Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

GUFBD / *GUJS* (2026) 16(3): 734-751 doi: 10.17714/gumusfenbil.1780647 Araştırma Makalesi / *Research Article*

Monoflament ve fibrilleşmiş fiber dolgulu polikaprolakton kompozit filmler ve özellikleri

Monofilament and fibrillated fiber filled polycaprolactone composite films and their properties

Meryem GÖKTAŞ*[1], Ferda MİNDİVAN[2]

[1]*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metalurji Bölümü, Metalurji Programı, 11200, Bilecik*

[2] *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 11200, Bilecik*

• Geliş tarihi / *Received*: 09.09.2025 • Kabul tarihi / *Accepted*: 11.07.2026

Öz

Bu çalışmada, düşük moleküler ağırlıklı polikaprolaktonun (PCL) yapısal, termal ve mekanik özelliklerini iyileştirerek uygulama alanını genişletmek için PCL/fiber kompozit filmler üretilmiştir. Yapı malzemelerinde dolgu maddesi olarak kullanılan yüksek mukavemetli polipropilen (PP) fiberler dolgu maddeleri olarak seçilmiştir. PCL/fiber kompozit filmleri, PCL matriksine ağırlıkça (ağ.) %2,0 oranında monoflament yapıda MONOFİRE ve POLY 12, fibrilleşmiş yapıda POLY 18 fiber dolguları ilave edilerek sıvı faz ultrasonik karıştırma yöntemi ile üretilmiştir. PCL/fiber kompozit filmlerin yapısal, termal, mekanik karakterizasyon çalışmaları ve biyobozunurluk deneyleri yapılmıştır. POLY18 ve MONOFİRE dolgulu kompozit filmlerin yarı kristal yapıda, POLY 12 dolgulu kompozit filmin ise amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. MONOFİRE ve POLY 18 katkılı kompozit filmlerin PCL'ye benzeyen ancak küçülmüş küresel kristal tane görüntüleri, bu fiberlerin heterojen çekirdeklenmeye katkısını yansıtmıştır. PCL/POLY 18 kompozit filmi katkısız PCL'ye göre, (110), (200) ve (202) düzlemlerinde sırasıyla %8,34, %15,12 ve %77,54 en yüksek kristal boyut değerleri göstermiştir. Kompozitlerin bozunma ve erime sıcaklıklarındaki değişimler POLY 12 ve MONOFİRE dolgularının termal kararlılığı arttıran katkı maddeleri olduğunu göstermiştir. Kompozit filmlerin FTIR analiz sonuçlarından tespit edilen MONOFİRE katkısının -CH_2 grupları, POLY 12 ve POLY 18 katkılarının ise oksijen içeren gruplar (C-O-C ve C=O) üzerindeki etkisi, üretilen kompozitlerin biyobozunurluk sonuçlarına yansımıştır. Hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanmadan önce MONOFİRE katkılı kompozitin %3,689, H_2O_2 kullandıktan sonra POLY 12 katkılı kompozit filmin %4,213, MONOFİRE katkılı kompozit filmin ise %4,468 ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Sertlik sonuçları tüm fiber içerikli kompozitlerin katkısız PCL' ye göre sertlik değerlerinin arttığını göstermiştir. Amorf kompozit yapısına sahip olan POLY 12 fiberi %8,36 artışla en düşük sertlik değerine sahip olmuştur. Kristal yapıya sahip olan MONOFİRE ve POLY 18 katkılı kompozitler ise sırasıyla %47,55 ve %104,61 oranlarında sertlik değerlerinde iyileşmeler sağlamıştır. Bu çalışmanın tüm sonuçları, POLY 12 katkısının biyomalzeme çalışmalarında, MONOFİRE ve POLY 18 katkılarının ise termal ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Biyobozunurluk, Polikaprolakton fiber kompozit, Mekanik karakterizasyon, Termal karakterizasyon, Yapısal karakterizasyon

Abstract

In this study, PCL/fiber composite films were produced to improve the structural, thermal, and mechanical properties of low molecular weight polycaprolactone (PCL) and expand its application area. High-strength polypropylene (PP) fibers, used as fillers in building materials, have been selected as filler materials. PCL/fiber composite films were produced by adding 2.0% by weight (wt.) of monofilament MONOFİRE and POLY 12, and fibrillated POLY 18 fiber fillers to a PCL matrix using a liquid-phase ultrasonic mixing method. Structural, thermal, mechanical characterization, and biodegradability experiments of the PCL/fiber composite films were carried out. It was determined that POLY18 and MONOFIRE filled composite films had the semi-crystalline structure, POLY 12 filled composite film had amorphous structure. The spherical crystal grain patterns of MONOFIRE and POLY 18-filled composite films, resembling PCL but reduced in size, reflected the contribution of these fibers to heterogeneous nucleation. PCL/POLY 18 composite film showed the highest crystal size values of 8.34%, 15.12% and 77.54% in planes (110), (200) and (202) respectively compared to the pure PCL. The observed changes in the degradation and melting temperatures of the composites indicate that Poly 12 and MONOFIRE fillers act as fillers that enhance thermal stability. The effects of the MONOFIRE filler on –CH_2 groups and of the Poly 12 and Poly 18 fillers on oxygen-containing groups (C–O–C and C=O), as identified by FTIR analysis, were reflected in the biodegradability results of the produced composite films. Before the use of hydrogen peroxide (H_2O_2), the MONOFIRE-filled composite film demonstrated degradation rate (3.689%). Following H_2O_2

*Meryem GÖKTAŞ; meryem.goktas@bilecik.edu.tr

treatment, the amorphous Poly 12–filled composite exhibited a degradation rate of 4.213%, whereas the MONOFIRE-filled composite film displayed the maximum degradation value of 4.468%. Hardness results indicated that all fiber-filled composite films exhibited higher hardness values compared to pure PCL. The Poly 12 fiber–filled composite film with an amorphous structure exhibited the lowest hardness value, with an increase of 8.36%. The crystalline MONOFIRE- and Poly 18–filled composite films exhibited significant enhancements in hardness, with increases of 47.55% and 104.61%, respectively. The results reveal that Poly 12 is preferential for biomaterial studies, whereas MONOFIRE and Poly 18 are better suited for applications requiring superior thermal and mechanical resistance.

***Keywords**: Biodegradability, Polycaprolactone fiber composite, Mechanical characterization, Structural characterization, Thermal characterization*

1. Giriş
1. Introduction

Dünya çapında polimer kullanımı, endüstriyel üretimin her alanında önemli bir yer tutmaktadır. Polimerler, çevresel, biyomedikal, enerji, otomotiv, tekstil ve gıda ambalajları gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerlerin uygulamaları, hem plastik endüstrisinin gelişimiyle paralel olarak artmış hem de çevresel kaygılar ve biyolojik olarak parçalanabilen (biyobozunur) alternatiflerin gerekliliği nedeniyle farklı alanlarda çeşitlenmiştir. Küresel alanda biyobozunur polimerler 1,2 milyon ton üretim kapasiteleri ile büyüyen pazarlarından biridir (Salavagione vd., 2011; Fattahi vd., 2020).

Polipropilen (PP), kimyasal direnci yüksek, düşük yoğunluklu, nem ve kimyasallara karşı dirençli, işlenmesi kolay termoplastik bir polimerdir (Selver & Adanur, 2010). Bu özelliklere sahip olması nedeniyle PP kompozit malzeme üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Selver & Adanur, 2010; Baydar vd., 2012; Çivici & Güngör, 2016). Özellikle gıda ambalajı uygulamalarında, PP nanokompozit filmler ürünün raf ömrünü artırmak ve dış etkilere karşı koruma sağlamak amacıyla tercih edilmektedir (Ayas vd., 2020; Sarfraz vd., 2020).

Fibrilasyon işlemi, polimerin ya da doğal liflerin mekanik veya ultrasonik yöntemlerle mikrofiber formuna ayrılması ile gerçekleştirilmektedir. Fibrilleşmiş dolgular, genellikle polimerik malzemelerden elde edilen, mikro ya da nano ölçekli fiber yapılar olup; matris malzemesi içinde mukavemeti ve bağlanmayı artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Wu vd., 2009; Sun vd., 2013). Literatürde fibrilleşmiş fiber ile yapılan bir çalışmada, fibrilleşmiş fiberlerin matris içinde homojen dağılımı ile ara yüzey bağının güçlendiğini ve buna bağlı olarak kompozit performansının arttığı rapor edilmiştir (Sun vd., 2013). Fibrilleşmiş dolguların kullanımı çevresel sürdürülebilirlik açısından; özellikle doğal fiber kaynaklarının kullanılması, biyobozunur özelliklerin arttırılması ve karbon ayak izinin azaltılmasında etkili olmuştur (Fares vd., 2019).

Monofilament dolgulu kompozit yapı, özellikle çekme dayanımı ve elastik modül gibi mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla tercih edilmektedir (Adanur & Selver, 2013). Monofilament dolgulu kompozit yapılar, cerrahi dikiş iplikleri, inşaatta beton takviyesi ve gıda ambalaj filmleri gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Çevre sorunları ve iklim krizinin etkili olduğu günümüzde biyobozunur polimerlerin kullanımı önem arzetmektedir. Bu çalışmada, kullanılan biyobozunur polimerin uygulama alanını genişletmek, dezavantajlı özelliklerini iyileştermek için dolgu maddesi olarak PP fiberler avantajlı özelliklerinden ve geniş kullanım alanlarından dolayı seçilmiştir. PCL yavaş biyobozunurluğu ile bilinen ve iyi biyouyumluluk özelliklerine sahip sentetik bir polimerdir. Biyomedikal uygulamalarda özellikle doku mühendisliği ve kontrollü ilaç salınımı için kullanılmaktadır (Mochane vd., 2019). Biyolojik çözünürlüğü, işlenebilme kolaylığı sağlayan erime sıcaklığının düşüklüğü (60-65°C) ve karışım uyumluluğu özellikleri tıbbi uygulamalarda ve biyomedikal alanlarda PCL' nin kullanımında büyük avantaj sağlamaktadır (Malikmammadov vd., 2018). Biyobozunurluğu ve düşük toksisitesi nedeniyle, doku mühendisliği, yara iyileşme sistemleri ve ilaç salınımı sistemleri için uygun olduğu birçokkez rapor edilmiştir (Dhanaraju vd., 2010; Behara vd., 2012; Miladi vd., 2014; Aydin vd., 2015; Mondal vd., 2016). PCL, hidrofobik özelliğe ve yarı kristal yapıya sahip bir polimerdir. PCL'nin hidrofobiklik özelliği suyun polimer yüzeyine nüfuz etmesini engellemektedir. Yapısındaki uzun karbon zincirleri ve ester bağları nedeniyle PCL su ile etkileşim göstermemektedir. Bu yapısal özelliği, PCL'nin suya karşı düşük çözünürlük göstermesine ve suyun yüzeyle etkileşimini engelleyip yüzeyden kaymasına neden olmaktadır (Woodruff & Hutmacher, 2010). Hidrofobik özellik gösteren PCL'nin ester bağlarının hidrolizi yoluyla gerçekleşen bozunma süreci, in vivo koşullar altında oldukça yavaş ilerlemektedir. PCL' nin bahsedilen özelliklerinden dolayı yalnız başına kullanıldığında özellikle mekanik özellikler ve biyobozunma

hızı açısından sınırlı kullanıma sahiptir. Bu nedenle farklı türde dolgu malzemelerinin PCL' nin yapısal, mekanik, termal ve biyobozunma özellikleri üzerindeki etkileri daha önce yapılan çalışmalarla incelenmiştir.

Bu konuda, yapılan bazı çalışmalar, PCL' ye kenaf ve jüt fiberi gibi doğal fiberler ekleyerek, polimerin mekanik özelliklerini ve biyobozunma hızını iyileştirmeyi amaçlamıştır. Bu fiberlerin PCL ile karıştırılması, malzemenin dayanıklılığını ve biyobozunma hızını arttırmıştır. Bu tür doğal fiberler, PCL' nin hidrofobik özelliklerini kısmen azaltarak, suyun malzeme ile etkileşimini artırıp, biyolojik bozunmayı hızlandırdığı sonucuna varılmıştır (İlyas vd., 2022).

Shen vd. (2009) yapmış oldukları çalışmada karbon fiberler kullanarak, PCL' nin mekanik dayanımını önemli ölçüde artırmışlardır. Karbon fiberler polimerin çekme mukavemetini artırmıştır. Biyobozunma hızını yavaşlatmıştır. Biyobozunma özelliklerinin kullanılan karbon fiberin özelliklerine ve oranına bağlı olarak değişiklik göstereceğini belirtmişlerdir. PCL/karbon fiber kompozit filmlerin özellikle uzun ömürlü biyomedikal uygulamalar için uygun olacağı sonucuna varılmıştır (Shen vd., 2009).

Zhang vd., (2022) PCL'ye eklenen aramid fiberler ile yapmış oldukları çalışmada, aramid fiberlerin kompozit filmin mukavemetini arttırdığını belirlemişlerdir. Aramid fiberlerinin PCL'ye eklenmesinin kompozit filmin biyobozunma hızını azalttığını ve polimerin çevresel etkilere karşı pasifleştirdiğini tespit etmişlerdir (Zhang vd., 2022).

PCL/Polyester fiber karışımları üzerine yapılan bir çalışmada ise, PCL ile polietilen tetreftalat (PET) gibi sentetik polyester fiberlerin etkileşimi incelenmiştir. Bu fiberin PCL'nin biyobozunurluğu ve mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışmalar ile polyester fiberlerin eklenmesinin, PCL' nin biyobozunma hızını azalttığı ve daha uzun süreli dayanıklılık sağlayabileceği tespit edilmiştir (Ntrivala vd., 2025).

PCL ve cam elyaf karışımları üzerine yapılan bir çalışma da; cam elyafı, PCL matriksine ilave edilerek polimerin sertliğini ve çekme dayanımı artırdığı rapor edilmiştir. Ancak cam elyafıın, biyobozunma hızını yavaşlatması nedeni ile cam elyafla üretilen PCL kompozit filmlerin uzun ömürlü ürünlerde kullanımı önerilmiştir (Toptaş & Fındık, 2023).

Bu çalışma, PP esaslı fiberlerin PCL' nin yapısal, termal, mekanik ve biyobozunurluk özellikleri üzerine etkisini belirlemek için yapılmıştır. Bu çalışmada farklı uzunlukta ve farklı formlarda PP esaslı fiberler kullanılarak PCL/fiber kompozit filmler üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Yapı malzemesi alanında kullanılan PP fiberlerin düşük moleküler ağırlıklı PCL' nin özelliklerini iyileştirerek uygulama alanını genişletmek bu çalışmanın amacıdır.

2. Materyal ve yöntem
2. Material and method

2.1. Malzeme
2.1. Material

Bu çalışmada polimer matris olarak seçilen PCL, Acros Organics firmasına ait olup 10.000 g/mol molekül ağırlığına sahiptir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan MONOFİRE, POLY 12 ve POLY 18 fiber örnekleri Polyfibers® Firmasından temin edilmiştir. Üç farklı dolgu malzemesinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Çözücü olarak tetrahydrofuran (THF) katılmıştır. Üretilen fimlerin bozunma davranışlarını incelemek için yapay vücut sıvısı (SBF-pH=7,40) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanılmıştır.

Tablo 1.Çalışmada kullanılan dolgu malzemelerinin özellikleri
Table 1. *Properties of filling materials used in the study*

Dolgu Malzemeleri	Length	Form	Standart	Density
MONOFİRE	3-6 mm	Monofilament	EN 14889-2	0,91 g/cm^3
POLYMONO 12	12 mm	Monofilament	EN 14889-2	0,91 g/cm^3
POLYFİBRİL18	18 mm	Fibrilleşmiş	EN 14889-2	0,91 g/cm^3

2.2. Kompozit film üretimi
2.1. Composite film production

Bu çalışmada, 20 g PCL, THF içerisinde 50 °C'de manyetik karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılarak çözülmüştür. Ardından, çözünen PCL içerisine ağ. %2,0 oranında tüm fiberler (MONOFİRE, POLYMONO 12 ve POLYFIBRIL 18) ilave edilmiştir. Ranjbar vd. (2016 a-b) PP fiberlerle yaptıkları kompozit film çalışmalarında PP fiberlerin %1'den fazla ilave edildiği kompozit filmlerde mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etki gözlendiği, ağ. %0,5 ilave edildiğinde ise polimer matriks malzemesine kıyasla mekanik özelliklerde düşüşler rapor etmişlerdir (Ranjbar vd., 2016 a-b). Bu çalışmada düşük molekül ağırlıklı PCL' nin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri iyileştirilmeye çalışıldığı için ağ. %2,0 oranı seçilmiştir.

Dolgu maddeleri, 1 saat boyunca ultrasonik prob yardımıyla matris içerisinde dağıtılmıştır. Daha sonra, 50 °C'de 30 dakika süreyle manyetik karıştırıcıda yeniden karıştırılan homojen çözeltiler kalıplara dökülmüş ve THF'nin kontrollü olarak yavaş buharlaşmasını sağlamak amacıyla 35 °C'de etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kuruyan numuneler karakterizasyon çalışmaları için muhafaza edilmiştir. Kompozit filmlerin hazırlanmasına dair akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Katkısız PCL ve fiber katkılı örnekler PCL/MONOFİRE, PCL/POLY 12 ve PCL/POLY 18 olarak adlandırılmıştır.

Şekil 1.Üretilen farklı fiber katkılı PCL/fiber kompozit filmlerin hazırlanması.
Figure 1. *Preparation of different fiber-reinforced PCL/fiber composite films*

2.3. Karakterizasyon
2.3. Characterization

PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin kristal yapıları, X-ışını kırınımı (XRD, PANalytical) analizi ile incelenmiştir. Analizler, Empyrean marka cihazda CuKα (λ = 1.540590 Å) radyasyonu kullanılarak ve 1°/dk tarama hızıyla, 2θº=5-50° aralığında gerçekleştirilmiştir. Fourier dönüşümlü Infrared spektroskopisi (FTIR) analizleri, oda sıcaklığında 400–4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında Spectrum 100 (Perkin Elmer) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (TG-DSC) analizleri inert azot atmosfer ortamında 20- 600 °C arasında 10 °C min^{-1} ısıtma hızında Netzsch Marka Sta 449 F3 Jupıter Model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Filmlerin bozunma davranışları, hızlandırılmış biyobozunurluk testleri ile incelenmiştir. Bu kapsamda numuneler, 50 mL yapay vücut sıvısı (SBF, pH = 7,40) içerisinde, 37 °C'de ve 60 rpm hızında çalışan su banyosunda tutulmuştur. Deneyler, H_2O_2 ilavesi olmaksızın 20 gün sürdürülmüş; 20. günde 5 mM H_2O_2, 27. günde ise 10 mM H_2O_2 eklenerek toplam 43 gün biyobozunurluk testleri sürdürülmüştür.

Bozunma miktarı, katı kütlesinde zamanla meydana gelen yüzde değişim (ağırlık kaybı, %) üzerinden Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır (Ghorghi vd., 2020). SBF sıvısı içerisinde bulunan örnekler, 6. ve 20. günlerde çıkarılarak, etüvde 37°C' de 5 saat kurutulup tartılmıştır. Bozunma sürecini hızlandırmak amacıyla, aynı çözelti içerisine 21. günde 5 mM H_2O_2 ve 27. ile 43. günlerde 10 mM H_2O_2 ilave edilmiştir. Belirtilen günlerde filmler çözeltilerden çıkarılmış, 37 °C'de 5 saat süreyle kurutulduktan sonra kütleleri ölçülmüş ve % gözeneklilik oranları Denklem (2) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır (Gupta vd., 2009).

$$Ağırlık\ Kaybı(\%) = \frac{Wt-W0}{W0} \times 100 \quad (1)$$

W_t: kurutulmuş örneklerin ağırlığını, W_0: örneklerin başlangıç ağırlığını temsil etmektedir.

$$Gözeneklilik(\%) = \left(1 - \frac{Görünür\ Yoğunluk\left(\frac{gr}{cm3}\right)}{Kütle\ Yoğunluğu\left(\frac{gr}{cm3}\right)}\right) \times 100\% \quad (2)$$

Kompozit filmlerin kalınlığını ölçmek için 0,001 mm hassasiyete sahip, kalibrasyonu yapılmış SL01 model dijital kumpas kullanılmıştır (Şekil 2). Her örneğin, merkez ve kenarlarda dâhil edilmek üzere 10 noktasından ölçüm alınmıştır. Sertlik ölçüm sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için, tüm örneklerde kalınlık ölçümü yapılmıştır. Tüm örneklerin sertlik testleri aynı kalınlıktaki bölgelerden ölçülmüştür. Westop AB-0052-K marka WR-205D model Shore D sertlik cihazı ile ölçülmüştür.

Şekil 2. Örneklerin kalınlık ölçümü.
Figure 2. *The thickness of samples*

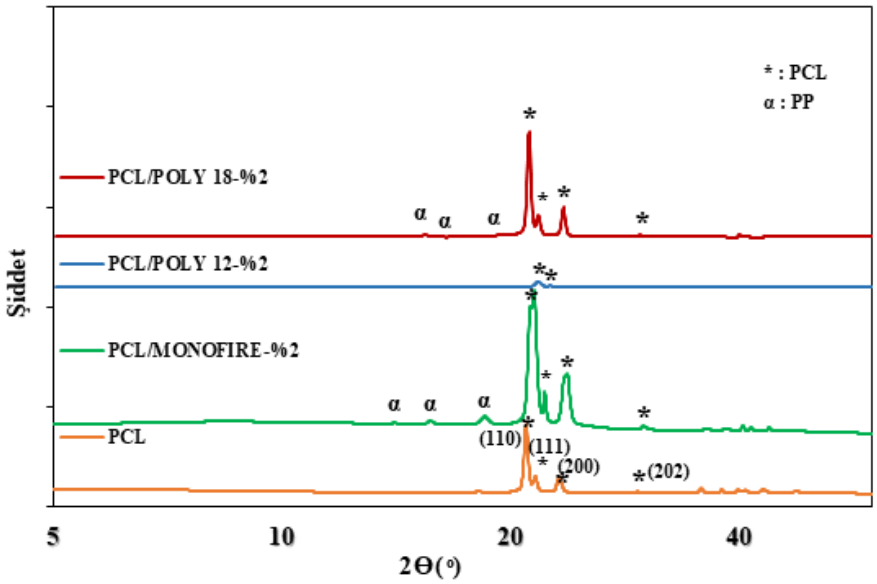
3. Bulgular ve tartışma
3. Results and discussion

3.1. XRD analizi
3.1. XRD analysis

Üretilen kompozit filmlerin kristal yapılarındaki değişimleri gözlemlemek için tüm örneklere XRD analizi yapılmıştır. Kompozit filmlerin XRD paternleri Şekil 3'te sunulmuş olup, XRD analizlerinden elde edilen 2θ°, tabakalar arası mesafe, kristal boyut ve mikro gerilme değerleri ise PCL için Tablo 2 'de verilmiştir. Şekil 3 ve Tablo 2 incelendiğinde, katkısız PCL'ye ait karakteristik 2θº değerlerinin 21,5°, 23,2° ve 29,3°'te gözlenmiş, bu piklerin sırasıyla (110), (200) ve (202) düzlemlerine ve PCL'nin yarı kristal morfolojisine atfedilmiştir (Harrison & Jenkins, 2004; Liang vd., 2012; Fang vd., 2015).

Şekil 3' de katkısız PCL'ye ait karakteristik pikler, POLY18 ve MONOFİRE katkılı kompozit filmlerde aynı 2θº değerlerinde ancak pik şiddetlerinde artışlarla gözlenmiştir. POLY 12'de ise yalnızca (110) düzlemine ait pikin görüldüğü, diğer düzlemlere ait piklerin kaybolduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre POLY18 ve MONOFİRE katkıları kristal yapıyı sürdürürken, POLY 12 katkısının yapıyı amorflaştırdığı belirlenmiştir. Literatürde XRD pik şiddetlerinin artışı kristal yapının baskınlığına, piklerin kaybolması ise yapının amorflaşmasına atfedilmektedir (Harrison & Jenkins, 2004; Duan vd., 2022).

MONOFİRE katkılı kompozit filmin (110) düzlemine ait pikin tabakalar arası mesafe değerinin bir miktar arttırdığı Tablo 2' de görülmektedir. Matrikse ilave edilen dolgu maddelerinin polimer ile etkileşimini kanıtlamak için, literatürde genellikle tabakalar arası mesafede meydana gelen artış göz önünde bulundurulmaktadır (Wei vd., 2007; Dere, 2021). Bu çalışmada; bu etkileşimin özellikle MONOFİRE katkısıyla daha fazla sağlandığı anlaşılmıştır. Diğer dolgu maddeleri ile de etkileşimin sağlandığı FTIR analizi bölümünde açıklanmıştır. Çünkü yalnızca tabakalar arası mesafe değeri ile polimer dolgu etkileşiminin sağlanıp sağlanmadığı tespit edilememektedir.



Şekil 3. PCL ve kompozit filmlerin XRD paterni.
Figure 3. *XRD pattern of PCL and composite films*

Tablo 2' den kristal boyut ve mikro gerilme değerlerine bakıldığında PCL/POLY 18 kompozit filmin (110), (200) ve (202) düzlemlerine ait piklerin katkısız PCL ile karşılaştırıldığında, kristal boyut değerlerini sırasıyla %8,34, %15,12 ve %77,54 oranlarında iyileştirdiği, PCL/MONOFİRE kompozit filmde ise yalnızca (200) düzleminde kristal boyut artışı %17,43 olarak tespit edilmiştir. PCL/POLY 12 kompozit filminde ise hiçbir düzlemde kristal boyut değerlerinin artmadığı belirlenmiş ve bu sonuç aynı kompozit filmin Şekil 3' de verilen XRD paterninden belirlenen amorf yapıyla uyumlu sonuçlar vermiştir. Literatürde pik şiddetleri ile kristal boyut değerlerinin birbirleri ile uyumlu sonuçlar verdiği polimer kompozit film çalışmaları mevcuttur (Göktaş & Mindivan, 2025). Kristal boyut değerlerinde elde edilen bu bulgular, tüm dolgu maddelerinin farklı kristal bölgelerde değişim oluşturmasına ve çekirdeklenmeyi teşvik etmesine bağlanmaktadır (Mindivan & Çolak, 2021). Ayrıca bu sonuçlar özellikle polimer zincirlerinin fiber katkılarıyla tekrar düzenlenmesine de atfedilmektedir (Dere, 2021). Tablo 2' de yer alan tüm kompozit filmlerin mikro gerilme değerleri incelendiğinde kristal boyut değerleri ile beklendiği gibi ters orantılı olarak değişimler sergilemişlerdir (Mindivan vd., 2020).

Literatürde PP'ye ait XRD analizinde α ve β olmak üzere iki ana kristal yapı sergilediği rapor edilmiştir. Farrow (1961)'un yapmış olduğu çalışmada, α-form kristallerinin XRD spektrumunda $2\theta^0 \approx 14{,}2°$'de (110) düzlemine karşılık gelen pikin, PP'nin yüksek derecede kristal yapısını yansıttığını rapor etmiştir (Farrow, 1961).

Tablo 2. Katkısız PCL ve kompozit filmlere ait XRD analizlerinden elde edilen 2θ°, tabakalar arası mesafe, kristal boyut ve mikro gerilme değerleri
Table 2. *2θ°, interlayer distance, crystalline size and microstrain values obtained from XRD analysis of pure PCL and composite films*

Örnek Adı	2θ°	Tabakalar arası mesafe (Å)	Kristal Boyutu (nm)	Mikro Gerilme (%)
PCL	21,5493	4,12383	332,7251	0,619705
PCL/POLY 18	21,7742	4,08174	360,8643	0,565551
PCL/MONOFİRE	21,5058	4,13207	258,6892	0,798656
PCL	23,1843	3,83658	259,4165	0,739464
PCL/POLY 18	23,4733	3,78999	298,6342	0,634555
PCL/POLY 12	-	-	-	-
PCL/MONOFİRE	23,4847	3,78819	304,6432	0,621742
PCL	29,3431	3,04384	262,6271	0,579498
PCL/POLY 18	29,5782	3,02019	466,2634	0,323871
PCL/POLY 12	-	-	-	-
PCL/MONOFİRE	29,9397	2,98454	203,2356	0,734255

Başka bir çalışmada; PP'nin düzenli kristal yapısını yansıtan 2θ ≈ 17,0°'deki pikin (040) düzlemiyle, 2θ ≈ 18,6°'deki pikin (130) düzlemiyle ve 2θ ≈ 21,3°'deki pikin ise (111) düzlemiyle ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Tordjeman vd., 2001). Bu çalışmada PCL/MONOFİRE kompozit filminin 2θº = 14,07°'de (110) ve 2θº = 18,48 º'de ise (130) düzlemlerine karşılık gelen pikler Şekil 3'den görülmektedir. PCL/POLY18 ve PCL/POLY 12 kompozit filmlerde ise sırasıyla 2θº = 15,45º ve 2θº = 15,83°'de yalnızca (110) düzlemine karşılık gelen pikler tespit edilmiştir. Bu çalışmada fiberlere ait tüm düzlem piklerinin oldukça düşük şiddette olduğu Şekil 3' den görülmektedir. Literatürde yapılan polimer kompozit film çalışmalarında ilave edilen dolguya ait piklerin, kompozit filmlerin XRD paterninde görülmemesi dolgunun polimer matriksinde homojen dağılımına ve polimer dolgu etkileşiminin sağlanmasına atfedilmektedir (Mindivan & Göktaş, 2020; Mindivan & Çolak, 2021).

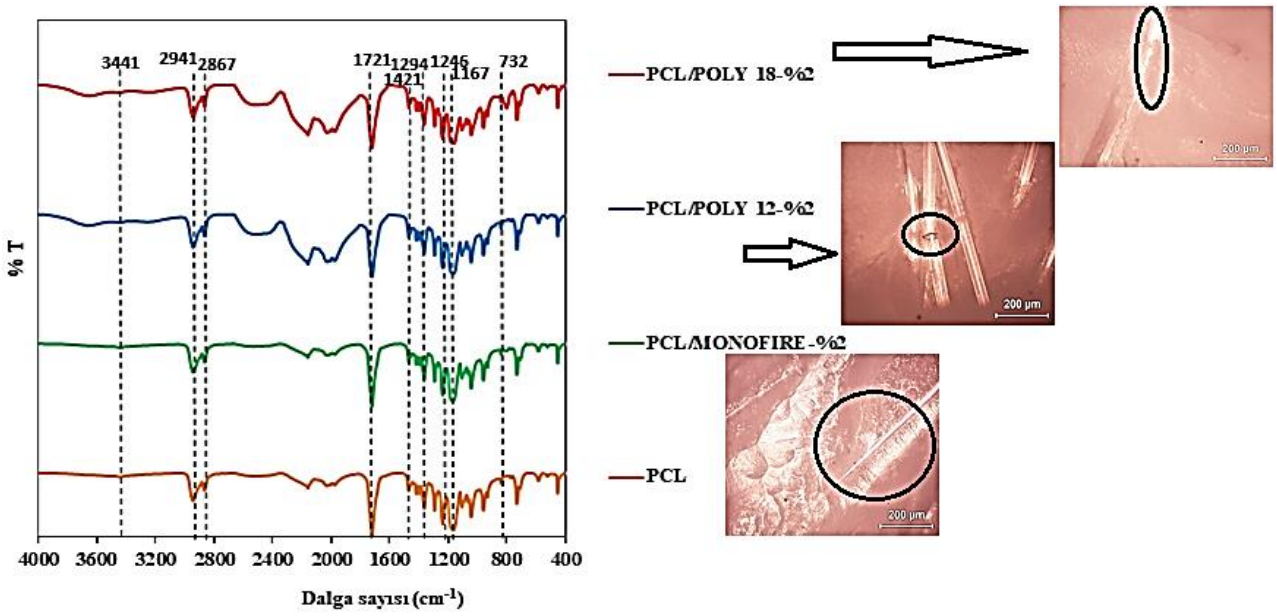
3.2. FTIR analizi
3.2. FTIR analysis

Katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerinin FTIR spektrumları Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4' de 3600-3441 cm^{-1} dalga sayısı aralığına karşılık gelen bantlar -OH gruplarının varlığına atfedilmiştir (Bagheri & Mahmoodzadeh, 2020). Bu bant katkısız PCL ve PCL/MONOFİRE kompozit filminde çok düşük şiddette, PCL/POLY12 ve PCL/POLY18 kompozit filmlerinde geniş bir bant şeklinde Şekil 4'te açıkça görülmektedir. Bu sonuç MONOFİRE' a göre daha uzun fiber boyuna sahip POLY 12 ve POLY 18' in (Tablo 1) PCL matriksinde boşluk oluşturarak nem tutmaları sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir (Ahmed vd., 2008). Kompozit filmlerin FTIR spektrumlarını gösteren Şekil 4 içerisinde kompozit filmlerin fiber bölgelerine odaklanmış optik mikroskop görüntülerinde MONOFİRE' ın matrikse gömülmüş ve boşluksuz görüntüsü, POLY 12 ve POLY 18' in ise matriks ile aralarında gözlenen boşluklar FTIR sonucunu desteklemektedir. Şekil 4 incelendiğinde, katkısız PCL ve tüm kompozit filmlerde 2941–2867 cm^{-1} aralığında, $-CH_2$ grubuna ait sırasıyla asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelen bantların varlığı gözlenmektedir. Bu gruplara ait FTIR bant şiddetleri katkısız PCL ile karşılaştırıldığında, PCL/MONOFİRE'da azalma, diğer kompozit filmlerde ise artma tespit edilmiştir. FTIR bant şiddetlerinde görülen azalma literatürde gruplar arasındaki etkileşimin artışına atfedilmektedir (Mindivan vd, 2020). Bu çalışmada MONOFİRE katkısının $-CH_2$ grupları ile etkileşiminin sağlandığı FTIR bant şiddetlerinde görülen azalma ile belirlenmiştir.

1721 cm^{-1} dalga sayısına karşılık gelen karbonil grubuna ait C=O gerilme titreşim bant şiddetlerinin (Balu vd., 2011) katkısız PCL ve PCL/MONOFİRE kompozit filmde benzer büyüklükte, PCL/POLY12 ve PCL/POLY18 kompozit filmlerde ise aynı gruba ait bant şiddetlerinde azalma olduğu Şekil 4' ten görülmektedir. Bu azalma POLY 12 ve POLY 18 katkılarının karbonil grubu üzerinde MONOFİRE' a göre daha etkili olduğunu tespit edilmesinde belirleyici olmuştur. Literatürde 1421 cm^{-1} dalga sayısında C-H bükülme, 1294 cm^{-1} dalga sayısında C-C gerilme titreşimlerine atfedilen (Azizi vd., 2018) bantların katkısız PCL ve tüm kompozit filmlerde aynı şiddette olduğu belirlenmiştir. 1240 cm^{-1} ve 1167 cm^{-1} bantlarına karşılık gelen sırasıyla asimetrik ve simetrik C–O–C gerilme titreşimlerinde (Lyu vd., 2019), PCL/POLY 12 ve PCL/POLY 18 kompozit filmlerinde şiddet azalması gözlenmiş olup, bu durum söz konusu katkıların C–O–C gerilme titreşimleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. 732 cm^{-1} dalga sayısına denk gelen CH_2 bükülme ve gerilme titreşim bantlarının PCL/MONOFİRE kompozit filminde şiddetinin azalarak, MONOFİRE' ın $-CH_2$ gruplarının üzerindeki etkisinin daha fazla olduğunu göstermiştir.

Tüm FTIR sonuçları incelendiğinde $-CH_2$ grubuna ait bantlar üzerinde MONOFİRE katkısının, oksijen içeren gruplarda ise (C-O-C ve C=O) POLY 12 ve POLY 18 katkılarının etkilerinin daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte XRD sonuçları, POLY 12 katkısının zincir düzenini baskılayarak amorf yapıyı teşvik ettiğini, MONOFİRE ve POLY 18 katkılarının ise PCL'nin yarı kristal yapısını koruduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, FTIR'de gözlenen lokal kimyasal etkileşimlerin her zaman uzun menzilli kristal düzenin bozulmasına yol açmadığını göstermektedir. POLY 12 katısının PCL' nin ester gruplarıyla güçlü muhtemel spesifik etkileşimleri (H-bağı, dipol–dipol), zincirler arası lokal çapraz bağlanma benzeri kısıtlamalar oluşturup zincirlerin düzenli paketlenmesini engellemiştir.

Ayrıca karbon içeren grupların MONOFİRE katkısının, oksijen içeren grupların ise POLY 12 ve POLY 18 katkılarını etkilemiş olduğu sonucu, birbirine yakın uzunlukta olan POLY12 ve POLY 18 fiberlerinin MONOFİRE' a göre çok daha uzun fiber boyuna sahip olmalarına atfedilmektedir (dos Santos vd., 2020).



Şekil 4. Katkısız PCL ve PCL fiber kompozit filmlerin FTIR sonuçları.
Figure 4. *FTIR results of PCL without additives and PCL fiber composite films*

3.3.TG-DSC analizi
3.3.TG-DSC analysis

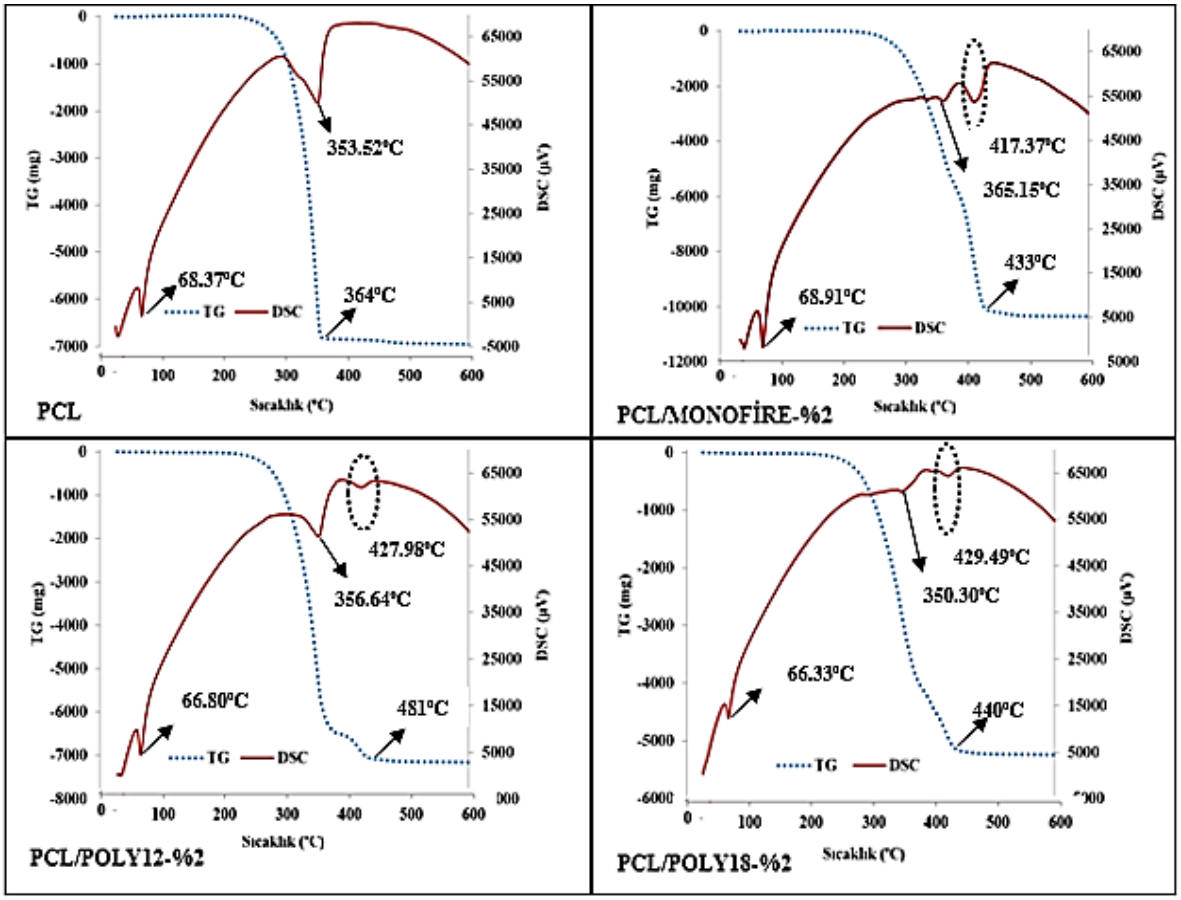
Şekil 5' te katkısız PCL ve PCL fiber kompozit filmlerin termal özelliklerini incelemek için termogravimetrik analizleri (TG-DSC) yapılmıştır. Katkısız PCL ve PCL fiber kompozit filmlerin sırasıyla polimer ana zincirinin ayrıştığı ve devamlı bir kütle kaybının gerçekleştiği tek adımlı bozunma basamakları Şekil 5' ten görülmektedir. Katkısız PCL ve PCL fiber kompozit filmlerin termal bozunma için başlangıç sıcaklıkları ~ 220-490 °C aralığında meydana gelmiştir. 364 °C' de katkısız PCL'nin neredeyse tamamı bozunmuştur. PCL/MONOFİRE fiber kompozit filminin 433°C, PCL/POLY 12 fiber kompozit filminin 481°C ve PCL/POLY18 fiber kompozit filminin 440°C' de kütle kaybına uğradıkları görülmüştür. PCL fiber kompozit filmlerin TG eğrilerinden bozunma sıcaklıkları katkısız PCL örneğinin kütle kaybından çok daha sonra başlamıştır. PCL fiber kompozit filmlerin daha yüksek bozunma sıcaklıkları daha yüksek termal kararlılığa atfedilmektedir (Major-Gabryś vd., 2015). En yüksek termal kararlılığa sahip olan örneğin PCL/POLY 12 fiber kompozit filmi olduğu en yüksek bozunma sıcaklığı (481°C) ile tespit edilmiştir. Literatürde PP fiberlerin termal bozunma sıcaklığı 495 ºC olarak rapor edilmiştir (Albin Zaid & Otaru, 2025). POLY 12 katkılı fiberin bozunma sıcaklığına yakın bir değer olması, PP fiberlerin etkisinin daha güçlü olduğu sonucunu göstermektedir.

Katkısız PCL'nin DSC eğrisinde 68,37°C'de gözlenen ilk endotermik erime piki PCL'nin kristal yapısını yansıtmaktadır (Sehrawat vd., 2023). Fiber kompozit filmlerin katkısız PCL'ye yakın erime sıcaklığı değerleri sergiledikleri Şekil 5'ten görülmektedir.

Katkısız PCL'nin 353,52°C'de gözlenen ikinci endotermik erime piki, PCL/MONOFİRE kompozit filminde 365,15 °C ile en yüksek erime sıcaklığı ile kendini göstermiştir. Literatürde erime piklerindeki değişimlerle XRD analizinde belirlenen kristal-amorf yapılar arasında gözlenen ilişki rapor edilmiştir (Sabater i Serra vd., 2011). Kristal yapı sergileyen ve polimer-dolgu etkileşiminin hem XRD hem FTIR analiz sonuçlarında rapor edilen MONOFİRE katkısı, termal analiz sonuçlarına göre termal kararlılığı artırmıştır.

Katkısız PCL'de görülmeyen üçüncü endotermik pikler ise PCL/MONOFİRE'da 417,37°C' de, PCL/POLY 12' de 427,98°C' de ve PCL/POLY 18' de 429,49°C' de görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, en yüksek erime sıcaklığının POLY18 katkılı kompozit filmde gerçekleştiğini göstermektedir. Aynı sonuç PP içeren bir kompozit film çalışmasında ayrışma sıcaklığındaki artış, dolguların polimer matrise iyi dağılmasına, PP' nin termo-oksidatif bozunmasını geciktirmek için bariyer etkisi göstermesine atfedilmiştir (Ban vd., 2016). DSC analizine göre MONOFİRE katkılı kompozit filmlerin termal davranışının daha kararlı olduğu ve TGA

analizlerine göre POLY 12 katkısının bozunma başlangıç sıcaklığını yükselterek kompozit filmin termal kararlılığını artırdığı tespit edilmiştir.

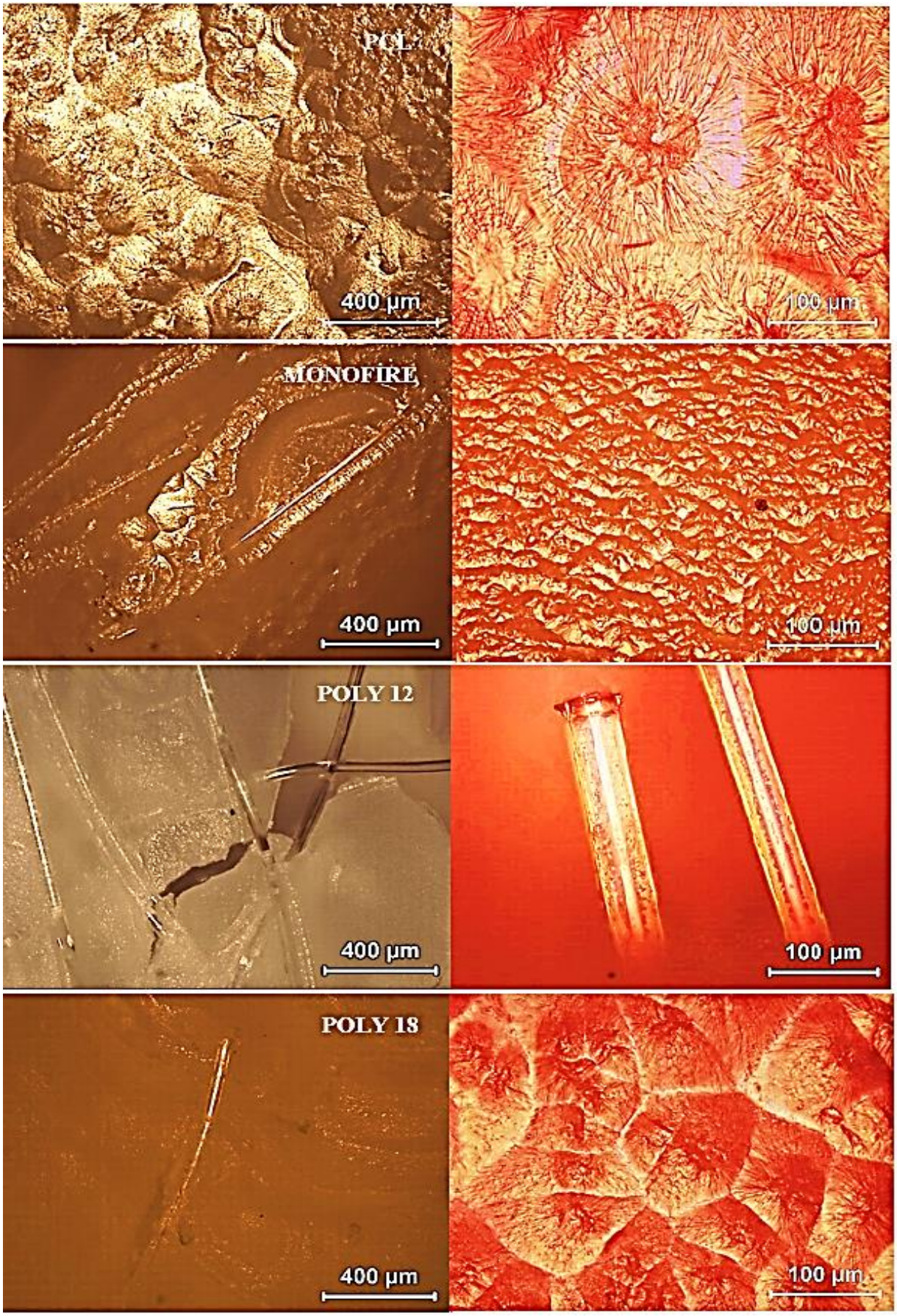


Şekil 5. Katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin DSC-TGA analiz sonuçları
Figure 5. *DSC-TGA analysis results of PCL without additives and PCL/ fiber composite films*

3.4. Optik mikroskop analizi
3.4. Optical microscope analysis

Farklı fiber katkılarının PCL'nin yapısı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, katkısız PCL ve hazırlanan fiber kompozit filmlerin 50X ve 200X büyütmede elde edilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 7' de MONOFİRE ve POLY 18 katkılarının kristallenmeye olan etkisini daha açık göstermek için 100X büyütmede optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6' da yüksek ve düşük büyütmede katkısız PCL'nin kristal yapısını yansıtan, literatürle benzer küresel taneler belirlenmiştir (Castilla-Cortázar vd., 2019; Mindivan & Göktaş, 2024).

Şekil 6'dan görüldüğü gibi fiber kompozit filmlerin optik mikroskop görüntülerinde MONOFİRE katkılı kompozit filmin fiber görüntüleri katkısız PCL ile karşılaştırıldığında daha küçük tanecikli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. POLY 12 katkılı kompozit filmde ise fiberlerin matrikste dağılımı ile PCL'nin kristal yapısının bozulduğu ve küresel tanelerin görülmediği tespit edilmiştir. Bu görüntü POLY 12 katkılı kompozit filmin XRD paterninde (Şekil 3) belirlenen PCL'nin yarı kristal yapısını yansıtan piklerin kaybolması ile ortaya çıkan amorf yapıyı doğrulamıştır. POLY 18'de ise PCL'nin kristal yapısını yansıtan küresel tanelerin katkısız PCL'ye göre bir miktar küçüldüğü ancak en fazla küçülmenin MONOFİRE katkılı kompozit filmde olduğu Şekil 6' da fiber kompozit filmlerin yüksek büyütmeli optik mikroskop görüntülerinden görülmektedir. Bu sonuç MONOFİRE katkısının heterojen çekirdeklenmeyi arttırmasına atfedilmiştir. Li vd. (2021)'nin biyobozunur PCL' nin kristalizasyon özelliklerini inceledikleri benzer bir çalışmada, fiber katkılı kompozit filmlerin tane yapılarının katkısız PCL' ye göre küçük boyutta ortaya çıkmasını, PVA fiberlerinin heterojen çekirdeklenme etkisinden dolayı daha fazla kristal çekirdeğin büyümesine ve büyüyen kristallerin çevredeki küresel tanelere hızla çarparak, kristallerin daha fazla büyümesini kısıtlamasına atfedilmiştir (Li vd., 2021).

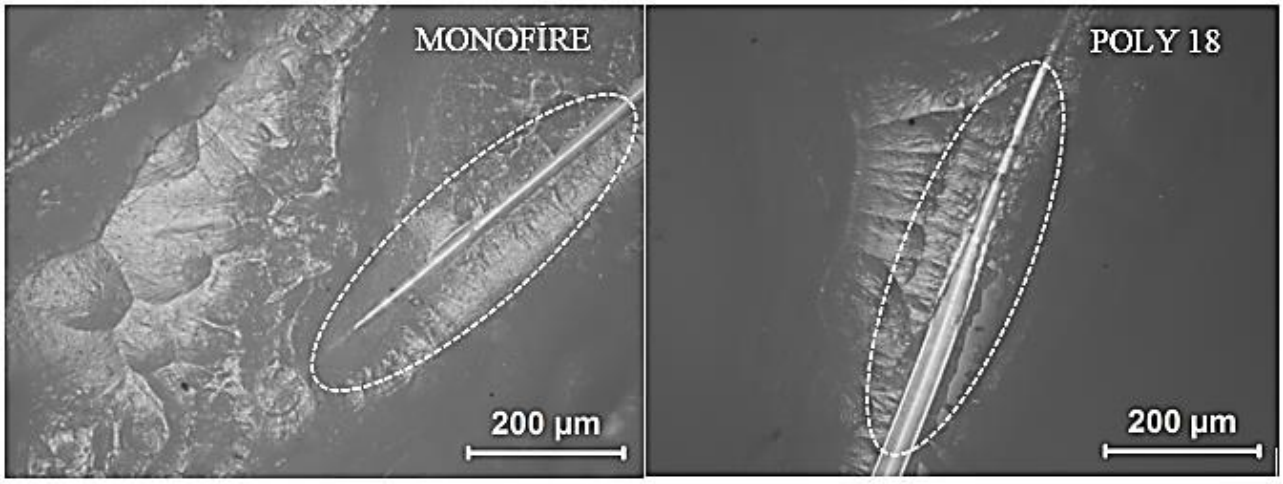


Şekil 6. Katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin 50Xve 200X büyütmede elde edilen optik mikroskop görüntüleri.

Figure 6. *Optical microscope Images of pure PCL and PCL/fiber composite films obtained with an optical microscope at 50X and 200X*

Şekil 7'de ise MONOFİRE ve POLY 18 katkılı kompozit filmlerin etrafında gözlenen kristal çekirdeklenmeleri, bu kompozit filmlerin XRD analizindende belirlendiği gibi PCL' nin yarı kristal yapısını devam ettirdiğini göstermektedir. Bu çalışmada tespit edilen çekirdeklenmeyi sağladığı düşünülen MONOFİRE ve POLY 18 fiberlerinin XRD analiz sonuçlarında verilen kristal boyut değerlerindeki artışlar da (Tablo 2) bu sonucu desteklemektedir.

Bu çalışmada kullanılan fiberlerin dışında literatürde karbon fiber ve cam elyaf (Baştosun, 2022), doğal fiberler (pamuk, jüt vb.) (Yıldızhan vd., 2025), cam elyafı (Khan vd., 2010), selüloz fiber (de Oliveira Aguiar & de Fatima Vieira Marques, 2016), aramid fiberler (Guo vd., 2025), sentetik fiberler (polipropilen, poliamid vb.) (Lima vd., 2019), katkılı PCL kompozit film çalışmalarında PCL'nin çekirdeklenmesini önemli ölçüde hızlandırdığını, mekanik özellikleri güçlendirdiğini, biyolojik uyumluluğu artırdığını, termal kararlılığını iyileştirdiği birçok kez bildirilmiştir.

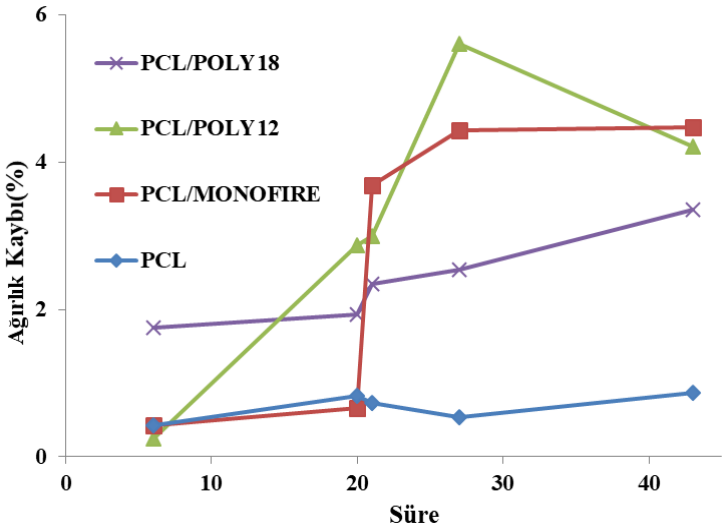


Şekil 7. PCL/MONOFİRE ve PCL/POLY18 kompozit filmlerin 100X büyütmede elde edilen optik mikroskop görüntüleri.
Figure 7. *Optical microscope ımages of PCL/MONOFIRE and PCL/POLY18 fiber composite films obtained at 100X.*

3.5. Biyobozunurluk testleri
3.5. Biodegradability tests

Şekil 8, katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin 43 günlük SBF çözeltisindeki yüzde (%) ağırlık kaybındaki değişimleri göstermektedir; Tablo 3 ise ilgili ağırlık kaybı değerlerini sunmaktadır. Şekil 8 ve Tablo 3' den görüldüğü gibi, H_2O_2 ilavesi yapılmadan SBF çözeltisi içerisinde 20 günlük bozunma süreci incelendiğinde, katkısız PCL ve fiber kompozit filmler arasında PCL/MONOFİRE kompozit filminin %3,689'luk katkı oranıyla en yüksek bozunma oranı gösterdiği belirlenmiştir. Katkısız PCL, %0,7304 ile en düşük bozunma yüzdesini gösterirken, PCL/POLY12 ve PCL/POLY18 sırasıyla %2,997 ve %2,352'lik bozunma değerleriyle birbirine yakın sonuçlar sergilemiştir. Literatürde katkısız PCL'nin ağırlık kaybı 7-30 gün arasındaki bozunma sürecinde %1-5 aralığında değişiklik göstermektedir. Bu süreç, katkısız PCL'nin hidrolitik bozunma sürecine bağlı olup, ağırlık kaybı oldukça sınırlıdır. Çünkü PCL'nin tam biyobozunurluğu için uzun bir zamana ihtiyacı vardır (Dumitriu, 2013). Bu sonuçlara göre aynı çözelti içerisinde ve aynı deney şartlarında katkısız PCL' nin bozunma miktarı fiber ilavesi ile artmış, kısa fiber uzun fiberlere göre PCL'nin biyobozunurluğunu artırmayı başarmıştır. Deney şartlarının sabit tutulmasının sebebi katkısız PCL' nin tuz çözeltisi içindeki ağırlık kaybı, özellikle ortamın iyonik yapısı, sıcaklık, pH değeri ve zaman gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermesinden dolayıdır. Tuz çözeltisi ortamında, iyonlar suyun ve polimerin etkileşimini değiştirebilir, bu durumda PCL'nin hidrolitik bozunma hızını değiştirebilmektedir (Söğüt & Seydim, 2017)

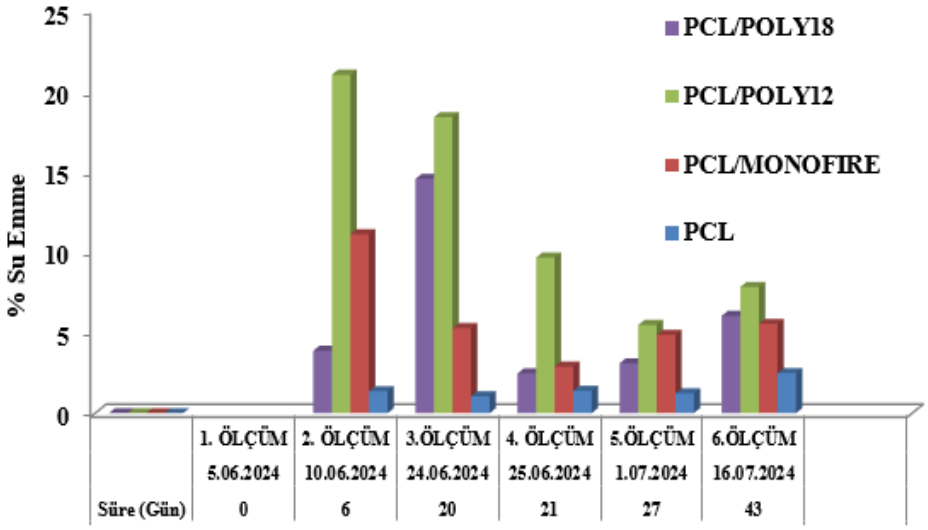
Azevedo vd. (2003), katkısız PCL'nin tuz çözeltisi içinde gerçekleştirilen 16 günlük bozunma testlerinde %1,5–2,0 arasında ağırlık kaybı gösterdiğini rapor etmişlerdir (Azevedo vd., 2003). PBS çözeltisi içinde gerçekleştirilen 16 haftalık bozunma çalışmasında, PCL'nin yalnızca %0,2'lik bir ağırlık kaybı gösterdiği bildirilmiştir (Diaz vd., 2014).



Şekil 8. Katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin 43 gün boyunca SBF çözeltisi içerisindeki ağırlık kayıpları
Figure 8. *Percent weight losses of pure PCL and PCL/fiber composite films in SBF solution over 43 days*

Mindivan & Göktaş (2023)'ın daha önce yaptığı PCL/CQDs kompozit çalışmasında katkısız PCL' nin 41 gün sonunda PBS çözeltisi içerisinde ağırlık kaybı %0,7, tuz çözeltisi içerisinde ise %1,9 olduğu rapor edilmiştir (Mindivan & Göktaş, 2023). Bu çalışmanın 20 günlük bozunma sonuçları yukarıda bahsedilen literatür sonuçları ile uyumludur.

Tüm kompozit örneklerinde, 20. günde 5 mM H_2O_2 ve 27. günde 10 mM H_2O_2 ilavesi sonrasında, % ağırlık kayıplarında belirgin artışlar Şekil 8 ve Tablo 3'te açıkça gözlemlenmektedir. PCL/POLY 12 örneğinde diğer örneklere göre H_2O_2 ilavesinin biyobozunurluğu oldukça artırdığı tespit edilmiştir. MONOFİRE, POLY 12 ve POLY 18 katkılı kompozit filmlerin % ağırlık kayıpları sırasıyla 43 günün sonunda %4,468, 4,213 ve 3,357 değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuç POLY 12 örneğinin yapıyı amorflaştırmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3). Çünkü literatürde PCL'nin biyobozunurluğu, sırasıyla önce amorf fazda ve sonra kristal fazda gerçekleşip, bozunma sürecinin tamamlandığı rapor edilmiştir (Salgado vd., 2012). PCL/POLY 12 kompozit filminin amorf yapısı bozunurluğu hızlandırmıştır. Ayrıca bu çalışmanın FTIR sonuçlarında, -CH_2 grubuna ait bantlar üzerinde MONOFİRE katkısının, oksijen içeren gruplarda ise (C-O-C ve C=O) POLY 12 ve POLY 18 katkılarının etkilerinin daha fazla olduğu ortaya çıktığı rapor edilmişti. Biyobozunurluk sonuçlarında H_2O_2 ilave edilmeden önce MONOFİRE katkılı kompozitin, ilave edildikten sonra PCL/POLY 12 kompozitinin en yüksek bozunma sonuçları vermeleri bu çalışmanın FTIR sonuçlarıyla uyumludur (Şekil 4). Aynı kompozitlerin biyobozunurluk testleri sırasında hesaplanan % su emme miktarları Şekil 9' de gösterilmiştir. Şekil 9' den görüldüğü gibi en yüksek su emme değeri PCL/POLY 12 kompozitinde gözlenmiştir. Bu sonuç aynı kompozilerin XRD analizinde tespit edilen amorf yapısı, FTIR analizinde belirlenen oksijenli fonksiyonel grupları ve biyobozunurluk sonuçları ile uyumludur.



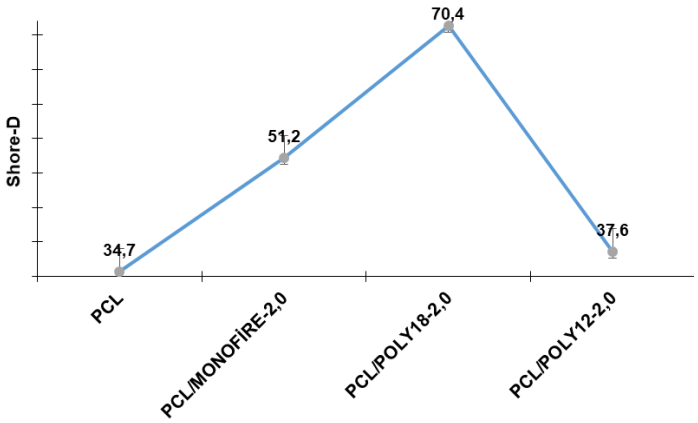
Şekil 9. 43 günlük SBF testi sonucunda, katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin su emme (%) değerleri.
Figure 9. *Water absorption (%) of pure PCL and PCL/fiber composite films in SBF solution over 43 days*

Tablo 3. 43 günlük SBF testi sonucunda, katkısız PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin ağırlık kaybı değerleri.
Table 3. *Pure PCL and PCL/fiber composite films: weight loss (%) after 43 days in SBF solution*

Örnekler	05.06.2024 Başlangıç Tartımı	10.06.2024		24.06.2024		25.06.2024		01.07.2024		16.07.2024	
	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru	Islak	Kuru
POLY 18	0,578	0,601	0,569	0,652	0,568	0,582	0,565	0,581	0,565	0,599	0,560
POLY 12	0,433	0,524	0,431	0,511	0,421	0,461	0,420	0,443	0,410	0,442	0,415
PCL	0,565	0,573	0,563	0,569	0,561	0,569	0,561	0,568	0,562	0,576	0,561
MONOFİRE	0,585	0,649	0,584	0,615	0,581	0,598	0,564	0,591	0,560	0,590	0,560

3.6. Sertlik testleri
3.5. Hardness tests

Şekil 10' da PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin sertlik değerleri ile birlikte sertlik değerlerindeki değişimler standart sapmaları ile birlikte grafik edilmiştir. Saf PCL'nin Shore-D sertlik değeri 34,7 olarak ölçülmüştür. Bu sonuç literatürde PCL ile yapılan çalışma sonuçlarıyla uyumludur (Choi vd., 2023; Kováčová vd., 2023). Şekil 10' da görüldüğü gibi PVC/MONOFİRE-2,0 fiber kompozit filminin sertlik değeri saf PCL' ye göre %47,55 oranında, PVC/POLY12-2,0 fiber kompozit filminin sertlik değeri ise %8,36 oranında ve PVC/POLY18-2,0 fiber kompozit filminin%104,61 oranında artmıştır. Bu sonuçlar en yüksek sertlik sonucunun POLY 18 fiber katkılı kompozitin sahip olduğunu göstermiştir. XRD analiz sonuçları POLY 18 katkısının kristal boyut değerini katkısız polimere göre en fazla arttıran fiber olduğunu göstermişti. Sertlik sonuçları ile XRD analiz sonuçlarının birbirlerini desteklediği görülmüştür (Şekil 3 ve 10). Literatürde kristal yapı ile sertlik arasında doğrusal bir ilişki olduğu rapor edilmiştir (Beloshenko & Voznyak, 2013). Benzer şekilde, fiber katkılarının sertlik ve mekanik dayanımı artırdığına dair bulgularda literatürde mevcuttur (George vd., 2001; Guo vd., 2013). Sertlik sonuçlarına göre en düşük sertlik değerine sahip olan POLY 12 katkılı fiber kompozitin amorf yapısı bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 10. Saf PCL ve PCL/fiber kompozit filmlerin Shore-D sertlik sonuçları.
Figure 10. *Shore-D hardness results of pure PCL and PCL/fiber composite films.*

4. Sonuçlar
4. Conclusions

Bu çalışmada, katkısız PCL ve ağ. %2,0 fiber dolgu içeren PCL/POLY 12, PCL/POLY 18 ve PCL/MONOFİRE kompozit filmleri, sıvı faz ultrasonik karıştırma ve döküm yöntemiyle elde edilmiştir. Üretilen bu filmlerin XRD analizi ile kristal yapıları, FTIR analizi ile polimer-dolgu etkileşimleri, termal kararlılıkları TG/DSC analizi ile, OM ile yüzey morfolojileri ve mekanik özellikleri sertlik testi ile incelenmiştir. Kompozitlerin yapısal, termal özellikleri, biyobozunurluk davranışları ve mekanik özellikleri üzerine farklı uzunlukta ve farklı özellikte fiberlerin etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlara göre POLY18 ve MONOFİRE katkıları kristal yapıyı sürdürürken, POLY 12 katkısının yapıyı amorflaştırdığı belirlenmiştir.

PCL/POLY 18 kompozitin (110), (200) ve (202) düzlemlerinde sırasıyla %8,34, %15,12 ve %77,54 kristal boyut değerlerinde diğer kompozitlere göre oldukça yüksek değerler göstermiştir. FTIR analiz sonuçları MONOFİRE katkısının -CH_2 grubuna ait bantları, POLY 12 ve POLY 18 katkılarının ise oksijen içeren grup bantları (C-O-C ve C=O) üzerinde etkilerinin daha fazla olduğunu göstermiştir. Termal analiz sonuçları POLY 12 ve MONOFİRE katkılarının termal kararlılığı arttırdığını göstermiştir. Optik mikroskop görüntüleri vasıtasıyla PCL'nin yarı kristal yapısını yansıtan küresel tanelerin MONOFİRE ve POLY 18 katkılarının sağladığı heterojen çekirdeklenme etkilerinden dolayı katkısız PCL'ye göre çok daha küçüldüğü belirlenmiştir. PCL/POLY 12 kompozit filminde ise karakteristik küresel tanelerin görülmemesi XRD analizinde belirlenen amorf yapıyı doğrulamıştır. Biyobozunurluk testlerinde ise H_2O_2 eklenmeden önce en yüksek bozunma değeri PCL/MONOFİRE, H_2O_2 eklendikten sonra en yüksek bozunma değeri PCL/POLY 12 kompozit filminde görülmüştür. PVC/POLY18-2,0 fiber kompozit filmi %104,61 oranında, katkısız PCL' ye göre en yüksek artışı sergilemiştir. MONOFİRE ve POLY 18 fiber dolgularının mekanik dayanım gerektiren farklı uygulama alanlarında, POLY 12 fiber dolgusunun ise diğer fiber dolgulara nazaran biyomalzeme alanında kullanılabileceği bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak söylenebilir.

Teşekkür
Acknowledgement

Çalışmada dolgu malzemesi olarak kullanılan MONOFİRE, POLYMONO 12 ve POLYFİBRİL 18 fiber örneklerinin teminini sağlayan Bilecik İlinde bulunan Polyfibers® firmasına teşekkür ederiz.

Yazar katkısı
Author contribution

Meryem Göktaş: Araştırma konusunun belirlenmesi, kurgulama, deney düzeninin kurulumu, analizlerin yapılması, literatür araştırması ve makalenin yazım aşamalarında katkı sunmuştur. Ferda Mindivan: Araştırma konusunun seçimi, araştırma kurgusunun oluşturulması, deney düzeninin kurulumu ve makalenin nihai yazım aşamasında katkı sağlamıştır.

Etik beyanı
Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve /veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı
Conflicts of interest

Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar
References

Adanur, S., & Selver, E. (2013). Nanoclay/polypropylene composite monofilament processing and properties using twin and single screw extruders. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, *62*(4), 236–242. https://doi.org/10.1080/00914037.2011.641696

Ahmed, I., Parsons, A. J., Palmer, G., Knowles, J. C., Walker, G. S., & Rudd, C. D. (2008). Weight loss, ion release and initial mechanical properties of a binary calcium phosphate glass fibre/PCL composite. *Acta biomaterialia*, *4*(5), 1307-1314. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.018

Albin Zaid, Z. A. A., & Otaru, A. J. (2025). Thermal Decomposition of Date Seed/Polypropylene Homopolymer: Machine Learning CDNN, Kinetics, and Thermodynamics. *Polymers*, 17(3), 307. https://doi.org/10.3390/polym17030307

Ayas, G. E., Ayhan, Z., Duraccio, D., Silvestre, C., & Cimmino, S. (2020). Application of polypropylene-based nanocomposite films for sliced turkish pastrami under vacuum/modified atmosphere packaging: A pilot study. *Coatings*, *10*(11), 1125. https://doi.org/10.3390/coatings10111125

Aydin, O., Aydin, B., Tezcaner, A., & Keskin, D. (2015). Study of physicochemical structure and in vitro release behaviors of Doxycycline-loaded PCL microspheres. *Journal of Applied Polymer Science*, *132*(14), 41768 (1-13). https://doi.org/10.1002/app.41768

Azevedo, M. C., Reis, R. L., Claase, M. B., Grijpma, D. W., & Feijen, J. (2003). Development and properties of polycaprolactone/hydroxyapatite composite biomaterials. *Journal of materials science: Materials in medicine*, *14*, 103-107. https://doi.org/10.1023/A:1022051326282

Azizi, M., Azimzadeh, M., Afzali, M., Alafzadeh, M., & Hossein, S. S. (2018). Mirhosseini. Characterization and optimization of using calendula officinalis extract in the fabrication of polycaprolactone/gelatin electrospun nanofibers for wound dressing applications. *Materials Science*, *6*(2), 34-46. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199409661

Bagheri, M., & Mahmoodzadeh, A. (2020). Polycaprolactone/graphene nanocomposites: synthesis, characterization and mechanical properties of electrospun nanofibers. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *30*, 1566–1577. https://doi.org/10.1007/s10904-019-01340-8

Balu, R., Kumar, T. S., Ramalingam, M., & Ramakrishna, S. (2011). Electrospun Polycaprolactone/Poly (1, 4-butylene adipate-co-polycaprolactam) blends: Potential biodegradable scaffold for bone tissue regeneration. *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering*, *1*(1), 30-39. https://doi.org/10.1166/jbt.2011.1004

Ban, C.-E., Stefan, A., Dinca, I., Pelin, G., Ficai, A., Andronescu, E., Oprea, O., & Voicu, G. (2016). Multi-walled carbon nanotubes effect in polypropylene nanocomposites. *Materiali in tehnologije*, *50*(1), 11-16. https://doi.org/10.17222/mit.2014.142

Baştosun, Y. (2022). *Halloysit Nanotüp Katkısının Karbon-Aramid Elyaf Takviyeli Nanokompozitlerin Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi*. [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Baydar, D. G., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., & Ünal, A. (2012). Production and characterization of continuous e-glass fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, *Sigma*, *30*, 120-132. https://sigma.yildiz.edu.tr/storage/upload/pdfs/1636108319-tr.pdf

Behara, A.K., Barik, B.B., & Joshi, S. (2012). Polycaprolactone based microspheres and nanospheres: a review. *FS Journal of Pharmacy Research*, *1*(2), 38-45. https://www.researchgate.net/profile/Atanu-Kumar-Behera/publication/256086343.

Beloshenko, V. A., & Voznyak, Y. V. (2013). Microhardness of oriented amorphous-crystalline polymers. *Materials Science,* 49(1), 110-116. https://doi.org/10.1007/s11003-013-9589-z

Castilla-Cortázar, I., Vidaurre, A., Marí, B., & Campillo-Fernández, A.J. (2019). Morphology, crystallinity, and molecular weight of poly (ε-caprolactone)/graphene oxide hybrids. *Polymers*, *11*(7), 1-19. https://doi.org/10.3390/polym11071099

Choi, J.-H., Woo, J.-J., & Kim, I. (2023). Sustainable Polycaprolactone Polyol-Based Thermoplastic Poly(ester ester) Elastomers Showing Superior Mechanical Properties and Biodegradability. *Polymers*, *15*(15), 3209. https://doi.org/10.3390/polym15153209

Çivici, F., & Güngör, E. (2016). Karma lifli betonların tokluk açısından değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik* Dergisi, *7*(3), 365-376. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3027

de Oliveira Aguiar, V., & de Fatima Vieira Marques, M. (2016). Composites of polycaprolactone with cellulose fibers: morphological and mechanical evaluation. In *Macromolecular Symposia*, *367*, 1, 101-112. https://doi.org/10.1002/masy.201500142

Dere, H. (2021). *Karbon Türevi Dolgulu Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (PE) Kompozit ve Hibrit Kompozit Kaplamaların Sürtünme ve Aşınma Davranışları* [Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Dhanaraju, M., Sathyyamoorthy, N., & Sundar, V. (2010). Preparation of polycaprolactone microspheres containing Etoposide by solvent evaporation method. *Asian Journal of Pharmaceutical Science*, *5*(3),114-122. https://www.researchgate.net/profile/Sundar-Devendiran/publication/326319546

Diaz, E., Sandonis, I., & Valle, M. B. (2014). In vitro degradation of poly (caprolactone)/nHA composites. *Journal of Nanomaterials*, *2014*(1), 802435. https://doi.org/10.1155/2014/802435

dos Santos, V. I., Merlini, C., Aragones, Á., Cesca, K., & Fredel, M. C. (2020). Influence of calcium phosphates incorporation into poly (lactic-co-glycolic acid) electrospun membranes for guided bone regeneration. *Polymer Degradation and Stability*, *179*, 109253. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109253

Duan, X., Chen, H. L., & Guo, C. (2022). Polymeric nanofibers for drug delivery applications: a recent review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, *33*(12), 78. https://doi.org/10.1007/s10856-022-06700-4

Dumitriu, S. (2013). Polymeric Biomaterials, Volume 1: Types and Applications. *CRC Press. https://books.google.com.tr/books?id=r0i3BgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=tr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false*

Fang, L., Wischke, C., Kratz, K., & Lendlein, A. (2015). Influence of film thickness on the crystalline morphology of a copolyesterurethane comprising crystallizable poly (ε-caprolactone) soft segments. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, *60*(1), 77-87. https://doi.org/10.3233/CH-151

Fares, M. C., Souza, G. de, & Carvalho, A. J. F. (2019). thermoformed polypropylene composite reinforced with cotton fabric. *Macromolecular Symposia*, *383*(1), 1800068. https://doi.org/10.1002/masy.201800068

Farrow, G. (1961). The measurement of crystallinity in polypropylene fibres by X-ray diffraction. *Polymer*, *2*, 409-417. https://doi.org/10.1016/0032-3861(61)90046-5

Fattahi, F. S., Khoddamı, A., & Avınc, O. O. (2020). Poly (Lactic Acid) Nano structure mats as potential wound dressings. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *26*(7), 1193-1203. https://doi.org/10.5505/pajes.2020.42890

George, J., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. Polymer Engineering & Science, 41(9), 1471-1485. https://doi.org/10.1002/pen.10846

Ghorghi, M., Rafienia. M., Nasirian, V., Bitaraf, F.S., Gharravi, A.M., & Zarrabi, A. (2020). Electrospun captopril-loaded PCL-carbon quantum dots nanocomposite scaffold: Fabrication, characterization, and in vitro studies. *Polymers Advanced Technologies*, *31*, 3302–3315. https://doi.org/10.1002/pat.5054

Göktaş M. & Mindivan F. (2025). İndirgenmiş Grafen Oksit Dolgulu PCL Kompozit Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 28(3): 745-751. https://doi.org/10.2339/politeknik.1337136

Guo, Q., Zhang, G., & Li, J. (2013). Process parameters design of a three-dimensional and five-directional braided composite joint based on finite element analysis. Materials & Design (1980-2015), 46, 291-300. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.025

Guo, Y., Hu, W., Cui, C., Liu, J., Ming, X., Zhang, Q., ... & Zhang, Y. (2025). Simultaneous Improvement of Thermal Stability, Mechanical Properties, and Combustion Safety in Polycaprolactone via Blending with a Tiny Amount of Aramid Nanofiber. *Composites Science and Technology*, 111215. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111215

Gupta, D., Venugopal, J., Prabhakaran, M.P., Dev, V.G., Low, S., Choon, A.T., & Ramakrishna, S. (2009). Aligned and random nanofibrous substrate for the in vitro culture of Schwann cells for neural tissue engineering. *Acta Biomaterialia,* 5(7), 2560-2569. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.01.039

Harrison, K. L., & Jenkins, M. J. (2004). The effect of crystallinity and water absorption on the dynamic mechanical relaxation behaviour of polycaprolactone. *Polymer international*, *53*(9), 1298-1304. https://doi.org/10.1002/pi.1517

İlyas, R. A., Zuhri, M. Y. M., Norrrahim, M. N. F., Misenan, M. S. M., Jenol, M. A., Samsudin, S. A., ... & Nurazzi, N. M. (2022). Natural fiber-reinforced polycaprolactone green and hybrid biocomposites for various advanced applications. *Polymers*, *14*, 1. https://doi.org/10.3390/polym14010182

Khan, R. A., Parsons, A. J., Jones, I. A., Walker, G. S., & Rudd, C. D. (2010). Preparation and characterization of phosphate glass fibers and fabrication of poly (caprolactone) matrix resorbable composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *29*(12), 1838-1850. https://doi.org/10.1177/0731684409337554

Kováčová, M., Vykydalová, A., & Špitálský, Z. (2023). Polycaprolactone with Glass Beads for 3D Printing Filaments. *Processes*, *11*(2), 395. https://doi.org/10.3390/pr11020395

Li, Y., Yao, S., Shi, H., Zhang, Y., Han, C., & Yu, Y. (2021). Enhancing the crystallization of biodegradable poly (ε-caprolactone) using a polyvinyl alcohol fiber favoring nucleation. *Thermochimica Acta*, *706*, 179065. https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.179065

Liang, Y., Yang, F., & Qiu, Z. (2012). Miscibility and crystallization behavior of biodegradable poly (ε-caprolactone)/tannic acid blends. *Journal of applied polymer science*, *124*(6), 4409-4415. https://doi.org/10.1002/app.35430

Lima, J. C., Sousa, J. C., Arruda, S. A., Almeida, Y. M., & Canedo, E. L. (2019). Polycaprolactone matrix composites reinforced with brown coir: Rheological, crystallization, and mechanical behavior. *Polymer Composites*, *40*(S1), 678-686. https://doi.org/10.1002/pc.24951

Lyu, J. S., Lee, J. S., & Han, J. (2019). Development of a biodegradable polycaprolactone film incorporated with an antimicrobial agent via an extrusion process. *Scientific reports*, *9*(1), 20236. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56757-5

Major-Gabryś, K., Dobosz, S. M., Drożyński, D., & Jakubski, J. (2015). The compositions: biodegradable material-typical resin, as moulding sands' binders. *Archives of Foundry Engineering*, *15*. https://doi.org/10.1515/afe-2015-0008

Malikmammadov, E., Tanir, T. E., Kiziltay, A., Hasirci, V., & Hasirci, N. (2018). PCL and PCL-based materials in biomedical applications. *Journal of Biomaterials science, Polymer edition*, *29*(7-9), 863-893. https://doi.org/10.1080/09205063.2017.1394711

Miladi, K., Ibraheem, D., Iqbal, M., Sfar, S., Fessi, H., & Elaissari, A. (2014). Particles from preformed polymers as carriers for drug delivery. *EXCLI journal*, *13*, 28. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4464506/

Mindivan, F., & Çolak, A. (2021). Tribo-material based on a UHMWPE/RGOC biocomposite for using in artificial joints. *Journal of Applied Polymer Science*, *138* (31), 50768, 2021. https://doi.org/10.1002/app.50768

Mindivan, F., & Göktaş, M. (2020). Preparation of new PVC composite using green reduced graphene oxide and its effects in thermal and mechanical properties. *Polym. Bull. 77,* 1929–1949. https://doi.org/10.1007/s00289-019-02831-x

Mindivan, F. & Göktaş, M. (2023). The green synthesis of carbon quantum dots (CQDs) and characterization of polycaprolactone (PCL/CQDs) films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 677, 132446. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132446

Mindivan, F., & Göktaş, M. (2024). Grafen türevleri dolgulu PCL kompozit filmlerin sentezi, yapısal özellikleri ve biyobozunurluğu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *30*(7), 862-868. https://doi.org/10.5505/pajes.2024.69327

Mindivan, F., Göktaş, M., & Dike, A. S., (2020). Mechanical, thermal, and micro- and nanostructural properties of polyvinyl chloride/graphene nanoplatelets nanocomposites. *Polymer Composites*, *41*, 9, 3707-3716. https://doi.org/10.1002/pc.25669

Mochane, M.J., Motsoeneng, T.S., Sadiku, E.R., Mokhena, T.C., & Sefadi, J.S. (2019). Morphology and properties of electrospun PCL and its composites for medical applications: A mini review. *Applied Sciences, 9*(11), 2205, 2019. https://doi.org/10.3390/app9112205

Mondal, D., Griffith, M., & Venkatraman, S. (2016). Polycaprolactone based biomaterials for tissue engineering and drug delivery: current scenario and challenges. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, *65*(5), 255-265. https://doi.org/10.1080/00914037.2015.1103241

Ntrivala, M. A., Pitsavas, A. C., Lazaridou, K., Baziakou, Z., Karavasili, D., Papadimitriou, M., ... & Bikiaris, D. N. (2025). Polycaprolactone (PCL): the biodegradable polyester shaping the future of materials–a review on synthesis, properties, biodegradation, applications and future perspectives. *European Polymer Journal*, 114033. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2025.114033

Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Pordsari, A.J., Mehrali, M., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z. (2016a). A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer. *PLoS ONE* 11 (1), 0147546–0147566. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147546

Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrali, M., Kuenzel, C., Metselaar, H.S.C., Jumaat, M. Z. (2016 b). Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Compos. Sci. Technol.,* 122, 73–81. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.11.009

Sabater i Serra, R., Kyritsis, A., Escobar Ivirico, J. L., Gómez Ribelles, J. L., Pissis, P., & Salmerón-Sánchez, M. (2011). Molecular mobility in biodegradable poly (-caprolactone)/poly (hydroxyethyl acrylate) networks. *The European Physical Journal E*, *34*(4), 37. https://doi.org/10.1140/epje/i2011-11037-4

Salavagione, H.J., Martínez, G., & Ellis, G. (2011). Recent advances in the covalent modification of graphene with polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, *32*(22), 1771–1789. https://doi.org/10.1002/marc.201100527

Salgado, C. L., Sanchez, E. M., Zavaglia, C. A., & Granja, P. L. (2012). Biocompatibility and biodegradation of polycaprolactone-sebacic acid blended gels. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *100*(1), 243-251. https://doi.org/10.1002/jbm.a.33272

Sarfraz, J., Gulin-Sarfraz, T., Nilsen-Nygaard, J., & Pettersen, M. K. (2020). Nanocomposites for food packaging applications: An overview. *Nanomaterials*, *11*(1), 10. https://doi.org/10.3390/nano11010010

Sehrawat, P., Parveen, S., & Hashmi, S. A. (2023). High-performance sodium ion conducting gel polymer electrolyte based on a biodegradable polymer polycaprolactone. *Energy Storage*, *5*(2), 375. https://doi.org/10.1002/est2.375

Selver, E., & Adanur, S. (2010). Processing and property relationship of polypropylene monofilaments containing nanoclay. *Journal of Industrial Textiles*, *40*(2), 123–137. https://doi.org/10.1177/1528083710366724

Shen, L., Yang, H., Ying, J., Qiao, F., & Peng, M. (2009). Preparation and mechanical properties of carbon fiber reinforced hydroxyapatite/polylactide biocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, *20*, 2259-2265. https://doi.org/10.1007/s10856-009-3785-2

Söğüt, E., & Seydim, A. C. (2017). Biyobazli Nanokompozitler Ve Gida Ambalajlamadaki Uygulamalari. *Gıda*, *42*(6), 821-833. https://doi.org/10.15237/gida.GD17084

Sun, X., Yu, Q., Shen, J., Gao, S., Li, J., & Guo, S. (2013). In situ microfibrillar morphology and properties of polypropylene/polyamide/carbon black composites prepared through multistage stretching extrusion. *Journal of Materials Science*, *48*(4), 1214–1224. https://doi.org/10.1007/s10853-012-6862-8

Toptaş, D. E., & Fındık, T. (2023). Termoplastik Matrisli Cam ve Karbon Elyaf takviyeli Kompozit Malzemelerin ANSYS Programı ile Modellenmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, *2*(1), 61-66. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3098

Tordjeman, P., Robert, C., Marin, G., & Gerard, P. (2001). The effect of α, β crystalline structure on the mechanical properties of polypropylene. *The European Physical Journal E*, *4*, 459-465. https://doi.org/10.1007/s101890170101

Wei, J., Li, Y., & Lau, K. T. (2007). Preparation and characterization of a nano apatite/polyamide6 bioactive composite. *Composites part B: Engineering*, *38*(3), 301-305. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.05.006

Woodruff, M.A., & Hutmacher, D.W. (2010). The return of a forgotten polymer- polycaprolactone in the 21st century. *Progress in Polymer Science*, *35*(10), 1217-1256. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.04.002

Wu, Y., Zhou, D.-G., Wang, S.-Q., & Zhang, Y. (2009). Polypropylene composites reinforced with rice straw micro/nano fibrils isolated by high intensity ultrasonication. *BioResources*, *4*(4), 1487–1497. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_04/BioRes_04_Security_Off/BioRes_04_4_1487_Wu_ZWZ_Res_PP_Reinf_RiceStraw_Nanocompos_501.pdf

Yıldızhan, Ş., Tosun, A. T., Akar, M. A., & Kumlu, U. (2025). Examination of mechanical and morphological properties of jute/cotton natural fiber reinforced hybrid composites Jüt/pamuk doğal elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin mekanik ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 31*(1), 9-16. https://doi.org/10.5505/pajes.2024.93507

Zhang, R., Lu, L., Yuan, X., Li, Z., Sun, R., & Zhang, B. (2022). Influences of fiber fibrillation degree on mechanical and tribological performances of aramid fiber/nitrile rubber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *139*(31), 52699. https://doi.org/10.1002/app.52699