İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 24(48), Güz 2025, 607-627.

İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

İstanbul Commerce University Journal of Science

http://dergipark.org.tr/ticaretfbd

Araştırma Makalesi / Review Article

TERMOFORM YÖNTEMİ İLE TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIAL PRODUCTION BY THERMOFORMING METHOD

Mehmet Fatih UZUNKÖK[1] **Ahmet EROL**[2]

Ramazan Çağıl ÇİÇEKDİKEN[3] **Muhammed YILDIZ**[4]

Furkan ALEMDAR[5]

https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1777919

Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
ahmeterol@aytekchillers.com

Geliş Tarihi (Received)
07.10.2025

Revizyon Tarihi (Revised)
20.10.2025

Kabul Tarihi (Accepted)
29.10.2025

Öz

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen çok fazlı yapılardır. Bu yapıların temel amacı, bileşenlerin avantajlı yönlerini bir arada kullanarak üstün mekanik, termal ve yapısal özellikler sağlamaktır. Polimer matrisli kompozitler; düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve kolay işlenebilirlikleri sayesinde özellikle uzay-havacılık, otomotiv ve savunma sanayiinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Bu grupta yer alan termoplastik matrisli kompozitler, termoset esaslı sistemlere kıyasla daha kısa çevrim süresi, geri dönüştürülebilirlik, uzun raf ömrü, yüksek darbe dayanımı ve çevreye duyarlı üretim süreçleriyle öne çıkmaktadır. Endüstride hızlı üretim ihtiyacını karşılayan ve karmaşık geometrilere uyum sağlayabilen termoform yöntemi, termoplastik kompozitlerin şekillendirilmesinde önemli bir teknik olarak dikkat çekmektedir. Termoform süreci; ön ısıtma, şekil verme ve kontrollü soğutma aşamalarından oluşmakta olup, sıcaklık, basınç ve süre gibi işlem parametreleri ürün kalitesi ve mekanik performans üzerinde doğrudan etkilidir. Bu çalışmada termoplastik kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamalarda avantajları, kullanım alanları ve özellikle termoform şekillendirme süreci ayrıntılı biçimde ele alınarak literatürdeki güncel gelişmeler sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Çalışma, termoform termoplastik kompozit üretiminde işlem parametreleri, üretim hataları ve optimizasyon stratejilerini karşılaştırmalı olarak analiz etmekte ve literatürdeki mevcut çalışmalar arasındaki temel eğilimleri ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, termoform, termoplastik kompozit malzeme, soğutma teknolojisi.

Abstract

Composite materials are multi-phase structures obtained by combining two or more materials with different physical and chemical properties. The main purpose of these structures is to utilize the advantageous aspects of each constituent together to achieve superior mechanical, thermal, and structural properties. Polymer matrix composites, owing to their low density, high specific strength, and ease of processing, are widely used in aerospace, automotive, and defense industries. Within this group, thermoplastic matrix composites stand out over thermoset systems with their shorter cycle time, recyclability, long shelf life, high impact resistance, and environmentally friendly manufacturing processes. The thermoforming method, which meets industrial demands for rapid production and adaptability to complex geometries, has become a prominent technique for shaping thermoplastic composites. The thermoforming process consists of three main stages—preheating, forming, and controlled cooling—and process parameters such as temperature, pressure, and time have a direct influence on product quality and mechanical performance. In this study, the advantages, application areas, and particularly the thermoforming process of thermoplastic composite materials are examined in detail, and recent developments in the literature are systematically evaluated. The study comparatively analyzes the process parameters, manufacturing defects, and optimization strategies in thermoformed thermoplastic composites, revealing the key trends among current research studies.

Keywords: Composite materials, thermoforming, thermoplastic composite material, cooling technology.

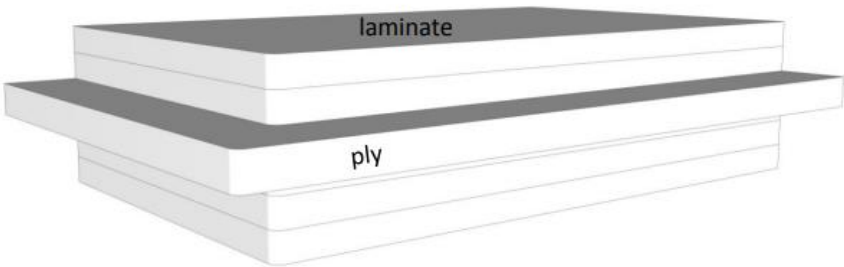
[1] Aytek Soğutma, Arnavutköy, 34555, İstanbul, Türkiye. mfuzunkok@aytekchillers.com.
[2] Aytek Soğutma, Arnavutköy, 34555, İstanbul, Türkiye. ahmeterol@aytekchillers.com.
[3] Aytek Soğutma, Arnavutköy, 34555, İstanbul, Türkiye. cagilcicekdiken@aytekchillers.com.
[4] Aytek Soğutma, Arnavutköy, 34555, İstanbul, Türkiye. muhammedyildiz@aytekchillers.com.
[5] Aytek Soğutma, Arnavutköy, 34555, İstanbul, Türkiye. furkanalemdar@aytekchillers.com.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği gibi farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin bir araya gelmesiyle elde edilen ve endüstride yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir. Bu yapılar, bileşenlerin üstün özelliklerinden yararlanarak daha yüksek performans sağlar. Kompozit malzemeler genel olarak bir matris ve bir takviye elemanından oluşur. Matris, yapısal bütünlüğü sağlarken; takviye elemanı mukavemet ve dayanım özelliklerini artırır. Matrisler genellikle metal, seramik ve polimer olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılırken; takviye elemanları karbon fiber, cam elyaf, aramid ve doğal fiberler gibi farklı türlerde olabilir (Campbell, 2010).

Polimer matrisli kompozitler, hafiflik ve dayanımın kritik öneme sahip olduğu uzay, havacılık, savunma ve otomotiv endüstrilerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Küresel ölçekte kompozit malzemelerin pazar büyüklüğü 37 milyar doları aşmış olup, yıllık büyüme oranı %10,6 seviyesindedir (R.P.L. Nijssen, 2015; Technavio, 2025). Bu büyüme, özellikle hassas geometrilere hızlı uyum sağlayabilen termoplastik kompozitlerin artan kullanımını desteklemektedir. Termoplastikler; hızlı üretim, düşük maliyet, geri dönüştürülebilirlik ve uzun raf ömrü gibi avantajlarıyla termoset malzemelere alternatif olarak öne çıkmaktadır (Krueger, 2024; Zeyrek, 2023). Ayrıca, çevre dostu yapıları ve üretim sırasında oluşan artık parçaların yeniden kullanılabilirliği sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (İslam, 2024).

1980'li yıllarda havacılık ve savunma endüstrileri ile malzeme tedarikçileri, termoset kompozitlerin yerine termoplastik kompozitlerin kullanılabilmesi için milyonlarca dolarlık yatırımlar yapmıştır (Campbell, 2010; Anka Kalkınma Ajansı, 2021). Sertlik, ısı dayanımı, kimyasal direnç ve mekanik stabilite gibi gereksinimler karşılanmış, ayrıca yüksek darbe dayanımı, hızlı şekillendirilebilirlik, daha düşük enerji tüketimi ve kısa ısıl işlem süreleri gibi avantajlar sayesinde termoplastikler öne çıkmıştır (Favaloro, 2012; Nishida, 2018). Bu özellikler, enerji tasarrufu ve çevresel uyum açısından termosetlere göre ek faydalar sunmaktadır (İslam, 2024).



Şekil 1. Kompozit Malzeme Şematik Gösterim (R.P.L.Nijssen, 2015).

Bununla birlikte, termoplastik kompozitlerin üretiminde karşılaşılan kalite problemleri, özellikle termoform yöntemiyle yapılan işlemlerde kritik öneme sahiptir. Yanlış işlem parametreleri; gözenek oluşumu, kalınlık düzensizlikleri, yüzey hataları ve mekanik performans kayıplarına yol açabilmektedir. Ayrıca üretim maliyetleri, montaj

zorlukları, yüksek dayanım gereksinimleri ve malzeme tedarikindeki sorunlar, yaygın kullanımın önündeki engeller olarak öne çıkmaktadır (Favaloro, 2012; Zeyrek, 2023). Bu nedenle otomasyon kontrollü üretim yöntemleri ve maliyet azaltıcı stratejiler, endüstriyel uygulamalarda güvenilirlik ve verimlilik sağlamak için kritik bir gereklilik haline gelmiştir.

Bu derleme çalışması kapsamında, termoform yöntemiyle üretilen termoplastik kompozitlerin üretim süreçleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş; işlem sıcaklığı, işlem süresi, malzeme özellikleri ve proses koşulları gibi nihai ürün kalitesini doğrudan etkileyen başlıca parametreler literatürdeki önemli bulgular ışığında analiz edilmiştir. Çalışmada ayrıca, delaminasyon, kristalizasyon ve yüzey deformasyonları gibi yaygın üretim hataları ile bunların önlenmesine yönelik yaklaşımlar ayrıntılı biçimde tartışılmıştır. Son olarak, literatür ışığında süreç verimliliğinin artırılması, enerji tüketiminin azaltılması, geri dönüştürülebilirlik olanaklarının değerlendirilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesinde üretim yönteminin etkileri tartışılmıştır.

2. TERMOPLASTİK KOMPOZİTLER VE TERMOFORM YÖNTEMİ

Termoplastik matrisli kompozitler, kısa çevrim süreleri, geri dönüştürülebilirlikleri ve yüksek mekanik performansları sayesinde modern mühendislik uygulamalarında giderek yaygınlaşmaktadır. Termoform yöntemi ise, bu malzemelerin şekillendirilmesinde hız, düşük maliyet ve geometrik esneklik sağlayan en verimli üretim tekniklerinden biridir. Aşağıda, termoplastik kompozitlerin yapısal avantajları, kullanım alanları ve termoform sürecinin temel prensipleri incelenmiştir**.**

2.1. Termoplastik Kompozitlerin Avantajları ve Kullanım Alanları

Fiber takviyeli kompozit malzemeler; zaman, işçilik ve maliyetin kritik öneme sahip olduğu uzay, havacılık, otomotiv ve savunma endüstrilerinin yanı sıra spor ve sağlık gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir otomobilde hangi parçaların kompozitten yapıldığı Şekil 2'de gösterilmiştir. Yüksek dayanım, hafif yapı ve düşük maliyet gibi üstün özellikleri, bu malzemelerin kullanım oranının her geçen yıl artmasını sağlamaktadır. Özellikle termoplastik kompozitler; sonsuz raf ömrü, hızlı ve düşük maliyetli üretim ile geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır (Krueger, 2024; Zeyrek, 2023).



Şekil 2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları (Group, 2025)

Bununla birlikte, üretim maliyetleri, montaj zorlukları ve yüksek dayanım gerektiren uygulamalardaki sınırlamalar, yaygın kullanımın önünde engel teşkil etmektedir. Ayrıca tasarım ekipmanlarının gerekliliği, malzeme bilgisi eksiklikleri, donanım kullanımı, personel eğitimi ve tedarik zincirindeki zorluklar kullanıcıları alternatif yöntemler aramaya yöneltmektedir (Favaloro, 2012).

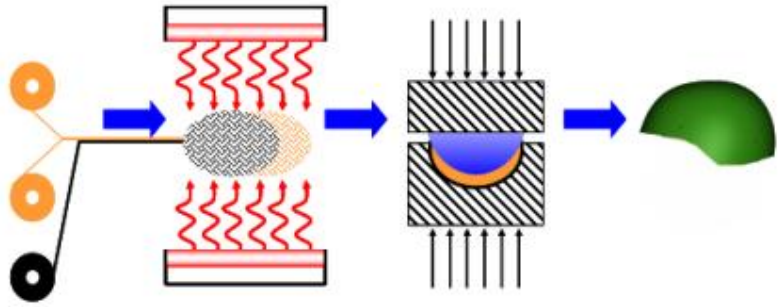
Termoplastik kompozitlerin en önemli avantajlarından biri, üretim sırasında ısıl işleme maruz kalma süresinin termoset malzemelere göre daha kısa olmasıdır. Benzer şekilde, uygulama, tamir ve tekrar işleme sırasında enerji tüketimi daha düşüktür. Ayrıca, termoplastikler yüksek darbe dayanımı ve kırılma direnci gibi mekanik üstünlükler sunmaktadır. Kalıplama sonrası termosetlere kıyasla daha az artık gerilmenin ortaya çıkması, dikkat çeken bir diğer avantajdır (Favaloro, 2012; Zeyrek, 2023; Nishida, 2018).

Termoplastik kompozitlerin üretim sürecinde oluşan artık parçalar, işlem sonrası ısıtılarak tekrar kullanılabilmektedir. Buna karşın, termoset malzemeler uygulama sırasında atmosfere organik bileşenler salarak kötü koku ve çevresel olumsuzluklara neden olmaktadır. Termoplastiklerin çevre dostu yapısı, sürdürülebilirlik açısından onları daha cazip hale getirmektedir (İslam, 2024; Zeyrek, 2023).

2.3. Termoform Yöntemi ve Üretim Süreci

Kompozit malzemelerin üretiminde birçok yöntem kullanılmaktadır. Elle yatırma, vakumlama, filament sarma ve kalıplama gibi teknikler çoğunlukla termoset esaslı kompozitlerde tercih edilmektedir. Fabrikasyon süreçlerine uygunluğu nedeniyle, kalıplama, pultrüzyon ve bant sarma yöntemleri ise termoplastik kompozitler için daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Çobanoğlu, 2021; Chawla, 1998). Özellikle uzay-havacılık, otomotiv ve savunma endüstrilerinde; hızlı üretim süreci, düşük maliyet ve karmaşık yapıların üretimine uygunluğu gibi avantajları nedeniyle, şekil 3'de gösterilen presli şekillendirme olarak da bilinen termoform yöntemi tercih edilmektedir. Şekil 3 sırsıyla matris ve takviye elamanın bir araya gelmesiyle oluşan kompozit yapının ön ısıtması; ön ısıtma sonrası kalıp içindeki kompozit yapının

ısıtılması, basınç ve sıcaklık altında tutulması ve soğutulması, son olarak nihai ürünün elde edilişini göstermektedir (Krueger, 2024; Çobanoğlu, 2021).



Şekil 3. Termoform Yöntemi ile Kompozit Ürün İmalatı (Walsh & Spagnuolo, 2005)

Termoform süreci üç temel aşamadan oluşmaktadır: ön ısıtma, form verme ve soğutma. Ön ısıtma, kompozit malzemenin kalıp yüzeyine yapışmasını engellemek ve homojen sıcaklık dağılımı sağlamak amacıyla uygulanır. Isıtma yöntemi; kızılötesi, iletim ve taşınım olmak üzere üç kategoride sınıflandırılır. Üretim hızı ve homojen sıcaklık sağlama kabiliyeti nedeniyle kızılötesi ısıtma yöntemi endüstride en çok tercih edilen yöntemdir.

Kompozit yapı, katman sayısı, kumaş yönlenmesi ve nihai geometrisine uygun olarak hazırlanır. Düz plaka halindeki bu yapı, ön ısıtmaya tabi tutulur ve ergime sıcaklığına ulaşan reçineye göre ısıtılmış kalıp içine yerleştirilir. Ardından, uygun basınç, sıcaklık ve süre değerlerinde kalıp içinde tutulur (Dutta, 1991; Zeyrek, 2023).

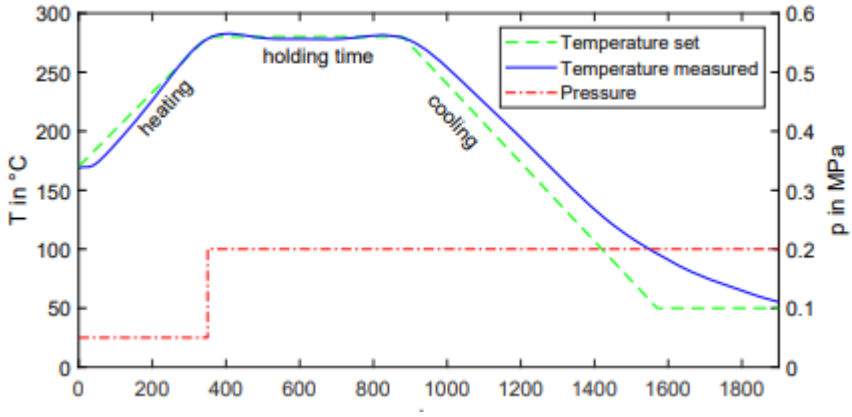
Form verme aşamasında, malzeme ön ısıtma sıcaklığının üzerine çıkarılarak kademeli bir şekilde ısıtılır. Örneğin, 80 °C ön ısıtma sıcaklığındaki bir kalıp, form verme sırasında yaklaşık 150 °C'ye kadar ısıtılır ve belirli bir süre bu sıcaklıkta basınç altında tutulur. Amorf, kristal veya yarı kristal yapıya sahip termoplastik kompozitlerde istenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için sıcaklık, basınç ve süre parametrelerinin uygun şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Nishida, 2018; Krueger, 2024).

Isıtma aşamasına benzer şekilde, kalıp ile birlikte kompozit plakanın soğutma işlemi de kademeli olarak gerçekleştirilir. Örneğin, 150 °C sıcaklığında olan bir sistem belirli bir soğutma hızında 120 °C'ye düşürülür. Bu sıcaklıkta plaka, işlem gereksinimlerine bağlı olarak belirli bir süre bekletilebilir; ardından yeniden ısıtılabileceği gibi, soğutma işlemine devam edilerek nihai sıcaklığa ulaşılabilir (Dutta, 1991).

Isıtma ve soğutma hızları, kalıp basıncı, tutma süresi gibi işlem parametreleri; kompozit malzemenin katman sayısı, fiber türü ve yapı özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu parametreler yalnızca toplam üretim süresini değil, aynı zamanda ürünün hata oranını da doğrudan etkilemektedir (Krueger, 2024).

Tüm prosese örnek olarak tek yönlü bazalt fiberden yapılmış 6 katmanlı bir kompozit kumaşın termoform sürecinin basınç, sıcaklık ve tutma süresi şekil 4'de görülmektedir.

Öncelikle kumaş ve matrisin oluşturduğu kompozit yapı ve kalıbın 170 °C' ye ön ısıtması yapılmıştır. 170 °C 'ye ulaşmış olan kompozit yapı ve kalıp 20 °C/ min hızında ısıtılmaya başlanmıştır. Kalıp ve kompozit yapı 280 °C 'ye ulaştığında kalıbın basıncı kompozit yapının istenilen şekli alması için arttırılmıştır. 530 saniye sabit basınç ve sıcaklıkta tutulan kompozit yapının süre sonunda 20 °C/ min hızında sıcaklığı 50°C' ye düşürülmüştür. Kompozit yapı üzerinde herhangi bir burulma, burkulma vb. gibi mekanik bir hataya sebebiyet vermemek adına basınç, yapı soğuyana kadar sabit tutulmuştur. Isıtma, tutma ve soğutma işlemlerinde kalıp sıcaklığını şartlandıran cihazların şekil 4'de yer alan yeşil kesikli çizgiyi referans almıştır. Referans değer ile kalıp sıcaklığı arasındaki farkın artması mekanik değer kaybına, geometrik ve yüzey hatalarına, verim kaybına ve maliyet artışına sebebiyet vermektedir. İşlem sonunda kalıp açılarak elde edilen kompozit ürünün kalite kontrol süreci başlamaktadır (Winhard, 2023).



Şekil 4. Termoform Yöntemi ile 6 Katmanlı Bazalt Fiber Takviyeli Kompozit Yapının Üretimi (Winhard, 2023)

Özetle, tek yönlü veya örme fiberlerin farklı açılarda katman katman dizilmesi ve matris ile bir araya getirilerek elde edilen kompozit plaka, ilk olarak ön ısıtmaya tabi tutulur. Ardından hesaplanan basınç altında belirlenen sıcaklık değerlerine kademeli olarak ısıtılıp soğutularak ve bu süreçte uygun bekleme süreleri uygulanarak form verme işlemi gerçekleştirilir. Nihai aşamada, parça ölçülerine göre kesimi yapılarak kullanıma hazır hale getirilir. Bu bütüncül üretim sürecine termoform yöntemi adı verilmektedir (Akkerman, 2015).

2.3. Termoform Termoplastik Kompozitlerde Araştırma Eğilimleri ve Literatürün Değerlendirilmesi

Uzay, havacılık, otomotiv ve savunma sanayilerinde; hafiflik, dayanıklılık, yüksek kimyasal direnç ve uzun raf ömrü gibi özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler, metal, plastik ve seramik yapılara kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Artan ihtiyaçlar ve gelişen teknoloji doğrultusunda, üniversitelerden sanayi Ar-Ge birimlerine kadar geniş bir yelpazede kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri üzerine kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan termoplastik

kompozitler ve termoform yöntemi üzerine yapılan çalışmalar genellikle çekme, darbe, üç nokta eğme gibi ASTM standartlarına uygun mekanik testleri içermektedir.

Literatürde, mekanik özellikler üzerine yapılan araştırmaların yoğun olduğu görülmektedir. Buna karşın, termo-mekanik davranışlara yönelik çalışmalar daha sınırlı olup, çoğu zaman gizli veya özel erişim gerektiren bilgileri içermektedir.

Nishida ve ark. (2018), karbon kumaş takviyeli kompozitlerde yaptıkları çalışmada, termoplastik malzemelerin termosetlere kıyasla daha üstün mekanik özellikler sunduğunu ortaya koymuştur.

Lessard ve ark. (2015), Taguchi metodunu kullanarak termoform sürecinde kalınlık, iç tabaka kayma gerilmesi ve kristalizasyon parametrelerini incelemiştir. Baskı kuvveti, süre, kalıp sıcaklığı ve ön ısıtma gibi parametrelerin birbirine bağlı değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Parça kalınlığının azalması homojen sıcaklık dağılımını kolaylaştırarak laminasyon oranını ve kesme mukavemetini artırmıştır. Kalıp sıcaklığının yüksek olması kristallenme derecesini ve buna bağlı olarak kesme mukavemetini artırırken, soğutma hızının artması kristallenmeyi azaltarak mukavemet kaybına yol açmıştır.

Genellikle tercih edilen polimer matrislerle lamine edilen kompozit kumaşların termoform yöntemi ile üretiminde Lessard ve ark. inde belirttiği gibi tek bir parametrenin diğer parametrelerden bağımsız olarak çalışması olanaksızdır. Kompozit bir yapı içerisinde lif hacminin matris hacmine oranı bile Young modülünün yanında delaminasyondan başlayarak birçok yüzey hatasına sebebiyet verebilmektedir. Bu sebepten tüm parametreleri bütün olarak düşünerek optimizasyon yapmak gereklidir (Jones, 1998).

Jar ve ark. (1991), 360–440 °C aralığında polimer matrisli karbon kumaş takviyeli kompozitlerde şekillendirme sırasında sıcaklığın mekanik davranışa etkisini araştırmıştır. Çalışma, yüksek sıcaklıklarda form verme işleminin mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bunun temel nedeni, matriksin düşük viskoziteye ulaşarak fiberlerle daha güçlü bir etkileşim kurmasıdır. Basınç altındaki eriyik matriksin boşluksuz olarak fiberleri sarması, kalıptan çıkan yapının mekanik performansını artırmıştır. Ancak delaminasyon gibi kritik hatalar, sürecin hassasiyetini ortaya koymaktadır.

Winhard ve ark. (2024), tek yönlü bazalt takviyeli kompozit yapıların termoform sürecini istatistiksel olarak incelemiştir. Tutma süresi ve kalıp basıncı arasında güçlü bir etki söz konusudur. Bu iki parametrenin aynı anda artışı elyaf yönlerindeki bozukluk nedeniyle çekme dayanımında ve kopma uzamasında ani düşüşe sebebiyet vermiştir. Çalışma pregpeg kalitesi, matris malzemeleri, tutma süresi, sıcaklığı ve basıncı gibi parametrelerin incelenmesine temel oluşturur niteliktedir.

Hwang ve ark. (2024), kalıp sıcaklığı, blank (ön şekillendirme) sıcaklığı ve tutma basıncını proses parametreleri olarak kabul ederek, dokuma karbon fiber termoplastik kompozitlerin geri yaylanma, deformasyon ve reçine davranışı üzerindeki etkilerini Taguchi ortogonal deney tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile incelemiştir. Çalışmada, tutma basıncının (~1,18 kPa) reçinenin lifler arasında etkin şekilde

yayılmasında ve lif-matris etkileşiminde en baskın parametre olduğu belirlenmiştir. Blank sıcaklığı (230 °C) ise matrisin akışkanlığı ve şekil alma kabiliyeti üzerinde kritik rol oynamaktadır. Buna karşılık, kalıp sıcaklığının etkisi daha sınırlı kalmış; dolayısıyla sistem davranışını ince ayarlamakta kullanılan bir parametre rolü üstlendiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, termoform sürecinin kalite optimizasyonunda çoklu hedefli (multi-objective) bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Bussetta & Correia (2018), yaptığı çalışmada uçak, otomotiv ve savunma sanayinde; kişisel koruyucu ekipman, kanat, dış gövde ve diğer parçaların üretiminde yüksek üretim hızı ve düşük maliyet avantajlarıyla tercih edilen termoplastik kompozitlerin avantaj, dezavantaj, üretim yöntemi ve uygulamalarına değinmiştir. Bu malzemelerde parametre optimizasyonu için çok sayıda deneme yapılması gerekliliği, zaman, maliyet ve işçilik açısından önemli dezavantajlar oluşturmaktadır. Bu nedenle üretim parametrelerinin optimizasyonu ve süreç otomasyonu üzerine yapılan araştırmaların sayısı giderek arttığını söylemek mümkündür. Ortaya çıkan üretim hatalarının azaltılmasında otomasyon sistemleri önemli bir rol oynamaktadır. Otomasyona ek olarak, termoform yönteminin iyi anlaşılması, son ürünün mekanik özelliklerine yönelik öngörülerin geliştirilmesine de katkı sağlamaktadır. Makro ve mikro ölçekli modeller üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları sayesinde buruşma, kayma, artık gerilme ve delaminasyon gibi hatalar mezo ölçekte analiz edilerek daha kaliteli ürün üretimi mümkün olmaktadır. Nümerik ve analitik modellemelerle sıcaklık, katman sayısı, basınç ve tutma süresi gibi parametreler üzerinde yapılan iyileştirmeler; üretim hızını artırmakla kalmayıp maliyet ve işçilik gereksinimlerini de azaltmaktadır.

Nardi ve ark. (2021) çalışması, termoplastik kompozit malzemelerin termoform yöntemiyle üretiminde fire oranının azaltılması ve makine öğrenmesi yöntemlerinden yararlanmanın önemini ortaya koymuştur. Araştırma, malzeme türü, kalınlık, katman sayısı ve kumaş yapısı gibi değişkenlerden yola çıkarak ısıtma, tutma ve soğutma aşamalarına ait sıcaklık ve süre parametrelerinin tasarım aşamasında hesaplanmasına yönelik bir strateji geliştirmeyi hedeflemiştir.

Benzer şekilde, Tan ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, delaminasyon, kırışma ve katman kayması gibi sorunların önüne geçmek amacıyla makine öğrenmesi temelli bir yöntem önerilmiştir. Deneme-yanılma yöntemine dayalı süreçlerin yerine yapay sinir ağları (ANN) kullanılarak hata analizi ve tersine mühendislik teknikleri ile üretim süreçlerinde optimizasyon ve öngörü sağlanabileceği gösterilmiştir.

Termoplastik kompozit malzemelerden üretilen parçalar, ağırlıklı olarak askeri ekipman, uzay-havacılık ve otomotiv sektörlerinde kritik öneme sahip bölgelerde kullanılmaktadır. Literatürde, üretim hızını artırmaya, maliyet ve hata oranlarını azaltmaya yönelik çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, derin teknik bilgilere erişim konusunda ciddi sınırlılıklar mevcuttur. Bunun temel nedenleri arasında, bu bilgilerin yüksek düzeyde gizlilik gerektiren uygulama alanlarında kullanılması ve firma ya da ülke ölçeğinde stratejik önem taşıması yer almaktadır.

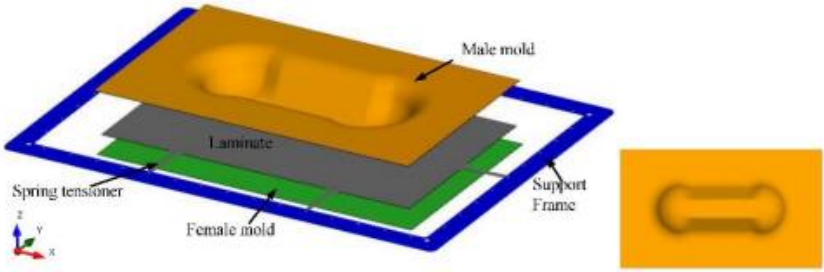
Know-how olarak tanımlanan bu bilgi birikiminin oluşturulması, büyük zaman, emek ve maliyet gerektirmektedir. Bu sebeple, literatürdeki çalışmalar çoğunlukla akademik düzeyde kalmakta ve uygulamaya yönelik kritik parametreler veya endüstriyel detaylara erişim mümkün olmamaktadır.

3. ÜRETİM PARAMETRELERİ

Termoplastik kompozitler; uzun raf ömrü, kısa çevrim süresi, geri dönüştürülebilir ve sürdürülebilir yapısı nedeniyle uzay-havacılık, otomotiv ve savunma sanayinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu avantajlara rağmen üretim sürecinde hata oranının azaltılması, çevrim süresinin kısaltılması ve maliyetin düşürülmesi için; ısıtma, soğutma, tutma süreleri ve malzeme özellikleri gibi parametrelerin iyi bilinmesi ve sürecin nitelikli personel kontrolünde yürütülmesi gerekmektedir. Aksi durumda işçilik süresi ve üretim maliyetlerinde artış kaçınılmazdır.

3.1. Isıtma ve Isıtma Süresi

Termoform işleminde ısı kontrolü, termal dengenin korunması, çevrim süresinin kısaltılması ve ürün kalitesinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir (Giray & Bailey, 2019). Bu nedenle, kalıp ve kompozit plakanın uygun ölçülerde hazırlanmasının ardından ön ısıtma işlemi uygulanır. Ön ısıtmanın amacı, kalıbı üretime hazırlamanın yanı sıra, kompozit içerisinde yer alan matrisin termoform için gerekli sıcaklık koşullarına getirilmesidir. Ayrıca, plaka yüzeyinde ve içinde bulunan mikro nemin uzaklaştırılması, kalıp içindeki hata oranını azaltır (Çobanoğlu & Ece, 2021; Ekşi & Erdoğan, 2014).



Şekil 5. Kompozit Plaka, Dişi ve Erkek Kalıp Yerleşimi (Tan & Nhat, 2023).

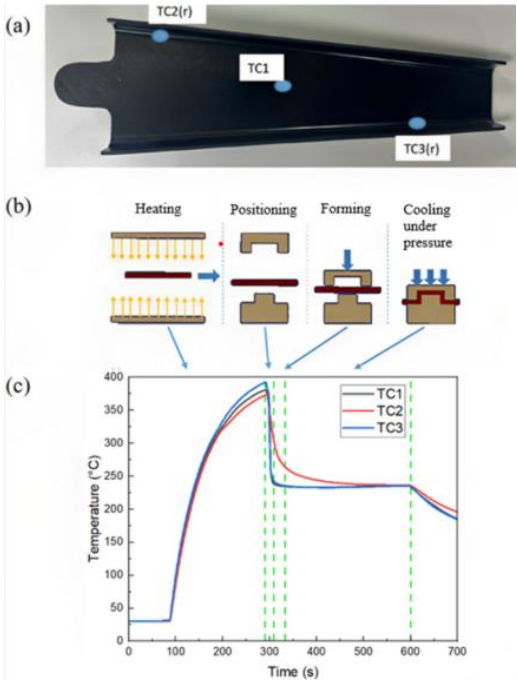
Ön ısıtma sonrası, kompozit plaka şekil 5'de görülen kalıp içine yerleştirilir ve malzeme türü, katman sayısı ve plaka kalınlığı gibi parametrelere bağlı olarak değişen basınç altında, matrisin erime sıcaklığına kadar ısıtılır. Basınç altında yapılan ısıtma, matrisin viskozitesini düşürerek yarı sıvı hale gelmesini sağlar ve bu sayede fiberlerin etkin bir şekilde emprenye edilmesine olanak tanır.

Isıtma süreci, hem mekanik özellikleri hem de mikro yapıyı doğrudan etkiler. Yüksek kalıp sıcaklıkları, düşük viskozitede matrisi kolayca fiberlere nüfuz ettirerek emprenye işlemini kolaylaştırırken; lokal bölgelerde delaminasyon oluşmasına neden olabilir. Düşük kalıp sıcaklıkları ise matrisin fiberlere tam olarak nüfuz edememesine bağlı olarak düşük mukavemet ve zayıf mikroyapıya yol açar (Valente ve ark., 2023).

3.2. Soğutma ve Soğutma Süresi

Metal malzemelerde olduğu gibi, şekil 6'da görüldüğü gibi termoplastik kompozitlerde de soğutma hızı, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Demir ve çelik gibi metallerde, soğutma hızı mikro tane boyutlarını etkileyerek sertlik, tokluk gibi özelliklerin ayarlanmasına olanak tanır. Bu nedenle yağda, suda, fanla veya doğal konveksiyonla soğutma gibi yöntemler kullanılarak istenen özellikler elde edilir. Benzer şekilde, termoplastik matrisli kompozitlerde de soğutma süreci yalnızca kalıp içerisindeki parçanın katılaşarak son şeklini almasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ısıl gerilmelerin kontrolü, ürün hatalarının önlenmesi ve nihai mekanik özelliklerin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir (Ekşi & Erdoğan, 2014).

Soğutma hızının kontrol edilmemesi, kompozit plakalarda iç gerilmelerin artmasına, katmanlar arası yapışmanın zayıflamasına ve delaminasyon riskinin yükselmesine yol açabilir. Ayrıca, hızlı soğutma kristallenme derecesini azaltarak mekanik performansı olumsuz etkilerken; çok yavaş soğutma çevrim süresini uzatarak üretim verimliliğini düşürmektedir. Bu nedenle, soğutma süresi ve hızının malzeme özelliklerine, kalıp sıcaklığına ve parça kalınlığına uygun şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 6. Termoform Sürecinin Prosese Bağlı Sıcaklık Değişimi (Çobanoğlu & Öz, 2024)

Soğutma işleminde süre ve hız, malzemeye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Termoform yönteminde kullanılan kompozit malzemenin yapısı, kalıp basıncı ve kristalizasyon derecesi, soğutma hızını doğrudan etkileyen başlıca parametrelerdir.

Miğfer ve dizlik gibi seri üretime uygun ürünlerin imalatında bu parametreler standartlaşmıştır. Standart üretimlerde belirlenen soğutma hızına göre kalıp soğutma (şekil 7 ‘de yer alan hava soğutmalı ve su soğutmalı), hava ile soğutma ve su sisi veya daldırma ile soğutma yöntemleri uygulanmaktadır.



Şekil 7. Kalıp Soğutmada Kullanılan Sırasıyla Su Soğutmalı ve Hava Soğutmalı Soğutma Grupları (Soğutma, 2025).

Su soğutmalı sistemlerde soğutma, koşullandırılmış su ve yağ gibi sıvıların kalıp içinde açılmış soğutma kanallarında dolaştırılmasıyla gerçekleştirilir ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Kontrol edilebilirliği yüksek olan bu yöntemde boyutsal stabilite oldukça iyidir. Hava ile soğutmada ise doğal veya zorlanmış hava akışı kalıp yüzeyinde dolaştırılarak soğutma sağlanır. Ancak bu yöntemde soğutma daha yavaş gerçekleştiği için büyük parçaların üretiminde hata riski artmakta, küçük boyutlu parçalar için ise uygun olmaktadır.

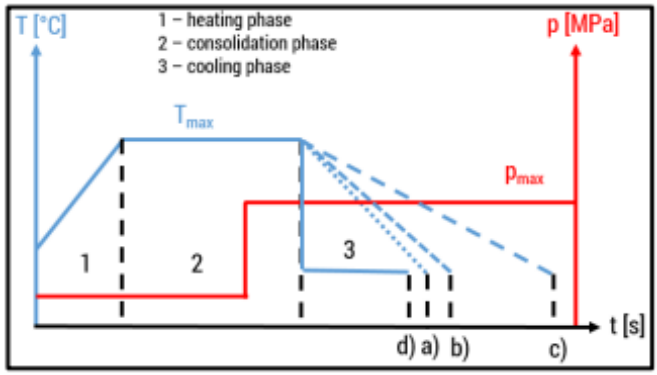
Ani ve yüksek soğutma hızları gerektiren uygulamalarda su sisi veya daldırma yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler iç gerilme oluşumu ve deformasyon riskini artırmaktadır. Kademeli, ani ve yavaş soğutma türlerine uygun yapısı sayesinde şekil 8’de olduğu gibi kalıp içi soğutma sistemleri, düşük hata riski ile en güvenilir yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Sonmez, 2002; Hwang, 2024).



Şekil 8. Kalıp Soğutma Sisteminin Şematik Gösterim.

Şekil 9’dan da anlaşılacağı üzere soğutma hızı, çeliklerde olduğu gibi termoplastik kompozitlerde de ürünün mukavemet değerlerini ve iç yapısını etkilemektedir. Yapının tanecik boyutunu belirleyen kristalizasyon derecesi doğrudan soğutma hızı ile ilişkilidir. Ayrıca, kesme ve çekme mukavemeti üzerinde etkili olduğu gibi, delaminasyon, çekme büzülmesi gibi yüzey ve geometrik kusurlar üzerinde de önemli bir parametredir. Şekilde gösterilen (a), (b), (c) veya (d) soğutma hızı eğrilerinde aynı

kompozit yapının farklı iç yapı ve yüzey durumlarının yanında farklı mekanik özelliklerde ortaya çıkacaktır. (Zopp, 2017).



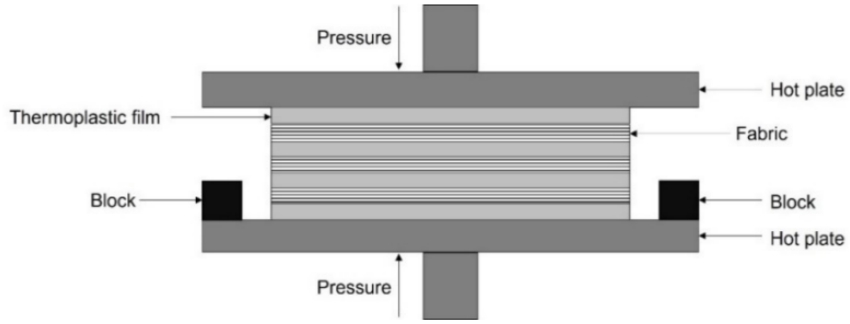
Şekil 9. Soğutma Hızlarının Kristalizasyon ve Mukavemete Etkisinin Karşılaştırılması (Zopp, 2017).

3.3. Kalıp Basıncı ve Tutma Süresi

Matris ve takviye elemanın yapısına bağlı olarak, termoplastik kompozit üretiminde sıcaklık, basınç ve tutma süresi; ürünün yüzey kalitesinden mekanik özelliklerine kadar belirleyici olmaktadır. Kalıp basıncı, matrisin fiberler tarafından emilmesi, katmanlar arasında kalan boşlukların giderilmesi ve ürün yüzeyinin kalıp formuna uygun şekilde hatasız üretilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Uygun basınç aralığı, matris ve takviye elemanın malzeme özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Plakanın basınç altında kalma süresi olarak tanımlanan tutma süresi ise, matrisin fiberleri tamamen sarması ve soğuma sırasında şekil bozukluklarının önlenmesi için gereklidir. Sürenin doğru belirlenmesi; üretim hızı, ürünün mekanik özellikleri, enerji tüketimi ve işçilik maliyetleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Bu nedenle, matris ve takviye elemanın özelliklerine bağlı olarak yapılan nümerik ve analitik hesaplamalar, parametrelerin belirlenmesinde ve süreç optimizasyonunda önemli faydalar sağlamaktadır (Kim, 2016; Valente & Rossitti, 2022).

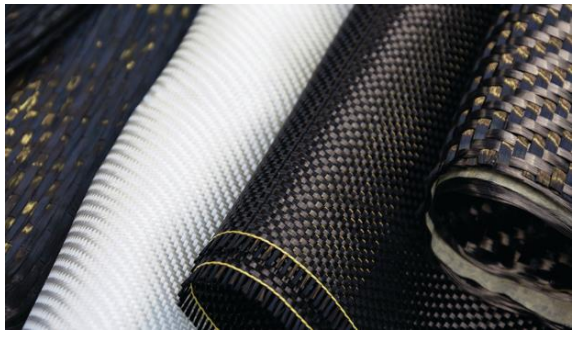


Şekil 10. Kalıp İçerisindeki Kompozit Plakanın Şekilsel Olarak Gösterimi (Valente & Rossitti, 2022).

3.4. Malzeme Özellikleri

Yukarıda belirtilen ısıtma, soğutma, basınç ve tutma süresi gibi parametreler, sistemin birbirine bağlı alt bileşenlerini oluşturmaktadır. Malzeme özellikleri ise bu parametre değerlerinin belirlenmesinde kritik bir değişkendir.

Matris, takviye elemanlarıyla birlikte kompozit yapıyı oluşturur. Şekil 11'de gözüktüğü gibi karbon fiber, cam fiber ve kevlar gibi kumaşların içinde bulunan fiberlerin etrafını sararak kompozit plakanın rijit bir yapıya sahip olmasını sağlar. Poliaktikasit ve polipropilen gibi düşük viskoziteye sahip matrisler, kısa sürede ve etkin biçimde emilim sağlarken; polieter keton gibi yüksek viskoziteye sahip matrisler için yüksek sıcaklık ve basınç gerekmekte, bu durum ise tutma süresinin uzamasına yol açmaktadır (Hwang & Yang, 2024).



Şekil 11. Kompozit İmalatında Kullanılan Takviye Elemanları: Kevlar, Cam Elyaf ve Karbon Fiber (Carbon, 2024).

Karbon fiber gibi lifler yüksek sıcaklıklara dayanabilirken, doğal lifler düşük geçirgenlik ve yüksek sıkıştırma direncine sahiptir. Örme ve dokuma yapılar ise kalıp basıncına karşı yüksek direnç gösterir. Bu tür lif ve kumaş davranışları, sıcaklık, kalıp basıncı ve tutma süresi üzerinde doğrudan etkilidir.

Genel olarak fiber ve matris yapısı değerlendirildiğinde; kristallenme, transkristalizasyon ve degradasyon gibi durumlara bağlı olarak soğutma ve ısıtma hızları ile kalıp ve ön ısıtma sıcaklıkları kritik önem taşımaktadır. Benzer şekilde, emprenye süreleri fiber hacmi ve plaka kalınlığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu hususlara dikkat edilmediğinde lif bozulması, yetersiz emprenye oranı ve yapısal bozukluklar ortaya çıkabilmektedir (Ouagne, 2009; Kim, 2016; Martin, 2020).

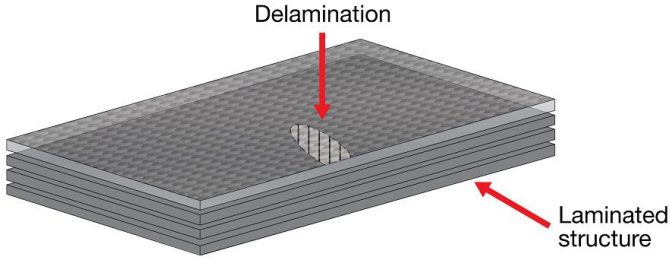
4. ÜRETİM HATALARI

Gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv, uzay-havacılık ve savunma sanayii gibi sektörlerde uzun ömürlü, düşük maliyetli, hafif ve yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyaç giderek artmıştır. Bu ihtiyaca yanıt olarak geliştirilen kompozit malzemeler, mühendislik uygulamalarında öne çıkan malzeme gruplarından biri haline gelmiştir. Talebin artması, malzeme tedarikinin ve dolayısıyla kompozit üretim hızının yükselmesini zorunlu kılmıştır. Bu noktada düşük maliyet, işçilik ve zaman açısından avantaj sağlayan termoform yöntemi öne çıkmaktadır. Ancak bu yöntemde üretim hatalarının azaltılması için süreç parametrelerinin analitik ve nümerik olarak dikkatle incelenmesi gerekmektedir (Çakıcı, 2021; Winhard, 2023).

4.1. Delaminasyon

Delaminasyon, kompoziti oluşturan plakaların birbirinden ayrılması, kumaş veya fiberlerin lokal ya da yüzeysel olarak matrisle yeterli bağ kuramadan dış ortamla temas etmesi şeklinde tanımlanır. Kompozitlerde en sık rastlanan hata türlerinden biridir. Genellikle yetersiz matris miktarı veya plaka içinde kalan mikro nemin uzaklaştırılamaması nedeniyle ortaya çıkar. Şematik olarak gösterimi şekil 12'de paylaşılmıştır.

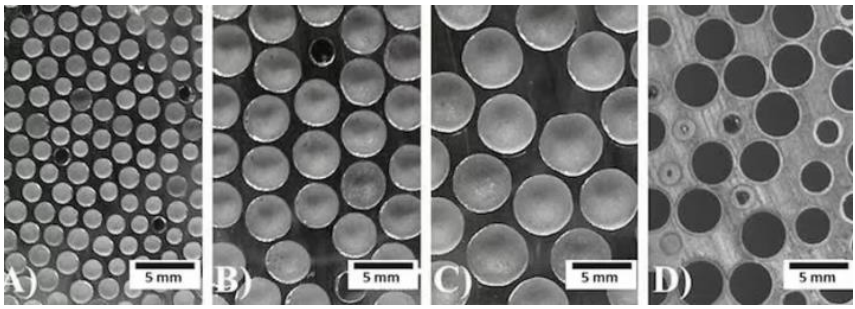
Sıcaklık dağılımı ve matrisin viskozitesi de delaminasyon oluşumunu etkileyen parametreler arasındadır. Literatürde yapılan birçok çalışma, delaminasyonun basma, çekme ve darbe gibi mekanik özellikler üzerinde doğrudan olumsuz etkiler yarattığını göstermiştir. Bu durum malzeme ömrünü de ciddi biçimde kısaltmaktadır. Delaminasyona maruz kalan bölgelerde burulma olasılığının artması, arayüz ve ara katmanlarda fiber kırılmalarına yol açarak mekanik bütünlüğü zayıflatmaktadır. Kalıp sıcaklığı, basınç, ön ısıtma ve tutma süresinin doğru seçilmesi, delaminasyon ihtimalini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Ateş & Baş, 2021; Chermoshentseva, 2016; Okolie, 2023).



Şekil 12. Delaminasyon Olayının Şematik Olarak Gösterimi.

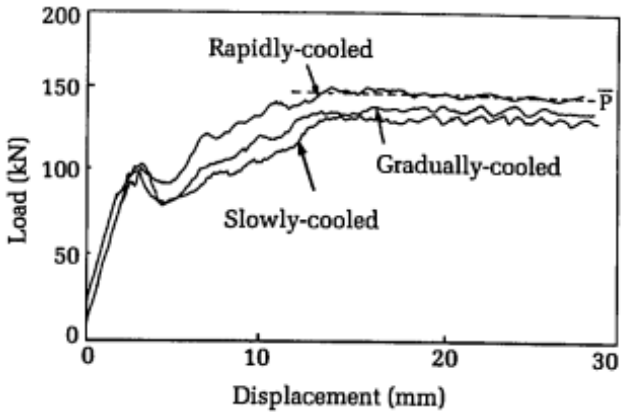
4.2. Kristalizasyon

Kristalizasyon, çelik malzemelerde olduğu gibi termoplastiklerde de ısıl işleme (ısıtma-soğutma) maruz kalma sonucunda oluşur ve malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Erimeden soğuma sürecinde de ortaya çıkabilen kristalizasyon, soğutma hızı ile ilişkilidir.



Şekil 13. Kristalizasyon Etkisinin Tanecik Boyutuna Yönelik Gösterimi (Nordqvist, 2025)

Hızlı soğutma kristalizasyon seviyesini düşürür ve daha küçük tanecik boyutu oluşmasına yol açar. Küçük tanecik boyutu kırılma tokluğunu artırırken, yavaş soğutma veya izotermal koşullar ise matrisçe fakir bölgelerin oluşmasına, büyük tanecik boyutlarına ve düşük kırılma tokluğuna sebep olur. Bu nedenle, şekil 13'de belirtilen kristalizasyon seviyelerinin uygun değerlerde tutulması için ısıtma-soğutma sürelerinin, sıcaklıklarının ve hızlarının doğru şekilde belirlenmesi gereklidir (Krueger, 2024; Ahmadi, 2023).



Şekil 14. Soğutma Hızına Bağlı Olarak Karbon Fiber ve Polimer Epoksi Malzemenin Çekme Testi Altındaki Davranışı (Hamada, 1995).

4.3. Çatlak Oluşumu

Çatlak oluşumu, termoplastik kompozitlerin kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Keskin köşeler, delikli parçalar, üretim sırasında meydana gelen uniform olmayan deformasyonlar ve ısıl işlemlerden kaynaklanan artık gerilmeler, çatlak oluşumunun başlıca sebeplerindendir.

Delaminasyon sonucu fiberlerin kırılması veya yüzey boşlukları da çatlaklara zemin hazırlayabilir. Isıl işlemler sırasında kristalizasyon kaynaklı hacimsel değişimler ve genleşmeler, iç gerilmeler oluşturarak transvers çatlaklara ve katmanlar arası delaminasyona yol açabilmektedir. Ayrıca düşük sıcaklıklarda yapılan laminasyon işlemleri veya yetersiz kalıp sıcaklıkları, fiber ve laminanın yeterli emprenye olamamasına bağlı olarak katmanlar arası çatlak oluşumunu hızlandırır (Chawla, 2008; Çakıcı, 2021; Krueger, 2024).

4.4. Yüzey ve Geometri Bozuklukları

Termoplastik kompozitlerin termoform yöntemiyle üretimi oldukça hassas bir süreçtir. İşlem adımlarının eksik takibi, yüzey ve geometri bozukluklarına neden olabilir. Bu tür kusurlar mekanik dayanımı azaltmakla birlikte, korozyon ve kimyasal direncin zayıflamasına da yol açar.

Katmanların düzgün yerleştirilmemesi, uniform olmayan boyutlara, yüzey dalgalanmalarına ve boşluklara sebep olur. Ön ısıtma sırasında veya kalıp içinde matrisin yeterli emprenye yapamaması, yüzey kusurlarıyla birlikte mekanik özelliklerde de zayıflamaya yol açar. Basınç altındaki plaka üzerinde küçük sıcaklık değişimleri yüzeyde burulma, buruşma ve çekmeye; iç yapıda ise bozulmalara sebebiyet verebilir (Chawla, 2008; Krueger, 2024).

Yetersiz ön ısıtma sırasında uzaklaştırılamayan nem, kalıp içinde gaz boşlukları oluşturur ve reçine akışını engelleyerek yüzey pürüzlülüğüne yol açar. Bu kesintili yapı, mekanik dayanımı düşürür. Fiber zengin bölgelerde matrisin yetersizliği veya düşük kalıp basıncı, laminalar arası bağı zayıflatarak delaminasyon riskini artırır. Yetersiz emprenye ise katmanlı yapının genel dayanımını azaltır (Cai, 2012; Miao & Dai, 2021).

5. SONUÇ VE ÖNERILER

5.1. Sonuç

Bu çalışma ile endüstriyel uygulamalar ve bilimsel literatür göz önüne alınarak termoplastik kompozit malzemelerin üretimi ve üretim süreçleri incelenmiştir. Mevcut literatür, termoform termoplastik kompozitlerde sıcaklık, basınç ve tutma süresi gibi temel parametrelerin ürün kalitesi üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde ortaya koysa da bu çalışmaların büyük bölümü belirli malzeme türlerine odaklanmakta ve bulguların genellenebilirliği sınırlı kalmaktadır. Ayrıca, üretime etki eden parametrelerin etkileşimleri çoğu zaman bağımsız değişkenler olarak ele alınmakta, sistematik optimizasyon stratejileri ise nadiren kullanılmaktadır. Gelecekteki araştırmaların çok değişkenli deneysel tasarımlar ve sayısal modelleme teknikleriyle desteklenmesi önem arz etmektedir.

Diğer yandan termoplastik kompozitler; uzay-havacılık, otomotiv ve savunma sanayilerinde artan ihtiyaçları karşılamakla birlikte, endüstriyel açıdan sürekli gelişime açık bir alandır. Yüksek talebin karşılanabilmesi, üretim sırasında ortaya çıkabilecek hataların azaltılmasıyla mümkündür. Hataların en aza indirilmesi yalnızca üretim hızını artırmakla kalmaz, aynı zamanda maliyet ve işçilik yükünü azaltarak ekonomiye katkı sağlar.

Üretim süreci ve karşılaşılan hatalar incelendiğinde, öne çıkan konulardan biri nitelikli insan kaynağı ihtiyacıdır. Deneyimli personelin dahil olduğu süreçlerde hata oranları düşmekte, kullanılan malzemenin özelliklerinin bilinmesiyle kalıp basıncı, tutma süresi, ön ısıtma ve kalıp sıcaklığı gibi parametrelerin doğru tayini sağlanmaktadır. Şekil 15'de belirtilen ısıtma hızı, soğutma hızı, kalıp basıncı ve tutma süresi gibi parametrelerin yol açacağı olası hataların da doğru şekilde analiz edilmesi ve yorumlanması da üretim ve sonrasında karşılaşılan sorunların büyük ölçüde önüne geçilebilmektedir. Mekanik özelliklerin azalmasına, geometrik ve yüzey kusurlarına sebep olan problemlerin yaklaşık %40'ının ısı kontrolünden kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu durum, termoform yöntemi ile yapılan üretimde ısı kontrolünün kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Doğru tasarlanmış ısıtma ve soğutma sistemleriyle imalat verimliliği önemli ölçüde artırılabilir.

	Delaminasyon	Kristalizasyon	Çatlak Oluşumu	Yüzey ve Geometrik Bozukluk
Isıtma Hızının Artması	Artar	Azalır	Artar	Artar
Soğutma Hızının Artması	Artar	Azalır	Artar	Artar
Kalıp Basıncının Artması	Azalır	Artar	Artar	Artar
Tutma Süresinin Artması	Azalır	İyileşir	Azalır	Azalır

Şekil 15. Parametrelere Bağlı Olarak Hata Oluşumun Artış ya da Azalışı.

5.2. Öneriler

- Termoplastik kompozitlerin termoform yöntemi ile üretimi üzerine yapılan bu çalışmada, üretim hatalarının azaltılması, süreç verimliliğinin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi için kritik parametreler belirlenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda hem akademik araştırmalara hem de endüstriyel uygulamalara yön verecek öneriler aşağıda sunulmaktadır:
- Parametre Optimizasyonu: Üretim sürecinde sıcaklık, basınç ve soğutma hızı gibi parametrelerin malzeme özellikleriyle uyumlu şekilde optimize edilmesi için hem deneysel hem de sayısal simülasyon çalışmaları yürütülmelidir.
- Otomasyon ve Makine Öğrenmesi: Üretim sürecinde hata oranlarının azaltılması ve verimliliğin artırılması amacıyla otomasyon sistemleri ile yapay zekâ destekli proses kontrol yöntemlerinin entegrasyonu teşvik edilmelidir.
- Malzeme Geliştirme: Yüksek performanslı, yeni nesil matris ve takviye malzemelerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar desteklenmeli ve endüstriyel ölçekli uygulamalar için uygun çözümler üretilmelidir.

- Çevresel Sürdürülebilirlik: Geri dönüştürülebilir termoplastik kompozitlerin kullanım alanlarının genişletilmesi, atık yönetimi için yenilikçi stratejilerin geliştirilmesi ve çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmalar önceliklendirilmelidir.
- Endüstri-Akademi İş birliği: Bilgi eksikliklerinin giderilmesi ve ileri düzey çözümler üretilmesi için özel sektör ve akademi arasında ortak araştırma projeleri ve teknoloji transferi faaliyetleri desteklenmelidir.

Yazarların Katkısı
Bu çalışmada 1. yazar fikir, eleştiri, bilgisayar ortamının sağlanması konusunda katkıda bulunmuştur. 2. yazar araştırma, veri toplama, analiz, kaynak taraması ve makalenin yazımı konusunda katkı sağlamıştır. 3, 4 ve 5. yazarlar yorum, fikir ve eleştiri konusunda katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı
Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı
Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Ahmadi, F. (2023). Study of process induced stresses and deformation in termoplastic matrix compozite . *Advanced Structural Analysis and Design using Composite Materials*.

Anka Kalkınma Ajansı. (2021). *Ankara İli Savunma Sanayiinde Kullanılan Yüksek Katma Değerli Kompozit Malzmemenin Geri Dönüşümü Ön Fizibilite Raporu KUllanılan Yüksek Katma Değerli Kompozit Malzemenin* . T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.

Ateş, E., & Baş, O. (2021). Havacılık Malzemelerinde Rönesans. *Bilim ve Teknik*.

Bussetta, P., & Correia, N. (2018). Numerical forming of continuous fibre reinforced composite material: A. *Composites Part A*.

Cai, X. (2012). Determination of Process Parameters for the Manufacturing of Thermoplastic . *Master of Applied Science*.

Campbell, F. (2010). *Structural Composite Materials.* ASM International.

Carbon, E. (2024). *Top 17 Graphite Powder Uses you Should Know.* East Carbon: https://www.eastcarb.com/graphite-powder-uses/ adresinden alındı

Chawla, K. K. (2008). Processing of fibre reinforced thermoplastic compozsites. *International Materials Reviews*.

Chen, H. (2021). A focused review on the thermo-stamping process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*.

Chermoshentseva, A. S. (2016). The behavior of delaminations in composite materials experimental results. *Materials Science and Engineering*.

Çakıcı, U. G. (2021). Üretim Parametrelerinin Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.

Çobanoğlu, M., & Ece, R. (2021). Thermoformıng Process Parameter Optımızatıon Of Thermoplastıc. *Eskişehir Technıcal Unıversıty Journal Of Scıence And Technology*.

Çobanoğlu, M., & Öz, Y. (2024). Investigation of thermoforming processes of aerostructures:Simulation and microstructural analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

Ekşi, O., & Erdoğan, E. (2014). Effects of manufacturing defects on thermoformed product . *Usak University Journal of Material*.

Favaloro, M. (2012). *A Comparison of the Environmental Attributes.* Ticona.

Giray, M., & Bailey, S. (2019). Developments in lightweight composite ballistic. *Güvenlik Bilimleri Dergisi*.

Group, T. (2025). *TORAY INDUSTRIES, INC.* Toray: https://www.toray.com/contact/?s=https%3A%2F%2Fwww.toray.com%2F adresinden alındı

Hamada, H. (1995). Effect ofCooling Rate on the Energy Absorption Capability ofCarbon FibrelPEEK Composite Tubes. *Polymers 8' Polymer Composites*.

Hwang, S.-F. (2024). Effects of Thermoforming Parameters on Woven Carbon Fiber Thermoplastic Composites. *Materials*.

Hwang, S.-F., & Yang, C.-Y. (2024). *Effects of Thermoforming Parameters on Woven Carbon Fiber Thermoplastic Composites.* Yunlin: Materials.

Islam, S. (2024). *Thermoset and thermoplastic polymer composite with datepalm fiber and its behavior: A review.* Wiley.

Jar, B. (1991). A STUDY OF THE EFFECT OF FORMING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF CARBONFIBRE/PEEK COMPOSITES. *Composites Science and Technology*, 7-19.

Jones, R. M. (1998). *Mechanics of Composite Materials.* Taylor & Francis.

Kim, S. H. (2016). Direct impregnation of thermoplastic melt into flax textile reinforcement for semi-structural composite parts. *Industrial Crops and Products*.

Krueger, R. (2024). *Advances in Thermoplastic Composites Over Three Decades.* Virginia: NASA.

Lessard, H., Lebrun, G., & Benkaddour, A. (2015). Influence of process parameters on the thermostamping of a [0/90]12. *Composites: Part A*, 59-68.

Martin, I. (2020). Advanced Thermoplastic Composite Manufacturing by In-Situ Consolidation: A Review. *Journal of Composites Science*.

Miao, Q., & Dai, Z. (2021). Effect of consolidation force on interlaminar shear strength of CF/PEEK laminates manufactured by laser-assisted forming. *Composite Structures*.

Nardi, D. (2021). Design analysis for thermoforming of thermoplastic composites: prediction. *Composites Part C*.

Nishida, H. (2018). Thermoplastic vs. thermoset epoxy carbon textile composites. *IOP Conference Series:Materials Science and Engineering*.

Nordqvist, J. (2025). *Market Business News*. Market Business News: https://marketbusinessnews.com/about-us/ adresinden alındı

Okolie, O. (2023). Manufacturing Defects in Thermoplastic Composite Pipes and Their Effect on the in-situ Performance of Thermoplastic Composite Pipes in Oil and Gas Applications. *Applied Composite Materials*.

Ouagne, P. (2009). Analysis of the Film-stacking Processing Parameters for PLLA/Flax Fiber Biocomposites. *Journal of Compozsite Materials*.

R.P.L.Nijssen. (2015). Composite Materials An Introduction. *Inholland University of Applied Sciences*.

Soğutma, A. (2025). *Chiller su soğutma üniteleri*. Aytek Soğutma: https://www.aytekchillers.com/urunler.asp?proses_kod=Chiller/su/sogutma/unitel eri adresinden alındı

Sonmez, F. O. (2002). Optimal post-manufacturing cooling paths for thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.

Tan, L. B., & Nhat, N. (2023). Prediction and Optimization of Process Parameters for Composite Thermoforming Using a Machine Learning. L. B. Tan içinde, *Prime Archives in Polymer Technology.* Vide Leaf.

Technavio. (2025). *Composite Materials Market Analysis, Size, and Forecast 2025-2029:.* Technsvio.

Toray Industries. (tarih yok). *TORAY Innovation by Chemistry*. Toray Industries: https://www.cf-composites.toray/products/processed/automotive.html adresinden alındı.

Valente, M., & Rossitti, I. (2022). Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Parameter. *Polymers*.

Walsh, S., & Spagnuolo, D. (2005). The Development of a Hybrid Thermoplastic Ballistic Material With Application to Helmets. *Army Research Laboratory* .

Winhard, J. (2023). *Effects of Process Parameters in Thermoforming of Unidirectional.*

Zeyrek, B. Y. (2023). *Recycle potential of thermoplastic composites.* Niğde: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.

Zopp, C. (2017). Influence of the cooling behaviour on mechanical properties of carbon fibre-reinforced thermoplastic/metal laminates. *Technologies for Lightweight Structures*.