

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CİHAN ALTUOK

NİSAN 2024

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CİHAN ALTUOK

DANIŞMAN: Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ

ZONGULDAK

Nisan 2024

KABUL:

Cihan ALTUOK tarafından hazırlanan “Üç Boyutlu Yazıcılar İle Üretilen Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir.25/04/2024

Danışman: Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Serdar GÜLDİBİ

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./...../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Cihan ALTUOK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR İLE ÜRETİLEN MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

Cihan ALTUOK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ

Nisan 2024, 51sayfa

Bu çalışmada; 3B basılmış PLA Plus parçaların sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesinde, parça doluluk oranlarının (%20, %40, %60, %80 ve %100) kaynak mukavemetine etkisi değerlendirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı işlem parametrelerinin (ilerleme hızı: 50 ve 100 mm/dak ve dönme hızı: 1000 ve 1500 dev/dak), sürtünme karıştırma kaynağının yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için çekme testleri ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesindeki kusurları tespit etmek için görsel incelemeler yapılmıştır. Doluluk oranlarına göre referans olarak verilen PLA Plus numunelerine kıyasla en yüksek kaynak mukavemetleri sırasıyla %80, %60 ve %100 doluluk oranında (sırasıyla 29.4 MPa, 17.47 MPa ve 41.12 MPa ve %112.38, %97.48, %87.04 verimlilik) elde edilmiştir. Sonuç olarak düşük doluluk oranlarında (%20 ve %40) kaynak kalitesinin olumsuz etkilendiği ve kaynak bölgesinde yüzey tünel kusurunun olduğu belirlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesinin işlem sırasında ortaya çıkan sıcaklıktan önemli derecede etkilendiği belirlenmiştir.

ÖZET (devam ediyor)

Yapılan çalışma, özellikle 3B yazıcıda farklı doluluk oranlarında basılan parçaların sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilebilir olduğunu ve doluluk oranlarının optimizasyonu ile kaynak işleminin verimliliğinin artırılabilirliğini göstermektedir.

Keywords: PLA Plus, sürtünme karıştırma kaynağı, 3B basım, doluluk oranı, mekanik özellikler, ısı oluşumu.

Bilim Kodu:625.02.00



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

JOINING MATERIALS PRODUCED WITH THREE-DIMENSIONAL PRINTERS USING FRICTION MIX WELDING

Cihan ALTUOK

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nergizhan ANAÇ

April 2024, 51pages

In this study, the effect of part infill ratio (20%, 40%, 60%, 80%, and 100%) on the welding strength of 3D printed PLA Plus parts was evaluated through friction stir welding (FSW). Tensile tests and temperature measurements were carried out to examine the effects of friction stir welding process parameters (feed speed: 50 and 100 mm/min and rotation speed: 1000 and 1500 rpm) on the structure and mechanical properties of friction stir welding. Moreover, visual inspections were performed to detect defects in the weld area. Compared to the PLA Plus samples given as reference according to the infill ratios, the highest welding strengths were obtained at 80%, 60% and 100% infill ratios (29.4 MPa, 17.47 MPa and 41.12 MPa and 112.38%, 97.48%, 87.04% efficiency, respectively). As a result, it was determined that at low infill ratios (20% and 40%), the weld quality was negatively affected, and a surface tunnel defect occurred in the weld area. It has been determined that the weld quality in FSW is significantly affected by the temperature occurring during the process. The study has shown that parts printed at different infill ratios, especially on a 3D printer, can be combined with

friction stir welding and that the efficiency of the welding process can be increased by optimizing the infillratios.

Keywords: PLA Plus, friction stir welding, 3D printing, infillratio, mechanical properties, heat generation.

Science Code:625.02.00



TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca yardımları ile yanımda olan, yol gösteren, yazım süreci ve deneysel çalışmalarımızda beraber çalıştığımız tez danışmanım sayın Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ'a yapılan deneylerde, cihazların kullanılmasında ve sonuçların yorumlanmasında tecrübesiyle daima yanımda olan ve desteğini esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR'a teşekkür ederim.

Bugüne kadar her koşulda beni destekleyen bugünlere ulaşmamı sağlayan anneme ve babama, manevi destekleri ile her zaman yanımda olan ablalarım ve aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2KURUMSAL TEMELLER	 5
2.1 EKLEMELİ İMALAT.....	5
2.2 ERİYİK YIĞMA MODELLEMETEKNİĞİ.....	9
2.3 POLİMERLER	10
2.4 TERMOPLASTİKLER	12
2.5 POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLME METOTLARI.....	12
2.6 TERMOPLASTİK MALZEMELERİN KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	13
2.7 TERMOPLASTİK KAYNAK YÖNTEMLERİNİN VERİMLİLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	14
2.8 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK).....	14
 BÖLÜM 3ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	 17
3.1 3B YAZICILARDA ÜRETİLEN MALZEMELERİN DOLULUK ORANININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ	17

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

3.2 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİNİN UYGULANDIĞI METAL MALZEMELER	19
3.3 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ İLE POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLMESİ.....	21
3.3 ÇALIŞMANIN MOTİVASYONU	23
 BÖLÜM 4MALZEME VE METOT.....	25
 4.1 PLA PLUS FİLAMENTİN ÖZELLİKLERİ.....	25
4.2 PLA PLUS MALZEMENİN 3B BASKI SÜRECİ	25
4.3 SKK İŞLEM PARAMETRELERİ VE DENEYSEL TASARIM	27
4.4 SKK EKİPMANLARI VE DENEY MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ.....	29
 BÖLÜM 5SONUÇLAR VE TARTIŞMA	31
 5.1 FARKLI DOLULUK ORANLARINDAKİ PLA PLUS MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	31
5.2 KAYNAK DAYANIMLARININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ	32
5.3 KAYNAK DAYANIMININ TAKIM DÖNME HIZINA GÖRE DEĞERLENDİRMESİ	37
5.4 KAYNAK DAYANIMININ TAKIM İLERLEME HIZINA GÖRE DEĞERLENDİRMESİ.....	37
5.5SKK İŞLEMİ SIRASINDA OLUŞAN ISININ DEĞERLENDİRMESİ.....	38
 BÖLÜM 6SONUÇLAR.....	43
 KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

No	Sayfa
Şekil 1.1 Eklemeli imalat (a) Yıllara göre eklemeli imalat üzerine yayınlanan makale sayısı. (b) Ülkelere göre eklemeli imalat konusunda patent oranları	3
Şekil 2.1 (a) 2017-2018 yıllarında en çok tercih edilen 3B yazıcı teknolojileri, (b) 2018 yılında en çok kullanılan 3B baskı malzemeleri.....	6
Şekil 2.2 Eklemeli imalat süreçlerinin ISO/ASTM 52900:2015'e göre sınıflandırılması	7
Şekil 2.3 Polimer malzemelerin üretimi için eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (a) Polijet baskı; (b) Stereolitografi (SLA); (c) Doğrudan hafif işleme (DLP); (d) Seçici lazer sintirleme (SLS); (e) Eriyik yığma modelleme (EYM); (f) Lamine nesne imalatı (LOM); (g) Seçici biriktirme modellemesi (SDM)	8
Şekil 2.4 EYM'de malzemenin ekstrüzyonu.....	10
Şekil 2.5 Monomerve polimerin şematik gösterimi	11
Şekil 2.6. Polimerlerin birleştirme metotları	13
Şekil 2.7 Sürtünme karıştırma kaynağı aşamaları	15
Şekil 2.8 Sürtünme karıştırma kaynağı prosesi	16
Şekil 4.1 PLA Plusfilamentten numunelerin basılması.....	26
Şekil 4.2 Farklı doluluk oranlarındaki SKK plakalarının görünümü.	27
Şekil 4.3 SKK'ndaişlem parametreleri ve karıştırıcı uç geometrisi görünümü.	29
Şekil 4.4 SKK işlemine genel bakış.	30
Şekil 4.5 Çekme test numuneleri ve sertlik ölçüm yerleri.	30
Şekil 5.1 Farklı doluluk oranlarına göre PLA Plus malzemenin mekanik özellikleri.....	32
Şekil 5.2 SKK işlemi sonrası kaynak dayanımları.....	33
Şekil 5.3 %20, %40 ve %60 doluluk oranındaki parçaların SKK sonrası görünümü.....	35
Şekil 5.4 %80 ve %100 doluluk oranındaki parçaların SKK sonrası görünümü.	36
Şekil 5.5 Dönme hızına bağlı kaynak mukavemeti.....	37
Şekil 5.6 İlerleme hızına bağlı kaynak mukavemeti.	38
Şekil 5.7 SKK işlemi sırasında ölçülen sıcaklıklar.	39
Şekil 5.8 En yüksek kaynak mukavemetinin termal görüntülemesi.	40



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 3B yazıcılarla ilgili tarihsel gelişmeler	2
Çizelge 1.2 Termoplastik malzemelerin birleştirme yöntemlerinin karşılaştırılması	4
Çizelge 2.1 Polimerlerin sınıflandırılması	11
Çizelge2.2 Termoplastiklerin birleştirme yöntemleri	13
Çizelge2.3 Termoplastiklerin birleştirme yöntemlerinin verimliliklerinin karşılaştırılması ...	14
Çizelge 4.1 Filament malzemelerinin mekanik/teknik özellikleri.	25
Çizelge 4.2 SKK işlem parametre değerleri.....	28
Çizelge 4.3 Farklı doluluk oranlarındaki (3B baskı) PLA Plusplakalar için deney seti.	28
Çizelge 5.1 Farklı dolum oranına göre SKK sırasında en yüksek/en düşük/optimum sıcaklık.	41



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitrilbütadienstiren
ASA	: Akrilonitrilstirenakrilat
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli üretim
FDM	: Kaynaşmış biriktirme modelleme
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
PLA	: Polilaktik asit
PP	: Polipropilen
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ülkemizde ve Dünya’da gelişen endüstriyel üretim çeşitliliği ile birlikte alternatif üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda üretim hızının artırılması, ekonomik olması, çevreye verilen zararın azaltılması ve hammaddenin verimli kullanılması hedeflenmektedir.

Alışıla gelmiş imalat yöntemlerinin dışında eklemeli imalat, karmaşık geometrik görünüme sahip ürünlerin tek seferde üretilmesi ve kişiselleştirilmiş ürün basılabilmesi ile katmanlı imalat yöntemlerini tercih edilme sebebi haline getirmiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinde, üretimde kullanılacak hammaddenin küçük boyutlardaki toz hali, reçine veya filament halinde temin edilerek, üretim metotlarından olan ekstrüzyon, lazer veya UV ışını kullanılarak üst üste katmanlı bir yapı oluşturacak şekilde üretim gerçekleştirilir. Eklemeli imalatın, CAD programları ile üç boyutlu (3B) tasarımı yapılmış karmaşık ürünleri üretebilme özelliği geleneksel üretim yöntemlerinden daha çok tercih edilmesini sağlamıştır. İlerici mühendislik işlerinin tamamlanması için bu yöntem üzerindeki çalışmaların geliştirilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmalar 1980’li yıllarda başlamış, ilk olarak eklemeli imalat küçük boyutlardaki ürünlerin üretilmesinde ve model tasarımlarının prototip haline getirilmesinde tercih edilmiştir [1].

Endüstrinin çeşitli sektörlerinde plastik, kompozit, seramik ve metal esaslı ürünlerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi farklı üretim sistemlerinin gelişmesini sağlamıştır. Eklemeli imalat sağlık, uzay, inşaat, otomotiv, savunma sanayi ve havacılık gibi sektörlerde yıllara göre daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle seri üretimi planlanan ürünlerin test aşamaları için prototip üretilmesi yüksek kalıp maliyetlerini ortadan kaldırmaktadır.

Eklemeli imalatta ürünlerin boyutlarına göre üretim planlaması yapılmaktadır. Eklemeli imalatta üretilecek ürün için cihazların üretim kapasitesi, hızı ve çalışma boyutları sınırlı kalabilmektedir. Bu noktada büyük boyutlarda üretim yapabilen üç boyutlu yazıcıların yatırım

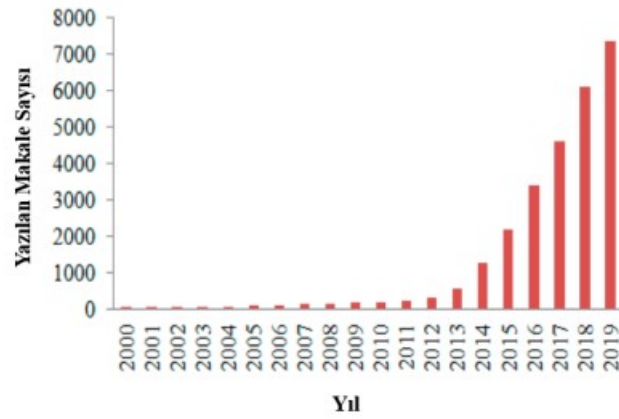
maliyetinin yüksek olması bir olumsuzluktur. Bununla beraber küçük boyutlarda (400x400x400 mm) üretim yapabilen cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık 40cm boyutlarından büyük olan ürünler genellikle tek aşamada üretimi tercih edilmez [2].

Tek aşamada bir bütün olarak üretilemeyen ürünler, 3 boyutlu yazıcı programlarında belirli boyutlarda sınıflandırılarak parçalara ayrılıp üretimi yapıldıktan sonra çeşitli birleştirme yöntemleri kullanılarak birleştirilmektedirler [2].

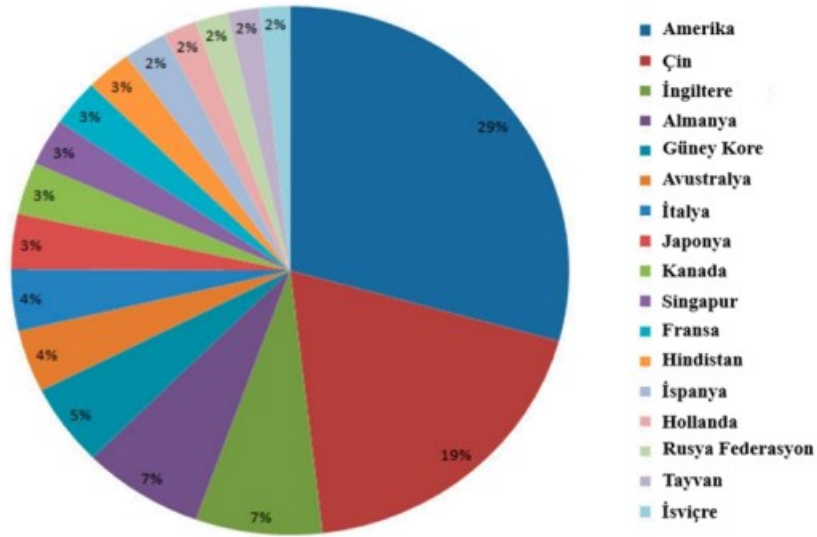
Çizelge 1.1 3B yazıcılarla ilgili tarihsel gelişmeler [1,2].

Buluş	Tarih
Fotopolimer hızlı prototipleme	1981
SLA teknolojisi	1984
FDM teknolojisi	1988
EOS firması ilk endüstriyel 3B cihazı üretti	1990
Stratasys FDM için kendi versiyonunupatentledi	1992
SLS teknolojisi tanıtıldı	1995
Biyotıp alanında 3B yazıcı ilk defa kullanıldı	1999
Object kendi 3B yazıcısını ve Z şirketi ise renkli 3B cihazını yaptı.	2000
Solidimension masaüstü 3B cihazını tanıttı.	2001
İlk defa 3B yazıcı ile insan böbreği geliştirildi.	2002
RepRap açık kaynak 3B cihaz tasarladı	2005
İlk defa 3B yazıcı ile protez bacak üretildi.	2008
Organova 3B yazıcı ile kan damarı üretti.	2009
Urbee 3B yazıcı ile araba geliştirdi.	2011
3B yazıcı ile ev üretildi. NASA 3B yazıcı ile yiyecek ve kıyafet üretme denemelerini paylaştı.	2014
3B yazıcı ile ilk defa insan kemiği geliştirildi.	2016
Seri üretim için yazılımlar geliştirildi.	2018

Eklemeli imalat üzerine yapılan çalışmalar geçtiğimiz 25 yılda artarak günümüze kadar süre gelmiştir. Sağlık, uzay, havacılık, inşaat, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok alanda eklemeli imalat üzerine yapılan Ar-Ge ve deneysel çalışmalar halen devam etmektedir. Çizelge 1.1 ve Şekil 1.1’de yıllara oranla yapılan çalışmalar gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1.1 Eklemeli imalat (a) Yıllara göre eklemeli imalat üzerine yayınlanan makale sayısı. (b) Ülkelere göre eklemeli imalat konusunda patent oranları [1,2].

Son yıllarda imalat sektöründeki Ar-Ge çalışmalarının diğer önemli konusu ise imalat sırasında çevreye verilen zararın minimum düzeyde tutulması olmuştur. Bu kapsamda üretimi yapılmış parçaların birleştirilme yöntemleri üzerine odaklanılmıştır. Aşağıda gösterilen Çizelge 1.2’de termoplastik malzemelere uygulanan kaynak yöntemleri kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmalar incelendiğinde, sürtünme karıştırma kaynağı’nın (SKK) ön hazırlık süresine ihtiyaç duymaması, sarf malzemesi ihtiyacının olmayışı ve ekonomikliği ile çevreci bir kaynak yöntemi olarak tercih edilmekte olduğu görülmektedir [2].

Çizelge 1.2 Termoplastik malzemelerin birleştirme yöntemlerinin karşılaştırılması [2,3].

Metot	Ön Hazırlık	Birleşme Süresi	Kaynak Süresi	Sarf Malzemesi	Fiyat (\$)
Ultrasonik	Enerji sağlayıcısı	1-3 sn	5-10 dk	Yok	30000
Sıcak levha	Yok	30-40 sn	60-90 s	Yok	47000
Sıcak gaz	V-oluk açılması	8-10 dk	15 dk	Gaz, dolgu malzemesi	3500
Ekstrüzyon	V- oluk açılması	8-10 dk	15 dk	Gaz, dolgu malzemesi	5500
Sürtünme	Yüzeylerin düzleştirilmesi	10-15 sn	6-8 dk	Yok	89000
Kimyasal yapıştırıcı	Yüzey temizlenmesi	3 dk	2-3 saat	Yüzey temizleyicisi, Yapıştırıcı	3000
SKK	Yok	2 dk	3 dk	Yok	11000

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak, farklı doluluk oranlarında, üç boyutlu imalat yöntemi ile basılmış PLA Plus numunelerin birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı bağlantılarda, doluluk oranları değişiminin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 2

KURUMSAL TEMELLER

2.1 EKLEMELİ İMALAT

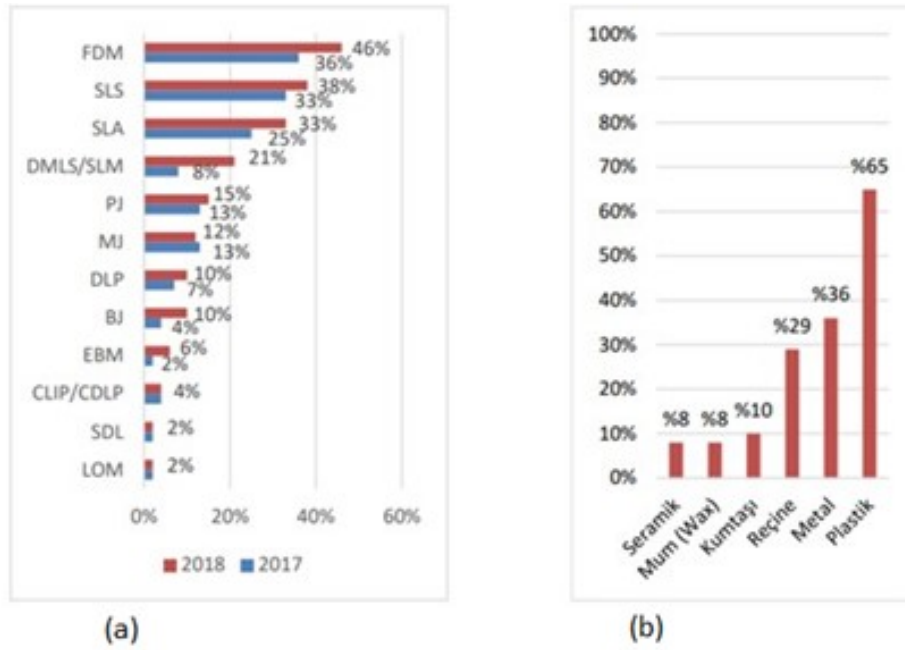
İmalat yöntemleri üzerine geçmişte yapılan çalışmalar sayesinde çeşitli tasarım kriterleri geliştirmiştir. Tasarımı yapılacak model geometriler karmaşık boyutlar kazanmıştır. Bilinen geleneksel imalat yöntemleri, belirli geometrik şekillerin imalatına olanak sağlamakta olup gelişen teknolojiyle talep edilen bazı tasarımlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu gibi eksiklikler beraberinde imalat sürecinde yaşanan zaman kayıplarına ve üretim maliyetlerinin artmasına neden olabilmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar yeni üretim tekniklerine ilgi artmış ve 1981 yılından itibaren katmanlı (üç boyutlu) imalat yöntemleri geliştirilerek kullanılmaya başlanmıştır.

Tasarım aşamasında belirlenen, karmaşık geometrik yapıya sahip ürünlerin üretilmesi üç boyutlu cihazlar ile mümkün hale gelmiştir. Üretimi planlanan modellerin, prototip aşamasında ortaya çıkan maliyetleri azaltılmış ve üretim hızı arttırılmıştır. Yaygın olarak kullanılan tasarım programları üç boyutlu CAD çizimleri ile birebir oranda prototipler üretilmektedir [2].

Eklemeli imalat ile elde edilen ekonomik kazanç bu alanda çeşitliliği arttırmış ve ulaşılabilirliği sağlamıştır. Kişisel tasarımların üretimine olanak sağlaması, masa üstü yazıcılar ile evlerde ve küçük atölyelerde tercih edilmesine imkân tanımıştır. Bununla birlikte, parçalar halinde üretilen karmaşık geometriler birleştirilerek bir araya getirilebilmektedir [4].

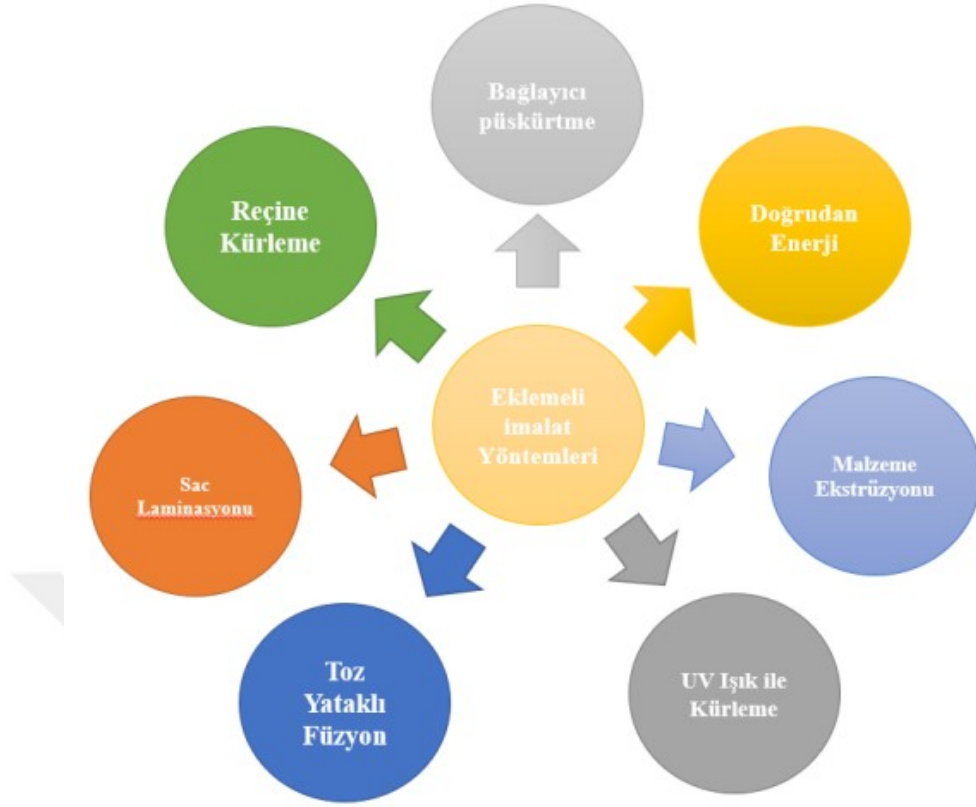
Eklemeli imalatın gelişmesinde, yaygın olarak kullanılan 3B baskı hızlı prototipleme ve ekonomik olması nedeniyle oldukça tercih edilmektedir. Talaşlı imalat ile üretilen ürünlerde talaş kesme ve uzaklaştırma işlemleri yapılmakta olup, 3B imalat teknolojisinde ise katmanlı imalat sırasında talaş uzaklaştırma işlemi olmadığı için malzeme tasarrufu

sağlanmaktadır. İmalat süreci içerisinde, kalıp tasarımının olmaması ve modellenen ürünün doğrudan üretilmesi 3B baskı yöntemini elverişli kılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda kompozit, plastik, metal ve çeşitli organik malzeme katkılı çeşitleri 3B baskı imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Özellikle, 3Boyutlu yazdırma işlemi, yazıcı teknolojisinin gelişmesi ve sarf malzeme çeşitliliğinin artması sayesinde otomotiv ve havacılık endüstrisinden modaya, kalıpcılıktan sağlık sektörüne kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır.



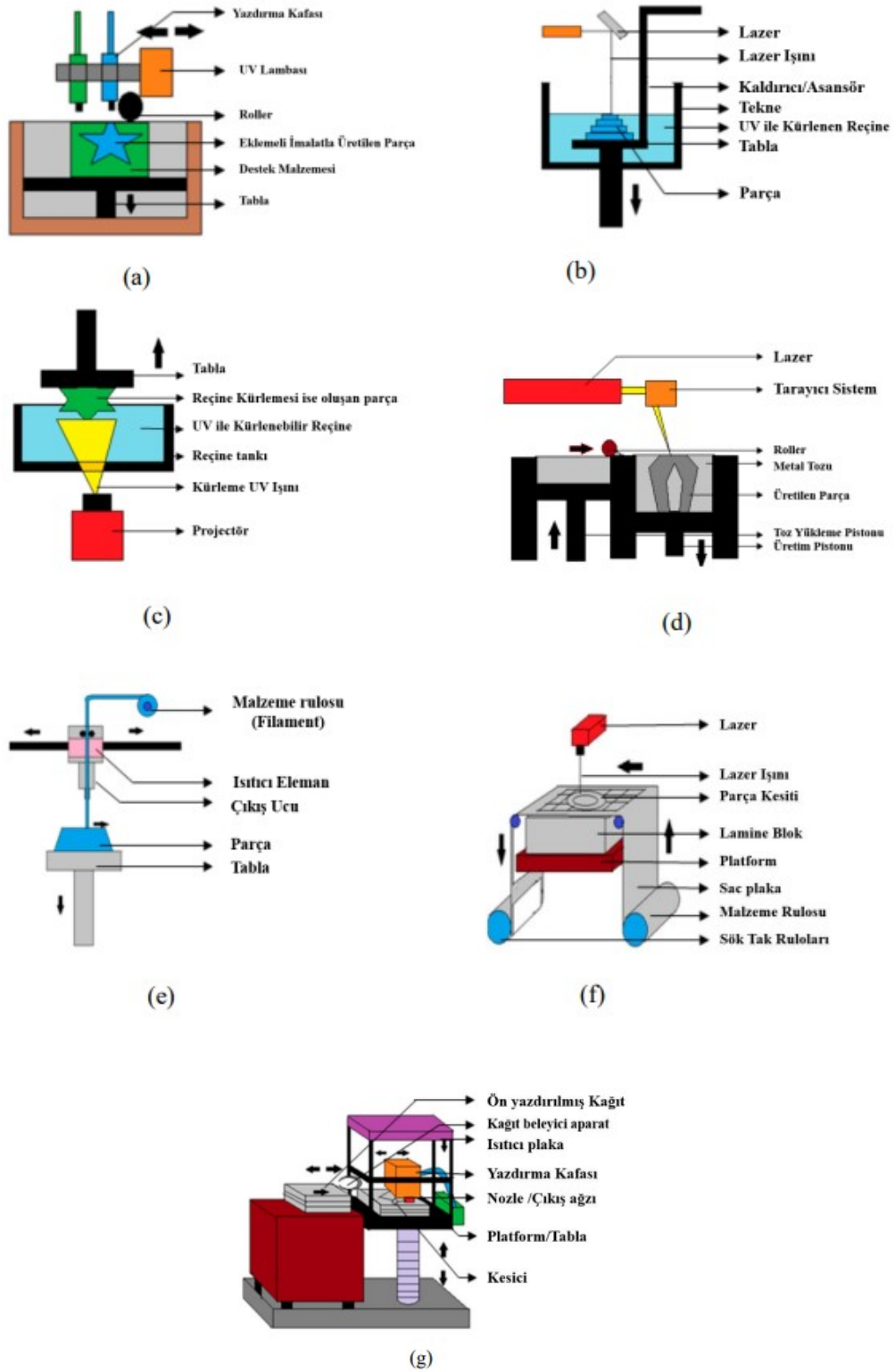
Şekil 2.1 (a) 2017-2018 yıllarında en çok tercih edilen 3B yazıcı teknolojileri, (b) 2018 yılında en çok kullanılan 3B baskı malzemeleri [5].

Eklemeli imalat, katman katman üretim şekli ile üç boyutlu baskı alma olarak tanınmaktadır. Bununla birlikte 3B model verileri ile modellenen parçaların birleştirilme süreci olarak da ifade edilebilir. Gelişen bu yöntem beraberinde kendi üretim standartlarını da oluşturmuştur. Örneğin Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO)/Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) 52900:2015 standardı incelendiğinde eklemeli imalat yönteminin sınıflandırıldığı görülmektedir [2].



Şekil 2.2 Eklemeli imalat süreçlerinin ISO/ASTM 52900:2015'e göre sınıflandırılması [2,6].

Eklemeli imalat içerisinde polimer malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler yedi kategoride incelenmiştir. Bu kategoriler: Polijet baskı, stereolitografi (SLA), doğrudan hafif işleme (DLP), seçici lazer sinterleme (SLS), eriyik yığma modelleme (EYM), lamine nesne imalatı (LOM), seçici biriktirme modellemesi (SDM) olarak ayrılmaktadır.



Şekil 2.3 Polimer malzemelerin üretimi için eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (a) Polijet baskı; (b) Stereolitografi (SLA); (c) Doğrudan hafif işleme (DLP); (d) Seçici lazer sinte (SLS); (e) Eriyik yığma modelleme (EYM); (f) Lamine nesne imalatı (LOM); (g) Seçici biriktirme modellemesi (SDM) [1,2].

Bu çalışmada, parça üretimi için malzeme ekstrüzyon yöntemi tercih edilmiştir. Malzeme ekstrüzyon yöntemi içerisinde EYM (Eriyik Yığma Modelleme) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çalışmada plaka üretimi için kullanılan EYM yöntemi Şekil 2.3(e)'deki resminde şematik olarak gösterilmiştir.

2.2 ERİYİK YIĞMA MODELLEMETEKİNİĞİ

Eklemeli imalat içerisinde EYM (Eriyik Yığma Modelleme) yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Karmaşık geometrilerin üretimine elverişli olması sebebiyle, endüstrinin dışında akademik çalışmalar içinde kullanılan 3B baskı alma yöntemidir [7].

Eriyik yığma modelleme (EYM) tekniğinde yapı oryantasyonu, filament malzemesi, baskı hızı, katman kalınlığı, yatak sıcaklığı, ekstrüzyon, ekstrüder sıcaklığı, tarama açısı ve dolgu yüzdesi gibi çeşitli işlem parametreleri, üretilen modelin kalitesini ve mekanik özelliklerini belirlemektedir [7,8].

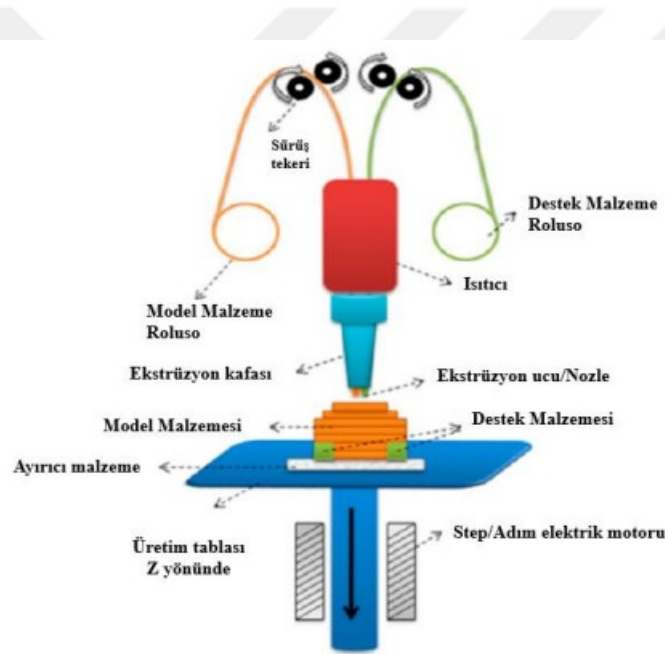
EYM tekniği ile üretilen PLA Plus (Polilaktikasit türevi) modelin baskı parametrelerinin optimizasyonu üzerine yapılan incelemelerde, çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre olarak doluluk oranının olduğu, diğer önemli parametrelerin ise tarama açısı ve baskı hızının olduğu tespit edilmiştir [7,9].

EYM tekniği ile üretilen PLA (Polilaktikasit) ve PET (Polietilen Tereftalat) filament malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda, malzemelerin mekanik özelliklerine doluluk oranı etkisi araştırılmıştır. Doluluk oranının artması ile PLA ve PET malzemelerde sertliğin arttığı, yüzey pürüzlülüğü ile çekme dayanımında ise öncesinde artış gözlemlendiği daha sonra azalma eğilimi olduğu yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir [7,10].

EYM tekniği ile üretilen PLA esaslı malzemelerin yapıştırılmasında, çeşitli işlem parametrelerinde (yapıştırma kalınlığı, yüzey işlemleri, yapıştırıcı tipi gibi) yapılan değişikliklerin bağlantı mukavemetine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda

dolgu oranındaki artışın, parça mukavemetindeki artışla doğru orantılı olarak etkilediği gözlemlenmiştir [11].

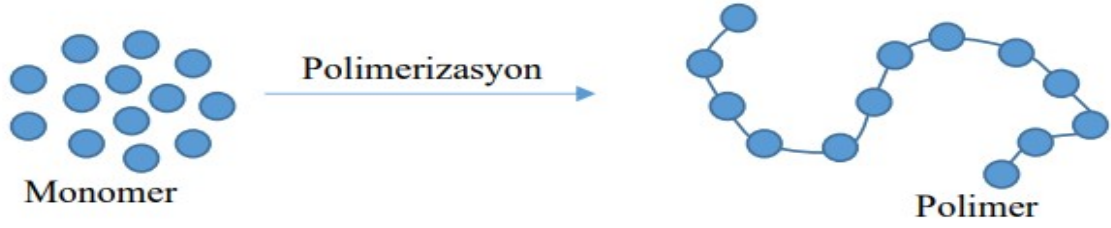
EYM tekniğinde model üretimi, plastik hammadde olan şerit filamentin, ekstrüzyon kafasına iletilmesi ile başlar. Isı geçişi ile filament malzeme eriyik hale getirilir. Modellemesi yapılan ürün için, ekstrüzyon kafasından eriyik haldeki filament malzemesi, damlalar halinde üretim tablasına akıtılarak modelin ilk katmanını oluşturulur. Modeli oluşturan her katmanda, üretim tablası hareket ederek parça katmanların oluşmasını sağlar. Üretim sırasında, destekleme görevi gören ayrı bir yapı oluşur ve üretim tamamlandığı süreçte bu yapı model üründen sökülür. Model üretimi tamamlanmış olur [2,12].



Şekil 2.4 EYM’de malzemenin ekstrüzyonu [4].

2.3 POLİMERLER

Türkçe’ye çevirdiğimizde “çok parçacıklı” anlamına gelen “polimer” Latince kökenli bir sözcüktür. “Monomer” ise “tekil parçacık” anlamına gelmektedir. Birden fazla monomerin bir araya gelerek oluşturdukları dizilim, kimyasal bağlar ile polimerleri oluşturur [2,13,14].



Şekil 2.5 Monomerve polimerin şematik gösterimi [2].

Katmanlı imalat malzemenin ısı altında şekillendirilmesi ya da kürleştirilmesi nedeniyle termoplastikler tercih edilir. Termoplastik ürünlerin tercih edilmesinde, kolay işlenebilmesi ve yaygın kullanım alanına sahip olması etkilidir. Termoplastik malzemeler ASA, ABS, PLA vb. ürünlerdir [2,15].

Çizelge 2.1 Polimerlerin sınıflandırılması [2,14].

Polimerler	
1 - Isı karşısında gösterdikleri dirence göre	1.1 – Termoplastikler
	1.2 – Termosetler
2 – Fiziksel mekanik özelliklerine göre	2.1 – Plastikler
	2.2 – Fiberler
	2.3 – Elastomerler
3 – Kaynağına göre	3.1 – Doğal polimerler
	3.2 – Sentetik polimerler
	3.3 – Yarı sentetik polimerler
4 – Monomerlerin bileşimine göre	4.1 – Homopolimer
	4.2 – Kopolimer
5 – Zincir yapısına göre	5.1 – Doğrusal Polimerler
	5.2 – Dallanmış Polimerler
	5.3 – Çapraz bağlı polimerler
6 – Zincir yapısının geometrik şekline göre	6.1 – Amorf polimerler
	6.2 – Kristalin polimerler
	6.3 – Kısmi kristalin polimerler
7 – Zincir konfigürasyonuna göre	7.1 – İzotaktik polimerler
	7.2 – Sindiotaktik polimerler
	7.3 – Ataktik polimerler
8 – Kullanım alanına göre	8.1 – Plastikler
	8.2 -Elastomerler
	8.3 – Fiberler
	8.4 – Kaplamalar
	8.5 – Filmler
	8.6 – Köpükler
	8.7 - Yapıştırıcılar

Çizelge 2.1 incelendiğinde, polimerlerin ısı karşısındaki gösterdikleri dirence bağlı olarak termosetler ve termoplastikler olarak iki grup oluşturduğu görülmektedir.

Termosetler oda sıcaklığında maddenin sıvı halinde olurlar. Isı etkisinde bırakıldıklarında kimyasal tepkimeye girerek bir seferliğine katı hale dönüşürler. Bu katılaşma halinden sonra ısıya karşı dirençleri çok yüksek hale gelir ve geri dönüşümü olanaksızdır [16].

Termoplastikler ise oda sıcaklığında maddenin katı halinde olurlar. Isı etkisi altında işlenebilmekte ve geri dönüşüme olanak verebilmektedir.

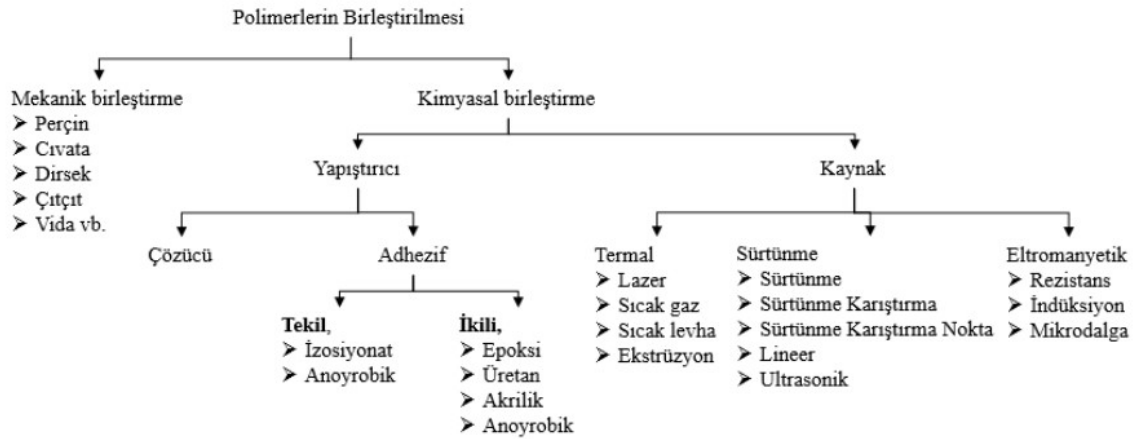
2.4 TERMOPLASTİKLER

Termoplastikler oda sıcaklığında sert yapıdadırlar, ancak ısı etkisinde kaldıklarında yumuşarlar. Termoplastik malzemelerin sertleşme için kimyasal çözücülere ihtiyaç duymaması, geri dönüşüme elverişli olmaları, kırılma tokluklarının yüksek olması, hammadde olarak uzun raf ömrüne sahip olmaları vb. özellikleri tercih edilmesinde avantaj sağlamaktadır [16].

Termoplastik malzemelerin darbe dayanımı ile sertlik özellikleri oldukça yüksektir. Termoplastiklerin bu özellikleri kullanım alanlarını yaygınlaştırmaktadır [4].

2.5 POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLME METOTLARI

Polimerlerin birleştirilme metotları, mekanik birleştirme ve kimyasal birleştirme olmak üzere iki grupta değerlendirilebilir. Uygulanılan birleştirme metoduna göre ayrıştırma aşamasında parçalarda deformasyon ortaya çıkabilir. Mekanik birleştirme metotları ile birleştirilen parçalar ayrıştırma aşamasında deformasyon oluşturmada sönülebilir, ancak kimyasal birleştirmelerde ayrıştırma sırasında deformasyon meydana gelmektedir. Kimyasal birleştirme metotlarından olan yapıştırıcı metodu birbirinden farklı polimerler arasında kullanılmakla birlikte, polimerler ile diğer tüm malzemelerin (termoset, elastomer, metal vb.) birleştirilmesinde kullanılabılır. Ancak kaynak metodu sadece termoplastik malzemeler arasında uygulanabilir [2,17].



Şekil 2.6 Polimerlerin birleştirme metotları [14].

2.6 TERMOPLASTİK MALZEMELERİN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak yöntemleri Çizelge 2.2’de sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesine göre ikiye ayrılır. Bunlar ise ısının transfer edildiği ısı transfer yöntemleri ile ısının direkt malzemede oluşturulduğu yöntemlerdir [2,14].

Çizelge 2.2 Termoplastiklerin birleştirme yöntemleri [14].

Isı Transfer Yöntemleri	Isının Direkt Malzemede Oluşturulduğu Yöntemler	
1-Isıl Yöntemler	1-Mekanik Yöntemler (Sürtünme Esaslı)	2- Elektromanyetik Yöntemler
• Sıcak Gaz Kaynağı • Sıcak Kama Kaynağı • Sıcak Eleman Kaynağı • Ekstrüzyon Kaynağı • İnfrared Isıtma Kaynağı • Lazer Kaynağı	• Sürtünme Kaynağı • Sürtünme Karıştırma Kaynağı • Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı • Titreşim Kaynağı (100-200 Hz) • Ultrasonik Kaynak (20-40 kHz)	• Rezistans (Elektro-füzyon, Implant) Kaynağı • İndüksiyon Kaynağı (5-25 MHz) • Dielektrik (Yüksek Frekans) Kaynağı (1-100 MHz) • Mikro-dalga Isıtma Kaynağı (1-100 GHz)

Isıl yöntemler, yardımcı bir ara eleman ile kaynak yapılacak parçaya ısının iletilmesi yöntemidir. Örneğin sıcak bir levhanın ısıtılması ile iki polipropilen (PP) boru parçası birbirine kaynak edilerek birleştirilir ve bu şekilde tesisat hattı oluşturulur. İşlem sırasında ısıtılmış bir plaka kaynak yapılacak iki boru yüzeyi arasına yerleştirilir, temas yüzeylerindeki

sıcaklık kristal erime sıcaklığını geçer ve plaka aradan kaldırılarak boru yüzeyleri birbirine örtüştürülür. İki yüzey üzerinde oluşmuş ergimiş malzeme birbirine karışır. Yüzeylerin soğuması ile rijit bir yapı elde edilerek kaynak işlemi tamamlanmış olur.

Isının direkt malzemede oluşturulduğu yöntemlerde ise kaynak yapılacak parçaya ısı, mekanik veya elektromanyetik yöntemlerle aktarılır. Örneğin iki plastik plaka yüzeyinin birbirine temas etmesi ile yüzeyler arasında sürtünme meydana getirilmesi ile yüzeyde dar bir alanda ısı meydana getirilmektedir. Oluşan sürtünme enerjisinin ortaya çıkarttığı ısı ile temas yüzeylerinde sıcaklık kristal erime sıcaklığını geçer ve iki plaka yüzeyinde oluşmuş ergimiş moleküller birbirine karışır. Sürtünme işleminin tamamlanması ile soğuma gerçekleştirilir ve kaynak işlemi tamamlanmış olur.

2.7 TERMOPLASTİK KAYNAK YÖNTEMLERİNİN VERİMLİLİĞİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan kaynak metotlarının, kaynak verimliliği Çizelge 2.3'te sıralanmıştır. Görüldüğü üzere Çizelge 2.3'te en yüksek verimlilik ile sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) %95 ile yer almaktadır.

Çizelge 2.3 Termoplastiklerin birleştirme yöntemlerinin verimliliklerinin karşılaştırılması [2,3].

Metot	Birleşme Verimliliği (%)	Tekrarlanabilirlik	Devamlılık	Ayrık
Ultrasonik	75	Yüksek	Hayır	Evet
Sıcak Plaka	90	Yüksek	Hayır	Evet
Sıcak Gaz	60	Uygun	Zor	Evet
Ekstrüzyon	70	Uygun	Zor	Evet
Sürtünme	85	Yüksek	Hayır	Evet
Yapıştırıcı	90	Uygun	Hayır	Evet
SKK	95	Yüksek	Evet	Evet

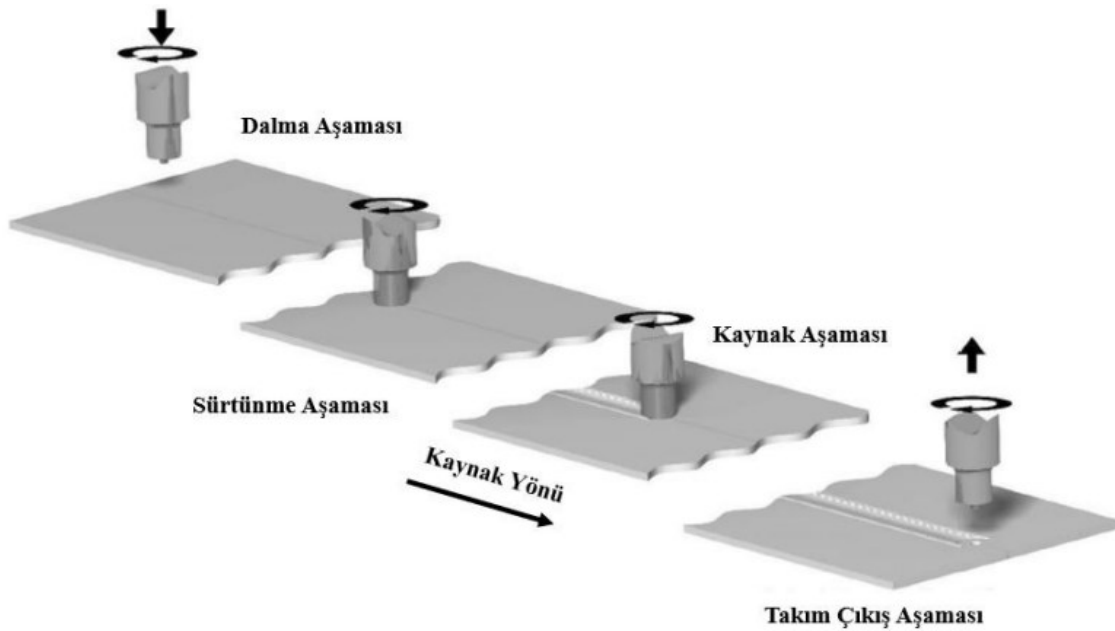
2.8 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK)

Sürtünme karıştırma kaynağı, termoplastiklerin yaygın kullanıldığı uzay, havacılık, savunma sanayi ve otomotiv endüstrilerinde tercih edilmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının enerji

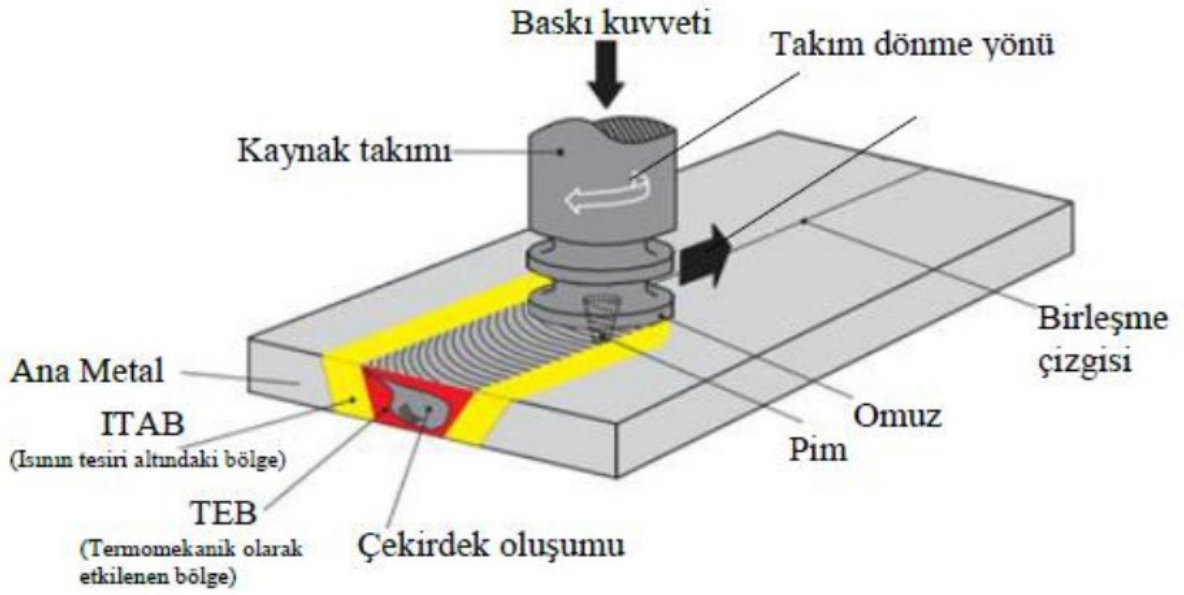
verimliliğinin yüksek olması, kaynak kalitesinin verimliliği ve çevre dostu bir işlem olması bu kaynak yöntemini tercih edilir hale getirmektedir [2,18,19].

Tarihsel gelişimi, 1991 yılında İngiltere’deki The Welding Institute tarafından katı hal kaynak teknikleri alanında başlayan sürtünme karıştırma kaynağı, günümüze kadar farklı sektörlerde kullanılarak geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Teknik olarak sürtünme kaynağı ile benzer göstermesine karşın, uygulama alanında farklılık göstermektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı, döner tipte bir takım ucunun iki plaka ara yüzeyleri arasında konumlandırılarak, bu plakaların ara yüzeylerinde dönme yolu ile sürtünme oluşturması ve bu sürtünme yolu ile açığa çıkan ısınnın basınç ile birlikte difüzyon etkisi meydana getirmesiyle yapılan bir birleştirme yöntemidir [2,20].

Sürtünme karıştırma kaynağı için kaynak prosesi; takım ucu, plaka sabitleme elemanları ile kaynaklanacak plakalardan oluşmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağında işlem sırası ilk olarak, iki plakanın yan yana sabitlenmesi ile başlar. Daha sonra takım ucu belirli bir devirde dönme ve ilerleme hızı ile belirlenen birleştirme bölgesine istenilen derinlikte dalar, dalma tamamlandıktan sonra aynı seviyede tanımlanan birleştirme sınırına kadar ilerler, takım ucu bu noktada kaynak işlemini tamamlar ve geri çekilerek parçadan ayrılır [2].



Şekil 2.7 Sürtünme karıştırma kaynağı aşamaları [2,21].



Şekil 2.8 Sürtünme karıştırma kaynağı prosesi [2,14].

Şekil 2.8 incelendiğinde, sürtünme karıştırma kaynak işleminde etkili olan kavramlar görülmektedir. Bu kavramlar aşağıda açıklanmıştır:

- a) Baskı kuvveti: Freze takımı tarafından parçaya uygulanan basma kuvvetidir.
- b) Takım dönme yönü: Genelde dış yönüne dönme yönü belirlenir.
- c) Kaynak takımı: Kaynak yapmak için tasarlanmakta ve dönme ile ilerleme hızını freze takımından almaktadır.
- d) Omuz: Takımın parça yüzeyine temas eden yüzeyidir.
- e) Pim: İki parça arasına girerek sürtünme işlemini gerçekleştirir.
- f) Birleşme çizgisi: İki parçanın tasarlanan birleşme çizgisidir. Bu çizgi boyunca kaynak işlemi uygulanır.
- g) Ana metal: Sürtünme enerjisi ile ortaya çıkan ısıdan etkilenmeyen bölgedir.
- h) Isının tesiri altındaki bölge (ITAB): Sürtünme enerjisi ile ortaya çıkan ısı etkisi ile zayıflayan bölgedir. Kopmaların çoğunluğu bu bölgede meydana gelir.
- i) Çekirdek oluşumu: Yeniden kristalleşmenin meydana geldiği bölgedir.
- j) TEB: Termodinamik olarak etki altında kalan bölgedir.

BÖLÜM 3

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1 3B YAZICILARDA ÜRETİLEN MALZEMELERİN DOLULUK ORANININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

EYM tipi üç boyutlu yazıcılarda, farklı doluluk oranı ile elde edilen baskıların mekanik özelliklerine doluluk oranı etki etmektedir. Doluluk oranının mekanik özelliklere nasıl etki ettiğini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Üç boyutlu yazıcılarda doluluk oranı ile malzemelerin mekanik özelliklere etkisinin incelendiği çalışmalardan yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

Evlen ve arkadaşları, üç boyutlu yazıcıda ABS, PLA ve kompozit filamentler kullanarak mekanik sistemin etrafı açık ve mekanik sistemin etrafı kapalı olduğu iki farklı durumda %10, %30 ve %50 doluluk oranlarında elde edilen numuneleri çekme deneyine ve Shore sertlik ölçme testine tabi tutmuşlardır. Deneysel sonuçlar, kapalı sistemde üretilen numunelerin açık sistemde üretilen numunelere göre sertlik değerinin daha düşük olduğu, çekme dirençlerinin ve % uzamalarının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Farklı doluluk oranlarında elde edilen deneysel veriler incelendiğinde doluluk oranının artması ile sertlik değerinin de arttığı tespit edilmiştir [22].

Çalışkan ve arkadaşları, üç boyutlu yazıcıda farklı doluluk oranlarında PLA ve PET filamentler kullanarak, malzemelerin %10, %20, %30, %40 ve %50 doluluk oranlarında mekanik test numunelerini üretmiş, elde edilen numuneleri tek eksenli çekme testlerine tabi tutularak sertlik ve pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Deneysel sonuçlar, yapılan ölçümler incelendiğinde PET ve PLA malzemelerde malzemenin doluluk oranı ile sertlik değeri arasında doğru orantı olduğu, doluluk oranının artması ile sertlik değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin pürüzlülük ile çekme değerlerinin birbiriyle ters orantılı

olduğu, pürüzlülük ile çekme mukavemeti değęlerinin %30 doluluk oranı ile başlayarak %10 ve %20 doluluk oranlarındakinin aksi yönde seyrettiği gözlemlenmiştir [23].

Günay ve arkadaşları, üç boyutlu yazıcıda PLA Plus filamentler kullanılarak, %50, %75 ve %100 doluluk oranlarında mekanik test numunelerini üretmiş, baskı hızı, tarama açısı ve doluluk oranı işlem parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini varyans analizi (ANOVA) ile gözlemlenmiştir. Bununla beraber Taguchi metodolojisi ile işlem parametrelerinin çekme dayanımı için optimizasyonu yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, çekme dayanımı üzerinde en etkin parametre doluluk oranı olarak göstermiş, sırası ile tarama açısı ve baskı hızı diğer önemli parametreler olarak tespit edilmiştir [24].

Anaç ve diğerleri, üç boyutlu yazıcıda PLA filamentler kullanılarak %20, %40, %60, %80 ve %100 doluluk oranlarında mekanik test numunelerini üretmiş ve iki farklı yapıştırıcı (Loctite 9492 ve Terason 9225) ile birleştirmişlerdir. Yüzey hazırlığı için 320 ve 600 SiC zımpara tercih edilerek mekanik zımparalama yapılmış ve üç farklı yapıştırıcı kalınlığı (0,3 0,18 ve 0,1 mm) ile PLA-PLA test numuneleri ile yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Oluşturulan bağlantılar çekme testine tabi tutularak mekanik özellikleri gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, 3boyutlu yazıcıda üretilen parçalarda doluluk oranının artması ile parça mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı çeşidine bağlı olarak yapıştırma bağlantı mukavemeti yapıştırma kalınlığının değişiminden ters orantılı olarak etkilendiği tespit edilmiştir [25].

Turan ve diğerleri, üç boyutlu yazıcıda Anycubic UV reçine malzeme kullanılarak farklı doluluk oranlarında mekanik test numuneleri üretmişlerdir. Üretilen %25, %50 ve %100 doluluk oranlarındaki numuneler ile çekme ve basma testleri gerçekteştirilmiş, doluluk oranının mekanik özellikler üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, üretilen test numunelerinde ortalama çekme ve basma mukavemeti değęlerinin doluluk oranı ile doğru orantılı olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir [26].

Koçar ve diğerleri, üç boyutlu yazıcıda PLA Plus filamentler kullanılarak %20 ve %100 doluluk oranlarında mekanik test numuneleri üretmişlerdir. Üretilen test numuneleri, Araldite 2015 ve Loctite 9466 ticari yapıştırıcıları ile PVC esaslı ve PS-Th esaslı ticari olmayan yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilmiştir. Kullanılan yapıştırıcılar içerisine %5 oranında iki

farklı dolgu malzemesi olan yumuşak lehim tozu ile fındık kabuğu tozu ilave edilmiştir. Deneysel sonuçlar, üç boyutlu yazıcılarda üretilen numunelerde doluluk oranı azaldığında parça mukavemetinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranı %100 oran ile Loctite 9466 yapıştırıcı içerisine %5 lehim ve fındık kabuğu tozu ilavesi, deneylerde diğer yapıştırıcılara oranla en yüksek mukavemeti sağlamıştır. %20 doluluk oranı ile üretilmiş numunelerin yapıştırma işleminde, yapıştırıcı içerisine dolgu malzemesi eklenmesi mukavemeti olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir [27].

3.2 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİNİN UYGULANDIĞI METAL MALZEMELER

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi bir dizi alüminyum alaşımı, magnezyum, bakır gibi malzemelerin dışında bazı termoplastik malzemelerin birleştirilmesin için de kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağının mekanik özelliklere nasıl etki ettiğini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin uygulandığı malzemelerin, mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmalardan yapılan derleme aşağıda sunulmuştur.

Catalgöl ve diğerleri, pirinç levhaların farklı kaynak parametreleri ile sürtünme karıştırma kaynak tekniği kullanılarak birleştirilmesini gözlemlemişlerdir. Yapılan birleştirmeler sonucunda elde edilen numunelerin mekanik özellikleri, çekme deneyi ve mikro sertlik deneyleri ile belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, kaynak işlemi uygulanmış numunelerden alınan alın kesit üzerinde ana metal bölgesi, termomekanik mekanik olarak etkilenen bölge, ısıdan etkilenen bölge ve karıştırma bölgelerinden elde edilmiştir. Kaynak işlemi gerçekleştirilirken takım dönme hızı ile kaynak ilerleme hızlarına bağlı olarak kaynak bölgesinde meydana gelen değişken ısı miktarı, malzeme akışının değişkenlik göstermesi sebebi ile mekanik özelliklerinde değişkenlik gösterdiği görülmüştür [28].

Çelik ve arkadaşları, AZ31B-H24 magnezyum alaşım levhalarının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan parçalara çekme deneyi ve mikro sertlik ölçme testleri uygulanmıştır. Çekme testi verileri incelendiğinde kaynaklı bağlantıların mukavemeti ana malzeme ile kıyaslandığında kaynak dayanım değerinde %75,88'lik bir artış sağladığı gözlemlenmiştir [29].

Çetkin ve arkadaşları, AA5182-AA7075 alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilen numuneler üzerinde kaynak ilerleme hızı, karıştırıcı uç dönme devri ile uç geometrisinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacı ile numunelere çekme testi uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde uygun dönme devrinin, ilerleme hızı ve uç geometrisi kombinasyonunun kaynak kalitesini arttırdığı gözlemlenmiştir [30]. Alnak ve arkadaşları, AISI316 östenik paslanmaz çelik ve sade karbonlu çeliklerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile birleştirilmesini incelemiştir. Kaynak işlemi sonucunda, numunelerin kaynaklı bölgelerinin mikroyapıları ve mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve en uyumlu kaynak çiftinin belirlenmesi öngörülmüştür. Numuneler üzerinde yapılan mekanik testler ile mikroyapı analizleri sonucunda en uyumlu kaynak çiftinin AISI 316-AISI 1010 olduğu gözlemlenmiştir [31].

İpekoğlu ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile dört farklı kalınlıktaki AA6061-T6 levhalarının birleştirilebilmesi için gerekli olan kaynak parametrelerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Numunelere uygulanmak üzere, her bir kalınlık ölçüsü için birbirinden farklı dört karıştırıcı takım temin edilerek, bu takım uçlarının kullanıldığı her bir kalınlık ölçüsü için kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaynak işlemi sonucunda birleştirilmiş numunelerin, çekme deneyi ve sertlik ölçümleri ile mekanik özellikleri belirlenmiştir. Numuneler üzerinde yapılan testler ile farklı kalınlıktaki AA6061-T6 alaşımı numunelerinin uygun karıştırıcı takımlar ve kaynak parametreleri ile birleştirilebileceği gözlemlenmiştir [32].

Batuk ve diğerleri, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile AA6061-T6 levhalarının birleştirilmesini mekanik özellikleri yönünden incelemişlerdir. Kaynak işlemi sonucunda elde edilen numunelerin, çekme deneyi ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, birleştirilmiş numunelerin çekme mukavemetinin, ana malzemeye oranla %30-90 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Birleştirme yönteminde tasarım ile takım geometrisinin en önemli parametreler olduğu ortaya çıkmıştır [33].

3.3 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ İLE POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi polimerlerin birleştirilmesi için de kullanılmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağının mekanik özelliklere nasıl etki ettiğini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin uygulandığı polimerlerin, mekanik özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmalardan yapılan derleme aşağıda sunulmuştur.

Javadi ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile ABS parçalarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çok duvarlı karbon nanotüp kullanımını incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin çekme deneyi yapılarak, mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, karbon nanotüp kullanılması ile sertlik değerlerinin ve çekme mukavemetlerinin arttığını göstermiştir [34].

Petousis ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen poli (metil met-akrilat) (PMMA)'dan basılan ve ekstrüde edilmiş PMMA numunelerinin birleştirilmesini incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin çekme deneyi ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, hibrit numunelerin yüksek kaynak verimliliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir [35].

Afşari ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen polipropilen/grafen (PP/GNP) nanokompozit numunelerinin birleştirilmesini incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin, sertlik ve çekme deneyi testleri yapılarak mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, kaynak takım ucunun dönme hızının artması ile çekme mukavemetinin arttığı ve sertliğin azaldığı, ayrıca kaynak ilerleme hızının artması ile çekme mukavemetinin azaldığı sertliğin arttığını ortaya çıkartmıştır [36].

Azhiri ve diğerleri, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile ABS parçalarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla nano-silika toz ilave edilmesi incelenmiştir. Elde edilen numunelerin çekme deneyi ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Çıkan sonuçlardan, nano-silika ilavesinin kaynak bağlantı mukavemetini arttırdığı anlaşılmıştır [37].

Anaç, sürtünme karıştırma kaynağı yöntemini kullanarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen polietilen (HDPE) ile polilaktik asit (PLA Plus) numunelerinin birleştirilmesini incelemiştir. Elde edilen numunelerin, çekme deneyi ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, PLA Plus numunelerinin HDPE numunelerine kıyasla sürtünme karıştırma kaynağı için daha uygun bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir [38].

Forcellese ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen ABS PLUS TM-P430 numunelerinin birleştirilmesini incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin, eğilme testi ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, kaynak ilerleme hızının sabit tutulması ve kaynak takım ucunun dönme hızının arttırılması sonucunda eğilme geriliminin arttığı, kaynak takım ucunun dönme hızının azaltılması ve kaynak hızının arttırılması ile deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir [39].

Tiwary ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen polietilen tereftalat (PET-G) ile ABS numunelerinin birleştirilmesini incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin, çekme deneyi ile mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, çekme deneyi sonuçları incelendiğinde numunelerin ana malzemeye oranla daha zayıf bağlantılar oluşturduğu anlaşılmıştır [40].

Sharma ve arkadaşları, petrol bazlı polimerlerin alternatifini olarak biyolojik olarak ayrışabilen biobozunur polimerlerin tercih edilmesini sağlamak için, sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerinin birleştirilmesini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminde takım ilerleme hızı, takım dönme hızı ve farklı pin geometrileri kullanılarak, numunelerin çekme deneyi ile mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, kaynak birleştirilmesinde silindirik pin geometrisi kullanımının daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığını ve takım ilerleme hızının artması ile kaynak mukavemetinin azaldığını ifade etmişlerdir [41].

Kumar ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı kullanılarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerinin konik silindirik pin kullanılarak birleştirilmesini incelemişlerdir. Elde edilen numunelerin, çekme deneyi yapılmıştır. Sonuçlarda, 1400 dev/dak takım dönme hızı ile 10 mm/dak takım ilerleme hızında kaynak verimliliğinin %40 olduğu grlmştir [42].

Kumar ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynağı kullanarak, üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen alüminyum takviyeli ABS-PA6 termoplastik kompozit numunelerinin birleştirilmesini incelemiştir. Elde edilen numunelerin, çekme deneyi ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, 1400 dev/dak takım dönme hızı ile 30 mm/dak takım ilerleme hızında kaynak verimliliğinin maksimum olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın çıktısı olarak bulunan sonuçların petrol/gaz boru hattının birleştirilmesi ve çatlakların doldurulmasında zaman kaybını azaltacağı ifade edilmiştir [43].

3.3 ÇALIŞMANIN MOTİVASYONU

Yapılan literatür araştırmasında birbirinden farklı ve birbirine benzer malzemelerin birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynak yönteminin kullanıldığı belirlenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak işleminde, kaynak kalitesinin iyileştirilmesi için işlem parametrelerinin (kaynak hızı, takım dönme hızı, omuz çapı, omuz şekli, karıştırıcı uç geometrisi) değerlendirildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Fakat üç boyutlu yazıcılarda üretilen plastik malzemelerin birleştirilmesi ile ilgili az sayıda çalışma vardır. Mevcut çalışmalarda, %100 doluluk oranındaki parçaların birleştirilmesi üzerinedir. Üç boyutlu yazıcıların en büyük avantajlarından biri farklı doluluk oranlarında (özellikle düşük doluluk oranlarında) parça üretilebilmesidir. Bununla birlikte, literatürde düşük doluluk oranlarında parçaların sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmesi hakkında herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu nedenle bu yapılan çalışmada, üç boyutlu yazıcılarda farklı doluluk oranlarında üretilmiş PLA Plus plakaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmesi konusu araştırılmıştır.



BÖLÜM 4

MALZEME VE METOT

4.1 PLA PLUS FİLAMENTİN ÖZELLİKLERİ

Polilaktikasit (PLA), üretim/baskı kolaylığı ve 3B yazıcı teknolojisine uyumlu olmasından dolayı eklemeli imalatla çok kullanılan ve tercih edilen bir malzemedir. Bu sebepten deneylerde PLA Plus filamentler kullanılmıştır. PLA 140 °C'ye kadar ısı direnci, UV direnci ve darbe direnci sunar. Yüksek biyo içeriğe sahiptir ve böylece karbon ayak izini azaltmaktadır. Ayrıca doğada toksik değildir ve insan sağlığına zarar vermeyen bir termoplastiktir [44-45]. PLA Plus standart PLA'nın mekanik özelliklerinin güçlendirilmiş bir çeşididir. PLA Plus, PLA'ya kıyasla daha tok ve yüksek darbe direncine sahiptir [46]. Çalışmada kullanılan filamentlerin özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Filament malzemelerinin mekanik/teknik özellikleri.

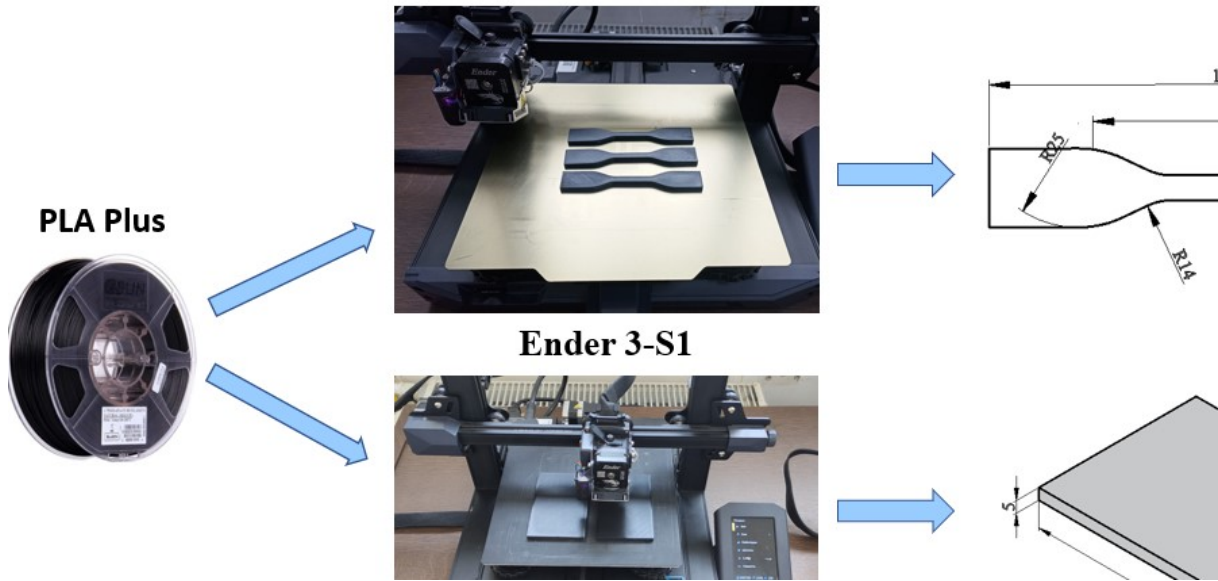
Mekanik Özellikler	PLA Plus
Çap Ölçüsü (mm)	1.75
Marka	eSUN
Renk	Siyah
Çekme Mukavemeti(MPa)	63
Kopma Uzaması (%)	20
Yoğunluk (g/cm ³)	1.23

4.2 PLA PLUS MALZEMENİN 3B BASKI SÜRECİ

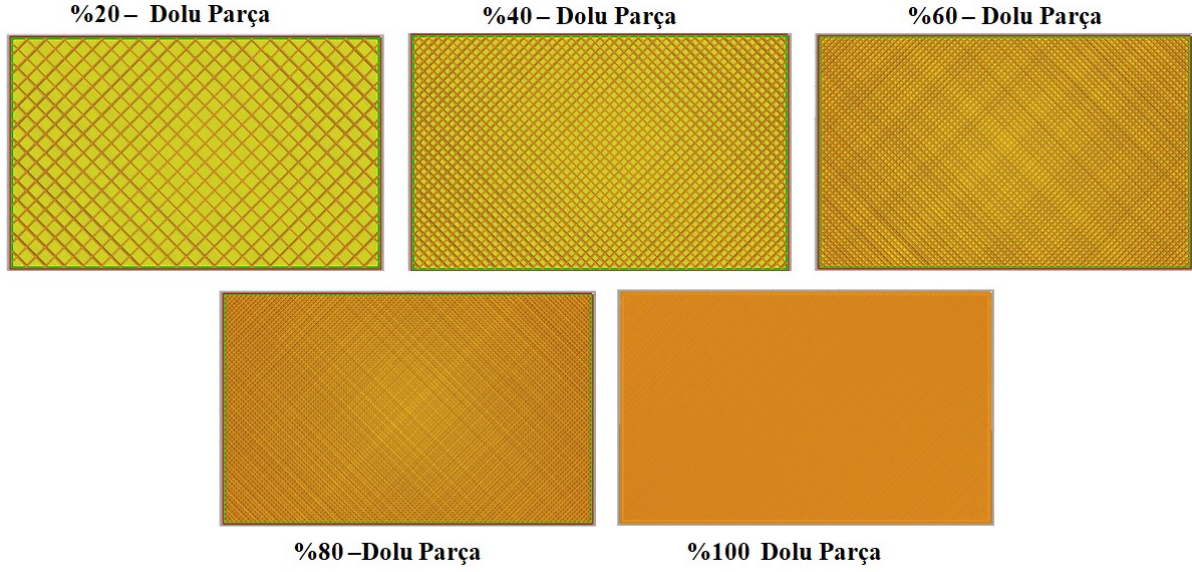
Çalışmada, PLA Plus filamentten belirlenen ölçülerde numunelerin basılması için Ender 3 S1 yazıcı, baskı parametreleri değerleri nozul sıcaklığı 210 °C, tabla sıcaklığı 60 °C ve basma hızı 60 mm/sn olarak kullanılmıştır. 3B yazıcı deney numunelerinin farklı doluluk oranlarındaki (%20, %40, %60, %80 ve %100) mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme test numuneleri (ASTM D638-10) ve sürtünme karıştırma kaynağı için 112x72 mm boyutlarında

PLA Plus plakalar basılmıştır [47]. Tüm numunelerde katman kalınlığı 0.1 mm olarak sabittir. Şekil 4.1’de baskı sürecinin akış süreci, Şekil 4.1-a’da çekme test numunelerinin ve Şekil 4.1-b’de SKK numunelerinin ölçüleri verilmiştir.

Eklemeli imalat yönteminde ürün kalitesi ve mekanik özellikler birçok parametreden etkilenmektedir. Bu parametreler kullanılan malzeme ve nozul sıcaklığı, katman kalınlığı, baskı hızı, tabla sıcaklığı vb. olmak üzere çeşitli işlem parametreleridir [48, 49]. Deneylerdeki numunelerin tamamı XYZ eksen düzeninde düz olarak, farklı doluluk oranındaki numuneler ızgara deseninde basılmıştır. %100 doluluk oranındaki numunelerde ise, ekstruderin her katmanda sırasıyla 45 ve -45 derecelik açıyla çizgisel bir yol izlemesiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de farklı doluluk oranlarındaki SKK numunelerin Ultimaker Cura 5.2.1 programından alınan görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.1 PLA Plus filamentten numunelerin basılması.



Şekil 4.2 Farklı doluluk oranlarındaki SKK plakalarının görünümü.

4.3 SKK İŞLEM PARAMETRELERİ VE DENEYSEL TASARIM

SKK’da kaynak kalitesi,işlem parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu yüzden literatürde işlem parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazılarında takım ilerleme hızı, takım omuz şekli [50, 51], takım omuz yüzeyi [52], karıştırıcı uç geometrisi [53,54], takım dönme hızı [55,56], takım dalma hızı, takım eğim açısı [57], takım malzemesi ve takım tasarımı detaylı olarak incelenmiştir [58,59]. Kaynak kalitesinin işlem parametrelerinden etkilenmesinin sebebi, işlem parametrelerinin SKK işlemi sırasında oluşan ısı miktarında önemli rol oynamasıdır. Kaynak bölgesindeki malzeme akışı ve malzemenin birbirine düzgün şekilde karışması, kaynak sırasında oluşan ısı miktarına bağlıdır. Ortaya çıkan ısının az olması malzemenin yetersiz plastikleşmesine neden olurken, ısının gereğinden fazla olması ise aşırı plastikleşmeye ve malzemenin kaynak bölgesinden taşmasına sebep olmaktadır.

Yapılan çalışmada, kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarını etkileyen önemli parametrelerden olan takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı deney değişkeni olarak kullanılmıştır [59, 60]. Çizelge 4.2’de işlem parametreleri verilmiştir. SKK işlem parametreleri iki farklı takım dönme hızı (1000 dev/dak ve 1500 dev/dak), iki farklı ilerleme hızı (50 ve 100 mm/dak) ve 3B baskı parametresi olarak beş farklı doluluk oranı (%20, %40, %60, %80 ve %100) seçilmiştir. Çizelge 4.3’de doluluk oranlarına ve işlem parametrelerine uygun tasarlanmış deney seti

verilmiştir. Kaynak kalitesinin değerlendirilmesi adına 3B yazıcıda basılan plakaların (bütün doluluk oranları için) çekme mukavemetleri belirlenerek, Çizelge 4.3'e referans (Ref) değer olarak eklenmiştir.

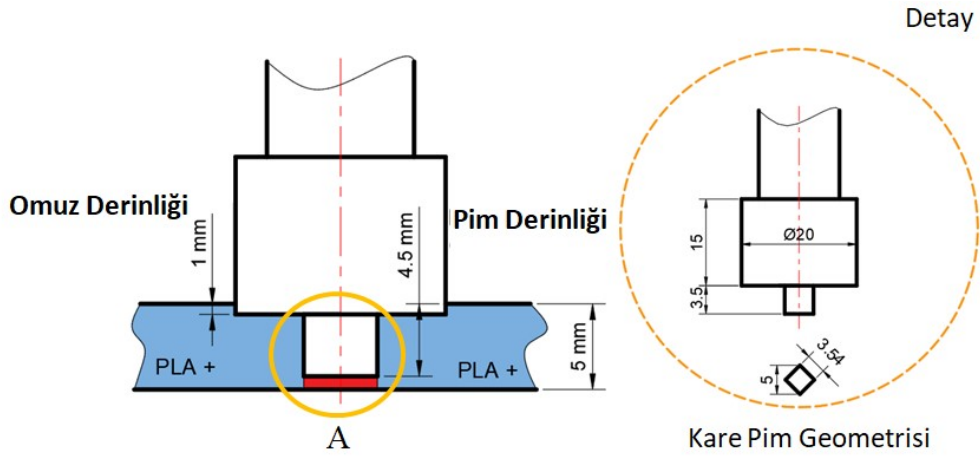
Çizelge 4.2 SKK işlem parametre değerleri.

Takım Geometrisi	Doluluk Oranı (%)	İlerleme (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)
Kare	20	50	1000
	40		
	60		
	80		
	100		1500

Çizelge 4.3 Farklı doluluk oranlarındaki (3B baskı) PLA Plus plakalar için deney seti.

	Katman kalınlığı (mm)	Pin Geometrisi	Doluluk oranı	İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım dönme hızı (dev/dak)	Kaynak Mukavemeti (MPa)	Verimlilik
Ref	0.1	-	20	-	-	15.45±1.42	
1	0.1	Kare	20	50	1000	1.58±0.35	10.23
2	0.1	Kare	20	50	1500	1.95±0.42	12.62
3	0.1	Kare	20	100	1000	1.76±0.13	11.39
4	0.1	Kare	20	100	1500	2.14±0.21	13.85
Ref	0.1	-	40	-	-	17.68±1.63	
5	0.1	Kare	40	50	1000	4.49±1.31	25.39
6	0.1	Kare	40	50	1500	9.18±0.91	51.92
7	0.1	Kare	40	100	1000	2.66±0.93	15.04
8	0.1	Kare	40	100	1500	2.71±0.69	15.32
Ref	0.1	-	60	-	-	17.92±0.96	
9	0.1	Kare	60	50	1000	3.91±0.76	21.82
10	0.1	Kare	60	50	1500	3.88±0.98	21.65
11	0.1	Kare	60	100	1000	5.18±0.66	28.9
12	0.1	Kare	60	100	1500	17.47±0.49	97.48
Ref	0.1	-	80	-	-	26.16±0.85	
13	0.1	Kare	80	50	1000	4.88±0.63	18.65
14	0.1	Kare	80	50	1500	4.29±0.81	16.39
15	0.1	Kare	80	100	1000	29.4±2.21	112.38
16	0.1	Kare	80	100	1500	21.86±0.19	83.56
Ref	0.1	-	100	-	-	47.24±1.36	
17	0.1	Kare	100	50	1000	25.88±0.27	54.78
18	0.1	Kare	100	50	1500	31.32±1.76	66.3
19	0.1	Kare	100	100	1000	38.39±6.34	81.27
20	0.1	Kare	100	100	1500	41.12±7.7	87.04

Şekil 4.3’de SKK işleminde kullanılan sabit işlem parametreleri ve karıştırıcı uç geometrisinin teknik resmi verilmiştir. Takım omuzu batma derinliği 1 mm, karıştırıcı uç yüksekliği 3.5 mm, karıştırıcı uç batma derinliği 4.5 mm, takım omuz çapı 20 mm olarak belirlenmiştir. PLA Plus plakaların kalınlığı 5 mm olduğu için karıştırıcı uç ile plaka arasında kalan boşluk 0.5 mm’dir. Şekil 3’de kırmızı olarak boyanan bölgede karıştırıcı uç teması olmadığı için, SKK işlemi sırasında oluşan ısı ile birleşme gerçekleşmektedir.

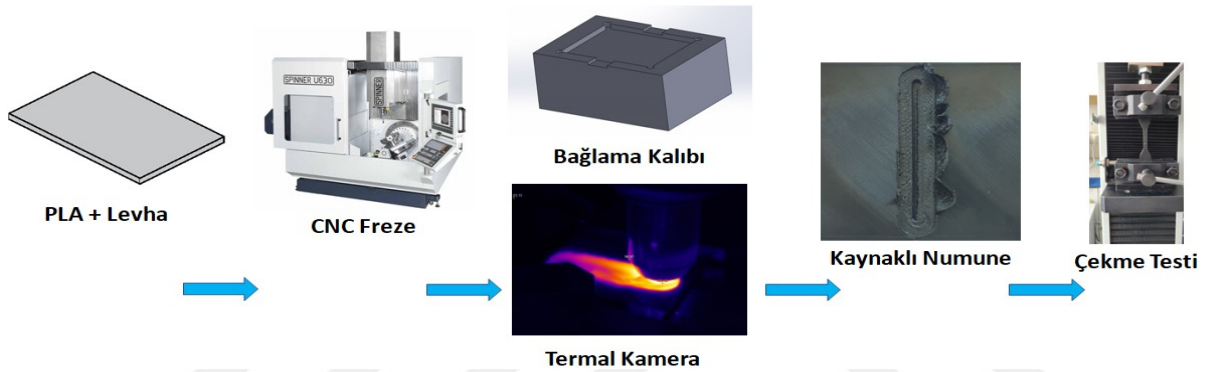


Şekil 4.3 SKK’nda işlem parametreleri ve karıştırıcı uç geometrisi görünümü.

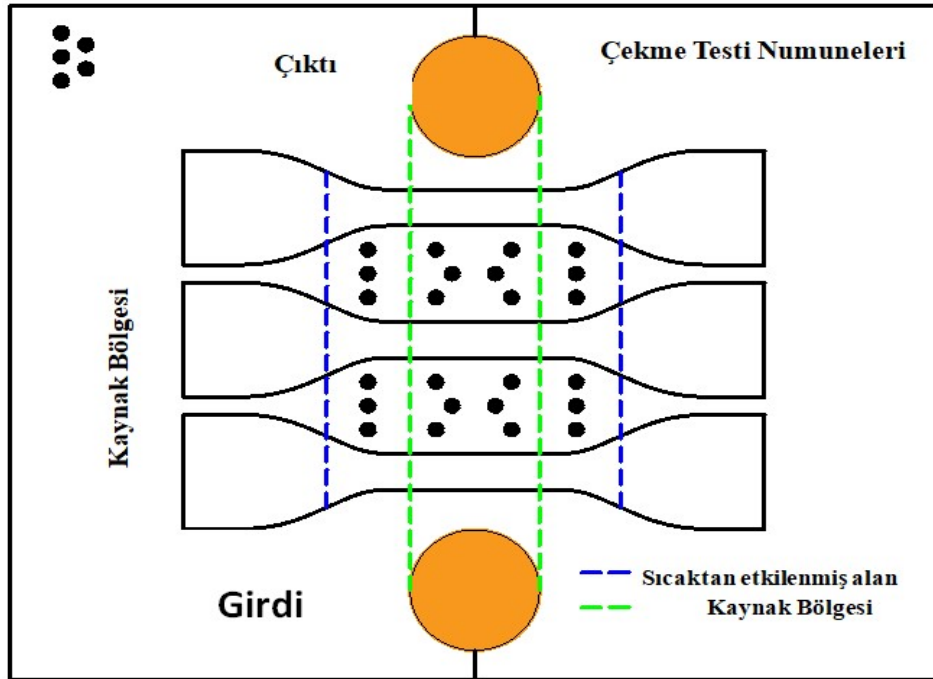
4.4 SKK EKİPMANLARI VE DENEY MALZEMELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

SKK işleminin uygulamasında iki önemli ekipman bulunmaktadır. Bunlardan birincisi 3B yazıcıda basılan PLA Plus plakaların birleştirilmesi için konvansiyonel veya CNC freze tezgâhıdır. Bu çalışmada SKK işlemi için Spinner U630 CNC (22 kw, 12000 dev/dak, y eksen 530 mm, z eksen 465 mm ve tabla ölçüsü ø650 mm) freze tezgâhı ve G-kodlarının çıkarılması için SolidCam ticari yazılımı kullanılmıştır. Şekil 4.4’de SKK işlemi ve işlem sırasında termal kamera ile yapılan ölçümün görüntüsü, kaynak sonrası numune görünümü ve en son çekme testi sırasında örnek bir numune verilmiştir. SKK işleminde ikinci önemli ekipman ise bağlama kalıbıdır. SKK işlemi sırasında parçaların hareket etmesi veya parçaların birbirinden uzaklaşarak ayrılması kaynağı olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden PLA Plus plakaları sabitlemek için özel kalıp tasarım ve üretimi yapılmıştır.

Şekil 4.5’de CNC tezgâhına göre kaynak yönü, karıştırıcı ucun giriş ve çıkış yerleri, sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler verilmiştir. Giriş ve çıkış noktalarına dalma, parçanın üstünden ve 10 mm/dak hız ile yapılmış olup kaynakta gerekli ısının oluşması için giriş noktasında takım 10 sn bekletilmiştir. Kaynak dayanımını belirlemek için üç tekrarlı çekme testi, sertlik değişimini belirlemek için ise kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve ana malzemeden beş tekrarlı ölçüm yapılmıştır. Çekme testleri için 5 kN kapasiteli WDW-5 model universal çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında 2 mm/dak çekme hızında yapılmıştır. Yapılan kaynağın kalitesini daha iyi değerlendirmek için, SSK sırasında FLUKE Ti32 Termal Kamera kullanılarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.4 SSK işlemine genel bakış.



Şekil 4.5 Çekme test numuneleri ve sertlik ölçüm yerleri.

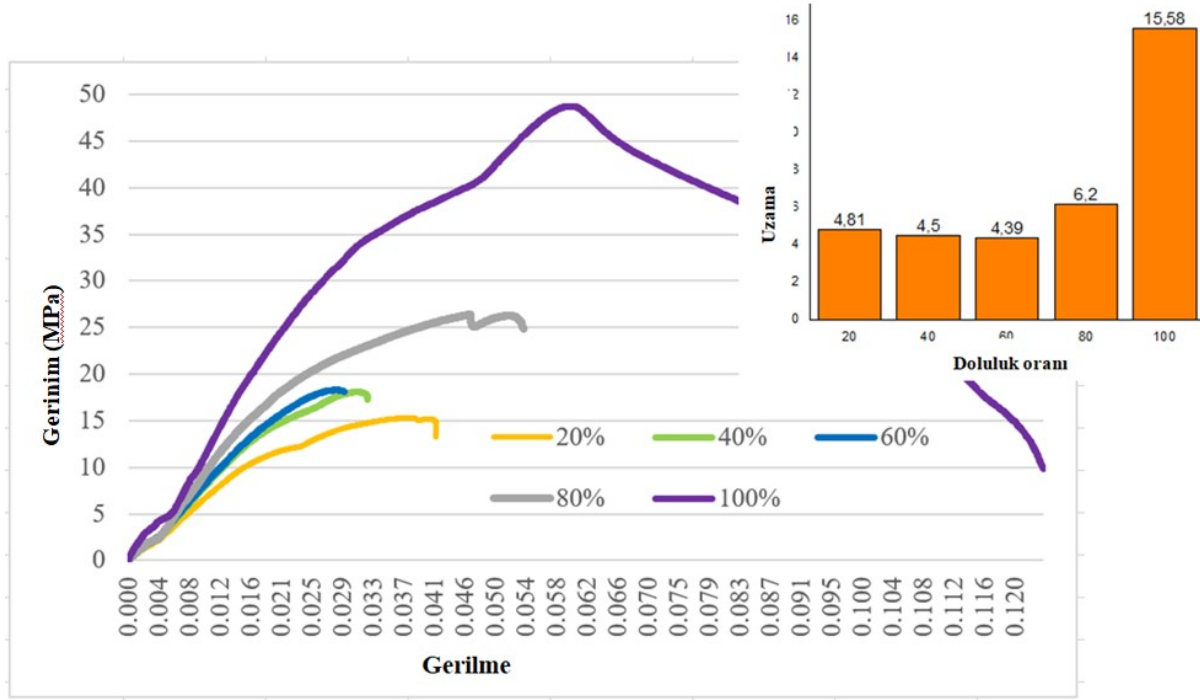
BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada PLA Plus filamentten 3B yazıcı kullanılarak elde edilen plakaların SKK ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Beş farklı doluluk oranındaki (%20, %40, %60, %80 ve %100) PLA Plus plakalar karıştırıcı uç geometrisi olarak kare, iki farklı ilerleme hızı (50 ve 100 mm/dak), iki farklı takım dönme hızı (1000 ve 1500 dev/dak) kullanılarak SKK ile birleştirilmiştir. Kaynaklı parçalardan, çekme numuneleri çıkartılarak kaynak kaliteleri değerlendirilmiştir. Ayrıca kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve ana malzeme sertlikleri ölçülerek karşılaştırılmıştır. SKK sırasında oluşan ısının değerlendirilmesi için termal görüntüler alınmıştır. Son olarak, kaynak hatalarını belirlemek için, kaynak numuneleri üzerinde görsel incelemeler yapılmıştır.

5.1 FARKLI DOLULUK ORANLARINDAKİ PLA PLUS MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Farklı doluluk oranlarındaki PLA Plus malzemenin gerilme-gerinim diyagramı ve birim uzama değerleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Grafikler ortalama kaynak mukavemeti ve yüzde uzama değerine yakın olan deney verilerinden çizdirilmiştir. %40 ve %60 doluluk oranlarındaki mukavemet (17.68 ± 1.63 ve 17.92 ± 0.96 MPa), %20 doluluk oranındaki mukavemete (15.45 ± 1.42 MPa) göre artma eğilimindeyken malzemenin sünekliği azalmıştır. %40 ve %60 doluluk oranlarındaki parçalardan alınan veriler birlikte değerlendirildiğinde, mukavemet ve uzama oranlarında önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Evlen vd. [61] çalışmalarında parçalarda %10 doluluk oranından %30 doluluk oranına doğru gittikçe artan bir çekme mukavemeti elde ederken, %40 ve %50 doluluk oranlarında mukavemetin düştüğünü belirtmişlerdir. Bu durumun, PLA gibi organik malzemelerde katmanlar arasındaki adhezyonun istenildiği gibi gerçekleşmemesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. %80 ve %100 doluluk oranlarında doluluk oranına bağlı olarak mukavemet (26.16 ± 0.8 ve 47.24 ± 1.3 MPa) ve uzama değerleri önemli ölçüde artmıştır.

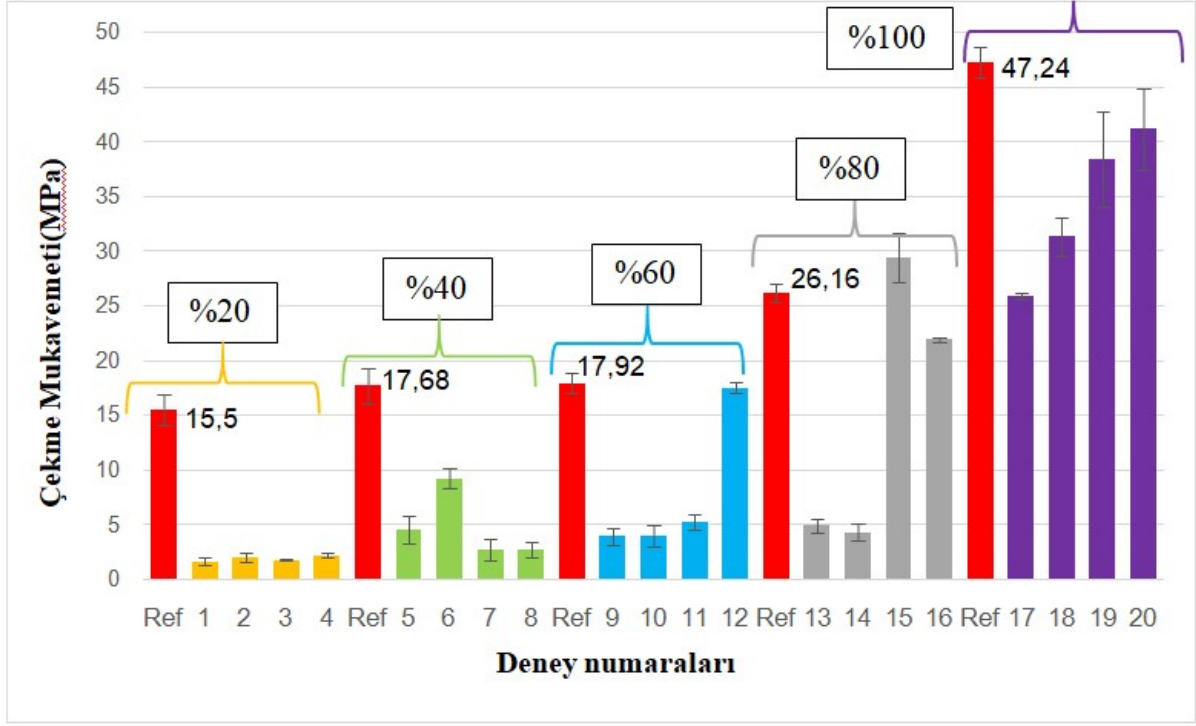


Şekil 5.1 Farklı doluluk oranlarına göre PLA Plus malzemenin mekanik özellikleri.

5.2 KAYNAK DAYANIMLARININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Şekil 5.2’de farklı parça doluluk oranlarındaki numunelerin SKK işlemi sonrası kaynak mukavemetleri, Tablo 4.3’de de referans numunelere göre kaynak verimleri verilmiştir. Şekil 5.2’de verilen kırmızı renkli sütunlar bütün parça doluluk oranları için referans değerleri göstermektedir. %20, %60 ve %100 doluluk oranları için en yüksek çekme mukavemet değerleri 100 mm/dak ilerleme hızı ve 1500 dev/dak dönme hızında, %40 doluluk oranı için 50 mm/dak ilerleme hızı ve 1500 dev/dak dönme hızında, %80 doluluk oranında ise 100 mm/dak ilerleme hızı ve 1000 dev/dak dönme hızında elde edilmiştir. %20 ve %40 doluluk oranlarında çekme mukavemeti düşüktür. Bunun sebebi SKK sırasında malzeme akışını sağlamak için yeterli malzemenin bulunmamasıdır. Doluluk oranının artmasıyla kaynak mukavemetinin arttığı görülmüş, %60, %80 ve %100 doluluk oranları için sırasıyla %97.48, %112.38 ve %87.04 verimlilikle parçalar birleştirilmiştir. Özellikle %80 doluluk oranındaki parçaların birleştirilmesinde kaynak mukavemeti referans numune mukavemetine kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, parçadaki boşlukların kaynak sırasında ortaya çıkan ısıyı dengelemesi ve kaynak bölgesindeki malzemenin aşırı plastikleşmesinin engellenmesiyle açıklanabilir. Sonuçlar, düşük doluluk oranlarındaki (doluluk oranının optimizasyonu

belirlenmesi şartıyla) parçalarda sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirme işleminin umut vaat ettiğini göstermiştir.

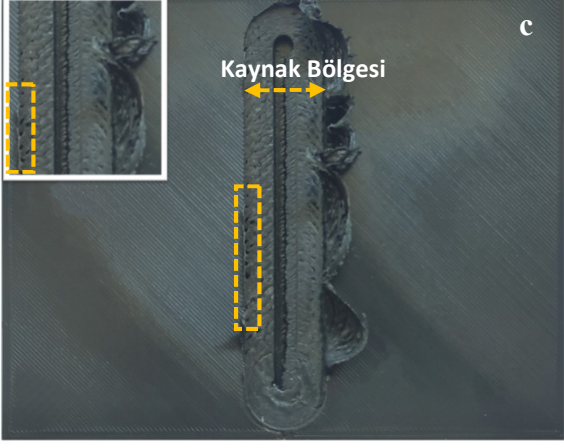
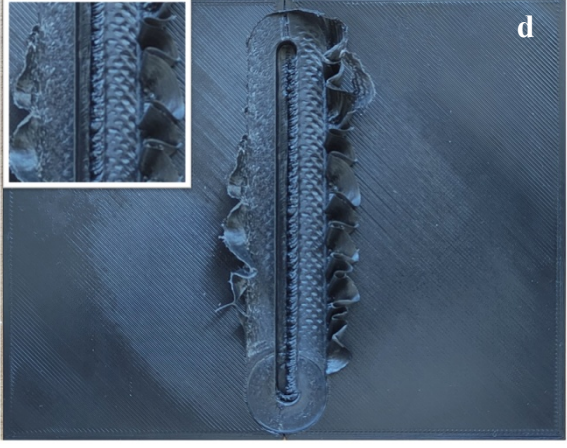


Şekil 5.2 SKK işlemi sonrası kaynak dayanımları.

Şekil 5.3’de SKK temel kavramları (takım giriş ve çıkış noktaları, kaynak yönü, takım dönüş yönü, ilerleme tarafı, geri çekme tarafı ve kaynak hataları) gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 5.3’de %20, %40 ve %60 doluluk oranları için, Şekil 5.4’de da %80 ve %100 doluluk oranları için SKK sonrası kaynak mukavemetinin en iyi ve en kötü olduğu numune görüntüleri seçilerek verilmiştir. Bütün numunelerde, takım omuz bitiminde çapak kusuru gözlemlenmiştir. %20, %40 ve %60 doluluk oranlarında kaynak çizgisi boyunca yüzey tünel kusuru oluşmuştur. Bu durumun düşük doluluk oranından kaynaklandığı ve kaynak bölgesinde yeterli malzeme olmadığı için yüzey tünel kusuru kusuruna sebep olduğu düşünülmektedir. %80 doluluk oranlarında yüzey tünel kusuru oluşmamıştır. %100 doluluk oranında kaynak kalitesinin kötü olduğu numunelerde yüzey tünel kusuru kusurunun olduğu, %100 doluluk oranında kaynak kalitesinin iyi olduğu numunelerde ise yüzey tünel kusuru kusurunun oluşmadığı görülmüştür. %100 doluluk oranına sahip numunelerde, yüzey tünel kusuru kusurunun oluşma sebebi, uygun olmayan işlem parametrelerine bağlı malzeme akışının yetersiz olması şeklinde açıklanabilir.

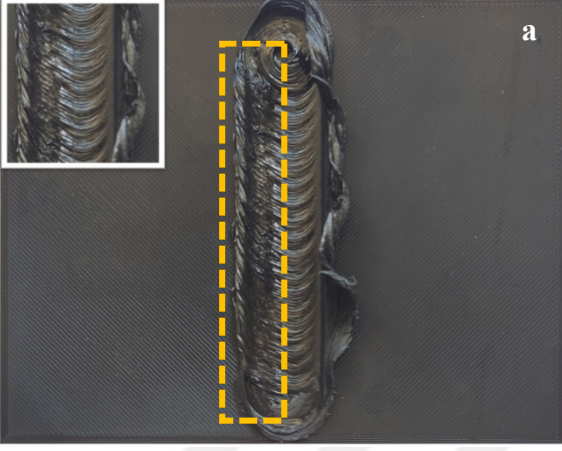
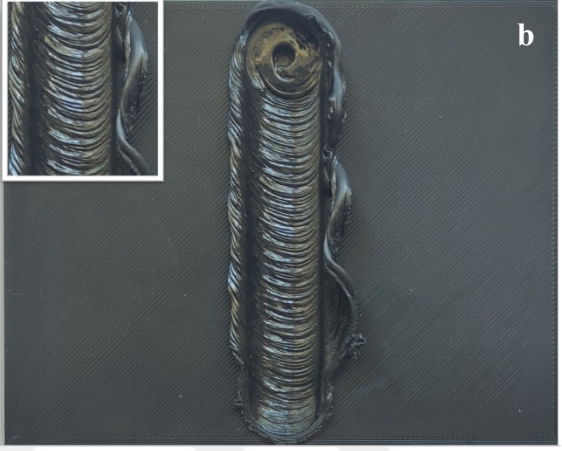
Şekil 5.3-a ve Şekil 5.3-b karşılaştırıldığında Şekil 5.3-a da uygun olmayan işlem parametrelerinden dolayı ilerleme tarafı ve geri çekme tarafı tarafında Şekil 5.3-b’de görülen numuneye göre kaynak bölgesinde boşlukların oluştuğu belirlenmiştir. %40 doluluk oranı için Şekil 5.3-c ve Şekil 5.3-d karşılaştırıldığında kaynak mukavemeti daha düşük olanda (Şekil 5.3-c) takım omuz bölgesinin kenarlarında boşluklar olduğu görülmektedir. Bu boşluklar kaynak mukavemetini olumsuz etkilemiştir. %60 doluluk oranı için (Şekil 5.3-e)’de ilerleme hızının düşük, dönme hızının yüksek olması malzemenin gereğinden fazla plastikleşmesiyle kaynak bölgesinden dışarı çıkmasına sebep olmuştur.



	
Doluluk Oranı:20, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1500 dev/dak (1.58 MPa)	Doluluk Oranı:20, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1500 dev/dak (2.14 MPa)
	
Doluluk Oranı:40, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1000 dev/dak (2.66MPa)	Doluluk Oranı:40, ilerleme hızı: 50 mm/dak, dönme hızı: 1500 dev/dak (9.18MPa)
	
Doluluk Oranı:60, ilerleme hızı: 50 mm/dak, dönme hızı: 1500 dev/dak (3.88MPa)	Doluluk Oranı:60, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1500 dev/dak (17.47MPa)

Şekil 5.3 %20, %40 ve %60 doluluk oranındaki parçaların SKK sonrası görünümü.

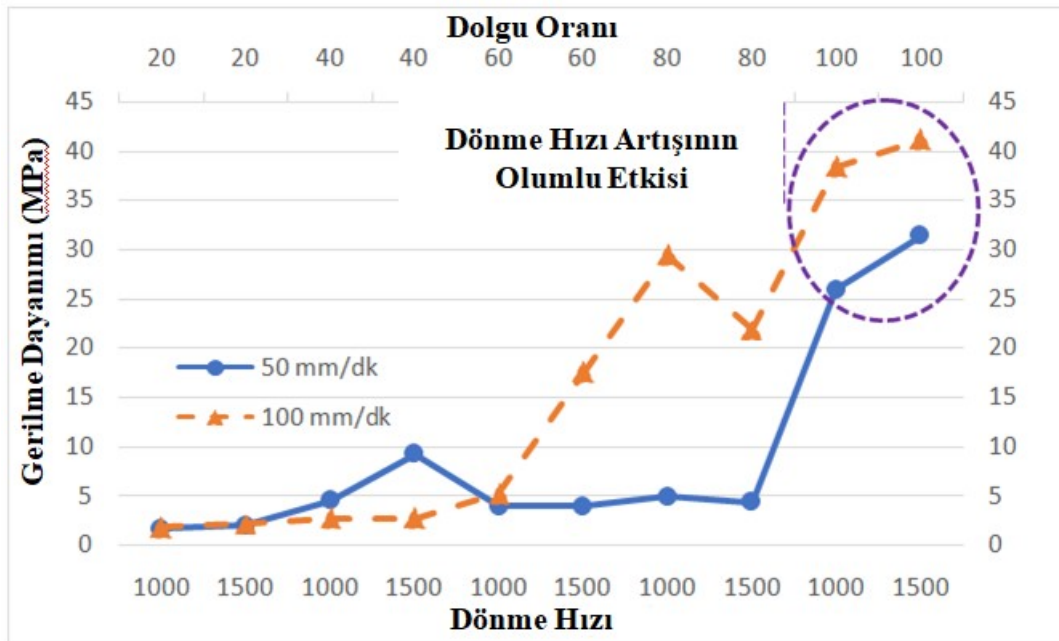
Şekil 5.4-a ve Şekil 5.4-b’de %80 doluluk oranı için en iyi ve en kötü kaynaklı numunelerin görselleri verilmiştir. Şekil 5.4-b’de takım dönmesinden meydana gelen kaynak çizgilerinin bir bütün olduğu ve malzeme akışının kesintiye uğramadığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.4-a’da ise kaynak çizgisi boyunca meydana gelen kusur malzeme akışının kesintiye uğradığını ve seçilen parametrelerin uygun olmadığını göstermektedir. Şekil 5.4-c’de ise kaynak kalitesini olumsuz etkileyen malzeme akışının olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.4-d’de kaynak çizgileri incelendiğinde kaynak dikişinin güzel olduğu belirlenmiştir.

	
Doluluk Oranı:80, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1000 dev/dak (16.39MPa)	Doluluk Oranı:80, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1000 dev/dak (83.56MPa)
	
Doluluk Oranı:100, ilerleme hızı: 50 mm/dak, dönme hızı: 1000 dev/dak (54.78MPa)	Doluluk Oranı:100, ilerleme hızı: 100 mm/dak, dönme hızı: 1500 dev/dak (87.04MPa)

Şekil 5.4 %80 ve %100 doluluk oranındaki parçaların SKK sonrası görünümü.

5.3 KAYNAK DAYANIMININ TAKIM DÖNME HIZINA GÖRE DEĞERLENDİRMESİ

Şekil 5.5’de takım dönme hızına bağlı kaynak mukavemetinin değişimi verilmiştir. 100 mm/dak ilerleme hızında %20 ve %40 parça doluluk oranlarında kaynak kalitesinin dönme hızından etkilenmediği belirlenmiştir. %100 doluluk oranında ise her iki ilerleme hızında (50 ve 100 mm/dak) dönme hızının artmasıyla birlikte kaynak mukavemeti artmıştır. 100 mm/dak ilerleme hızının %60 doluluk oranından sonra etkisinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Dönme hızının artmasıyla %60 ve %100 doluluk oranında kaynak mukavemeti artarken, %80 doluluk oranında her iki ilerleme hızı için dönme hızının artmasıyla kaynak mukavemeti azalmıştır. Sonuç olarak düşük doluluk oranının parçaların birleştirmesini zorlaştırdığı ve işlem parametrelerinin etkilerini sınırlandırdığı söylenebilir.

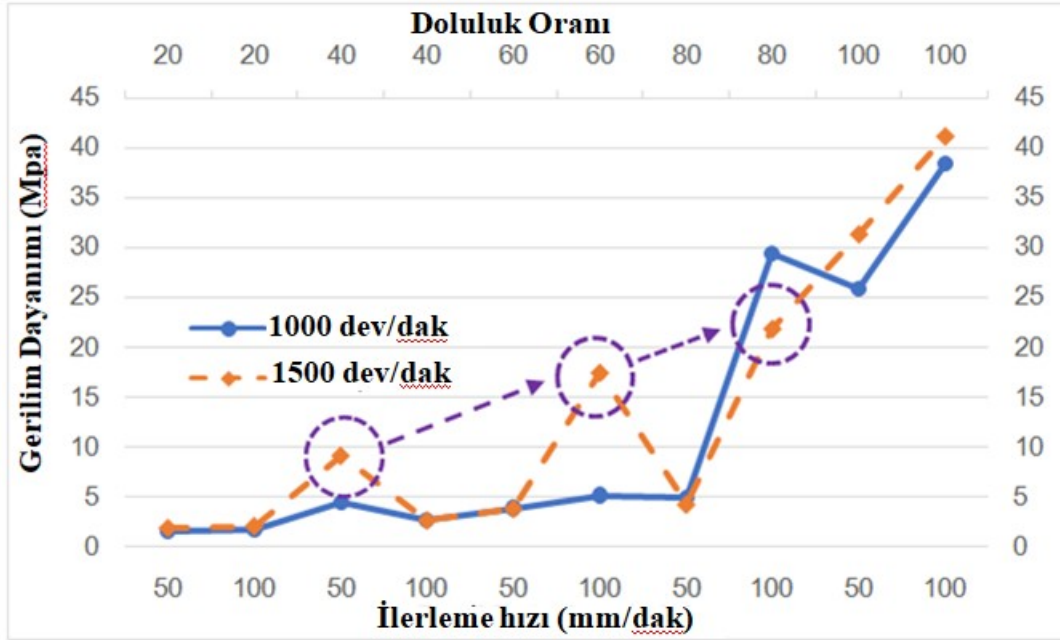


Şekil 5.5 Dönme hızına bağlı kaynak mukavemeti.

5.4 KAYNAK DAYANIMININ TAKIM İLERLEME HIZINA GÖRE DEĞERLENDİRMESİ

Şekil 5.6’da ilerleme hızına göre kaynak mukavemeti verilmiştir. 1000 dev/dak dönme hızında ilerleme hızının değişmesine rağmen kaynak mukavemeti %80 doluluk oranına kadar bir değişim sergilememiştir. %80 doluluk oranında 100 mm/dak ilerleme hızında kaynak

mukavemeti önemli ölçüde artmış ve %100 doluluk oranında ilerleme hızının artmasıyla kaynak kalitesi artmıştır. 1500 dev/dak dönme hızında %40 doluluk oranında 50 mm/dak, %60 ve %80 doluluk oranında 100 mm/dak ilerleme hızında kaynak mukavemetinde artma olmuştur. Özellikle %80 ve %100 doluluk oranlarında ilerleme hızının etkisinin arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak ilerleme hızının kaynak kalitesinin üstünde etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. %60 doluluk oranından sonra ilerleme hızının kaynak kalitesi üstünde etkili olduğu ve olumlu etkilediği söylenebilir. SKK işleminde kaynak bölgesinde aşırı ısınma, kaynak kalitesini olumsuz etkilemektedir. SKK işlemi sırasında ilerleme hızının artması kaynak bölgesinin aşırı ısınmasını engellemiş olacaktır.

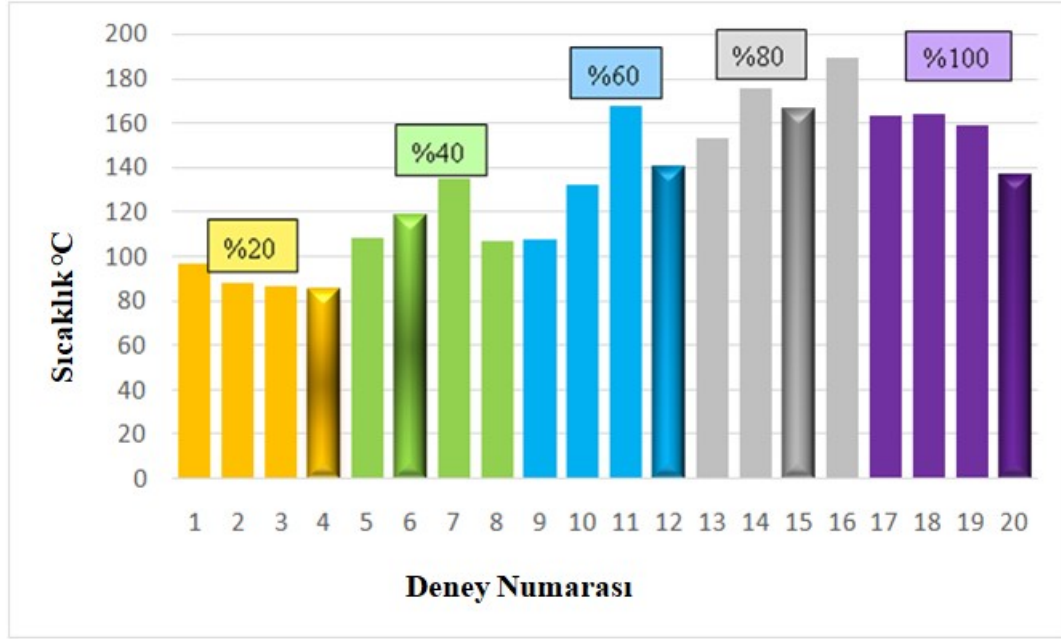


Şekil 5.6 İlerleme hızına bağlı kaynak mukavemeti.

5.5 SKK İŞLEMİ SIRASINDA OLUŞAN ISININ DEĞERLENDİRMESİ

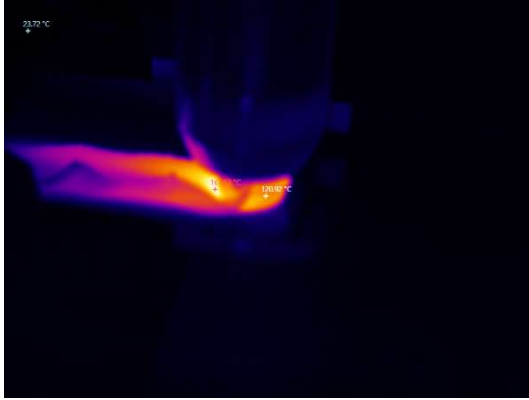
SKK sırasında ölçülen sıcaklıklar Şekil 5.7’de ve termal görüntülerden elde edilen en yüksek, en düşük ve optimum sıcaklık değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde SKK sırasında kaynak bölgesindeki sıcaklığın %20 doluluk oranında işlem parametrelerinden etkilenmediği, %40’ dan %80 doluluk oranına kadar ise SKK sırasında ortaya çıkan sıcaklığın arttığı belirlenmiştir. Bunun sebebi, düşük doluluk oranlarında (%20) omuzun parçaya sürtünmesinin yetersiz olması ve bu nedenle kaynak işlemini olumsuz (malzeme akışını ve kaynak ısısını) etkilemesidir. %60 ve %80 doluluk oranlarında işlem sırasında kaynak

bölgesinde oluşan ısının artmasının sebebi, parçanın yapısındaki boşluklardaki havanın kaynak ısısının yayılmasını zorlaştırdığı ve ısının kaynak bölgesinde biriktiği düşünülmektedir. %100 doluluk oranındaki kaynak bölgesindeki ısının tekrar azalma eğilimine geçmesi bu olguyu desteklemektedir.

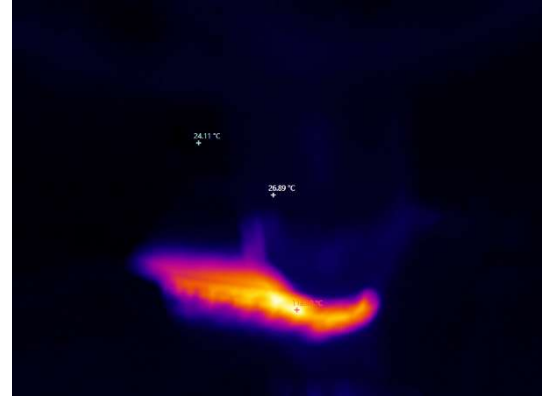


Şekil 5.7 SKK işlemi sırasında ölçülen sıcaklıklar.

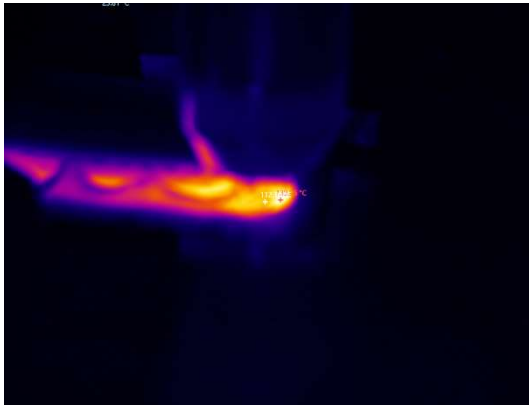
Şekil 5.8’de farklı doluluk oranlarındaki parçaların SKK ile birleştirilmesinde en yüksek kaynak mukavemetine sahip numunelerin termal kamera ile alınmış görüntüleri verilmiştir. Farklı doluluk oranları kendi içinde değerlendirildiğinde en yüksek kaynak mukavemeti için sırasıyla 85.25° C, 118.6°C, 139.95° C, 166.18° C ve 136.18° C, en düşük kaynak mukavemeti için sırasıyla 96.58° C, 134.88° C, 132.11° C, 175.39° C ve 163.39° C olarak belirlenmiştir. PLA malzemenin camsı geçiş sıcaklığı 60° C’dir. FSW işlemi sırasında elde edilen sıcaklıklar camsı geçiş sıcaklığının üstünde 85.25°C-189.17°C arasında gerçekleşmiştir. Elde edilen sıcaklık verileri Sharma et al. [41] PLA plakaların FSW ile birleştirilmesinde IR kamera ile aldıkları görüntülerde 75.9-140.7 °C aralığında bulmuşlardır. Oluşan kaynak sıcaklığı camsı sıcaklığın üstünde olduğu için yumuşamış polimerin birbirine karışmasının kolay olduğunu ve yüksek kaliteli kaynaklar elde edilebildiğini belirtmişlerdir.



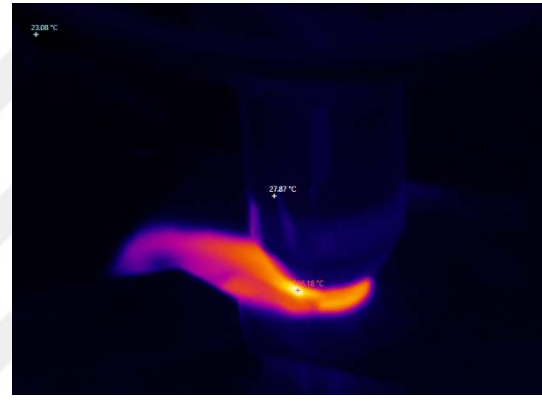
100mm/dak, 1500 dev/dak
Deney: 4, Sıcaklık: 85.25°C



50 mm/dak, 1500 dev/dakDeney: 6, Sıcaklık:
118.6°C



100 mm/dak, 1500 dev/dakDeney: 12, Sıcaklık:
139.95°C



100 mm/dak, 1000 dev/dakDeney: 15, Sıcaklık:
166.18°C



100 mm/dak, 1500dev/dak
Deney: 20, Sıcaklık: 136.18°C

Şekil 5.8 En yüksek kaynak mukavemetinin termal görüntülemesi.

Çizelge 5.1'deki sonuçlara göre en yüksek kaynak mukavemetinin elde edildiği sıcaklıkların en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, düşük sıcaklıklar malzeme akışını olumsuz etkilerken, yüksek sıcaklıklar da kaynak

bölgesindeki malzemenin aşırı plastikleşmesi nedeniyle kaynak mukavemetini olumsuz etkilemektedir [62]

Çizelge 5.1 Farklı dolum oranına göre SKK sırasında en yüksek/en düşük/optimum sıcaklık.

DolulukOranı	Endüşüksıcaklık (°C)	Enyükseksıcaklık (°C)	Kaynakdayanımı için optimumsıcaklık(°C)
20	85.25 (100 mm/dak-1500dev/dak)	96.58 (50 mm/dak-1000 dev/dak)	85.25 (100 mm/dak-1500dev/dak)
40	106.88 (100 mm/dak-1500 dev/dak)	134.88 (100 mm/dak-1000 dev/dak)	118.6 (50 mm/dak-1500 dev/dak)
60	107.66 (50 mm/dak-1000 dev/dak)	167.53 (100 mm/dak-1000 dev/dak)	139.95 (100 mm/dak-1500 dev/dak)
80	153.49 (50 mm/dak-1000 dev/dak)	189.17 (1000 mm/dak-1500 dev/dak)	166.18 (100 mm/dak-1000 dev/dak)
100	136.18 (100 mm/dak-1500 dev/dak)	164.29 (50 mm/dak-1500 dev/dak)	136.18 (100 mm/dak-1500 dev/dak)



BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, farklı doluluk oranlarındaki PLA Plus levhaların SKK ile birleştirme davranışları incelenmiştir. Birleştirme için kare pim geometrisi, iki farklı ilerleme hızı (50mm/dak ve 100 mm/dak) ve iki farklı takım dönüş hızı (1000dev/dak ve 1500 dev/dak) kullanılmıştır. Farklı doluluk oranlarında dolgu deseni olarak grid deseni, 100% doluluk oranında 45/-45° açıyla çizgisel desen kullanılarak üretilmiştir. Bütün doluluk oranları için PLA Plus malzemenin mekanik özellikleri belirlenerek kaynaklı numunelerin dayanımı ile karşılaştırılarak kaynak verimliliği belirlenmiştir. Farklı doluluk oranlarındaki PLA Plus levhaların kaynaklanabilirliği, ilerleme hızı ve dönme hızının kaynak işlemi üzerindeki etkisi deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmanın önemli bulguları aşağıda özetlenmiştir:

Referans numunelerde %20 doluluk oranına göre %40 ve %60 doluluk oranlarında mukavemet artarken %uzama azalmıştır. %80 ve %100 doluluk oranlarında ise mukavemet ve %uzama değerleri önemli ölçüde artma göstermiştir. %20, %60 ve %100 doluluk oranları için en yüksek çekme mukavemet değerleri 100 mm/dak ilerleme hızı ve 1500 dev/dak dönme hızında (sırasıyla 2.14, 17.47 ve 41.12 MPa) %40 doluluk oranı için 50 mm/dak ilerleme hızı ve 1500 dev/dak dönme hızında (9.18 MPa), %80 doluluk oranında ise 100 mm/dak ilerleme hızı ve 1000 dev/dak dönme hızında (29.4 MPa) elde edilmiştir. %80 doluluk oranındaki parçaların birleştirilmesinde kaynak mukavemetinin, referans numune mukavemetine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %20 ve %40 doluluk oranlarında işlem parametrelerinin birleştirmeye etkisinin çok az olduğu, doluluk oranının artmasıyla işlem parametrelerinin etkisinin arttığı belirlenmiştir.

Bütün numunelerde flash kusuru meydana gelirken, %20, %40 ve %60 doluluk oranlarında malzeme yetersizliğine bağlı olarak yüzey tünel kusuru oluşumu belirlenmiştir. SKK sırasında oluşan sıcaklıklar incelendiğinde, %40'dan %80 parça doluluk oranına kadar bir artış olduğu, %100 parça doluluk oranında ise düşüş yaşandığı belirlenmiştir. %20 ve %40

doluluk oranlarında kaynak sırasında sürtünmenin yetersiz olması sıcaklık oluşumunu olumsuz etkilerken (kaynak kalitesi de olumsuz etkilenmiştir), %60 ve %80 doluluk oranlarında boşluklardaki havanın ısının difüzyonunu zorlaştırmış olduğundan sıcaklığın artmış olduğu tahmin edilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Alghamdi S and John S** (2021) Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers*, 13,753.
- [2] **Güden Ş** (2022) Eklemeli İmalatla Üretilen Termoplastik Parçaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirme Performansının İncelenmesi Ve Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa,1-20.
- [3] **Gao J and Cui X** (2017) Application and Exploration of Friction Stir Welding/Processing In Plastics Industry. *Materials Science and Technology*, 33:10, 1145-1158.
- [4] **Chiulan I and Frone A N** (2018) Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters,*Bioengineering*, 5, 2.
- [5] **Sürmen H K** (2019) Eklemeli İmalat (3B Baskı),Teknolojiler ve Uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24,2.
- [6] **Lee J and An J** (2017) Fundamentals and Applications of 3D Printing For Novel Materials, *Applied Materyals Today*, 7,120-133.
- [7] **Kuruoğlu Y, Akgün M ve Demir H** (2022) Fdm Yöntemiyle Üretilen Abs, Pla ve Petg Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü ve Çekme Dayanımının Modellenmesi Ve Optimizasyonu,*Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3): 358-369.
- [8] **Günay M, Gündüz S, Yılmaz H, Yaşar N ve Kaçar R** (2020) PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı için 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23,1, 73-79.
- [9] **Zhang X, Chen L, Mulholland T and Osswald T A** (2019) Characterization of Mechanical Properties And Fracturemode of PLA And Copper/PLA Composite Part Manufactured By Fused Deposition Modeling, *SN AppliedSciences*, 1,6, 1-12.
- [10] **Evlen H, Özdemir M A ve Çalışkan A** (2019) Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri, *Politeknik Dergisi*, 22,4, 1031-1037.
- [11] **Polat Ç N, Anaç N ve Mert F** (2023) Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Parçaların Yapıştırılmasında Yapıştırma Parametrelerinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 26(3): 1145-1154.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Mendricky R and Fris D** (2020) Analysis of The Accuracy and The Surface Roughness of FDM/FFF Technology and Optimisation of Process Parameters, *Technical Gazette* 27, 1166-1173.
- [13] **Ülker A** (2015) Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Kaynak Parametrelerinin Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi ile Optimizasyonu. *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*, 3-12.
- [14] **Karagöz İ** (2014) Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri. *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 35-70.
- [15] **Chiulan I and Frone A N** (2018) Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters, *Bioengineering*, 5, 2.
- [16] **Bozu M** (2020) Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilen Plastik Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Metalürjik Özelliklerinin İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne*, 10-12.
- [17] **Mishra D, Sahu S K, Mahto R P, Pal S K and Pal K** (2019) Friction Stir Welding For Joining of Polymers. *Springer Nature Singapore Pte Ltd.*, 6, 123-162.
- [18] **Xue Y, Zhao H and Zhang Y** (2021) Design And multi-Objective Optimization of The Bumper Beams Prepared in Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene. *Polym Compos*, 42, 6: 2933-2947.
- [19] **Nath R K, Maji P and Barma J D** (2019) Development of A Self-Heated Friction Stir Welding Tool For Welding of Polypropylene Sheets, *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 41, 1-13.
- [20] **Kumar R and Singh R** (2017) Weldability of Thermoplastic Materials For Friction Stir Welding- A State of Art Review and Future Applications, *Composites Part B*, 137, 1-15.
- [21] **Nath R K, Maji P and Barma J D** (2022) Effect of Tool Rotational Speed On Friction Stir Welding of Polymer Using Self-Heated Tool, *Production Engineering*, 16, 683-690.
- [22] **Evlen H, Erel G ve Yılmaz E** (2018) 3 Boyutlu Yazıcı Tasarımı ve Yazdırma Doluluk Oranının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Uluslararası 3D Baskı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi*, 2(1), 23-31.
- [23] **Evlen H, Özdemir M A ve Çalışkan A** (2019) Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 1031-1037.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [24] **Günay M, Gündüz S, Yılmaz H, Yaşar N ve Kaçar R** (2020) PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.
- [25] **Polat Ç N, Anaç N ve Mert F** (2023) Eklemeli İmalat ile Üretilen PLA Parçaların Yapıştırılmasında Yapıştırma Parametrelerinin Mekanik Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 26(3): 1145-1154.
- [26] **Turan S R, Ulkir O, Kuncan M ve Buldu A** (2022) Stereolithografi Eklemeli İmalat Yöntemiyle Farklı Doluluk Oranlarında Üretilen Numunelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(3), 399-407.
- [27] **Koçar O, Anaç N ve Hazer B** (2023) Yapıştırma Bağlantılarında Dolgu Malzemelerinin Bağlantı Mukavemetine Etkisi, *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 220-232.
- [28] **Zarif C ve İnan G** (2021) Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği ile Birleştirilen Pirinç (CuZn63) Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1): 533-543.
- [29] **Sare Ç, Ali O ve Alper G** (2021) AZ31B-H24, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 23(2), 402-413.
- [30] **Edip Ç, Yahya H Ç ve Şemsettin T** (2019) Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmiş AA5182/AA7075 Alaşım Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10, 2, 603-612.
- [31] **Yeliz A, Ali Ö ve Vedat S** (2021) Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen AISI 316 Paslanmaz Çelik ve Karbonlu Çelik Çiftlerinin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 719-733.
- [32] **Güven İ, Özgür A ve Gürel Ç** (2018) Farklı Kalınlıktaki AA6061-T6 Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı için Uygun Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1), 324-335.
- [33] **Batuk Ç ve Demirtaş H** (2023) Mekanik Özellikler Yönünden Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşım Sacların İncelenmesi, *Manufacturing Technologies and Applications*, 4(3), 167-178.
- [34] **Javadi M S, Ehteshamfar M V and Adibi H** (2023) A Comprehensive Analysis and Prediction of The Effect of Groove Shape and Volume Fraction of Multi-Walled Carbon Nanotubes On The Polymer 3D-Printed Parts in The Friction Stir Welding Process, *Polymer Testing*, 117, 107844.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [35] **Petousis M, Mountakis N and Vidakis N** (2023) Optimization of Hybrid Friction Stir Welding of PMMA: 3D-Printed Parts and Conventional Sheets Welding Efficiency In Single and Two Axis Welding Traces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-23.
- [36] **Afshari M, Hardani H, Samadi M R and Hamounpeyma M** (2023) Friction Stir Welding of Polypropylene Based Graphene Nanocomposites Fabricated With 3-D Printing, An Investigation on The Microstructure and Mechanical Properties. *Journal of Composite Materials*, 57(8),1523-1538.
- [37] **Azhiri R B, Tekiyeh R M, Zeynali İ and Ahmednia M** (2018) Measurement and Evaluation of Joint Properties in Friction Stir Welding of ABS Sheets Reinforced by Nanosilicaaddition. *Measurement*,127, 198-204.
- [38] **Anaç N** (2023) The Mechanical Properties of Dissimilar/Similar Polymer Materials Joined by Friction Stir Welding. *Heliyon*, 6. 7.17627.
- [39] **Forcellese A, Mancina T, Pieralisi M and Vita A** (2022) Friction Stir Welding of Additively Manufactured Blanks in The Moplastic Polymer. *Procedia CIRP*, 112, 448-453.
- [40] **Tiwary V K, Ravi N J, Arunkumar P, Shivakumar S, Deshpande A S and Malik V R** (2020) Investigations on Friction Stir Joining of 3D Printed Parts to Overcome ed Size Limitation and Enhance Joint Quality for Unmanned Air Craft Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(24),4857-4871.
- [41] **Sharma A K R, Roy C M and Debnath K** (2020) Experimental Investigation of Friction Stir Welding of PLA. *Welding in the World*, 64, 1011-1021.
- [42] **Senthil S and Kumar M B** (2022) Effect of Tool Rotational Speed and Traverse Speed on Friction Stir Welding of 3d-Printed Polylactic Acid Material. *Applied Science and Engineering Progress*, 15,1.
- [43] **Kumar R, Singh R and Ahuja I** (2019) Mechanical, Thermal and Micrographic Investigations of Friction Stir Welded: 3D Printed Melt Flow Compatible Dissimilar Thermoplastics. *Journal of Manufacturing Processes*,38, 387-395.
- [44] **Incorporated. P.S. 3 Types of Plastic Used in 3D Printing.** (31.05.2016) Available from: <https://www.polymersolutions.com/blog/plastic-in-3d-printing/>.
- [45] **Singh J, Singh S and Dhawan V** (2018) Mechanical and Biodegradation Behaviour of Jute/Polylactic Acid Green Composites. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 7(2), 52-57.
- [46] **Ultimaker. Ultimaker Tough PLA TDS.17** (09.05.2022) Available from: <https://support.makerbot.com/s/article/1667411002379>.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [47] **Şentürk B, Çetin K, Ürküt S N, Anaç N ve Koçar O** (2022) Jig Design and Manufacturing for Adhesive Thickness Control in Adhesive Joints. *Journal of Materials and Manufacturing*,1(2), 17-23.
- [48] **Günay M, Gündüz S, Yılmaz H, Yaşar N ve Kaçar R** (2020) PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı için 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu,*Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.
- [49] **Bilgin M** (2022) Abs Esaslı Numunelerin 3D Yazıcı İle Üretilmesinde İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu,*International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(2), 236-249.
- [50] **Devuri V, Mahapatra M M, Harsha S P and Mandal N R** (2014) Effect of Shoulder Surface Dimension and Geometries on FSW of AA7039. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 14(3),183-194.
- [51] **Sun T, Reynolds A P, Roy M J, Withers P J and Prangnell P B** (2018) The Effect of Shoulder Coupling on the Residual Stress and Hardness Distribution in AA7050 Friction Stir Butt Welds. *Materials Science and Engineering: A*, **735**, 218-227.
- [52] **Hou W, Ding Y, Huang G, Şah L H A, Piao Z, Shen Y, Shen Z and Gerlich A** (2022) The Role of Pin Eccentricity in Friction Stir Welding of Al-Mg-Si Alloy Sheets: Microstructural Evolution and Mechanical Properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11), 7661-7675.
- [53] **Sharma N, Siddiquee A N, Khan Z A and Muhammed M T** (2018) Material Stirring During FSW of Al–Cu: Effect of Pin Profile. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(7), 786-794.
- [54] **Darmadi D B and Talice M** (2021) Improving The Strength of Friction Stir Welded Joint By Double Side Friction Welding and Varying Pin Geometry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*,24(3), 637-647.
- [55] **Hynes N R J and Velu P S** (2018) Effect of Rotational Speed on Ti-6Al-4V-AA 6061 Friction Welded Joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 288-297.
- [56] **Rajakumar S, Muralidharan C and Balasubramanian V** (2011) Influence of Friction Stir Welding Process and Tool Parameters on Strength Properties of AA7075-T6 Aluminium Alloy Joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549.
- [57] **Arici A and Selale S** (2007) Effects of Tool Tilt Angle on Tensile Strength and Fracture Locations of Friction Stir Welding of Polyethylene. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(6), 536-539.
- [58] **Hovanski Y, Upadhyay P, Carsley J, Luzanski T, Carlson B, Eisenmenger M, Sülami E, Marshall D, Landino B and Hartfield S** (2015) High-Speed Friction-Stir Welding to Enable Aluminum Tailor-Welded Blanks, *Jom*, 67(5), 1045-1053.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [59] **Bhardwaj N, Narayanan G, Dixit A B D, and Haşmi J** (2019) Recent Developments in Friction Stir Welding and Resulting Industrial Practices. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 5(3), 461-496.
- [60] **Zhang Y, Cao X, Larose S and Wanjara P** (2012) Review of Tools for Friction Stir Welding and Processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3), 250-261.
- [61] **Evlen H, Özdemir M A ve Çalışkan A** (2019) Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031-1037.
- [62] **Vijendra B and Sharma A** (2015) Induction Heated Tool Assisted Friction-Stir Welding (i-FSW): A Novel Hybrid Process for Joining of Thermoplastics. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 234-244.

ÖZGEÇMİŞ

Cihan ALTUOK 2012 yılında Bergama 14 Eylül Anadolu Lisesinden, 2019 Yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2021 yılında İzmir Bergama’da kurmuş olduğu Altuok Mühendislik şirketinde şirket yetkilisi olarak çalışmaktadır.

