

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KEVLAR MALZEMESİNİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE ÇOKLUFİZİK MODELLENMESİ**

AHMET TAŞAN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KEVLAR MALZEMESİNİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE ÇOKLUFİZİK MODELLENMESİ**

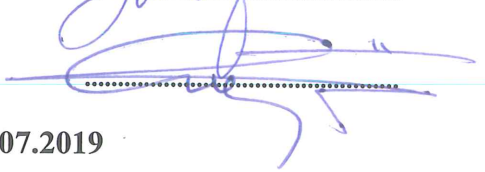
AHMET TAŞAN

Prof. Dr. Zafer BİNGÜL
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Emel TABAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Uğur ÖZSARAÇ
Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.07.2019



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İlk olarak yüksek lisans eğitimim boyunca engin bilgisi ve motivasyonu ile beni destekleyen, sınırsız sabrı ile bu tezin araştırma ve yazımının her aşamasında bana yardımcı olan danışmanım Prof. Dr. Zafer BİNGÜL'e sonsuz şükranlarımı sunmak isterim.

Tez aşamasında teknik destek veren, uygulama ve tez yazımı sırasında değerli vakitlerini bana ayıran, ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Koray YURTIŞIK ve Dr. Süha TİRKEŞ'e sonsuz teşekkürler ediyorum.

Yüksek lisans tez çalışmam için zaman ayırmama izin veren ve her aşamada beni destekleyen öncelikle çalıştığım kuruma, bütün yönetici ve çalışma arkadaşlarıma özellikle de Dr. Tuğba ÖZBİLGİN'e ve Dr. Aydın YENİAY'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, analiz aşamasında, desteği ve tecrübesi ile beni yönlendiren değerli kurum ve proje arkadaşım Dr. Yavuz ÖZTÜRK'e de çok teşekkür ediyorum.

Son olarak, manevi desteklerini esirgemedikleri ve her ihtiyaç duyduğumda yanımda oldukları için kıymetli aileme ve eşime en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Temmuz – 2019

Ahmet TAŞAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. YÖNTEME GENEL BAKIŞ.....	2
1.1. Birleştirme Çeşitleri	4
1.2. Mikroyapının İncelenmesi.....	5
2. TAKIM ÇEŞİTLERİ, GEOMETRİSİ VE UYGULAMALARI.....	7
2.1. Omuz Çeşitleri.....	7
2.1.1. Spiral omuz ve kullanımı	7
2.1.2. Dışbükey omuz ve kullanımı.....	8
2.1.3. İçbükey omuz ve kullanımı	9
2.2. Pim Çeşitleri	10
2.2.1. Silindirik pim ve kullanımı.....	10
2.2.2. Konik pim ve kullanımı.....	13
2.2.3. Helisel pim ve kullanımı	15
2.2.4. MX üç yivli pim ve kullanımı	16
2.2.5. MX trivex pim ve kullanımı	17
2.2.6. Dişsiz pim ve kullanımı.....	18
3. KEVLAR MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM YERLERİ	20
4. FSW'DEKİ ISI ÜRETİM MODELİNİN İNCELENMESİ.....	23
4.1. Isı Üretim Modelinin Hesaplanması.....	23
4.1.1. Takım omuz yüzeyindeki ısı üretimi.....	26
4.1.2. Konik pimin yüzeyindeki ısı üretimi.....	26
4.1.3. Pimin uç yüzeyindeki ısı üretimi.....	26
4.2. Sistem Modelinin Oluşturulması.....	28
4.2.1. Isı aktarımının hesaplanması	28
4.2.2. Torkun hesaplanması.....	28
4.2.3. Dalma kuvvetinin hesaplanması.....	30
4.2.4. Sürtünme katsayısının hesaplanması.....	31
4.2.5. Newton yasasına uymayan akışın hesaplanması	31
5. SİSTEMİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) ANALİZİNİN YAPILMASI	34
6. DENEYSEL YÖNTEM	44
6.1. Uygulama Seti	44
6.2. FSW ve Sonuçlar	45
6.2.1. Birleştirme olmaksızın kaynak uygulaması	45
6.2.2. Bindirmeli kaynak uygulaması.....	49
6.2.3. Alın kaynak uygulaması.....	50
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53

KAYNAKLAR	54
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	58
ÖZGEÇMİŞ	59



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	FSW'nin şematik görünümü ve terminolojisi.....	2
Şekil 1.2.	Bir FSW takımının şematik görünümü ve etkiyen kuvvetler	3
Şekil 1.3.	FSW ile yapılabilen birleştirme çeşitleri a) alın kaynağı b) kenar kaynağı c) çoklu T-kaynağı d) bindirme kaynağı e) çoklu bindirme kaynağı f) tekli T-kaynağı g) köşe kaynağı.....	4
Şekil 1.4.	FSW'nin mikroyapının şematik görünümü	5
Şekil 1.5.	Al alaşımlı bir malzemenin,FSW sonrası kesit alınıp dağlanması sonucu görülen bölgeler a) mikroyapı ve sınırları b) geri çekilme bölgesi c) ilerleme bölgesi	6
Şekil 3.1.	Reçine kaplı Twaron CT 736 PHF Kevlar görünümü	21
Şekil 4.1.	Çalışmada kullanılan konik uçlu ve 3 yüzeyi düz kenarlı pim	23
Şekil 4.2.	Konik uçlu pimde, farklı bölgelerde oluşan ısı üretimi.....	24
Şekil 4.3.	Konik uçlu pim için, yüzey oryantasyonu ve sonsuz küçüklükteki kesit bölgeleri.....	25
Şekil 4.4.	Kullanılan konik pime ait a) pim yüksekliği b) omuz çapı c) pim dip çapı (6 mm kabul edilmiştir) d) pim uç çapı gösterilmektedir	29
Şekil 4.5.	Kevlar plakaların elde edilme prosesi.....	30
Şekil 4.6.	Kullanılan kevlar plakasının ölçüleri	30
Şekil 4.7.	Newton yasasına uymayan akışların sınıflandırılması ve gerilim-kesme oranı davranışları	32
Şekil 5.1.	COMSOL ortamında problemin geometrisinin tanımlanması.....	34
Şekil 5.2.	COMSOL ortamında tanımlanan konik FSW pimi	34
Şekil 5.3.	Problem çözümü için oluşturulan örgü yapısı	35
Şekil 5.4.	COMSOL ortamında, pim hızı ve dönme hareketinin uygulanması, a) omuz yüzeyi b) yanall yüzey.....	36
Şekil 5.5.	COMSOL ortamında, pim hızı ve dönme hareketinin uygulanması	37
Şekil 5.6.	COMSOL ortamında, Newton Yasasına Uymayan Carreau modelinin uygulanması.....	38
Şekil 5.7.	$u_{weld} = 100$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız haritası	38
Şekil 5.8.	$u_{weld} = 200$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız haritası	39
Şekil 5.9.	$u_{weld} = 200$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız vektörleri.....	39
Şekil 5.10.	$u_{weld} = 100$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız vektörleri.....	40
Şekil 5.11.	$u_{weld} = 200$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için kesme oranı.....	41
Şekil 5.12.	$u_{weld} = 100$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için kesme oranı.....	41
Şekil 5.13.	Pimin etrafında oluşan izotermal yüzey haritası. Daha iyi görüntü elde edebilmek için izotermal yüzeylerden sadece negative x değerleri gösterilmektedir	43
Şekil 6.1.	Smart XL6036 yatay diz tipi freze tezgahı	44
Şekil 6.2.	FLIR T450sc marka termal kamera	44
Şekil 6.3.	FSW için kurulan uygulama seti a) fener mili b) pim tutucu c) pim d) fikstür e) Kevlar plakaları	45

Şekil 6.4.	1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak işlemi a) 53°C başladı b) 168°C'ye 5 saniyede ulaştı.....	45
Şekil 6.5.	1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak sonuçları a) toplu posa yanığı b) erişilen maksimum sıcaklık c) posa yanığı, yetersiz ergime ve fiber lif deformasyonu gibi kusurlar	46
Şekil 6.6.	720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak a) 74°C'de başladı b) 165°C'ye 4 saniyede ulaşmıştır.....	47
Şekil 6.7.	720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak sonuçları a) toplu posa yanığı ve sıçrantı b) erişilen maksimum sıcaklık d) toplu posa yanığı, yetersiz ergime ve fiber lif deformasyonu gibi kusurlar	47
Şekil 6.8.	390 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak a) 83°C'de başladı b) 165°C'ye 6 saniyede ulaşmıştır	48
Şekil 6.9.	390 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak sonuçları a) posa yanığı ve sıçrantı b) erişilen maksimum sıcaklık, toplu posa yanığı ve sıçrantı d) toplu posa yanığı, yetersiz ergime ve fiber lif deformasyonu gibi kusurlar.....	48
Şekil 6.10.	1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında bindirmeli kaynak uygulaması a) 50°C'de başladı b) 166°C'ye 9 saniyede ulaşmıştır.....	49
Şekil 6.11.	1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında bindirmeli kaynak uygulaması a) maksimum 354°C'de yoğun çoklu posa yanığı b) bindirmeli kaynak pozisyonu c) üst plakada, kaynak hattı boyunca görülen yetersiz ergime d) alt plakada sadece yüzey deformasyonu görülmüştür	49
Şekil 6.12.	1800 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında alın kaynak uygulaması a) 32°C'de sıcaklıkta başlamıştır b) maksimum 86°C'ye 11 saniyede çıkmıştır c) kaynak işlem sonrası görüntü d) ergime görülmemiş, sadece kenar yanığı ve fiber lif deformasyonu gözlenmiştir.	50
Şekil 6.13.	720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında alın kaynak uygulaması a) 36°C'de sıcaklıkta başlamıştır b) maksimum 90,5°C'ye 41 saniyede çıkmıştır c) kaynak işlemi sonrası görüntü d) ergime görülmemiş, sadece kenar yanığı ve fiber lif deformasyonu gözlenmiştir.	51
Şekil 6.14.	Kevlar'deki ağırlık azalması, zamanla artan sıcaklık artışı ile artmaktadır (izotermal basamak 260°C'dir)	52

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. MIG ve FSW karşılaştırılması	4
Tablo 2.1. Spiral omzun kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	7
Tablo 2.2. Dışbükey omzun kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	8
Tablo 2.3. İçbükey omzun kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	9
Tablo 2.4. Silindirik pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	10
Tablo 2.5. Konik pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	13
Tablo 2.6. Helisel pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	15
Tablo 2.7. MX üç yivli pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	16
Tablo 2.8. MX Trivex pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	17
Tablo 2.9. Dişsiz pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri	18
Tablo 3.1 Fiber malzemelerinin mekanik özellikleri	21
Tablo 3.2. Twaron CT 736 PHF Kevlar malzemesi ile Kevlar 29 ve Kevlar 49 malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	22
Tablo 3.3. Kevlar ile farklı malzeme özelliklerinin karşılaştırılması	22
Tablo 4.1. Terimler ve açıklamaları	24
Tablo 5.1. Farklı parametreler için karışım oranları	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

θ	: Eğim açısı, (°)
F	: Dalma kuvveti, (N)
ω	: Takım açısal dönme hızı, (rpm)
v	: İlerleme hızı, (mm/dak)
Q_1	: Takım omzundaki ısı üretimi, (W)
Q_2	: Pim yüzeyindeki ısı üretimi, (W)
Q_3	: Pim ucundaki ısı üretimi, (W)
Q_{total}	: Toplam ısı üretimi, (W)
μ	: Sürünme katsayısı
α	: Pim konik açısı, (°)
v	: Takım ilerleme hızı, (mm/dak)
σ	: Kontak basıncı, (Pa)
$\tau_{contact}$	: Kontak kesme gerilmesi, (Pa)
R_{PT}	: Pim uç yarıçapı, (mm)
R_{PS}	: Pim dip yarıçapı, (mm)
$R_{shoulder}$	: Takım omuz yarıçapı, (mm)
H_{probe}	: Pim yüksekliği, (mm)
T	: Ortam sıcaklığı, (°C)
T_{ergime}	: Kevlar erime sıcaklığı, (°C)
t	: Zaman, (s)
u	: Birim vektör
ρ	: Yoğunluk, (g/cm ³)
k	: Isı iletim katsayısı, (W/mK)
C_p	: Özgül ısı katsayısı, (cal/g°C)
F_n	: Nominal kuvveti, (N)
A_s	: Takım omuz yüzey alanı, (mm ²)
A_p	: Plaka yüzey alanı, (mm ²)
P	: Plakaya uygulana basınç, (Pa)
r	: Dönme eksenine olan mesafe, (mm)
r_i	: Pim yarıçapı, (mm)
r_0	: Takım omuz yarıçapı, (mm)
M_{omuz}	: Takım omzundaki tork, (Nm)
$M_{pim yüzeyi}$	: Pim yüzeyindeki tork, (Nm)
$M_{pim taban}$	: Pim tabanındaki tork, (Nm)
n	: Akış davranış indeksi
μ_{∞}	: Sonsuz kesme viskozitesi, (kg/ms)
μ_0	: Sıfır kesme viskozitesi, (kg/ms)
$\dot{\gamma}$	: Kesme gerilme oranı, (1/s)
λ	: Zaman sabiti
T_0	: Referans sıcaklık, (K)
u_{weld}	: COMSOL'daki takım ilerleme hızı, (mm/dak)
w	: COMSOL'daki takım açısal dönme hızı, (rpm)
s	: Parça kalınlığı, (mm)

Kısaltmalar

CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FSSW	: Friction Stir Spot Welding (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
HAZ	: Heat-Affected Zone (Isıdan Etkilenmiş Bölge)
MIG	: Metal Inert Gaz (Asal Gaz Altında Yapılan Kaynak Yöntemi)
OÇ	: Omuz Çapı
PB	: Pim Boyu
PÇdip	: Pim Dip Çapı
PÇuç	: Pim Uç Çapı
PM	: Pim Çapı
PŞ	: Pim Şekli
TMAZ	: Thermomechanically Affected Zone (Termomekanik Olarak Etkilenmiş Bölge)
TWI	: The Welding Institute (Kaynak Enstitüsü)

KEVLAR MALZEMESİNİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİ İLE ÇOKLUFİZİK MODELLENMESİ

ÖZET

Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW), geleneksel kaynaklı birleştirme yöntemlerinde metalin ergimesi ve katılaşması sırasında meydana gelen, çatlakları, kalıntı gerilimlerini ve çarpılmaları ortadan kaldıran, bir katı hal birleştirme yöntemidir. 1991 yılında, İngiltere'deki Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından alüminyum kaynakları için geliştirilmiştir. FSW'nin en önemli avantajları olan; kolay otomasyon edilmesi, daha az çarpılma, kaynak bölgesi içerisinde daha az kalıntı gerilimleri ve daha iyi mekanik özelliklerinin yanı sıra, alüminyum malzemelere ilave olarak diğer metal ve metal alaşımlarına da uygulanışı üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

FSW'nin genel yapısına bakacak olursak; erimeyen bir malzemedan üretilen, pim ve omuz kısımlarından oluşan, özel bir tasarıma sahip dönen bir takımdan meydana gelmektedir. Bu takım, birleştirilecek olan plaka veya sac malzemelerin birleştirme kenarları üzerinde döner ve daha sonra da kaynak hattı boyunca ilerleyerek kaynak işlemini yapar. Takım dönme eksenini ile, kaynaklanacak olan parçalar arasında bir eğim açısı belirlenir. Bu açı, takım ana gövdede malzemenin işlenmesini ve takım ilerleme sırasında da, omzun desteklenmesiyle kuvvet etkisinin kademeli olarak arttırılmasını sağlar. Böylelikle, takımın yanal hattı boyunca malzemenin plastik akışı korunur ve pimin gerisindeki kaynak bitimi desteklenmiş olunur.

Bu çalışmada ilk önce, kevlar kumaşlardan yapılan 4 mm kalınlığındaki iki plakanın, FSW yöntemiyle birleştirilebilirliğinin COMSOL Multiphysics analiz programıyla incelenmiştir. Sonrasında da, uygun bir tezgah ile uygulaması yapıp sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Analitik Modelleme, Isı Üretimi, Kompozit Malzemelerin Kaynağı, Sürtünme Karıştırma Kaynağı.

MULTIPHYSICS MODELLING OF KEVLAR MATERIAL WITH FRICTION STIR WELDING

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a joining process in solid-state, which eliminates problems associated with the material melting and solidification, such as cracks, residual stresses and distortions generated during conventional welding. It was invented in 1991 at TWI (The Welding Institute) in the UK initially for aluminium joining. Among the most important advantages of FSW are; easy automation, less distortion, lower residual stress and good mechanical properties in the joining region, FSW is a recent approach to metal joining and although originally intended for aluminium alloys, it is investigated in a variety of metallic materials.

The basic concept of FSW is a rotating tool, made of non-consumable material, especially designed with a geometry consisting of a pin and a recess (shoulder). This tool is inserted as spinning on its axis at the adjoining edges of two sheets or plates to be joined and then it travels along the joining path line. The tool rotation axis defines an angle of inclination with which the components to be welded. This angle is used for receiving the material to be processed at the tool base and to promote the gradual forge effect imposed by the shoulder during the passage of the tool. This prevents the material plastic flow at the tool lateral, ensuring weld closure on the back of the pin.

In this study, two 4 mm kevlar plates which were produced with the kevlar fabrics, were analysed with COMSOL Multiphysics in order to investigate the weldability via FSW. Thereafter, an experimental investigation was done with an appropriate workbench in order to compare with the analysis results.

Keywords: Analytical Modeling, Heat Generation Composite Materials Welding, Friction Stir Welding.

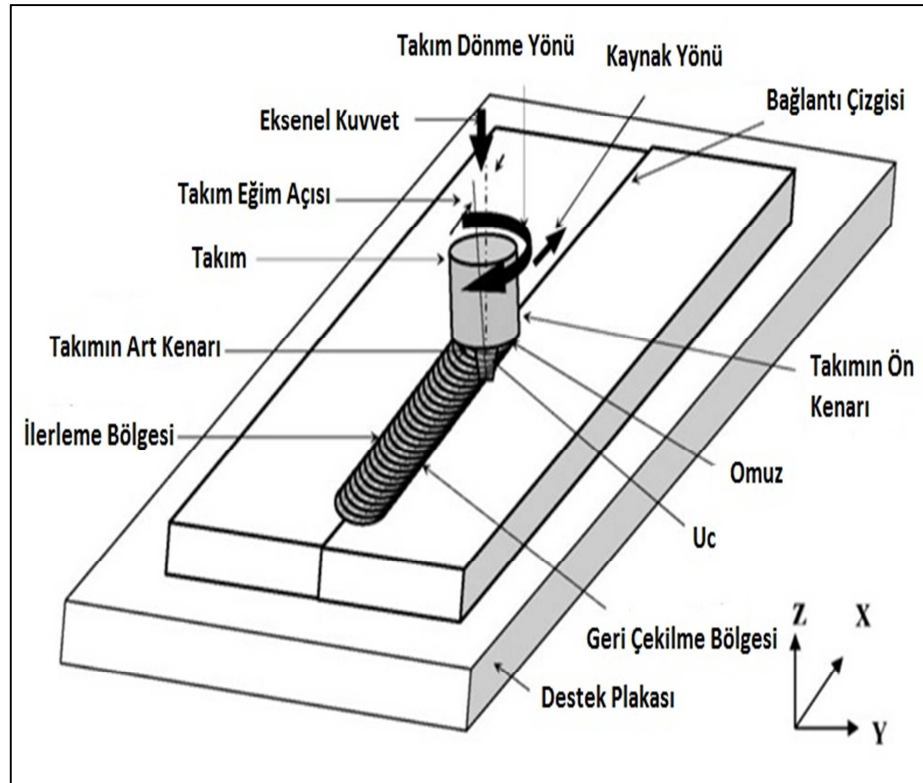
GİRİŞ

Sürtünme karıştırma kaynağı özellikle düşük erime sıcaklığına sahip demir olmayan metallerin birleştirilmesi için uygundur. Ayrıca sabit faz birleştirme yöntemiyle alüminyum ve çelik gibi karışık bileşiklerin birleştirilmesi de mümkün olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağında dönen bir pim, iş parçalarının temas yüzeyleri arası boyunca sürülür. Sürtünme sıcaklığı sayesinde malzeme plastifiye olur ve birbiriyle kaynaklanır.

Yöntem özellikle düşük erime sıcaklığına sahip demir dışı metallerin ve karışık bileşiklerin ekonomik bir şekilde birleştirilmesi için uygundur. Sürtünme karıştırma kaynağı sayesinde çok zor kaynaklanabilir veya farklı türden malzemeler örneğin alüminyum, magnezyum, bakır, titanyum veya çelik, birbiriyle birleştirilebilir. Bu teknoloji, farklı branşlarda uygulanabilmektedir. Yalpaze burada otomobil imalatından havacılık sektörüne ve elektronik endüstrisine kadar uzanmaktadır.

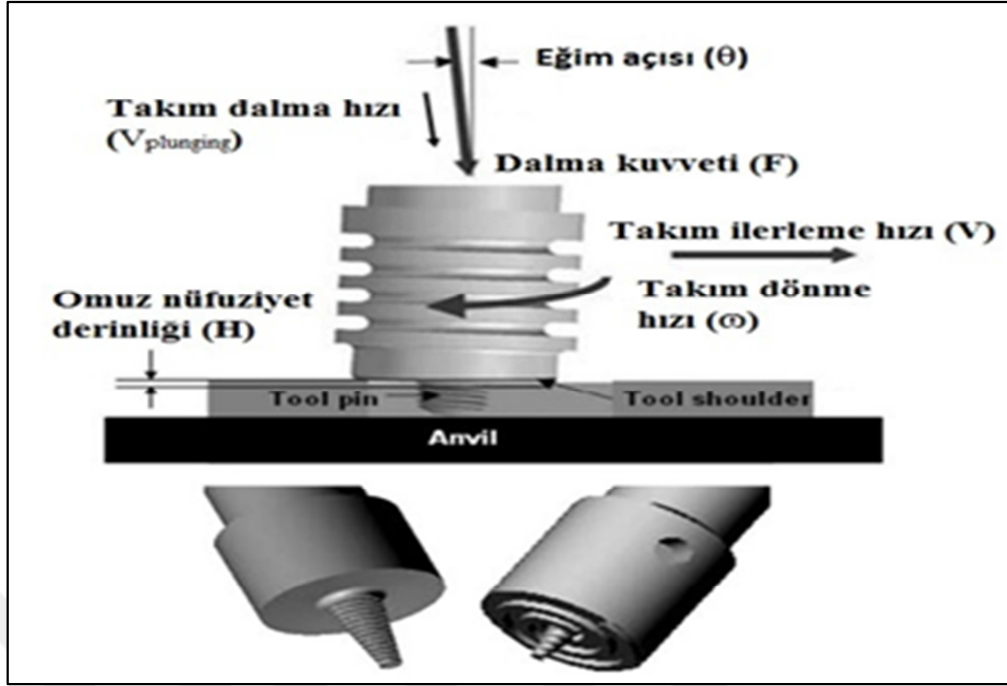
1. YÖNTEME GENEL BAKIŞ

Yöntem; Şekil 1.1.'de görüldüğü üzere, özel tasarlanmış pim ve destek bölümlerinden oluşan bir takım ile birleştirilecek olan parçalara; daldırma, döndürme ve ileri sürme kuvvetleri etkisinde birleştirme uygular.



Şekil 1.1. FSW'nin şematik görünümü ve terminolojisi [1]

Şekil 1.2.'de gösterildiği üzere takıma yakından bakacak olursak, hiçbir kaynak ağzı hazırlığı yapılmadan alın altına getirilen iki plaka, özel tasarlanmış bir omuz ve omuza takılı pimden meydana gelen takım, belirli bir eğim açısı (θ) ile baskı uygulayıp (F , daldırma kuvveti), hem dönerek (ω , dönme hızı) hem de ilerleyerek (v , ilerleme hızı), kaynak hattı boyunca birleştirilmektedir.



Şekil 1.2. Bir FSW takımının şematik görünümü ve etkiyen kuvvetler [1]

Yöntemin avantajlarını sıralayacak olursak;

- Alaşım kaybı yoktur
- Ölçüsel stabilite ve tekrar edilebilirlik
- Çok iyi mekanik özellikler, gözenek ve çatlak oluşumu önlenir
- Sarf malzeme maliyetinden tasarruf
- Al, Ti, Cu, Ni, Mg alaşımlı ve kompozit malzemelerin kaynağına çok uygun
- Malzeme ağırlığından tasarruf
- Çevreye zararlı etkisi yoktur

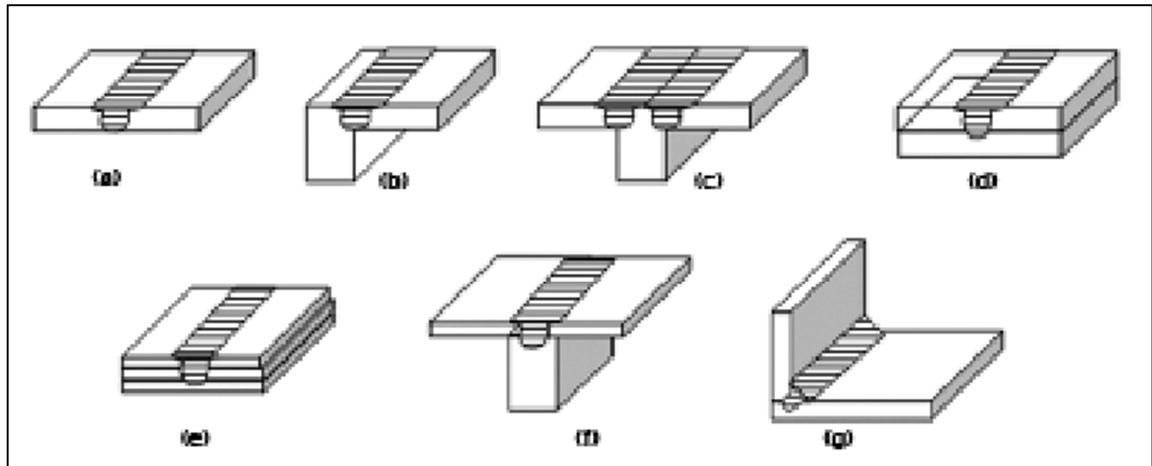
Literatürde, MIG yani soygaz altında yapılan kaynak olarak bilinen kaynak yöntemi ile, FSW yönteminin karşılaştırıldığı Tablo 1.1.'de de görüldüğü üzere, 6000 serisi AA 6062-T6 malzemenin 5 mm ve 10 mm olmak üzere yapılan ayrı uygulamada dikkati çeken, FSW'nin MIG kaynak yöntemine göre 5 mm'lik malzeme için kaynak hızı 4 kat, 10 mm'lik malzeme için de yaklaşık 2 kat daha hızlıdır. Bunun nedenleri olarak da daha önce bahsettiğimiz üzere, FSW yönteminin geleneksel kaynak yöntemlerinde olduğu gibi, kaynak ağzı hazırlığı ve temizliğine, sarf malzemesi kullanımına ihtiyaç duymamasıdır.

Tablo 1.1. MIG ve FSW karşılaştırılması [2]

AA6082-T6	s=5 mm	s=5 mm	s=10 mm	s=10 mm
Tek taraflı kaynak	MIG	FSW	MIG	FSW
Kaynak ağızı hazırlığı	V-kanal, 60°	-	-	-
Alkol ile temizlik	-	0,5 dak/m	-	0,5 dak/m
Kaynak öncesi fırçalama	2 dak/m	-	2 dak/m	-
Kaynak akımı	200 A	-	200/250 A	-
Koruyucu gaz	Ar	-	Ar	-
Kaynak hızı	0,5 m/dak	2 m/dak	0,6/0,3 m/dak	1 m/dak
Kullanılan tel	OK 18.16 Ø 1,2 mm	-	OK 18.16 Ø 1,2 mm	-
Paso sayısı	1	1	1+1	1
Toplam süre (1 m kaynak için)	4 dak.	1 dak.	7 dak.	1,5 dak.

1.1. Birleştirme Çeşitleri

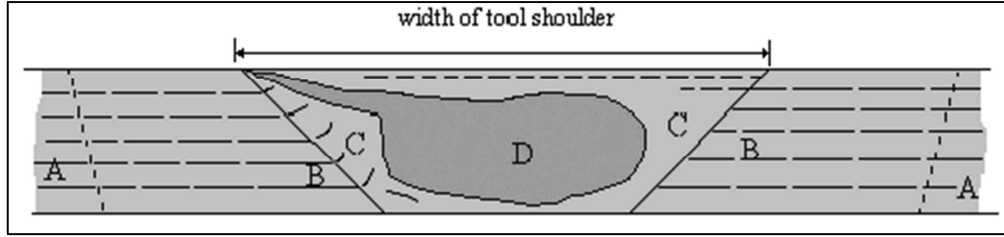
Yöntemi, birçok avantajlarının olması nedeniyle, Şekil 1.1.' de görüldüğü üzere alın altına kaynak yapılmasının yanı sıra, Şekil 1.3.'teki şekillerde de birleştirme yapmayı mümkün kılmaktadır.



Şekil 1.3. FSW ile yapılabilen birleştirme çeşitleri a) alın kaynağı b) kenar kaynağı c) çoklu T-kaynağı d) bindirme kaynağı e) çoklu bindirme kaynağı f) tekli T-kaynağı g) köşe kaynağı [3]

1.2. Mikroyapının İncelenmesi

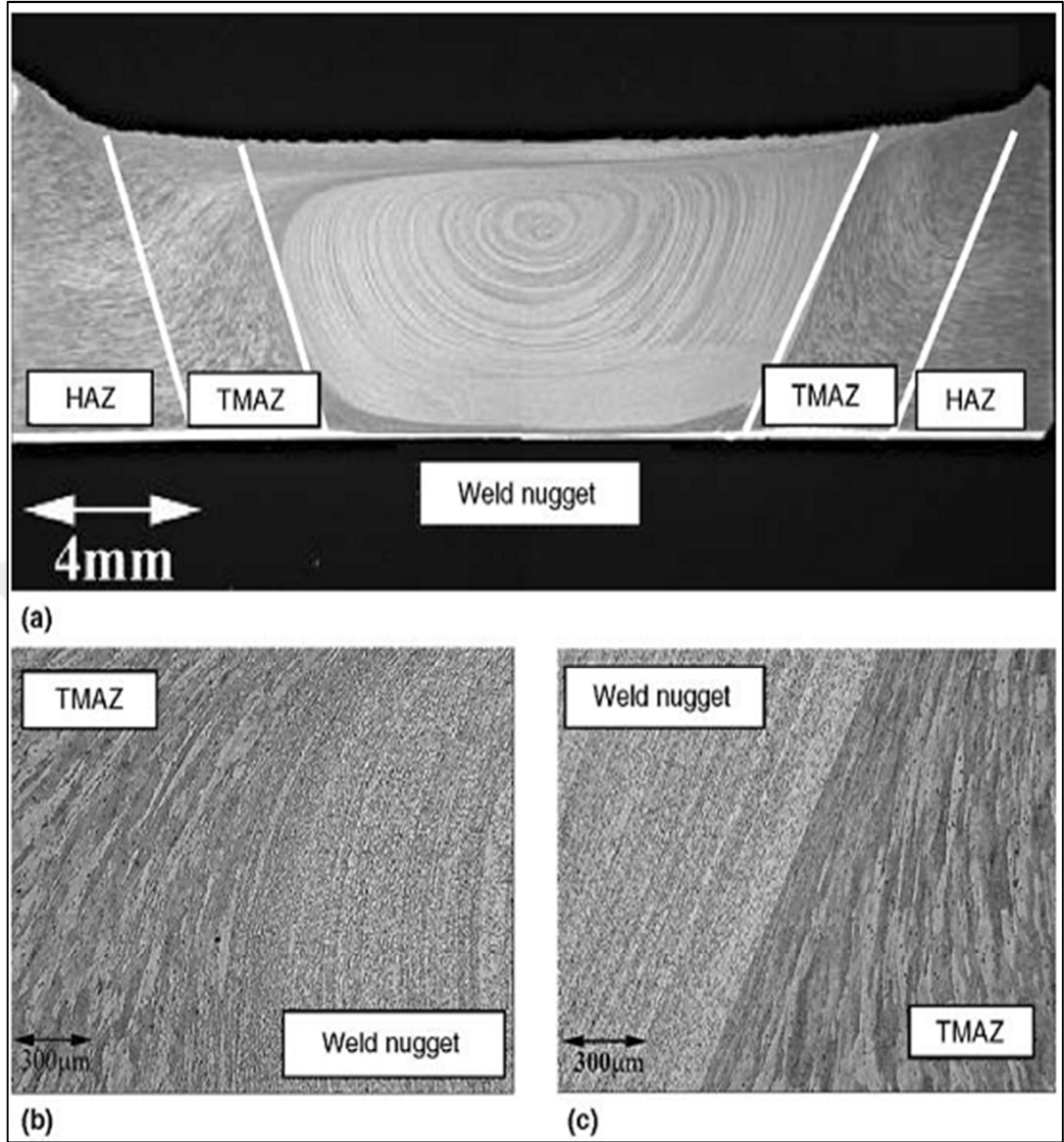
FSW'nin mikroyapısı, dönme ve ilerleme hızı, dalma kuvveti, takımın geometrisi ve malzemesi gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Şekil 1.4.'te, TWI tarafından araştırılıp kabul görülen, FSW'nin mikroyapısı ve bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 1.4. FSW'nin mikroyapısının şematik görünümü [3]

- A: Etkilenmemiş bölge: Kaynak bölgesinden uzak ve ısıdan etkilenmiş bölgedir. Bu da, malzemenin mikroyapısının mekanik özelliklerinin değişikliğe uğramadığı anlamına gelmektedir. 'Ana malzeme' olarak da adlandırılmaktadır.
- B: Isıdan etkilenmiş bölge (HAZ): Kaynak bölgesine biraz daha yakın bölgedir. Malzemenin, termal döngüsü ve mekanik özellikleri ve/veya mikroyapısı etkilenmiş ancak plastik deformasyona uğramamıştır.
- C: Termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TMAZ): Mikroyapısı ve mekanik özellikleri değişmiş bölgedir. HAZ bölgesinin aksine, plastik deformasyon oluşmaktadır. Rekristalizasyon bölgesi (kaynak havuzu) ile TMAZ bölgesi arasında belirgin bir sınır mevcuttur [3].
- D: Kaynak havuzu: Tamamiyle rekristalizasyona uğramış karıştırma bölgesi olarak adlandırılır. Tane yapısı, ana malzemeninkinden 10 kat daha küçük olması, mekanik özellikleri ve kırılma dayancı üzerinde önemli etkiye neden olmaktadır. Bölgenin çapı, pim çapından biraz daha büyük ancak omuz çapından önemli derecede küçüktür [4].

Şekil 1.5.'te, alüminyum alaşımlı bir malzemenin, FSW sonrası kesit alınıp dağlanması sonucu, yukarıda bahsedilen bölgeler ve sınırları gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Al alaşımlı bir malzemenin, FSW sonrası kesit alınıp dağlanması sonucu görülen bölgeler a) mikroyapı ve sınırları b) geri çekilme bölgesi c) ilerleme bölgesi [3]

2. TAKIM ÇEŞİTLERİ, GEOMETRİSİ VE UYGULAMALARI

Takım geometrisi, takımın üreteceği ve maruz kaldığı ısı üretim oranını, ilerleme hızını, torku ve termomekanik ortamı etkilemektedir. Plastik dönüşümdeki malzeme akışı da, takımın lineer ve eksenel dönüş hareketlerinden etkilenmektedir. Bu hususta en önemli parametreler; omuz çapı, omuz yüzey açısı, pim çapı/boyu, pim şeklidir [5].

2.1. Omuz Çeşitleri

2.1.1. Spiral omuz ve kullanımı

Tablo 2.1. Spiral omzun kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Spiral						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	Al 5xxx (Mg içerikli) serisi (Al 5083 H131)	1-30 mm	250 rpm, ilerleme 107 mm/min	* Kanal yapısı sayesinde, malzeme pime doğru direkt olarak deforme edildiğinden, takıma eğim vermek gerekmez.	* Farklı malzeme kalınlıklarında yeterli formu verilememesi	
	Al 6xxx (Si ve Mg içerikli) serisi (Al 6111-T4 - FSSW, Al 6082-T6)		* AA 6111-T4 - 2000 rpm, bekleme süresi; 2,5 s, dalma oranı; 2,5 mm/s. * AA 6082-T6 - 1810 rpm, 460 mm/min	* Undercut oluşumunu minimize eder, böylelikle çapak (flash) oluşumu da azaltılmış olur.		
	Al 7xxx (Zn içerikli) serisi (Al 7075-T7351)		394 ve 457 rpm, 300-540 mm/min	* Takım parça normaline dik olduğundan, uygulanması gereken normal kuvvetin düşüktür.		

Tablo 2.1.'de görüldüğü üzere, spiral omuz özellikle alüminyum serisinde kullanım alanı bulmuştur. Al 6082-T6 malzemesinde, kaynak verimliliği ~%76 olarak

görülmüştür [5, 22]. Al 7075-T7351 malzemesinde, kaynağın maksimum çekme direnci 470-480 MPa olarak ölçülmüş, yüzeyde tufal ve boşluk oluşumu problemleri saptanmıştır [5, 23]. Spiral omzun en belirgin avantajları; çapak oluşumunu azaltması ve uygulanması gereken normal kuvvetin düşük olmasıdır [3, 5].

2.1.2. Dışbükey omuz ve kullanımı

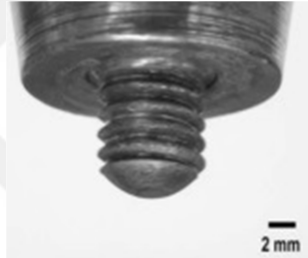
Tablo 2.2. Dışbükey omzun kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Dışbükey						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	Al 5xxx (Mg içerikli) serisi (Al 5754-FSSW)	1,32 mm	1500 rpm, bekleme süresi; 2 s, dalma oranı; 20 mm/s.	* Kalın parçaların kaynağını yapabilmek için takıma spiral (scroll) yapı da eklenmelidir.	* Çok başarı gösteremese de ince malzemelerin (0,4 mm) kaynağında TWI tarafından uygulaması yapılmıştır.	
Ti	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	3 mm	400 rpm, 60 mm/min, Ar gazı koruması altında	* Takımın en dış kenarının parça ile sürekli kontakt halinde olmasına gerek yoktur; böylelikle omuz (shoulder), dış bükey (convex) yapı boyunca her hangi bir noktadan temasa geçme rahatlığına kavuşur. Bununla beraber; bağlantı kaçıklık toleransları iyileştirilmiş, farklı kalınlıklarda ve karmaşık yapıdaki malzemelerin kaynağı iyileştirilmiştir.		
Paslanmaz Çelik	Süper östenitik paslanmaz (NSSC 270)	6 mm	400-800 rpm, 76 mm/min, Ar gazı koruması altında	* Çapak ve hata oluşumu en aza indirgenir		

Tablo 2.2.'ye baktığımızda, Al 5754 malzemesinde dış bükey omuzlu takım ile yapılan kaynak sonrası, kaynak metali içerisinde alaşım azalması görülmemiştir [5, 24]. NSSC270 süper östenitik paslanmaz çeliğin kaynağında, inter metalik fazların çokluğu zayıf kaynak birleşimine neden olmuştur [5, 25]. Dışbükey omzun en belirgin avantajları; çapak ve hata oluşumunu minimize etmesi, farklı kalınlık ve kompleks yapıdaki malzemelerin kaynağını iyileştirmesidir [3, 5].

2.1.3. İçbukey omuz ve kullanımı

Tablo 2.3. İçbukey omzun kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

İçbükey								
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü		
Al	Al 5xxx (Mg içerikli) serisi (Al 5754-FSSW)	1,32 mm	1500 rpm, bekleme süresi; 2 s, dalma oranı; 20 mm/s	* Kaynaktaki mikro yapı, geometri ve hata türleri önemli derecede azaltılabilir.	* Orta derecede çapak ve hata oluşabilme riski			
	Al 6xxx (Si ve Mg içerikli) serisi (Al 6061-T6)	6,3 mm	286-1150 rpm, 30-210 mm/min	* Uygulanacak maksimum kuvveti ve inilecek derinliği artırır.				
	Al 7xxx (Zn içerikli) serisi (Al 7020-T6)	4 mm	300-1620 rpm, 100-900 mm/min	* Tasarımı kolaydır.				
	AA 1050 ile 22MnB5	3 mm	1000-2000 rpm, bekleme süresi; 2 s, FSSW bindirme kaynağı	* Uygun bir operasyon için, parça normalinden hareket yönünün tersine doğru 1-3° lik bir açı ile durmalıdır. Böylelikle daha yüksek baskı kuvveti ile daha çok malzeme karışımı ve kaynak havuzu bütünlüğü sağlanır.				
Ti	Ti alaşımlı (cp-Ti, ticari saflıkta Ti)	1,8 mm	200 rpm, 50 mm/min, Ar gazı koruması altında					
	2024-T3 Al ile Ti-6Al-4V alaşımlı	2 mm	800 rpm, 80 mm/min					
Paslanmaz Çelik	SAF 2507 süper duplex	4 mm	450 rpm, 60 mm/min					
	15-5PH (çökelme sertleşmeli martenzitik paslanmaz çelik)	2,6 mm	300-450 rpm, 60-350 mm/min					
Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS)	DP 780 karbon çeliği (dual phase, otomotiv çeliği, ferritik faz içinde martenzitik yapılı)-FSSW	1,5 mm	800-1600 rpm, bekleme süresi; 1-10 s					
	DP 590 karbon çeliği (dual phase, otomotiv çeliği, ferritik faz içinde martenzitik yapılı)	1,2 mm	3000 rpm, Ar gazı koruması altında, FSSW bindirme kaynağı					

Tablo 2.3.'e baktığımızda, Al 7020-T6 malzemesinde, iç bükey omuzlu takım ile yapılan kaynakta, kaynak metali içerisinde alaşım azalması görülmemiştir [5, 26]. 2024-T3 Al ile Ti-6Al-4V alaşımlı malzemenin kaynağı sonucunda elde edilen maksimum çekme dayanımının %73'ü, Al alaşımından sağlanmıştır [5, 27]. SAF 2507 süper duplex paslanmaz çeliğin kaynak sonrası, kaynak dayanımı ana metal ile aynı çıkmıştır [3, 28]. 15-5PH (çökeltme sertleşmeli martenzitik paslanmaz çelik) kaynak verimliliği %80-98 olarak görülmüş, takım aşınması pim ucunda ve omuz kenarlarında gerçekleşmiştir [3, 29]. DP 590 karbon çeliğinin (dual phase, otomotiv çeliği, ferritik faz içinde martenzitik yapılı) kaynak sonrası takımdan kaynaklanan silisyum ve azot içerikli kontaminasyonlar dayanımda azalmaya neden olmuştur [5, 30]. İçbükey omzun en belirgin avantajları; kaynaktaki mikro yapı, geometri ve hatalar önemli derecede azaltılmakta, uygulanması gereken maksimum kuvveti ve inilecek derinliği de arttırmaktadır [3, 5].

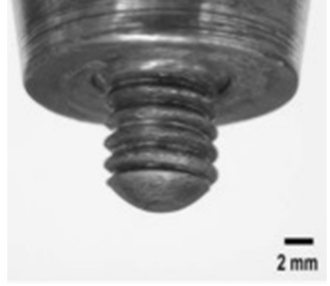
2.2. Pim Çeşitleri

2.2.1. Silindirik pim ve kullanımı

Tablo 2.4. Silindirik pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Silindirik						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Mg	AZ31 Mg (Al içerikli Mg alaşımlı, havacılık sektöründe kullanılır)	1,5 mm	OÇ: 10 mm, PÇ: 4 mm, PB: 1,8 mm; PŞ: M4 düz dişlere sahip 3 kenarlı düz. 1000-3000 rpm, bekleme süresi; 1,4 s, dalma oranı; 0-10 mm/s, FSSW	* Dişler sayesinde malzemenin omuzdan (shoulder) pim dibine doğru transferi sağlanır. * Yuvarlatılmış dişler sayesinde daldırma esnasında takımın aşınması azaltılarak kaynak kalitesi artırılır (en etkin yuvarlatma uç çapının %75 'i alınarak elde edilir).		
	AZ31B-H24 (Mg alaşımlı, temperli, havacılık ve elektronik cihaz kutularında kullanılır)	2 mm	PÇ: 3,175 mm, PB: 1,65 mm; PŞ: Düz dişli. 1000-2000 rpm, 300-1800 mm/min	* İmalatı kolay * Oluşabilecek hata oranları düşük		

Tablo 2.4. (Devam) Silindirik pim kullanımı yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
	Al alaşımları	5 mm	OÇ: 15 mm; PB: 4,7/6 mm; PŞ: düz silindirik, üçgen formlu silindirik dişli. 600-1500 rpm, 25-1000 mm/min			
	6082-T6 Al	1,5 mm	PÇ: 1,7 mm; PŞ: düz silindirik; PB: 1,2mm. 1810 rpm, 460 mm/min		* Maksimum 12 mm kalınlığa malzeme kalınlığına kadar çıkılabilir. * Yuvarlatma yarıçapı arttıkça yüzey hızı düşmektedir. * Ucu düz olan pimler daha fazla daldırma kuvvetine ihtiyaç duymaktadır.	
	6061-T6 Al	6,3 mm	OÇ:26 mm; PÇ: 5,6 mm; PB: 5,9 mm; PŞ: düz silindirik dişli. 286-1150 rpm, 30-210 mm/min			
	7020-T6 Al	4 mm	OÇ: 13 mm; PŞ: düz silindirik; PB:3,19 mm; PÇ: 5 mm. 300-1620 rpm, 100-900 mm/min			
	6061-T6 Al +% 20 Al2O3	5 & 6 mm	OÇ: 19 mm; PŞ: düz silindirik dişli; PÇ: 6,3mm. 500-2000 rpm, 60-540 mm/min			
	Al 359 +20% SiC (döküm için)	4 mm	OÇ: 19 mm; PŞ: düz silindirik dişli; PÇ: 6, 3 mm; PB: 3,6mm. 500-1000 rpm, 360 ve 660 mm/min			

Tablo 2.4. (Devam) Silindirik pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

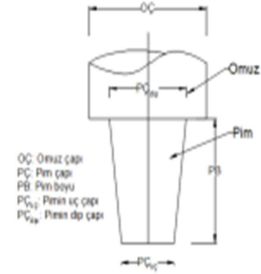
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Kompozit	Al-10 wt -%TiB2 (ağırlıkça %10 Al olan, TiB2 alaşımlı Al)	6 mm	OÇ: 16 mm; PŞ: kare formlu silindirik. 2000 rpm, 30 mm/min			
Ti	Tungsten karbür kaplı pim ve tungsten kaplı omuz altında	3 mm	OÇ: 18 mm; PŞ: düz silindirik; PÇ: 5 mm PB: 2,85 mm. 1250 rpm, 32 mm/s, 1500 rpm, 60 mm/min			

Tablo 2.4.'e baktığımızda, AZ31B-H24 (Mg alaşımlı, temperli, havacılık ve elektronik cihaz kutularında kullanılır) malzemenin silindirik pimle kaynağı sonucu %48,8-96,7 aralığında kaynak verimliliği elde edilmişti [5, 31]. Al 6082-T6 malzemesinde ise kaynak verimi %76 olarak elde edilmiştir [5, 22]. Al 7020-T6 alaşımlı malzemenin kaynağı sonucu maksimum kaynak verimi %92 olarak elde edildiği görülmüştür [3, 32]. 6061-T6 Al+%20 Al₂O₃ alaşımlı malzemede kaynak sonrası, yöntem parametresine bağlı olarak, malzeme yüzeyinde aşınma gözlenmemiştir [5, 33, 34]. Al-10 wt-% TiB2 (ağırlıkça %10 Al olan, TiB2 alaşımlı Al) olan kompozit malzemenin kaynağında, %78,9-99,5 aralığında kaynak verimliliği elde edilmiştir [5, 35]. Tungsten karbür kaplı pime ve tungsten kaplı omuzla sahip takım altında yapılan Ti malzemesinin kaynağı sonucunda, kullanılan tungsten-tungsten karbür kaplı takım neticesinde %100'e yakın kaynak verimliliği ve düşük aşınma elde edilirken, başka takım ve kaplamalarda daha yüksek aşınma gözlenmiştir [3, 36]. Silindirik pimin en belirgin avantajları; dişler sayesinde malzemenin omuzdan pim dibine doğru transferi sağlanır, yuvarlatılmış dişler sayesinde daldırma esnasında takımın aşınması azaltılarak kaynak kalitesi artırılır, imalatı da oldukça kolaydır [3, 5].

2.2.2. Konik pim ve kullanımı

Tablo 2.5. Konik pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Konik						
Kullanıldığı Malzemeler	Aleay Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	7020-T6 Al	4 mm	OÇ: 13 mm; PŞ: 3 kenar düz; PB:3,19 mm; PÇ: 5 mm. 300–1620 rpm, 100–900 mm/min	* Tipik silindirik pimlerde 12 mm'ye kadar Al malzemelerin kaynağı yapılırken, kesik konik pimlerle ≥ 12 mm Al malzemelerin kaynağı daha hızlı yapılabilmektedir.	* Yüksek sıcaklık ve hidrostatik basınç, takım aşınmalarını arttırabilir.	
	AA 1050 - 22MnB5 (22MnB5 'li sıcak daldırılmış bor aleaylı Al)	1,8 mm	OÇ: 12 mm; PŞ: düz konik; PÇuç: 2 mm; PB: 2,7mm. FSSW bindirme kaynağı; 1000–2000 rpm, bekleme süresi: 2 s	* Silindirik pime göre enine yüklemeler daha az etkilidir.		
	AA 6061– (3–7) %TiC (TiC ile kuvvetlendirilmiş Al 6061)	6 mm	PŞ: Kare uçlu, altıgen uçlu, sekizgen uçlu konik. 30–135 mm/min	* Daha yüksek sürtünme ısısı, pim ile iş parçası arasında daha fazla temas yüzeyi olduğundan, plastik deformasyonu arttırmaktadır.		
	2024-T3 Al ile Ti–6Al–4V aleaylı	2 mm	OÇ: 18 mm; PŞ: dişli konik; PÇ: 6 mm. 800 rpm, 80 mm/min	* Kaynak bölgesine daha yüksek hidrostatik basınç uygulanabilmektedir. Böylelikle malzeme karışımına oranına ve kaynak bölgesi bütünlülüğüne önemli ölçüde olumlu etki bırakmaktadır.		
Mg	AZ31B (Mg aleaylı)	6 mm	OÇ: 15,18,21 mm, PÇ: 6 mm, PB: 5,7 mm; PŞ: üçgen ve kare formu düz. 1600 rpm, 40 mm/min	* Kademeli spiral pimler, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin (Ni-Al bronz gibi) kaynağında uygundur (1000°C'ye maruz)		
Ti	cp-Ti (ticari saflıkta Ti)	3 mm	OÇ: 15 mm; PŞ: 45 deg konik ve ucu kesik; PB: 1,7 mm; PÇdip:5,1mm. 200 rpm, 50 mm/min, Ar gaz koruması altında			



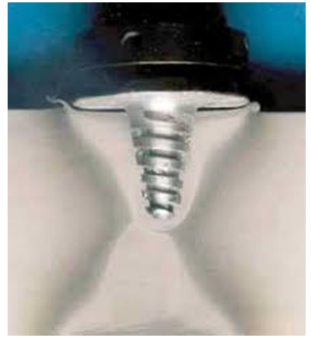
Tablo 2.5.(Devam) Konik pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
	Ti-6Al-4V	3-12 mm	OÇ: 19-32 mm; PŞ: düz konik; PB: 2,8-13,3mm. 150-750 rpm, 50-200 mm/mm			
	Ti-5111 plaka	12,7 mm	PB: 12,7 mm; PÇdip:25,4 mm; PÇuç:9,5mm. 140 rpm, 51 mm/min			
	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	3 mm	OÇ: 15 mm; PÇdip:5,1 mm; PÇuç:3mm. 400 rpm, 60 mm/min, Ar gaz koruması altında			
Bor	Sıcak daldırılmış bor alaşımları	1,4 mm	OÇ: 10, 2 mm; PB: 2,3 mm; PŞ: 3 kenarı düz. 800-2000 rpm, 1,9-10,5 s kaynak süresi. Bindirme kaynağı			
Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS)	DP 600 karbon çeliği (dual phase, otomotiv çeliği, ferritik faz içinde martenzitik yapılı)	1,22 mm	OÇ: 10 mm; PŞ: düz konik; PB: 1,7 mm; PÇ: 4-5,1mm. Dalma oranı; 3000 rpm 30-60 mm/min (FSSW)			
Kompozit	AA2124/SiCp/25-T4	3 mm	OÇ: 20 mm; PB: 25 mm; PŞ: konik dişli, PÇdip:6 mm; PÇuç:4mm. 900 rpm, 100 mm/min			
	Al-15 wt-%Mg ₂ Si (ağırlıkça %15 Al olan, Mg ₂ S alaşımlı Al)	6 mm	OÇ: 18 mm; PŞ: dişli silindirik konik; PB: 5,7mm. 710-1400 rpm, 125 mm/min			

Tablo 2.5.'e baktığımızda, AA 6061-(3-7) %TiC (TiC ile kuvvetlendirilmiş Al 6061) malzemesinin konik pim ile kaynağında, %72-114 aralığında kaynak verimliliği elde edilmiştir [5, 37]. AZ31B (Mg alaşımlı) malzemede kaynak verimliliği %48,8-96,7 aralığında elde edilmiştir [5, 38]. Ti-6Al-4V malzemesinde ise kaynak verimliliği %100'ün üzerine çıktığı görülmüştür [3, 39]. DP 600 karbon çeliği (dual phase, otomotiv çeliği, ferritik faz içinde martenzitik yapılı) kaynak sonrası mekanik özellikleri, geleneksel direnç nokta kaynağına benzer görülmüştür [5, 40]. Al-15 wt-% Mg₂Si (ağırlıkça %15 Al olan, Mg₂Si alaşımlı Al) kaynağında, kaynak verimi %80-98 aralığında elde edildiği görülmüştür [3, 41]. Konik pimin en belirgin avantajları; silindirik pime göre enine yüklemeler daha azdır, daha yüksek sürtünme ısısı, pim ile iş parçası arasında daha fazla temas yüzeyi olduğundan, plastik deformasyonu arttırmaktadır [3, 5].

2.2.3. Helisel pim ve kullanımı

Tablo 2.6. Helisel pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Helisel						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	6082 T6 Al	1-50 mm	Tek paso	* Bir silindirik ucun aynı çaptaki silindirik pime göre % 60 hacim kaybını azaltır. Böylelikle, enine yüklemeler azaltılmış ve ilerleme hızı da artırılmış olunur.		
	6082 T6 Al	75 mm	Arkalı önlü tek paso	* Kesik konik pimlerden farkı; pim üzerinde helisel dişlerin yer almasıdır, böylelikle burgu etkisini artırarak, dalma hareketini kolaylaştırır. * En göze çarpan özelliği; pim hacmine göre süpürdüğü malzeme oranının yüksek olmasıdır. Bu oran; silindirik uçlarda 1,1:1 iken, helisel uçlarda 1,8:1'dir		

Tablo 2.6.'ya baktığımızda, 6082-T6 Al malzemesinin helisel pim kullanılarak 1-50 mm kalınlıkta tek pasoda, 75 mm kalınlıkta ise arkalı önlü tek pasoda başarılı bir şekilde kaynaklanabildiği görülmüştür [3, 42, 43]. Helisel pimin en belirgin avantajları; pim hacmine göre süpürdüğü malzeme oranının yüksek olmasıdır. Bu oran; silindirik uçlarda 1,1:1 iken, helisel uçlarda 1,8:1'dir [3, 5]. Kesik konik pimlerden farkı, pim üzerinde helisel dişlerin yer almasıdır, böylelikle burgu etkisini arttırarak, dalma hareketini kolaylaştırır [3, 5]. Bir silindirik ucun aynı çaptaki silindirik pime göre %60 hacim kaybını azaltır. Bu sayede, enine yüklemeler azaltılmış ve ilerleme hızı da arttırılmış olunur [3, 5].

2.2.4. MX üç yivli pim ve kullanımı

Tablo 2.7. MX üç yivli pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

MX Üç Yivli						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	7075-T7351 Al	6,35 mm	394 ve 457 rpm, 300-540 mm/min	* TWI tarafından helisel pimin (Whorl pin) türevi olarak tasarlanmıştır; yüzeydeki yivler sayesinde hacim kaybı %70 oranında azaltılmıştır, kaynak hattı boyunca deformasyon da arttırılmış. * Hacmine göre süpürdüğü malzeme oranı 2,6:1 olarak saptanmıştır. İlerleme hızlarında diğer uçlara göre 2,5 katına kadar artış gözlenmiştir.		

Tablo 2.7.(Devam) MX üç yivli pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3,5]

Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
	6082 T6 Al	1-50 mm	Tek paso	* A356 Al döküm bir malzeme ile yapılan bir denemede; 3 yivli silindirik uç kullanılarak, silindirik ve kesik konik uçlara göre, Si artıklarının parçalanması ve döküm gözeneklerinin iyileştirilmesinde daha etkili olmuştur.		

Tablo 2.7.'ye baktığımızda, 7075-T7351 Al malzemesinin MX üç yivli pim kullanılarak yapılan kaynağında, maksimum çekme dayanımı 470-488 MPa elde edilmiş, ancak yüzeyde pullanma ve çukurlar görülmüştür [5, 45]. 6082-T6 Al malzemesinin 1-50 mm kalınlıkta tek pasoda başarılı bir şekilde kaynaklanabildiği görülmüştür [3, 42, 43]. MX üç yivli pimin en belirgin avantajları; yüzeydeki yivler sayesinde hacim kaybı %70 oranında azaltılmış, kaynak hattı boyunca deformasyon da arttırılmıştır [3, 5]. Hacmine göre süpürdüğü malzeme oranı 2,6:1 olarak saptanmış, ilerleme hızlarında diğer uçlara göre 2,5 katına kadar artış gözlenmiştir [3, 5].

2.2.5. MX trivex pim ve kullanımı

Tablo 2.8. MX Trivex pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

MX Trivex						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	7075-T7351 Al	6,35 mm	394 ve 457 rpm, 300-540 mm/min	* 6,35 mm kalınlığında 7075-T7351 Al malzeme ile yapılmış olan denemelerde; diğer pimplere göre enine yüklemelerde %18-25'lik bir düşüş, normal (forging or plunge) kuvvette de %12'lik bir azalma gözlenmiştir.		

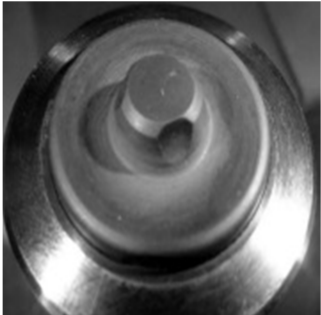
Tablo 2.8.(Devam) MX Trivex pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3,5]

Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
				* Bu pimlerle yapılmış olan kaynakların çekme dayançlarında da kayda değer artışlar gözlenmiştir.		

Tablo 2.8.'e baktığımızda, 7075-T7351 Al malzemesinin MX Trivex pim kullanılarak yapılan kaynağında, MX üç yivli pimde olduğu gibi maksimum çekme dayanımı 470-488 MPa elde edilmiş, ancak yüzeyde pullanma ve çukurlar görülmüştür [5, 45]. MX Trivex pimin en belirgin avantajları; diğer pimlere göre enine yüklemelerde %18-25'lik bir düşüş, normal kuvvette de %12'lik bir azalma gözlenmiş ve yapılan kaynakların çekme dayançlarında da kayda değer artışlar gözlenmiştir [3, 5].

2.2.6. Dişsiz pim ve kullanımı

Tablo 2.9. Dişsiz pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Dişsiz						
Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Al	7075-T7351 Al	2,4 mm		* Yüksek sıcaklığa dayançlı veya abrasif kompozitli alaşımların kaynağında oldukça uygundur. Özellikle aşınmaya karşı PCBN veya tungsten karbür kaplanmış olanlarla daha iyi sonuçlar elde edilir.		
	2024-T3 Al	2,11 mm				

Tablo 2.9.(Devam) Dişsiz pimin kullanım yerleri ve kaynak parametreleri [3, 5]

Kullanıldığı Malzemeler	Alaşım Türü	Malzeme Kalınlığı	Kaynak Parametreleri	Avantajları	Dezavantajları	Şematik Görünümü
Mg	Mg AZ31 (Al içerikli Mg alaşımlı, havacılık sektöründe kullanılır)	0,4 mm		* Çok ince malzemelerin (0,4mm gibi) kaynağında da iyi sonuçlar elde edilir.		
Ti	21S Ti (uzay sektöründe kullanılan oksidasyona dayanıklı Ti alaşımlı malzeme)	1,2 mm				

Tablo 2.9.'a baktığımızda, dişsiz pimin, havacılık ve uzay sektörlerinde yoğun olarak kullanılan Mg AZ31 (Al içerikli Mg alaşımlı, havacılık sektöründe kullanılır) ve 21S Ti (uzay sektöründe kullanılan oksidasyona dayanıklı Ti alaşımlı) malzemelerin kaynağında yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmüştür [5, 45, 46]. 21S Ti malzesinde kullanım sebebi, pimin dişli olması pimin dayanıklılığını azalttığı gibi, beklenmedik zamanda da pim kusurlarına neden olmaktadır [5, 45]. Dişsiz pimler, kasıtlı bir şekilde kusurlu kaynak elde etmek ve malzeme akışı üzerine çalışmak için de kullanılmaktadır [5, 46]. Dişsiz pimin en belirgin avantajları; yüksek sıcaklığa dayançlı veya abrasif kompozitli alaşımların kaynağında oldukça uygundur. Özellikle aşınmaya karşı PCBN veya tungsten karbür kaplanmış olanlarla daha iyi sonuçlar elde edilir [3, 5]. Ayrıca, 0,4 mm gibi çok ince malzemelerin kaynağında da iyi sonuçlar elde edilmektedir [3,5].

3. KEVLAR MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM YERLERİ

Kevlar'ı diğer ticari fiberlerden ayıran özellikler, yüksek dayanım, tokluk ve ısı dengesi gibi kendine özgü karakteristiğe sahip olmasıdır [6]. Kevlar, aromatik poliamid fiber (aramids) ailesine bağlı olup, E.I.Du Pont de Nemours firmasının tescilli ürünüdür. Uzay, savunma ve askeri endüstrisinin ihtiyaçlarına yönelik geliştirilmiş bir üründür [6].

Kevlar 29 ve Kevlar 49 olmak üzere iki tip mevcuttur ve özellikle Kevlar 49 uzay endüstrisinde oldukça yaygın kullanılmaktadır [7]. Kevlar'ın en geniş kullanım alanları olarak, mermi ile delinmeye, parçalanmaya ve ısıya dayanıklı miğfer yapımı, firen ve aktarma organlarında sürtünen gazket, halat ve kablolarda, kompozit ve fiber-optik kablolar, baskı-devre kartları kuvvetlendirme, spor malzemelerin, otomotiv sektöründe kullanılan lastik, kayış ve borular örnek gösterilebilir.

Sürekli filament iplik, sentetik lif, ıslak ve kuru lif yumağı posası ve kordon Kevlar'ın en yoğun kullanılan form çeşitleridir [7]. Aşağıda sıralanan özelliklere baktığımızda, Kevlar'ın birçok endüstri için ne kadar önemli olduğunu daha iyi anlayabiliyoruz [7].

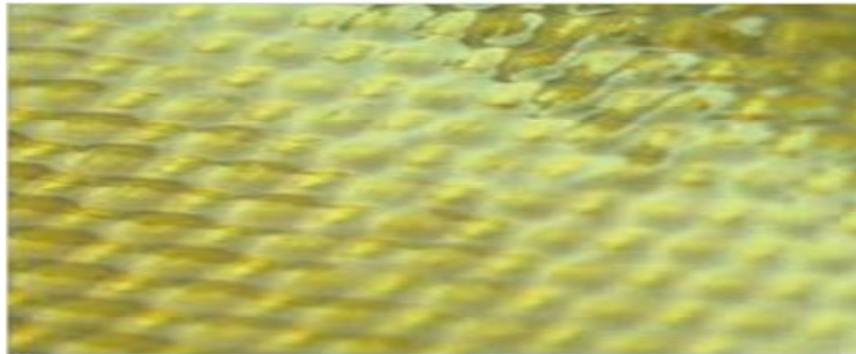
- Yüksek çekme mukavemeti
- Kırılmaya karşı düşük uzuma
- Yapısal rijitlik
- Düşük elektrik iletkenliği
- Yüksek kimyasal dayanım
- Düşük termal büzülme
- Kırılmaya karşı yüksek dayanım
- Mükemmel ölçüsel kararlılık
- Yüksek kesme direnci
- Alevlenme direnci
- Kendi kendine sönebilme

Tablo 3.1.'de, Kevlar 29 ve Kevlar 49 malzemelerinin de yer aldığı fiber malzemelerin mekanik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3.1. Fiber malzemelerinin mekanik özellikleri [8]

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastiklik Modülü (MPa x 10 ³)	Çekme Dayanımı (MPa)
E-camı	2550	71,7	1780
S-camı	2490	85.4	3240
Bor	2600	400	3270
Yüksek Mukavemetli Grafite	1780	275	2750
Yüksek Modül Grafite	1920	515	2400
Orta Özellikteki Grafite	1750	220	2070
Kevlar 29	1470	131	2750
Kevlar 49	1470	82,5	2950

Bu çalışmada, Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere, SAATI S.p.A.firmasının tescilli malzemesi olan reçine kaplı Twaron CT 736 PHF Kevlar kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Reçine kaplı Twaron CT 736 PHF Kevlar görünümü [7]

Tablo 3.2.'de, Twaron CT 736 PHF Kevlar malzemesi ile Kevlar 29 ve Kevlar 49 malzemelerinin mekanik özellikleri karşılaştırılmaktadır. Benzer mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2. Twaron CT 736 PHF Kevlar malzemesi ile Kevlar 29 ve Kevlar 49 malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [6, 7]

Özellikler	Birim	Twaron CT 736	Kevlar 29	Kevlar 49
Yoğunluk	g/cm ³	1,44	1,44	1,44
Çekme Dayanımı	GPa	2,4-3,6	3,6	3,6
Yapışkanlık	N/tex	1,65-2,5	2,03	2,08
Çekme Modülü	GPa	60-120	70,5	112,4
Uzama	%	2,2-4,4	3,6	2,4
Nemlilik	wt%	3,2-5	4,5	3,5
Bozunma veya Ergime	°C	500	427-482	427-482
Özgül Isı				
25°C'de	cal/g°C	0,34	0,34	0,34
100°C'de	cal/g°C	0,48	0,48	0,48
180°C'de	cal/g°C	0,6	0,6	0,6
Isıl İletim	W/mK	0,04	0,04	0,04

Tablo 3.3. Kevlar ile farklı malzeme özelliklerinin karşılaştırılması [6, 7]

Malzeme Türü	Ağırlığa Göre Dayanım	Maksimum Mukavemet (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
	KN.m/kg		
Kevlar® (ARAMID)	2514	2757	1,44
Alaşımli Çelik ASTM A36	254	400	7,8
Alüminyum Alaşım	222	248-483	2,63-2,8
Örümcek İpeği	1069	1000	1,3
Meşe Odunu	87	65	0,75

4. FSW'DEKİ ISI ÜRETİM MODELİNİN İNCELENMESİ

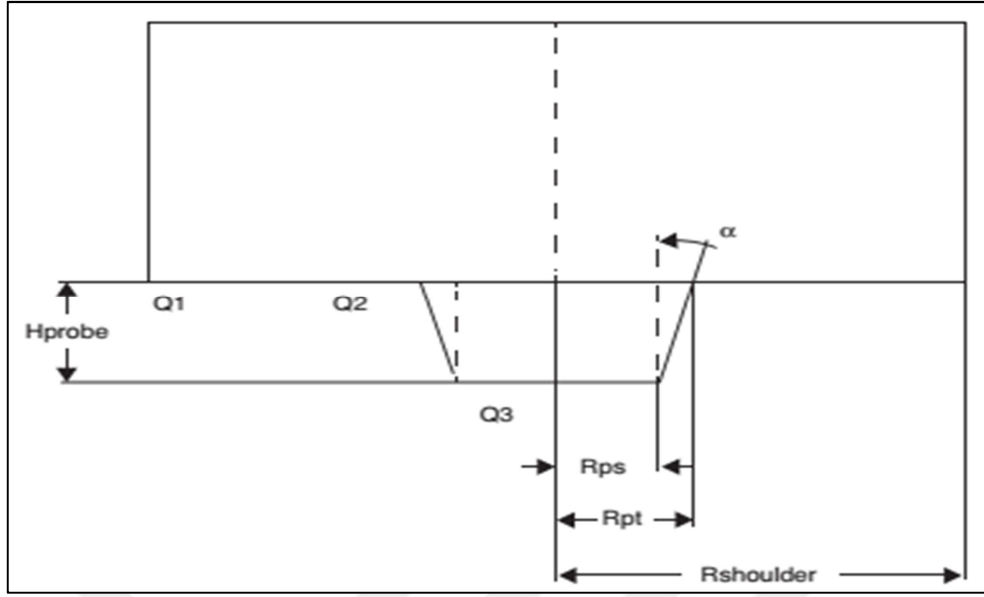
Güncel araştırmalarda, analitik model genel olarak düz silindirik pime göre geliştirilmiştir [9]. Konik uçlu pimin, silindirik pimden daha iyi mekanik sonuçlar vermesinden dolayı, analitik modelin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu çalışmada, Şekil 4.1.'de görülen konik uçlu ve 3 kenarı düz pim kullanıldığından, analitik hesaplama modeli de buna göre çıkartılmıştır.



Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan konik uçlu ve 3 yüzeyi düz kenarlı pim

4.1. Isı Üretim Modelinin Hesaplanması

Şekil 4.2.'de görüldüğü üzere, Q_1 takım omzundaki, Q_2 pim yüzeyinde, Q_3 pim uç kısmında olmak üzere 3 farklı bölgede ısı üretimi gerçekleşmektedir. Toplam ısı üretimi $Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.2. Konik uçlu pimde, farklı bölgelerde oluşan ısı üretimi [9]

Hesaplama sırasında kullanılan terimler ve açıklaması Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Terimler ve açıklamaları [9]

Terimler	
Q_1	takım omuz yüzeyindeki ısı üretimi, (W)
Q_2	pim yüzeyindeki ısı üretimi, (W)
Q_3	pim ucundaki ısı üretimi, (W)
μ	sürtünme katsayısı
ω	takım açısal dönem hızı, (rpm)
α	pim konik açısı, ($^{\circ}$)
v	takım ilerleme hızı, (mm/dak)
σ	kontak basıncı, (Pa)
$\tau_{contact}$	kontak kesme gerilmesi, (Pa)
R_{PT}	pim uç yarıçapı, (mm)
R_{PS}	pim dip yarıçapı, (mm)
$R_{shoulder}$	takım omuz yarıçapı, (mm)
Q_{total}	toplam ısı üretimi, (W)
H_{probe}	pim yüksekliği, (mm)

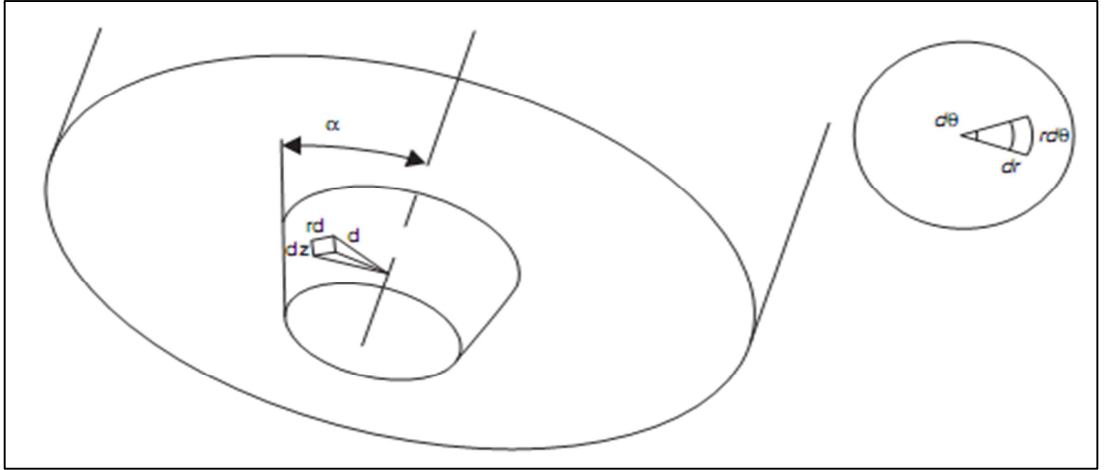
Analitik model için, şu kabuller yapılmıştır [9]:

- Uniform kesme gerilmesinin (τ_{contact}) genel kabulü temel alınarak analitik hesaplama yapılmıştır
- Kayar durumda kesme, kontak arayüzeyde gerçekleşmektedir
- Deformasyon gibi diğer ısı üretim mekanizması dikkate alınmamıştır
- Sürtünme arayüzey mekanizmasından dolayı, sürtünme kesme gerilmesi τ_{friction} olarak kabul edilmiştir. Kayar durum için sürtünme kesme gerilmesi $\tau_{\text{contact}} = \tau_{\text{friction}} = \mu P = \mu \sigma$ olarak hesaplanmıştır

Hesaplama, düz omuzlu, konik ve ucu düz bir pimi olan takım için, Schmidt ve arkadaşlarının kullanmış olduğu analitik modelin geliştirilmiş hali kullanılmıştır [9]. Konik pin yüzeyi, α konik açısı ile karakterize edilmektedir. Isı üretimi için genel denklem:

$$dQ = \omega \cdot dM = \omega \cdot r \cdot dF = \omega \cdot r \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot dA \quad (4.1)$$

Şekil 4.3.'de, dönme eksenini ile ilişkili olarak, pozisyon ve oryantasyonu ile birlikte, iş parçası ile takım temas yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Konik uçlu pim için, yüzey oryantasyonu ve sonsuz küçüklükteki kesit bölgeleri [9]

4.1.1. Takım omuz yüzeyindeki ısı üretimi

Takım merkez eksenini etrafında dönen omuz yüzeyindeki ısı üretimini hesaplamak için, yüzeyde sonsuz küçüklikte kesit ele alınmıştır [9]. $dA = r.d\theta.dr$ şeklinde ifade edilen bu kesit bölgesi, τ_{contact} olarak bahsettiğimiz uniform kesme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu kesit, sonsuz küçüklikte $dF = \tau_{\text{contact}}.dA$ kuvvet ve $dM = r.dF$ torku üretmektedir. Kesitteki ısı üretimi [9];

$$dQ = \omega.r.dF = \omega.r^2.\tau_{\text{contact}}.d\theta.dr \quad (4.2)$$

denklemini ile hesaplanır, burada r dönme eksenine olan mesafe, ω açısal hız, $r.d\theta$ ve dr kesit ölçülerini belirtmektedir. Denklem (4.2)'nin integralini alırsak, takım omzu üzerinden R_{PT} 'den R_{shoulder} 'a kadar olan ısı üretimini elde ederiz [9]:

$$Q_1 = \int_0^{2\pi} \int_{R_{PT}}^{R_{\text{shoulder}}} \omega.r^2.\tau_{\text{contact}}.d\theta.dr$$
$$Q_1 = \frac{2}{3}\pi.\omega.\tau_{\text{contact}}.(R_{\text{shoulder}}^3 - R_{PT}^3) \quad (4.3)$$

4.1.2. Konik pimin yüzeyindeki ısı üretimi

Konik pim yüzeyi, R_{PS} dip yarıçapı, R_{PT} pim uç yarıçapı ve H_{probe} pim yükseliği bölümlerinden oluşmaktadır. Denklem (4.4)'de, pim yanal yüzey alanında oluşan ısı üretimi ifade edilmiştir [9]:

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \omega.r^2.\tau_{\text{contact}}.d\theta.dz$$
$$Q_2 = 2.\pi.\omega.\tau_{\text{contact}}.l.\left(\frac{R_{PS}+R_{PT}}{2}\right)^2$$
$$Q_2 = \frac{\pi.\omega.\tau_{\text{contact}}}{2} \cdot \frac{H_{\text{probe}}}{\cos\alpha} \cdot (R_{PS}+R_{PT})^2 \quad (4.4)$$

4.1.3. Pimin uç yüzeyindeki ısı üretimi

Denklem (4.2) integralini alıp, pim ucunu da düz kabul edersek, aşağıdaki Q_3 ısı üretim denklemini elde ederiz [9]:

$$Q_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{PS}} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot d\theta \cdot dz$$

$$Q_3 = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot R_{PS}^3 \quad (4.5)$$

Denklem (3)-(5) ile, Q_{total} 'ı şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{\text{total}} = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot (R_{\text{shoulder}}^3 - R_{PT}^3) + \frac{\pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{contact}}}{2} \cdot \frac{H_{\text{probe}}}{\cos \alpha} \cdot (R_{PS} + R_{PT})^2 + \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot R_{PS}^3$$

Ancak,

$$R_{PS} = R_{PT} - H_{\text{probe}} \cdot \tan \alpha \quad (4.6)$$

olduğundan Q_{total} şöyle yazabiliriz;

$$Q_{\text{total}} = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot \left(R_{\text{shoulder}}^3 - R_{PT}^3 + \frac{3}{4} \cdot \frac{H_{\text{probe}}}{\cos \alpha} \cdot (2 \cdot R_{PT} - H_{\text{probe}} \cdot \tan \alpha)^2 + (R_{PT} - H_{\text{probe}} \cdot \tan \alpha)^3 \right) \quad (4.7)$$

Kaynağın birim uzunluğuna düşen enerji miktarı, Denklem (4.7)'nin ilerleme hızına bölünmesiyle Denklem (4.8) ile hesaplanabilir [9]:

$$Q_{\text{energy/length}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega \cdot F \cdot \mu}{\theta \cdot R_{\text{shoulder}}^2} \cdot \left(R_{\text{shoulder}}^3 - R_{PT}^3 + \frac{3}{4} \cdot \frac{H_{\text{probe}}}{\cos \alpha} \cdot (2 \cdot R_{PT} - H_{\text{probe}} \cdot \tan \alpha)^2 + (R_{PT} - H_{\text{probe}} \cdot \tan \alpha)^3 \right) \quad (4.8)$$

Silindirik pim için, $R_{PS} = R_{PT}$ olduğundan toplam ısı üretimi şu şekilde basitleşir [9]:

$$Q_{\text{total}} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{contact}} \cdot (R_{\text{shoulder}}^3 + 3 \cdot H_{\text{probe}} \cdot R_{PS}^2) \quad (4.9)$$

4.2. Sistem Modelinin Oluşturulması

4.2.1. Isı aktarımının hesaplanması

Malzeme içi ısı aktarımı hesaplanırken sonlu elemanlar çözümünde

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4.10)$$

Denklem (4.10) esas alınmıştır. Burada T ısı, t zaman, u birim vektör, ρ , k ve C_p ise malzeme parametreleri olup sırasıyla yoğunluk, ısı iletkenliği ve sabit basınç ısı sığasını ifade etmektedir. Koordinat sistemini kaynak takımına yerleştirdiğimizde, denklemdeki taşınımlı ifadeye, iletimsel ifadeyi de eklemiş oluruz ve denklem şu hali alır [10];

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T \quad (4.11)$$

Aşağıdaki ifadede, plaka, pim ve omuz arasında ısı üretiminin olabilmesi için gerekli sınır şartını göstermektedir [10];

$$q(r, T) = \begin{cases} \left(\frac{\mu F_n}{A_s} \right) \omega r; & T < T_{\text{ergime}} \\ 0; & T \geq T_{\text{ergime}} \end{cases} \quad (4.12)$$

Burada, F_n normal kuvveti, A_s omuz yüzey alanını, T_{ergime} Kevlar ergime sıcaklığını, μ Kevlar yüzey sürtünme katsayısını, ω açısal hızı, r de pim yarıçapını ifade etmektedir.

4.2.2. Torkun hesaplanması

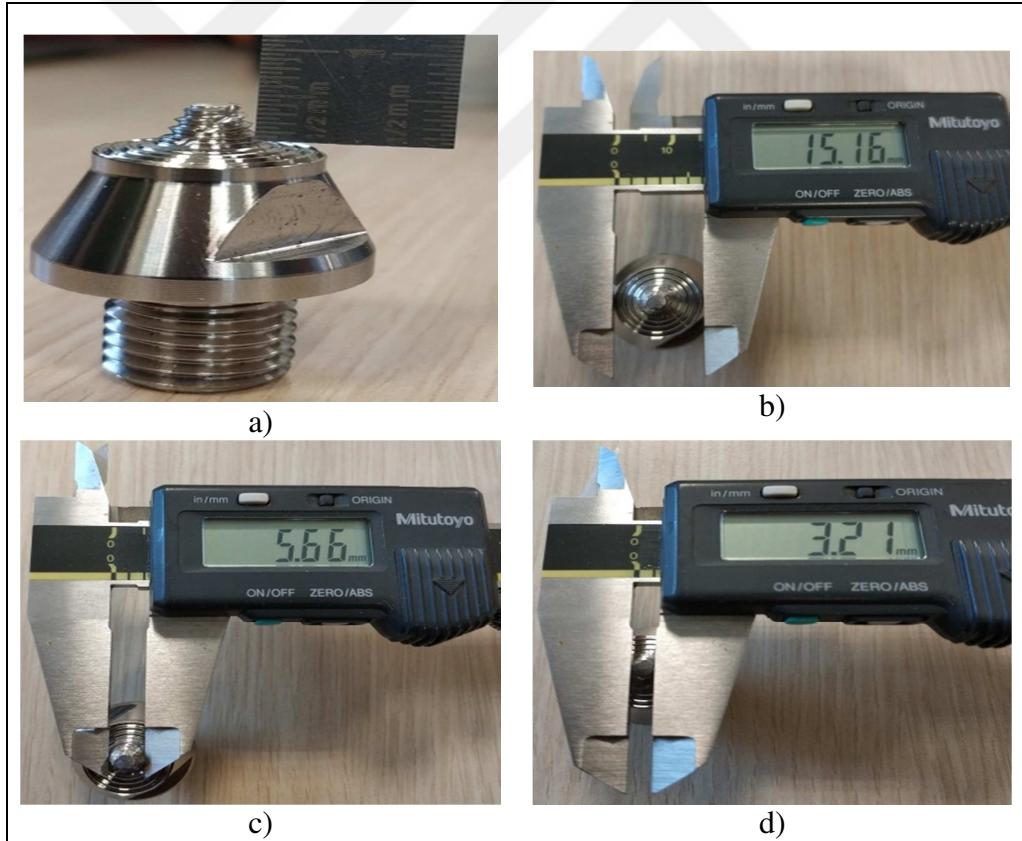
Gerekli olan maksimum tork değeri, Reynolds ve arkadaşlarının kullanmış [11] olduğu komple kaynamış durumdaki hal denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır. Reynolds, toplam torku 3 ayrı bölgede ele almış ve şu şekilde ifade etmiştir [12];

$$M = M_{\text{omuz}} + M_{\text{pim yüzeyi}} + M_{\text{pim taban}} \\ \Rightarrow M = \frac{\int_{r_i}^{r_0} r \tau 2\pi r dr}{2} + \int_0^{r_i} r \tau 2\pi r dr + r_i \tau 2\pi r_i h \quad (4.13)$$

Burada, r_i pim yarıçapını, r_0 omuz yarıçapını, τ kesme gerilmesini, h pim yüksekliğini göstermektedir. $\tau = \sigma/\sqrt{3}$ olarak alındığında denklem aşağıdaki şekli almaktadır ve burada σ çekme mukavemetini ifade etmektedir [12].

$$M = \frac{2\pi\sigma}{\sqrt{3}} \left[\frac{\int_{R_{PS}}^{R_{shoulder}} r^2 dr}{2} + \int_0^{R_{PS}} r^2 dr + R_{PS}^2 H_{probe} \right] \quad (4.14)$$

Denklem düz silindirik pime göre çıkarılmış olup, eğer konik kısım pimin ucuna kadar gidiyorsa (kullandığımız pimde olduğu gibi) tork değerinin %90'nı bu denklemden elde edilebilmektedir [13]. Bu nedenle, Denklem (4.14)'ü konik pimler için de kullanabiliriz. Şekil 4.4.'te kullanılan pime ait, R_{PS} dip yarıçapı, R_{PT} pim uç yarıçapı, H_{probe} pim yükseliği, $R_{shoulder}$ omuz yarıçapı gösterilmekte olup değerler şöyledir; $R_{PT} = 1,6$ mm, $R_{PS} = 3$ mm, $R_{shoulder} = 7,5$ mm, $H_{probe} = 3,5$ mm.



Şekil 4.4. Kullanılan konik pime ait a) pim yüksekliği b) omuz çapı c) pim dip çapı (6 mm kabul edilmiştir) d) pim uç çapı gösterilmektedir

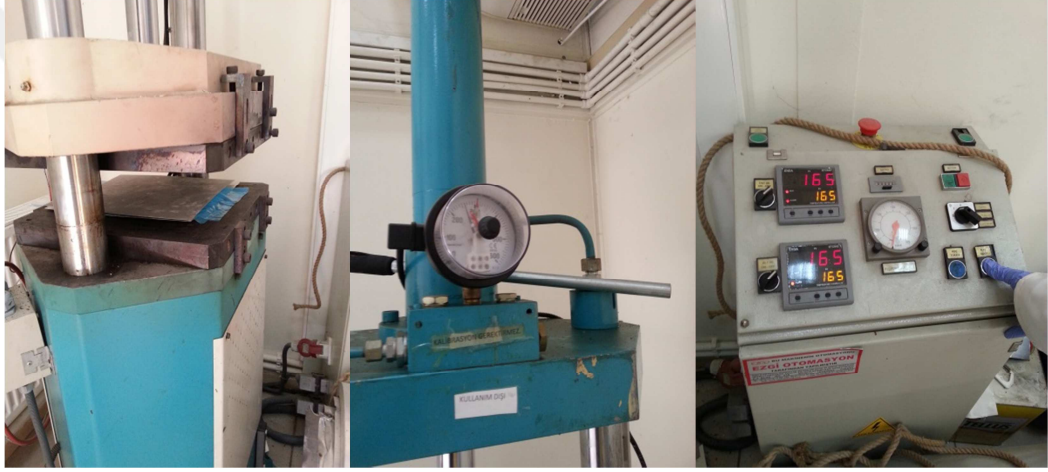
$$\sigma = 3600 \times 10^3 \text{ Pa}, R_{PS} = 0,003 \text{ m}, R_{shoulder} = 0,0075 \text{ m}, H_{probe} = 0,0035 \text{ m}$$

aldığımızda;

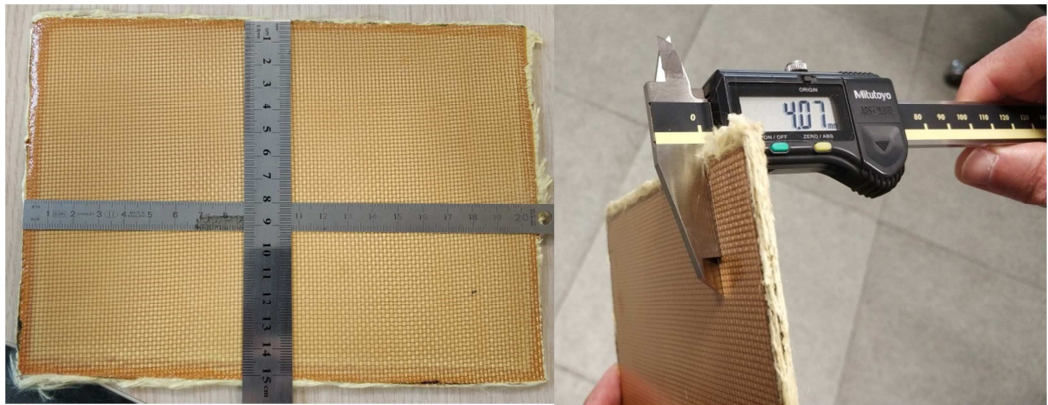
$$M = \frac{2\pi\sigma}{\sqrt{3}} \left[\frac{\int_{R_{PS}}^{R_{Shoulder}} r^2 dr}{2} + \int_0^{R_{PS}} r^2 dr + R_{PS}^2 H_{probe} \right] = 5,7 \text{ Nm olarak hesaplanır.}$$

4.2.3. Dalma kuvvetinin hesaplanması

Kevlar malzemesini plaka haline getirebilmek için, Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere, 165⁰C ve 6 bar'lık bir pres altında, üzerindeki reçine yardımıyla 10 dakikalık bir presleme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 4.6.'da gösterildiği üzere, 150 mm x 250 mm x 4 mm boyutlarında plakalar elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Kevlar plakaların elde edilme prosesi



Şekil 4.6. Kullanılan kevlar plakasının ölçüleri

Plakaların elde edilme prosesi sırasında, uygulanan sıcaklık ve basınç, kaynak sırasında da referans olarak kullanıldığından;

$$6 \text{ bar} = 6 \times 10^5 \text{ Pa, } A_p = 0,15 \times 0,25 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{F}{A_p} \Rightarrow 6 \times 10^5 = \frac{F}{0,15 \times 0,25} \Rightarrow F = 2250 \text{ N olarak bulunur.}$$

Litaretür çalışmasında dalma kuvveti, takımı tutan tezgah tarafından çalışma parçasına uygulanan kuvvet olarak tanımlanmakta olup, şu denklemle ifade edilmektedir [14];

$$F \cong 6\pi R_{\text{shoulder}}^2 \tau \quad (4.15)$$

Bu denkleme göre hesaplarsak;

$F = 6\pi(0,0075)^2 \frac{3600 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 2203 \text{ N}$ olarak hesaplanır. Bu değerin, Kevlar'ın plaka haline getirilmesi sırasında uygulanan kuvvete (2250 N) yakın olduğu görülmektedir.

4.2.4. Sürtünme katsayısının hesaplanması

Deneysel çalışmanın sonucuna göre, Kevlar malzemesinin statik durumu için sürtünme katsayısı (μ) değeri, 0,36-0,51 arası olarak hesaplanmıştır [15]. Teorik olarak hesaplamaya çalışırsak;

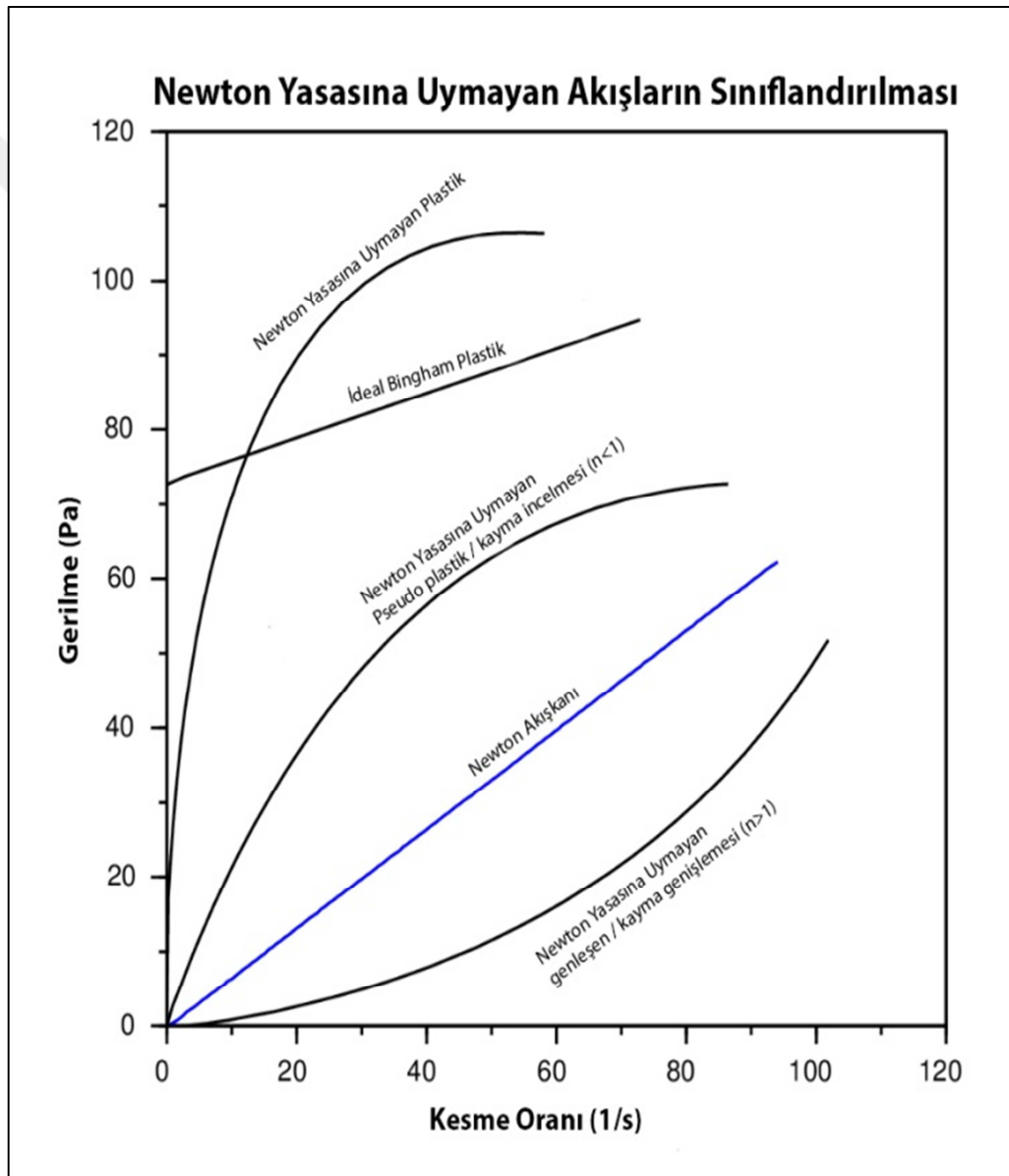
$$\mu = \frac{M}{F_x R_{\text{shoulder}}} = \frac{5,7}{2203 \times 0,0075} = 0,34 \text{ olarak bulunur. Teorik hesaplamaya yakın olduğundan}$$

$\mu = 0,35$ olarak alınmıştır.

4.2.5. Newton yasasına uymayan akışın hesaplanması

Newton yasasına uymayan akışta, yerel kesme gerilmesi ve yerel kesme oranı arasındaki orantı sabiti, normal Newton yasalarıyla hesaplanamamaktadır. Burada akış, sabit bir skaler değil değişkendir. Akış, kesme oranına veya kesme oranının zaman tanım alanına bağlıdır. Örnek olarak, ketçap, krema, diş macunu, kan ve şampuan verilebilir. Çalışmamızda model olarak, COMSOL programının CFD modülünde de kullanılan Carreau modeli kullanılmıştır. Nedeni, pimin etrafında ve TMAZ sınır bölgesinde, çok yüksek ve çok düşük kesme oranlarının varlığı nedeniyle, akışın linear olmayan durum sergilemesidir [16]. Şekil 4.7.'de, Newton yasasına uymayan akışların sınıflandırılması görülmektedir. Burada n, akışın davranış indeksi olup;

- Eğer $0 < n < 1$ ise; pseudo plastik/kayma incelmesini ifade etmekte olup, viskoziteki azalma, kesme oranında artışa neden olmaktadır. Daha küçük n değeri, daha büyük kayma incelmesi demektir
- Eğer $n = 1$ ise; Newton davranışı göstermektedir
- Eğer $1 < n$ ise; genleşen/kayma kalınlaşmayı ifade etmekte olup, psedo plastiğin aksine, viskoziteki artma, kesme oranında da artışa neden olmaktadır. Örnek olarak da mısır nişastası verilebilir. Daha büyük n değeri, daha büyük kayma kalınlaşması demektir



Şekil 4.7. Newton yasasına uymayan akışların sınıflandırılması ve gerilim-kesme oranı davranışları [17]

Carreau model denklemi şu şekilde ifade edilmektedir [17].

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + \left(\dot{\gamma} \lambda \exp \left(\frac{T_0}{T} \right) \right)^2 \right]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (4.16)$$

Burada, μ_{∞} sonsuz kesme viskozitesi (kg/ms), μ_0 sıfır kesme viskozitesi (kg/ms), $\dot{\gamma}$ kesme gerilmesi oranı (1/s), λ zaman sabiti, T erime sıcaklık, T_0 referans sıcaklık (K), n akışkan davranış indeksidir.

Çalışmamızda;

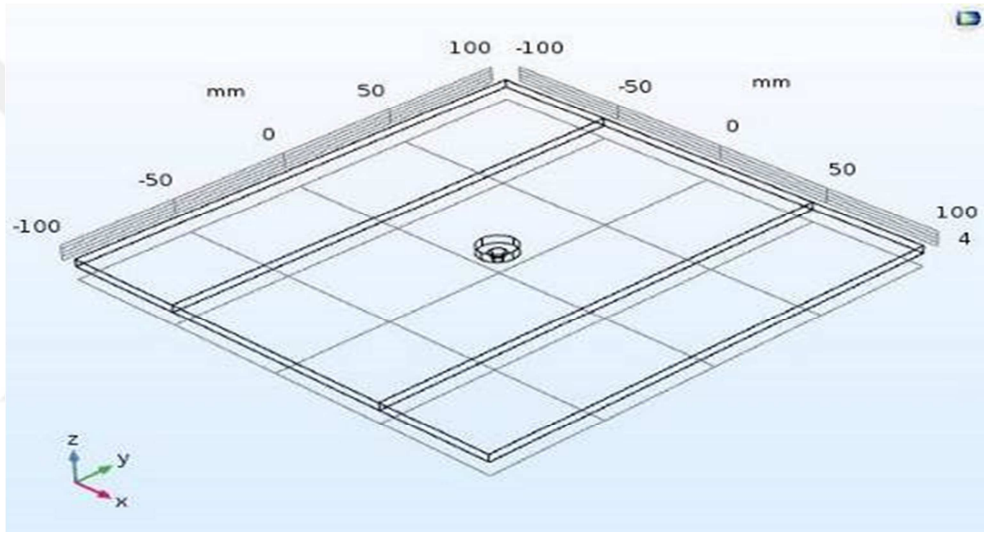
$\mu_0 = 10^4$ kg/ms, $\mu_{\infty} = 0$, $\dot{\gamma} = 0,1$ 1/s, $\lambda = 10$, $T = 441$ K (168°C), $T_0 = 298$ K (25°C), $n = 0,2$ olarak alınmıştır [18-20].

Buradan;

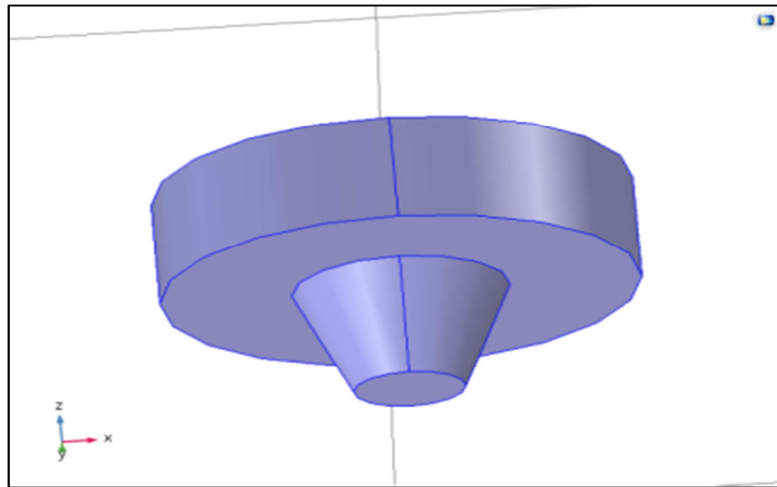
$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + \left(\dot{\gamma} \lambda \exp \left(\frac{T_0}{T} \right) \right)^2 \right]^{\frac{(n-1)}{2}} \\ &= 0 + (10^4 - 0) \times \left[1 + \left(0,1 \times 10 \times \exp \left(\frac{298}{441} \right) \right)^2 \right]^{\frac{(0,2-1)}{2}} = 5,32 \times 10^3 \text{ kg/ms olarak hesaplanır.} \end{aligned}$$

5. SİSTEMİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (CFD) ANALİZİNİN YAPILMASI

FSW'nin sonlu elemanlar analizi (FEA), COMSOL Multiphysics programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FSW kafa pimi geometrisi Şekil 4.4.'deki pimin ölçüleri esas alınarak Şekil 5.2.'de görüldüğü üzere COMSOL CAD modülü içerisinde oluşturulmuştur.

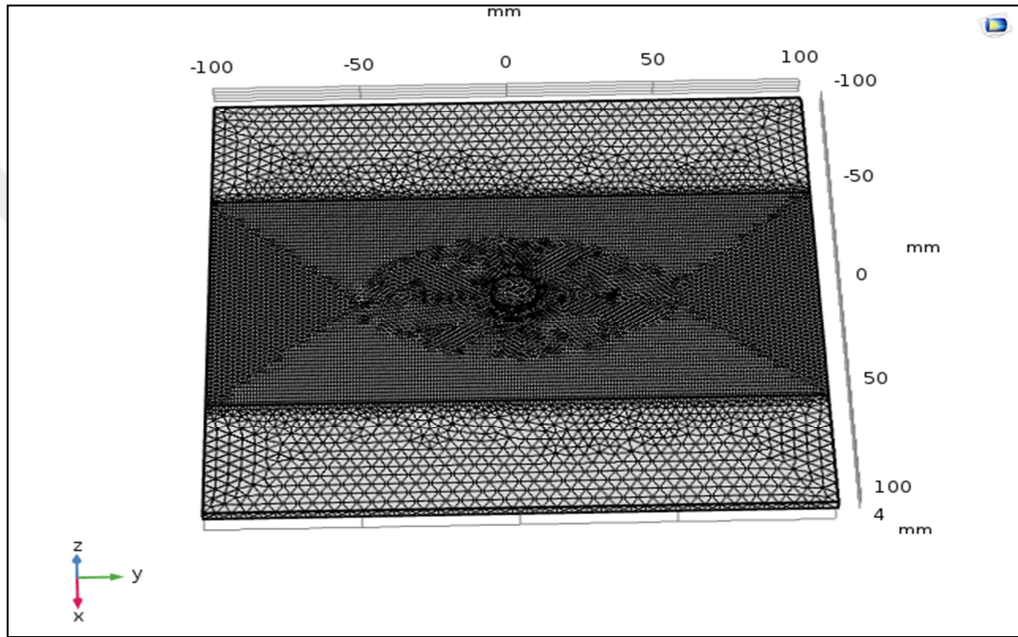


Şekil 5.1. COMSOL ortamında problemin geometrisinin tanımlanması



Şekil 5.2. COMSOL ortamında tanımlanan konik FSW pimi

Şekil 5.2.'de pim modelinin çevresine, kevlar malzemesi için 200 mm x 200 mm x 4 mm kalınlığında blok tanımlanmıştır. Bu blok, Şekil 5.1.'de gösterildiği üzere, pimin çevresi ve pimden uzak bölgeler olmak üzere iki bölge şeklinde tanımlanmıştır. Böylece ortada kalan 100 mm x 200 mm x 4 mm'lik kısım, çözüm açısından daha kritik olduğu için daha sık örgülenmiş uzakta kalan dış bloklar ise (sağdan ve soldan 50 mm x 200 mm x 4 mm olmak üzere) daha seyrek örgülenerek problemin daha kolay çözümlenebilmesi amaçlanmıştır.



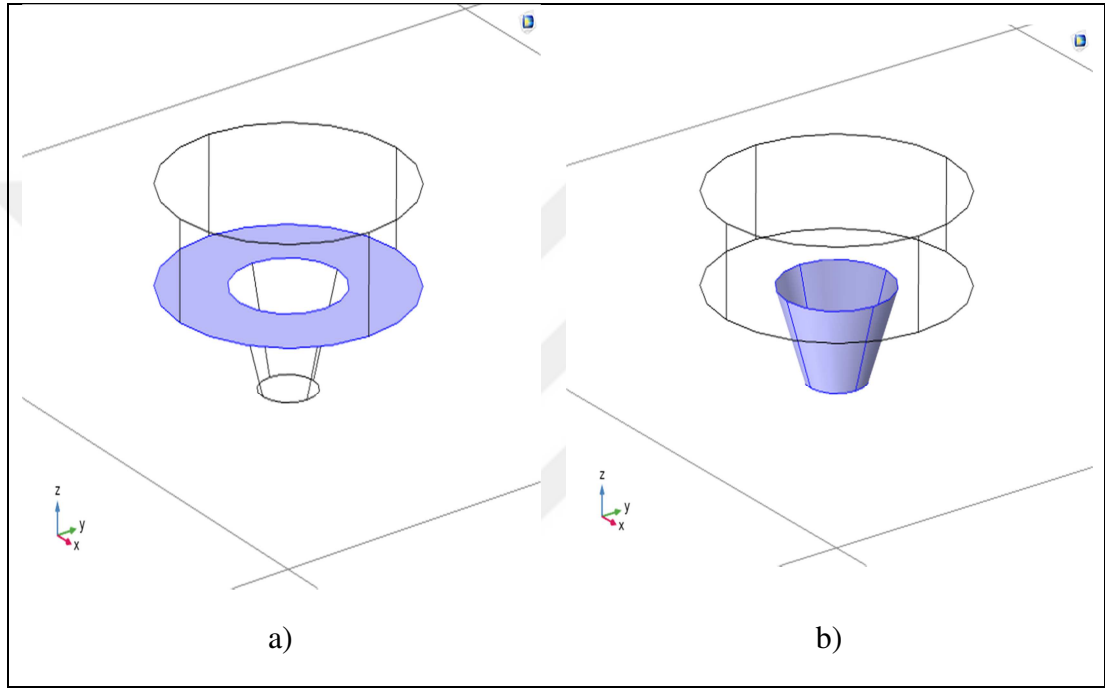
Şekil 5.3. Problem çözümü için oluşturulan örgü yapısı

Örgü sistemi, dört yüzlü örgü yapısı ile oluşturulmuştur. Tanımlı alandaki örgü yapısı, ortalama kalitede (average quality: 0,6617) 156154 adet elemandan meydana gelmiştir. Problemde kullanılan örgü yapısı Şekil 5.3.'te gösterilmektedir.

Çalışmamız iki temel fizik probleminin birlikte çözülmesini gerektirmektedir. Bu türden problemler Çoklufizik (Multifizik) olarak adlandırılmaktadır. Burada söz konusu olan iki fizik problemi, ısı aktarımı ve akışkanlar dinamiğidir. Akışkanlar dinamiğinin bilgisayar ortamında çözülmesi CFD (Computational Fluid Dynamics) olarak adlandırılmaktadır. Burada, ısı aktarımı probleminde oluşan ısılar, akışkan tarafındaki akışkanlık parametrelerini etkilerken, akışkan tarafındaki hareketler ise ısı probleminde taşınım olarak girdi sağlamaktadır.

Böylece bu iki problem birbirini besleyerek, çözülmekte ve çözüm denge noktasına ulaşana dek işlemler devam etmektedir.

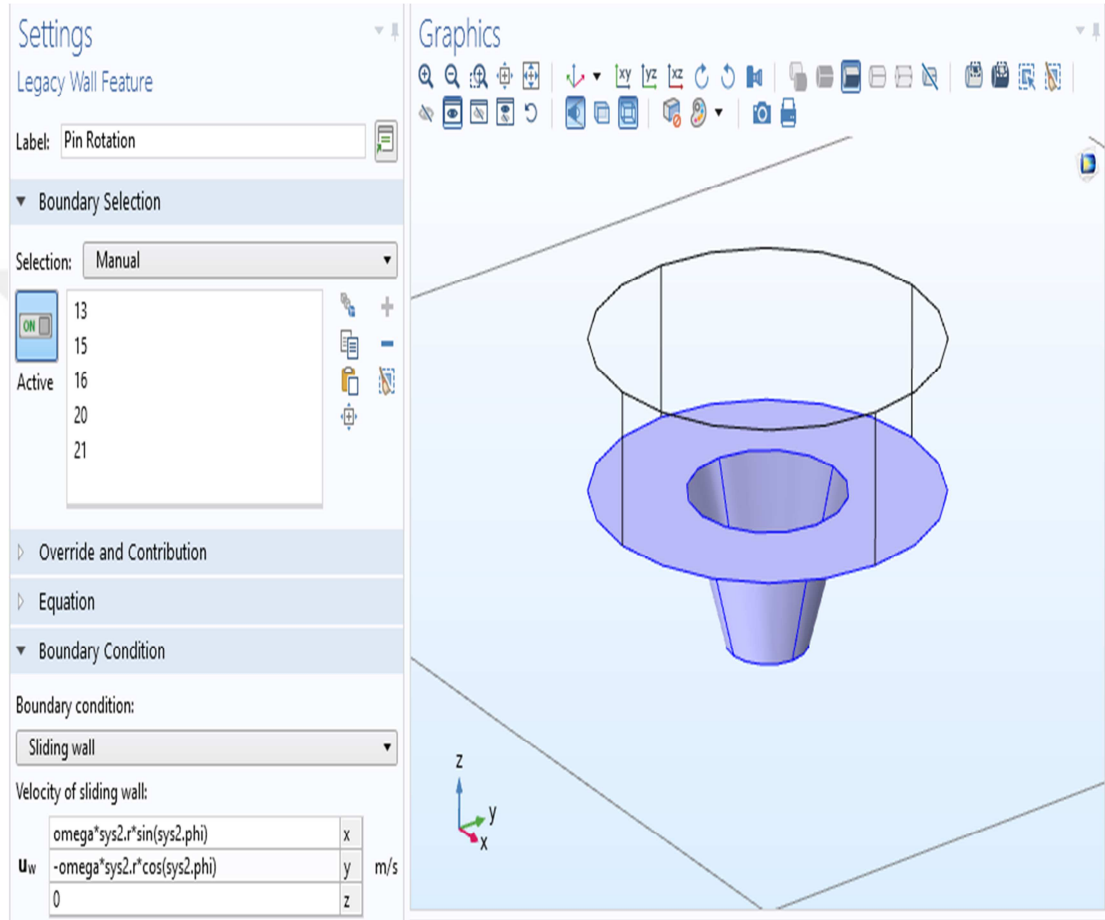
Problem basit olarak iki adet ısı kaynağına ve iki harekete indirgenmiştir. Şekil 5.4.'te gösterildiği üzere, pim omuz ve yanal yüzeyinde üretilen ısı, Denklem (4.3) ve Denklem (4.4) vasıtasıyla değişken şekilde hesaplanmış ve yüzeyler de birer ısı kaynağı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5.4. COMSOL ortamında, pim hızı ve dönme hareketinin uygulanması, a) omuz yüzeyi b) yanal yüzey

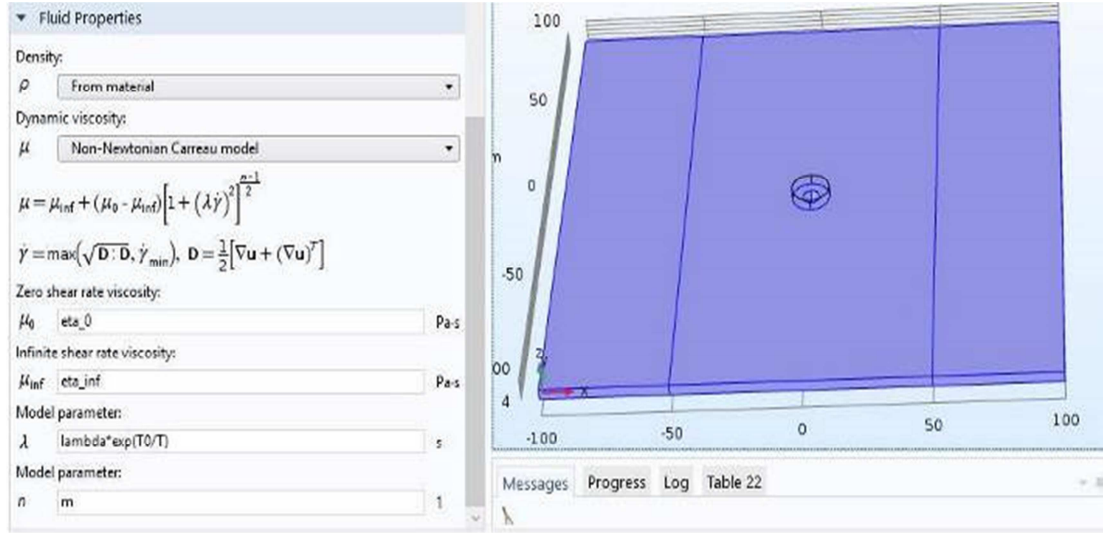
Isı aktarımı problemi, Denklem (4.10)'da verilen Fourier Denklemi'nin çözülmesini gerektirir. Burada, sistemin denge noktasındaki sürekliliği incelendiği için, zamandan bağımsız kararlı durum çözümlerine bakılmıştır. Bu durumda, Denklem (4.10) sadeleşerek Denklem (4.11)'e dönüşür. Isı üretiminde dikkate alınması gereken bir diğer husus, malzeme ergime noktasını aştığında sürtünme neredeyse hiç kalmayacağından, sürtünme kaynaklı ısı üretiminin ihmal edilebilir düzeye inmesidir. Bu durum, Denklem (4.12)'deki parçalı fonksiyonla ifade edilmiş ve COMSOL simülasyonlarına bir adım fonksiyonu ifadesi olarak yerleştirilmiştir. Böylece, pim yüzeylerindeki ısı, ergime noktası olarak kabul ettiğimiz 168°C 'yi geçtiğinde, bu yüzeylerde ısı üretilmeyeceği kabul edilmiştir.

Problemi basitleştirmek adına, kevlar malzemesi tamamen bir akışkanlar dinamiği çerçevesinde ele alınmıştır. Şöyle ki, malzemenin tezgah üzerinde ilerlemesi bir viskoz öteleme akış hareketi olarak modellenmiştir. Şekil 5.5.'te gösterilen, pim yüzeyindeki karıştırma kaynağı hareketi ise, “kayan duvar” arayüzüne rotasyonel hareket empoze edilerek modellenmiştir.



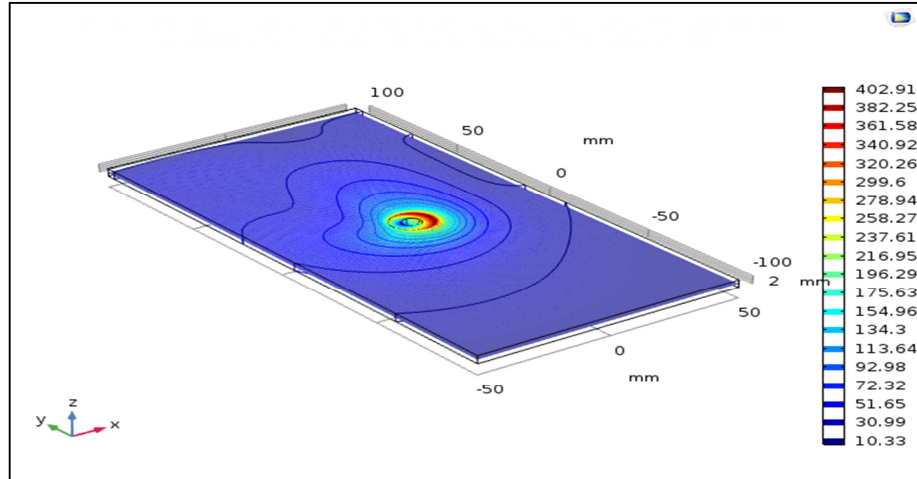
Şekil 5.5. COMSOL ortamında, pim hızı ve dönme hareketinin uygulanması

Akışkan modelinde çözüm, Newton Yasasına Uymayan Carreau Modeli kullanılarak yapılmıştır. Burada, model parametresi olan λ ergime sıcaklığı, referans olacak şekilde üstel bir çarpan ile normalize edilmiştir. Böylece malzeme, düşük sıcaklıklarda yüksek ağırlıklılık (viskozite) göstererek katı gibi davranmış, sıcaklığın artarak ergime noktasını geçtiği noktalarda ise bu değer düşerek, malzemenin akışkan davranışı Şekil 5.6.'da gösterildiği üzere modellenebilmiştir.

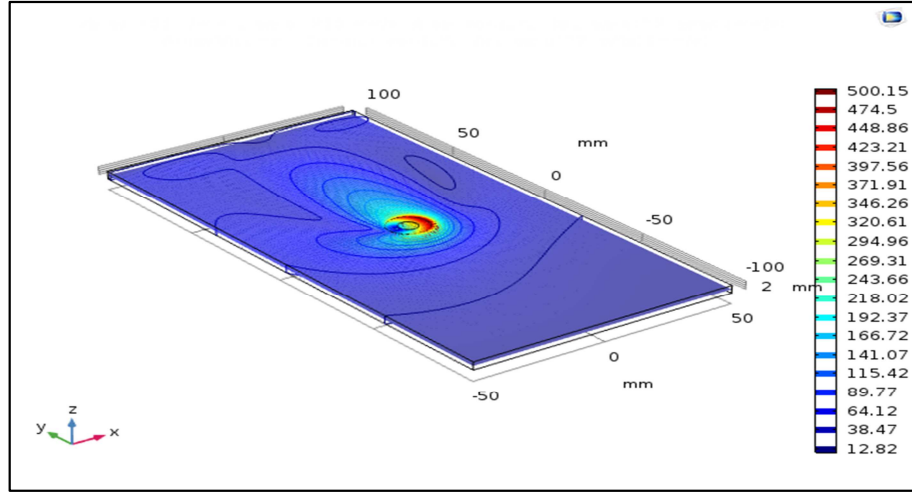


Şekil 5.6. COMSOL ortamında, Newton Yasasına Uymayan Carreau modelinin uygulanması

Hesaplamalar iki temel parametre üzerine yapılmıştır. Bunlardan biri u_{weld} yani ilerleme hızı, diğeri ise w yani pimin dönme hızıdır. Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de iki farklı parametre seti ($u_{weld} = 100$ mm/dak, $w = 400$ rpm; $u_{weld} = 200$ mm/dak, $w = 400$ rpm) için hız haritaları gösterilmektedir. Buradaki gösterimlerde, dönme ve karıştırmanın daha iyi anlaşılabilmesi için, yatay yöndeki öteleme hareketi toplam hareketten çıkartılmıştır.

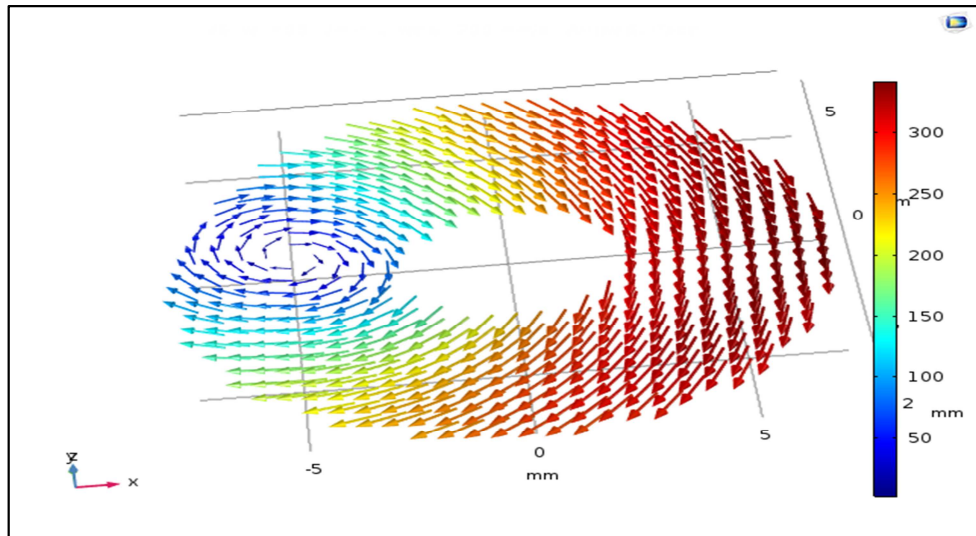


Şekil 5.7. $u_{weld} = 100$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız haritası

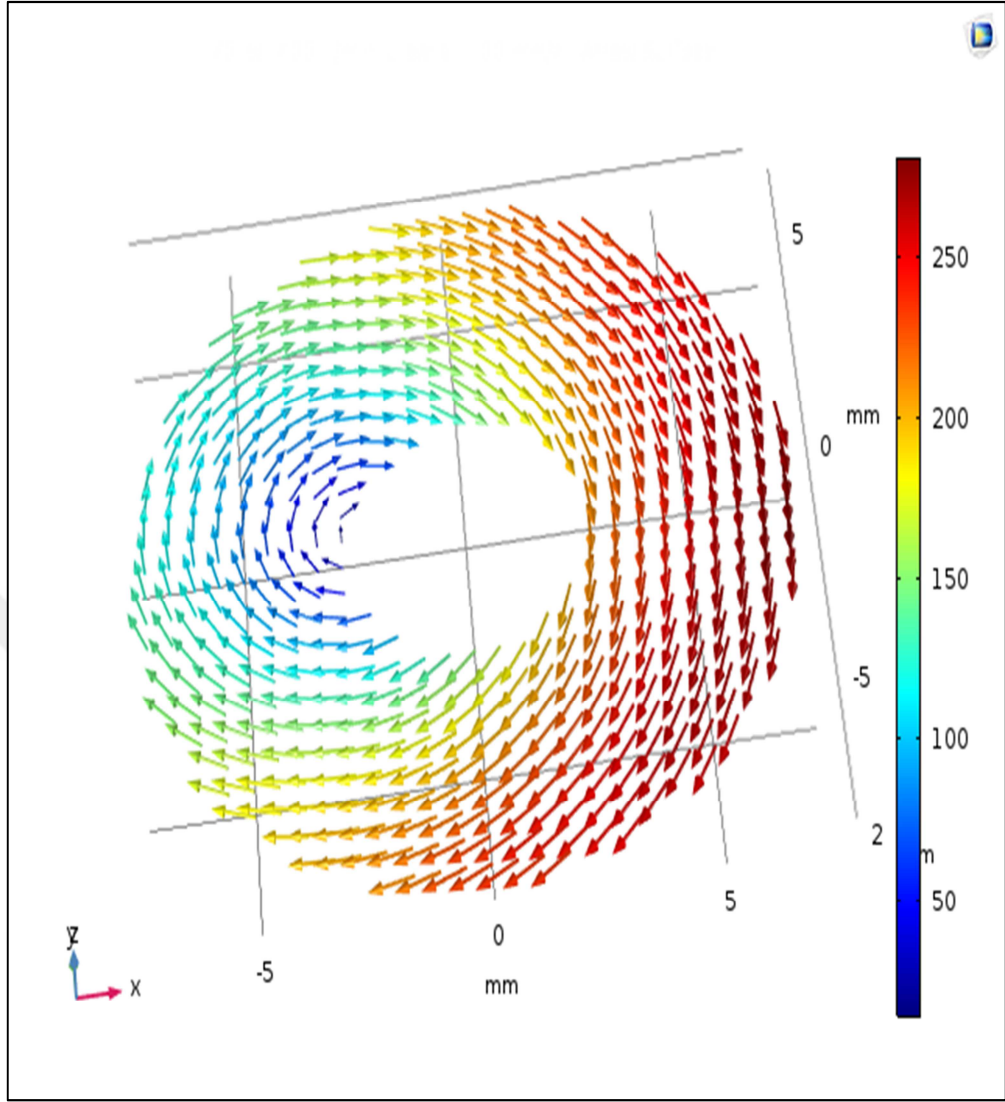


Şekil 5.8. $u_{weld} = 200$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız haritası

Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'e bakarak hedeflenen karışımına tam anlamıyla ulaşıp ulaşılmadığı doğrudan görülememektedir. Karışımı görebilmek için, hız vektörlerini gösteren bir haritaya ihtiyaç duyulmuştur. Vektörel hız haritaları çizildiğinde, pim etrafında tam dairesel bir hareket olması durumunda, karışmanın gerçekleşeceği beklenebilir. Herhangi bir şekilde girdapların görülmesi, karışmanın tam anlamıyla gerçekleşmediğini gösterecektir. Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da olduğu gibi, sözü edilen vektörel hız haritaları çizildiğinde, karşımıza iki farklı davranış çıkmaktadır. Şekil 5.9.'da girdap etkisi net bir şekilde görülürken, Şekil 5.10.'da bu etki kaybolmuştur. Dolayısıyla burada ikinci parametre seti ($u_{weld} = 200$ mm/dak, $w = 400$ rpm) için karışımın sağlandığı kanısına varılabilir.

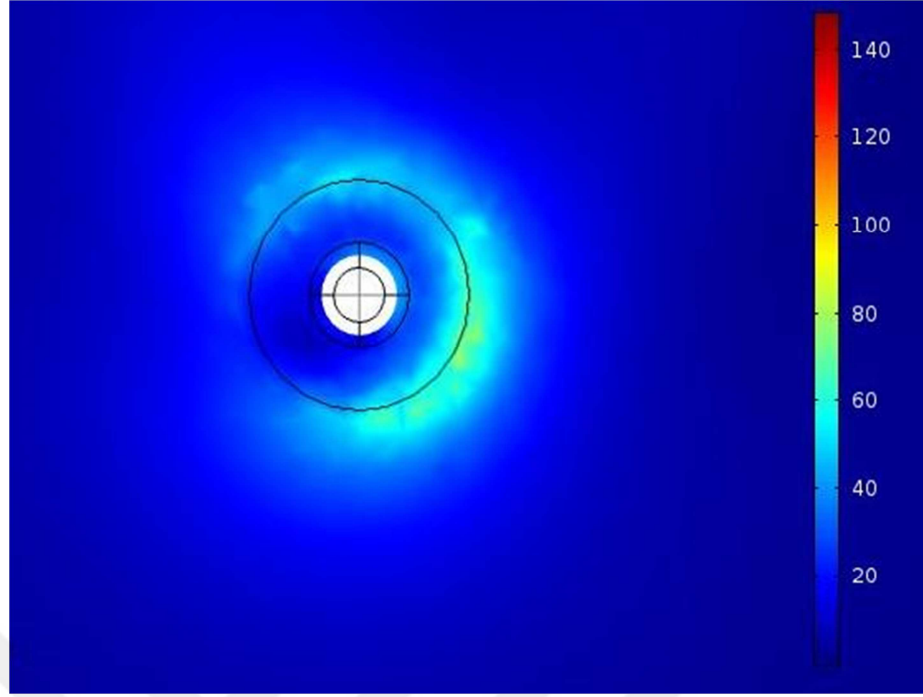


Şekil 5.9. $u_{weld} = 200$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için hız vektörleri

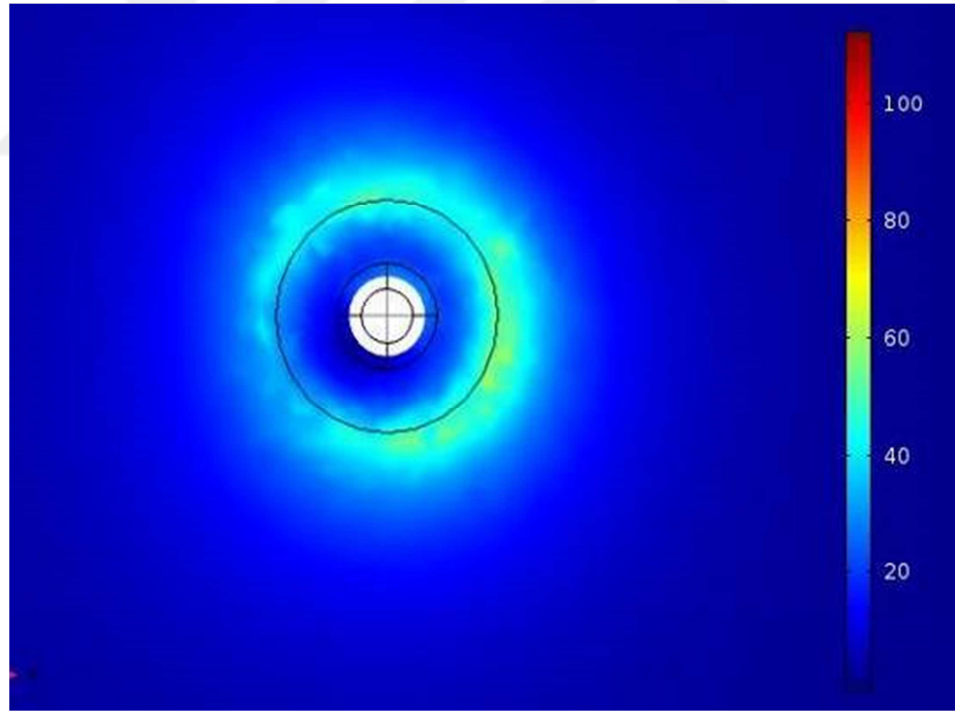


Şekil 5.10. $u_{\text{weld}} = 100 \text{ mm/dak}$ ve $w = 400 \text{ rpm}$ için hız vektörleri

Karışımın gerçekleşip gerçekleşmediği hususunda bir diğer ipucu, kesme oranı bakılarak elde edilebilir. Yukarıda kullanılan iki parameter seti için, Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'deki kesme oranları çizdirildiğinde, ikinci setin yani Şekil 5.12.'nin düzgün dağılım sergilediği görülmektedir. Bu setin, Şekil 5.10.'da bahsedildiği üzere girdap oluşturmadığı bilindiğinden, buradan karışım durumunu belirlemede kesme oranının da etkin bir parametre olabileceği kanaatine varılabilir.



Şekil 5.11. $u_{\text{weld}} = 200$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için kesme oranı



Şekil 5.12. $u_{\text{weld}} = 100$ mm/dak ve $w = 400$ rpm için kesme oranı

Yukarıda, gerek girdap oluşumları gerekse de kesme oranlarından yola çıkılarak, sürtünme karıştırma tezgâhında arzulanan karışma işleminin gerçekleşip gerçekleşmediğine bakılmıştır. Her bir parametre seti için, ayrı ayrı Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da verilen hız haritaları ve Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de verilen kesme oranlarına bakılarak karışmanın durumu hakkında bir kanaate varılabilir. Bu şekilde, her bir parametre seti için, ayrı ayrı ilgili verilere bakılıp Tablo 5.1.'de verilen karışma tablosu elde edilmiştir. Buradan hareketle, 100 mm/dak'nın üzerindeki kaynak hızlarında karışımın oluşamayacağı öngörülmektedir. Dönme hızının ise, sağlıklı bir karıştırmayı sağlamak üzere, belirli değerlerin üzerinde olması gerektiği görülmektedir. Fakat diğer taraftan, dönme hızı ile yüksek dönme hızlarında ortaya çıkacak ısınma arasında, bir dengenin de sağlanması gerektiği bilinmelidir.

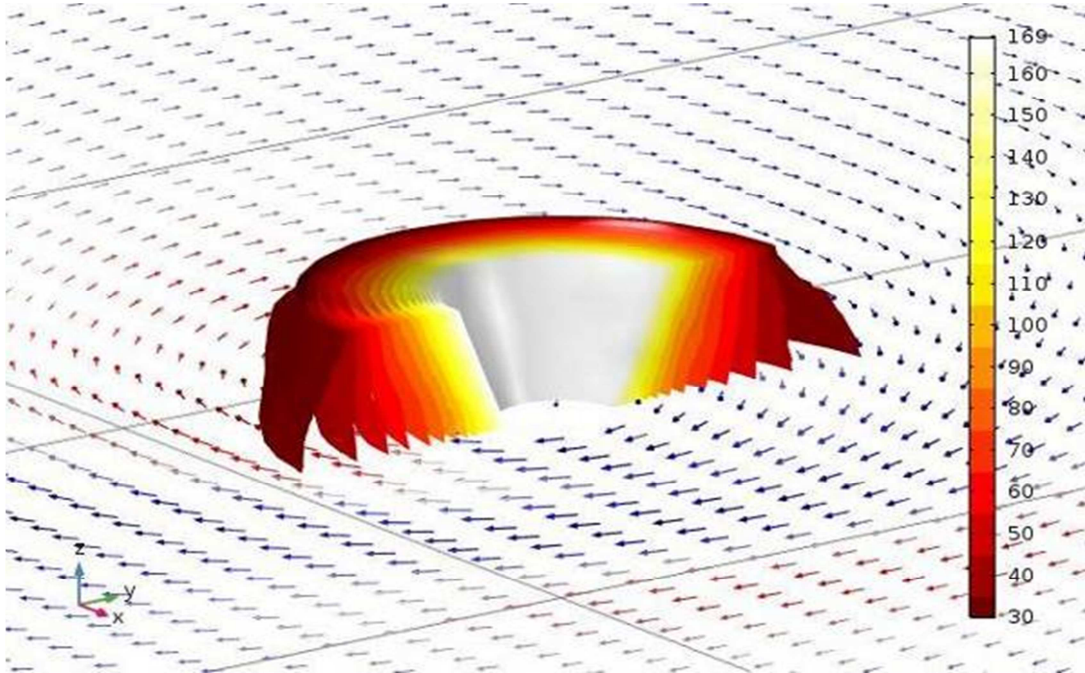
Tablo 5.1. Farklı parametler için karışım oranları

Dönme Hızı (rpm)	50	100	150	250	300	350	400	500	600
Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)									
30	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
40	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓
60	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓
70	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓
80	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓
90	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓

Tablo 5.1.(Devam) Farklı parametreler için karışım oranları

Dönme Hızı (rpm)	50	100	150	250	300	350	400	500	600
Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)									
100	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓
200	×	×	×	×	×	×	×	×	×
300	×	×	×	×	×	×	×	×	×

İlerleme hızının karışımıyı gerçekleştirmek üzere çok yüksek olmaması gerekmektedir. Fakat diğer taraftan, kaynak hızının çok düşük olması durumu parçanın aşırı ısınmasına ve de yanmasına neden olacaktır. Aşırı ısınmanın gerçekleşip gerçekleşmediğini görmek için, sistemin sıcaklık haritası da hesaplanmıştır. Sıcaklığın, 170°C'yi geçmemesi gerekmektedir. Şekil 5.13.'de, $u_{weld} = 100$ mm/dak, $w = 400$ rpm parametreleri için pimin etrafındaki izotermal yüzey haritası gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Pimin etrafında oluşan izotermal yüzey haritası. Daha iyi görüntü elde edebilmek için izotermal yüzeylerden sadece negative x değerleri gösterilmektedir

6. DENEYSEL YÖNTEM

6.1. Uygulama Seti

Sürtünme Karıştırma Kaynağını (FSW) uygulamak için, Şekil 6.1.'de görüldüğü üzere, Smart XL6036 yatay diz tipi freze tezgahı kullanılmıştır.



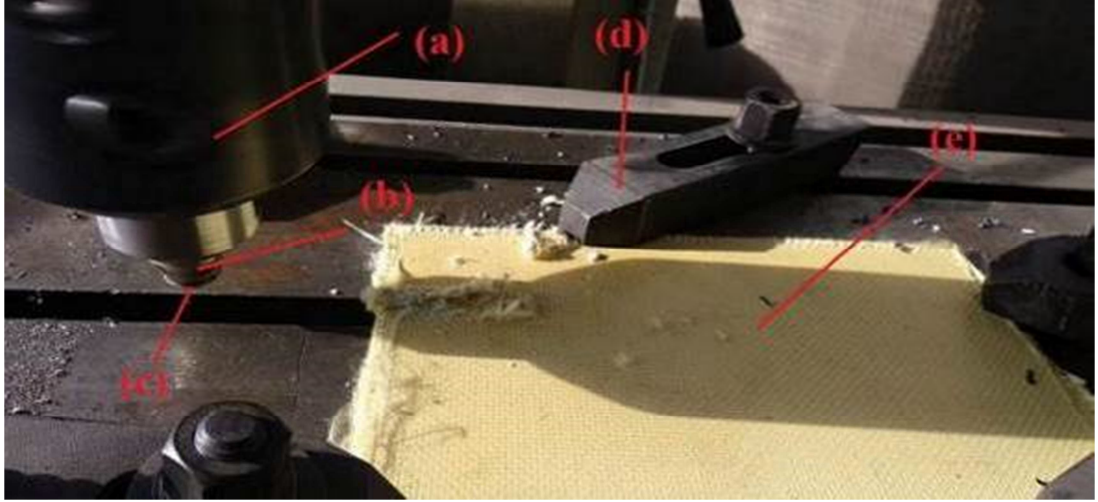
Şekil 6.1. Smart XL6036 yatay diz tipi freze tezgahı

FSW sırasında termal durumu gözlemlemek ve sıcaklık değişimini kontrol edebilmek için, Şekil 6.2.'de görülen FLIR T450sc marka termal kamera kullanılmıştır.



Şekil 6.2. FLIR T450sc marka termal kamera

Şekil 6.3.'de ilgili freze tezgahı ile kurulan uygulama seti ve ekipman isimleri gösterilmektedir.



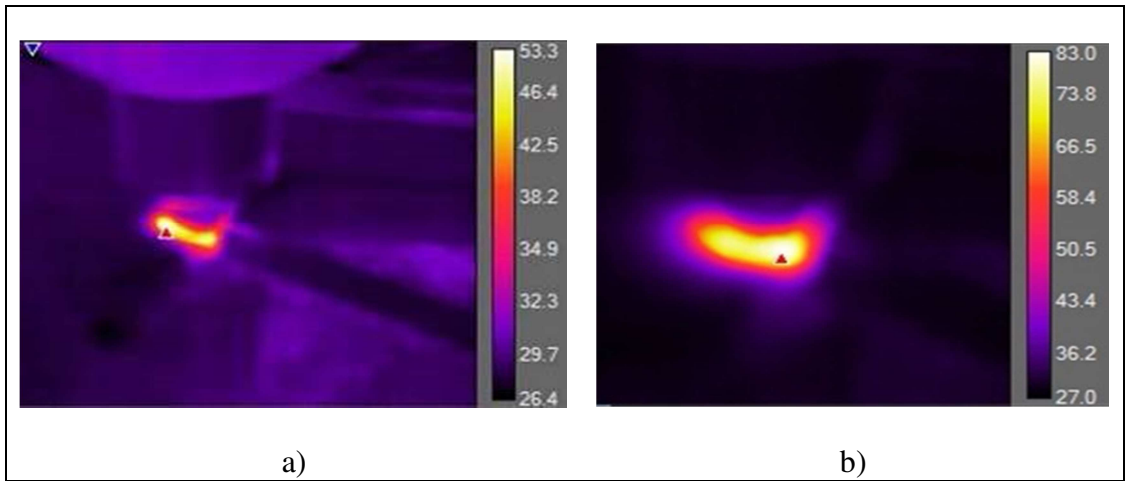
Şekil 6.3. FSW için kurulan uygulama seti a) fener mili b) pim tutucu c) pim d) fikstür e) Kevlar plakaları

6.2. FSW ve Sonuçlar

6.2.1. Birleştirme olmaksızın kaynak uygulaması

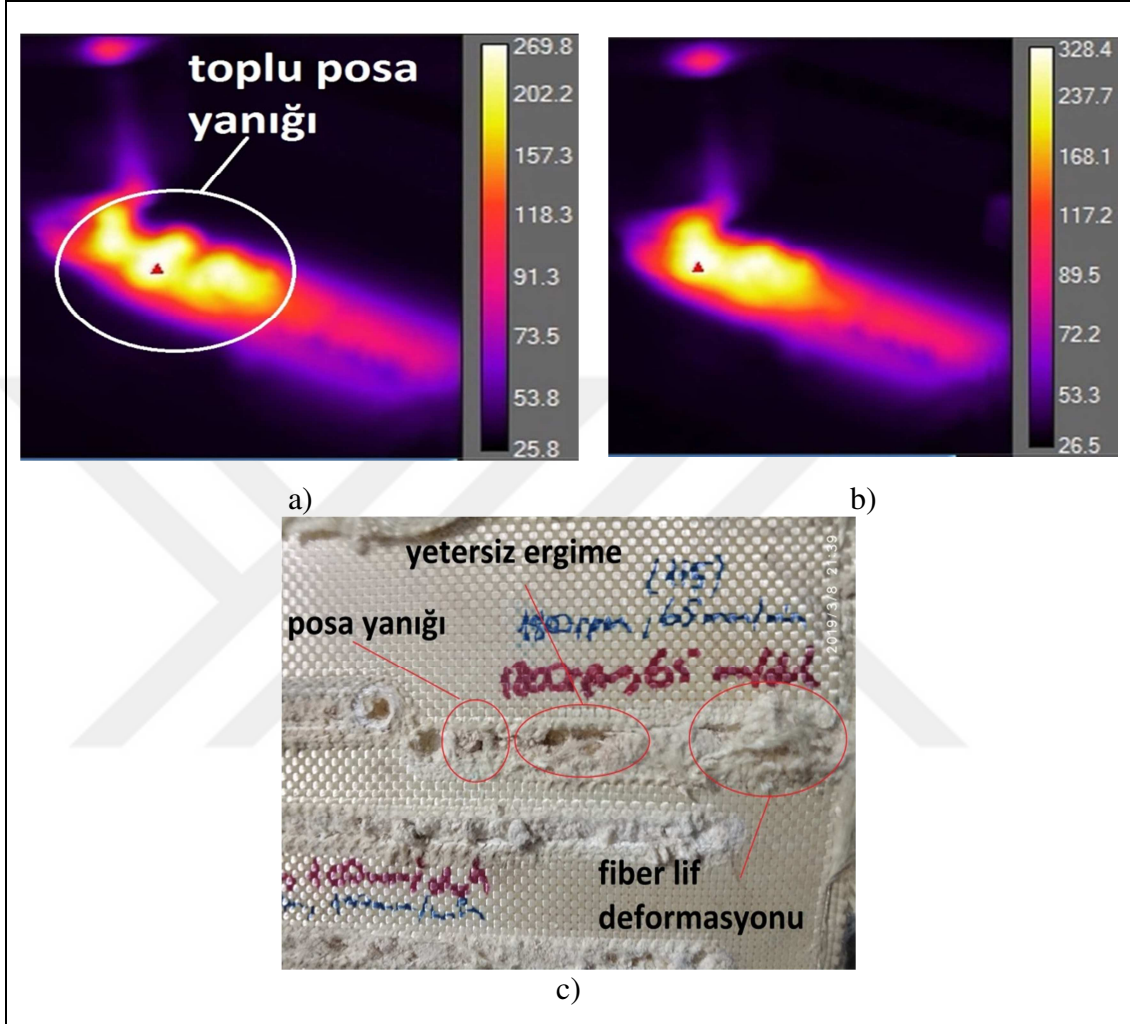
Bu bölümde, Şekil 6.3.'te görüldüğü üzere, bütün uygulama süresince sadece bir adet Kevlar plakanın kaynak edilebilirliği denenmiştir. COMSOL analizinde, 500 N daldırma kuvveti üstünde herhangi bir sonuç elde edilemediğinden, uygulama boyunca daldırma kuvveti ihmal edilmiştir.

Şekil 6.4.'te görüldüğü üzere, kaynak işlemi 1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır.



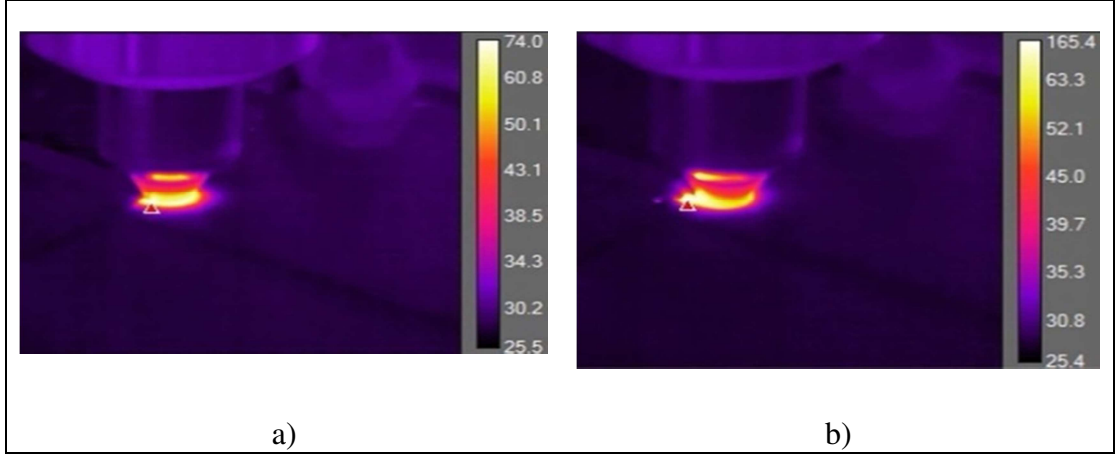
Şekil 6.4. 1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak işlemi a) 53°C başladı b) 168°C'ye 5 saniyede ulaştı

168°C'ye çıktıktan sonra, sıcaklık hızla maksimum 328°C'ye ulaşmış ve sonrasında da Şekil 6.5.'te görüldüğü üzere, toplu posa yanığı (volkanik patlama gibi) gözlenmiştir.



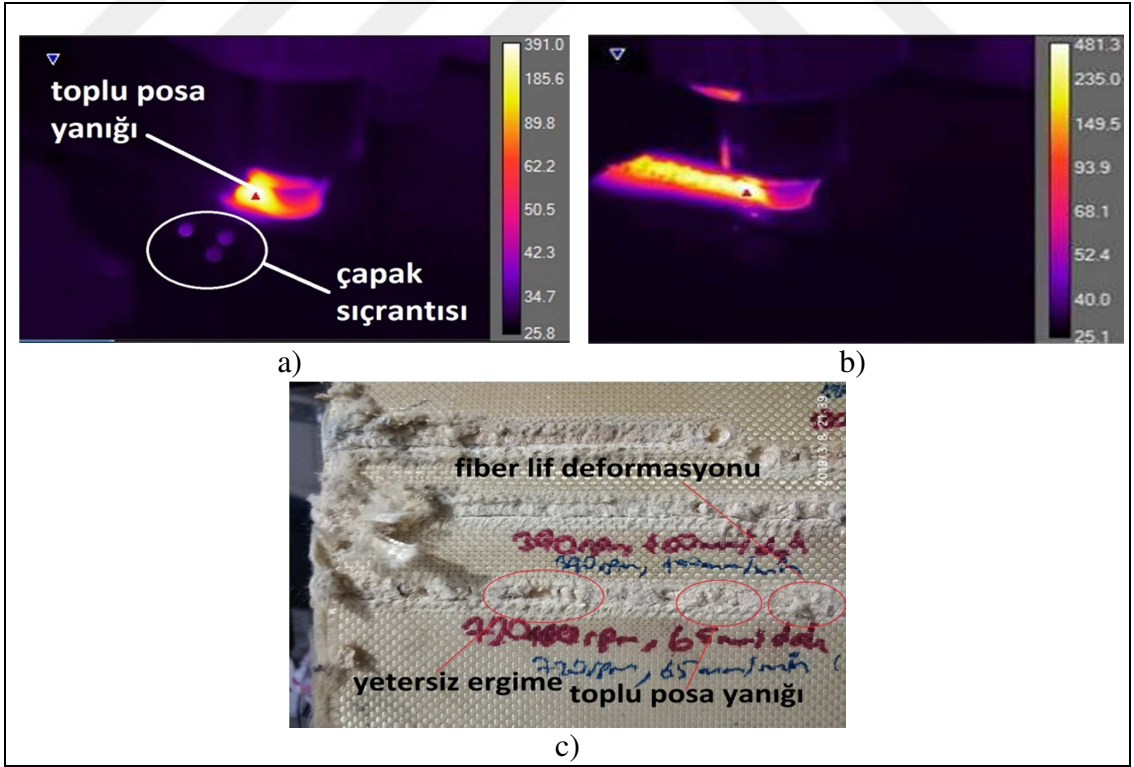
Şekil 6.5. 1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak sonuçları a) toplu posa yanığı b) erişilen maksimum sıcaklık c) posa yanığı, yetersiz ergime ve fiber lif deformasyonu gibi kusurlar

Şekil 6.6.'da, kaynak uygulaması 720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır.



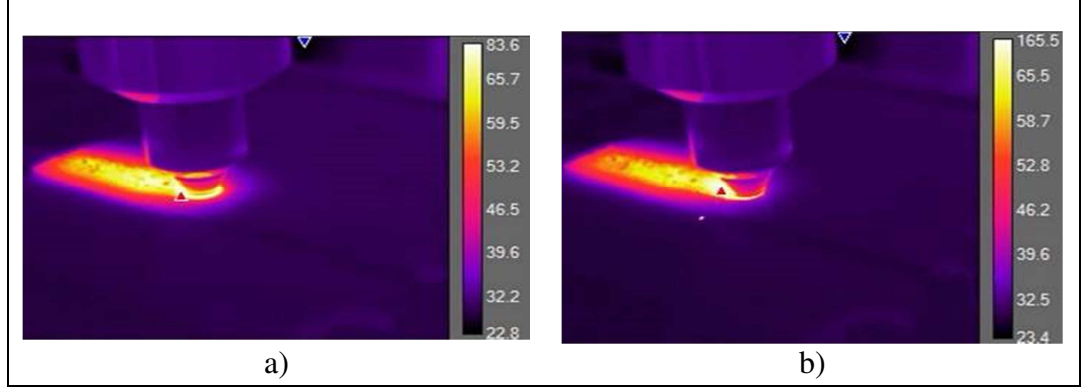
Şekil 6.6. 720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak a) 74°C’de başladı b) 165°C’ye 4 saniyede ulaşmıştır

165°C’ye çıktıktan sonra, sıcaklık hızla maksimum 391°C’ye ulaşmış ve sonrasında da Şekil 6.7.’de görüldüğü üzere, toplu posa yanığı ve çapak sıçrantıları gözlenmiş (posa yanığı 213°C’de başlamıştır) ve sıcaklık maksimum 481°C’ye kadar çıkmıştır. Daha sonra, aynı şekilde toplu posa yanığı, sıçrantı ve yetersiz ergime gibi kusurlar görülmüştür.



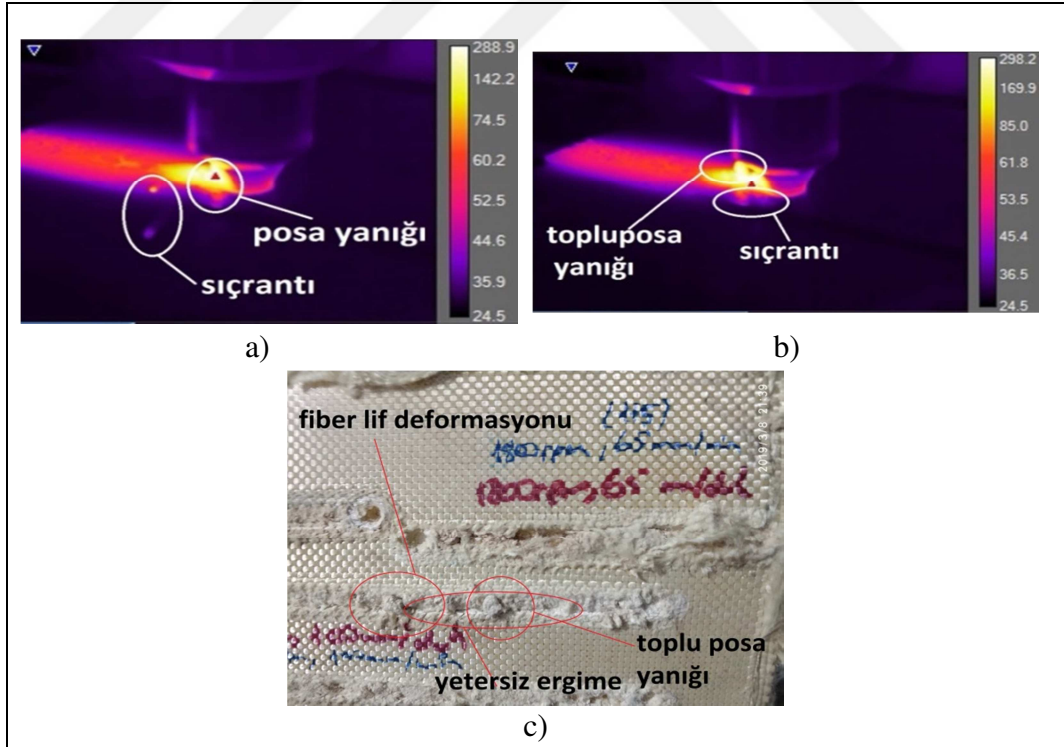
Şekil 6.7. 720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak sonuçları a) toplu posa yanığı ve sıçrantı b) erişilen maksimum sıcaklık d) toplu posa yanığı, yetersiz ergime ve fiber lif deformasyonu gibi kusurlar

Şekil 6.8.'de, kaynak uygulaması 390 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır.



Şekil 6.8. 390 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak a) 83 °C’de başladı b) 165°C’ye 6 saniyede ulaşmıştır

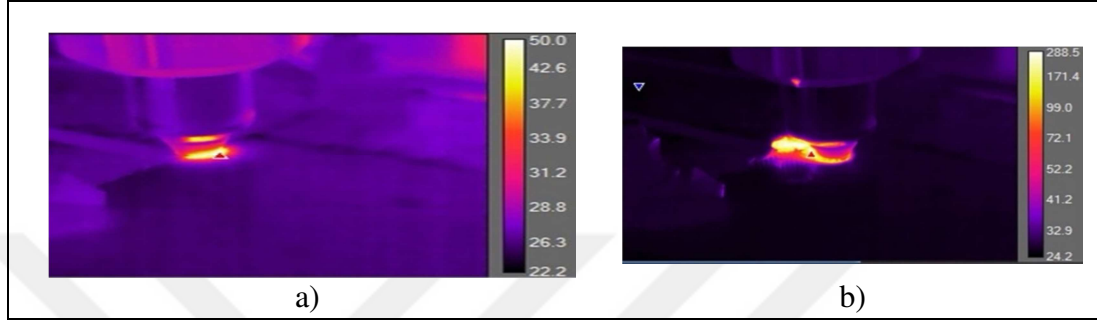
165°C’ye çıktıktan sonra, Şekil 6.9.’da görüldüğü üzere, 288°C’de posa yanığı görülmüş ve sıcaklık maksimum 298°C’ye kadar çıkmıştır. Daha sonra, aynı şekilde toplu posa yanığı, sıçrantı ve yetersiz ergime gibi kusurlar görülmüştür.



Şekil 6.9. 390 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılan kaynak sonuçları a) posa yanığı ve sıçrantı b) erişilen maksimum sıcaklık, toplu posa yanığı ve sıçrantı d) toplu posa yanığı, yetersiz ergime ve fiber lif deformasyonu gibi kusurlar

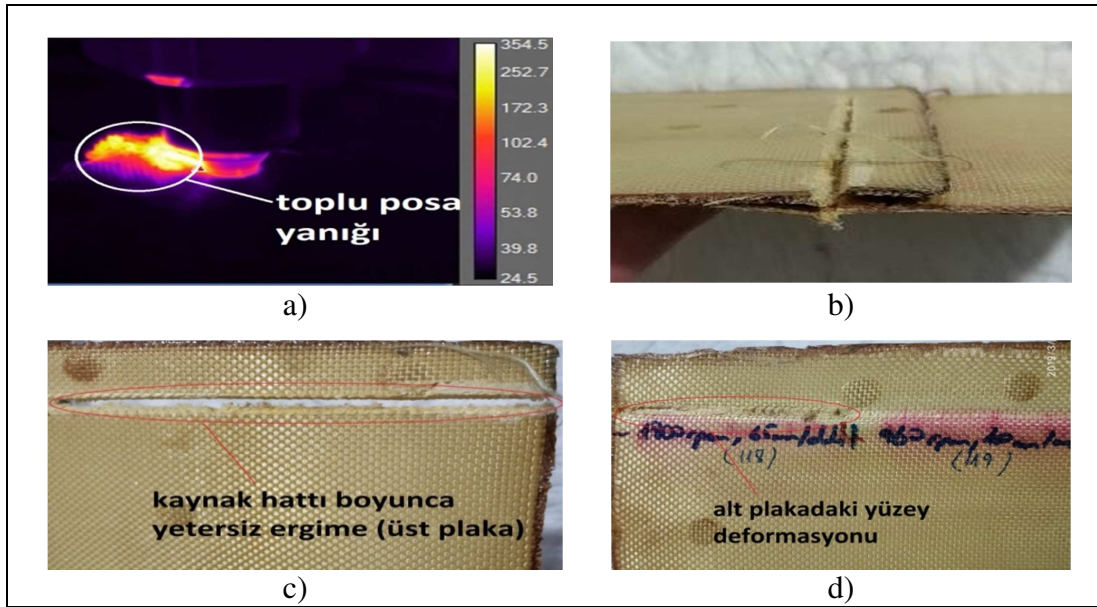
6.2.2. Bindirmeli kaynak uygulaması

Şekil 6.10.'da görüldüğü üzere, bindirmeli kaynak uygulaması 1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır. Birleştirme olmaksızın yapılan kaynak uygulamalarına benzer olması amacıyla, plaka kalınlığı yaklaşık 2 mm olan 2 adet plaka kullanılmıştır. Şekil 6.10.'da, 166°C'de posa yanığının olduğu görülmektedir.



Şekil 6.10. 1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında bindirmeli kaynak uygulaması a) 50 °C'de başladı b) 166 °C'ye 9 saniyede ulaşmıştır

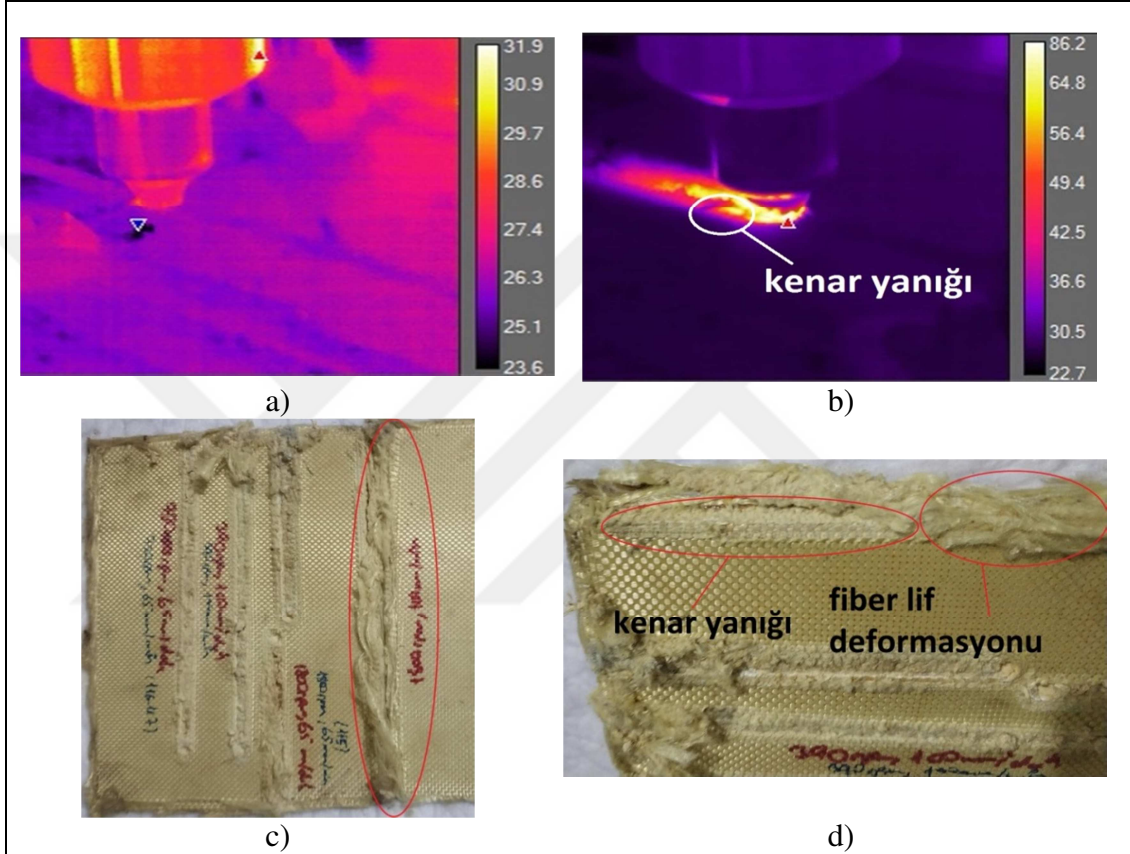
166°C sıcaklığa ulaştıktan sonra, Şekil 6.11. a)'da görüldüğü üzere kısa süre içinde, sıcaklık maksimum 354°C'ye yükselmiş ve ardından daha yoğun toplu posa yanıkları gözlenmiştir. Şekil 6.11. c)'de kaynak hattı boyunca üst plakanın yırtıldığı, d)'de alt plakanın üst yüzeyinde sadece deformasyon olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.11. 1800 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında bindirmeli kaynak uygulaması a) maksimum 354°C'de yoğun çoklu posa yanığı b) bindirmeli kaynak pozisyonu c) üst plakada, kaynak hattı boyunca görülen yetersiz ergime d) alt plakada sadece yüzey deformasyonu görülmüştür

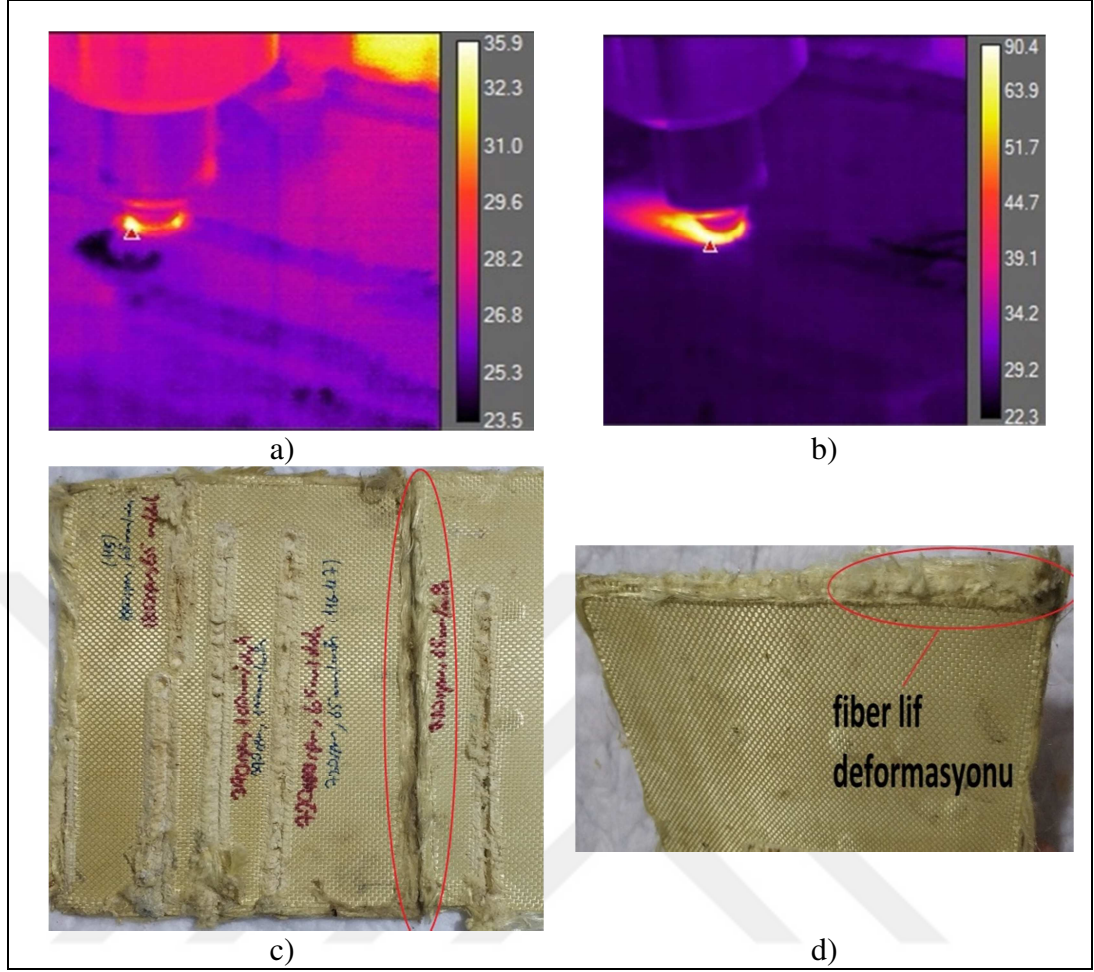
6.2.3. Alın kaynak uygulaması

Şekil 6.12.'de görüldüğü üzere, alın kaynak uygulaması 1800 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır. 4 mm kalınlığında 2 adet plaka kullanılmıştır. Uygulama sonrası, Şekil 6.12. d)'de görüldüğü üzere herhangi bir ergime görülmemiş, sadece kenar yanığı ve fiber lif deformasyonu meydana gelmiştir.



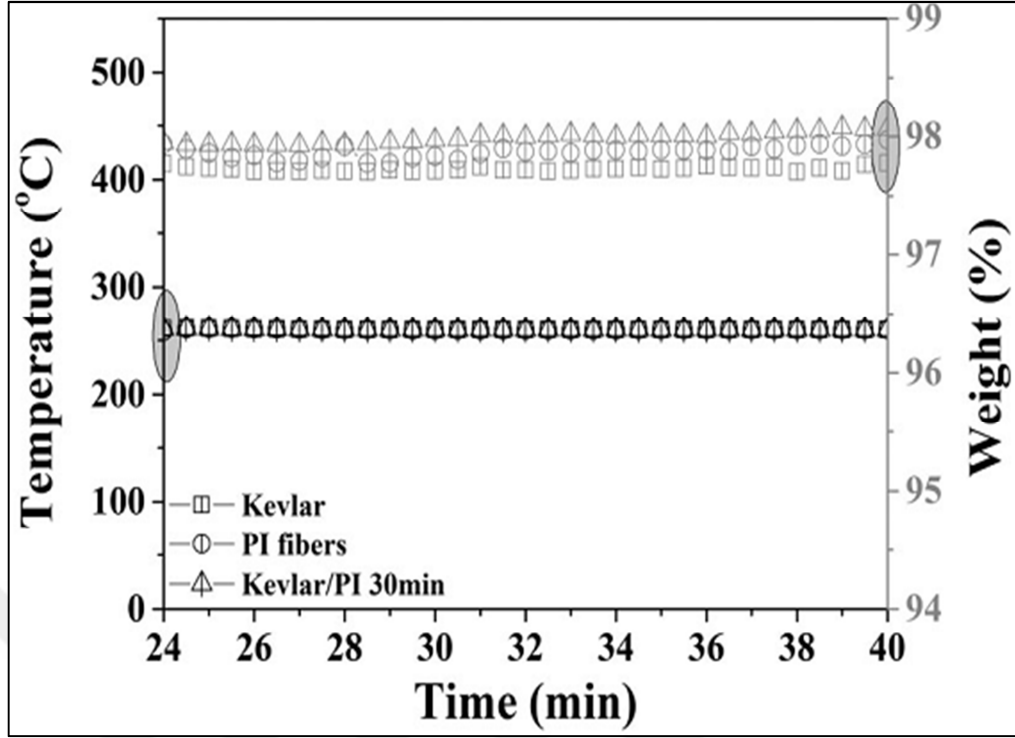
Şekil 6.12. 1800 rpm dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında alın kaynak uygulaması a) 32°C'de sıcaklıkta başlamıştır b) maksimum 86°C'ye 11 saniyede çıkmıştır c) kaynak işlem sonrası görüntü d) ergime görülmemiş, sadece kenar yanığı ve fiber lif deformasyonu gözlenmiştir.

Şekil 6.13. c)'de görüldüğü üzere, alın kaynak uygulaması 720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında yapılmıştır. 4 mm kalınlığında 2 adet plaka kullanılmıştır. Uygulama sonrası, Şekil 6.13. d)'de görüldüğü üzere herhangi bir ergime görülmemiş, sadece kenar yanığı ve fiber lif deformasyonu meydana gelmiştir.



Şekil 6.13. 720 rpm dönme ve 65 mm/dak ilerleme hızında alın kaynak uygulaması a) 36°C’de sıcaklıkta başlamıştır b) maksimum 90,5°C’ye 41 saniyede çıkmıştır c) kaynak işlemi sonrası görüntü d) ergime görülmemiş, sadece kenar yanığı ve fiber lif deformasyonu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, Şekil 6.14.’te görüldüğü üzere Kevlar malzemesi, sıcaklığın 200°C’yi geçmesi halinde ağırlığından büyük oranda kaybetmektedir [21]. Hem fiber lifte hem de reçine de görülen bu ağırlık azalmasından dolayı, kompozitin boş hacmi artmakta ancak kesme gerilmesi de azalmaktadır. Aramid Kevlar, çok sağlam olması yanında yüklenen enerjiyi de önemli derece absorbe edebilmektedir, ancak karbonla karşılaştırıldığında, basma dayanımı ve aşınma direnci düşüktür. Twaron CT 736 PHF Kevlar malzemesi, fenolik reçine içermekte olup, bu reçine 250°C üzeri sıcaklıklarda yanarak kömürleşmektedir. Fenolik reçinenin ısıl iletkenlik katsayısı 451 W/mK ve Kevlar malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısına göre oldukça yüksektir (0,004 W/mK).



Şekil 6.14. Kevlar'deki ağırlık azalması, zamanla artan sıcaklık artışı ile artmaktadır (izotermal basamak 260°C'dir)

Yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı, kaynak işlemi sırasında, sıcaklık 250°C'nin üzerine çıktığında, toplu posa yanığı, yetersiz ergime, çapak ve fiber lif deformasyonu gibi bir çok kusur ortaya çıkmıştır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hafiflik, darbe enerjisini absorbe yeteneği, bıçak kesiği ve saplamalarına karşı yüksek balistik özelliklerinden dolayı Kevlar, uzay ve savunma sektörlerinde oldukça kullanım alanına sahiptir. Kevlar'ın teknik kılavuzuna göre Kevlar, ne yanan ne de eriyen bir malzemedir, ancak uzun süre artan sıcaklık etkisinde kaldığında (250°C'nin üzeri), yaptığımız denemelerde de görüldüğü üzere, toplu ve/veya tekil posa yanığı, kenar yanığı, sıçrıntı ve fiber lif deformasyonu gibi bozunmalara maruz kalmaktadır.

Özellikle otomotiv ve uzay sanayisinde, ihtiyaç duyulan kompleks tasarımlar için, 2 veya daha çok sayıda Kevlar tabakasının plaka haline getirilmesi ihtiyacı doğmaktadır. Genel kural olarak, polyester, naylon veya poliamid gibi sentetik mensucatlar, elektromagnetik dalgalar altında kaynaklanabilmektedir. Ancak, bu çalışmada da görüldüğü üzere Kevlar, eritilemediği ve büyük oranda ağırlık kaybına maruz kalması nedeniyle, konik uçlu ve 3 yüzeyi düz pim kullanılarak yapılan FSW yöntemiyle kaynaklanamamaktadır.

Öneri olarak, Kevlar'ın üretilmesi aşamasında, kullanılacak olan reçinenin ısı iletkenlik katsayısının, Kevlar'ın ısı iletkenlik katsayısına yakın seçilmesi halinde, reçine fiberleri koruyarak, kaynak boyunca fiberlerin dağılmadan ve parçalanmadan birleşmesi sağlanabilir. Diğer bir öneri de, sistemin ısı girdisini kontrol altına alabilecek, böylelikle analizlerde ve uygulama sırasında da gördüğümüz üzere kaynak sıcaklığının erime sıcaklığı olan 170°C'nin üzerine çıkılmasını önleyebilecek bir adaptif kontrol sistemi geliştirilebilir. Zira uygulamalar sırasında, tezgahın kullanımı, uygulanması gereken ilerleme ve dönme hızları manuel şekliyle ele alındığından, FSW'nin geliştirilecek olan bu adaptif kontrol sistemi altında yapılması, kaynak sırasında oluşabilecek reçine ve posa yanığı gibi istenmeyen bozunmaları önleyerek, kaynak işleminin gerçekleşmesini muhtemel kılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kumar K., Satish V., The Role of Friction Stir Welding Tool on Material Flow and Weld Formation, *Materials Science and Engineering A* 485 367–374, 2008.
- [2] Kallee S. Davenport J., Nicholas D. 2002. Railway Manufacturers Implement Friction Stir Welding, *Welding Journal*, 47-50, October 2002.
- [3] Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, editors, Friction Stir Welding and Processing, 1-5 DOI:10.1361/fswp2007p001.
- [4] Dalle C., Biallas G., Fatigue And Fracture Performance of Friction Stir Welded 2024-T3 Joints. *Proceedings European Conference on Spacecraft Structure. Materials and Mechanical*, Braunschweig, Germany, 309–314, 4–6 November 1998.
- [5] H. Bhadeshia, T. DebRoy, Critical Assessment: Friction Stir Welding of Steels, *Sci. Technol. Weld. Join*, 2009, **14**(3), 193–196.
- [6] Davis J., Du Pont Kevlar Technical Guide, <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibersnonwovens/fibers/articles/kevlar-properties.html> (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2018).
- [7] Lohmann R., Sales & Marketing Ballistics, Teijin Aramid GmbH, *Techtextile Middle East Symposium*, Dubai, 20 February 2014.
- [8] Kerem Altuğ G., Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 2003.
- [9] Vijay Shivaji G., Kumar A., Heat Generation Model for Taper Cylindrical Pin Profile in FSW, *Journal of Materials Research and Technology*, 2013, **2**(4): 370-375.
- [10] Song M., Kovacevic R, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, 605–615, 2003.
- [11] Johnson R., Kallee S., Friction Stir Welding, *Materials World*, Vol. 7 no.12 751-53 December 1999.
- [12] Cui Z., Chen Z.W., Robson J.D., A Model Relating Tool Torque and It's Associated Power and Specific Energy To Rotation and Forward Speeds During Friction Stir Welding/Processing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, **50**, 1023-1030.

- [13] James R.S., 1990. Aluminum-Lithium Alloys. *Metal Handbook Tenth Edition, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International Metals Park, OH.178-199
- [14] Hill R., The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford at the Clarendon Press, 1956.
- [15] Martinez M. A., Navarro C., Cortes R., Rodriguez J., Sanchez-Galvez V., Friction and Wear Behaviour of Kevlar Fabrics, *Journal of Materials Science*, 1993, **28**, 1305-1311, 14 August 1992.
- [16] Saha Roy B., Medhi T., Saha S. C., Material Flow Modeling in Friction Stir Welding of AA 6061-T6 Alloy and Study of the Effect of Process Parameters, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* Vol:9, No:6, 2015.
- [17] Yong G., Continuum Mechanics-Progress in Fundamentals and Engineering Applications, <http://www.cfd.direct/openfoam/user-guide/transport-rheology> (Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2018).
- [18] Dohany J. E., and Humphrey J. S., *In Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2nd ed., edited by H. F. Mark, et al. John Wiley and Sons, New York, vol. 17, 1989.
- [19] Wilfong R. E., Zimmerman J., Strength and Durability Characteristics of Kevlar Aramid Fiber, *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium* 1977, 31, 1–21.
- [20] Wagner et al, United States Patent Application Publication, Pub. No. US 2006/0234572 A1.
- [21] Diana S., Ana Maria P., Timea S., Ion S., Rene R. and Giuseppino F., Preparation and Characterization of Thermally Stable Polyimide Membranes by Electrospinning for Protective Clothing Applications, *Textile Research Journal*, 0(00), 1-13, DOI: 10.1177/0040517515576326, 2015.
- [22] Scialpi A., Filippis L. A. and Cavaliere P., Influence of Shoulder Geometry on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6082 Aluminium Alloy, *Mater. Des.*, 2007, **28**(4), 1124-1129.
- [23] Colegrove P. A. and Shercliff H., Experimental and Numerical Analysis of Aluminium Alloy 7075-T7351 Friction Stir Welds, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2003, **8**(5), 360-368.
- [24] Badarinarayan H., Shi Y. , Li X. and Okamoto K., Effect of Tool Geometry on Hook Formation and Static Strength of Friction Stir Spot Welding Aluminium 5754-O Sheets, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2009, 49(11), 814-823.

- [25] Sato Y., Harayama S., Kokawa H., Inoue H., Tadokoro Y. and Tsuge S., Evaluation of Microstructure and Properties in Friction Stir Welded Superaustenitic Stainless Steel, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2009, **14**(3), 202-209.
- [26] Lorrain O., Favier V., Zahrouni H. and Lawrjaniec D., Understanding The Material Flow Path of Friction Stir Welding Process Using Unthreaded Tools, *J. Matter. Process. Technol.*, 2010, **210**(4), 603-609.
- [27] Cheng C. P., Lin H. M. and Lin J.C., Friction Stir Welding of Ductile Iron and Low Carbon Steel, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2010, **15**(8), 706-711.
- [28] Sato Y., Nelson T. W., Sterling C. J., Steel R. J. and Pettersson C. O., Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded SAF 2507 Super Duplex Stainless Steel, *Mater.Sci. Eng. A*, 2005, **A397**, (1-2), 376-384.
- [29] Reynolds A. P., Tang W., Gnaupel-Herold T. and Prask H., Structure, Properties and Residual Stress of 304 L Stainless Steel Friction Stir Welds, *Scr. Matter.*, 2003, **48**(9), 1289-1294.
- [30] Ohashi R., Fujimoto M., Mironov S., Sato Y. S. and Kokawa H., Effect of Contamination on Microstructure in Friction Stir Spot Welded DP590 Steel, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2009, **14**(3), 221-227.
- [31] Chowdhury S. M., Chen D. L., Bhole S. D. and Cao X., Tensile Properties of A Friction Stir Welded Magnesium Alloy: Effect of Pin Tool Thread Orientation and Weld Pitch, *Mater.Sci. Eng. A*, 2010, **A527**, (21-22), 6064-6075.
- [32] Fujii H., Cui L., Maeda M. and Nogi K., Effect of Tool Shape on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded Aluminum Alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **512**, 389-394.
- [33] Prado R. A., Murr L. E., Soto K. F. and McClure J. C., Self-Optimization in Tool Wear for Friction-Stir Welding of Al 6061+20% Al₂O₃ MMC, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **A349**, (1-2), 156-165.
- [34] Prado R. A., Murr L. E., Shindo D. J. and Soto K. F., Tool Wear in The Friction-Stir Welding of Aluminum Alloy Al 6061+20% Al₂O₃: A Preliminary Study, *Scr. Matter.*, 2001, 45, (1), 75-80.
- [35] Vijay S. J. and Murugan N., Influence of Tool Pin Profile on The Metallurgical and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al 10 Wt. %TiB₂ Metal Matrix Composite, *Mater. Des.*, 2010, **31**(7), 3585-3589.
- [36] Reshad Seighalani K., Besharati Givi M. K., Nasiri A. M. and Bahemmat P., Investigations on The Effects of The Tool Material, Geometry and Tilt Angle on Friction Stir Welding of Pure Titanium, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2010, **19**(7), 955-962.

- [37] Gopalakrishnan S. and Murugan N., Prediction of Tensile Strength of Friction Stir Welded Aluminium Matrix TiC_p Particulate Reinforced Composite, *Mater. Des.*, 2011, **32**(1), 462-467.
- [38] Padmanaban G. and Balasubramanian V., Selection of FSW Tool Pin Profile, Shoulder Diameter and Material for Joining AZ31B Magnesium Alloy-An Experimental Approach, *Mater. Des.*, 2009, **30**(7), 2647-2656.
- [39] Edward P. and Ramulu M., Effect of Process Conditions on Superplastic Forming Behaviour in Ti-6Al-4V Friction Stir Welds, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2009, **14**(7), 669-680.
- [40] Khan M. I., Kuntz M. L., Su P., Gerlich A., North T. and Zhou Y., Resistance and Friction Stir Welding of DP600: A Comparative Study, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2007, **12**(2), 175-182.
- [41] Nami H., Adgi H., Sharifitabar M. and Shamabadi H., Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al/Mg₂Si Metal Matrix Cast Composite, *Mater. Des.*, 2011, **32**(2), 976-983.
- [42] Thomas W., Johnson K. I. and Wiesner C. S., Friction Stir Welding Recent Developments in Tool and Process Technologies, *Adv. Eng. Mater.*, 2003, **5**(7), 485-490.
- [43] Nandan R., Debroy T. and Bhadeshia H. K. D. H., Recent Advances in Friction Stir Welding Process, Weldment Structure and Properties, *Prog. Mater. Sci.*, 2008, **53**, 980-1023.
- [44] Colegrove P. A. and Shercliff H. R., Development of Trivex Friction Stir Welding Tool Part 1—Two Dimensional Flow Modelling and Experimental Validation, *Sci. Technol. Weld. Join.*, 2004, **9**(4), 345-51.
- [45] Loftus Z., Takeshita J., Reynolds A. and Tang W., An Overview of Friction Stir Welding Beta 21S Titanium, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, Sept 14-16, 2004 (Metz, France), TWI, paper on CD.
- [46] Hishihara T. and Nagasaka Y., Development of Micro-FSW, *Proceedings of the Fifth International Conference on Friction Stir Welding*, Sept 14-16, 2004 (Metz, France), TWI, paper on CD.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Taşan A., Tirkeş S., Öztürk Y., Bingöl Z., Feasibility Study of Friction Stir Welding Application for Kevlar Material, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering* , Vol:13, No:5, 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Taşan, 1982’de Elazığ’da doğdu. Lise öğrenimini Mustafa Kemal Paşa Süper Lisesi’nde tamamladı. Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği alanında lisans derecesini 2005 yılında aldı. 2013 yılından bu yana TÜBİTAK BİLGEM’de mekanik tasarımcı olarak çalışmaktadır. Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine 2015 yılında başlamıştır. Mevcut araştırma ilgi alanları arasında lazer ve plazma kaynağı uygulamaları ile mekanik tasarım yetkinliği de bulunmaktadır.

