2209/B

ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİ SANAYİYE YÖNELİK ARAŞTIRMA PROJELERİ DESTEĞİ PROGRAMI

SONUÇ RAPORU

PROJE BAŞLIĞI:

ATIK POŞETLERDEN MONOFİLAMENT İPLİK ÜRETİMİ OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI:

MERT EDİP UĞURLU

DANIŞMANININ ADI:

PROF. DR. MUSA KILIÇ (AKADEMİK DANIŞMAN)

TÜLİN KAYA NACARKAHYA (SANAYİ DANIŞMANI)

GENEL BİLGİLER

PROJENİN KONUSU	Atık Poşetlerden Monofilament İplik Üretimi Olanaklarının Araştırılması
PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI	MERT EDİP UĞURLU
DANIŞMANIN ADI	PROF. DR. MUSA KILIÇ (AKADEMİK DANIŞMAN) TÜLİN KAYA NACARKAHYA (SANAYİ DANIŞMANI)
PROJE BAŞLANGIÇ VE BİTİŞ TARİHLERİ	NİSAN 2025 – NİSAN 2026

BÖLÜM 1
GİRİŞ

1.1. Giriş

Günümüzde alışılagelmiş sentetik malzemelerin yerini işleme kolaylığı, ekonomiklik, sürdürülebilirlik, geri dönüşüm gibi üstün mekanik, sürdürülebilir ve katma değeri yüksek geri dönüşüm sentetik lifler, kompozitler ve polimerler almıştır. Bunun doğal bir sonucu olarak, bu malzemelerin endüstrideki önemi giderek artmakta ve istenen özelliklere sahip farklı matris ve takviye elemanları içeren yeni ürünler geliştirilmektedir.

Polipropilen (PP), düşük yoğunluk, düşük termal iletkenlik, çok düşük nem emilimi, iyi aşınma dayanımı, güç kirlenme ve yün benzeri tutum özellikleriyle bilinen poliolefin sınıfı bir liftir. Çeşitli avantajlarına karşın PP ham maddesi yurt dışından ithal edilmektedir. Ayrıştırılan telefler geri dönüşüm işlemlerine tabi olarak farklı sektörlerde kullanılarak yeniden değerlendirilmektedir.

Bu çalışma ile ana hedefimiz ticari olarak ithal edilen PP ham maddesinden elde edilen PP iplik teleflerini yeniden değerlendirmek, ekonomik kaybın önüne geçmek, üretim sürecinin çevresel etkilerini azaltmaktır. Geri dönüştürülmüş polipropilen teleflerinden elde edilen ipliklere mekanik iplik testleri yapılarak, standart polipropilen iplik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu konudan yola çıkarak, tez çalışmasında, atık poşetlerden elde edilen geri dönüşüm polipropilen (rPP) polimeri kullanılarak monofilament elde edilecektir. Monofilamentler, 3D yazıcılarda girdi materyali olarak kullanılacaktır. Bu projede, söz konusu atıkların azaltılabilmesi ve yeni bir teknoloji sayılabilecek olan 3D yazıcılarda katma değeri yüksek girdi materyali olarak kullanılması için polipropilen esaslı atık poşetlerden monofilament iplik elde edilecektir. Lif elde edilme sürecinde Karafiber Tekstil San. Tic. A.Ş.'deki atık ekmek poşetleri kullanılacaktır. Doğrudan geri dönüşüme gönderilecek bu poşetlerin 3D yazıcılarda kullanılmak üzere dönüştürülmesi hem firma hem de ülkemiz için ekonomik ve sürdürülebilir bir ürün elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Çalışma kapsamında, lif eldesi için ilk önce atık poşetler toplanıp depolanacak, ardından eritilip masterbatch elde edilecek ve düzelerden geçirilerek belirlenen incelikte monofilament iplik üretilecektir. Karafiber Tekstil bünyesinde gerçekleştirilecek bu işlemlerin ardından

üretilen ipliklerin karakterizasyonunun yapılabilmesi için Dokuz Eylül Üniversitesi Tekstil Mühendisliği tarafından DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre), MFI (Erime Akış İndeksi), FT-IR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi) gibi testler ile malzemenin yüzey görünümünün incelenebilmesi için SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi yapılacaktır.

1.2. Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik

Dünya genelinde nüfus artışının hız kazanmasıyla birlikte, tüketim alışkanlıklarında da ciddi bir yükseliş gözlemlenmektedir. Bu artış, doğal olarak çevre sorunlarının da paralel şekilde çoğalmasına neden olmaktadır. Özellikle sanayileşmenin etkisiyle tüketilen ürün miktarındaki artış, doğaya bırakılan atıkların çeşitliliğini ve miktarını da önemli ölçüde yükseltmiştir. Artan çevre sorunları ve bunun sonucunda oluşan atık kirliliği hem doğal yaşamı hem de insan sağlığını tehdit eden bir boyuta ulaşmıştır. Bu tehdit karşısında, son yıllarda sürdürülebilirlik ilkeleri çerçevesinde, çeşitli endüstriyel ve toplumsal düzeyde çözüm arayışları yoğunlaşmış; çevresel zararın en aza indirgenmesi, geri dönüşümün yaygınlaştırılması ve doğal kaynakların verimli kullanımı gibi hedeflere dayanan çalışmalar ön plana çıkmıştır. Bu bağlamda, sentetik polimerlerin günümüzdeki kullanım oranı da kayda değer biçimde artmıştır. Bu artışın temelinde, söz konusu malzemelerin sahip olduğu bazı teknik ve ekonomik avantajlar yatmaktadır. Cam, metal, seramik ve ahşap gibi geleneksel malzemelere kıyasla daha hafif olmaları, çevresel koşullara ve kimyasallara karşı dirençli bir yapıya sahip bulunmaları ve üretim süreçlerinde esneklik sunmaları, sentetik polimerleri birçok sektörde vazgeçilmez hale getirmiştir. Ayrıca bu malzemeler; kalıplama, ekstrüzyon, enjeksiyon gibi birçok farklı üretim yöntemiyle işlenebilir özellikte olup, istenilen ürünlerin seri üretimini kolaylaştırmaktadır. Ancak bu avantajların yanı sıra, sentetik polimerlerin doğada çözünmeyen yapıları ve uzun süreli çevresel kalıcılıkları, ciddi çevresel ve ekolojik sorunlara yol açmaktadır. Özellikle plastik kökenli atıklar, çöplüklerde birikmekte, geri dönüşüm oranlarının düşüklüğü ve maliyetlerin yüksekliği nedeniyle sürdürülebilirlik açısından yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, atıkların kontrolsüz şekilde birikmesi alan kaybına ve ekonomik maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerle, atık yönetimi politikalarında geri dönüşüm uygulamaları giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ancak mevcut veriler, geri dönüşümün henüz istenen düzeyde bir katma değer yaratamadığını ortaya koymaktadır. Örneğin, tablo 1.1’de verilen Türkiye İstatistik Kurumu’nun (TÜİK) 2023 yılına ait Atık Raporu'na göre, özellikle plastik ve sentetik tekstil atıklarının büyük bir kısmı hâlâ ekonomik döngüye tam olarak kazandırılamamaktadır. Bu da geri dönüşüm sistemlerinin iyileştirilmesi ve yüksek katma değerli ürünlere

dönüştürülebilecek atık yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır (TÜİK, 2023; H. Yakışık, 2023).

Plastik atıklar, günümüzde tüm ekosistem üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı yollardan ciddi tahribata yol açan başlıca kirleticiler arasında yer almaktadır. Okyanuslar, denizler, göller, nehirler ve karasal alanlar dahil olmak üzere tüm doğal yaşam alanlarında plastik atıkların izlerine rastlanmakta; özellikle sucul canlıların yaşamlarını tehdit edici boyutlara ulaşmaktadır. Bu durumun temel nedenlerinden biri, plastiklerin doğada kendiliğinden bulunmayan ve tamamen petrokimyasallardan (doğal gaz ve petrol gibi fosil kaynaklardan) üretilen sentetik polimerler olmalarıdır. Bu polimerler, yüksek molekül ağırlıklı ve uzun zincirli yapıları sayesinde dayanıklılık, hafiflik ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip oldukları için modern yaşamın hemen her alanında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak bu avantajlar, aynı zamanda plastiklerin çevrede çözünmeden uzun yıllar kalmalarına neden olarak onları kalıcı bir çevre sorunu haline getirmektedir (H. Yakışık, 2023).

Plastik atıkların oluşturduğu tehdit yalnızca büyük boyutlu atıklarla sınırlı değildir. Bu atıkların zaman içinde parçalanarak oluşturduğu mikroplastikler (5 mm'den küçük plastik parçaları), su kaynaklarında yaşayan organizmalardan başlayarak besin zincirinin tüm halkalarını etkileyen bir kirlilik unsuruna dönüşmektedir. Mikroplastikler, hem kimyasal içerikleri hem de fiziksel özellikleri nedeniyle biyolojik sistemlerde birikerek toksik etkilere yol açabilmekte, dolayısıyla insan sağlığı açısından da ciddi riskler oluşturmaktadır. Özellikle 1950'li yıllardan itibaren dünya genelinde yaşanan nüfus artışı ve sanayileşmeye paralel olarak plastik üretiminde ve tüketiminde büyük bir artış gözlemlenmiştir. Bu süreçte kimya endüstrisindeki teknolojik gelişmeler, plastik üretimini daha hızlı ve ekonomik hale getirerek bu artışı daha da hızlandırmıştır. Avrupa ülkeleri başta olmak üzere birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülke, hızlı ekonomik büyümenin bir sonucu olarak plastik bazlı ambalaj malzemelerinin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Plastiğin bu denli yoğun olarak ambalaj sektöründe tercih edilmesinin temelinde, esnek yapısı sayesinde her türlü tasarıma uygun olması, dayanıklı yapısı ve düşük üretim maliyetleri gibi nedenler yer almaktadır. Ancak yapılan bilimsel araştırmalar, başlangıçta masum bir üretim girdisi ve pratik bir ambalaj çözümü olarak görülen plastiğin, uzun vadede çevre ve insan sağlığı açısından oldukça zararlı sonuçlar doğurduğunu açıkça ortaya koymaktadır (H. Yakışık, 2023).

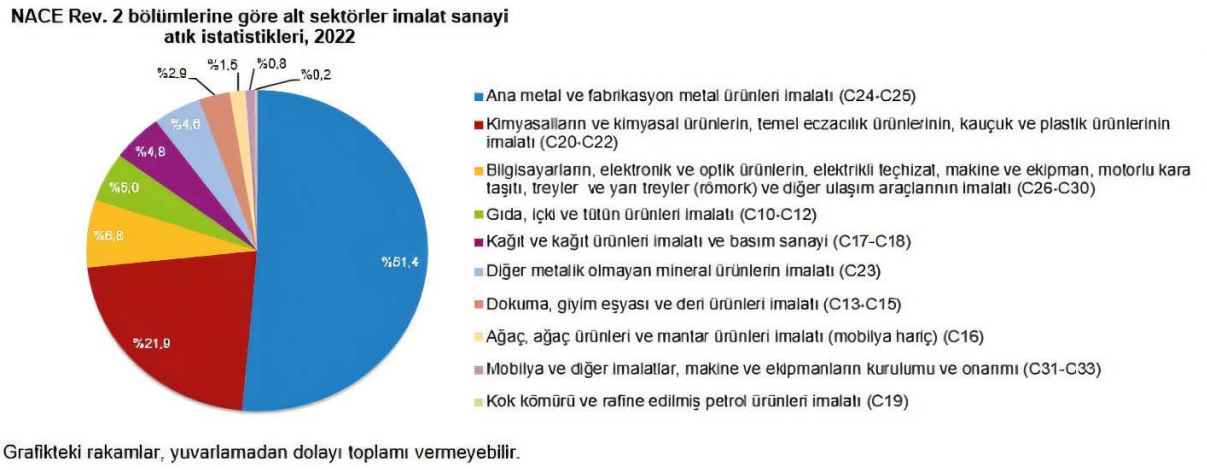
Tablo 1.1. TÜİK 2022 Atık İstatistikleri (TÜİK, 2023)

Oluşan atık miktarı, 2020, 2022 (Ton)

	Toplam atık miktarı		Tehlikeli atık miktarı		Tehlikesiz atık miktarı	
	2020	2022	2020	2022	2020	2022
Toplam	**104 739 181**	**109 237 232**	**30 770 088**	**29 380 898**	**73 969 093**	**79 856 334**
İmalat sanayi işyerleri	**23 867 866**	**27 969 021**	4 597 274	5 439 883	19 270 593	22 529 139
Termik santraller	**24 375 356**	**27 815 548**	10 012	10 512	24 365 343	27 805 036
Maden işletmeleri(1)	**27 581 875**	**26 309 170**	26 044 730	23 794 881	1 537 144	2 514 289
Organize sanayi bölgeleri	**279 067**	**323 140**	116 720	127 268	162 347	195 872
Hanehalkı(2)	**28 635 018**	**26 820 352**	1 352	8 354	28 633 665	26 811 998

Tablodaki rakamlar, yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.

Tablo 1.1' de belirtildiği üzere son yapılan TÜİK raporunda 2020-2022 yılları arasındaki atık miktarları gösterilmektedir. Atık depolama tesislerinde 109,2 milyon ton atık bertaraf edilmiştir.



Şekil 1.1. TÜİK 2022 Atık İstatistikleri (TÜİK, 2023)

Şekil 1.1'de verilen pasta grafiğinde imalat sanayilerindeki atık istatistikleri verilmiştir, bu grafikten yola çıkarak kauçuk ve plastik temelli ürün atıkları toplam atık miktarının %21,9'luk kısmını oluşturmaktadır.

1.2.1. Sürdürülebilirliğin Tanımı

Velazquez ve arkadaşları (2011), sürdürülebilirlik kavramını üç temel boyut çerçevesinde değerlendirmektedir. Ekonomik açıdan sürdürülebilirlik, sürekli büyümeye odaklanan bir ekonomik yapıdan, daha dengeli ve uzun vadeli refahı hedefleyen bir sisteme geçiş olarak tanımlanmaktadır. Çevresel açıdan ise, doğal kaynakların dengeli ve uzun vadeli kullanımını sağlayarak çevreye verilen zararın en aza indirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Sosyal

boyutta ise, kültürel yapılar ile doğa arasındaki etkileşimin sürdürülmesi ve bu etkileşimin toplumsal yaşamın bir parçası hâline getirilmesi ön plana çıkmaktadır (Öztürk, 2023).

Sürdürülebilirlik kavramı, yalnızca çevreci bir düşünce sistemi olmanın ötesinde, çok boyutlu bir yaklaşımı ifade etmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik, sosyal hakların korunması ve doğal kaynakların etkin kullanımı bu kavramın temel unsurlarını oluşturmaktadır. İşletmeler açısından sürdürülebilirlik ise, finansal sermayenin artırılmasına yönelik çabanın, insan haklarının gözetilmesi ve çevresel değerlerin korunması yönünde de gösterilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik, yalnızca kârlılık odaklı bir strateji değil; aynı zamanda sosyal sorumluluk ve çevresel farkındalık temelinde şekillenen bütüncül bir kurumsal yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Öztürk, 2023).

Sürdürülebilirlik, en genel anlamıyla sürekliliği ve kalıcılığı sağlamayı başarma durumu olarak tanımlanabilir. Ekonomik açıdan sürdürülebilirlik, büyüme ve kalkınmanın istikrarlı bir şekilde devam ettirilmesini ifade etmektedir. Sosyal boyutta ise, toplumların sağlıklı bir sosyal yapıya sahip olmaları ve bireylerin ekonomik refah içinde yaşamaları hedeflenmektedir. Çevresel sürdürülebilirlik ise, biyolojik çeşitliliğin korunması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve çevreye karşı sorumlu bir tutumun benimsenmesini kapsamaktadır. Bu üç temel boyutun birlikte ve dengeli bir şekilde sağlanması, sürdürülebilirliğin bütüncül olarak gerçekleşmesi açısından zorunlu görülmektedir (Öztürk, 2023).

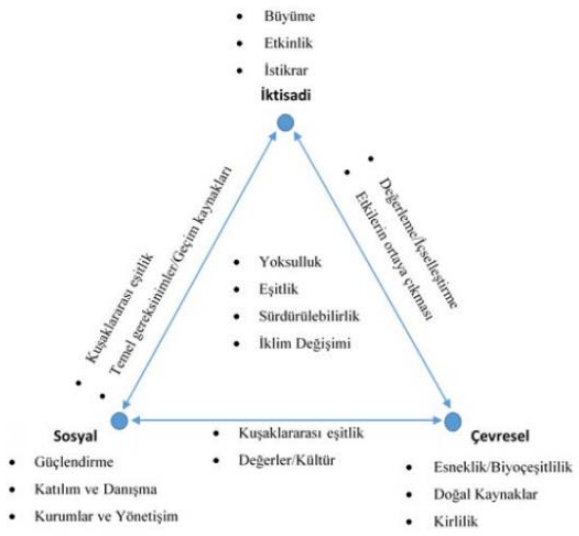
1.2.2. Sürdürülebilirliğin Tarihsel Gelişimi

Sürdürülebilirlik hareketi, kökenini 1972 yılında İsveç'in Stockholm kentinde gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı'na dayandırmaktadır. Bu konferansta yayımlanan deklarasyon, sürdürülebilirliğin temel ilkelerini ortaya koyarak çevresel sorunlara yönelik küresel farkındalığın artmasına öncülük etmiştir. Akademik literatürde sürdürülebilirlik kavramına ilişkin ilk kapsamlı tartışmalardan biri ise yine 1972 yılında, "Club of Rome" tarafından yayımlanan Büyümenin Sınırları (The Limits to Growth) başlıklı raporda yer almıştır. Söz konusu rapor, sınırlı kaynaklarla sürdürülebilir kalkınmanın olanaklarını sorgulayarak kavramın çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarına dikkat çekmiştir (Öztürk, 2023).

Sürdürülebilirlik kavramının küresel ölçekte kamuoyunun gündemine girmesi, 1987 yılında Birleşmiş Milletler bünyesinde faaliyet gösteren Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından yayımlanan Ortak Geleceğimiz (Our Common Future) adlı rapor ile mümkün olmuştur. (Öztürk, 2023).

Takip eden süreçte, 1992 yılında Rio de Janeiro'da düzenlenen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı (UNCED), sürdürülebilir kalkınma alanında küresel iş birliğini güçlendiren önemli belgelerin kabul edilmesiyle sonuçlanmıştır. Konferans kapsamında ortaya çıkan başlıca belgeler arasında Rio Deklarasyonu, Gündem 21, İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Biyolojik Çeşitlilik Sözleşmesi, Ormansızlaşma ile Mücadele Çerçeve Sözleşmesi ve daha sonraki yıllarda imzalanan Kyoto Protokolü yer almaktadır. Bu belgeler, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla uluslararası düzeyde atılan somut adımların temelini oluşturmuştur (Öztürk, 2023).

2002 yılında Güney Afrika'nın Johannesburg şehrinde gerçekleştirilen Sürdürülebilir Kalkınma Dünya Zirvesi, sürdürülebilir kalkınmanın hayata geçirilmesi ile yoksulluğun azaltılması gibi kritik konuların ele alındığı önemli bir uluslararası platform olmuştur (Öztürk, 2023). Ayrıca, Şekil 1.2'de yer alan sürdürülebilir kalkınma üçgeni modeli, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları temel alan üç ana odağı temsil etmektedir. Bu model, yalnızca üçgenin köşelerinin değil, aynı zamanda iç bölgesinin ve kenarlarının da sürdürülebilirlik anlayışında önemli bir yer tuttuğunu vurgulayarak, çok boyutlu ve bütüncül bir yaklaşımın gerekliliğini ortaya koymaktadır ve bu bağlamda akademik çevrelerde geniş kabul görmüştür (Yakar, 2024).



Şekil 1.2. Sürdürülebilirlik kalkınma üçgeni (Yakar, 2024)

1.2.3. Sürdürülebilirliğin Bileşenleri ve Boyutları

Sürdürülebilirlik kavramı, literatürde genellikle üç temel bileşen çerçevesinde ele alınmakta olup; bu bileşenler ekonomik sürdürülebilirlik, sosyal sürdürülebilirlik ve çevresel sürdürülebilirlik olarak sınıflandırılmaktadır (Harris, 2000). Sürdürülebilirliğin bütüncül ve sağlam temeller üzerine inşa edilebilmesi için, ekonomik, sosyal ve çevresel unsurlar arasındaki uyumun sağlanması gerekliliği, konuyla ilgili yapılan araştırmalarda yaygın olarak vurgulanan ortak bir yaklaşımdır (Şen ve ark., 2018).

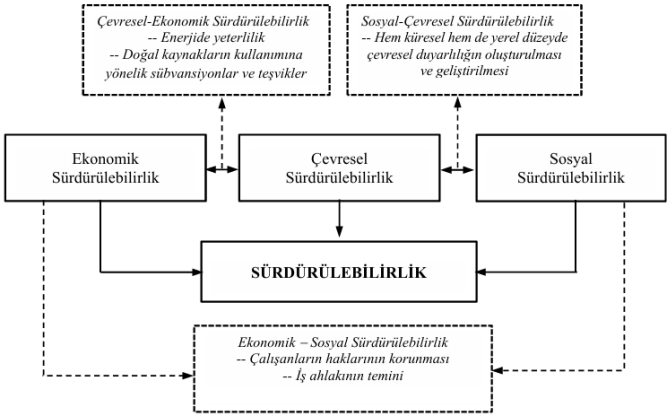
Bu üç unsur şu şekilde ifade edilmiştir:

- Ekonomik sürdürülebilirlik, mal ve hizmetlerin süreklilik esaslarına dayalı olarak üretilebildiği, dış borçların yönetilebilir seviyede tutulduğu ve kamu yönetiminin etkinliğinin sürdürülebildiği bir ekonomik sistem olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, endüstriyel ve tarımsal üretimde ortaya çıkan sektörel dengesizliklerin, özellikle çevreye ve ekonomiye zarar verebilecek boyutlarda olmasından kaçınılması gerekmektedir (Harris, 2000).

- Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların temel stoklarının korunmasını esas alarak hareket eden bir sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir kaynakların ve çevresel yatırım fonksiyonlarının aşırı kullanımının önlenmesi ve yenilenemeyen kaynakların ise yalnızca yeterince yenilenebilen miktarlarda tüketilmesi gerekmektedir. Ayrıca, çevresel sürdürülebilirlik; biyolojik çeşitlilik, atmosfer dengesi ve ekosistem işlevlerinin korunmasını da kapsayarak, ekonomik kaynaklardan farklı olarak doğal sistemlerin devamlılığını sağlamayı amaçlamaktadır (Harris, 2000).

- Sosyal sürdürülebilirlik, toplumsal eşitliğin desteklenmesi ve sağlık, eğitim, politik katılım, cinsiyet eşitliği gibi temel sosyal hizmetlerin yeterli ve adil bir şekilde sunulmasını güvence altına alan bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Harris, 2000).

Sürdürülebilirlik kavramı, genel olarak ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere üç temel boyutta ele alınmakla birlikte, mekânsal, kültürel ve benzeri diğer boyutları da içermektedir. İnsani perspektiften incelendiğinde sosyal boyut ön plana çıkarken; toplumsal açıdan değerlendirildiğinde ekonomik ve kültürel unsurların, doğal kaynaklar açısından ise çevresel faktörlerin belirleyici olduğu görülmektedir. Günümüzde sürdürülebilirliğin iç içe geçmiş bu üç temel boyutuna ilişkin görsel bir temsil, Şekil 1.3'te sunulmaktadır (Şen ve ark., 2018).



Şekil 1.3. Sürdürülebilirliğin Günümüzde Birbiri ile Eklemlenmiş Üç Boyutu (Şen vd., 2018)

Plastik atıkların, özellikle de polietilen tereftalat (PET) esaslı olanların çevresel etkileri, günümüzde küresel ölçekte ciddi bir sorun haline gelmiştir. Türkiye'de olduğu gibi dünya genelinde de bu tür plastik atıklar çoğunlukla toprağa gömülerek veya düzenli depolama sahalarında biriktirilerek bertaraf edilmeye çalışılmaktadır. Ancak bu yöntemler, uzun vadede çevresel sürdürülebilirlik açısından yetersiz kalmaktadır. Çünkü PET esaslı plastikler doğada biyolojik olarak parçalanamayan yapıları nedeniyle, yüzlerce yıl boyunca çözünmeden kalabilmektedir. Yapılan bilimsel araştırmalar, bu tür plastiklerin doğada 1000 ila 3000 yıl arasında değişen sürelerde varlıklarını sürdürebildiklerini ortaya koymaktadır. Bu durum, sınırlı doğal kaynaklara sahip olan dünyamızda, atık yönetiminin geleneksel yöntemlerle sürdürülemeyeceğini açıkça göstermektedir. Diğer yandan, petrol türevi tekstil liflerinin üretimi de çevresel ve ekonomik açıdan ciddi kaynak tüketimine neden olmaktadır. Özellikle tekstil sektöründe pamuktan sonra en fazla kullanılan sentetik lif olan polyesterin üretimi sırasında, toplam maliyetin büyük bir kısmını (%75'e varan oranla) hammadde giderleri oluşturmaktadır (H. Kılıç, 2016). Bu durum, bir yandan üretim maliyetlerini artırırken, diğer yandan fosil kaynaklara olan bağımlılığı da derinleştirmektedir. Dolayısıyla hem ekonomik yükün azaltılması hem de doğal kaynakların korunması açısından plastik atıkların yeniden değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir (H. Kılıç, 2016).

1.3. Plastik Ürünlerin Geri Dönüşümü

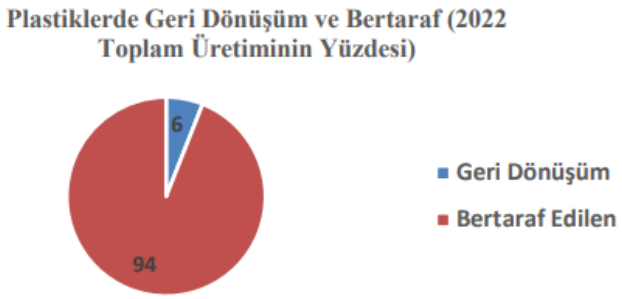
Genellikle termoplastik yapıya sahip polimerler, ısı etkisiyle yumuşatılıp yeniden şekillendirilebilme özellikleri sayesinde tekrar kullanıma uygun malzemeler arasında yer almaktadır. Bu özellikleri, söz konusu materyallerin geri dönüşüm süreçlerinde değerlendirilmesini mümkün kılmakta ve böylece sınırlı doğal kaynaklara olan bağımlılığı

azaltacak bir alternatif sunmaktadır. Geri dönüşüm süreci kapsamında, uygun fiziksel veya kimyasal işlemler yardımıyla plastik atıklar ikincil hammaddeye dönüştürülerek yeniden üretim sürecine dahil edilebilmektedir. Bu bağlamda PET hem mekanik hem de kimyasal geri dönüşüm yöntemleriyle dönüştürülebilen bir plastik türü olarak ön plana çıkmaktadır. Günümüzde modern teknolojilerle donatılmış geri dönüşüm tesislerinde, PET atıklar parçalanarak, eritilerek veya kimyasal reaksiyonlarla temel yapı taşlarına ayrıştırılarak yeniden üretime kazandırılmaktadır. Bu süreçler, sadece ekonomik anlamda değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da çeşitli avantajlar sunmaktadır. Geri dönüşüm yoluyla hammadde ihtiyacının azaltılması, enerji tüketiminin düşürülmesi ve sera gazı salınımlarının sınırlandırılması, bu avantajların başında gelmektedir. Ancak geri dönüşüm sistemlerinin etkinliğinin artırılabilmesi için sadece teknolojik gelişmeler yeterli olmamaktadır. Aynı zamanda geri dönüşüm ürünlerinin tüketiciler tarafından benimsenmesi ve teşvik edilmesi de büyük önem taşımaktadır. Geri dönüşümün farklı sektörlerde yaygınlaştırılması, geri dönüştürülmüş PET ürünlerinin ambalaj, tekstil, otomotiv ve inşaat gibi alanlarda kullanımının artırılması ile mümkün olacaktır. Bu doğrultuda hem kamu hem de özel sektör eliyle yürütülen politikaların desteklenmesi, çevresel farkındalık çalışmalarının artırılması ve ekonomik teşvik mekanizmalarının uygulanması kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir (H. Kılıç, 2016).



Şekil 1.4. Plastik Atık ve Geri Dönüşüm Verileri (2019-2022, bin ton) (H. Yakışık, 2023)

Şekil 1.4'te belirtildiği üzere plastik ve türevi atıklarının geri dönüşümünün düşük miktarlarda gerçekleştiği gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Plastik atık ve geri dönüşüm veri pasta grafiği (2019-2022, bin ton) (H. Yakışık, 2023)

Şekil 1.5'te verilen pasta grafiğinde geri dönüştürülen plastik ürünleri yalnızca %6'lık bir kısmı oluşturmaktadır.

1.3.1. Plastik Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Plastik malzemesinin sahip olduğu mekanik ve yapısal özellikleri inceleyecek olursak öncelikle görünüş olarak sahip oldukları herhangi bir renk yoktur. Bu sebepten ötürü kullanılacak alana ve tercihe bağlı olarak gerekli katkılarla istenilen rengin elde edilmesi mümkündür. Çekme dayanımı, elastiklik modülü, alevlenme, uzama değeri, hava ve onun gibi çevresel faktörlerden etkilenme, elektriksel iletkenlik, basma dayanımı, sürünme dayanımı, darbe dayanımı, eğme dayanımı, burulma dayanımı, özgül ağırlık ve sürtünme katsayısı gibi temel özellikleri ise plastik çeşitlerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Plastik türlerine göre değişkenlik gösterebilen bazı özelliklerin yanı sıra hepsi için geçerli ortak özellikleri de vardır. Bu temel özelliklerin başında elektriksel iletkenlik özelliği gelmektedir. (Çebi, 2020)

Isısal açıdan ise ısı iletkenlikleri düşüktür. Yüksek sıcaklarda ısı malzemenin içinde yığılır dolayısıyla malzemenin yumuşamasına ve buna bağlı olarak deformasyona uğramasına sebep olur. Bu gibi olumsuz etkilerin görülmemesi için gerekli önlemler alınmadır aksi taktirde malzeme deformasyona uğrayacaktır. Dış etkilerden etkilenme ve yüksek ısılarda yanma gibi özellikleri de gerekli tedbirler alınmadığı taktirde olumsuz durumların oluşmasına sebebiyet verecektir. Bu özellikler tüm plastikler için ortaktır fakat bazı mekanik özellikler plastiğin türüne göre değiştirmektedir. Aşağıdaki bölümde plastik türleri incelenecektir ve bu özellikler detaylı bir şekilde anlatılacaktır (Çebi, 2020). Plastikleri çeşitleri bakımından üç gruba ayırmak mümkündür. Bunlar termosetler, termoplastikler ve elastomerlerdir (Tayyar ve Üstün, 2009).

Tablo 1.2. PP, ABS ve PETG materyallerinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Tessier, 2012)

Özellik	PP	ABS	PETG
Erime Sıcaklığı (°C)	160-230	230-250	200-240
Öz Yoğunluk (g/cm^3)	0,9-0,91	1,27-1,3	1,04
Çekme Dayanımı (MPa)	30-50	50-70	30-50
Bükülme Modülü (MPa)	1000-1500	1800-2200	1500-2500
Sıcaklık Dayanım Derecesi (°C)	80-100	70-80	80-100
Nem Absorbsiyonu (%)	0,1-0,2	0,1-0,3	0,2

1.3.1.1.Termoplastikler

Termoplastikler yüksek ısı (yaklaşık 170 derece) ve belli basınç değerine ulaştıklarında eriyip akışkan bir hale gelir. Eriyip akışkan hale gelen termoplastik malzeme bu özelliğinden ötürü istediği gibi şekil alabilir. Isıtıldıklarında eriyen ve tercih edilen şekle girebilen bu malzemeler aynı şekilde soğutuldukları zaman da hızlıca soğuyup sertleşme özelliğine sahiptir. Aynı zamanda termoplastikler sünek davranış gösterirler. (Çebi, 2020)

Erimesi ve eridikten sonra akışkan haldeyken istenilen şekle girebilmesi plastiğin fiziksel değişimiyle ilgilidir, kimyasal yapısında ve özelliklerinde hiçbir değişiklik olmaz. Şekil vermede böyle kolaylıklar sağlaması yapı sektöründe ve diğer alanlarda sıklıkla tercih edilmesini sağlamaktadır. (Çebi, 2020)

1.3.1.2.Termosetler

Termoset malzemeler ısı altında fiziksel değişim gösterip talep ve tercih edilen şekle girebilirler. Fakat daha sonra sıcaklık altında yumuşayıp eski haline dönmezler. Termoplastik malzemeler sahip oldukları kovalent bağların sebebiyle eğilme, dönme gibi hareketleri kolay gerçekleştiremezler dolayısıyla genel olarak gevrek davranış gösterir. Termoset plastikleri termoplastik malzemelerden ayıran en önemli özellik şekil aldıktan sonra tekrar eritme işlemine tabi tutulamamasıdır (Çebi, 2020).

1.3.1.3.Elastomerler

Elastomerler oldukça esnek malzemelerdir. Elastik özellik gösteren bu malzemeler istenilen boylara kadar uzatılabilir ardından eski uzunluklarına geri dönebilme özelliklerine sahiptirler. Elastomerlerin sahip olduğu bu özellik yapılarında sahip oldukları çapraz bağlar ve bu bağlardan ötürü oluşan çekim kuvvetidir. (Çebi, 2020)

1.3.2. Geri Dönüştürülmüş Plastik (Pet) Eldesi

Geri dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak plastiklerin temin edilmesi gerekmektedir. Plastik atıklar, kaynaklarına göre proses atıkları ve kullanım sonrası atıklar olarak iki sınıfta gruplandırılmaktadır. Proses atıkları, plastik fabrikaları ve imalathanelerinde üretimler yapılırken üretilen malzemelerin çapaklarının alınması veya üretim hatasından kaynaklanmaktadır. (Tayyar, Üstün, 2009)

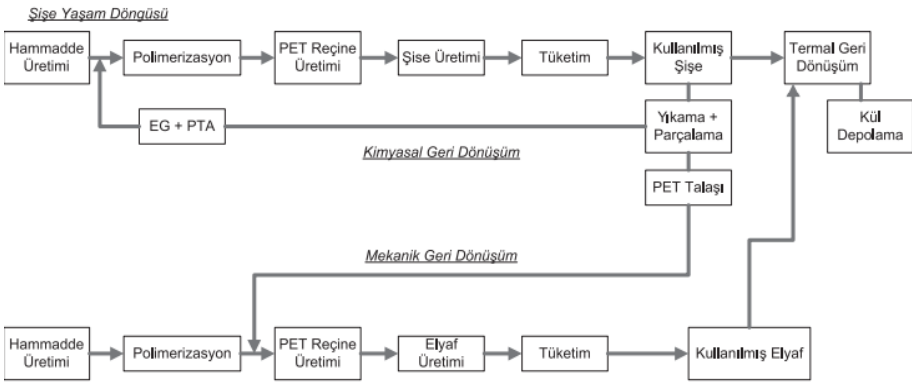
Plastik atık geri kazanımı 4 yöntemde gerçekleşir;

• Birincil Geri Kazanım: Birincil geri kazanım yönteminde atık plastikler mekanik kıyıcılarla boyutlan küçültülür ve orijinal plastiklerle karıştırılıp tekrar işlenir.

• İkincil Geri Kazanım: Atık plastikten orijinal polimerden elde edilen ürüne eşdeğer olmayan ikincil kalitede mamul üretimine yönelik geri kazanımdır.

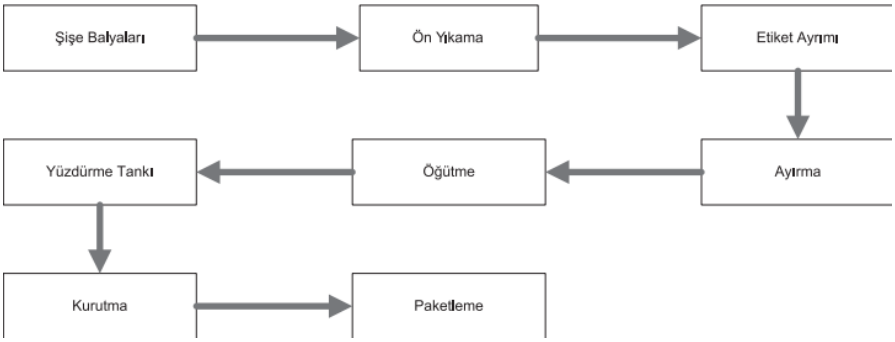
• Üçüncül Geri Kazanım: Kimyasal geri kazanım olarak da tarif edilmektedir. Temel amaç atık plastiklerden, plastiğin üretildiği polimerin monomerini, orijinal polimerini ve diğer amaçlar için kullanılmak üzere çeşitli kimyasal maddelerin üretilmesidir.

• Dördüncül Geri Kazanım: Plastik atıklardan ısı geri kazanmak için yapılan bir yakma işlemidir. Burada plastik atıklar yakılarak enerjisinden faydalanılmaktadır. (Tayyar, Üstün, 2009)



Şekil 1.6. Pet şişelerin geri kazanım döngüsü (Tayyar ve Üstün, 2009)

Şekil 1.6'da Pet şişelerinin mekanik ve kimyasal olarak geri dönüşüm döngüsü verilmiştir. Bu döngülerde görüldüğü üzere mekanik ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri belli benzerlikler göstermektedir.



Şekil 1.7. Pet şişelerin fiziksel geri kazanım döngüsü (Tayyar, Üstün, 2009)

Şekil 1.7'de fiziksel geri kazanım döngüsü detaylıca verilmektedir. Şişe balyalarının toplanıp istiflenmesi ile başlayan döngü ürün paketlenmesi ile sonlanmaktadır.

1.3.3. Geri Dönüştürülmüş Plastik (Pet) Tasnifi

PET şişelerin tasnifi hem renk hem de materyal türüne göre yapılır:

- Renk Ayırımı: Şeffaf, mavi, yeşil ve diğer renkli PET şişeler optik sensörlerle ayrılır.
- Malzeme Ayırımı: PVC, HDPE gibi diğer plastik türlerinden ayırmak amacıyla yoğunluk farkı prensibine dayalı su banyoları kullanılır.
- Metal Parçaların Ayıklanması: Manyetik ayırıcılar kullanılarak metal kapaklar ve teller ayrılır.

PET poşetlerin tasnif süreci daha karmaşıktır, aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Yoğunluk Ayırımı: İnce film yapılar su yüzeyinde yüzdüğünden, diğer plastik türlerle (örneğin LDPE) karışması kolaydır.
- Malzeme Cinsi Ayırımı: Spektroskopik sistemler kullanılarak PET, PP ve LDPE film türleri ayırt edilir.
- Renk Ayırımı: Şeffaf ve renkli poşetler, optik ayrıştırıcılarla ayrılır.

1.3.4. Geri Dönüştürülmüş Plastik (Pet) Temizlenmesi

Kirli ürünler, sulu kırma makinesi yardımı ile parçalanarak yıkama hattına alınmaktadır. Yıkama hattının ilk havuzunda atıklar üzerindeki toz, çamur v.b. yıkanarak temizlenmektedir. Kırma işlemi genellikle yıkama işlemine paralel gelişmektedir. Ekmek poşetlerinden elde edilen polipropilen sert bir malzeme olmadığı için PET şişe geri dönüşümünde oluşan bıçak yıpranmaları oluşmayacaktır. Bu işlemin ardından tamburlu yıkama makinesinde asıl yıkama

gerçekleştirilir. Tamburlu yıkama makinesinden çıkan malzemeler kurutulmaktadır, ardından lif üretimi aşamasına geçilmektedir. (Tayyar, Üstün, 2009)



Şekil 1.8. Tamburlu Yıkama Makinesi (made in china, 2025)

Tamburlu Yıkama Makinelerinde yıkanan PET şişeler üzerlerinde bulunan etiket ve atıkları temizlenmiş olarak çıkmaktadır. Şekil 1.8'de gösterilen Tamburlu Yıkama Makinesinde şişelerin girişi soldan yapılır ve sağdan temizlenmiş şekilde çıkmaktadır

1.3.5. Geri Dönüştürülmüş Lif Üretim Teknolojisi

Plastik ürünlerin geri dönüşümünde toplanması ve temizlenmesi diğer alternatiflere göre daha kolay olduğu için çoğunlukla PET şişeler tercih edilmektedir. Bu çalışmada, geri dönüşüm materyali olarak polipropilen esaslı atık poşetler kullanılacaktır. Temiz olmaları ve yeniden bir temizleme işlemine ihtiyaç duyulmaması nedeniyle Karafiber Tekstil San. Tic. A.Ş. yemekhanesinden toplanacak olan atık ekmek poşetleri yeterli miktara ulaştıktan sonra küçük parçalar haline getirilmek üzere mekanik öğütücüden geçirilecektir. Ardından ekstrüzyon işlemi ve kuru çekim yöntemi ile masterbatch elde edilecektir ve filament üretimi Denizli Ticaret Odası desteğiyle üretilecektir. Filament üretimi sırasında laboratuvar tipi ekstuder kullanılacaktır. Üretim sonunda 3D yazıcı filamenti olarak kullanılmak üzere 1,75 mm çapında monofilament üretilmiş olacaktır.



Şekil 1.9. Laboratuvar Tipi 16mm Çift Vidalı Ekstruder (Gülnar Makina Makina Kataloğu, 2010)

Şekil 1.9'da belirtilen makine soğutma havuzu ve granülatör ile birlikte tek bir stand üzerinde tasarlanmıştır. Ekstruder az hammadde kulanılarak test yapabilme ve lif üretebilme imkanı sunmaktadır. (Gülnar Makina Makina Kataloğu, 2010)

1.4. Geri Dönüştürülmüş Ürünlerin Karakterizasyonu

1.4.1. MFI

Erime indeksi testi, termoplastiklerin akışkanlığını belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Test, belirli bir yük ve sıcaklık altında standardize edilmiş bir nozülden ne kadar malzeme aktığını ölçer. Sonuç, erime indeksi (MI) veya erime akış indeksi (MFI) olarak adlandırılır. (Zwick Roell, 2025)



Şekil 1.10. MFI Test Cihazı (alarge, 2025)

Şekil 1.10’da verilen test cihazı Erime akış indeksi göstergeler olarak da adlandırılan erime indeksi test cihazları (standartlarda akış test cihazı olarak da tanımlanır), bir plastik eriyiğin eriyik kütle akış hızını (MFR) ve eriyik hacim akış hızını (MVR) belirlemek için kullanılır. Eriyiğin akış davranışının ölçülmesi, aynı polimerin farklı kalitelerini karşılaştırmak için kullanılır ve kalite güvencesi ve gelen mal denetimi, malzeme seçimi ve plastik işleme cihazlarında işleme cihazlarının kurulumu için önemli bir parametredir. Plastik işleme aşamasına bağlı olarak, bu eriyik indeksi test cihazlarının gereklilikleri değişir. (Zwick Roell, 2025)

1.4.2. DSC

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi, malzeme özelliklerinin anlaşılmasını sağlayan gelişmiş bir termal analiz tekniğidir. DSC analizi, bir numuneye giren veya çıkan ısı akışını sıcaklık veya zamana bağlı olarak hassas bir şekilde ölçerek, çok çeşitli malzeme özellikleri hakkında paha biçilmez bilgiler sağlar. Cam geçiş sıcaklığından termal kararlılığa kadar bu güçlü analitik araç, malzemelerin kapsamlı bir değerlendirmesini sunar. (intertek, 2025)



Şekil 1.11. DSC Test Cihazı (labteknoloji, 2025)

Şekil 1.11’de belirtilen DSC test cihazında çeşitli ölçüm analizleri sunmaktadır;

- Cam Geçiş Sıcaklığı (Tg): Bir malzemenin camsı bir durumdan lastik haline geçtiği sıcaklığı tanımlar ve malzeme davranışını anlamada çok önemlidir.
- Erime ve Kristalleşme: Malzemelerin erime ve kristalleşme noktalarını belirleyerek üretim ve işleme için hayati bilgiler sağlar.

- Özgül Isı Kapasitesi: Bir malzemenin sıcaklığını değiştirmek için gereken ısı miktarını ölçer ve çeşitli uygulamalar için malzeme seçimine yardımcı olur.
- Kürleme İşlemi: Yapıştırıcılar ve kaplamalar gibi uygulamalarda gerekli olan malzemelerin kürlenme veya sertleştirme sürecini karakterize eder.
- Saflık ve Oksidasyon Davranışı: Maddelerin saflığını ve oksidasyona duyarlılıklarını değerlendirerek malzeme kalitesini ve stabilitesini sağlar.
- Malzeme Bileşimi ve Kristallik: Test numunesi ile referans malzemeler arasındaki ısı akış hızlarını karşılaştırarak bileşim ve kristallikteki değişiklikleri ortaya çıkarır. (İntertek, 2025)

1.4.3. FT-IR

FTIR analizi, müşterilerin malzemeleri ve ürünleri anlamalarına yardımcı olmaktadır. Analitik test numune ekranları, profiller ve veri yorumlama, tüketici ürünleri, boyalar, polimerler, kaplamalar, ilaçlar, gıdalar ve diğer ürünlerdeki kimyasal bileşikleri tanımlamak için kullanılmaktadır. (intertek, 2025)



Şekil 1.12. FT-IR Test Cihazı (tetratek, 2015)

FTIR, organik ve inorganik numuneler için kantitatif ve kalitatif analizler sunmaktadır.Şekil 1.12'de verilen Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), bir kızılötesi absorpsiyon spektrumu üreterek bir moleküldeki kimyasal bağları tanımlamaktadır. Spektrumlar, numuneleri birçok farklı bileşen için taramak ve taramak için kullanılabilen ayırt edici bir moleküler parmak izi olan numunenin bir profilini üretmektedir. FTIR, fonksiyonel grupları tespit etmek ve kovalent bağ bilgisini karakterize etmek için etkili bir analitik araçtır.

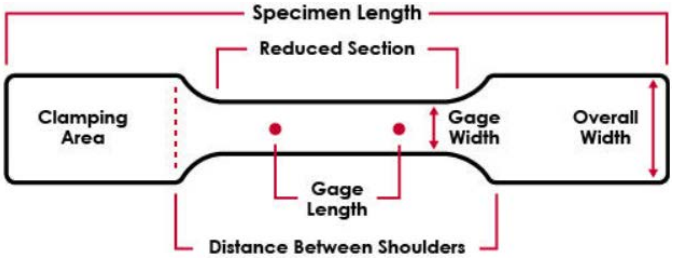
1.4.4. Mekanik Testler

ASTM D638, bir numune numunesine bir çekme kuvveti uygulanarak ve stres altındaki numunenin çeşitli özelliklerinin ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Üniversal bir test makinesinde (çekme test makinesi olarak da adlandırılır) 1 ila 500 mm/dak arasında değişen çekme hızlarında numune arızalanana kadar (akma veya kırılma) gerçekleştirilir. ASTM D638 birçok farklı çekme özelliğini ölçse de, aşağıdakiler en yaygın olanlarıdır:

- Çekme mukavemeti – bir plastiğe akmadan (onarılamaz şekilde gerilmeden) veya kırılmadan önce uygulanabilecek kuvvet miktarı.
- Çekme modülü – bir malzemenin akmadan önce strese tepki olarak ne kadar deforme olabileceği (esneyebileceği). Modül, malzemenin sertliğinin bir ölçüsüdür.
- Uzama – kopmadan sonra ölçü uzunluğundaki artışın orijinal ölçü uzunluğuna bölünmesi. Daha fazla uzama, daha yüksek sünekliği gösterir.
- Poisson Oranı - bir malzemenin ne kadar gerildiği ile germe işlemi sırasında ne kadar inceldiği arasındaki ilişkinin bir ölçüsüdür. (instron, 2025)



Şekil 1.13. Instron- Çekme Test Cihazı (instron, 2025)



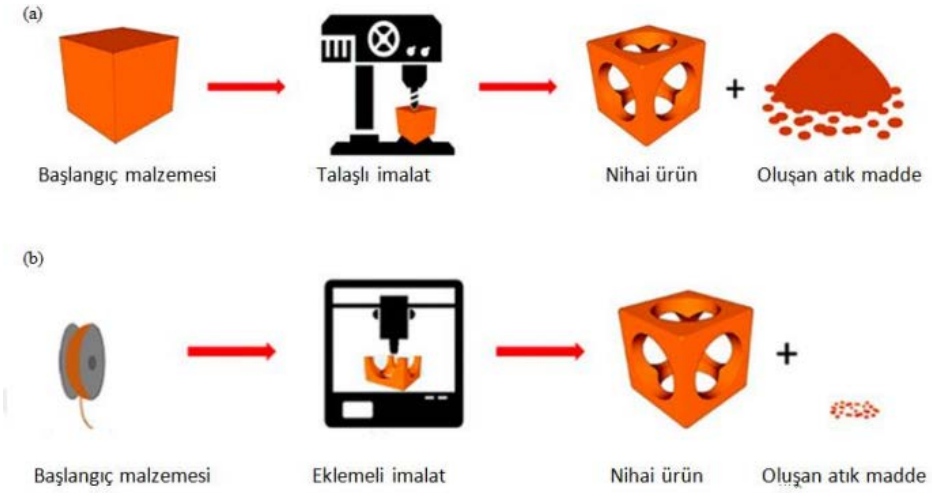
Şekil 1.14. Numune Tipi Örneği (instron, 2025)

Şekil 1.13 ve 1.14'te test cihazı genel görünümü ve numune tipinin değişkenliği belirtilmiştir. Şekil 1.13'te en yaygın olarak kullanılan, 3,2 mm kalınlığında olan ve genellikle enjeksiyon kalıplama ile oluşturulan Tip I numunelerdir. Tip I numunelerin toplam uzunluğu 165 mm ve genişliği 13 mm, ölçü uzunluğu ise 50 mm'dir. Düz numuneler tipik olarak kalıplanır, kalıpla kesilir veya bir "köpek kemiği" veya "dambıl" şeklinde işlenir, bu da kırılmanın sıkıştırma alanlarından ziyade numunenin merkezinde gerçekleşmesini sağlamaktadır. ASTM D638, düz numunelere ek olarak, her ikisi de köpek kemiği şeklinde işlenmesi gereken sert boruların ve çubukların test edilmesine de izin vermektedir. (instron, 2025)

1.5. 3D Baskı Teknolojisi

Eklemeli imalat olarak adlandırılan bu teknolojinin temel prensibi, bilgisayar destekli tasarım programları (Autocad, SolidWorks vb.) veya 3D tarayıcılar kullanılarak oluşturulan dijital bir nesnenin süreç planlamasına gerek kalmadan fiziksel formda doğrudan üretilmesi olarak tanımlanabilir. Bu işlemi gerçekleştiren cihazlar ise 3D yazıcı olarak adlandırılır. Eklemeli üretim teknolojisi, ürün geliştirme süreçlerini hızlandırmak, küçük ölçekli üretimlerde esneklik sağlamak ve karmaşık tasarımlı bileşenleri düşük maliyetle üretmek için geliştirilmiş yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Günümüz teknolojisinde kullanılan 3D yazıcılarda katman tabanlı çalışma prensibi olmakla birlikte, üretim şekillerinin farklılık göstermesinin nedeni katmanların nasıl oluşturulduğu ve birbiri ile nasıl bağlandığı, üretim için kullanılan malzemelerin çeşididir. Bazı Eklemeli İmalat yöntemlerinde nesne katmanları oluşturmada hammaddeyi eriterek ya da yumuşatarak kullanırken, diğerleri lazer/UV ışık kaynağı kullanarak foto-reaktif bir reçineyi tabaka tabaka sertleştirerek oluşturur, bu farklar ise 3D baskı teknolojilerini birbirinden ayıran temel unsurlardır. Şekil 1.15'te de görüldüğü gibi eklemeli imalat tasarımı yapılan ürünü malzeme ekleyerek katman katman oluşturduğundan, geometrik

doğruluğa yüksek oranda ulaşabilirken, verimli hammadde kullanmaya ilave olarak minimum atık üretme özelliğine de sahiptir. (Tunca, 2022)



Şekil 1.15. Geleneksel imalat yöntemi ile eklemeli imalat yönteminin karşılaştırması (a) geleneksel imalat, (b) eklemeli imalat. (Tunca, 2022)

Eklemeli imalat, geleneksel imalat tekniklerine kıyasla birçok avantaj sunarak cazip hale gelmektedir. Bu avantajlardan bazıları şunlardır:

• Geleneksel imalat yöntemleri ile kıyaslandığında, eklemeli imalat malzeme verimliliğini artırır ve atık miktarını minimum seviyeye indirir. Geleneksel imalat, iş parçalarının belirli şekillerde oyulması veya kesilmesiyle gerçekleştirilir ve bu süreçte büyük miktarda malzeme israf edilir. Eklemeli imalat 'da ise, malzeme katman katman eklenerek yapı oluşturulduğundan, yalnızca ihtiyaç duyulan malzeme kullanılır. Bundan dolayı çevreci bir imalat yöntemi olarak da adlandırılır (Tunca, E., 2022).

• Eklemeli imalat yöntemleri ile 3D tasarımı yapılan ürünler dijital ortamda gönderilerek, uygun cihazın bulunduğu bir yerde basım işlemi yapılabilir. Bu durum üretim yeri konusundaki kısıtlamaları ortadan kaldırarak taşıma gereksinimini ve bağımlılığı azaltmaktadır (Tunca, E., 2022).

• Eklemeli imalat, dijital olarak tasarlanan bir model doğrudan 3D yazıcıya aktarılır ve katmanlar halinde üretilir. Bu süreçte enjeksiyon kalıplama gibi yaygın olarak kullanılan birçok imalat tekniğinin aksine hiçbir aparat, kesici takım, kalıp gibi ilave yardımcı araçlara ihtiyaç duymadığından, maliyetleri önemli ölçüde azaltır (Ercan, 2019).

• Geleneksel imalat teknikleri ile üretim uzun zaman almaktadır fakat eklemeli imalat ile tasarım ve üretim arasındaki kademeler atlandığı için, tasarımdan saatler içerisinde hızlı bir şekilde doğrudan imalat yapılabilir. Aynı zamanda daha az iş gücü ve daha az üretim adımı gerektiği için hem zaman tasarrufu hem de maliyet düşüşü sağlar ayrıca verimliliği de arttırır (Ercan, 2019).

• Geometriden doğan kısıtlamaları ortadan kaldırarak tasarımda serbestlik sağlar, üretim sırasında bile tasarımı hızlıca değiştirebilmek mümkündür. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde daha verimlidir, çünkü sadece gerekli olan alanlara malzeme eklenir (Sarvestani ve ark., 2018).

1.6. Yapılan Önceki Çalışmalar

Sürdürülebilirlik kavramı, azalan yer altı kaynakları, üretim anında salınan gazlar ve karbon ayak izi gibi nedenlere bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Literatür incelendiğinde, geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik konularında yapılmış çok sayıda araştırmaya rastlanmaktadır.

Telli ve ark. (2012) çalışmasında plastik ambalaj atıklarının ülkemiz nüfusuna göre yüksek olduğunu bu bağlamda atık geri dönüşüm sistemlerinin geliştirilerek tekstil endüstrisinde kullanılabileceğini belirtmiştir.

Tayyar ve Üstün (2009), çalışmasında atık PET şişelerin geri dönüşüm teknolojisini ve uygulamalarını incelenmiş ve bu konuda yapılmış bilimsel çalışmalar özetlenmiştir. Çalışmada ayrıca geri dönüştürülen maddelerin tekstil sektöründeki kullanım alanları sıralanmıştır. Geri dönüşüm uzun yıllardır çeşitli sektörlerde kullanılan bir sürdürülebilirlik konusudur. Bu bağlamda ülkemizde atık oranı en yüksek olan termoplastik (PET, PP vb.) atıklar geri dönüşüm için önemli rol oynamaktadır. Geri dönüştürülen termoplastik malzemeler pek çok sanayi kolunun girdi malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sektörlerin başında tekstil ve inşaat sektörü gelmektedir. Tekstil sektöründe geri dönüştürülmüş atıklardan lif ve iplik üretilmesi amaçlanırken inşaat sektöründe bu atıklar çoğunlukla kompozit malzeme üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1.3. Kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanabilirliği

Yöntem	Üretim Maliyeti	Ekonomik Rekabet Edebilirlik	Uygulama
Hidroliz	Yüksek	Yüksek Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanmakta
Metnoliz	Yüksek	Yüksek Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanmakta
Glikoliz	Orta - Düşük	Küçük Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanmakta
Aminoliz	Düşük	Küçük Kapasitede	Endüstriyel olarak uygulanması bulunmamakta
Amonoliz	Düşük	Ürüne Bağlı	Endüstriyel olarak uygulanması bulunmamakta

Literatür incelendiğinde geri dönüştürülmüş termoplastik atıkların kullanıldığı farklı sanayi kollarına yönelik çalışmalara rastlanmıştır.

Erdem (2013), çalışmasında yapının mukavemetini arttırmak amacıyla geri dönüştürülmüş tekstil esaslı alçı kompozitlerini ele almıştır. Bu amaçla kompozit yapının oluşturulması için PET şişe geri dönüşümünden elde edilen polietilen tereftalat lifleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, alçının türü, su/alçı oranı, geri dönüştürülmüş PET lifinin kompozit içindeki hacim oranları, geri dönüştürülmüş PET lifinin boyu ve çapı gibi parametreler değişken olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda geri dönüştürülmüş tekstil liflerinin katkısıyla üretilen alçı yapılarının mukavemetinin arttığı ve bunun da lif boyu ile doğru orantılı olduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.16. İnşaat tekstillerin, tente çadırlık ve ağır katranlı dokuma kumaşları olarak kullanılması (Erdem, 2013)

Kılıç (2016), çalışmasında alışılagelmiş metal ve metal alaşımlarının yerini işleme kolaylığı, ekonomiklik, hafiflik, ısıl kararlılık gibi üstün mekanik, elektriksel, ısıl özellikler sunan kompozit malzemelerin almaya başladığını belirtmiştir. Çalışma kapsamında, geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (rPET) polimeri kullanılarak kil, bor, pomza ve zeolit gibi nanopartikül içerikli nanokompozit üretimi amaçlanmıştır. Çalışmanın sonucunda kil, bor, zeolit ve pomza partiküllerin polimer matris içerisindeki dağılımının cips, lif gibi katkı malzemelerinden etkilendiğini ve nanokompozitlerin çeşitli özelliklerinin değiştiğini belirtmiştir.

Tablo 1.4. PET'in fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	**Değerler**
Moleküler ağırlık (yinelenen birim)	192 (g mol^{-1})
Ortalama molekül ağırlığı (MW)	30.000–80.000 (g mol^{-1})
Yoğunluk	1.41 (g/cm^3)
Camsı geçiş sıcaklığı	69–115 (°C)
Erime sıcaklığı	260 (°C)
Çekme dayanımı	50 (MPa)
Darbe dayanımı	90 (J m^{-1})
Su absorpsiyonu (24 h sonra) (%)	0.5

Akçaözoğlu (2008), atık PET şişelerden elde edilen şişe kırıklarının beton ile belli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yapıların mukavemet ve hafif beton yoğunluklarını karşılaştırmıştır. Termoplastik atıkların geri dönüşümü sonrasında en çok kullanıldığı sektörlerin başında tekstil sektörü gelmektedir. Atık malzemeler çoğunlukla lif formuna dönüştürülmekte ve farklı hammaddeler ile çeşitli oranlarda karıştırılarak iplik yapıları elde edilmektedir.

Sarıoğlu (2017), çalışmasında belirli oranlarda PES ve r-PET liflerini pamuk lifi ile karıştırarak ring iplikleri üretmiş ve üretilen ipliklerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda, aynı karışım oranında üretilen pamuk-PES ipliklerinin mukavemetlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, karışımdaki r-PET oranı arttıkça iplik mukavemeti de artmaktadır.

Sarıoğlu ve ark. (2019), ham PET (v-PET) lifleri ile geri dönüştürülmüş PET (r-pet) liflerinden ring, OE-rotor, kompakt ve vortex eğirme teknolojilerinde karışım iplikleri üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda ring ve kompakt eğirme teknolojilerinde r-PET kullanımının mukavemeti düşürdüğü ancak uzamayı arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte,

tüm eğirme teknolojilerinde r-PET kullanımı tüylülüğün artmasına neden olmuştur. Bunların dışında, geri dönüştürülmüş lif kullanımının iplik özellikleri üzerinde anlamlı farklar yaratmadığı sonucuna varılmıştır.

Eren ve ark. (2023), çalışmalarında poliester, geri dönüştürülmüş poliester (r-PET) ve biyobozunur poliester (bio-PET) içerikli kumaşların boyama ve fiziksel performanslarını karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlarda r-PET ve bio-PET içerikli numunelerin en az PET içerikli kumaşlar kadar iyi boyandığı haslık ve mukavemet değerlerinde belirgin farklılıklar olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 1.5. Numune Haslık Değerleri (Eren ve ark, 2023)

Kumaş	Asetat	Pamuk	Poliamid	Poliester	Akrilik	Yün
PET+Pamuk	4/5	4	4/5	4/5	4/5	4/5
r-PET+Pamuk	4/5	4	4/5	4/5	4/5	4/5
bio-PET+Pamuk	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5

Sözcü (2019), çalışmasında polipropileni ele almış ve tekstilde %0,8 oranı ile en az geri dönüştürülen termoplastik atıklardan biri olduğu belirtmiştir. Çalışmada, geri dönüştürülen polipropilen (PP) liflerinin halı ipliği üretiminde kullanılması hedeflenmiştir.

Putra ve Abdullah (2020), çalışmalarında üç farklı sarım hızı kullanılarak üretilen monofilament (r-PET) ipliklerde mukavemet karşılaştırması yapmıştır. Çalışmanın sonucunda, en yüksek sarım hızının en verimli sonucu çıkardığı belirtilmiştir.

Tablo 1.6. Numune Sarım Hızı-Mukavemet-Uzama karşılaştırılması (Putra ve Abdullah, 2020)

Sample	Winding Speed (m/min)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)
Yarn A	43.33	(34.62 ± 5.01)	(35 ± 9.89)
Yarn B	59.35	(43.10 ± 4.88)	(14 ± 9.78)
Yarn C	72.72	(47.71 ± 4.97)	(10 ± 9.65)

Literatür incelendiğinde atık plastik malzemelerin 3D yazıcılarda filament olarak kullanımına yönelik sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmaktadır.

Aktepe ve Aktepe (2024), çalışmalarında geri dönüştürülmüş PET ve PLA liflerini 3D yazıcılarda kullanmak amacıyla malzemelerin boyutsal doğruluk ve geri-çekilme değerlerini

karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, baskı hızı arttıkça (30, 40 ve 50 mm/sn) boyutsal doğruluk azalmaktadır. Ek olarak, aynı baskı hızlarında çalışıldığında PET ve PLA arasındaki en büyük farklardan birinin geri dönüştürülmüş PET ile yapılan baskıda daha fazla kılçıklanma olmasıdır. Bununla birlikte, çeşitli atıkların 3D yazıcı filamenti içerisinde katkı malzemesi olarak kullanıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır.

Tablo 1.7. Farklı basım hızlarının karşılaştırılması (Aktepe ve Aktepe, 2024)

CAD Çapı (mm)	50 hız ile 3 Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde fark (%)	40 hız ile 3 Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)	30 hız ile 3 Boyutlu Baskıda Ölçülen Çap (mm)	Fark (mm)	Yüzde Fark (%)
2.5	1.7	0.8	47.0	1.8	0.7	38.8	1.9	0.6	31.5
5	4.4	0.6	13.6	4.5	0.5	11.1	4.8	0.2	4.1
10	9.5	0.5	5.2	9.7	0.3	3.0	9.8	0.2	2.0
15	14.5	0.5	3.4	14.7	0.3	2.0	14.8	0.2	1.3
20	19.4	0.6	3.0	19.6	0.4	2.0	19.8	0.2	1.0
25	24.5	0.5	2.0	24.6	0.4	1.6	24.6	0.4	1.6

Cengiz ve Aktepe (2022), çalışmalarında ahşap proses atıklarının sürdürülebilirlik kapsamında geri dönüştürülerek 3D yazıcılarda kullanımını araştırmıştır. İlk adımda ahşap ve talaş malzemelerini toz haline getirmişlerdir. 3D yazıcılarda kullanabilmek adına belli ek bağlayıcılar ilave etmişlerdir. Sonuç olarak, 3D yazıcılarda ahşap tozlarının kullanımı ile yazdırılan objelerde fiziksel ve mekanik özelliklerde dezavantajlar tespit edilmiştir.



Şekil 1.17. Ahşap madde geri dönüşümü (Cengiz ve Aktepe, 2022)

Özdemir ve ark. (2023), çalışmalarında jüt lifi atıklarını 3D yazıcılarda yaygın olarak kullanılan PLA (polilaktik asit) filamenti içerisinde katkı malzemesi olarak kullanarak filamentin özelliklerini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir.

1.7. Çalışmanın Amacı

Çalışmanın temel amacı, plastik atıkların geri dönüştürülerek sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkı sunmaktır. Çalışmada, polipropilen esaslı atık poşetlerin geri dönüşümü üzerine yoğunlaşılacaktır. Bu kapsamda, yeni bir teknoloji sayılabilecek olan 3D yazıcılarda kullanılan girdi materyallerine bir alternatif olarak daha ekonomik ve çevreci bir ürün elde edilmesi amaçlanmaktadır. Plastik atıkların geri dönüştürülerek tekstil ürününe dönüştürülmesinde ilk akla gelen alternatif olan PET esaslı atıkların yerine polipropilen esaslı atıkların kullanılmasının yaygınlaştırılmasını sağlamak da projenin diğer hedefleri arasında yer almaktadır. Atık poşetlerden üretilecek monofilament ipliğin 3D yazıcılarda kullanılabilirliğinin ortaya konulması amacıyla malzemenin karakterizasyonunun yapılması da projenin hedefleri arasındadır.

BÖLÜM 2

RAPOR DÖNEMLERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1 Materyal

2.1.1. Polipropilen Yapısı ve Geri Dönüşüm Adımları

2.1.1.1. Polipropilen 'in Yapısı

Polipropilen, çok çeşitli kullanımlara sahip ucuz bir polimerdir. Cam Geçiş Sıcaklığı , Tg = -10 ° C; Erime Sıcaklığı, Tm = 173 ° C; 25 ° C'de = 0,85 g/cc; 25 ° C'de = 0,95 = 42,08 3 ° C;25 g/cc'de amorf yoğunluk; 25 g/cc'de kristalinite ;Tekrarlanan birim g/mol moleküler ağırlığı . Polipropilen, polietilene benzeyen, az veya hiç doymamışlık içermeyen doğrusal bir hidrokarbondur; ancak -CH grupları sertleşmeye ve oksidasyona karşı daha az kararlılığa neden olur. (Lee Tin Sin, 2023)

Aşağıda bazı genel özellikler verilmiştir.
Su emilimi: 24 saatte %0,01 ila %0,03
Su tutma: %5
Özgül ısı: 40 ° C'de 0,46 ve 100 ° C'de 0,5
Dielektrik sabiti: 2,25
Basınç akma dayanımı: 3,8-4,6 (daN/mm2)
Young modülü : 120 (daN/mm)
Kopma uzaması: %20-300;
Eğilme akma dayanımı : 4,2 ila 4,9 (daN/mm)
Eğilme modülü : 110 (daN/mm)
Darbe dayanımı : 0,4-2,2 (Izod ft lb/in)
Sürtünme: 0,1-0,3 (polimer/polimer) (Lee Tin Sin, 2023)

2.1.1.2. Polipropilen 'in Geri Dönüşüm Adımları

2.1.1.2.1. Atık Poşet Eldesi ve Tasnifi

Geri dönüşümün gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak atık poşetlerin temin edilmesi gerekmektedir. Atık poşetler Karafiber Tekstil San. Ve Tic. A.Ş.'nin yemekhanesinde kullanım ömrünü dolduran ekmek poşetlerinden elde edilmiştir. Üretimde kullanılmak üzere Karafiber Tekstil San. Ve Tic. A.Ş. bünyesinde tasnif edilmiştir. Eldesi süresince yemekhanede atık

toplama bölümleri oluşturulmuştur ve söz konusu bölümlerden toplanan poşetler yeterli miktarda toplanana dek tasnifine devam edilmiştir.

2.1.1.3. Atık Poşetten Polipropilen Eldesi

2.1.1.3.1. Mekanik Geri Dönüşüm Yöntemi ile PP Eldesi

Atık poşetler mekanik geri dönüşüm yöntemi ile yani fiziksel olarak giyotin ile parçalanarak küçük parçalara ayrılması sağlanmıştır. Bu sayede homojen şekilde parçalanmış atık poşet parçaları elde edilmektedir. Küçük parçalara ayırmanın temel amacı ekstrüzyon işlemi öncesi malzemenin homojen akışkanlık ve ısı transferi özelliklerini artırmaktır. Parçalamada kullanılan makine Granülatör makinesidir, Parçalanmış plastikler daha da küçültülerek 3–10 mm boyutunda granüller elde edilir. Yüksek devirli bıçak sistemi ile çalışır (200–800 rpm).

Tablo 2.1. Atık poşetten PP eldesi işlem aşamaları

Adım	Açıklama
Besleme	Kurutulmuş poşetler konveyör veya hazne aracılığıyla makineye beslenir.
İlk Parçalama	Büyük bıçaklarla poşetler 2–5 cm boyutlara getirilir.
İkincil Öğütme (Opsiyonel)	Granülatör ile daha küçük (3–10 mm) parçalara ayrılır.
Eleme / Ayırma	Elde edilen parçalar bir elek sisteminden geçirilir; istenmeyen boyutlar tekrar kırıcıya döner.

2.1.1.3.2. PP Ekstrüzyon İşlemi

Polipropilen (PP), termoplastik özellik gösteren ve çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılan önemli bir polimer türüdür. Polipropilenin çeşitli formlarda (levha, film, filament, boru vb.) şekillendirilmesini sağlayan temel yöntemlerden biri ekstrüzyon işlemidir. Ekstrüzyon, katı haldeki PP hammaddesinin ısıtılarak eritilmesi, viskoz bir hâle getirilmesi ve ardından belirli kalıplar aracılığıyla sürekli bir şekilde şekillendirilmesi esasına dayanır. Bu bölümde PP ekstrüzyon işlemi adım adım açıklanmıştır.

PP, ekstrüderin üst kısmında yer alan besleme hunisine (hopper) aktarılır. Bu huni, doğrudan vida sistemiyle bağlantılıdır ve PP granüllerinin düzenli bir şekilde vida içine alınmasını sağlar. Polipropilenin eritilerek viskoz bir hâle getirilmesini sağlayan en kritik bölge, ekstrüderde yer alan vida (screw) ve silindir (barrel) sistemidir. Bu sistem, genellikle üç ana bölgeden oluşur: besleme bölgesi, sıkıştırma bölgesi ve homojenleştirme bölgesi. Bu bölgelerde granül hammadde ilerledikçe sürtünme kuvveti ve dış ısıtıcıların etkisiyle kademeli olarak ısıtılır ve erimeye başlar.



Şekil 2.1. Besleme hunisi önden görünümü

Barrel boyunca farklı sıcaklık bölgeleri tanımlanır. Besleme bölgesinde sıcaklık genellikle 170–180 °C arasındadır. Bu sıcaklık aralıkları, PP'nin eriyik hâlinde düzgün bir akış sağlamasına ve kalıpta şekil bozulmalarının önlenmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 2.2. Besleme hunisi üstten görünümü

Eriyik hâle gelen PP, ekstrüder çıkışında bir filtre sistemi olan ekran değiştiriciden (screen changer) geçirilir. Bu filtre sistemi sayesinde hammadde içerisinde bulunan istenmeyen partiküller (yanık kalıntılar, metal parçaları, kir) uzaklaştırılır. Böylece ürün kalitesinin sürekliliği sağlanır.



Şekil 2.3. Kontrol ekranı

Besleme hunisinden beslenen PP granülleri yüksek sıcaklığa maruz kalarak nozula (spinneret) kadar eriyik bir hal alarak gelir nozuldan tek filament halinde çıkan PP granülleri soğuk sudan geçerek amorf bölge ve kristalin bölge oryantasyonu sağlanır. Soğuk suda katılaşan filamentler numara ve çap (mm) tayini cihazından geçerek istenen değere ulaşıldığında sarım kısmına geçerek sarıma başlanır.



Şekil 2.4. Sarım Ünitesi

3D yazıcı giriş materyali olarak kullanılacak olan geri dönüştürülmüş PP filamenti 1.75 mm çapında üretilmiştir. Üretim esnasında kalın yeri 1.90 mm ince yeri 1.56 mm olarak ölçülmüştür. Ölçümler manuel kumpas ve çap tayini ünitesinde yapılmıştır.



Şekil 2.5. Sarım ve çap tayin ünitesi

Sarım bitiminde alınan filament diski 3D yazıcılarda girdi olarak kullanılmadan önce karakterizasyon testleri ve mekanik testler yapılarak karakteri ve yapısı hakkında bilgiler edinilecektir.

2.2. Yöntem

Atık poşetlerden üretilen PP filamentinin karakter ve yapısal analizleri için belirli standartlara göre MFI, DSC, FT-IR ve ASTM D638 standardına göre Instron'da çekme testi uygulanacaktır.

2.2.1. MFI

Erime akış indeksi (MFI – Melt Flow Index), termoplastik malzemelerin belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında eriyik hâlindeki akış davranışlarını ölçmek amacıyla uygulanan standart bir testtir. Bu test, plastik hammaddelerin proses edilebilirliğini ve viskozite özelliklerini değerlendirmede kullanılır. MFI değeri, genellikle polimerin 10 dakikada bir capillary (boru) kalıptan geçen kütlesi (g/10 dk) cinsinden ifade edilir.

Yüksek MFI değeri, polimerin düşük eriyik viskozitesine sahip olduğunu, dolayısıyla kolay aktığını; düşük MFI değeri ise yüksek viskozite ve daha zor akan bir yapı sergilediğini gösterir. Bu özellik, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, film üfleme, filament çekimi gibi proses parametrelerinin belirlenmesinde kritik rol oynar.

Erime akış indeksi testi, ASTM D1238 veya ISO 1133 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir.

2.2.1.1 Testin Uygulanışı

Erime akış indeksi (MFI) testi uygulanmadan önce, öncelikle test edilecek atık poşetlerden elde edilen PP granül formda hazırlanmır ve özellikle higroskopik yapıya sahip malzemeler için gerekli kurutma işlemleri yapılmaktadır. Kurutma işlemi, malzemenin içerisindeki nemin uzaklaştırılması açısından kritik öneme sahiptir, aksi takdirde test sonuçları yanıltıcı olabilir.

Hazırlık aşamasının ardından test cihazı, test edilecek malzemenin türüne uygun olarak belirlenen sıcaklığa önceden ısıtılmaktadır. Polipropilen (PP) malzemeler için cihaz genellikle 230 °C'ye ayarlanır. Bu test kapsamında da X dereceye ısıtılmıştır. Uygun sıcaklığa ulaşılmasının ardından, belirli miktarda plastik granül cihazın ısıtmalı silindirik bölmesine manuel olarak yerleştirilmiştir. Daha sonra, cihazın piston mekanizması yerleştirilerek granülün tam anlamıyla eriyip akışa geçmesi için yaklaşık beş dakika kadar beklenmiştir.

Malzemenin tamamen erimesi sonrasında, pistonun üzerine belirli bir kütle uygulanmıştır. Genellikle 2,16 kg ağırlık kullanılmakta olup, bu ağırlık pistonun aşağı yönlü hareket etmesini sağlayarak erimiş plastiğin alt kısımdaki standart kalıptan dışarı akmasına neden olmaktadır. Eriyik hâlde kalıptan çıkan polimer, önceden belirlenmiş zaman aralıklarında kesilerek toplanmakta ve hassas terazi yardımıyla tartılmıştır.

Toplanan örneklerin ağırlığı 10 dakikalık süre boyunca kaydedilmiştir. Elde edilen bu değer, aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanarak MFI sonucu elde edilmektedir:

$$MFI\ \left(\frac{g}{10\ dk}\right) = \frac{Toplam\ çıkış\ kütlesi\ (g)}{10 dakika}$$

Bu hesaplama sonucunda elde edilen MFI değeri, malzemenin eriyik hâlindeki akışkanlığını ifade eder ve işlenebilirlik açısından oldukça önemli bir göstergedir. Test, ASTM D1238 veya ISO 1133 gibi uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmekte olup, polimerin kalitesinin değerlendirilmesinde ve proses parametrelerinin belirlenmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

MFI (Erime Akış İndeksi) değeri, polimerlerin işlenebilirliği ile üretilecek ürünün yüzey kalitesini ve mekanik dayanıklılığını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. MFI değeri düşük olan polimerler, yani viskozitesi yüksek olan malzemeler, genellikle mukavemeti yüksek ancak işlenmesi daha zor olan ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Bu tür malzemeler

özellikle basınca dayanıklı borular gibi yüksek yapısal bütünlük gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

Buna karşılık, MFI değeri yüksek olan polimerler, yani viskozitesi düşük malzemeler, karmaşık geometrilere sahip kalıpların hızlı ve verimli bir şekilde doldurulmasını sağlayarak daha kolay işlenebilirlik sunar. Bu özelliklerinden dolayı, ince duvarlı enjeksiyon kalıplar gibi detaylı ve hassas şekillerin üretildiği proseslerde tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, MFI değeri; ürünün kullanım alanına, dayanım gereksinimlerine ve işleme yöntemine göre doğru malzemenin seçilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

2.2.2. DSC

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), polimerik malzemelerin ısıl özelliklerini incelemek amacıyla kullanılan termal analiz yöntemlerinden biridir. Bu testin temel amacı, malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı verdiği tepkileri –özellikle faz geçişlerini– ölçerek, cam geçiş sıcaklığı (**Tg**), kristallenme sıcaklığı (**Tc**), erime sıcaklığı (**Tm**) ve spesifik ısı kapasitesi gibi parametreleri belirlemektir.

DSC testi sayesinde, bir polimerin morfolojik yapısı hakkında bilgi edinilebilmekte, kristalin ve amorf bölgelerin oranı tahmin edilebilmekte, ayrıca termal stabilite ve yeniden işlenebilirlik açısından değerlendirmeler yapılabilmektedir. Geri dönüşüm uygulamalarında, özellikle polimerin işlenebilirliği ve performansının analizinde DSC verileri oldukça önemlidir.

DSC cihazı, numune ve referans olmak üzere iki ayrı hazne içerir. Her iki hazne aynı sıcaklık programına tabi tutulur. Numune haznesine test edilecek polimer konulurken, referans haznesi boş bırakılır veya inert bir madde ile doldurulur. Cihaz, sıcaklığı kontrollü bir şekilde artırırken, polimerin geçirdiği fiziksel değişimlerin (örn. cam geçişi, kristallenme, erime vb.) neden olduğu ısı akış farklarını ölçer. Bu farklar, zaman veya sıcaklığa karşı çizilen DSC eğrisinde endo veya ekzotermik pikler şeklinde görünür.

2.2.2.1. Testin Uygulanışı

DSC testi uygulanmadan önce, analiz edilecek PP numunesi hassas terazi yardımıyla 5 ila 10 mg arasında olacak şekilde tartılır. Bu işlem, doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Tartılan numune, alüminyum malzemeden üretilmiş DSC panı içerisine yerleştirilir ve ardından cihazın numune haznesine dikkatlice konumlandırılır.

Testin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, numune haznesine karşılık gelen referans haznesi de aynı koşullarda hazırlanmalıdır. Bu referans haznesi genellikle boş bırakılır. Bu tez kapsamında da boş bırakılmıştır.

Cihazın sıcaklık programı, polimerin özelliklerine ve analiz hedeflerine göre belirlenir. Tipik olarak sıcaklık artış hızı 10 °C/dakika olarak ayarlanmakta olup, test aralığı -50 °C ile 300 °C arasında değişmektedir. Bu sıcaklık aralığında cihaz hem ısıtma hem de soğutma döngülerini kontrollü biçimde gerçekleştirir.

Sıcaklık değişimi sırasında numuneden geçen ısı akışı sürekli olarak ölçülür ve cihazın yazılımı aracılığıyla termogram (DSC eğrisi) elde edilir. Bu eğri üzerinde gözlemlenen endotermik veya ekzotermik pikler, polimerin cam geçiş sıcaklığı (Tg), erime sıcaklığı (Tm), kristallenme sıcaklığı (Tc) gibi ısıl geçiş noktalarının belirlenmesine olanak sağlar. Ayrıca bu pikler yardımıyla entalpi değerleri de hesaplanabilir ve polimerin kristallik derecesi gibi ileri seviye termal özellikleri hakkında bilgi edinilebilir.

DSC testi, polimerlerin safiyetinin, kristallik derecesinin, termal stabilitesinin ve yeniden işlenebilirlik potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Geri dönüştürülmüş plastiklerde, özellikle zincir bozunması ve oksidasyon gibi olumsuz etkilerin olup olmadığını anlamak için de kullanılır. Ayrıca çok fazlı sistemlerde veya katkılı malzemelerde farklı bileşenlerin ısıl özellikleri ayrı ayrı gözlemlenebilir.

Geri dönüşümden elde edilen malzemelerin saf malzeme ile kıyaslanmasında, DSC eğrilerinde gözlenen pik kaymaları veya entalpi azalması, materyalin yapısal olarak bozulduğunu veya katkı içerdiğini gösterebilir.



Şekil 2.6. DSC test numunesi ve referans numunesi

2.2.3. FT-IR

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi (FT-IR), bir maddenin moleküler yapısını ve kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla kullanılan, yaygın ve güçlü bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, polimer malzemelerdeki fonksiyonel grupların tanımlanmasına, kimyasal bağ yapılarının incelenmesine ve geri dönüşüm veya bozunma sonrası oluşan yapısal değişikliklerin tespitine olanak sağlar.

FT-IR testi, özellikle geri kazanılmış plastiklerin saflık derecesini ve başka polimerlerle karışıp karışmadığını belirlemek açısından büyük önem taşır. Polimer malzemelerde FT-IR analizi, spesifik dalga boylarında görülen absorpsiyon bantlarının yardımıyla, molekül içi titreşim hareketlerinin değerlendirilmesiyle gerçekleştirilir. FT-IR analizinin temel prensibi, kızılötesi (IR) ışığın numune üzerine gönderilmesi ve bu ışığın malzeme tarafından belirli dalga boylarında absorbe edilmesidir. Her kimyasal bağ, karakteristik bir dalga boyunda titreşim yapar ve bu bağa ait spesifik bir absorpsiyon bandı oluşturur. Numuneden geçen veya yansıyan ışığın spektral bileşenleri Fourier dönüşümü ile analiz edilerek bir IR spektrumu elde edilir.

Bu spektrumda her bir absorpsiyon bandı, belirli bir bağ türünü veya fonksiyonel grubu temsil eder. Polimerik yapılar, farklı karakteristik piklere sahiptir ve bu pikler yardımıyla yapısal analiz yapılabilir.

2.2.3.1. Testin Uygulanışı

FT-IR testi, belirli adımlar izlenerek gerçekleştirilen sistematik bir analiz yöntemidir. İlk olarak, analiz edilecek polimer numunesi hazırlanır. Numune, genellikle ince bir film, granül ya da toz hâline getirilir. Toz hâlindeki örnekler, potasyum bromür (KBr) tableti ile karıştırılıp preslenerek analiz için uygun formata getirilebilir. Alternatif olarak, ATR (Azaltılmış Toplam Yansıma) modunda yapılan ölçümlerde örnek hazırlığı daha basit olup, numunenin doğrudan ölçüm yüzeyine yerleştirilmesi yeterlidir.

Numune hazırlandıktan sonra FT-IR spektrometresi uygun ölçüm moduna göre ayarlanır. Bu aşamada genellikle ATR, transmisyon veya reflektans gibi modlardan biri tercih edilir. ATR modunun tercih edilmesi hâlinde hem zamandan tasarruf sağlanmakta hem de hazırlık süreci sadeleşmektedir.

Cihazın ayarlanmasının ardından, ölçüm işlemi başlatılır ve 4000–400 cm^{-1} dalga boyu aralığında kızılötesi ışığın örnek tarafından hangi dalga boylarında ve ne miktarda absorbe

edildiği kayıt altına alınır. Elde edilen bu veriler, cihaz yazılımı tarafından işlenerek bir IR spektrumu (absorpsiyon eğrisi) hâlinde gösterilir.

Son aşamada, bu spektrum üzerinden analiz gerçekleştirilir. Karakteristik dalga boylarındaki absorpsiyon pikleri incelenerek numunenin içerdiği fonksiyonel gruplar belirlenir ve böylece polimerin türü ve kimyasal yapısı hakkında detaylı bilgi elde edilir.

FT-IR spektroskopisi, polimerlerin kimyasal yapısının doğrulanması, geri dönüşüm sürecinde karışım tespiti ve polimer bozunmalarının incelenmesi için vazgeçilmez bir analiz yöntemidir. Özellikle karışık plastik atıkların ayrıştırılması veya bir polimerin geri dönüştürülmüş olup olmadığının anlaşılmasında FT-IR testi yol göstericidir.

Geri dönüştürülmüş polimerlerde FT-IR spektrumunun saf polimerle karşılaştırılması sonucunda, yapıda herhangi bir değişiklik veya kontaminasyon olup olmadığı anlaşılabilir. Ayrıca polimerin oksidatif bozunmaya uğrayıp uğramadığı, yeni fonksiyonel grupların (örneğin hidroksil veya karboksil grupları) oluşup oluşmadığı da bu yöntemle saptanabilir.



Şekil 2.7. FT-IR test cihazı

2.2.4. Instron Çekme Testi (ASTM D638)

ASTM D638, plastik malzemelerin çekme davranışlarını belirlemek amacıyla uygulanan uluslararası geçerliliğe sahip bir test standardıdır. Bu yöntem ile numunenin çekme mukavemeti, kopma uzaması ve elastik modülü gibi mekanik özellikleri belirlenir. Testin amacı, plastik malzemenin dış kuvvetlere karşı gösterdiği direnç ve deformasyon karakteristiğini analiz etmektir.

Test, **Instron** gibi universal test cihazları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu cihazlar, belirli bir hızda uygulanan çekme kuvvetine karşılık olarak malzemenin verdiği tepkileri ölçer ve sonuçları grafiksel ve sayısal veriler olarak sunar.

Testin temel prensibi, özel olarak hazırlanmış standart numunenin iki uçtan sabitlenerek çekme kuvvetine maruz bırakılmasıdır. Numune üzerine uygulanan kuvvet arttıkça, malzeme önce elastik (geri dönebilen), ardından plastik (kalıcı) deformasyona uğrar ve sonunda kopar. Bu süreçte elde edilen verilerle numunenin:

- Çekme mukavemeti (Tensile strength)
- Elastik modülü (Young modülü)
- Kopma uzaması (Elongation at break) gibi temel mekanik özellikleri belirlenir.

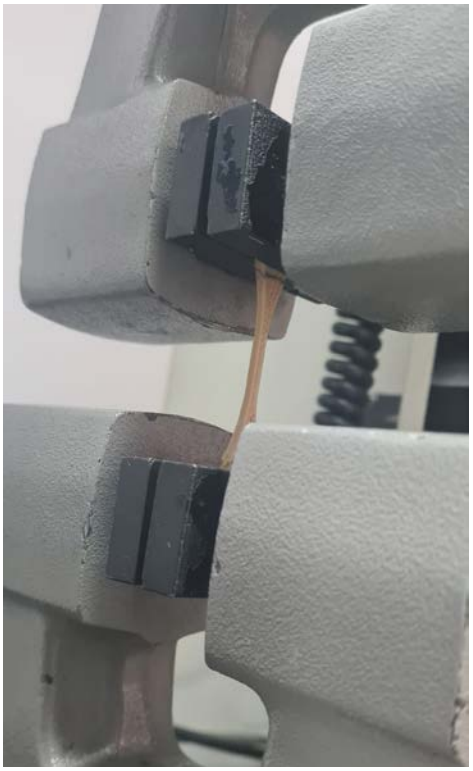
2.2.4.1. Testin Uygulanışı

ASTM D638 standardına göre yapılan çekme testi, belirli aşamalar izlenerek gerçekleştirilir. İlk olarak, testte kullanılacak numune hazırlanır. Numune, standardın öngördüğü şekil ve boyutlarda, genellikle "Type I" olarak adlandırılan köprü biçimli formda hazırlanır. Kalınlık ve genişlik ölçüleri, standardın belirlediği toleranslara uygun olmalıdır.

Ardından, Instron çekme test cihazı kullanıma hazır hâle getirilir. Bu aşamada, cihazın yük hücresi kapasitesi, test edilecek malzemenin dayanım düzeyine göre seçilir. Genellikle bu değer 1 ila 10 kN aralığındadır. Cihazın çene aralığı, numune boyuna göre ayarlanır ve test hızı genellikle 5 mm/dk ile 50 mm/dk arasında seçilir.

Numune hazırlık ve cihaz ayarları tamamlandıktan sonra, test numunesi cihazın üst ve alt çeneleri arasına düzgün ve simetrik biçimde yerleştirilir ve sıkıca sabitlenir. Test başlatıldığında, numuneye eksenel yönde çekme kuvveti uygulanmaya başlanır. Bu esnada kuvvet ve deformasyon verileri, cihaz tarafından anlık olarak kaydedilir.

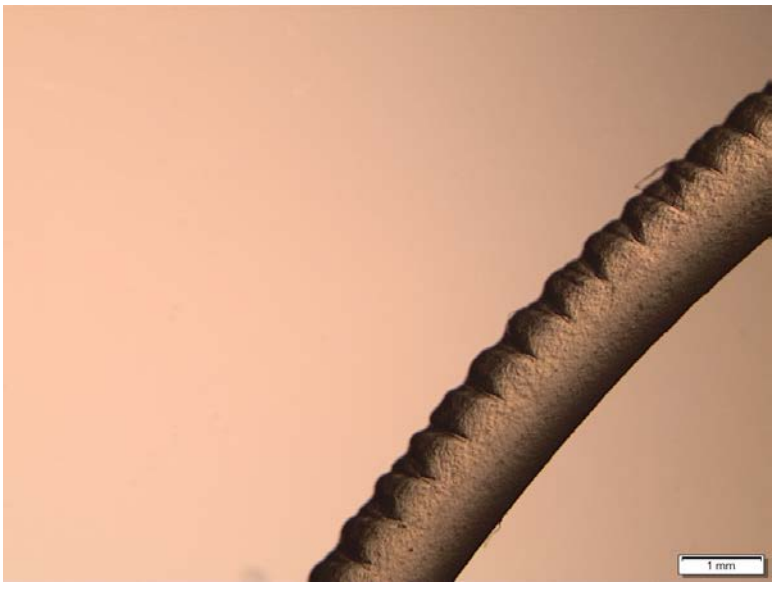
Test, numune tamamen kopuncaya kadar devam eder. Test süreci boyunca elde edilen veriler, cihaz yazılımı aracılığıyla çekme eğrisi (gerilme–birim uzama eğrisi) şeklinde grafiksel olarak sunulur. Bu eğriden maksimum çekme kuvveti, akma noktası (varsa), kopma noktası ve elastik modül gibi mekanik özellikler hesaplanır.



Şekil 2.8. Instron test cihazı

2.2.5. Mikroskobik Analiz

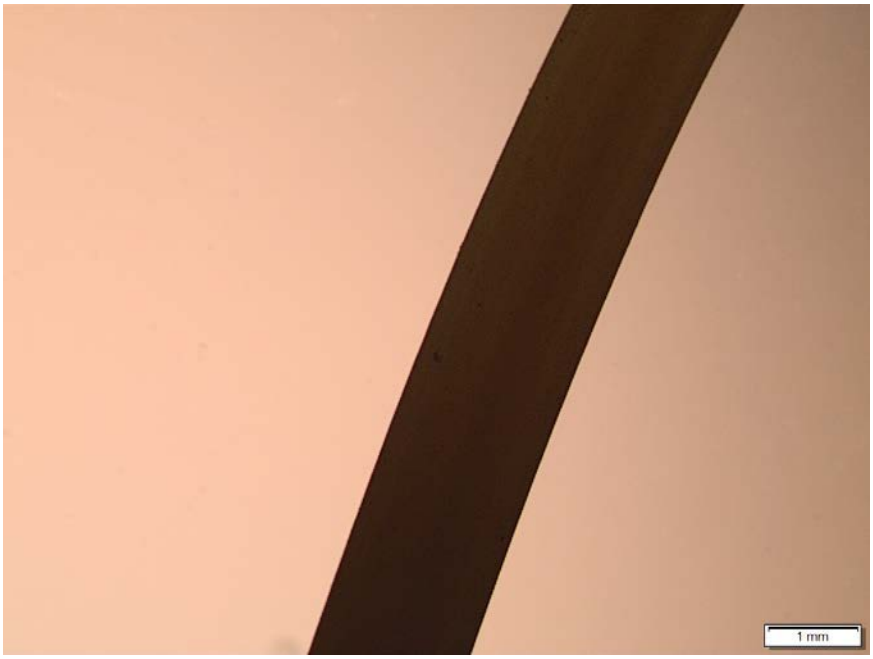
PP, TPU ve PLA, Stereo Mikroskobu altında incelenmiştir.



Şekil 2.9. PP, Stereo Mikroskop görüntüsü



Şekil 2.10. PLA, Stereo Mikroskop görüntüsü

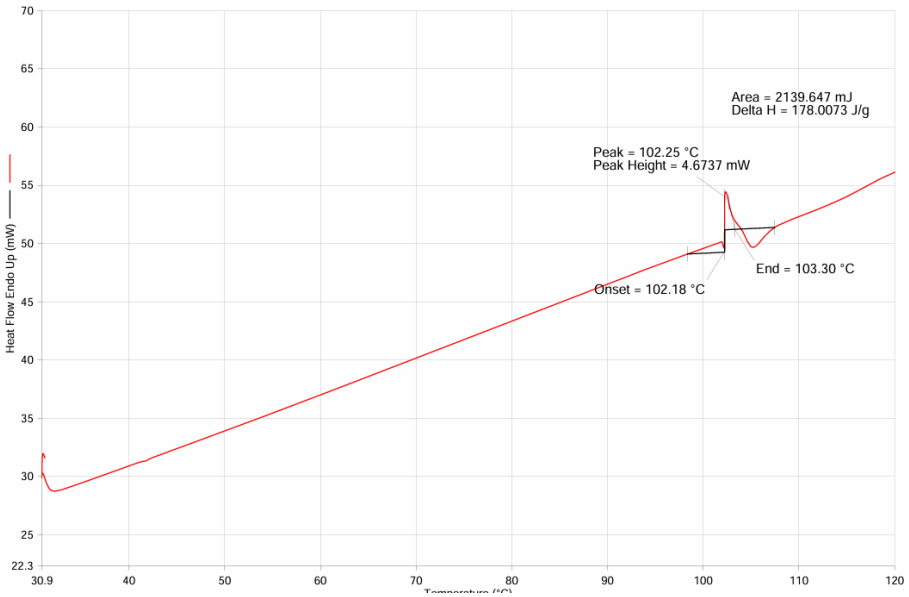


Şekil 2.11. TPU, Stereo Mikroskop görüntüsü

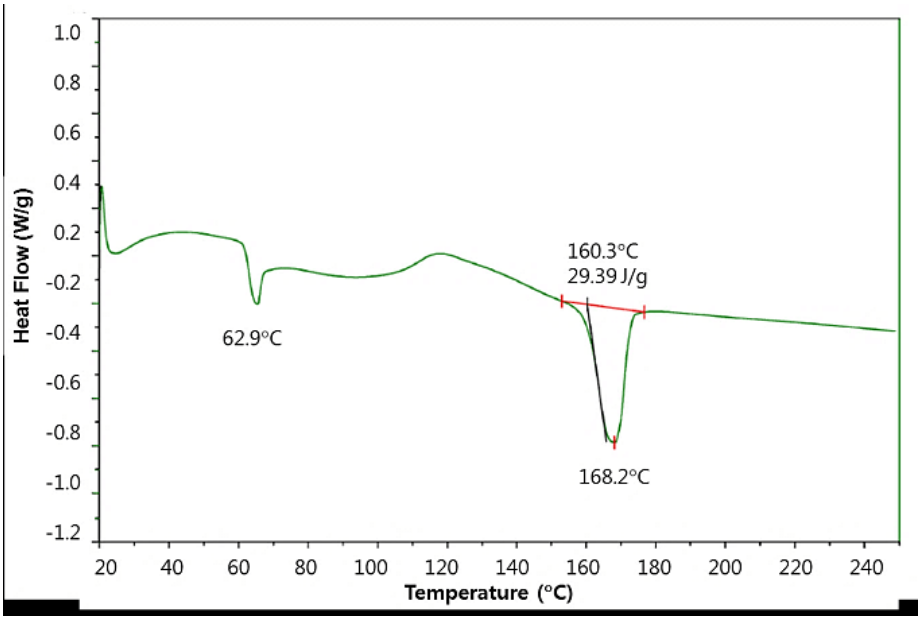
BÖLÜM 3

SONUÇLAR

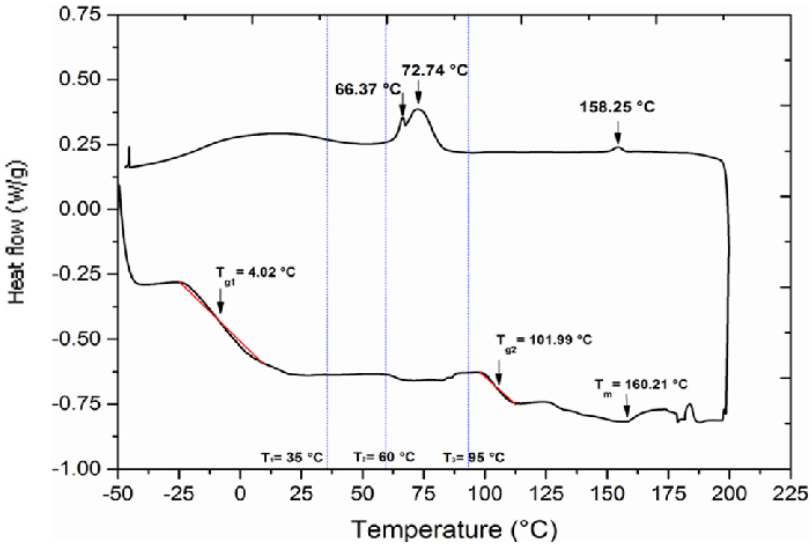
3.1. DSC Test Sonuçları



Şekil 3.1. PP DSC test sonucu



Şekil 3.2. PLA, DSC test sonucu (Lee, 2017)



Şekil 3.3. TPU, DSC test sonucu (Yuan ve ark, 2016)

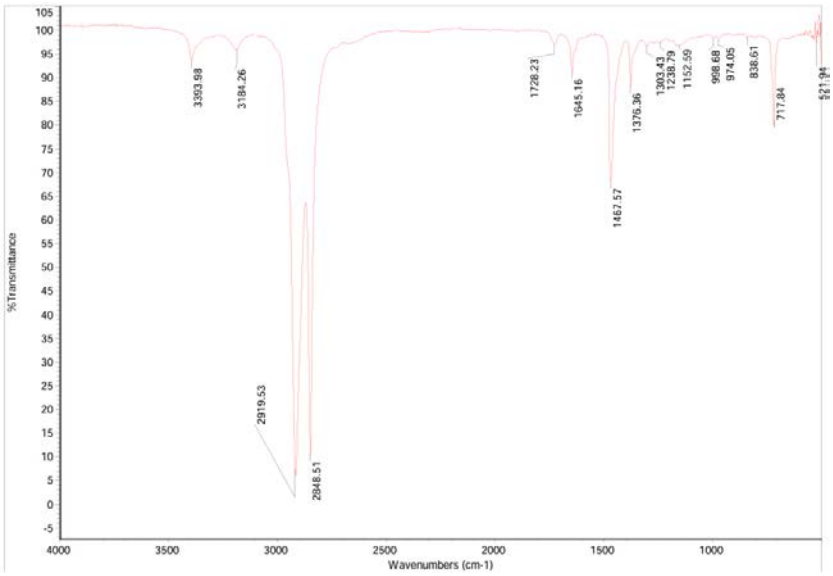
Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş poşetlerden üretilen PP, yapısal olarak PP'ye benzeyen TPU ve ticari olarak en çok tercih edilen 3D yazıcı girdisi PLA karşılaştırılmıştır. Bu üç polimerin termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) yöntemi ile analiz edilmiştir. İlk olarak termoplastik poliüretan (TPU) numunesinin DSC grafiği incelendiğinde, 4,02 °C ve 101,99 °C sıcaklıklarında iki farklı cam geçiş sıcaklığı (Tg) tespit edilmiştir. Bu durum, malzemenin sert ve yumuşak segmentlerden oluşan çift fazlı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. 66,37 °C ve 72,74 °C civarında gözlenen küçük endotermik pikler, malzemedeki yeniden düzenlenen kristal bölgeleri temsil ederken; 158,25 °C ve 160,21 °C'deki çift erime pikleri (Tm), TPU'nun çoklu kristal yapılar içerdiğine işaret etmektedir. Bu sonuçlar, TPU'nun ısıya karşı duyarlı ve kompleks bir termal davranışa sahip olduğunu ve sıcaklık kontrolünün üretim sırasında kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Polilaktik asit (PLA) numunesine ait DSC grafiğinde ise 62,9 °C'de bir cam geçişi ya da kristallenme başlangıcı olduğu gözlemlenmiştir. 160,3 °C ile 160,3 °C arasında net bir erime tepesi (Tm) oluşmuş olup, bu bölgedeki erime entalpisi 29.39 J/g olarak hesaplanmıştır. Bu değer, PLA'nın yarı kristalin yapıda olduğunu ve tam kristal bir PLA'ya göre daha düşük oranda kristallik içerdiğini göstermektedir. Bu bağlamda PLA'nın düşük ısıl dayanımı ve sınırlı kristallenme davranışı, onu biyobozunur ve 3D yazıcılarda düşük sıcaklıkta işlenebilen bir malzeme haline getirmektedir.

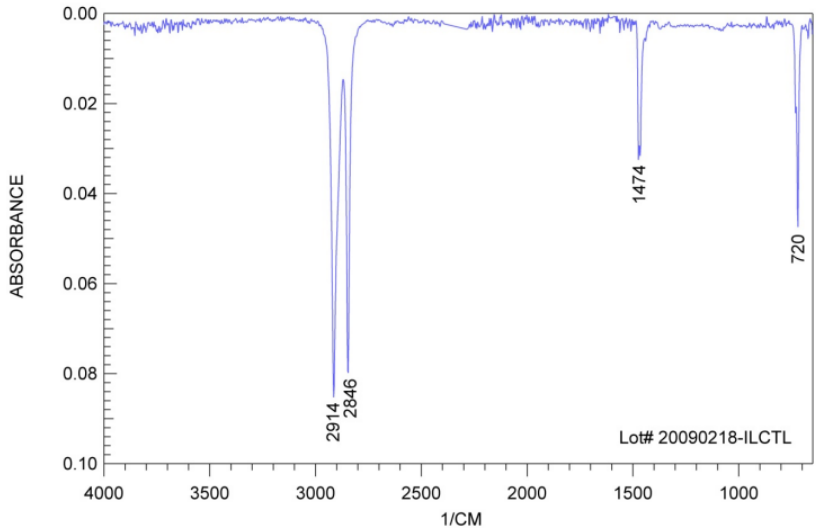
Son olarak, polipropilen (PP) numunesine ait DSC grafiği değerlendirildiğinde 102,25 °C civarında yüksek entalpili bir endotermik tepe tespit edilmiştir. Bu değer, PP'nin tipik erime

sıcaklığı olan 160–170 °C aralığının dışında olup, daha çok kristal gevşemesi ya da önceden işlem görmüş yapının ısıl tepkisi olarak değerlendirilebilir. ΔH değeri ise 178.0073 J/g gibi oldukça yüksek bir seviyede gerçekleşmiştir. Bu durum, PP numunesinin yüksek kristallilik oranına sahip olduğunu ya da modifiye edilmiş masterbatch içeriği barındırdığını düşündürmektedir. Elde edilen bu termal analiz sonuçları, kullanılan malzemelerin yeniden işlenebilirlik özelliklerinin ve 3D yazıcılarda kullanılabilirlik düzeylerinin değerlendirilmesinde önemli bir yol gösterici olmuştur.

3.2. FT-IR Test Sonuçları

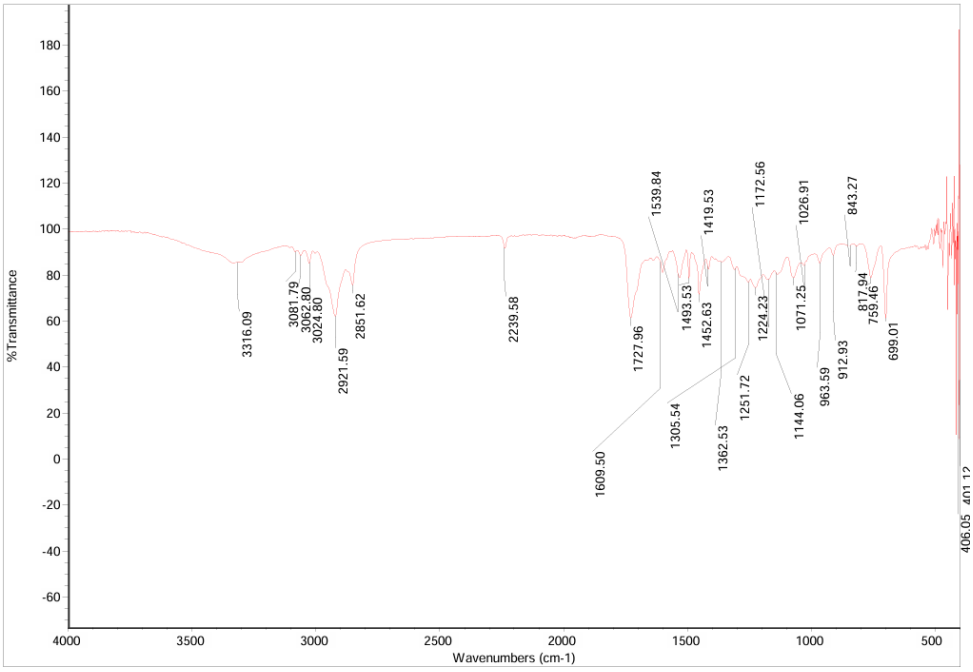


Şekil 3.4. recycled PP, FT-IR test sonucu



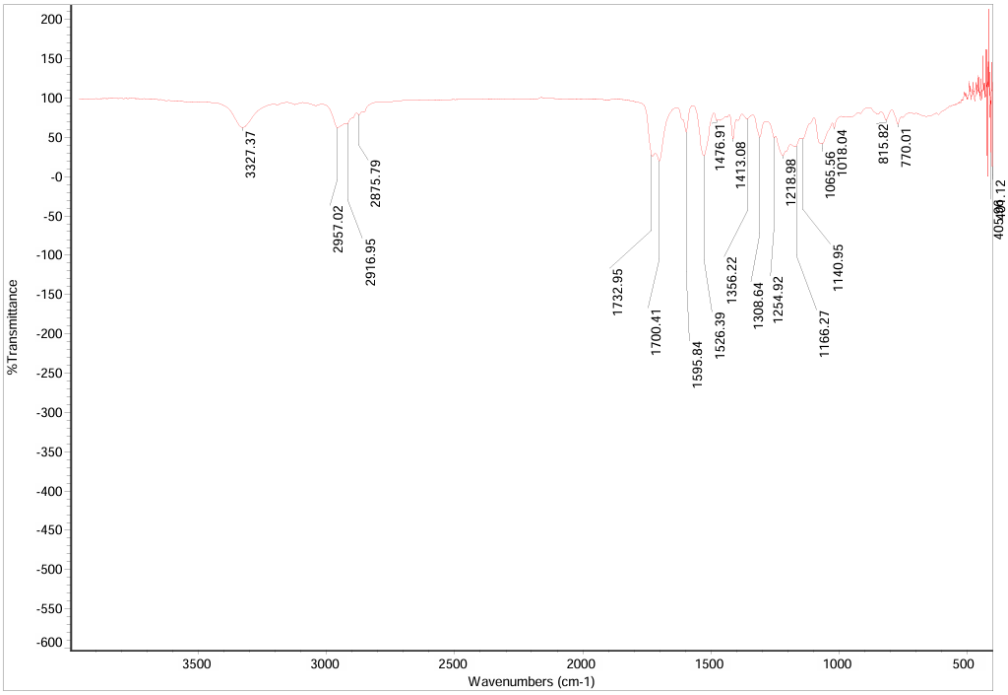
Şekil 3.5. PP, FT-IR test sonucu (referans)

Recycled PP ve ticari PP monofilament örneğine ait (şekil 3.4 ve 3.5) FT-IR spektrumunda, 2950 cm^{-1} ve 2870 cm^{-1} civarında belirgin iki pik görülmektedir; bunlar metilen ($–CH_2–$) ve metil ($–CH_3$) gruplarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelir. 1456 cm^{-1} ve 1376 cm^{-1} bölgelerindeki pikler sırasıyla $–CH_3$ bükülme ve $–CH_2$ bükülme titreşimlerine işaret etmektedir. Yaklaşık 1167 cm^{-1} ve 972 cm^{-1}'deki absorpsiyon bantları ise isotaktik PP zincir düzeni ile ilişkilidir. Bu pikler, polimerin kristalin ve düzenli yapısını yansıtmaktadır. Ayrıca, 840 cm^{-1} civarındaki pik, PP'nin tipik propilen omurgasındaki C–C bağları ile ilgilidir. Tüm bu bulgular, polipropilenin yarı kristal yapısını ve alifatik hidrokarbon zincirlerini desteklemektedir.



Şekil 3.6. PLA, FT-IR test sonucu

PLA örneğine ait FT-IR spektrumunda, 1759 cm^{-1} dalga sayısında gözlenen belirgin pik, karakteristik olarak C=O (karbonil) gerilme titreşimini göstermektedir. Bu pik, poliester yapısındaki ester bağlarının varlığını doğrulamaktadır. 1180–1120 cm^{-1} aralığındaki zirveler, C–O–C gerilme titreşimlerini temsil eder ve alifatik ester yapılarına işaret eder. 2995–2945 cm^{-1} aralığında görülen pikler ise asiklik CH gerilme titreşimleriyle ilişkilidir. Ayrıca 1452 cm^{-1} ve 1380 cm^{-1}'deki pikler, sırasıyla $–CH_3$ bükülme ve –CH bükülme titreşimlerine karşılık gelir. Bu sonuçlar, PLA'nın tipik alifatik polyester yapısını desteklemektedir.



Şekil 3.7. TPU, FT-IR test sonucu

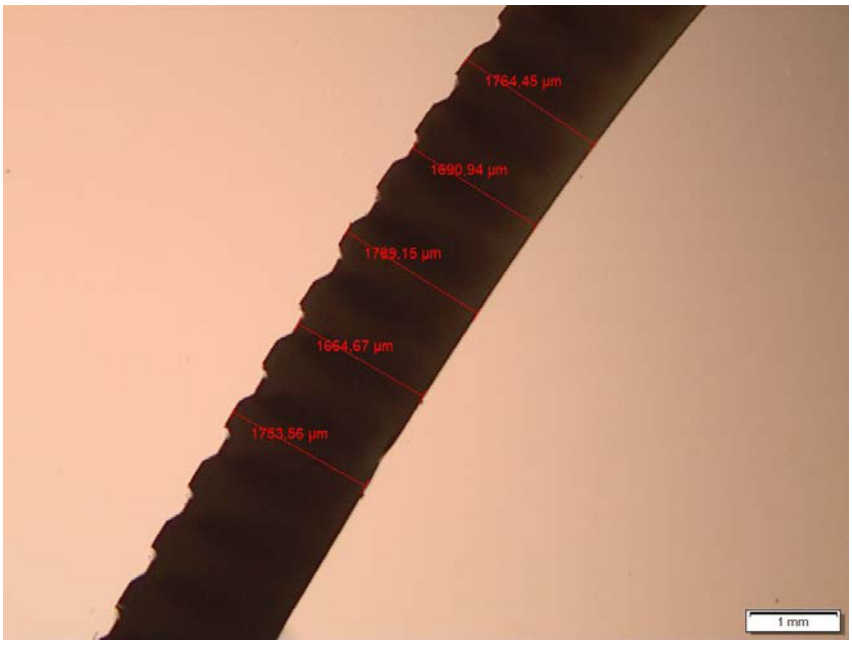
TPU örneğine ait FT-IR spektrumunda, 3327 cm^{-1} dalga sayısında geniş bir bant gözlenmektedir; bu bant, N–H gerilme titreşimine karşılık gelir ve poliüretan yapısındaki üre veya üretan gruplarını gösterir. 1700–1720 cm^{-1} aralığında yer alan yoğun pik, C=O (karbonil) gruplarına aittir. Bu, TPU'nun hem sert hem de yumuşak segmentler içeren blok kopolimer yapısını işaret eder. 1530–1540 cm^{-1} civarındaki absorpsiyon, N–H bükülme ve C–N gerilme bileşenlerini içerir. 1220–1260 cm^{-1} arasında gözlenen bantlar, C–O–C gerilme titreşimlerini temsil eder ve poliester/poliéter segmentlerin varlığını kanıtlar. 2920 cm^{-1} ve 2850 cm^{-1} bölgelerinde yer alan tipik metilen gerilme bantları ise yumuşak segmentlerin varlığını doğrulamaktadır. Bu spektral bulgular, TPU'nun karmaşık segmentli yapısını ve poliüretan karakteristiğini açık biçimde yansıtmaktadır.

3.3. Mikroskobik Analiz

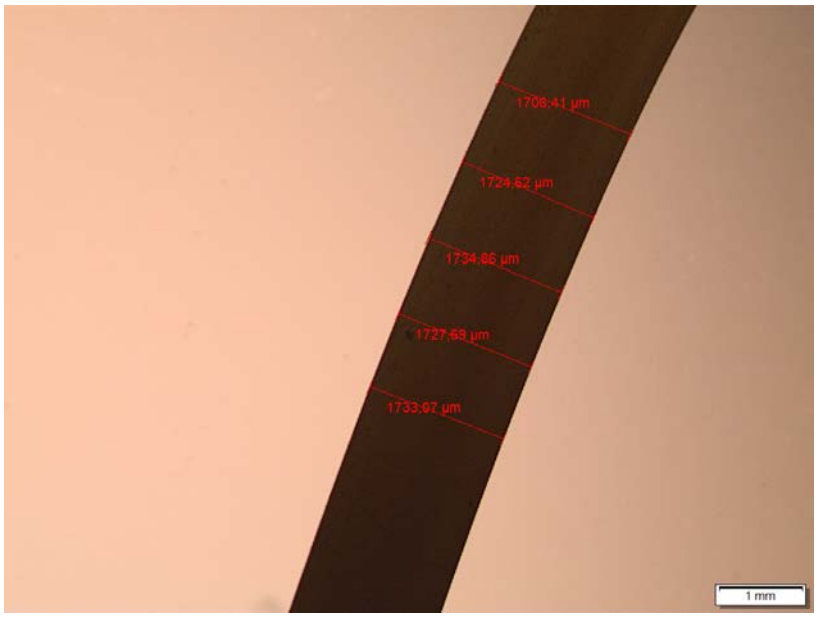
PP, PLA ve TPU stereo mikroskop altında incelenmiştir. Yüzey değerlendirmesi ve çap ölçümü yapılmıştır. Bu değerlendirmelere göre PP monofilamentinin yüzey yapısı 3D baskı üretim teknolojisine uygun olduğu görülmektedir. Çap tayininde ise ortalama PP 1,74 mm, PLA 1,72 mm ve TPU 1,72 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.8. PP, Stereo Mikroskop görüntüsü ve çap ölçümleri



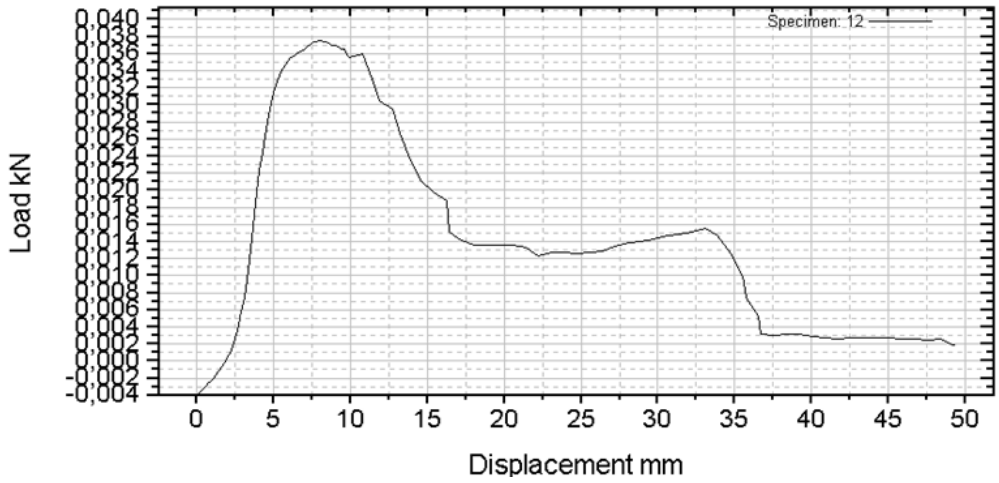
Şekil 3.9. PLA, Stereo Mikroskop görüntüsü ve çap ölçümleri



Şekil 3.10. TPU, Stereo Mikroskop görüntüsü ve çap ölçümleri

3.4. ASTM D638 Mekanik Test

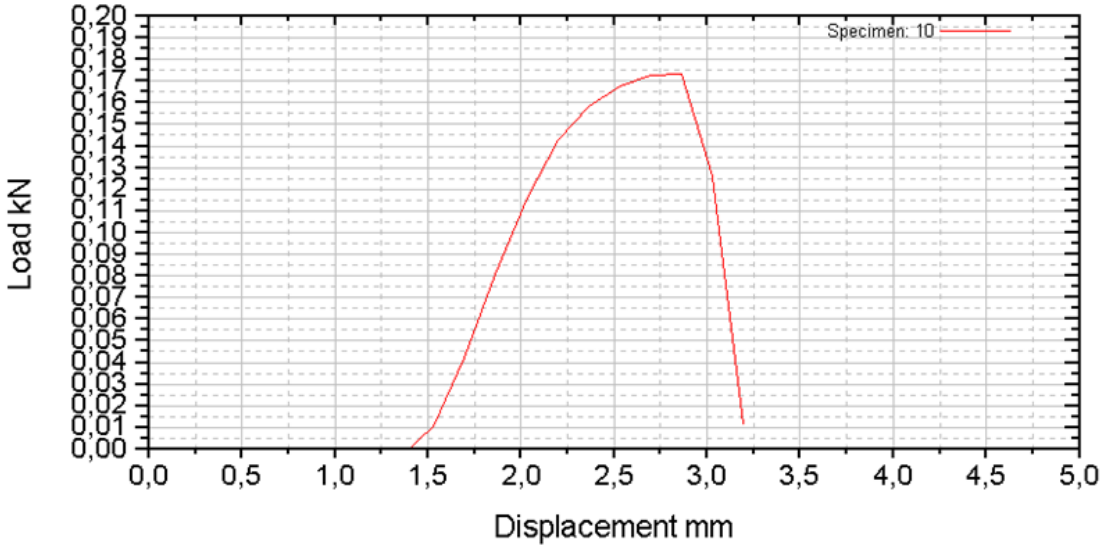
PP, PLA ve TPU polimerleri ‘köpek dişi’ olarak adlandırılan şekilde standarda uygun koşul ve boyutlarda test edilmiştir.



Şekil 3.11. PP, mekanik test sonucu

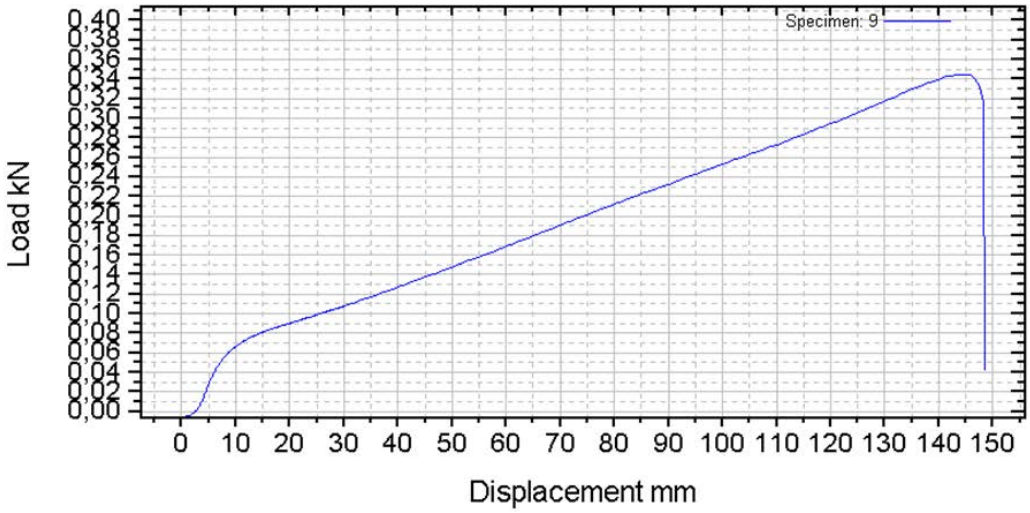
PP numunesine ait yük-deplasman eğrisi oldukça karakteristiktir. Malzeme yaklaşık 0,35 kN’lik bir maksimum yüke 6 mm civarında bir deplasmanda ulaşmakta, ardından art arda gelen yük düşüşleriyle birlikte deformasyona devam etmektedir. Eğrinin bu şekli, PP’nin yarı sünek

bir davranış sergilediğini göstermektedir. İlk elastik bölgede yük artarken, tepe noktası sonrasında malzeme plastiğe geçiş yaparak ardışık mikro-kırılmalarla taşıma kapasitesini azaltarak deformasyonuna devam etmektedir. Bu zigzaglı yapı, malzemenin akma sonrası yeniden yük taşıma kapasitesi gösterdiğini ve kırılmadan önce enerjiyi dağıttığını ifade eder. PP, yüksek deformasyon kapasitesine sahip olup, özellikle darbe emici uygulamalarda veya esnek bağlantı parçalarında sıkça tercih edilir.



Şekil 3.12. PLA, mekanik test sonucu

PLA numunesine ait eğri, malzemenin kırılgan bir davranış sergilediğini göstermektedir. Maksimum yük yaklaşık 18 kN olup, deplasman yalnızca 3 mm seviyelerine ulaşmıştır. Eğrinin eğimi yüksek olduğundan PLA'nın elastik modülünün yüksek olduğu söylenebilir. Ancak çok düşük uzama değerleri ve keskin kopma eğilimi, malzemenin gevrek bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. PLA'nın bu kırılgan yapısı, onun yapısal uygulamalarda dikkatli kullanılmasını gerektirir. Rijitliği yüksek olsa da darbelere karşı dayanımı düşüktür. Bu nedenle PLA, düşük yük altında formunu koruması gereken ancak esneklik gerektirmeyen estetik ya da prototipleme amaçlı uygulamalarda tercih edilmektedir.



Şekil 3.13. TPU, mekanik test sonucu

TPU numunesine ait yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, numunenin oldukça yüksek uzama yeteneğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Grafikte yük yaklaşık 38 kN seviyesine kadar artarken, deplasman 140 mm'yi aşmaktadır. Bu durum, TPU'nun elastikiyetinin ve sünekliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Eğrinin eğimi başlangıçta düşük bir rijitlik sergilemekte, sonrasında doğrusal olarak artmakta ve numune kopma noktasına kadar yük taşımaya devam etmektedir. Kopma anında ani bir yük kaybı görülmektedir. Bu mekanik davranış, TPU'nun darbe dayanımı yüksek, enerji sönümleme kapasitesi fazla olan, esnek bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle TPU, esnek bağlantı elemanları, titreşim sönümleyici parçalar ve elastik uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bu üç polimerin çekme davranışları karşılaştırıldığında, TPU malzemesinin en yüksek deformasyon kapasitesine ve sünekliğe sahip olduğu, PLA'nın ise en rijit ancak kırılgan yapıda olduğu görülmektedir. PP ise bu iki malzeme arasında bir davranış sergilemekte; belirli bir yük kapasitesine sahip olmakla birlikte sünekliği TPU kadar yüksek, rijitliği ise PLA kadar değildir.

3.5. Görsel Değerlendirme



Şekil 3.14. TPU ve geri dönüştürülmüş PP 3D baskı çıktıları

Görsel değerlendirme sonucunda benzer elastik yapı gösteren TPU ile kıyaslandığında yüzey bozulmalarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, PP'nin 3D yazıcı tablasına yapışma sorunundan dolayı oluştuğu anlaşılmıştır. İleri dönem çalışmalar için eriyik haldeyken, nanopartikül eklenmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKÇA

Basılı ve Tez Kaynakları

Akçaözoğlu, S. (2008), Atık PET şişe kırıklarının hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 17Aktepe, E. Ve Aktepe, Ş. (2023), PLA ve Geri dönüştürülmüş PET filamentlerinin FDM baskıda boyutsal doğruluk ve geri çekilme performansının karşılaştırılması, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 8(1), 119

Cengiz, Ö. ve Aktepe, Ş. (2022), Üç boyutlu (3D) yazıcılarda sürdürülebilir malzeme olarak ahşap ve proses atıklarının kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 38(1), 146

Çebi, K. (2020), Atık polimerlerden üretilmiş I profillerin eğilme davranışının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, 52

Dündar, P. (2015), Pet şişelerden iplik üretimi, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 54-55

Erdem, S. (2013), Geri Dönüştürülmüş PET Lifi- Alçı Kompozitlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 24

Eren, S., Akarsu Özenç, A., Atlas, Z., ve İşbilir Salih, C. (2023), PET, geri dönüşümlü PET (R-PET) ve biyobozunabilir PET (Bio-PET) içerikli kumaşların mekanik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi üzerine bir çalışma, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 28(3), 841-843

Kılıç, H. (2016), Nanopartikül takviyeli geri dönüşüm PET (rPET) polimeri esaslı cips ve lif formuna sahip nanokompozit üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 48-53

Köleoğlu, N. (2021), Investigation of The Effect of colour masterbatch addition on the physical, Mechanical and thermal properties of recycled polyethylene terepthalate fibers, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 72

Putra, A. and Abdullah, A. (2020), The utilization of pet waste as raw material for producing monofilament yarn: the effect of winding speed on the physical and mechanical properties of the yarn, Jurnal Sains Materi Indonesia, 21(3), 124

Sarıoğlu. E., Yayla, O. ve Çelikten, E. (2022), Investigation of yarn properties produced from %100 recycled Polyester (r-PET) by different spinning systems, The International Conference of Materials and Engineering Technology, 450

Şahin, K. ve Turan, B.O. (2018), Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi, Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2(2), 98-99

Tayyar, A. E., ve Üstün, S. (2009). Geri kazanılmış PET'in kullanımı, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Uşak Üniversitesi, 16(1), 57-58

Telli, A. (2012), PET şişe Atıklarının Tekstil Endüstrisinde Değerlendirilmesi ve Sürdürülebilirliğe Katkısı, Journal of Textiles and Engineer, 19(86), 50

Tunca, E. (2022). Bal peteği çekirdekli poliüretan köpük dolgulu sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, 14

Yakışık, H. (2023). Plastik atıklar ve sürdürülebilirlik: Türkiye'de plastik atık yönetimi, Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 9(2), 41

TÜİK. (2023). *Atık istatistikleri 2022*. Türkiye İstatistik Kurumu.

Web Siteleri:

3Dnatives. (2018). *3D printing vs. CNC machining*. https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184 (Erişim tarihi: 15.05.2025)

Alarge. (t.y.). *Eriyik akış indeksleyici MFI test cihazı*. https://www.alarge.com.tr/urun/eriyik-akis-indeksleyici-mfi-test-cihazi/ (Erişim tarihi: 13.05.2025)

Gülnar Makina. (t.y.). *Teknoloji kataloğu*. https://www.gulnarmakina.com/teknoloji/G%C3%9CLNAR%20MAK%C4%B0NA%20KATALOG%20-TR.pdf (Erişim tarihi: 07.05.2025)

Intertek. (t.y.). *DSC analiz laboratuvarları*: https://www.intertek.com/analytical-laboratories/dsc/ *FTIR analiz laboratuvarları*: https://www.intertek.com/analytical-laboratories/ftir/ (Erişim tarihi: 10.04.2025)

Instron. (t.y.). *ASTM D638 test çözümü*. https://www.instron.com/en/testing-solutions/astm-standards/astm-d638 (Erişim tarihi: 09.05.2025)

Labteknoloji. (t.y.). ***DSC ve OIT ölçüm test cihazı (yerli imalat)*****.** **https://www.labteknoloji.com/urun/dsc-ve-oit-olcum-test-cihazi-yerli-imalat (Erişim tarihi: 05.05.2025)**

Made-in-China. (t.y.). ***Waste plastic PET bottle flake drum pallet washing machine*****.** **https://tr.made-in-china.com/co_regulus/product_Waste-Plastic-Pet-Bottle-Flake-Drum-Pallet-Washing-Machine_ysihuysrig.html (Erişim tarihi: 12.03.2025)**

Tetratek. (t.y.). ***FT-IR 6700*****.** **https://tetratek.com.tr/tr/ft-ir-6700/ (Erişim tarihi: 08.03.2025)**

ZwickRoell. (t.y.). ***Erime indeksi test cihazları*****.** **https://www.zwickroell.com/tr/ueruenler/erime-indeksi-test-cihazlari/ (Erişim tarihi: 02.03.2025)**

BÖLÜM 4

ÇIKTILAR

Uluslararası Kongre Sözlü Sunum

Musa Kılıç, Mert Edip Uğurlu, Tülin Kaya Nacarkahya, Mehmet Sarıkanat, Gonca Balcı Kılıç, Murat Demir, Yaşar Uslu. (2025) Investigating Production Possibilities Of 3d Printer Monofilaments From Waste Bags, 9th *International Technical Textiles Congress*, İzmir-TÜRKİYE

BÖLÜM 5

PROJE İLE İLGİLİ HARCAMA KALEMLERİ HAKKINDA AYRINTILI BİLGİ

Proje bütçesinden herhangi bir harcama yapılmamış olup gerekli kalemlerde maddi destek Karafiber Tekstil San. ve Tic. A.Ş. tarafından sağlanmıştır.

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI – SOYADI - İMZA	AKADEMİK DANIŞMANIN ADI – SOYADI - İMZA	SANAYİ DANIŞMANININ ADI – SOYADI - İMZA
MERT EDİP UĞURLU	PROF. DR. MUSA KILIÇ	TÜLİN KAYA NACARKAHYA

Tarih : 27.03.2026

CamScanner ile tarandı