

# Effects of Consolidation Parameters on Flexural Behavior of Polypropylene/Glass Fiber Thermoplastic Composites

Abdullah Saar <sup>a</sup>, Cihan Bezen <sup>b</sup>, Umut Caliskan <sup>c,d,e,1</sup>, Zeynep Gul Apalak <sup>f</sup>

<sup>a</sup> Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering, Kayseri, Türkiye  
ORCID ID: 0009-0000-4467-3176

<sup>b</sup> Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Mechanical Engineering, Kayseri, Türkiye  
ORCID ID: 0009-0008-3054-8401

<sup>c</sup> Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Kayseri, , Türkiye  
ORCID ID: 0000-0002-8043-2799

<sup>d</sup> Maicros Advanced Engineering Technologies, Erciyes Teknopark, Kayseri, Türkiye  
ORCID ID: 0000-0002-8043-2799

<sup>e</sup> Aviation Research and Application Center, Erciyes University, Kayseri, Türkiye  
ORCID ID: 0000-0002-8043-2799

<sup>f</sup> Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Kayseri, Türkiye  
ORCID ID: 0000-0002-5777-0239

## Abstract

In this study, the flexural behavior of glass fiber-reinforced polypropylene (GFR-PP) composites was systematically investigated under three-point bending conditions to evaluate the impact of key production parameters. Composite plates with a thickness of 4 mm were fabricated using a stepped mold under varying pressure levels (10, 20, and 30 bar) and durations under pressure (5, 10, and 20 minutes). The specimens were prepared according to ASTM standards to ensure consistency and reliability. The primary objective of this study was to understand how production parameters influence the mechanical properties of GFR-PP composites. The results indicated that the combination of low pressure (10 bar) and longer durations (20 minutes) led to superior flexural strength and enhanced fiber-matrix adhesion due to optimized consolidation, with a maximum flexural strength exceeding 500 MPa. In contrast, higher pressure levels (30 bar) resulted in fiber deformation and reduced mechanical performance. This work provides critical insights into the optimization of production parameters to achieve high-performance GFR-PP composites, with potential applications in aerospace and other lightweight structural components requiring high mechanical strength and durability.

**Keywords:** “Glass fiber-reinforced polypropylene (GFRPP), three-point bending test, thermoplastic composites.”

## 1. Giriş

Kompozit malzemeler, son yıllarda havacılık, otomotiv ve gemi sanayinde yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir. Bu sektörlerde kullanılan kompozit malzemeler, çelik ve alüminyum gibi izotropik malzemelere kıyasla daha yüksek eğilme rijitliği, düşük özgül ağırlık, üstün termal yalıtım özellikleri ve kolay tamir edilebilirlik gibi benzersiz avantajlar sunmaktadır[1]. Kompozit malzemeler, farklı polimerlerden, metallere veya seramik malzemelerden elde edilen karmaşık yapılardır. Bu malzemeler belirgin bir arayüzle ayrılmış iki veya daha fazla kimyasal ve fiziksel olarak farklı fazdan oluşan malzemeler olarak da tanımlanmaktadır [2]. Kompozit malzemeler havacılık, uzay, otomotiv, inşaat ve gemi sanayinde yaygın olarak kullanılmakta ve her geçen gün kullanımları artmaktadır[3]. Özellikle, kompozit malzemelerdeki gelişmeler roket gibi uygulamalar için çok önemli olmuştur. Kompozitleri ve gelişimlerini anlamak araştırmacılar için hayati önem taşımaktadır[4]. Günümüzde uygulama alanlarına ve ihtiyaç duyulan mekanik özelliklere uygun şekilde üretilebilmektedir. Farklı fiber ve matris kombinasyonları kullanılarak istenen özellikler malzemeye kazandırılabilir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin kullanım alanları her geçen gün daha da genişlemektedir. Takviye elyafının türü, matris malzemesinin bileşimi, kullanılan üretim süreci, elyafların oryantasyonu ve spesifik son kullanım uygulaması yer alır. Bu sınıflandırma değişkenleri, mühendislere özel ihtiyaçları için en uygun malzeme ve üretim tekniklerini belirlemek ve seçmek için çok yönlü bir yapı sunmaktadır[5].

<sup>1</sup> Corresponding Author  
E-mail Address: ucaliskan@erciyes.edu.tr

Matris, yükün kohezyonunu ve yönelimini sağlamaktadır. Matris termoplastik, termoset ve/veya elastomer tipinde olabilir. Matris seçimi, kompozit malzemenin amaçlandığı kullanıma bağlıdır. Matrisin rolü, takviye elyafı birbirine bağlamak, kısıtlamaları dağıtmak, yapının kimyasal direncini sağlamak ve nihai ürüne istenen şekli vermektir. Bu şekilde elde edilen malzemeler çok heterojen ve genellikle anizotropik yapıdadır. Matrisin ve yükün doğası, yükün şekli ve oranı, arayüzün kalitesi ve kullanılan üretim süreci, kompozit malzemenin özelliklerini etkileyebilecek parametrelerdir. Matris ve takviye metalik, seramik veya plastik olabilir, bu da çok sayıda kombinasyon oluşumunu sağlamaktadır[6]. Yüksek sıcaklık termoplastikleri içeren malzeme kompozisyonları matris reçinesi olarak, yüksek sıcaklık ve kimyasal kararlılığın genellikle özel sürtünme ve aşınma özellikleriyle birleştirilmesinin gerekli olduğu havacılık endüstrisi, açık deniz teknolojisi ve kimya mühendisliği gibi uygulamalarda tercih edilmektedir[7].

Son yıllarda polipropilen, olağanüstü özellikleri, maliyet etkinliği ve işleme kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan termoplastik polimerlerden biri olmuştur[8]. Yıllar içinde polipropilenin geliştirilmesi ve kullanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiş olması çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır[9]. PP, yarı şeffaf beyaz katı bir malzemedir. Soğuk organik çözücülerde çözünmez, sıcak çözücülerde yumuşar. Birçok kez bükülse bile sertliğini korur. Antioksidan eklenmediğinde, ısı ve ışığın etkisiyle bozulur. Yapısının çok düzenli olması nedeniyle kolay renklendirilemez. İyi bir elektriksel dirence sahiptir, düşük su absorpsiyonu ve geçirgenliği vardır. -9,4 °C'nin altında kırılındır. Mantar ve bakterilere karşı dayanıklıdır. 60 °C'ye kadar kuvvetli asit ve bazlara dayanıklıdır ancak klor, nitrik asit ve diğer güçlü oksitleyicilerden etkilenir. Yakılabılır ama yavaş yanar. Zehirsizdir ve gıda tüzüğüne uygundur. Düşük yoğunluk, yüksek darbe dayanımı, kimyasallara karşı yüksek mukavemet, iyi elektriksel yalıtım, yüksek mekanik mukavemet, düşük nem alma, makul fiyat ve işlem kolaylığı temel özelliklerindedir[10].

Kompozit malzemelerin üretiminde düşük yoğunlukları, yüksek darbe dayanımları, yüksek aşınma dayanımları, yüksek yorulma dayanımları ve yüksek titreşim sönümlenme özellikleri nedeniyle cam, karbon, aramid elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı hızla artmıştır. Elyaf genellikle bir kompozitteki elyaf ve matris arasındaki yapışma kalitesini iyileştirmek için kimyasal veya elektrolitik oksidasyon yöntemleriyle yüzey işlemine tabi tutulmaktadır. Cam elyafı, erimiş camın çok ince ipliklere çekilmesi ve ardından çekme işlemiyle oluşturulan yapıyı korumak için bunların atmosferle veya sert yüzeylerle temastan hemen korunmasıyla üretilmektedir. Cam elyaf, inorganik elyaf kadar güçlüdür ancak moleküler yapıları nedeniyle sert yapıda değildir. Cam elyaf, düşük yoğunluklu, mükemmel mekanik özelliklere sahip ve oldukça uygun maliyetli olmaları nedeniyle çoğunlukla takviye olarak kullanılmaktadır [11]. Cam elyaf, lifler dik konumda olduğunda PEI gibi polimerlerin aşınma direncini artırmada potansiyel etki göstermiştir [12].

Termoplastik malzemeler, modern sanayinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu yaygınlık, onların çeşitli özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu malzemeler, ısıtıldıklarında yumuşayarak şekil alabilen ve soğuduktan sonra sertleşen özellikleri sayesinde farklı uygulamalar için uygun hale gelmektedir. Özellikle, üretim süreçlerinde sağladıkları esneklik ve hızlı şekil alma yetenekleri, termoplastiklerin tercih edilmesinde önemli bir etken olmaktadır. Elyaf takviyeli polimer kompozitler, mukavemet ve sertlik açısından sahip oldukları avantajlar nedeniyle havacılık, denizcilik, ulaştırma ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde yoğun olarak kullanılmaktadır[13]. Elyaf takviyeli polimer kompozitlere olan talep artmasına paralel olarak, termoset muadillerinin baskın olduğu birçok sektörde termoplastik matrislere olan ilgi yeniden artmaktadır[14]. Termoplastik matrislerinin geri dönüştürülebilirlik, kaynaklanabilirlik ve termoform edilebilirlik açısından Termoset matrislerinden daha elverişli faydalar sağladığı uzun zamandır biliniyor olsa da yüksek erime viskoziteleri yüksek işleme sıcaklıkları ve basınçları gerektirmesi ve bu nedenle bunları çoğu sektör için maliyet açısından engelleyici ve uygulanamaz hale getirmektedir. Otomotiv sektöründe termoplastik matrisli malzemelerin kullanımının yaygınlaşması, uzay ve havacılık sanayisinde de benzer bir artışa yol açmıştır. 2000 yılında Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi, havacılık sektöründe CO2 emisyonlarını azaltmaya yönelik bir karar almış ve bu doğrultuda uçak, helikopter ve uzay araçları için yeni malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu süreçte, geliştirilen malzemelerin üretim yöntemlerinin çevre dostu olması kritik bir öneme sahip olmuştur. Örneğin, 2007 yılında Airbus A350 ve Boeing B787 modellerinin yapısının %50-53'lük bölümü (motor parçaları hariç) kompozit malzemelerden üretilmiştir. Günümüzde bu malzemeler, uçak kapıları, ana kanat yapısı, kanatçıklar, flapler, spoilerlar, slatlar ve uçakların iç aksamlarında yaygın olarak kullanılmaktadır[15]. Termoplastik matrisli elyaf takviyeli kompozitler, erimiş haldeki yüksek viskoziteleri nedeniyle sınırlı bir yapısal kullanım alanı bulmuş ve bu da takviye malzemesinin yeterince iyi ıslanmasını engelleyerek nihai ürünün mekanik özelliklerinin termosetlerle kıyaslanamayacak düzeyde kalmasına yol açmıştır. Bu durum, otomotiv, havacılık, ulaşım ve inşaat gibi çeşitli sektörlerde termosetlerin hâlâ baskın olmasına neden olmaktadır. Ancak, termoplastik kompozitlerin üretimini içeren yeni uygulamalar hızla artmakta ve bu sorunun çözümüne yönelik yeni yaklaşımlar sunulmaktadır [16]. Son 20 yılda termoplastik uygulamaları için birçok yeni teknik önerilmiş, geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir ve son yıllarda, sürekli elyaf takviyeli termoplastik matris kompozitler, mükemmel özellikleri nedeniyle uçak, askeri ve havacılık endüstrilerinde başarıyla kullanılmaktadır[17]. Termoplastik kompozitler, termosetlere kıyasla daha yüksek tokluk, daha hızlı üretim ve her şeyden önce geri dönüştürülebilir yapı gibi bazı avantajlar sunar[18]. Tekrar tekrar ısıtılıp şekillendirilebildikleri için tamamen yeni ve otomatik bir üretime olanak sağlarlar[19].

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik (CFRTP) kompozitler, yüksek performans, kısa işleme döngüsü, stoklama kolaylığı, onarım ve kaynak imkânı gibi avantajları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [20]. CFRTP şekillendirme süreci, termoplastik reçinenin erime sıcaklığının üzerinde bir işleme sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Termoplastik matrisler, önemli avantajlar sunmaktadır. Genellikle ön şekillendirme süreçlerinden geçirilerek levha formunda ya da prepreg adı verilen önceden reçine emdirilmiş ürünler halinde üretilirler. Termoplastik matrislerin en önemli avantajlarından biri, termosetlerin

aksine özel depolama gerektirmemesi ve uzun süre saklanabilir olmasıdır. Ayrıca, bu malzemelerin ısı işlemlerle kolayca şekillendirilebilmesi, endüstriyel süreçlerde çevrim sürelerini kısaltarak verimliliği artırır. Termoplastik yapıların bulunduğu bu esneklik, aynı zamanda üretim maliyetlerini azaltırken geri dönüşüm olanaklarını da genişleterek sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlar. Birçok akademik çalışmaya konu olan sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemeler, sahip oldukları yüksek dayanım ve düşük yoğunluk avantajları ile otomotiv endüstrisinde yürütülen metal malzemelere alternatif malzeme olma konusunda ön plana çıkmaktadırlar. Termoplastik kompozit malzemelere uygulanan mekanik etki sırasında gözlemlenen, matris kırılması, matris-elyaf arası bağların kırılması, katmanlar arası kayma eğilimi ve elyaf kırılması adımlarının, metal malzemelere uygulanan mekanik etki sırasında gözlemlenen katlanma ve burulma adımlarına benzer mekanik davranış olması termoplastik SETK malzemelerin metal malzemelere alternatif olabileceğinin en iyi kanıtı olarak gösterilmektedir[21].

Çakır ve Berberoğlu tarafından yapılan çalışmada[22], cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerde elyaf oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırmada, vakum destekli reçine transfer metodu (VARTM) kullanılarak, hacimce %30, %40, %50 ve %60 oranlarında cam elyaf içeren kompozit plakalar üretilmiştir. Matris malzemesi olarak Epikote 828 epoksi reçinesi tercih edilmiştir. Numuneler ASTM standartlarına uygun olarak hazırlanmış ve çekme, darbe, üç nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, elyaf oranındaki artışın maksimum gerilme, elastik modül ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerde belirgin bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Örneğin, elyaf oranının %30'dan %60'a çıkarılması elastik modülde %47'lik bir artış sağlamıştır. Üç nokta eğme testinde, eğilme dayanımının lineer olarak yaklaşık iki kat arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, cam elyaf oranının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini optimize etmede kritik bir rol oynadığını ve VARTM yöntemi ile başarılı üretimin %60 cam elyaf oranına kadar mümkün olduğunu göstermektedir. Araştırma, hafif ve yüksek mukavemetli malzemelere olan talebi karşılamak adına önemli katkılar sunmaktadır.

Sathishkumar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada[23], cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitlerin özelliklerini ve uygulamalarını incelemiştir. GFRP kompozitlerin hafifliği, yüksek mukavemeti ve çevresel dayanımı, onları havacılık ve otomotiv gibi sektörler için ideal kılmaktadır. Çalışmada, üretim tekniklerinin (örneğin, el yatırma, sıkıştırma kalıplama, VARTM) mekanik performans üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Eğilme dayanımı, GFRP kompozitlerin kritik bir mekanik özelliği olarak vurgulanmıştır. Elyaf hacim oranı ve yöneliminin eğilme mukavemetini doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, VARTM gibi üretim yöntemlerinin, homojen bir elyaf-matris dağılımı sağlayarak eğilme performansını optimize ettiği görülmüştür. Çalışmada, çevresel faktörlerin (nem ve sıcaklık) GFRP'nin eğilme davranışı üzerindeki olumsuz etkileri de ele alınmıştır. Bu çalışma, GFRP kompozitlerin eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin üretim parametreleriyle optimize edilebileceğini ve bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında sunduğu potansiyeli ortaya koymaktadır.

Kabiri ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada[24], cam elyaf/polipropilen (GF/PP) kompozitlerinin mekanik özelliklerini ve ortopedik sabitleme plakalarında potansiyel kullanımını incelemiştir. Çalışmada kısa, uzun ve iplik formundaki cam elyaflarla üretilen kompozitlerin mekanik davranışları, çekme, eğilme, basma, kayma ve darbe testleri ile değerlendirilmiştir. Eğme testleri, özellikle uzun cam elyaf içeren PPLGF numunelerinin en yüksek performansı sergilediğini ortaya koymuştur. PPLGF, 185 MPa eğilme dayanımı ve 20,10 GPa elastik modül ile diğer numunelere üstünlük sağlamıştır. Bu yüksek değerler, cam elyafların tek yönlü düzenlenmesiyle elde edilen yapı ile açıklanmıştır. Bu özellikler, PPLGF'nin ortopedik sabitleme plakalarında kemik kaynamasını desteklemek için ideal bir malzeme olduğunu göstermektedir. Çekme ve basma testlerinde, tüm GF/PP kompozitlerinin kortikal kemiğe benzer mekanik özellikler sergilediği gözlemlenmiştir. Bu, stres birikimlerini azaltarak daha iyi biyomekanik uyum sağlama potansiyeline işaret etmektedir. Kayma ve darbe testleri, PPLGF'nin üstün dayanıklılık ve enerji emme kapasitesi sunduğunu göstermiştir. Bu çalışma, GF/PP kompozitlerin sabitleme plakaları için hafif, dayanıklı ve biyomekanik olarak uyumlu bir alternatif sunduğunu ve eğilme dayanımı açısından özellikle PPLGF'nin en uygun seçenek olduğunu vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) kompozitlerin eğilme dayanımı üzerine, üretim parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Havacılık gibi hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren sektörlerde GFR-PP'nin kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla, malzeme üretiminde iki temel parametre incelenmiştir: basınç (10, 20, 30 bar) ve basınç altında kalma süresi (5, 10, 20 dakika). Eğme testleri için malzeme kalınlığı 4 mm olarak sabit tutulmuştur. Üç nokta eğilme testleri, malzemenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. ASTM standartlarına uygun olarak hazırlanan test numuneleri ile elde edilen sonuçlar, üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymayı hedeflemiştir. Bu çalışma, üretim süreçlerinin optimize edilmesi yoluyla GFR-PP kompozitlerin eğilme mukavemetinin artırılabilceğini ve bu malzemelerin mühendislik uygulamaları için uygunluğunu göstermeyi amaçlamaktadır.

## 2. Deneysel Prosedür

### 2.1. Numune Üretimi

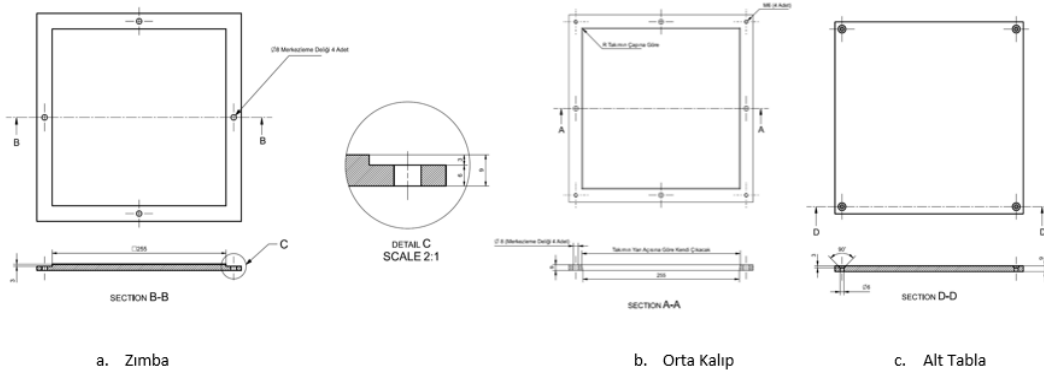
Bu çalışmada kullanılan GFR-PP prepreg malzeme, Durform İzolasyon ve Ambalaj Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiştir. Araştırma kapsamında cam elyaf takviyeli polipropilen (GFR-PP) prepreg malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme tek yönlü yönelime sahip prepreg halinde temin edilmiş olup, üretim süreci öncesinde kalıba uygun boyutlarda hazırlanmıştır. Malzemenin standartlaştırılması amacıyla 25 x 25 mm boyutlarında kesimler yapılmış ve üretim sürecine hazırlanmıştır. Kesim

işlemi, malzemenin kalıp içerisine düzenli ve doğru bir şekilde yerleştirilebilmesi için titizlikle gerçekleştirilmiştir. Bu ön hazırlık süreci, üretim sırasında malzeme kalınlığının kontrolü ve homojen bir numune elde edilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 1. GFR-PP prepeg.

Üretim sürecinde, 4 mm kalınlığında numuneler elde etmek hedeflenmiştir. Bunun için kademeli bir yapıya sahip özel bir kalıp kullanılmıştır (Şekil 2). Kullanılan kalıbın numune alanı, tasarım gereği 6 mm genişliğe sahiptir. Ancak nihai numune kalınlığının 4 mm olması gerektiği için, bu farkı dengelemek amacıyla kalıp içerisine 25 x 25 mm boyutlarında, önceden hazırlanmış bir destek sac levhası yerleştirilmiştir. Bu destek sacı, kalınlık kontrolünü sağlayarak üretim sürecinde hedeflenen hassasiyete ulaşılmasına olanak tanımıştır.

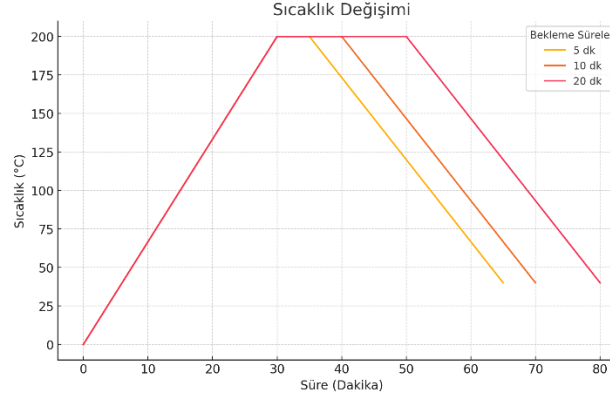


Şekil 2. Levhaların üretiminde kullanılan kademeli kalıp teknik resmi.

Her bir 4 mm kalınlığındaki numunenin üretimi için kalıp içerisine 14 tabaka 25 x 25 mm boyutlarında kesilmiş cam elyaf takviyeli polipropilen prepeg yerleştirilmiştir. Bu işlem, malzemenin mekanik özelliklerinin homojen bir şekilde oluşmasını sağlamak için dikkatle uygulanmıştır. Üretim sırasında, toplam 9 adet 4 mm kalınlığında ve 25 x 25 mm boyutlarında kompozit levha üretilmiştir. Her bir numune için aynı süreç tekrarlanmış ve üretim prosedürlerinin sürekliliği korunmuştur. Bu yaklaşım, elde edilen numunelerin karşılaştırılabilir olmasını ve test sonuçlarının güvenilirliğini artırmıştır. Üretilen 9 adet numune, farklı basınç ve süre kombinasyonlarına göre hazırlanmıştır (Tablo 1). Bu kapsamda, sıcak pres uygulaması sırasında üç farklı basınç (10, 20 ve 30 bar) ve üç farklı süre (5, 10 ve 20 dakika) kombinasyonları kullanılmıştır. Böylelikle, toplamda 9 farklı numune aşağıdaki şekilde üretilmiştir.

Tablo 1. Konfigürasyon Tablosu.

Bar	Süre(Dakika)
10	5
	10
	20
20	5
	10
	20
30	5
	10
	20



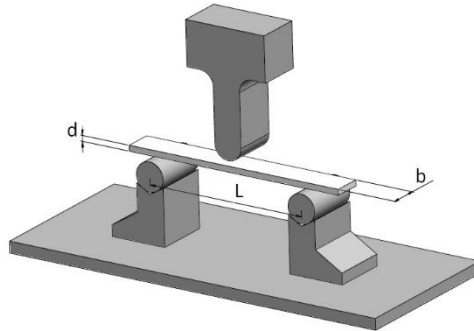
Şekil 3. Sıcak pres ve sıcaklık değişimi.

Bu farklı parametrelerin kullanılmasındaki amaç, üretim parametrelerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemektir. Basınç ve sürenin değişken olarak kullanılması, malzemenin mukavemeti, dayanıklılığı ve yüzey kalitesindeki farklılıkları değerlendirmek için önemli veriler sağlamaktadır. Üretim süreci, sıcak pres teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Bu işlemde, kalıp içerisindeki malzeme 200°C sıcaklığa ulaşana kadar pres altında tutulmuştur. Sıcaklık artışı, polipropilen matris malzemenin yumuşamasını sağlayarak cam elyaf takviyesinin homojen bir şekilde matris içinde dağılmasına olanak tanımıştır. Gerekli sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, malzeme üzerinde belirlenen basınç ve süre kombinasyonlarına uygun şekilde presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu basınç ve süre koşulları, her bir numune için belirlenen üretim parametreleri doğrultusunda uygulanmıştır. Üretim sürecinin tamamlanmasının ardından elde edilen numuneler, hem fiziksel boyutlar hem de yüzey kalitesi açısından kontrol edilmiştir. Üretim prosedürü, hem malzeme özelliklerini hem de uygulanan basınç ve sıcaklık gibi üretim parametrelerini optimize etmek amacıyla titizlikle planlanmıştır. Bu süreçte kullanılan yöntem ve teknikler, hem akademik hem de endüstriyel üretim standartları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

Sonuç olarak, toplam 9 adet kompozit numune başarıyla üretilmiş ve sonraki test aşamaları için hazırlanmıştır. Bu numuneler, çalışmanın deneysel kısmında kullanılacak ve elde edilen sonuçlar, malzemenin mekanik performansı ile üretim parametreleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için analiz edilecektir.

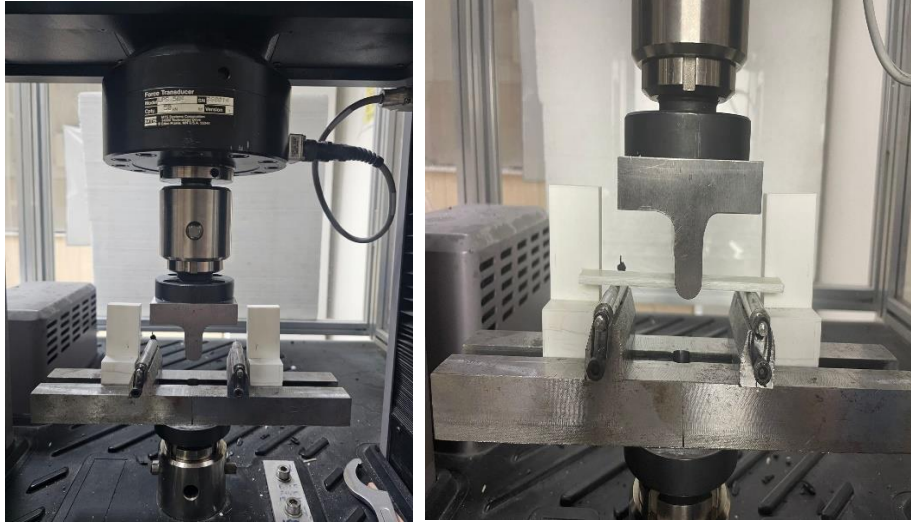
## 2.2. 3 Nokta Eğme Testi

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için yapılan üç noktalı eğilme testi, malzemenin gerilme kapasitesi ve deformasyon davranışını analiz etmek amacıyla tercih edilen standart bir yöntemdir. Bu çalışmada kullanılan üç noktalı eğilme testi, ASTM D790 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Test sürecinde, dikdörtgen kesitli numuneler düz bir hat üzerinde yerleştirilmiş iki destek üzerine yerleştirilmiş, açıklığın ortasına sabit bir gerinim hızı ile yük uygulanmıştır. Gerinim hızı, hareketli çene hızına göre belirlenmiş olup, tüm numunelerde 1 mm/dk sabit hız kullanılarak testin doğruluğu ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.



Şekil 4. 3 nokta eğme testi şematik gösterimi ve numune boyutlandırması.

Test düzeneklerinde destek uzunluğu/derinlik oranı, 32:1 olacak şekilde korunmuştur. Bu oran, ASTM D790 standardı gereklilikleri doğrultusunda belirlenmiş ve test sonuçlarının doğruluğunu sağlamak adına dikkatle uygulanmıştır. Numunelerin yerleştirildiği iki destek arasındaki açıklık (destek açıklığı) 96 mm olarak ayarlanmış, test edilen kirişin genişliği ise 12,7 mm olarak sabitlenmiştir. Test sırasında numuneler, ya dış yüzeyde kırılma gerçekleşene kadar ya da maksimum %10,0 gerinim seviyesine ulaşana kadar eğilmeye devam etmiştir. Bu parametreler, malzemenin hem elastik hem de plastik deformasyon davranışını analiz etmek için kritik önem taşımaktadır.



Şekil 5. Üç nokta eğme test aparatı ve cihazı.

Çalışma kapsamında, farklı üretim parametrelerine göre hazırlanan toplam 9 farklı parametreyle üretilmiş test numuneleri kullanılmıştır. Her bir parametre, test sırasında meydana gelebilecek olası hataları önlemek ve sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla, kendi içinde 3 adet numune barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu planlama ile toplamda 27 adet test numunesi elde edilmiştir. Üçer numunelik bu tekrar yapısı, her bir parametre için eğilme gerilmesi, ve eğilme şekil değiştirme kapasitesinin ortalama değerlerini belirlemek açısından önemlidir. Aynı zamanda bu yaklaşım, her bir üretim parametresinin test sonuçları üzerindeki etkisini daha kesin bir şekilde değerlendirme olanağı sunmaktadır.

Eğilme Gerilmesi;

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

Eğilme Şekil Değiştirmesi;

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2)$$

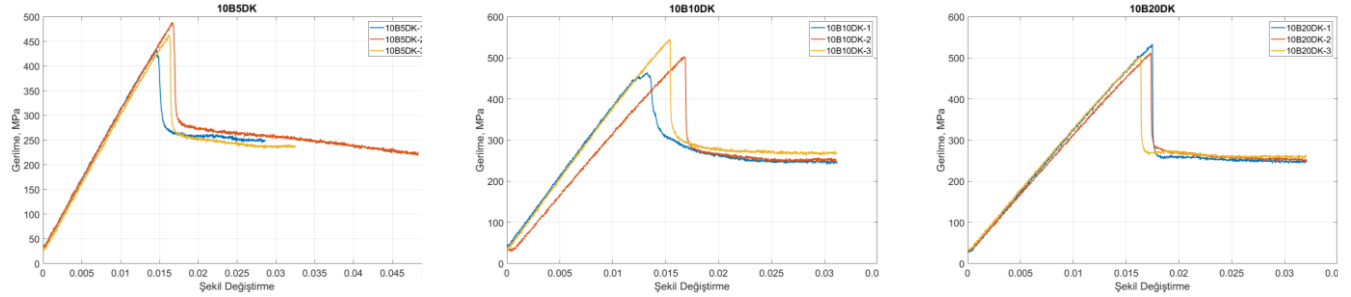
Test sırasında numunelerin mekanik davranışlarını temsil eden çeşitli parametreler hesaplanmıştır. Gerilim ( $\sigma$ ), numunenin orta noktasındaki dış liflerde oluşan gerilimi ifade etmektedir ve bu değer, yük-sapma eğrisi boyunca farklı noktadaki yükler (P) ile ilişkilendirilmiştir. Destek açıklığı (L), test sırasında numunenin yerleştirildiği iki destek arasındaki mesafeyi ifade ederken, genişlik (b) ve kalınlık (d) numunenin kesit boyutlarını tanımlamaktadır. Ayrıca, şekil değiştirme ( $\varepsilon$ ), kirişin dış yüzeyinde meydana gelen deformasyonu temsil ederken, maksimum sapma (D) numunenin orta noktasındaki en büyük yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Şekil 5’de test sırasında kullanılan düzenek ve cihaz gösterilmektedir. Düzenek, testin standartlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi ve tekrarlanabilir sonuçlar alınabilmesi için özel olarak tasarlanmıştır. Tüm test süreçleri, ASTM D790 yönergelerine uygun bir şekilde gerçekleştirilmiş ve numunelerin elastik/plastik davranışlarını anlamak için gerekli tüm veriler toplanmıştır. Böylelikle, malzemenin performansı ile üretim parametreleri arasındaki ilişki net bir şekilde ortaya konulmuştur.

### 3. Sonuçlar

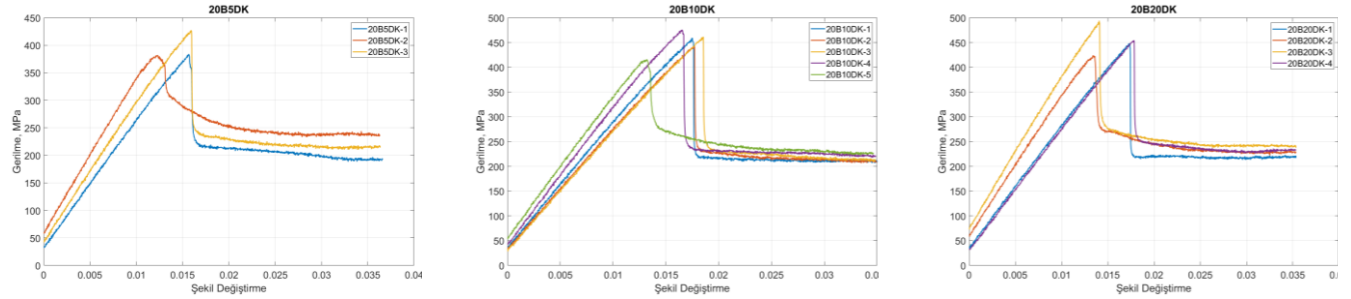
Üç nokta eğme testi sonuçlarına göre, üretim parametreleri olan basınç ve süre, termoplastik kompozit numunelerin mekanik özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemiştir. Şekil 6, 10, 20 ve 30 bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları gerilme-şekil değiştirme eğrileri açısından göstermektedir. 10 bar basınç altında üretilen numuneler (10B5DK, 10B10DK, 10B20DK) arasında, üretim süresi arttıkça gerilme kapasitesinde önemli

bir artış gözlemlenmiştir. 10B5DK, kısa üretim süresi nedeniyle yaklaşık 400 MPa gerilme kapasitesine ulaşmış, ancak deformasyon kapasitesi sınırlı kalmıştır. 10B10DK, 450 MPa seviyesinde daha yüksek bir dayanım ve dengeli bir deformasyon kapasitesi sergilemiştir. En yüksek performans ise, 10 bar altında 20 dakika süreyle üretilen 10B20DK numunesinde elde edilmiştir; bu numune, yaklaşık 500 MPa seviyesini aşarak en yüksek gerilme kapasitesine ulaşmıştır.

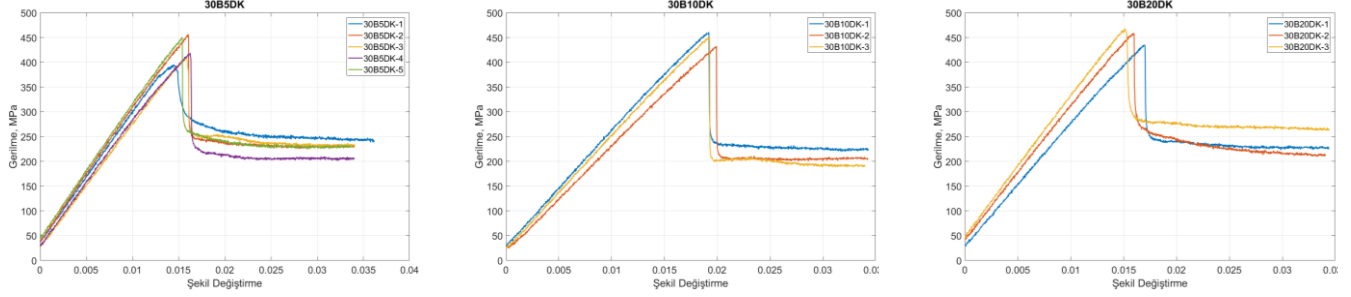
20 bar basınç altında üretilen numuneler (20B5DK, 20B10DK, 20B20DK) arasında, üretim süresi arttıkça mekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiştir. 20B5DK numunesi, yaklaşık 350-400 MPa gerilme kapasitesine ulaşmıştır. 20B10DK numunesinde gerilme kapasitesi yaklaşık 400-450 MPa seviyesine çıkmış ve deformasyon kararlılığı artmıştır. En iyi mekanik performans ise 20B20DK numunesinde gözlenmiş ve bu numune, 450 MPa gerilme kapasitesine bir davranış sergilemiştir.



### 10 Bar



### 20 Bar

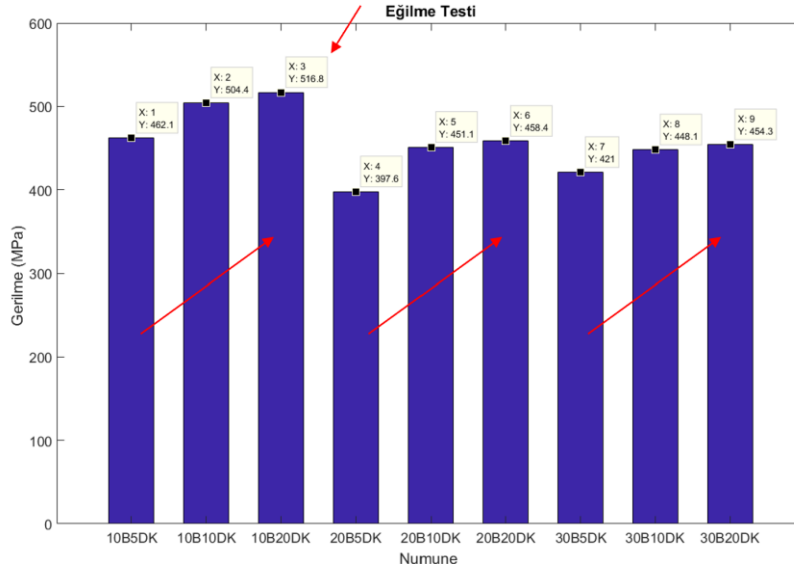


### 30 Bar

**Şekil 6. 10, 20 ve 30 Bar altında üretimi yapılan farklı üretim parametrelerine sahip termoplastik kompozitlerin tekrarlı 3 nokta eğme sonuçları.**

30 bar basınç altında üretilen numunelerde (30B5DK, 30B10DK, 30B20DK), en yüksek gerilme kapasitesinin 450 MPa seviyesinde olduğu ve basınç arttıkça maksimum dayanım seviyesinin 10 bar altında üretilen numunelere kıyasla düşük kaldığı görülmüştür. 30B5DK, kısa üretim süresinin etkisiyle sınırlı bir deformasyon kapasitesine sahiptir. 30B10DK numunesi, 450 MPa seviyesine yaklaşan bir gerilme kapasitesi ve dengeli bir mekanik dayanım sunmuştur. Benzer performans ise, 30 bar altında 20 dakika süreyle üretilen 30B20DK numunesinde gözlenmiş ve bu numune, yaklaşık 450 MPa gerilme kapasitesine ulaşmıştır. Ancak, bu kapasite, 10B20DK'nın sağladığı 500 MPa seviyesine ulaşamamıştır.





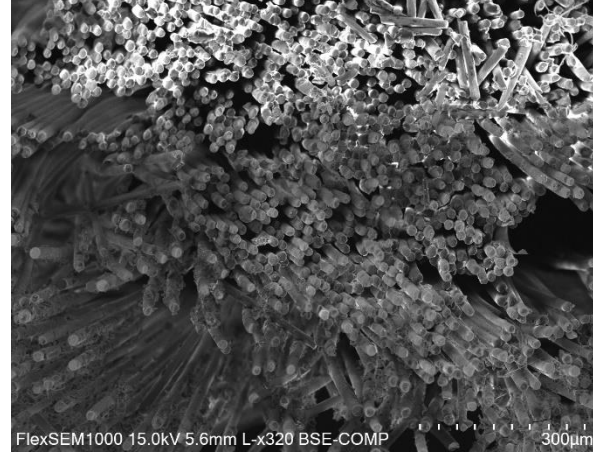
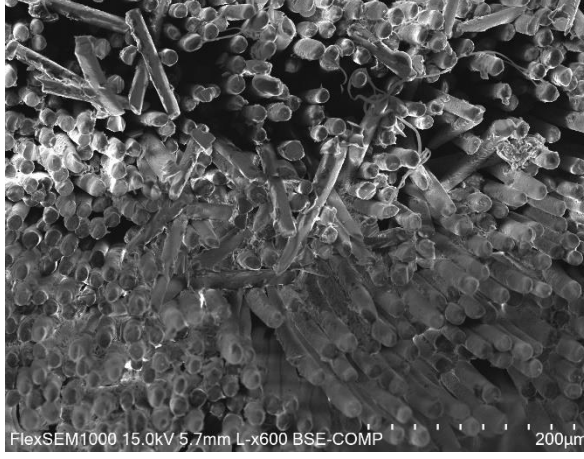
Şekil 7. Farklı üretim parametrelerine ait termoplastik kompozitlerin ortalama en büyük eğilme dayanımları.

Şekil 7 farklı üretim parametrelerine ait termoplastik kompozitlerin ortalama en büyük eğilme dayanımları göstermektedir. Üretim parametrelerinin etkilerinin incelendiği bu çalışmada, üretim sırasında uygulanan basınç ve süre değişkenleri, termoplastik kompozit malzemelerin mekanik dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Düşük basınç ve uzun süre kombinasyonunun mekanik dayanım üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Özellikle 10 bar basınç altında 20 dakika süreyle üretilen numune (10B20DK), 500 MPa'yı aşan gerilme kapasitesiyle tüm test edilen numuneler arasında en yüksek dayanımı göstermiştir. Bu durum, düşük basınç seviyesinde liflerin aşırı ezilmesinin engellenmesi ve lif-matris bağlanmasının optimum düzeye ulaşmasıyla açıklanabilir. Daha yüksek basınç seviyelerinde (20 ve 30 bar), lifler arasındaki ezilmenin artması ve bu durumun bağlanma kalitesini olumsuz etkilemesi nedeniyle gerilme kapasitesinin 450 MPa seviyesinde sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, tüm basınç seviyelerinde üretim süresinin artışı, gerilme kapasitesinde iyileşmelere yol açmıştır. Bu da süre artışının, lif-matris bağlanmasını ve malzeme yoğunluğunu optimize ederek mekanik özellikleri geliştirdiğini göstermektedir. Genel olarak, düşük basınç ve uzun süreli üretim koşulları, optimum mekanik performans için en uygun parametreler olarak değerlendirilmektedir. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar, termoplastik kompozitlerin üretim sürecinde uygulanan basınç ve süre kombinasyonlarının mekanik dayanım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Aynı basınca maruz kalan numunelerde, basınca maruz kalma süresinin artmasıyla birlikte maksimum gerilme kapasitelerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, üretim süresinin uzamasıyla kompozit yapının konsolidasyon sürecinin tamamlanması ve fiber-matris bağlanmasının daha verimli bir şekilde gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Özellikle, 10 bar basınç altında 20 dakika süreyle üretilen numunede (10B20DK), maksimum 516.8 MPa gerilme kapasitesine ulaşılmış ve bu, tüm test edilen numuneler arasında en yüksek değer olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, düşük basınç koşullarının fiber-matris etkileşimini optimize ederek malzemenin dayanımını artırdığını göstermektedir.

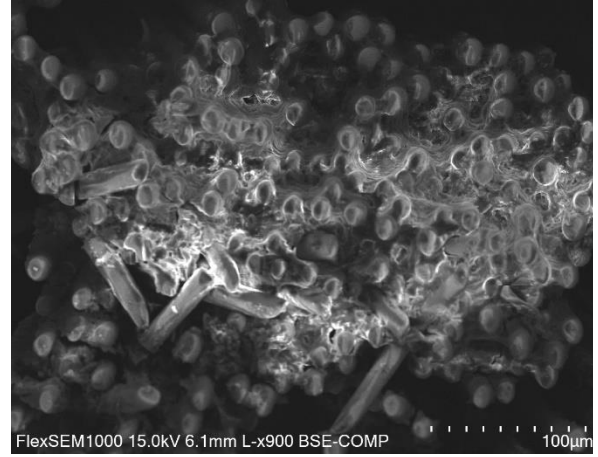
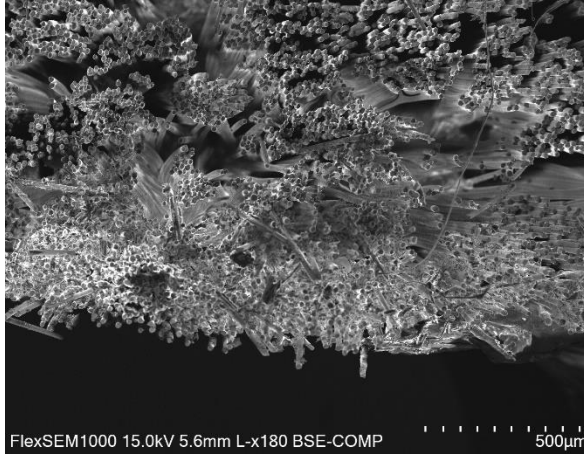
Buna karşılık, basıncın artmasıyla birlikte fiber-matris arasındaki etkileşimde bir değişim meydana gelmiş ve bu durum, mekanik dayanım değerlerine olumsuz yansımıştır. Daha yüksek basınç seviyelerinde (20 ve 30 bar), lifler arasındaki ezilmenin artması ve bu ezilmenin lif-matris bağlanmasını zayıflatması nedeniyle maksimum gerilme kapasiteleri sırasıyla 458.4 MPa (20B20DK) ve 454.3 MPa (30B20DK) seviyelerinde sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, yüksek basınç uygulamalarında liflerin mekanik bağlanma performansını sınırlayabileceğini ortaya koymaktadır. Genel olarak, süre artışının tüm basınç seviyelerinde gerilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, üretim sürecindeki konsolidasyon süresinin termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmedeki kritik önemini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, en yüksek dayanımın 10 bar altında elde edilmesi, düşük basınç koşullarının fiber-matris bağlanmasındaki avantajlarını göstermektedir. Üretim süreçlerinde basınç ve süre parametrelerinin optimize edilmesi, termoplastik kompozitlerin performansını artırmak için önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 8, 10 Bar basınç ve farklı sürelerde konsolide edilmiş GFR-PP termoplastik kompozit levhaların SEM görüntülerini vermektedir. En büyük eğilme gerilme değerlerinin 10 Bar basınç altında gerçekleşmesi nedeni ile ilgili basınç seviyesinde kompozitlerin mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. 10 bar altında 5 dakika süreyle üretilen numune (10B5DK), üretim süresinin kısa olması nedeniyle matris içerisinde belirgin boşluklar (voids) göstermiş ve lif-matris bağlanmasının sınırlı olduğu bir mikroyapı sergilemiştir. Bu durum, konsolidasyonun yeterince tamamlanmadığını ve mekanik dayanımı olumsuz etkileyebilecek bir yapı oluştuğunu göstermektedir. 10 bar altında 10 dakika (10B10DK) süreyle üretilen numunede, boşlukların azaldığı ve lif-matris tutulumunun daha homojen hale geldiği gözlemlenmiştir. Sürenin artışı, konsolidasyon sürecini geliştirerek mikroyapısal iyileşme sağlamıştır. 10 bar altında 20 dakika (10B20DK) süreyle üretilen numunede ise boşlukların tamamen ortadan kalktığı ve lif-matris bağlanmasının en iyi seviyeye ulaştığı görülmüştür.

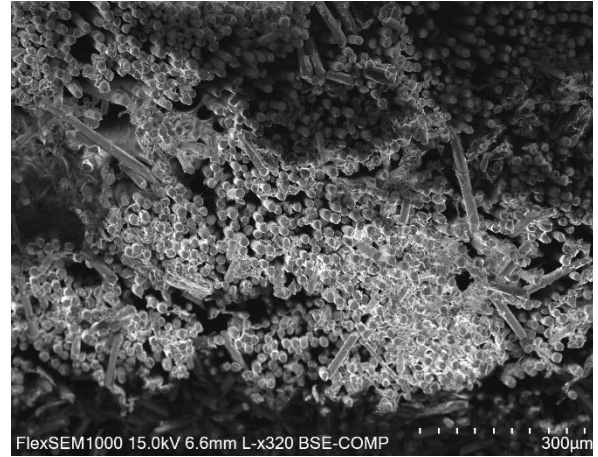
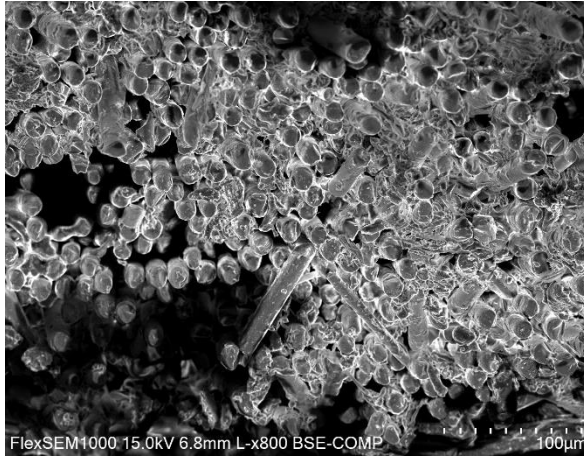




10 Bar- 5 dk



10 Bar-10 dk

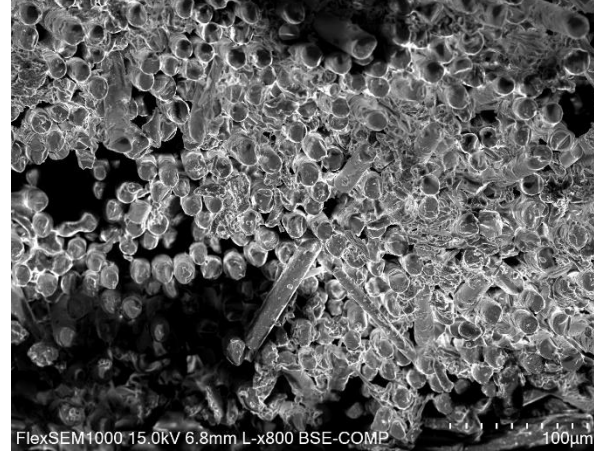
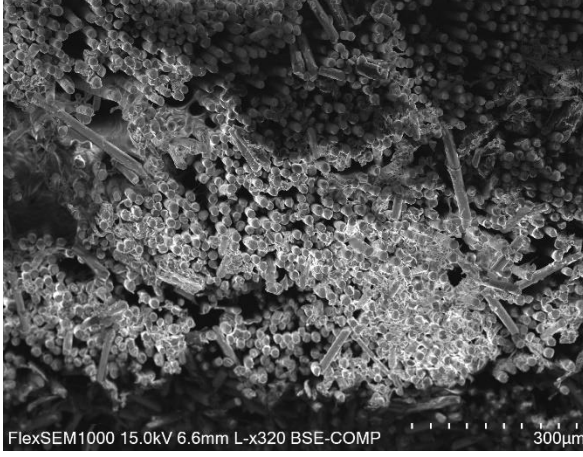


10 Bar-20 dk

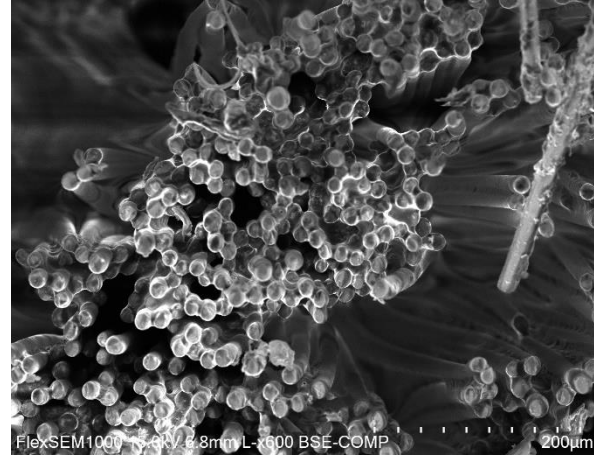
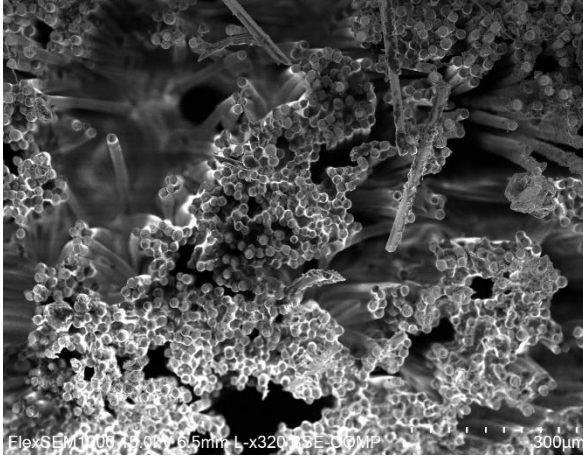
**Şekil 8. 10 Bar basınç ve farklı sürelerde konsolide edilmiş GFR-PP termoplastik kompozit levhalar SEM görüntüleri.**

Üretim süresinin uzun olması, homojen bir matris dağılımı sağlayarak mikroyapısal bütünlüğü optimize etmiştir. Bu numune, yüksek mekanik dayanım açısından en uygun üretim parametresini temsil etmektedir. Buna karşılık, en yüksek basınç değeri olan 30 Bar basınç altındaki numunelerin mikro yapısı 20 dk süre ile üretilen kompozitler için karşılaştırılmıştır (Şekil 9). 30 bar altında 20 dakika (30B20DK) süreyle üretilen numunede, yüksek basıncın lif-matris bağlanmasında olumsuz etkiler yarattığı tespit edilmiştir. Bazı bölgelerde liflerin aşırı sıkışması ve matrisin deformasyona uğraması, homojenliği azaltmış ve ara yüzey bağlanmasını zayıflatmıştır. Süre uzun olmasına rağmen, yüksek basıncın yarattığı mikroyapısal baskılar nedeniyle bağlanma kalitesinin sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak, süre artışı mikroyapısal bütünlüğü ve homojenliği iyileştiren önemli bir faktör iken, basınç artışı bu iyileşmeyi olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu sonuçlar, düşük basınç ve uzun süre

kombinasyonunun lif-matris tutunumunu optimize ederek termoplastik kompozitlerin üretimi için daha uygun bir yol sağladığını göstermektedir.



10 Bar- 20 Dk



30 Bar-20 Dk

Şekil 9. 10 ve 30 bar basınç ve 20 dk sürede konsolide edilmiş GFR-PP termoplastik kompozit levhanın SEM görüntüleri.

10 bar 20 dakika (10B20DK) ve 30 bar 20 dakika (30B20DK) üretim koşullarında elde edilen numunelerin mikroyapısal analizleri, süre ve basınç parametrelerinin fiber-matris bağlanması ve homojenliği üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. 10 bar 20 dakika sürede üretilen numune, matrisin fiberler arasında homojen bir şekilde yayıldığı ve boşlukların neredeyse tamamen ortadan kalktığı bir mikroyapı sergilemiştir. Bu numune, lif-matris bağlanması oldukça güçlü olup konsolidasyon sürecinin etkili bir şekilde tamamlandığı gözlemlenmiştir. Mikroyapıdaki bu homojenlik ve ara yüzey bütünlüğü, numunenin mekanik dayanım açısından yüksek bir performans sergilemesini desteklemektedir. Buna karşılık, 30 bar 20 dakika sürede üretilen numune, yüksek basıncın lif-matris sisteminde olumsuz etkiler yarattığı tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde, lifler arasındaki aşırı sıkışmanın ve matris deformasyonunun bağlanma kalitesini sınırladığı gözlemlenmiştir. Bu yüksek basınç koşulu, bazı bölgelerde fiber-matris homojenliğini bozmuş ve bağlanmanın zayıflamasına yol açmıştır. Boşluk miktarı azalmakla birlikte, fiberler arasındaki mikroyapısal bütünlük 10 bar altında üretilen numuneye kıyasla daha düşük kalmıştır.

#### 4. Tartışma ve Yorum

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen matrisli termoplastik kompozitlerin eğilme dayanımı üzerine, sıcaklık ve basınç gibi üretim parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren sektörlerde GFR-PP'nin kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla, malzeme üretiminde iki temel parametre incelenmiştir: pres basıncı 10, 20, 30 bar ve basınç altında kalma süresi 5, 10, 20 dakikadır. Eğme testleri için malzeme kalınlığı 4 mm olarak sabit tutulmuştur. Üç nokta eğme testleri, malzemenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. ASTM standartlarına uygun olarak hazırlanan test numuneleri ile elde edilen sonuçlar, üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini ortaya koymayı hedeflemiştir. Düşük basınç ve uzun süre kombinasyonu, homojenlik ve mikroyapısal bütünlük açısından daha avantajlı bir üretim koşulu sunmaktadır. 10 bar 20 dakika koşulu, lif-matris bağlanmasının optimize edildiği ve konsolidasyonun

tamamlandığı ideal bir durumu temsil ederken, 30 bar 20 dakika koşulu, yüksek basıncın mikroyapı üzerinde deformasyona yol açabileceğini ve mekanik performansı sınırlayabileceğini göstermektedir.

## Kaynaklar

- [1] O. Özdemir and H. Kandaş, "Cam lifi takviyeli polipropilen kompozitlerde kalınlığın ve sıcaklığın darbe davranışına etkileri," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 25, no. 110, pp. 103-112, 2018.
- [2] J. P. Jose and K. Joseph, "Advances in polymer composites: macro-and microcomposites–state of the art, new challenges, and opportunities," *Polymer Composites*, pp. 1-16, 2012.
- [3] K. Gündoğan and A. R. B. Özşarı, "Basıncılı İnfiltasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B4C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 11, no. 2, pp. 657-669, 2019.
- [4] S. Singh, M. Uddin, and C. Prakash, "Introduction, history, and origin of composite materials," in *Fabrication and Machining of Advanced Materials and Composites*, CRC Press, pp. 1-18, 2022.
- [5] A. Diniță et al., "Advancements in fiber-reinforced polymer composites: a comprehensive analysis," *Polymers*, vol. 16, no. 1, pp. 1-16, 2023.
- [6] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, and A. Elharfi, "Polymer composite materials: A comprehensive review," *Composite Structures*, vol. 262, 113640, 2021.
- [7] P. Mitschang, M. Blinzler, and A. Wöginger, "Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 14, pp. 2099-2110, 2003.
- [8] R. Watanabe, H. Hagihara, and H. Sato, "Structure-property relationships of polypropylene-based nanocomposites obtained by dispersing mesoporous silica into hydroxyl-functionalized polypropylene. Part 1: toughness, stiffness and transparency," *Polymer Journal*, vol. 50, no. 11, pp. 1057-1065, 2018.
- [9] J. Karger-Kocsis and T. Bárány, *Polypropylene Handbook*. Switzerland: Springer Nature, 2019.
- [10] E. Karadeniz, "Poliamid/polipropilen (PA/PP) karışımlarının yapı ve özellikleri," M.S. thesis, Marmara Univ., Istanbul, Turkey, 2006.
- [11] S. Alwekar, R. Ogle, S. Kim, and U. Vaidya, "Manufacturing and characterization of continuous fiber-reinforced thermoplastic tape overmolded long fiber thermoplastic," *Composites Part B: Engineering*, vol. 207, 108597, 2021.
- [12] J. Bijwe, J. Indumathi, and A. K. Ghosh, "On the abrasive wear behaviour of fabric-reinforced polyetherimide composites," *Wear*, vol. 253, no. 7-8, pp. 768-777, 2002.
- [13] R. Yahaya, S. Sapuan, M. Jawaid, Z. Leman, and E. Zainudin, "Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 24, pp. 2242-2254, 2014.
- [14] W. Obande, C. M. Ó Brádaigh, and D. Ray, "Continuous fibre-reinforced thermoplastic acrylic-matrix composites prepared by liquid resin infusion – A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 215, 108771, 2021.
- [15] A. P. d. Costa, E. C. Botelho, M. L. Costa, N. E. Narita, and J. R. Tarpani, "A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 4, no. 3, pp. 255-265, 2012.
- [16] M. Valente, I. Rossitti, and M. Sambucci, "Different production processes for thermoplastic composite materials: sustainability versus mechanical properties and processes parameter," *Polymers*, vol. 15, no. 1, 242, 2023.
- [17] M. W. Todd, "Carbon Fiber Reinforced PPS Thermoplastic Materials Implemented in Cost Sensitive Commercial Applications," in *Proc. of the 38th Int. SAMPE Symp.*, Anaheim, CA, USA, 1993, pp. 2055–2065.
- [18] K. Van Rijswijk and H. Bersee, "Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 3, pp. 666-681, 2007.

- [19] A. R. Offringa, "Thermoplastic composites—rapid processing applications," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 4, pp. 329-336, 1996.
- [20] Q. Chen, P. Boisse, C. H. Park, A. Saouab, and J. Bréard, "Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes," *Composite Structures*, vol. 93, no. 7, pp. 1692-1703, 2011.
- [21] A. Wedgewood, P. Granowicz, and Z. Zhang, "Multi-scale modeling of an injection over-molded woven fabric composite beam," *CAE Design and Failure Analysis of Automotive Composites*, vol. 166, pp. 19, 2014.
- [22] M. Çakır and B. Berberoğlu, "E-Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Elyaf Oranındaki Artış ile Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi," *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 5, no. 3, pp. 734-740, 2018.
- [23] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, "Glass fiber-reinforced polymer composites—a review," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 13, pp. 1258-1275, 2014.
- [24] A. Kabiri et al., "Glass fiber/polypropylene composites with potential of bone fracture fixation plates: manufacturing process and mechanical characterization," *Journal of Composite Materials*, vol. 54, no. 30, pp. 4903-4919, 2020.