EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN TERMOPLASTİK PARÇALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRME PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Şehmus GÜDEN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN TERMOPLASTİK PARÇALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRME PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Şehmus GÜDEN

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN TERMOPLASTİK PARÇALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRME PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Şehmus GÜDEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Küresel ısınmanın insan hayatını gittikçe tehdit etmeye başladığı son yıllarda, endüstride kullanılan tüm malzeme ve proseslerde olduğu gibi çevreye zarar vermeyen kaynak yöntemleri kullanmak önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalara göre Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) da çevreci bir kaynak türüdür. Aynı zamanda kaynak sırasında kaynaktan etkilenen bölgeyi en az etkilediğinden kaynak mukavemeti yüksektir. Bunun yanında ucuz ulaşılabilir ve farklı malzemelerin kaynağı gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda gittikçe SKK ile ilgili araştırmalar artmıştır. Araştırmalar genelde metal malzemelerin kaynağı, kompozit malzemelerin kaynağı ve termoplastik malzemelerin kaynağı üzerinde yoğunlaşmıştır.

Otomotiv sektöründe, proje aşamalarında Ar-Ge birimlerinde tasarlanan yeni bir parçanın seri üretime geçmeden araç üzerinde görülmesi ve test edilmesi gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerde seri üretim olmayacak tekil bir parçayı üretmek fazla zaman almakta ve çok yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Bu tür prototip (ilk örnek) parçaları üretmek için katmanlı üretim (eklemeli imalat) yöntemleri geliştirilmiştir. Otomotiv sektöründe eklemeli imalat ile üretilmiş prototip parçalarda en çok termoplastik malzemeler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ABS M30 malzemesinden eklemeli imalatla üretilen parçaların sürtünme karıştırma kaynağının kaynak parametreleri araştırılmıştır. Deney parametrelerinin oluşturulması için öncü deneysel çalışmalar yapılmış ve kaynak için parametre aralığı bulunmuştur. Daha sonra taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan deneysel çalışma ile eklemeli imalatla üretilen parçaların SKK ile birleştirmede en yüksek mukavemet değerleri, takım dönme hızı 800 devir/dk, ilerleme 10 mm/dk ve takım omuz çapının 16 mm olduğu durumda ulaşılmıştır. Deneyler sonucunda kaynak bölgesinin mekanik değerleri değerlendirilmiş ve görsel olarak da mikroskopla incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Sürtünme karıştırma kaynağı, Termoplastik, Taguchi metodu, Optimizasyon
2022, XV + 89 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE WELD ZONE AND MECHANICAL PERFORMANCE OF THERMOPLASTIC PARTS WHICH PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING AND WELDED BY FRICTION STIR WELDING

Şehmus GÜDEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

In recent years, when global warming has begun to threaten human life, it is important to use welding methods that do not harm the environment, as in all materials and processes used in the industry. According to the researches, Friction Stir Welding (FSW) is also an environmentally friendly type of welding. At the same time, the welding strength is high since it affects the area affected by the weld the least during welding. In addition, due to its benefits, such as being cheaply, accessible and welding different materials with each other, researches on FSW have been increasing in recent years. Research has generally focused on welding metal materials with each other, welding composite materials and welding thermoplastic materials with each other.

In the automotive sector, during the project stages, designed new part in the R&D units must be seen and tested on the vehicle before it goes into mass production. Producing a single part with traditional methods took too much time and caused very high costs that would not be mass-produced. Additive manufacturing (additive manufacturing) methods have been developed to produce such this prototype parts. İn the automotive industry thermoplastic materials are mostly used in the prototyping phase with additive manufacturing.

In this study, the joining of parts produced by additive manufacturing from ABS M30 material with friction stir welding was investigated. Pioneer experimental studies were carried out to find the experimental parameters and the parameter range for welding was found. Then, the experimental design was made using the taguchi L9 orthogonal method array. when tool shoulder diameter was 16 mm, tool rotation speed was 800 rpm and feed rate was 10mm/min maximum stress obtained from welding of the samples produced by additive manufacturing with friction stir welding. End of the experiments, the mechanical values of the weld zone were measured and their behavior was examined via optical microscope.

Key words: Additive manufacturing, Friction stir welding, Thermoplastic, Taguchi Method, Optimization
2022, XV + 89 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile çalışmalarımı yönlendiren çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Murat Yazıcı'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmasının başlamasında destekleri, motivasyonları ve deneylerin yapılmasında verdikleri değerli destekleri için TOFAŞ Ar-Ge Entegrasyon bölümü yöneticisi Sayın Çağrı Mikdan ve Mimari entegrasyon kısım yöneticim Özgür Şentürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmaya katkıda bulunup desteğini esirgemeyen değerli meslektaşım Cemil Işılak'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma için FDM ile parçaların üretiminde destek olan ve eklemeli imalatla ilgili bilgi birikimini benimle paylaşan Gonca Ünal'a ve deneylerin yapım aşamasında desteklerini esirgemeyen TOFAŞ Ar-Ge prototip atölyesinin kıymetli çalışanları Orhan Çetkin, Sinan İyigün ve Hüseyin Yazıcı'ya teşekkürlerimi sunarım.

TOFAŞ Ar-Ge malzeme laboratuvarında testlerin yapılmasında desteklerini esirgemeyen Sayın Halil İbrahim Okar'a teşekkürlerimi sunarım.

Özel olarak beni bu ana kadar maddi manevi destekleyen, motivasyonumu yükselten babam Emin Güden'e ve annem Emine Güden'e bu çalışmayı ithaf eder ve şükranlarımı sunarım.

Şehmus GÜDEN
29/08/2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ x
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1 Polimerler 6
2.2 Termoplastikler 8
2.3 Camsı Geçiş Sıcaklığı (T_g) ve Kristal erime Sıcaklığı (T_e) 8
2.2 Eklemeli İmalat 9
2.3 FDM Tekniği 12
2.4 Polimerlerin Birleştirilme Yöntemleri 13
2.5 Termoplastik Malzemelerin Kaynak Yöntemleri 14
2.6 Termoplastik Kaynak Yöntemlerinin Verimliliğinin Karşılaştırılması 15
2.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) 15
2.8 SKK Kaynak Bölgesine Takım Uç Tasarımının Etkisi 18
2.9 SKK İle Termoplastik Malzemelerin Kaynağı 20
2.10 Taguchi Metodu 22
3. MATERYAL VE YÖNTEM 24
3.1. Deneysel Çalışmanın Parametre Tasarımı (Taguchi Metodu) 24
3.2 FDM İle Plaka Üretimi 25
3.2.1 Çekme çubuğu geometrisi 25
3.2.2 Plaka geometrisi 26
3.2.3 Stratasys fortus 400 MC katmanlı üretim cihazı 27
3.2.4 Plaka üretimi (ABS M30) 29
3.3 Takım Ucu üretimi 32
3.3.1 Üniversal torna 32
3.3.2 Takım malzemesi 32
3.3.3 Takım tasarımı 32
3.4 Freze Tezgâhı 34
3.5 Parça Sabitleme Kalıbı 34
3.6 ABS M30 Plakaların CNC Dik İşlem Merkezinin Tablasına Sabitlenmesi 35
3.7 SKK İle Plakaların Birleştirilme İşlemi 36
3.8 ABS M30 Malzemesinin Teknik Özellikleri 37
3.9 SKK İle Birleştirilmiş Parçalar 38
3.10 Çekme Numunelerin Su Jeti İle Kesimi 39
3.11 Kaynak Bölgesinin İncelenmesi İçin Yapılan Testler ve Kullanılan Cihazlar 41
3.11.1 Çekme testi için üniversal çekme cihazı 41
3.11.2 Numunenin görüntülenmesi için (Optik Mikroskop) 43

3.11.3 Numunenin görüntülenmesi için yüzeylerin hazırlanması (Zımparalama).....43
3.11.4 Yoğunluk terazisi 44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
4.1 FDM Eklemeli İmalata Ait Bulgular.....45
4.1.1 3B cihazının kalibrasyonu.....45
4.1.2 Tabla sıcaklığı ve ortam sıcaklığı 45
4.1.3 Model malzemesi ve destek malzemesi 45
4.2 Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi 46
4.2.1 Takım dönme yönü 47
4.2.2 Takım dönme ve ilerleme hızı.....49
4.3 Kaynak Bölgesinin Optik Mikroskop İle İncelenmesi.....52
4.3.1 Kaynak bölgesinde tünel hatası.....52
4.4 Çekme Testinin Sonuçlarının İncelenmesi 53
4.5 Kopma Bölgesinin İncelenmesi 58
4.5.1 Kaynak yapılmamış ABS M30 malzeme numunesi 58
4.5.2 Deney 1'in incelenmesi:.....60
4.5.3 Deney 2'in incelenmesi:.....62
4.5.4 Deney 3'ün incelenmesi:.....63
4.5.5 Deney 4'ün incelenmesi:.....65
4.5.6 Deney 5'in incelenmesi:.....67
4.5.7 Deney 6'nın incelenmesi:.....69
4.5.8 Deney 7'nin incelenmesi:.....71
4.5.9 Deney 8'in incelenmesi:.....73
4.5.10 Deney 9'un incelenmesi:.....75
4.6 Kaynak İle Ana Plastik Alanlarının Yoğunluklarının Karşılaştırılması 77
5. SONUÇ 79
KAYNAKLAR 82

EKLER 85
EK 1 Polimerlerin Birleştirme Yöntemleri 86
EK 2 Deney parametreleri, Çekme sonuçları, Gerilme-% uzama grafiği.....87
EK 3 Çekme Testinden Sonra Deneylerin Kopulmuş Hali.....88
ÖZGEÇMİŞ 89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
3B	üç boyutlu
C	Karbon
g/cm^3	Yoğunluk birimi (gram/santimetre küp)
H	Hidrojen
Hz	Hertz
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
N/mm^2	Gerilme birimi (Newton/milimetre kare)
ºC	Santigrat derece
T_e	Kristal erime sıcaklığı
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
X	1 kat büyütme (50X, 50 kat büyütme)

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
ASA	Akrilonitril stiren akrilat
BMD	Rod (çubuk) ile üretim
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CAM	Bilgisayar destekli üretim
FDM	Kaynaşmış biriktirme modelleme
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HIPS	Yüksek etkili polistiren
PA	Poliamid (Nylon)
PC	Polikarbon
PEEK	Polieter eter keton
PEI	Polieterimid
PLA	Poliaktik asit
PP	Polipropilen
PTFE	Politetrafloretilen
PVC	Polivinil klorür
PVDF	Polivinilidenflorit
SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SLA	Stereolitografi
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
TPU	Termoplasitk poliüretan
UHMWPE	Çok yüsek moleküler ağırlıklı polietilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Eklemeli imalat (a) Yıllara bağlı olarak eklemeli imalat hakkında yayınlanan makale sayısı. (b) Ülkelere göre eklemeli imalat hakkında patent dağılımı (Alghamdi ve John, 2021). 3
Şekil 2.1. Monomer ve polimerin şematik gösterimi 6
Şekil 2.2. Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve kristal erime sıcaklığı (T_e) grafiği (Saçak, 2012). 9
Şekil 2.3. Eklemeli imalat süreçlerinin ISO/ASTM 529000:2015'e göre sınıflandırılması (Lee ve An, 2017). 10
Şekil 2.4. Polimer malzemeler için kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinin şematik gösterimi a) Polijet baskı; (b) Stereolitografi (SLA); (c) Doğrudan hafif işleme (DLP); (d) Seçici lazer sinterleme (SLS); (e) Kaynaşmış biriktirme modelleme (FDM); (f) Lamine nesne imalatı (LOM); (g) Seçici biriktirme modellemesi (SDM) (Alghamdi ve John, 2021). 12
Şekil 2.5. FDM'de malzemenin ekstrüzyonu (Chiulan ve Frone, 2018). 13
Şekil 2.6. Polimerlerin birleştirme yöntemleri (Karagöz, 2014). 14
Şekil 2.7. Genel sürtünme karıştırma kaynağı fazları (Nath ve diğerleri, 2022). 16
Şekil 2.8. SKK prosesi (Karagöz, 2014). 17
Şekil 2.9. SKK kaynak bölgesi mikro yapısının şematik gösterimi, (a) A- Isıdan etkilenmeyen bölge, (b) B- Isının etkisi altında kalan bölge, (c) C- Termomekanik olarak etkilenen bölge, (d) D- Yeniden kristalleşmiş bölge (Karagöz, 2014). 18
Şekil 2.10. SKK 'da takım uçları TC: diş açılmış silindirik, S: kare, T: Üçgen, SC: düz silindirik uc (Hajideh ve Alavi, 2017). 18
Şekil 3.1. Çekme çubuğu numune geometrisi 25
Şekil 3.2. Üretilmiş plaka geometrisi 26
Şekil 3.3. Fortus 400 MC katmanlı üretim cihazı 27
Şekil 3.4. Fortus 400 MC cihazı üretim tablası 27
Şekil 3.5. Fortus 400 MC cihazının detaylı gösterimi (a) Kartuş yerleştirme bölgesi detaylı gösterimi, (b) Saklama alanı. 28
Şekil 3.6. Fortus 400 MC cihazının uç yapısı. 29
Şekil 3.7. Baskı açısı 135ºolan baskı yapısının ön görüntülemesi (a) üstten görüntüsü, (b) alttan görüntüsü. 30
Şekil 3.8. Insight 13.7 yazılımında plaka üretimi yapılırken kullanılan özellikler. .30
Şekil 3.9. Katmanlı üretim eksenleri (a) Fortus 400 MC eksenlerinin gösterimi (b) Eksenel gösterim. 31
Şekil 3.10. Üretilmiş nihai plakalar. 31
Şekil 3.11. ZMM Bulgaria CU500. 32
Şekil 3.12. Silindirik St37 çeliği. 32
Şekil 3.13. Deneysel çalışmada kullanılan takımların teknik resimleri Omuz çapı 16 mm , (b) Omuz çapı 20 mm, (c) Omuz çapı 24 mm. 33
Şekil 3.14. Deneysel çalışmada kullanılan takımlar Omuz çapı 16 mm , (b) Omuz çapı 20 mm, (c) Omuz çapı 24 mm 33
Şekil 3.15. Mazak VTC 300C II üç eksen CNC dik işleme merkezinde. 34
Şekil 3.16. Sabitleme kalıbının yapım resmi. 35
Şekil 3.17. Sabitleme kalıbının CNC dik işleme merkezinde işlenmesi. 35

Şekil 3.18. Plakaların kalıp ve pabuçlar yardımı ile CNC dik işleme merkezinin tablasına sabitlenmesi. 36
Şekil 3.19. Takımın frezeye bağlanması. 36
Şekil 3.20. SKK'nın yapılışı 37
Şekil 3.21. ABS'nin Kimyasal yapısı (Karki ve Turku, 2018). 38
Şekil 3.22. Katmanlı imalatla üretilmiş ve SKK ile birleştirilmiş bir çift plaka (a) Numune tablaya bağlı iken, (b) Numune tabladan çıkartıldıktan sonra. 39
Şekil 3.23. Numunelerin kesimi (a) Su jeti ile kesim prensibi, (b) Su jeti ile kesme. 40
Şekil 3.24. SKK ile birleştirilmiş ve su jeti ile kesilmiş plakalar. 41
Şekil 3.25. Çekme testi için kullanılan çekme cihazı (Zwick roell Z010). 42
Şekil 3.26. Çekme testi için kullanılan uzunluk değişim ölçüm cihazı (Ekstansometre)..... 42
Şekil 3.27. Zeiss 50X stereoskop görüntü büyütme cihazı 43
Şekil 3.28. P400, P800 veP1500 zımpara kağıtları..... 43
Şekil 3.29. Zımpara yapılmış örnek ABS M30 kaynak yüzeyi..... 44
Şekil 3.30. Yoğunluk Ölçümü (a) Yoğunluk terazisi, (b) FDM numunesi ölçümü, (c) Kaynak parçası numune ölçümü..... 44
Şekil 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan model ve destek malzemesi..... 46
Şekil 4.2. Saat ibresi yönünde kaynak sonuçları (a) Düşük hızlarda yapılan kaynak (b), Yüksek hızlarda yapılan kaynak. 48
Şekil 4.3. Vida yapısı (a) M5 sağ vida helis, (b) Saat ibresi yönü, (c) Saat ibresi yönün tersi. 48
Şekil 4.4. Takım dönme yönü saat yönün tersine alındığında kaynak sonucu 49
Şekil 4.5. Takım dönme hızının artması ile kaynak alanının genişlemesi ve başarısız bir kaynak deneyi (Devir 1500 dev/dk ilerleme 25 mm/dk, Omuz çapı 16 mm). 50
Şekil 4.6. Kaynak için ideal parametrelerin bulunması için kullanılan yöntem. 51
Şekil 4.7. SKK kaynak bölgesi mikroyapısının şematik gösterimi, (a) Deneysel çalışma sonucu elde edilen kaynak bölgesi görüntüsü, (b) Literatürde bulunan SKK kaynak bölgesi incelemesi (A- Isıdan etkilenmeyen bölge, B- Isının etkisi altında kalan bölge, C- Termomekanik olarak etkilenen bölge, D- Yeniden kristalleşmiş bölge) (Karagöz, 2014). 52
Şekil 4.8. SKK kaynak bölgesi mikroyapısından tünel etkisi, (a) 1250 d/dk, 20 mm/s, 16 mm, (b) 1200 d/dk, 10 mm/s, 24 mm..... 53
Şekil 4.9. SKK ile kaynatılmış çekme testi deney numuneleri..... 54
Şekil 4.10. SKK ile kaynak yapılmamış ABS M30 çekme testi deney numuneleri. 54
Şekil 4.11. Çekme numunelerinin Zwick roell Z010 ile çekildikten sonra kopulmuş hali..... 55
Şekil 4.12. SKK'ı ile birleştirilmiş ABS M30 numunelerin, çekme sonucu Gerilme -% Uzama grafiği. 56
Şekil 4.13. Ana etki grafiği. 57
Şekil 4.14. Ekelemeli üretimde XY yönünde baskı yapılıp, aynı yönde çekme testine tabi tutulmuş kaynak yapılmamış ABS M30 numunenin gerilme-yüzde uzama grafiği..... 58
Şekil 4.15. ABS M30 malzemesinden FDM eklemeli imalat yöntemi ile

	üretilmiş ve kaynak yapılmamış numuneler. (a) Çekme testi uygulanmamış numune, (b) Çekme testi sonucu kopmuş numune.	59
Şekil 4.16.	Kaynak yapılmamış numunenin kopma davranışı (a) kopma bölgesi üstten görüntüsü, (b)kopma bölgesi yandan görüntüsü, (c) kopma bölgelerinin alın görüntüsü, (d) Alın bölgesine detaylı görünüşü.	60
Şekil 4.17.	Deney 1'in gerilme-yüzde uzama grafiği.	60
Şekil 4.18.	Deney 1 numunesinin mikroskop ile incelenmesi.(a) Numunenin üstten genel görüntüsü (X10) , (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	61
Şekil 4.19.	Deney 2'nin gerilme-yüzde uzama grafiği.	62
Şekil 4.20.	Deney 2'nin mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir resmi, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	63
Şekil 4.21.	Deney 3'ün Gerilme-Yüzde Uzama grafiği	64
Şekil 4.22.	Deney 3'ün mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir resmi, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	65
Şekil 4.23.	Deney 4'ün gerilme-yüzde uzama grafiği	66
Şekil 4.24.	Deney'ün 4 mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir resmi, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	67
Şekil 4.25.	Deney 5 gerilme-yüzde uzama grafiği	68
Şekil 4.26.	Deney 5'in mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	69
Şekil 4.27.	Deney 6'nın gerilme-yüzde uzama grafiği	70
Şekil 4.28.	Deney 6'nın mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	71
Şekil 4.29.	Deney 7 gerilme-yüzde uzama grafiği	72
Şekil 4.30.	Deney 7'nin mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.	73
Şekil 4.31.	Deney 8'in gerilme-yüzde uzama grafiği	74
Şekil 4.32.	Deney 8'in mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü	75
Şekil 4.33	Deney 9'un gerilme-yüzde uzama grafiği	76

Şekil 4.34. Deney 9'un mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü. 77
Şekil 4.35. SKK kaynak bölgesi kesiti A) Ana parça, B) Kaynak bölgesi 78
Şekil 4.36. SKK bölgesi ve ABS M30 katmanlı üretim parçası yoğunluk ölçümü kaynak bölgesi yoğunluğu, b) Katmanlı üretim malzeme yoğunluğu c) Filament yoğunluğu 78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1.	3B yazıcılarla ilgili tarihsel gelişmeler (Alghamdi ve John, 2021).	2
Çizelge 1.2.	Termoplastik malzemelerin birleştirme yöntemlerinin karşılaştırılmalı tablosu (Gao ve Cui, 2017).	4
Çizelge 2.1.	Polimerlerin sınıflandırılması (Karagöz, 2014).	7
Çizelge 2.2.	Termoplastiklerin birleştirme yöntemleri (Karagöz, 2014).	14
Çizelge 2.3.	Termoplastiklerin birleştirme yöntemlerinin verimliliklerinin karşılaştırılması (Gao ve Cui, 2017).	15
Çizelge 2.4.	SKK ‘da takım uçları ile yapılan deney sonuçları (Hajideh ve Alavi, 2017).	19
Çizelge 2.5.	Sektörde en çok kullanılan termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Gao ve Cui, 2017).	21
Çizelge 3.1.	Deneysel çalışma için seçilen değişkenler ve seviyeleri.....	24
Çizelge 3.2.	Taguchi metodu L9 ortogonal dizi ile belirlenen deney değerleri	24
Çizelge 3.3.	Kullanılan cihazın tabla ölçüleri.	28
Çizelge 4.1.	Taguchi metodu ile belirlenmiş ilk deney parametreleri	47
Çizelge 4.2.	ABS M30 için kaynak yapılabilen parametre aralığı.....	51
Çizelge 4.3.	Taguchi metodu L9 ortogonal dizisi ile belirlenen deney değerleri ...	53
Çizelge 4.4.	ABS M30 SSK Çekme deneyi sonuçları	55
Çizelge 4.5.	SKK için ortalama yanıt tablosu.	57
Çizelge 4.6.	Deney 1’in değerleri	60
Çizelge 4.7.	Deney 2’nin değerleri.	62
Çizelge 4.8.	Deney 3’ün değerleri.....	64
Çizelge 4.9.	Deney 4 değerleri.....	66
Çizelge 4.10.	Deney 5’in değerleri	68
Çizelge 4.11.	Deney 6’nın değerleri	70
Çizelge 4.12.	Deney 7 değerleri	72
Çizelge 4.13.	Deney 8’in değerleri	74
Çizelge 4.14.	Deney 9’un değerleri.....	75

1. GİRİŞ

Eklemeli katmanlı üretim birçok sektöründe, birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe ise bir otomobilin Ar-Ge çalışmalarında prototip parçaların üretimi için ilk akla gelen yöntemlerden biridir.

Eklemeli imalatta ise malzemenin toz, filament ya da reçine halinde ekstrüzyon, lazer ışını ya da UV ışını ile katman katman dökülerek ya da kürleştirilerek 3 boyutlu parçaların tek seferde üretilebildiği bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalat, geleneksel yöntemlerin getirdiği kısıtları ortadan kaldırarak yenilikçi tasarımlara ve ileri mühendislik çalışmalarına olanak sağlayan; en az malzeme kullanımına olanak sağlayan, imalat süresini kısaltmasını sağlayan, süreç maliyetini düşüren böylelikle verimliliği artıran ve geleneksel yöntemlere karşı yıkıcı bir teknolojidir. Tarihsel gelişimine bakıldığında, katmanlı üretim teknolojisi 1980'lerde tanıtıldı ve başlangıçta yalnızca küçük ürünlerin üretim ve prototiplenmesi gibi sınırlı alanlarda kullanılmıştır. 2009 yılından bu yana, katmanlı üretim teknolojisindeki gelişme çok hızlandı ve çeşitli endüstrilerin mühendislik uygulamalarında yeni boyutlar belirledi. Şekil 1'de 1980'den beri önemli keşiflerin zaman çizelgesi gösterilmektedir. Ne kadar 30 yılı aşkın bir süredir var olsa da, henüz genç bir aşamadadır (Alghamdi ve John, 2021).

Otomotiv sektöründeki kullanımını ele aldığımızda ise bir tasarım fikir aşamasından seri üretime geçmeden önce prototip aşaması denilen süreçte ilgili tasarımın ilk numunesi üretilip test edilmektedir. Bu aşamada yüksek kalıp maliyetlerinden kaçınmak ve tekil parça için hızlı bir üretim gerçekleştirmek için çeşitli üretim teknikleri kullanılmaktadır. günümüzde otomotiv sektöründe prototip aşamasında en çok kullanılan yöntemlerden biri de eklemeli imalat yöntemidir.

Eklemeli imalat yüksek kalıp maliyetinin önüne geçse bile, eklemeli imalat için kullanılan cihazların üretim hızı ve üretebileceği parça büyüklüğü kapasitesi günümüzde sınırlıdır. Örneğin bir binek aracın tamponunun (650x1750x700 mm) tamamını tek seferde üretecek büyüklükte bir 3 boyutlu yazıcı maliyeti yüksek olduğundan her fabrikada bulunamayabilir. Bunun yanında piyasada daha küçük (400x400x400 mm) boyutlarda

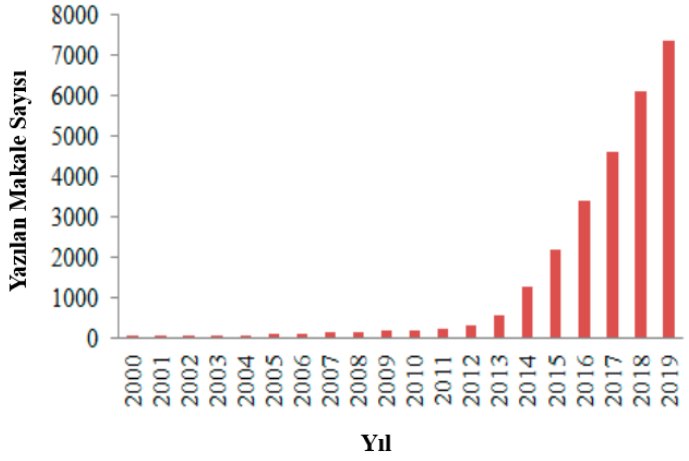
üretim yapan cihazlar da mevcuttur. Sadece tampon örneğinde olduğu gibi değil 40 cm'den büyük olan tüm parçalar için tekil üretim yapmak mümkün değildir.

Bu problemi aşmak için tekil parça, 3 boyutlu data üzerinde belirli parçalara ayrılarak üretilmekte daha sonra da çeşitli bağlantı yöntemleri ile de birleştirilmektedir.

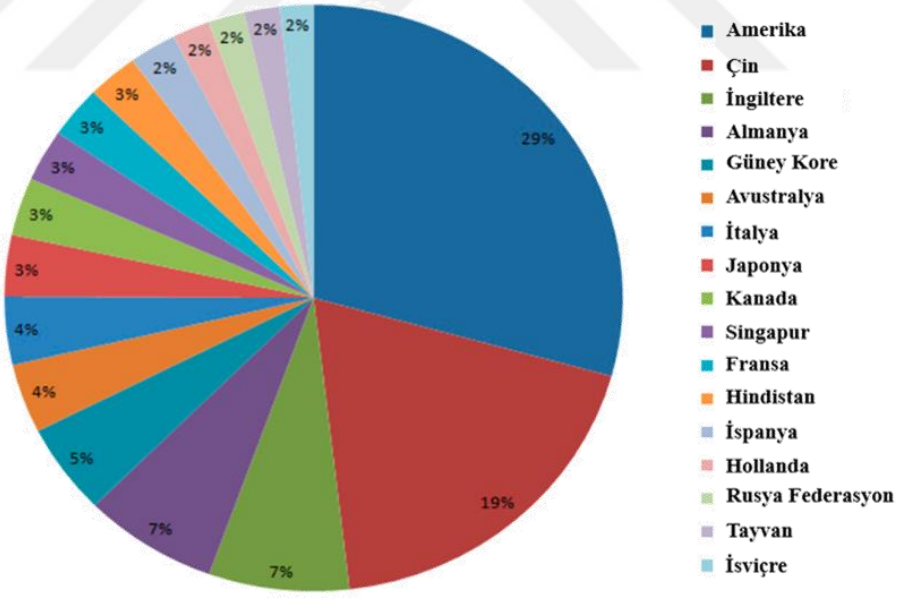
Çizelge 1.1 3B yazıcılarla ilgili tarihsel gelişmeler (Alghamdi ve John, 2021).

Buluş	**Tarih**
Fotopolimer hızlı prototipleme	1981
SLA teknolojisi	1984
FDM teknolojisi	1988
EOS firması ilk endüstriyel 3B cihazı üretti.	1990
Stratasys FDM için kendi versiyonunu patentledi.	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
Soliddimension 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

Çizelge 1.1 de ve Şekil 1.1'de görüldüğü üzere son 20 yıl içerisinde eklemeli imalat üzerinde çalışmalar artmaktadır. Sadece otomotiv sektöründe değil, inşaat, uzay, gıda sektörü ve hatta biyomedikal alanında kullanım içinde son birkaç yılda çalışmalar artmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1.1 Eklemeli imalat (a) Yıllara bağlı olarak eklemeli imalat hakkında yayınlanan makale sayısı. (b) Ülkelere göre eklemeli imalat hakkında patent dağılımı (Alghamdi ve John, 2021).

Küresel ısınmanın arttığı son zamanlarda birleştirme yöntemlerinde çevreye zararlı gaz salınımı yapmayan ve geri dönüşümü mümkün malzemeler kullanılması önem arz etmektedir. Çizelge 1.2'de termoplastiklerin kaynak türlerinin karşılaştırıldığı bir tablo verilmiştir. Görüldüğü üzere çevreye zarar vermeyen kaynak türleri içerisinde maliyet olarak en uygun olan tür Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 1.2 Termoplastik malzemelerin birleştirme yöntemlerinin karşılaştırılmalı tablosu (Gao ve Cui, 2017).

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**

Otomotiv sektöründe eklemeli imalatta, termoplastik malzeme kullanımına baktığımızda ise en çok akrilonitril stiren akrilat (ASA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat, polieterimid, polilaktik asit (PLA) yüksek etkili polistiren (HIPS), Termoplastik poliüretan (TPU), alifatik poliamidler (PA, Nylon) ve yüksek dayanımlı plastiklerdense polieter eter keton (PEEK), ve polieterimid (PEI) kullanılmaktadır (Alghamdi ve John, 2021).

Otomotiv sektöründe, mukavemet değerlerinden ve maliyetinden dolayı ABS malzemesinin geniş kullanım alanı mevcuttur. Eklemeli imalatta da ABS kullanımı yaygındır (Bozcu, 2020).

Lakin literatürde eklemeli imalatla üretilen ABS M30 malzemelerin birleştirilmesi için çevreci olan sürtünme karıştırma kaynağının kullanımına pek rastlanmamıştır.

Bu çalışmada ise eklemeli imalatla üretilen ABS M30 plakaların, sürtünme karıştırma kaynağını kullanılarak birleştirilmesi, kaynak bölgesinin mekanik performansının incelenmesi ve bulunan mekanik değerlerin optimizasyonu için taguchi metodunun kullanılması amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Polimerler

"Polimer" kelime yapısı olarak iki farklı kelimeden 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 anlamına gelmektedir. "Monomer" (Şekil 2.1) "tekil" parçacık, "polimer" (Şekil 2.1) ise bu tekil parçacıkların kimyasal olarak zincir şeklinde birbirine bağlanmış çok parçacıklı, yüksek molekül ağırlıklı bileşik oluşturmuş halidir (Karagöz, 2014; Ülker, 2015).



Şekil 2.1 Monomer ve polimerin şematik gösterimi

Polimerler Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi, 8 farklı gruba ayrılır. Katmanlı üretimde malzeme ısı altında şekillendirilerek ya da kürleştirilerek üretim yapılır. Bu nedenle termoplastik malzemelerin işlenmesi daha kolaydır ve sektörde de genellikle termoplastik malzemelerin kullanımı yaygındır. 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 katılaşırlar. Bir sefer katılaştıktan sonra ısıya karşı dirençleri çok yüksektir ve geri dönüşümü mümkün değildir (Bozcu, 2020).

Termoplastikler ise oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Isı altında işlenmesi ve geri dönüşümü mümkündür. Bu tez çalışmasında hem bu nedenle hem de katmanlı üretim için kullanımı yaygın olduğundan termoplastik malzemeler incelenecektir.

Çizelge 2.1. Polimerlerin sınıflandırılması (Karagöz, 2014).

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- Kısmı 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

2.2 Termoplastikler

Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında serttirler, ancak ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termoset malzemelere karşın matris olarak kullanımları daha azdır. Lakin kırılma tokluğu daha yüksek, geri dönüşümleri mümkün, sertleşmesi için kimyasal çözücülere ihtiyacın bulunmaması, hammadde raf ömürlerinin daha uzun 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 yaygındır (Chiulan ve Frone, 2017).

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

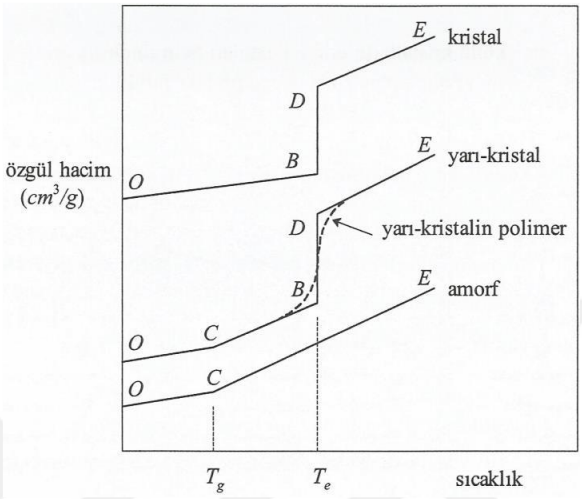
2.3 Camsı Geçiş Sıcaklığı (T_g) ve Kristal erime Sıcaklığı (T_e)

Polimerlerde, sıcaklık molekül zincirlerinin hareketinde oldukça etkilidir. Sıcaklığın arttırılması ile molekül zincirlerinin hareketi artar, bağ kuvvetleri zayıflar, zincirlerin bağlanma kuvveti düşer ve moleküller birbirinden bağımsız hareket etmeye başlar. Sıcaklığın azaltılması ile ise 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 malzeme camsı hal olarak bilinen rijit, sert ve gevrektir. Bunun yanında kırılgan ve yorulma dayanımları kötüdür. 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 malzemede 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.



Şekil 2.2 Polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve kristal erime sıcaklığı (T_e) grafiği (Saçak, 2012).

2.2 Eklemeli İmalat

Malzemelerin tasarım çeşitliliği ve karmaşıklığı dünya genelinde sürekli olarak artmaktadır. Lakin geleneksel üretim yöntemleri yeni karmaşık tasarım ürünlerinin üretimine cevap veremez hale gelmiştir. Cevap verse bile maliyet ve zaman bakamından kısıtları mevcuttur. Tam bu noktada 1981'de bu ihtiyacı karşılamak için üç boyutlu (katmanlı) imalat yöntemi bulunmuştur.

Üç boyutlu cihazlar çok karmaşık yüzeylere sahip parçaların üretimine cevap verebilmekte ve bunun yanında prototipleme aşamasındaki maliyetleri düşürmekte, hızlı bir şekilde üretimini sağlamaktadır. Hızlı prototipleme, bilgisayarda hazırlanan üç boyutlu CAD çizimlerinden direkt olarak elle tutulur fiziksel modeller elde etmemizi sağlayan imalat teknolojisidir.

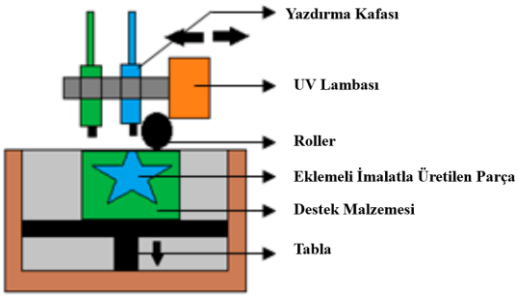
Eklemeli üretimin başlıca avantajları; ek maliyet gerektirmeden çok karmaşık parçaların üretimini sağlayabilir, parçalar doğrudan monte edilmiş ya da edilebilir formlarda

üretebilir, geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında birkaç parçadan oluşan bir parçanın parça sayısını azaltmakta ve evde masaüstü yazıcılarla kişiselleştirilmiş ürünlerin üretimine olanak sağlamaktadır (Chiulan ve Frone, 2018).

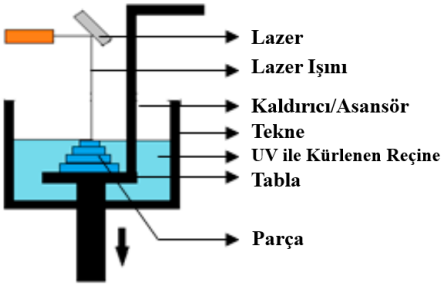
Genel olarak üç boyutlu baskı olarak bilinen eklemeli imalat , "eksiltmeli imalat ve biçimlendirici imalat metodolojilerinin aksine, genellikle katman katman olmak üzere, 3B model verilerinden parçalar oluşturmak için malzemeleri birleştirme süreci" olarak tanımlanabilir. Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO)/Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM) 52900:2015 standardına göre; eklemeli imalat süreçleri yedi kategoride sınıflandırılabilir: (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.



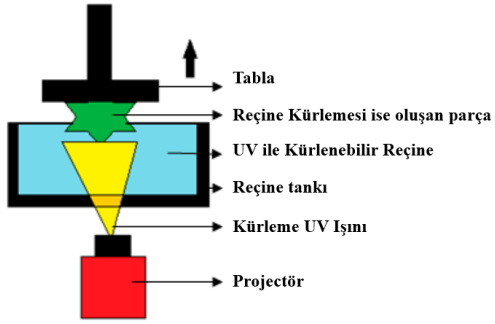
Şekil 2.3 Eklemeli imalat süreçlerinin ISO/ASTM 529000:2015'e göre sınıflandırılması (Lee ve An, 2017).


Yazdırma Kafası
UV Lambası
Roller
Eklemeli İmalatla Üretilen Parça
Destek Malzemesi
Tabla

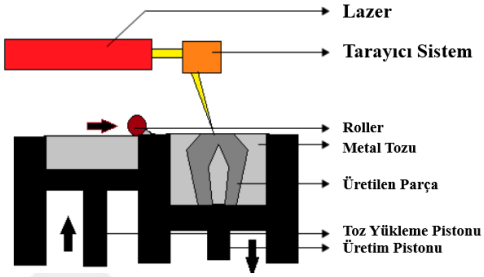
(a)


Lazer
Lazer Işını
Kaldırıcı/Asansör
Tekne
UV ile Kürlenen Reçine
Tabla
Parça

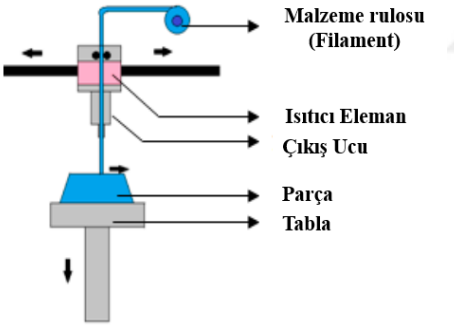
(b)


Tabla
Reçine Kürlemesi ise oluşan parça
UV ile Kürlenebilir Reçine
Reçine tankı
Kürleme UV Işını
Projectör

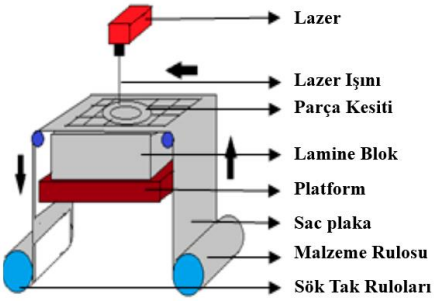
(c)


Lazer
Tarayıcı Sistem
Roller
Metal Tozu
Üretilen Parça
Toz Yükleme Pistonu
Üretim Pistonu

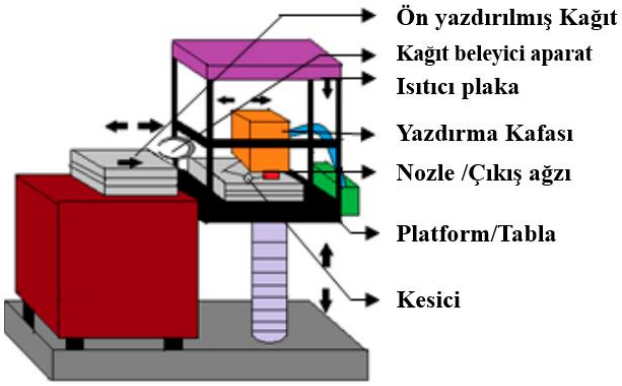
(d)


Malzeme rulosu
(Filament)
Isıtıcı Eleman
Çıkış Ucu
Parça
Tabla

(e)


Lazer
Lazer Işını
Parça Kesiti
Lamine Blok
Platform
Sac plaka
Malzeme Rulosu
Sök Tak Ruloları

(f)



(g)

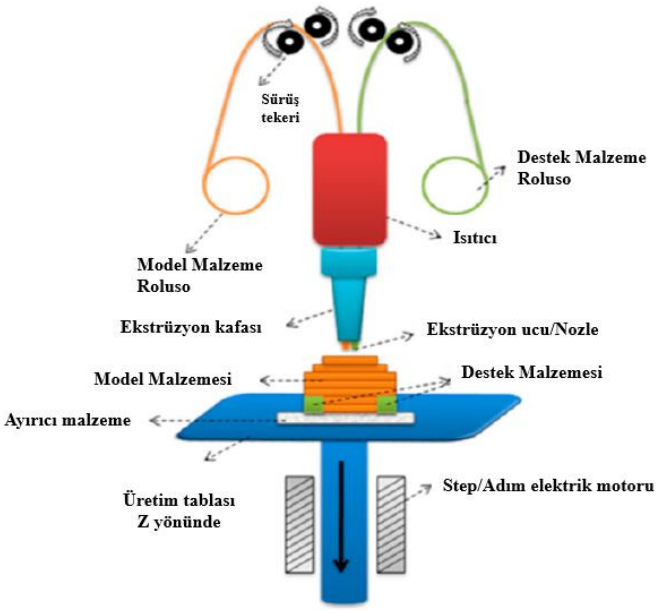
Şekil 2.4 Polimer malzemeler için kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinin şematik gösterimi a) Polijet baskı; (b) Stereolitografi (SLA); (c) Doğrudan hafif işleme (DLP); (d) Seçici lazer sinterleme (SLS); (e) Kaynaşmış biriktirme modelleme (FDM); (f) Lamine nesne imalatı (LOM); (g) Seçici biriktirme modellemesi (SDM) (Alghamdi ve John, 2021).

Bu çalışmada parça üretimi için malzeme ekstrüzyon yöntemi kullanılmıştır. Malzeme ekstrüzyon yöntemi ikiye ayrılır. (1) FDM: Kaynaşmış biriktirme modelleme, (2) BMD: Rod (Çubuk) ile üretim.

Bu çalışmada plaka üretimi için FDM yöntemi kullanılmıştır. FDM'in açılımı "Fused deposition Modeling" tir. Türkçesi ise Kaynaşmış biriktirme modellemesi olarak bilinir. Şekil 2.4'teki e resminde şematik olarak gösterimi verilmiştir. Detayları 2.3 başlığı altında verilmiştir.

2.3 FDM Tekniği

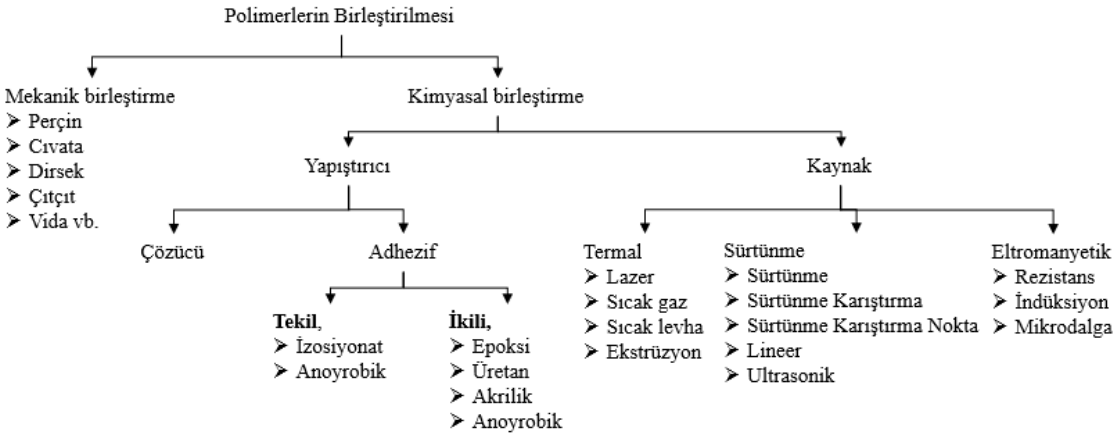
Hızlı prototipleme, FDM tekniğinde şerit halindeki plastik hammadde ekstrüzyon kafasına iletilir. Burada malzeme ısıtılarak eriyik hale getirilir. Ekstrüzyon kafası eriyik malzemeyi damlalar halinde boş bir tepsiye akıtarak parçayı oluşturacak ilk katmanı oluşturur. Her katmanda tepsi bir adım aşağıya iner ve böylece parça katmanlar halinde inşa edilir (Şekil 2.5). İnşa sırasında destek görevi gören bir ayrı yapı oluşur ve üretim tamamlandıktan sonra bu yapı parçadan sökülür (Mendricky ve Fris 2020).



Şekil 2.5. FDM'de malzemenin ekstrüzyonu (Chiulan ve Frone, 2018).

2.4 Polimerlerin Birleştirilme Yöntemleri

Polimerlerin birleştirilme yöntemleri Şekil 2.6'da sınıflandırılarak gösterilmiştir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi birleştirme yöntemlerini mekanik ve kimyasal olmak üzere iki ana grupta sınıflandırabiliriz. Mekanik birleştirmeler parçaya zarar vermeden sökülebilirken, kimyasal birleştirmelerin sökülmesi sırasında parça tahribata uğratılmaktadır. Kimyasal birleştirmelerde bulunan yapıştırıcı yöntemleri sadece farklı polimeleri birbiri ile değil, diğer tüm malzemelerin (metal, termoset, elastomer vb.) birbiri ile birleştirilmesinde kullanmak mümkündür. Lakin kaynak sadece termoplastik malzemelere uygulanabilmektedir (Mishra, 2019).



Şekil 2.6. Polimerlerin birleştirme yöntemleri (Karagöz, 2014).

2.5 Termoplastik Malzemelerin Kaynak Yöntemleri

Termoplastik malzemelerin kaynak yöntemlerine detaylı baktığımızda Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi ısının transfer edildiği yöntemler ve ısının direkt malzemede oluşturulduğu yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Çizelge 2.2. Termoplastiklerin birleştirme yöntemleri (Karagöz, 2014).

Isı Transfer Yöntemleri	Isının Direkt Malzemede Oluşturulduğu Yöntemler	
Isıl Yöntemler	Mekanik Yöntemler (Sürtünme Esaslı)	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 (100-250 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, bir ara eleman yardımı ile parçaya ısının iletilmesi yöntemidir. Örneğin sıcak bir kamanın ya da levhanın ısıtılması ile iki PVC pencere parçası birbirine ile kaynak edilerek birleştirilir ve bu şekilde pencere üretimi yapılır. İşlem sırasında ısıtılmış bir plaka kaynak yapılacak iki yüzey arasına yerleştirilir ve bu temas yüzeylerinde sıcaklık T_e sıcaklığını geçer, plaka aradan kaldırılarak hızlı bir şekilde yüzeyler birbirine

örtüştürülür. İki yüzey üzerinde ergimiş malzeme birbirine karışır. Yüzeylerin soğuması ile çok rijit bir yapı oluşmuş olur bu şekilde kaynak tamamlanmış olur.

Isının direkt malzemede oluşturulduğu yöntemlerde ise dış bir kaynaktan ısı direkt verilmez. Mekanik ya da elektromanyetik yöntemlerle bu sağlanır. Örneğin iki plastik yüzeyin birbiri ile temas ettirilip bu yüzeylerin birbiri ile sürtünmesinden dolayı yüzeyde yüksek ve dar bir alanda bir ısı meydana getirilmektedir. Bu ısının etkisi ile sadece temas yüzeylerin de sıcaklık T_e sıcaklığını geçer ve iki plaka yüzeyindeki moleküller birbirine karışır. Sürtünme olgusunun kaldırılması ile, soğuma gerçekleşir ve kaynak tamamlanmış olur.

2.6 Termoplastik Kaynak Yöntemlerinin Verimliliğinin Karşılaştırılması

Şekil 2.8 de termoplastiklerin birleştirilmesi için kullanılan kaynak yöntemlerin kaynak verimliliğini gösteren tablo verilmiştir. Çizelge 2.3'te SKK %95 verimlilikle en iyi birleşmeye sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.3. Termoplastiklerin birleştirme yöntemlerinin verimliliklerinin karşılaştırılması (Gao ve Cui, 2017).

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

Bu tez çalışmasında sürtünme karıştırma kaynağı kullanılmıştır.

2.7 Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK)

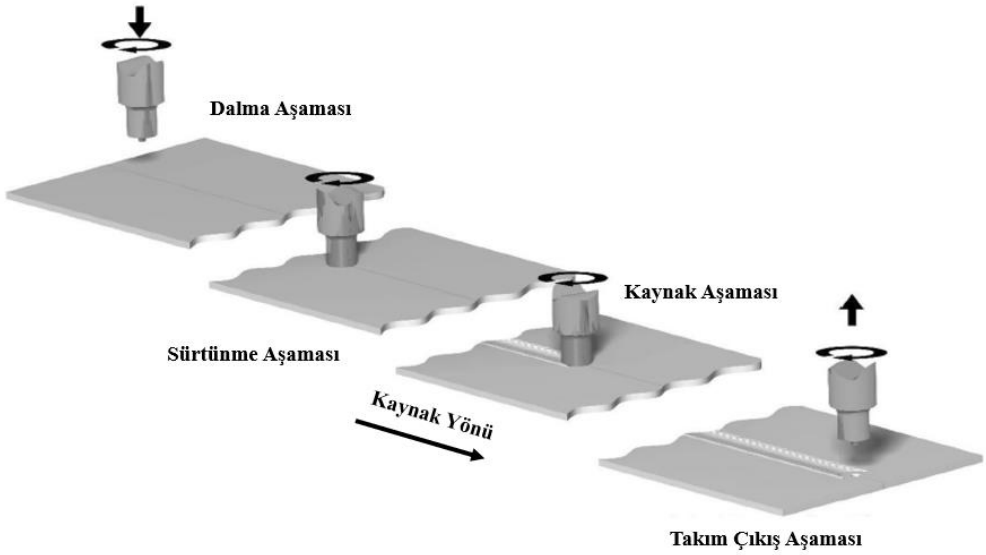
Son zamanlarda SKK ile birleştirme, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde termoplastiklerin birleştirilmesi konusunda giderek daha fazla dikkate alınmaktadır

(Xue ve diğerleri, 2021). SKK'nin çevre dostu prosesin olması, enerji verimliliğinin yüksek olması ve kaynak kalitesinin çok iyi olması gibi avantajlarının olması dikkatleri üzerine çekmektedir (Nath ve diğerleri, 2019).

İlk olarak sürtünme karıştırma kaynağı tekniği 1991 yılında İngiltere'deki The Welding Institute tarafından katı hal kaynak teknikleri altında geliştirilmiştir. Temelde sürtünme karıştırma kaynağı ile sürtünme kaynağı çok benzerdirler. Ancak uygulamada farklılık gösterir. 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 biçimidir (Kumar ve Singh, 2017).

SKK kaynak prosesi; temelde takım ucu, plakalar ve plaka sabitleme elemanlarından oluştur.

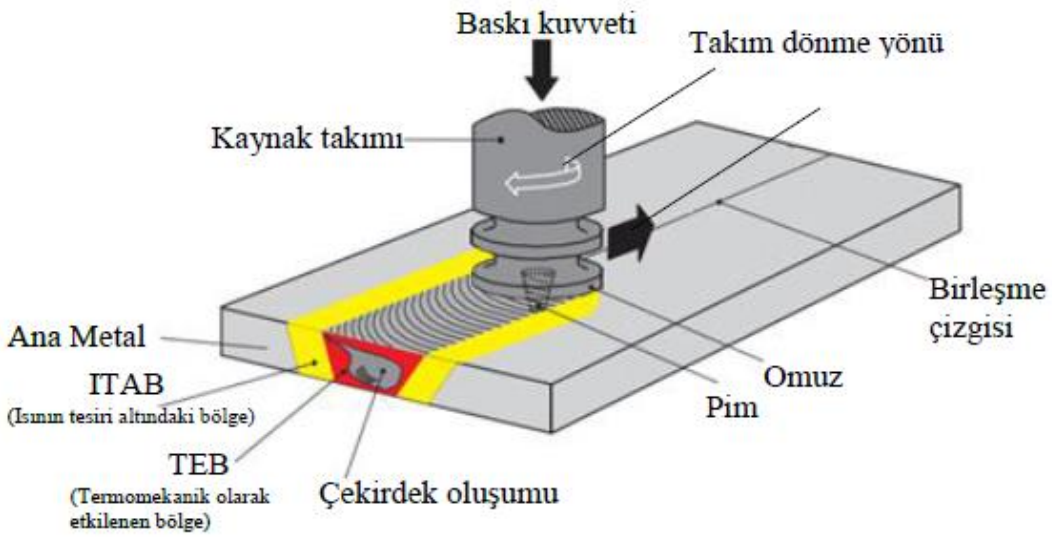
Şekil 2.7'de proses ile ilgili şema gösterilmiştir. İlk önce iki plaka yan yana sabitlenir, daha sonra takım belirli bir dönme ve ilerle hızı ile birleştirme bölgesine belirlenen derinlikte dalar, dalma tamamlandıktan sonra aynı seviyede tanımlanan yere kadar ilerler, kaynak işlemini tamamlanır ve parçadan çıkar.



Şekil 2.7. Genel sürtünme karıştırma kaynağı fazları (Nath ve diğerleri, 2022).

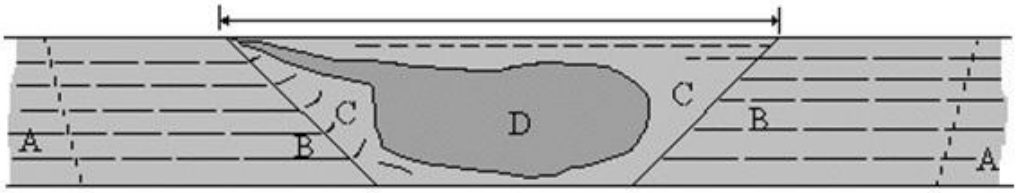
Kaynak sırasında ve sonrasında Şekil 2.8'de gösterildiği gibi kaynak bölgesi oluştur.

a) Baskı kuvveti: Freze takımının parçaya uyguladığı basma kuvvetidir.
b) Takım dönme yönü: Genelde diş yönüne göre değişir.
c) Kaynak takımı: Kaynak yapmak için tasarlanmış ve freze cihazından dönme ve ilerleme hızını alır
d) Omuz: Takımın parça yüzeyine temas eden kısmıdır.
e) Pim: İki parça arasına girerek sürtünmeyi sağlar.
f) Birleşme Çizgisi: İki parçanın birleşme çizgisidir. Kaynak bu çizgi boyunca yapılır.
g) Ana metal: Isıdan etkilenmeyen bölgedir.
h) ITAB (Isının tesiri altındaki bölge): Isı tesiri ile zayıflamış bölgedir. Kopmaların çoğu bu bölgeden gerçekleşir.
i) Çekirdek oluşumu: Yeniden kristalleşmiş bölgedir.
j) Termodinamik olarak etkilenen bölgedir.



Şekil 2.8 SKK prosesi (Karagöz, 2014).

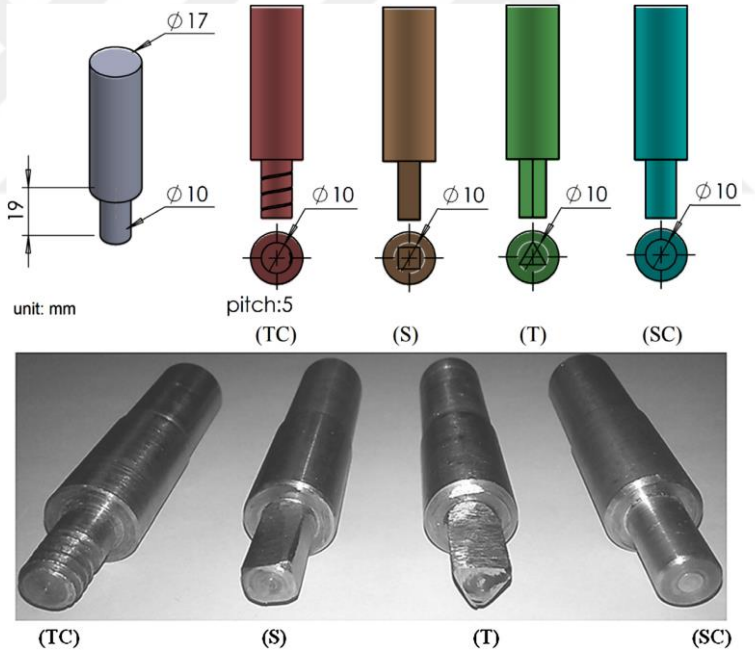
Kaynak bölgesinin daha detaylı görüntüsü Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 SKK kaynak bölgesi mikro yapısının şematik gösterimi, (a) A- Isıdan etkilenmeyen bölge, (b) B- Isının etkisi altında kalan bölge, (c) C- Termomekanik olarak etkilenen bölge, (d) D- Yeniden kristalleşmiş bölge (Karagöz, 2014).

2.8 SKK Kaynak Bölgesine Takım Uç Tasarımının Etkisi

Hajideh ve Alavi'nin (2017) takım uç tipi tasarımın termoplastiklerin SKK'ye etkisini araştırdıkları çalışmada Şekil 2.10'da (TC) ile adlandırılan, diş açılmış silindirik uçlu takımın ortalama değerleri Çizelge 2.4'te görüldüğü gibi diğer takımların değerlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu çalışmada da diş açılmış silindirik uç kullanılacaktır.



Şekil 2.10 SKK 'da takım uçları TC: diş açılmış silindirik, S: kare, T: Üçgen, SC: düz silindirik uc (Hajideh ve Alavi, 2017).

Çizelge 2.4 SKK 'da takım uçları ile yapılan deney sonuçları (Hajideh ve Alavi, 2017).

Uç Tipi	TS (mm/dk)	Rs (dev/dk)	UTS (MPa)	UTS/UTS_{PE} (%)	e(%)	e/e_{PE} (%)	H (Shore D)	H/H_{PE} (%)
TC	8	900	21.3	88.8	490.6	114.1	62.8	104.7
TC	10	900	21.9	91.3	491.9	114.4	63.8	106.3
TC	12.5	900	22.2	92.5	493.2	114.7	64.4	107.3
TC	8	1860	21.9	91.3	493.6	114.8	63	105
TC	10	1860	22.1	92.1	495.8	115.3	63.2	105.3
TC	**12.5**	**1860**	**23.7**	**98.8**	**498.4**	**115.9**	**68.6**	**114.3**
TC	8	2920	21.1	87.9	489.8	113.9	61.7	102.8
TC	10	2920	21.3	88.8	490.6	114.1	61.9	103.1
TC	12.5	2920	21.6	90.0	491.5	114.3	62.7	104.5
S	8	900	19.7	82.0	483.8	112.5	61.4	102.3
S	10	900	20.2	84.1	485.5	112.9	61.8	103
S	12.5	900	20.8	86.6	487.2	113.3	62.2	103.6
S	8	1860	20.3	84.5	486.8	113.2	61.7	102.8
S	10	1860	22.1	92.0	491.1	114.2	63.6	106
S	12.5	1860	22.3	92.9	493.2	114.7	64.4	107.3
S	8	2920	19.4	80.8	482.5	112.12	61.1	101.8
S	10	2920	19.7	82.0	484.2	112.6	61.5	102.5
S	12.5	2920	20.2	84.1	486.3	113.1	61.9	103.1
T	8	900	18.2	75.8	477.7	111.1	58.7	97.8
T	10	900	18.6	77.5	479.9	111.6	59.1	98.5
T	12.5	900	18.9	78.7	481.2	111.9	59.8	99.6
T	8	1860	18.8	78.3	479.5	111.4	59.2	98.6
T	10	1860	19.1	79.5	480.7	111.8	59.9	99.8
T	12.5	1860	20.7	86.2	485.5	112.9	62.6	104.6
T	8	2920	17.9	74.5	476.4	110.8	58.4	97.3
T	10	2920	18.3	76.2	478.6	111.3	58.7	97.8
T	12.5	2920	18.4	76.6	479.5	111.5	59.3	98.8
SC	8	900	16.7	69.5	472.1	109.8	56.4	94
SC	10	900	17.2	71.6	473.9	110.2	56.9	94.8
SC	12.5	900	17.6	73.3	475.6	110.6	57.3	95.5
SC	8	1860	16.9	70.4	474.3	110.3	56.8	94.6
SC	10	1860	17.9	74.5	476.4	110.8	57.1	95.1
SC	12.5	1860	19.6	81.6	477.7	111.1	59.2	98.6
SC	8	2920	16.4	68.3	471.3	109.6	55.9	93.1
SC	10	2920	16.8	70.0	473.4	110.1	56.1	93.5
SC	12.5	2920	17.3	72.0	474.3	110.3	56.7	94.5

TS:İlerleme Hızı RS: Dönme Hızı UTS: Akma gerilmesi e: Yüzde Uzama H: Sertlik

2.9 SKK İle Termoplastik Malzemelerin Kaynağı

Son yıllarda SKK ile termoplastik malzemelerin kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalar artmıştır.

Termoplastiklerin SKK ile birleştirme çalışmalarından biri Singh ile Singh'in 2020 yılında gerçekleştirdiği HDPE ile PA-6'nın kaynağıdır. Bu iki malzemenin kaynağı için ısının oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Kumar ve Singh'nin (2020) yaptığı bir çalışmada otomobil tamponların SKK ile tamiri hakkında bir çalışma kurgulanmıştır. Laboratuvar ortamında bir kurgu yapılmış ve araştırmacılar %15 Al - ABS malzemeden ekstürüzyon ile ürettikleri plaka ile %50 Al - PA6 üretilen plakaların SKK ile kaynağı araştırmışlardır. Taguchi metodu kullanılarak optimum sonuçlar araştırılmıştır. En yüksek kaynak mukavemeti takımın 3 mm daldığı durumda,1400 devir/dk takım dönmesi ile 50 mm/dk takım ilerlemesinde bulunurken en düşük ise takımın 2mm daldığında 1000 devir/dk takım dönmesi 30 mm/dk takım ilerlemesinde bulunmuştur.

Narender, Manoj ve Jakirahemed'in 2021'de yaptıkları bir araştırma makalesi son yıllarda tamirat işlemleri için SKK yönteminin kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaları göstermektedir.

Pereira ile Galvao tarafından 2022'de yayınlanan bir araştırma makalesinde, sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme karıştırma nokta kaynağı vb. kaynakların son zamanlarda kullanımları ile ilgili detaylı bilgilere yer verilmiştir. Çalışmada, fiberlerle güçlendirilmiş termoplastik malzemelerin kaynağında takım, karıştırma ve sıcaklık etkilerinin kısıtları ile ilgili yapılan çalışmaları gösterilmiştir.

Bilici tarafından 2022'de yapılan bir çalışmada HDPE'nin SKK ile kaynağında makro yapı ve kaynaklanabilirlik araştırılmıştır.

Son zamanlarda SKK'nın ulaşılabilir, yenilikçi, çevreye zararsız, iyi kaynak kalitesi ve ucuz maliyetinden dolayı, sadece termpolastiklerde değil, metal ve kompozit malzemelerde de kullanılmasının araştırılması oldukça artmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağının prensibi ve işleyişi termoplastikler, metaller ve kompozit malzemeler için aynıdır. Literatürde kontrol edildiğinde eklemeli imalatla üretilen saf termoplastik malzemelerin SKK ile kaynağına rastlanmamıştır.

Bu çalışmada ABS M30 malzemesi ile üretilen plakaların sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi araştırılacak ve kaynak parametreleri Taguchi metodu ile optimize edilecek ve çekme sonucunda malzemenin kopma bölgesindeki davranışı incelenecektir.

Çizelge 2.5'te otomotiv sektöründe en çok kullanılan termoplastik malzemelerin SKK kaynağı ile birleştirilmesinde elde edilen mukavemet değerleri gösterilmiştir. Aynı tabloda ABS-ABS kaynak verimliliğinin en yüksek olduğu görünmektedir. Bu nedenden dolayı tez çalışası için ABS M30 malzemesi seçilmiştir.

Çizelge 2.5. Sektörde en çok kullanılan termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması (Gao ve Cui, 2017).

	Matris Yapının	SKK Birleştirme	
	Akma Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	%
ABS	34.1	32.7	96
HDPE	22.5	21.5	95
PA	72.4	28.4	39
PC	68.3	57.1	83
PMMA	42.0	21.5	51
PP	31.3	30.6	98
UHMWPE	28.8	20.0	69

SKK kaynak mukavemetini ve kaynak verimliliğini etkileyen faktörler takım dönüş hızı, takım omuz çapı, yatak sıcaklığı ve ilerleme hızıdır. (Kumar ve Singh, 2017)

Bu tez çalışmasında üç farklı omuz çapı, üç farklı takım dönme hızı ve üç farklı takım ilerleme hızı seçilmiştir. üç değişkenin olması Taguchi L9 ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımının yapılmasını sağlamaktadır.

Seçilen bu değerler ilk etapta literatüre yakın değerler alınmıştır lakin deneysel çalışma sırasında bulunan bulgular çerçevesinde değiştirip optimum kaynak için değerler bulunmuştur.

2.10 Taguchi Metodu

Taguchi metodu, kullanımı kolay, klasik yöntemlerle kurgulanan çok fazla deney sayısından oluşan çalışma sonuçlarına, çok daha az deney sayısı ile ulaşabilen bir deney tasarım metodudur. Taguchi metodu, deney parametrelerini optimize etmek için kullanılan basit ve sağlam bir tekniktir. Taguchi metodu, tüm süreç parametrelerini az sayıda deneyle 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 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;

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

b) Büyük olan en iyidir.

$$S/N = 10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \quad (2.2)$$

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, “s^2 ” ise varyansı, “n” ise deney sayısını ifade etmektedir.

S/N birimi dB (desibel) dir.

Değişkenliğin belirli bir hedef etrafında azaltılması amaçlanıyorsa Denklem 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.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmanın Parametre Tasarımı (Taguchi Metodu)

Deney tasarımı Minitab programında Taguchi metodu L9 ortogonal dizisi kullanılarak yapılmıştır. üç farklı omuz çapı, üç farklı takım dönme hızı ve üç farklı takım ilerleme hızı seçilmiştir. Seçilen değerler Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Seçilen değerlerle ortogonal L9 dizisi yardımıyla tasarlanan nihai deneylerin değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışma için seçilen değişkenler ve seviyeleri

Değişken No	Takım Dönme Hızı	Takım İlerleme Hızı	Takım Omuz Çapı
1	800	10	16
2	1000	15	20
3	1200	20	24

Çizelge 3.2. Taguchi metodu L9 ortogonal dizi ile belirlenen deney değerleri

Deney No	Takım Dönme Hızı	Takım İlerleme Hızı	Takım Omuz Çapı
1	800	20	24
2	800	10	16
3	800	15	20
4	1000	20	16
5	1000	15	24
6	1000	10	20
7	1200	10	24
8	1200	15	16
9	1200	20	20

Çizelge 3.2'de belirlendiği gibi seçilen değerlerle optimum kaynak kombinasyonunun bulunabilmesi için en az 9 deney yapılmalıdır.

Her bir deney için bir çift FDM ile üretilmiş ABS plaka çifti kullanılmıştır. 9 deney için, 9x2=18 adet plaka üretilmiştir. Plakanın mekanik değerlerini ve bulunan değerin doğrulama deneylerini de hesaba kattığımızda toplamda en az 22 adet plaka üretimi yapılmalıdır. Bu deneyde 40 çift plaka üretilmiş, ilk önce kaynak yapılabilir parametre aralığı bulunmuş daha sonra da bulunan bu aralıktan optimum değerin bulunması için taguchi methodu ile deney tasarımı yapılmıştır.

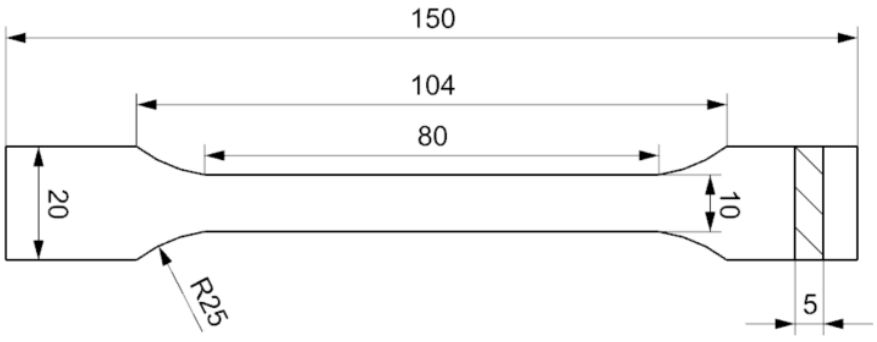
3.2 FDM İle Plaka Üretimi

Plaka üretiminin gerçekleştirilmesi için ilk önce plaka boyutlarının belirlenmesi ve tasarımının yapılıp ".stl" formatı ile üç boyutlu katmanlı üretim cihazına verilmesi gerekmektedir.

Plaka boyutlarını çekme testinde kullanılacak kaşık sayısı belirlemiştir. Çekme testinde her bir deney için 5 çekme testi ön görülmüştür.

3.2.1 Çekme çubuğu geometrisi

EN ISO 527-2 çekme testi numune geometrisinden yola çıkılarak numunen tasarımı ticari bir tasarım programı olan "Siemens NX Continuous release" versiyonun da yapılmıştır. (NX, 2022). Şekil 3.1'de çekme numunesinin teknik resmi verilmiştir. Plaka kalınlığı ve üretilen takım uçlarının uzunluğu 5 mm olarak seçilmiştir.

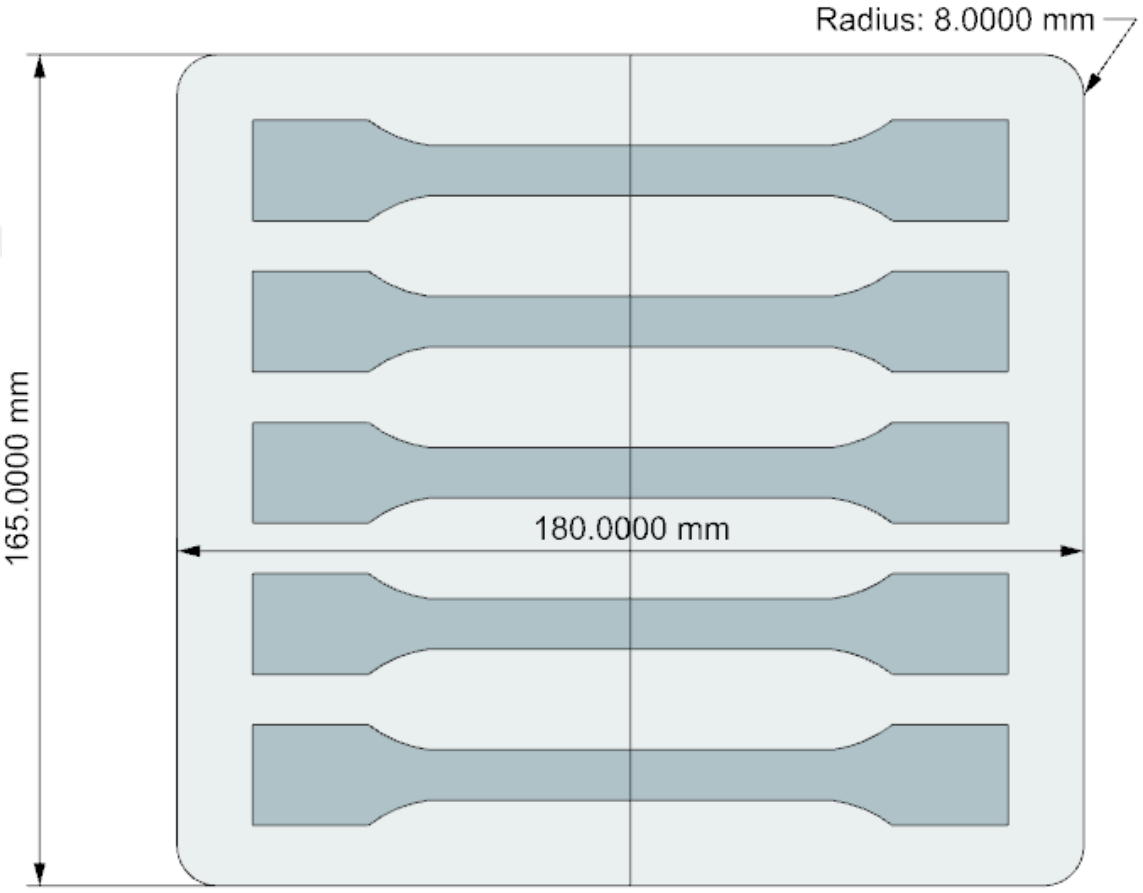


Şekil 3.1 Çekme çubuğu numune geometrisi

3.2.2 Plaka geometrisi

Plaka ölçüleri Şekil 3.2'de 5 adet çekme çubuğunun çıkabileceği uzunluk ve genişlikte seçilmiştir.

Her bir deney için Şekil 3.2'deki gibi bir plaka çifti kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Üretilmiş plaka geometrisi

Plakalar FDM yöntemi ile Stratasys Fortus 400 MC cihazı ile eklemeli üretim gerçekleştirilmiştir.

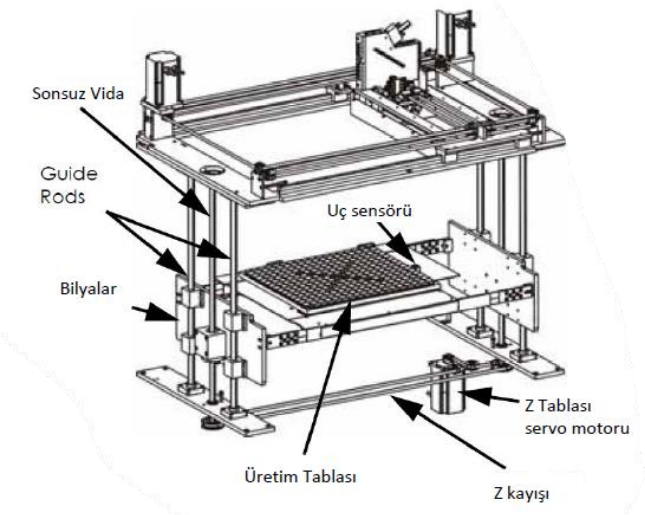
3.2.3 Stratasys fortus 400 MC katmanlı üretim cihazı

Şekil 3.3'te 3B katmanlı üretim cihazı verilmiştir. Cihazın vakumlu ve sıcaklık değerinin malzemeye göre değiştirebilme özelliği cihazdan endüstriyel parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.3 Fortus 400 MC katmanlı üretim cihazı

Cihazın üretim tablası ile ilgili detaylı bir resim Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



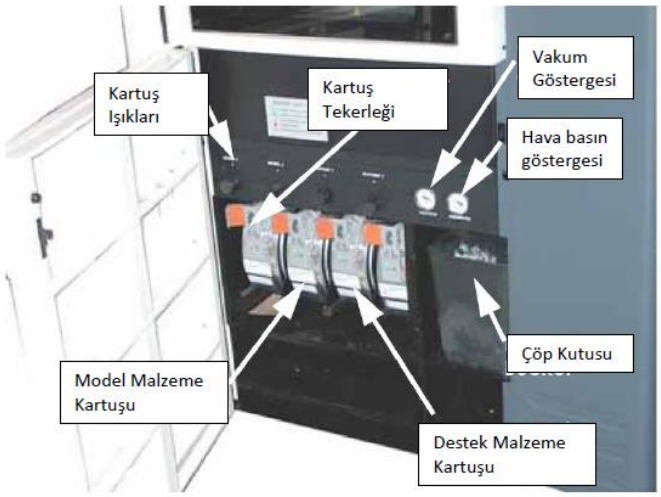
Şekil 3.4 Fortus 400 MC cihazı üretim tablası

Kullanılan cihazda üretilebilecek en büyük hacim (406x355x406 mm)'dir. Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

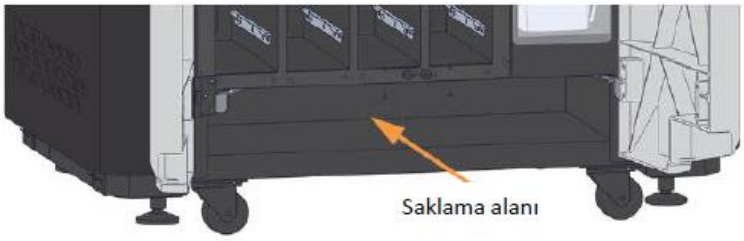
Çizelge 3.3 Kullanılan cihazın tabla ölçüleri.

ÖLÇÜLER mm.	X	Y	Z
Küçük Hacim (400mc small)	355	254	254
Büyük Hacim (400mc large)	406	355	406

Kullanılan cihazın malzeme besleme kısmı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



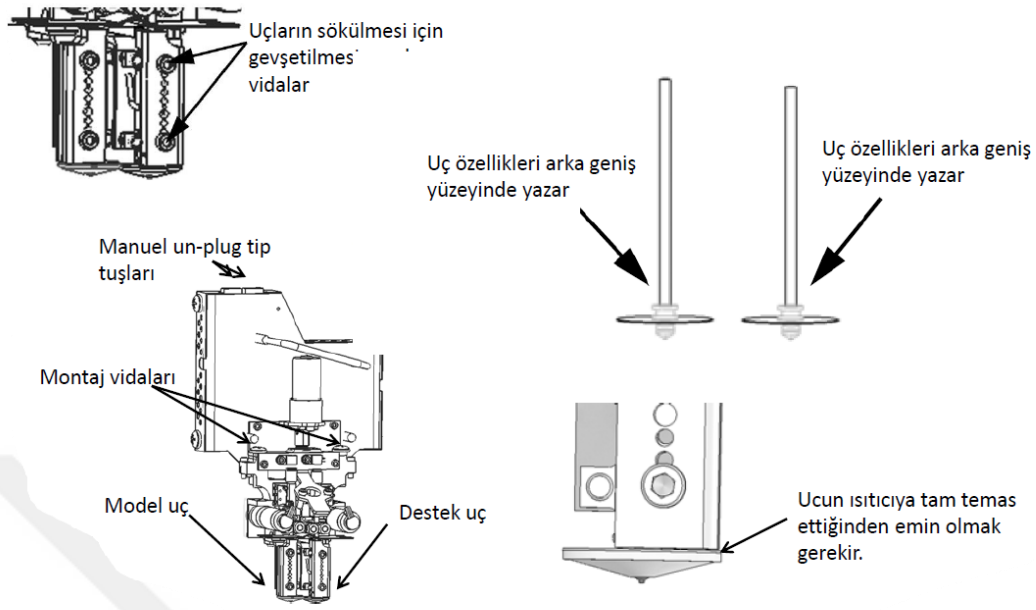
(a)



(b)

Şekil 3.5 Fortus 400 MC cihazının detaylı gösterimi (a) Kartuş yerleştirme bölgesi detaylı gösterimi, (b) Saklama alanı.

Cihazın uç yapısının detaylı anlatımı şekil 3.6'da gösterilmiştir.

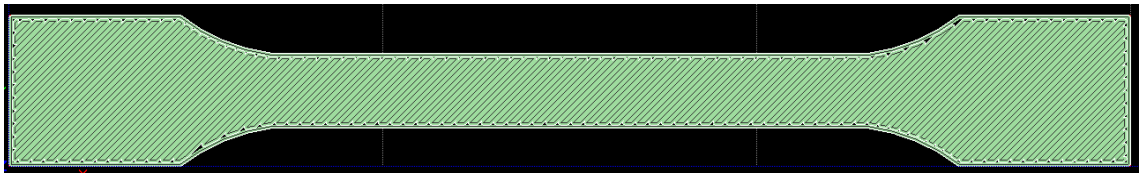


Şekil 3.6 Fortus 400 MC cihazının uç yapısı.

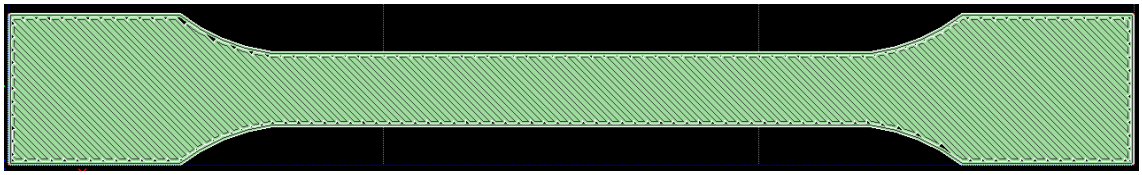
Fortus 400 MC cihazında ABS-M30™, PC, PPSF, ULTEM® 9085, Naylon 12™, PC-ABS, ASA gibi birden fazla üretim dereceli ve yüksek gereksinimle termoplastik parçaları üretebilmektedir. Fortus 400 MC, işlevsel prototipler, üretim araçları ve üretim parçaları üretebilmektedir. Fortus 400 MC, Insight™ işleme yazılımıyla birlikte mekanik, termal, estetik ve çözünürlük ihtiyaçlarını karşılayan üretimler yapabilmektedir.

3.2.4 Plaka üretimi (ABS M30)

NX programında tasarımı tamamlanmış plakaların datası .stl formatı ile Fortus 400 MC cihazına Insight 13.7 işleme yazılımı yoluyla aktarıldı. Baskı yapılırken baskı açısı 135º ile yapılmıştır. Şekil 3.8'de ön görüntülemesi mevcuttur. Baskı yapılırken T16 tip uc ile 190 ºC'de ABS M30 malzemesi model olarak SR 30 destek malzemesi kullanılarak üretim yapılmıştır. Kullanılan diğer özellikler Şekil 3.7'de verilmiştir.



(a)

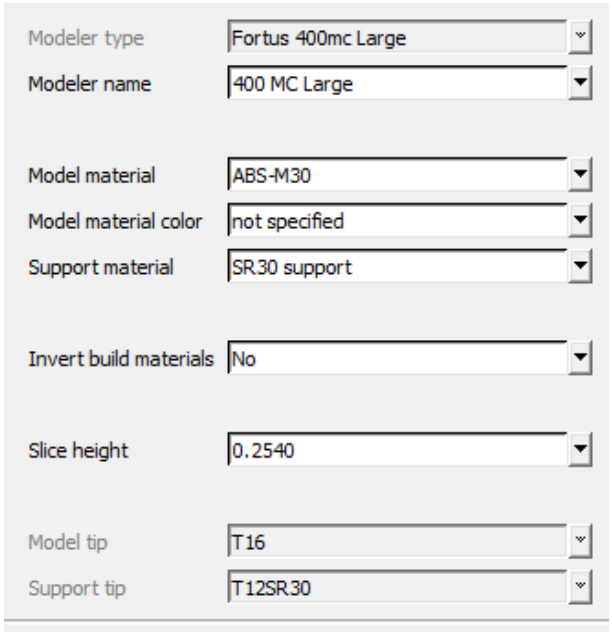


(b)

Şekil 3.7 Baskı açısı 135ºolan baskı yapısının ön görüntülemesi (a) üstten görüntüsü, (b) alttan görüntüsü.

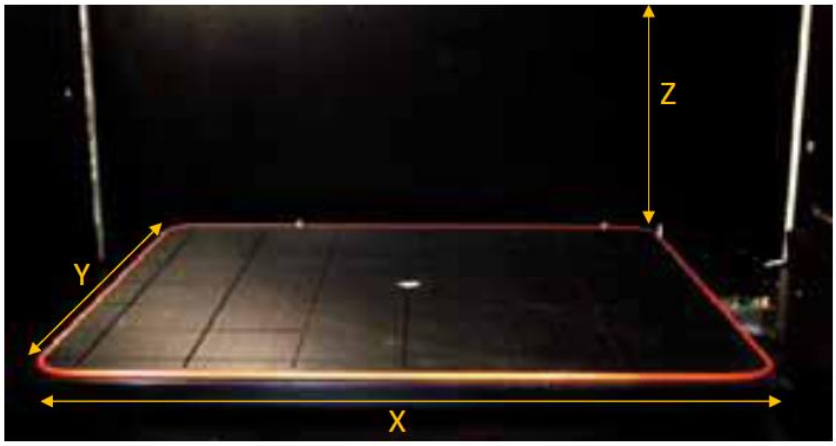
135 derece ile baskı tasarlanıp Insight 13.7 yazılımı ile Fortus 400 MC cihazına yüklenmiştir.

Üretim yapılırken Insight 13.7 yazılımının ayarları şekil 3.8'deki gibi belirtilmiştir. Katman kalınlığı 0.2540 mm kullanılmıştır.

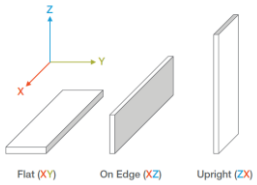


Şekil 3.8 Insight 13.7 yazılımında plaka üretimi yapılırken kullanılan özellikler.

Katmanlı üretimde anizotropi olduğundan dolayı hangi yönde baskı yapıldığı önemlidir. Bu çalışmada Şekil 3.9'da gösterildiği gibi XY koordinatlarında üretim yapılmıştır. Şekil 3.11'de baskı yapılmış plakalar mevcuttur.

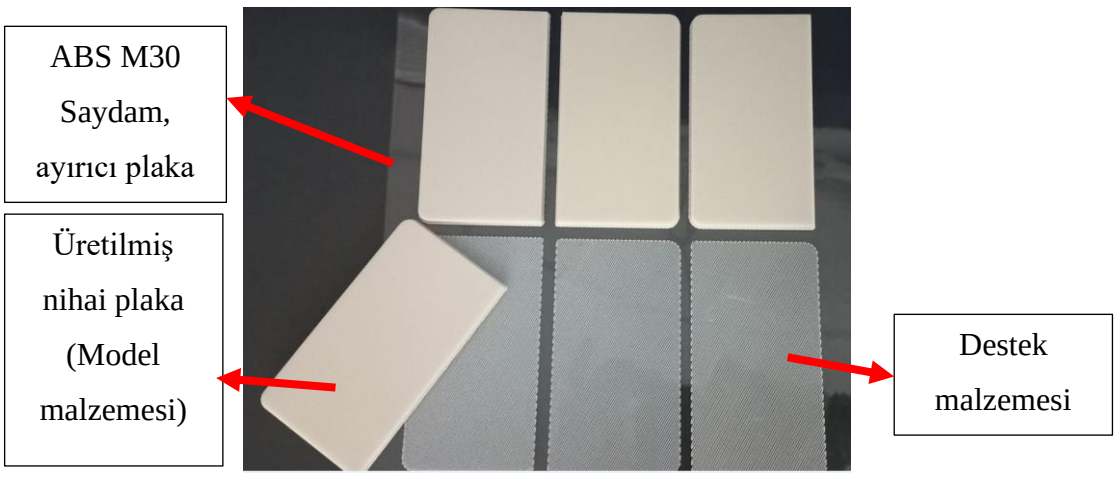


(a)



(b)

Şekil 3.9 Katmanlı üretim eksenleri (a) Fortus 400 MC eksenlerinin gösterimi (b) Eksenel gösterim.

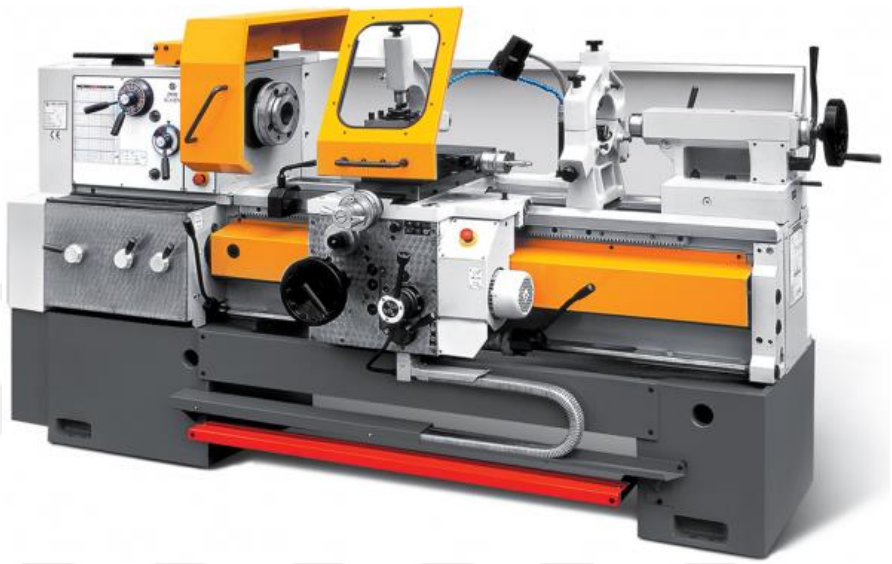


Şekil 3.10 Üretilmiş nihai plakalar.

3.3 Takım Ucu üretimi

3.3.1 Üniversal torna

Takım üretimi Şekil 3.11'de gösterilen ZMM Bulgaria CU500 üniversal torna tezgahı ile yapılmıştır.



Şekil 3.11 ZMM Bulgaria CU500.

3.3.2 Takım malzemesi

Takım malzemesi olarak Şekil 3.12'de gösterildiği gibi silindirik St37 çeliği kullanılmıştır.

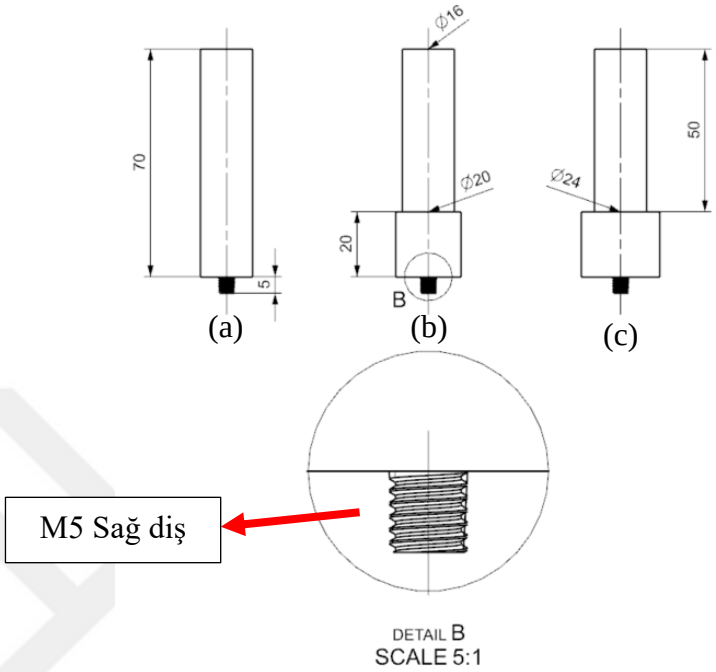


Şekil 3.12 Silindirik St37 çeliği.

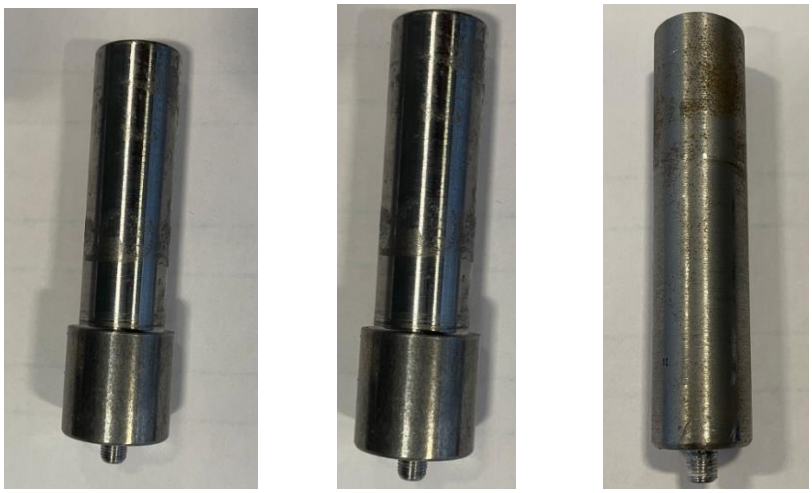
3.3.3 Takım tasarımı

Hajideh ve Alavi'nin (2017) yaptığı araştırmaya göre diş açılmış silindirik uc ile yapılan sürtünme karıştırma kaynağının sonucu en iyi çıkmıştı. Bu çalışmada da M5 diş açılmış 5 mm uzunluğunda uc seçilmiştir. Bunun yanında seçilen parametrelerden biri de takım

omuz çapı idi. 5 mm takım ucuna sahip 16, 20 ve 24 mm omuz çapına sahip üç takım NX'te tasarlandı ve üniversal torna tezgahında üretilmiştir. Şekil 3.13'te takımların teknik resimleri mevcuttur. Şekil 3.14'te ise üretilmiş takımların resimleri görünmektedir.



Şekil 3.13 Deneysel çalışmada kullanılan takımların teknik resimleri Omuz çapı 16 mm , (b) Omuz çapı 20 mm, (c) Omuz çapı 24 mm.



(a) (b) (c)

Şekil 3.14 Deneysel çalışmada kullanılan takımlar Omuz çapı 16 mm , (b) Omuz çapı 20 mm, (c) Omuz çapı 24 mm.

Üretilmiş olan bu takımlar Mazak VTC 300C II CNC dik işleme merkezinde kurulan bir düzenek ile sürtünme karıştırma kaynağında kullanılmıştır.

3.4 Freze Tezgâhı

Bu tez çalışmasında Şekil 3.15'te gösterilen Mazak VTC 300C II üç eksen CNC dik işleme merkezinde kullanılmıştır.



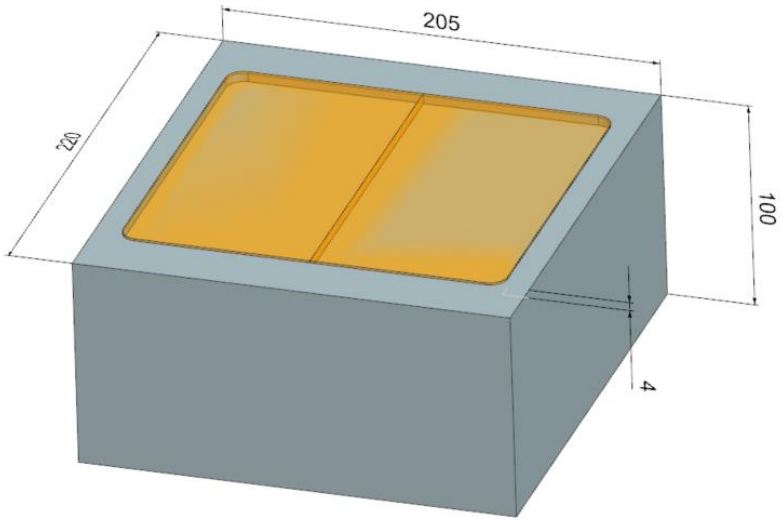
Şekil 3.15 Mazak VTC 300C II üç eksen CNC dik işleme merkezinde.

Üretilen ABS M30 plakaları CNC dik işlem merkezine bağlamak için poliüretan bir kalıp tasarlanıp üretilmiştir. Bu kalıp üzerine plakalar pabuçlar yardımı ile bağlanmıştır.

Kalıp tasarımı ve sürtünme karıştırma kaynak girdileri (CNC kodları) NX CAM yardımı ile oluşturmuştur. Oluşturulan bu kodlar için post oluşturulmuş ve makine diline çevrilip deney çalışmaları yapılmıştır.

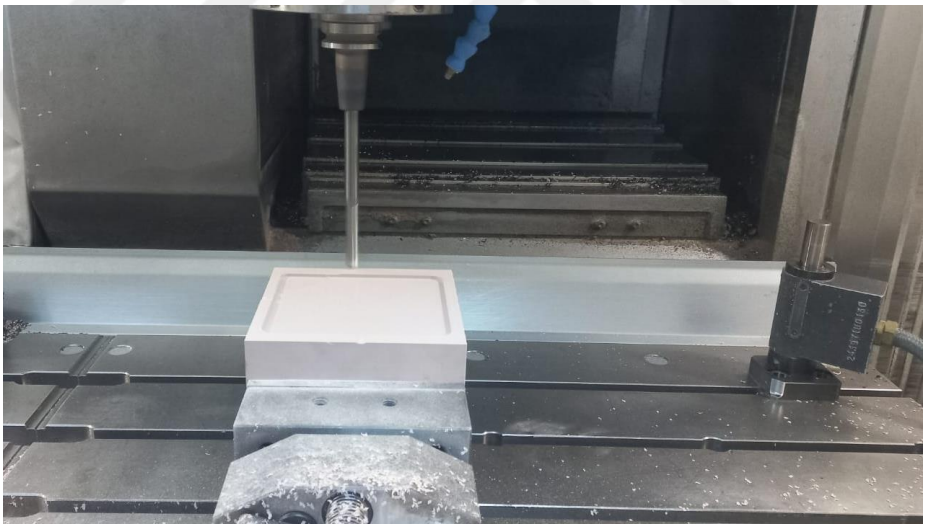
3.5 Parça Sabitleme Kalıbı

Poliüretan malzemeden katmanlı üretimle üretilen numunelerin sığabileceği şekilde tasarlanmış bir sabitleme kalıbı üretilmiştir. Teknik datası Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 Sabitleme kalıbının yapım resmi.

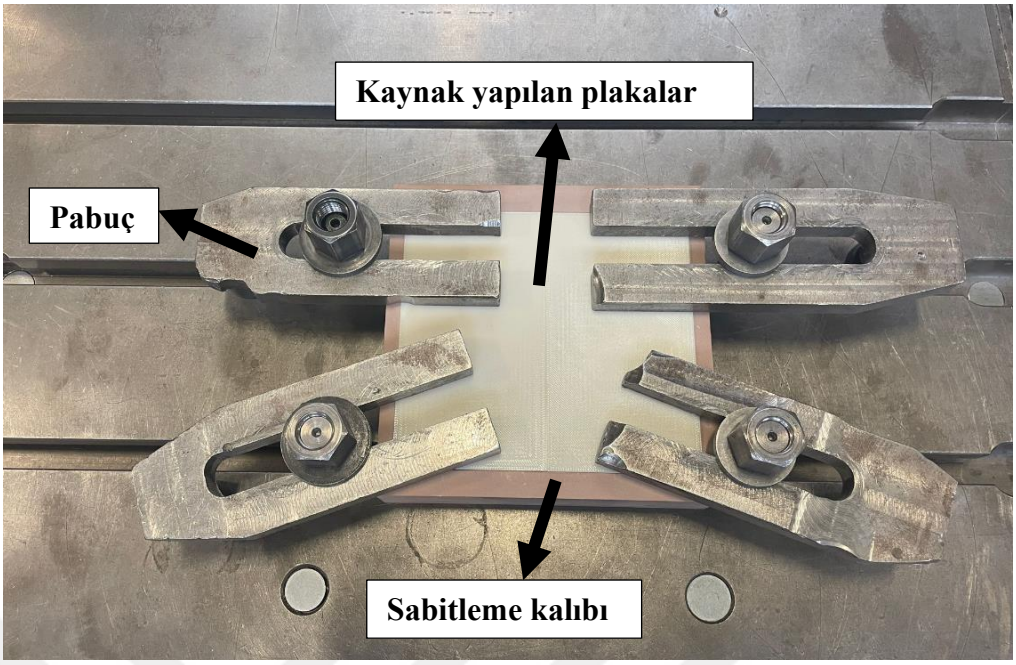
Sabitlenme kalıbının üretimi aşaması Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17 Sabitleme kalıbının CNC dik işleme merkezinde işlenmesi.

3.6 ABS M30 Plakaların CNC Dik İşlem Merkezinin Tablasına Sabitlenmesi

ABS plakasının kalıp içerisine yerleştirilir ve kalıpta CNC dik işleme merkezi üzerine pabuçlar yardımı ile sabitlenir. Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 Plakaların kalıp ve pabuçlar yardımı ile CNC dik işleme merkezinin tablasına sabitlenmesi.

3.7 SKK İle Plakaların Birleştirilme İşlemi

Parçalar tabla üzerinde sabitlendikten sonra dik işlem merkezinin fener miline Şekil 3.19'daki gibi takım bağlanır.



Şekil 3.19 Takımın frezeye bağlanması.

Taguchi metodu ile belirlenmiş parametreler için her deney nezdinde NX'te CAM (G kodları) hazırlandı, CAM içerisinde takımın plakalara gireceği ve çıkacağı nokta, ilerleme hızı ve dönme hızları tanımlanmıştır. Takım dönme yönü ise, metrik sağ helis kullanıldığından dolayı saat ibresinin tersi yönünde tanımlanmıştır.

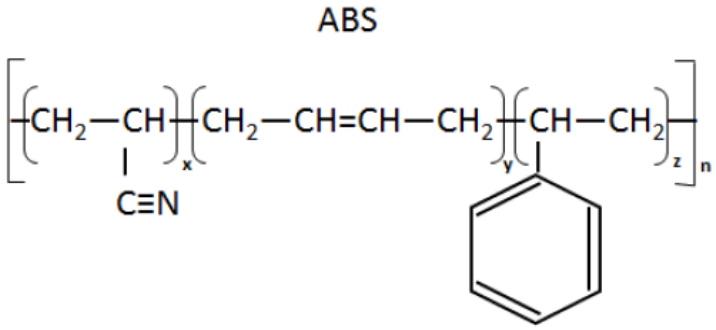
SKK'nın yapılışı Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Kaynak işlemi için iki plaka alın alına sabitlenmiştir. Takım yüzeylerin örtüştüğü çizgi boyunca ilerletilmiş ve takım ucu ile plakalar arasında sürtünmeden oluşan ısı ile kaynak yapılmıştır.



Şekil 3.20 SKK'nın yapılışı

3.8 ABS M30 Malzemesinin Teknik Özellikleri

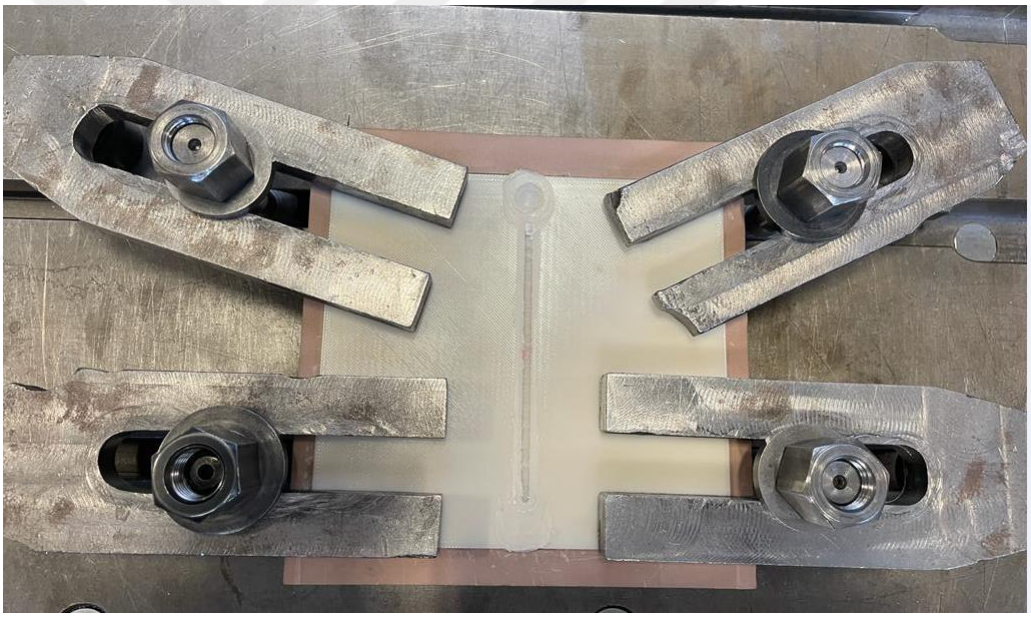
ABS M30'un kimyasal yapısının gösterimi Şekil 3.21'de verilmiştir. Stratasys firmasından alınan ABS M30 teknik data dokümanına baktığımızda ABS M30 malzemesinin T_g sıcaklığı 105 ºC'dir. T_e sıcaklığı ise 180 ºC'dir. Mekanik değerleri bulgular kısmında bulunmuştur. Kimyasal formülü $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$' dir.



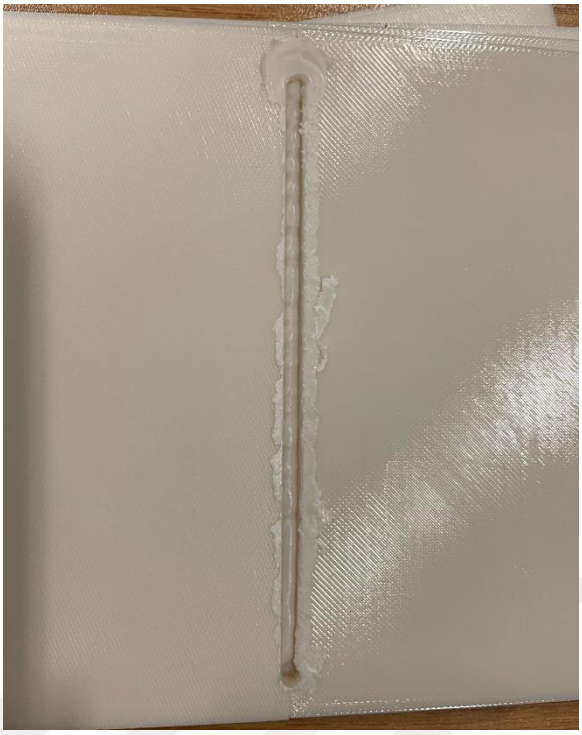
Şekil 3.21 ABS'nin Kimyasal yapısı (Karki ve Turku, 2018).

3.9 SKK İle Birleştirilmiş Parçalar

Kaynak işlemi tamamlanmış ve birleştirilmiş bir numune şekil 3.22' gösterilmiştir.



(a)



(b)

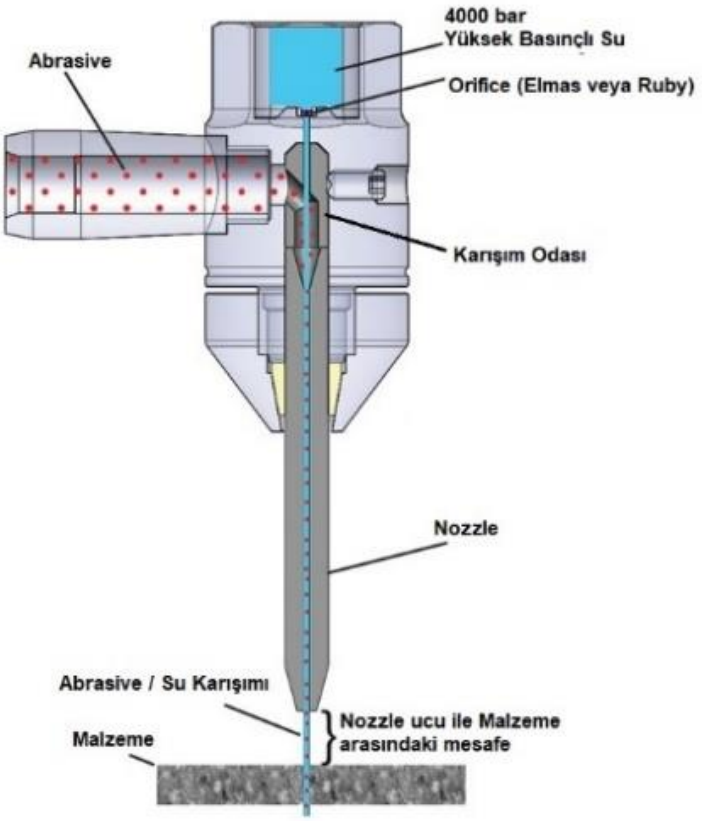
Şekil 3.22 Katmanlı imalatla üretilmiş ve SKK ile birleştirilmiş bir çift plaka (a) Numune tablaya bağlı iken, (b) Numune tabladan çıkartıldıktan sonra.

3.10 Çekme Numunelerin Su Jeti İle Kesimi

Hassas kesim yapmanın yöntemlerinden biri de su jeti ile kesimdir. ABS M30 termoplastik bir malzeme olduğundan ve ısıdan etkilendiğinden dolayı plakalardan çekme numunesi kesilmesi için malzemenin yapısına zarar vermeden ve düzgün bir kesim yapılabilmesi için su jeti ile kesim tercih edilmiştir.

Lazer kesim daha hassas bir kesim olabilir lakin ABS M30 parçayı eriteceğinden dolayı kullanılmamıştır.

Su jeti ile kesim yönteminde yüksek basınçlı su içerisine çok küçük boyutlardaki kum tanecikleri karıştırılarak hassas bir kesim sağlanır. (Şekil 3.23)



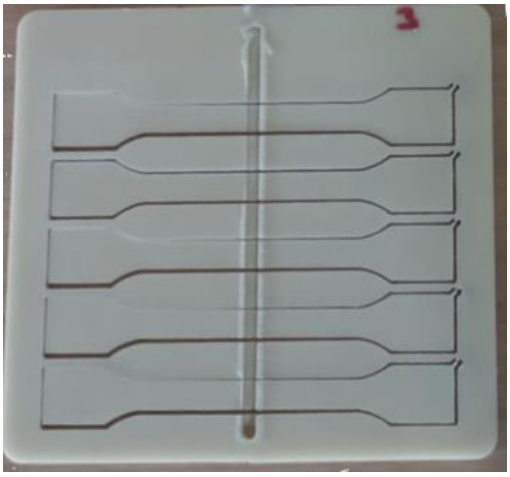
(a)



(b)

Şekil 3.23 Numunelerin kesimi (a) Su jeti ile kesim prensibi, (b) Su jeti ile kesme.

Kaynak yapılıp, su jeti ile kesilmiş numuneler Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24 SKK ile birleştirilmiş ve su jeti ile kesilmiş plakalar.

3.11 Kaynak Bölgesinin İncelenmesi İçin Yapılan Testler ve Kullanılan Cihazlar

3.11.1 Çekme testi için üniversal çekme cihazı

Bir malzemenin mekanik değerlerini bulmak için en yüksek gerilme kuvveti, gerilme deplasman grafiği vb. bulmak için kullanılan testtir.

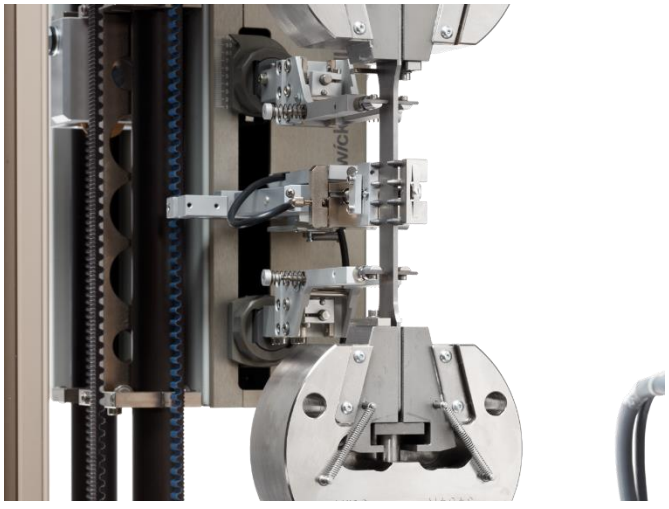
Çekme testleri 10 mm/dk ile ISO527 standardına göre yapılmıştır. Gerilme değeri N/mm^2 türünden bulunmuştur. Bu test ile ABS M30 malzemenin kaynak yapılmamış halinin ve kaynak bölgesinin en yüksek gerilme değeri ile elastisite modülü bulunmuş ve kuvvet deplasman grafiği oluşturulmuştur.

Bu test için Şekil 3.25'te gösterilen Zwick roell Z010 çekme test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.25 Çekme testi için kullanılan çekme cihazı (Zwick roell Z010).

Çekme testi sırasında deplasman değerini ölçmek için ekstansometre kullanılmıştır. Ekstansometre Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26 Çekme testi için kullanılan uzunluk değişim ölçüm cihazı (Ekstansometre)

3.11.2 Numunenin görüntülenmesi için (Optik Mikroskop)

Kaynak bölgelerinin detaylı incelenmesi için Zeiss 50X stereoskop görüntü büyütme cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27 Zeiss 50X stereoskop görüntü büyütme cihazı

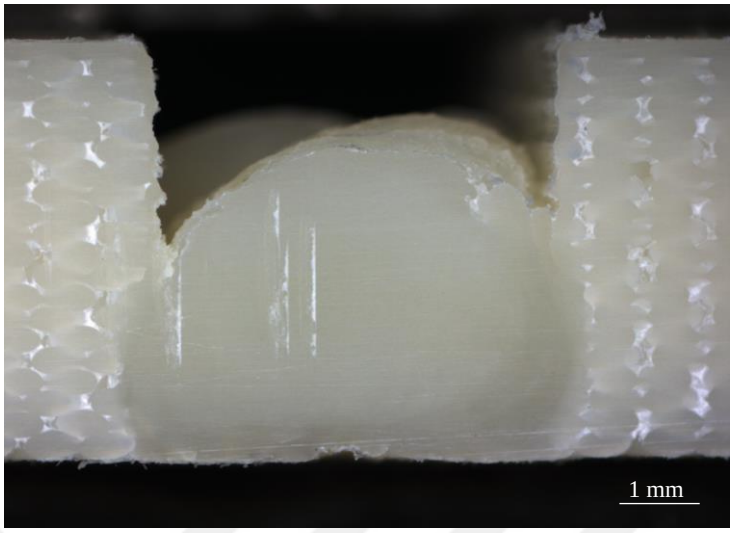
3.11.3 Numunenin görüntülenmesi için yüzeylerin hazırlanması (Zımparalama)

Kaynak bölgelerinin net bir şekilde görüntülenebilmesi için kaynak bölgelerinin temizlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kâğıt zımparalarla hassas temizlik yapılarak yüzeyler temizlenmiştir. İlk önce P400 ile kaba işlem yapılmış daha sonra yüzey P800 ile pürüzsüz hale getirilmiştir. En sonda P1500 ile nihai parlatma yapılmıştır. Zımpara kağıtları Şekil 3.28'da gösterilmiştir.



Şekil 3.28 P400**,** P800 veP1500 zımpara kağıtları

Zımpara yapılmış örnek bir numune Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Zımpara yapılmış örnek ABS M30 kaynak yüzeyi

3.11.4 Yoğunluk terazisi

FDM ile üretilmiş bölge ile kaynak bölgesinin yoğunluk farklılıklarını ölçmek için sıvı taşırma yöntemi ile yoğunluk ölçen, Şekil 3.30'da gösterilen Sartorius marka yoğunluk ölçüm terazisi kullanılmıştır. Bu terazide sıvı olarak etil alkol kullanılmaktadır.



(a) (b) (c)

Şekil 3.30 Yoğunluk Ölçümü (a) Yoğunluk terazisi, (b) FDM numunesi ölçümü, (c) Kaynak parçası numune ölçümü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 FDM Eklemeli İmalata Ait Bulgular

4.1.1 3B cihazının kalibrasyonu

Kullanılan cihazın iyi bir şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibre hatası olduğu durumlarda destek maddesi iyi örülmeyebilir, model malzemesinin katmanları arasında kaçıklık, sapmalar oluşabilir. Bu gibi problemler parçanın hatalı üretilmesine sebep olacaktır.

4.1.2 Tabla sıcaklığı ve ortam sıcaklığı

FDM üretim mantığında malzeme ergitilerek katman katman üst üste eklenerek üretim sağlanmaktadır. Bu aşamada ABS M30 filamentler T_e sıcaklığında ergitilir. Daha düşük bir sıcaklığa sahip olan tabla üzerine, daha önceden programla tanımlanmış desen doğrultusunda üretime başlar. Malzeme iyi ergitilmezse ya da döküm yapılan plakanın sıcaklığı malzemeyi kademeli bir şekilde soğutacak şekilde kalibre değilse, iyi bir üretim gerçekleşmez.

4.1.3 Model malzemesi ve destek malzemesi

Bu çalışmada Stratasys destek ve model malzemesi kullanılmıştır Şekil 4.1. Filamentler hava ve neme temas etmeyecek şekilde kapalı kutularda saklanmakta ve bu şekilde cihaza bağlanmaktadır. Hava veya nem ile temas etmiş ise, yapılan baskı kaliteli olmaz, plakalarda çarpılmalara neden olabilir.



Şekil 4.1 Deneysel çalışmada kullanılan model ve destek malzemesi.

4.2 Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi

Deneysel çalışma için parametre seçimi yapılırken literatürden yararlanılmıştır. Kumar'ın 2016, 2017, 2018, 2020, 2021'de, Hajideh'ın 2017'de, Ülker'in 2015, 2018, 2020'de ve Bozu'nun 2020'de termoplastiklerin SKK yöntemi birleştirilmeleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmalarda çeşitli termoplastikler için SKK kaynağında takım dönme hızını 1000-2800 dev/dk arasında ilerleme hızı 12.5 ile 60 mm/dk, takım omuz çapının ise 16-24 mm arasında alınıp pim çapı ise 5-12 mm arasında alınıp deneyler yaptığı görülmüştür.

Bu deneysel çalışmada da ilk önce;

(a) Omuz çapı 16, 20, 24 mm
(b) Takım dönme hızı 1000, 1500, 1800 dev/dk
(c) İlerleme hızı 15, 25, 40 mm/dk olarak seçilmiştir.
(d) Takım dönme yönü de literatürde belirtildiği gibi sağ diş vida için saat yönünde seçilmiştir. (Ülker, 2015)

Taguchi metodu ile deney parametreleri Çizelge 4.1'deki gibi tasarlandı ve deneyler yapılmıştır.

Çizelge 4.1 Taguchi metodu ile belirlenmiş ilk deney parametreleri

Deney No	Takım Dönme Hızı (Devir/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Takım Omuz Çapı (mm)
1	1000	40	24
2	1000	15	16
3	1000	25	20
4	1500	40	16
5	1500	25	24
6	1500	15	20
7	1800	15	24
8	1800	25	16
9	1800	40	20

4.2.1 Takım dönme yönü

Takım saat ibresinin yönünde döndürüldüğünde, pim ile plakalardan aşındırılan partiküller direkt yukarıya doğru çıkmıştır. Ergimenin gerçekleşmesi için aşındırılan partiküller plaka yüzeyleri ile pim arasında sıkışıp sürtünme ile oluşan ısı yardımıyla ergimiştir. Detaylı incelendiğinde silindirik pime açılan M5 vida sağ helis olduğundan dolayı açısal olarak yukarıyı gösterdiği görülmüştür. Saat ibresi yönünde döndürüldüğünde ise bu helis açı nedeniyle aşındırılan partiküller dışarı doğru çıkmış ve başarılı bir kaynak olmamıştır. Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Düşük hızlarda aşındırılan partiküller dışarıya doğru çıkmış ve takım omzu ile parça arasında sıkışıp ergimiştir. Lakin başarılı kaynak görülmemiştir (Şekil 4.2, (a)). Yüksek hızlarda aşındırılan partiküller direkt dışarı atılmıştır. Kaynak görülmemiştir (Şekil 4.2, (b)).

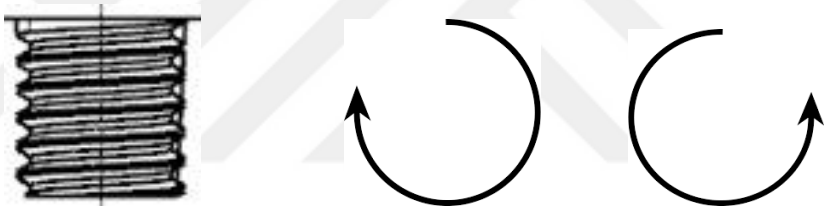
Şekil 4.3'te kaynak yönü ve helis yönleri gösterilmiştir.

Takım dönme yönü saat yönünün tersi olarak değiştirildiğinde Şekil 4.4'teki gibi başarılı bir kaynak gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



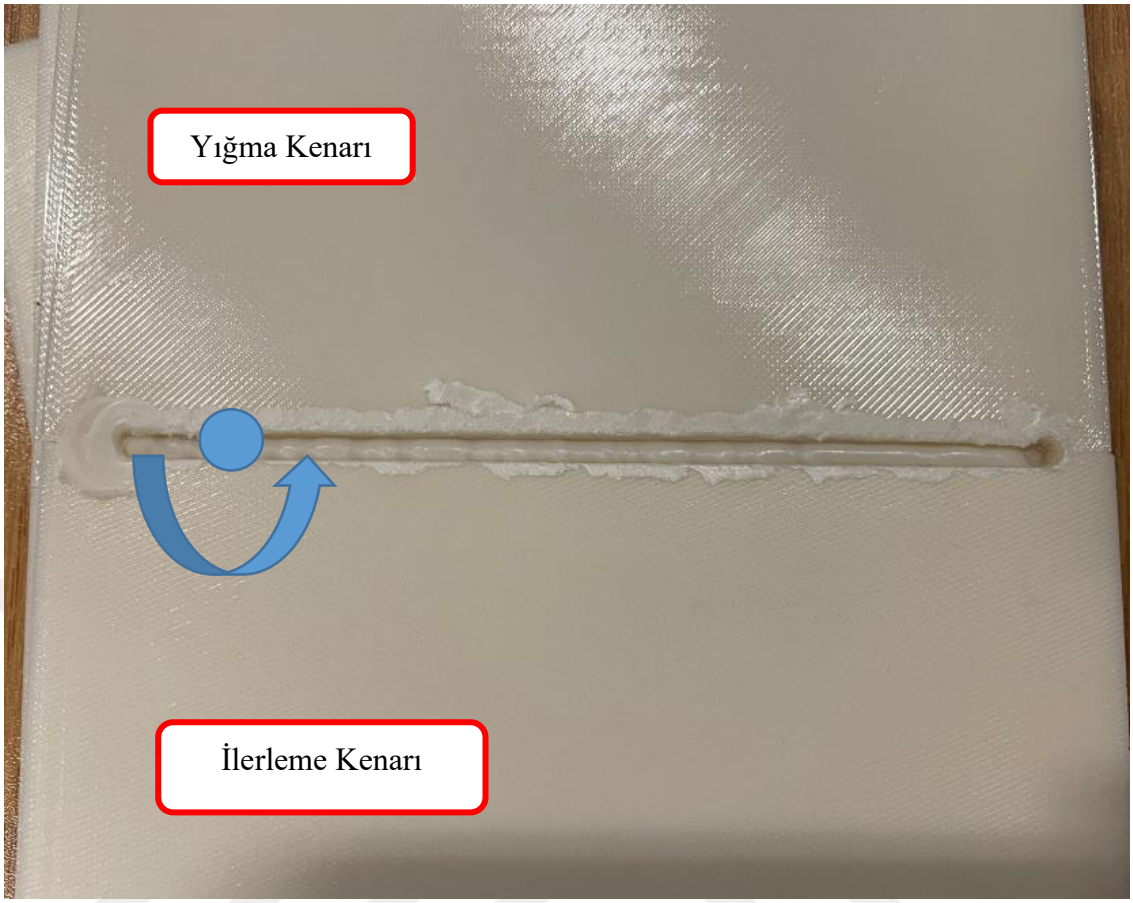
(a) (b)

Şekil 4.2 Saat ibresi yönünde kaynak sonuçları (a) Düşük hızlarda yapılan kaynak (b), Yüksek hızlarda yapılan kaynak.



(a) (b) (c)

Şekil 4.3 Vida yapısı (a) M5 sağ vida helis, (b) Saat ibresi yönü, (c) Saat ibresi yönün tersi.



Şekil 4.4 Takım dönme yönü saat yönün tersine alındığında kaynak sonucu.

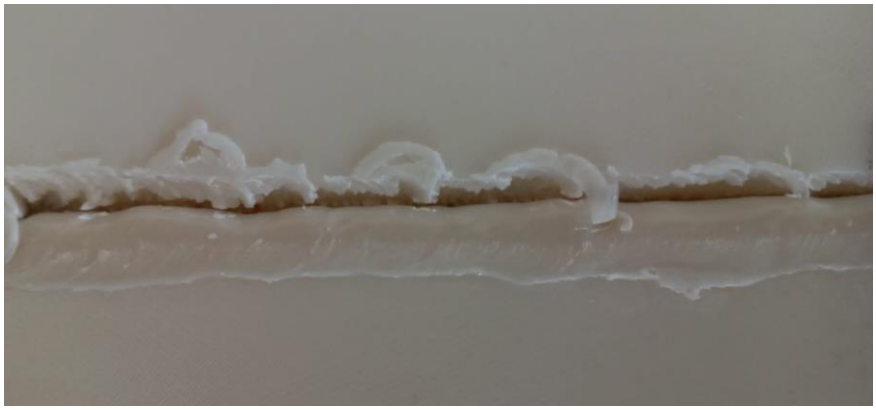
Kaynak yönü bu şekilde belirlenmiş ve tüm deneyler için bu yön kullanılmıştır.

İlerleme kenarı takımın malzemeyi koparttığı, yığma kenarı ise kopartılan malzemenin toplandığı kenar olarak belirtilebilir.

4.2.2 Takım dönme ve ilerleme hızı

Takım dönme hızı arttıkça temas bölgesinde sürtünme artmakta ve kaynak bölgesinde genişlemeye rastlanmıştı (Şekil 4.5).

1500 ve 1800 dev/dk'da seçilen tüm ilerleme hız değerlerinde kaynak olmadığı sadece parçanın doğrultuları boyunca eritildiği gözlemlenmiştir.



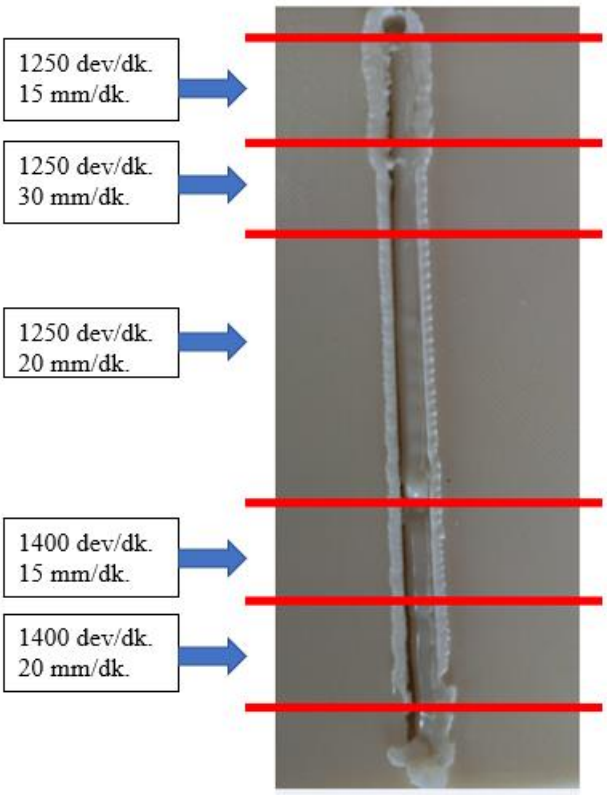
Şekil 4.5 Takım dönme hızının artması ile kaynak alanının genişlemesi ve başarısız bir kaynak deneyi (Devir 1500 dev/dk ilerleme 25 mm/dk, Omuz çapı 16 mm).

İlk etapta seçilen parametrelerle kaynak olamayacağı anlaşılmış ve kaynağın olabileceği değerleri bulmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar için omuz çapı 20 mm olan takım seçilmiştir (Diğer takımların omuz çapının ortalaması olduğundan). ilk etapta 1250 ve1400 dev/dk dönme hızları; 15, 20 ve 30 mm/dk ilerleme hızı olarak seçilmiştir.

Daha sonra bir çift plaka alınıp frezede belirtilen hızlarla kaynak yapılmıştır. Şekil 4.6'da görüldüğü seçilen parametreler için dönme hızı ve ilerleme hızları azaldıkça kaynak miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Aynı işlem diğer çeşitli kombinasyonlarda denenmiş ve kaynak yapılabilen parametreler belirlenmiştir. Çizelge 4.2'deki gibi nihai parametre aralığı belirlenmiştir.



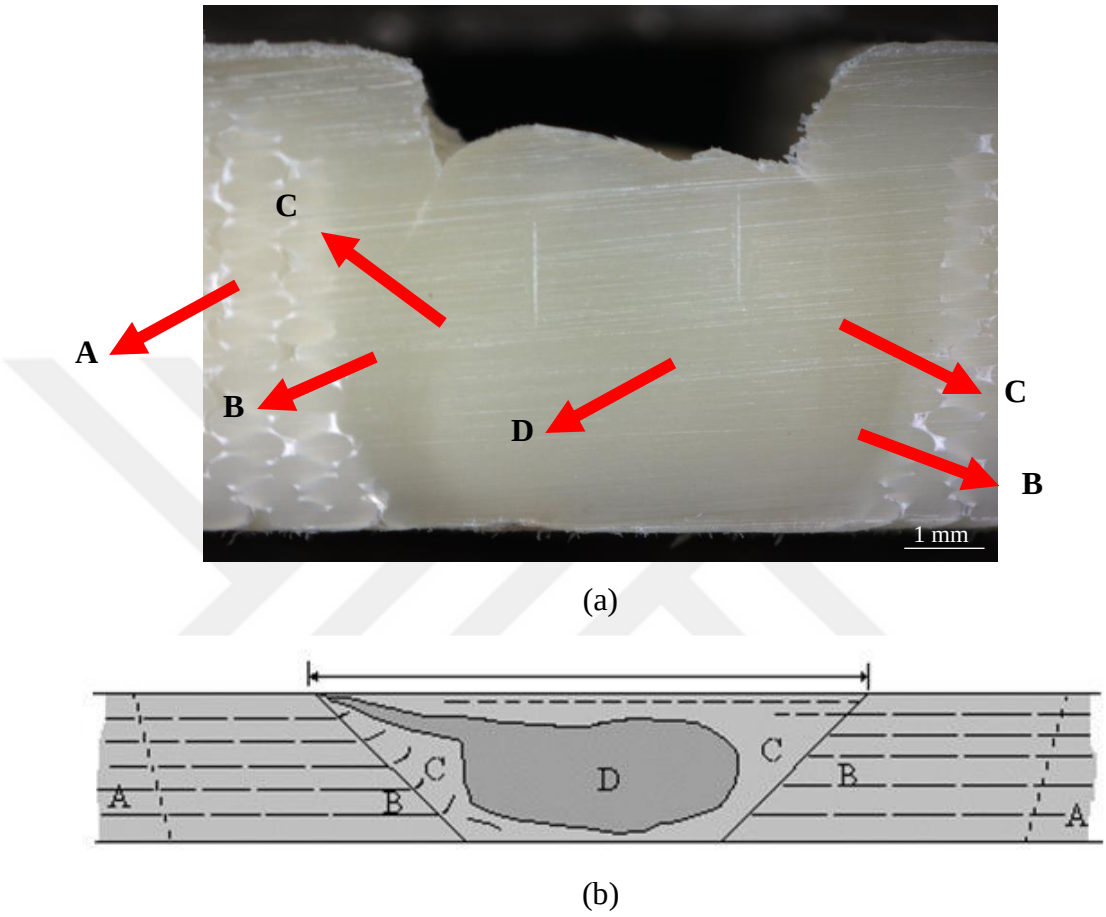
Şekil 4.6 Kaynak için ideal parametrelerin bulunması için kullanılan yöntem.

Çizelge 4.2 ABS M30 için kaynak yapılabilen parametre aralığı

Parametre	**Takım Dönme Hızı (dev/dk)**	**Takım İlerleme Hızı (mm/dk)**	**Takım Omuz Çapı (mm)**
1	800	10	16
2	1000	15	20
3	1200	20	24

4.3 Kaynak Bölgesinin Optik Mikroskop İle İncelenmesi

Kaynak bölgesinin kesit görüntüsüne Mikroskopla 10 kat büyütülerek bakıldığında şekil 4.7 görülmektedir.

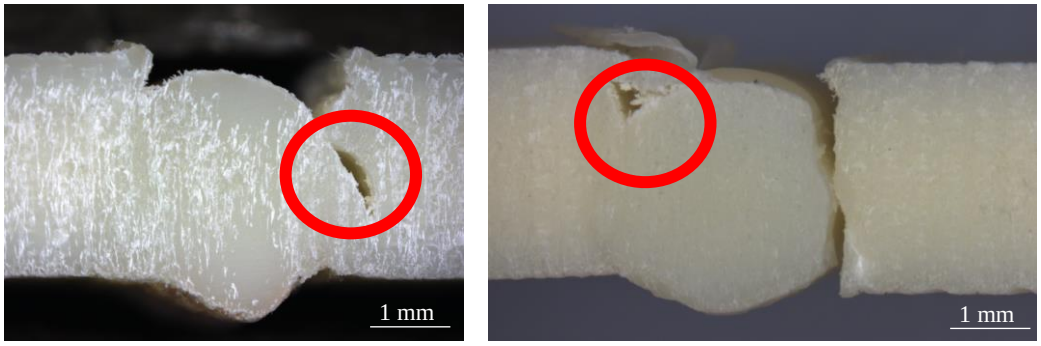


Şekil 4.7 SKK kaynak bölgesi mikroyapısının şematik gösterimi, (a) Deneysel çalışma sonucu elde edilen kaynak bölgesi görüntüsü, (b) Literatürde bulunan SKK kaynak bölgesi incelemesi (A- Isıdan etkilenmeyen bölge, B- Isının etkisi altında kalan bölge, C- Termomekanik olarak etkilenen bölge, D- Yeniden kristalleşmiş bölge) (Karagöz, 2014).

4.3.1 Kaynak bölgesinde tünel hatası

9. deney de 1200 devir/dk ve 20 mm/dk ilerleme de kaynak bölgesinde bazı yerlerde tünele benzer açıklara rastlanılmıştır. Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Tünel hatası yüksek hızlarda kaynaşma için yeterli süre bulunmadığında oluşur (Hajideh ve Alavi, 2017).



(a) (b)

Şekil 4.8 SKK kaynak bölgesi mikroyapısından tünel etkisi, (a) 1250 d/dk 20 mm/s, 16 mm, (b) 1200 d/dk, 10 mm/s, 24 mm

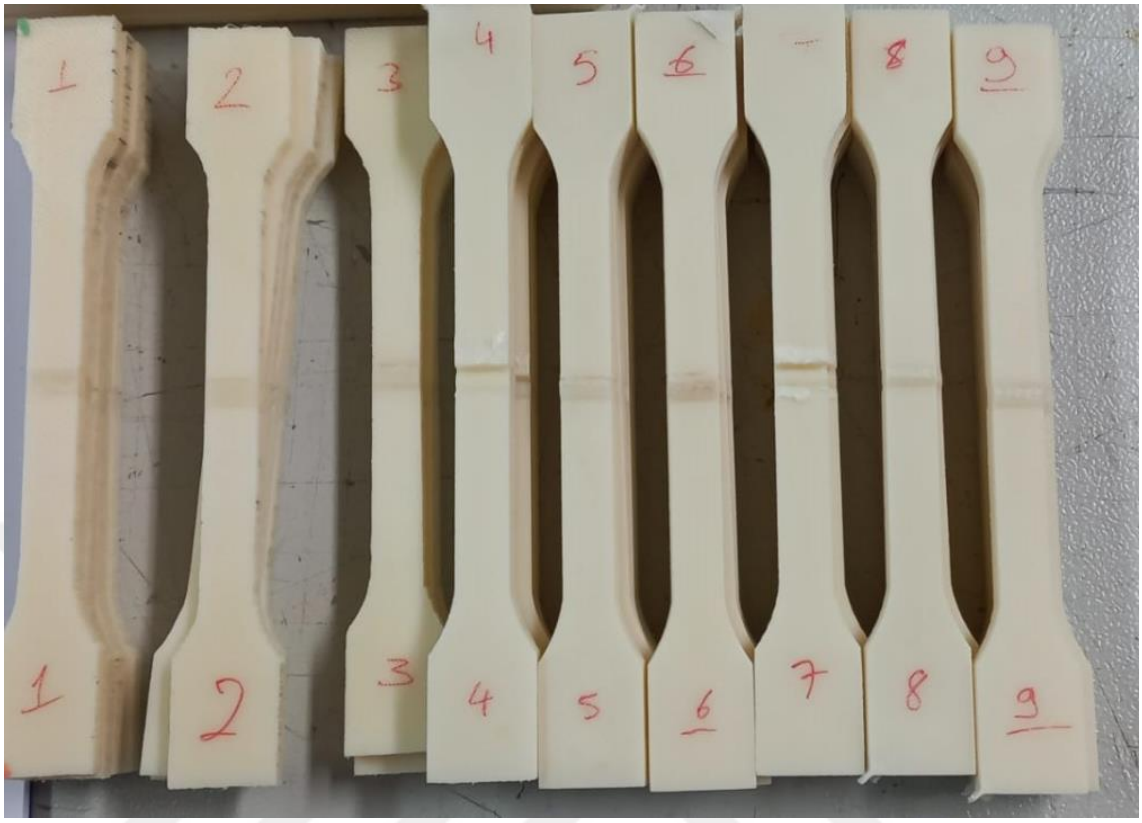
4.4 Çekme Testinin Sonuçlarının İncelenmesi

Çekme deneyleri Çizelge 4.3'te için Taguchi metodu ile oluşturulan deney parametreleri ile yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Taguchi metodu L9 ortogonal dizisi ile belirlenen deney değerleri

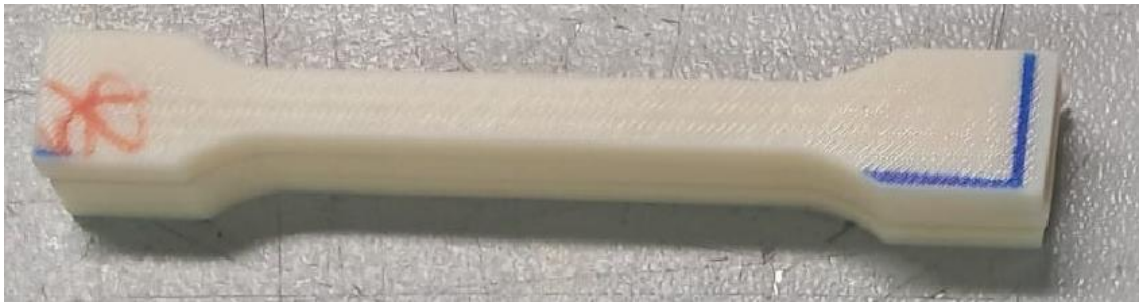
Deney No	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Takım Omuz Çapı (mm)
1	800	20	24
2	800	10	16
3	800	15	20
4	1000	20	16
5	1000	15	24
6	1000	10	20
7	1200	10	24
8	1200	15	16
9	1200	20	20

9 farklı kombinasyon için SKK deneyi yapılmıştır. Her bir deneyden su jeti ile kesim yapılarak 5'er tane numune çıkartılmıştır. Toplamda 45 adet çekme numunesi oluşturulmuştur. Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 SKK ile kaynatılmış çekme testi deney numuneleri

Ayrıca üç adet de kaynak yapılmamış ABS M30 plakası malzeme eklemeli imalattaki mukavemet değerlerini bulmak için kesilmiştir.



Şekil 4.10 SKK ile kaynak yapılmamış ABS M30 çekme testi deney numuneleri

Çekme testleri 10 mm/dk ile ISO527 standartına göre, Zwick roell Z010 çekme test cihazı ile yapılmıştır. Çekme test cihazının sonuç görüntüleme programı ise TestXpert II'dir. Çekme numunelerinin kopulmuş toplu görüntüsü Şekil 4.11'de verilmiştir.



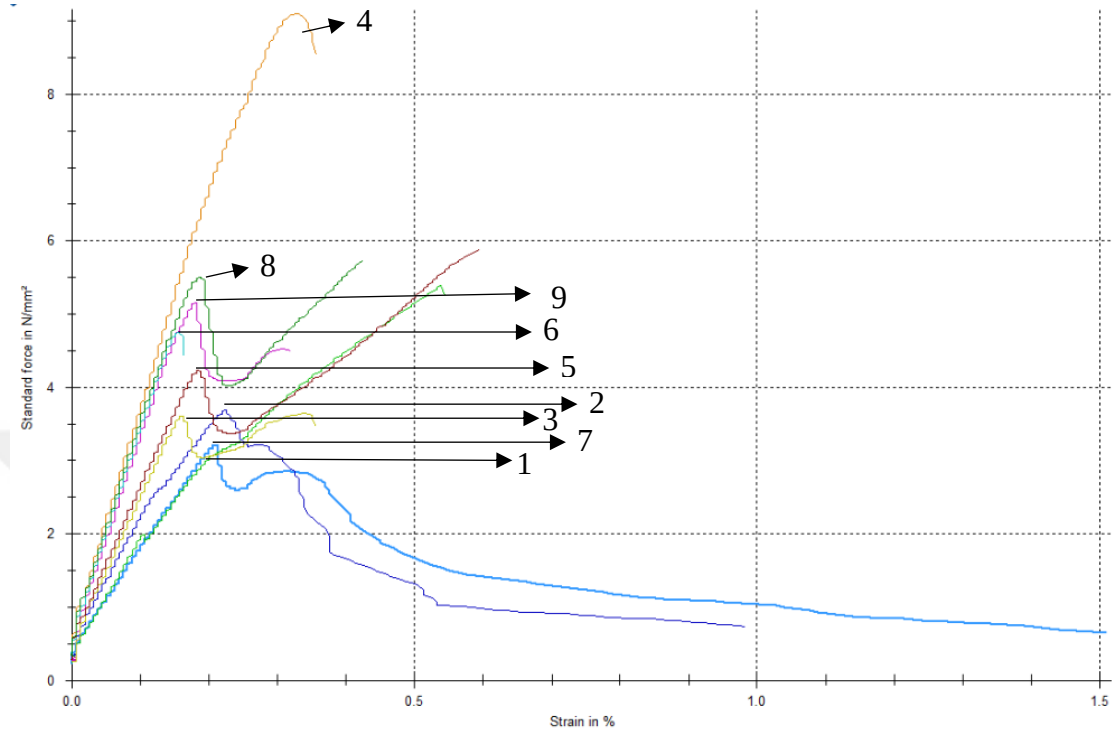
Şekil 4.11 Çekme numunelerinin Zwick roell Z010 ile çekildikten sonra kopulmuş hali

ABS M30 malzemesinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme deneyi sonucunda akma gerilme değeri sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 ABS M30 SSK Çekme deneyi sonuçları

Deney no	**Takım Omuz Çapı (mm)**	**Takım Dönme Hızı (dev/dk)**	**Takım İlerleme Hızı (mm/dk)**	**Gerilme (N/mm^2)**
1	20	800	15	3.17
2	20	1000	10	4.30
3	20	1200	20	3.82
4	16	800	10	9.80
5	16	1000	20	5.15
6	16	1200	15	5.50
7	24	800	20	3.50
8	24	1000	15	5.85
9	24	1200	10	5.70
(Kaynaksız numune)				27.5

Çekme deneyi sonuçlarının gerilme-yüzde uzama grafiği TestXpert II programından alındığı gibi Şekil 4.12'de verilmiştir.

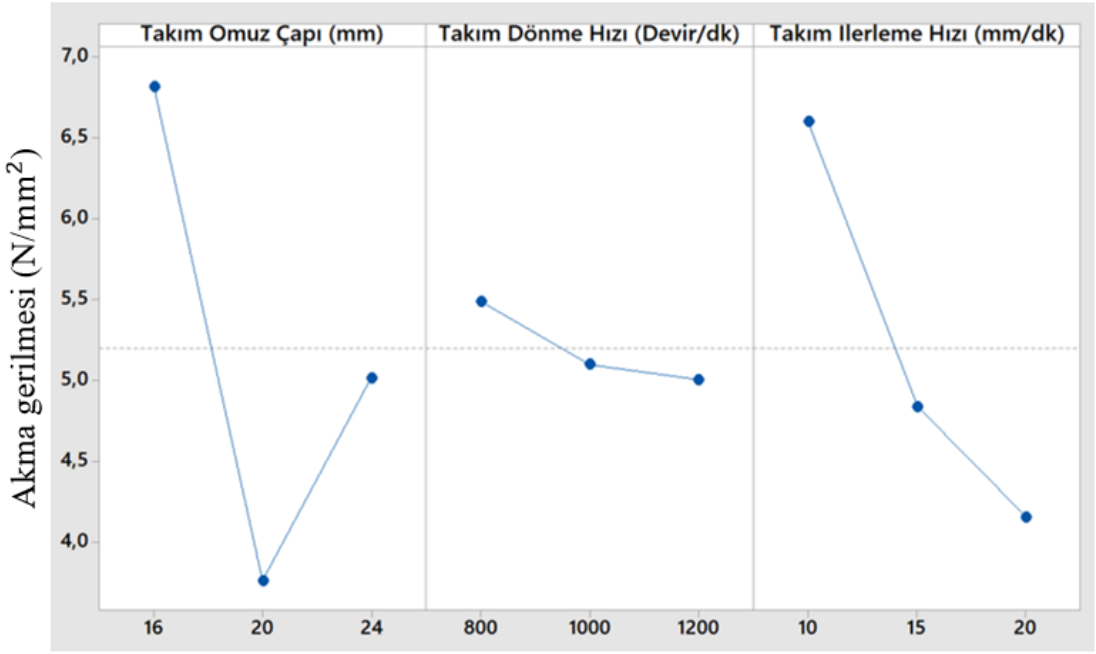


Şekil 4.12 SKK'ı ile birleştirilmiş ABS M30 numunelerin, çekme sonucu Gerilme -% Uzama grafiği.

Minitab programında Taguchi methodu ile ortalama cevap sonuçlarına bakıldığında, "en yüksek en iyidir" parametresine göre sonuçlar elde elildiğinde, her bir parametrenin birinci seviyesi en iyi çıkmıştır. Buradan omuz çapı 16 mm , takım dönme hızı 800 dev/dk ilerleme hızı 10 mm/dk olan deney şartlarının en iyi kombinasyon olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Ortalama cevap grafiği ise şekil 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 SKK için ortalama yanıt tablosu.

Level	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (Devir/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)
1	6,817	5,490	6,600
2	3,763	5,100	4,840
3	5,017	5,007	4,157
Delta	3,053	0,483	2,443
Rank	1	3	2



Şekil 4.13 Ana etki grafiği.

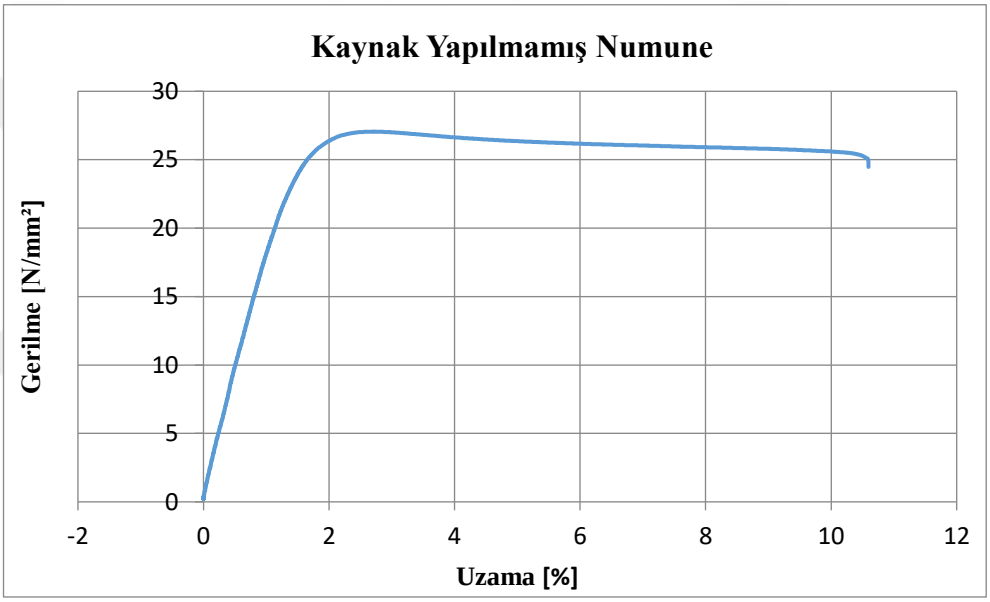
Taguchi sonuçları ve çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında rastgele bir şekilde, en yüksek akma kuvvetine sahip parametreler bulunmuştur. Bu değerler numune 4 için kullanılan omuz çapı 16 mm takım dönme hızı 800 devir/dk ve ilerleme hızı 10 mm/dk olan değerlerle aynı değerlerdir.

4.5 Kopma Bölgesinin İncelenmesi

4.5.1 Kaynak yapılmamış ABS M30 malzeme numunesi

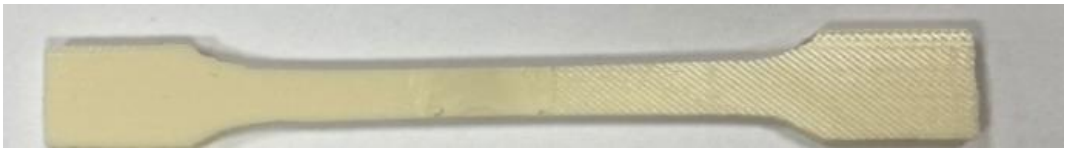
Standart çekme numunesi ile kaynak yapılmamış ABS M30 malzemesinden FDM yöntemi ile eklemeli imalatla üretilip çekme testi uygulanmış numunenin karşılaştırılması şekil 4.16'da gösterilmiştir. Bu şekilde üç numune üretilmiş ve test edilmiştir. Bulgular ise aşağıdaki gibidir.

- Kaynak yapılmamış numunenin Akma kuvveti 27.5 Mpa olarak ölçülmüştür. Gerilme-yüzde uzama grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir.

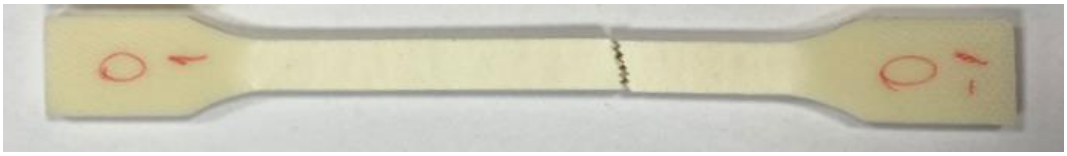


Şekil 4.14 Ekelemeli üretimde XY yönünde baskı yapılıp, aynı yönde çekme testine tabi tutulmuş kaynak yapılmamış ABS M30 numunenin gerilme-yüzde uzama grafiği.

- Çekme testinde en fazla uzama 8 mm olarak bu numunelerde görülmüştür.
- Şekil 4.16'da alttaki kopulmuş numunede olduğu gibi renk değişimi gözlemlenmiştir.
- Elastisite modülü Emod: 1910.19 N/mm^2 olarak bulunmuştur.



(a)

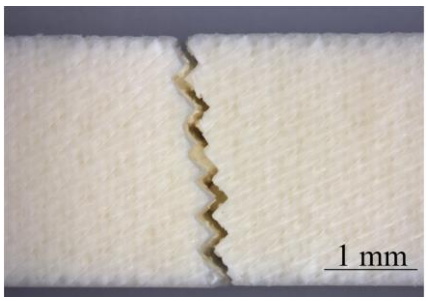


(b)

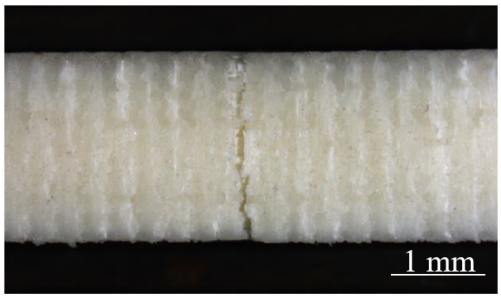
Şekil 4.15 ABS M30 malzemesinden FDM eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş ve kaynak yapılmamış numuneler. (a) Çekme testi uygulanmamış numune, (b) Çekme testi sonucu kopmuş numune.

Kopma bölgesinin 10 kat büyütmeyle çekilmiş resimleri Şekil 4.16 da verilmiştir.

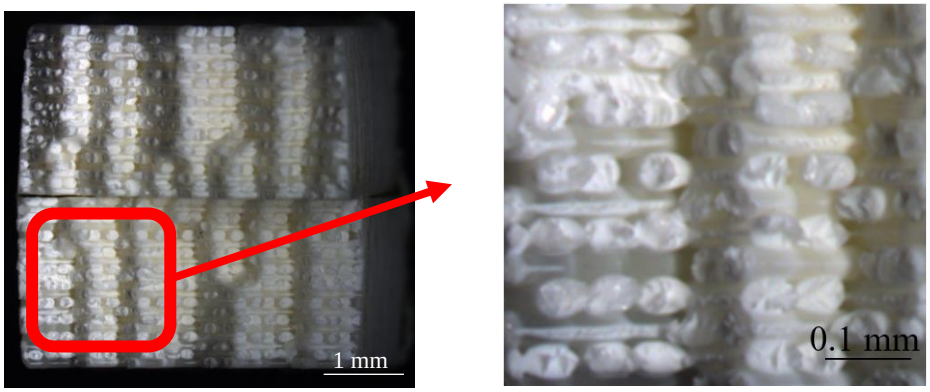
- Kopma bölgesine bakıldığında zikzaklı bir kopma göstermiştir. (Şekil 4.16-a)
- Yandan bakıldığında doğrusal olmayan bir kopma görünmektedir. (Şekil 4.17-b)
- Kopma bölgelerinin alınları yan yana getirilip bakıldığında filamentlerin katman sıralandığı görülmektedir. Kopma alınlarına daha detaylı bakıldığında kopma şekli bölgesel olarak farklılık göstermekte ve filament alınlarındaki kopmalar da farklı görülmektedir (Şekil 4.17-d). Yani anizotropik bir yapı görülmektedir.



(a)



(b)



(c) (d)

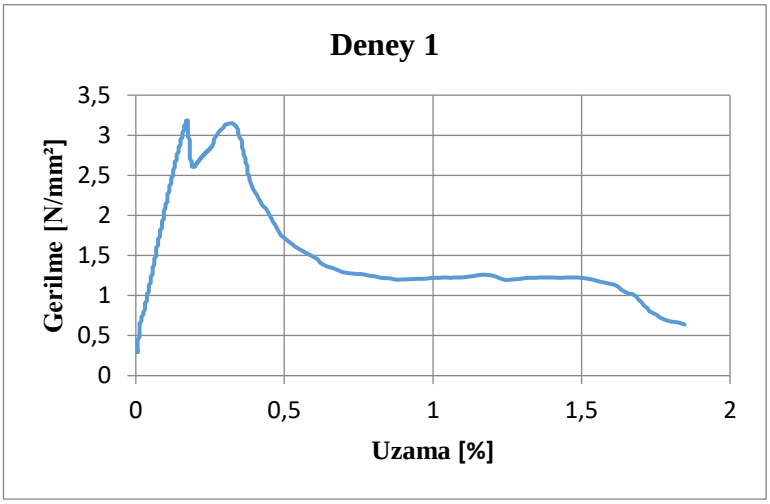
Şekil 4.16 Kaynak yapılmamış numunenin kopma davranışı (a) kopma bölgesi üstten görüntüsü, (b)kopma bölgesi yandan görüntüsü, (c) kopma bölgelerinin alın görüntüsü, (d) Alın bölgesine detaylı görünüşü.

4.5.2 Deney 1'in incelenmesi:

Deney 1'in SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Gerilme-yüzde uzama şekil 4.17'de gösterilmiştir. Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi ise Şekil 4.18'de verilmiştir.

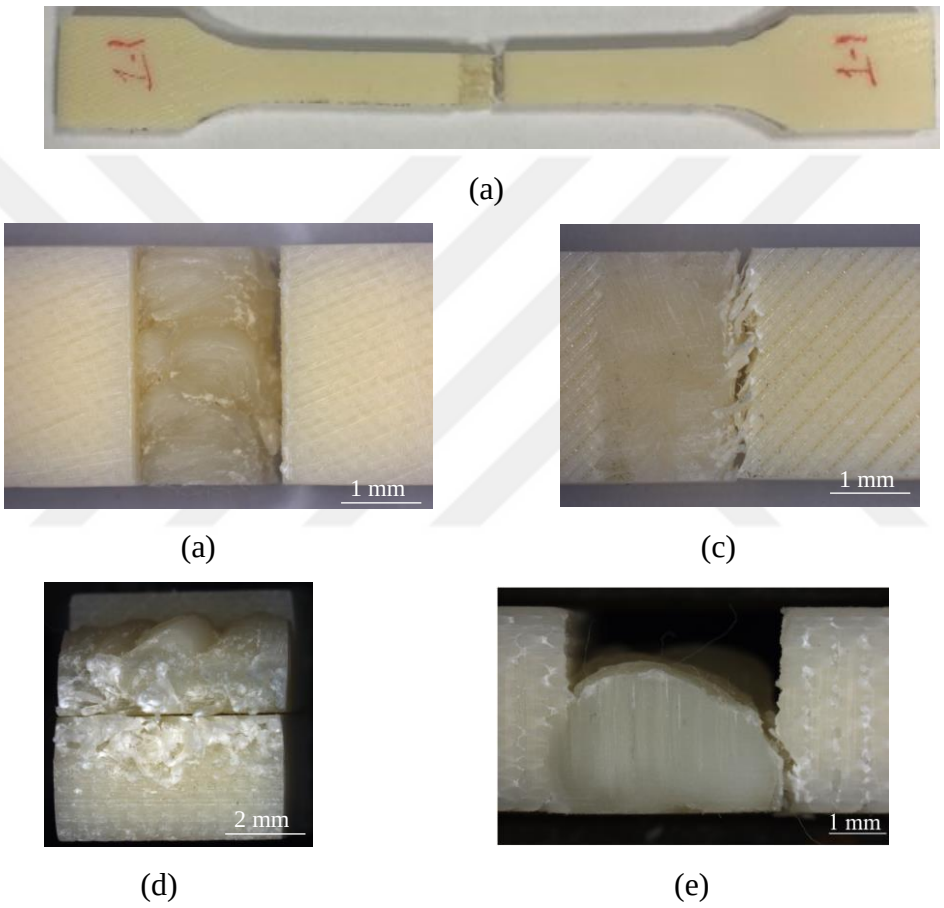
Çizelge 4.6 Deney 1'in değerleri

Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
20	800	15	3,17



Şekil 4.17 Deney 1'in gerilme-yüzde uzama grafiği.

Kaynak bölgesine bakıldığında Şekil 4.18-a'da kopma görülmektedir. Şekil 4.18-b'de kaynak bölgesine üstten bakıldığında ergimenin olduğu lakin sıralı bir şekilde devam etmediği gözlemlenmiştir. Şekil 4.18-c'de filamentlerin lif şeklinde uzadığı ve kopulduğu görülmektedir. Şekil 4.18-d'de ve Şekil 4.18-e'de görüldüğü üzere ilerleme tarafında daha iyi bir kaynama lakin yığılma tarafından daha az bir birleşme görülmektedir. Bu nedenle kopma yığılma tarafından gerçekleşmiştir. Şekil 4.18-e'de dolu bir kesitin olmadığı ve aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.18 Deney 1 numunesinin mikroskop ile incelenmesi. (a) Numunenin üstten genel görüntüsü (X10) , (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

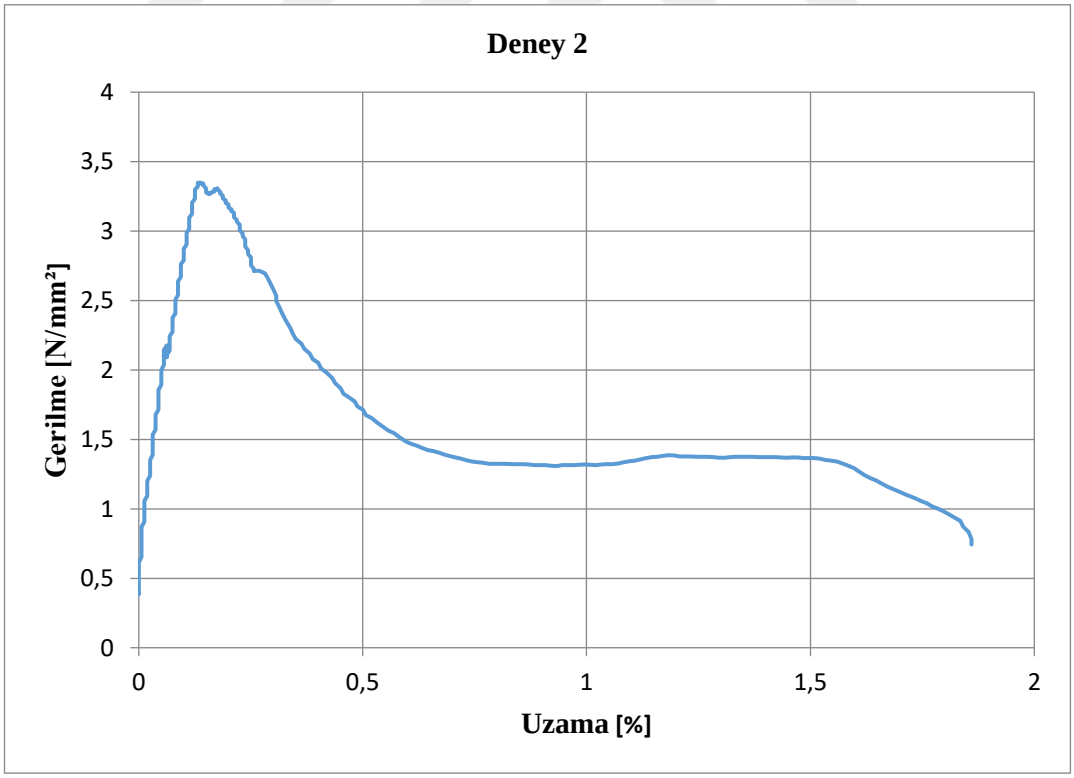
4.5.3 Deney 2'in incelenmesi:

Deney 2'in SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler çizelge 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.19 gerilme-uzama grafiği verilmiştir. Gerilme-yüzde uzama grafiğinde akma noktasından sonra boyun vermeye başladığı gözlemlenmiştir. Lakin boyun verme birkaç seferde gerçekleşmiştir. Bu da katmanlı üretimde bazı lifler koptuğunda diğerlerinin hala bağlı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.21-c'de resminde lif şeklindeki kopmalara rastlanılmaktadır.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.20'de verilmiştir.

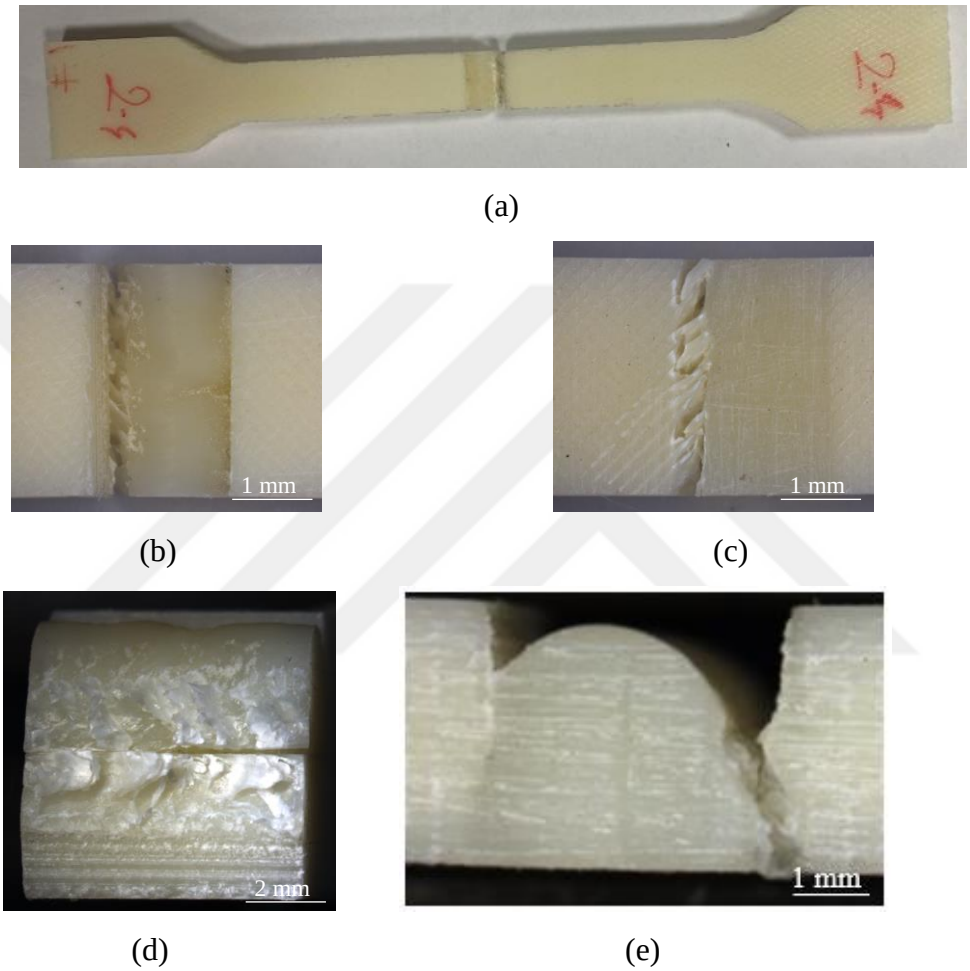
Çizelge 4.7 Deney 2'nin değerleri.

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
2	20	1000	10	4,30



Şekil 4.19 Deney 2'nin gerilme-yüzde uzama grafiği.

Kaynak bölgesine bakıldığında resim (c) de kopma bölgesinde parçanın lif şeklinde uzadığı ve kopulduğu görülmektedir. Resim (e) de deney 1'deki dolgudan daha dolu bir kestin olduğu ve aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden gerçekleştiği görülmüştür.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Şekil 4.20 Deney 2'nin mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir resmi, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

4.5.4 Deney 3'ün incelenmesi:

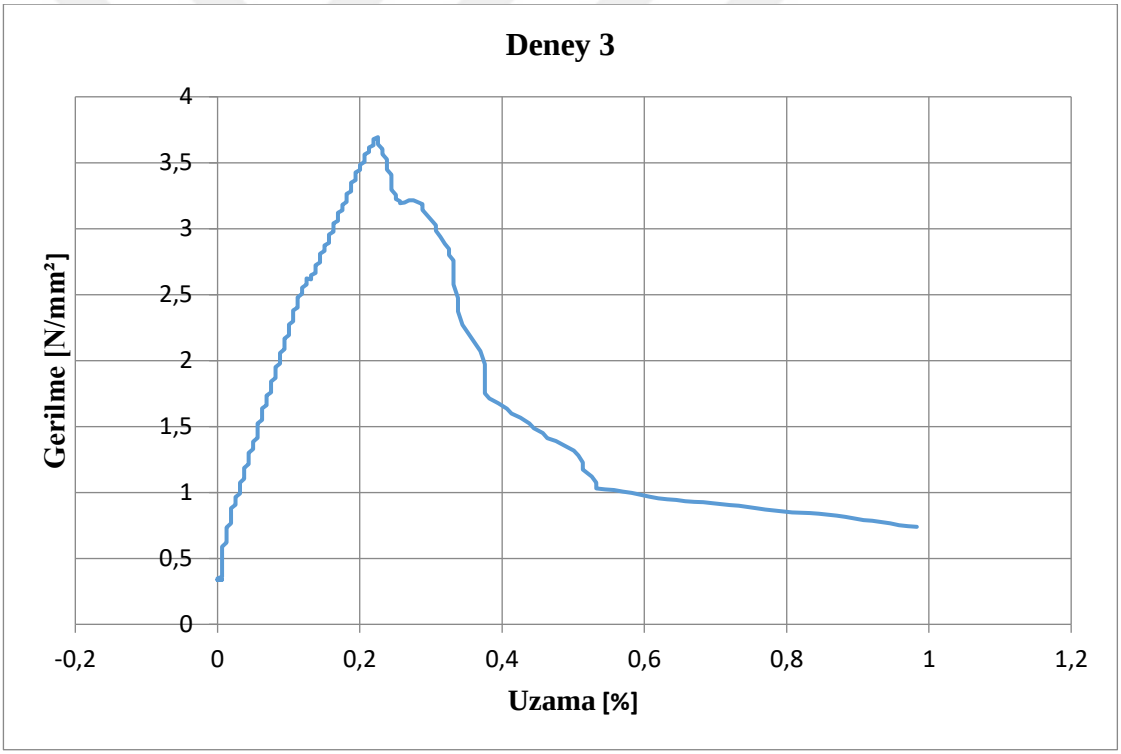
Deney 3'ün SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler çizelge 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.21'de gerilme-uzama grafiği verilmiştir. Şekil 4.22-b'de kaynak bölgesine üstten bakıldığında ergimenin sıralı bir şekilde devam etmediği gözlemlenmiştir. Şekil 4.22-

c'de filamentlerin lif şeklinde uzadığı ve kopulduğu görülmektedir. Şekil 4.22-d'de ve Şekil 4.22-e'de görüldüğü üzere ilerleme tarafında daha iyi bir kaynama lakin yığılma tarafından daha az bir birleşme görülmektedir. Bu nedenle kopma yığılma tarafından gerçekleşmiştir. Şekil 4.22-e'de dolu bir kesitin olmadığı ve aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden gerçekleştiği görülmüştür.

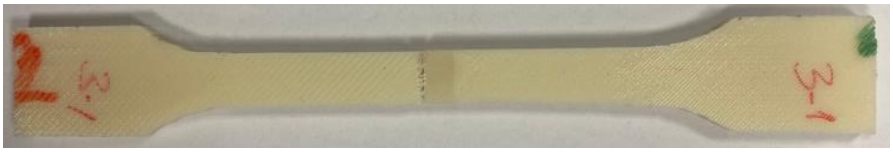
Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Deney 3'ün değerleri

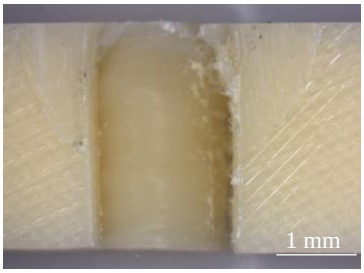
Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
3	20	1200	20	3,82



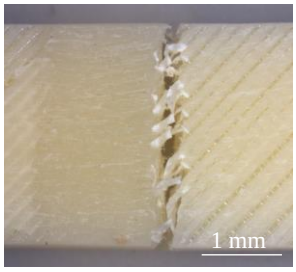
Şekil 4.21 Deney 3'ün Gerilme-Yüzde Uzama grafiği



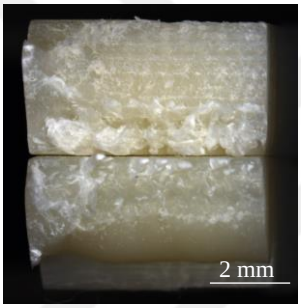
(a)



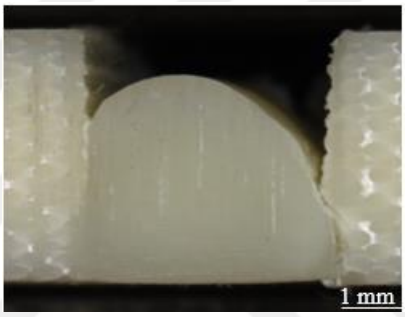
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.22 Deney 3'ün mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir resmi, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

4.5.5 Deney 4'ün incelenmesi:

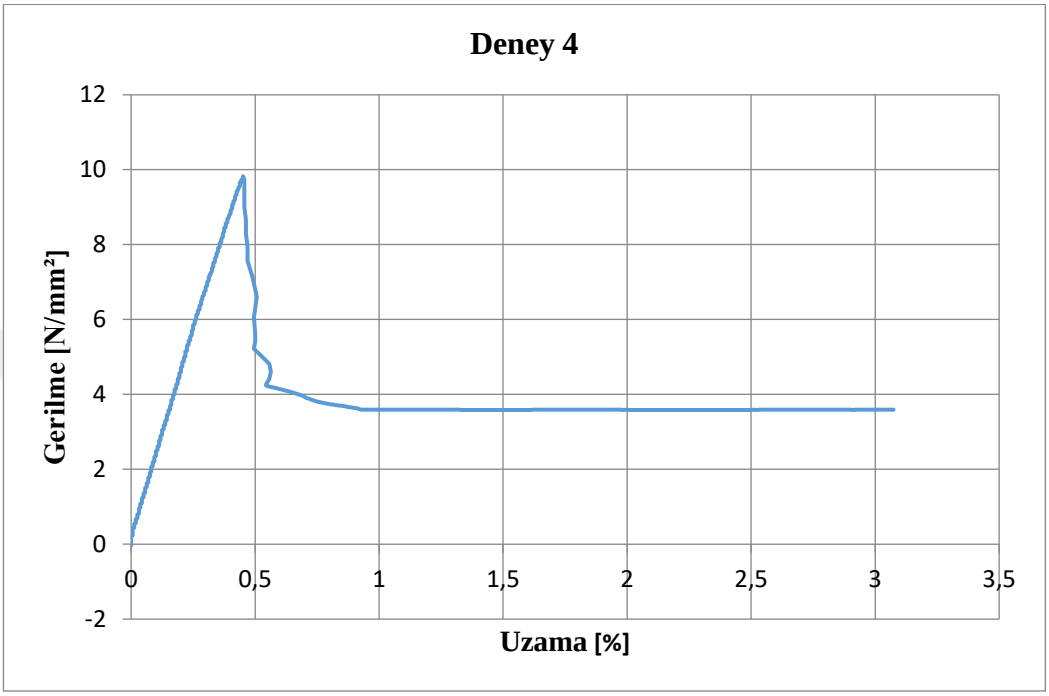
Deney 4'ün SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Şekil 4.23'te gerilme-uzama grafiği verilmiştir.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.24'te verilmiştir.

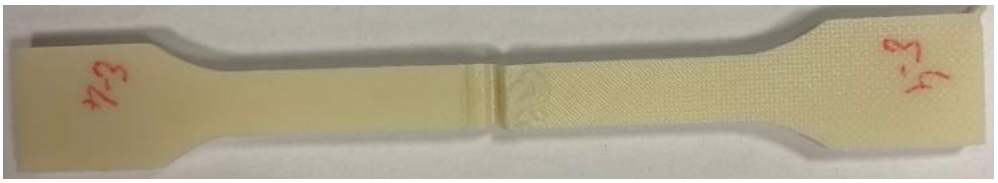
Çizelge 4.9 Deney 4 değerleri

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
4	16	800	10	9,80

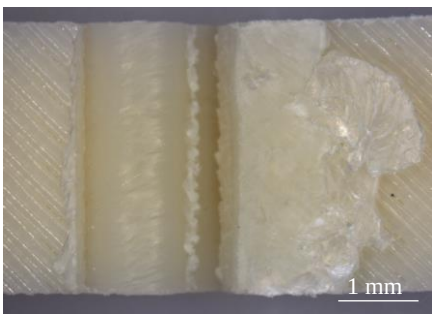


Şekil 4.23 Deney 4'ün gerilme-yüzde uzama grafiği

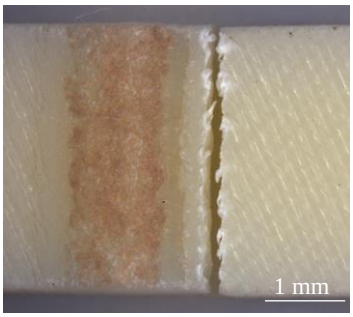
Kaynak bölgesine bakıldığında Şekil 4.24-c'de kopma sırasında lif şeklindeki yapıların daha kısa uzadığı ve kopulduğu görülmektedir. Şekil 4.24-d'de kaynak bölgesinin daha geniş olduğu görülmüştür. Şekil 4.24-e'de daha dolu bir kestin olduğu ve aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeyi geçip bir kısmının parça tarafından gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 4.24-c'de görünen kırmızımsı renklenmeler parça sabitleme aparatı poliüretan malzemeden yapıldığından eriyik sıcak yüzeye tozlar yapışmıştır. Aynı durum diğer numunelerde de mevcuttur. Şekil 4.24-c'de görülen alta doğru ovalımsı bir yapısı takımın baskısından oluşmuştur.



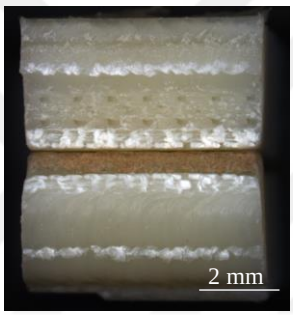
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.24 Deney'ün 4 mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir resmi, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

4.5.6 Deney 5'in incelenmesi:

Deney 5'in SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

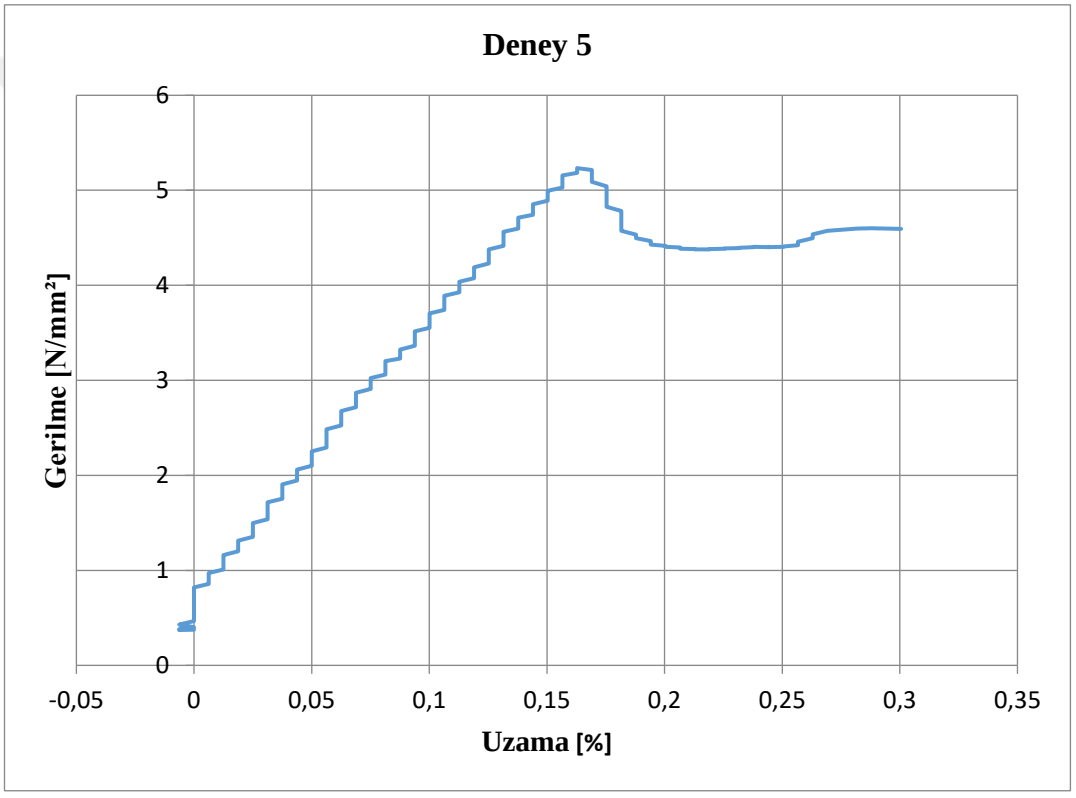
Şekil 4.25'te gerilme-uzama grafiği verilmiştir.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.26'da verilmiştir.

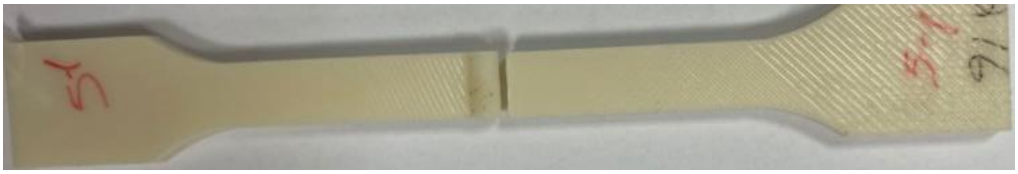
Çizelge 4.10 Deney 5'in değerleri.

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
5	16	1000	20	5,15

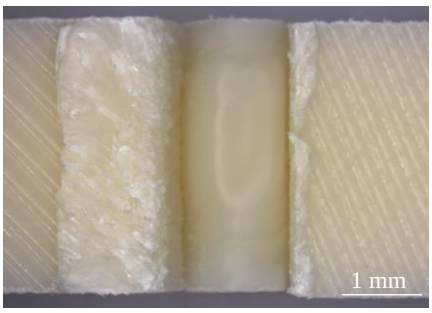
Kaynak bölgesine bakıldığında Şekil 4.26-d'de iyi bir kaynamanın olduğu lakin iyi bir birleşmeye rastlanmamıştır. 4.26-e'de hem ilerleme tarafında hem de yığılma tarafında iyi bir birleşmenin olmadığı görülmektedir. Aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden gerçekleştiği görülmüştür.



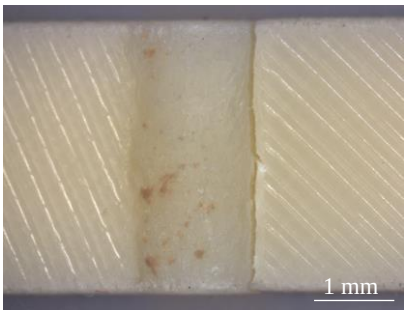
Şekil 4.25 Deney 5 gerilme-yüzde uzama grafiği



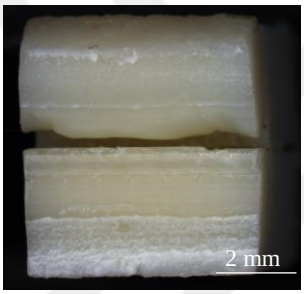
(a)



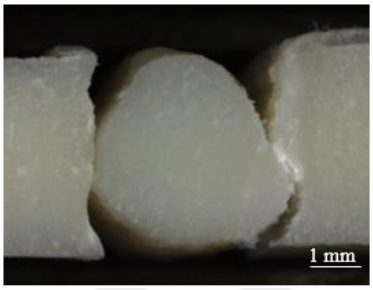
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.26 Deney 5'in mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

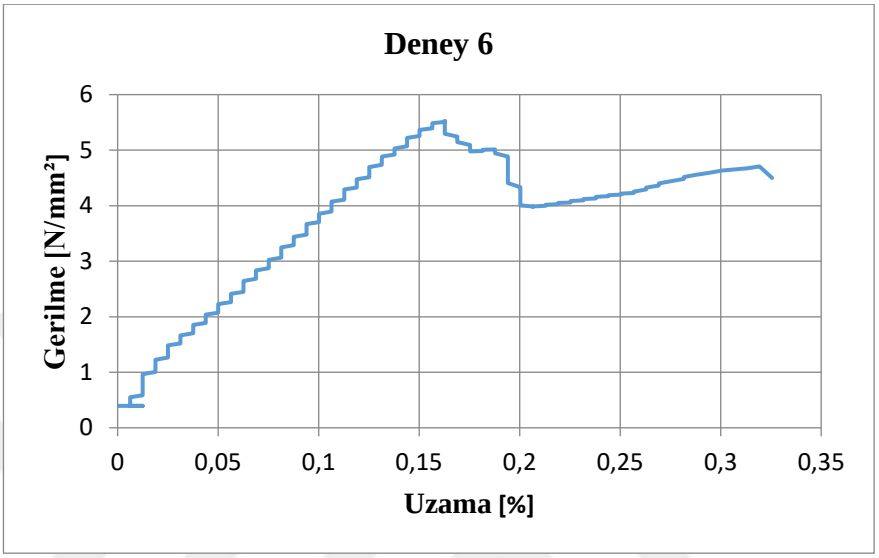
4.5.7 Deney 6'nın incelenmesi:

Deney 6'nın SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.27'de gerilme-uzama grafiği verilmiştir.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.28'de verilmiştir.

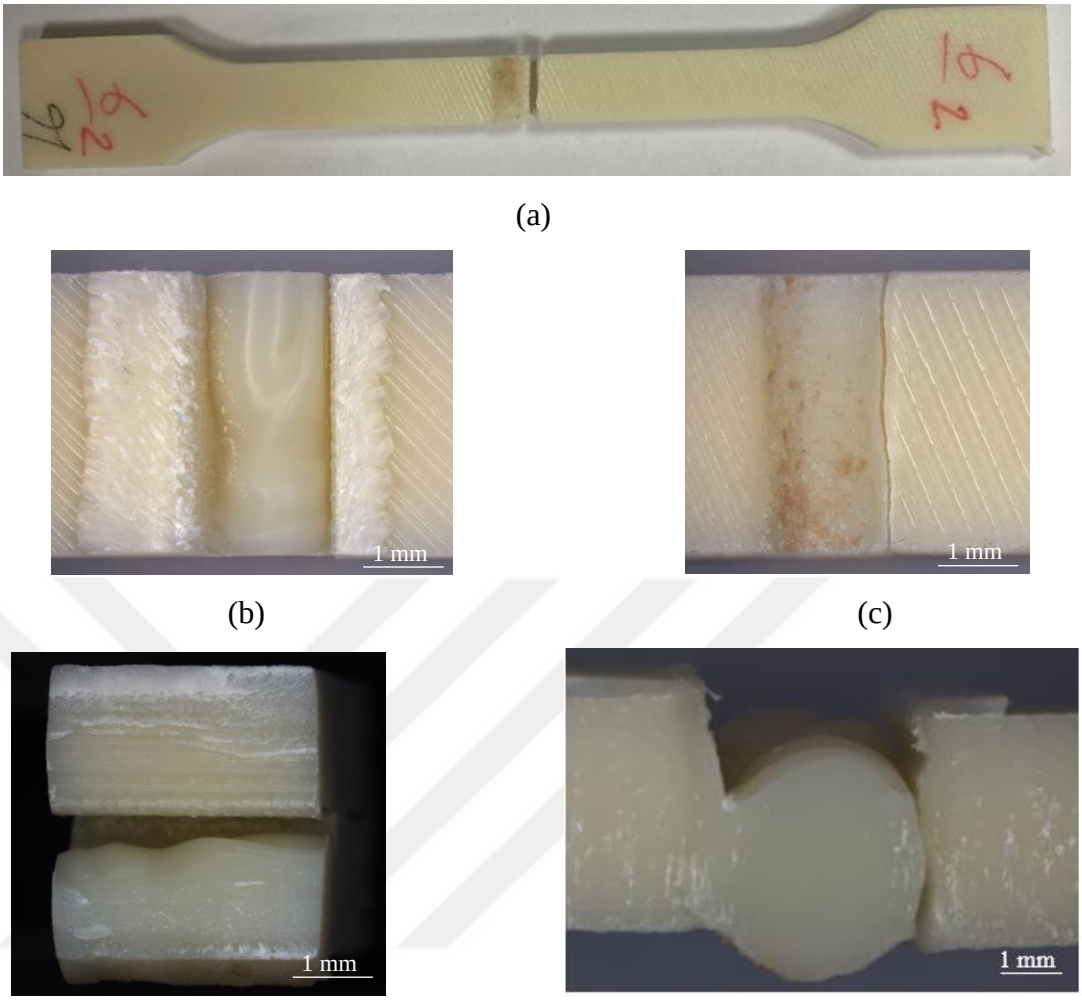
Çizelge 4.11 Deney 6'nın değerleri

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
6	16	1200	15	5,50



Şekil 4.27 Deney 6'nın gerilme-yüzde uzama grafiği

Kaynak bölgesine bakıldığında 4.28-d'de iyi bir birleşme olmadığı görülmektedir. 4.28-e'de ise ilerleme yönünde iyi bir birleşme görülmekte iken yığılma bölgesinde iyi bir birleşme görülmemektedir. Aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden gerçekleştiği görülmüştür.



(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Şekil 4.28 Deney 6'nın mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

4.5.8 Deney 7'nin incelenmesi:

Deney 7'nin SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.12'de verilmiştir.

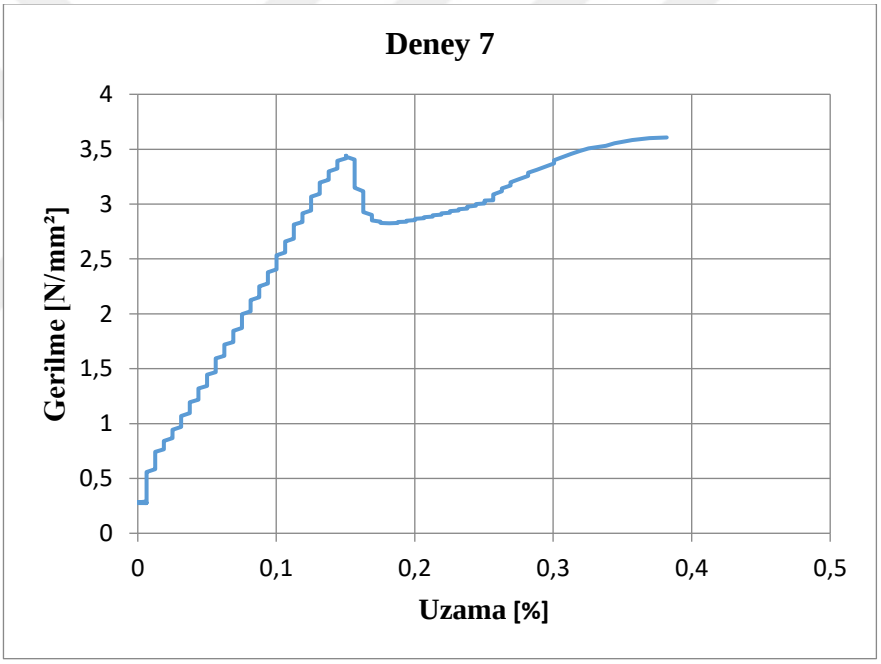
Şekil 4.29 gerilme-uzama grafiği verilmiştir. Grafikte akma noktasından sonra eğride aşağıya doğru bir düşme daha sonra ise tekrardan bir yükselme görülmektedir. Bunun nedeni katmanlı üretimde katman katman katman birleşme olduğundan dolayı bir katman ya da lif koparken diğer lifler kopmamış olabiliyor ya da ısıdan etkilenme durumuna göre

daha fazla uzama gösterebiliyor. Bir diğer neden ise eklemeli imalatta her katman adım adım üretildiğinden dolayı, yani yapısı gereği anizotropik davranış sergilemektedir bu da aynı parça ve kaynak bölgesi olmasına rağmen kaynak bölgesindeki katmanlar ya da lifler birbirinden farklı davrandığından dolayı grafik bu şekilde görülmüştür.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.30'da verilmiştir.

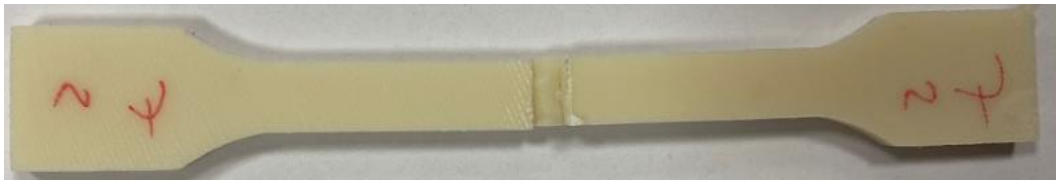
Çizelge 4.12 Deney 7 değerleri

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (Devir/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
7	24	800	20	3,50

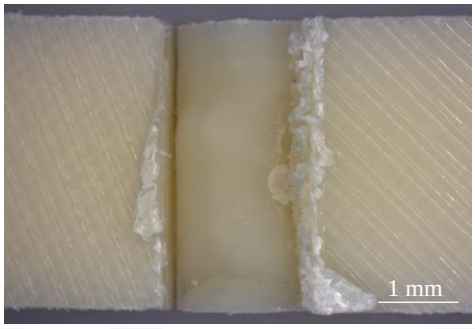


Şekil 4.29 Deney 7 gerilme-yüzde uzama grafiği

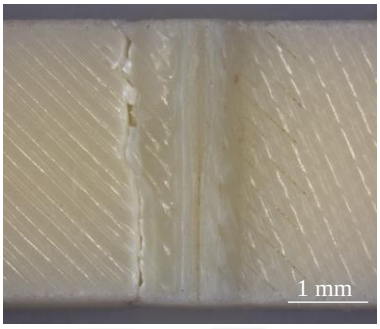
Kaynak bölgesine bakıldığında 4.30-e'de de dolu bir kestin olmadığı ve aynı resimde kopmanın ısıdan etkilenen bölgeden gerçekleştiği görülmüştür.



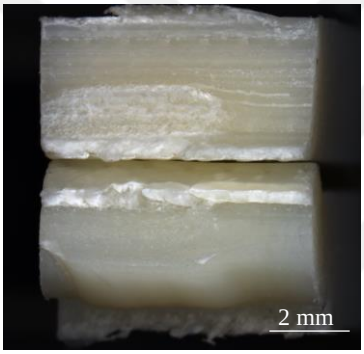
(a)



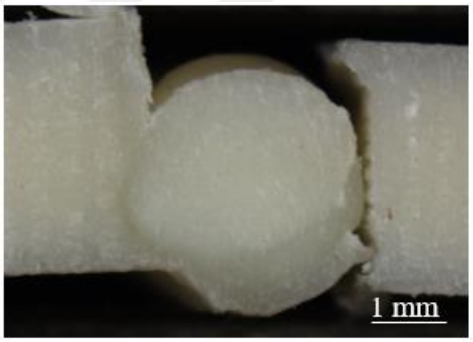
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.30 Deney 7'nin mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

4.5.9 Deney 8'in incelenmesi:

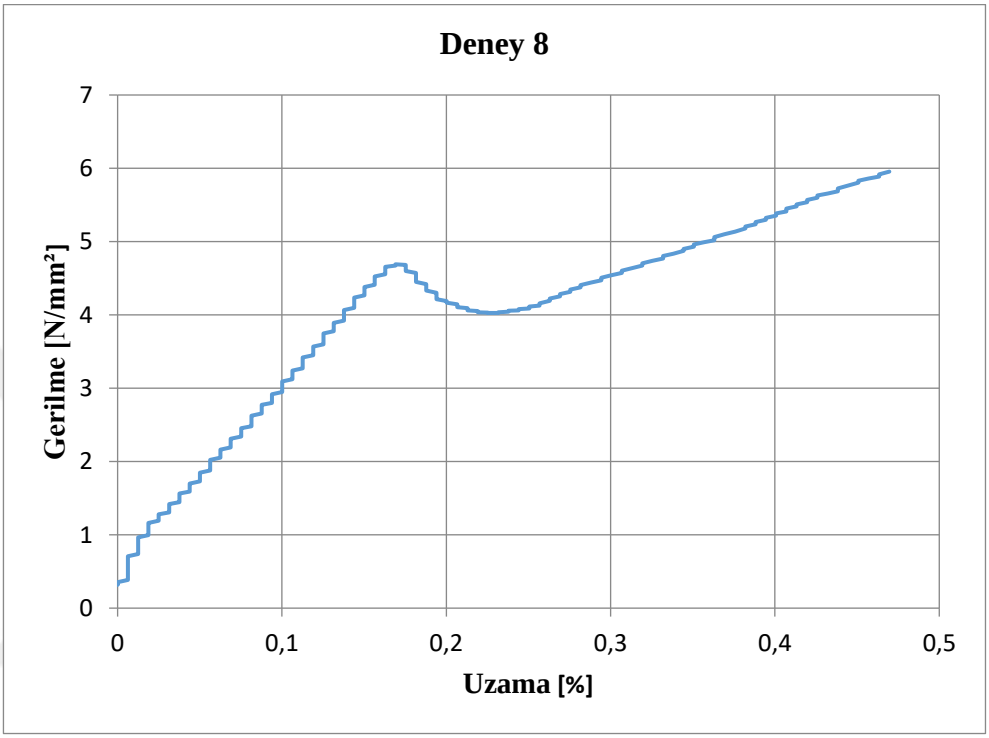
Deney 8'in SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Şekil 4.31 gerilme-uzama grafiği verilmiştir.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.32'de erilmiştir.

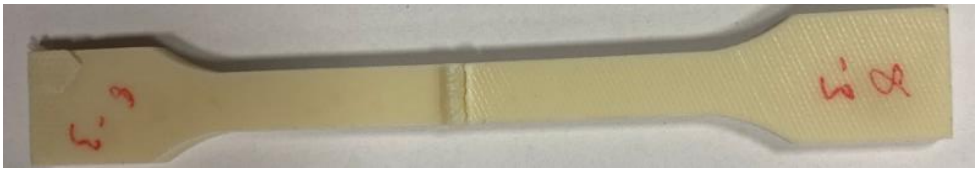
Çizelge 4.13 Deney 8'in değerleri

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (Devir/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
8	24	1000	15	5,85

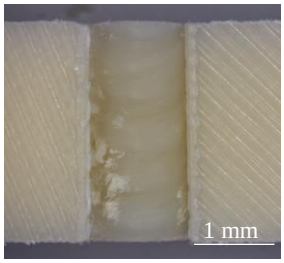


Şekil 4.31 Deney 8'in gerilme-yüzde uzama grafiği

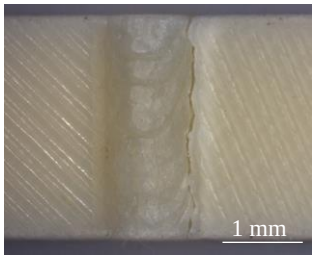
Kaynak bölgesine bakıldığında 4.32-e'de devir arttıkça erimenin daha iyi olduğu ve ilerlemenin yavaş olasından da dolayı da kaynak kesitinin daha dolu olduğu görülmüştür. Kopma bölgesinde lifli kopma yapılarına rastlanmamıştır. Şekil 4.32-e'de resminde kopma alanına bakıldığında birleşmenin başta oval daha sonra da doğrusal bir şekilde ilerlediği görülmüştür. Şekil 4.31 deki gerilme-yüzde uzama grafiğine bakıldığında akma gerilmesinden sonra parça gerilmesi düşmüş daha sonra tekrardan artıp kopmaya uğramıştır. Bu da oval yapı ile ilk önce karşılaşmış burada kopma ve uzamaya uğramış daha sonra da doğrusal kısma geldiğinde akma gerilmesi tekrardan uzamaya devam etmiştir.



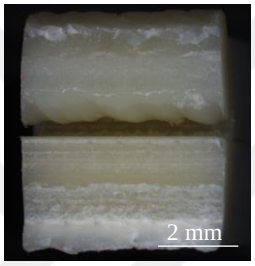
(a)



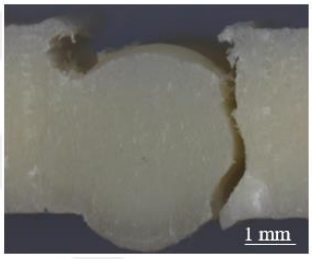
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.32 Deney 8'in mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

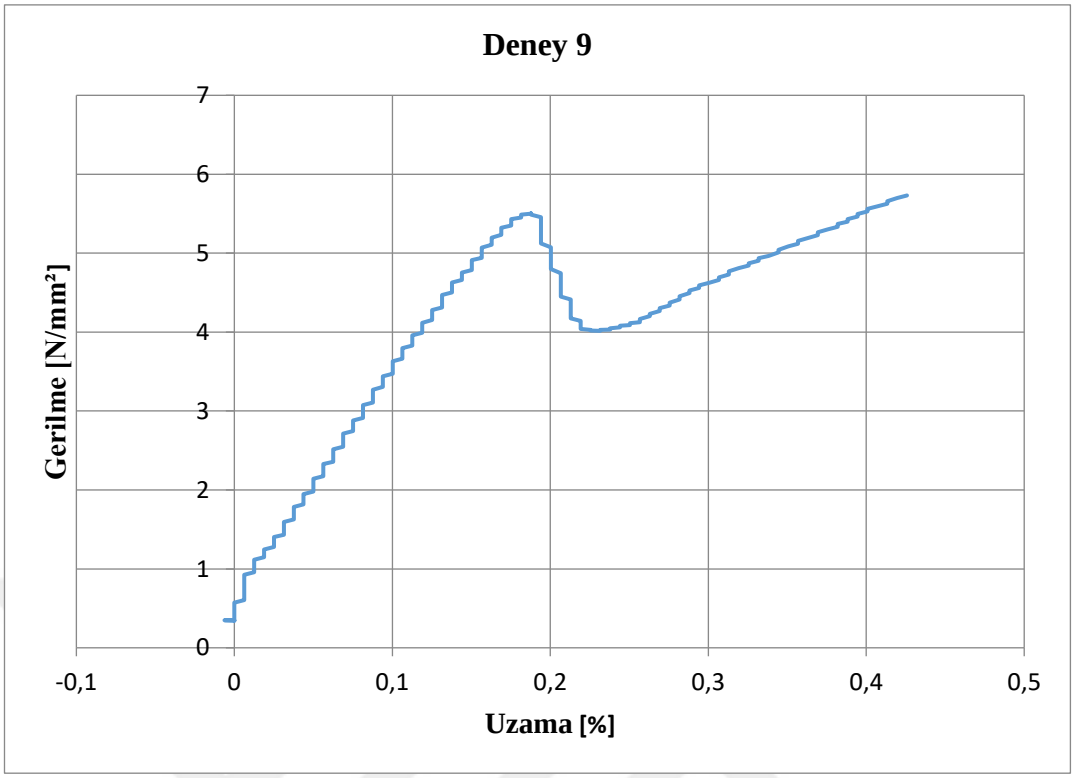
4.5.10 Deney 9'un incelenmesi:

Deney 9'un SKK ile birleştirilmesi için kullanılan parametreler Çizelge 4.14'te verilmiştir. Şekil 4.33 gerilme-uzama grafiği verilmiştir.

Kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmesi Şekil 4.34'te verilmiştir.

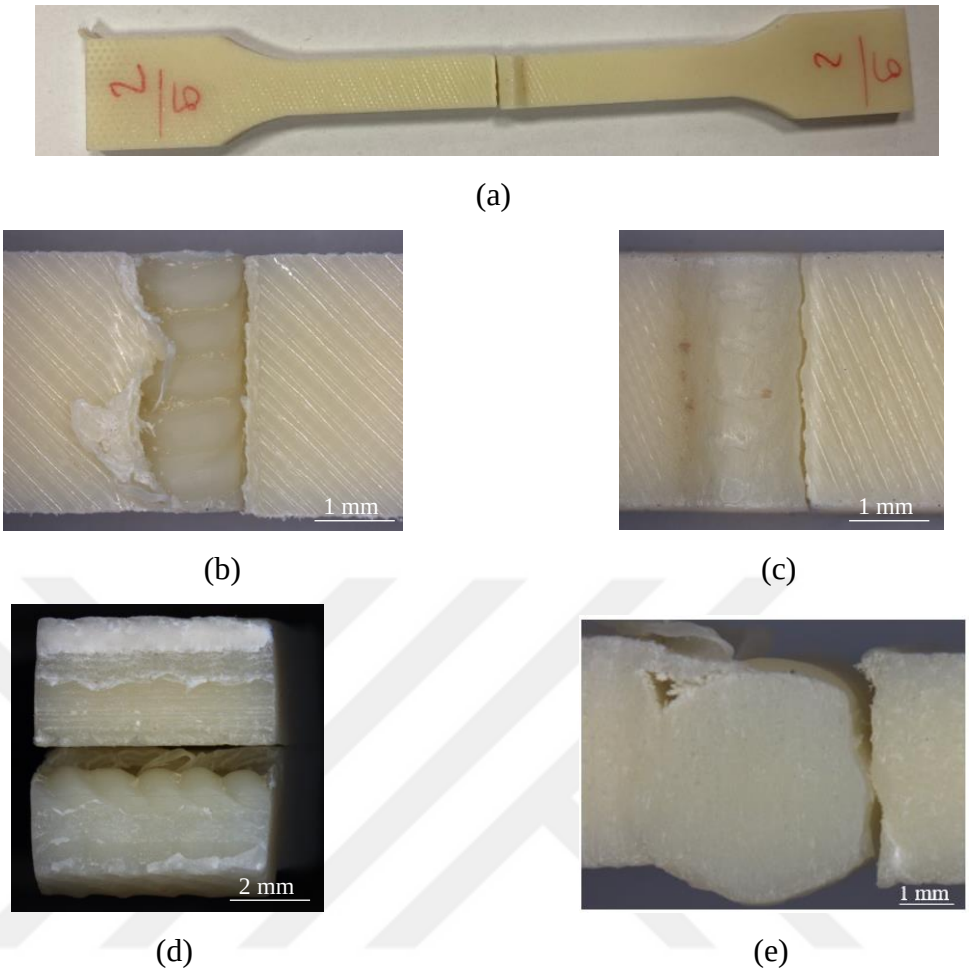
Çizelge 4.14 Deney 9'un değerleri

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (Devir/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
9	24	1200	10	5,70



Şekil 4.33 Deney 9'un gerilme-yüzde uzama grafiği

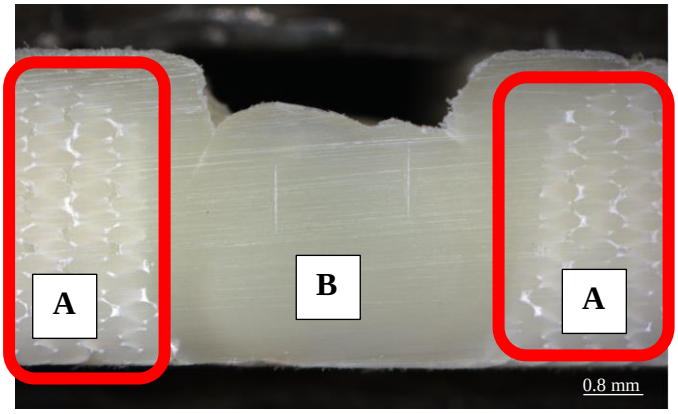
Kaynak bölgesine bakıldığında 4.34-e'de devir arttıkça erimenin daha iyi olduğu ve ilerlemenin yavaş olasından da dolayı kaynak kesitinin daha dolu olduğu görülmüştür. Aynı resimde yüksek dönme hızından fazla miktarda malzemenin ergidiği görülmüş ve takımın ilerlemesinden dolayı kaynak bölgesinin üst kısmında boşluklar oluşmuştur. Bu boşluklara tünel hatası denir. Tünel hatası yüksek hızlarda kaynaşma için yeterli süre bulunmadığında oluşur (Hajideh ve Alavi, 2017). Kopma bölgesinde lifli yapılara rastlanmamıştır.



Şekil 4.34 Deney 9'un mikroskop ile incelenmesi, (a) Numunenin üstten genel bir görüntüsü, (b) Kaynak bölgesinin üstten görüntüsü, (c) Kaynak bölgesini alttan görüntüsü, (d), Kaynak bölgelerinin alınlarının görüntüsü, (e) Kaynak bölgesinin yandan görüntüsü.

4.6 Kaynak İle Ana Plastik Alanlarının Yoğunluklarının Karşılaştırılması

Şekil 4.35'te kaynak bölgesi dışında kalan bölgelere bakıldığında eklemeli imalatla üretilen bölgelerin yapısı katmanlı ve boşluklu görünmektedir. Kaynak bölgesi ise dolu görünmektedir. Bu da yoğunluk farklılıklarının olabileceği sorusunu akıllara getirmiştir.



Şekil 4.35 SKK kaynak bölgesi kesiti A) Ana parça, B) Kaynak bölgesi

Çekme deneyinden sonra bir pense yardımı ile ana malzemeden bir parça ve kaynak bölgesi sökülmüş, 23.5 ºC'de yoğunluk ölçüm terazisinde yoğunlukları ölçülmüştür. Kaynak bölgesi yoğunluğu 1.0221 g/cm^3 iken katmanlı üretimle üretilen ABS M30 malzemesinin yoğunluğu 1.0044 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. ABS M30 filament yoğunluğu ise 1.0445 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.13'te verilmiştir. Stratasys firmasından alınan filamentin teknik tanım dokümanında ASTM D257 standartına göre 23 °C'de yapılan ölçümde yoğunluk 1.05 g/cm^3 olarak verilmiştir. Bu da yapılan ölçümün doğruluğunu göstermektedir.



(a) (b) (c)

Şekil 4.36 SKK bölgesi ve ABS M30 katmanlı üretim parçası yoğunluk ölçümü kaynak bölgesi yoğunluğu, b) Katmanlı üretim malzeme yoğunluğu c) Filament yoğunluğu

5. SONUÇ

Bu deneysel çalışmada ABS M30 malzemesinden üretilmiş plakalar SKK yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin optimum seviyelerini tespit etmek ve parametre etkilerini araştırmak için Taguchi metodu ile parametre optimizasyon tasarımı yapılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir

Gerçekleştirilen deneyler SKK ile birleştirilen ABS M30 plakaların kaynak mukavemetini değerlendirmek, kaynak yapısını ve kaynak kalitesini araştırmak için yapılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda takım dönme yönünün SKK kalite ve mukavemetine önemli etkileri olduğu görülmüştür. Yön seçiminde dikkat edilecek en önemli hususun, sürtünme sırasında eriyen sıvı polimer malzemenin takımın uyguladığı dönme momenti ile kaynak ağzını ve kaynak hattını dolduracak şekilde içeriye doğru hareketin sağlanmasıdır. Bu çalışmada sağ yönlü helis açısına sahip takımda, dönme yönü saat biresi yönünün tersi olarak uygulandığında bu davranış elde edilmiştir. Takımı saat ibresi yönünde döndürülerek yapılan SKK uygulamasında ise eriyen malzemenin kaynak ağzı ve hattından uzaklaşarak birleşmenin sağlanamadığı görülmüştür.

Deneysel çalışmada ABS M30 malzemesinin SKK ile birleştirilmesi için uygun parametre aralığı araştırılmıştır. Takım dönme hızı 800 - 1800 devir/dk, takım ilerleme hızı için 10-40 mm/dk, takım omuz çapı 16-24 mm parametreleri arasında kaynak yapılabilirlik araştırılmıştır.

SKK ile kaynak yapılabilir aralık takım dönme hızı için 800-1200 devir/dk, takım ilerleme hızı için 10-20 mm/dk ve takım omuz çapı ise 16-24 mm olarak bulunmuştur. Bu değerler ile en iyi kaynak parametresinin bulunması için taguchi methodu ile deney tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan deneyler için üç eksen CNC dik işleme merkezinde uygulamak üzere kaynak düzeneği tasarlanmış ve SKK ile birleştirme yapılmıştır. Birleştirilen plakalardan çekme testi için standart çekme çubukları su jeti kesim ile her deney için 5 adet numune çıkartılmıştır. Üretilen numunelere çekme testleri uygulanmıştır.

Kopmaya uğrayan numunelerde kaynak bölgesinin incelenmesi için optik mikroskopla detaylı inceleme yapılmıştır. Bulanan mekanik değerle minitab programında Taguchi L_9 ortogonal serisi, S/N oranı kullanılarak sonuçlar optimize edilmiştir.

En iyi parametre için ortalama cevap sonucunda en yüksek en iyidir mantığı ile bakılmış ve en iyi kombinasyon takım dönme hızı 800 devir/dk, ilerleme 10 mm/dk ve takım omuz çapının 16 mm olduğu bulunmuştur. Bu değer deney tasarımı yaparken rastlantısal olarak yapılan 4 nolu deney parametreleri ile aynıdır.

Numunelerin kaynak bölgesine mikroskopla bakıldığında kopma bölgesinde parçanın katmanlarında eritilen filamentlerin lif şeklinde uzadığı ve kopulduğu görülmektedir. Kopmanın ısıdan etkilenen bölgede yığılma tarafında gerçekleştiği görülmüştür.

Yüksek devirlerde kaynak bölgesinde tünel etkisi ile boşluklara rastlanmıştır.

Kaynak mukavemetine takım dönme ve ilerleme hızlarının etki ettiği görülmüştür.

Eklemeli imalatla üretilen matris yapısının yoğunluğu, üretimde kullanılan filamentin yoğunlukları ve kaynak bölgesinin yoğunlukları karşılaştırılmış, yoğunluk farklılıklarına rastlanılmıştır. Optik mikroskopla incelendiğinde yapı içerisindeki boşluklar nedeniyle yoğunluk farkları oluştuğuna rastlanılmıştır.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler;

Eklemeli imalatla üretilen parçaların SKK ile kaynağının kalitesini ve mukavemetini artırmak için çift yüzeyden kaynak tasarımı ya da çift taraflı takım uç tasarımı yapılabilir.

Sabitleme kalıbı olarak poliüretandan daha rijit bir malzeme kullanılabilir.

Deney tasarımında tabla sıcaklığı ve takım uc sıcaklığı parametreleri de deney tasarım sürecine dahil edilerek SKK'ya etkisi araştırılabilir.

Eklemeli imalatla üretilmiş farklı termoplastik malzemelerin kaynak davranışları incelenebilir.

Eklemeli imalat sırasında kullanılan ağ yapısı çeşitleri sürece dahil edilerek SKK için en uygun kaynak parametre optimizasyonu yapılabilir.

Elle kontrol edilebilen bir aparat için uç çeşitleri tasarlanabilir ve termoplastiklerin SKK kaynağı ile birleştirme parametrelerinden veri kütüphanesi oluşturarak, SKK kaynağının ulaşılabilirliği artırılabilir.

Farklı geometriler için farklı takım ve prosesler tasarlanarak SKK kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Alghamdi, S. ve John, S. (2021). *Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges*. Polymers: 13,753. https://doi.org/10.3390/polym13050753

Anonim, (2022). Zeis 50X optik mikroskop https://bolioptics.com/6-50x-led-wf-binocular-zoom-stereo-microscope-top-bottom-light-76mm-track-stand/ Erişim tarihi (10.05.2022)

Anonim, (2022). Siemens NX tasarım programı: *https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/* Erişim tarihi (03.05.2022)

Anonim, (2022). Minitab deney tasarım programı: https://www.minitab.com/ Erişim tarihi: (03.05.2022

Anonim, (2022). St37 silindirik çelik görselleri: https://www.amazon.com.tr/Yuvarlak-%C3%A7elik-ST37-S235JRC-parlak-%C3%A7ekilmi%C5%9F/dp/B06XZTHFQ2 Erişim

Anonim, (2022). Stratasys Fortus 400 Mc görselleri: https://www.stratasys.com/en/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/?filter=FDM Erişim tarihi (03.05.2022)

Anonim, (2022). Su jeti görselleri https://www.sujeti.net/su-jeti-waterjet-nedir-nasil-calisir/ Erişim tarihi (03.05.2022)

Bilici, MK (2022) Investigation of the effects of welding variables on the welding defects of the friction stir welded high density polyethylene sheets Journal Of Elastomers And Plastics: 54, 3 , 157-476

Bindal, T. Saxena, R. (2020). *Analysis of joint overlap during friction spin welding of plastics* : Materials Today: 2798–2804

Bozu, M. , (2020). *Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilen plastik matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve metalürjik özelliklerinin incelenmesi.* Edirne: Trakya Üniversitesi

Chiulan, I. Frone, A. N. (2018). *Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters:* Bioengineering 2018, 5, 2; doi:10.3390/bioengineering5010002

Dana, R. Barbe, F. (2019). *Polymer additive manufacturing of ABS structure: Influence of printing direction on mechanical properties* : The Society of Manufacturing Engineers 1526-6125

Gao, J. Cui, X. (2017). *Application and exploration of friction stir welding/processing in plastics industry. :* Materials Science and Technology, 33:10, 1145-1158

Hajideh, M. R., Alavi, S. (2017). *Investigation on the effects of tool geometry on the microstructureand the mechanical properties of dissimilar friction stir weldedpolyethylene and polypropylene sheets*. Journal of Manufacturing Processes: 26, 269–279

Huang, Y., Meng, X. (2017) *Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites:* Composites: Part A, doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.005

Iftikhar, Syed H. Mourad A. H. (2021). *A Comprehensive Review on OptimalWelding Conditions for Friction Stir Welding of Thermoplastic Polymers and Their Composites :* Polymers, 13, 1208.

Karagöz, İ., (2014). *Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Özellikleri.* İstanbul: Marmara Üniversitesi

Karki, T. , Turku, I. (2018) *Characterization of Feedstock Filament Extruded from Secondary Sources of PS, ABS and PVC,* Recycling: 3, 57

Kumar, R. Singh, R. (2017). *Weldability of thermoplastic materials for friction stir welding- A state of art review and future applications:* Composites Part B doi.10.1016/j.compositesb.2017.10.039

Kumar, R. Singh, R. (2018). *Friction stir welding of ABS-15Al sheets by introducing compatible semiconsumable shoulder-less pin of PA6-50Al:* Measurement (2018), doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.005

Kumar, R. Singh R. (2020), *Repair of automotive bumpers and bars with modified friction stir welding*, J. Cent. South Univ.: 27: 2239−2248

Lee, J., An, J. (2017). *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials* : Elsevier 2352-9407 http://dx.doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004

Lion samuel C. Liska R. (2019).*Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing:* Chem. Rev. 2017, 117, 10212−10290

Mendrıcky, R. 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. & Pal, K. (2019). *Friction Stir Welding For Joining of Polymers*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 6, 123-162.

Mohammed, Omer A. (2017) *Analytical Modeling and Experimental Investigation of Product Quality and Mechanical Properties in FDM Additive Manufacturing.* Australia: Swinburne University of Technology

Nath, R. Maji, P. Barma, John. (2022). *Effect of tool rotational speed on friction stir welding of polymer using self-heated tool:* Production Engineering: https://doi.org/10.1007/s11740-022-01123-0

Nath RK, Maji P, Barma JD (2019). *Development of a Self-Heated Friction Stir Welding tool for welding of polypropylene sheets*: J Braz Soc Mech Sci Eng 41:1–13. https:// doi. org/ 10. 1007/s40430- 019- 2059-2

Narender, M; Manoj, A, Jakirahemed, MD (2021) *Study on defects repairing using Friction Stir Technologies.* Materıals Today-Proceedıngs 44 , pp.2373-2379

Omprakasam, S., Marimuthu, K. (2022). *Statistical Modelling and Optimization of TIG Welding Process Parameters Using Taguchi's Method*. Strojnıskı Vestnık-Journal Of Mechanıcal Engıneerıng: 68, 3, 200-209

Pereira, M. ; Galvao, I (2022) *Joining of Fibre-Reinforced Thermoplastic Polymer Composites by Friction Stir Welding-A Review*, Applıed Scıences-Basel: 12, 5

Singh, S. Singh, G. (2020), *On the mechanical characteristics of friction stir welded dissimilar polymers: statistical analysis of the processing parameters and morphological investigations of the weld joint*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42, 154

Ülker A. (2015) *Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemenin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Kaynak Mukavemeti Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması Ve Kaynak Parametrelerinin Taguchı Deneysel Tasarım Yöntemi İle Optimizasyonu.* İzmir: Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Ülker, A. Ayaz, A. (2020). *Optimization of process parameters of friction stir spot welding of polycarbonate sheets and morphological analysis:* Materialwiss. Werkstofftech. 51, 1640–1652
tarihi (03.05.2022)

Xue ,Y., Zhao, H., Zhang, Y. (2021) *Design and multi-objective optimization of the bumper beams prepared in long glass fiberreinforced polypropylene.* Polym Compos: https:// doi. org/ 10.1002/ pc. 26026

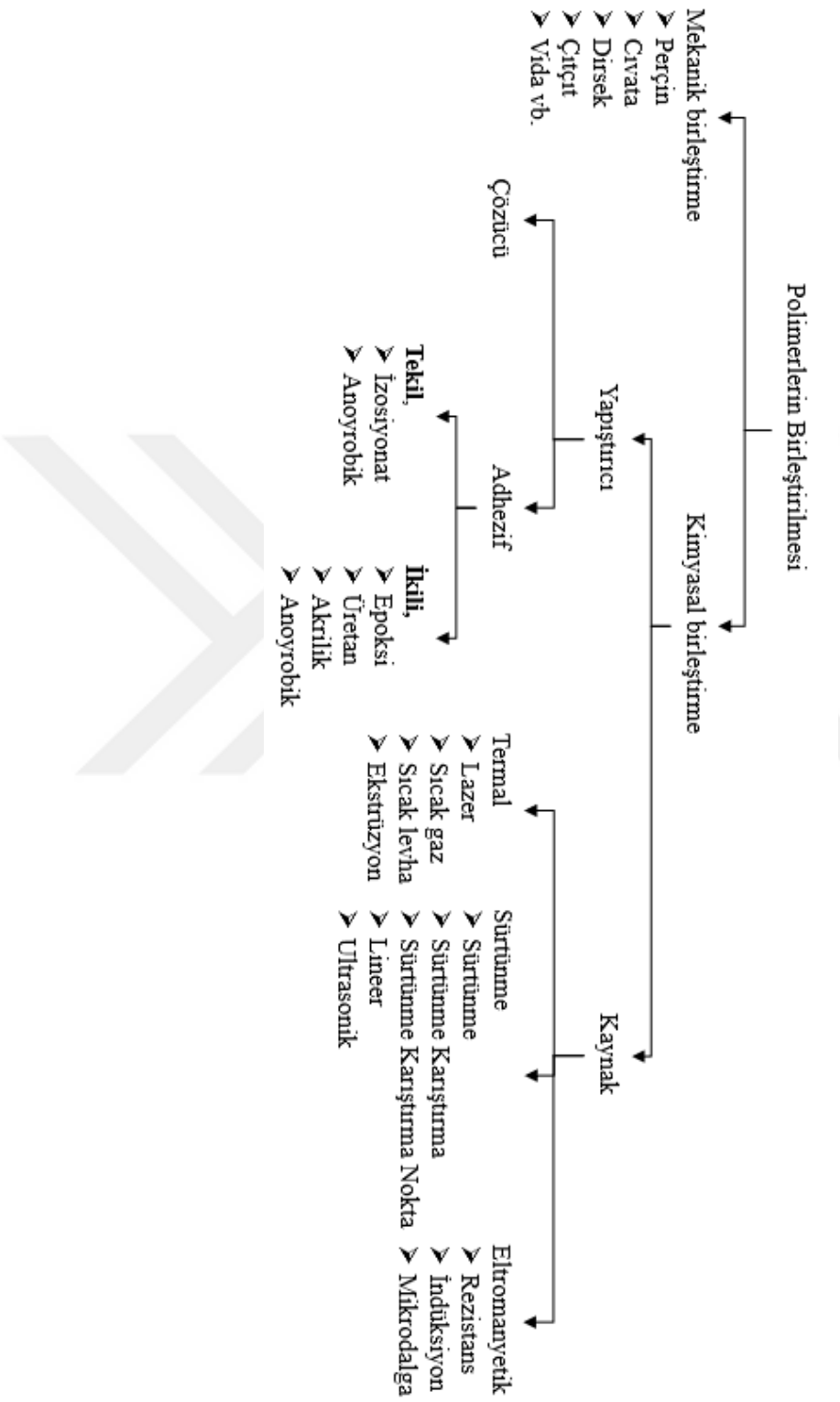
EKLER

EK 1 Polimerlerin birleştirme yöntemleri

EK 2 Deney parametreleri, Çekme sonuçları, Gerilme-% uzama grafiği

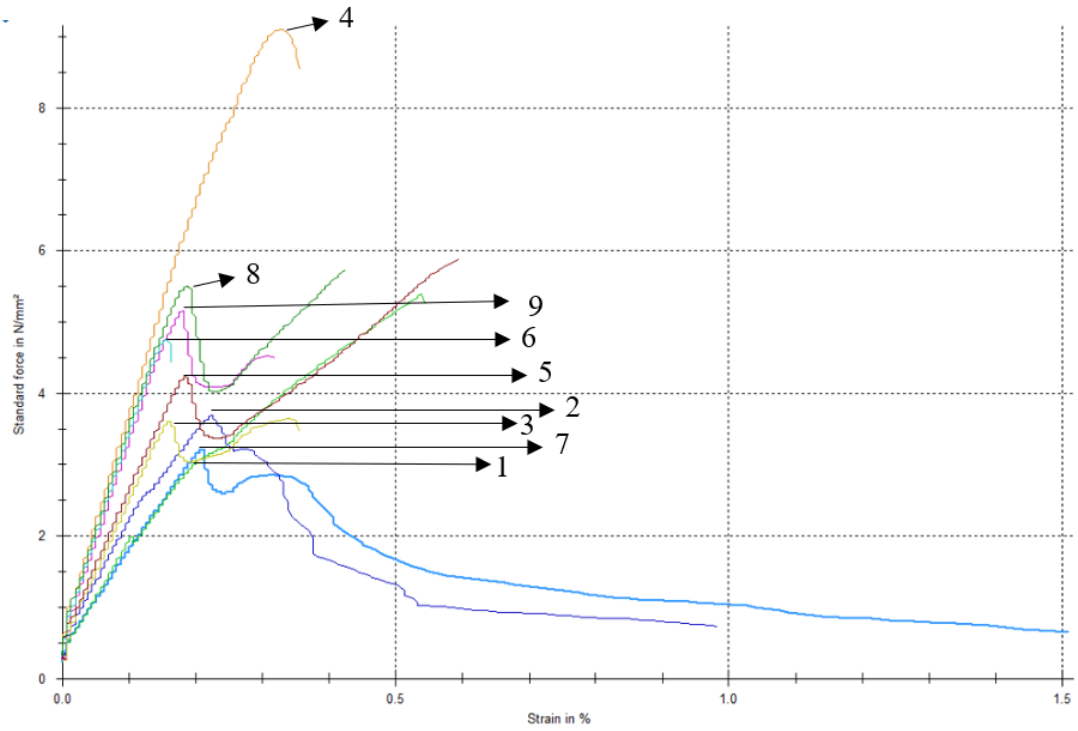
EK 3 Çekme testinden sonra deneylerin kopulmuş hali

EK 1 Polimerlerin Birleştirme Yöntemleri



EK 2 Deney parametreleri, Çekme sonuçları, Gerilme-% uzama grafiği

Deney no	Takım Omuz Çapı (mm)	Takım Dönme Hızı (Devir/dk)	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Gerilme (N/mm^2)
1	20	800	15	3,17
2	20	1000	10	4,30
3	20	1200	20	3,82
4	16	800	10	9,80
5	16	1000	20	5,15
6	16	1200	15	5,50
7	24	800	20	3,50
8	24	1000	15	5,85
9	24	1200	10	5,70
(Kaynaksız numune)				27,5



EK 3 Çekme Testinden Sonra Deneylerin Kopulmuş Hali

