

3 Boyutlu Yazıcılarda Z-Dikiş Noktalarının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi: Re-Entrant Hücre Geometrisi Üzerine Deneysel Bir Araştırma

Çağlar SEVİM 

*: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, NİĞDE

(Alınış / Received: 23.07.2025, Kabul / Accepted: 06.08.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2025)

Anahtar Kelimeler

Eklemeli İmalat,
3B Yazdırma,
Z-Dikiş başlangıç Noktası
Eriyik Yığma Modelleme,
Basma Testi

Öz: Katmanlı eriyik yığma modelleme (EYM) yöntemi, karmaşık parçaların üretiminde çeşitli avantajlar sunar. Bu teknolojinin başarısı yalnızca görsel kaliteye değil, aynı zamanda elde edilen parçaların mekanik özelliklerinin doğru belirlenmesine de bağlıdır. Üretim kalitesi ve nihai performans açısından, çekme, basma ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikler kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, üretim parametrelerinin mekanik davranışa etkisi ayrıntılı şekilde incelenmelidir. Bu parametrelerden biri olan Z-Dikiş noktaları, katmanlar arası birleştirme stratejisini ifade etmekte olup parçanın bütünsel dayanımını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, literatürde mevcut olan bir Re-Entrant hücre geometrisi kullanılarak tasarlanan numuneler, PLA malzemesi ile farklı Z-dikiş parametreleri kullanılarak üretilmiş ve bu numuneler tek eksenli basma testine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda, en düşük basma dayanımı 1,55 kN ile “Keskin Köşe – Gizli Dikiş” konfigürasyonunda, en yüksek dayanım ise 1,65 kN ile “En Kısa – Açık&Gizli Dikiş” konfigürasyonunda elde edilmiştir. Bu bulgular, Z-Dikiş noktalarının yerleşimi ve türünün, parça dayanımı üzerinde yaklaşık %10 oranında değişime neden olabildiğini ve bu parametrenin EYM ile üretimde dikkate değer bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Investigation of the Effect of Z-Seam Locations on Mechanical Properties in 3D Printing: An Experimental Study on Re-Entrant Cell Geometry

Keywords

Additive Manufacturing,
3D Printing,
Z-Seam Start Point,
Fused Deposition Modeling
Compression Test

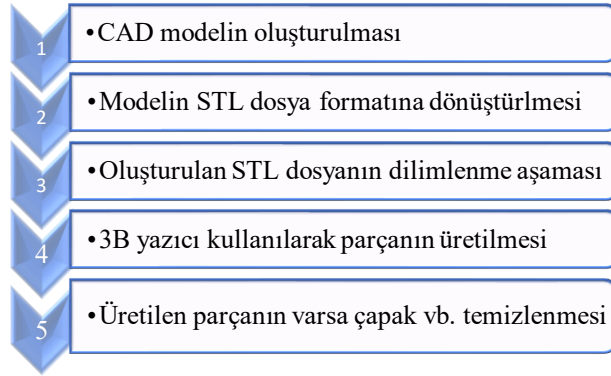
Abstract: Fused Deposition Modeling (FDM) offers several advantages in the production of complex parts. The success of this technology depends not only on visual quality but also on the accurate determination of the mechanical properties of the printed parts. Mechanical properties such as tensile, compressive, and impact strength are critical for production quality and final performance. Therefore, the effects of manufacturing parameters on mechanical behavior must be examined in detail. One of these parameters, Z-seam locations, represents the interlayer bonding strategy and can directly affect the overall strength of the part. In this study, test specimens were produced using PLA material based on a Re-Entrant cell geometry previously established in the literature, with varying Z-seam parameters, and were subjected to uniaxial compression testing. As a result of the experiments, the lowest compressive strength was obtained in the “Sharp Corner – Hidden Seam” configuration with 1.55 kN, while the highest strength was achieved in the “Shortest – Open & Hidden Seam” configuration with 1.65 kN. These findings reveal that the placement and type of Z-seam can cause approximately a 10% variation in part strength and show that this parameter has a significant effect in FDM production.

*İlgili Yazar, email: caglar.sevim@ohu.edu.tr

1.Giriş

Üç boyutlu (3B) yazdırma teknolojisi, gelişen üretim yaklaşımları arasında yerini sağlamlaştırmış ve sunduğu esneklik, düşük maliyet ve tasarım özgürlüğü ile birçok sektörde yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Eklemeli imalatın bir alt dalı olan eriyik yığma modellemesi (EYM veya FDM), özellikle karmaşık geometrilere sahip işlevsel parçaların üretiminde öne çıkan bir yöntemdir. Bu teknoloji, tasarım kısıtlamalarını azaltması, üretim atığını minimize etmesi ve hızlı prototipleme imkânı sunması gibi avantajları sayesinde günümüzde mühendislik, tıp, havacılık ve otomotiv gibi birçok disiplinde yaygın olarak tercih edilmektedir [1–3].

EYM teknolojisinde üretim süreci, öncelikle modelin bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında oluşturulmasıyla başlar. Hazırlanan model, STL (Standard Tessellation Language) uzantılı dosya formatında kaydedilir. STL dosyası, 3B modeli üçgen ağ yapısıyla tanımlar. Sonrasında, Ultimaker CURA gibi dilimleme yazılımları aracılığıyla malzeme türü, baskı hızı, ekstrüder ve tabla sıcaklığı, katman kalınlığı, doluluk oranı, baskı yönü ve dikiş modeli gibi parametreler belirlenir. Bu ayarlara göre oluşturulan G-CODE, yazıcıya aktarılarak parçanın katmanlı üretimi gerçekleştirilir. Üretim sürecine ilişkin temel adımlar Şekil 1’ de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 1. Eklemeli imalatta işlem aşamaları

FDM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri, yalnızca malzeme türü veya doluluk oranına değil, aynı zamanda katmanlar arası bağ yapısına ve dikiş hizalanmasına da önemli ölçüde bağlıdır. Bu yöntemde katmanlar yatay düzlemde biriktirilerek oluşturulduğu için, oluşan yapılar anizotropik davranış sergilemektedir [4-6]. FDM yöntemiyle üretilen parçalarda, yazdırma yönüne ve X, Y, Z eksenleri boyunca oluşan bağlanma mukavemeti farklılıklarına bağlı olarak, çekme, basma ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerde önemli değişkenlikler gözlemlenmektedir [5,7,8]. Bu nedenle, FDM ile üretilmiş parçaların mekanik performansını değerlendirmek için yazdırma açısı, katman kalınlığı ve dikiş çeşidi parametreleri gibi farklı yazdırma parametrelerinin etkisi kapsamlı biçimde analiz edilmelidir.

Literatürde, ticari olarak en yaygın kullanılan polimerlerden olan polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve benzeri malzemelerden üretilen test numuneleri üzerinde yapılan çok sayıda çalışmada; yazdırma parametrelerinin (dolgu deseni, doluluk oranı, hava boşluğu, parça yerleşim yönü, yazdırma açısı, katman kalınlığı, besleme hızı, yerleştirme açısı ve katman yüksekliği gibi) mekanik performans (çekme dayanımı, kopma uzaması, nihai çekme dayanımı, akma dayanımı, elastik modül, tokluk vb.) üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir [9-10]. Bu çalışmalar, üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır. Ayrıca, yazdırma hassasiyeti, maliyet ve darbe dayanımı gibi faktörlerin birlikte optimize edilmesine yönelik metodolojiler de önerilmektedir [11]. Farklı uygulamalar için özel malzemelerle yapılan çalışmalarda, üretim parametrelerinin fonksiyonel performansa etkisini vurgulamaktadır [12].

Katmanların üst üste biriktirilmesiyle oluşan parçada her katman belirli bir başlangıç noktası veya noktalarına sahiptir. Katmanın içerdiği geometrik şekillere göre her bir katmanda bir veya birden fazla başlangıç noktaları bulunabilmektedir. Bu noktalar "Z-Dikiş yeri" veya "Z-seam" olarak adlandırılmakta ve parçanın geometrisine bağlı olarak farklı konumlarda yer alabilmektedir. Bu dikiş noktaları, ekstrüderin her yeni katmana veya aynı katman üzerinde farklı geometrik bir şekle geçişte filament akışını başlatıp durdurduğu bölgeler olması nedeniyle potansiyel zayıflık bölgeleri olarak değerlendirilmektedir.

Chafik ve arkadaşları (2017), bu etkiye dikkat çekerek çekme testlerine tabi tuttıkları numunelerde dikiş noktalarını köşelere konumlandırarak hatalı kırılmaların önüne geçmeyi hedeflemişlerdir [13]. Benzer şekilde, Demir (2024), FFF yöntemiyle ürettiği PLA numunelerinde Z-Dikişlerinin keskin köşelere yerleştirilmesinin yapısal zayıflıkları azalttığını belirtmiştir [14]. Demir ve arkadaşları (2022) ise Taguchi yöntemi kullanarak PLA parçaların çekme dayanımını optimize etmeyi amaçlamış, Z-Dikiş yerlerinin doğru konumlandırılmasının

malzeme kırılma gerilmesini azaltarak mukavemeti artırdığını ifade etmişlerdir [15]. Foppiano ve ark. [16], Z-Dikiş hizalamasını rastgele (random) olacak şekilde ayarlayarak dikiş kaynaklı üretim kusurlarını dağıtmayı amaçlamış; ancak bu çalışmalarda Z-Dikiş konumunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi doğrudan incelenmemiştir.

Yapılan araştırmalarda, EYM sürecine ait çeşitli parametrelerin mekanik performansa etkisi sıklıkla incelenmiş olsa da Z-Dikiş noktalarının yerleşimini dikkate alan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Literatürde çoğunlukla baskı yönelimi, doluluk oranı, malzeme türü gibi parametreler ele alınırken, dikiş başlangıç noktalarının konumunun mekanik dayanım üzerindeki rolü çoğunlukla göz ardı edilmiştir. Geleneksel plastik malzemeler için çekme ve basma testleri sıklıkla ASTM D638-14 ve ASTM D695-15 standartlarına göre yürütülmektedir. Ancak bu standartlar, homojen ve kusursuz yapıda üretilmiş plastik numuneler için geliştirilmiştir. Katmanlı üretim yöntemleriyle üretilen parçalar ise, Z-dikiş noktaları, katmanlar arası yapışma kalitesi, soğuma farklılıkları gibi çeşitli üretim kusurlarına maruz kalabilmektedir. Bu durum, standardize edilmiş test sonuçlarında sapmalara ve tekrar edilebilirliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, Z-Dikiş yerleşimi gibi üretim parametrelerinin optimize edilmesi, hem üretim kalitesinin artırılması hem de mekanik testlerin daha tutarlı sonuçlar vermesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu eksiklik, Z-Dikiş stratejisinin yalnızca estetik değil, aynı zamanda yapısal bütünlük açısından da önemli bir üretim parametresi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, karmaşık geometrili bir model üzerinde farklı Z-Dikiş yerleşimlerinin parça dayanımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemekte ve bu alandaki sınırlı literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, Z-Dikiş noktalarının konumlandırılmasının mekanik performans üzerindeki etkisini net biçimde ortaya koymaktadır.

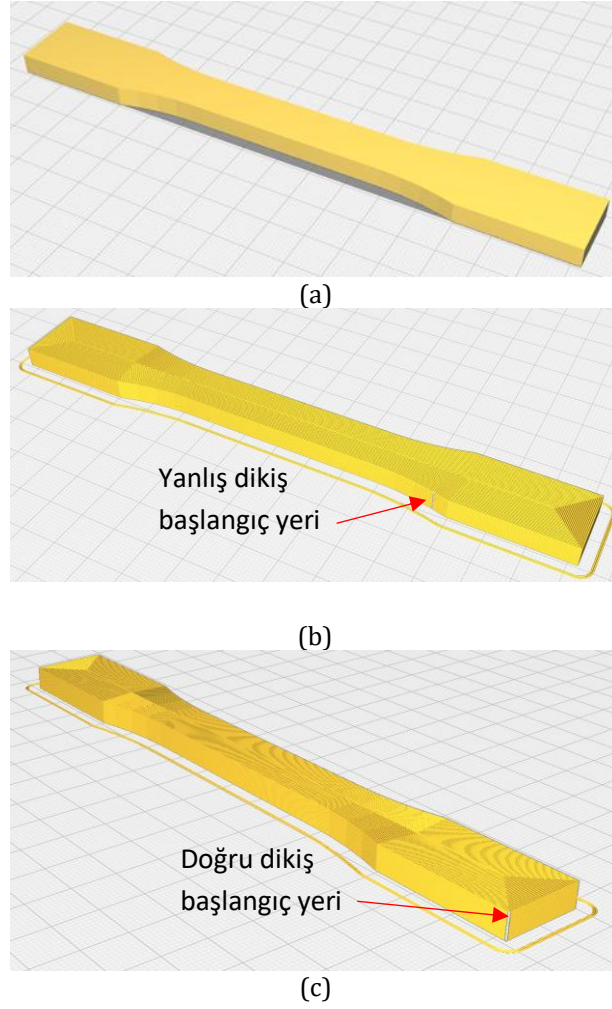
2. Materyal ve Metot

Katmanlı üretim sürecinin temel adımlarından ilki, tasarım aşamasında dijital bir model oluşturmaktır. Bu süreçte genellikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılır. CAD programları tasarımcıların istenilen şekilde karmaşık ve hassas modellerin dahi rahatlıkla oluşturmaya olanak tanır. Tasarım sürecinin sonunda, oluşturulan dijital model, yazdırma işlemi için STL uzantısına sahip formata dönüştürülmesi gereklidir.

STL dosya formatı, tasarımın yüzeylerini üçgen ağlarla ifade ederek, modelin dijital bir kopyasını oluşturur. Bu, parçanın yüzey geometrisinin 3B yazıcı için G-CODE üretecek programlar tarafından anlaşılabilir hale getirilmesini sağlar. STL formatı, yalnızca modelin dış yüzey bilgilerini içerir; malzeme cinsi, renk, doku veya diğer ayrıntılar gibi verileri desteklemez. STL uzantılı dosya oluşturulduktan sonra bir dilimleme programına aktarılır. Bu çalışmada dilimleme programı olarak katmanlı üretimde sıkça kullanılan Ultimaker CURA programı kullanılmıştır. Ultimaker CURA programı, modelin 3B yazıcıda yazdırılabilmesi için gerekli olan G-CODE dosyasını, belirlenen yazdırma parametrelerine göre oluşturmaya sağlar. G-CODE, yazıcının X,Y,Z hareketlerini, ekstruder hareketini, yazdırma hızlarını ve sıcaklıklarını içeren komutlardır.

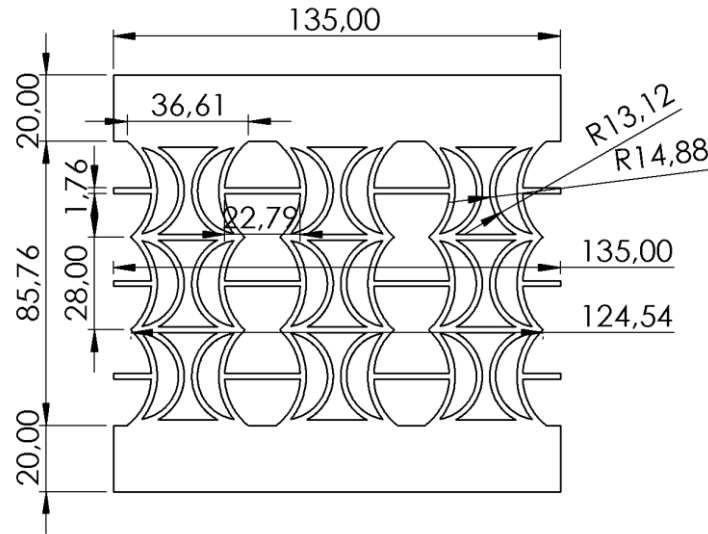
Ultimaker CURA programında, katman kalınlığı, duvar kalınlığı, yazdırma hızı, malzeme türü, yazdırma sıcaklığı gibi çeşitli yazdırma parametreleri ihtiyaca göre ayarlanabilmektedir. Bu parametreler, üretilen parçanın mekanik ve görsel özelliklerini doğrudan etkiler. Ayrıca, dikiş noktalarının yerleşimi, doluluk oranı ve destek yapılarının konumlandırılması gibi detaylar da bu aşamada belirlenir.

G-CODE oluşturulmasından sonra, ilgili dosya 3B yazıcıya aktarılır ve yazıcı, bu talimatlara bağlı olarak parçayı katman katman üretir. G-CODE oluşturulurken Z-Dikiş yerleri, yazdırılan parçanın dayanıklılığını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle, dilimleme yazılımlarında, yazdırılacak parçanın geometrisine bağlı olarak dikiş yerlerinin optimize edilmesi, mekanik dayanım açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, “doğru” dikiş yeri ifadesi, yükleme yönünde kritik gerilim hattına denk gelmeyecek şekilde konumlandırılmış ve mekanik performansı asgari düzeyde etkileyen dikiş bölgelerini tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. Buna karşılık “yanlış” dikiş yeri ise, yükleme eksenini boyunca numunenin zayıf kesitlerine rastlayan ve bu nedenle yapısal zayıflığa yol açan konumları ifade etmektedir. Örneğin, bir çekme numunesinde Z-Dikiş yerleri, Şekil 2’de gösterildiği gibi numunenin orta bölgesine yerleştirilirse, bu bölgelerde kopmalar meydana gelebilir ve test sonuçları, numunenin gerçek mekanik dayanımını yansıtmaktan uzaklaşabilir. Bu nedenle, dikiş başlangıç noktalarının gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerden uzaklaştırılması ve inceleme yapılan alanı etkilemeyecek şekilde optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.



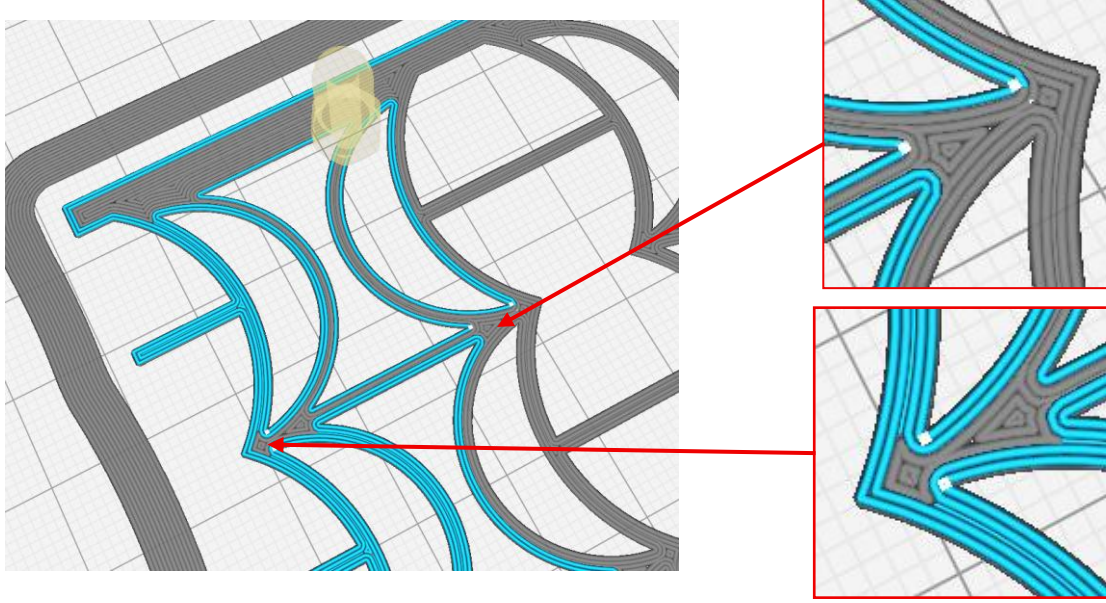
Şekil 2. Z-Dikiş başlangıç yeri görünümü: (a) Numune genel görünümü (b) Yükleme eksenine paralel zayıf bölgede konumlandırılmış ‘yanlış’ dikiş (c) Kritik gerilim hattından uzak ‘doğru’ dikiş yerleşimi

3B yazdırılacak parçalarda yazdırılacak her bir katmanda, yazdırma başlığı, parçanın geometrisine bağlı olarak, dilimleme programının belirlediği konumlardan yazdırmaya başlamaktadır. Çalışmada kullanılan test numunesi, Şekil 3’ te verilen ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Parçanın geometrik yapısı, Z-Dikiş yerleşimlerinin etkisini daha belirgin biçimde incelemek amacıyla kavisli ve çok yüzeyli olarak seçilmiştir. Bu geometri, literatürde önerilen bir Re-Entrant hücre tasarımından uyarlanmıştır [17].



Şekil 3. Deneysel çalışmada kullanılan numunenin teknik çizimi ve boyutsal görünümleri

Şekil 4'te Ultimaker CURA programı ile oluşturulan G-CODE görünümü verilmiştir. Yazdırılan yollar mavi, henüz yazdırılmamış hatlar ise gri renkle gösterilmiştir. Beyaz noktalar, her katmanda yazdırmanın başladığı Z-Dikiş konumlarını temsil etmektedir. Yazdırma işlemi sırasında bu noktalarda ekstrüderin hareketiyle birlikte filament sızıntısı veya eksik doldurma oluşabileceğinden, bu bölgeler mekanik zayıflık yaratma potansiyeline sahiptir.



Şekil 4. 3B yazdırma sürecinde baskı yolları ve dikiş başlangıç noktaları

Bu çalışmada, %100 saf PLA (Polilaktik Asit) esaslı filament tercih edilmiştir [18]. PLA, biyolojik olarak çözünür yapısı ve çevresel sürdürülebilirliği nedeniyle yaygın şekilde kullanılan bir termoplastiktir. 3B yazıcılarda kolay işlenebilmesi, düşük termal büzülme eğilimi ve yüksek boyutsal kararlılığı sayesinde, özellikle karmaşık geometriye sahip modellerin hassas üretiminde avantaj sağlamaktadır. Kullanılan filamentin çapı 1,75 mm $\pm$ 0,05 mm olup, yoğunluğu 1,252 g/cm³ tür. Üretici tarafından önerilen ideal baskı sıcaklığı 190–230 °C aralığındadır.

Yazdırma işlemine ait temel parametreler Tablo 1’de sunulmuştur. Numunenin kavisli ve karmaşık bir geometriye sahip olması nedeniyle, iç yapıda dolgu oluşumunu engellemek ve maksimum mekanik dayanımı sağlamak amacıyla duvar sayısı yüksek tutulmuştur. Böylece, dilimleme yazılımı tarafından iç dolgu uygulanmamış ve numune tamamen dış duvar katmanlarından oluşacak şekilde yazdırılmıştır.

Tablo 1. Yazdırma Parametreleri

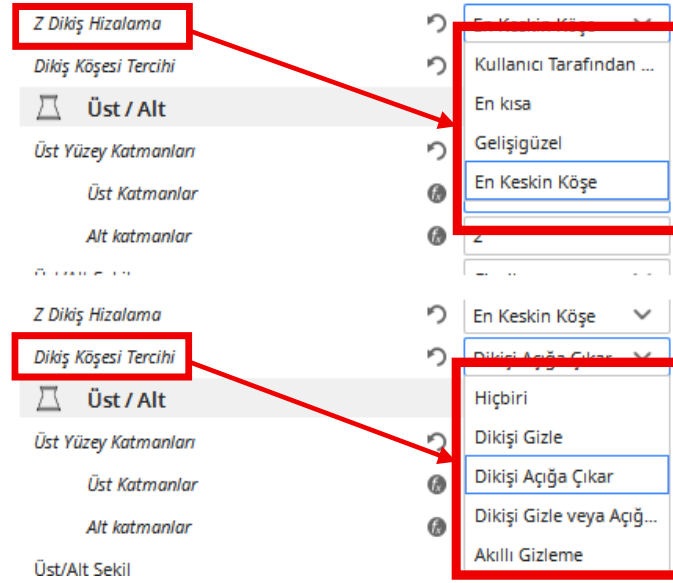
Katman Kalınlığı	0,2 mm	Yazdırma hızı	30 mm/sn
Hat kalınlığı	0,4 mm	Yazdırma sıcaklığı	200 °C
Duvar kalınlığı	∞	Tabla Sıcaklığı	50 °C

Numunelerin yazdırma işlemi, yüksek hassasiyete sahip bir Sapphire Plus 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yazıcı, 300 mm $\times$ 300 mm ölçülerinde ısıtmalı bir baskı tablasına sahip olup, X, Y ve Z eksenlerinde lineer raylı yataklama sistemine ve bilyeli arabalarla donatılmış hareket mekanizmasına sahiptir. Yazıcının katman hassasiyeti 0,01 mm düzeyindedir.

Tablo 2. Z-Dikiş ile ilgili ayar parametreleri

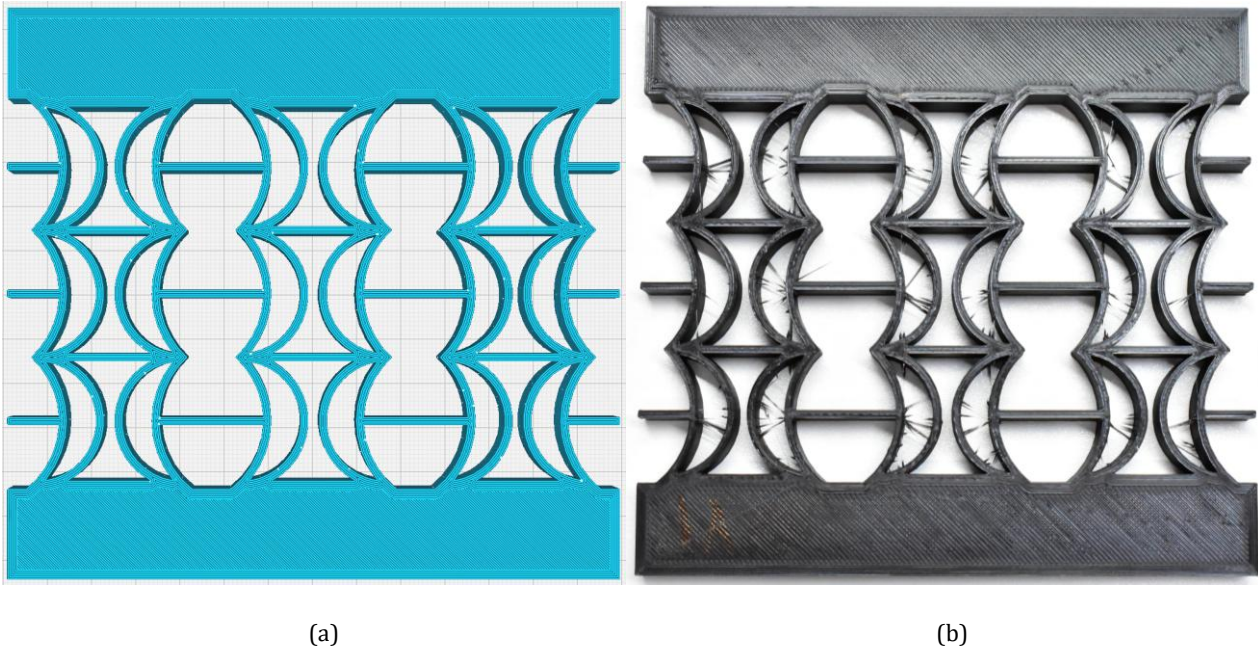
Z-Dikiş Hizalama	-En Kısa -Gelişigüzel -En Keskin Köşe
Dikiş Köşesi Tercihi	-Dikişi Gizle -Dikişi Açığa Çıkar

Dilimleme yazılımında, Z-Dikiş konumlandırmasına ilişkin ayarlar Şekil 5’de görüldüğü üzere; “Z-Dikiş Hizalama” ve buna bağlı “Dikiş Köşesi Tercihi” başlıkları altında yapılandırılabilir. Bu ayarlar sayesinde yazdırma işlemi sırasında her katmanın başlangıç noktasının konumu kontrol edilerek, dikişlerin geometrik yerleşimi üzerinde etkili olunabilir. Tablo 2’ de Cura yazılımında Z-Dikiş yerleşiminin kontrolüne yönelik kullanılan parametre başlıkları ve sunulan seçenekler verilmiştir.



Şekil 5. Ultimaker CURA yazdırma Z-Dikiş ayar parametreleri görünümü

G-CODE oluşturma sürecinde kullanılan dikiş parametreleri, her katmanda filamentin başlama konumunu belirlemektedir. Rastgele Z-dikiş stratejisinde bu noktalar tüm katmanlar boyunca düzensiz olarak dağıtılır. Bu duruma örnek olarak, ilgili yazdırma yolları ve elde edilen numune görünümü Şekil 6’ da gösterilmiştir. Özellikle son katmanda bu rastgelelik daha görünür hale gelmektedir.



Şekil 6. (a) Rastgele Z-dikiş parametresine ait dilimleme yazılımı (G-CODE) görünümü, (b) aynı parametreye üretilen test numunesinin fiziksel görünümü.

Bu çalışmada, yaygın kullanılan beş farklı Z-Dikiş parametresi değerlendirilmiştir. Bu parametreler; gelişigüzel, en keskin köşeye hizalı (dikişi açık veya gizli) ve en kısa yola hizalı (dikişi açık veya gizli) seçeneklerini içermektedir. Şekil 7’ de bu parametrelere ait dilimleme görünümleri sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 7. Çalışmada kullanılan beş farklı Z-Dikiş stratejisine göre dilimlenmiş numune görünümleri: (a) Gelişigüzel, (b) En keskin köşe – Dikişi açığa çıkar, (c) En keskin köşe – Dikişi gizle, (d) En kısa – Dikişi açığa çıkar, (e) En kısa – Dikişi gizle

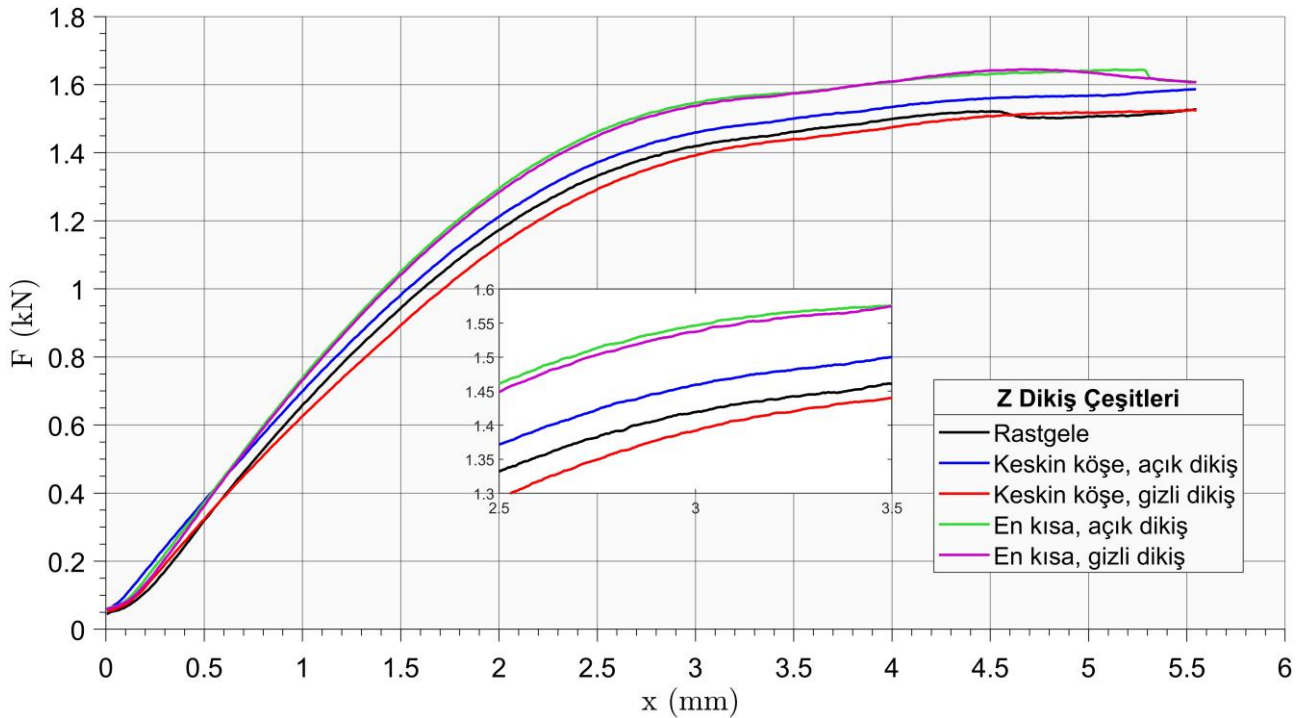
3. DeneySEL Sistem ve Bulgular

Çalışma kapsamında farklı Z-Dikiş parametreleriyle üretilen PLA numunelerin mekanik dayanımları, tek eksenli statik basma testiyle incelenmiştir. Testler 100 kN kapasiteli MTS marka evrensel test cihazında gerçekleştirilmiş [19] ve yükleme hızı 1 mm/dk olarak belirlenmiştir (Şekil 8). Numuneler, yükün düzgün dağılması amacıyla üst ve alt yüzeylerinden 20 mm yüksekliğinde dolu (solid) baskı yapılarak desteklenmiştir. Her bir dikiş parametresi için üç adet numune hazırlanmış ve tüm testler oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 8. Tek eksenli basma testi deney düzeneğinin ve numune yerleşiminin genel görünümü.

Test süresince kuvvet ve yer değiştirme verileri eş zamanlı olarak kaydedilmiş, bu sayede Z-Dikiş konumlandırmalarının mekanik performans üzerindeki etkisi kuvvet-yer değiştirme grafikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Yükleme sırasında herhangi bir eksenel sapma veya burkulmanın oluşmaması için deney süreci dikkatle takip edilmiştir.



Şekil 9. Farklı Z-Dikiş parametreleri ile üretilen numunelere ait kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 9’ da farklı Z-Dikiş parametresiyle üretilen PLA numunelere ait basma testi kuvvet-yer değiştirme (F-x) eğrileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, Z-Dikiş konumlandırmasının mekanik dayanım üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Tüm numunelerin deney sonuçlarına bakıldığında, plastik deformasyon bölgesine kadar benzer bir trend göstermekle birlikte, maksimum taşıma kapasiteleri ve akma davranışlarına Z-Dikiş konumunun etkisi görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, “en kısa, açık dikiş” ve “en kısa, gizli dikiş” parametreleri en yüksek taşıma kapasitesine sahip parametreler olarak öne çıkmaktadır. Her iki durumda da maksimum kuvvet yaklaşık 1,65 kN seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, yazdırma sırasında dikiş başlangıcının minimum yol ilkesine göre konumlandırılmasının, yapının genel dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. En kısa dikiş parametresinde, dikişin açık veya gizli olmasının dayanım üzerinde anlamlı bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, dilimleme yazılımı tarafından üretilen G-CODE yollarında da açıkça görülmekte olup, dikiş başlangıç konumlarının açık veya gizli seçeneklerinden bağımsız olarak benzer noktalara yerleştiği tespit edilmiştir (Şekil 7).

Buna karşın, “keskin köşe, açık dikiş” parametresi orta seviyede bir performans sergilemiştir. Özellikle, açık dikiş bölgelerinde oluşan ekstrüzyon izlerinin yapısal sürekliliği kısmen bozduğu ve bu nedenle kuvvet taşıma kapasitesinin sınırlı kaldığı değerlendirilmektedir. “Rastgele dikiş” seçeneği ise, dikişlerin kontrolsüz noktalarda oluşması sebebiyle genel olarak daha düşük dayanım göstermiştir.

En düşük maksimum kuvvet değeri ise “keskin köşe, gizli dikiş” parametresine ait olup, bu durumda dikiş başlangıçlarının belirgin geometrik köşelere denk gelmesiyle birlikte, gizli konumda biriken fazla malzemenin lokal gerilim birikimlerine yol açtığı düşünülmektedir. Bu da yapı bütünlüğünü zayıflatarak taşıma kapasitesini düşürmüştür.

Genel olarak değerlendirildiğinde, dikiş başlangıç yerinin geometriye göre optimize edilmesi (özellikle minimum yol ilkesiyle), numunenin mekanik dayanımını artırmakta, ancak bu optimizasyon dikişin açık ya da gizli olmasına göre farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu bulgular, Z-Dikiş parametrelerinin mekanik performans açısından dikkate alınması gereken önemli bir üretim girdisi olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, Z-Dikiş başlangıç noktalarının 3B yazdırılan parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini deneyel olarak ortaya koymuştur. Çalışmada incelenen özel geometri dikkate alındığında, “en kısa yol” parametresine dayalı konumlandırmaların, parça dayanımını artırdığı; buna karşın, “keskin köşe – gizli dikiş” gibi parametrelerin lokal gerilim birikimlerine yol açarak mekanik performansı olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre; dikiş konfigürasyon değişiminin basma dayanımını yaklaşık %10 değiştirdiği gösterilmiş ve dikişin 3B yazıcılar ile üretimde önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışma, Z-Dikiş konumlandırmasının yapısal bütünlük açısından kritik bir üretim parametresi olduğunu göstermektedir. Çünkü, Z-Dikiş noktaları, her katmanda ekstrüderin başlama ve bitiş yaptığı bölgeler olduğundan, bu alanlarda meydana gelen filament artıkları, boşluklar ve zayıf bağlanma gibi üretim kusurları, yapının yük taşıma kapasitesini doğrudan etkileyebilmektedir.

Bu nedenle, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde, baskı öncesinde Z-Dikiş parametrelerine yönelik ön deneylerin yapılmasının hem deneyel doğruluğun artırılması hem de üretimden kaynaklı mekanik performansta meydana gelebilecek sapmaların minimize edilmesine önemli katkı sağlayacağı açıktır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip baskılarda, üretimden önce dikiş yerleşimi ön izleme analizlerinin yapılması ve mümkünse deney numuneleri üzerinde küçük çaplı ön testler gerçekleştirilmesi hem test sonuçlarının güvenilirliği hem de üretim kalitesinin artırılması açısından önerilmektedir.

Kaynakça

1. Shunmugam, M.S., Kanthababu, M. (2020). Advances in Additive Manufacturing and Joining: Proceedings of AIMTDR 2018. Springer.
2. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
3. Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>
4. 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>
5. Rybachuk, M., Mauger, C.A., Fiedler, T., Öchsner, A. (2017). Anisotropic mechanical properties of fused deposition modeled parts fabricated by using acrylonitrile butadiene styrene polymer. *Journal of Polymer Engineering*, 37(7), 699–706. <http://doi.org/10.1515/polyeng-2016-0263>
6. Tymrak, B.M., Kreiger, M., Pearce, J.M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
7. Xu, Q., Shang, Y., Jiang, Z., Wang, Z., Zhou, C., Liu, X., Zhang, H. (2021). Effect of molecular weight on mechanical properties and microstructure of 3D printed poly(ether ether ketone). *Polymer International*, 70(8), 1065–1072. <https://doi.org/10.1002/pi.6166>
8. Nagaraj, C., Mishra, D., Tirupati, T. (2019). Optimization of the FDM process parameters to attain the desired strength of ABS specimens. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(4), 1589–1593. <https://doi.org/10.35940/ijrte.c3854.118419>
9. Tanveer, M.Q., Mishra, G., Mishra, S., et al. (2022). Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed parts – A current review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310>
10. Agrawal, A.P., Kumar, V., Kumar, J., et al. (2023). An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication. *Heliyon*, 9, e16531. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16531>
11. Solouki, A., Aliha, M.R.M., & Makui, A. (2024). A methodology for optimizing impact strength, dimensional accuracy and costs of manufacturing with three-dimensional printing of polylactic acid. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 7545–7569. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08422-3>
12. Rath, U., & Pandey, P.M. (2022). Experimental investigations into extrusion-based 3D printing of PCL/CIP composites for microwave shielding applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35, 998–1021. <https://doi.org/10.1177/0892705720925131>
13. Chafik, R.S., Ebeid, S.J., Sayed, M.M. (2024). Printing parameters and material characteristics affecting mechanical properties of FDM printed parts. *Engineering Research Journal (Shoubra)*, 53(2), 220–225. <https://doi.org/10.21608/erjsh.2023.251818.1252>
14. Demir, S. (2024). Investigation of mechanical properties in FFF-produced PLA samples using the Erichsen test: Application of definitive screening and RSM. *Rapid Prototyping Journal*. (Erken çevrimiçi baskı). <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2024-0342>
15. Demir, S., Yüksel, C. (2022). Evaluation of effect and optimizing of process parameters for fused deposition modeling parts on tensile properties via Taguchi method. *Rapid Prototyping Journal*, 29(4), 720–730.

<https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2022-0201>

16. Foppiano, B., Saluja, R., & Fayazbakhsh, K. (2021). The effect of variable nozzle temperature and cross-sectional pattern on interlayer tensile strength of 3D printed ABS specimens. *Experimental Mechanics*, 61, 1305–1322. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00757-y>
17. Demirbas, M. D., Ekrikaya, S., Caliskan, U., Sevim, C., & Apalak, M. K. (2025). Functionally Graded and Geometrically Modified Auxetic Re-Entrant Honeycombs: Experimental and Numerical Analysis. *Polymers*, 17(11), 1547. <https://doi.org/10.3390/polym17111547>
18. Riiz Machinery Ltd. Co. (2023). FILAMEON. <https://www.filameon.com> (Erişim Tarihi: 20.04.2025)
19. MTS Test ve Simülasyon Sistemleri. (2023). <https://www.mts.com> (Erişim Tarihi: 20.04.2025)