

Polilaktik asit Malzeme ile Eriyik Yığıma Modellemede Boyutsal Doğruluk ve Üretim Süresi için Parametre Optimizasyonu

İnayet Burcu TOPRAK^{1*}

¹ Akdeniz Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Teknolojisi Bölümü, Antalya Türkiye

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: ibmutlu@akdeniz.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 27.02.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 24.06.2024

ÖZET

Savunma, havacılık, otomotiv ve sağlık sektörlerindeki ihtiyaçları karşılayan eklemeli imalat teknolojileri için, boyutsal doğruluk ve üretim süresinin kısıtlılığı önemlidir. Bunun için doğru parametrelerin belirlenmesi, optimize edilmesi ve karar verme süreçlerinde birden fazla hedefin dengelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, İdeal Çözüme Benzerlik Sırası Tekniğiyle boyutsal doğruluk ve üretim süresi üzerinde farklı üretim parametrelerinin etkisi aynı anda incelenmiştir. Deneilerin tasarlanması için Taguchi yöntemi kullanılmış ve ANYCUBIC 3B yazıcısı ile Polilaktik asit malzemeden ASTM D638 tip 1 standardına uygun çekme numuneleri üretilmiştir. Çalışma için seçilen kontrol faktörleri, dolgu yoğunluğu (% 40, 60, 80), katman kalınlığı (0,2, 0,25, 0,30 mm) ve baskı hızıdır (40, 50, 60 mm/sn). Numunelerin nominal boy, genişlik ve kalınlık değerlerinden sapmalar, boyutsal doğruluk yanıtları olarak kabul edilmiştir. Optimal parametreleri bulmak için ideal çözüme izafi yakınlık değerleri-Ci⁺ hesaplanmış, Varyans Analizi ve Sinyal/Gürültü analizi kullanılarak analiz edilmiş, Ci⁺ yı arttırmak için en iyi koşulların %80 dolgu yoğunluğu, 0,30 mm katman kalınlığı ve 40 mm/sn baskı hızı olduğu bulunmuştur. Parametrelerin katkısı sırasıyla %19,5, %20,1 ve %55,7 belirlenmiştir. Son olarak, optimal parametreler kullanılarak bir doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde, boydaki sapma 0,41 mm, genişlikteki sapma 0,03 mm ve kalınlıktaki sapma ise 0,07 mm olarak belirlenmiştir. Üretim süresi ise 56 dakika olarak tespit edilmiştir. Ci⁺ değerinin %44 arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, optimal parametrelerin kullanılmasıyla eklemeli imalat teknolojilerindeki verimlilik ve kalite artışının mümkün olduğunu açıkça göstererek, sektörde rekabet avantajı sağlamak isteyen şirketlere değerli bir yol haritası sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eriyik Yığıma Modelleme, Polilaktik asit (PLA), Taguchi, TOPSIS, boyutsal doğruluk, üretim süresi.

Parameter Optimization for Dimensional Accuracy and Production Time in Fused Deposition Modeling with Polylactic Acid

ABSTRACT

Dimensional accuracy and short production times are important for additive manufacturing technologies that meet the needs of the defense, aerospace, automotive and healthcare industries. This requires identifying and optimizing the right parameters and balancing multiple objectives in decision-making processes. In this study, the simultaneous impact of various production parameters on dimensional accuracy and production time was examined using the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution. Taguchi method was used to design the experiments and tensile specimens were produced from polylactic acid material in accordance with ASTM D638 type 1 standard with ANYCUBIC 3D printer. The control factors selected for the study were infill density (40, 60, 80%), layer thickness (0,2, 0,25, 0,30 mm) and printing speed (40, 50, 60 mm/s). The deviations from the nominal length, width, and thickness values of the samples are considered as responses for dimensional accuracy. To find the optimal parameters, relative closeness to the ideal solution-Ci⁺ values were calculated and analyzed using Analysis of Variance and Signal/Noise analysis, and it was found that the best conditions to increase Ci⁺ were 80% infill density, 0,30 mm layer thickness and 40 mm/sec printing speed. The contribution of parameters was determined to be 19,5%, 20,1%, and 55,7%, respectively. Finally, a validation experiment was conducted using the optimal parameters. In this experiment, the deviation in length is determined to be 0.41 mm, the deviation in width is 0.03 mm, and the deviation in thickness is 0.07 mm. The production time is determined to be 56 minutes. An increase of 44% in the Ci⁺ value was observed. These results clearly show that productivity and quality improvements in additive manufacturing technologies are possible with the use of optimal parameters, providing a valuable roadmap for companies that want to gain a competitive advantage in the sector.

Keywords: Fused Deposition Modeling, Polylactic Acid (PLA), Taguchi, TOPSIS, dimensional accuracy, production time

Cite as;

Toprak, İ.B. (2024). Polilaktik asit malzeme ile eriyik yığıma modellemede boyutsal doğruluk ve üretim süresi için parametre optimizasyonu. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 5(2), 39-48. DOI: 10.53501/rteufemud.1443884

1. GİRİŞ

Fused Deposition Modelling (FDM)/Eriyik Yığma Modelleme (EYM) olarak adlandırılan Fused Filament Fabrication (FFF) (Shakeria vd., 2021; Başçı ve Ymanoğlu, 2021; Gao vd., 2022a;) termoplastik bir filamentin sıcaklık altında ekstrüze edilmesi ile üç boyutlu modelin tabaka tabaka üretilmesi esasına göre çalışan eklemeli imalat tekniklerinden biridir. EYM, 3 boyutlu baskı teknolojisinin önemli bir parçası olarak, prototipleme, ürün geliştirme, eğitim, özel parça üretimi, mimari modelleme, sağlık ve tıp, uzay ve havacılık alanlarındaki kullanım potansiyeliyle dikkat çeker (Kuruoğlu vd., 2022; Kıran vd., 2022). Endüstriyel ekipmanlardaki yedek parça üretiminden cerrahi eğitim modellerine, otomotiv sektöründeki prototip parçalardan özelleştirilmiş tıbbi cihazlara kadar geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır. Ürün geliştirme sürecinin ötesinde, üretime yardımcı olan doğrudan ve dolaylı olarak kalıp ve fiyestürlerin imalatında da kullanılabilmektedir (Başçı ve Ymanoğlu, 2021). Endüstriyel uygulamaların yanı sıra akademik alanda da, karmaşık geometrileri takım sorunu olmadan, hızlı bir şekilde, düşük maliyet, minimum enerji tüketimi ve düşük malzeme israfıyla ürettiği için yaygın olarak kullanılmaktadır (Farazin ve Mohammadimehr, 2022; Gao vd., 2022b). Bu teknolojiye sahip 3B yazıcılarda yaygın olarak; polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat (PC), termoplastik poliüretan (TPU), naylon gibi termoplastik malzemeler kullanılmaktadır (Kuruoğlu vd., 2022; Medibew, 2022; Subhashini ve Sneha, 2022; Özmen vd., 2023; Yılmaz vd., 2024). PLA, yenilenebilir kaynaklardan üretilen (genellikle mısır nişastası veya şeker kamışı), çevre dostu olarak kabul edilen termoplastik malzemedir. ABS filamentine göre daha az duman ve koku açığa çıkarması sebebiyle daha çok tercih edilmektedir (Özmen vd., 2023). PLA'nın öne çıkan özellikleri arasında düşük erime sıcaklığına sahip olması, biyouyumluluk ve kolay şekillendirilebilirliği gelmektedir. Bununla birlikte, düşük mukavemet, kırılabilirlik ve düşük tokluk gibi özellikler, PLA malzemesinin kullanım alanlarını sınırlayan dezavantajlar

arasındadır (Yılmaz vd., 2024). PLA, Gıda Sektörü, Sağlık ve Tıbbi Cihaz Sektörü, Mimari Uygulamalar, Tekstil Sektörü, Kozmetik Sektörü, Hobi ürünleri ve Görsel prototiplemede kullanılmaktadır (URL-1, 2021). Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen kaliteli ürünler, boyutsal doğruluk, yüksek yüzey kalitesi ve mekanik dayanıklılık gibi özelliklere sahip olmalıdır. EYM yöntemi, basitlik, maliyetlerin düşmesi ve hızlı üretim gibi avantajlar sunsa da, parça kalitesi, boyutsal doğruluk ve mekanik özellikler açısından önemli kısıtlamalar getirebilmektedir (Equbal vd., 2019; Gao vd., 2022a; Medibew, 2022). EYM ile üretilen parçaların performansları ve kaliteleri üzerinde tarama açısı, tarama genişliği, katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, baskı yönü, üretim hızı, iç dolgu deseni, iç dolgu yoğunluğu, üst-alt katı katmanların sayısı, ekstrüder sıcaklığı, yatak sıcaklığı, filament malzemesi gibi işlem parametrelerinin önemli bir etkisi vardır (İriç, 2020, Kuruoğlu vd., 2022; Karakoç ve Uzun, 2023).

Bu yöntemle nihai ürünün kalitesini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için, işlem parametrelerinin etkisini anlamak ve optimize etmek büyük öneme sahiptir (Negrete, 2020; Tura vd., 2021; Gao vd., 2022b). Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Rajamani vd. (2022), EYM işlem parametrelerinin (katman kalınlığı, parça yönelimi, raster genişliği ve raster açısı) yüzey kalitesi üzerindeki etkisini, flapping wing mikro mekanizmasının montajını geliştirmek amacıyla incelemişlerdir. Deneysel stratejisi için Box-Behnken tasarımını, deneylerin performansı için Varyans Analizini (ANOVA), optimal EYM parametrelerini belirlemek için İdeal Çözüme Benzerlik Sırası Tekniğini (TOPSIS) kullanmışlardır. Sonuçlar, parça yönelimi ve raster açısının Ra üzerinde, katman kalınlığı ve raster genişliğinin Rz üzerinde, katman kalınlığı ve raster açısının Rq üzerinde etkili parametreler olduğunu göstermiştir. Optimal parametreler; 0,2285 mm katman kalınlığı, 45 derece parça yönelimi, 0,558 mm raster genişliği ve 0 derece raster açısıdır ve bu parametrelerle Ra = 25,8 µm, Rz = 98,3 µm ve Rq = 49,4 µm değerlerine ulaşılmıştır. Sharif vd.

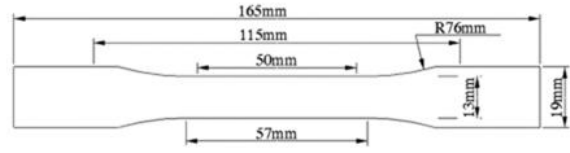
(2023), EYM aracılığıyla PLA' nın mekanik özelliklerini değerlendirmeye odaklanmışlardır. Baskı parametrelerinin darbe dayanımı üzerindeki etkisi, optimizasyon süreci için dikkate alınmıştır. Optimizasyon, baskı hızı, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu gibi baskı süreç parametrelerinin değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Numuneleri hazırlamak için L9 ortogonal dizisi ve süreç koşullarını optimize etmek için Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Her giriş parametresinin yanıt üzerindeki önemi ANOVA analizi ile belirlenmiştir. Sonuçlar, darbe dayanımının %80 dolgu yoğunluğu, minimum 0,1 mm tabaka kalınlığı ve 100 mm/s baskı hızında daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ANOVA çalışması, darbe dayanımını etkileyen parametrelerin sırasını dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı olarak belirlemiştir. Farazin ve Mohammadimehr (2022), dolgu yoğunluğu, baskı hızı ve tabaka kalınlığı gibi üç önemli parametrenin PLA numunelerinin çekme özellikleri üzerindeki etkisini MDs (molecular dynamics simulation) yöntemi ve deneysel analiz ile araştırmışlardır. Bu amaçla, dört farklı dolgu yoğunluğu, iki farklı hız ve iki farklı kalınlıkta standart numuneler basılmış ve quasi-statik çekme testine tabi tutulmuştur. Tüm numunelerde, baskı açısı $\pm 45^\circ$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, dolgu yoğunluğunun artmasıyla birlikte parçaların mekanik özelliklerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Ancak, çok yüksek dolgu yoğunluklarında, parçalar daha kırılabilir davranmakta ve daha düşük gerilme kırıklarına sahip olmaktadır. Bu nedenle, parçanın gücü şekil ve görünümünden daha az önemli olduğu durumlarda, maliyet, malzeme ve zaman tasarrufu açısından %40 yoğunluğun daha uygun olacağı belirtilmiştir. Baskı hızının PLA parçalarının mekanik özellikleri azalttığı ve diğer parametrelere göre daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir. İnce katmanların, yüksek boyut hassasiyeti ve kaliteli bir yüzey, daha kalın katmanların daha hızlı üretim ve güçlü mekanik özellikler sağlayacağı ifade edilmiştir. Anerao vd. (2023), biyokömür takviyeli PLA kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine

biyokömürün ağırlığının ve çeşitli üretim parametrelerinin etkilerini değerlendirmişlerdir. Deneysel tasarımı için Taguchi L16 kullanılmışlardır. İşlem parametrelerinin önemi ANOVA ile belirlenmiştir. Mekanik performansı sıralamak için TOPSIS tercih edilmiştir. Çalışma üç boyutlu basılmış nesnelerin mekanik özelliklerini optimize etmek için, EYM işlem parametreleri olarak 0,2 mm tabaka kalınlığı, %100 dolgu yoğunluğu ve 0° raster açısı önermektedir. Bolat ve Ergene (2022) tarafından yapılan çalışmada, PLA, PET-G ve ABS filament tiplerinden üretilen çekme testi numunelerinin boyutsal doğruluğuna filament tipi ve katman yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. Üretilen test numunelerinin uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri ölçülerek, elde edilen sonuçlar tasarım boyutları ile karşılaştırılmış ve her bir numunenin boyutsal doğruluğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, nihai yüzey kalitelerini değerlendirmek amacıyla numunelerin üzerinde yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. PLA numunelerinin diğer filamentlere kıyasla en iyi yüzey kalitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan boyutsal ölçümler sonucunda en doğru sonuçların PET-G (uzunlukta ve yükseklikte) ve PLA (genişlikte) numuneleri için kaydedildiği gözlemlenmiştir. Özellikle birbirine monte edilen parçalarda boyutsal doğruluk önemlidir. Boyutsal hatalar, parça çekmesi, büzülmesi, STL dosya hataları ve cihaz pozisyon hatalarından kaynaklanmaktadır. Her cihaz-malzeme-imalat parametresi-geometri kombinasyonunda farklı boyut hataları elde edileceğinden cihaz imalatçıları ve son kullanıcılar için hataların tespit edilip incelenmesine ihtiyaç vardır (Kıran vd., 2022). Gelecekteki savaş ortamlarında katmanlı imalat teknolojilerinin tedarik zinciri senaryolarındaki potansiyelini inceleyen Ersoy (2023), savunma sanayisi açısından operasyonlarda hasar gören sistemlerin ve yedek parça tamirinin kritik bir ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, savaş şartlarında 3D yazıcılar aracılığıyla kişiselleştirilmiş protezler, implantlar ve organların üretilerek yaralı askerlerin kayıplarının en aza indirilmesinin önemi üzerinde durmuştur. Bu bağlamda, boyutsal doğruluk, üretilen bileşenlerin ve kişiselleştirilmiş ürünlerin

işlevselliği için kritik bir öneme sahiptir. Üretim süresinin kısılması, sahada acil ihtiyaçların hızla karşılanmasına ve operasyonel etkinliğin artmasına olanak tanır. Dolayısıyla, üretim süresinin kısılgınının, savunma sanayisi ve askeri operasyonlar açısından büyük bir önemi bulunmaktadır. FDM gibi katmanlı imalat teknolojilerinde baskı süresinin kısılması, çeşitli avantajlar sunar. Hızlı prototipleme süreçleri, tasarım iterasyonlarını hızlandırır ve yeni ürünlerin daha hızlı geliştirilmesini sağlar. Aynı zamanda, seri üretimde kısa baskı süreleri, daha hızlı dönüş süreleri ve rekabet avantajı sunar. Daha az zaman ve enerji kullanımıyla maliyetlerin düşmesi, işletme maliyetlerini azaltırken, acil durum yanıtlarında da kritik bir rol oynar. Sonuç olarak, kısa baskı süreleri, işletme verimliliği, rekabet avantajı ve müşteri memnuniyeti açısından önemlidir. Suniya ve Verma (2023), EYM' nin performans parametrelerini iyileştirmek için işlem parametrelerinin optimizasyonu üzerine yayınlanan bazı araştırma makalelerini incelemişlerdir. İnceleme, çeşitli işlem parametrelerinin boyut hassasiyeti ve üretim süresi üzerindeki etkisini değerlendirmek için çok amaçlı optimizasyonun uygun bir yaklaşım olduğunu vurgulamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada optimum boyut ve baskı süresini elde etmek için TOPSIS tabanlı Taguchi yöntemi kullanılarak EYM baskı parametrelerinin incelenmesi planlanmıştır. Literatür taraması sonucunda benzer bir yaklaşıma rastlanmamıştır. Araştırma, EYM baskı sürecinin optimize edilmesine yönelik yeni bir bakış açısı sunmayı ve literatüre önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır

2. Materyal ve Metot

EYM ile farklı baskı parametrelerinde, ASTM D638 Tip 1 standardına uygun (Şekil 1) çekme numuneleri üretilmiştir (Doh vd., 2017). Çalışmadaki baskılar Teira3D 1,75 mm lik PLA filament kullanılarak, ANYCUBIC cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. ASTM D638 Tip 1 standardına göre test numunesi boyutları ($t=3,2$ mm)

Figure 1. Dimensions of test specimens according to ASTM D638 Type 1 standard ($t=3,2$ mm)

EYM baskı sürecinde birçok parametre ürün kalitesini etkileyebilir ve üreticilerin sağladığı varsayılan parametre ayarları, basılı ürünlerin kalitesini garanti edemez (Shakeria vd., 2021). Bu nedenle, farklı EYM süreç parametrelerinin çeşitli çıktılar üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır. Dey ve Yodo (2019), yaptıkları çalışmada, parametrelerin parça kalitesi üzerindeki etkisi ve işlem parametrelerinin optimizasyonu konusundaki mevcut literatürü kapsamlı bir şekilde incelemektedirler. Mevcut çalışmaların sonuçlarına dayanarak bir Balık Kılıcı diyagramı geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, boyutsal doğruluk ve üretim süresi optimizasyonu için baskı parametreleri ve seviyeleri, Balık Kılıcı diyagramı ve literatür göz önüne alınarak belirlenmiştir (Negrete, 2020; Aslani vd., 2020; Shaikh ve Salokhe, 2020; Syed vd., 2022; Singh ve Bharti, 2022; Mazlan vd., 2023). Tablo 1' de gösterildiği gibi, incelenen parametreler dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı olup, her biri üç farklı seviyede ele alınmıştır. Diğer tüm faktörler sabit tutulmuştur: nozzle çapı 0,4 mm, platform sıcaklığı 50 °C, baskı sıcaklığı 210 °C, dolgu deseni concentric, üst ve alt katman deseni zigzag, alt ve üst yüzeyler dört katman, fan hızı %10 ve numunelerin dış yüzey kabuğu dört katman kalınlığındadır.

Tablo 1. EYM baskı parametrelerinin test seviyeleri

Table 1. Test levels for FDM printing parameters

Parametreler	Sembolleri	Seviyeleri		
		1	2	3
Dolgu yoğunluğu (%)	A	40	60	80
Katman kalınlığı (mm)	B	0,2	0,25	0,3
Baskı Hızı (mm/sn)	C	40	50	60

Tablo 2' de sunulan deney düzeni, Taguchi L9 ortogonal dizisine göre planlanmıştır. Üç parametre ve üç seviyeli bir deney düzeni için Taguchi L9, etkili bir seçenektir. Bu düzen, deney sayısını en aza indirirken parametre etkilerini değerlendirir ve deneyler arasındaki etkileşimleri dengeler. Taguchi yöntemi, parametre etkilerini analiz ederken aynı zamanda maliyeti ve zamanı minimize etmeye yardımcı olur. Bu nedenle, literatürde Taguchi metodolojisinin parametrelerin etkili bir şekilde incelenmesi için uygun ve yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Tunçel ve Bayraklılar, 2024; Tunçel, 2024).

Her bir deney için üretilen çekme numunelerinin boyutları ve baskı süreleri Tablo 3' te verilmiştir. Boyut ölçümleri, hassasiyeti 0,01 mm olan

Dasqua 2310-7110 Dijital Kumpas ile Şekil 2' de gösterilen noktalardan yapılmıştır. Baskı süreleri, dilimleme yazılımından elde edilmiştir

Tablo 2. Her deney için baskı parametrelerinin kombinasyonu

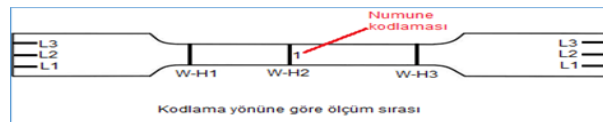
Table 2. Combination of printing parameters for each experiment

Deney No	A	B	C
1	40	0,2	40
2	40	0,25	50
3	40	0,3	60
4	60	0,2	50
5	60	0,25	60
6	60	0,3	40
7	80	0,2	60
8	80	0,25	40
9	80	0,3	50

Tablo 3. Her deney numunesi için boyut ve baskı süresi sonuçları

Table 3. Dimension and printing time results for each test sample

Deney No	Boy (mm)			Genişlik (mm)			Kalınlık (mm)			Baskı Süresi (dk)
	L1	L2	L3	W1	W2	W3	H1	H2	H3	
1	164,63	164,74	164,76	12,94	12,93	12,94	3,08	3,07	3,08	64
2	164,58	164,64	164,65	12,93	12,94	12,92	3,13	3,12	3,13	49
3	164,58	164,61	164,66	12,95	12,95	12,94	3,18	3,17	3,17	39
4	164,6	164,63	164,64	12,93	12,95	12,9	3,09	3,09	3,08	56
5	164,61	164,59	164,58	12,96	12,94	12,93	3,17	3,14	3,14	44
6	164,62	164,66	164,66	12,94	12,95	12,94	3,17	3,17	3,17	55
7	164,61	164,62	164,62	12,94	12,96	12,98	3,08	3,09	3,1	52
8	164,59	164,57	164,61	12,95	12,98	12,98	3,12	3,12	3,12	62
9	164,61	164,63	164,65	12,94	12,95	12,93	3,16	3,14	3,15	47



Şekil 2. Deney numuneleri için boyut ölçüm noktaları

Figure 2. Dimension measurement points for test samples

3. Bulgular ve Tartışma

Numune boyutu ve üretim süresinin eş zamanlı optimizasyonu için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden biri olan TOPSIS metodu kullanılmıştır. Her numuneye ait boy, genişlik ve kalınlık için ortalama değer hesaplanmıştır. Analizde kullanılan ΔL , ΔW ve ΔH değerleri, istenen ölçü değerinden ortalama değerler

çıkarılarak elde edilmiştir. Yanıtların önemi, Analitik Hiyerarşi Yöntemiyle belirlenmiştir. Ağırlık faktörleri sırasıyla; $W_{\Delta L}=0,5$, $W_{\Delta W}=0,27$, $W_{\Delta H}=0,11$, $W_{Süre}=0,12$ olarak alınmıştır. Boyut ve süre değerlerinin normalizasyonu, ağırlıklandırılmış karar matrisi, yanıtların pozitif ideal ve negatif ideal çözümü, Pozitif (Si^+) ve negatif (Si^-) ideal çözümlerden olan sapmalar, her bir deney kombinasyonu için ideal çözüme izafi yakınlık değerleri hesaplanmış, Ci^+ değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. En büyük Ci^+ değeri en uygun deney kombinasyonunu göstermektedir. Tablo 4' te her

bir yanıt için pozitif ve negatif ideal çözümler, Tablo 5a ve 5b' de yöntemin kullanımıyla hesaplanan değerler verilmiştir. Tablo 5b incelendiğinde, ideal çözüme en yakın değere 0,535786 ile 8 numaralı deneyde ulaşılmıştır.

Tablo 4. Pozitif ve negatif ideal çözümler
Table 4. Positive and negative ideal solutions

Yanıtlar	ΔL	ΔW	ΔH	Süre dk
İdeal pozitif	0,129332	0,04704	0,01212	0,0296
İdeal	0,182848	0,11498	0,05607	0,0487

Tablo 5a. TOPSIS yönteminin kullanımında hesaplanan değerler

Table 5a. Calculated values in the application of the TOPSIS method

Normaliz edilmiş veriler				Ağırlıklandırılmış normalize veriler			
ΔL	ΔW	ΔH	Süre-dk	ΔL	ΔW	ΔH	Süre-dk
0,258664	0,367773	0,509727	0,405812	0,129332	0,099299	0,05607	0,048697
0,335966	0,406485	0,303081	0,3107	0,167983	0,109751	0,033339	0,037284
0,341912	0,309703	0,110211	0,247292	0,170956	0,08362	0,012123	0,029675
0,335966	0,425842	0,468398	0,355085	0,167983	0,114977	0,051524	0,04261
0,362724	0,32906	0,206646	0,278996	0,181362	0,088846	0,022731	0,033479
0,315154	0,32906	0,123988	0,348744	0,157577	0,088846	0,013639	0,041849
0,341912	0,232277	0,454621	0,329722	0,170956	0,062715	0,050008	0,039567
0,365697	0,174208	0,330634	0,39313	0,182849	0,047036	0,03637	0,047176
0,33002	0,348416	0,206646	0,298018	0,16501	0,094072	0,022731	0,035762

Tablo 5b. TOPSIS yönteminin kullanımında hesaplanan değerler

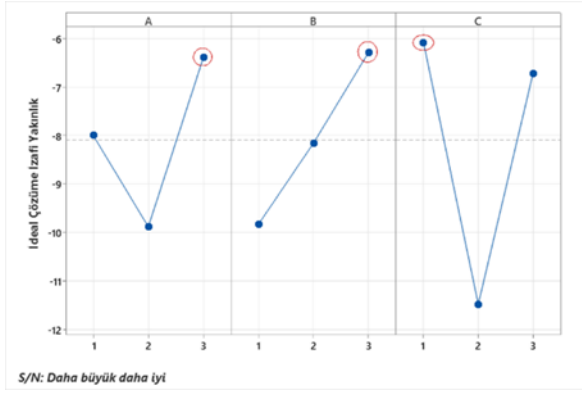
Table 5b. Calculated values in the application of the TOPSIS method

Si^+	Si^-	Ci^+	Sıralama
0,070884	0,055766	0,440317	5
0,077039	0,029921	0,27974	8
0,055416	0,058463	0,513377	3
0,088485	0,016695	0,158725	9
0,067692	0,045035	0,399503	7
0,051926	0,056292	0,520171	2
0,059258	0,054707	0,480035	4
0,061304	0,070756	0,535786	1
0,06029	0,0451	0,427936	6

Boyut değişimleri ve süre için her bir parametrenin ideal çözüme izafi yakınlık değeri üzerindeki etkisi Şekil 3' te verilmiştir. Baskı parametreleri ve seviyelerinin Ci^+ ya etkileri S/N oranı ile hesaplanmıştır. Daha büyük daha iyi oranı kullanılarak baskı parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanmış daha yüksek

ideal çözüme izafi yakınlık değeri kontrol faktörlerinin optimum seviyesini göstermektedir.

Tablo 6' da ideal çözüme izafi yakınlık değeri için yanıt tablosu verilmiştir. Parametrelerin optimum seviyelerine, %80 dolgu yoğunluğu, 0,30 mm katman kalınlığı ve 40 mm/sn baskı hızında yani A3B3C1 deney kombinasyonunda ulaşılmıştır.



Şekil 3. Parametrelerin Ci^+ üzerindeki etkileri
Figure 3. Effects of parameters on Ci^+

Suniya ve Verma (2023) yaptıkları çalışmada katman kalınlığı parametresinin, bir parçanın yüzey kalitesini ve üretim süresini etkilediğini belirtmişlerdir. Literatürdeki çalışmalarda (Nancharaiah, 2011; Mendonsa vd., 2015; Wu, 2018), katman kalınlığı arttıkça üretim süresinin azalacağını göstermektedir. Sumalatha vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, minimum baskı süresine en düşük baskı hızı, en yüksek katman kalınlığı ve en düşük dolgu yoğunluğu kombinasyonu ile ulaşılmıştır. Agarwal ve diğerleri (2022) ise, katman kalınlığının artmasının ölçü sapmasını artırdığını belirtmektedir. Bu nedenle, basılan parçadaki sapmayı azaltmak için katman kalınlığının daha düşük bir değere sahip olması gerektiği önerilmektedir. Ansari ve Kamil (2021), boyutsal sapmanın düşük baskı hızında daha düşük bulunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, minimum baskı süresini yüksek baskı hızında gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Akande (2015), boyutsal doğruluk için optimal parametre setlerini yüksek katman kalınlığı, düşük baskı hızı ve düşük dolgu yoğunluğu olarak belirlemiştir. Boyutsal doğruluk ve baskı süresi için gereken optimum parametre setleri arasında uyumsuzluk bulunmaktadır. Bu çalışmada, boyutsal doğruluk ve baskı süresinin eş zamanlı optimizasyonu için TOPSIS yöntemi kullanılarak en uygun deney kombinasyonu belirlenmiştir.

Parametrelerin Ci^+ üzerindeki etkilerinin sırasıyla hız, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu olduğu tablo 6' dan görülmektedir.

Tablo 6. İdeal Çözüme İzafi Yakınlık Değeri İçin Yanıt Tablosu

Table 6. Response Table for Relative Proximity Value to Ideal Solution

Level	Dolgu Yoğunluğu	Katman Kalınlığı	Baskı Hızı
1	-7,994	-9,829	-6,074
2	-9,878	-8,152	-11,475
3	-6,389	-6,280	-6,712
Delta	3,489	3,548	5,401
Rank	3	2	1

Parametrelerin ideal çözüme izafi yakınlık değeri üzerindeki etki oranlarını belirlemek için ANOVA uygulanmıştır. Tablo 7' de Ci^+ 'nin ANOVA sonucu verilmiştir. Baskı hızı, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu için etki oranlarının sırasıyla %55,7, %20,1 ve %19,5 olduğu görülmektedir (R-kare: %95,33).

Tablo 7. Ci^+ 'nin Varyans Analiz Sonuçları

Table 7. Variance Analysis Results of Ci^+

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Dolgu yoğunluğu	2	18,298	18,298	9,149	4,17	0,193
Katman kalınlığı	2	18,906	18,906	9,453	4,31	0,188
Baskı Hızı	2	52,260	52,260	26,130	11,92	0,077
Residual Error	2	4,386	4,386	2,193		
Total	8	93,849				

A3B3C1 deney kombinasyonu mevcut deneyler içinde olmadığından yeni bir üretim gerçekleştirilmiştir. Başlangıç parametresine ve TOPSIS parametresine göre yapılan üretim sonuçları Tablo 8' de karşılaştırılmıştır. Ci^+ da % 44 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Bu TOPSIS yönteminin başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir.

Tablo 8. Doğrulama test sonuçları**Table 8.** Validation Test Results

Yanıtlar	Başlangıç	TOPSIS
	Parametresi	Parametresi
	<i>A1B1C1</i>	<i>A3B3C1</i>
ΔL	0,29	0,41
ΔW	0,06	0,03
ΔH	0,12	0,07
Süre-dk	64	56
C_i^+	0,440317	0,6326

4. Sonuçlar

EYM ile üretilen çekme numunelerinin boyutsal doğruluğunun ve üretim süresinin eş zamanlı optimizasyonu için TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Deneysel Taguchi L9 ortogonal dizisine göre gerçekleştirilmiştir. Her biri üç seviyeye sahip olan baskı parametreleri (Dolgu yoğunluğu, katman kalınlığı ve baskı hızı) kontrol faktörleri olarak dikkate alınmıştır. Numunelerin nominal boy, genişlik ve kalınlık değerlerinde gerçekleşen sapma, boyutsal doğruluk yanıtları olarak kabul edilmiştir. TOPSIS yöntemine göre, optimum parametre kombinasyonu %80 dolgu yoğunluğu, 0,30 mm katman kalınlığı ve 40 mm/sn baskı hızı (A3B3C1) olarak belirlenmiştir. Bu parametre kombinasyonu ile, $\Delta L=0.41$ mm, $\Delta W=0.03$ mm, $\Delta H=0.07$ mm ve üretim süresi 56 dakika olarak elde edilmiştir. İdeal çözüme izafi yakınlık değerinin ANOVA sonucuna göre, en etkili faktör baskı hızı (%55,7) olup, onu sırasıyla katman kalınlığı (%20,1) ve dolgu yoğunluğu (%19,5) takip etmektedir. Optimum parametre kombinasyonuna göre yapılan yeni üretimin sonucu TOPSIS yönteminin başarılı olduğunu göstermektedir. Daha sonra yapılacak çalışmalarda, farklı malzemelerin, farklı baskı parametrelerinin ve diğer çok kriterli karar verme yöntemlerinin incelenmesi planlanmaktadır.

Yazar katkısı

Toprak, İ.B: Çalışmanın planlanması, literatür taraması, verilerin analizi ve yorumlanması, makalenin yazımı.

Teşekkür

Numunelerin üretilmesindeki katkıları için, Makine Mühendisi Ahmet Tolunay Işık' a ve ölçümlerdeki yardımını için Öğr.Gör.Dr. Hüseyin İpek'e teşekkür ederim.

Finansman beyanı

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Etik standartlar

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Agarwal, K. M., Shubham, P., Bhatia, D., Sharma, P., Vaid, H., Vajpeyi, R. (2022). Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of abs specimens printed using fused deposition modelling (FDM). *Sensors International*, 3, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>
- Anerao, P., Kulkarni, A., Munde, Y., Shinde, A., Das, O. (2023). Biochar reinforced PLA composite for fused deposition modelling (FDM): A parametric study on mechanical performance. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100406. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100406>
- Ansari, A.A. and Kamil, M. (2021). Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process. *Materials Today: Proceedings*, 45 (6), 5462-5468. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.137>
- Aslani, K.E., Kitsakis, K., Kechagias, J.D., Vaxevanidis, N.M., Manolakos, D.E. (2020). On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the

- PLA fused filament fabrication process. *SN Applied Sciences*, 2(6), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2823-z>
- Başçı, Ü.G., Yamanoğlu R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.838281>
- Bolat, Ç., Ergene, B. (2022). An investigation on dimensional accuracy of 3D printed PLA, PET-G and ABS samples with different layer heights. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 449-458. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1146401>
- Dey, A. and Yodo, N. (2019). A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
- Doh, J., Kim, S-W., Lee, J. (2017). Reliability assessment on the degradation properties of polymers under operating temperature and vibration conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(13), 1–17. <https://doi.org/10.1177/0954407017735263>
- Ersoy, K. (2023). Savunma sanayiinde katmanlı imalat ile tedarik zinciri yönetimi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 21(2), 63-73. <https://doi.org/10.56193/matim.1270281>
- Equbal, A., Equbal, M.I., Sood, A.K. (2019). PCA-based desirability method for dimensional improvement of part extruded by fused deposition modelling technology. *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 269–280. <https://doi.org/10.1007/s40964-018-00072-4>
- Farazin, A. and Mohammadimehr, M. (2022). Effect of different parameters on the tensile properties of printed Polylactic acid samples by FDM: Experimental design tested with MDs simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 103–118. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-273321/v1>
- Gao, G., Xu, F., Xu, J. (2022a). Effect of testing standard on parameter optimization of fused deposition modelling process. *Journal of Physics: Conference Series*, 2390 012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2390/1/012075>
- Gao, G., Xu, F., Xu, J. (2022b). Parametric optimization of FDM process for improving mechanical strengths using taguchi method and response surface method: A comparative investigation. *Machines*, 10(9), 750. <https://doi.org/10.3390/machines10090750>
- İriç, S. (2020). Experimental investigation on effect to the specific strength of FDM fabrication parameters using taguchi method. *Sakarya University Journal of Science*, 24(5), 984-990. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.771389>
- Karakoç B. ve Uzun G. (2023). Ergiyik yığıma modelleme yöntemi ile üretilen numunelerde örme yönteminin ve baskı yönünün mukavemete olan etkisi. *Politeknik Dergisi*, 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1262855>
- Kıran, K., Şekerci, B., Urgancı, K.B., Delikanlı, Y.E., Gezgen, B. (2022). Endüstriyel bir 3 boyutlu yazıcı ile imal edilen ABS malzemeli parçaların boyut hatalarının incelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(4), 1046-1057. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1055034>
- Kuruoğlu, Y., Akgün, M., Demir, H. (2022). FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu. *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3), 358-369. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1148923>
- Mazlan, M.A., Anas, M.A., Nor Izmin, N.A., Abdullah, A.H.. (2023). Effects of infill density, wall perimeter and layer height in fabricating 3D printing products. *Materials*, 16 (2), 695. <https://doi.org/10.3390/ma16020695>
- Medibew, T.M. (2022). A comprehensive review on the optimization of the fused deposition modeling process parameter for better tensile strength of PLA-printed parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 5490831. <https://doi.org/10.1155/2022/5490831>
- Mendonsa, C., Naveen, K.V., Upadhyaya, P., Shenoy, V.D. (2015). Influence of FDM process parameters on build time using Taguchi and ANOVA approach. *International Journal of Science and Research*, 4(2), 330-333.
- Nancharaiah, T. (2011). Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments. *International Journal on Emerging Technologies*, 2(1), 100-102

- Negrete, C.C. (2020). Optimization of FDM parameters for improving part quality, productivity and sustainability of the process using Taguchi methodology and desirability approach. *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 59–65. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00115-9>
- Özmen, Ö., Sürmen, H.K., Sezgin, A. (2023). 3 Boyutlu baskıda dolgu biçiminin çekme dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(1), 336-348. <https://doi.org/10.21923/jesd.1095594>
- Rajamani, D., Balasubramanian, E., Yang, L.J. (2022). Enhancing the surface quality of FDM processed flapping wing micro mechanism assembly through RSM–TOPSIS hybrid approach. *Processes*, 10 (11), 2457. <https://doi.org/10.3390/pr10112457>
- Shaikh, A.M. and Salokhe, O.A. (2020). Multi objective optimization of fused deposition modeling parameters for PC/ABS blend material parts using GRA. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(3), 1107-1116. <https://doi.org/10.35940/ijtee.C8009.019320>
- Shakeria, Z., Benfriha, K., Zirak, N., Shirinbayan, M. (2021). Optimization of FFF processing parameters to improve geometrical accuracy and mechanical behavior of polyamide 6 using grey relational analysis (GRA). *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1118150/v1>
- Sharif, A., Khan, H., Bashir, N., Alam, W. (2023). Parametric optimization and evaluating mechanical properties of poly lactic acid proceed by FDM additive manufacturing. *Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 11-20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8020527>
- Singh, M. and Bharti P.S. (2022). Grey relational analysis based optimization of process parameters for efficient performance of fused deposition modelling based 3D printer. *Journal of Engg. Research, ICMET Special Issue*. <https://doi.org/10.36909/jer.ICMET.17159>
- Subhashini, P.V.S. and Sneha, G. (2022). Parametric optimization of fused deposition modeling using multi-objective techniques. *Journal of Nanotechnology and Smart Materials*, 6, 1-15. <https://doi.org/10.17303/jnsm.2022.7.105>
- Sumalatha, M., Rao, J.N.M., Reddy, B.S. (2021). Optimization of process parameters in 3d printing-fused deposition modeling using Taguchi method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1112(1):012009. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1112/1/012009>
- Suniya, N.K. and Verma, A.K. (2023). A review on optimization of process parameters of fused deposition modeling. *Reserch Engineering Structures and Materials*, 9(2), 631-659. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2022.520ma0909>
- Syed, M.A.B., Rhaman, Q., Shahriar, H.M., Khan, M.M.A. (2022). Grey-Taguchi approach to optimize fused deposition modeling process in terms of mechanical properties and dimensional accuracy. *Journal of Engineering Research, Innovation and Education*, 4(1), 38-52.
- Tunçel, O. (2024). Optimization of charpy impact strength of tough PLA samples produced by 3D printing using the Taguchi method. *Polymers (Basel)*, 16(4), 459. <https://doi.org/10.3390/polym16040459>
- Tunçel, O. ve Bayraklılar, M.S. (2024). The application of the taguchi method for optimizing the compression strength of pla samples produced using FDM. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 133-141. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1365534>
- Tura, A.D., Mamo, H.B., Rao, D.K. (2021). Study on the effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength and their optimal selection. *International Journal of Engineering and Artificial Intelligence*, 2 (2), 81–91. <https://repository.ju.edu.et/handle/123456789/6570>
- URL-1, (2021). <https://blog.3dortgen.com/rehber-pla-filament-nedir-ne-degildir>, 27.02.2024.
- Wu, J. (2018). Study on optimization of 3D printing parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 392(6):062050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062050>
- Yılmaz, M., Yılmaz, N.F., Kılıç, A., Mazı, H. (2024). Investigation of manufacturability of in-situ crosslinked polylactic acid (PLA) and peroxide composite in additive manufacturing. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 859-86. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1213974>