

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER KATKILI PLA
PLAKALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRELEBİRLİLİĞİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK
İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İBRAHİM İNCEDAL

AĞUSTOS 2023

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER KATKILI PLA
PLAKALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRELEBİRLİLİĞİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK
İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim İNCEDAL

DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

ZONGULDAK

Ağustos 2023

KABUL:

İbrahim İNCEDAL tarafından hazırlanan “Eklemeli İmalat Yöntemi İle Üretilen Karbon Fiber Katkılı Pla Plakaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi” 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. 18/08/2023

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Nergizhan ANAÇ

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.”

İbrahim İNCEDAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER KATKILI PLA PLAKALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRELEBİRLİLİĞİNİN TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

İbrahim İNCEDAL

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR

Ağustos 2023, 37 sayfa

Polimer malzemeler, hafif ve kolay şekil verebilme özellikleri gibi avantajlarından dolayı uzun zamandır hem endüstriyel hem de günlük yaşamda pek çok farklı üründe kullanılmaktadırlar. Özellikle güçlendirilmiş yüksek performanslı plastik olan mühendislik plastikleri otomotiv, elektronik ve gıda gibi çeşitli imalat sektörlerinde mekanik dayanım, ısı ve kimyasal direnç gereken durumlarda metal, ahşap ve seramik malzemelerin yerini almaktadır. Ayrıca, filamentlerin 3B yazıcı teknolojisinde sarf malzemesi olarak kullanılması, termoplastik malzemelerin tüketimini daha da artmıştır. 3B yazıcıların düşük maliyet ve hızlı parça üretim kabiliyeti, tasarım ve imalat sektörüne (prototip ve nihai ürün üretimi) yeni bir soluk getirmiştir. Bununla beraber; 3B yazıcı ile üretilen parça boyutlarının yazıcı tabla ölçüsüyle sınırlı kalması yüzünden, ürünlerin parça parça basılması ve sonradan birleştirilmesi gereksinimi vardır. Plastik malzemelerin birleştirilmesinde; mekanik bağlantılar, yapıştırma ve kaynak yöntemleri kullanılmaktadır.

ÖZET (devam ediyor)

Mekanik bağlantılar sisteme ağırlık yükü getirdikleri, yapıştırma bağlantıları ise termal ve mekanik zorlanmalar altında düşük performans gösterdikleri için plastik malzemelerin birleştirilmesinde özel kaynak yöntemleri öne çıkmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi güç olan aynı türden veya farklı malzeme çiftlerinin birleştirilebilmesinde kullanılmaya başlayan yenilikçi bir katı hal kaynak yöntemidir. SKK ile plastik malzemelerin birleştirilmesi hakkında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Yapılan çalışmada %15 karbon fiber takviyesine sahip polilaktik asit (PLA-CF) filament kullanılmıştır. 3B yazıcı kullanılarak PLA-CF plakalar üretilmiş ve SKK ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. Deneyleerde; üç farklı uç geometrisi (üçgen, kare ve vida), üç farklı ilerleme hızı (20, 40 ve 60 mm/dk) ve üç farklı takım dönme hızı (1250, 1750 ve 2250 dev/dk) kullanılmıştır. Deneyle tasarımı için Taguchi istatistiksel analizi kullanılmıştır. SKK için belirlenen parametre sayısı ve her parametrenin üç seviyesi olduğu için Taguchi L9 ortogonal dizi seçilmiştir. Çalışmada, kaynak işleminin kalitesini belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Elde edilen çekme sonuçları Taguchi metodundaki “en büyük en iyi” kuralına göre değerlendirilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi yapılarak uç geometrisi, ilerleme hızı ve takım dönme hızınının kaynak kalitesine olan etkileri belirlenmiştir. SKK sırasında termal kamera ile ölçümler yapılmış ve takım ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden kaynaklı ısı oluşumu değerlendirilmiştir. Kaynak hatalarını belirlemek için, kaynaklı numuneler üzerinde görsel incelemeler yapılmıştır. Sonuç olarak kaynak kalitesi üzerinde en önemli etki %51.21 ile takım ilerleme hızı, %33.68 ile takım uç profili ve son olarak %9.21 ile takım dönme hızı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Karbon fiber katkılı PLA, Taguchi deneyle tasarımı, ANOVA, 3B yazıcı.

Bilim Kodu: 625.02.05.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE COMBINABILITY OF CARBON FIBER ADDED PLATES MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD WITH FRICTION MIXING WELDING USING TAGUCHI METHOD

İbrahim İNCEDAL

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

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Oğuz KOÇAR

Agust 2023, 37 pages

Polymer materials have long been used in many different products in both industrial and daily life due to their advantages such as lightweight and easy formability. Especially reinforced high-performance plastics which are named engineering plastics, replace materials such as metal, wood, and ceramics in various manufacturing sectors such as automotive, electronics, and food, where mechanical strength, heat, and chemical resistance are required. Furthermore, using filaments as consumables in 3D printer technology has further increased the consumption of thermoplastic materials. The low cost and fast part production capability of 3D printers have brought a breath of fresh air to the design and manufacturing sector (prototype and final product production). However; due to the fact that the part sizes produced with 3D printers are limited to the printer table size, there is a need to print the products piece by piece and then assemble them. Mechanical fastening, adhesive bonding, and welding methods are used for joining plastic materials. Special welding methods come to the fore in the joining of plastic materials

ABSTRACT (continued)

since mechanical joints add weight load to the system and adhesive joints show low performance under thermal and mechanical stresses. Friction stir welding (FSW) is an innovative solid-state welding process for welding pairs of similar or dissimilar materials that are difficult to join by conventional welding methods. There is a limited number of studies on welding plastic materials with FSW.

This study used a polylactic acid filament with 15% carbon fiber reinforcement (PLA-CF). PLA-CF sheets were produced using a 3D printer, and their weldability with FSW was investigated. Three different pin geometries (triangular, square, and screw), three different feed rates (20, 40, and 60 mm/min), and three different tool rotational speeds (1250, 1750, and 2250 rpm) were used in the experiments. Taguchi statistical analysis was used for the experimental design. Taguchi L9 orthogonal array was chosen because of the three parameters and three levels of each parameter determined for FSW. In the study, a tensile test was performed to determine the quality of the welding process. The tensile results obtained were evaluated according to the "Larger is better" rule in Taguchi method. In addition, the effects of tip geometry, feed rate, and tool rotational speed on the weld quality were determined by ANOVA analysis. During the FSW process, measurements were made with a thermal camera, and heat generation due to friction between the tool and the workpiece was evaluated. Visual examinations were made on the welded specimens to determine the welding defects. As a result, the most critical effect on the weld quality was determined as tool feed rate at 51.21%, tool pin profile at 33.68%, and tool rotation speed at 9.21%.

Keywords: Friction stir welding, carbon fiber reinforced PLA, Taguchi experimental design, ANOVA, 3D printer

Science Code: 625.02.05

TEŞEKKÜR

Dönem projesi kapsamında yürüttüğüm çalışmalarım süresince, anlayış ve sabırla yardımını ve bilgisini esirgemeyen kıymetli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Oğuz KOÇAR'a, saha çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşım Erhan KARATAŐ' a ve yoğun çalışma temposu sırasında anlayışı ve destekleri için değerli çekirdek aileme sonsuz muhabbet ve teşekkürlerimi sunarım.





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 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 TEMEL KAVRAMLAR VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 POLİMERLER	3
2.2 TERMOPLASTİKLER	4
2.3 CAMSI GEÇİŞ SICAKLIĞI (T _g) ve KRİSTAL ERİME SICAKLIĞI (T _e).....	5
2.4 EKLEMELİ İMALAT.....	5
2.5 ERİYİK YIĞMA (FDM) TEKNİĞİ.....	7
2.6 POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLME YÖNTEMLERİ.....	8
2.7 TERMOPLASTİK MALZEMELERİN KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	9
2.8 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI.....	9
2.8.1 Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminin Prensibi	10
2.8.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametreleri	12
2.8.3 Kullanılan Takım Uç Şekilleri Ve Takım Özellikleri.....	14
BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOD.....	17
3.1 FİLAMENT MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ.....	17

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI.....	18
3.3 İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	19
3.4 TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM.....	21
BÖLÜM 4 TARTIŞMA VE BULGULAR.....	23
4.1 S/N GÜRÜLTÜ ORANI	23
4.2 ANOVA ANALİZİ.....	25
4.3 REGRASYON ANALİZİ.....	25
4.4 SICAKLIK ÖLÇÜMLERİ	26
4.5 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	28
BÖLÜM 5 SONUÇLAR.....	31
KAYNAKLAR.....	33
ÖZGEÇMİŞ	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Monomer ve polimerin dizilim halinde gösterilişi.....	3
Şekil 2.2 Eklemeli imalat süreçlerinin ISO/ASTM 529000:2015'e göre sınıflandırılması	7
Şekil 2.3 FDM'de malzemenin ekstrüzyonu.....	8
Şekil 2.4 Polimerlerin birleştirme yöntemleri.....	9
Şekil 2.5 Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik diyagramı.....	11
Şekil 2.6 Karıştırıcı Uç Geometrileri,	14
Şekil 3.1 Numune ölçüleri (mm), SKK şematik görünümü.....	18
Şekil 3.2 SKK akış şeması.	19
Şekil 3.3 Karıştırıcı uç geometrileri ve sabit işlem parametreleri.....	20
Şekil 3.4 Kaynağı tamamlanmış ve lazer kesimi yapılmış çekme test numuneleri	21
Şekil 4.1 “Daha büyük daha iyidir” için S/N Oranları.....	24
Şekil 4.2 “Daha büyük daha iyidir” için ortalama değerleri.....	24
Şekil 4.3 SKK sırasında ısı ölçüm görüntüleri.....	28
Şekil 4.4 Shore D sertlik değerleri	29



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Polimerlerin sınıflandırılması	4
Çizelge 2.2 Termoplastiklerin birleştirme yöntemleri	9
Çizelge 3.1 PLA-CF teknik özellikleri.....	17
Çizelge 3.2 SKK işlem parametreleri.....	20
Çizelge 3.3 L9 ortogonal dizisi ve parametrelerin yerleşimi.	22
Çizelge 4.1 S/N oranı ve ortalama değerleri.	24
Çizelge 4.2 Doğrulama testi sonucu.....	25
Çizelge 4.3 ANOVA sonuçları.....	25
Çizelge 4.4 Kaynak mukavemetinin tahmini için oluşturulan denklemler	26
Çizelge 4.5 L9 ortogonal dizi tahmin ve deneysel sonuçlar.	26



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

S/N : Sinyal Gürültü Oranı

S : Varyans

KISALTMALAR

ANOVA : Varyans Analizi

CF : Karbon Fiber

FDM : Eriyik Yığıma Tekniği

PLA : Poliaktik asit

SKK : Sürtünme Karıştırma Kaynağı

T_g : Camı Geçiş Sıcaklığı

T_e : Erime Sıcaklığı



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllara bakıldığında, dünyada genel olarak endüstriyel plastik malzeme üretim ve tüketiminde önemli artışlar görülmektedir. Bu artış eğilimi, temelde iki sebeple açıklanabilir. Birincisi, araçlarda yakıt verimliliğinin arttırmak ve metal kaynaklardan tasarruf etmek için alternatif olarak mühendislik plastiklerinin kullanımının teşvik edilmesidir. Örneğin, bir otomobilin ağır bileşenlerinin %10 kadarı hafif plastik parçalarla değiştirilerek yakıt tüketimi %6-7 oranında azaltılmıştır (Joost 2012, Sharma vd. 2020). İkinci sebep ise 3B yazıcı sektöründe görülen teknolojik gelişmelerin yüksek hızıdır. Sanayi ve ev ortamında esnek, düşük maliyet ve hızlı parça üretimi ile yerini alan 3B yazıcıların temel sarf malzemesi termoplastiklerdir. 3B yazıcılarda üretilen parçaların boyutlarının sınırlı olması durumu, bu termoplastik malzemelerin birleştirilmesi konusunu gündeme getirmiştir. Termoplastiklerin birleştirilmesi için temelde üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler mekanik birleştirme, yapıştırma ve kaynak ile birleştirme değildir. Her yöntemin kendine göre avantajları olmakla beraber mekanik birleştirmelerde fazladan kullanılan cıvata, perçin vb. parçalar yapıya ekstra yük getirmektedir. Yapıştırıcılar ise termal ve mekanik zorlanmalar karşısında özelliklerini kaybedebilmektedirler. Bu dezavantajlardan kaçınmak için, kaynak işleminin yapıldığı kaynaklı birleştirmeler ön plana çıkmaktadır. Plastiklerin kaynağında, metallerin kaynağından farklı veya özel (hibrit) yöntemlerin uygulanması gerekliliği vardır. Plastik parçaların birleştirilmesinde kullanılan kaynak türlerinden bazıları sıcak eleman kaynağı, dikiş kaynağı, sıcak gaz kaynağı, sürtünme kaynağı, titreşim kaynağı, ultrasonik kaynak, yüksek frekans kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağıdır (Çevik 2014). Otomotiv sektöründeki kullanımına baktığımızda ise bir dizaynın düşünce aşamasından seri üretime başlamasından önce prototip aşaması denilen süre zarfında ilgili tasarımın ilk numunesi imal edilip test edilmektedir. İlk üretim aşamasında yüksek kalıp maliyetlerinden kaçınmak ve tekil parça için hızlı bir üretim yöntemi gerçekleştirmek için çeşitli üretim teknikleri kullanılmaktadır. Günümüzde otomotiv alanında prototip aşamasında en fazla kullanılan imalat türlerinden birisi de eklemeli imalat yöntemidir.

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), benzer veya farklı malzemeleri karıştırıcı takım kullanarak birleştiren bir katı hal kaynak yöntemidir. Takım, bir omuz ve pim geometrisinden oluşur ve kaynak hattı boyunca belirli bir hızla dönerek ilerler. Uygulama alanları hızlı bir şekilde artan SKK'nın araştırmacılar tarafından farklı malzemelerin kaynaklanabilirliği ve işlem parametrelerinin kaynak kalitesine olan etkilerini incelemek için çalışmalar yürütülmektedir. Fakat hâlihazırda literatürde termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi hakkında az sayıda çalışma mevcuttur.

Senthil ve arkadaşları (Senthil 2022) üç farklı dönme hızı (700, 1400 ve 2000 dev/dk) ve üç farklı ilerleme hızı (10, 14 ve 20 mm/dak) ve konik silindirik pim profili kullanarak hazırladıkları PLA (polilaktik asit) plakaların kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. En yüksek kaynak mukavemeti 1400 dev/dk ve 10 mm/dak parametrelerinde elde edilmiştir. Bir başka çalışmada (5) PLA levhalar 600, 1000 ve 1400 dev/dk, 3, 6 ve 9 mm/dak kaynak hızı ve iki farklı pim profili kullanılarak birleştirilmiştir. Sharma ve arkadaşları (Joost, 2012), PLA levhaların birleştirilmesinde farklı takım dönme hızları (700, 1400 ve 2000 dev/dk), ilerleme hızı (20, 30 ve 40 mm/dak) ve farklı pim profilleri (silindirik, dişli ve konik) kullanmışlardır. Pim profilinden bağımsız olarak en yüksek mukavemet değeri takım dönüş hızında 1400 dev/dk' da belirlenmiştir. Ayrıca kaynak esnasında oluşan sıcaklığın 75-110 °C aralığında olduğu ve yüksek mukavemette önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Diğer bir çalışmada ise SKK metodunun PE (polietilen) levhaların birleştirilmesinde başarılı olduğu ve dönme hızının büyük etkisinin bulunduğu ifade edilmiştir. Bunun nedeni de, artan dönme hızı ile kaynak bölgesindeki sıcaklığın artması olarak açıklanmıştır (Raouache vd. 2018).

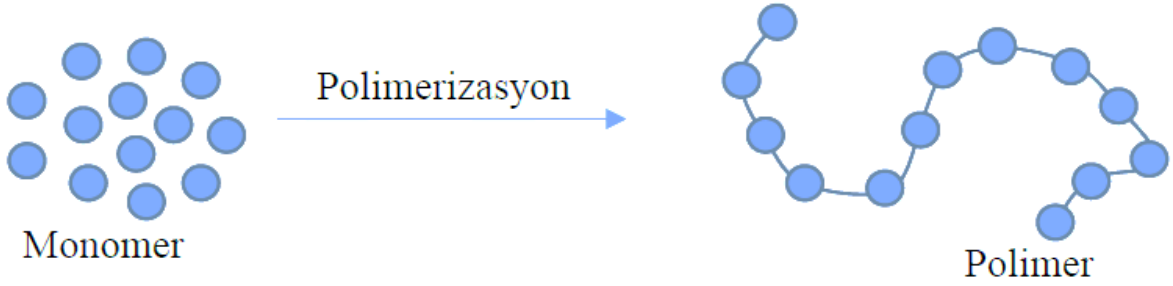
Yapılan bu çalışmada 3B yazıcıda üretilen PLA-CF levhaların SKK kaynağı ile birleştirilebilirliği incelenmiştir. SKK işlem parametreleri olarak; üç farklı karıştırıcı uç profili (üçgen, kare ve vida), üç farklı ilerleme hızı (20, 40 ve 60 mm/dk) ve üç farklı takım dönme hızı (1250, 1750 ve 2250 dev/dk) belirlenmiştir. Kaynak kalitesini değerlendirmek için çekme testleri yapılmıştır. Ayrıca SKK sırasında ısı görüntüleri alınmış ve kaynak sonrasında parçaların sertlik değerleri ölçülmüştür. Belirlenen faktörlerin kaynak kalitesine olan etkilerini incelemek için Taguchi L9 ortogonal dizi ve ANOVA istatistiksel analiz yöntemi kullanılmıştır.

BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 POLİMERLER

“Polimer” kelime yapısı olarak iki farklı kelimedenden bir araya gelen, Türkçe’ye çevirdiğimizde de “çok parçacıklı” anlamına gelen bir Latince sözcüktür. (Ülker, 2015) Şöyle ki “Poli” Latince’de “çok” anlamına gelmektedir. “Mer” ise “parçacık” anlamına gelmektedir. “Mono” ise bir ya da tekil anlamında kullanılmaktadır. “Monomer” (Şekil 2.1) “tekil” parçacık, “polimer” (Şekil 2.1) ise bu tekil parçacıkların kimyasal olarak zincir şeklinde birbirine bağımlı çok parçacıklı, yüksek molekül ağırlıklı bileşik oluşturmuş halidir (Karagöz, 2014; Ülker, 2015).



Şekil 2.1 Monomer ve polimerin dizilim halinde gösterilişi.

Polimerler Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi, 8 farklı başlık halinde adlandırılabilir. Katmanlı olarak yapılan üretimlerde parça ısı altında şekillendirilerek ya da genişletilerek üretim yapılır. Bu nedenle termoplastik malzemeler ile işleme yapmak daha kolaydır ve uygulama alanlarında .oğunlukla termoplastik malzeme türlerinin kullanımı fazladır. Bunlar ASA, ABS, PLA vb. termoplastik malzemelerdir (Chiulan ve Frone 2017).

Polimerlerin yapısına daha detaylı bakıldığında Çizelge 2.1’de de görüldüğü gibi ısı karşısında gösterdikleri dirence göre; termoplastikler ve termosetler olmak üzere ikiye ayrılır.

Isı karşısında gösterdikleri dirence baktığımızda termosetler oda sıcaklığında sıvı halde bulunurlar, ısı etkisi ile kimyasal tepkimeye uğrarlar ve bir seferliğine katılırlar. Bir sefer katıldıktan sonra ısıya karşı dirençleri daha artar ve geri dönüşümü mümkün değildir (Bozcu 2020).

Termoplastik malzemelere bakıldığında oda sıcaklığında katı haldedirler. Isı altında işleme yapılması ve geri dönüşüm yapılması kolaydır.

Çizelge 2.1 Polimerlerin sınıflandırılması (Karagöz 2014).

Polimerler	
1-Isı karşısındaki dirençlere 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 yerlerine göre	8.1- Plastikler 8.2- Elastomerler 8.3- Fiberler 8.4- Kaplamalar 8.5- Filmler 8.6- Köpükler 8.7- Yapıştırıcılar

2.2 TERMOPLASTİKLER

Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında serttirler, fakat ısı verildiğinde yumuşarlar. Termoset malzemelere bakarak matris olarak kullanımları daha azdır. Lakin kırılma tokluğu daha yüksek, geri dönüşümleri mümkün, sertleşmesi için kimyasal çözücülere ihtiyacın bulunmaması, hammadde kullanım sürelerinin daha fazla olması vb. avantajları bulunmaktadır. Bunun yanında, şekil verilmiş olan termoplastikler tekrar ısıl işleme tabi tutularak yeniden şekillendirilebilirler (Bozcu 2020).

Ayrıca termoplastiklerin sertlik ve darbe dayanım özellikleri çok yüksektir. Bu gibi nedenlerden dolayı termoplastiklerin kullanım alanları çok fazladır (Chiulan ve Frone 2017).

Polimerlerin ve termoplastiklerin maddenin akışını ve deformasyonu belirleyen iki kritik sıcaklık mevcuttur. Bunlar camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve Kristal erime sıcaklığı (T_e) olarak ikiye ayrılır.

2.3 CAMSI GEÇİŞ SICAKLIĞI (T_g) ve KRİSTAL ERİME SICAKLIĞI (T_e)

Polimerlerde, sıcaklık moleküllere bağlı zincirlerin yer değiştirmesinde çok etkilidir. Sıcaklığın artırılması ile molekül zincirlerinin hareketi artar, bağ kuvvetleri zayıflar, zincirlerin bağlanma kuvveti düşer ve moleküller birbirinden bağımsız olarak yer değiştirmeye başlamaktadır.

Sıcaklığın azaltılması ile moleküllerin hareketi yavaşlar ve öyle bir sıcaklık vardır ki hareket durur. Bu hareketin durduğu sıcaklığa T_g sıcaklığı adı verilmektedir. Her polimer için farklılık göstermektedir (Bozcu 2020).

T_g sıcaklığının altında parça camsı hal olarak bilinen rijit, sert ve gevreklerdir. Bunun yanı sıra kırılma ve yorulma dayanımları azdır. T_g 'nin değeri, moleküller arası kuvvetlerin artması, molekül ağırlığının yüksek olması, zincir içerisindeki birimlerin rijitliğinin yüksek olması ve çapraz bağların büyümesi ile artar.

Termoplastiklere eklenen yumuşatıcılar T_g değerini düşürür (Ülker 2015). Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, polimer malzemelerde kristal yapının bozulma sıcaklığı mevcuttur. Bu değere kristal erime sıcaklığı (T_e) denir. T_e 'ye yaklaşıldıkça, kristal yapının düzeni bozulmaya ve moleküller arası zincirler hareket etmeye başlar. Böylelikle malzeme yumuşama meydana gelir. T_e 'ye ulaşıldığında ise kristal yapının düzeni tamamen bozulur ve ortadan kaybolur. Böylelikle malzemenin viskozitesi düşer ve T_e 'nin üzerinde malzeme sıvı hale geçer.

2.4 EKLEMELİ İMALAT

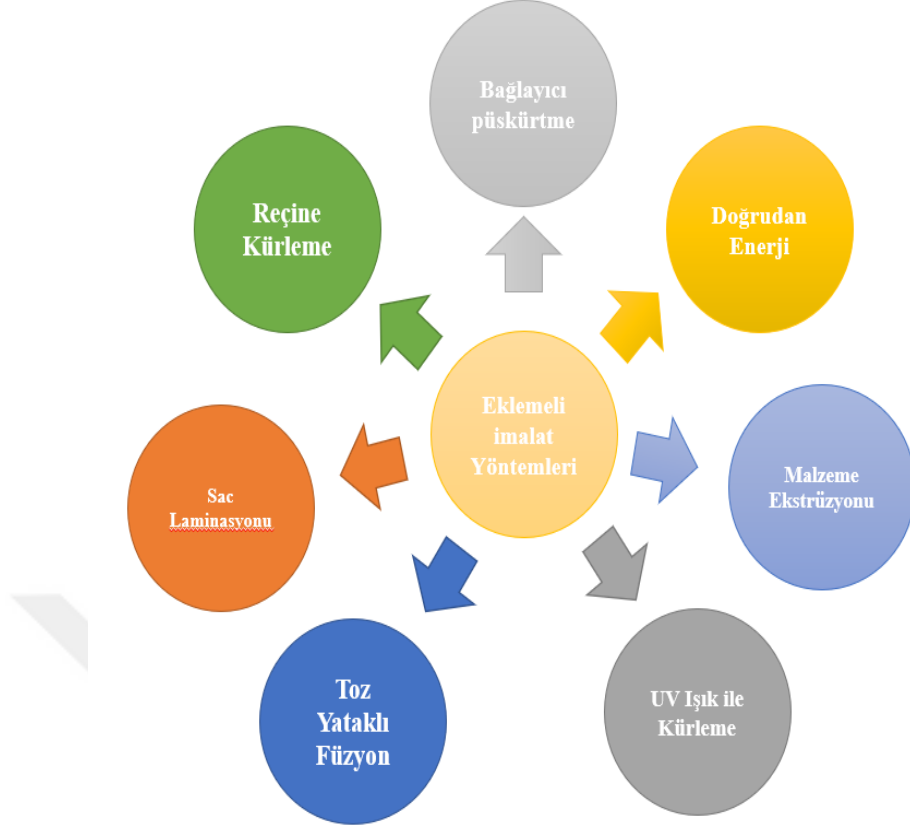
Malzemelerin tasarım çeşitliliği ve karmaşıklığı dünya genelinde sürekli olarak artış göstermektedir. Ancak bilinen üretim türleri yeni karmaşık tasarım ürünlerin üretimine cevap veremez hale gelmiştir. Cevap verse bile maliyet ve zaman bakımından kısıtları mevcuttur. Tam

bu noktada 1981 yılında bu ihtiyaca çözüm olarak üç boyutlu yani katmanlı olarak da adlandırılan imalat yöntemleri bulunmuştur.

Üç boyutlu cihazlar çok kompleks yüzeylere sahip parçaların üretimine cevap verebilmekte ve bunun yanında prototipleme aşamasındaki maliyetleri azaltmakta, zamandan tasarruf edilerek hızlı üretim olanağı sağlamaktadır. Hızlı prototipleme, bilgisayarda hazırlanan üç boyutlu CAD çizimlerinden direkt olarak elle tutulur fiziksel modeller elde etmemizi sağlayan imalat teknolojisidir.

Eklemeli imalatın başlıca avantajları; ilave maliyet gerektirmeden çok komplike malzemelerin imalatını sağlayabilir, parçalar doğrudan monte edilmiş ya da edilebilir formlarda üretebilir, geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında birkaç parçadan oluşan bir parçanın parça sayısını azaltmakta ve evde masaüstü yazıcılarla kişiselleştirilmiş malzemelerin imal edilmesine olanak sağlamaktadır (Chiulan ve Frone 2018).

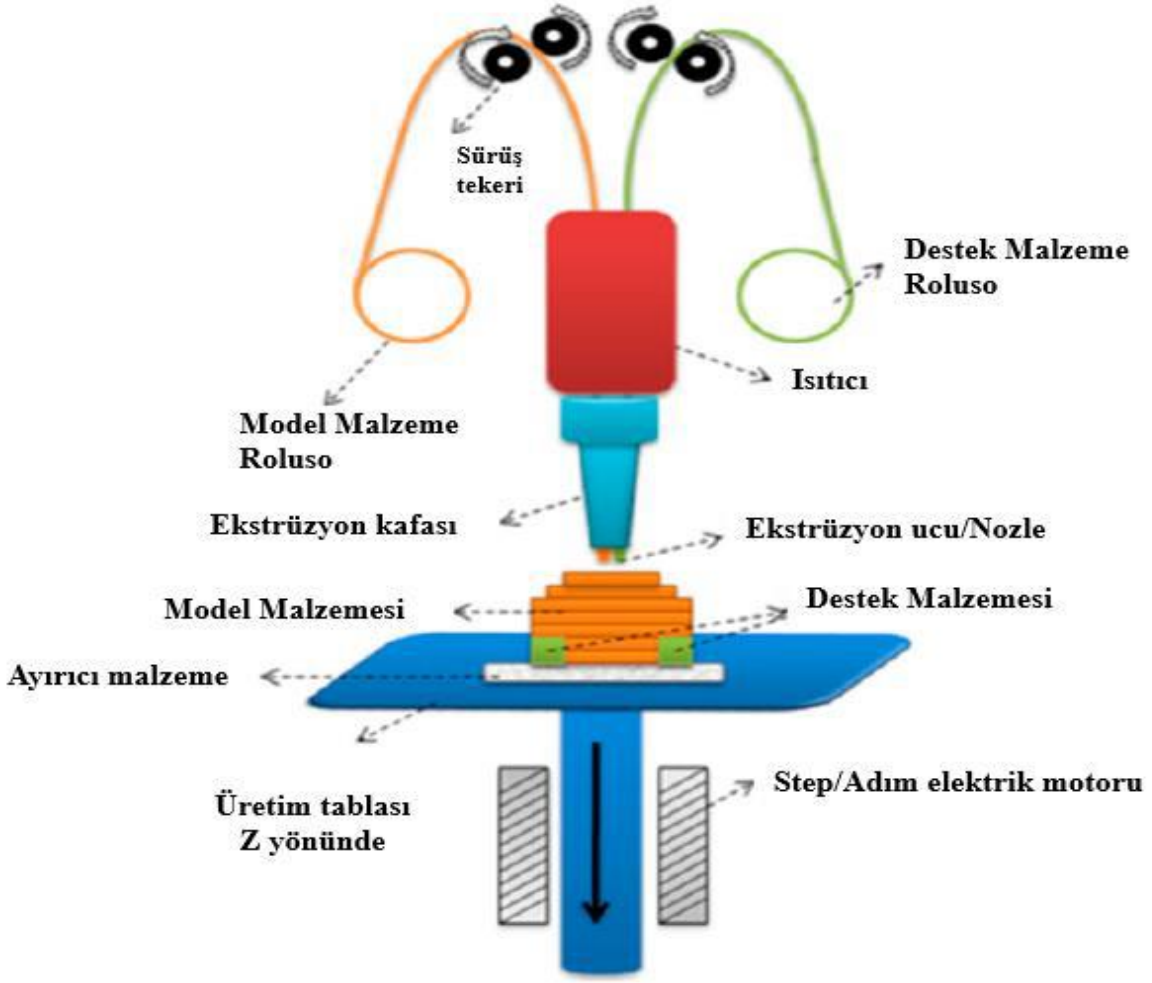
Genellikle üç boyutlu baskı adı ile bilinen eklemeli imalat ,“eksiltmeli imalat ve biçimlendirici imalat metodolojilerinin aksine, genellikle katman katman olmak üzere, 3B model verilerinden parçalar oluşturmak için malzemeleri birleştirme süreci” olarak adlandırılabilir. Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO)/Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) 52900:2015 standardına göre; eklemeli imalat süreçleri yedi başlıkta toplanabilir: (1) Bağlayıcı püskürtme; (2) Doğrudan enerji/Malzeme biriktirme; (3) Malzeme ekstrüzyonu; (4) Malzeme püskürtme; (5) Toz yataklı füzyon; (6) Sac laminasyonu ve (7) Reçine kürleme.



Şekil 2.2 Eklemeli imalat süreçlerinin ISO/ASTM 529000:2015'e göre sınıflandırılması (Lee ve An 2017).

2.5 ERİYİK YIĞMA (FDM) TEKNİĞİ

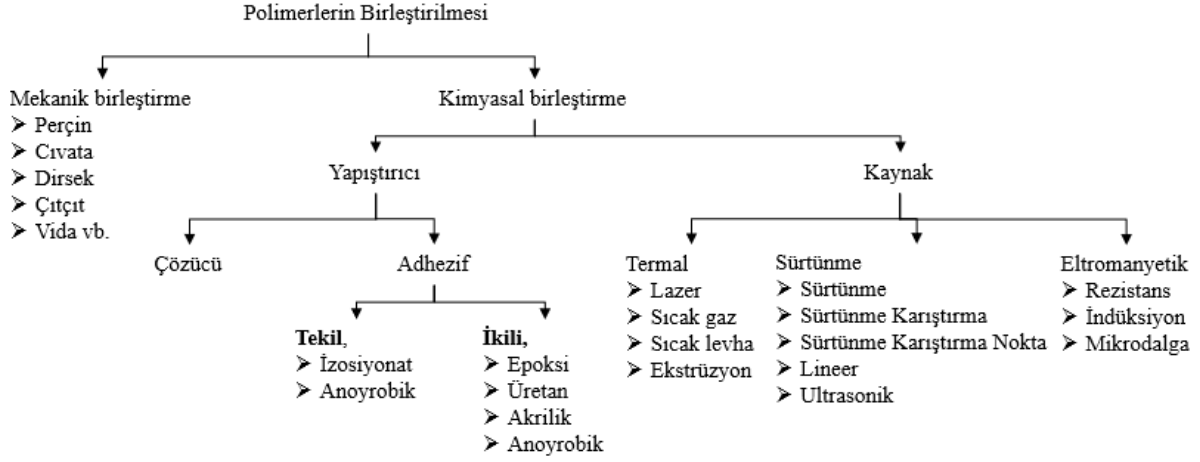
Hızlı prototipleme, FDM tekniğinde şerit halindeki plastik hammadde ekstrüzyon kafasına iletilir. Burada malzeme ısıtılarak eriyik hale getirilir. Ekstrüzyon kafası eriyik malzemeyi damlalar halinde boş bir kaba akıtarak parçayı oluşturacak ilk katmanı oluşturur. Her katmanda kap bir adım aşağıya iner ve böylece parça katmanlar halinde inşa edilir (Şekil 2.3). İnşa sırasında destek görevi gören bir ayrı yapı oluşur ve üretim tamamlandıktan sonra bu yapı parçadan sökülür (Mendricky ve Fris 2020).



Şekil 2.3 FDM’de malzemenin ekstrüzyonu (Chiulan ve Frone 2018).

2.6 POLİMERLERİN BİRLEŞTİRİLME YÖNTEMLERİ

Polimerlerin birleştirilmesine ait yöntemleri Şekil 2.4’te türlerine göre sınıflandırılmıştır. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi polimerlerin birleştirme türlerini mekanik ve kimyasal olmak üzere iki ana grupta sınıflandırabiliriz. Mekanik birleştirmeler parçaya zarar vermeden sökülebilirken, kimyasal birleştirmelerin birbirlerinden ayrılması sırasında parça tahribat görmektedir. Kimyasal birleştirmelerde kullanılan yapıştırıcı yöntemleri sadece farklı polimerleri birbiri ile değil, diğer tüm malzemelerin (metal, termoset, elastomer vb.) birbiri ile birleştirilmesinde kullanmak mümkündür. Ancak kaynak sadece termoplastik malzemelere uygulanabilmektedir (Mishra 2019).



Şekil 2.4 Polimerlerin birleştirme yöntemleri.

2.7 TERMOPLASTİK MALZEMELERİN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Termoplastik malzemelerin birleştirmesine ait kaynak yöntemlerine bakıldığında Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi ısının transfer edildiği metotlar ve ısının direkt malzemede oluşturulduğu metotlar olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

Çizelge 2.2 Termoplastiklerin birleştirme yöntemleri (Karagöz 2014).

Isı transfer yöntemleri	Isının direk malzemede oluşturduğu yöntemler	
Isıl yöntemler	Mekanik Yöntemler	Elektromanyetik yöntemler
Sıcak gaz kaynağı	Sürtünme kaynağı	Rezistans kaynağı
Sıcak kama kaynağı	Sürtünme karıştırma kaynağı	İndüksiyon kaynağı
Sıcak eleman kaynağı	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı	Dielektrik yüksek frekans kaynağı
Ekstrüzyon kaynağı	Titreşim kaynağı	Mikrodalga ısıtma kaynağı
İnfrared ısıtma kaynağı	Ultrasonik kaynak	
Lazer kaynağı		

2.8 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Son zamanlarda SKK ile birleştirme, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde termoplastiklerin birleştirilmesi konusunda giderek daha fazla dikkate alınmaktadır (Xue vd. 2021) SKK’nın çevre dostu proses, enerji verimliliğinin yüksek ve kaynak kalitesinin çok iyi olması gibi avantajlarının bulunması dikkatleri üzerine çekmektedir (Nath vd. 2019).

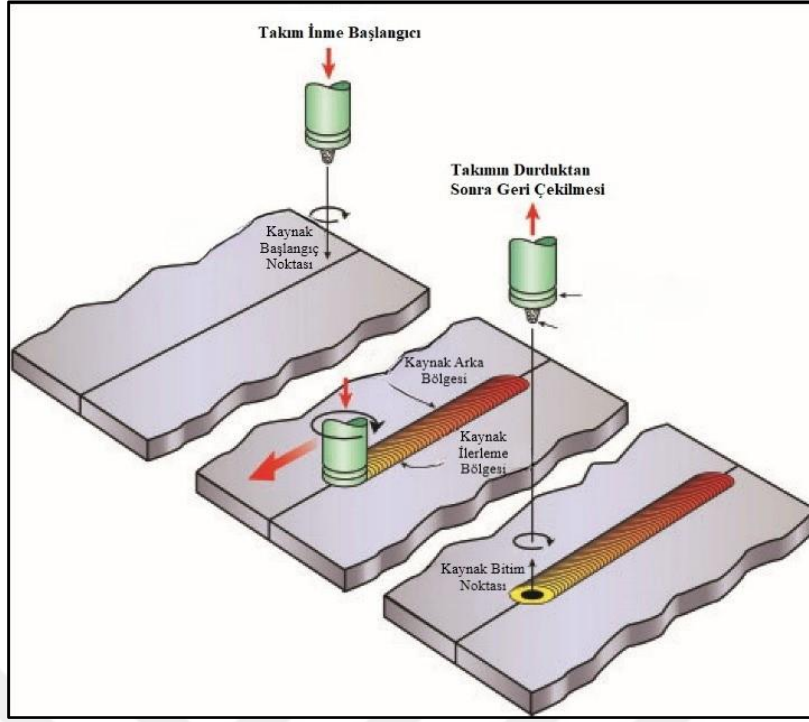
İlk olarak sürtünme karıştırma kaynağı tekniği 1991 yılında İngiltere’deki The Welding Institute tarafından katı hal kaynak teknikleri başlığı altında geliştirilmiştir. Temelde sürtünme

karıştırma kaynağı ile sürtünme kaynağının benzer özellikleri çok fazladır. Ancak uygulama alanları farklılık gösterebilir. Sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemi iken sürtünme karıştırma kaynağı katı hal kaynak tekniğidir. Sürtünme karıştırma kaynağı sarf malzemesi olmayan, döner tipte bir takımın iki plakanın ara yüzleri arasına yerleştirildiği ve plaka ara yüzlerinde dönme yolu ile sürtünme, bununla beraber ısı ve basınçla difüzyon etkisiyle yapılan bir birleştirme yöntemidir (Kumar ve Singh 2017).

SKK kaynak süreci; başlangıç olarak takım ucu, plaka malzemeler ve plaka sabitleme parçalarından oluşmaktadır.

2.8.1 Sürtünme Karıştırma Kaynak İşleminin Prensibi

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme ve sürtünme ile ısı üretimi ilkesine dayanmaktadır. Temel bileşenler döner bir takım, omuz ve iş parçası üzerine bastırılan ve daldırılan alın altına birleştirilen yüzler boyunca hareket ettirilen bir karıştırıcı uçtur. Takımda ki omuz, iş parçası yüzeyi ile tam temas edene kadar karıştırıcı uç malzemeye daldırılır. Karıştırıcı uç tamamen yerine oturduğunda, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi döndürülerek kaynak yönünde hareket ettirilir. Döner takım, levhalarda sürtünme ve basınç kuvveti oluşturur. Levhaların ara yüzeyinde takım dönüşü ve hareketi, takım ile iş parçası arasında sürtünme ile ısı üretimine neden olur. Üretilen ısı, iş parçasının arayüzündeki malzemeleri yumuşatır, bu işlem arayüzü deforme eder ve yüksek basınç kuvveti uygulayarak iki iş levhanın malzemelerini birbirine yayarak, malzemelerin arayüzü arasında güçlü bir bağlantı oluşturur.



Şekil 2.5 Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin şematik diyagramı

Kaynak işleminin gerçekleştirilme aşamaları şu şekildedir:

- Birleştirilecek plakalar veya levhalar, kaynak işlemi sırasında iş parçasının hareket etmemesi veya sallanmaması için bağlama kalıbı kullanılarak alın altına temas edecek şekilde birleştirilerek sıkıca kenetlenir.
- İş parçalarının uygun şekilde sıkıştırılmasından sonra, takıma bağlanan karıştırıcı ucun omzu iş parçasına dokunana kadar levhalar ve plakalar arasındaki alın altına birleştirildikleri bölgede iş parçalarına yerleştirilir. Bu hareket, sürtünme kuvvetinin ısıtma hareketinin bir sonucu olarak malzemelerin yüzeyinde plastik deformasyona neden olur.
- Takım ve takıma bağlı karıştırıcı uç eklem hattı boyunca hareket ettirilir. Takım iş parçasının yüzeyinde hareket ederken takımın arkasında kaynak meydana gelir. Takım, tüm kaynak üretilirken yanmadan hareket etmeye devam eder.
- Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra takım iş parçasından ayrılır ve gerekirse pürüzsüz hale getirme işlemleri yapılır (Akinlabi ve Mahamood 2020), (Vilaça ve Thomas 2011).

2.8.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametreleri

SKK'nin önemli bir avantajı, kaynak/işleme işlemi sırasında tüm işlem parametreleri doğru bir şekilde oluşturulduğunda ve izlendiğinde sonuçların yüksek kalitesi ve tekrarlanabilirliğidir. İşlem parametrelerinin değerlendirilmesi nispeten kolaydır çünkü SKK çoğunlukla sonuçların çevresel koşullar veya operatör becerileri gibi zor kontrol koşullarına bağlı olmadığı mekanik bir kaynak işlemidir. Kalite güvence koşullarını sağlamak için makine ve bağlama sistemi önemlidir.

SKK karmaşık parça ilerlemesi ve plastik deformasyonu kapsamaktadır. Kaynak parametreleri, takım geometrisi ve bağlantı tasarımı, malzeme akış modeli ve sıcaklık dağılımı üzerinde gözle görülür değişim gösterir, bunun sonucunda malzemenin mikroyapısal evrimini etki eder. SKK işlem parametreleri aşağıdaki gibidir.

Karıştırıcı Uç Geometrisi

Omuz ve karıştırıcı uç geometrisi, kaynak dikişinin nihai özelliklerini ve genel bütünlüğünü etkileyen en önemli özelliktir. Takım geometrisi malzeme akışında önemli bir rol oynar ve sırayla SKK'nın gerçekleştirilebileceği hareket hızını yönetir. Karıştırıcı ucun iki temel işlevi bölgesel ısıtma ve malzeme akışıdır.

Kaynak Hızı

Dönme hızı ile kaynak ilerleme hızı arasındaki ilişki, kaynak adım oranı olarak bilinir. SKK için iki parametre çok önemlidir bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersine yönde takım dönüş hızı (rpm) ve bağlantı hattı boyunca takım hareket hızı (mm/dak). Takımın dönüşü, dönen karıştırıcı ucun etrafındaki malzemenin karıştırılması ve karıştırılan malzemeyi karıştırıcı ucun önünden arkasına doğru hareket ettirilmesi ile kaynak işlemi tamamlanır. Daha yüksek takım dönüş hızları, daha yüksek sürtünme ısıtması nedeniyle daha yüksek sıcaklık üretir ve daha yoğun karıştırma ile sonuçlanır. Ancak, takım yüzeyinin iş parçası ile sürtünmeli bağlantısının ısınmayı yöneteceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, artan takım dönüş hızı ile arayüzdeki sürtünme katsayısı değişeceğinden, artan takım dönüş hızı ile ısınmada monotonik bir artış beklenmemelidir.

Takım Eğim Açısı

Karıştırıcı ucun arka yöne doğru uygun şekilde eğilmesi, karıştırıcı ucun omzunun karıştırılan malzemeyi tutmasını ve malzemeyi karıştırıcı ucun önünden arkasına verimli bir şekilde hareket ettirmesini sağlar.

Karıştırıcı Ucun Batma Derinliği

İş parçalarına karıştırıcı uç yerleştirme derinliği, pürüzsüz takım omuzları ile sağlam kaynaklar imal etmek için önem arz etmektedir. Ucun yerleştirme derinliği ucun yüksekliği ile ilişkilidir. Yerleştirme derinliği çok sığ olduğunda, takımın omzu orijinal iş parçası yüzeyi ile temas etmez. Bu nedenle, dönen omuz, karıştırılan malzemeyi ucun önünden arkasına verimli bir şekilde hareket ettiremez, bu da iç kanal veya yüzey oluşu ile kaynakların oluşmasına neden olur. Yerleştirme derinliği çok derin olduğunda, takımın omzu iş parçasına dalar ve aşırı parlama oluşturur. Bu durumda, önemli ölçüde içbükey bir kaynak üretilir ve bu da kaynaklı plakaların yerel olarak incelmesine yol açar.

Bağlama Sistemi

SKK işlemi mekanik bir işlemdir ve iş parçalarını doğru yerde tutan ve üçüncü gövde bölgesini sınırlayan sağlam ve güvenilir bir bağlama sistemi gerektirir.

Eksenel Yük

Omuzun z eksenini boyunca doğru temas basıncını uygulamak ve iş parçaları üzerinde sonda yapmak için önemli bir parametredir. Bu yük her zaman takım geometrisine (esas olarak omuz çapı ile ilgili) ve iş parçalarının malzemesine bağlı olacaktır.

Takım Dönüş Yönü

Saat yönü veya tersi olmak üzere dönüş yönü, iş parçalarının viskoplastikleştirilmiş bölgesinde, omuz çevresinde içe doğru bir malzeme akışını ve karıştırıcı uç çevresindeki aşağı doğru malzeme akışını kolaylaştırmak için takımın özellikleri dikkate alınmalıdır.

Karıştırıcı Ucun Başlangıç Pozisyonundaki İş Parçalarında Dalma Hızı

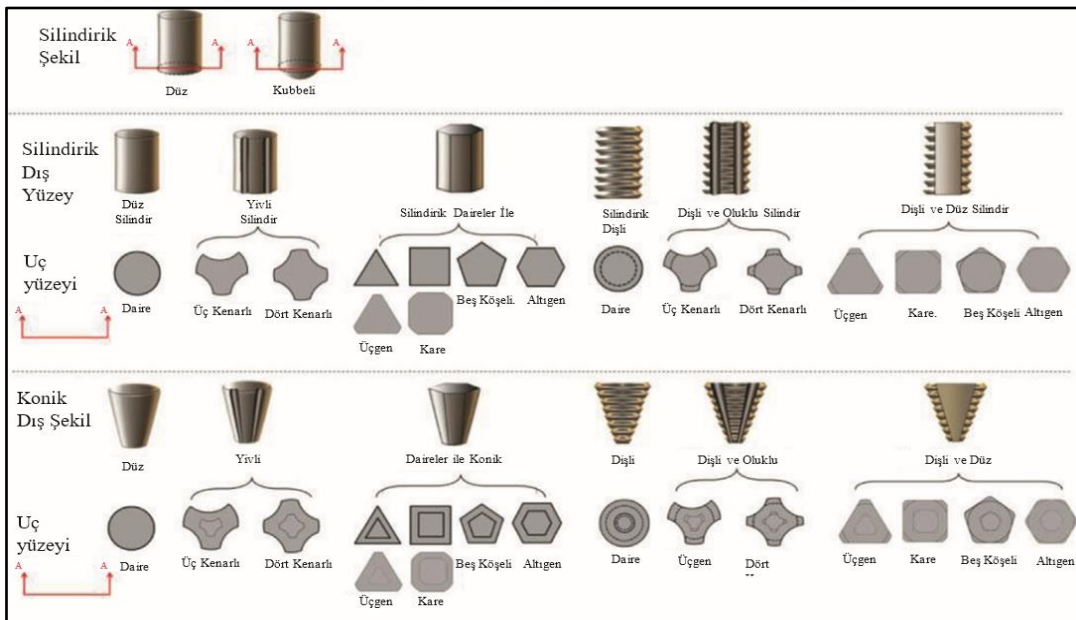
İş parçalarının sertliği arttıkça bu hız düşmelidir. Çok sert malzemeler için, boyutları karıştırıcı uç çapıyla aynı veya biraz daha küçük olan önceden delinmiş bir başlangıç deliği gerekli olabilir.

Kaynak Başlangıcında Bekleme Süresi

Dönen takımın başlangıç konumunda iş parçalarıyla nihai temasa ulaşmasından sonraki süre boyunca üretilen ısı, malzemelerin karıştırılması takımın ilerlemesini kolaylaştırmaktadır (Mishra ve Ma 2005, Akinlabi ve Mahamood 2020, Vilaça ve Thomas 2011).

2.8.3 Kullanılan Takım Uç Şekilleri Ve Takım Özellikleri

Sürtünme karıştırma kaynağı işleminde, füzyon kaynak tekniklerinden farklı olarak, işlem sırasında ısı üretmek için harici ısı kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yöntemi gerçekleştirmede kritik öneme sahip olan omuz ve karıştırıcı uç olmak üzere iki ana bileşeni vardır. Daldırma işleminin ilk aşamasında, iş parçası ile karıştırıcı arasındaki sürtünme nedeniyle ısı ortaya çıkar. Omuz iş parçasına bir kez dokunduğunda, omuz ve iş parçasının daha geniş yüzey alanı arasındaki sürtünme oluşması ısı üretiminin temelini oluşturmaktadır. Takım hareketi bu aşamada başlar ve takıma bağlı karıştırıcı uç, etrafındaki malzeme hareketini başlatır. Karıştırıcı uç malzemenin yoğun plastik deformasyonu nedeniyle oluşan ısı içeriğine de katkıda bulunur. Şekil 2.6’da karıştırıcı uç çeşitleri görsel olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.6 Karıştırıcı Uç Geometrileri (Mishra 2017).

SKK, kaynak sırasında takıma etki eden yüksek işlem kuvvetlerini içeren yüksek sıcaklıklı bir işlem olduğundan, takım malzemesi önemli bir husustur. SKK takımlarının üretiminde

kullanılan takım malzemesi, iş parçası malzemesine kıyasla daha serttir ve iyi yüksek sıcaklık özelliklerine sahip olmalıdır.

SKK'nın ilk günlerinde karıştırıcı uç, düz veya yuvarlak tabanlı, düz veya dişli silindirik olarak kullanılmıştır. Karıştırıcı uç üzerindeki dişler, daha iyi malzeme sıkıştırması ve sağlam kaynaklar sağlayan karıştırıcı ucun altına taşımak için tasarlanmıştır. Karıştırıcı uç tasarımı kademeli olarak silindirik geometriden konik geometriye değişmiştir.

Bir SKK takımının takım omzu, malzemeyi yumuşatmak, ısı üretmek ve kaynak sırasında malzemeyi karıştırmak için aşağı doğru yeterli dövme kuvveti üretmek üzere tasarlanmalıdır. Konkavlık, SKK takım omzunda kullanılacak ilk tasarım ögesidir. Burada amaç, hatasız kaynak üretmek için malzemeyi kaynak bölgesi içinde tutmaktır. SKK'nın daha da geliştirilmesiyle beraber takım omzu için de birçok tasarım özelliği geliştirilmiştir. Bu özellikler, içbükeylik ile veya içbükeylik olmadan işlenmiş kaydırmalar, tırtıllar, oluklar ve eşmerkezli dairelerden oluşmaktadır (Mishra ve Ma 2005), (Mishra ve Sidhar 2017), (Zhang, 2012).

2.9 TAGUCHİ METODU

Taguchi metodu, kullanımı basit, geleneksel yöntemlerle kurgulanan çok fazla deney sayısından oluşan çalışma sonuçlarına, çok daha az deney yapılma sayısı ile ulaşabilen bir deney tasarım türüdür. Taguchi metodu, deney parametrelerini optimize etmek için kullanılan kolay ve başarılı bir tekniktir. Taguchi metodu, tüm süreç parametrelerini az sayıda deney yapılarak araştırmak için özel bir ortogonal dizi tasarımı kullanılır. Klasik deneysel tasarım yöntemlerine göre avantajlar sunar. Taguchi metodu, sonuç değişkeninin varyasyonunu azaltır ve optimum proses koşullarını bulmanın en iyi yolunu gösterir. Deney tasarımında optimum proses koşullarını belirlemenin ve verimliliği artırmanın en iyi ve en ekonomik yoludur.

Daha sonra deneysel değer ile istenen değer arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu tanımlanır. Taguchi, kayıp fonksiyonunun kullanılmasını önerir ve bu kayıp fonksiyonunun değeri ayrıca S/N oranına dönüştürülür. S/N oranı, istenen değer civarında çıktı özelliklerinin daha küçük varyansına karşılık gelir.

Sinyal-gürültü (S/N) oranının analizinde tanımlanan performans özelliklerinin üç kategorisi vardır: Küçük olan en iyidir, büyük olan en iyidir, nominal en iyidir (Denklem, 2.1-2.3).

a) Nominal en iyidir;

$$S/N = 10 \log \left(\frac{y}{s_y^2} \right) \quad (2.1)$$

b) Büyük olan en iyidir.

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (2.2)$$

c) Küçük olan en iyidir.

$$S/N = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.3)$$

Yukarıda S/N oranları için belirtilen eşitliklerde “y” performans karakteristiği değerini, “s²” ise varyansı “n” ise deney sayısını ifade etmektedir.

S/N birimi dB (desibel) dir.

Değişkenliğin belirli bir hedef etrafında azaltılması amaçlanıyorsa Denklem 2.1 kullanılabilir.

Sistemin optimize edilmiş olması durumunda yanıtın mümkün olduğu kadar büyük olmasıdır. Bu durumda denklem 2 kullanılabilir . Sistemin optimize edilmiş olması durumunda yanıtın mümkün olduğu kadar küçük olmasıdır. Bu durumda denklem 3 kullanılabilir.

S/N analiz fonksiyonu, her bir süreç parametresi düzeyi için S/N oranının hesaplanmasını sağlar. Daha büyük S/N oranı, performans özelliklerinin kategorisi dikkate alınmadığında daha iyi performans özellikleri anlamına gelir. Ayrıca, hangi parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu belirlemek için istatistiksel bir varyans analizi (ANOVA) kullanılır. Proses parametrelerinin optimum kombinasyonu tahmin edilebilir (Kumar ve Singh 2018, Ülker ve Ayaz 2020). Bu tez çalışmasında Minitab 18.0 programında taguchi L9 ortogonal dizisine göre deney tasarımı yapılmıştır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOD

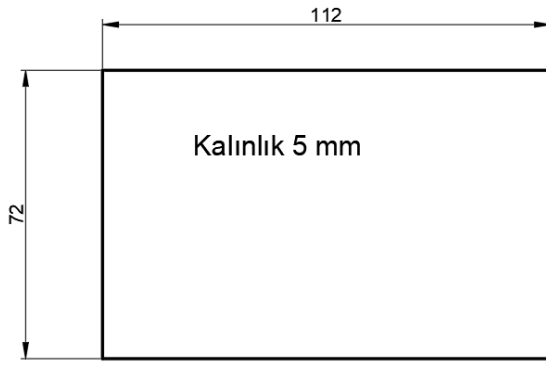
3.1 FİLAMENT MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ

Çalışmada karbon fiber takviyeli PLA malzeme kullanılmıştır. PLA-CF'nin mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. SKK için 72x114x5 mm ölçülerinde plakalar üretilmiştir (Şekil 3.1 a). Baskı için eriyik yığılma metodu ile çalışan Creality Ender 3 S1 kullanılmıştır.

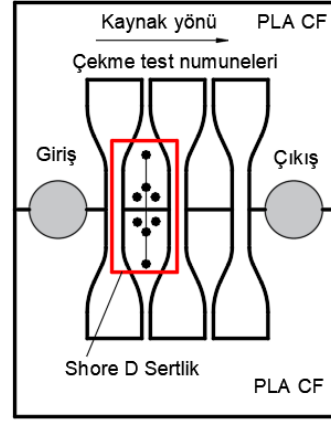
PLA-CF numunelerin baskı parametreleri; nozul sıcaklığı 215 °C, tabla sıcaklığı 65 °C, basım hızı 45 mm/sn ve basım yönü XYZ olarak belirlenmiştir. Ayrıca numuneler 0.2 mm katman kalınlığında ve %100 doluluk oranında basılmıştır. Numuneler basıldıktan sonra nemden etkilenmelerini önlemek için hava geçirmez saklama paketlerine yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 PLA-CF teknik özellikleri.

Mekanik Özellikler	PLA-CF (7)
Çap Ölçüsü (mm)	1.75
Marka	Sunlu
Renk	Siyah
Çekme Mukavemeti (MPa)	55
Baskı Sıcaklığı (°C)	190-230
Yoğunluk (g/cm ³)	1.23



a

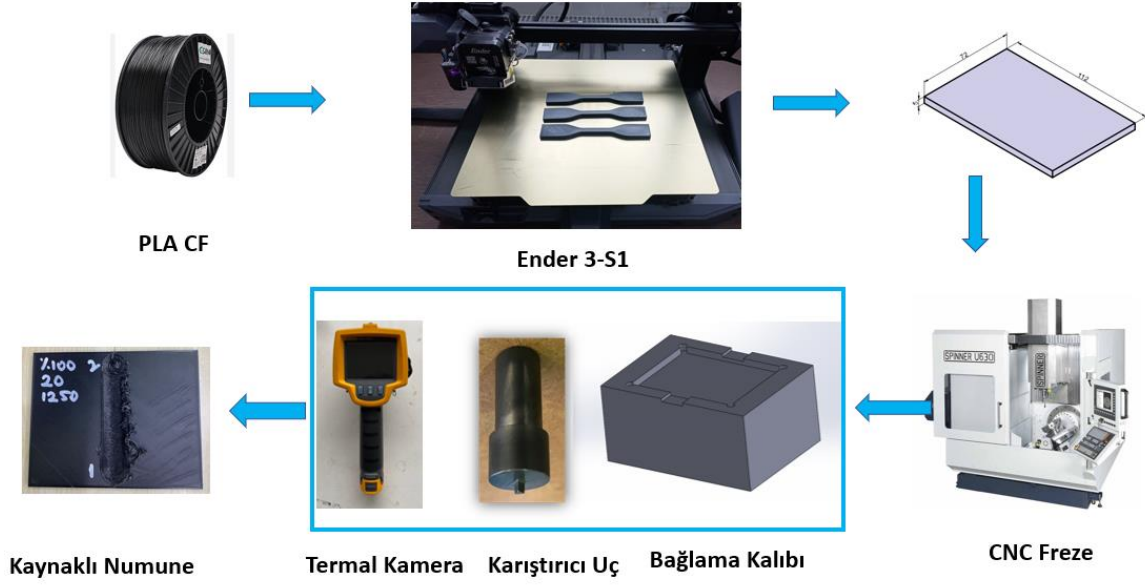


b

Şekil 3.1 Numune ölçüleri (mm), SKK şematik görünümü.

3.2 SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

3B yazıcıda basılan PLA-CF plakaların SKK kullanılarak birleştirilmesi için Spinner U630 CNC (22 kw, 12000 dev/dk, y eksenini 530 mm, z eksenini 465 mm ve tabla ölçüsü $\varnothing 650$ mm) freze tezgâhı kullanılmıştır. Şekil 3.2’de filamentten plaka üretimi, plakaların bağlanması, kullanılan CNC freze tezgâhı ve kaynak sonrası parça görünümü olmak üzere akış şeması verilmiştir. Şekil 3.1 b’de kaynak yönü, karıştırıcı uç giriş ve çıkış yerleri, sertlik ölçümünün yapıldığı bölgeler verilmiştir. Kaynak dayanımını belirlemek için ASTM D608-10 (8) standardına uygun EBH marka lazer kesim tezgahında 8 mm/s kesme hızında ve 100 w güç kullanılarak çekme test numuneleri kesilmiştir. Kaynak dayanımını belirlemek için çekme testi 3 tekrarla, sertlik değişimini belirlemek için ise kaynak bölgesi ve ana malzemeden en az beş tekrarla ölçüm yapılmıştır. Yapılan kaynak kalitesini daha iyi değerlendirmek için SSK sırasında FLUKE Ti32 Termal Kamera kullanılarak ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.2 SKK akış şeması.

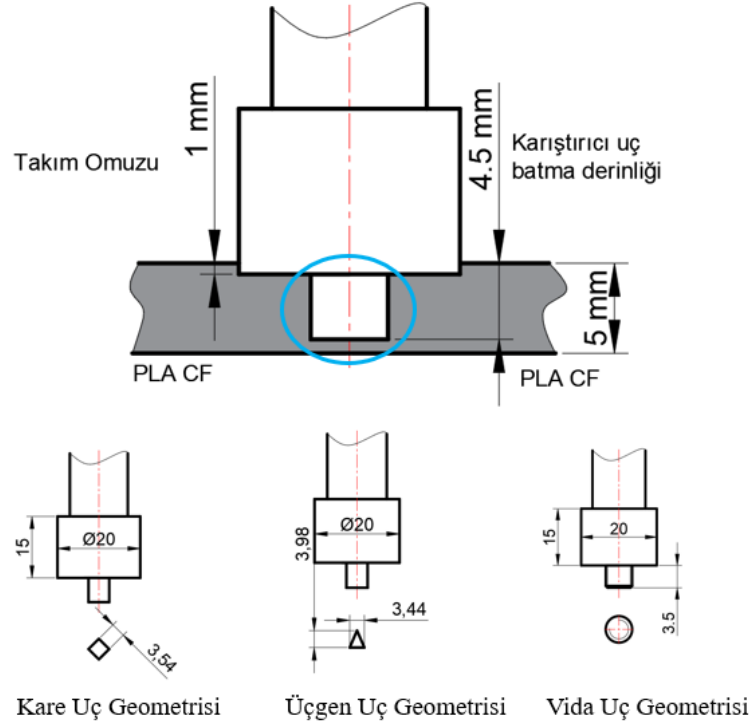
3.3 İŞLEM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesini, birleştirilecek malzeme özellikleri ve işlem parametrelerinden (takım ilerleme ve dönme hızı, takım eğim açısı, takım uç profili, omuz tasarımı, dalma hızı (Hovanski vd. 2015, Bhardwaj vd. 2019) etkilemektedir. Kaynak dayanımının iyileştirilebilmesi için kaynak bölgesinde sürtünmeden kaynaklı ortaya çıkan ısının, kaynak sırasındaki malzeme akışının optimizasyonu gereklidir. Kaynak yapılırken ortaya çıkan ısıda takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı, malzeme akışında ise takım uç profili önemli rol oynamaktadır (Zhang 2012).

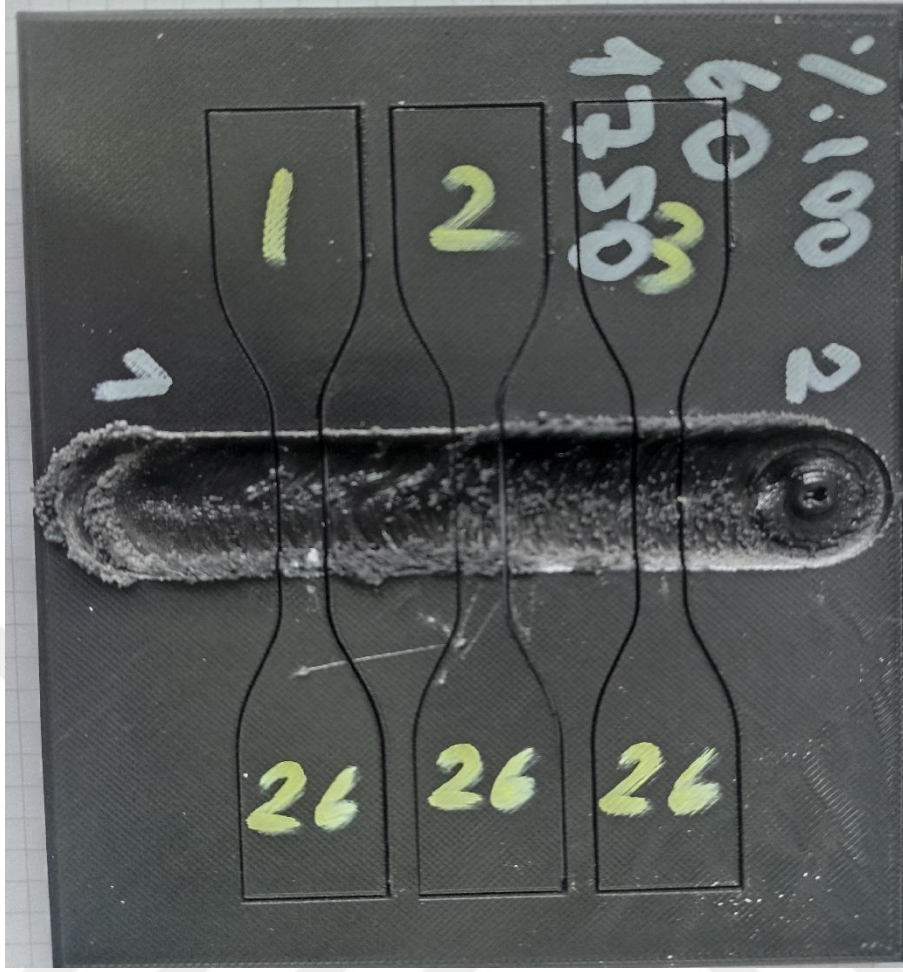
Bu çalışmada takım ilerleme hızı/dönme hızı ve takım uç profilinin belirlenmesi için daha önceden yapılmış çalışmalar incelenmiştir (Sharma 2020, Senthil 2022, Bozkurt 2012, Kumar vd. 2022). Çizelge 3.2’de belirlenen işlem parametreleri, Şekil 3.3’de karıştırıcı uç geometrisi, karıştırıcı uç batma derinliği ve omuz batma derinliği gösterilmiştir. Omuz çapı, 20 mm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2 SKK işlem parametreleri.

Kontrol Faktörü	Seviye			
	I	II	III	
Uç profili	Üçgen	Kare	Vida	mm
İlerleme hızı	20	40	60	mm/dk
Dönme hızı	1250	1750	2250	dev/dk



Şekil 3.3 Karıştırıcı uç geometrileri ve sabit işlem parametreleri.



Şekil 3.4 Kaynağı tamamlanmış ve lazer kesimi yapılmış çekme test numuneleri.

3.4 TAGUCHİ DENEYSEL TASARIM

Taguchi deneysel tasarım metodu, ürün kalitesini etkileyen parametreler ve bu parametrelerin seviyeleri için daha az sayıda deney planlaması sunarak, parametrelerin ürün kalitesine olan etki düzeylerinin ve istenilen ürün kalitesi için işlem parametrelerinin belirlenmesine imkan veren istatistiksel bir yöntemdir (Yalçın vd. 2017). Taguchi metodunun en önemli avantajı ürün geliştirmede sürecinde gerekli zamanı azaltması ve dolayısıyla maliyetleri düşürmesidir (Günay 2013). Taguchi metodunun uygulanmasında: 1- Ürün kalitesini etkileyen parametrelerin ve seviyelerinin belirlenmesi, 2- Uygun ortogonal serinin seçilmesi, 3- Deneylerin yapılması, 4. Deney sonucunda elde edilen verileri amaç fonksiyonu değerlerine göre sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürülmesi (S/N oranı olarak ifade edilen “en küçük en iyi, en büyük en iyi ve hedef değer en iyi” olmak üzere üç farklı fonksiyon bulunmaktadır), 5- S/N oranına göre

optimum parametrelerin belirlenmesi, 6- ANOVA analizi ile etki seviyelerinin belirlenmesi, 7- Doğrulama deneyinin yapılması olarak sıralanabilir.

Yapılan çalışmada, kontrol faktörü karıştırıcı uç geometrisi, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı olarak belirlenmiştir. Her faktör üç seviyeye sahiptir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Çizelge 3.2’de görülmektedir. Üç faktör ve her faktör için de üç seviye olduğu için L9 veya L27 ortogonal dizilerden birisinin seçilmesi uygundur. Bu durumda serbestlik derecesi hesaplanması gereklidir. Her faktörün serbestlik derecesi belirlenen seviyelerin bir eksiğidir (3-1=2). Serbestlik derecesinin toplamı altı olarak hesaplanır. Ortogonal dizi seçilirken serbestlik derecesine en yakın olanı seçilmelidir. Bu durumda en uygun ortogonal dizi L9 serisidir. Çizelge 3.3’de L9 ortogonal dizisi parametre/seviyelerinin yerleşimi ve çekme testi sonucunda elde edilen çekme gerilmeleri verilmiştir. Her bir faktörün kaynak dayanımına olan etkisinin analizi, Minitab 16.0 istatistik yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Taguchi yönteminde deneysel sonuçlar, istenen değerlerden kalitenin sapmasını ölçmek için kullanılan sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülür. S/N oranları hesaplanırken “En büyük en iyi” fonksiyonu (Denklem 3.1) kullanılmıştır:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.1)$$

Çizelge 3.3 L9 ortogonal dizisi ve parametrelerin yerleşimi.

Deney numarası	Uç profili	İlerleme hızı (mm/dk)	Dönme hızı (dev/dk)	Çekme mukavemeti (MPa)
1	Üçgen	20	1250	42.49
2	Üçgen	40	1750	33.75
3	Üçgen	60	2250	38.05
4	Kare	20	1750	46.97
5	Kare	40	2250	41.91
6	Kare	60	1250	42.87
7	Vida	20	2250	44.90
8	Vida	40	1250	25.84
9	Vida	60	1750	34.75

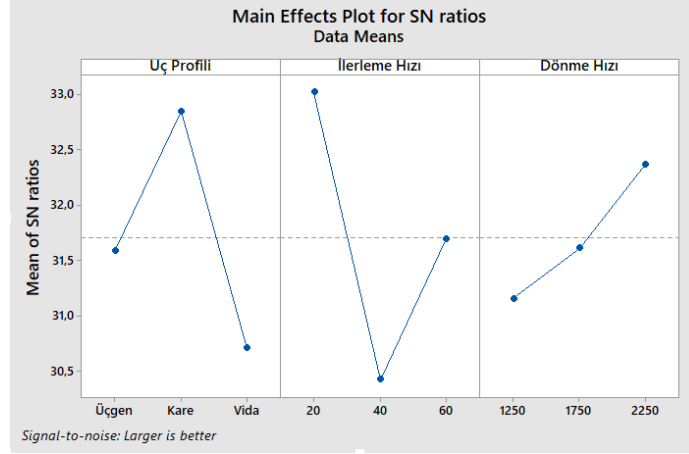
BÖLÜM 4

TARTIŞMA VE BULGULAR

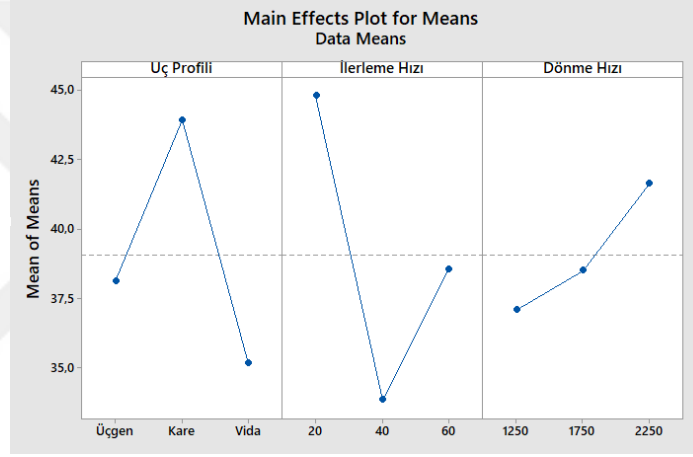
PLA-CF malzemelerin SKK metodu ile birleştirilmesinde işlem parametrelerinin kaynak dayanımına etkileri L9 ortogonal dizinine ve en büyük en iyi yaklaşımına göre değerlendirilmiştir.

4.1 S/N GÜRÜLTÜ ORANI

Kaynak dayanımına göre hesaplanan S/N oranları deney parametrelerine göre etki grafikleri Şekil 4.1’de, ortalama değerleri Şekil 4.2’de ve değişkenlere göre dağılımı ise Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de kontrol faktörlerinin seviye 1’den seviye 3’e değişimleri görülmektedir. Buradan en güçlü etkiye sahip kontrol faktörü seviyeler arasındaki farka göre belirlenmektedir. Daha yüksek fark, kontrol faktörünün veya iki kontrolün etkileşiminin ürün kontrolü üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu anlamına gelir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 incelendiğinde ortalama değer çizgisinin üstünde kalan değerler, sürtünme karıştırma kaynağında kaynak kalitesine etkisinin olduğu anlamına gelmektedir. PLA-CF plakaların birleştirilmesinde parametrelerin optimizasyonu için grafikler kullanıldığında karıştırıcı uç geometrisi için “kare uç”, takım ilerleme hızı için “20 mm/dk” ve takım dönme hızı “2250 dev/dk” olarak belirlenmiştir. Buna göre PLA-CF plakaların birleştirilmesinde en iyi kaynak mukavemeti için kare uç, 20 mm/dk ilerleme hızı ve 2250 dev/dk ($A_2B_1C_3$) parametreleri kullanılmalıdır.



Şekil 4.1 “Daha büyük daha iyidir” için S/N Oranları.



Şekil 4.2 “Daha büyük daha iyidir” için ortalama değerleri.

Çizelge 4.1 S/N oranı ve ortalama değerleri.

S/N Oranı				Ortalama			
Level	Uç Profili	İlerleme Hızı	Dönme Hızı	Level	Uç Profili	İlerleme Hızı	Dönme Hızı
1	31.58	33.02	31.15	1	38.10	44.79	37.07
2	32.84	30.42	31.61	2	43.92	33.83	38.49
3	30.70	31.69	32.37	3	35.16	38.56	41.62
Delta	2.14	2.60	1.21	Delta	8.75	10.95	4.55
Rank	2	1	3	Rank	2	1	3

Taguchi deney tasarımındaki son adım optimum deney parametreleri için doğrulama deneyinin yapılmasıdır. Doğrulama deneylerinin amacı, analiz aşamasında elde edilen tahminin deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmasıdır. Kontrol faktörlerinin ayrı ayrı etkileri dikkate

alındığında, Taguchi yöntemine göre $A_2B_1C_3$ için elde edilen kaynak kalitesi tahmin değeri ile kontrol deneyi sonucunda elde edilen değer Çizelge 4.2'de verilmiştir. Hata oranı %5.69 olarak belirlenmiştir. Sonuçların tutarlılığının ve tahminlerin doğruluğunun yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre Taguchi tahmin denklemi kullanılarak elde edilecek değerler %95 güven aralığında olacaktır.

Çizelge 4.2 Doğrulama testi sonucu.

	Optimum kontrol parametreleri		Hata Payı (%)
	Tahmin	Deneyisel	
Çekme Gerilmesi (MPa)	$A_2B_1C_3$ 52.20	$A_2B_1C_3$ 49.23	5.69

4.2 ANOVA ANALİZİ

Belirlenen faktörlerin kaynak kalitesi üzerindeki etki yüzdelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de P: anlamlılık düzeyini, SD: serbestlik derecesi, KT: kareler toplamı, KO: kareler ortalaması, F değerleri ve yüzde katkı oranları (PCR) görülmektedir. ANOVA tablosu incelendiğinde kaynak kalitesini en fazla etkileyen %51.21 ile takım ilerleme hızı, %33.68 ile takım uç profili ve son olarak takım dönme hızı %9.21 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.3 ANOVA sonuçları.

Faktör	SD	KT	Katkı Oranı	KT	KO	F	P
Uç Profili	2	119.10	33.68%	119.10	59.55	5.70	0.149
İlerleme Hızı	2	181.10	51.21%	181.10	90.55	8.67	0.103
Dönme Hızı	2	32.56	9.21%	32.56	16.28	1.56	0.391
Hata	2	20.89	5.91%	20.89	10.44		
Toplam	8	353.64	100.00%				

4.3 REGRASYON ANALİZİ

Regresyon analizi, kontrol faktörlerinin her bir kombinasyonu ile deneyseller sonucunda elde edilen bağımlı değişkeninin (kaynak mukavemeti) tahmin edilebilmesi için denklem türetmek için kullanılır. Çizelge 4.4'de oluşturulan denklemler verilmiştir. Karıştırıcı uç profillerinin seviyeleri belirlenirken “sözel” ifadeler kullanıldığı için doğrudan denklemlerin içinde yer alamamışlardır. Her karıştırıcı uç profili için ayrı bir denklem türetilmiştir. Çizelge 4.5'de, L9 serisinden rastgele seçilen deneysel sonuçlar ile tahmin denklemi sonuçları karşılaştırılmıştır. Çizelgeye göre hata oranlarının düşük olduğu ve tahminde yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.4 Kaynak mukavemetinin tahmini için oluşturulan denklemler.

Uç Profili			
Üçgen	Çekme Mukavemeti	=	$36.4 - 0.156 \text{ İlerleme Hızı} + 0.00455 \text{ Dönme Hızı}$
Kare	Çekme Mukavemeti	=	$42.2 - 0.156 \text{ İlerleme Hızı} + 0.00455 \text{ Dönme Hızı}$
Vida	Çekme Mukavemeti	=	$33.4 - 0.156 \text{ İlerleme Hızı} + 0.00455 \text{ Dönme Hızı}$

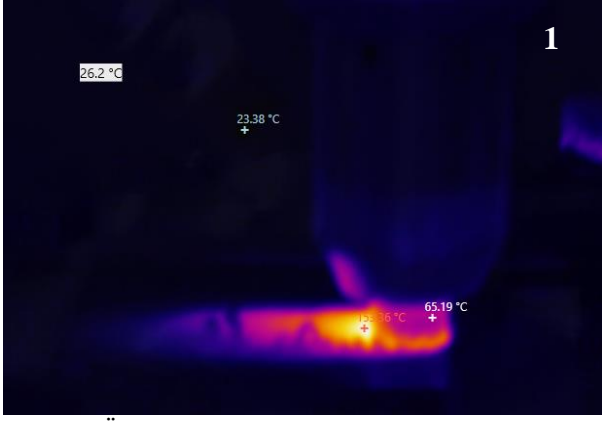
Çizelge 4.5. L9 ortogonal dizi tahmin ve deneysel sonuçlar.

Deney Numarası	Çekme mukavemeti (MPa)		Hata Oranı (%)
	Tahmin	DeneySEL	
1	41.83	42.49	1.55
2	32.30	33.75	4.3
3	40.15	38.05	5.23
4	49,07	46.97	4.28
5	41.25	41.91	1.57
6	41.42	42.87	3.38
7	43.45	44.90	2.56
8	27.94	25.84	7.52
9	34.09	34.75	1.9

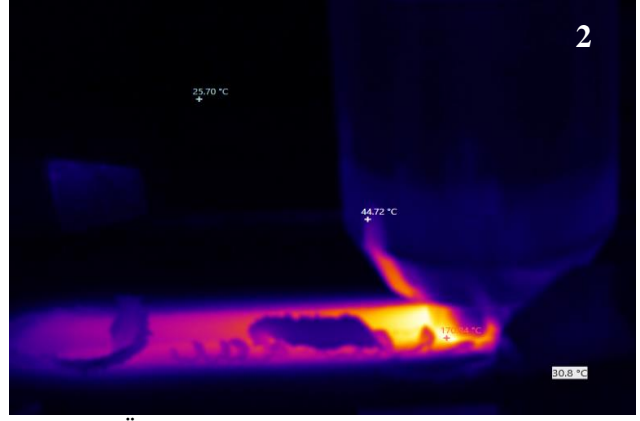
4.4 SICAKLIK ÖLÇÜMLERİ

Kaynak sırasında ısı görüntüleri alınmıştır, alınan ısı görüntüleri Şekil 4.3’de verilmiştir. Oluşan ısı değerleri karşılaştırıldığında en fazla ısı 197.84 °C ile karıştırıcı uç profili kare, takım ilerleme hızı 40 mm/dk ve takım dönme hızı 2250 dev/dk parametrelerinde elde edilmiştir. SKK sırasında ortaya çıkan ısı, kaynak bölgesinin plastikleşmesinde ve malzeme akışında önemli bir rol oynamaktadır. Karıştırıcı uç geometrisi, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızının ısı oluşumunda etkileri bulunmaktadır. Şekil 4.3’deki ilk üç deney sonuçları incelendiğinde takım dönme hızı ile birlikte sürtünme artacağından ortaya çıkan ısının arttığı (sırasıyla 153.36 °C, 170.24 °C ve 186.75 °C) görülmektedir.

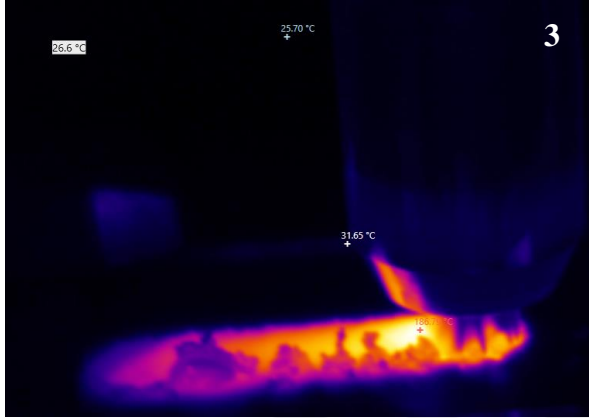
Karıştırıcı uç profiline göre SKK sırasında ortaya çıkan ısı değerlendirdiğinde üçgen uçla yapılan deneylerde 153.36 °C, 170.24 °C ve 186.75 °C (1, 2 ve 3 numaralı deneyler), kare uçla yapılan deneylerde 195.16 °C, 197.84 °C ve 178.06 °C (4, 5 ve 6 numaralı deneyler) ve vida uçla yapılan deneylerde 182.81 °C, 171.3 °C ve 185.7 °C (7, 8 ve 9 numaralı deneyler) ortaya çıkmıştır. Buna göre kare karıştırıcı ucun ısı oluşumunda daha etkili olduğu söylenebilir. SKK sırasında ortaya çıkan ısının, uç profiline göre değişmesi uç profilinin etkisini doğrulamaktadır.



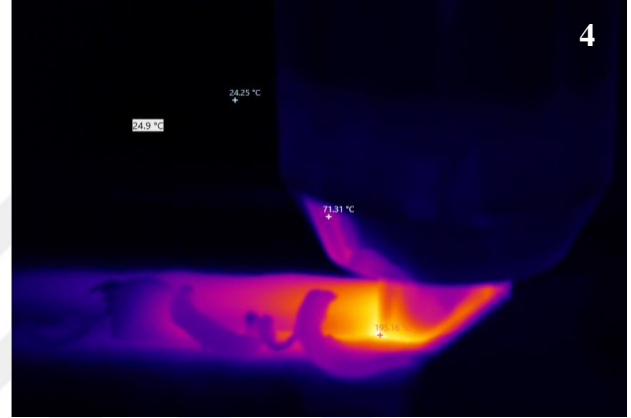
Üçgen uç, 20 mm/dak ve 1250 dev/dk
Max sıcaklık: 153.36 °C



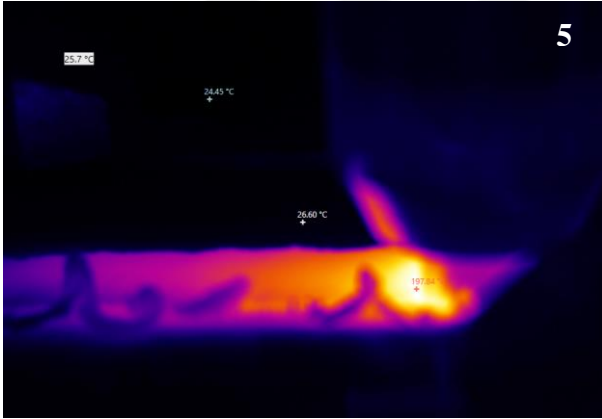
Üçgen uç, 40 mm/dak ve 1750 dev/dk
Max sıcaklık: 170.24 °C



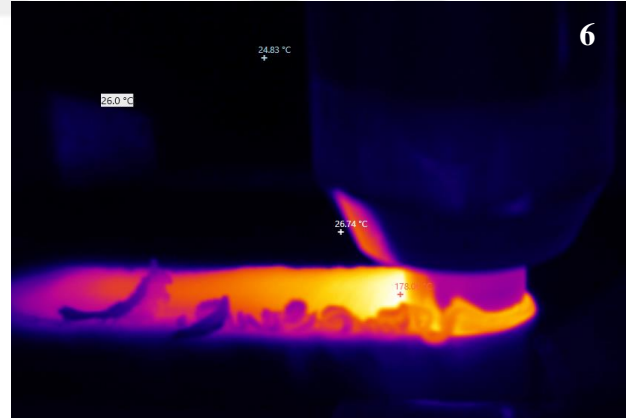
Üçgen uç, 60 mm/dak ve 2250 dev/dk
Max sıcaklık: 186.75 °C



Kare uç, 20 mm/dak ve 1750 dev/dk
Max sıcaklık: 195.16 °C



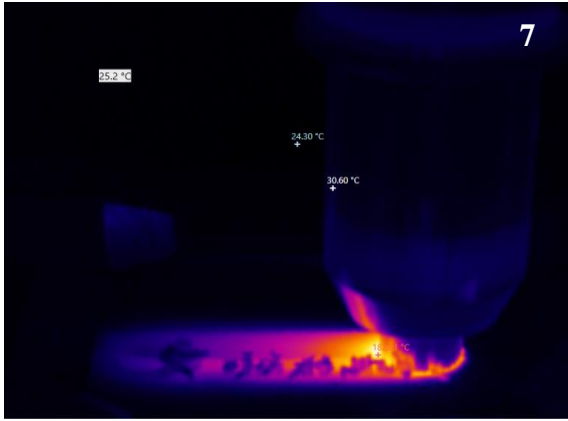
Kare uç, 40 mm/dak ve 2250 dev/dk
Max sıcaklık: 197.84 °C



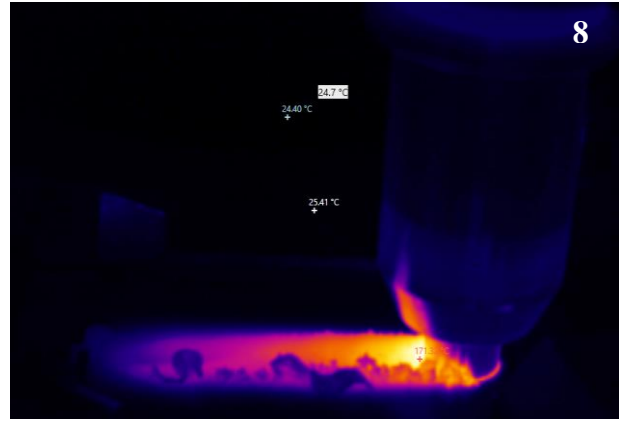
Kare uç, 60 mm/dak ve 1250 dev/dk
Max sıcaklık: 178.06 °C

Şekil 4.3 SKK sırasında ısı ölçüm görüntüleri.

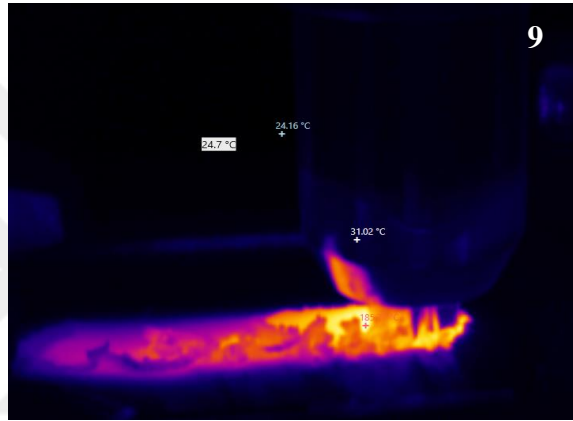
Şekil 4.3 (devam ediyor)



Vida uç, 20 mm/dak ve 2250 dev/dk
Max sıcaklık: 182.81 °C



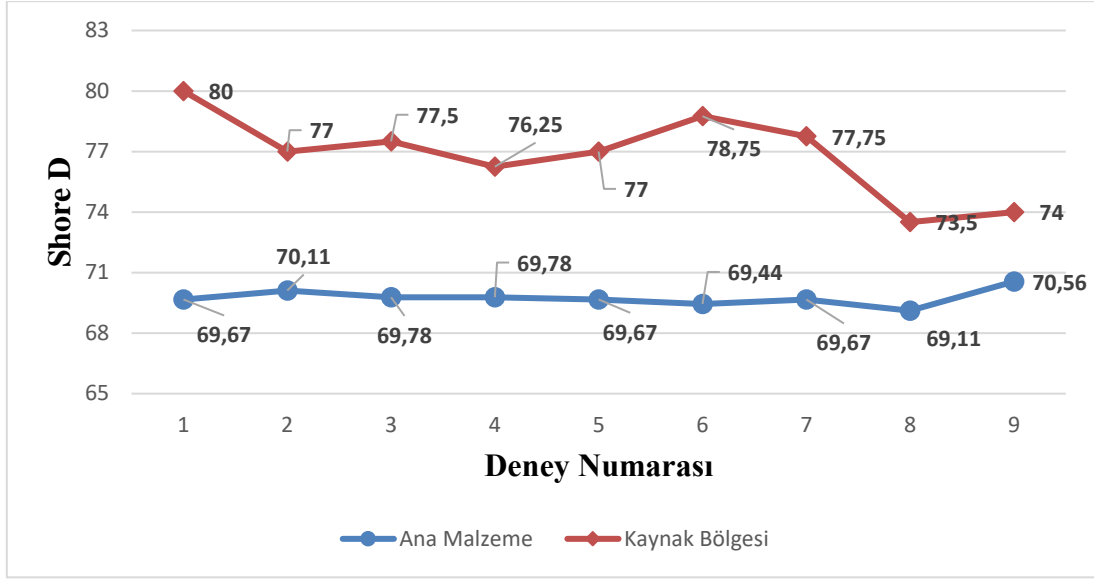
Vida uç, 40 mm/dak ve 1250 dev/dk
Max sıcaklık 171.3 °C



Vida uç, 60 mm/dk ve 1750 dev/dk
Max sıcaklık: 185.7 °C

4.5 SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Şekil 4.4’de tüm numunelerin (9 adet) iki farklı bölgesinden alınan sertlik değerleri verilmiştir. Birinci bölge olarak kaynaktan etkilenmeyen ve PLA-CF’nin sertliğini temsil eden noktalar seçilmiştir. İkinci bölge için kaynak sırasında oluşan ısıdan etkilenen noktalardan sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler beş tekrarlı yapılarak ortalamaları alınmıştır. PLA-CF’yi temsil eden (ana malzeme) bölgelerdeki sertlik değerleri 69.67 ve 70.56 Shore D arasında çıkmıştır. Bu bölgelerdeki değerlerin kendi arasında istikrarlı olduğu Şekil 4.4’de görülmektedir. Kaynak bölgesine yakın yerlerden alınan sertlikler incelendiğinde ise değerlerin ana malzemeye göre yüksek çıktığı belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Shore D sertlik değerleri.



BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, %100 doluluk oranında ve 0.2 katman kalınlığında PLA-CF plakaların SKK yöntemi ile birleştirilebilirlikleri incelenmiştir. SKK işlem parametresi olarak üçgen, kare ve vida profilli karıştırıcı uç, 20, 40 ve 60 mm/dk takım ilerleme hızı ve 1250, 1750 ve 2250 dev/dk takım dönme hızı kullanılmıştır. Parametrelerin kaynak kalitesine olan etkilerini belirlemek için Taguchi L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Sinyal-gürültü (S/N) oranı yaklaşımı, varyans analizi (ANOVA) ve Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak kaynak kalitesinin optimizasyonu için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- İstatistiksel sonuçlar (%99,5 güven düzeyinde) karıştırıcı uç profili (A), ilerleme hızı (B) ve takım dönme hızının (C) sırasıyla %33.68, %51.21 ve %9.21 yüzde oranlarında etkilediği belirlenmiştir.
- PLA-CF plakaların birleştirilmesinde en etkili faktörün %51.21 ile takım ilerleme hızı olduğu görülmektedir. SKK işlemi sırasında ortaya çıkan ısı, kaynak bölgesinin plastikleşmesinde ve malzeme akışında önemli rol oynamaktadır. Takım ilerleme hızınının düşük olması aşırı plastikleşmeye sebep olurken, ilerlemenin yavaş olması ise gerekli ısının oluşumunu olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı parametrelerin optimizasyonu kaynak kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.
- Optimum kaynak kalitesi için A2B1C3 (uç profili: kare, ilerleme hızı 20 mm/dk ve takım dönme hızı 2250 dev/dk) parametreleri önerilmiştir. Doğrulama değeri sonucunda tahmin edilen kaynak kalitesi değeri ile doğrulama deneylerinden elde edilen kaynak kalitesi değerleri arasındaki farkın %5.69 olduğu belirlenmiştir.
- Sertlik sonuçları, ana malzemeye kıyasla kaynak bölgesinde sıcaklığın etkisi ile sertliğin arttığını göstermiştir.
- SKK sırasında belirlenen ısı değerlerine göre en fazla ısı 197.84 °C ile karıştırıcı uç profili kare, takım ilerleme hızı 40 mm/dk ve takım dönme hızı 2250 dev/dk parametrelerinde elde edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Bhardwaj N, Narayanan R G, Dixit U and Hashmi M R** (2019) developments in friction stir welding and resulting industrial practices. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 5 (3): 461-96.
- Bilici M K** (2022). Investigation of the effects of welding variables on the welding defects of the friction stir welded high density polyethylene sheets. *Journal of Elastomers & Plastics*. 54 (3): 457-76.
- Bozkurt Y** (2012) The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. *Materials & Design*, 35: 440-5.
- Çevik B** (2014) Polimer Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2 (2): 271-7.
- Chiulan I and Frone A N** (2018) *Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters: Bioengineering 2018*, 5 (2):
- Günay M** (2013) A1s1 316l Çeliğinin İşlenmesinde Takım Radyüsü Ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 28 (3):
- Hovanski Y Upadhyay P, Carsley J, Luzanski T, Carlson B, Eisenmenger M** (2015) High-Speed Friction-Stir Welding to Enable Aluminum Tailor-Welded Blanks. *Jom*. 2015; 67 (5):1045-53.
- Joost W J** (2012) Reducing vehicle weight and improving US energy efficiency using integrated computational materials engineering. *Jom*. 64: 1032-1038.
- Karagöz İ** (2014) Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri. İstanbul: Marmara Üniversitesi
- 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*.
- Kumar R and Singh R** (2020) Repair of automotive bumpers and bars with modified friction stir welding, *J. Cent. South Univ.*: 27: 2239–2248.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kumar R, Ranjan N, Kumar V, Kumar R, Chohan J S and Yadav A** (2022) Characterization of friction stir-welded polylactic acid/aluminum composite primed through fused filament fabrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 31 (3): 2391-409.
- Lee J and An J** (2017) *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*: Elsevier. pp. 2352-9407
- 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
- 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.
- Mishra R S and Ma Z Y** (2005) *Friction stir welding and processing*, *Mater. Sci. Eng. R Reports*, 50 (1–2): 1–78.
- Mishra R S and Sidhar H** (2017) içinde *Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys*, Elsevier, pp.1–13.
- 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.
- Raouache E, Boumerzoug Z, Rajakumar S and Khalfallah F** (2018) *Effect of FSW process parameters on strength and peak temperature for joining high-density polyethylene (HDPE) sheets*. *Revue des Composites et des Materiaux Avances*. 28 (2): 149.
- Saeedy S and Besharati Givi M** (2010) Experimental application of friction stir welding (FSW) on thermo plastic medium density polyethylene blanks. *Engineering Systems Design and Analysis*. p. 841-4.
- 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): 9.
- Sharma A K R, Roy Choudhury M and Debnath K** (2020) *Experimental investigation of friction stir welding of PLA*. *Welding in the World*. 64 (6):1011-21.
- Ülker A and Ayaz A** (2020). *Optimization of process parameters of friction stir spot welding of polycarbonate sheets and morphological analysis*: *Materialwiss. Werkstofftech*. 51, 1640–1652.
- Vilaça P and Thomas W** (2011) *Friction Stir Welding Technology*, 2011, pp. 85–124.
- Xue Y, Zhao H and Zhang Y** (2021) *Design and multi-objective optimization of the bumper beams prepared in long glass fiberreinforced polypropylene*. *Polym Compos*.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Yalçın N, Kayır Y and Erkan L S (2017) AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma yöntemlerinin işlenebilirliğe etkisinin taguchi ve anova ile araştırılması. *Politeknik Dergisi*. 20 (4): 743-51.

Zhang Y N, Cao X, Larose S and Wanjara P (2012) Review of tools for friction stir welding and processing, *Can. Metall. Q.*, 51 (3): 250–261.





ÖZGEÇMİŞ

İbrahim İNCEDAL, ilk, orta öğrenimimi Kırıkkale' de lise öğrenimimi Ankara'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. 2021 yılında girdiği Bülent Ecevit Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği alanında yüksek lisans tezini tamamladı. 2011- 2013 yıllarında Çankırı' da Saygınlar Ticaret ve Sim yapı Mühendislik firmalarında Doğalgaz sektöründe Proje Mühendisi olarak çalıştı. 2014 yılında Zonguldak' da Türkiye Taşkömürü Kurumunda Mühendis olarak çalışmaya başladı. 2021 yılında Başmühendis Pozisyonuna yükseldi ve halen Kurumda çalışmaya devam etmektedir. 2020 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına başlamış olup halen devam etmektedir.