



Optimization of drilling process parameters for additive manufacturing parts produced using the FDM method

Ezgi Selen Zorer¹ , Emre Ayhan² , Mustafa Yurdakul¹ , Yusuf Tansel İç^{3*} 

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

²Department of Electronic and Automation, Technical Sciences Vocational School, Gazi University, 06500, Ankara, Türkiye

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Başkent University, 06790, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Hole tolerance values of plates produced with melt deposition modeling have been improved
- The best parameters were determined with the help of experimental design and the TOPSIS method
- The results were confirmed by validation experiments

Keywords:

- Fused deposition modeling method
- FDM
- Polycarbonate material
- Design of experiment
- TOPSIS

Article Info:

Research Article

Received: 19.09.2023

Accepted: 28.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1363157

Correspondence:

Author: Yusuf Tansel İç

e-mail:

yustanic@baskent.edu.tr

phone: +90 312 246 6658

Graphical/Tabular Abstract

In this study, experiments were carried out to improve the tolerance values of the holes on the plates made of polycarbonate material, which is widely used in prototyping and production tools (welding, drilling, fixing) with FDM, and the optimum processing parameters were determined using the integrated design of experiment and TOPSIS methods (Figure A).

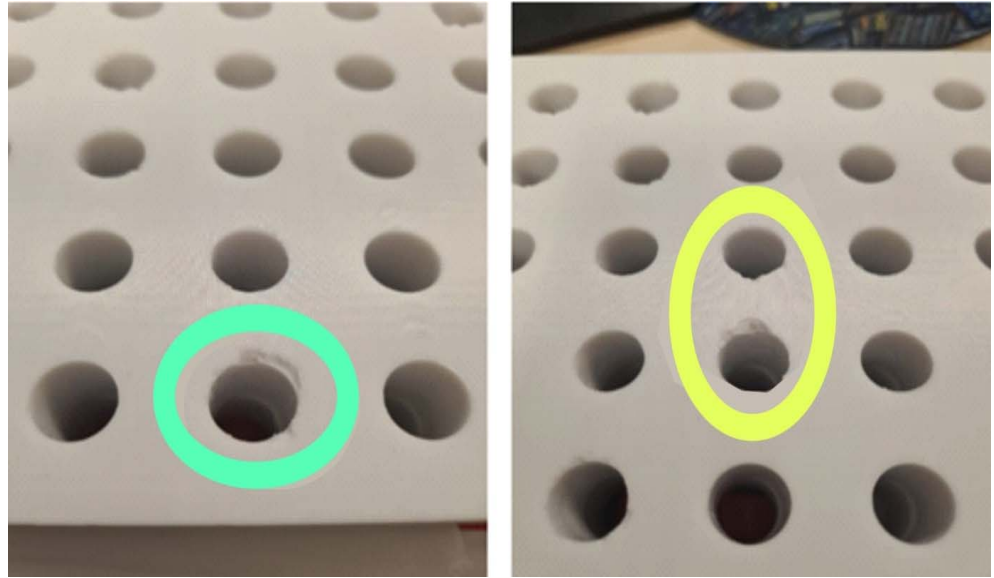


Figure A. The negative effect of changes in spindle speed on hole quality

Purpose:

We optimized drilling process parameters for additive manufacturing parts produced using the FDM method

Theory and Methods:

The optimum processing parameters were determined using the integrated design of experiment and TOPSIS methods.

Results:





According to the obtained results, the optimum drilling parameters for the plate without pre-drilling case could be obtained by selecting HSS as the drill material, using cutting fluid, and setting the feed rate to 390.9091 mm/min and the spindle speed to 1000 rpm. For the pre-drilled plate, the optimum drilling parameters were again obtained by selecting the drill material HSS, using cutting fluid and applying the feed rate to 369.6970 mm/min and the spindle speed to 781.8182 rpm.

Conclusion:

With the verification experiments carried out on plates without and with pre-holes, it was seen that the best results were obtained within the specified conditions of 4 test outputs.



FDM yöntemi ile üretilen eklemeli imalat parçaları için delik delme işlem parametrelerinin optimizasyonu

Ezgi Selen Zorer¹ , Emre Ayhan² , Mustafa Yurdakul¹ , Yusuf Tansel İç^{3*} 

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

³Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Etimesgut, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Eriyik yığıma modelleme ile üretilen plakaların delik tolerans değerleri iyileştirilmiştir
- Deney tasarımı ve TOPSIS yöntemi yardımıyla en iyi parametreler tespit edilmiştir
- Doğrulama deneyleri ile sonuçlar doğrulanmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.09.2023

Kabul: 28.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1363157

Anahtar Kelimeler:

Eriyik yığıma modelleme yöntemi,
EYM,
polikarbonat malzeme,
deney tasarımı,
TOPSIS

ÖZ

Eriyik yığıma modelleme yöntemi (EYM), malzeme filamentlerinin katmanlı olarak birleştirilmesini temel alan ve günümüzde 3B baskı olarak bilinen ve yaygınlaşan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Ancak, havacılık sanayinde EYM ile üretilmiş olan parçaların istenilen boyutsal ve geometrik tolerans değerlerine sahip olmadığı görülmektedir. Bu sebeple EYM yöntemi ile üretilen parçaların istenilen tolerans değerlerine getirilmesi için farklı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada EYM ile prototipleme ve üretim takımlarında (kaynak, delik delme, sabitleme) yaygın olarak kullanılan polikarbonat malzemeden imal edilen plakalar üzerindeki deliklerin tolerans değerlerinin iyileştirilmesine yönelik deneyler yapılmış ve deney tasarımı ile bütünleşik olarak TOPSIS yöntemi kullanılarak en iyi işleme parametreleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; ön deliksiz plaka için en iyi delik delme parametreleri matkap malzemesi olarak yüksek hız çeliği (YHÇ) seçilerek, kesme sıvısı kullanılarak, ilerleme hızını 390,9091 mm/dk., iş mili hızını 1000 dev/dk. olarak ayarlayarak elde edilebilmiştir. Ön delikli plaka içinse en iyi delik delme parametreleri yine matkap malzemesi YHÇ seçilerek, kesme sıvısı kullanılarak, ilerleme hızını 369,6970 mm/dk., iş mili hızı ise 781,8182 dev/dk. olacak şekilde uygulayarak elde edilebilmiştir.

Optimization of drilling process parameters for additive manufacturing parts produced using the FDM method

H I G H L I G H T S

- Hole tolerance values of plates produced with melt deposition modeling have been improved
- The best parameters were determined with the help of experimental design and the TOPSIS method
- The results were confirmed by validation experiments

Article Info

Research Article

Received: 19.09.2023

Accepted: 28.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1363157

Keywords:

Fused deposition modeling method,
FDM,
polycarbonate material,
design of experiment,
TOPSIS.

ABSTRACT

The melt deposition modeling method (FDM) is one of the increasingly widespread additive manufacturing methods, known as 3D printing, based on the layered assembly of material filaments. However, it is seen that the parts produced with FDM in the aviation industry do not have the desired dimensional and geometric tolerance values. For this reason, different manufacturing methods are used to bring the parts produced by the FDM method to the desired tolerance values. In this study, experiments were carried out to improve the tolerance values of the holes on the plates made of polycarbonate material, which is widely used in prototyping and production tools (welding, drilling, fixing) with FDM, and the optimum processing parameters were determined using the integrated design of experiment and TOPSIS methods. According to the obtained results, the optimum drilling parameters for the plate without pre-drilling case could be obtained by selecting HSS as the drill material, using cutting fluid, and setting the feed rate to 390.9091 mm/min and the spindle speed to 1000 rpm. For the pre-drilled plate, the optimum drilling parameters were again obtained by selecting the drill material HSS, using cutting fluid and applying the feed rate to 369.6970 mm/min and the spindle speed to 781.8182 rpm.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : ezgiselen.can@gazi.edu.tr, ayhanemre@hotmail.com, yurdakul@gazi.edu.tr, yustanic@baskent.edu.tr / Tel: +90 312 246 6658

1.Giriş (Introduction)

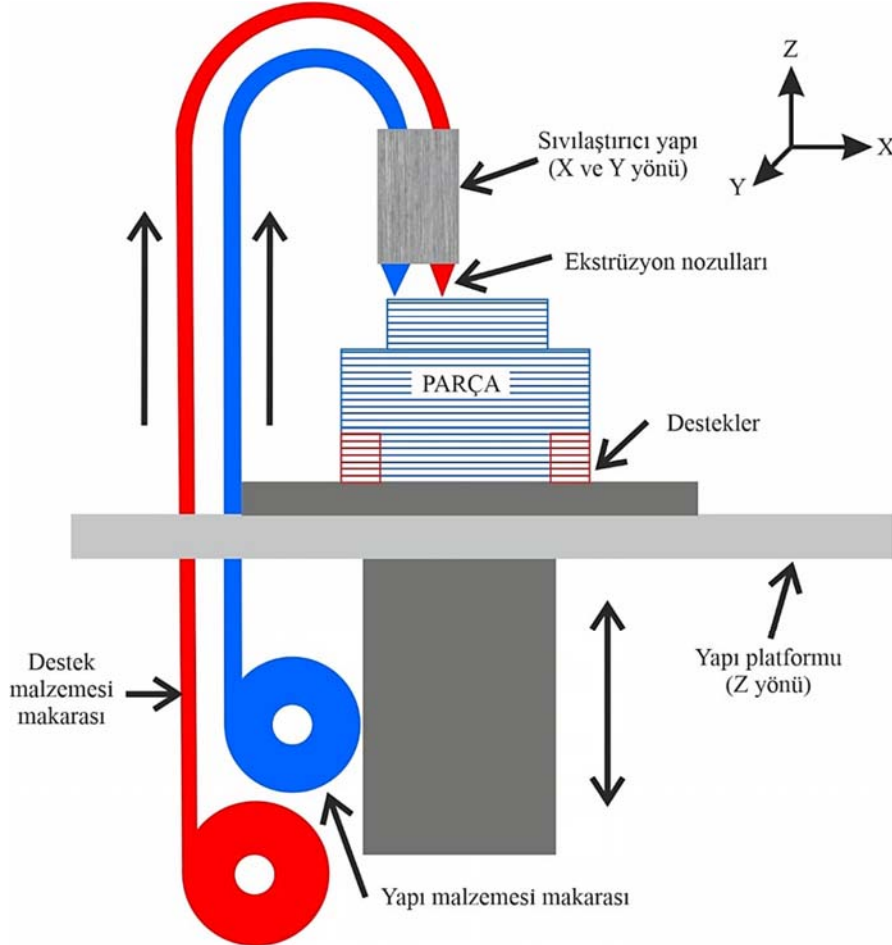
1980'li yıllarda geliştirilmeye başlanan eklemeli imalat yöntemi talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak metal, plastik, kompozit ve çeşitli malzemelerin katmanlar şeklinde birleştirilmesi ile nesnelere oluşturma sürecidir [1-3]. Eklemeli imalat yöntemleri savunma sanayii başta olmak üzere otomotiv, uzay ve havacılık gibi sektörlerde yoğun kullanılmaktadır. Yöntem katmanlı imalat veya eklemeli katmanlı imalat olarak isimlendirilmektedir. Malzeme atığı ve son işlem ihtiyacının en aza indirildiği parçaların üretilmesi sebebiyle çevresel ve ekolojik olarak umut vaat eden bir üretim yöntemidir. Bunlarla birlikte karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesine olanak sağlaması sebebiyle "tasarım özgürlüğü" sunmaktadır [4, 5]. Bu avantajlara ek olarak; tasarımın doğrudan imal edilebilmesine imkan tanınması, üretilecek parçaların farklı doluluk oranlarına göre imal edilebilmesi, ürün geliştirme sürelerinin kısalması, parçaların daha küçük üretim alanlarında imal edilebilmesi ve talep anında üretimin yapılabilmesine izin verilmesi yöntemin avantajları olarak ifade edilmektedir [6]. Gelişmekte olan bir yöntem olması, düşük tolerans değerleri sunması ve yüksek hacimli imalat söz konusu olduğunda maliyetin artışı yöntem adına dezavantajları oluşturmaktadır [7].

Eriyik yığıma modelleme (EYM) yöntemi (Şekil 1) Scott Crump tarafından patenti alınan ve Stratasys Inc. tarafından ticarileştirilen yarı akışkan durumdaki malzeme filamentinin ekstrüzyonu ve sonrasında katmanlı olarak biriktirilmesini içermektedir [3]. Tipik bir EYM yazıcısında nozul yarı akışkan durumdaki filamentleri platform

üzerine XY düzleminde yatay hareket ederek püskürtür. Platform ise bir sonraki katmanın oluşturulması için Z düzleminde aşağı yönde hareket eder. Tablanın sabit olduğu durumlarda ise nozul Z düzleminde yukarı yönde hareket etmektedir. Oluşturulan katman soğuyarak altında bulunan katmana bağlanır ve bu süreç parça tamamlanana kadar devam eder. EYM yönteminde filament olarak termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Polilaktik asit (PLA), Polikarbonat (PC), Polietilen tereftalat (PET), Termoplastik poliüretan (TPU), Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve Naylon 6 yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Literatürde polikarbonat malzeme ve EYM yönteminin bir arada kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Smith ve Dean yaptıkları çalışmada EYM ile üretilmiş polikarbonat parçaların yapısal özelliklerini ve bunların oryantasyon bağımlılığını incelemiştir [10]. Çalışma ile hızlı prototipleme üretim tekniklerinde tasarım değerlendirmeleri için polikarbonat malzemenin özellikleri tespit edilmiştir. EYM ile üretilen polikarbonat parçaların çekme mukavemeti ve elastikiyet modülünün tekrarlanabilir ölçümleri yapılarak, EYM ile üretilen parçaların dökme malzemeye kıyasla mukavemetinde azalmanın olduğu sonucu elde edilmiştir.

Hill ve Haghi çalışmalarında polikarbonat malzeme kullanarak EYM ile ürettikleri numunelerin tarama oryantasyonunun malzeme özellikleri üzerine olan etkisi üzerine çalışmıştır [11]. Çalışmada 15° aralıklarla 0 ile 90° arasında farklı tarama açılarındaki numuneler üretilmiş ve üretilen numunelerden gerilim, sertlik ve yoğunluk



Şekil 1. EYM yazıcı [9] (FDM printer)

ölçümleri yapılmıştır. Çalışma polikarbonat malzemenin mekanik özelliklerinin farklı tarama açılarıyla varyasyon gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Domingo-Espin vd. yaptıkları çalışmada EYM ile imal edilmiş polikarbonat parçaları simüle etmek için uygun bir model bulmayı ve sonlu elemanlar analizi simülasyonu ile numunelerle yapılan testler arasında bir korelasyon kurmayı amaçlamıştır [12]. Deneyler sonucunda, elastik bölge sınırını aşan EYM parçalarının sonlu elemanlar analizi simülasyonu kullanılırken anizotropik malzeme özelliklerinin dikkate alınması gerektiği ve bununla birlikte, elastik deformasyonlar için, malzeme mekanik özelliklerin ortalama değerleri kullanılarak izotropik olarak kabul edilebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, nozul çapı, katman kalınlığı ve ekstrüde edilmiş filamentlerin çapı gibi diğer faktörler de EYM parçalarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir.

Santhakumar vd. çalışmalarında EYM yöntemini uygulayarak elde edilen polikarbonat malzemenin yüksek darbe mukavemetinin elde edildiği işleme parametrelerini tespit etmek üzere deneyler yapmıştır [13]. Taguchi deney tasarımı kullanılarak yapılan deneyler sonucunda optimum parametreler tespit edilerek doğrulama deneyleri ile sonuçlar teyit edilmiştir. Çalışma sonucunda katman kalınlığının darbe mukavemeti üzerinde en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.

Miller vd. çalışmalarında farklı oranlarda sert ve yumuşak segmentlere sahip polikarbonat üretanların (PCU) yapısı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmıştır [14]. Çalışma, PCU'lar için etkili bir işleme yöntemi olarak 3D baskının, EYM'nin potansiyelini vurgulamaktadır. Deneylerde; sertlik, kesme hatası gerilimi, gerilme mukavemeti, çekme hatası gerinimi, basınç özellikleri, kesme mukavemeti ve çekme yorgunluğu gibi parametreler ölçülerek sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonunda, EYM'nin PCU malzemeler için çok etkili bir işleme yöntemi olduğu ifade edilmiştir.

Salazar-Martín vd. çalışmalarında çeşitli proses parametrelerinin EYM yoluyla üretilen polikarbonat parçaların sürünme davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır [15]. Çalışmada parça inşa oryantasyonu, hava boşluğu ve kontur sayısı ile bunların birbirleriyle etkileşimi üzerinden sonuçlar elde edilmiştir. Üretim yapılırken filamentlerin numunenin çekildiği yönde düzenlenmesinin etkisi olduğu ve toplam kontur sayısının parça oryantasyonunda dikkate alınması gerektiği ifade edilmiştir.

Sneha vd. EYM yönteminde kullandıkları PLA malzemeye nano boyutta bronz parçacıklar ekleyerek parçalar üretmiştir [16]. Bronz parçacıkların eklenmesiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada delikli ve deliksiz olmak üzere iki farklı malzeme imal edilerek, deliksiz plakalar üzerinde delikler delinmiştir.

Ergene vd. EYM yöntemiyle PET-G malzemeden ürettikleri parçalar üzerinde mekanik özelliklerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmıştır [17]. Çalışmada, üretimde kullanılan farklı katman kalınlığının ve farklı test sıcaklıklarının numuneler üzerindeki etkisi incelenerek sonuçlar elde edilmiştir.

Ergene vd. EYM yöntemi ile hücreli yapıların üretilmesi ve üretilen parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır [18]. Çalışmada PLA malzeme kullanılarak bal peteği, re-entrant, kiral ve hibrit formda numuneler imal edilerek, geometrik formun mekanik özelliklere olan etkisi üzerine sonuçlara ulaşılmıştır.

Puigoriol-Forcada vd. diğer çalışmalara benzer şekilde EYM tekniği ile üretilen polikarbonat parçaların parça inşa oryantasyonunun eğilme ve yorulma özelliklerine olan etkisini incelemiştir [19]. Deneyler

sonucunda parça oryantasyonunun, çeşitli filament yönelimlerinin neden olduğu iç anizotropi nedeniyle EYM parçalarının dinamik davranışlarını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca sonlu elemanlar analizi ile deney sonuçlarının doğrulanması yapılmıştır.

Dey ve Yodo yaptıkları çalışmada EYM ile üretilen ürünlerin niteliklerinin katman kalınlığı, yapı yönü, tarama genişliği ve baskı hızı gibi çeşitli işlem parametreleri ile ilişkili olması sebebiyle, bu parametrelerin etkisine ilişkin literatürü ve işleme parametresi optimizasyonu üzerindeki çalışmalarını ele almışlardır [20]. Çalışma incelendiğinde polikarbonat malzemelerin kullanıldığı ve TOPSIS yöntemi ile sonuçların değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamaktadır.

Chinchankar vd. EYM işlem parametrelerinin baskılı parçanın mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [21]. Çalışmada en iyilenen kalite karakteristikleri işlenen parça için daha düşük bir yüzey pürüzlülüğü ve maksimum dayanıklılık (darbe, çekme ve bükülme mukavemetleri) olarak ele alınmıştır. TOPSIS, Yanıt Yüzeyi Metodu (RSM), Genetik Algoritma (NSGA-II) ve Gri İlişkisel Analiz (GRA) gibi yöntemler, dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı, baskı hızı ve ekstrüzyon sıcaklığı olarak seçilen parametrelerin en iyi değerlerini bulmak için kullanılmıştır.

Bhowmik, bulanık Analitik Ağ Süreci (ANP) yöntemini kullanarak katman yüksekliği, kabuk kalınlığı ve dolgu yoğunluğu olmak üzere belirlenen üç işlem parametresini dikkate alarak, nihai çekme mukavemeti, boyutsal doğruluk ve üretim süresi gibi yanlılar için en iyi parametre değerlerini tespit etmeye çalışmıştır [22].

Yapılan çalışmalardan EYM yöntemi ile imal edilen polikarbonat malzemelerin üretilmesi ve üretilen parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinin odak nokta olduğu görülmektedir. Eklemeli imalatın en büyük avantajlarından biri nihai parçaların üretilmesidir. Ancak, eklemeli imalat ile üretilen parçaların geometrileri ihtiyaç duyulan tolerans değerlerini karşılamada yeterli değildir [23]. Bu noktada eklemeli imalat ile imal edilen parçalar üzerinde bir takım talaşlı imalat işlemleri uygulanarak daha düşük tolerans değerleri elde edilmesi çalışmamızda hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. İş Parçası (Workpiece)

Deney malzemesi olarak polikarbonat malzeme tercih edilmiştir. Polikarbonat yüksek mukavemete ve tokluğa sahip, termal direnci yüksek olan bir malzemedir [8]. Kullanılan polikarbonat malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Deneylerde kullanılacak polikarbonat plakalar Fortus 900MC eklemeli imalat makinasında 204x228x20 mm boyutlarında, deliksiz ve 6 mm derinliğe sahip ön delikli olarak üretilmiştir (Şekil 2). EYM parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Polikarbonat malzemenin mekanik özellikleri (Mechanical properties of polycarbonate)

Çekme Özellikleri (ASTM D638) [24]	
Akma dayanımı (MPa)	57,9
Uzama (Akma sınırında) (%)	4,9
Kopma direnci (MPa)	57,3
Uzama (Kopma sınırında) (%)	5,2
Elastikiyet modülü (GPa)	2,25

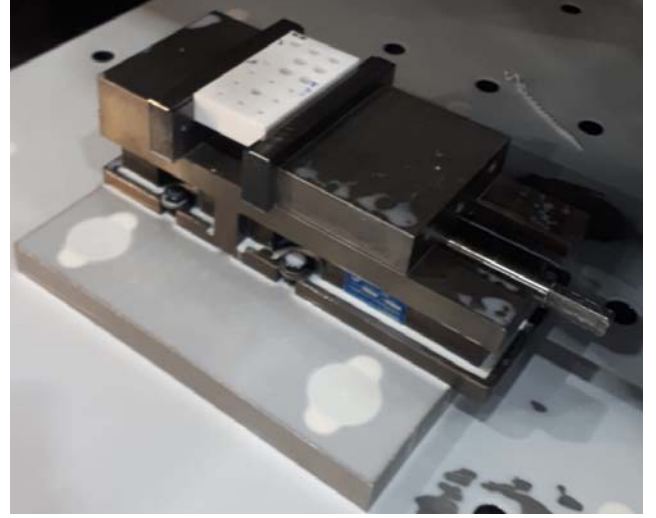
Tablo 2. EYM üretim parametreleri (FDM production parameters)

Üretim Parametreleri	
Dolgu yoğunluğu	100%
Dolgu açısı	45°
Katman kalınlığı	0,2540 mm
Katman tipi	Sabit
Destek malzemesi	SR-100
Destek tipi	T12SR100
Tarama genişliği	0,508 mm
Yapı oryantasyonu	90°

**Şekil 2.** Üretilen ön delikli polikarbonat plaka
(Manufactured pre-drilled polycarbonate plate)

2.2. Delik Delme Tezgâhı ve Kesici Takım (Drilling machine tool and cutting tool)

Delik delme işlemi için Şekil 3'te gösterilen Mori Seiki 3 eksenli CNC tezgâh kullanılmıştır. Numune tezgâha bağlanırken Şekil 4'te verilen yükseltici aparat kullanılmıştır. Gövdesi döküm ve tutma çeneleri çelik malzemeden üretilmiş aparat sayesinde delik çıkışında kesici takımın sabitleme tablasına zarar vermesi önlenmiştir.

**Şekil 4.** Numune bağlama aparatı (Specimen fixation apparatus)

Çalışmada elde edilecek deliklerin oluşturulmasında iki farklı malzemeden imal edilmiş kesici takımlar kullanılmıştır (Şekil 4). Kesici takım olarak yüksek hız çeliği (YHÇ) ve karbür malzemeden imal edilmiş kesici takımlar kullanılmıştır. Karbür matkap ucu 20 mm uzunluğunda ve 12 mm çapında kaplamasız olarak deneylerde kullanılmak üzere imal edilmiştir. Deneylerde kullanılan matkap uçları Şekil 5'te gösterilmiştir. YHÇ matkap olarak DIN 340/R-N standartlarına uygun hazır ucu kullanılmıştır. YHÇ matkap ucuna ait özellikler Tablo 3'te verilmiştir. YHÇ ile aynı özelliklere sahip olmakla birlikte, karbür matkap ucu firma tarafından üretilmiş olup, teknik detayı firma tarafından gizli tutulduğundan makalede detaylı bilgi sunulamamıştır.

Tablo 3. YHÇ matkap özellikleri (HSS drill bit specifications)

Matkap Ucu Özellikleri	
Malzeme	YHÇ
Norm	TS ISO 10899
Tip	N
Uç açısı	118°
Kesme yönü	Sağ
Çap (mm)	12
Tam boy (mm)	205
Kesme boyu (mm)	134

**Şekil 3.** Delik delme tezgâhı (Drill machine tool)



Şekil 5. Matkap uçları (Drill bits)

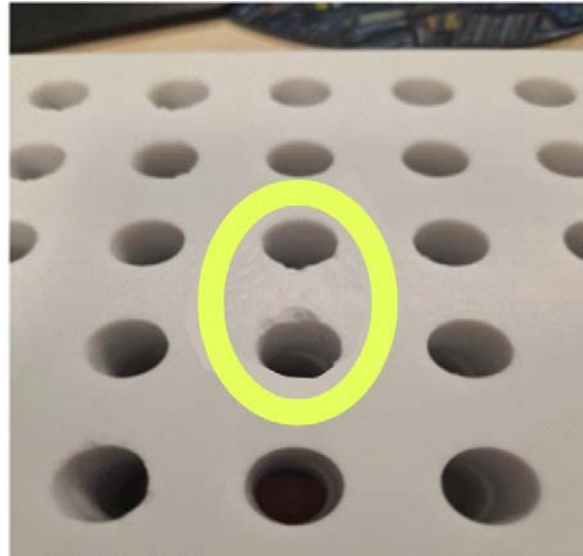
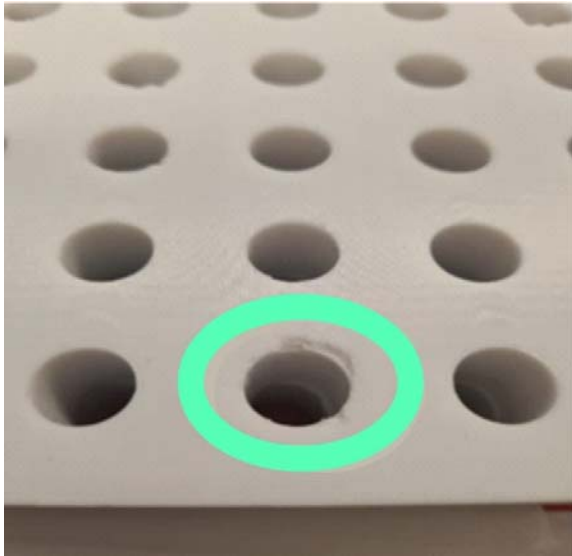
Deneylerde kesme sıvısı olarak bor yağı kullanılmıştır. Kesme sıvısı tezgâh tarafından işleme esnasında delik yüzeyine püskürtülmektedir.

2.3. Deneysel Tasarım (Experimental Design)

Çalışmanın sonuçlarının ortaya konulacağı deney parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 25 adet ön deney yapılmıştır. Ön deneylerden elde edilen bulgulardan yola çıkılarak Tablo 4'te verilen deney parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 4. Deneysel parametreleri (Experimental parameters)

Deneysel Parametreleri	
Deneysel numunesi	Deliksiz plaka, 6 mm ön delikli plaka
İş mili hızı (dev/dk.)	400, 600, 800, 1000
İlerleme hızı (mm/dk)	200, 300, 600, 900
Matkap malzemesi	YHÇ, Karbür
Kesme Sıvısı Kullanımı	Sulu, Susuz



Şekil 6. İş mili hızındaki değişimlerin delik kalitesine olumsuz etkisi (The negative effect of changes in spindle speed on hole quality)

Literatürde yapılan çalışmalarda iş mili hızı yerine kesme hızının da kullanılabilirliği görülmektedir. Çalışmada iş mili hızının deney parametresi olarak tercih edilmesinde, yapılan ön deneylerde elde edilen delik geometrilerinin kalite düzeyi rol oynamıştır. Yapılan ön deneylerde iş mili hızının farklı değerlerinde delik girişinde veya çıkışında malzemede kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu sebeple iş mili hızı seçiminin işleme kalitesi açısından kritik bir parametre olduğu değerlendirilmiş ve en iyilenmesi gereken parametre olarak iş mili hızı seçilmiştir (Şekil 6).

Çalışmada her bir faktörün birbiri ile etkileşimi göstermesi amacıyla deney tasarımı "Tam Faktöriyel Tasarım" yaklaşımına göre yapılmıştır. Ön deliksiz ve ön delikli olmak üzere her bir plaka için 64 adet deneyin gerçekleştirilmesi ile toplam 128 adet deney çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.

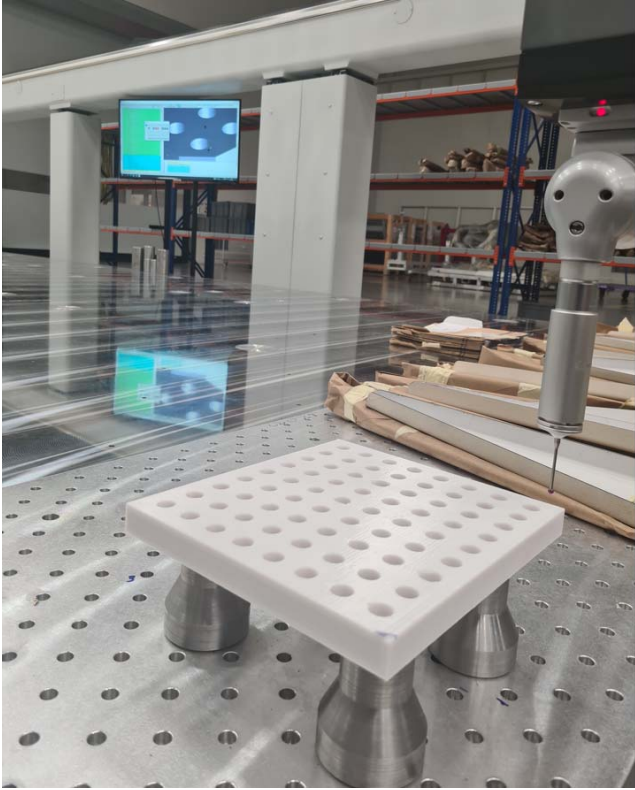
Günümüzde özellikle havacılık endüstrisinde minimum hatalı ve delik kalitesi yüksek parçalar üretmek için parametrelerin doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu sebeple delik kalitesinin değerlendirilmesinde önemli rol oynayan parametreler deneylerin çıktısı olarak belirlenmiştir [25]. Deneysel sonuçlarını yorumlanmasında çap ölçüsü, delik yüzeyi pürüzlülüğü, silindiriklik ve dairesellik değerleri kullanılmıştır.

Bu parametrelerden silindiriklik, dairesellik ve çap değerlerinin ölçümünde Hexagon firmasının ürettiği Delta Slant model koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılmıştır (Şekil 7).

Ölçümler, model aracılığıyla koordinatların sıfırlanması ile başlamaktadır. Daha sonra dairesellikten sapma ölçümü için parçanın üst ve alt bölgelerinde yer alan delik girişi ve delik çıkışı taranarak sanal daireler oluşturulmuştur. Tarama sonucu elde edilen sanal daireler ile model eşleştirilerek dairesellikten sapma değerleri hesaplanmıştır. Dairesellikten sapma ölçümleri yapılırken deliklerin giriş ve çıkışlarındaki deformasyonların ölçüm sonuçlarını etkileyeceği ön görüldüğünden, deliğin 2 mm ve 18 mm'lik kısımlarında tarama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Silindiriklikten sapma ölçümü için parçanın üst, orta ve alt noktalarında tam bir tarama yapılarak sanal silindirikler oluşturulmuş ve bu silindirlerin ideal silindir geometrisinden sapma değeri elde edilmiştir. Diğer bir performans parametresi olan çaptan sapma değerinin hesaplanmasında delik merkezinin X ve Y eksenlerinden

uzaklıkları ile deliğin tamamının taranması ile elde edilen ölçümler kullanılmıştır. Deliklere ait son performans parametresi olan yüzey pürüzlülüğü için ACCUD SR400 [26] yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 8). Yüzey pürüzlülük cihazı $\pm\%10$ hassasiyet, $\pm 160 \mu\text{m}$ ölçüm aralığına ve 0,25/0,8/2,5 mm kesme frekansına sahiptir. Parça cihazın sabitleme aparatları aracılığıyla konumlandırılarak, delik yüzeylerinden 11 mm uzunluğunda ölçümler alınmıştır. Bu uzunluk savunma sanayiinde faaliyet gösteren ve deneylerin gerçekleştirildiği firma tarafından seçilmiş olup, ACCUD SR400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında küçük delik probu için klavuzda belirtilen açıklık değeridir [26]. Her bir delik için iki farklı ölçüm yapılmış olup, yüzey pürüzlülük değeri olarak bu iki değer ortalaması alınmıştır.



Şekil 7. CMM cihazı ile ölçümün gösterilmesi
(Demonstration of measurement with CMM device)

3. Deneysel Sonuçları (Experimental results)

3.1. Ön Deliksiz Plaka İçin Deneysel Sonuçları (Test Results for Plate Without Pre-Drilling)

Ön deliksiz plakalar üzerinde yapılan deney sonuçlarında elde edilen çaptan sapma sonuçlarına ait grafikler Şekil 9'da verilmiştir. Ön deliksiz plaka için çaptan sapma grafikleri incelendiğinde YHÇ matkap için hem sulu hem de susuz kesimde iş mili hızı ve ilerleme hızlarının çaptan sapma değerlerinde çok büyük farklar ortaya çıkarmadığı görülmüştür. Karbür uçlu matkaplarda düşük ilerleme ve düşük iş mili hızlarında çaptan sapma değerleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Grafikler birlikte değerlendirildiğinde en büyük etkiyi matkap malzemesinin oluşturduğu söylenebilir. YHÇ matkap ile delinen delikler karbür uçlu matkaba göre çaptan sapma için küçük değerler vermiştir. Bunun sebebinin YHÇ matkap malzemesinin ısı transferi performansının daha iyi olmasıdır. Kaplaması olmaması sebebi ile ısı iletimi daha iyidir.



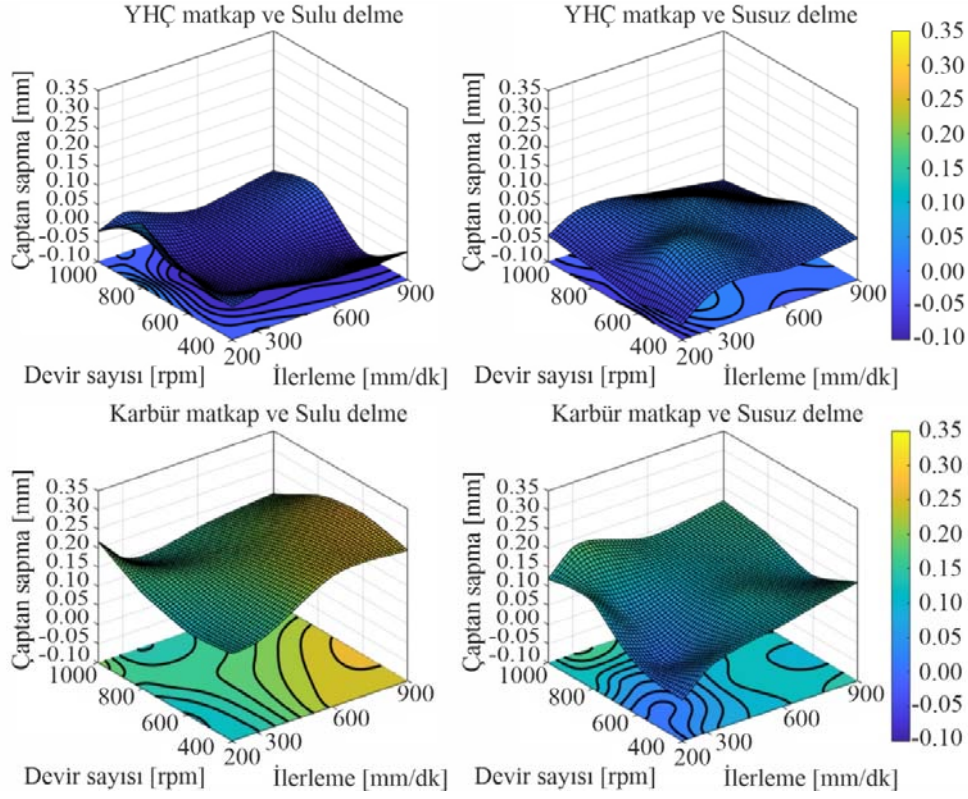
Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü (Surface roughness measurement)

Yüzey pürüzlülüğüne ait grafikler Şekil 10'da verilmiştir. Ön deliksiz plaka için yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde YHÇ matkap için iş mili hızının etkisinin radikal bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Sulu delme işlemi için ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Susuz kesimde ise ilerleme hızının etkisi doğrusal bir değişim göstermemiştir. Karbür matkap ile delme işlemi incelendiğinde iş mili hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olmadığı görülmektedir. Karbür matkap ile susuz kesimde ise ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Susuz kesimde ise net bir çıkarımda bulunulmamıştır. Grafikler incelendiğinde en büyük etkileri kesme sıvısı ve ilerleme hızının oluşturduğu anlaşılmaktadır. Sulu kesimde ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün bozulduğu gözlemlenmiştir.

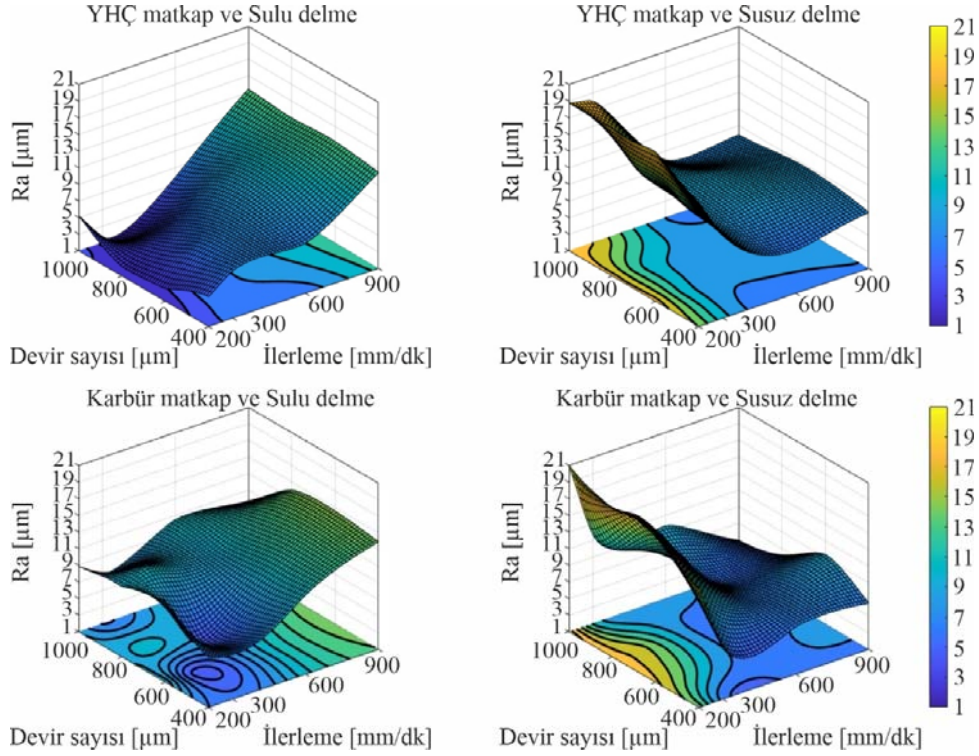
Silindiriklikten sapma değerlerine ait grafikler Şekil 11'de verilmiştir. Ön deliksiz plakanın silindiriklikten sapma değerleri incelendiğinde YHÇ ve karbür uçlu matkap için sulu delmede ilerleme hızı arttıkça silindiriklikten sapma değeri artmıştır. İş mili hızının etkisi YHÇ matkap susuz delme işleminde görülmüştür. YHÇ matkap ile susuz kesimde orta kesme hızlarında silindiriklikten sapma artmıştır. Susuz kesimlerde ise ilerleme hızı arttıkça önce silindiriklikten sapma azalmış sonrasında artmıştır. Dairesellikten sapma değerlerine ait grafikler Şekil 12'de verilmiştir. Ön deliksiz plaka dairesellikten sapma grafikleri incelendiğinde belirgin etkiyi kesme sıvısının verdiği görülmüştür. Karbür uçlu ve YHÇ matkap için susuz delme işlemi dairesellikten sapmanın artmasına sebep olmuştur. Bu durum kesme sıvısının oluşan ısı ve talaşı uzaklaştırması ile ilişkilendirilebilir.

3.2. Ön Delikli Plaka İçin Deneysel Sonuçları (Test Results for Front Pre-drilled Plate)

Çaptan sapma sonuçlarına ait grafikler Şekil 13'te verilmiştir. YHÇ matkap için sulu kesimde ilerleme ve iş mili hızlarının çaptan sapma için çok büyük değişiklikler göstermediği görülmüştür. Susuz kesimde orta seviyede iş mili hızı ve artan ilerleme hızı ile çaptan



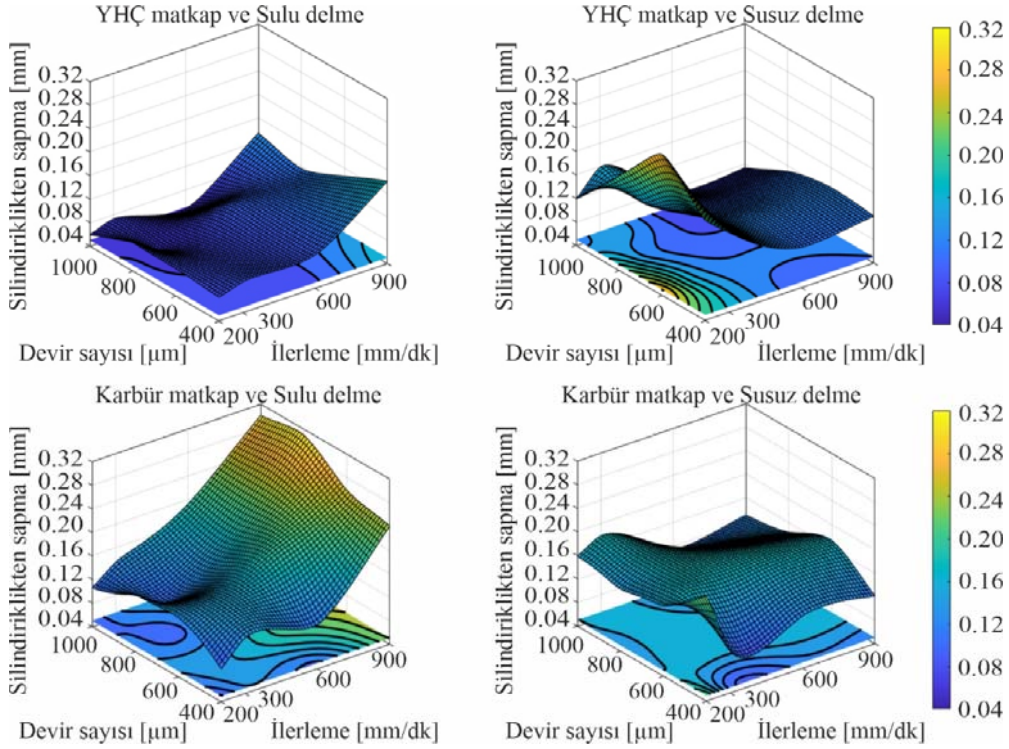
Şekil 9. Çaptan sapma sonuçlarına ait grafikler (Graphs of diameter deviation results)



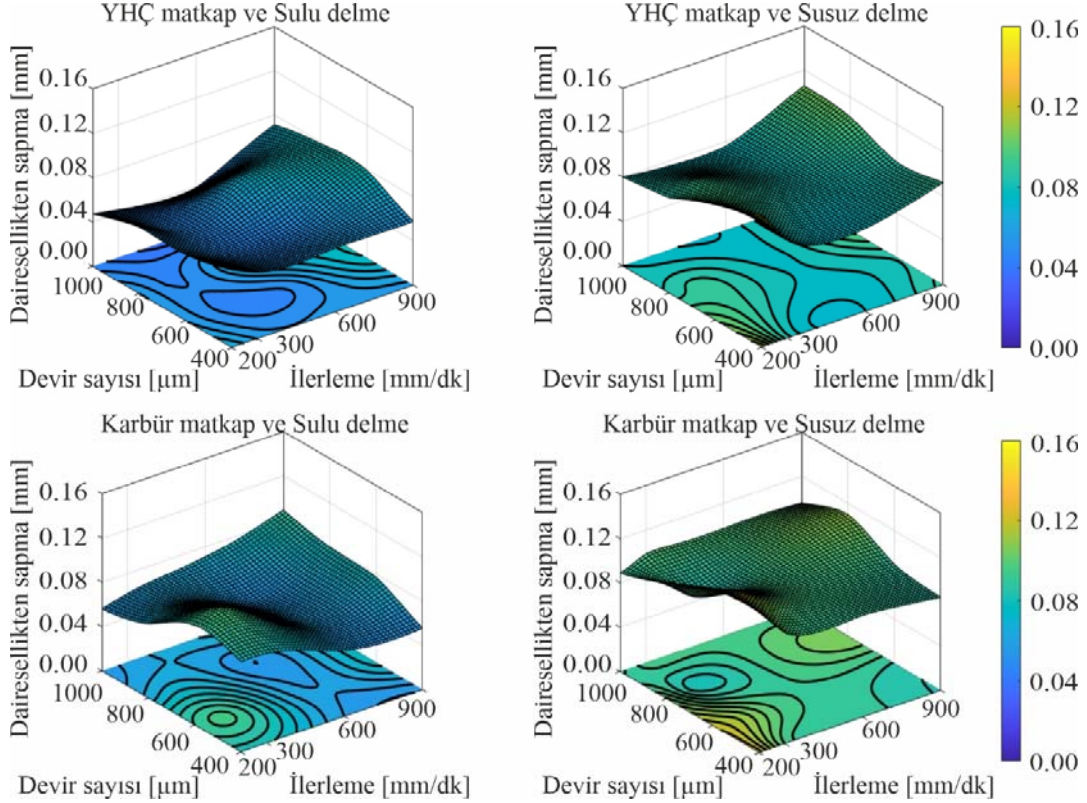
Şekil 10. Yüzey pürüzlülüğüne ait grafikler (Graphs of surface roughness)

sapma değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Karbür uçlu matkaplar incelendiğinde 800 rpm hızlarında çaptan sapmanın en yüksek değerlerine ulaştığı görülmüştür. Karbür matkap ile susuz delmede ilerleme hızı arttıkça önce sapma değerleri azalmış sonrasında ise

artmıştır. Karbür matkap ile sulu delme işleminde ilerleme hızı arttıkça çaptan sapma değeri artmıştır. Her iki matkap ucuna ait grafik incelediğinde en büyük etkinin matkap malzemesi tarafından oluşturulduğu gözlemlenmiştir. YHÇ matkap ile delinen deliklerin



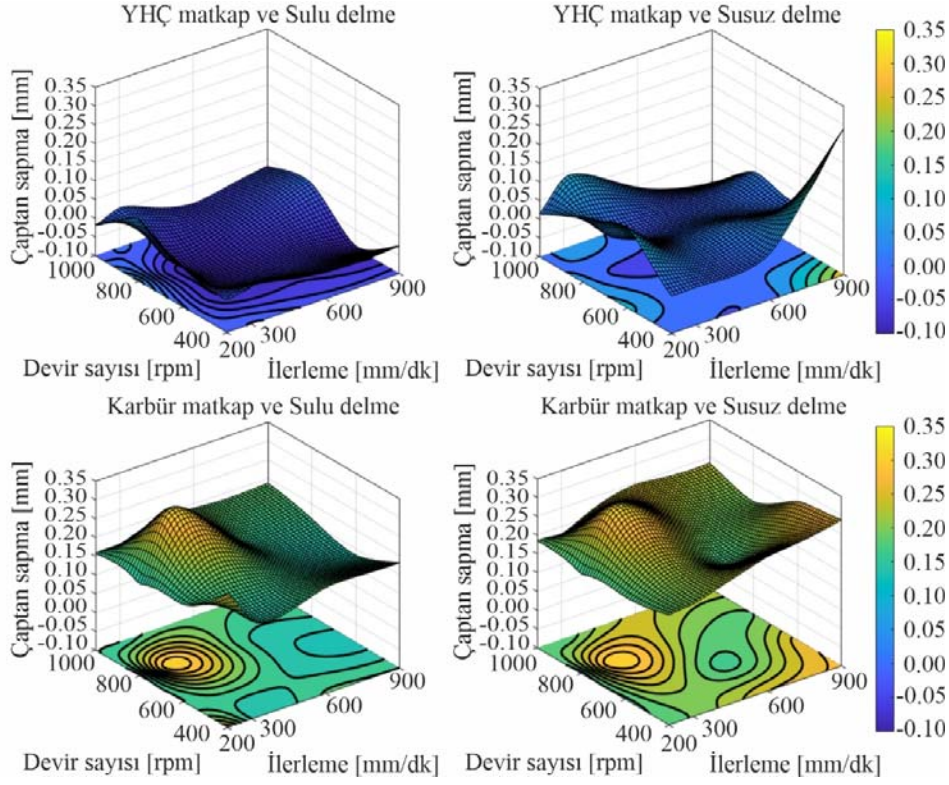
Şekil 11. Silindiriklikten sapma değerlerine ait grafikler (Graphs of deviation values from cylindricity)



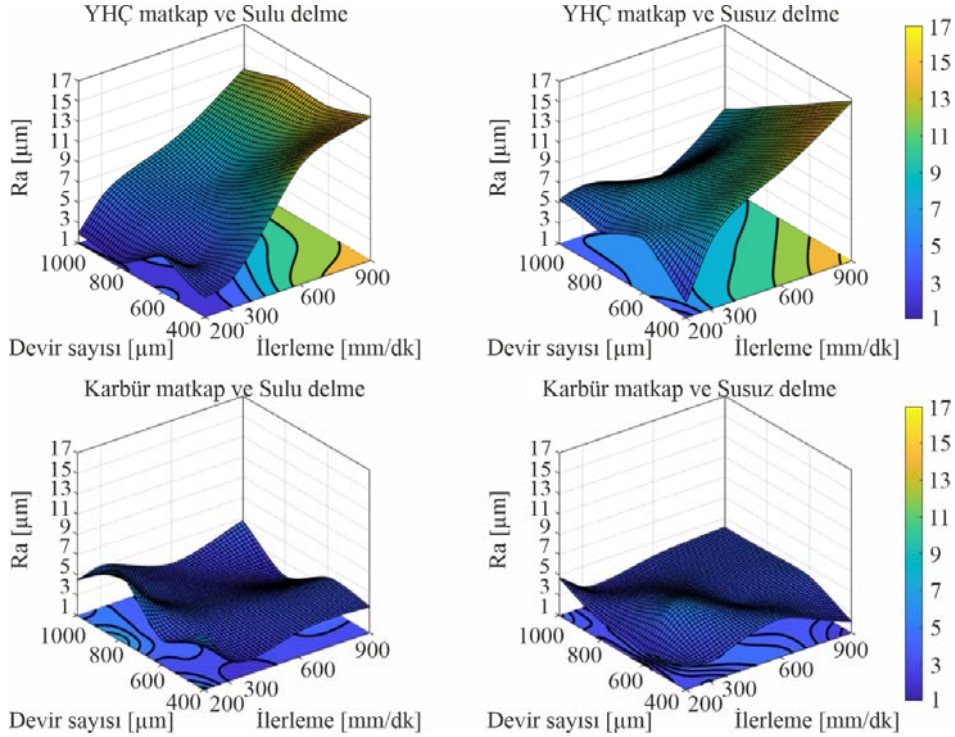
Şekil 12. Dairesellikten sapma değerlerine ait grafikler (Graphs of deviation from circularity values)

karbür matkap ile delinen deliklere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğüne ait grafikler Şekil 14'te verilmiştir. Ön delikli plaka için yüzey pürüzlülüğü incelediğinde YHÇ matkaplarda ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır.

İş mili hızının çok büyük bir fark oluşturmadığı görülmüştür. Karbür uçlu matkap ile delme işleminde kesme ve ilerleme hızlarının çok büyük farklar oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Grafikler birlikte incelendiğinde karbür uçlu matkap için yüzey pürüzlülüğünde daha iyi



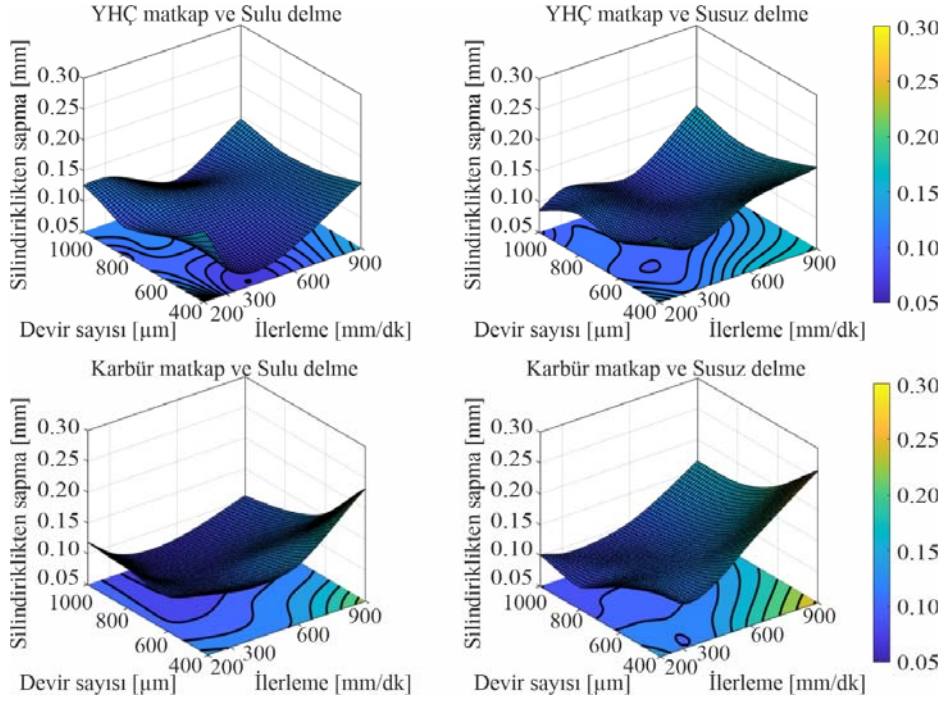
Şekil 13. Çaptan sapma sonuçlarına ait grafikler (Graphs of diameter deviation results)



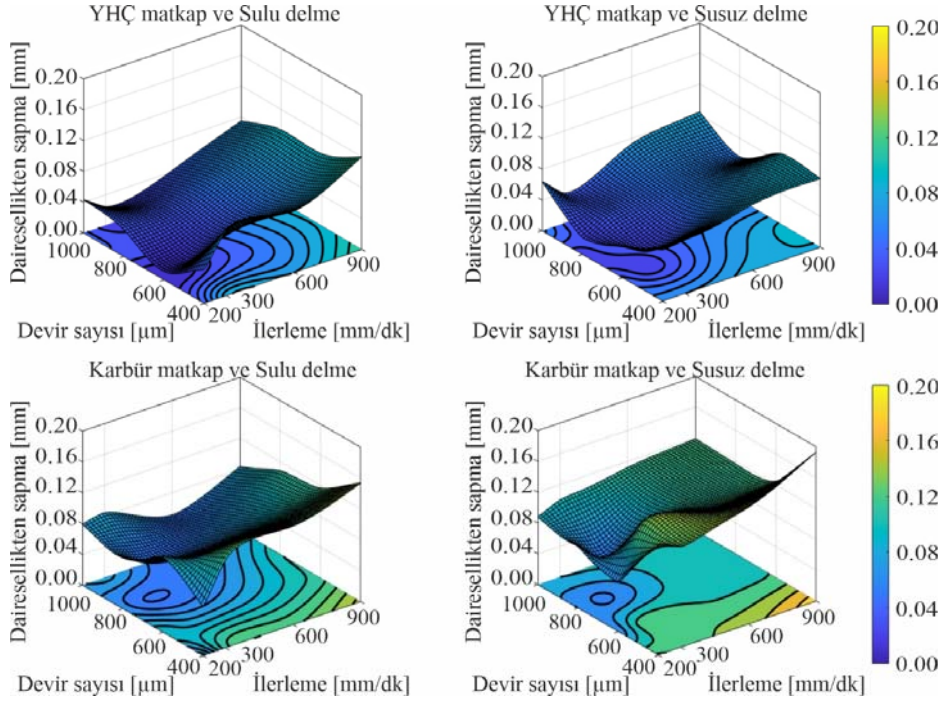
Şekil 14. Yüzey pürüzlülüğüne ait grafikler (Graphs of surface roughness)

sonuçlar elde edilmiştir. Silindiriklikten sapma değerlerine ait grafikler Şekil 15'te verilmiştir. Ön delikli plaka için silindiriklikten sapma değerleri orta ilerleme hızları için en iyi değerleri vermiştir. Düşük iş mili hızlarında silindiriklikten sapma değerleri belirgin olmasa da bir artış göstermiştir. Deneysel sonuçlarından iş mili hızı ve

ilerleme hızlarının silindiriklikten sapmaya doğrudan etki ettiği görülmektedir. Dairesellikten sapma değerlerine ait grafikler Şekil 16'da verilmiştir. Ön delikli plaka dairesellikten sapma değerleri incelendiğinde genel olarak ilerleme hızı arttıkça dairesellikten sapma değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum ilerleme hızındaki artışla



Şekil 15. Silindiriklikten sapma değerlerine ait grafikler (Graphs of deviation values from cylindricity)



Şekil 16. Dairesellikten sapma değerlerine ait grafikler (Graphs of deviation from circularity values)

beraber titreşimin artmasından kaynaklı olarak dairesellikten sapmanın artışı ile açıklanabilir. YHÇ matkap dairesellikten sapma değerleri için karbür uçlu matkaptan daha iyi sonuçlar vermiştir.

4. Optimizasyon (Optimization)

Deney sonuçlarının optimizasyonu için öncelikle çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ön değerlendirme

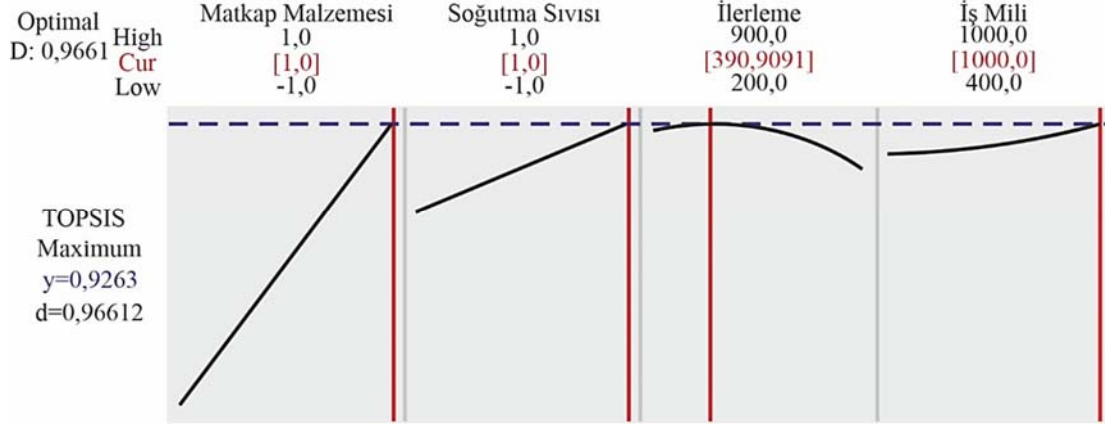
amaçlı kullanılmıştır. Çok kriterli karar verme yöntemleri; alternatiflerin birden fazla olduğu durumlarda kriterler göz önünde bulundurularak, çözümler arasındaki en iyi alternatifin seçilmesini ya da bu alternatiflerin iyiden kötüye sıralanmasına olanak sağlamaktadır. TOPSIS yöntemi 6 adımdan oluşmaktadır. Yöntemin uygulama aşamaları [27] numaralı kaynaktan izlenebilir. Bu adımlar sırasıyla deney sonuçları için uygulanmıştır. Ön deliksiz ve ön delikli deney sonuçlarına TOPSIS yönteminin uygulanma sonuçları Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Elde edilen sıralama puanları oluşturulmuş

Ön deliksiz deney sonuçlarına TOPSIS yönteminin uygulanması sonucunda bulunan C_1^* değerleri Minitab programında "Response Optimizer" modülünde tanımlanarak Şekil 17 ön deliksiz plaka için ideal (en iyi) kesme şartları bulunmuştur. Elde edilen regresyon katsayıları ve ANOVA sonuçları Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir.

Bu sonuç doğrultusunda; matkap malzemesi YHÇ, kesme sıvısı kullanılarak, ilerleme hızı 390,9091 mm/dk, iş mili hızı 1000 dev/dk olacak şekilde optimal değerler elde edilmiştir.

Ön delikli deney sonuçlarına TOPSIS yönteminin uygulanması sonucunda bulunan C_2^* değerleri Minitab programında "Response Optimizer" modülünde tanımlanarak ön delikli plaka için Şekil 18'de gösterilen ideal kesme şartları bulunmuştur. Elde edilen regresyon katsayıları ve ANOVA sonuçları Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.

Bu sonuç doğrultusunda; matkap malzemesi YHÇ, kesme sıvısı kullanılarak, ilerleme hızı 369,6970 mm/dk, iş mili hızı 781,8182 dev/dk olacak şekilde en iyi değerler elde edilmiştir.



Şekil 17. Ön deliksiz plaka için optimum delik delme parametreleri (Optimum drilling parameters for plate without pre-drilling)

Tablo 7. C_1^* için Tahmini regresyon katsayıları (Estimated Regression Coefficients for C_1^*)

Terim	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	0,661721	0,013621	48,580	0,000
Matkap Malzemesi	-0,172733	0,006178	-27,958	0,000
Kesme Sıvısı	0,024988	0,006178	4,044	0,000
İlerleme Hızı [mm/dk]	-0,051851	0,007768	-6,675	0,000
İş Mili Hızı [rpm]	-0,008684	-0,008684	-1,048	0,300
İlerleme Hızı [mm/dk]*	-0,037156	0,014966	-2,483	0,016
İlerleme Hızı [mm/dk]				
İş Mili Hızı [rpm]*	0,011004	0,013675	0,805	0,425
İş Mili Hızı [rpm]				
Matkap Malzemesi*Kesme Sıvısı	0,062297	0,006078	10,250	0,000
Matkap Malzemesi*	-0,050524	0,007768	-6,504	0,000
İlerleme Hızı [mm/dk]				
Matkap Malzemesi*İş Mili Hızı [rpm]	-0,029541	0,008154	-3,623	0,001
Kesme Sıvısı*İlerleme Hızı [mm/dk]	0,052084	0,007768	6,705	0,000
Kesme Sıvısı*İş Mili Hızı [rpm]	0,008154	0,008154	-1,829	0,073
İlerleme Hızı [mm/dk]*	0,010421	0,010421	1,869	0,067
İş Mili Hızı [rpm]				

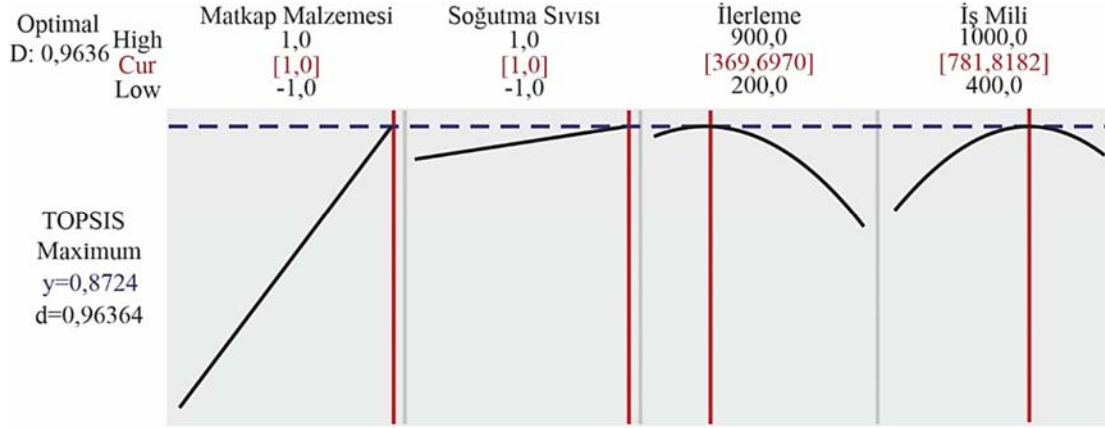
S = 0,04862 R-Sq = 95,2% R-Sq(adj) = 94,1%

Etkin parametreler ve etkileşimleri ifade etmektedir

Tablo 8. C_1^* için varyans analizi (Analysis of Variance for C_1^*)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	12	2,40103	2,40103	0,200086	84,63	0,0000
Doğrusal	4	1,88303	1,99457	0,498642	210,92	0,0000
Karesel	2	0,01610	0,01610	0,008052	3,41	0,0410
Etkileşim	6	0,50189	0,50189	0,083648	35,38	0,0000
Hata	51	0,12057	0,12057	0,002364		
Toplam	63	2,52160				

Etkin olanları ifade etmektedir



Şekil 18. Ön delikli plaka için optimum delik delme parametreleri (Optimum drilling parameters for pre-drilled plate)

Tablo 9. C₂* için Tahmini regresyon katsayıları (Estimated Regression Coefficients for C₂*)

Terim	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	0,674973	0,016244	41,553	0,000
Matkap Malzemesi	-0,146054	0,007368	-19,823	0,000
Kesme Sıvısı	-0,041781	0,007368	-5,671	0,000
İlerleme Hızı [mm/dk]	-0,066937	0,009263	-7,226	0,000
İş Mili Hızı [rpm]	0,064127	0,009885	6,487	0,000
İlerleme Hızı [mm/dk]*	-0,043153	0,017847	-2,418	0,019
İlerleme Hızı [mm/dk]				
İş Mili Hızı [rpm]*	-0,051609	0,016308	-3,165	0,003
İş Mili Hızı [rpm]				
Matkap Malzemesi*Kesme Sıvısı	-0,010719	0,007248	-1,479	0,145
Matkap Malzemesi*	0,010340	0,009263	1,116	0,270
İlerleme Hızı [mm/dk]				
Matkap Malzemesi*İş Mili Hızı [rpm]	0,005888	0,009724	0,605	0,548
Kesme Sıvısı*İlerleme Hızı [mm/dk]	0,022969	0,009263	-2,480	0,016
Kesme Sıvısı*İş Mili Hızı [rpm]	0,012919	0,009724	1,329	0,190
İlerleme Hızı [mm/dk]*	0,034011	0,012428	2,737	0,009
İş Mili Hızı [rpm]				

S = 0,05798 R-Sq = 91,7% R-Sq(adj) = 89,8%

Etkin parametreler ve etkileşimleri ifade etmektedir

Tablo 10. C₂* için varyans analizi (Analysis of Variance for C₂*)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regresyon	12	1,90621	1,90621	0,158851	47,25	0,000
Doğrusal	4	1,78832	1,74638	0,436596	129,85	0,000
Karesel	2	0,05333	0,05333	0,026665	7,93	0,001
Etkileşim	6	0,06456	0,06456	0,010760	3,20	0,010
Hata	51	0,17147	0,17147	0,003362		
Toplam	63	2,07768				

Etkin olanları ifade etmektedir

Tablo 11. Doğrulama deneyi sonuçları (Validation experiments results)

	R _a (micron)	Silindiriklikten sapma (mm)	Dairesellikten Sapma (mm)	Çaptan Sapma (mm)
Ön Deliksiz Plaka	1,643	0,046	0,021	0,006
Deney sonucunda en iyi değer	1,53	0,05	0,04	-0,08
Ön Delikli Plaka	1,231	0,037	0,02	-0,009
Deney sonucunda en iyi değer	1,56	0,075	0,011	-0,077

5. Sonuçlar (Conclusions)

Elde edilen en iyi parametreler ile doğrulama deneyleri yapılmıştır ve deney sonuçları Tablo 11'de verilmiştir. Buna göre eniyileme

sonucunda elde edilen değerlerden ön deliksiz plaka yüzey pürüzlülüğü değeri (1,643 micron) ile ön delikli plaka dairesellikten sapma değeri (0,02 mm) dışındaki tüm değerler, deney sonuçlarından elde edilmiş olan değerlerden daha iyi değerler olarak elde

edilebilmiştir. İlgili değerler ise deney sonucunda elde edilen değerlere çok yakın değerler olup, onlarla başa baş değerlere sahiptir.

Çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan EYM yöntemi ile ön delikli ve ön deliksiz plaka üretimi yapılmıştır. Her bir plaka üzerinde 64 adet deney yapılarak, delikler delinmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilerden yola çıkarak TOPSIS yöntemi yardımıyla ve en iyi işleme parametreleri tespit edilmiş ve doğrulama deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda; ön deliksiz ve ön delikli plakalar üzerinde yapılan doğrulama deneyleri ile 4 deney çıktısının belirlenen koşullar dahilinde en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Çalışmamızda ön delikli plaka için elde edilen sonuçların literatürdeki çalışmalara yakın sonuçlar sunabildiği görülmektedir. Örneğin, çalışmamıza en yakın çalışma olan ve Dezaki vd [28] tarafından gerçekleştirilen PLA delme işleminde, iş mili hızı ve ilerleme hızının etkili parametreler olduğu, orta düzey hız olarak tanımlanan 1100 mm/dk ilerleme hızı ile 800 ila 1000 dev/dk iş mili hızında en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin elde edilebildiği belirtilmiştir. Çalışmamızda da optimum değerler ilerleme hızı için yaklaşık 370 mm/dk (orta seviye), iş mili hızı içinse 782 dev/dk (orta üstü seviye) olarak bulunmuş, ANOVA analizinde ilerleme ve iş mili hızı etkin parametreler olarak belirlenmiştir. Ancak ön deliksiz plakada bu değerler üst parametre değerlerine doğru yaklaşmakta, hatta iş mili hızında çalışmamızın üst parametre değeri olan 1000 dev/dk değerine ulaşılmaktadır. Diğer taraftan iş mili hızı ANOVA tablosunda etkin parametreler arasında yer almamakta, ancak ilerleme hızı etkin parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, ön deliksiz plaka için ileriki çalışmalarda 1000 dev/dk değerinin üzerinde iş mili hızları parametre seviyeleri olarak alınıp deney tasarımı yeniden oluşturularak analizler yapılabilir.

Çalışmada kullanılan malzeme türü ve optimizasyon yöntemi dikkate alındığında literatürde benzer koşullarda yapılmış bir çalışmanın olmadığı görülmektedir [20]. Deney tasarımı ile bütünlük olarak TOPSIS yönteminin kullanılması ile en iyi sonuçların elde edilmesi bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en büyük farklılıktır.

Bu çalışmada değerlendirmeye alınmamış olan ancak ileriki çalışmalarda değerlendirmeye alınabilecek hususlar ise aşağıda belirtilmiştir:

- Kesici takım geometrisi yeni bir parametre olarak çalışmaya eklenebilir. Bu amaçla, özellikle termoplastik malzemelerin delinmesi sırasında aşırı ısınmadan kaynaklı problemlerin üstesinden gelebilecek takımların da belirlenebilmesi için; takım çapı, uç açısı ya da helis açısı mevcut parametrelere ilave edilebilecek diğer parametreler olarak değerlendirilebilir.
- Literatürde mevcut olan farklı baskı yönlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi de ileriki çalışmalarda değerlendirmeye alınabilir.
- Bu çalışma savunma sanayiinde hizmet veren firmada gerçekleştirilmiş olup, firmanın gereksinimleri, üretim standartları ve isteklerine uygun olacak şekilde deney sonuçlarına ilişkin ölçüm ve değerlendirmeler yapılmıştır. İleriki çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü değeri için belirli standartlara göre ölçüm işlemleri gerçekleştirilebilir (örneğin ISO 21920-3'e göre).

Kaynaklar (References)

1. Guo, N., Leu, M. C., Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8 (3), 215-243, 2013.
2. ASTM F2792-12a., Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM International, 1-3, 2012.
3. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Biaino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Salmi, A., Minetola, P., Iuliano, L., and Fino, P., Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105, 593-612, 2017.
4. Bikas, H., Stavropoulos, P., and Chryssolouris, G., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389-405, 2016.
5. Özsoy, K., Duman, B., ve Gültekin, D., İ., Havacılık, uzay ve savunma sanayi için eklemeli imalat ile metal parça imalatı. 4th international congress on 3d printing (additive manufacturing) technologies and digital industry, 462-471, 2019.
6. Başçı Ü.G., Yamanoglu R., Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: FDM ile Eklemeli İmalat. *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 5 (2), 339-352, 2021.
7. Başçı Ü.G., Yamanoglu R., Eklemeli Metal İmalat Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, 307-314, 2020.
8. Mazurchevici, A., Nedelcu, D., & Popa, R., Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27, 179-192, 2020.
9. Bikas, H., Stavropoulos, P., and Chryssolouris, G., Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (1), 389-405, 2015.
10. Smith, W.C., Dean R.W., Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material. *Polymer Testing*, 32, 1306-1312, 2013.
11. Hill, N., Haghi M., Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate. *Rapid Prototyping Journal*, 20 (3), 221-227, 2014.
12. Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J.M., Garcia-Granada, A., Llumà, J., Borros S., Reyes G., Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & Design*, 83, 670-677, 2015.
13. Santhakumar, J., Maggirwar, R., Gollapudi, S., Karthekeyan, S., Kalra, N., Enhancing Impact Strength of Fused Deposition Modeling Built Parts using Polycarbonate Material. *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (34), 1-6, 2016.
14. Miller, A.T., Safranski, D.L., Smith, K.E., Sycks, D.G., Guldberg R.E., Gall, K., Fatigue of injection molded, and 3D printed polycarbonate urethane in solution. *Polymer*, 108, 121-134, 2017.
15. Salazar-Martín, A.G., Pérez, M.A., Garcia-Granada, A., Reyes, G., Puigoriol-Forcada, J.M., A study of creep in polycarbonate fused deposition modelling parts. *Materials and Design*, 141, 414-425, 2018.
16. Sneha, P., Balamurugan, K., Jyothi, Y. and Krishnan, S., Microdrilling Studies PLA/Bronze Composite Samples Printed Using Fused Deposition Model. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, 1-14, 2023.
17. Ergene, B., İspartalı, H. ve Karakılınç, U., Impact behavior of PET-G parts produced by fused deposition modelling depending on layer height and test temperature. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1345-1360, 2023.
18. Ergene, B. ve Yalçın, B., Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced with fused deposition modeling (FDM). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 201-218, 2022.
19. Puigoriol-Forcada, J.M., Alsina A., Salazar-Martín, A.G., Gomez-Gras, G., Perez, M.A., Flexural fatigue properties of polycarbonate fused-deposition modelling specimens. *Materials and Design*, 155, 414-421, 2018.
20. Dey A, Yodo N., A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3 (3), 64, 2019.
21. Chinchankar, S., Shinde, S., Shaikh, A., Gaikwad, V., & Ambhore, N. H., Multi-objective optimization of FDM using hybrid genetic algorithm-based multi-criteria decision-making (MCDM) techniques. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 1-15, 2023.
22. Bhowmik, S., Parameters optimization of FDM for the quality of prototypes using an integrated MCDM approach. In *Additive Manufacturing Technologies from an Optimization Perspective*, IGI Global, 199-220, 2019.
23. Gómez-Gras, G., Pérez, M.A., Fábregas-Moreno, J. and Reyes-Pozo, G., Experimental study on the accuracy and surface quality of printed versus machined holes in PEI Ultem 9085 FDM specimens. *Rapid Prototyping Journal*, 27 (11), 1-12, 2021.

24. Stratasys PC (Polycarbonate) FDM Thermoplastic Filament properties, Working document, 1-10.
25. Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., & Nosrati, A., Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: A Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (5-6), 2289–2308, 2019.
26. ACCUD. SR400 Yüzey Pürüzlülük Cihazı Teknik Dokümanı. <http://accud.in/products/pdf/SR400.pdf>. 02/01/2024.
27. Yurdakul M., İç Y., An Illustrative Study Aimed to Measure And Rank Performance of Turkish Automotive Companies Using TOPSIS, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18 (1), 1-18, 2003.
28. Lalegani Dezaki, M., Mohd Ariffin, M. K. A., & Baharuddin, B. T. H. T., Experimental Study of Drilling 3D Printed Polylactic Acid (PLA) in FDM Process. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, 85-106, 2021.

