EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİYLE ÜRETİLEN KONTROL FİKSTÜRLERİNİN GELENEKSEL YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KONTROL FİKSTÜRLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

İsmail Umur SERT

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİYLE ÜRETİLEN KONTROL FİKSTÜRLERİNİN GELENEKSEL YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KONTROL FİKSTÜRLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

İsmail Umur SERT
0009-0006-7026-7255

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS /
EKLEMELİ İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

EKLEMELİ İMALAT İLE YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KONTROL FİKSTÜRLERİNİN GELENEKSEL YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KONTROL FİKSTÜRLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

İsmail Umur SERT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Eklemeli İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Bu çalışmada, Stereolitografi (SLA) yöntemi kullanılarak farklı reçine tipleri ile üretilen kontrol fikstürlerinin mekanik performansları ve üretim verimlilikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan reçine türleri arasında Standart Reçine, ABS Like Pro 2 ve Tough 2.0 yer almakta olup, her bir malzeme ile üretilen numuneler çekme, eğilme ve sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Çekme testleri, ISO 527-2 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiş numunelerin çekme dayanımı mukavemet değerleri belirlenmiştir. Eğilme dayanımı ise ASTM D790 standardına göre üç nokta eğilme yöntemiyle ölçülmüştür. Yüzey dayanımı açısından uygulanan Shore D sertlik testi ile numunelerin penetrasyon direnci değerlendirilmiştir. Deneysel süreç, Taguchi L27 deney tasarımı yöntemiyle planlanmış; elde edilen veriler varyans analizi ile incelenmiştir. Sonuçlar, özellikle reçine tipinin mekanik özellikler üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CAD modelleme sürecinde klasik dolu yapılar yerine kullanılan kafes yapıları, Altair Inspire yazılımı ile tasarlanmış ve Chitubox dilimleme programı aracılığıyla üretime aktarılmıştır. Bu sayede parça ağırlıklarında ortalama %32 oranında azalma sağlanmış, taşınabilirlik ve malzeme tasarrufu açısından kayda değer avantajlar elde edilmiştir. SLA yöntemiyle üretilen parçaların ±0,1 mm tolerans aralığında kaldığı saptanmış olup, bu doğruluk seviyesi kontrol fikstürü gibi hassas uygulamalar için yeterli bulunmuştur. Geleneksel yöntemlerde işlem süresi 5–5,5 saate ulaşırken, SLA yöntemiyle üretim süresi ardıl işlemler dahil yaklaşık 4 saat sürmekte ve daha düşük enerji ve malzeme tüketimi ile öne çıkmaktadır. Eİ'nin zaman, maliyet ve kaynak verimliliği açısından avantaj sunduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma SLA teknolojisinin endüstriyel fikstür üretiminde işlevsel ve verimli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Stereolitografi (SLA), Kontrol Fikstürü, Kafes Yapılar, Taguchi Yöntemi

2025, xiv + 58 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARISON OF CONTROL FIXTURES MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS WITH THOSE PRODUCED BY TRADITIONAL METHODS

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Additive Manufacturing

Supervisor: Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN

In this study, the mechanical performance and production efficiency of control fixtures produced using different resin types via the stereolithography (SLA) method were comprehensively analyzed. The resin types used in the study include Standard Resin, ABS Like Pro 2, and Tough 2.0, and samples produced with each material were subjected to tensile, flexural, and hardness tests. Tensile tests were performed in accordance with the ISO 527-2 standard to determine the tensile strength values of the samples. Bending strength was measured using the three-point bending method in accordance with the ASTM D790 standard. The Shore D hardness test was applied to evaluate the penetration resistance of the samples in terms of surface strength. The experimental process was planned using the Taguchi L27 experimental design method, and the obtained data were analyzed using variance analysis. The results showed that the type of resin is a decisive factor in mechanical properties. Additionally, lattice structures used instead of classical solid structures in the CAD modeling process were designed using Altair Inspire software and transferred to production via the Chitubox slicing program. This resulted in an average 32% reduction in part weight, providing significant advantages in terms of portability and material savings. It was determined that parts produced using the SLA method remained within a tolerance range of ±0.1 mm, and this level of accuracy was found to be sufficient for sensitive applications such as control fixtures. While the processing time in traditional methods reached 5–5.5 hours, the production time using the SLA method, including post-processing, took approximately 4 hours and stood out with lower energy and material consumption. This demonstrates that SLA offers advantages in terms of time, cost, and resource efficiency. In conclusion, this study demonstrates that SLA technology provides a functional and efficient alternative for industrial fixture production.

Key words: Additive Manufacturing, Stereolithography (SLA), Control Fixture, Lattice Structures, Taguchi Method

2025, xiv + 58 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bana yol gösteren ve tüm bu süreçte desteğiyle yanımda olan değerli danışmanım Prof. Dr. Gökhan Sevilgen'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın planlanması, testlerin uygulanması ve üretim süreçlerinin gerçekleştirilmesinde sağladıkları katkılar için Ermetal Şirketleri Ar-Ge Merkezi'ne teşekkür ederim.

Katkılarından dolayı Ermetal Ar-Ge Merkezi Müdürü Sayın Fatih Ateş'e, sürece liderliğiyle yön veren ve destek sağlayan Erkalıp İşletme Müdürü Sayın Taha Kanık'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olan, sevgisi ve desteğiyle bana her zaman güç veren, varlıklarıyla bana güven aşılayan anneme ve ablama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm süreç boyunca gösterdiği sevgi, anlayış ve destekle bana güç veren müstakbel eşim Hande'ye içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

İsmail Umur SERT

20/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xii
1.GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
2.1. Malzeme Ekstrüzyon....3
2.2. Toz Yatağı Füzyon....4
2.3. Doğrudan Enerji Biriktirme....4
2.4. Vat Fotopolimerizasyon....5
2.5. Ardıl İşlemler....7
2.5.1 Kürleme....7
2.6. Kontrol Fikstürleri....8
2.6.1. Kontrol Fikstürlerinde Kullanılan Malzemeler....9
2.6.2. Kontrol Fikstürlerinde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri....10
2.7. Parçanın Kullanım Alanı ve Görsel Sunumu....11
3. MATERYAL ve YÖNTEM....12
3.1. Sla İle Üretilen Malzemelerin Parametre Optimizasyonu....12
3.2. Lazer Tarama Geometrik Doğruluk Ölçümü....14
3.3. CMM Geometrik Doğruluk Ölçümü....14
3.4. Çekme Test Numunesi Standardı....15
3.5. Eğilme Test Numunesi Standardı....17
3.6. Sertlik Test Numunesi Standardı....19
3.7. Taguchi Yöntemi....20
3.8. Kafes Yapılar....21
3.9. Tasarım ve Üretim Öncesi Hazırlık Süreci....22
3.10. Numunelerin Üretilmesi....23
3.11. Kürleme ve Yıkama Prosesi....24
4. BULGULAR ve TARTIŞMA....26
4.1. Çekme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi....29
4.2. Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi....35
4.3. Sertlik Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi....41
4.4. SLA Teknolojisi ile Üretilen Kafes Yapılı Kontrol Fikstürü....47
4.5. Kafes Yapılarıyla Tasarlanan Parçaların Performans Analizi....48
4.5.1.Standart Reçine ile Üretilen Parçada Kafes Yapısının Uygulanması....49
4.5.2. ABS Like Pro 2 Reçinesi ile Üretilen Parçada Kafes Yapısının Uygulanması....49
4.5.3.Tough 2.0 Reçine ile Üretilen Parçada Kafes Yapısının Uygulanması....50
4.6. Parça Geometrisinin Tolerans Kriterlerine Uygunluğu ve Sapma Analizi....51
4.7. Alüminyum ve Cibatool Malzemeler İçin Üretim Süreci....52
4.8. Alüminyum ve Cibatool Malzemeler İçin Maliyet Analizi....53
4.9. SLA Yöntemi ile Kontrol Fikstürü Üretim Süreci....53
4.9. Eklemeli İmalat İle Üretilen Kontrol Fikstürlerinin Maliyet Değerlendirmesi....53
5. SONUÇ....55
KAYNAKLAR....56
ÖZGEÇMİŞ....58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
F	Kuvvet (N)
σ	Gerilme (MPa)
ε	Birim deformasyon
E	Elastik Modül (MPa)
δ	Uzama miktarı
A	Kesit alanı (mm^2)
L	Ölçü uzunluğu (mm)
b	Genişlik (mm)
h	Kalınlık (mm)
l_1	Dar paralel bölüm uzunluğu (mm)
l_2	Geniş uçlar arası mesafe (mm)
l_3	Toplam uzunluk (mm)
r	Geçiş yarıçapı (mm)
HV	Vickers sertliği
Shore D	Yüzey sertliği değeri
MPa	Megapascal, basınç/gerilme birimi
mm	Milimetre, uzunluk birimi

Kısaltmalar	Açıklama
Eİ	Eklemeli İmalat
CAD	Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
3D	Üç Boyutlu
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
PBF	Powder Bed Fusion (Toz Yatağı Füzyon)
DED	Directed Energy Deposition (Doğrudan Enerji Biriktirme)
VP	Vat Photopolymerization (Vat Fotopolimerizasyon)
IPA	Isopropyl Alcohol (İzopropil Alkol)
CMM	Coordinate Measuring Machine (Koordinat Ölçüm Makinesi)
ISO	International Organization for Standardization
SLA	Stereolithography
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
S/N	Signal-to-Noise Ratio (Sinyal-Gürültü Oranı)
HV	Vickers Sertliği Birimi
LSP	Laser Shock Peening (Lazer Şok Peklemesi)
UV	Ultraviyole

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1	Malzeme ekstrüzyon yöntemi	3
Şekil 2.2	Toz yatağı füzyon yöntemi	4
Şekil 2.3	Direkt enerji yöntemi	5
Şekil 2.4	Vat fotopolimerizasyon yöntemi	6
Şekil 2.5	Kontrol fikstürü türleri	8
Şekil 2.6	Sac parça kontrol fikstürü	9
Şekil 2.7	İncelenen parçanın sanal ortam modeli	11
Şekil 2.8	Ticari panelvan araç üzerindeki konumu	11
Şekil 3.1	Atos tarama cihazı	14
Şekil 3.2	CMM ile bir sac parça ölçümü	15
Şekil 3.3	Çekme çubuğu ölçüleri	16
Şekil 3.4	Çekme test düzeneği	17
Şekil 3.5	Eğilme testi şablonu	18
Şekil 3.6	Eğilme test düzeneği	18
Şekil 3.7	Shore D sertlik testi cihazı	19
Şekil 3.8	Farklı topolojilere sahip kafes yapısı örnekleri	22
Şekil 3.9	Kontrol fikstürü gövdesinin konumlandırılması ve destek yapı tasarımı	23
Şekil 3.10	Anycubic photon mono x	23
Şekil 3.11	Creality kürleme ve yıkama makinesi	24
Şekil 4.1	Farklı reçine türlerinde (Standart, ABS, Tough) ve aynı baskı parametrelerinde üretilen eğilme testi numuneleri	27
Şekil 4.2	Farklı reçine türlerinde (Standart, ABS, Tough) ve aynı baskı parametrelerinde üretilen eğilme testi numuneleri	28
Şekil 4.3	Çekme mukavemeti sonuçlarının büyükten küçüğe sıralanmış dağılımı	31
Şekil 4.4	Çekme deneyine ait reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresine göre S/N oranı ana etki grafiği	33
Şekil 4.5	Eğilme mukavemeti sonuçlarının büyükten küçüğe sıralanmış dağılımı	37
Şekil 4.6	Eğilme deneyine ait reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresine göre S/N oranı ana etki grafiği	39
Şekil 4.7	Sertlik sonuçlarının büyükten küçüğe sıralanmış dağılımı	43
Şekil 4.8	Sertlik deneyine ait reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresine göre S/N oranı ana etki grafiği	45
Şekil 4.9	SLA teknolojisiyle üretilmiş ve iç hacminde kafes yapısı bulunan kontrol fikstürünün farklı açılardan görünümü	46
Şekil 4.10	Kafes yapılı kontrol fikstürü parçasının dijital modeli (sol) ve SLA yöntemiyle üretilmiş fiziksel çıktısı (sağ)	47
Şekil 4.11	Kafes yapısı uygulanmış (sol) ve dolu (sağ) modelin standart reçine kullanılarak üretim bilgileri karşılaştırması	48
Şekil 4.11	Kafes yapısı uygulanmış (sol) ve dolu (sağ) modelin ABS Like Pro 2 reçine kullanılarak üretim bilgileri karşılaştırması	49
Şekil 4.11	Kafes yapısı uygulanmış (sol) ve dolu (sağ) modelin Tough 2.0 reçine kullanılarak üretim bilgileri karşılaştırması	50
Şekil 4.11	Parçanın Tarama Sonucu Sapma Analizi Raporu	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 1.1	ASTM'ye Bazı Eklemeli İmalat Yöntemleri	2
Çizelge 3.1	Farklı Reçine Tipleri, Katman Kalınlıkları ve Kürleme Sürelerine Göre Deneysel Girdi Parametreleri	11
Çizelge 3.2	Farklı Reçine Tipleri, Katman Kalınlıkları ve Kürleme Sürelerine Göre Deney Düzenekleri	12
Çizelge 3.3	Tip 1A Çekme Numune Boyutları (ISO 527-2:2012)	15
Çizelge 4.1	Farklı reçine tipleri, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre eğilme ve çekme dayanımı sonuçları	25
Çizelge 4.2	L27 Taguchi ortogonal deney düzeni kullanılarak farklı reçineler, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre elde edilen çekme mukavemeti sonuçları	29
Çizelge 4.3	Çekme dayanımı için anova sonuçları (Taguchi L27)	30
Çizelge 4.4	Çekme mukavemeti anova bulguları	34
Çizelge 4.5	L27 Taguchi ortogonal deney düzeni kullanılarak farklı reçineler, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre elde edilen eğilme mukavemeti sonuçları	35
Çizelge 4.6	Çekme dayanımı için anova sonuçları (Taguchi L27)	35
Çizelge 4.7	Eğilme mukavemeti anova bulguları	37
Çizelge 4.8	L27 Taguchi ortogonal deney düzeni kullanılarak farklı reçineler, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre elde edilen sertlik sonuçları	38
Çizelge 4.9	Eğilme dayanımı için anova sonuçları (Taguchi L27)	39
Çizelge 4.10	Sertlik testi anova bulguları	41

1.GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi, yirmi yılı aşkın bir süredir araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Eİ süreçleri, malzemeleri çıkarmak yerine katman katman ekleyerek doğrudan CAD modellerinden üç boyutlu parçalar üretir. Bu yöntem, eksiltici üretim süreçleriyle elde edilemeyen karmaşık geometrik ve malzeme yapısına sahip parçalar oluşturmak için önemli bir yetenek sunar. Son yirmi yıl içinde gerçekleştirilen yoğun araştırmalar sonucunda, yeni ve yenilikçi Eİ süreçlerinin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesiyle birlikte havacılık, otomotiv, biyomedikal, enerji ve diğer alanlarda birçok pratik uygulamada kayda değer ilerlemeler sağlanmıştır.(Guo & Leu, 2013)

Ürün tasarımında stil ve estetiği ön plana çıkarmak amacıyla, serbest biçimli yüzeyler de dahil olmak üzere giderek daha karmaşık geometrik formlar tercih edilmektedir. Ancak bu tür ürünlerin modellenmesi genellikle son derece zorlu ve çoğu zaman imkânsız bir süreçtir. Bu sorunu aşmak için kullanılan tersine mühendislik, fiziksel maketler veya prototiplerden CAD modelleri üreten bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Halk arasında “3D (üç boyutlu) baskı” olarak bilinen eklemeli üretim, Calignano’nun kitabında yer alan tüm üretim prensipleri arasında en yeni ve muhtemelen en yıkıcı olanıdır. Bu sürecin temel unsuru, tamamen dijital kontrol altında malzeme ekleyerek parçaları aşamalı bir şekilde üretmektir. Bir 3D yazıcının çalışabilmesi için gerekli olanlar, hammadde ve bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyasıdır; sonuçta elde edilen, son işleme hazır bir parçadır. Son yıllarda, düşük kaliteli kırılgan plastiklerden yüksek kaliteli mühendislik polimerleri, metaller ve seramikler gibi malzeme seçenekleri büyük bir çeşitlilik kazanmıştır. Tasarım özgürlüğü neredeyse sınırsızdır ve her bir parça, özel kalıplara ihtiyaç duyulmadığı için benzersiz olabilir; tek gereken şey farklı bir CAD dosyasıdır. Ayrıca, eklemeli üretim ekipmanlarının fiyatlarının önemli ölçüde düşmesiyle birlikte, bu süreç bilgisayar bilgisi artan bireyler için daha erişilebilir bir hale gelmektedir.

Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM)’ye göre, Eİ teknolojileri çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bunlardan bazıları, malzeme ekstrüzyonu, toz yatağı füzyonu, doğrudan enerji biriktirme ve fotopolimerizasyonu. Her bir kategori, farklı süreçleri

kapsasa da hepsi katmanların seçici olarak modellenmesi için benzer prensiplere dayanır.(Calignano et al., 2017)

Çizelge 1.1 ASTM'ye Bazı Eklemeli İmalat Yöntemleri

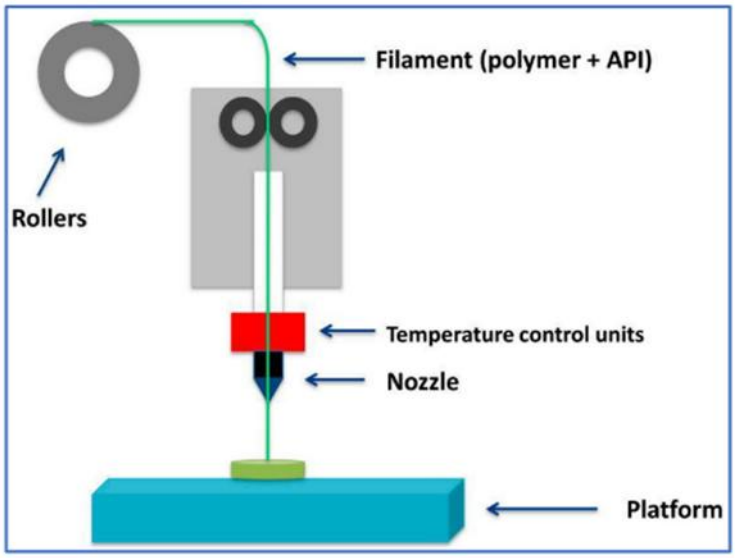
Proses	**Malzeme**
Malzeme Ekstrüzyon	Polimer
Toz Yatağı Füzyon	Metal, Polimer, Seramik
Direkt Enerji Depozisyonu	Metal, toz ve tel
Vat Fotopolimerizasyonu	Fotopolimer, Seramik

Eklemeli imalat teknolojileri, ASTM sınıflandırmasına göre çeşitli kategorilere ayrılmakta olup; bu kategoriler, kullanılan malzeme türlerine ve enerji kaynaklarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu kapsamda, çalışmada yer verilen yöntemler arasında polimer esaslı üretimlerde yaygın kullanılan malzeme ekstrüzyonu, polimer, seramik ve metal tozlarının selektif olarak eritildiği toz yatağı füzyonu, özellikle metal parçaların üretiminde tercih edilen direkt enerji depozisyonu ve fotopolimer ile seramiklerin kullanıldığı vat fotopolimerizasyonu yer almaktadır. Bu yöntemlerin her biri, katmanlı üretimin temel prensiplerine dayanmakla birlikte, farklı malzeme türlerine ve uygulama alanlarına hizmet edecek şekilde gelişmiştir. Bu süreçlerin teknik ayrıntılarına ve çalışma prensiplerine ilgili literatür incelemesi bölümünde detaylı olarak yer verilecektir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Malzeme Ekstrüzyon

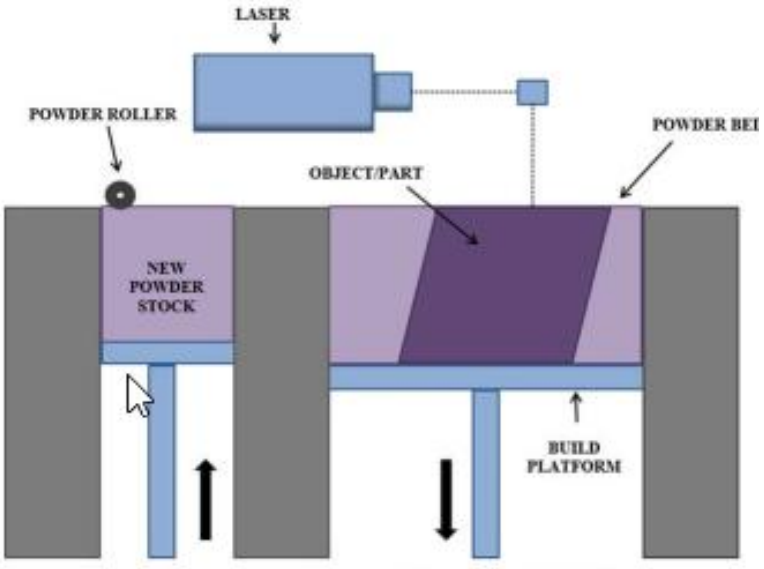
Stratasys'in kurucu ortağı Scott Crump, literatürde Fused Deposition Modeling (FDM) veya Fused Filament Fabrication (FFF) olarak bilinen teknolojisini 1989 yılında geliştirmiştir. Günümüzde, FDM tabanlı 3D yazıcılar, ekstrüzyon katkılı üretim Eİ sistemlerine dayanan polimer kompozitlerin basımı için en çok tercih edilen tüketici düzeyindeki 3D yazıcılardır. Ekstrüzyon tabanlı Eİ, genellikle bir malzemenin eritilerek ve katmanlar halinde biriktirilmesi prensibine dayanır ve bu sayede iki boyutlu katmanlar oluşturularak somut üç boyutlu nesneler elde edilir. Diğer ekstrüzyon tabanlı yöntemler arasında FDM, termoplastik filamentler kullanarak malzeme eritme tekniğiyle çalışmaktadır; örneğin, PC ve ABS gibi farklı çaplardaki PLA filamentleri, ısıtılmış bir nozülden ekstrüde edilerek kullanılmaktadır.(Dizon et al., 2018)



Şekil 2.1. Malzeme ekstrüzyon yöntemi (Husna et al., 2024)

2.2. Toz Yatağı Füzyon

Toz yatağı füzyonu (PBF), havacılık, otomotiv ve nükleer gibi farklı sektörlerde bileşen üretimi için yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Bu süreçte, ince toz katmanları bir yapı plakasının üzerine serilir ve bu tozların katı hale gelmesi için lazer veya elektron ışını gibi odaklanmış bir enerji kaynağı kullanılır. Bir katman tamamlandıktan sonra, üzerine yeni bir toz katmanı eklenir ve bu döngü, üç boyutlu bir parça elde edilene kadar devam eder. Ancak, PBF ile üretilen metal bileşenler, sürecin doğasından kaynaklanan çeşitli kusurlara eğilimlidir. Bunlar arasında yüzey altı gözeneklilik, düşük yüzey kalitesi, yüksek seviyelerde kalıntı gerilmesi veya bozulma, önemli kimyasal ayrışma ve istenmeyen mikroyapı oluşumu yer alır.(Flint et al., 2022)



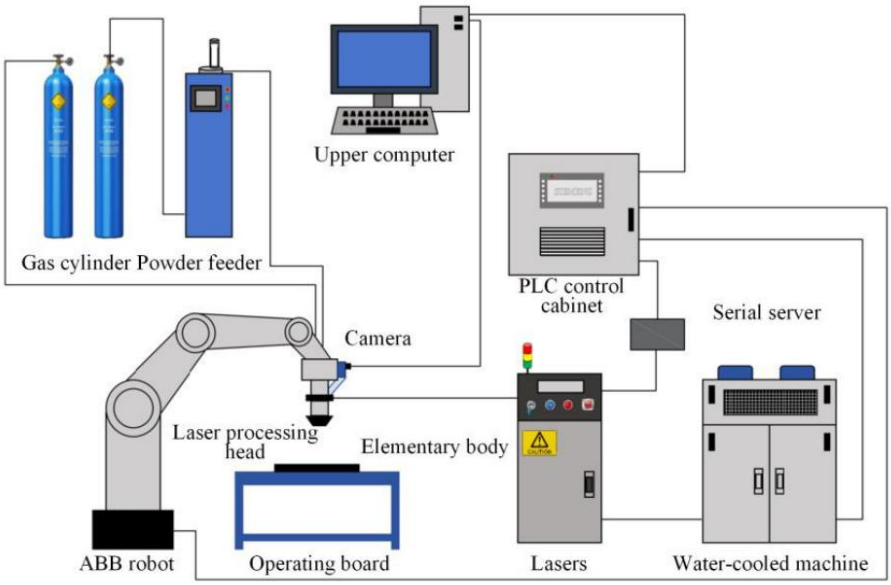
Şekil 2.2. Toz yatağı füzyon yöntemi (Al Rashid et al., 2020)

2.3. Doğrudan Enerji Biriktirme

Metal katkılı üretim teknolojileri, yönlendirilmiş enerji biriktirme DED süreçleri, metalik bir malzemenin katman katman biriktirilmesi yoluyla düz ve düz olmayan alt tabakalar üzerinde rastgele bir şekil oluşturabilir. Bu DED süreçleri, farklı malzemelerin ardışık ve eşzamanlı biriktirilmesi yoluyla istenen özelliklere ve karakteristiklere sahip heterojen bir malzemeyi kolayca imal edebilir. Buna ek olarak, DED ile farklı üretim süreçlerini

birleştiren hibrit bir süreç de rahatlıkla geliştirilebilir. Bu nedenle, DED süreçleri üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda giderek artmıştır. Dong-Gyu Ahn'nın çalışmasında DED süreçleri ve uygulamalarına ilişkin son araştırma eğilimleri gözden geçirilmiştir. Süreç ve sistemin geliştirilmesi, biriktirme koşullarının optimizasyonu ve DED sürecinin uygulanması ile ilgili ilkeler, temel teknolojiler ve son teknoloji tartışılmıştır. Son olarak, DED sürecinin gelecekteki araştırma konuları ve fırsatları belirlenmiştir.

Termal enerji (örneğin, lazer, elektron ışını, kaynak ısısı gibi) kullanılarak, tel veya toz şeklindeki hammadde aynı anda bu odaklanmış enerji bölgesine beslenir. Odaklanmış termal enerjinin bulunduğu noktada, önceki katman ve beslenen hammadde eriyerek bir eriyik havuzu oluşturur. Eriyik havuzunun soğumasıyla bir birikim izi oluşur. Bu işlemin tekrarı yoluyla, üç boyutlu metalik bir parça üretilir.(Ahn, 2021)



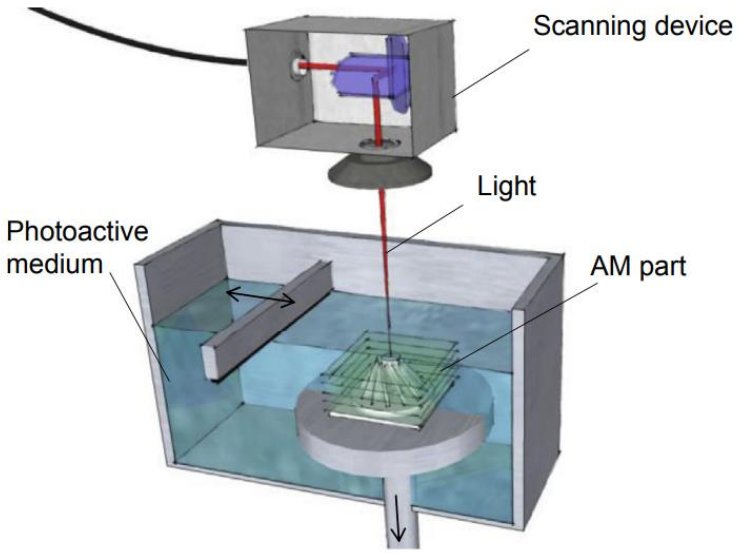
Şekil 2.3. Direkt enerji yöntemi (Wang et al., 2024)

2.4. Vat Fotopolimerizasyon

Modern stereolitografi ile bağlantılı en önemli çalışmalar, 1970'lerde ortaya çıkmıştır. Swainson, fotokimyasal olarak çapraz bağlanan veya bozulan polimerler yardımıyla iki kesişen radyasyon ışını kullanarak 3D nesnelerin inşa edilebileceği bir sistemin patentini

almıştır. Ardından Herbert, fotosensitif polimerleri kullanarak katman katman katı nesneler oluşturan bir sistem geliştirmiştir. Bununla birlikte, modern stereolitografinin asıl başlangıcının CW Hull'un çalışmasıyla gerçekleştiği genel olarak kabul edilmektedir. Hull'un konseptine göre, 3D nesneler, ultraviyole (UV) ışını ile sertleştirilebilen fotosensitif malzemelerden katmanlar halinde oluşturulmaktadır. Günümüzde stereolitografi büyük bir gelişme göstermiş ve bu teknoloji için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bildirilen yöntemleri dört nesil olarak özetleyip sınıflandırdık. İlk nesil, Hull'un çalışmasıyla temsil edilmekte olup, sıvı malzemeler üzerinde lazer ışını tarayarak 3D ürünler üretir.

Verimlilik sorunlarını aşmak amacıyla, ikinci nesil olan projeksiyon stereolitografisi, fotomaske teknolojisini kullanarak tüm katmanı aynı anda sertleştirebilir. 2015 yılında Tumbleston ve ekibi, üçüncü nesil olarak bilinen sürekli sıvı arayüz üretimi (CLIP) sürecini geliştirmiştir; bu yöntem, parçaların dakikalar içinde üretilmesine olanak tanıyarak önceki yöntemlerden çok daha hızlıdır. Son olarak, karmaşık 3D hacimlerin saniyeler içinde üretildiği hacimsel stereolitografi tanıtılmış olup, bu yöntem dördüncü nesil olarak kabul edilmektedir. Ancak, renkli stereolitografi ve termal stereolitografi gibi diğer yaklaşımlar bu makalede ele alınmamıştır.(Huang et al., 2020)



Şekil 2.4. Vat fotopolimerizasyon yöntemi(Brandt, n.d.)

2.5. Ardıl İşlemler

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojilerinde kullanılan bazı yöntemler, üretim süreci sonrasında belirli ardıl işlemlerin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle Vat Fotopolimerizasyon (VP) yöntemiyle üretilen parçalar, mekanik özelliklerini optimize edebilmek amacıyla yıkama ve kürleme gibi ardıl işlemlerden geçirilmektedir. Bu işlemlerin süresi ve uygulanma şekli, parçanın yüzey kalitesi ve mekanik performansı üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir.

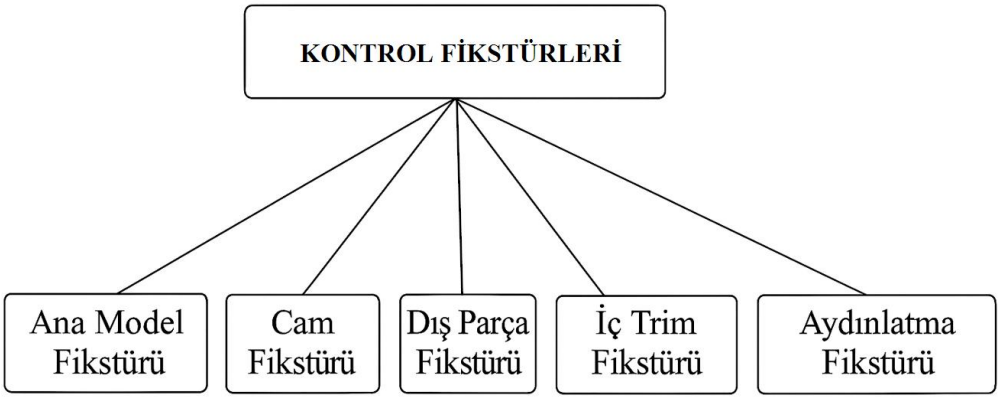
VP yöntemindeki tipik post-proses adımları dört ana başlık altında toplanabilir: yapıdan ayırma, temizleme, kürleme (post-polimerizasyon) ve destek yapıların çıkarılması. İlk aşamada, üretilen parça yapı platformundan fiziksel olarak ayrılır. Ardından, parçanın yüzeyinde kalan kürlenmemiş reçine, izopropil alkol (IPA) gibi organik çözücülerle temizlenir.(Marasli et al., 2024)

2.5.1 Kürleme

Nowacki'nin çalışmasında elde edilen bulgulara göre, post-kürleme süresinin artması, numunelerin çekme ve eğilme mukavemetleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Süre uzadıkça numune içerisindeki yapısal homojenlik azalmakta; dış yüzeydeki sertlik iç bölgelere oranla daha fazla artış göstermektedir. Bu durum, toplam mukavemeti doğrudan düşürmese de eğilme mukavemetinin çekme mukavemetine göre daha fazla artmasına neden olmaktadır. Yüzey kalitesi açısından ise, kürleme işlemi özellikle ilk 30 dakika içerisinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Ancak bu sürenin aşılması halinde, yüzeyde düzensiz kabartılar oluşmakta ve ek bir kalite artışı gözlemlenmemektedir. Dolayısıyla, post-proses parametrelerinin optimize edilmesi, SLA ile üretilen parçaların hedeflenen mekanik özellikleri taşıması açısından kritik bir öneme sahiptir. (Nowacki et al., 2021)

2.6. Kontrol Fikstürleri

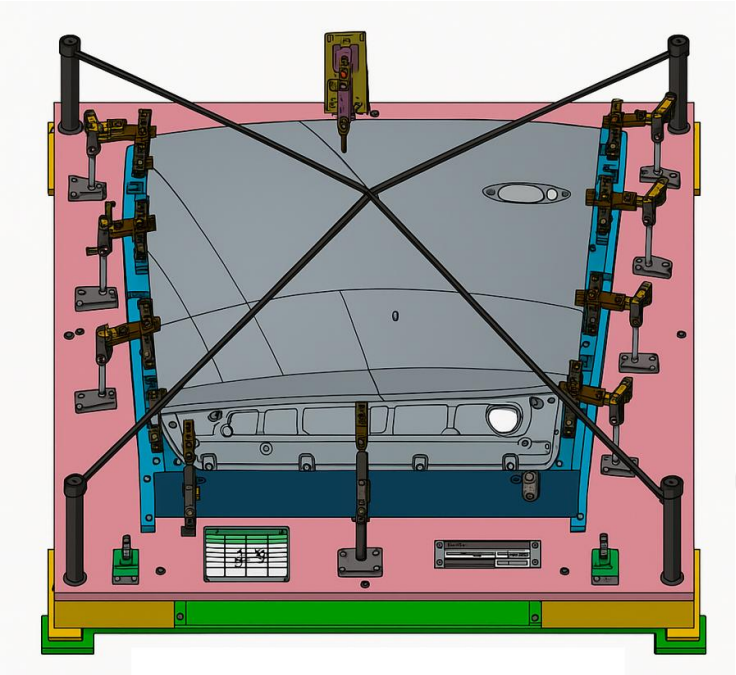
Kontrol fikstürleri, kontrol edilecek parça türüne bağlı olarak farklı amaçlara hizmet edecek şekilde sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi ana model fikstürü, araç üzerindeki tüm panel geometrilerinin ana referans modeli olarak görev yaparken; cam fikstürü, ön, arka ve yan cam gibi şeffaf parçaların kontur ve oturma boşluklarının doğrulanması amacıyla kullanılmaktadır. Dış parça fikstürü, kaput, çamurluk ve tampon gibi dış sac parçalarının form ve pozisyon kontrolünü gerçekleştirmek üzere tasarlanır. Kapı fikstürü, araç kapılarının menteşe bağlantıları, cam kanalları ve kilit sistemleri dahil olmak üzere hem iç hem de dış yüzey ölçümleri için kullanılmaktadır. İç trim fikstürü, gösterge paneli, kapı iç döşemesi ve konsol gibi iç plastik parçaların ölçüsel kontrolü için tercih edilirken; aydınlatma fikstürü, far, stop lambası ve sinyal grubu gibi optik elemanların montaj pozisyonu ve açı kontrolünü sağlamak üzere özel olarak geliştirilmiştir.



Şekil 2.5. Kontrol fikstürü türleri

Tipik bir kontrol fikstürü, üç temel işlevi yerine getirmelidir: konumlandırma, sıkıştırma ve kontrol etmektir. Bu işlevlere karşılık gelen en az dört temel bileşen, her kontrol fikstüründe yer alır: konumlandırıcılar, sıkıştırıcılar, kontrol elemanları ve diğer tüm elemanların yerleştirildiği çalışma tablasıdır.

Şekil 2.6’da bir ön kapı dış sacının kontrol fikstürü gösterilmektedir. Bu fikstürde, çalışma tablası kontrol edilecek parçanın konum ve yönüne göre belirlenmiştir. Konumlandırıcılar, parçanın statik denge durumuna getirilmesini sağlar ve böylece tüm serbestlik dereceleri ortadan kaldırılır. Sıkıştırıcılar, parçanın konumlandırıcılara karşı sabitlenmesi için kullanılır. Kontrol elemanları ise tüm işlevsel bileşenler arasında en önemli olanlarıdır ve parçanın niteliksel veya niceliksel olarak kontrol edilmesini sağlar.



Şekil 2.6. Sac parça kontrol fikstürü

2.6.1. Kontrol Fikstürlerinde Kullanılan Malzemeler

Geleneksel yöntemlerle üretilen kontrol fikstürlerinde yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında alüminyum ve Cibatool gibi model levhalar yer almaktadır. Bu malzemelerin tercih edilmesindeki temel neden, yüksek işlenebilirlik özellikleri ve CNC tezgâhlarında karmaşık geometrilere sahip parçaların hassas bir şekilde üretilebilmesine olanak tanımalarıdır. Alüminyumun hafifliği, fikstürlerin ergonomik taşınabilirliğini artırırken; Cibatool gibi poliüretan esaslı malzemelerin boyutsal kararlılığı, ölçüm doğruluğunu destekleyen önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

2.6.2. Kontrol Fikstürlerinde Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri

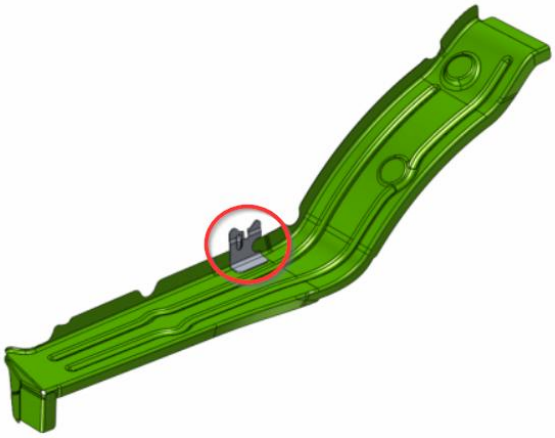
Mathi'nin çalışmasında, lazer şok peklemesi (LSP) uygulanmış Al5083 numunelerinde elde edilen maksimum 127.5 HV Vickers sertliği ile karşılaştırıldığında, bu tez kapsamında kullanılan polimer esaslı reçinelerin daha düşük mekanik dayanım gösterdiği görülmektedir. Örneğin, deneylerde kullanılan reçineler arasında en yüksek sertlik değeri yaklaşık 89.9 Shore D ile Tough 1500 reçinesine ait olup, bu değer metallerin mikroyapısal sertlik seviyelerine göre sınırlı kalmaktadır. Bu farklılık, polimer esaslı malzemelerin doğal yapısından kaynaklanmakta olup, Shore D testinin esasen yüzey sertliğini değerlendirmesi nedeniyle, iç mekanik özelliklerle doğrudan karşılaştırma yapılmasında dikkatli olunması gerekmektedir.(Mathi et al., 2025)

Buna ek olarak, Janusz Musiał'nın yaptığı çalışmada, alüminyum malzemelere alternatif olarak değerlendirilen Cibatool BM serisi malzemelerin sertlik değerleri raporlanmıştır. Bu çalışmada, Cibatool® BM5005 için 68 Shore D, BM5272 ve BM5168 malzemeleri için ise 85 Shore D sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu bulgular, Cibatool® malzemelerinin kontrol fikstürlerinde yapısal stabilite ve yeterli yüzey sertliği sağlama açısından uygun alternatifler olabileceğini göstermektedir.(Musiał et al., 2020)

Dr. Thomas H. Pang'ın gerçekleştirdiği çalışmada, Cibatool SL 5081-1 ve SL 5131 malzemelerin mekanik özelliklere, çekme testlerinin ASTM D638 ve eğilme testlerinin ASTM D790 standardına göre gerçekleştirildiği rapor edilmiştir. Bu kapsamda, SL 5081-1 ve SL 5131 reçineleri, yaklaşık 49,6–79,3 MPa aralığındaki değerleriyle en yüksek çekme mukavemetini göstermiştir. Buna karşılık, üretan-akrilat bazlı reçineler hem çekme hem de eğilme açısından en düşük dayanım seviyelerine (~34,5 MPa) sahiptir.
SL 5170 ve SL 5180 epoksi bazlı reçineler, çekme dayanımı açısından orta düzeyde performans sergilemekte (yaklaşık 41,4–62,1 MPa) olup, bu değerler akrilik plastiklerle benzerlik göstermektedir. Eğilme mukavemeti açısından ise epoksi bazlı reçinelerin, çekme mukavemetlerine kıyasla daha üstün performans sergilediği görülmektedir. Örneğin, SL 5180 reçinesinin eğilme dayanımı 87,6 MPa iken, çekme dayanımı yalnızca 42,1 MPa'dır. Benzer şekilde, SL 5170 reçinesi yaklaşık %80 artış ile 107,6 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. (Pang, n.d.)

2.7. Parçanın Kullanım Alanı ve Görsel Sunumu

Tez kapsamında incelenen parça, bir ana sanayi firmasında güçlendirme braketi olarak kullanılmakta olup, ilgili parça ticari panelvan tipi bir araçta görev yapmaktadır. Parçanın sanal ortam modeli ve gerçek araç üzerindeki uygulaması sırasıyla Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de sunulmuştur.



Şekil 2.7. İncelenen parçanın sanal ortam modeli



Şekil 2.8. Ticari panelvan araç üzerindeki konumu

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, farklı malzeme türleri ve üretim parametreleri kullanılarak elde edilen numuneler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın amacı, eklemeli imalat ile üretilen kontrol fikstürlerinin çekme, eğilme ve sertlik gibi temel mekanik özelliklerini incelemek ve bu çıktıları üretim parametreleriyle ilişkilendirmektir.

3.1. Sla İle Üretilen Malzemelerin Parametre Optimizasyonu

Üretim sürecinde üç temel kontrol parametresi değerlendirmeye alınmıştır: malzeme türü, katman kalınlığı ve kürleme süresi. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler; Tough 2.0 fotopolimer reçinesi, Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Standart reçine olmak üzere üç farklı türde seçilmiştir. Bu malzemeler, farklı mekanik ve işlenebilirlik özelliklerine sahip olup, üretim yöntemi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla tercih edilmiştir. Katman kalınlığı parametresi, üretim hassasiyetini ve yüzey kalitesini etkileyen önemli bir faktör olarak 0.01 mm, 0.03 mm ve 0.05 mm seviyelerinde uygulanmıştır. Kürleme süresi ise, üretim sonrası uygulanan ardıl işlem kapsamında ele alınmış olup, numunelere sırasıyla 20, 40 ve 60 dakika süreyle ultraviyole (UV) ışık altında kürleme işlemi uygulanmıştır. Bu sürelerin, fotopolimer malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak hedeflenmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı Reçine Tipleri, Katman Kalınlıkları ve Kürleme Sürelerine Göre Deneysel Girdi Parametreleri

Proses Parametreleri (Faktörler)	**Birim**	**Seviye**		
		1	**2**	**3**
Katman Kalınlığı	**mm**	0,01	0,03	0,05
Kürleme Süresi	**dk**	20	40	60
Malzeme		Standart Reçine	ABS Like Pro	Tough 2.0

Çalışmada kullanılan deney düzenekleri, reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresi olmak üzere üç temel parametrenin farklı kombinasyonlarıyla oluşturulmuş ve bu düzeneklere ait detaylı dağılım Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı Reçine Tipleri, Katman Kalınlıkları ve Kürleme Sürelerine Göre Deney Düzenekleri

Deney No	Reçine Tipi	Kalınlık	Kürleme Süresi
1	Standart Reçine	0,01	20
2	Standart Reçine	0,01	40
3	Standart Reçine	0,01	60
4	Standart Reçine	0,03	20
5	Standart Reçine	0,03	40
6	Standart Reçine	0,03	60
7	Standart Reçine	0,05	20
8	Standart Reçine	0,05	40
9	Standart Reçine	0,05	60
10	ABS Like Pro-2	0,01	20
11	ABS Like Pro-2	0,01	40
12	ABS Like Pro-2	0,01	60
13	ABS Like Pro-2	0,03	20
14	ABS Like Pro-2	0,03	40
15	ABS Like Pro-2	0,03	60
16	ABS Like Pro-2	0,05	20
17	ABS Like Pro-2	0,05	40
18	ABS Like Pro-2	0,05	60
19	Tough 2.0	0,01	20
20	Tough 2.0	0,01	40
21	Tough 2.0	0,01	60
22	Tough 2.0	0,03	20
23	Tough 2.0	0,03	40
24	Tough 2.0	0,03	60
25	Tough 2.0	0,05	20
26	Tough 2.0	0,05	40
27	Tough 2.0	0,05	60

3.2. Lazer Tarama Geometrik Doğruluk Ölçümü

Numunelerin boyutsal doğruluğu, ATOS 3D optik tarama sistemi ile analiz edilmiştir. Bu sistem, yüksek hassasiyetli yüzey tarama teknolojisi sayesinde CAD model ile üretilen parçayı karşılaştırarak, yüzey sapmaları ve ölçüsel bozulmaları tespit etmektedir Bu ölçüm tekniği, özellikle hassas toleranslı parçaların kalite kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Atos tarama cihazı

3.3. CMM Geometrik Doğruluk Ölçümü

Kontrol fikstürlerinin imalat sonrası doğruluğu, kalite kontrol süreçlerinin temel bileşenlerinden biridir. Bu doğruluk, genellikle Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM) kullanılarak değerlendirilir. CMM sistemleri, parçaların üç boyutlu fiziksel geometrisini yüksek hassasiyetle ölçerek, belirlenen toleranslara uygunluğunu doğrulamak amacıyla kullanılmaktadır.CMM; mekanik sistem, ölçüm probu ve bilgisayar destekli yazılımdan oluşur. Ölçüm işlemi, probun X, Y ve Z eksenlerinde hareket ettirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu doğrultuda tasarlanmış bir kontrol fikstürü, 3B CAD modeliyle uyumlu hassas koordinatlar üretmeli ve parçayı doğru konumda sabitlemelidir.

Otomotiv sektöründe, artan rekabet ve tasarım karmaşıklığı nedeniyle kalite kontrol kritik bir role sahiptir. Kontrol fikstürleri, üretimin çeşitli aşamalarında parçaların ölçüsel ve konumsal doğruluğunu sağlamak amacıyla kullanılan, sürece özel olarak tasarlanmış araçlardır. Bu sayede tekrarlanabilir ve güvenilir kalite güvence süreçleri oluşturulmaktadır.(Hanandita et al., 2023)

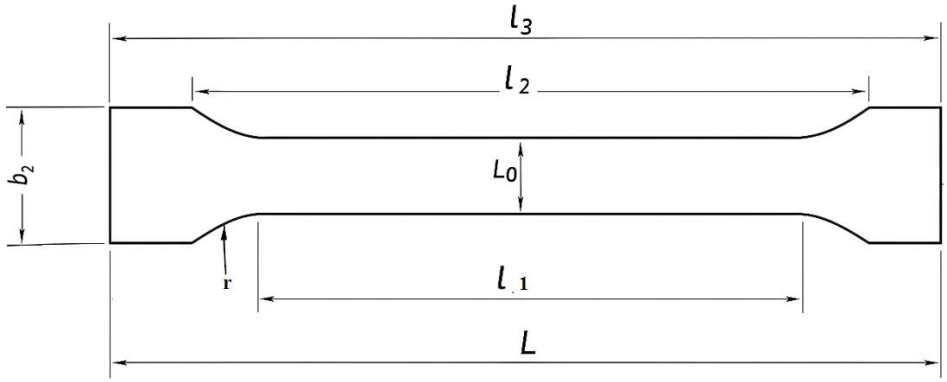


Şekil 3.2. CMM ile bir sac parça ölçümü

3.4. Çekme Test Numunesi Standardı

Çekme dayanımı testleri, numunelerin eksenel doğrultuda uygulanan çekme kuvveti karşısındaki davranışlarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testler, ISO 527 standardı temel alınarak yürütülmüştür. ISO 527, plastik ve kompozit malzemelerin çekme özelliklerini belirlemeye yönelik uluslararası kabul görmüş bir standarttır. Bu standarda göre yapılan testlerde, numuneler sabit bir hızda çekilmekte ve kopma noktasına kadar olan süreçteki maksimum gerilme değeri, elastik modül, kopma uzaması gibi mekanik parametreler hesaplanmaktadır (ISO, 2012).

Testlerde kullanılan numuneler, ISO 527-2 standardında tanımlı olan Tip 1A geometrisine uygun olarak hazırlanmıştır. Bu numune tipi, enjeksiyon kalıplama ile elde edilen malzemeler için standartlaştırılmış olup, 75 mm ölçü uzunluğuna ve 10 mm genişliğe sahiptir. Test sürecinde numuneler, üniversal çekme test cihazına yerleştirilmiş ve standartta belirtilen çapraz kafa hızı ile çekilerek veriler kaydedilmiştir.



Şekil 3.3. Çekme çubuğu ölçüleri

Çizelge 3.3. Tip 1A Çekme Numune Boyutları (ISO 527-2:2012)

Özellik	Değer (mm)
Toplam uzunluk (l_3)	170
Dar paralel bölüm uzunluğu (l_1)	80 ± 2
Geniş uçlar arası mesafe (l_2)	109.3 ± 3.2
Uç genişliği (b_2)	20.0 ± 0.2
Dar bölüm genişliği (b_1)	10.0 ± 0.2
Kalınlık (h)	4.0 ± 0.2
Ölçü uzunluğu (L_o)	75.0 ± 0.5
Çene arası mesafe (L)	115 ± 1
Geçiş yarıçapı (r)	24 ± 1

Çekme testleri, ISO 527-2 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, ölçümler Şekil 3.4'de gösterilen Zwick Roell çekme testi cihazı kullanılarak alınmıştır. Bu cihaz, numune üzerine kontrollü ve sabit hızda yük uygulayarak malzemenin maksimum çekme dayanımını belirlemeye olanak sağlamaktadır.

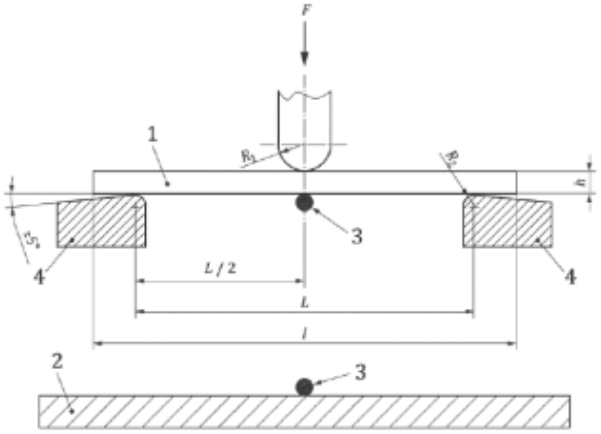


Şekil 3.4. Çekme test düzeneği

3.5. Eğilme Test Numunesi Standardı

Üç nokta eğilme testleri, numunelerin bükülme direncini belirlemek amacıyla DIN EN ISO 178 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu test yöntemi, plastik ve kompozit yapıdaki malzemelerin elastik ve kırılma davranışlarını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (ISO, 2019).

Testte, numune iki destek noktasına yerleştirilmiş ve ortasından tek bir yük uygulanarak eğilme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Yükleme hızı, malzeme türüne ve numune boyutlarına uygun olarak belirlenmiş olup, maksimum eğilme mukavemeti ve eğilme modülü hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, özellikle katkılı üretimle imal edilen parçaların rijitlik ve dayanım karakteristiklerinin değerlendirilmesi açısından önemli veriler sunmaktadır.



Şekil 3.5. Eğilme testi şablonu

Eğilme testleri, DIN EN ISO 178 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiş olup, ölçümler Şekil 3.6'da gösterilen Zwick Roell test cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Aynı cihaz, üç nokta eğilme düzeneği ile numune üzerine uygulanan yükü kontrollü biçimde ileterek, malzemenin eğilme dayanımının hassas şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.6. Eğilme test düzeneği

3.6. Sertlik Test Numunesi Standardı

Malzemelerin yüzey sertliği, ASTM D2240-15 standardı kapsamında Shore D skalasında belirlenmiştir. Shore D yöntemi, orta-yüksek sertlikteki plastiklerin ve sert reçinelerin sertlik seviyelerini değerlendirmede tercih edilmektedir (ASTM, 2015).

Her numunede üç farklı noktadan ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması nihai sertlik değeri olarak kaydedilmiştir. Test sırasında, ölçüm ucu numune yüzeyine dik olarak temas ettirilmiş ve belirli bir sürede (tipik olarak 1 saniye) ölçüm tamamlanmıştır. Shore D sertlik ölçümleri, standartlara uygun olarak belirli bir baskı kuvveti ve temas süresi altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, altta Şekil X'te gösterilen dijital Shore D sertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri, üretim parametrelerinin malzemenin yüzey dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koymak açısından referans kabul edilmiştir.



Şekil 3.7. Shore D sertlik testi cihazı

3.7. Taguchi Yöntemi

Taguchi teknikleri, mühendislik tasarımlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi, sağlam bir süreç ve en iyi ürün kalitesini elde etmek amacıyla sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamadan oluşur. Bu yöntemin temel odağı, kalite karakteristiklerini en uygun seviyelerde ve minimum varyasyonla sağlayacak faktör ayarlarının belirlenmesini amaçlayan parametre tasarımıdır.

Taguchi deney tasarımları, farklı koşullar altında tutarlı ve optimum performans sergileyen süreçler tasarlamak için güçlü ve etkili bir yöntem sunar. En iyi tasarım kombinasyonunu belirlemek için süreç, farklı seviyelerdeki parametrelere maruz bırakılarak stratejik olarak planlanmış deneyler yürütülmelidir.

Deney tasarımı teknikleri 20. yüzyılın başlarında geliştirilmiş ve istatistikçiler tarafından kapsamlı şekilde incelenmiştir. Ancak bu yöntemler, uygulayıcılar açısından kolay anlaşılır olmaktan uzaktı. Taguchi'nin yaklaşımı ise istatistik bilgisi sınırlı kullanıcılar tarafından dahi kolaylıkla uygulanabilir olması nedeniyle mühendislik ve bilim camiasında yaygın şekilde benimsenmiştir.(Kumar et al., n.d.)

Taguchi, kalite karakteristiklerini üç ana grupta sınıflandırmıştır:

Sinyal-Gürültü (S/N) oranı, Taguchi yönteminin temel bir unsuru olup, sistem performansını farklı hedeflere göre değerlendirmek için kullanılır. Daha küçük olması daha iyi prensibiyle çalışan durumlar (Denklem 3.1) için, örneğin takım aşınması gibi minimize edilmesi gereken olumsuz çıktıların en aza indirilmesi amaçlanır. Buna karşılık, çıktı değerinin belirli bir hedefte olması ve minimum varyasyonla gerçekleşmesi gereken durumlar (Denklem 3.2 ve 3.3) için farklı bir S/N oranı kullanılır; bu, montaj parçalarının uygunluğu gibi uygulamalarda hem doğruluk hem de tutarlılık arayışını temsil eder. Bu formüller, bir sürecin sağlamlığını ve belirlenen kalite standartlarına ne kadar etkili bir şekilde ulaştığını niceliksel olarak ifade eder.

Daha büyük olması daha iyidir (örneğin, kesici takım ömrü) (3.1)

$$S/_N = -10.\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right)$$

Daha küçük olması daha iyidir (örneğin, kesici takım aşınması) (3.2)

$$S/_N = -10.\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right)$$

Hedef değerde ve minimum varyasyonla olması gerekir (örneğin, montaj parçalarının uygunluğu) (3.3)

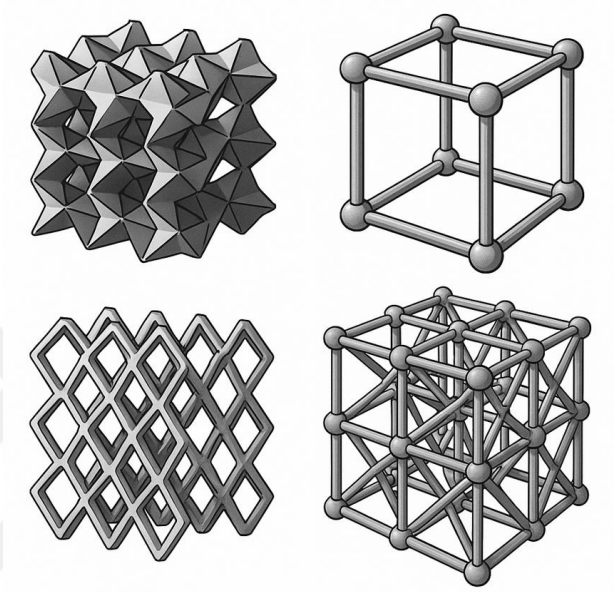
$$S/_N = 10.\log\left(\frac{\overline{y}}{s^2}\right)$$

3.8. Kafes Yapılar

Kafes yapılar, düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım ve sertlik gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, biyomedikal ve mekanik mühendislik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kafes yapılar, hücresel malzemeler sınıfına dâhil olup; köpük ve petek yapılardan farklı olarak birim hücre topolojisi, geometrik ölçeklenebilirlik ve özelleştirilebilirliği ile öne çıkar.

Köpükler rastgele şekillere sahip gözenekli yapılarken, petek yapılar düzenli ve sabit hücre geometrilerine sahiptir. Kafes yapılar ise kenar ve yüzeylerden oluşan uzaysal birim hücrelerin düzenli dizilimiyle oluşur. Bu mimari yapı, sadece yüksek mekanik performans sağlamakla kalmaz, aynı zamanda her bir hücrenin veya strut'un ayrı ayrı tasarım değişkeni olarak optimize edilebilmesine olanak tanır.

Son çalışmalar, kafes yapıların, uygun şekilde tasarlandığında basma ve kesme dayanımı açısından köpük ve petek yapılardan daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, modern mühendislik uygulamalarında hem hafiflik hem de dayanım gereksinimlerini karşılamak için kafes yapılar giderek daha fazla tercih edilmektedir.(Pan et al., 2020)

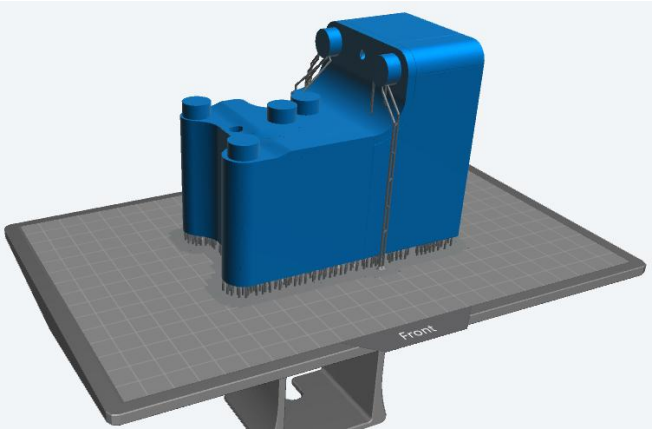


Şekil 3.8. Farklı topolojilere sahip kafes yapısı örnekleri

3.9. Tasarım ve Üretim Öncesi Hazırlık Süreci

Parça tasarım sürecinde CAD tabanlı modelleme için SolidWorks yazılımı tercih edilmiştir. Kafes (lattice) yapılarının oluşturulması ve topolojik optimizasyon işlemleri ise Altair Inspire programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen geometrilerin üretim öncesi dilimleme işlemleri, Chitubox adlı dilimleme(slicer) yazılımı aracılığıyla yapılmış ve yazdırma dosyaları üretim sürecine uygun şekilde hazırlanmıştır.

Kafes yapılı kontrol fikstürü gövdesi, Chitubox yazılımı aracılığıyla yapı platformuna 90° açıyla yerleştirilmiştir. Bu konumlandırma, destek yapıların parçanın üst yüzeyinde iz bırakmasını önlemekte ve yüzey kalitesinin korunmasını sağlamaktadır. Destek yapılarına ilişkin düzenleme Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Kontrol fikstürü gövdesinin konumlandırılması ve destek yapı tasarımı

3.10. Numunelerin Üretilmesi

Çekme, eğilme ve sertlik testleri için gerekli numuneler, reçine bazlı katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan Vat Fotopolimerizasyon tekniğiyle, Creality markasına ait Photon Mono X model 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Bu cihaz, 405 nm dalga boyunda UV ışık kaynağına sahip olup, 192 × 120 × 245 mm baskı hacmi sunmakta ve 4K (3840 × 2400 piksel) monokrom LCD ekranı sayesinde yüksek çözünürlükte ve kısa süreli kürleme ile hassas üretim imkânı sağlamaktadır. Cihaz, 0.01 – 0.15 mm arası ayarlanabilir katman kalınlığı ve ortalama 60 mm/s baskı hızıyla çalışmaktadır.



Şekil 3.10. Anycubic photon mono x

3.11. Kürleme ve Yıkama Prosesi

Çekme, eğilme ve sertlik test numuneleri, reçine bazlı katmanlı imalat yöntemi olan Vat Fotopolimerizasyon tekniğiyle, 4K çözünürlüklü monokrom LCD ekranı ve 405 nm UV ışık kaynağına sahip Creality Photon Mono X cihazı kullanılarak üretilmiştir. Üretim sonrasında, yüzeydeki fazla reçinenin uzaklaştırılması amacıyla numunelere izopropil alkol (IPA) ile yıkama işlemi uygulanmış, ardından mekanik özelliklerin stabilize edilmesi için Creality Wash & Cure Station cihazı ile 405 nm UV ışığı altında post-kürleme gerçekleştirilmiştir."



Şekil 3.11. Creality kürleme ve yıkama makinesi

3.12. Reçine İçeriği ve Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan reçineler, Anycubic marka reçinelerden seçilmiştir. Kullanılan reçinenin temel kimyasal bileşimi yaklaşık olarak %30–60 oranında poliüretan akrilat, %10–40 oranında akrilat monomer ve %2–5 oranında fotobaşlatıcıdan oluşmaktadır. Poliüretan akrilat, reçinenin mekanik dayanımını ve esnekliğini artıran çapraz bağlanabilir bir oligomer olarak görev yaparken; akrilat monomer, viskoziteyi düşürerek akışkanlığı ve kürleme hızını iyileştiren düşük moleküllü bir bileşen olarak işlev görmektedir. Fotobaşlatıcı ise UV ışığı altında polimerizasyonu başlatan ve sertleşmeyi sağlayan temel bileşendir. Bu bileşim, hem mekanik performans hem de işlenebilirlik açısından dengelenmiş bir reçine sistemi oluşturmak amacıyla optimize edilmiştir.(Anonim,2025)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, Stereolitografi (SLA) yöntemiyle imal edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen mekanik testlerin sonuçları değerlendirilmiştir. Üç farklı reçine türü (Standart Reçine, ABS-like Pro2 Reçine, Tough Resin 2.0), üç farklı katman kalınlığı (0.01 mm, 0.03 mm, 0.05 mm) ve üç farklı kürleme süresi (20 dk, 40 dk, 60 dk) dikkate alınarak toplam 27 adet numune üretilmiş ve Taguchi L27 ortogonal deney tasarımı uygulanmıştır. Üretilen numunelere sırasıyla çekme, üç nokta eğilme ve Shore D sertlik testleri uygulanmış, elde edilen tüm test sonuçları sistematik biçimde analiz edilerek Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Mekanik testler, ilgili uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir: Çekme testleri ISO 527 standardına göre evrensel test cihazında, eğilme testleri DIN EN ISO 178 standardına göre üç nokta eğilme düzeneğiyle, sertlik testleri ise ASTM D2240-15 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler doğrultusunda, çekme mukavemeti üzerinde en belirgin etkiye sahip faktörün reçine tipi olduğu belirlenmiş; bu faktörü sırasıyla kürleme süresi ve katman kalınlığı izlemiştir.

Özellikle ABS-like Pro2 reçinesiyle üretilen numunelerde, Standart Reçine ve Tough Resin 2.0 reçineleriyle üretilenlere kıyasla daha yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu durum, reçinelerin iç yapısı ve ışıkla kürlenme davranışlarıyla ilişkilendirilmektedir.

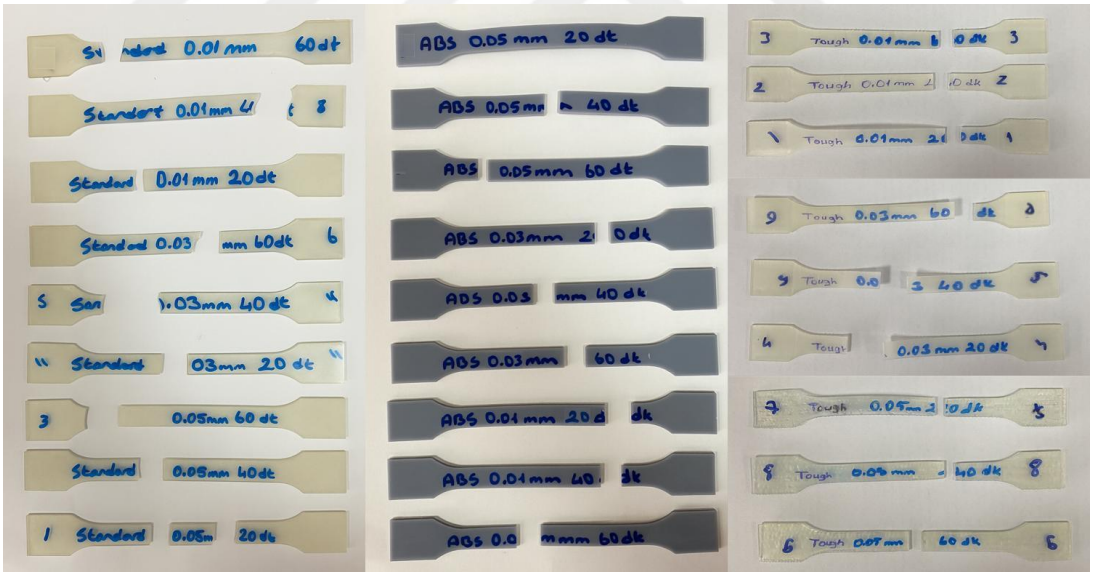
Çizelge 4.1. Farklı reçine tipleri, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre eğilme ve çekme dayanımı sonuçları

Reçine Tipi	Kalınlık (mm)	Kürleme Süresi (dk)	Çekme Mukavemeti [N/mm²]	Eğilme Mukavemeti [N/mm²]	Sertlik (Shore D)
Standart Reçine	0,01	20	24,9	49,83	68
Standart Reçine	0,01	40	41	85,74	73
Standart Reçine	0,01	60	48,49	78,05	72
Standart Reçine	0,03	20	22,3	58,82	71
Standart Reçine	0,03	40	33,77	67,54	72
Standart Reçine	0,03	60	38,09	62,53	74
Standart Reçine	0,05	20	15,67	63,28	77
Standart Reçine	0,05	40	22,79	71,01	74
Standart Reçine	0,05	60	21,15	85,55	73
ABS Like Pro-2	0,01	20	48,22	70,91	77
ABS Like Pro-2	0,01	40	49,85	71,65	76
ABS Like Pro-2	0,01	60	52,6	75,62	74
ABS Like Pro-2	0,03	20	42,14	66,51	77
ABS Like Pro-2	0,03	40	46,57	65	78
ABS Like Pro-2	0,03	60	49,16	65,7	79
ABS Like Pro-2	0,05	20	29,89	62,28	81
ABS Like Pro-2	0,05	40	43,84	62,95	80
ABS Like Pro-2	0,05	60	50,06	67,5	79
Tough 2.0	0,01	20	29,99	37,05	68
Tough 2.0	0,01	40	37,94	55,56	71
Tough 2.0	0,01	60	40,28	57,3	75
Tough 2.0	0,03	20	26,23	37,96	78
Tough 2.0	0,03	40	30,74	47,54	76
Tough 2.0	0,03	60	34,12	55,84	73
Tough 2.0	0,05	20	32,66	40,1	66
Tough 2.0	0,05	40	35,62	43,43	69
Tough 2.0	0,05	60	41,29	45,11	69

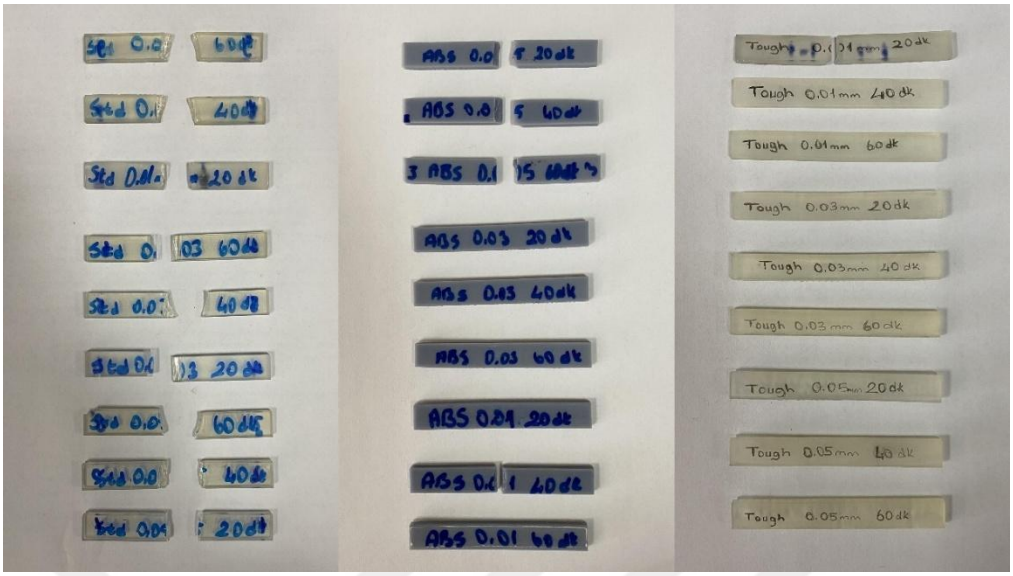
Çizelge 4.1’de yer alan tüm kombinasyonlara karşılık gelen test numuneleri Şekil 4.1.’de ve Şekil 4.2.’de görsel olarak sunulmuştur. Şekil 4.1’de farklı reçinelerle hazırlanmış eğilme testi numuneleri, Şekil 4.2’de ise aynı parametre kombinasyonlarına sahip çekme testi numuneleri yer almaktadır.

Görsellerde, numunelerin üretim sonrası bütünlükleri, baskı kaliteleri ve etiketlemeleri net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Bu numuneler, ilgili testlere tabi tutulmadan önce boyutsal ve görsel olarak kontrol edilmiş ve ardından standartlara uygun biçimde test süreçlerine dâhil edilmiştir.

Ek olarak, üç nokta eğilme testlerinde kullanılan tüm numuneler, eğilme testinin ardından aynı zamanda Shore D sertlik testinde de değerlendirilmiştir. Böylelikle hem elastik hem de yüzeysel mekanik performans ölçümleri aynı numuneler üzerinden elde edilerek, malzeme karakterizasyonu daha bütüncül bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı reçine türlerinde (Standart, ABS, Tough) ve aynı baskı parametrelerinde üretilen eğilme testi numuneleri



Şekil 4.2. Farklı reçine türlerinde (Standart, ABS, Tough) ve aynı baskı parametrelerinde üretilen eğilme testi numuneleri

Taguchi analizinde hesaplanan sinyal/gürültü (S/N) oranlarına göre "larger is better" kriteri dikkate alınmış, böylece çekme dayanımı yüksek olan deney kombinasyonları öncelikli olarak değerlendirilmiştir. S/N oranlarına göre yapılan sıralama, faktörlerin çekme dayanımına katkı oranlarını da ortaya koymuştur. Ortalama yanıt değerleri ve varyans analizi (ANOVA) sonuçları da bu bulgularla paralel sonuçlar vermiştir.

Modelin açıklayıcılığı %80'in üzerinde gerçekleşmiş ve varyansın büyük bir kısmının deneyde tanımlanan üç ana faktörle açıklandığı görülmüştür. Regresyon analizleri de deneysel modelin istatistiksel anlamlılık taşıdığını göstermektedir.

4.1. Çekme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneylerde, farklı reçine tipleri (Standart Reçine, ABS Like Pro-2 ve Tough 2.0) ile katman kalınlıkları (0,01 mm, 0,03 mm, 0,05 mm) ve kürleme sürelerinin (20, 40, 60 dakika) çekme mukavemeti üzerindeki etkileri, Çizelge 4.2'de detaylı olarak sunulan deney düzeneği ve sonuçlarla incelenmiştir. Bu çizelge, parametrelerin mekanik performans üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Deneyler sonucunda, reçine tipinin çekme dayanımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmüş, özellikle ABS Like Pro-2 reçinesi yüksek performans

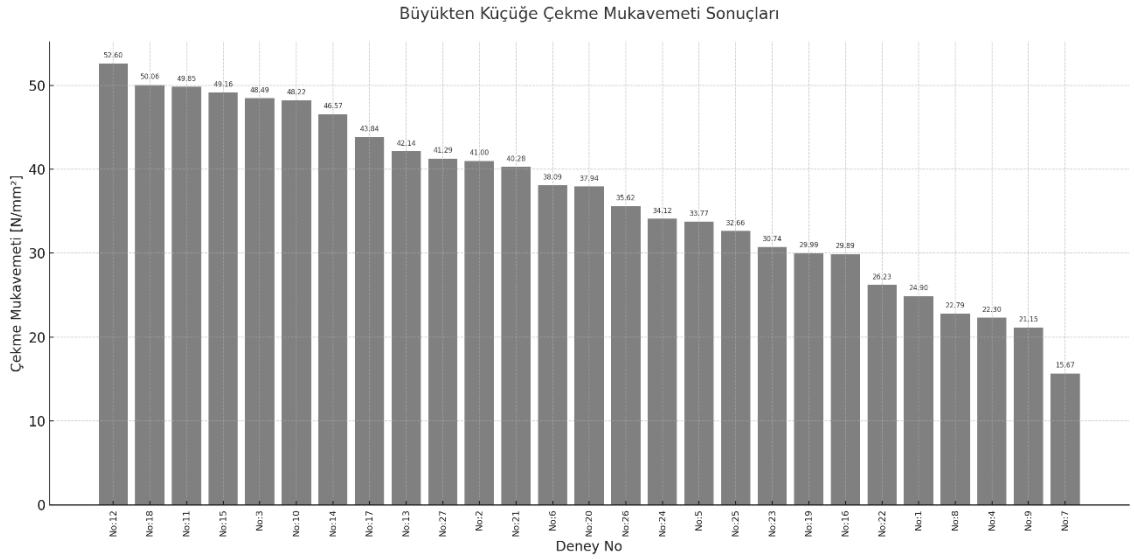
sergilemiştir. ABS Like Pro-2 grubunda en yüksek çekme mukavemeti değeri 52,60 N/mm² ile 0,01 mm kalınlık ve 60 dakika kürleme süresi kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu reçine tipi, tüm kalınlık ve sürelerde yüksek dayanım göstermiş; 0,03 mm – 60 dk koşulunda da 49,16 N/mm² değerine ulaşılmıştır. Genel olarak, kürleme süresi uzadıkça bu malzemede çekme dayanımı artış göstermiştir. Standart Reçine için elde edilen çekme mukavemeti değerleri, ABS Like Pro-2'ye kıyasla daha düşüktür. En yüksek değer 48,49 N/mm² ile 0,01 mm – 60 dk koşulunda elde edilmiş; özellikle 0,05 mm kalınlıkta ve 20 dakikalık sürede değer 15,67 N/mm² seviyesine kadar gerilemiştir. Bu durum, kalın katman ve yetersiz kürlemenin mekanik performansı düşürdüğünü göstermektedir. Tough 2.0 numuneleri ise dengeli ancak sınırlı bir aralıkta çekme dayanımı sunmuştur. En yüksek değer 40,28 N/mm² ile 0,01 mm – 60 dk kombinasyonunda elde edilmiştir. Tough reçinesi için en düşük değer 26,23 N/mm² olarak 0,03 mm – 20 dk kombinasyonunda ölçülmüş olup, kürleme süresi uzadıkça mukavemetin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Genel değerlendirme sonucunda, çekme dayanımı üzerinde en etkili parametrenin reçine tipi olduğu, bunu kürleme süresinin izlediği ve katman kalınlığının etkisinin malzemeye bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Özellikle ABS Like Pro-2, yüksek mukavemet değerleriyle en başarılı reçine tipi olarak öne çıkmıştır.

Çizelge 4.2. L27 Taguchi ortogonal deney düzeni kullanılarak farklı reçineler, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre elde edilen çekme mukavemeti sonuçları

Deney No	Reçine Tipi	Kalınlık (mm)	Kürleme Süresi (dk)	Çekme Mukavemeti [N/mm²]
1	Standart Reçine	0,01	20	24,9
2	Standart Reçine	0,01	40	41
3	Standart Reçine	0,01	60	48,49
4	Standart Reçine	0,03	20	22,3
5	Standart Reçine	0,03	40	33,77
6	Standart Reçine	0,03	60	38,09
7	Standart Reçine	0,05	20	15,67
8	Standart Reçine	0,05	40	22,79
9	Standart Reçine	0,05	60	21,15
10	ABS Like Pro 2	0,01	20	48,22
11	ABS Like Pro 2	0,01	40	49,85
12	ABS Like Pro 2	0,01	60	52,6
13	ABS Like Pro 2	0,03	20	42,14
14	ABS Like Pro 2	0,03	40	46,57
15	ABS Like Pro 2	0,03	60	49,16
16	ABS Like Pro 2	0,05	20	29,89
17	ABS Like Pro 2	0,05	40	43,84
18	ABS Like Pro 2	0,05	60	50,06
19	Tough 2.0	0,01	20	29,99
20	Tough 2.0	0,01	40	37,94
21	Tough 2.0	0,01	60	40,28
22	Tough 2.0	0,03	20	26,23
23	Tough 2.0	0,03	40	30,74
24	Tough 2.0	0,03	60	34,12
25	Tough 2.0	0,05	20	32,66
26	Tough 2.0	0,05	40	35,62
27	Tough 2.0	0,05	60	41,29

Şekil 4.3’de farklı reçine tipleri, katman kalınlıkları ve kürleme süreleri altında elde edilen çekme mukavemeti değerleri büyükten küçüğe sıralanarak gösterilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti, 52,6 N/mm² ile ABS-Like Pro 2 reçinesi (0,01 mm kalınlık, 60 dk kürleme süresi) numunesinde ölçülmüştür. ABS-Like Pro 2 reçineleri genel olarak en yüksek mukavemet değerlerine ulaşırken, Tough 2.0 ve Standart Reçine numuneleri daha düşük çekme mukavemeti göstermiştir. Katman kalınlığındaki artış ve kürleme sürelerinin kombinasyonu da sonuçlar üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Grafik, reçine tiplerinin ve işlem parametrelerinin çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.



Şekil 4.3. Çekme mukavemeti sonuçlarının büyükten küçüğe sıralanmış dağılımı

Çekme dayanımı üzerine yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları, modelin anlamlılığını ve açıklayıcılığını ortaya koymaktadır. ANOVA sonuçlarına göre, reçine tipi faktörü %44.51 katkı oranıyla çekme dayanımını en fazla etkileyen parametre olarak belirlenmiştir ($F = 22.42$, $p < .001$).

Bu bulgu, reçine yapısının mekanik özellikler üzerindeki belirleyici etkisini vurgulamaktadır. Kürleme süresi faktörü de %22.39 katkı oranı ve $p = .001$ değeri ile çekme dayanımına istatistiksel olarak anlamlı bir etki sağlamaktadır. Katman kalınlığı ise

%13.26 katkı oranı ve p = .006 değeri ile anlamlılığı sınırında bir etki göstermektedir. Deneysel hata payı %19.85 seviyesindedir ve bu, modelde tanımlanmamış küçük değişkenlerin etkisi olarak yorumlanabilir.

Modelin genel açıklayıcılığı oldukça yüksek düzeydedir. Toplam varyansın %80.15'i model tarafından açıklanabilmekte (R^2 = 80.15), ayarlanmış R^2 değeri %74.19'dur. Bu, modelin doğruluğunu ve parametrelerin uygun seçildiğini göstermektedir. Tahmin edilebilirlik oranı olan R^2(pred) ise %63.82 olup, bu değer modelin farklı veri kümelerine de genellenebilir olduğunu göstermektedir; bu bulguların tümü Çizelge 4.3'de detaylı biçimde sunulmaktadır.

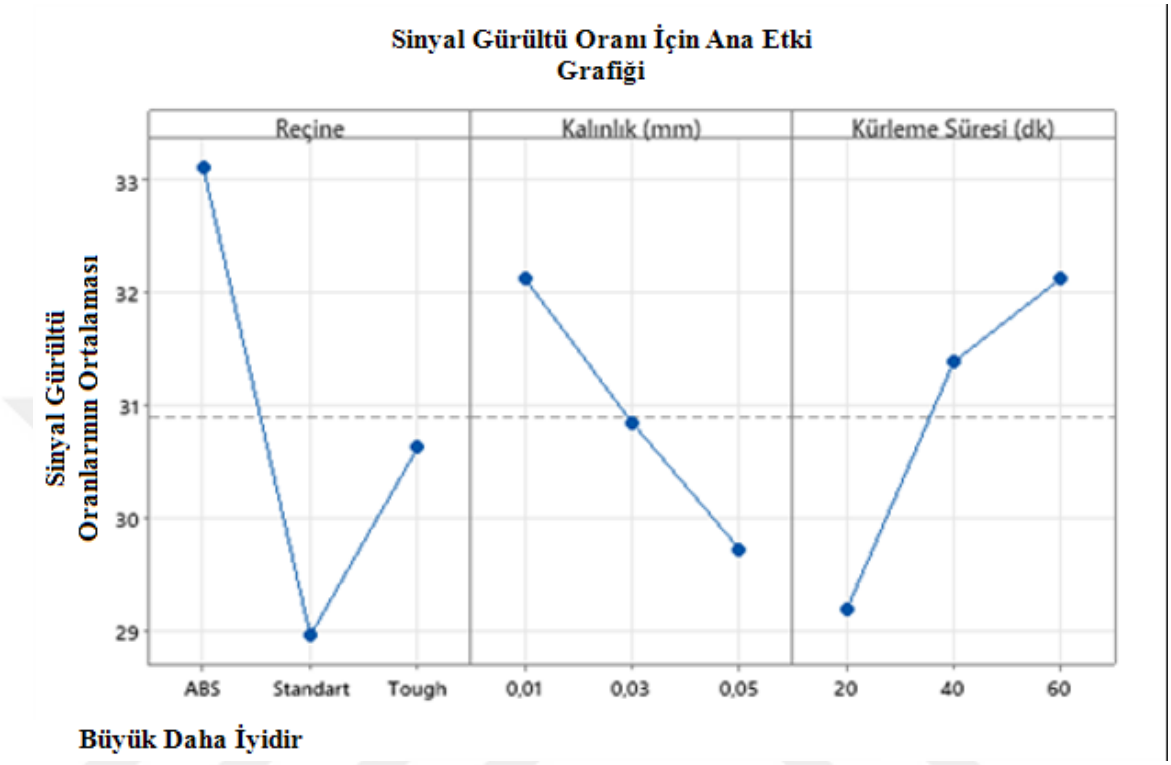
Çizelge 4.3. Çekme dayanımı için anova sonuçları (Taguchi L27)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p-Değeri
Malzeme	2	1227.6	44.51	1227.6	613.82	22.42	.000
Kalınlık (mm)	2	365.6	13.26	365.6	182.82	6.68	.006
Kürleme Süresi (dk)	2	617.5	22.39	617.5	308.75	11.28	.001
Hata	20	547.6	19.85	547.6	27.38		
Toplam	26	2758.4	100.00				

Şekil 4.4'te sunulan SN oranlarına ait ana etki grafiği, faktörlerin sinyal-gürültü performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. En yüksek SN ortalamasına sahip olan ABS reçinesi, çekme dayanımı açısından en kararlı ve güvenilir sonuçları vermiştir. Standart reçine, en düşük SN oranıyla istatistiksel açıdan en dengesiz sonuçları üretmiştir. Katman kalınlığı açısından bakıldığında, 0.01 mm kalınlık en yüksek SN değerine sahiptir ve kalınlık arttıkça kararlılık azalmaktadır.

Benzer şekilde, kürleme süresi de önemli bir etkiye sahiptir; 60 dakikalık kürleme en yüksek SN ortalamasını sağlamaktadır. Bu bulgular, çekme dayanımı açısından hem yüksek değerlerin hem de düşük varyansın, yani "larger is better" kriterine uygunluğun

ABS reçinesi, ince katman ve uzun kürleme süresi kombinasyonuyla sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.4. Çekme deneyine ait reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresine göre S/N oranı ana etki grafiği

Çalışmada farklı reçine tipleri, katman kalınlıkları ve kürleme süreleri dikkate alınarak elde edilen eğilme dayanımı sonuçları değerlendirilmiştir. Genel olarak, en yüksek ortalama değerler Standart Reçine ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Özellikle 0.01 mm katman kalınlığı ve 40–60 dakikalık kürleme süresi kombinasyonu ile 85,74 ve 85,55 N/mm² gibi yüksek eğilme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

ABS Like Pro-2 reçinesi, daha dengeli fakat biraz daha düşük değerler sunarken, Tough 2.0 reçinesi tüm deney kombinasyonlarında en düşük eğilme dayanımı sonuçlarını vermiştir. Bu durum, Tough reçinesinin yapısal olarak daha elastik ancak daha az rijit bir karakter taşıdığını göstermektedir.

Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere, kürleme süresi arttıkça eğilme dayanımında genel bir artış eğilimi gözlenmektedir. Benzer şekilde, kalınlığın azalması ve daha rijit reçinelerin kullanılması, dayanımı artıran faktörler olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, mekanik performansın hem malzeme seçimine hem de üretim parametrelerine duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.4. Çekme mukavemeti anova bulguları

Level	Reçine	Kalınlık (mm)	Kürleme Süresi (dk)
1	33,12	32,13	29,18
2	28,96	30,85	31,39
3	30,63	29,73	32,13
Delta	4,16	2,40	2,94
Rank	1	3	2

4.2. Eğilme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, eğilme mukavemeti üzerindeki etkileri araştırmak amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney düzenekleri ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Bu deneylerde, Standart Reçine, ABS Like Pro-2 ve Tough 2.0 gibi farklı reçine tipleriyle birlikte, 0,01 mm, 0,03 mm ve 0,05 mm olmak üzere değişen katman kalınlıkları ve 20, 40 ve 60 dakika gibi farklı kürleme süreleri kullanılmıştır.

Toplam 27 numune üzerinde yapılan testler, reçine tipi ve kürleme süresinin eğilme dayanımı üzerinde belirgin etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Standart Reçine, tüm kombinasyonlar arasında en yüksek eğilme dayanımını sağlamış; özellikle 0,01 mm kalınlık ve 40 dakika kürleme süresinde 85,74 N/mm², 0,05 mm kalınlık ve 60 dakikada 85,55 N/mm² değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, yeterli kürleme süresi ve uygun katman kalınlığının bu malzeme türü için optimal olduğunu göstermektedir.

ABS Like Pro-2 reçinesi, daha dengeli ancak daha sınırlı bir aralıkta değerler üretmiştir. En yüksek eğilme dayanımı 75,62 N/mm² ile 0,01 mm ve 60 dk koşullarında elde edilmiştir. Bu reçine için kürleme süresinin dayanımı doğrudan etkilediği, katman kalınlığının ise daha sınırlı bir rol oynadığı görülmektedir.

Tough 2.0 ise en düşük mukavemet değerlerine sahip reçine olmuştur. Özellikle 0,01 mm, 20 dk koşulunda 37,05 N/mm² ile en düşük değer ölçülmüştür. Ancak kürleme süresi arttıkça, özellikle 60 dakikada değerlerin belirgin şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir.

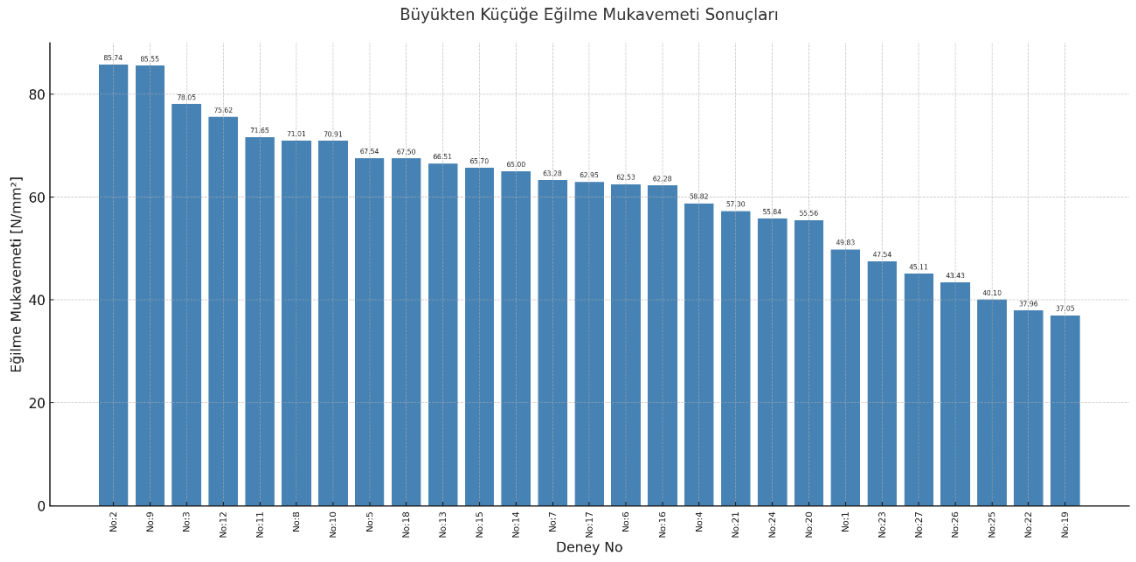
Sonuç olarak, deneysel veriler reçine tipi ve kürleme süresinin eğilme mukavemetine olan etkisinin daha baskın olduğunu, katman kalınlığının ise bu etkiyi destekleyici yönde çalıştığını ortaya koymaktadır. Doğru parametre seçimiyle özellikle Standart Reçine ile yüksek mekanik performans elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.5. L27 Taguchi ortogonal deney düzeni kullanılarak farklı reçineler, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre elde edilen eğilme mukavemeti sonuçları

Deney No	Reçine Tipi	Kalınlık (mm)	Kürleme Süresi (dk)	Eğilme Mukavemeti [N/mm²]
1	Standart Reçine	0,01	20	49,83
2	Standart Reçine	0,01	40	85,74
3	Standart Reçine	0,01	60	78,05
4	Standart Reçine	0,03	20	58,82
5	Standart Reçine	0,03	40	67,54
6	Standart Reçine	0,03	60	62,53
7	Standart Reçine	0,05	20	63,28
8	Standart Reçine	0,05	40	71,01
9	Standart Reçine	0,05	60	85,55
10	ABS Like Pro-2	0,01	20	70,91
11	ABS Like Pro-2	0,01	40	71,65
12	ABS Like Pro-2	0,01	60	75,62
13	ABS Like Pro-2	0,03	20	66,51
14	ABS Like Pro-2	0,03	40	65
15	ABS Like Pro-2	0,03	60	65,7
16	ABS Like Pro-2	0,05	20	62,28
17	ABS Like Pro-2	0,05	40	62,95
18	ABS Like Pro-2	0,05	60	67,5
19	Tough 2.0	0,01	20	37,05
20	Tough 2.0	0,01	40	55,56
21	Tough 2.0	0,01	60	57,3
22	Tough 2.0	0,03	20	37,96
23	Tough 2.0	0,03	40	47,54
24	Tough 2.0	0,03	60	55,84
25	Tough 2.0	0,05	20	40,1
26	Tough 2.0	0,05	40	43,43
27	Tough 2.0	0,05	60	45,11

Şekil 4.5’te, farklı reçine tipleri, katman kalınlıkları ve kürleme süreleri altında elde edilen eğilme mukavemeti değerleri büyükten küçüğe sıralanarak sunulmaktadır. En yüksek eğilme mukavemeti, 85,74 N/mm² ile Standart Reçine (0,01 mm kalınlık, 40 dk kürleme süresi) numunesinde ölçülmüştür.

Standart Reçine, özellikle düşük kalınlık ve orta kürleme süresi koşullarında en yüksek değerleri sergilemiştir. ABS-Like Pro-2 reçinesi, genelde orta düzeyde eğilme mukavemeti değerleri sağlarken, Tough 2.0 reçinesi diğerlerine kıyasla daha düşük değerler göstermiştir. Grafik, reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresi gibi parametrelerin eğilme mukavemeti üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. Eğilme mukavemeti sonuçlarının büyükten küçüğe sıralanmış dağılımı

Eğilme dayanımı verileri üzerinde yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, deneysel modelin anlamlı ve güçlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 4.6’da sunulan analizde, en yüksek katkı oranı %60.64 ile reçine tipi faktörüne aittir ($F = 29.35$, $p < .001$). Bu durum, kullanılan reçine malzemesinin eğilme dayanımı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Kürleme süresi faktörü de model üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir ($F = 7.22$, $p = .004$) ve %14.92 oranında katkı sağlamaktadır.

Bu sonuç, kürleme süresinin uzaması ile birlikte malzemenin yapısal bütünlüğünün arttığını ve bunun da eğilme dayanımını pozitif yönde etkilediğini göstermektedir. Buna karşılık, katman kalınlığı faktörü %3.78 katkı oranı ve p = .186 değeri ile istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermemektedir. Bu, katman kalınlığının değişiminin eğilme dayanımı üzerinde sınırlı ve önemsiz bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

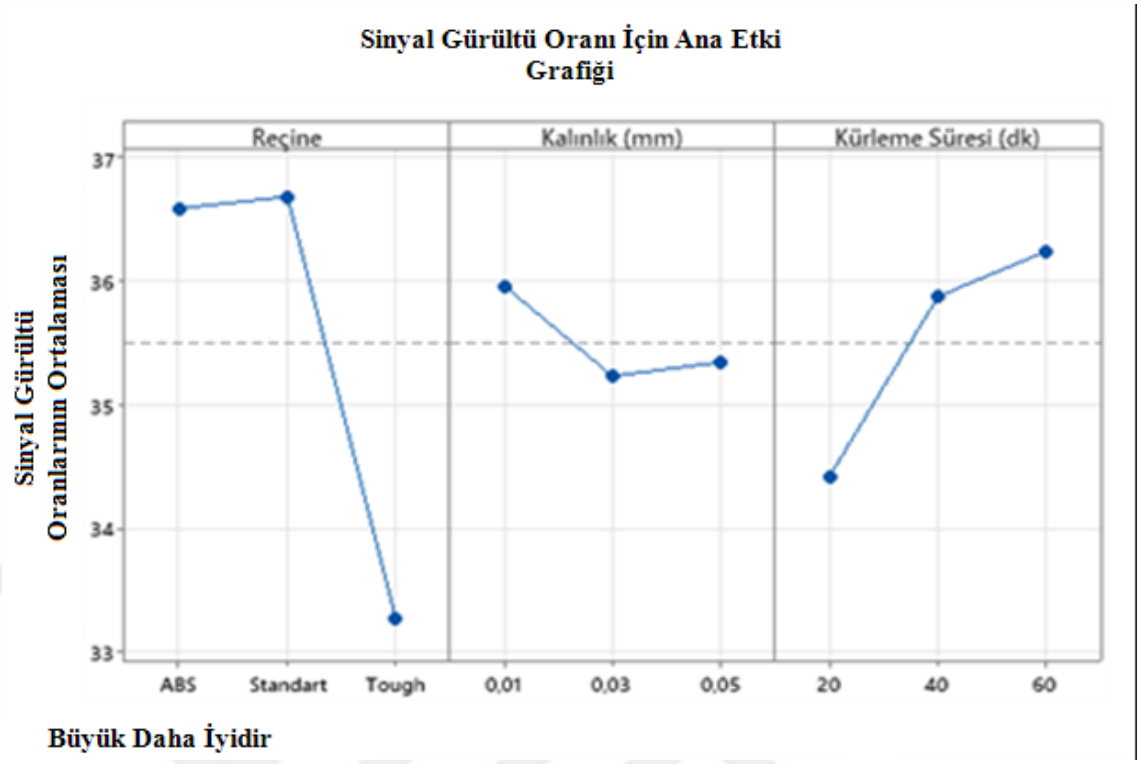
Modelin hata payı %20.66 olup, tanımlanmamış veya ölçüm dışı değişkenlerden kaynaklı olabilir. Bununla birlikte, toplam varyansın %79.34'lük kısmı tanımlı üç faktör tarafından açıklanmıştır ve bu durum, modelin güçlü bir açıklayıcı sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.6. Çekme dayanımı için anova sonuçları (Taguchi L27)

Source	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-	P-
Malzeme	2	2837,9	60,64%	2837,9	1418,95	29,35	0,000
Kalınlık (mm)	2	176,9	3,78%	176,9	88,43	1,83	0,186
Kürleme Süresi (dk)	2	698,3	14,92%	698,3	349,17	7,22	0,004
Error	20	967,1	20,66%	967,1	48,35		
Total	26	4680,1	100,00%				

Reçine tipi açısından değerlendirildiğinde, ABS ve Standart Reçine benzer ve yüksek ortalama SN oranları sunarken, Tough reçinesi anlamlı derecede daha düşük bir SN ortalamasına sahiptir. Bu durum, Tough reçinesinin deneysel sonuçlarında daha fazla varyans içerdiğini ve performans kararlılığının daha düşük olduğunu göstermektedir.

Katman kalınlığı bakımından en yüksek SN oranı 0.01 mm kalınlıkta elde edilmiştir. Kalınlık arttıkça SN oranında düşüş gözlemlenmektedir; bu da daha ince katmanların eğilme dayanımı açısından hem daha yüksek hem de daha tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Kürleme süresi faktörü ise doğrudan pozitif bir eğilim sergilemiştir. 20 dakikalık kürleme süresi en düşük SN oranına sahipken, 60 dakikalık süre en yüksek kararlılığı sunmuştur. Bu da kürleme süresi arttıkça polimerizasyon düzeyinin ve sonuçların tutarlılığının arttığını göstermektedir.



Şekil 4.6. Eğilme deneyine ait reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresine göre S/N oranı ana etki grafiği

Taguchi L27 deney düzenine göre oluşturulan ortalama yanıt değerleri ve faktörlerin etkileri Çizelge 4.7'de görüldüğü üzere incelendiğinde, çekme veya eğilme dayanımı üzerinde en etkili faktörün reçine tipi olduğu görülmektedir. Reçine faktörü için hesaplanan delta değeri 3.41 olup, bu değer diğer faktörlere kıyasla en yüksek katkıyı göstermektedir (Sıra 1).

Bu durum, kullanılan reçinenin mekanik özellikler üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Kürleme süresi, delta değeri 1.82 ile ikinci sırada yer almakta olup, dayanım sonuçlarını anlamlı düzeyde etkilemektedir (Sıra 2).

Daha uzun kürleme süresi, genellikle daha yüksek ortalama yanıt değeriyle ilişkilidir ve bu durum, kürleme süresi arttıkça malzemenin iç yapısının daha iyi oturduğunu ve mekanik dayanımın yükseldiğini göstermektedir. Katman kalınlığı faktörü ise delta değeri 0.73 ile en düşük etki düzeyine sahiptir (Sıra 3).

Bu bulgu, katman kalınlığı değişimlerinin deneysel çıktılar üzerinde göreli olarak daha az etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, faktörlerin etkisini sıralamak ve süreç parametrelerini optimize etmek açısından önemlidir. Yüksek delta değeri, faktörün sonucu daha çok etkilediği anlamına gelirken; daha düşük delta değeri, faktör etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.7. Eğilme mukavemeti anova bulguları

Level	Reçine	Kalınlık (mm)	Kürleme Süresi (dk)
1	36,58	35,95	34,42
2	36,67	35,23	35,87
3	33,27	35,34	36,23
Delta	3,41	0,73	1,82
Rank	1	3	2

4.3. Sertlik Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu deneylerde, üç farklı reçine tipi (Standart, ABS Like Pro-2 ve Tough 2.0) için değişen katman kalınlıkları (0,01 mm, 0,03 mm, 0,05 mm) ve kürleme sürelerinin (20, 40, 60 dakika) Shore D sertliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Toplam 27 numune üzerinde gerçekleştirilen bu ölçümlerin sonuçları Çizelge 4.8'de sunulmuş olup, sertlik değerlerinin reçine türüne ve işlem parametrelerine göre anlamlı şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. ABS Like Pro-2 reçinesi, genel olarak en yüksek sertlik değerlerini sunmuştur.

Özellikle 0,05 mm katman kalınlığı ve 20 dakika kürleme süresinde 81 Shore D ile en yüksek sertlik elde edilmiştir. Bu reçine tipi, farklı kombinasyonlarda tutarlı ve yüksek sertlik profili sergilemiş, kürleme süresi arttıkça değerlerin hafifçe azaldığı gözlenmiştir. Standart Reçine için elde edilen sertlik değerleri orta seviyede olup, en yüksek değer 77 Shore D ile 0,05 mm kalınlıkta ve 20 dakikalık kürleme süresinde ölçülmüştür.

Bu malzeme için kürleme süresinin artışı genel olarak değerleri korusa da, katman kalınlığıyla birlikte bazı dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Tough 2.0 reçinesi ise en düşük sertlik değerlerini üretmiştir. Özellikle 0,05 mm kalınlık ve 20 dakikalık kürleme süresinde 66 Shore D gibi düşük bir değer elde edilmiştir. Bununla birlikte, 0,01 mm ve 60 dk koşulunda 75 Shore D'ye kadar çıkılması, bu malzeme için adıl işlem süresinin etkili olduğunu göstermektedir.

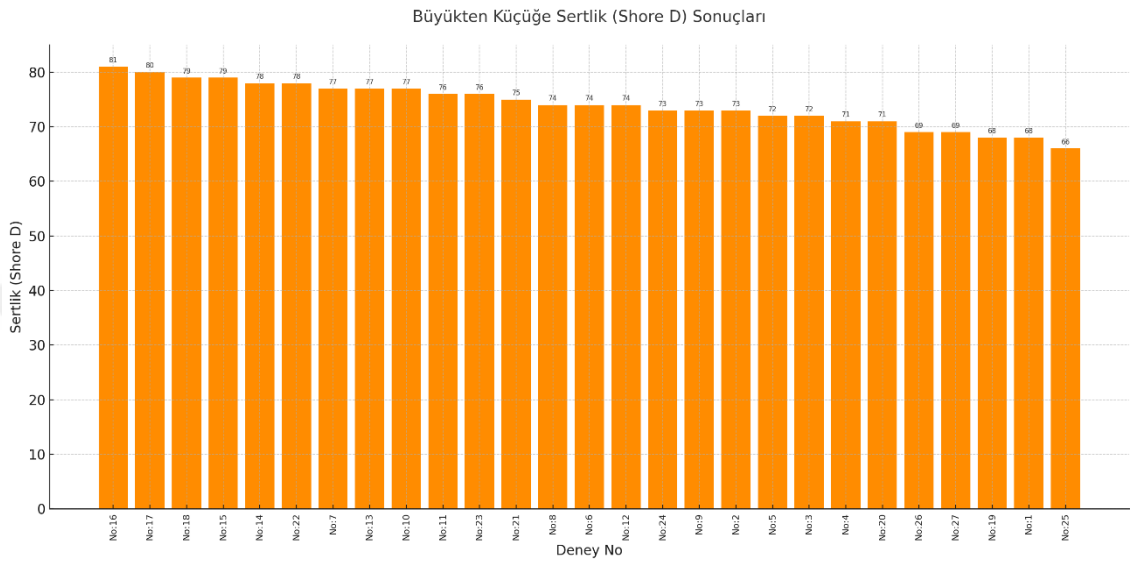
Genel olarak, sertlik üzerinde reçine tipi en etkili faktör olarak öne çıkarken; katman kalınlığı ve kürleme süresi parametreleri de malzeme türüne bağlı olarak değişen ikincil etkiler göstermektedir. Özellikle ABS Like Pro-2 reçinesi, yüksek yüzey sertliği gerektiren uygulamalar için uygun bir malzeme profili ortaya koymuştur.

Çizelge 4.8. L27 Taguchi ortogonal deney düzeni kullanılarak farklı reçineler, katman kalınlıkları ve kürleme sürelerine göre elde edilen sertlik sonuçları

Deney No	Malzeme	Katman Kalınlığı (mm)	Kürleme Süresi (dk)	Sertlik (Shore D)
1	Standart Reçine	0,01	20	68
2	Standart Reçine	0,01	40	73
3	Standart Reçine	0,01	60	72
4	Standart Reçine	0,03	20	71
5	Standart Reçine	0,03	40	72
6	Standart Reçine	0,03	60	74
7	Standart Reçine	0,05	20	77
8	Standart Reçine	0,05	40	74
9	Standart Reçine	0,05	60	73
10	ABS Like Pro-2	0,01	20	77
11	ABS Like Pro-2	0,01	40	76
12	ABS Like Pro-2	0,01	60	74
13	ABS Like Pro-2	0,03	20	77
14	ABS Like Pro-2	0,03	40	78
15	ABS Like Pro-2	0,03	60	79
16	ABS Like Pro-2	0,05	20	81
17	ABS Like Pro-2	0,05	40	80
18	ABS Like Pro-2	0,05	60	79
19	Tough 2.0	0,01	20	68
20	Tough 2.0	0,01	40	71
21	Tough 2.0	0,01	60	75
22	Tough 2.0	0,03	20	78
23	Tough 2.0	0,03	40	76
24	Tough 2.0	0,03	60	73
25	Tough 2.0	0,05	20	66
26	Tough 2.0	0,05	40	69
27	Tough 2.0	0,05	60	69

Şekil 4.7'de, farklı reçine tipleri, katman kalınlıkları ve kürleme süreleri için ölçülen sertlik değerleri (Shore D) büyükten küçüğe sıralanarak gösterilmiştir. En yüksek sertlik değeri, 81 Shore D ile ABS-Like Pro-2 reçinesinin 0,05 mm katman kalınlığı ve 20 dk kürleme süresi koşullarında elde edilmiştir. ABS-Like Pro-2 reçinesi genel olarak en yüksek sertlik değerlerini sağlarken, Standart Reçine ve Tough 2.0 reçineleri daha düşük

değerlere sahip olmuştur. Katman kalınlığındaki artış ve kürleme süresi gibi üretim parametrelerinin sertlik üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu grafik, malzeme türü ve işlem parametrelerinin sertlik özellikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7. Sertlik sonuçlarının büyükten küçüğe sıralanmış dağılımı

Sertlik verileri üzerinde yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, deneysel modelin istatistiksel olarak anlamlı ve güçlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 9'da sunulan analizde, en yüksek katkı oranı %47,21 ile malzeme türü faktörüne aittir (F = 10,64, p = .001). Bu durum, kullanılan reçine tipinin Shore D sertliği üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir.Katman kalınlığı faktörü, toplam varyansa %7,67 oranında katkı sağlamakla birlikte, F = 1,73 ve p = .203 değeriyle istatistiksel olarak anlamlı bir etki göstermemektedir.

Kürleme süresi ise yalnızca %0,76 oranında katkı sağlamış ve F = 0,17, p = .844 değeriyle model üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.Modelin hata payı %44,36 olup, bu oran tanımlanmamış ya da modele dahil edilmeyen başka değişkenlerin etkisinden kaynaklanıyor olabilir. Bununla birlikte, toplam varyansın %55,64'lük kısmı açıklanan üç temel faktör aracılığıyla modellenmiş olup, özellikle malzeme türü parametresi üzerinden anlamlı çıkarımlar yapılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.9. Eğilme dayanımı için anova sonuçları (Taguchi L27)

Source	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Malzeme	2	2,75468	47,21%	2,75468	1,37734	10,64	0,001
Katman Kalınlığı	2	0,44753	7,67%	0,44753	0,22377	1,73	0,203
Kürleme Süresi	2	0,04414	0,76%	0,04414	0,02207	0,17	0,844
Error	20	2,58821	44,36%	2,58821	0,12941		
Total	26	5,83456	100,00%				

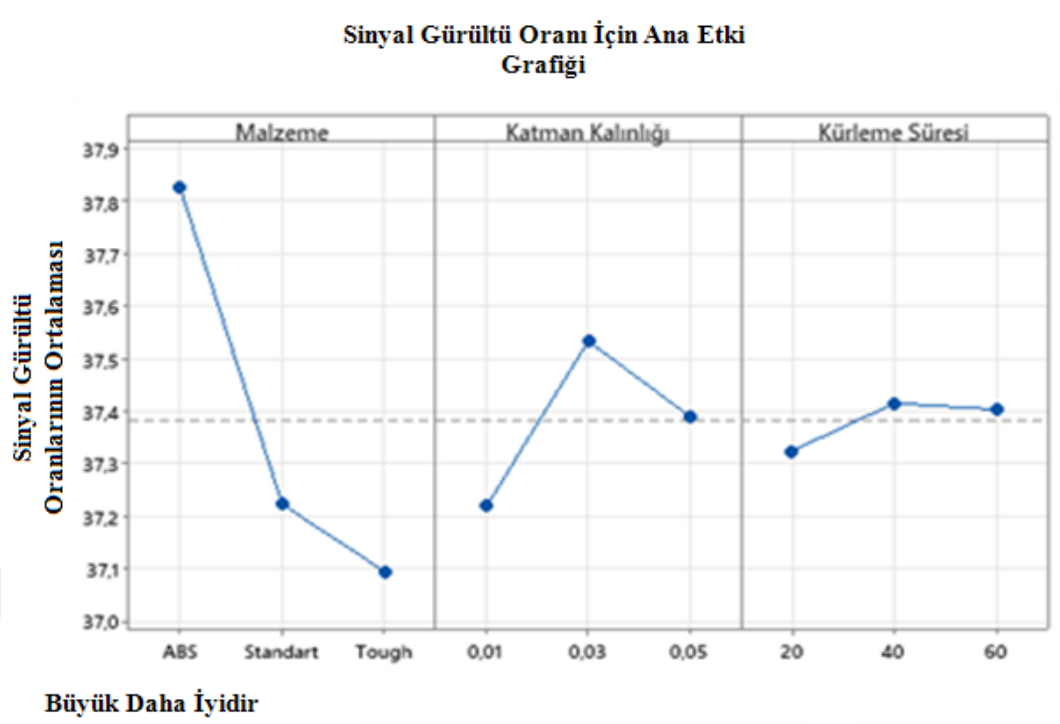
Şekil 4.5'te yer alan ana etkiler grafiği, Shore D sertlik değerlerine ait sinyal/gürültü (S/N) oranlarını göstermekte ve üç temel faktörün (malzeme tipi, katman kalınlığı, kürleme süresi) bu özellik üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, malzeme tipi sertlik üzerinde en belirleyici etkiye sahip parametre olarak öne çıkmaktadır. Özellikle ABS reçinesi, diğer iki malzeme ile karşılaştırıldığında en yüksek ortalama S/N oranını göstermiş ve en iyi sertlik performansını sağlamıştır. Tough reçinesi ise en düşük değerlere sahiptir.

Katman kalınlığı açısından en yüksek S/N oranı 0,03 mm kalınlıkta gözlemlenmiş; hem daha ince (0,01 mm) hem de daha kalın (0,05 mm) üretimlerde sertlik değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum, orta kalınlığın sertlik açısından optimum üretim parametresi olabileceğini göstermektedir.

Kürleme süresi parametresi ise sınırlı bir etkiye sahiptir. En düşük değer 20 dakikalık kürlemede elde edilirken, 40 dakikada artış gözlenmiş; 60 dakikaya ulaşıldığında ise sertlik değerinde belirgin bir artış gerçekleşmemiştir.

Sonuç olarak, ABS reçinesi, 0,03 mm katman kalınlığı ve 40 dakikalık kürleme süresi kombinasyonu, sertlik performansı açısından en uygun üretim koşulu olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4.8. Sertlik deneyine ait reçine tipi, katman kalınlığı ve kürleme süresine göre S/N oranı ana etki grafiği

Taguchi L27 deney düzenine göre yapılan sertlik analizinde, ortalama S/N oranları Çizelge 10'da görüldüğü üzere incelendiğinde, malzeme tipi delta 0.73 ile sertlik üzerinde en belirgin etkiye sahip faktör olarak öne çıkmıştır. Bu sonuç, reçine türünün Shore D sertliği üzerinde doğrudan ve belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Katman kalınlığı faktörü delta 0.31 değeriyle orta düzeyde etkiye sahiptir. Özellikle 0.03 mm kalınlığın daha yüksek ortalama sertlik değerleri üretmesi, bu kalınlığın yüzey performansı açısından tercih edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Kürleme süresi ise delta 0.09 ile en düşük etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, kürleme süresi değişiminin Shore D sertliği üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, sertlik çıktısı üzerinde en etkili faktörün malzeme seçimi olduğu, katman kalınlığının ikinci derecede etkili olduğu ve kürleme süresinin etkisinin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.10. Sertlik testi anova bulguları

Level	Malzeme	Katman Kalınlığı	Kürleme Süresi
1	37,83	37,22	37,32
2	37,22	37,53	37,42
3	37,09	37,39	37,40
Delta	0,73	0,31	0,09
Rank	1	2	3

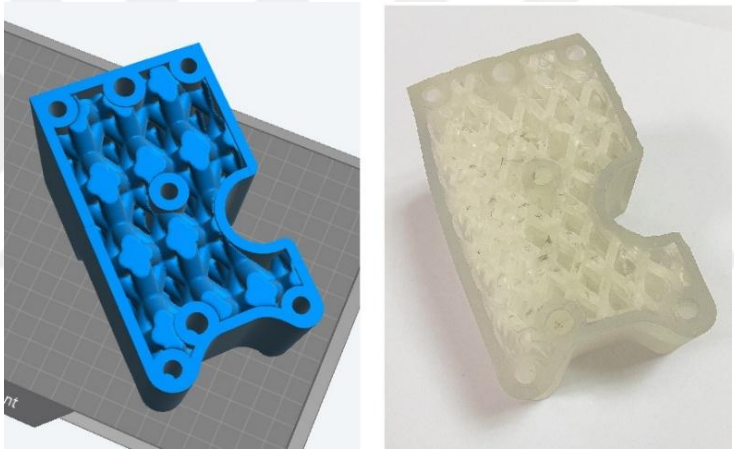
4.4. SLA Teknolojisi ile Üretilen Kafes Yapılı Kontrol Fikstürü

SLA teknolojisi kullanılarak üretilmiş ve iç hacminde kafes yapısı uygulanmış bir kontrol fikstürüne ait olan bu örnek, özellikle fonksiyonel alanlarda hafiflik ve rijitlik dengesini başarılı bir şekilde sağlamaktadır. Yarı saydam reçine kullanımı sayesinde, iç yapıda yer alan düzenli kafes geometri dışarıdan gözlemlenebilir niteliktedir. Bu yapı yalnızca estetik bir bütünlük sunmakla kalmamakta, aynı zamanda parçanın genel mekanik dayanımını koruyarak önemli bir ağırlık azalımı sağlamaktadır. Fikstür geometrisinin işlevsel yüzeylerinde herhangi bir deformasyon izine rastlanmaması, bu üretim yaklaşımının yüksek tolerans hassasiyeti gerektiren uygulamalarda da güvenle kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle taşıma, yerleştirme ve manuel kullanım gibi operasyonel süreçlerde bu hafif yapı, kullanıcıya ergonomik avantaj sağlamaktadır. Söz konusu özellikler, Şekil 4.9'da sunulan kontrol fikstürünün görselinde açıkça gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.9. SLA teknolojisiyle üretilmiş ve iç hacminde kafes yapısı bulunan kontrol fikstürünün farklı açılardan görünümü

Şekil 4.10'da, kontrol fikstürü bileşenine ait bir parçanın hem dijital ortamda oluşturulan kafes yapılı modeline solda, bu modelin stereolitografi (SLA) yöntemiyle üretilmiş fiziksel örneğine sağda yer verilmektedir. Soldaki görselde, Altair Inspire yazılımı kullanılarak tasarlanan kafes yapısı net biçimde görülmekte olup, yapının iç hacimde oluşturduğu dolgu geometrisi malzeme kullanımını azaltmaya yöneliktir. Sağdaki fotoğrafta ise parçanın içyapısı şeffaflık sayesinde görsel olarak doğrulanabilmektedir. Kafes yapısının, parça fonksiyonelliğini korurken hem hacimsel hem de kütlesel tasarruf sağladığı bu karşılaştırmalı görsel ile açık şekilde ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, özellikle taşınabilirlik ve üretim maliyetlerinin azaltılması gereken uygulamalarda önemli yapısal ve ekonomik avantajlar sunmaktadır.



Şekil 4.10. Kafes yapılı kontrol fikstürü parçasının dijital modeli (sol) ve SLA yöntemiyle üretilmiş fiziksel çıktısı (sağ)

4.5. Kafes Yapılarıyla Tasarlanan Parçaların Performans Analizi

Standart Reçine, ABS Like Pro 2 ve Tough 2.0 reçineleriyle üretilen parçaların dolu ve kafes yapılı versiyonlarına ait üretim verileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Parçaların tamamen dolu şekilde üretilmesi durumunda elde edilen ağırlık ve maliyet değerleri, dilimleme sürecinde kullanılan Chitubox programı üzerinden hesaplanmıştır. Aynı şekilde, kafes yapılı versiyonlara ait veriler de yine bu yazılım aracılığıyla elde edilmiştir. Her bir reçine türüne özel alt başlıklarda, söz konusu üretim farkları sistematik biçimde ele alınmıştır.

4.5.1.Standart Reçine ile Üretilen Parçada Kafes Yapısının Uygulanması

Standart reçine kullanılarak üretilen parçalara yönelik yapılan değerlendirmede, kafes yapısının uygulanmasıyla önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Dolu modelin toplam ağırlığı 245,392 gram iken, aynı parçanın kafes yapılı versiyonu 166,529 gramdır. Bu da yaklaşık %32,15 oranında bir kütle azalımı anlamına gelmektedir. Bu hafifleme, özellikle kontrol fikstürü gibi hassasiyet ve taşınabilirliğin kritik öneme sahip olduğu uygulamalarda kullanıcıya operasyonel avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, kullanılan reçine miktarındaki düşüş, toplam üretim maliyetlerini azaltmakta ve kaynak verimliliğini artırarak sürdürülebilir üretim anlayışına katkı sağlamaktadır. İlgili parçalara ait dolu ve kafes yapılı modellerin görsel karşılaştırması Şekil 4.11'de sunulmaktadır.



Şekil 4.11. Kafes yapısı uygulanmış (sol) ve dolu (sağ) modelin standart reçine kullanılarak üretim bilgileri karşılaştırması

4.5.2. ABS Like Pro 2 Reçinesi ile Üretilen Parçada Kafes Yapısının Uygulanması

Yapılan üretim analizine göre, ABS Like Pro 2 malzemesi kullanılarak üretilen parçada kafes yapısının uygulanması sonucunda önemli bir ağırlık tasarrufu elde edilmiştir. Dolu modelin toplam ağırlığı 244,731 gram iken, aynı parçanın kafes yapılı versiyonu 166,08 gram ağırlığındadır. Bu da yaklaşık %32,14 oranında bir kütle azalımı anlamına gelmektedir. Bu tür bir hafifletme, özellikle kontrol fikstürü uygulamaları gibi hassasiyet ve taşınabilirliğin önemli olduğu alanlarda taşıma kolaylığı, ergonomi ve üretim verimliliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, malzeme tüketiminin

azalması üretim maliyetlerini doğrudan düşürmekte ve sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sağlamaktadır. İlgili parçalara ait dolu ve kafes yapılı modellerin görsel karşılaştırması Şekil 4.12'de sunulmaktadır.



Şekil 4.12. Kafes yapısı uygulanmış (sol) ve dolu (sağ) modelin ABS Like Pro 2 reçine kullanılarak üretim bilgileri karşılaştırması

4.5.3.Tough 2.0 Reçine ile Üretilen Parçada Kafes Yapısının Uygulanması

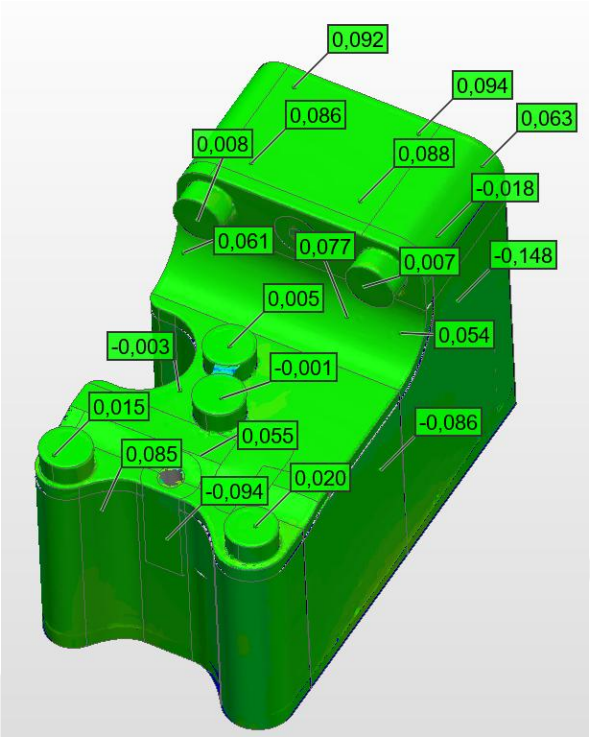
Tough 2.0 reçinesiyle yapılan üretim analizine göre, lattice (kafes) yapısının kullanılması sonucunda dikkate değer bir ağırlık ve maliyet avantajı sağlanmıştır. Dolu modelin toplam ağırlığı 242,495 gram aynı parçanın kafes yapılı versiyonunun ağırlığı 164,565 gram hesaplanmıştır. Bu veriler, yaklaşık %32,13 oranında bir kütle azalışına ve %32,16 oranında bir maliyet tasarrufuna işaret etmektedir. Lattice yapı uygulaması, sadece üretim ekonomisi açısından değil, aynı zamanda fikstürlerin taşınabilirliği ve kullanım ergonomisi açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık gibi ağırlık hassasiyeti gerektiren sektörlerde, bu tür hafifletme stratejileri hem yapısal verimlilik hem de operasyonel fayda sağlamaktadır. İlgili parçalara ait dolu ve kafes yapılı modellerin görsel karşılaştırması Şekil 4.13'te sunulmaktadır.



Şekil 4.13. Kafes yapısı uygulanmış (sol) ve dolu (sağ) modelin Tough 2.0 reçine kullanılarak üretim bilgileri karşılaştırması

4.6. Parça Geometrisinin Tolerans Kriterlerine Uygunluğu ve Sapma Analizi

Mevcut örnekte, kabul kriteri ±0,1 mm olarak belirlenmiştir ki bu, genel kontrol fikstürleri ölçümünde yüksek bir doğruluk kriteri olarak değerlendirilmektedir. Şekil 1'de etiketlenmiş tüm ölçüm noktalarının bu ±0,1 mm tolerans aralığında olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle, pozitif sapmaların en yüksek değeri 0,094 mm, negatif sapmaların ise en düşük değeri −0,094 mm olarak kaydedilmiştir. Her iki durumda da mutlak sapma değerleri 0,1 mm sınırının altında kalmaktadır. Bu durum, incelenen parçanın yüzey geometrisinin, CAD modeline kıyasla oldukça düşük sapmalar gösterdiğini ve belirlenen kalite standartlarını karşıladığını işaret etmektedir. Şekil 4.14'te baskın yeşil renk tonları da parçanın büyük çoğunluğunun tolerans dahilinde olduğunu doğrulamaktadır. Bununla birlikte, kapsamlı bir değerlendirme için yalnızca etiketlenmiş noktalar değil, tüm yüzeyin maksimum/minimum sapma değerleri ve istatistiksel analizler de dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.14. Parçanın Tarama Sonucu Sapma Analizi Raporu

4.7. Alüminyum ve Cibatool Malzemeler İçin Üretim Süreci

Kontrol fikstürlerinde kullanılan alüminyum gövdeye yönelik üretim süreci, ortalama 0,5 saat süren CAM programlaması ile başlamaktadır. Devamında, montaj öncesi tekil parça yüzey tıraşlama ve delme işlemleri yaklaşık 0,5 saat sürmektedir. Montajlı gövde üzerinde gerçekleştirilen işlemler sırasıyla; kaba işleme 1,5 saat, yarı ince işleme yüzey işleme 0,5 saat, final ince işlemleri yüzey ve trim 1 saat, radyus küçültme 1 saat ve delme işlemi 0,5 saatlik sürelerde tamamlanmaktadır. Bu ince işlemler, CNC tezgâhlar üzerinde hassas toleranslarla gerçekleştirilmekte olup, fikstürün fonksiyonel doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Tüm işlemler dikkate alındığında, alüminyum malzemeden üretilen bir kontrol fikstürü için toplam işlem süresi 5,5 saattir. Ancak eğer gövde malzemesi olarak Cibatool gibi yüksek işlenebilirliğe sahip model plakaları tercih edilirse, ilerleme hızlarının artması sayesinde işlem süresinde yaklaşık 0,5 saatlik bir tasarruf sağlanmakta ve toplam üretim süresi 5 saate düşmektedir. Bu durum, özellikle prototipleme ve düşük hacimli üretimlerde zaman ve kaynak verimliliği açısından avantaj

sağlamaktadır. 3D ölçümler, reçinelerin sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyeti nedeniyle oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklıklar, reçinelerde boyutsal sapmalara ve yüzey deformasyonlarına yol açabileceğinden, ölçümlerin sabit ve kontrollü bir ortamda yapılması daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

4.8. Alüminyum ve Cibatool Malzemeler İçin Maliyet Analizi

Seçilen örnek kapsamında, kontrol fikstüründe kullanılan gövde bileşeninin üretimi için gerekli hammadde boyutları, minimum 110 × 60 × 80 mm brüt ölçülerinde belirlenmiştir. Bu ölçüler, CNC tezgâhlarında işleme süreci sırasında parça yerleşimi, bağlama ve referans yüzey oluşturma işlemleri için gerekli toleransları sağlamaktadır. Belirtilen boyutlardaki AL5083 alüminyum blok, yaklaşık 1404,48 gram (1,404 kg) ağırlığındadır. Güncel birim fiyatlar dikkate alındığında, AL5083 malzemesinin kilogram başına ortalama 310 TL maliyete sahip olduğu varsayılmış ve bu doğrultuda söz konusu bloğun hammadde maliyeti yaklaşık 435 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değer, geleneksel üretim yöntemleriyle imal edilen kontrol fikstürlerinin toplam maliyet analizine dâhil edilmiştir.

4.9. SLA Yöntemi ile Kontrol Fikstürü Üretim Süreci

Kontrol fikstürü örneği, SLA yöntemiyle uygun üretim parametreleri seçilerek Anycubic Photon Mono X cihazında yaklaşık 3,5 saatlik bir üretim süresi sonunda başarıyla üretilmiştir. Üretim sonrasında uygulanan yıkama, UV kürleme ve destek yapılarının temizlenmesi gibi standart ardıl işlemler dikkate alındığında, toplam üretim süresi yaklaşık 4 saate ulaşmaktadır.

4.9. Eklemeli İmalat İle Üretilen Kontrol Fikstürlerinin Maliyet Değerlendirmesi

Şekil 4.6’daki kontrol fikstürü parçasının üretimi Anycubic Photon Mono X cihazı ile yaklaşık 3,5 saatlik bir üretim süresi sonunda tamamlanmıştır. Üretim işlemi sonrasında, ardıl işlemler yaklaşık 30 dakikalık bir süreyi kapsamaktadır. Elektrik tüketimi açısından değerlendirildiğinde, Anycubic cihazı 120 W güç tüketimiyle 3,5 saat boyunca çalıştığında yaklaşık 0,42 kWh enerji harcamaktadır. Aynı şekilde, 60 W gücündeki Creality cihazı 0,5 saatlik kürleme işlemi sırasında yaklaşık 0,03 kWh enerji

tüketmektedir. Toplamda 0,45 kWh'lik bir elektrik tüketimi söz konusudur. Bursa Organize Sanayi Bölgesi için 2025 yılı itibarıyla geçerli olan 1 kWh elektrik birim fiyatı 3,21 TL olarak alındığında, bu üretim süreci için ortaya çıkan toplam elektrik maliyeti yaklaşık 1,44 TL olarak hesaplanmaktadır. Standart, ABS Like Pro ve Tough 2.0 reçineleri kullanılarak üretilen parçanın ağırlığı ve buna bağlı olarak hesaplanan malzeme maliyeti, Chitubox dilimleme yazılımı aracılığıyla belirlenmiş olup, ilgili veriler sırayla Şekil 4.9, Şekil.4.10 ve Şekil 4.11'de yer verilmiştir.

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında, Stereolitografi (SLA) yöntemiyle üretilen kontrol fikstürlerinin mekanik özellikleri ve üretim verimlilikleri; farklı reçine türleri ve üretim parametreleri dikkate alınarak sistematik biçimde incelenmiştir. Çekme, eğilme ve sertlik testlerinden elde edilen veriler Taguchi deney tasarımı yöntemiyle analiz edilmiş, en etkili parametrenin reçine türü olduğu belirlenmiştir. ABS Like Pro 2 reçinesi çekme ve sertlik özellikleri bakımından en yüksek performansı gösterirken, Standart Reçine eğilme dayanımı açısından en iyi sonucu vermiştir.

Ayrıca, kontrol fikstürü tasarımında uygulanan kafes yapılar, parça ağırlığını ve malzeme tüketimini yaklaşık %32 oranında azaltarak, özellikle taşınabilirlik ve maliyet etkinliği açısından önemli avantajlar sağlamıştır. SLA yöntemiyle üretilen parçaların ±0,1 mm tolerans aralığında boyutsal doğruluk göstermesi, bu teknolojinin kontrol fikstürü üretiminde geometrik hassasiyet açısından yeterli olduğunu ortaya koymuştur.
Maliyet analizine yönelik karşılaştırmalarda, geleneksel yöntemle AL5083 alüminyum kullanılarak üretilen kontrol fikstürünün toplam maliyeti eklemeli imalat yöntemi ile üretilen kontrol fikstürlerine göre çok daha avantajlı olduğu hesaplanmıştır. Bu maliyetin önemli bir bölümü, 5,5 saatlik işleme süresine bağlı yüksek işçilik giderlerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşın, aynı parçanın SLA yöntemiyle üretimi sonucunda oluşan toplam maliyet reçine ve enerji tüketimi dahil yaklaşık 150–250 TL aralığında kalmaktadır. Bu durum, eklemeli imalat teknolojisinin düşük maliyet, hızlı üretim ve kaynak verimliliği açısından geleneksel yöntemlere göre kayda değer avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular SLA teknolojisinin kontrol fikstürü üretiminde hem teknik hem de ekonomik açıdan uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve yapısal tasarımlarda hafifletme stratejilerinin etkin kullanımı ile eklemeli imalatın sanayide daha geniş bir kullanım alanı bulabileceği öngörülmektedir. Gelecek çalışmalarda farklı kafes geometrileri, alternatif reçine sistemleri ve hibrit üretim yaklaşımlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Ahn, D. G. (2021). Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. In *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* (Vol. 8, Issue 2, pp. 703–742). Korean Society for Precision Engineeing. https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Salmi, A., Minetola, P., Iuliano, L., & Fino, P. (2017). Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, *105*(4), 593–612. https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2625098

Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. In *Additive Manufacturing* (Vol. 20, pp. 44–67). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002

Flint, T. F., Anderson, M. J., Akrivos, V., Roy, M. J., Francis, J. A., Vasileiou, A., & Smith, M. C. (2022). A fundamental analysis of factors affecting chemical homogeneity in the laser powder bed fusion process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *194*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122985

Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, *8*(3), 215–243. https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8

Hanandita, H. S., Ubaidillah, Prabowo, A. R., Lenggana, B. W., Turnip, A., & Joelianto, E. (2023). Static Structural Analysis of Checking Fixture Frame of Car Interior Using Finite Element Method. *Automotive Experiences*, *6*(3), 652–668. https://doi.org/10.31603/ae.9860

Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. (2020). *A Review of Stereolithography : Processes*.

Kumar, S., Jb, K., Park, K., Scholar, K., Mech, A. P. (, & Sahai, R. (n.d.). An Overview on Taguchi Method. In *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences* (Vol. 1). https://www.researchgate.net/publication/265282800

Marasli, C., Katifelis, H., Gazouli, M., & Lagopati, N. (2024). Nano-Based Approaches in Surface Modifications of Dental Implants: A Literature Review. In *Molecules* (Vol. 29, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/molecules29133061

Mathi, P., Chembuly, V. V. M. J. S., Sai, A. N., Ram Prasad, C., Chekuri, R. B. R., Penmetsa, R. V., & Gudaru, K. R. (2025). Effect of laser shock peening on grain structure, surface hardness, residual stresses, and wear behavior of Al5083 alloy. *Engineering Research Express*, *7*(2). https://doi.org/10.1088/2631-8695/adcb01

Musiał, J., Horiashchenko, S., Polasik, R., Musiał, J., Kałaczyński, T., Matuszewski, M., & Śrutek, M. (2020). Abrasion wear resistance of polymer constructional materials for rapid prototyping and tool-making industry. *Polymers*, *12*(4). https://doi.org/10.3390/POLYM12040873

Nowacki, B., Kowol, P., Kozioł, M., Olesik, P., Wieczorek, J., & Wacławiak, K. (2021). Effect of post-process curing and washing time on mechanical properties of mslaprintouts. *Materials*, *14*(17). https://doi.org/10.3390/ma14174856

Pan, C., Han, Y., & Lu, J. (2020). Design and optimization of lattice structures: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 18, pp. 1–36). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/APP10186374

Pang, T. H. (n.d.). *Stereolithography Epoxy Resins SL 5170 and SL 5180: Accuracy, Dimensional Stability, and Mechanical Properties*.

ISO (2019). *ISO 178: Plastics — Determination of flexural properties*. International Organization for Standardization.

ISO. (2012). ISO 527-2: Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. International Organization for Standardization.

ASTM D2240-15. (2015). Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. ASTM International.

Al Rashid, A., Khan, S. A., G. Al-Ghamdi, S., & Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. In *Automation in Construction* (Vol. 118). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268

Brandt, M. (n.d.). *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 88 Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Applications Edited by*.

Husna, A., Ashrafi, S., Tomal, A. A., Tuli, N. T., & Bin Rashid, A. (2024). Recent advancements in stereolithography (SLA) and their optimization of process parameters for sustainable manufacturing. In *Hybrid Advances* (Vol. 7). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100307

Wang, H., Hao, J., Ding, M., Zheng, X., Yang, H., & Liu, H. (2024). Research on Process Control of Laser-Based Direct Energy Deposition Based on Real-Time Monitoring of Molten Pool. *Coatings*, *14*(9), 1131. https://doi.org/10.3390/coatings14091131

Anonim 2025, Anycubic Kimyasal Özellikler, https://i.alza.cz/Foto/docs/MSDS%20for%20Resin%20from%20Anycubic.pdf?utm

Anonim, 2025, Creality Cure & Wash Elektrik Tüketimi, https://www.creality.com/products/creality-uw-01-washing-curing-machine

Anonim, 2025, Anycubic Photon Mono X Elektrik Tüketimi, https://store.anycubic.com/products/photon-mono-x-resin-printer

Anonim, 2025, Bursa Organize Sanayi Hizmet Bedelleri, https://www.bosb.org.tr/bosb-tuketim-0-tuketim_fiyat.html

Anonim,2025, Al5083 Birim Fiyatı, https://aluminyumburada.com/aluminyum-plaka-hadde/5083-H321-80mm