



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

FDM Yöntemiyle Üretilen Hyper-PLA Numunelerde Dolgu Deseni ve Doluluk Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi ve Optimizasyonu

Muhammet DAĞLI^{*1} **Elif GÜDEN**² **Ahmet DEMİRER**²

^{*1}Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 54000, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54000, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54000, Sakarya, Türkiye

*Sorumlu yazar e-posta: m.dagli1991@gmail.com

Öz: Bu çalışma, Ergiterek Yığma Modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak üretilen Hyper-PLA (Yüksek, Geliştirilmiş, İleri Polilaktik Asit) malzemenin mekanik özellikleri üzerinde dolgu deseni, doluluk oranı ve dolgu açısı gibi üretim parametrelerinin etkilerini deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi amaçlamıştır. Bu kapsamda, beş farklı dolgu deseni (45° Grid, 90° Grid, 45° Line, 45° Rectilinear, Gyroid ve Concentric) ve üç farklı doluluk oranı (%60, %80 ve %100) kullanılarak üretilen numunelerin çekme (ISO 527-2) ve Charpy darbe (ISO 180) dayanımları test edilmiştir. Elde edilen veriler, Yüzey Cevap Metodolojisi (RSM) ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak Design Expert 12® yazılımı ile analiz edilmiş ve parametrelerin mekanik performans üzerindeki etkileri modellenmiştir. Bu çalışmada, incelenen tüm mekanik özellikler üzerinde etkili ve istatistiksel olarak en anlamlı parametrenin doluluk oranı olduğu tespit edilmiştir. Dolgu açısının etkisi ise ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Dolgu desenleri arasında performans açısından belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. En düşük %60 doluluk oranı baz alındığında en yüksek çekme dayanımı 31.60 MPa ve en yüksek darbe enerjisi sönümlleme kapasitesi de 9.62 kJ/m² ile Concentric dolgu desenine sahip olmuştur. Sonuç olarak, 3D yazıcı teknolojisiyle amaca yönelik, hafif, düşük maliyetli ve fonksiyonel parçaların mekanik performansını en üst düzeye çıkarmak için malzeme, dolgu deseni ve doluluk oranı arasında dikkatli seçim yapılması kritik önem taşımaktadır. Bu sonuçlar, FDM sürecinin optimizasyonu açısından anlamlı bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ergiterek yığma modelleme (FDM), Hyper-PLA, Dolgu parametresi, Mekanik özellikler, Yüzey cevap metodolojisi (RSM)

Effect and Optimization of Pattern and Filling Ratio on Mechanical Properties in Hyper-PLA Samples Produced with the FDM Method

Abstract: This study aims to experimentally and statistically investigate the effects of manufacturing parameters such as infill pattern, infill density, and infill angle on the mechanical properties of Hyper-PLA (High-Performance, Enhanced, Advanced Polylactic Acid) material produced using Fused Deposition Modeling (FDM) technology. In this context, specimens were produced with five different infill patterns (45° Grid, 90° Grid, 45° Line, 45° Rectilinear, Gyroid, and Concentric) and three different infill densities (60%, 80%, and 100%). Tensile tests (ISO 527-2) and Charpy impact tests (ISO 180) were performed on the specimens. The obtained data were analyzed using Response Surface Methodology (RSM) and Analysis of Variance (ANOVA) through the Design Expert 12® software to model the influence of the parameters on mechanical performance. Among all the investigated mechanical properties, infill density was identified as the

Gönderilme Tarihi: 23.07.2025

Kabul Tarihi: 03.11.2025

Nasıl atıf yapılır: Dağlı, M., Güden, E., & Demire, A. (2025). FDM yöntemiyle üretilen Hyper-PLA numunelerde dolgu deseni ve doluluk oranının mekanik özelliklere etkisi ve optimizasyonu. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(3), 1065-1081. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1748993>

most effective and statistically significant parameter. The effect of infill angle was found to be negligible. Noticeable performance differences were observed among the infill patterns. At the lowest infill density of 60%, the highest tensile strength (31.60 MPa) and the highest impact energy absorption capacity (9.62 kJ/m²) were achieved with the Concentric infill pattern. As a result, for maximizing the mechanical performance of lightweight, cost-effective, and functional parts produced by 3D printing technology, a careful selection of material, infill pattern, and infill density is of critical importance. These results were found to be significant in terms of optimization of the FDM process.

Keywords: Fused deposition modeling (FDM), Hyper-PLA, Infill parameter, Mechanical properties, Response surface methodology (RSM)

1. Giriş

Son yıllarda üç boyutlu (3D) baskı teknolojileri, üretim yöntemleri arasında hızla popülerleşmekte ve özellikle Ergiterek Yığma ile Modelleme (Fused Deposition Modeling - FDM) yöntemi öne çıkmaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla sunduğu üretim esnekliği, düşük maliyet avantajı ve karmaşık geometrili ürünleri hızlı ve hassas şekilde üretme yeteneği nedeniyle FDM yöntemi birçok sektörde yoğun ilgi görmektedir (Özmen ve ark., 2023; Günay ve ark., 2020). Bu üretim yönteminde kullanılan Polilaktik Asit (PLA) malzemenin mekanik performansı, baskı parametreleri olan dolgu tipi, doluluk oranı, baskı hızı ve desen yönü gibi değişkenlere doğrudan bağlıdır ve bu parametrelerin optimize edilmesiyle çekme, basma ve eğilme gibi kritik mekanik özelliklerde önemli iyileştirmeler sağlanabilmektedir (Boğa ve ark., 2021; Adanur ve ark., 2024; Tatlı & Güler Özgül, 2020).

Çeşitli araştırmalar, dolgu desenlerinin ve doluluk oranlarının PLA malzeme üzerinde büyük etkisi olduğunu ve doğru parametrelerin seçimi ile hem üretim maliyetlerinin azaltılabileceğini hem de ürün kalitesinin yükseltilebileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmalarda %25, %50, %75 ve %100 doluluk oranlarında üçgen ve altıgen desenlerle üretilen PLA numunelerde, doluluk oranı arttıkça tüm test türlerinde mekanik özelliklerin yükseldiği; %25 doluluk oranına sahip üçgen desenli numunelerin ise en yüksek özgül çekme dayanımına ulaştığı raporlanmıştır (Kaya ve ark., 2024). Farklı bir araştırmada, %20–100 doluluk oranlarında üretilen PLA numunelerde doluluk oranının artışıyla çekme mukavemetinin 18 MPa'dan 35 MPa'a yükseldiği, dolgu deseninin ise çekme dayanımı üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığı belirtilmiştir (Karabıyık & Apak, 2021). Diğer bir çalışmada zig-zag desenli PLA numunelerde 23.4 MPa, grid desenli cPLA numunelerde ise 30.6 MPa çekme dayanımı elde edildiği ve desenin malzeme türüne göre farklı etki gösterdiği bildirilmiştir (Yeoh ve ark., 2020). Ayrıca concentric dolgu deseninin 48 MPa ile diğer desenlere kıyasla en yüksek çekme mukavemeti sağladığı ifade edilmiştir (Kamer ve ark., 2021). Dolgu tipi, katman kalınlığı ve doluluk oranı gibi FDM parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olduğu, optimum parametre kombinasyonunun çekme dayanımını %25'e kadar artırabildiği vurgulanmıştır (Medibew, 2022). Yapılan başka bir çalışmada ise dolgu açısının $\pm 45^\circ$ yönlendirmede kopma uzamasını %14.8'e kadar artırdığı, $0^\circ/90^\circ$ yönelimli numunelerde bu değer yalnızca %6.2 olduğu belirtilmiştir (Borah & Chandrasekaran, 2022; Hasçelik ve ark., 2021). Literatürde de benzer bulgular raporlanmıştır. Örneğin, %60 dolulukta honeycomb deseni 53.4 MPa ile en yüksek çekme dayanımını, %15 dolulukta lattice deseni ise 43.4 MPa ile en düşük değeri vermiştir. Bu sonuçlar, dolgu oranı ve desen seçiminin mekanik dayanım üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir (Saylık ve ark., 2025).

Endüstride ve akademik çalışmalarda FDM yöntemiyle çok farklı desenlerde ve açılarda ürünler elde edilmektedir. Bu desenlerin ürünü oluşturmada hemen hemen hepsi başarılı sonuçlar göstermektedir. Günümüzde bu ürünler artık model ya da prototip olarak üretilip görsel fikir oluşturması dışında yerinde işlevselliğinin de sağlanması beklentileri hayli artış göstermiştir (Demirer, 2024). Bu çalışmanın amacı, sık kullanılan ve son geliştirilen dolgu desenleri ve açılarını kullanarak, en düşük doluluk oranında (%60) mekanik olarak en yüksek performansı sağlayan dolgu deseninin optimum belirlenmesidir.

Çalışma kapsamında, beş farklı dolgu desenleri ve üç farklı doluluk oranlarına sahip Hyper-PLA (İleri Polilaktik Asit) numunelerinin çekme, darbe testleri ve kütle ölçümleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler Design Expert 12® yazılım programına aktararak varyans analizi (ANOVA) ile

analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları değerlendirilerek yüksek mekanik performansa sahip dolgu deseni ve doluluk oranları istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, dolgu desenleri ve doluluk oranlarının mekanik dayanıma etkisi incelenerek özgül dayanımı yüksek daha düşük kütle ve daha yüksek dayanımlı ürünler elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan filament, Hyper-PLA yani “Yüksek, Geliştirilmiş, İleri Polilaktik Asit” filamenti Creality firmasından tedarik edilmiştir. Çalışmada standart PLA yerine Hyper-PLA kullanılmasının nedeni ısı ve darbe dayanımının PLA’ya nazaran daha yüksek olmasıdır. İçeriğinde darbe dayanım artırıcı (impact modifier), elastomer ve zincir uzatma (chain extender) katkıları bulunmaktadır. Tokluk ve ısı dayanımları daha yüksek malzemelerdir. Filamente ait mekanik özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Hyper-PLA filamenti teknik özellikleri

Unsur	Birim	Değerler
Filament çapı	mm	1.75± 0.01
Yoğunluk	(g/cm ³ , 21.5°C)	1.24 ±0.1
Camsı Geçiş Sıcaklığı	°C	62
Yumuşama Sıcaklığı	°C	62.3 ±0.5
Erime İndeksi	g/10 min	3-5
Çekme Dayanımı (X-Y)	MPa	52.99
Çekme Modülü (X-Y)	MPa	1146.06
Kopma Uzaması (X-Y)	%	6.3
Eğilme Dayanımı (X-Y)	MPa	92.38
Eğilme Modülü (X-Y)	MPa	2490.17
Darbe Dayanımı (Z)	kJ/m ²	8.83

2.2. Yöntem

Numunelerin üretiminde, Creality K1 Max® 3D yazıcı tercih edilmiştir. Kullanılan yazıcıya ait teknik özellikler Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. 3D yazıcı teknik özellikleri (Creality K1 Max® / Çin)

Parametreler	Birim	Değerler
Baskı Alanı	mm	300x300x300
Nozul Çapı	mm	0.40
Max. Baskı Hızı	mm/s	600
Hızlanma	mm/s ²	20 000
Baskı Hassasiyeti	mm	100±0.1
Max. Nozul Sıcaklığı	°C	300
Max. Tabla Sıcaklığı	°C	100
Katman Yüksekliği	mm	0.1 – 0.35
Desteklenen Filamentler		PLA, PETG, PET, TPU, PA, ABS, ASA, PC, PLA-CF, PA-CF, PET-CF



Bu deneysel çalışma kapsamında, mekanik dayanımların testi için beş farklı dolgu deseni ve bu desenlere uygulanacak üç farklı doluluk oranı (%60-80-100) belirlenmiştir. Deneylere ait çalışma matrisi Çizelge 4’te verilmiştir.

Deneysel numunelerin 3D baskı cihazında numune üretimi esnasında kullanılan sabit baskı parametreleri Çizelge 3’te verilmiştir.

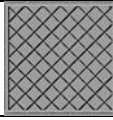
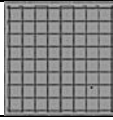
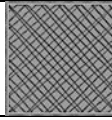
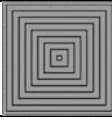
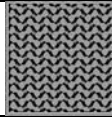
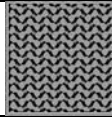
Çizelge 3. Baskı parametreleri

Parametre	Birim	Değer	Tolerans
Nozul Çapı	mm	0,40	±0.02
Filament Çapı	mm	1.75	±0.01
Filament Rengi		Naturel	-
Nozul Sıcaklığı	°C	220	±2
Tabla Sıcaklığı	°C	60	±2
Baskı Hızı	mm/s	300	±5
“	mm	0.40	±0.05

Çizelge 3. Baskı parametreleri (devam)

Katman Yüksekliği	mm	0.16	±0.02
Baskı Yönelimi		X-Y düzlemine paralel	±1°
Dolgu Oranları	%	60,80 ve 100	-
Tolerans	mm	-	±0.1

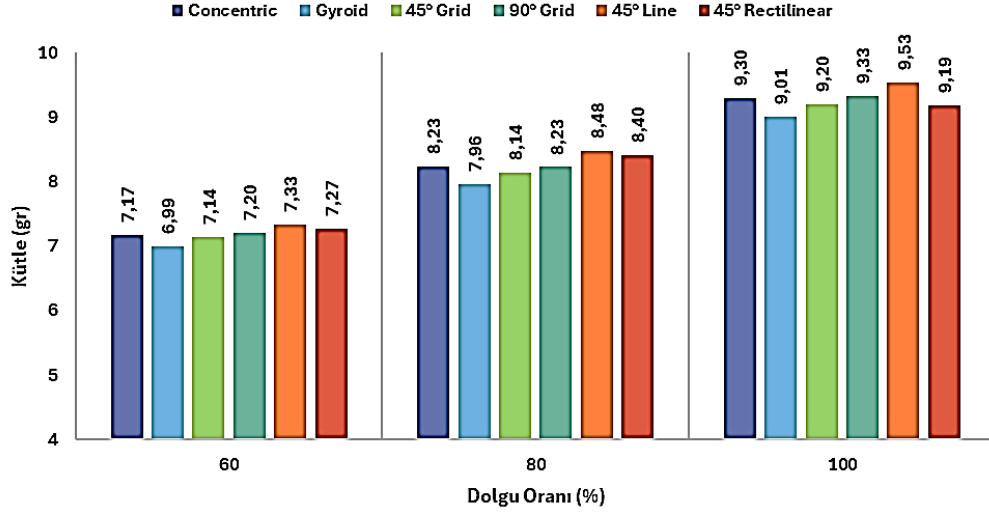
Çizelge 4. Seçilen dolgu desenleri, doluluk oranları, yapılan mekanik dayanım testleri ve numune adetleri

Dolgu Desen adı		Grid		Line	Rectilinear	Concentric	Gyroid
Dolgu Deseni							
Dolgu Açısı (°)		45	90	45	45	45 ve 90 aynı	45 ve 90 aynı
Doluluk Oranı (%)		60 - 80 - 100					
Mekanik Dayanım Testleri ve Numune Adetleri	Çekme Testi / Numune Adedi	6	6	6	6	6	6
	Darbe Testi / Numune Adedi	6	6	6	6	6	6

Deneyssel çalışmamızda kullanılan dolgu desenleri, dolgu açıları ve doluluk oranları; literatürde yaygın olarak kullanılan ve parça mekanik performansını doğrudan etkileyen parametreler arasından seçilmiştir. Parametrelerin seçimi, hem farklı iç yapıların mekanik davranış üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek hem de test sürecini optimize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; dolgu açısı olarak 45° ve 90°, doluluk oranı olarak ise %60, %80 ve %100 değerleri tercih edilmiştir.

Deneyssel tasarım ve veri analizi süreçlerinde Design Expert 12® istatistiksel analiz yazılımı kullanılmıştır.

Numunelerin çekme testi için Tinius Olsen® çekme test cihazı ve darbe testi için ise Tinius Olsen® darbe test cihazı kullanılarak mekanik dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen her bir numune test öncesinde, boyut ölçümleri 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpas ile, kütle ölçümleri ise 0.01 gram hassasiyetli DENSI TP-6B terazi ile yapılmıştır. Çekme testi numunelerinin ortalama kütle ölçümleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Dolgu deseni ve doluluk oranına göre çekme testi numunesi kütleleri.

2.2.1. İstatistiksel veri analizi

Yüzey Cevap Metodu (RSM), bir veya birden fazla bağımsız değişkenin (girdinin) bir cevaba (çıkıya) etkisini anlamak için kullanılan bir deney tasarım ve analiz yöntemidir. Deneysel verilerle genellikle ikinci dereceden polinom ile regresyon modeli oluşturur ve optimize eder (Nigiz, 2018).

Çalışmada RSM ile kurulan modele ANOVA analizi uygulanarak modelin anlamlılığı istatistiksel olarak test edilmiştir. ANOVA, modelin genel olarak anlamlı olup olmadığını, faktörlerin istatistiksel olarak etkili olup olmadığını ve hata varyansının yeterince küçük olup olmadığını kontrol eder.

Çalışmada sabit tutulan deney parametreleri Çizelge 5'te; maksimum çekme ve darbe dayanımına etki eden parametreler ise Çizelge 6'da verilmiştir. Değişkenlerin etkisi Çizelge 7'de verilen yanıtlar üzerinde incelenmiştir.

Çizelge 5. Sabit tutulan deney parametreleri

Sabit Parametreler
Grid
Line
Rectilinear
Concentric
Gyroid

Çizelge 6. Değişken deney parametreleri

Değişkenler	Değerler
Dolgu Desen Açısı (°)	45 - 90
Doluluk Oranı (%)	60, 80 ve 100

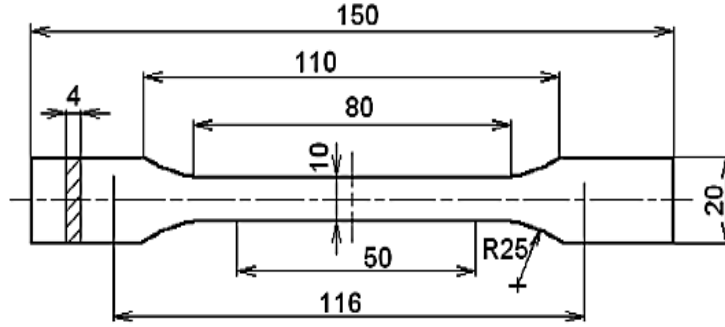
Çizelge 7. Yanıt (cevap) parametreleri

Yanıtlar	Birim
Çekme Dayanımı	MPa
Darbe Dayanımı	kJ/m ²

2.2.2. Çekme testi

Elde edilen deney numuneleri, ISO 527-2 Tip 1A standardına uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 2). Çekme testleri, 23 ± 2 °C sıcaklık ve 50 ± 5 bağıl nem koşullarında, Çizelge 8'de

gösterilen çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin karakterizasyonu için birçok özelliğini görebilmemiz sağlayan test metodudur.



Şekil 2. Çekme testi numunesi ISO 527-2/1A (International Organization for Standardization, 2012), birim (mm).

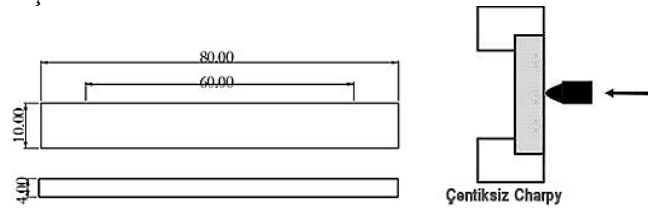
Çizelge 8. Çekme cihazı ve teknik özellikleri

Özellikler	Birim	Değer
Çekme Kapasitesi	kN	2000 (PLC Kontrollü)
Çekme Hızı	mm/s	5 ± 1
Marka/Model		TINIUS OLSEN H25KS (İNGİLTERE)



2.2.3. Darbe testi

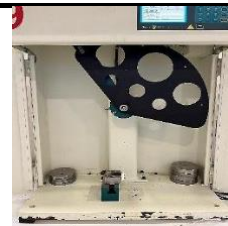
Hyper PLA malzemenin darbe dayanımı standart PLA'dan daha yüksektir. Darbeye maruz kalınan yerlerde kullanılması bakımından bu test önem arz etmektedir. Elde edilen deneysel numuneleri, ISO 180 standardına uygun olarak çentiksiz, $4 \times 10 \times 80$ mm boyutlarında hazırlanmıştır (Şekil 3). Charpy Darbe Test Cihazı (Çizelge 9) ile, 23 ± 2 °C sıcaklık ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Çentiksiz Charpy darbe testi numunesi (ISO 180), birim (mm).

Çizelge 9. Charpy darbe test cihazı ve teknik özellikleri

Özellikler	Birim	Değer
Düşme Yüksekliği	m	0.61
Darbe Hızı	m/s	3.46
Marka/Model		TINIUS OLSEN IMPACT 503 (İNGİLTERE)



3. Bulgular

3.1. İstatistiksel veri analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Çalışmada, deneysel tasarım sürecinde kullanılan beş farklı dolgu deseni her bir test tipi için ayrı ayrı modellenmiş ve bu desenlerin değişkenlerinin (dolgu açısı ve doluluk oranı) cevaplar (çekme dayanımına, darbe dayanımına) üzerindeki etkileri istatistiksel veri analizi ile incelenmiştir. Elde edilen test verileri programa girilmiş (Çizelge 10) ve veriler ANOVA yöntemi ile test edilmiştir.

Çizelge 10. RSM ile belirlenen değişkenler ve deney sonuçları

45° ve 90° GRID				
Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Cevap 1	Cevap 2
	Dolgu Açısı (°)	Doluluk Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
1	45	80	22.03	6.35
2	90	60	17.89	5.66
3	90	100	38.08	10.56
4	90	80	21.73	5.81
5	45	100	33.19	8.86
6	45	60	15.90	6.23
7	45	80	22.03	6.35
8	90	80	21.73	5.81
45° LINE				
Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Cevap 1	Cevap 2
	Dolgu Açısı (°)	Doluluk Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
1	45	80	26.72	7.54
2	45	60	22.53	6.89
3	45	100	36.58	9.26
4	45	80	26.73	7.54
45° RECTILINEAR				
Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Cevap 1	Cevap 2
	Dolgu Açısı (°)	Doluluk Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
1	45	60	19.33	5.74
2	45	100	34.17	8.56
3	45	80	25.94	7.73
4	45	80	25.94	7.74
CONCENTRIC				
Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Cevap 1	Cevap 2
	Dolgu Açısı (°)	Doluluk Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
1	45	100	41.60	11.69
2	45	80	36.55	10.60
3	45	80	37.00	10.65
4	45	60	31.60	9.62
GYROID				
Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Cevap 1	Cevap 2
	Dolgu Açısı (°)	Doluluk Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)
1	45	60	21.25	5.97
2	45	80	24.26	7.49
3	45	100	30.05	8.59
4	45	80	25.00	7.50

3.1.1 ANOVA (Varyans Analizi) sonuçlarının değerlendirilmesi

Çalışmada elde edilen deneysel veriler doğrultusunda oluşturulan lineer modelin geçerliliği ve modelde yer alan faktörlerin maksimum çekme ve darbe dayanımı üzerindeki etkisi, ANOVA ile değerlendirilmiştir. Çizelge 11'de sunulan her bir parametrenin modele katkısı “F-değeri” ve “Kareler Toplamı (Sum of Squares)” değerleri üzerinden incelenmiştir. Özellikle model kısmında yer alan, değişkenlerin faktörü F-değeri ile sistem yanıtı üzerinde en etkili parametre hangisi olduğu belirlenir. Genel olarak F-değerinin büyüklüğü, modelin açıklayıcılık düzeyini artırmakta olup; bu yüksek değer, modelin doğruluğunu ve öngörü gücünü desteklemektedir (Nigiz, 2018). P değerinin (hata değeri olasılığı) 0.05'ten küçük olması önemlidir. $p < 0.05$ ise, program tarafından önerilen deneylerin laboratuvar şartlarında elde edilen sonuçların %95'inin program tarafından elde edilen model ile açıklanabileceğini göstermektedir (Myers & Montgomery, 1995; Yılmaz & Ertürk, 2021).

Çizelge 11. Lineer model için ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestleşme Derecesi (df)	Kareler Ortalaması	F Değeri	p Değeri	
Model	356.12	2	178.06	18.72	0.0048	Anlamlı
A-Doluluk Oranı	351.19	1	351.19	36.93	0.0017	
B-Dolgu Açısı	4.93	1	4.93	0.5184	0.5038	
Artan	47.55	5	9.51			
Model Uygunsuzluğu	47.55	3	15.85			
Hata	0.0000	2	0.0000			
Toplam	403.67	7				

Çizelge 12. Regresyon değeri tablosu

Standart Sapma	3.08	R ²	0.8822
Ortalama	24.07	Ayarlanmış R ²	0.8351
Varyasyon katsayısı (%)	12.81	Tahmin Edilen R ²	0.6539
		Yeterli Hassasiyet	10.7545

Modelin genel geçerliliğini değerlendirmek amacıyla Regresyon Katsayısı (R²) da incelenmiştir. Çizelge 12’de sunulan regresyon değer tablosunda ise modeldeki deneysel verilerin uyumluluğu incelenmektedir. Yüksek regresyon katsayısı (R²)’nin 1’e yakın olması gerekir ve tahmin edilen regresyon değeri ve yüksek regresyon katsayısı değerleri birbirlerine yakın olması modelin yanıt değişkenini iyi açıkladığını göstermesi açısından önemlidir.

Çizelge 13. Dolgu desenleri çekme dayanımı lineer model için ANOVA tablosu

Dolgu Deseni	Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestleşme Derecesi (df)	Kareler Ortalaması	F Değeri	p Değeri	
45° ve 90° Grid	Model	356.12	2	178.06	18.72	0.0048	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	351.19	1	351.19	36.93	0.0017	
	B-Dolgu Açısı	4.93	1	4.93	0.5184	0.5038	
45° Line	Model	220.23	2	110.11	416.98	<0.0001	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	220.23	1	220.23	833.95	<0.0001	
	B-Dolgu Açısı	0.0001	1	0.0001	0.0004	0.9843	
45° Rectilinear	Model	220.23	2	110.11	416.98	<0.0001	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	220.23	1	220.23	833.95	<0.0001	
	B-Dolgu Açısı	0.0001	1	0.0001	0.0004	0.9843	
Concentric	Model	99.00	2	49.50	985.11	<0.0001	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	99.00	1	99.00	1970.20	<0.0001	
	B-Dolgu Açısı	0.0012	1	0.0012	0.0249	0.8808	
Gyroid	Model	77.44	2	38.72	73.66	0.0002	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	77.44	1	77.44	147.31	<0.0001	
	B-Dolgu Açısı	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	

Çizelge 14. Dolgu desenlerine ait çekme dayanımı regresyon değeri tablosu

Dolgu Deseni	R ²	Ayarlanmış R ²	Tahmin Edilen R ²	Yeterli Hassasiyet
45° ve 90° Grid	0.8822	0.8351	0.6539	10.7545
45° Line	0.9940	0.9917	0.9828	47.1818
45° Rectilinear	0.9940	0.9917	0.9828	47.1818
Concentric	0.9975	0.9965	0.9949	72.6657
Gyroid	0.9672	0.9540	0.9128	19.8201

ANOVA sonuçlarına ait modeller incelendiğinde, A–Doluluk Oranı faktörünün F-değeri ile sistem yanıtı üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Modelin genel geçerliliğini değerlendirmek amacıyla Regresyon Katsayısı (R²) da incelenmiş ve sonuçları Çizelge 14’te verilmiştir. Çizelge 14’te sunulan regresyon analizi sonuçlarına göre, modellerin deneysel verilerle yüksek oranda uyumlu olduğunu göstermektedir. Tahmin edilen regresyon değeri ile deneysel veriler arasındaki yakınlık uyumu doğrulamaktadır.

Aynı şekilde deneysel numunelerin maksimum darbe dayanım sonuçları ANOVA Çizelge 15’te verilmiştir.

Çizelge 15. Dolgu desenleri darbe dayanımı lineer model için ANOVA tablosu

Dolgu Deseni	Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestleşme Derecesi (df)	Kareler Ortalaması	F Değeri	p Değeri	
45° ve 90° Grid	Model	14.18	2	7.09	4.43	0.0783	Anlamlı Değil
	A-Doluluk Oranı	14.18	1	14.18	8.85	0.0310	
	B-Dolgu Açısı	0.0003	1	0.0003	0.0002	0.9894	
45° Line	Model	7.95	2	3.98	29.04	0.0018	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	7.95	1	7.95	58.08	0.0006	
	B-Dolgu Açısı	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
45° Rectilinear	Model	7.95	2	3.98	29.04	0.0018	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	7.95	1	7.95	58.08	0.0006	
	B-Dolgu Açısı	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
Concentric	Model	4.24	2	2.12	1768.25	<0.0001	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	4.24	1	4.24	3536.33	<0.0001	
	B-Dolgu Açısı	0.0002	1	0.0002	0.1637	0.7000	
Gyroid	Model	6.89	2	3.45	190.45	<0.0001	Anlamlı
	A-Doluluk Oranı	6.89	1	6.89	380.91	<0.0001	
	B-Dolgu Açısı	0.0000	1	0.0000	0.0007	0.9800	

Çizelge 16. Dolgu desenlerine ait darbe dayanımı regresyon değeri tablosu

Dolgu Deseni	R ²	Ayarlanmış R ²	Tahmin Edilen R ²	Yeterli Hassasiyet
45° ve 90° Grid	0.6391	0.4947	-0.1072	4.8748
45° Line	0.9207	0.8890	0.7710	12.4456
45° Rectilinear	0.9207	0.8890	0.7710	12.4456
Concentric	0.9986	0.9980	0.9965	97.5807
Gyroid	0.9870	0.9819	0.9626	31.9013

ANOVA sonuçlarına ait modeller incelendiğinde, A–Doluluk Oranı faktörünün F-değeri ile sistem yanıtı üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Modelin genel geçerliliğini değerlendirmek amacıyla Regresyon Katsayısı (R²) da incelenmiş ve sonuçları Çizelge 16’da verilmiştir. Çizelge 16’da sunulan regresyon analizi sonuçlarına göre, 45° ve 90° Grid dolgu deseninde elde edilen R² değeri modelin deneysel verilerle uyumsuzluk olduğunu, diğer dolgu desenlerinden elde edilen R² değeri modellerin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir.

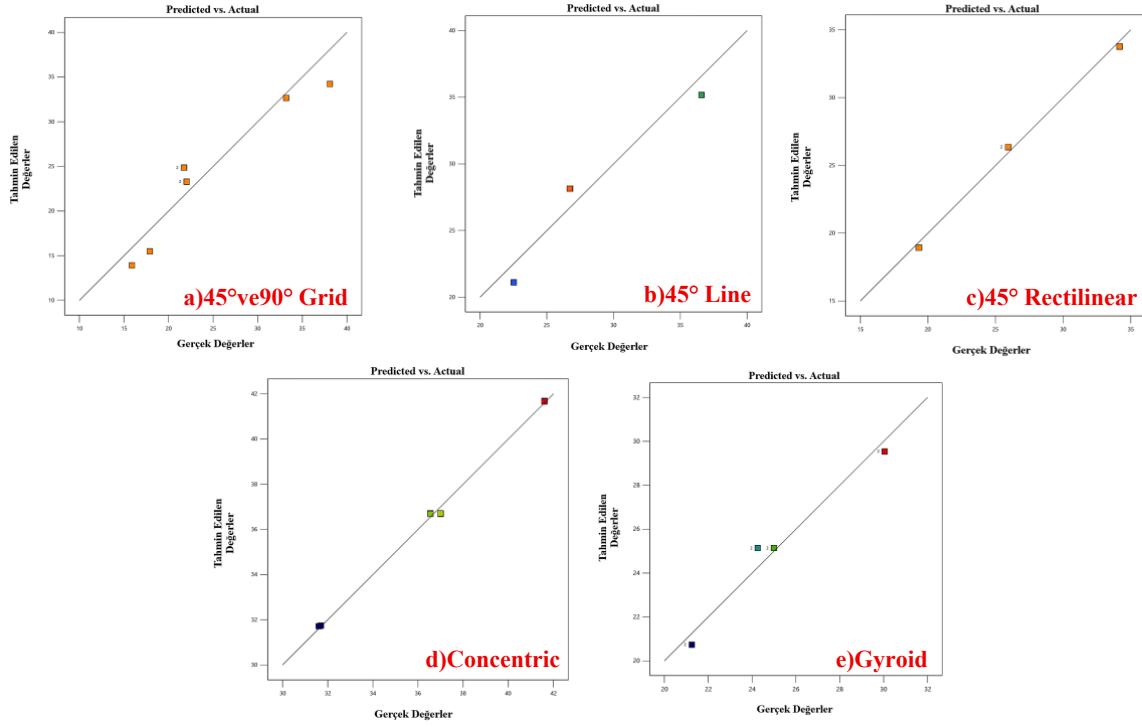
3.1.2. ANOVA sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu çalışmada 5 farklı dolgu deseninin ve 3 farklı doluluk orandan elde edilen verilerin maksimum çekme ve darbe dayanımları Şekil 4 ve 5’te incelenmiştir. Tahmin edilen değerlerin dağılımı, grafik üzerinde ideal doğrusal çizgiyle tam çakışma olup olmadığı incelenmiştir. Bu durum, özellikle bazı noktalarda normallik varsayımının tam olarak sağlanamadığını ve küçük sapmaların mevcut olduğunu göstermektedir (Yılmaz & Ertürk, 2021).

Şekil 4’te deneysel çalışmada kullanılan dolgu desenlerinin ve dolgu oranlarının maksimum çekme dayanımına ait tahmin edilen ve gerçek değerlere ait grafiği bulunmaktadır. Maksimum çekme dayanımına ait sapmaların sonuçları Çizelge 17’de verilmiştir.

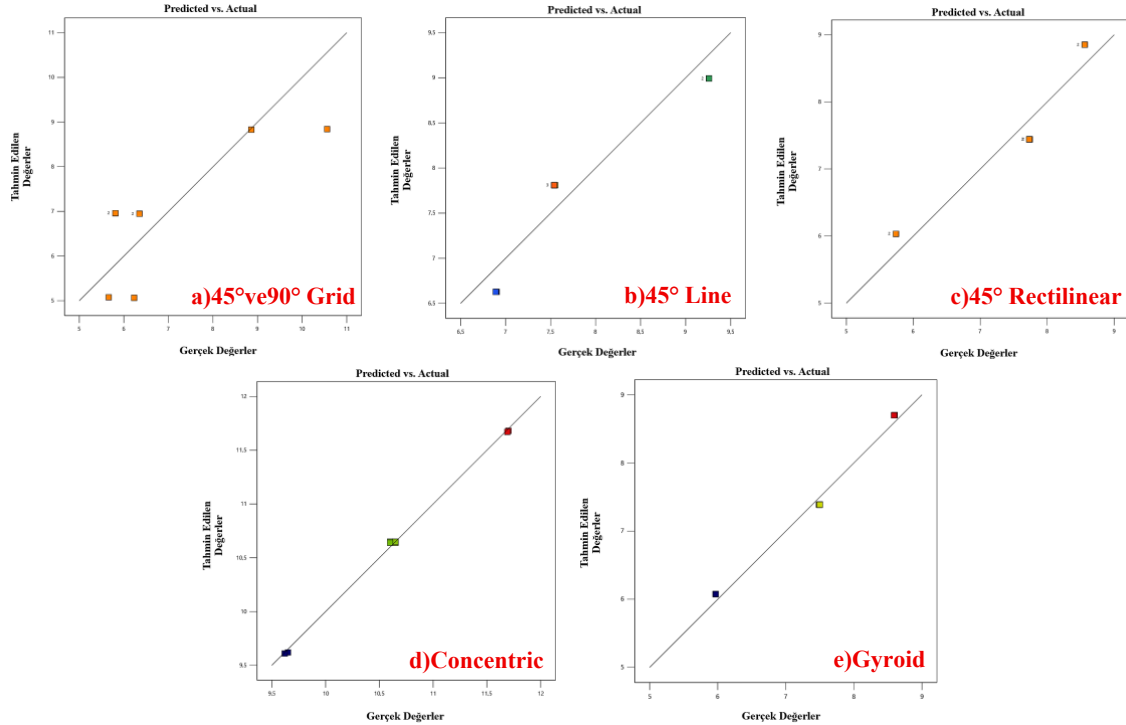
Çizelge 17. Deneysel ve RSM maksimum çekme dayanımı kıyaslaması grafiği sapma sonuçları

Dolgu Deseni	Sapma Miktarı	İdeal Doğru Çizgi Çakışıklık Durumu
a)45° ve 90° Grid	0.1178	Tam çakışma mevcut değil
b)45° Line	0.0006	Tam çakışma mevcut
c)45° Rectilinear	0.0006	Tam çakışma mevcut
d)Concentric	0.0025	Tam çakışma mevcut
e)Gyroid	0.0328	Yakın oranda çakışma mevcut



Şekil 4. Dolgu desenlerine ait deneysel ve RSM maksimum çekme dayanımı kıyaslama grafiği.

Şekil 5'te deneysel çalışmada kullanılan dolgu desenlerinin ve doluluk oranlarının maksimum darbe dayanımına ait tahmin edilen ve gerçek değerlere ait grafiği bulunmaktadır. Maksimum darbe dayanımına ait sapmaların sonuçları Çizelge 18'de verilmiştir.



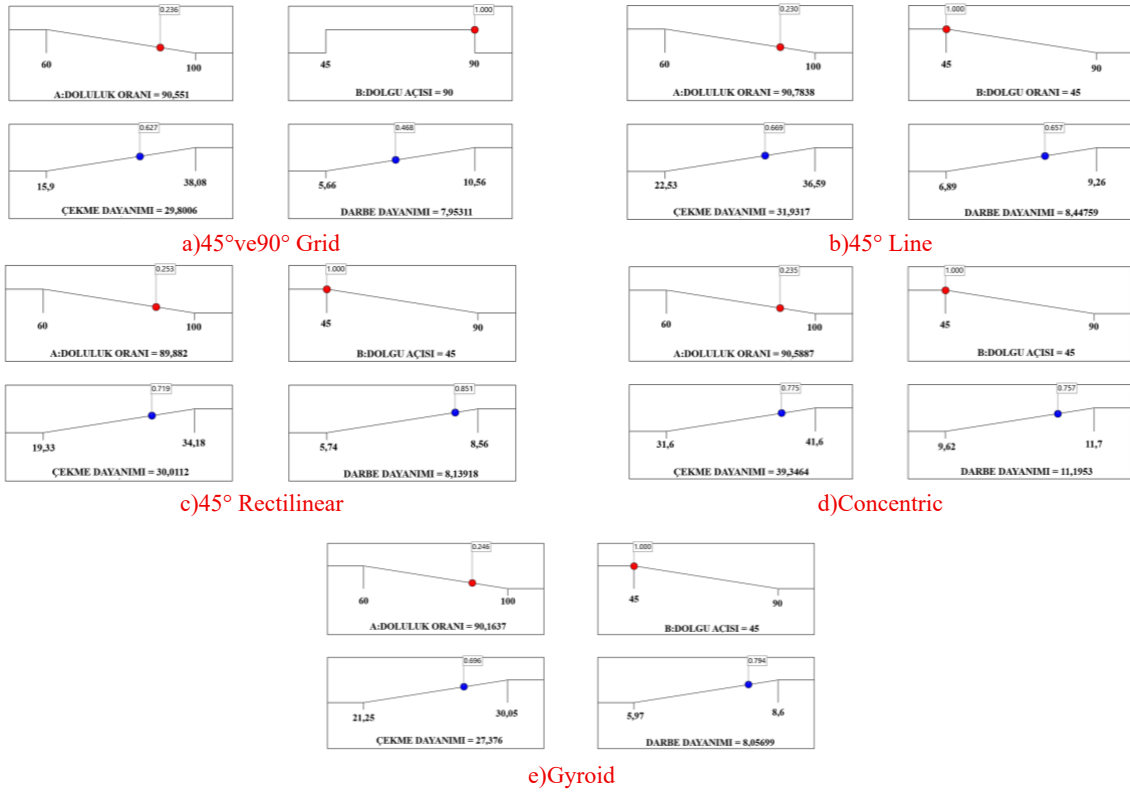
Şekil 5. Dolgu desenlerine ait deneysel ve RSM maksimum darbe dayanımı kıyaslama grafiği.

Çizelge 18. Deneysel ve RSM maksimum darbe dayanımı kıyaslaması grafiği sapma sonuçları

Dolgu Deseni	Sapma Miktarı	İdeal Doğru Çizgi Çakışıklık Durumu
a)45° ve 90° Grid	0.3909	Tam çakışma mevcut değil
b)45° Line	0.0793	Tam çakışma mevcut değil
c)45° Rectilinear	0.0793	Tam çakışma mevcut değil
d)Concentric	0.0014	Tam çakışma mevcut
e)Gyroid	0.0013	Tam çakışma mevcut

3.1.3. Optimum parametrelerin değerlendirilmesi

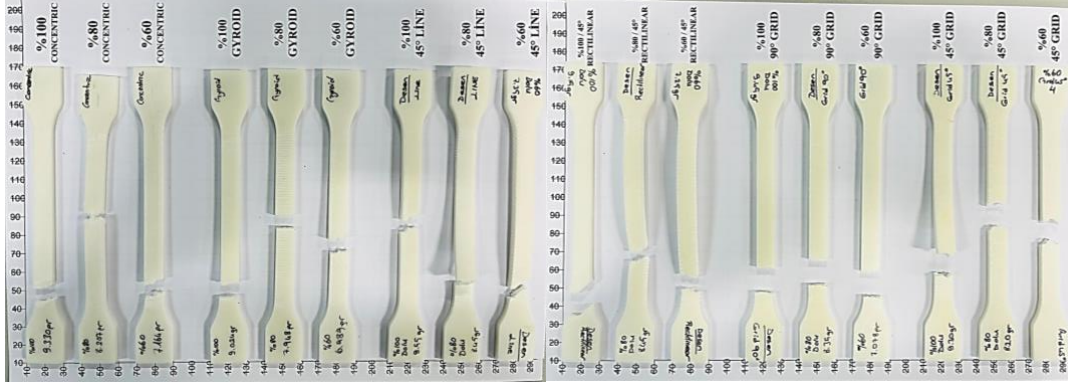
Bu çalışmada doluluk oranı ve dolgu açısı değişken parametrelerin maksimum çekme ve darbe dayanımı üzerindeki etkileri incelendikten sonra, optimum parametre değerleri Design Expert 12® yazılım programında elde edilmiştir. 5 farklı dolgu deseni için elde edilen optimum parametre değerleri ve tüm faktörler birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek çekme ve darbe dayanımını elde etmek amacı ile program tarafından doluluk oranı ve dolgu açısı değişkenleri için önerilen değerler Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Optimum parametreler, en yüksek çekme ve darbe dayanımı değerleri.

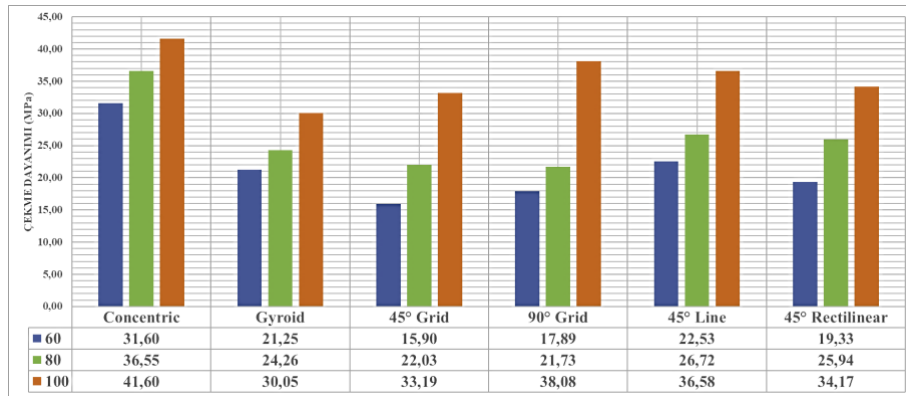
3.2. Çekme dayanımı testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneysel çalışmamızda ilk olarak Design Expert 12® programı tarafından belirlenmiş olan deney parametreleri ile (Çizelge 11) farklı dolgu desenlerinde, doluluk oranlarında ve dolgu açılarında üretilmiş numunelerin çekme testi sonrası görselleri Şekil 7'de verilmiştir.



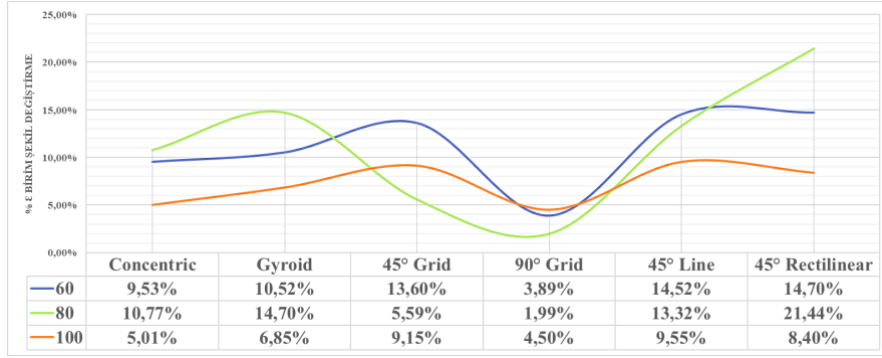
Şekil 7. Çekme testi sonrası numune görseli.

Şekil 8'de görüldüğü üzere, doluluk oranı %60'tan %100'e doğru arttıkça çekme dayanımı da paralel şekilde yükseltmektedir. Bu artışa %80 doluluk oranı da dâhildir; bu oran sistemin yük taşıma kapasitesini artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle %80 doluluk oranı, mekanik performans ile malzeme tasarrufu arasında bir denge noktası oluşturarak, mühendislik uygulamaları açısından dikkat çekici bir potansiyel sunmaktadır. Elde edilen veriler, özellikle doluluk oranının çekme dayanımı üzerindeki etkisinin oldukça belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Desenler arasında karşılaştırma yapıldığında, en yüksek çekme dayanımı %100 doluluk oranı ile üretilmiş 41.60 MPa değerindeki çekme dayanımı ile Concentric desenli numune, en düşük çekme dayanımı %60 doluluk oranı ile üretilmiş 15.90 MPa değerindeki çekme dayanımı ile 45° Grid desenli numunede elde edilmiştir. Concentric dolgu deseninin 41.60 MPa değerindeki çekme dayanımı ile diğer desenlerle karşılaştırıldığında yüksek performans sunmaktadır. Şekil 7'de çekme testi sonrasında numunelerde iki farklı bölgede kopma hasarları görülmüştür. %100 doluluk oranına sahip 45°Line dolgu deseni ve %80 doluluk oranına sahip Concentric, Gyroid, 45°Grid dolgu desenlerinde numunenin orta bölgesinde hasar meydana gelirken, diğer doluluk oranlarındaki dolgu desenlerinde ise uç kısımlardaki geçiş bölgelerinde hasar meydana gelmiştir. Bunun desenin geçiş bölgesinde zayıflık oluşturması nedeniyle olduğu anlaşılmaktadır. Concentric dolgu deseninden elde edilen bu başarı, iç dolgu yapısının dairesel ve çok yönlü simetrik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu geometri, uygulanan çekme kuvvetini tüm yönlere eşit dağıtarak lokal gerilme yığılmalarını minimize etmekte ve böylece malzemenin ani kopma riskini azaltmaktadır.



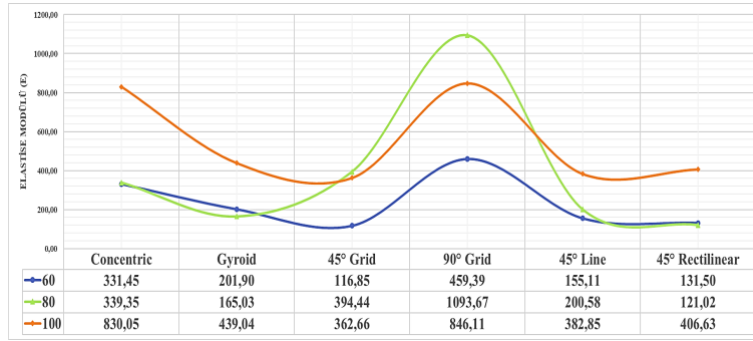
Şekil 8. Farklı dolgu desenleri ve doluluk oranlarına göre çekme dayanımı sonuçları.

Farklı dolgu desenlerine sahip numunelerin, yalnızca dayanım açısından değil, aynı zamanda deformasyon kapasitesi açısından da öne çıkması önemlidir. Şekil 9'u incelediğimizde %80 doluluk oranı ile üretilmiş olan 45° Rectilinear dolgu desenine sahip numune, %21.44 kopma uzaması değeri ile en yüksek şekil değiştirme kabiliyetine ulaşmıştır. Bu durum, elastik ve plastik deformasyon sırasında daha kararlı bir enerji absorpsiyon mekanizması olduğunu göstermektedir. %80 doluluk oranı ile üretilmiş olan 90° Grid dolgu desenine sahip numune, %1.99 kopma uzaması ile en düşük şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir.



Şekil 9. Farklı dolgu desenleri ve doluluk oranlarına göre birim şekil değiştirme sonuçları.

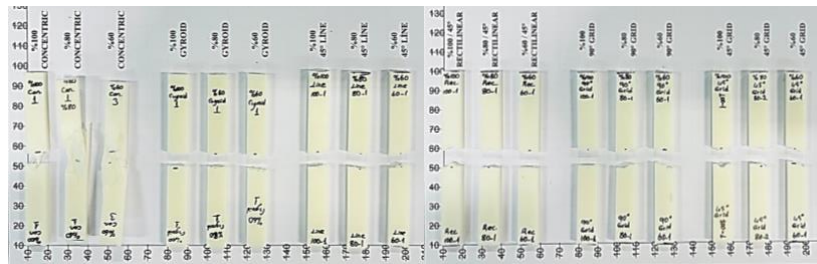
Çekme testine ait elastisite modülü (E-modülü) değerleri Şekil 10'da sunulmuştur. En yüksek E-modülü değeri ile %80 doluluk oranı ile basılmış 90° Grid dolgu desenine sahip numunede, 1093.67 MPa olarak ölçülmüştür. Düşük doluluk oranlarında (özellikle %60), elastik modül değerleri gözle görülür biçimde düşüş yaşanmış ve 45° Grid dolgu deseni %60 dolulukta yalnızca 116.85 MPa değerinde kalmıştır.



Şekil 10. Farklı dolgu desenleri ve doluluk oranlarına göre çekme elastisite modülü (MPa).

3.3. Darbe dayanımı testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Farklı dolgu desenlerinde, dolgu oranlarında ve dolgu açılarında üretilmiş deneysel numunelerin çentiksiz Charpy darbe testi sonrası görselleri Şekil 11'de verilmiştir.

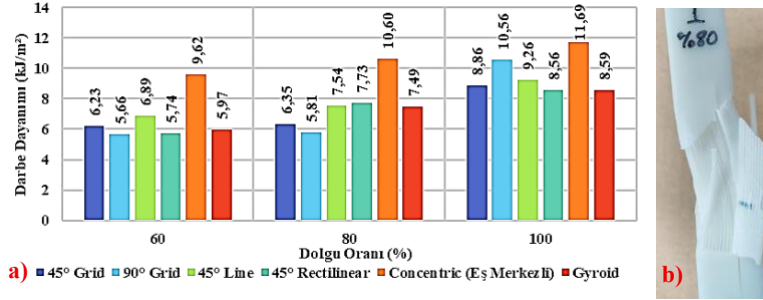


Şekil 11. Darbe testi sonrası numune görseli.

Deneysel çalışmada üretilen farklı dolgu desenine, doluluk oranına ve dolgu açısına sahip deneysel numunelerin çentiksiz Charpy darbe testi sonuçları Şekil 12a'da sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, darbe dayanımı açısından en yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi %100 doluluk oranı ile Concentric numunede tespit edilmiştir. Bu dolgu deseni, 11.69 kJ/m² darbe enerjisi ile tüm diğer dolgu desenlerinden yüksek değerdedir. Ayrıca %80 ve %60 doluluk oranlarındaki darbe dayanımları incelediğinde diğer dolgu desenlerinden de en yüksek enerji absorpsiyonuna sahip dolgu desendir. En düşük darbe dayanımı ise %60 doluluk oranı ile 90° Grid dolgu deseninde 5.66 kJ/m² olarak

ölçülmüştür. Bu fark, dolgu geometrisinin ve iç yapısal sürekliliğin, dinamik yüklere karşı gösterdiği direnç üzerinde ne derece etkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Darbe dayanımı testi sonuçları, tıpkı çekme testinde olduğu gibi, doluluk oranının en belirleyici faktör olduğunu; dolgu desenin ise enerji dağılım biçimi ile bu etkiyi destekleyici ya da sınırlayıcı rol üstlendiğini göstermiştir. Darbe sonucu oluşan hasarlar Charpy testi gereği orta noktadan kuvvet etki ettiği için hasarlar orta bölgede gerçekleşmiştir. Concentric numunelerde hasar katman ayrılması şeklinde görülmüştür (Şekil 12b).



Şekil 12. a) Farklı dolgu desenleri ve doluluk oranlarına göre charpy darbe dayanımı sonuçları.
b) Concentric numunelerdeki hasar durumu.

Farklı dolgu deseni, doluluk oranı ve dolgu açısına sahip deneysel numunelerin özgül çekme ve darbe dayanım sonuçları Çizelge 19’da sunulmuştur. Elde edilen verilere göre en yüksek özgül çekme ve darbe dayanımı Concentric dolgu deseninde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 19. Özgül çekme ve darbe dayanım tablosu

Özgül Çekme Dayanımı			
Dolgu Deseni / Doluluk Oranı	60%	80%	100%
Concentric	4.41	4.44	4.48
Gyroid	3.04	3.05	3.34
45° Grid	2.23	2.71	3.61
90° Grid	2.48	2.64	4.08
45° Line	3.07	3.15	3.84
45° Rectilinear	2.66	3.09	3.72
Özgül Darbe Dayanımı			
Dolgu Deseni / Doluluk Oranı	60%	80%	100%
Concentric	1.34	1.29	1.26
Gyroid	0.85	0.94	0.95
45° Grid	0.87	0.78	0.96
90° Grid	0.79	0.71	1.13
45° Line	0.94	0.89	0.97
45° Rectilinear	0.79	0.92	0.93

4. Tartışma

Bu çalışmada, Hyper-PLA malzemesi kullanılarak FDM yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özelliklerine dolgu deseni, doluluk oranı ve dolgu açısı gibi üretim parametrelerinin etkileri, Yüzey Cevap Metodu (RSM) ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, bu parametrelerin malzeme davranışı üzerindeki etkileşimlerini ortaya koymuş ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Yapılan ANOVA analizi sonucunda tüm dolgu desenleri ve mekanik testler (çekme ve darbe) için “doluluk oranının” en baskın ve istatistiksel olarak anlamlı parametre olduğunu göstermiştir. Bulgulara göre, doluluk oranının %60’tan %100’e çıkarılması, numunelerin iç yoğunluğunu artırarak yük taşıma kapasitelerini belirgin şekilde yükseltmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında, literatürdeki birçok çalışmayla paralellik göstermektedir. Günay ve ark. (2020), Karabıyık & Apak (2021) da doluluk oranındaki artışın PLA malzemenin çekme mukavemetini doğrudan artırdığını tespit etmişlerdir.

Dolgu açısının ise mekanik dayanımlar üzerindeki etkisinin, doluluk oranına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ve sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.

Çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, en yüksek performansı, %100 doluluk oranında 41.60 MPa değeriyle Concentric dolgu deseni sergilemiştir. Bu desenin, çekme kuvveti yönünde sürekli ve kesintisiz katmanlar oluşturarak yükü etkin bir şekilde dağıttığı ve gerilme yığılmalarını azalttığı düşünülmektedir. Özmen ve ark. (2023), Kamer ve ark. (2021) da çalışmalarında eş merkezli Concentric dolgu desenin yüksek özgül dayanıma sahip olduğunu bularak bu bulguyu desteklemiştir. İlginç bir şekilde, en yüksek şekil değiştirme kabiliyeti (%21.44 kopma uzaması) %80 doluluk oranındaki 45° Rectilinear dolgu deseninde gözlemlenirken, en yüksek elastisite modülü (rijitlik) 1093.67 MPa ile %80 dolulukta 90° Grid dolgu deseninde elde edilmiştir. Bu durum, dayanım, süneklik ve rijitlik arasındaki farklı ilişkiye bakarak optimum seçimin kullanım amacına bağlı olduğunu göstermektedir.

Darbe dayanımı testlerinde de Concentric dolgu deseni, 11.69 kJ/m² enerji absorpsiyon kapasitesi ile en yüksek sonuçları vermiştir. Bu dolgu deseni sürekli ve simetrik yapısıyla, darbe enerjisini etkili bir şekilde sönmüleyerek malzemenin ani kırılmalara karşı direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. En düşük darbe dayanımı ise 5.66 kJ/m² ile %60 dolulukta 90° Grid dolgu deseninde görülmüştür. Dağılı ve ark. (2024) da çalışmalarında %60 doluluk oranındaki 45° Line dolgu deseninin, 90° Grid desenine göre yaklaşık %17.85 oranında daha yüksek kırılma enerjisini absorbe ettiği belirtilmiştir. Bu çalışmada ise Concentric desenin aynı doluluk oranında, 90° Grid desenine kıyasla yaklaşık iki kat (yaklaşık %106) daha fazla darbe enerjisi sönmülediği tespit edilmiştir. Bu durum, dolgu deseninin geometrik yapısının darbe dayanımı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymakta ve özellikle simetrik geçişli yapıların, ani darbe yüklemelerine karşı daha etkili bir performans sergilediğini göstermektedir.

Çalışmanın istatistiksel veri analizinde, Yüzey Cevap Metodu (RSM) ile oluşturulan modellerin, özellikle Concentric, Line, Rectilinear ve Gyroid dolgu desenleri için yüksek R² (belirlilik katsayısı) değerleri (çoğunlukla >0.95) gösterdiği tespit edilmiştir. Bu, geliştirilen modellerin deneysel sonuçları büyük bir doğrulukla tahmin edebildiğini ve bu sayede optimum üretim parametrelerinin daha az deneyle belirlenebileceğini kanıtlamaktadır. Medibew (2022) da yapmış olduğu çalışma sonucunda en uygun parametre kombinasyonlarını bulmak için çeşitli optimizasyon teknikleri incelenmiş ve en sık kullanılan yöntemlerin başında %38.5 oran ile RSM olduğunu bularak bu bulguyu desteklemiştir.

Özgül dayanım değerleri incelendiğinde hem hafif hem de yüksek çekme dayanımına sahip dolgu desenleri sırasıyla %60 dolulukta Concentric ve 45° Line; %80 dolulukta Concentric, 45° Line ve buna en yakın 45° Rectilinear desen türleridir. En yüksek özgül darbe dayanımına sahip desenler ise %60 dolulukta Concentric ve sonra 45° Line; %80 dolulukta Concentric, Gyroid ve buna en yakın 45° Rectilinear olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma yalnızca Hyper-PLA malzeme ve X-Y yönelimli numuneler için geçerlidir. Gelecek çalışmalarda farklı termoplastikler, farklı baskı yönleri ve çok eksenli yükleme koşulları incelenebilir.

5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, FDM yöntemi ile elde edilen numunelerin farklı dolgu desenleri, doluluk oranları ve dolgu açılarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Yapılan tüm testler ve analizler sonucunda, çekme ve darbe dayanımlarını etkileyen en baskın ve istatistiksel olarak en anlamlı parametrenin “doluluk oranı” olduğu kesin olarak belirlenmiştir.
2. “Dolgu açısının” mekanik özellikler üzerindeki etkisi, doluluk oranına kıyasla ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır.
3. Çekme ve darbe dayanımı için en yüksek performans: “Concentric” dolgu deseni olup, hem en yüksek çekme dayanımı (%100 doluluk oranında 41.60 MPa) hem de en yüksek darbe enerjisi sönmüleme kapasitesine (%100 doluluk oranında 11.69 kJ/m²) sahiptir. Ayrıca bu dolgu deseni %80 ve %60 doluluk oranlarında ise en yüksek çekme ve darbe dayanımına sahiptir. Bu desen, bu iki mekanik özelliğin ön planda olduğu uygulamalar için idealdir.

4. En yüksek özgül dayanım değerleri incelendiğinde en yüksek özgül çekme ve darbe dayanımı “Concentric” dolgu deseni ve %60 doluluk oranında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu dolgu deseni %80 ve %100 doluluk oranlarında ise en yüksek özgül çekme ve darbe dayanıma sahiptir.
5. İstatistiksel Modellemenin Başarısı: Yüzey Cevap Metodu (RSM) ile geliştirilen tahmin modelleri, yüksek R^2 değerleri ile deneysel verilerle güçlü bir uyum göstermiştir. Bu, FDM sürecinin optimizasyonu için istatistiksel yöntemlerin etkin bir araç olduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, doluluk oranı, deseni ve geometrisine göre mekanik performansının geliştirilebileceği ve malzeme mekaniği çalışan tasarımcılarına destek olacağı öngörülmektedir. 3D yazıcı teknolojisinde geliştirilmiş filament kullanımı ile amaca yönelik, özgül dayanımı yüksek, hafif, düşük maliyetli ve fonksiyonel parçaların elde edilmesi mümkündür. Çalışmada ayrıca mekanik performansı en üst düzeye çıkarmak için malzeme, dolgu deseni ve doluluk oranı arasında dikkatli bir denge kurulması gerektiğini ortaya koymuştur. İleriki yapılacak olan çalışmalarda farklı desen ve dolgu türleriyle ve malzeme modifikasyonu beraberce düşünülerek daha düşük doluluk oranlarıyla daha yüksek dayanımların elde edilebileceği ve bu bağlamdaki çalışmalara da ışık tutacağı düşünülmektedir.

Kongre Beyanı

Bildiri, 06-08 Aralık 2024 tarihlerinde Afyon’da düzenlenen 7th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences Kongresi’nde bildiri olarak sunulmuştur. Bu makale sunulan bildirinin genişletilmiş halidir.

Yazarların Katkı Oranı Beyanı

Muhammet Dağı:Kuram/Teori Oluşturma, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynak/Malzeme/Alet Temini, Proje Yönetimi, Doğrulama. **Elif Güden:** Araştırma, Veri Analizi, Biçimsel Analiz, Özgün Taslak Yazımı, Görselleştirme. **Ahmet Demirer:** Gözden Geçirme ve Düzenleme, Kontrol/Deney/Gözlem/Danışmanlık.

Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu makalenin çalışmalarında araştırma ve yayın etiğine uyduğumuzu beyan ederiz.

Etik Kurul Beyanı

Bu makalenin çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerekmektedir.

Yapay Zeka Kullanımı

Bu makalenin yazımında, görsellerin, grafiklerin, tabloların ya da bunlara karşılık gelen başlıkların oluşturulmasında herhangi bir tür üretken yapay zekâ kullanmamıştır.

Kaynakça

Adanur, Ö., Koçar, O., & Güldibi, A. S. (2024). FDM yöntemiyle üretilen PLA malzemelerde dolgu deseninin mekanik özelliklere etkisi. *Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science*, 11(2), 294-307. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1336572>

- Borah, J., & Chandrasekaran, M. (2022). Evaluation of tensile strength of 3D printed PLA component and Taguchi optimization. *Neuro Quantology*, 20(7), 1714-1726.
- Boğa, C., Seyedzavvar, M., & Zehir, B. (2021). Experimental Investigation on the Effects of Internal Architecture on the Mechanical Properties of 3D Printed PLA Components. *European Journal of Science and Technology*, (24), 119-124. <https://doi.org/10.31590/ejosat.901012>
- Dağlı, M., Güden, E., Demirer, A., & Yumat, E. (2024, Aralık). 3 Boyutlu yazıcı ile PLA bazlı yapılarda dolgu deseninin mekanik özelliklere etkisi. 7th International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS), Afyonkarahisar, Türkiye.
- Demirer, A. (2024). *Mühendislik Polimerleri ve Kalıplama Prosesi*, Lisansüstü Ders notları. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya.
- International Organization for Standardization. (2012). *Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics* (EN ISO 527-2). <https://www.iso.org/standard/56046.html>
- Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N., & Kaçar, R. (2020). PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79. <https://doi.org/10.2339/politeknik.422795>
- Hasçelik, S., Öztürk, Ö. T., & Özerinç, S. (2021). Mechanical properties of nylon parts produced by fused deposition modeling. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 13(2), 34–40. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2021.13.2.34>
- Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., & Kaya, A. (2021). 3 Boyutlu yazıcı ile farklı renklerde ve farklı dolgu desenlerinde üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 829-848. <https://doi.org/10.17482/uumfd.887786>
- Karabıyık, Ö., & Apak, K. (2021). Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemeden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 13(2), 62-68.
- Kaya, E., Bayar, İ., & Akpınar, A. F. (2024). Dolgu desenlerinin ve oranlarının ergiyik biriktirme modellemede PLA malzemesinin mekanik performansına olan etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 792-798. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1442158>
- 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*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/5490831>
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (1995). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments* (4th ed.). Wiley.
- Nigiz, F. U. (2018). Yüzey yanıt metodu ile optimize edilen metil laurat üretiminin membran reaktörde uygulaması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 47-55. <https://doi.org/10.21923/jesd.375201>
- 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>
- Saylık, A., Tetik, B., & Acar, M. (2025). Copula-based data augmentation and machine learning for predicting tensile properties of 3D-printed PLA. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(5), e58116. <https://doi.org/10.1002/app.57533>
- Tatlı, O., & Güler Özgül, H. (2020). Üç boyutlu yazıcı tasarımı, imalatı ve dolgu geometrisinin mekanik özelliklere etkisi. *ICONTECH International Journal*, 4(1), 13-24. <https://doi.org/10.46291/ICONTECHvol4iss1pp13-24>
- Yeoh, C. K., Cheah, C. S., Pushpanathan, R., Song, C. C., Tan, M. A., & Teh, P. L. (2020). *Effect of infill pattern on mechanical properties of 3D printed PLA and cPLA*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 957, 012064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/957/1/012064>
- Yılmaz, O., & Ertürk, M. (2021). *Etil Asetat Üretiminin Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu (Yüksek Lisans Tezi)*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.