

## ATMOSFERİK BASINÇLI PLAZMA UYGULAMASININ 3B BASKILARA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

*Murat DAL* \*<sup>ID</sup>  
*Kadir ÇAVDAR* \*\*<sup>ID</sup>

Alınma: 04.04.2022; düzeltme: 21.11.2022; kabul: 23.11.2022

**Öz:** Atmosferik basınçlı plazma, toz veya organik maddeden temizleme gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek veya boyama ve kaplama için iyi yapışma özellikleri elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmanın temel amacı, polilaktik asidin (PLA) daha yüksek yüzey enerjisi ve dolayısıyla iyi yapışma özellikleri sağlamak için plazma işleme uygulamasında optimum parametre seviyelerini belirlemektir. Yüzey enerjisi doğrudan yüzey temas açısı ile ilgili olduğundan, deneysel çalışma su temas açısının en aza indirilmesine dayanmaktadır. Sonuç, optimum parametre seviyeleri ile muamele edilmiş bir numune ile temas açısında yaklaşık %45 oranında kayda değer bir gelişme olduğunu göstermektedir. PLA'nın ıslanabilirliği, atmosferik plazma yüzey işleminin uygulanmasıyla geliştirilmiştir. Bu sonuçtan hareketle, tabakalar arası bağlanma performansının plazma işlemi ile de güçlendirileceği hipotezi ile her bir tabakada plazma ile muamele edilmiş PLA ile FDM ile üretilen numunelerin mukavemetini araştırmak için daha ileri çalışmalar yapılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Atmosferik Basınçlı Plazma, 3B Yazma, Yüzey Enerjisi, Temas Açısı, PLA

### Investigation of the Effect of Atmospheric Pressure Plasma Treatment on 3D Printing

**Abstract:** Atmospheric Pressure Plasma is a commonly used method to improve surface properties such as cleaning from soil or organic substance or to achieve good adhesion properties for painting and coating. The main objective of this study is to determine the optimum parameter levels for plasma treatment application to provide higher surface energy and therefore good adhesion properties of the polylactic acid (PLA). Since the surface energy is directly related to surface contact angle, experimental study is based on minimizing the water contact angle. The result shows remarkable improvement in contact angle about 45% with a sample treated with optimum parameter levels. The wettability of PLA has been improved with the application of an atmospheric plasma surface treatment. Starting from this result, with the hypothesis that interlayer bonding performance will be strengthened with plasma treatment too, further studies will be to investigate strength of the FDM manufactured samples with plasma treated PLA at each layer.

**Keywords:** Atmospheric Pressure Plasma, 3D Printing, Surface Energy, Contact Angle, PLA

## 1. GİRİŞ

Atmosferik basınçlı plazma (ABP) yüzey iyileştirme yöntemi günümüzde boyama, yapıştırma, pas ve gerilim giderme gibi birçok imalat sürecini olumlu yönde etkileyen ve giderek ekonomik hale gelen bir uygulamadır. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçaların beklenen mekanik dayanıma ulaşamaması problemine, atmosferik plazma uygulamasının çare olabileceği tezinden yola çıkılarak, plazma uygulama süreç parametrelerinin araştırılması amaçlanmıştır.

\* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle Bursa, Türkiye

\* Martur Fompak A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Nilüfer, Bursa, Türkiye. İletişim Yazarı: murat.dal@marturfompak.com

\*\* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059 Görükle Bursa, Türkiye

Geleneksel eksiltmeli imalat yöntemlerine kıyasla karmaşık formdaki üç boyutlu parçaların Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi ile üretimi daha kolay ve hızlıdır. Ayrıca Eİ yöntemi düşük yatırım maliyeti gerektirir. Eİ teknolojileri arasında en popüler ve ucuz yöntem “Ergiyik Biriktirme Yöntemi” dir (EBY). EBY yöntemi polimer malzemelerin bir nozuldan ekstrüzyon yöntemi ile akıtılmasına dayanmaktadır. Geleneksel ekstrüzyon yönteminden farklı ekstrüzyon kafasının dikey ve hareketli olmasıdır. Filament halindeki polimer ısıtılmış ekstrüzyon nozulünden kontrollü bir şekilde geçirilip yarı ergiyik hale getirilir. Ekstrüzyon kafasının yine kontrollü hareketleri ile çizgisel yollar halinde akıtılarak katlaşır. Bu çizgilerin yüzeyleri arasında yanyana ve bir alt katman ile üst üste yapışmalar gerçekleşir. Böylece istenen desene ait katmanlar üretilir ve 3B parça elde edilmiş olur.

Son yıllarda, bu teknoloji ile son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına ilgi artmıştır. Ancak EBY baskılı parçaların düşük mekanik dayanımları ve imalat yönteminin doğasından gelen anizotropik özellikler, bu yöntemin yaygın biçimde kullanımına engel olan temel problemdir. Dolayısıyla EBY ile eklemeli imalat yönteminde mevcut tekniklerde ve malzemelerde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu alandaki çalışmalar; çoğunlukla baskı parametrelerinde iyileştirmeler, kompozit malzeme geliştirme ve üretim öncesi / sonrası / sonrasında uygulanan ek işlemler şeklinde sıralanabilir.

Baskı parametrelerini ele alan çalışmaların birçoğunda yazdırma açısı ve baskı yönü incelenmiştir (Wimpenny ve diğ. 2016), (Ala’aldin ve diğ. 2017), (Ala’aldin ve diğ. 2017), (Sezer ve diğ. 2019), (Forster 2015), (Ahn ve diğ. 2002), (Ning ve diğ. 2017), (Es-Said ve diğ. 2000), (Balderrama-Armendariz ve diğ. 2018), (Zaldivar ve diğ. 2017), (Sun ve diğ. 2008), (Mei ve diğ. 2019), (Dawoud ve diğ. 2016).

Ayrıca ekstrüzyon sıcaklığı, baskı hızı, dolgu oranı, yazdırma deseni, baskı genişliği, katman yüksekliği, filamentler arası boşluk incelenen diğer parametrelerdendir (Ala’aldin Alafaghani ve Qattawi ve Alrawi ve diğ. 2017), (Sezer ve diğ. 2019), (Dawoud ve diğ. 2016), (Hamza ve diğ. 2018), (Yasa ve Ersoy 2019).

Yapılan araştırmalardan çıkan ortak sonuç, EBY eklemeli imalat yönteminde baskının Z yönünde anizotropik etkinin en yüksek olduğudur. Bunun nedeni, katmanlar arası yapışmanın zayıflığı (Ala’aldin Alafaghani ve Qattawi ve Ablat 2017), (Ala’aldin Alafaghani ve Qattawi ve Alrawi ve diğ. 2017), (Sezer ve diğ. 2019), (Sun ve diğ. 2008), (Koch ve diğ. 2017), (Kishore ve diğ. 2017), (Bryll ve diğ. 2018) ve imalat sırasında oluşan boşluklardır (Zaldivar ve diğ. 2017), (Yasa ve Ersoy 2019), (Koch ve diğ. 2017), (Tekinalp ve diğ. 2014), (Ning ve diğ. 2015), (Keleş ve diğ. 2018), (G. Li ve diğ. 2018), (Wang ve diğ. 2016), (J. Li ve Cai 2011)

Mekanik özellikleri iyileştirmek için karbon veya cam elyaf katkılı kompozit malzemelerle birlikte anizotropik özellikleri en aza indirmek amacıyla farklı araştırmacılar çeşitli yöntemler denemişlerdir: Keleş ve diğ. (2018) baskı kafasına monte edilen bir motor ile titreşim uygulayarak filamentler arasındaki boşluk oluşumunu azaltmış ve böylece mekanik özelliklerde iyileşme görülmüştür. Karbon fiber katkılı ABS malzeme ile yapılan çalışmada kırılma tokluğunda %49 artış sağlamışlardır. Ayrıca weibull analizi sonucu titreşim destekli imalat ile mekanik değerlerin güvenilirliğinin arttığı sonucuna varmışlardır (Keleş ve diğ. 2018).

Li ve diğ. (2018) yazıcı tablasını yazma işlemi bittikten sonra ultrasonik titreşime tabi tutarak mukavemet değerlerini artırmayı hedeflemiştir. Sonuç olarak PLA malzemedeki çekme mukavemetinin %22,83, eğme mukavemetinin %49,05 arttığını görmüşlerdir (G. Li ve diğ. 2018).

Camirero ve diğ. (2019) grafen nanoplatelet (GNP) katkısı ile PLA polimer malzemenin mekanik özelliklerini ve boyutsal kararlılığını incelemiştir. Çekme ve eğme mukavemeti sırasıyla 1,5 ve 1,7 kat artmasına rağmen darbe mukavemetinin 1,2 kat düştüğü sonucuna varmıştır (Camirero ve diğ. 2019).

Atmosferik basınçlı plazma uygulamasının malzemelerin yüzey enerjisini arttırdığı literatürdeki çalışmalarda gösterilmiştir (Ayas 2021), (Turgut ve Çave diğ. ar 2019), (Esen ve diğ. 2016). Bu sonuçlardan hareketle, atmosferik plazma uygulamasının eklemeli imalatta katmanlar

arası bağı arttırma amacıyla kullanılabileceği hipotezi ortaya konulmuştur. Bu hipotezi kuvvetlendiren literatürde az da olsa çalışma mevcuttur: Plazma uygulaması ile katmanlar arası yapışmayı iyileştirmek ve dolayısıyla mekanik mukavemeti arttırmaya yönelik çalışmalarda deney çubukları ile mekanik testlerden ziyade yüzey enerji ölçümü ve kayma testi ile değerlendirmeler yapılmıştır.

Narahara ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada PLA malzeme için yapışma dayanımını arttırmak üzere, katman atılacak yüzeye atmosferik plazma uygulamıştır. Bu uygulamanın yüzey enerjisini %75'e kadar yükselttiği ve kırılma mukavemetinin de %17'ye kadar arttığını göstermişlerdir (Narahara ve diğ. 2016).

Shih ve diğ. (2016) ise yine katmanlar arası yapışma kalitesini arttırmak için soğuk plazma yöntemini kullanmıştır. Bu şekilde PLA malzeme için Z yönündeki mukavemetin %100'den fazla artabileceğini ve X ve Y yönündeki mukavemetlere yaklaşabileceğini bulmuştur. Ancak farklı polimer malzemeler için plazma uygulamasının uygun parametreleri için ayrı çalışmalar yapılması gerektiğini vurgulamıştır (Shih ve diğ. 2019).

Abourayana ve diğ. (2018) ise ABS ve PLA granülleri filament haline getirilmeden farklı atmosferik şartlarda plazma şartlandırması tatbik etmişler ve bu granüllerden elde edilmiş filamentleri 3B imalatta kullanarak mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan plazma ön-işlemi ile çekme mukavemeti testlerinde ABS malzemede %22, PLA malzemede ise %16 artış gözlemlenmiştir. Ayrıca plazma aktivasyonunun yüzeydeki atıkların temizlenmesine göre 3B imalattaki mekanik özelliklerin artmasında daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. (Abourayana ve diğ. 2018)

Tsai ve diğ. (2016) ise eklemeli imalat sırasında katmanlar arası yapışma ve mukavemeti geliştirme, boşlukları azaltma ve su tutma özelliğini iyileştirmek için plazma kullanan bir metodun patentini almışlardır. Buluş bir eklemeli imalat cihazı ve plazma aplikatörü içermektedir. Plazma aplikatörü eklemeli imalat cihazına dönebilir şekilde bağlıdır ve malzeme yayıldıktan hemen sonra erimiş malzeme tabakasına veya bir sonraki tabaka yayılmadan hemen önce katlanmış bir tabakaya plazma uygulayabilir. Bazı uygulamalarda, plazmanın her katmandan önce ve sonra uygulanması için ikinci bir plazma aplikatörü dahil edilir. Bazı uygulamalarda ise plazma bitmiş bir imalatın son katmanına uygulanır. (WO 2016/154103 A1).

Sweney, C. B ve diğ. (2018) İletken malzeme katkılı bir termoplastik polimer malzeme kullanılan eklemeli imalat sırasında, katmanları kaynaştırmak için elektromanyetik enerjiyi üreten atmosferik plazmanın kullanıldığı yöntemi ortaya koymuşlardır ve patent başvurusunda bulunmuşlardır. Yöntem bir 3B yazıcı, plazma yayıcı ve elektromanyetik enerji kaynağı içermektedir. Plazmadan yayılan elektromanyetik enerji ile iletken malzemeli (karbon nanotüp) termoplastik kompozit malzeme ısınır ve yeni yayılan katman ile kaynaşması sağlanır. (WO 2018/156458 A1)

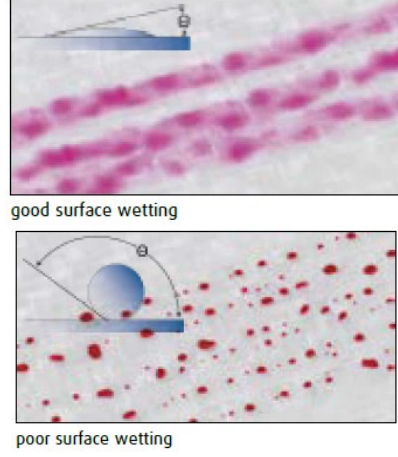
Jordá-Vilaplana ve diğ. (2014) ABP uygulaması ile PLA yüzeylerin ıslanabilirliğinin iyileştiğini göstermişlerdir. Yüzey enerji ölçümlerinde %62 oranında bir iyileşmeye ulaşılmıştır (37,1 mJ/m<sup>2</sup> den 60 mJ/m<sup>2</sup>). Çalışma da ayrıca mikroskopik incelemeler de yapılmış ve ABP uygulama sonrası yüzeylerdeki topografik değişimler incelenmiştir. (Jordá-Vilaplana ve diğ. 2014)

Plazma uygulamasının çalışmada incelenecek polimer malzemelerin yüzey enerjilerine etkileri su damlası temas açısı ile değerlendirilecektir. Çalışmada yüzey enerjisi belirlemedeki amaç sayısal verilerden çok göreceli olarak yüzey enerjisini en fazla artıran ve uygulanabilir olan plazma uygulamasının parametrelerini tayin etmek olduğundan, daha hızlı ve karşılaştırmalı olarak tutarlı sonuçlar vereceğinden su damlası açısı ölçümü ile yüzey enerji ölçümleri yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan plazma cihazı tedarikçisi Relyon Plazma firmasının da web sayfalarında belirttiği gibi: “yüzey enerjisi yapıştırma, vernikleme veya baskı gibi işlemlerde işlenecek yüzeyler için önemli bir parametredir. Bir yüzeyin ıslanabilirliği için önemlidir ve test mükrekpleri yardımıyla kolayca tespit edilebilir. Katmanlar yapıştırıcılar tarafından yeterince

ıslatılmazsa, bağın kalitesi düşecektir. Atmosferik plazma ile yüzey ön işleme ile yüzey enerjisi etkili bir şekilde artırılabilir. (Int Kyn. 1) .

Plazma uygulamasının yüzey enerjisini artırdığı, plasmatreteat firmasının ürün tanıtımlarında da gösterilmiştir, Şekil 1:



**Şekil 1:**  
*Yüzey ıslanabilirlik görselleri (Int Kyn. 1)*

Eklemeli imalata 3B baskılarda ve özellikle EBY de proses parametreleri birçok çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmalarda Taguchi ortogonal matrisleri de sıklıkla tercih edilmiştir.

Srivastava ve Rathee (2018), yine EBY de katman yüksekliği, kontur genişliği, iz genişliği ve izler arası boşluğu parametre olarak alıp her bir parametreyi 3 seviyede incelediği bir çalışma yapmıştır. Çıktı cevabı olarak malzeme hacmini alan araştırmacılar, Taguchi L9 deney matrisinden elde edilen sonuçları ile S/N analizi ve ANOVA analizi yaparak en uygun parametre seviyeleri ve faktörlerin görece yüzde katkısını tahmin etmişlerdir. (Srivastava ve Rathee 2018)

Rajpurohit ve Dave (2018), EBY ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerini artırmak için proses parametrelerinin seçimleri ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. İz açısı, katman yüksekliği ve iz genişliği parametreleri seçilmiş ve PLA malzeme ile basılan numunelerde çekme mukavemetlerini incelemişlerdir. Kurulan deney seti Taguchi L9 matrisine göre kurulmuştur. (Rajpurohit ve Dave 2018)

Moza ve diğ. (2015) ise EBY ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğu üzerinde proses parametre iyileştirme çalışması yapmışlardır. Filament malzemesi, dolgu oranı, kabuk sayısı parametrelerinin Taguchi L9 deney matrisi ile en uygun seviyelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. (Moza ve diğ. 2015)

Hamza ve diğ. (2018) boyutsal doğruluğun optimizasyonu için proses parametrelerine yazıcı parametrelerini de (platform sıcaklığı, ekstruder sıcaklığı ve baskı hızı) ekleyerek toplam 8 parametre için Taguchi L18 ortogonal matrisi ile değerlendirme yapmışlardır. Çalışmada boyutsal doğruluk ve baskı süresi birlikte değerlendirilerek parametrelerin bu çıktı cevaplarına etkileri incelenmiştir. (Hamza ve diğ. 2018).

Bu çalışmada, ABP uygulamasının parametreleri; uygulama hızı, uygulama mesafesi ve tekrar sayısı olarak seçilmiştir.

Katmanlar arası yapışmanın ve dolayısıyla mukavemetin, alt katmanın ıslanma açısı ile orantılı olduğu ilgili çalışmalarda gösterildiğinden, bu çalışmada da ıslanma açısını en çok etkileyen parametre seviyelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Deney matrisi kurulmasında birçok araştırmacının tercih ettiği şekilde Taguchi ortogonal L9 matrisi seçilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Temas açısı bir sıvının yüzeye ne kadar iyi (veya ne kadar zayıf) yayılacağına dair bir göstergedir. Şekil 2, katı bir yüzey üzerindeki damlanın 2B kesitini göstermektedir. Temas açısı, damla ana hattının katı yüzeyle kesiştiği noktadan damla ana hattı ile katı yüzey arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır.



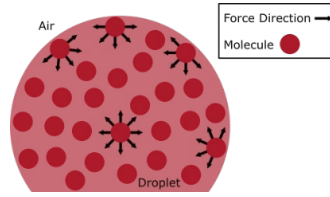
**Şekil 2:**  
Temas açısı. (Int Kyn. 2)

Temas açısı, araştırılan malzemelerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak büyük veya küçük olabilir. Şekil 3 bir yüzeyde üç farklı damla göstermektedir. En soldaki damla, katı yüzeye yayılmadığı için büyük bir temas açısına sahiptir. Sağdaki damla, iyi yayıldığı için düşük temas açısına sahiptir. Büyük temas açılı yüzeyler hidrofobik, küçük temas açılı yüzeyler ise hidrofilik olarak adlandırılır.



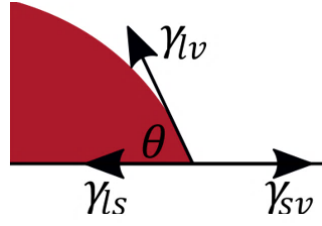
**Şekil 3:**  
Farklı temas açıları (hidrofobik ve hidrofilik yüzeyler) (Int Kyn. 2)

Yüzey Gerilimi ise bileşen molekülleri arasındaki etkileşimlerle belirlenir. Bir sıvı damlasındaki moleküller Şekil 4'te gösterilmiştir. Damlacıkların büyük kısmında, moleküller arası kuvvetler her taraftan eşit olarak bir molekül üzerinde hareket eder. Bununla birlikte, damlacık yüzeyinde, dış tarafta sıvı moleküllerin yokluğu vardır.



**Şekil 4:**  
Damlacık yüzey gerilimi (Int Kyn. 2)

Yüzeydeki moleküller, her taraftan çekilmedikleri için kütledeki moleküllerden daha güçlü bir şekilde birbirlerine bağlanırlar. Bu, bir nesnenin yüzeye nüfuz etmesinin, bir nesnenin suya batırıldıktan sonra yığın içinde hareket etmesinden daha zor olduğu anlamına gelir. Dengeli Kuvvetler Bir damlacık katı bir yüzeyle temas ettiğinde göz önünde bulundurulacak üç sınır vardır: katı, sıvı ve onları çevreleyen buhar (genellikle hava).



Şekil 5:  
Temas açısı kuvvetleri (Int Kyn. 2)

Şekil 5, damlacık kenarının katı bir yüzeye buluştuğu noktanın kuvvet diyagramını gösterir. Üç ok, yüzey gerilimlerinin üç arayüzde uyguladığı kuvvetleri temsil eder: sıvı-yüzey (ls), sıvı-buhar (lv) ve yüzey-buhar (sv). Her kuvvet denge noktasından uzaklaşma yönünde etki eder, bu nedenle damlacık dengedeysse, kuvvetler dengelenir ve aşağıdaki denklemle tanımlanabilir:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{ls} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (1)$$

Burada  $\cos \theta$  sıvı buhar yüzey geriliminin x bileşenini verir. Denklem aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lv}} \quad (2)$$

Bu denklemden aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Eğer  $\gamma_{sv} > \gamma_{ls}$  ise  $\cos \theta$  pozitifdir ve  $\theta < 90^\circ$  (damla yüzeyi ıslatır). Bu durum, yüksek yüzey enerjili bir katı (metal gibi) veya düşük yüzey gerilimli bir sıvı ile ortaya çıkabilir.
- Eğer  $\gamma_{sv} < \gamma_{ls}$  ise  $\cos \theta$  negatiftir ve bu nedenle  $\theta > 90^\circ$  (damla yüzeyi ıslatmaz). Bu durum, düşük yüzey enerjili bir katı veya yüksek yüzey gerilimli bir sıvı (su gibi) ile ortaya çıkabilir.

Bu çıkarımlar, yüzey enerji yoğunluğunu ( $J/m^2$ ) ile yüzey gerilimi ( $N/m$ ) ile nasıl kıyaslanabildiği sorusunu gündeme getirebilir. Ancak;

$$\text{Yüzey Enerji Yoğunluğu} = \frac{\text{Enerji}}{\text{Alan}} = \frac{J}{m^2}$$

$$\text{Enerji} = \text{Kuvvet} \times \text{mesafe} = Nm$$

$$\text{Yüzey Enerji Yoğunluğu} = \frac{Nm}{m^2} = \frac{N}{m}$$

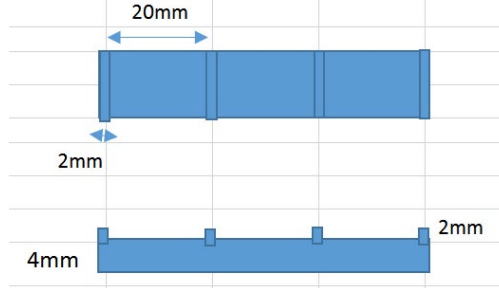
Dolayısıyla yüzey enerjisi ile yüzey gerilimi kıyaslanabilir büyüklüklerdir ve her ikisi de temas açısı ile orantılıdır.

## 2.1. Numune hazırlanması ve Temas açısı ölçümü

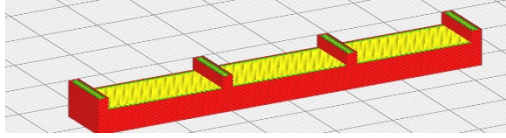
Görüntü işleme olarak temas açısı belirleme katı yüzey üzerine damlatılan bir sıvı ve kamera kayıtlarındaki görüntü üzerinden uygun bir yazılım ile açı belirlenmesi şeklinde yapılmıştır. Bu amaçla Nikon D5300 fotoğraf makinası ve AF-S DX NIKKOR 18-105mm lens kullanılmış, Kinovea yazılımı ile açı belirleme yapılmıştır. Sıvı olarak su kullanılmış ve bir damlalık ile hazırlanan PLA yüzeylere damlatılmıştır. Ölçüm yapılacak PLA yüzeyler için şekil 6 daki

numune tasarlanmış ve Ultimaker Cura yazılımının 4.13.1 sürümü ile gcode üretilmiştir. Daha sonra bu gcode ile Creality Ender 5 Plus 3B Yazıcı ile (Şekil 7) üretim yapılmıştır.

Temas açısı ölçümü için herhangi bir numune standardı bulunmadığından, çalışmadaki numune boyutları 3 tekrar yapabilecek şekilde tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Numune üretiminde kullanılan filament “ESUN PLA+”dır



a. Temas ölçümü yapılacak numune boyutları



b. Temas ölçümü yapılacak numune Cura ekran görüntüsü



c. Temas ölçümü yapılacak numune örnek resmi

**Şekil 6:**  
Temas açısı ölçme numunesi



**Şekil 7:**  
Creality Ender 5 Plus 3B Yazıcı

Numune üzerine 3 adet su damlası damlatılıp 3 açı ölçümünün ortalaması alınmıştır. Şekil 8 da örnek bir numune ve su damlatma kamera görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 8:**  
Numune üzerinde su damlatma kamera örnek görüntüsü

## 2.2. Deney Tasarımı

Bu çalışmada, Taguchi'nin Ortogonal dizi yöntemi kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Taguchi ortogonal dizileri deney tasarımlarında en çok kullanılan ve deney maliyeti ve doğruluk açısından en uygun dizilerdir. Taguchi ortogonal dizilerin özelliği belirli bir parametrenin her seviyesi için diğer parametrelerin her birinin tüm seviyeleri en az bir kez test edilmesidir. Tablo 1 çalışmada kullanılan L9 matrisinin parametre (P) ve seviye (L) dizilişlerini göstermektedir.

**Tablo 1. L9 Ortogonal deney matrisi**

Taguchi, P = 3 (A,B,C), L = 3 (1,2,3)				
Deney	A	B	C	Sonuç
1	1	1	1	Y1
2	1	2	2	Y2
3	1	3	3	Y3
4	2	1	2	Y4
5	2	2	3	Y5
6	2	3	1	Y6
7	3	1	3	Y7
8	3	2	1	Y8
9	3	3	2	Y9

Çıktı yanıtı olarak temas açısı kullanılan deney tasarımında plazma uygulama parametreleri giriş parametreleri ve her bir parametre için de 3 seviye seçilmiş, dolayısıyla L9 Taguchi ortogonal dizisi oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan plazma cihazı Relyon Plasma GmbH firmasına ait piezobrush® PZ2 tipi atmosferik soğuk plazma cihazıdır. Plazma uygulama parametreleri ise ürün kataloğundaki uygulama parametreleri arasından mesafe, hız şeklinde ve ek olarak da tekrar sayısı olacak şekilde toplam 3 parametre seçilmiştir.

Plazma uygulamasının dar bir alanda uygulanacak olması nedeniyle parametre seviyeleri genel kullanım önerilerinden daha düşük değerlerde seçilmiştir. Uygulama hızı 5-10 ve 15mm/s, uygulama mesafesi 2-4 ve 6mm, yüzey üzerine uygulama sayısı da 1-2 ve 3 tekrar olarak seçilmiştir. Seçilen parametre ve seviyelere göre oluşturulan L9 ortogonal matris Tablo 2 de verilmiştir.



**Tablo 2. Deney parametre ve seviyeleri le oluşturulmuş L9 Deney matrisi**

Deney No:	Hız (mm/s)	Mesafe (mm)	Tekrar (-)
P1	5	2	1
P2	5	4	2
P3	5	6	3
P4	10	2	2
P5	10	4	3
P6	10	6	1
P7	15	2	3
P8	15	4	1
P9	15	6	2

Test sonuçlarının değerlendirilmesi için bir dizi istatistiksel işlem yapılması gerekmektedir. Fonksiyonun gürbüzlüğüne değerlendiren, hedef performans civarındaki varyansı, istikrar ve güvenilirliğini ölçen bir Sinyal/Gürültü (S/N) oranı belirlenmelidir. En çok uygulanan üç tane S/N oranı; Hedef değer en iyi, En küçük en iyi ve En büyük en iyidir. Çalışmanın amacı yüzey temas açısını en çok düşüren parametre seviyelerini belirlemek olduğu için amaca uygun olan En küçük en iyi S/N formülüdür.

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (3)$$

Burada;

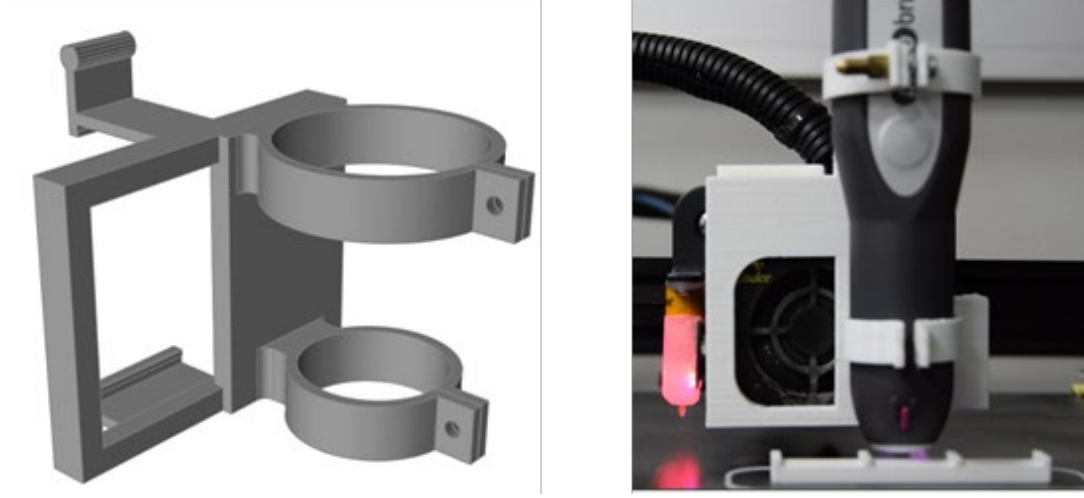
Y: Performans karakteristik değeri (temas açısı),

n: Y değerlerinin sayısıdır.

Burada amaç S/N oranını maksimize etmektir. S/N oranını maksimize etmek, bir yandan sinyali arttırırken, diğer yandan da varyansı azaltmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen S/N değerleri hakkında yorum yapmak için bu değerlerin standart sapmaları, aritmetik ortalamaları, serbestlik derecelerinin hesaplanması gibi matematiksel ve istatistiksel işlemler yapılarak Varyans Analizi (ANOVA) tablosu oluşturulmaktadır. Varyans analizi yapıldıktan sonra daha önce yapılan deney şartları ile aynı olacak şekilde ve seçilen parametrelerin öngörülen en iyi seviye değerleri ile uygulanacak bir test deneyi daha yapılması deneylerin tutarlılığının kontrolü için gerekmektedir.

### 2.3. Deney düzeneği ve ölçümler

Temas açısı ölçümünde kullanılacak numuneler 3 boyutlu tasarlandıktan sonra Ultimaker Cura ile gcode hazırlanmıştır. Ayrıca plazma cihazını ekstrüder kafasına monte edecek adaptör parça da 3 boyutlu tasarlanıp Ergiyik Biriktirme Yöntemi, EBY ile üretilmiştir. Şekil 9, plazma adaptör parça tasarımını ve yazıcı ekstrüdere monte edilmiş halini göstermektedir.



**Şekil 9:**  
*Plazma adaptör parça tasarımı ve yazıcı ekstrüdere monte edilmiş hali*

Plazma uygulaması, numune için hazırlanan gcode un sonuna filament geri çekme işlemi yapıldıktan sonra deney matrisindeki deney sırasına göre parametre seviyelerini ayarlama için ek satırlar eklenerek sağlanmıştır.

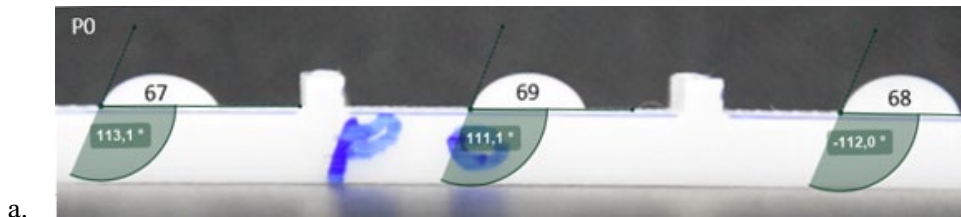
Plazma uygulanmayan P0 numunesi ve deney matrisindeki tüm numunelerin basımı bittikten sonra kamera kaydı ile su damlacıkları damlatılmış ve temas açısı Kinovea yazılımının 0.9.3 sürümü ile ölçülmüştür. Şekil 10 deney matrisindeki 9 numuneyi ve plazma uygulanmamış P0 numunesini göstermektedir.



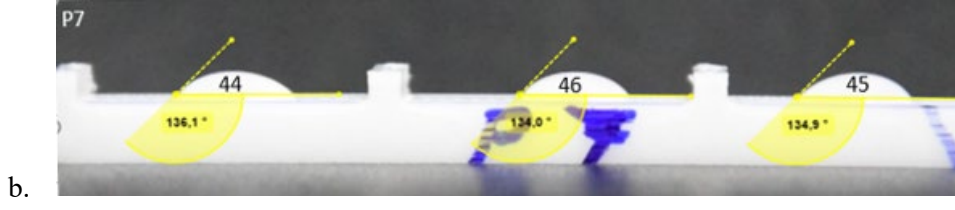
**Şekil 10:**  
*Temas ölçümlerinde kullanılan numuneler.*

### 3. BULGULAR

Deney sonuçlarının (temas açısı değerleri) değerlendirilmesi, 3 damla için yapılan kamera görüntüsü açı ölçümlerinin ortalaması ile yapılmıştır. Şekil 11 örnek olarak P0 ve P7 numunelerindeki açı ölçümlerini göstermektedir.



a.



b.

**Şekil 11:**

*P0 ve P7 Açılı ölçüm sonuçları; a. P0 numunesi b. P7 numunesi*

Tablo 3, L9 matristeki tüm temas açısı ölçümlerini, ortalama değerleri ve plazma uygulanmamış yüzeye göre yüzdelik değişimi göstermektedir.

**Tablo 3. Temas açısı ölçüm sonuçları**

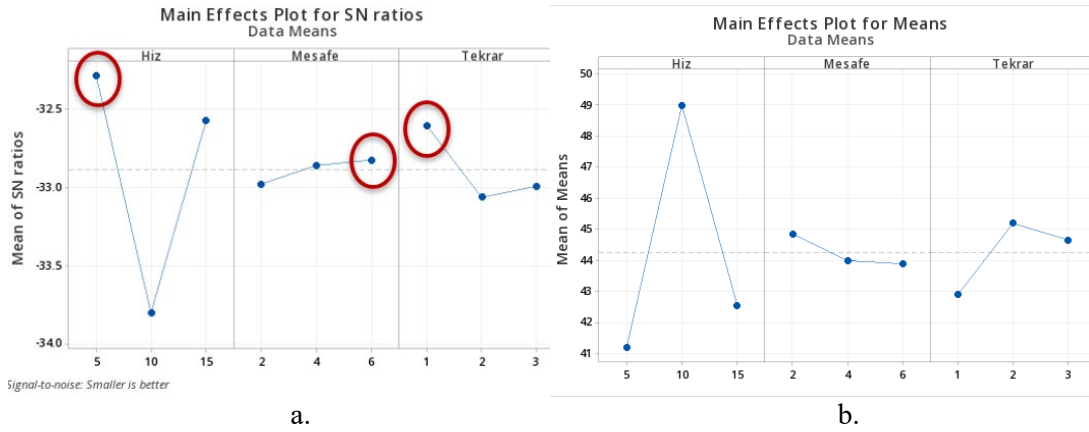
Deney No:	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama (°)	% (1-Px/P0)
P0	67	69	68	68,0	-
P1	39	39	37	38,3	%44
P2	43	42	45	43,3	%36
P3	41	42	43	42,0	%38
P4	50	51	53	51,3	%25
P5	47	49	46	47,3	%30
P6	47	48	51	48,7	%28
P7	44	46	45	45,0	%34
P8	42	43	40	41,7	%39
P9	42	41	40	41,0	%40

Ölçülmüş değerler Minitab-18 yazılımı ile analiz edilmiştir. Parametrelerin en iyi kombinasyonunu bulmak için ortalamaların analizi ve S/N oranı tabloları ve grafikleri elde edilmiştir. S/N oranı sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4. Parametre seviyelerinin S/N oranları**

Seviye	Hız	Mesafe	Tekrar
1	-32,29	-32,98	-32,61
2	-33,80	-32,86	-33,06
3	-32,57	-32,82	-32,99
Fark	1,51	0,16	0,45
Sıralama	1	3	2

Tablo 4'te bulunan parametrelerin en büyük değerlerinin sahip olduğu seviye, o parametrenin en iyi seviyesine, yani temas açısının en düşük olduğu deney sonucuna işaret etmektedir. Hesaplanan bu değerler her bir parametre için Şekil 12'te grafik olarak gösterilmiştir.



a.

b.

**Şekil 12:**

*Seviye etkileri grafikleri (S/N oranı) ve ortalama analizi grafikleri*  
a. S/N oranları grafiği b. Ortalamalar analizi grafiği

Şekil 12 incelendiğinde ve Tablo 4'teki sıralamaya bakıldığında, plazma uygulama hızının temas açısı değeri üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Uygulama mesafesi için değerler yakın olduğu için temas açısı üzerinde etkisi yok denilebilir, tekrar sayısına baktığımızda ise bir tekrarın en iyi seviye olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, S/N oranlarının en yüksek olduğu daire içerisindeki değerler optimum parametre setini vermekte olup, söz konusu set hız: 5mm/s, mesafe 6mm ve tekrar sayısı 1 olarak belirlenmiş ve ilgili parametreler Tablo 5 de listelenmiştir.

**Tablo 5. Optimum parametreler ve beklenen S/N oranı ile hedef açı değeri**

Parametreler			Tahmin	
Hız	Mesafe	Tekrar	S/N	Ortalama
5 mm/s	6 mm	1	-31,9	39,4

### 3.1. Doğrulama Deneyleri

Taguchi tasarımına göre, incelenen her faktör için optimum performansa (en düşük temas açısı) ulaşılmasını sağlayacak olan seviyeler, S/N oranları içerisinde her faktör için en büyük değerin olduğu seviyenin alınması ile; hız 5mm/s, mesafe 6mm ve tekrar sayısı 1 olarak tespit edilmiştir. Ancak L9 deney tasarımı içerisinde bu noktada deney yapılmamıştır. Dolayısıyla bir numune daha hazırlanarak Taguchi analizi sonucuna göre plazma uygulaması yapılmıştır.

Doğrulama deneyi ile plazma uygulamasının yüzey temas açısını %45 e kadar azaltabileceği (68,0° den 37,3° ye) gösterilmiştir: Şekil 13 ve Tablo 6.



**Şekil 13:**

*Optimum Seviye seçimi ile yüzey temas açısı ölçüm sonucu.*

**Tablo 6. Doğrulama deneyi ölçüm sonuçları**

Deney No:	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama (°)	% (1-Px/P0)
P0	67	69	68	68,0	-
P1	36	37	39	37,3	%45

#### 4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, 3B yazıcılar ile üretilen deney numunelerinin yüzeylerinde atmosferik basınçlı plazma uygulaması ile yüzey enerjilerinin artırılmasına etki eden parametreler araştırılmıştır. Yüzey enerjisinin artışı su damlacık denemeleri yolu ile tespit edilmiştir. Yüzey enerjisinin artışının katmanlar arasındaki yüzey enerjisinin artışı ile paralel olduğu yani aynı yüzey enerjisi artışının katmanlar arası yapışma kuvvetini de arttıracığı hipotezinin deney gerçekleştirilmesinde ilk adım olarak bu denemeler kurgulanmış ve sonuca ulaşılmıştır. %45 değerinde bir yüzey enerjisi artışına paralel şekilde büyük bir katmanlar arası yapışma kuvvetinde iyileşme ABP uygulaması ile sağlanabilir. Gelecek çalışmada bunun deneysel kurgusu üzerinde durulacaktır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

#### YAZAR KATKISI

Yazarlardan Murat Dal çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, Kadir Çavdar çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri analizi ve yorumlama, fiziksel içeriğin eleştirel incelemesi konularında makaleye katkı sağlamışlardır.

#### KAYNAKLAR

1. Abourayana, H., Dobbyn, P., Dowling, D. 2018. Enhancing the mechanical performance of additive manufactured polymer components using atmospheric plasma pre-treatments. *Plasma Processes and Polymers*, 15(3):. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700141>
2. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K. 2002. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4):, 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
3. Alafaghani, Ala'aldin, Qattawi, A., Ablat, M. A. 2017. Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling. *Open Journal of Applied Sciences*, 07(06):, 291–318. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2017.76024>
4. Alafaghani, Ala'aldin, Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A. 2017. Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing*, 10:, 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>
5. Ayas, K. 2021. Atmosferik basınçlı plazma uygulaması ile polipropilen malzemelerde yüzey işlemleri. , 1179–1190. <https://doi.org/10.17482/uumfd.977508>
6. Balderrama-Armendariz, C. O., MacDonald, E., Espalin, D., Cortes-Saenz, D., Wicker, R., Maldonado-Macias, A. 2018. Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1–4):, 307–

317. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1602-0>
7. Bryll, K., Piesowicz, E., Szymański, P., Slaczka, W., Pijanowski, M. 2018. Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D Printing Technology. MATEC Web of Conferences, 237:, 0–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823702006>
  8. Caminero, M. Á., Chacón, J. M., García-Plaza, E., Núñez, P. J., Reverte, J. M., Becar, J. P. 2019. Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture. *Polymers*, 11(5):. <https://doi.org/10.3390/polym11050799>
  9. Dawoud, M., Taha, I., Ebeid, S. J. 2016. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 21:, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002>
  10. Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., Pregger, B. A. 2000. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(1):, 107–122. <https://doi.org/10.1080/10426910008912976>
  11. Esen, S. G., Altuncu, E., Üstel, F., Akpınar, S. 2016. Atmosferik plazma yüzey aktivasyon işlemi ile farklı yüzey tarama hızlarının polipropilen yüzey ıslatma özelliklerine etkisi Different plasma scanning velocities effect on surface wettability properties of polypropylene by atmospheric plasma surface activ. , 307–316.
  12. Forster, A. M. 2015. Materials testing standards for additive manufacturing of polymer materials: State of the art and standards applicability. *Additive Manufacturing Materials: Standards, Testing and Applicability*, 67–123.
  13. Hamza, I., Abdellah, E. G., Mohamed, O. 2018. Experimental optimization of fused deposition modeling process parameters: A Taguchi process approach for dimension and tolerance control. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2018(JUL):, 2992–2993.
  14. Jordá-Vilaplana, A., Fombuena, V., García-García, D., Samper, M. D., Sánchez-Nácher, L. 2014. Surface modification of polylactic acid (PLA) by air atmospheric plasma treatment. *European Polymer Journal*, 58:, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.06.002>
  15. Keleş, Ö., Anderson, E. H., Huynh, J. 2018. Mechanical reliability of short carbon fiber reinforced ABS produced via vibration assisted fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 24(9):, 1572–1578. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2017-0247>
  16. Kishore, V., Ajinjeru, C., Nycz, A., Post, B., Lindahl, J., Kunc, V., Duty, C. 2017. Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. *Additive Manufacturing*, 14:, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.008>
  17. Koch, C., Van Hulle, L., Rudolph, N. 2017. Investigation of mechanical anisotropy of the fused filament fabrication process via customized tool path generation. *Additive Manufacturing*, 16:, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.003>
  18. Li, G., Zhao, J., Wu, W., Jiang, J., Wang, B., Jiang, H., Fuh, J. Y. H. 2018. Effect of ultrasonic vibration on mechanical properties of 3D printing non-crystalline and semi-crystalline polymers. *Materials*, 11(5):. <https://doi.org/10.3390/ma11050826>
  19. Li, J., Cai, C. L. 2011. The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites. *Current Applied Physics*, 11(1):, 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.06.017>

20. Mei, H., Ali, Z., Yan, Y., Ali, I., Cheng, L. 2019. Influence of mixed isotropic fiber angles and hot press on the mechanical properties of 3D printed composites. *Additive Manufacturing*, 27(November 2018):, 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.008>
21. Moza, Z., Kitsakis, K., Kechagias, J., Mastorakis, N. 2015. Optimizing Dimensional Accuracy of Fused Filament Fabrication using Taguchi Design. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2015/Salerno/IMAS/IMAS-14.pdf>
22. Narahara, H., Shirahama, Y., Koresawa, H. 2016. Improvement and Evaluation of the Interlaminar Bonding Strength of FDM Parts by Atmospheric-Pressure Plasma. *Procedia CIRP*, 42(Isem Xviii):, 754–759. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.314>
23. Ning, F., Cong, W., Hu, Y., Wang, H. 2017. Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, 51(4):, 451–462. <https://doi.org/10.1177/0021998316646169>
24. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., Wang, S. 2015. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80:, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
25. Rajpurohit, S. R., Dave, H. K. 2018. Flexural strength of fused filament fabricated (FFF) PLA parts on an open-source 3D printer. *Advances in Manufacturing*, 6(4):, 430–441. <https://doi.org/10.1007/s40436-018-0237-6>
26. Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R., Özdemir, V. 2019. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: Effect of fiber content and process parameters on mechanical properties. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2):, 663–674. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416523>
27. Shih, C. C., Burnette, M., Staack, D., Wang, J., Tai, B. L. 2019. Effects of cold plasma treatment on interlayer bonding strength in FFF process. *Additive Manufacturing*, 25(October 2018):, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.005>
28. Srivastava, M., Rathee, S. 2018. Optimisation of FDM process parameters by Taguchi method for imparting customised properties to components. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3):, 203–210. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1440722>
29. Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., Gu, P. 2008. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2):, 72–80. <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>
30. Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Blue, C. A., Ozcan, S. 2014. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105:, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.009>
31. Turgut, M., Çavdar, K. 2019. ATMOSFERİK PLAZMA YÜZEY İŞLEMİ İLE FARKLI ŞARTLAR ALTINDA KAUÇUK -NONWOVEN ARASI YAPIŞMA DAVRANIŞININ GELİŞTİRİLMESİ Mehmet TURGUT, Bursa Uludağ University.
32. Wang, J., Xie, H., Weng, Z., Senthil, T., Wu, L. 2016. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials and Design*, 105:, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.078>
33. Wimpenny, D. I., Pandey, P. M., Jyothish Kumar, L. 2016. *Advances in 3D Printing &*

additive manufacturing technologies. *Advances in 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, 1–186. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2>

34. *WO 2016/154103 A1*.

35. *WO 2018/156458 A1*.

36. Yasa, E., Ersoy, K. 2019. Dimensional accuracy and mechanical properties of chopped carbon reinforced polymers produced by material extrusion additive manufacturing. *Materials*, 12(23):, 3885. <https://doi.org/10.3390/ma12233885>

37. Zaldivar, R. J., Witkin, D. B., McLouth, T., Patel, D. N., Schmitt, K., Nokes, J. P. 2017. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-Printed ULTEM ® 9085 Material. *Additive Manufacturing*, 13:, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.007>

### ***İnternet kaynakları***

1. <https://www.relyon-plasma.com/surface-energy/?lang=en>, (17.01.2022)
2. <https://www.ossila.com/pages/contact-angle-theory-measurement#What-is-a-contact-angle>, (19.01.2022)