



CAM FİBER TAKVİYELİ PLASTİK MALZEMELERİN DELAMİNASYON DURUMUNUN İNCELENMESİ

Nergizhan ANAÇ, Esra ŞEN, Eren GÜL, Esra ACAR,
Muhammed Erdem YILDIZ, Oğuz KOÇAR*, Furkan PARMAKSIZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Anahtar Kelimeler Öz

Cam Elyaf Takviyeli Plastik, Delaminasyon, 3B Baskı, Elle Yatırma, Sıcak Presle Kalıplama. Cam fiber malzemeler ekonomikliği ve hafif olması sebebiyle endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir. Cam fiber kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin ve montaj sırasında oluşabilecek olası hasar mekanizmalarının (delik delmede delaminasyon gibi) bilinmesi tasarımcılar için önemlidir. Bu çalışmada farklı imalat teknikleriyle üretilmiş (sıcak presle kalıplama, 3B baskı ve elle yatırma) cam elyaf takviyeli plastiklerde (CTP) delik delme işleminden sonra oluşan delik çıkış hasarları incelenmiştir. Deneylerde işlem parametreleri olarak üç farklı ilerleme hızı (200, 400 ve 600 mm/dak) ve iki farklı takım dönme hızı (1500 ve 3000 dev/dak) kullanılmıştır. Delik delme işlemi sonunda delaminasyon oranları hesaplanmıştır. En düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip deney numunelerinin görsel muayeneleri yapılmıştır. Ek olarak, 3B yazıcıda delikli olarak basılmış ve sonradan matkapla delinmiş iki ayrı CTP malzemenin delik delme işlemi karşılaştırılmıştır. Sıcak presle kalıplama tekniği ile üretilen parçalarda takım ilerleme hızı artarken delaminasyon oranı artmış, 3B baskı tekniği ile üretilen parçalarda ilerleme hızının artmasıyla delaminasyon oranı düşmüştür. Elle yatırma tekniği ile üretilen parçalarda ise düşük takım dönme hızlarında delaminasyon oranının arttığı belirlenmiştir. Ayrıca delaminasyonda işlem parametrelerinin etkisi kadar malzeme üretim tekniğinin de etkili olduğu görülmüştür. Sıcak presle kalıplama ve elle yatırma tekniğiyle üretilen cam elyaf takviyeli kompozitlerde delik delme işlem parametrelerinin delaminasyona etkileri benzerken, 3B yazıcı ile üretilmiş parçalar farklı davranış sergilemiştir.

INVESTIGATION OF DELAMINATION OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC MATERIALS

Keywords

Glass Fiber Reinforced Plastic, Delamination, 3D Printing, Hand Lay-Up Technique, Hot Press Molding.

Abstract

Glass fiber materials have a wide range of applications in industry due to their affordability and light weight. It is important for designers to know the mechanical properties of glass fiber composite materials and possible damage mechanisms that may occur during assembly (such as delamination in drilling). In this study, hole exit defects in glass fiber reinforced plastics (GRP) produced by different manufacturing techniques (hot press molding, 3D printing and hand lay-up) after hole drilling were investigated. In the experiments, three different feed rates (200, 400 and 600 mm/min) and two different tool rotational speeds (1500 and 3000 rpm) were used as process parameters. At the end of the drilling process, delamination rates were calculated. The specimens with the lowest and highest delamination rates were visually inspected. In addition, the hole drilling process was compared in two different GRP materials, which were printed as perforated on a 3D printer and then drilled with a drill. The delamination rate increased with increasing tool feed rate in parts produced by hot press molding technique, while the delamination rate decreased with increasing feed rate in parts produced by 3D printing technique. It was determined that the delamination rate increased at low tool rotation speeds in parts produced by hand lay-up technique. It was also observed that the material production technique was as effective as the process parameters in delamination. While the effects of drilling process parameters on delamination in glass fiber reinforced composites produced by hot press molding and hand lay-up techniques were similar, the parts manufactured using 3D printer exhibited different results.

Alıntı / Cite

Anaç, N., Şen, E., Gül, E., Acar, E., Yıldız, M.E., Koçar, O., Parmaksız, F., (2025). Cam Fiber Takviyeli Plastik Malzemelerin Delaminasyon Durumunun İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 234-249.

* İlgili yazar / Corresponding author: oguz.kocar@beun.edu.tr, +90-372-291-1181

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
N.Anaç, 0000-0001-6738-9741	Başvuru Tarihi / Submission Date	16.07.2024
E.Şen, 0009-0009-0819-5387	Revizyon Tarihi / Revision Date	05.12.2024
E.Gül, 0009-0007-3322-2717	Kabul Tarihi / Accepted Date	11.01.2025
E.Acar, 0009-0008-6554-729X	Yayın Tarihi / Published Date	20.03.2025
M.E.Yıldız, 0009-0008-4212-9140		
O.Koçar, 0000-0002-1928-4301		
F.Parmaksız, 0000-0001-7002-9157		

INVESTIGATION OF DELAMINATION OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC MATERIALS

Nergizhan ANAÇ, Esra ŞEN, Eren GÜL, Esra ACAR, Muhammed Erdem YILDIZ, Oğuz KOÇAR†, Furkan PARMAKSIZ

Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Zonguldak, Türkiye

Highlights

- The mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials produced by different manufacturing techniques were compared.
- Delamination rates of composites produced by hand lay-up, hot press molding and 3D printing were compared.
- Delamination rates were found to vary according to the production technique.

Graphical Abstract

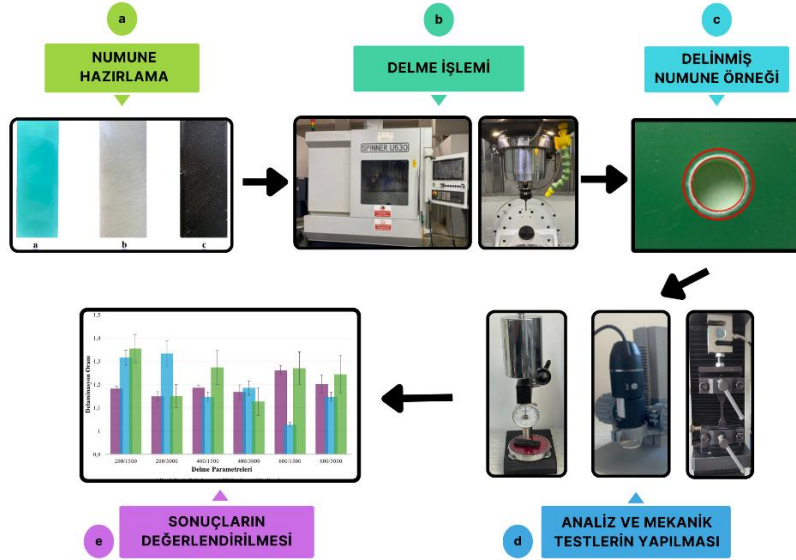


Figure. Flowchart of the drilling

Purpose and Scope

In this study, the mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials produced by three different manufacturing techniques and the delamination factor during drilling were compared.

Design/methodology/approach

In this study, glass fiber reinforced composite materials produced using hand lay-up, hot press molding and 3D printing techniques were used. Tensile tests and hardness tests were performed to determine the mechanical properties of the composite materials. The specimens were drilled at 200, 400 and 600 mm/min feed rate and 1500 and 3000 rpm tool rotation speed to investigate the delamination caused by the drilling process according to different manufacturing techniques.

† Corresponding author: oguz.kocar@beun.edu.tr, +90-372-291-1181

Findings

Manufacturing techniques also have a significant effect on the mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials. According to the production techniques, the highest strength was determined as hand lay-up, hot press molding and 3D printing, respectively. The lowest delamination rate (1.027) was determined in the composite material produced by 3D printing method and the highest delamination rate (1.89) was determined in the composite material produced by hand lay-up method.

Practical implications

In order to reduce the delamination factor in the drilling process in composite materials, manufacturing techniques as well as process parameters should be taken into consideration. It was also observed that the delamination rate increased with the increase in mechanical properties. In the composites produced by hot press molding technique, it was found that the defects at the hole exit were more stable due to the compression and better fusion of the layers.

Originality

The mechanical properties and delamination factor during drilling of glass fiber reinforced composite materials produced by different manufacturing techniques are compared and their advantages over each other are discussed. It also contributed to the literature by investigating the delamination factor in the drilling process in glass fiber reinforced composite materials printed on 3D printers.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde neredeyse yerkürede bulunan bütün elementler ve alaşımlar işlenip kullanmakta ve bu malzemelerin özelliklerini geliştirmek için yeni araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırma ve geliştirme sürecinin sonucu olarak insanlar iki veya daha fazla malzemeyi gözle görülür boyutlarda birleştirerek kompozit malzeme adı verilen hibrit malzeme türünü ortaya koymuşlardır. Kompozit malzeme üretiminin amacı, farklı malzemelerin özelliklerini bir araya getirerek, tek başlarına sahip olmadıkları özellikleri kazandırmak ve böylece çeşitli kullanım alanlarına uygun ürünler elde etmektir. Üretimde kompozit malzemelerin kullanımı; dayanım, hafiflik, esneklik ve uygun maliyet gibi avantajlar sağlar (Yücel, 2019). Kompozit malzemeler geleneksel malzemeler ile kıyaslandığında daha yüksek mukavemete daha düşük ağırlıkla ulaşabilmektedir. Bu özelliklerinden ötürü kompozit malzemeler, savunma sanayii, uzay ve havacılık, inşaat, otomotiv, ulaşım, tıp ve spor gibi birçok farklı sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Yücel, 2019; Özkaya vd., 2019). Kompozitlerin sınıflandırılması içerdiği matris ve takviye malzemelerine göre değişiklik göstermektedir. Kompozit malzemeler matris malzemelerine göre: metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitler olarak üç grupta sınıflandırılır. Takviye elemanlarına göre ise elyafli kompozitler, parçacıklı kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olarak isimlendirilirler (Kaya, 2016). Yapılan araştırmalar elyaf ve reçinenin uyumlu bir kombinasyon oluşturduğunu göstermiş ve elyaf takviyeli plastik kompozit malzemeler mühendislikte ihtiyaçlara uygun bir çözüm haline gelmiştir (İlhan ve Feyzulloğlu, 2019). Cam elyafı, elyaf takviyeli polimerik kompozit üretiminde en çok kullanılan elyaf çeşididir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında cam takviyesi yapılan elyafların reçine ile oluşturduğu kompozit malzemeye, cam elyaf takviyeli plastik (CTP) denilmektedir. CTP, bir termoset veya termoplastik matris malzemesi ile takviye edilmiş cam elyafı ve reçine içerir. Bu bileşim sayesinde kompozit; hafiflik, yüksek mukavemet, sertlik, yorulma direnci ve kimyasal direnç gibi özellikler kazanır (Özer, 2015). Aynı zamanda CTP, geri dönüştürülebilir ve üretim maliyetleri açısından diğer kompozitlere kıyasla daha avantajlıdır. Bu avantajları sayesinde özellikle inşaat ve havacılık sektöründe tercih edilirler (Skoczylas vd., 2019). Cam fiber kompozitler; rüzgâr kanadı, otomotiv, hava filtre kapakları veya kayak snowboard, kask ve bisiklet parçaları gibi spor ekipmanlarının imalatında kullanılırlar. Cam fiberler hem kırılmış halde takviye malzemesi olarak hem de farklı formlarda dokuma kumaş, hortum veya bant şeklinde çeşitli parça imalatı uygulamalarında kolaylık sağlar. Çoğunlukla geleneksel teknikler ile üretilen cam elyaf takviyeli plastik malzemeler Endüstri 4.0 sanayi devrimindeki teknolojik gelişmelerin yardımıyla eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan 3B yazıcılar ile üretilebilir olmuştur. Eklemeli İmalat (Eİ) geleneksel üretim teknolojilerinin yetersiz kaldığı noktalarda üretim yapabilen yenilikçi bir teknolojidir. Eİ ile kompleks parçalar seri üretim tesislerine ve montajlamaya gerek kalmadan tek bir cihaz kullanılarak yekpare şekilde üretilebilmektedir. Son zamanların en popüler eklemeli imalat yöntemlerinden biri 3B yazıcılarıdır. 3B yazıcı teknolojileri polimer parça üretimiyle tanınsa da, metal ve kompozit malzemelerin üretimine de olanak sağlamaktadır. 3B yazıcılarda kullanılan filament malzemeler incelendiğinde, cam fiberin çeşitli oranlarda (%15 veya %30) katkı olarak kullanıldığı görülmüştür. Polipropilen, polilaktasit (PLA), polietilen tereftalat (PET), polietilen tereftalat glikol (PETG) poliamid, naylon 12 (PA 12) gibi ana matris malzemesine eklenen cam-elyaf katkısı ile dayanımın artması hedeflenmiştir. Bu sayede, üreticileri tarafından dayanıklı fiyestür ve aparat, dişli çarklar, hareketli mekanizmalar, üretim bantlarındaki plastikler, otomotiv ve havacılık parçaları, kimyasala ve neme dayanıklı plastiklerin üretiminde kullanılmaları tavsiye edilmektedir (BASF, 2024). Bu malzemelerin geleneksel yöntemler (kalıp hazırlama, vakumlama vb.) yerine 3B yazıcıda üretilmesi ile

maliyetlerin azalması kullanıcıların mühendislik malzemelerine ulaşımını kolaylaştırmıştır. Bununla birlikte, 3B yazıcıda üretilen malzemelerin geleneksel yöntemlerle üretilen kompozitlerin yerine geçip geçemeyecekleri, mukavemetlerinin ne olduğu ve ekstra işlemlerde gösterecekleri malzeme davranışlarının bilinmesi tasarımcılar açısından önemlidir.

Kompozit malzemeler nihai ürüne dönüştürülmeden önce talaşlı imalat metotlarından en az biriyle işlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında en çok delik delme kullanılmakta ve parçaya son işlem olarak uygulanmaktadır (Bayraktar ve Turgut, 2012; Bilge vd., 2017). Fakat kompozit parçalara delik açıldıktan sonra sıklıkla delaminasyon kusuruyla karşılaşmaktadır. Delaminasyon, en basit anlatımıyla delme işlemi esnasında delik giriş ve çıkışında meydana gelen deformasyondur. Delaminasyon, sadece parça bütünlüğünü bozmakla kalmaz, aynı zamanda zayıf montaj toleransına yol açarak uzun vadede çalışma performansının bozulmasına neden olabilir (Ho-Cheng ve Dharan, 1990). Yapılan literatür araştırmasında kompozit malzemeler ve kompozitlerin delik delme işlemlerinde delaminasyonun azaltılması ile ilgili birçok çalışma bulunduğu görülmüştür. Ek olarak, 3B yazıcı filamentlerindeki gelişmeler sayesinde sanayide uzun zamandır geleneksel yöntemler kullanılarak elde edilen cam fiber katkılı ürünlerin 3B yazıcılarda üretilebildiği de anlaşılmıştır. Yakın zamanda ticarileşmiş cam fiber katkılı kompozit filamentlerden üretilen parçalar hakkında yapılan çalışmalar oldukça azdır. Bunun sebebinin 3B yazdırma tekniğinin bu filament malzemesiyle kullanılabilirliğinin yeni olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışma ile cam fiber katkılı malzemelerin delme işlemindeki delaminasyon durumu ve 3B yazıcıda üretilebilirliği konusunda literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu nedenle üç farklı üretim tekniği (sıcak presle kalıplama, elle yatırma tekniği ve 3B yazdırma) ile üretilmiş cam elyaf katkılı plastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve delik delme sırasında oluşan delaminasyonları incelenmiştir. Delme işlem parametreleri olarak 3 farklı ilerleme hızı (200, 400 ve 600 mm/dak) ve iki farklı takım dönme hızı (1500 ve 3000 dev/dak) kullanılmıştır. Delme işlemi sonrası deliklerin görüntüleri dijital mikroskopla alınarak delaminasyon miktarları hesaplanmıştır. Çalışmanın giriş bölümünde kompozit malzemeler ve kullanım alanlarına ait genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ayrıntılı literatür taraması yapılarak ve çalışmanın literatüre katkısı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde sıcak presle kalıplama, elle yatırma tekniği ve 3B yazıcı ile üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri, deney tasarımı, delme işlemleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Ayrıca cam elyaf takviyeli kompozit üretimi için 3B yazıcı parametrelerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ilk önce her üretim tekniği için ayrı ayrı delaminasyon oranları verilmiş ve işlem parametrelerinin delaminasyon oranına etkileri literatürdeki sonuçlarla birlikte karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Daha sonra tüm üretim teknikleri için delaminasyon oranları karşılaştırılmıştır. Böylece üretim tekniklerinin delaminasyon oranındaki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Son olarak sonuçlar tartışılarak gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Karaca (2016) yapmış olduğu çalışmada cam elyaf takviyeli kompozitlerde delik delme işlem parametrelerinin delaminasyona olan etkilerini incelemiştir. İşlem parametresi olarak dört farklı takım dönme hızı (5, 7.5, 10 ve 12.5 mm/dak), dört farklı ilerleme hızı (0.050, 0.075, 0.100 ve 0.125 mm/dev) ve dört farklı matkap uç açısı (118°, 125°, 130° ve 140°) kullanmıştır. Sonuçlar, cam elyaf takviyeli plastik malzemede gerçekleştirilen delme işleminde delaminasyon faktörüne neden olan en önemli faktörün ilerleme miktarı olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışmada cam laminant alüminyum takviyeli epoksinin (Glare) özel geometrili matkaplarla delinmesi ve delaminasyon faktörüne etkisi incelenmiştir. Delme işlem parametresi olarak üç farklı takım dönme hızı (60, 78 ve 100 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0.10, 0.14 ve 0.20 mm/dev) ve üç farklı matkap uç açısı (130°, 135°, 118°) kullanılmıştır. Özel geometrili takımlarla delik delmede delaminasyon üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu ve sonra kesme hızının geldiği ifade edilmiştir (Motorcu vd., 2020).

Basmacı ve Yörük (2020) karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin kuru ve kriyojenik şartlarda farklı kesme parametreleri ve çaplarda matkaplarla delinmesini incelemişlerdir. Deneylerde iki farklı kesme hızı (20 ve 50 m/dak), dört farklı ilerleme miktarı (0.075, 0.15, 0.225 ve 0.3mm/dev) ve iki farklı çapta matkap (4 ve 6 mm) kullanılmıştır. Sonuç olarak kriyojenik teknik ile delme işleminin kolaylaştığını, yüzey pürüzlülüğünün azaldığını ve delaminasyon faktörünün arttığını ifade etmişlerdir. Özkaya vd. (2019) cam küre takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin delinmesinde delaminasyonun etkilerini incelemiştir. Takviye fazı olarak ağırlıkça %5, %10 ve %20 cam küre takviyeleri kullanılmıştır. Ayrıca delme işleminde üç kesme hızı (15, 20 ve 25 m/dak), üç ilerleme hızı (0.05, 0.10 ve 0.15 mm/dev) ve 118° matkap uç açısı kullanılmıştır. En düşük delaminasyon ağırlıkça %5 cam küre takviyeli kompozitte, 0.05 mm/dev ilerleme ve 15 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada, çeşitli kalınlıklarda farklı kompozit malzemelerin (Epoksi/E-glass ve Epoksi/Kevlar 49) matkapla delik delme özellikleri incelenmiştir. Üç farklı kesme hızı (125, 250 ve 315 dev/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0.056, 0.112 ve 0.16 mm/dev) kullanılarak 5 mm, 10 mm ve 15 mm çaplarında HSS, TiN ve karbür matkaplar test

edilmiştir. Bulgular, devir ve ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve küçük çaplı matkapların daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir (Canpolat, 2008).

Singh vd. (2008) tek yönlü cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesini deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Üç farklı nokta açısı (90°, 104°, 118°), üç farklı takım dönme hızı (375, 938 ve 1500 dev/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0.075, 0.188 ve 0.300 mm/dev) kullanılmıştır. Delme sırasında oluşan itme kuvveti, matkap uç açısı ve ilerleme hızına bağlı olarak artmıştır. 90° matkap uç açısının en az delaminasyon sonucunu verdiği belirlenmiştir. Rubio vd. (2008) cam elyaf takviyeli plastiklerin delinmesinde hızın ve delaminasyon faktörünün etkilerini incelemiştir. Deneyde 5 mm çapında, 25° helisel açılı ve 118° ile 85° uç açılara sahip matkaplar kullanılmıştır. İşlem parametreleri olarak 4000 dev/dak, 8000 dev/dak ve 40000 dev/dak dönme hızları ile 1000 mm/dak, 3000 mm/dak, 6000 mm/dak ve 9000 mm/dak ilerleme hızları kullanılmıştır. 4000 ve 8000 dev/dak hızlarında ilerleme hızı arttıkça delaminasyon da artmıştır. Ancak, 40000 dev/dak hızında ilerleme hızındaki artış delaminasyonda kayda değer bir artışa yol açmamıştır. Delaminasyon takım dönme hızına bağlı kesme bölgesinde oluşan sıcaklıktan doğrudan etkilenmektedir. Takım dönüş hızı arttıkça bölgesel sıcaklık artışı için delaminasyon oranı azalmıştır. Ayrıca literatürde MDF (Aktaş ve Sofuoğlu, 2022), fiber metal laminant (Ekici ve Motorcu, 2022), kompakt laminant (Bilge vd., 2017), sandviç kompozit (Kuş ve Ekici, 2017) gibi farklı malzemelerin delaminasyonu hakkında çalışmalar bulunmaktadır.

Literatürdeki 3B yazıcılarda basılmış cam fiber kompozit malzemelerle alakalı araştırmalar incelendiğinde, çoğunlukla filament malzemeleri geliştirmeye odaklanıldığı görülmüştür. Altun ve Sekban (Altun ve Sekban, 2023) çalışmalarında, çeşitli miktarlarda cam lifi (%5, %10 ve %15) ekledikleri PLA filamentin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını incelemişlerdir. En yüksek çekme ve eğilme dayanımı %5, en yüksek darbe direnci de %10 cam lifi katkılı PLA malzemelerden elde edilmiştir. Kaynak ve Varsavas (2018), PLA içerisine TPU ve cam elyaf takviye karıştırarak 3B yazıcıda basılmaya uygun kompozit malzemeler üretmişlerdir. Çıkan sonuçlar, PLA/cam elyaf ve PLA/TPU/cam elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerinde cam elyaf oryantasyonundaki farklılıklardan kaynaklı azalma olduğunu göstermiştir. Ranganathan vd. (2019) ağırlıkça % 0, 20 ve 30 oranlarında cam elyaf ve cam bilya eklenmiş iki farklı PA6 malzeme üreterek, bu malzemelerin termal özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada kullanılan cam bilya, PA6 matrisinin termal özelliklerini gelişmesini sağlayan kristal bir malzeme olduğundan ve cam elyaf ise PA6 matrisinde yüksek modül sağlayabilecek boyutsal olarak kararlı bir malzeme olması sebebiyle seçilmiştir. %30 cam elyaf katkılı PA6'nın termal özellikleri gelişmiştir. Otomotiv, havacılık ve elektronik endüstriyel uygulamalarında kullanılabilir.

Yapılan araştırmaların tamamı değerlendirildiğinde; 3B yazılarda üretilen cam fiber katkılı kompozitlerin delinmesinde işlem parametrelerinin delaminasyona etkisi ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla birlikte, çeşitli kompozit malzemelerde işlem parametrelerinin (takım dönme hızı, ilerleme hızı, matkap uç açısı, matkap malzemesi vb.) delaminasyona etkilerinin incelendiği belirlenmiştir. Bu çalışmada cam fiber katkılı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılarak, işlem parametrelerinin delaminasyona etkisi incelenmiştir. Çalışmanın amacı endüstri uygulamalarında cam fiber kompozit malzeme kullanmak isteyen kullanıcılara malzeme özellikleri ve işlenebilirlik hakkında bilgi vererek uygun malzeme seçimi için yardımcı olmaktır.

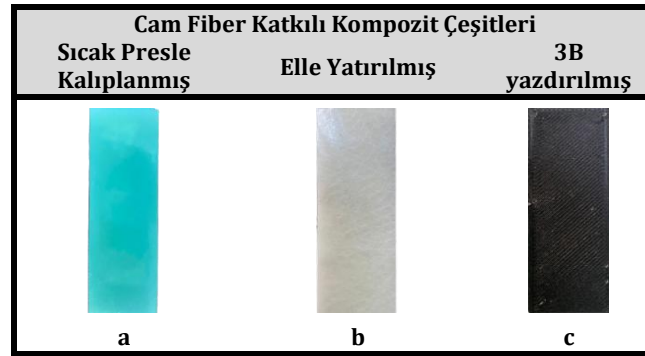
3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, üç farklı üretim tekniğiyle imal edilmiş (sıcak presle kalıplama, elle yatırma, 3B baskı) cam fiber katkılı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Preslenmiş cam fiber plakalar; cam fiber kumaş ve epoksi reçinenin bir arada kullanıldığı, arka ve ön yüzeyleri pürüzsüz bir şekilde sıcak pres kalıplama yöntemiyle üretilmiş G10 serisi plakalardır (Kompozitshop, 2019). Deneylerde kullanılan plakalar 1000x1000x5 mm boyutlarında hazır olarak satın alınmıştır. Ardından plakalar 50x20x5 mm ölçülerinde Probotsan 3 Eksenli CNC router makinesinde kesilmiştir. Elle yatırılmış cam fiber plakalar, bir kalıba elle yerleştirilen kumaşlara bir rulo veya fırça ile reçine emdirilmesi sonucunda üretilmiş numunelerdir (Durgun, 2014). Bu yöntem ile üretilmiş olan malzemeler hazır olarak Kanaltek İnşaat A.Ş.'den temin edilmiştir. 3B yazıcıda basılan deney parçaları için %30 oranında cam fiber katkılı poliamid filament (PA6 GF30) kullanılmıştır. Poliamid; yüksek kimyasal dayanım, darbe dayanımı ve yüzey aşınma direnci gibi özelliklere sahip esnek termoplastik malzemedir (Dey vd., 2021; Terekhina vd., 2019). Bu özellikler %30 oranında cam fiber takviyesiyle birleştiğinde, Poliamid'e kıyasla çok daha güçlendirilmiş bir hale dönüşmektedir. PA6 GF30 filamentler yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptirler. Bunun yanı sıra yüksek termal dayanım ve kararlılık, kimyasal etmenlere ve UV ışığa karşı yüksek dayanım gibi üstün özelliklere sahip bir malzemedir (Tanabi, 2021). Bu çalışmada BASF marka 2.85 mm çapında Ultrafuse PA6 GF30 filament kullanılmıştır. 3B parça basımında kullanılan filamentin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan deney numuneleri ise Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ultrafuse PA6 GF30 filamentin teknik özellikleri
(Technical specifications of ultrafuse PA6 GF30 filament) (BASF, 2024)

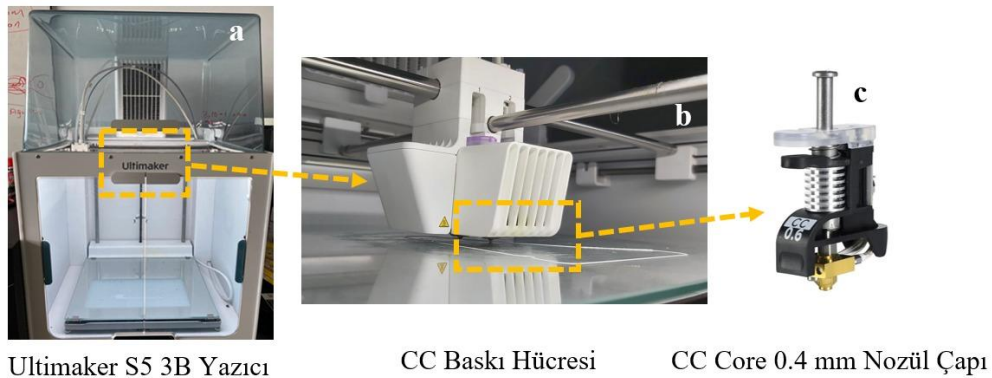
Filament Özellikleri	
Çap Ölçüsü (mm)	2.85
Renk	Siyah
Çekme Mukavemeti (MPa)	78.3
Çekme Modülü (MPa)	5036
Kopma Uzaması (%)	2.2
Yoğunluk (g/cm ³)	1.2



Şekil 1. Cam fiber katkılı kompozit malzemeler (Glass fiber reinforced composite materials)

3.2 Eklemeli İmalat İle Üretilen Numunelerinin Hazırlanması (Specimen Manufactured by Additive Manufacturing)

Çalışmadaki deney numunelerinin bir kısmı 3B yazıcıda basılmıştır. 3B yazdırma işlemi, Ultimaker S5 model 3B yazıcıda Ultrafuse PA6 GF30 malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan filament içerdiği cam fiber katkıdan ötürü aşındırıcı bir kompozit malzeme olduğundan, standart pirinç nozül uçlu baskı hücresi kullanmak yerine yazıcı üreticisi tarafından önerilen Ultimaker Printcore CC kullanılmıştır. Sertleştirilmiş çelik uca sahip olan Ultimaker Printcore CC sayesinde kompozit malzeme üretmek için gerekli olan yüksek sıcaklıklara çıkılabilmekte ve aşındırıcı kompozit malzemelerle sorunsuz baskı alınabilmektedir. Baskı işleminde kullanılan 3B yazıcı, baskı hücresi ve CC baskı hücresi Şekil 2'de gösterilmektedir.



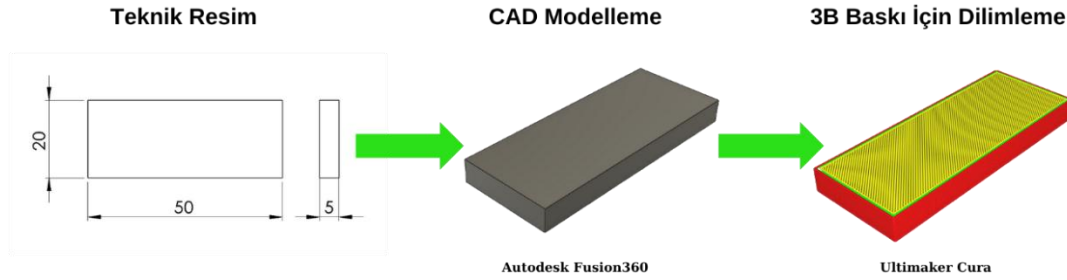
Şekil 2. Parça basımında kullanılan ekipmanlar; (a) 3B yazıcı (b) CC baskı hücresi ve (c) CC nozül
(Equipments used in part printing; (a) The 3D printer (b) CC print cell and (c) CC core)

Üretilen numunelerin doluluk oranları %100 ve katman kalınlıkları 0.2 mm'dir. Katman kalınlığının azalmasıyla birlikte boyutsal doğruluk artmakta (Nuñez vd., 2015) ve yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir ancak üretim sürecinin uzunluğu, katman kalınlığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda katman kalınlığı seçimi yapılmıştır. Diğer iki yöntemle üretilen (elle yatırma ve sıcak pres kalıplama) deney malzemelerinin makro yapıda boşluksuz olmalarından ötürü 3B yazıcı kullanılarak üretilen parçalar, %100 iç doluluk oranında basılmıştır. 3B yazıcıda üretilen numuneler, Autodesk Fusion 360 kullanılarak üç boyutlu olarak

modellenmiş ardından stl formatına çevrilerek Ultimaker Cura 5.5.0 programında Tablo 2’de bulunan parametreler doğrultusunda dilimleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. 3B baskı öncesi işlemler Şekil 3’de şematik bir biçimde gösterilmiştir.

Tablo 2. 3B baskı parametreleri (3D printing parameters)

Parça Basım Parametreleri	
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Parça Doluluk Oranı (%)	100
Nozül Sıcaklığı (°C)	260
Tabla Sıcaklığı (°C)	70
Yazdırma hızı (mm/sn)	45



Şekil 3. 3B baskı öncesi işlem basamakları (3D Pre-printing processes)

3.3. Delme Parametreleri Ve Kesici Takım (Drilling Parameters and Cutting Tool)

Kompozit malzemelerde delik delme işlemi sonrasında yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve delaminasyon faktörleri incelenerek delik kalitesi değerlendirilmektedir. Delme işlemi sonunda yüzey pürüzlülüğünün, çapak oluşumunun ve delaminasyon faktörünün istenilen değerlerde olmaması ardıl işlemleri zorunlu kılmaktadır. Bu durum üretim maliyetlerini ve üretim süresini arttırmaktadır. Bu yüzden delik kalitesinin belirlenmesinde etkin bir rol oynayan çapak oluşumu ve delaminasyon faktörlerinin oluşmaması veya en aza indirilmesi için optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bu faktörlerden delaminasyon kompozit malzemelerin delinmesinde delik giriş ve çıkışlarında sıkça rastlanan bir yüzey hasar durumudur. Delaminasyon faktörünü etkileyen delme faktörleri; kesme parametreleri, kesici takım malzemesi ve geometrisidir (Bayraktar ve Turgut, 2012).

Yapılan deneysel çalışmada silindirik saplı, $\varnothing 6.7$ mm, matkap uç açısı 118° , çift ağızlı, N tipi, sağ kesme yönlü Stock marka matkap kullanılmıştır (Şekil 4). İstatistiksel değerlendirme için deneyler 3 tekrarlı olarak yapılmıştır. Delme işleminde matkap özellikleri sabit tutulurken, üç farklı üretim tekniği ile üretilmiş cam fiber katkılı kompozit malzeme, üç farklı ilerleme hızı ve üç farklı dönme hızında deneyler tamamlanmıştır. Deney tasarımı Tablo 3’de verilmiştir. Deney parametreleri önceki çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir (Karataş vd. 2024). Her malzeme için 6 delme işlemi gerçekleştirilmiş ve toplamda 18×3 deney yapılmıştır.



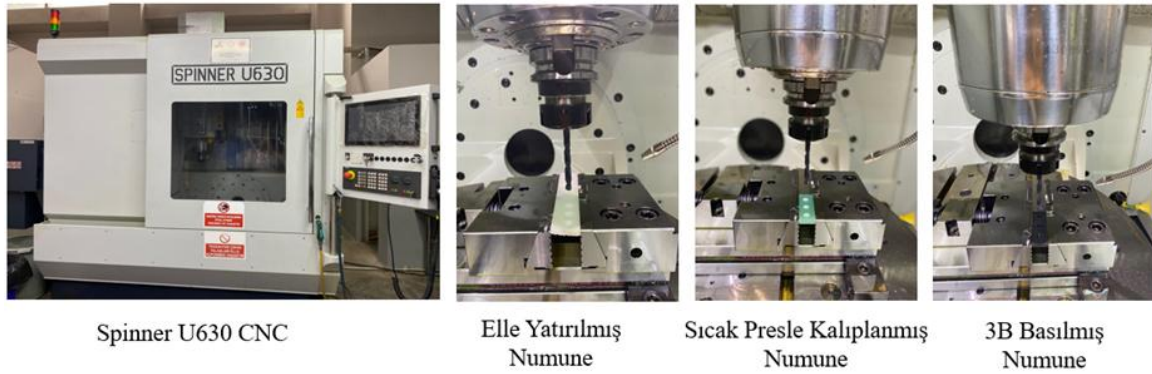
Şekil 4. Stock marka $\varnothing 6.7$ mm matkap ($\varnothing 6.7$ mm drill from stock)

Tablo 3. Deney tasarımı (Design of experiment)

Üretim Teknikleri	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)
Sıcak Presle Kalıplama	200	1500
3B Baskı	400	3000
Elle Yatırma	600	

3.4. Delik Delme Deney Düzenegi (Drilling Test Setup)

Yapılan çalışmada tabla boyutu $\varnothing 630$ mm, fener mili dönme hızı 12.000 dev/dak ve 18Kw güce sahip Spinner U630 5 Eksenli CNC tezgâhı kullanılmıştır. Deneylerde soğutma sıvısı kullanılmamıştır. G kodları SolidCam adlı ticari yazılımda elde edilmiştir. Şekil 5'te kullanılan CNC tezgâhı görülmektedir.

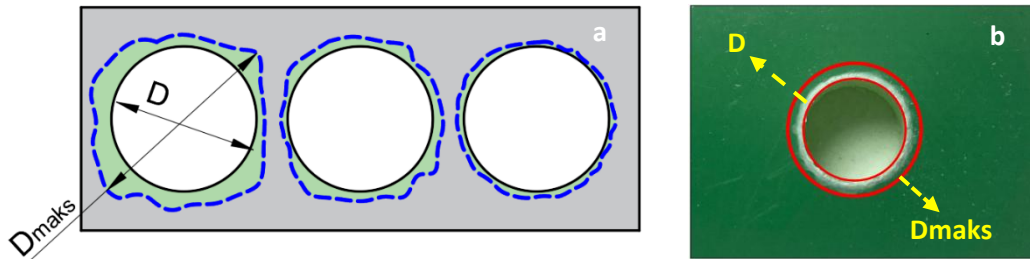


Şekil 5. Delme işlemlerinde kullanılan CNC tezgâhı ve cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delinme işlemi (CNC machine used in drilling processes and drilling process of glass fiber reinforced composite materials)

3.5. Delaminasyon Oranının Belirlenmesi (Determination of Delamination Rate)

Delaminasyon oranı, delme sırasında meydana gelen hasarda görülen en büyük çapın (D_{maks}) matkap çapına (D) oranıyla hesaplanır. Delaminasyon faktörü (D_f), kompozit malzemelerin delik delme işlemlerinde delik giriş/çıkışlarında oluşan yüzey hasarlarının değerlendirilmesinde kullanılan bir parametredir (Özkaya vd., 2019; Koboevic vd. 2012). Delme işleminden sonra stereo mikroskop ile bütün deliklerin çıkış kısmından (10x büyütme) görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler AutoCAD 2024 programına aktarılarak, delaminasyon oranını hesaplamak için oluşan hasara uygun daireler çizilmiştir. Şekil 6'da matkap çapı (D) ve delaminasyon bölgesindeki en büyük çap (D_{maks}) gösterilmiştir. D_{maks} belirlendikten sonra delaminasyon faktörü aşağıdaki Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanmıştır (Bilge vd., 2017).

$$D_f = D_{maks}/D \quad (1)$$



Şekil 6. Delaminasyon faktörünün gösterilmesi a) Delaminasyon faktörünün şematik gösterilişi b) Delme sonrası gerçek görünüm (Demonstration of the delamination factor a) Schematic representation of the delamination factor b) Actual appearance after drilling)

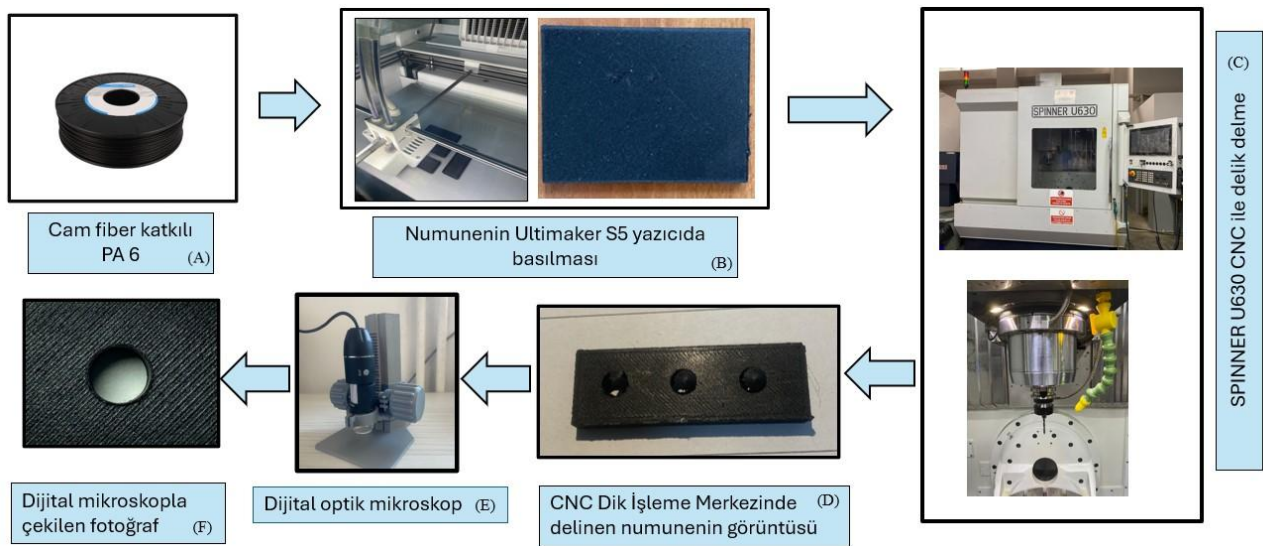
3.6. Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (Mechanical Properties of Specimens)

Elle yatırılmış, preslenmiş ve 3B baskısı alınmış numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için ASTM D638-10 Tip IV standartlarına uygun, beşer adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri 2 mm/dak hızla oda sıcaklığında yapılmıştır. 3B baskı ile hazırlanan cam fiber katkılı kompozit numunelerin çekme testleri 5

KN kapasiteli WDW-5 model universal çekme cihazında, elle yatırma ve preslenmiş numunelerin çekme testleri ise 50 ton kapasiteli Besmark marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. 3B yazıcıda üretilen parçaların sertlik ölçümü Loyka LX-D-2 marka durometre (Shore D) ile ölçülmüştür. Sıcak pres kalıplama ve elle yatırma tekniği ile üretilen parçalarda sertlik, Insize HDT-LP200 Leeb portatif cihaz ile ölçülmüştür.

4. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

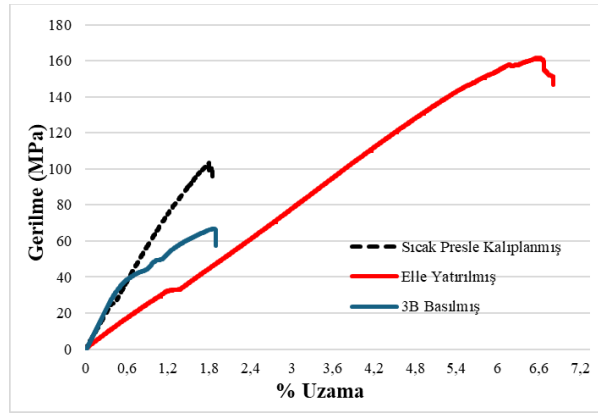
Yapılan çalışmada farklı üretim teknikleriyle imal edilmiş cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delme işlemi karşılaştırılmış ve delik çıkış hasarı incelenmiştir. Delme işleminde takım dönme hızları 1500 ve 3000 dev/dak, takım ilerleme hızları 200, 400 ve 600 mm/dak olarak kullanılmıştır. Şekil 7'de 3B yazıcıda hazırlanan cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delinmesinde uygulanan basamaklar adım adım gösterilmiştir. Şekil 7A'da cam fiber katkılı PA6 filament, Şekil 7B'de Ultimaker S5 yazıcıda Tablo 3'teki parametrelere göre yapılan basım işlemi verilmiştir (Şekil 7B). Hazırlanan numuneler CNC dik işleme merkezi'nde belirlenen deney parametreleri kullanılarak delinmiştir (Şekil 7C). Şekil 7D'de delme işlemi gerçekleştirilmiş bir deney numunesi görülmektedir. Delme işlemi sonrası delaminasyon oranının belirlenmesi için delik etrafı optik mikroskopla incelenmiştir (Şekil 7E). Şekil 7F'de dijital optik mikroskopla çekilen örnek görüntü verilmiştir. Üç farklı üretim metoduyla imal edilen cam fiber katkılı kompozit malzeme için belirtilen tüm bu işlemler tekrarlanmıştır. Son olarak elde edilen veriler karşılaştırılmış ve cam fiber katkılı kompozitlerin delik delme işlemi değerlendirilmiştir.



Şekil 7. 3B baskı ile hazırlanmış numuneler için akış şeması (Flowchart for 3D printed specimens)

4.1. Cam Fiber Katkılı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composites)

Üretim tekniğine bağlı olarak cam fiber katkılı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testleri yapılmıştır. Çekme testinden elde edilen ortalama değere en yakın olan sonuçların gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 8'de verilmiştir. Çekme testi sonrasında belirlenen çekme mukavemetleri ve yüzde uzama değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Çekme testi sonucu kompozitlerden elde edilen en yüksek mukavemet değerleri elle yatırma tekniği için 168.4 ± 6.4 MPa, sıcak pres kalıplama için 102.1 ± 2.4 MPa ve 3B basılan parçalar için 68.1 ± 1.9 MPa olarak bulunmuştur. Türkmen ve Köksal (2012) yapmış oldukları çalışmada cam fiber katkılı kompozitlerde katman sayısının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Cam elyaf kompozitlerde elyaf tabaka sayısına bağlı olarak çekme dayanımının ve elastisite modülünün arttığını belirtmişlerdir. El-Wazery vd., (2017) yaptıkları çalışmada elle yatırma yöntemi kullanarak ağırlıkça %15-%60 arasında cam elyaf takviyesi ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar cam elyaf takviye oranına bağlı olarak çekme mukavemetinin 28.25 MPa ile 78.83 MPa arasında, eğilme mukavemetinin 44.65 MPa ile 119.23 MPa arasında değiştiğini göstermiştir. Kompozit malzeme üretiminde mekanik özellikler birçok parametreden etkilenmektedir. Yapılan çalışma ile üretim tekniklerinin cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

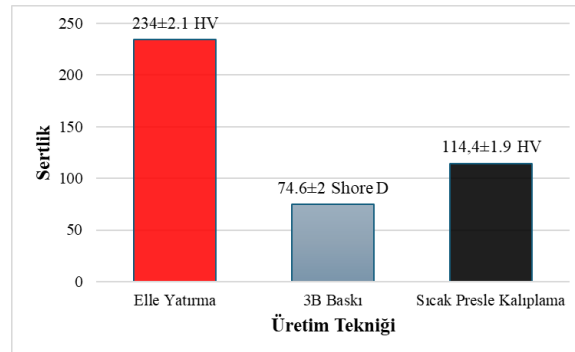


Şekil 8. Cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Stress-strain diagram of glass fiber reinforced composite materials)

Tablo 4. Cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of glass fiber reinforced composite materials)

Üretim Tekniği	Mekanik Özellikler	
	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Elle Yatırma	168.4±6.4	6.8±0.5
3B Baskı	68.1±1.9	1.6±0.2
Sıcak Presle Kalıplama	102.1±2.4	1.8±0.3

Deney malzemelerin sertlik sonuçları Şekil 9’da verilmiştir. Elle yatırma üretim tekniği ile üretilen kompozit malzemede sertlik değeri 234 HV, sıcak presle kalıplama ile üretilen kompozitlerde 114.4 HV ve 3B baskı ile üretilen kompozitlerde 74.6 Shore D olarak ölçülmüştür. Sertlik sonuçları çekme mukavemetleri ile uyumlu çıkmıştır. Mukavemet arttıkça sertlik değeri de artmıştır.



Şekil 9. Üretim tekniklerine göre sertlik değerlerinin değişimi (Variation of hardness values according to production techniques)

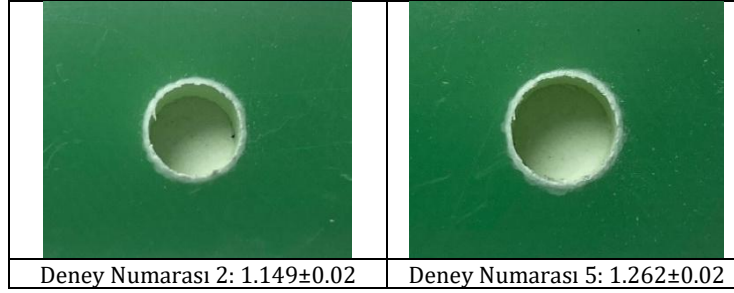
4.2. Delaminasyon Oranları (Delamination Rates)

4.2.1. Sıcak presle kalıplama tekniği ile üretilen numuneler için delaminasyon oranı (Delamination rate for hot press molding)

Tablo 5’de sıcak presle kalıplama tekniğiyle üretilen cam fiber katkıli kompozitlerin farklı ilerleme hızı ve dönme hızlarında oluşan delaminasyon oranlarının ortalamaları verilmiştir. Şekil 10’da en düşük ve en büyük delaminasyon oranına sahip numunelerin görüntüleri görülmektedir. Delik delme sonrası en düşük delaminasyon oranı 2 numaralı deneyde 1.149 ± 0.02 , en yüksek delaminasyon oranı 5 numaralı deneyde 1.262 ± 0.02 olarak belirlenmiştir. İlerleme hızı arttıkça delaminasyon oranı artarken, dönme hızının artmasıyla azalma meydana gelmiştir. Kuş ve Ekici (2018) çalışmalarında takım ilerleme hızının delaminasyon üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Karaca (2016) çalışmasında ilerleme miktarının artmasıyla deformasyon faktörünün arttığına dikkat çekmiştir. Kırhasanoğlu ve Turgut (2021) karbon elyaf takviyeli istifli delinmesinde işlem parametrelerinin delaminasyon oranına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kesme hızının artması ile delaminasyon oranının azaldığı aynı zamanda ilerleme miktarının artması ile delaminasyon oranının arttığı görülmüştür.

Tablo 5. Sıcak presle kalıplanmış numunelerin delaminasyon oranları (Delamination rates of hot press molded specimens)

Deney Numarası	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	Delaminasyon Oranı
1	200	1500	1.182±0.01
2	200	3000	1.149±0.02
3	400	1500	1.186±0.01
4	400	3000	1.168±0.03
5	600	1500	1.262±0.02
6	600	3000	1.202±0.04

**Şekil 10.** Sıcak presle kalıplama için en düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip numunelerde deliklerin görünümü (Appearance of holes in specimens with the lowest and highest delamination rate for hot press molding)

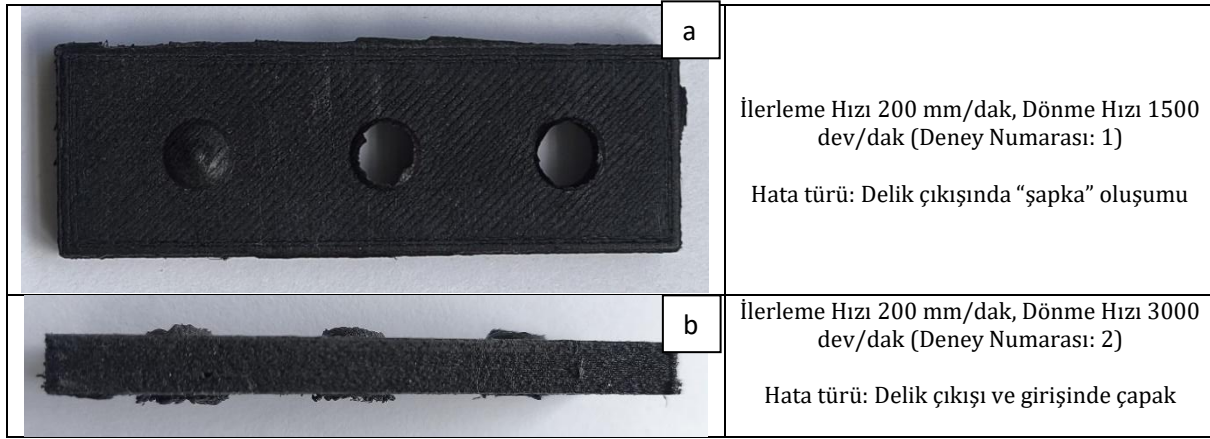
4.2.2. 3B yazıcı ile üretilen numuneler için delaminasyon oranı (Delamination rate for 3D printed specimens)

Tablo 6'da 3B baskı tekniğiyle üretilen cam fiber katkıli kompozitlerin farklı ilerleme hızları ve dönme hızlarında oluşan delaminasyon oranlarının ortalamaları verilmiştir. Şekil 11'de en düşük ve en büyük delaminasyon oranına sahip numunelerin görüntüleri verilmiştir. Delme sonrası en düşük delaminasyon oranı 5 numaralı deneyde 1.027 ± 0.01 , en yüksek delaminasyon oranı 2 numaralı deneyde 1.333 ± 0.14 olarak belirlenmiştir. Tablo 6 incelendiğinde düşük ilerleme hızlarında delaminasyon oranının arttığı belirlenmiştir. Bunun sebebi düşük sertliğe (yüksek süneklik) sahip malzemelerde özellikle düşük dönme hızında delik çıkış bölgesinde malzeme kesme işlemine maruz kalmadan deformasyona uğrayarak dışarıya doğru itilmesidir (Alliche vd., 2021). Bu durum çıkış bölgesindeki deformasyonu arttırdığı için delaminasyon oranını arttırmıştır. Şekil 12'de 3B yazıcı ile üretilmiş cam fiber takviyeli kompozitlerin delinmesi sırasında oluşan kusurlar verilmiştir. Şekil 12 a'da şapka oluşumu, Şekil 12 b'de çapak oluşumu görülmektedir. Her iki kusurda düşük takım ilerleme hızında meydana gelmiştir. Bu durum takım ve kesme bölgesinde malzemenin sürtünmesinden dolayı yumuşaması ve plastik deformasyona uğraması ile açıklanabilir.

Tablo 6. 3B baskıyla üretilmiş numunelerin delaminasyon oranları (Delamination rates of 3D printed specimens)

Deney Numarası	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	Delaminasyon Oranı
1	200	1500	1.317±0.31
2	200	3000	1.333±0.14
3	400	1500	1.147±0.02
4	400	3000	1.186±0.03
5	600	1500	1.027±0.01
6	600	3000	1.147±0.02

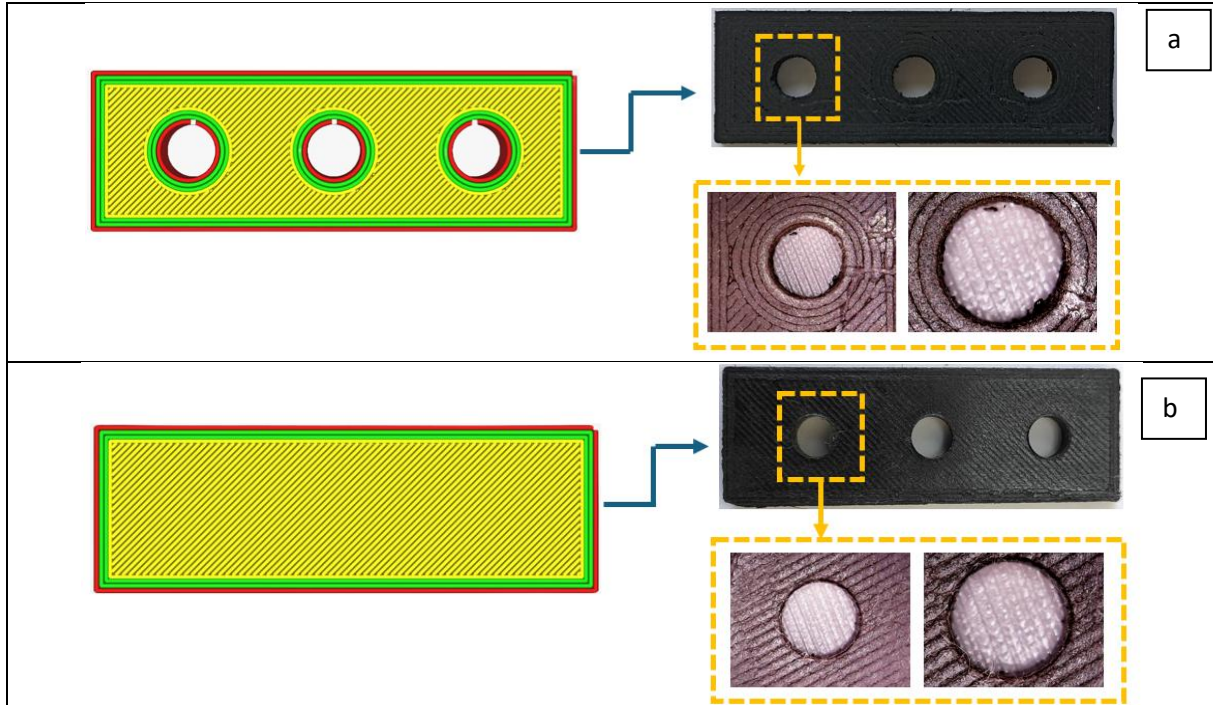
**Şekil 11.** 3B baskı için en düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip numunelerin görünümü (View of specimens with the lowest and highest delamination rate for 3D printing)



Şekil 12. 3B baskı ile üretilmiş kompozitlerin delinmesinde meydana gelen hatalar.
(Defects in drilling of composites produced by 3D printing.)

3B yazıcıda üretilmiş CTP kompozit malzemelere geleneksel delik delme işlemi yapılabilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemeler 3B yazıcıların üretim özellikleri sayesinde herhangi bir talaşlı imalat işlemi gerekmeksizin delikli olarak da basılabilmektedirler.

Şekil 13'de 3B yazıcıda (a) delikli basılan ve (b) sonradan delinen CTP kompozit parçaların görüntüleri verilmiştir. Delikli numunelerde (Şekil 13a) delaminasyon oranı 1.032 olarak belirlenmiştir. Sonradan delinen CTP kompozitlerle delikli parçaların delaminasyonları arasında önemli bir fark oluşmamıştır. Şekil 13'a ve b'de parçalar incelendiğinde baskı sırasında oluşan baskı çizgilerinde önemli farklar vardır. Özellikle delikli basılan parçalarda delik etrafına 0.4 mm kalınlığında 3 duvar atıldığı için baskı çizgileri değişiklik göstermektedir. Ayrıca matkapla delinen parçalarda fiberler kesintiye uğradığı için delik içlerinde fiber uzantıları belirlenmiştir.



Şekil 13. 3B yazıcıda basılan numunelerin görüntüleri a) delikli basılan parça b) deliksiz basılan parça
(Images of the specimens printed on the 3D printer a) part printed with holes b) part printed without holes)

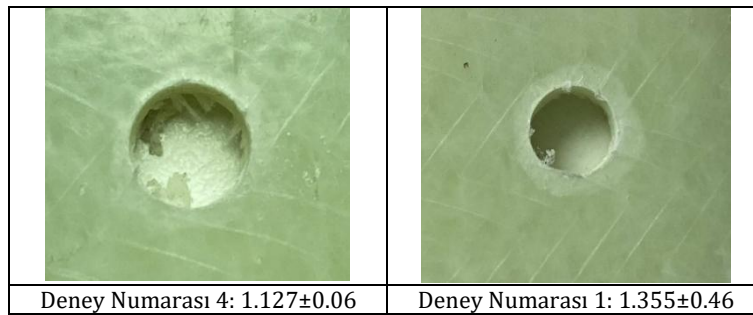
4.2.3. Elle yatırma tekniği ile üretilen numuneler için delaminasyon oranı (Delamination rate for specimens produced by hand lay-up technique)

Tablo 7'de elle yatırma tekniğiyle üretilen cam fiber katkıli kompozitlerin farklı ilerleme hızı ve farklı dönme hızlarında oluşan delaminasyon oranlarının ortalamaları ve Şekil 14'de en düşük ve en büyük delaminasyon oranına sahip numunelerin görüntüleri verilmiştir. Delme sonrası en düşük delaminasyon oranı 4 numaralı deneyde 1.127 ± 0.06 , en yüksek delaminasyon oranı 1 numaralı deneyde 1.355 ± 0.46 olarak belirlenmiştir. En

düşük delaminasyon oranı 400 mm/dak ilerleme hızında ve 3000 dev/dak takım dönme hızında elde edilmiştir. Sonuç olarak, delaminasyonu en aza indirmek için parametrelerin optimum değerleri belirlenmesi gerekmektedir. Ghasemi vd. (2011) cam elyaflarla güçlendirilmiş polimer bazlı kompozitlerin delinmesinde ilerleme hızı (25, 100 ve 400 mm/dak), matkap dönüş hızı (1000, 2000 ve 2500 dev/dak) ve matkap uç açısının (70°, 90° ve 118°) delaminasyon faktörü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarında delme kuvvetini ölçülmüşlerdir. Delinmiş bölgenin çıkış deliği taranarak delaminasyon faktörü miktarı hesaplanmıştır. Sonuçlar, ilerleme hızının düşük ve yüksek değerlerinde delaminasyon faktörünün arttığını göstermiştir.

Tablo 7. Elle yatırılmış numunelerin delaminasyon oranları (Delamination rates of hand-layed specimens)

Deney Numarası	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	Delaminasyon Oranı
1	200	1500	1.355±0.46
2	200	3000	1.151±0.05
3	400	1500	1.274±0.13
4	400	3000	1.127±0.06
5	600	1500	1.270±0.07
6	600	3000	1.244±0.08

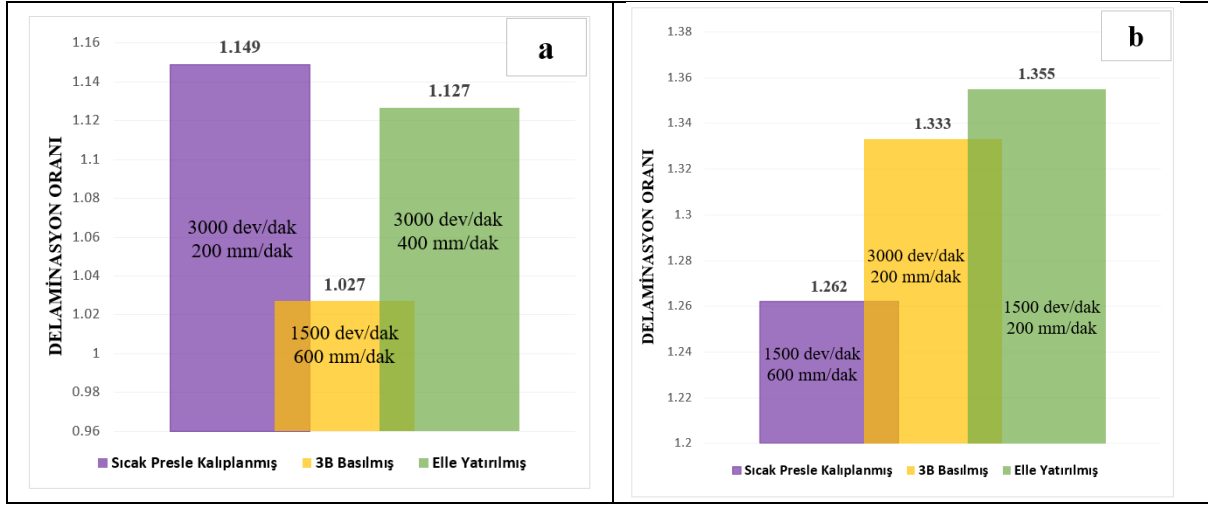


Şekil 14. Elle yatırma tekniği için en düşük ve en yüksek delaminasyon oranına sahip numunelerin görünümü (Image of specimens with the lowest and highest delamination rate for hand lay-up technique)

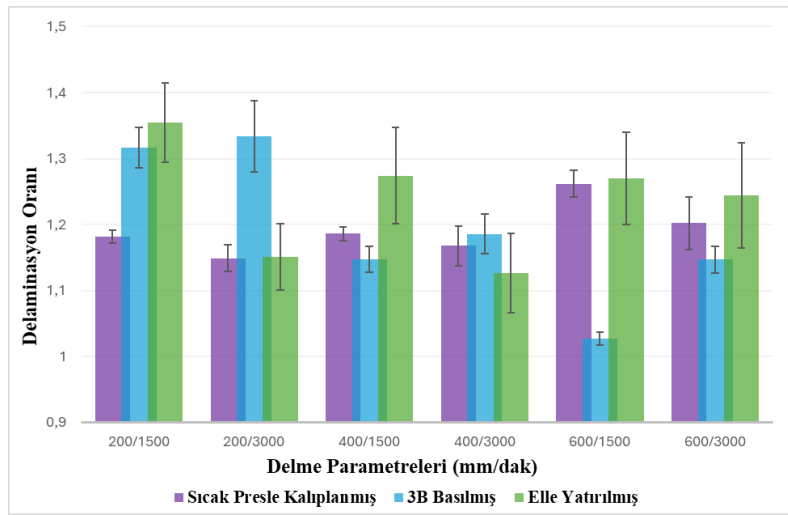
4.3. Üretim Tekniklerine Göre Belirlenen Delaminasyon Oranlarının Karşılaştırılması (Comparison of Delamination Rates Determined According to Manufacturing Techniques)

Farklı üretim teknikleriyle üretilmiş cam fiber katkılı kompozit malzemelerin delinmesi sırasında delik çıkışlarında meydana gelen en büyük ve en küçük delaminasyon oranları Şekil 15'de verilmiştir. En düşük delaminasyon oranı (1.027) 3B baskıyla üretilen kompozit malzemede, en büyük delaminasyon oranı (1.355) elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozit malzemede belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük delaminasyon oranları arasındaki fark incelendiğinde sıcak presle kalıplanmış numunelerde (1.262-1.149) 0.113, 3B basılmış numunelerde (1.333-1.027) 0.306 ve elle yatırılmış numunelerde (1.355-1.127) 0.228 olarak hesaplanmıştır. Delme operasyonunda işlem parametrelerinden en az etkilenen sıcak presle kalıplama ile üretilen kompozit malzemedir. Bunun sebebi sıcak preslemenin etkisi ile katmanların birbiri ile daha iyi birleşmesi olduğu söylenebilir. Delme operasyonunda işlem parametrelerinden en fazla etkilenen 3B baskıyla üretilen kompozit malzemedir. 3B baskıyla üretilen kompozitlerde kesme sırasında oluşan ısı bölgesel olarak malzemenin yumuşamasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı kesici takım kesme yapamadığı için malzeme plastik deformasyona uğrar. Bu durumun delik çıkış bölgesinde delaminasyonun artmasına sebep olduğu söylenebilir.

Şekil 16'da farklı üretim teknikleriyle elde edilen kompozit malzemelerin delme işleminde kullanılan ilerleme hızı ve takım dönme hızına göre oluşan delaminasyon oranları verilmiştir. Sıcak kalıpla preslenmiş kompozitlerin delinmesinde 200 mm/dak ve 400 mm/dak ilerleme hızlarında takım dönme hızının delaminasyona etkisinin az olduğu belirlenmiştir. Takım ilerleme hızı 600 mm/dak' ya çıktığında 1500 dev/dak takım dönme hızında delaminasyon oranı artarken 3000 dev/dak takım dönme hızında düşmüştür. 3B baskı tekniğiyle üretilen kompozitlerin delinmesinde takım dönme hızı 1500 dev/dak ve 3000 dev/dak'da ilerleme hızının artmasıyla delaminasyon oranı düşmüştür. İlerleme hızı sabit tutularak takım dönme hızı arttırıldığında ise delaminasyon oranının arttığı belirlenmiştir. Elle yatırma tekniğiyle üretilen kompozitlerin delinmesinde ilerleme hızı sabit tutulduğunda takım dönme hızı arttıkça delaminasyon oranı düşmüştür. Sonuç olarak kompozit malzemelerin delinmesinde en sık karşılaşılan hata türü olan delaminasyon oranı birçok parametreden etkilenmektedir. Kompozit üretim tekniklerinin delik delmede ortaya çıkan delaminasyon oranında etkili bir faktör olduğu belirlenmiştir. Delaminasyon oranını azaltmak için delme sırasındaki işlem parametrelerinin yanı sıra üretim teknikleri de dikkate alınmalıdır.



Şekil 15. Farklı üretim teknikleriyle üretilen cam elyaf takviyeli kompozitlerin minimum (a) ve maksimum (b) delaminasyon oranları (Minimum (a) and maximum (b) delamination rates of glass fiber reinforced composites produced by different manufacturing techniques)



Şekil 16. Üretim tekniğine göre delme işlemindeki delaminasyon oranları (Delamination rates in drilling according to manufacturing technique)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Elyaf takviyeli polimer kompozitler sahip oldukları mekanik ve ısıl özellikler sayesinde otomotiv, havacılık-uzay, savunma sanayi başta olmak üzere endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozit malzemeler katmanlardan oluştuğu için delme işlemlerinde yapısal bütünlüklerini bozabilecek hatalar oluşmaktadır. Yapılan çalışmada sıcak presle kalıplama, 3B baskı ve elle yatırma üretim teknikleriyle üretilmiş CTP kompozitlerin işlenebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Delme işleminde üç farklı ilerleme hızı ve iki farklı takım dönme hızı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Çekme testi sonucunda üretim tekniklerine göre sıralandığında elle yatırma (168.4±6.4 MPa), sıcak presle kalıplama (102.1±2.4 MPa) ve 3B baskı (68.1±1.9 MPa) olarak bulunmuştur. Üretim tekniklerinin de cam fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Sıcak presle kalıplama ile üretilen CTP parçalarda en düşük delaminasyon oranı 200 mm/dak ilerleme hızında ve 3000 dev/dak takım dönme hızında 1.149 olarak, 3B baskı ile üretilen CTP parçalarda en düşük delaminasyon oranı 600 mm/dak ilerleme hızında ve 1500 dev/dak takım dönme hızında 1.027 olarak, elle yatırma ile üretilen CTP parçalarda en düşük delaminasyon oranı 400 mm/dak ilerleme hızında ve 3000 dev/dak takım dönme hızında 1.127 olarak belirlenmiştir.

En düşük delaminasyon oranı (1.027) 3B baskı yöntemiyle üretilen kompozit malzemede, en büyük delaminasyon oranı (1.355) elle yatırma yöntemiyle üretilen kompozit malzemede belirlenmiştir. Sıcak presle kalıplamada bu

değerlerin arasında çıkmıştır. Bunun sebebi sıcak preslemenin etkisiyle katmanların birbiri ile daha iyi birleşmesidir.

3B baskı yöntemiyle üretilmiş delikli ve deliksiz numunelerde delaminasyon oranı birbirine yakın çıkmıştır.

Sonuç olarak kompozit malzemelerin delinmesinde en sık karşılaşılan hata türü olan delaminasyon kusuru birçok parametreden etkilenmektedir. Yapılan çalışmada kompozit malzemelerin üretim tekniklerinin de delaminasyon oranında etkili olduğu belirlenmiştir. Delaminasyon oranını azaltmak için delme sırasındaki işlem parametrelerin yanı sıra üretim teknikleri de dikkate alınmalıdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 2023 yılının 2. Döneminde 1919B012320287 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aktaş, E. N., & Sofuoğlu, S. D., 2022. Mdf'lerin Delinmesinde Taguchi Yöntemi Kullanılarak Delaminasyon Faktörünün İncelenmesi. *Mobilya Ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 29-39.
- Alliche, M., Djebara, A., Zedan, Y., & Songmene, V., 2021. Machinability Of A356 Cast Alloys Under The Effect Of Artificial Aging Treatment And Lubrication Modes. *Jmst Advances*, 3, 19-33.
- Altun S., & Sekban B., 2023. 3B Yazıcılar İçin Cam Fiber Katkılı Kompozit Filament Üretimi ve Mekanik Özellikleri. *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(1), 64-77.
- Basf, 2024. Ultrafuse Pa6 Gf30. Erişim Tarihi: 27 May 2024 from <https://Forward-Am.Com/Material-Portfolio/Ultrafuse-Filaments-For-Fused-Filaments-Fabrication-Fff/Reinforced-Filaments/Ultrafuse-Pa6-Gf30/>
- Basf, 2024. Ultrafuse PP GF30. Erişim Tarihi: 27 May 2024 from https://www.onlinefilament.com/urun/ultrafuse-siyah-pp-gf30-filament?srsid=AfmBOoeDJ8fM_vv_dll4q0mltygDahhq5YIFM9hdtFflfj1VMNfLj.
- Basmacı, G., & Yörük, A. S., 2020. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemenin Kuru Ve Kriyojenik Şartlarda Delinebilirliğinin Deneysel Araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 164-175.
- Bayraktar, Ş., & Turgut, Y., 2012. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Delinmesi Üzerine Bir Araştırma. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 04-05 Ekim, Ankara, Türkiye.
- Bilge, T., Motorcu, A. R., & Ivanov, A., 2017. Kompakt Laminat Kompozit Malzemenin Tungsten Karbür Takımlarla Delinmesinde Delaminasyon Faktörünün Değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 427-436.
- Canpolat, N., 2008. Değişik Takviyeli Kompozit Malzemenin Matkapla Delinebilirliğinin Ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N., 2021. A Review On Filament Materials For Fused Filament Fabrication. *Journal Of Manufacturing And Materials Processing*, 5(3), 69.
- Durgun, I., 2014. El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, 7. Mühendislik Ve Teknoloji Sempozyumu, 15-16 Mayıs, Çankaya, Ankara.
- Ekici, E., & Motorcu, A. R., 2022, Fiber Metal Laminatların Delinmesinde Giriş Delaminasyonu Üzerine Bir Araştırma. 9th International Congress On Engineering, Architecture and Design, 14 - 16 Mayıs, İstanbul, Türkiye.
- El-Wazery, M., El-Elamy, M., & Zoalfakar, S., 2017. Mechanical Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal Of Applied Science And Engineering*, 14(3), 121-131.
- Ghasemi, F. A., Hyvadi, A., Payganeh, G., & Arab, N. B. M., 2011. Effects Of Drilling Parameters On Delamination Of Glass-Epoxy Composites. *Australian Journal Of Basic And Applied Sciences*, 5(12), 1433-1440.
- Ho-Cheng, H., & Dharan, C., 1990. Delamination During Drilling In Composite Laminates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 112(3), 236-239.
- Ilhan, R., & Feyzullahoğlu, E., 2019. Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaf Ve Dolgu Maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 355-381.
- Karaca, F., 2016. Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerde Delme Parametrelerinin Deformasyon Faktörüne Etkisinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 23-27.
- Karataş, E., Koçar, O., Zülfiyar, N. B., Anaç, N. & Parmaksız, F., 2024. Investigation of Delamination Factor in Bi-directional Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Materials. *International Conference on Engineering, Natural Sciences, and Technological Developments (ICENSTED 2024)*, 19-21 July, Balıkesir, Türkiye.
- Kaya, A. I., 2016. Kompozit Malzemeler Ve Özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kaynak, C., & Varsavas S.D., 2018. Performance Comparison of The 3D-Printed and Injection-Molded PLA and Its Elastomer Blend and Fiber Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(4), 501-520.
- Kırhasanoğlu, E.Ö., & Turgut, Y., 2021. Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin İstifli Delinmesinde Delik Çıkış Hasarının Deneysel Araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), pp.152-159.

- Koboevic, N., Jurjevic, M., & Koboevic, Z., 2012. Influence Of Cutting Parameters On Thrust Force, Drilling Torque And Delamination During Drilling Of Carbon Fibre Reinforced Composites. *Tehnicki Vjesnik*, 19(2), 391-398.
- Kompozitshop, 2024. Cam Fiber G10 Frp Plaka. Erişim Tarihi: 27 Mayıs 2024 (<https://www.kompozitshop.com/cam-fiber-g10-frp-plaka-t2mm-40x40cm-1295>)
- Kuş, A., & Ekici, E., 2017. Sandviç Kompozitlerin Delinmesinde Delaminasyon Faktörünün İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 153-162.
- Motorcu, A., Ekici, E., & Yıldırım, E., 2020. Cam Laminat Alüminyum Takviyeli Epoksinin (Glare) Özel Geometrilili Matkaplarla Delinmesi: Delaminasyon Faktörü Üzerine Bir Çalışma, Uluslararası Malzeme ve Mühendislik Teknolojileri Konferansı, 5-7 Kasım, Gaziantep, Türkiye.
- Núñez, P., Rivas, A., García-Plaza, E., Beamud, E., & Sanz-Lobera, A., 2015. Dimensional And Surface Texture Characterization In Fused Deposition Modelling (Fdm) With Abs Plus. *Procedia Engineering*, 132, 856-863.
- Özer, H., 2015. Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye.
- Özkaya, F., Özen, F., İlhan, E., & Aslanlar, S., 2019. Cam Küre Takviyeli Polipropilen Kompozit Malzemelerin Delaminasyon Faktörünün Deneysel Olarak İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 843-849.
- Ranganathan, S., Rangasamy Suguna Thangaraj, H.N., Vasudevan, A.K., & Shanmugan, D.K., 2019. Analogy of thermal properties of polyamide 6 reinforced with glass fiber and glass beads through FDM Process. *SAE Technical Paper*, 2019-28-0137.
- Rubio, J. C., Abrao, A., Faria, P., Correia, A. E., & Davim, J. P., 2008. Effects Of High Speed In The Drilling Of Glass Fibre Reinforced Plastic: Evaluation Of The Delamination Factor. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 48(6), 715-720.
- Singh, I., Bhatnagar, N., & Viswanath, P., 2008. Drilling Of Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastics: Experimental And Finite Element Study. *Materials & Design*, 29(2), 546-553.
- Skoczylas, J., Samborski, S., & Kłonica, M., 2019. The Application of Composite Materials in The Aerospace Industry, *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*, 5(1), 1-6.
- Tanabi, H., 2021. Investigation of The Temperature Effect on The Mechanical Properties of 3D Printed Composites, *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(2), 188-193.
- Terekhina, S., Skornyakov, I., Tarasova, T., & Egorov, S., 2019. Effects of The Infill Density on The Mechanical Properties of Nylon Specimens Made by Filament Fused Fabrication, *Technologies*, 7(3), 57.
- Türkmen, I., & Köksal, N. S., 2012. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (Ctp) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin Ve Darbe Dayanımının İncelenmesi, *Celal Bayar University Journal Of Science*, 8(2), 17-30.
- Yücel, U., 2019, Termoplastik Esaslı Partikül Katkılı Kompozit Malzemelerin Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.