. K. and Lim, V. H. (2022). Fluid-structural analysis of modular floating solar farms under wave motion. *Solar Energy*, 233, 267–280.
- Şahan, Z. (2022). *Yeni nesil güneş panellerinin ülkemizde geri ödeme süresine etkisi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Şençiçek, H. (2017). *Yüzer ve Arazi Kurulumu Fotovoltaik Sistemlerin Teknik ve Ekonomik Açidan İncelenmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şengül, Ö. (2024). Geri dönüşümü yapılmış polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilen polimer malzemesinin Izod darbe ve ısı özelliklerinin belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(2), 839-846.
- Tang, C. Y., Chan, L. C., Tsui, C. P., & Wong, T. L. (2002). Mechanical and thermal properties of ABS-CaCO₃ composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21(15), 1327–1341.
- Taşdelen, M. A., Bingöl, M., Yılmaz, Y. ve Kahramanerb, H. (2019). *Geri dönüştürülmüş termoplastiklerin üç boyutlu yazıcılardaki performansları*. 4. Uluslararası 3B Baskı (Eklemeli İmalat) Teknolojileri ve Dijital Endüstri Kongresi Bildiriler Kitabı (ss. 182-192).
- Teixeira, F. S. M., Peres, A. C. C. and Pacheco, E. B. A. V. (2023). Mechanical recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer and high impact polystyrene from waste electrical and electronic equipment to comply with the circular economy. *Frontiers in Sustainability*, 4, 1203457.
- Tiganis, B. E., Burn, L. S., Davis, P. and Hill, A. J. (2002). Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends. *Polymer Degradation and Stability*, 76(3), 425–434.
- Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B. and Roberson, D. A. (2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*, 6, 16–29.
- Trapani, K. and Santafé, M. R. (2014). A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(6), 742–750.

- Vácha, J. and Borůvka, M. (2017). *Mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene thermoplastic polymer matrix with carbon nanotubes*. Technical University of Liberec.
- Ventosinos Louzao, V., García Murias, D., De Dios Álvarez, M. Á., Acuña Domínguez, P. A., Paredes Barros, E. and Ledo Bañobre, R. (2025). Impact of recyclability on the tensile and impact properties of coated plastic materials for the automotive and electronic sectors. *Open Research Europe*, 4, 51.
- Veraart, J. A., Jacobs, C. M. J., de Groot, G. A., Jans, W. W. P., Klostermann, J. E. M. and Velthuis, M. (2020). Methods to assess the blue carbon potential of seaweed culture in the North Sea: Feasibility study, desk study and review workshop. Wageningen University & Research.
- Verbeeten, W. M. H., Arnold-Bik, R. J. and Lorenzo-Bañuelos, M. (2021). Print velocity effects on strain-rate sensitivity of acrylonitrile-butadiene-styrene using material extrusion additive manufacturing. *Polymers*, 13(1), 149.
- Verbeeten, W. M. H., Lorenzo-Bañuelos, M., Saiz-Ortiz, R. and González, R. (2020). Strain-rate-dependent properties of short carbon fiber-reinforced acrylonitrile-butadiene-styrene using material extrusion additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26(10), 1701–1712.
- Vidakis, N., Petousis, M. and Maniadi, A. (2021). Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of high-density polyethylene over multiple recycling processes. *Recycling*, 6(1), 4.
- Vishwakarma, S. K., Pandey, P. and Gupta, N. K. (2017). Characterization of ABS material: A review. *Quest Journals Journal of Research in Mechanical Engineering*, 3(5), 13–16.
- Wang, J., Li, L., Song, J., He, M., Song, J. and Xia, K. (2015). Recycling of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) copolymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE), through using an epoxy-based chain extender. *Polymer Degradation and Stability*, 112, 167–174.
- Wicks, Z. W., Jones, F. N., Pappas, S. P. and Wicks, D. A. (2007). *Organic coatings: Science and technology*. John Wiley & Sons.
- Wilson, E. O. and Amgbari, C. O. (2025). Comparative evaluation of mechanical properties, scanning electron microscopy (SEM) analysis, and water holding capacity of recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE) plastics. *Mechanical Technology and Engineering Insights*, 2(1), 10–27.
- World Bank. (2018). Where sun meets water: Floating solar market report.
- WWF. (2019). Relatório WWF-Solucionar a Poluição Plástica: Transparência e Responsabilização.
- Yakutlu, K. (2020). Yüzer Güneş Enerji Santralleri. ResearchGate.

- Yıldız, C. ve Akgül, A. (2023). Türkiye'nin Akdeniz kıyılarında açık deniz güneş ve rüzgar enerjisi üretiminin verim temelli karşılanması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 122–136.
- Yue, Y., Peng, X., Wang, H., Tan, H. and Zhou, B. (2025). Evaluation of mechanical properties and aging resistance of floating hull for offshore floating photovoltaic platform. *CE*, 9(4).
- Zeren, F. (2013). *Değişik oranlarda nano ve mikro boyutlardaki CaCO₃'ün yüksek yoğunluklu polietilenin özelliklerine etkilerinin incelenmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zhang, C., Dai, J., Ang, K. K. and Lim, H. V. (2024). Development of modular floating photovoltaic farm for coastal conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 114084.
- Żenkiewicz, M., Rytlewski, P., Moraczewski, K., Stepczynska, M., Karasiewicz, T., Malinowski, R. and Ostorowicki, W. (2009). Some effect of multiple injection moulding on selected properties of ABS. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37(2), 361-368.
- Żenkiewicz, M. and Richert, J. (2008). Influence of polymer samples preparation procedure on their mechanical properties. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 26(2), 191–194.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Mustafa AKYOL

Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	Kocaeli Üniveristesi	2011

Bilimsel Faaliyetler (Yayınlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

Akyol. M., ve Kazan. H, “*Manufacturing a Floating SPP Platform by Recycling Waste Plastics*”5th International Thales Congress on Life, Engineering, Architecture And Mathematics, October 16-18,2025, Cairo, Egypt, DOI:<https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8605-2-8.2025.087>.