

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SAYISAL ANALİZİ VE
KISA ÇEVİRİMLİ YORULMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

MURAT TÜRKAN

DENİZLİ, ARALIK - 2022

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLEN
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SAYISAL ANALİZİ VE
KISA ÇEVİRİMLİ YORULMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

MURAT TÜRKAN

DENİZLİ, ARALIK - 2022

**Bu tez alışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma
Koordinasyon Birimi tarafından 2019FEBE039 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

MURAT TÜRKAN

ÖZET

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SAYISAL ANALİZİ VE KISA
ÇEVİRİMLİ YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ
DOKTORA TEZİ
MURAT TÜRKAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)**

DENİZLİ, ARALIK - 2022

Düşük ağırlığa sahip magnezyum alaşımları havacılık-uzay ve otomotiv sanayilerinde büyük potansiyele sahiptir ve magnezyum alaşımlarının bu sanayilerdeki uygulamaları kaçınılmaz olarak kaynaklı imalatı içerir. Kaynaklı imalat genellikle kaynak boyunca mikro yapısal değişiklikler ve/veya potansiyel kaynak hataları oluşumu nedeniyle malzemelerin dayanımının azalmasına neden olduğundan, kaynaklı birleştirmelerin özellikle dinamik yüklerdeki davranışının incelenmesi yapısal parçalarda büyük hasarların meydana gelmesini önlemek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma deneysel çalışmalar ve sayısal çalışmalar olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Deneysel çalışmalar kısmında 5.2 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımını klasik sürtünme karıştırma kaynağı ile en yüksek birleştirme verimliliğinde kaynaklamak amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde çekme dayanımında %88'lik birleştirme verimliliği elde edilmiştir. Bu numunelerin mikro-makro yapı incelemeleri sonucunda bileşimin tam olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerde yapılan uzama kontrollü düşük çevrim yorulma deney sonuçlarına göre kaynaklı olmayan numuneler %0.3 uzama oranında kaynaklı numuneler ise %0.2 uzama oranında belirlenen 50000 çevrim sınırını hasara uğramadan aşmıştır. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerin Coffin-Manson-Basquin denklemine göre kısa zaman yorulma parametreleri elde edilmiştir. Kaynaklı numunelerden her bir uzama oranı için çok benzer yorulma deney sonuçları elde edilmesi kaynak kalitesinin dikiş boyunca sağlandığını göstermiştir. Sayısal çalışmalar kısmında ise bir sonlu elemanlar modeli aracılığıyla AZ61 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi modellenmiştir. Sayısal modelde CEL (Coupled Eulerian Lagrangian – Birleştirilmiş Euler Lagrange) formülasyonu, modifiye edilmiş Coulomb sürtünme yasası, Johnson-Cook malzeme yasası, kütle ölçekleme tekniği ve sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri kullanılmıştır. Sayısal model ısı girdisi, sıcaklık dağılımı, plastik deformasyon tipi-miktarı ve kaynak bölgesinde kaynak hatası oluşumu açısından literatürdeki deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Oluşturulan sayısal model oldukça gerçekçi çıktılar vermiştir.

ANAHTAR KELİMELER:

Magnezyum Alaşımları, Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Yorulma, Sayısal Model

ABSTRACT

THE NUMERICAL ANALYSIS AND THE INVESTIGATION OF LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOYS JOINED BY FRICTION STIR WELDING

PH.D THESIS

MURAT TÜRKAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. ÖZLER KARAKAŞ)

DENİZLİ, DECEMBER 2022

Low-weight magnesium alloys have great potential in aerospace and automotive industries, and applications of magnesium alloys in these industries inevitably include welded manufacturing. Since welded manufacturing generally causes a decrease in the strength of materials due to microstructural changes and/or potential welding defects in the weld area, examining the behavior of welded joints, especially under dynamic loads, is very important to prevent major damage on the structural parts. This study can be divided into two groups as, experimental studies and numerical studies. In the experimental studies, it is aimed to join 5.2mm-thick AZ31 magnesium alloy with conventional friction stir welding with the highest joining efficiency. As a result of these experiments, 88% joint efficiency is obtained in tensile strength at 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ welding parameter. As a result of micro-macro structure examinations of these samples, it is observed that the joining was fully realized. According to the results of the strain-controlled low cycle fatigue test performed on welded and non-welded samples, welded samples exceed the 50000-cycle limit determined at 0.3% strain rate and non-welded samples at 0.2% strain rate without any damage. Low cycle fatigue parameters of welded and non-welded samples are obtained according to the Coffin-Manson-Basquin equation. Obtaining very similar fatigue test results for each strain rate from welded specimens shows that weld quality was ensured throughout the seam. In the numerical studies, the joining of AZ61 magnesium alloy with friction stir welding is modeled by means of a finite element model. CEL (Coupled Eulerian Lagrangian) formulation, modified Coulomb friction law, Johnson-Cook material law, mass scaling technique and temperature dependent friction coefficient values are used in the numerical model. The numerical model has been verified with the experimental results in literature in terms of heat input, temperature distribution, plastic deformation type-amount and weld defect formation in the weld area. The numerical model created gives very realistic outputs.

KEYWORDS:

Magnesium Alloys, Friction Stir Welding, Fatigue, Numerical Model

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI.....	3
2.1 Magnezyum ve Alaşımlarının Özellikleri	3
2.2 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	5
3. YORULMA	8
3.1 Yorulma Teorisi	8
3.2 Yorulma Gerilmeleri	8
3.3 Düşük Çevrim Yorulma	10
3.4 Yüksek Çevrim Yorulma.....	12
3.5 Ortalama Gerilmenin Yorulmaya Etkisi.....	14
3.6 Gerilme Konsantrasyonunun Yorulmaya Etkisi.....	16
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	19
4.1 Klasik Sürtünme Karıştırma Kaynağı	19
4.1.1 Klasik Sürtünme Karıştırma Kaynağında Mikro Yapı	22
4.2 Bobin Takımla Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	23
4.3 Sabit Omuzla Sürtünme Karıştırma Kaynağı	25
4.4 Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Kaynağı	27
4.5 Kendinden Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	28
4.6 Tekrar Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı.....	29
5. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ SAYISAL MODELLENMESİ	32
5.1 CFD Yöntemi	32
5.2 ALE Formülasyonu	33
5.3 SPH Yöntemi.....	34
5.4 CEL Formülasyonu	36
5.4.1 CEL ile ALE Formülasyonunun Karşılaştırılması.....	38
6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ	42
6.1 Magnezyum Alaşımlarının Kaynağında Karşılaşılan Problemler	42
6.2 Sürtünme Karıştırma Kaynak Kalitesini Belirleyen Faktörler	42
6.2.1 Takım Geometrisi	43
6.2.2 Kaynak Parametreleri	48
6.2.2.1 Takım Dönüş Hızı ve Takım İlerleme Hızı.....	48
6.2.2.2 Takım Eğim Açısı ve Dalma Derinliği	52
6.2.2.3 Kuvvetlerin Etkisi	53
6.2.3 Birleştirme Tasarımı	55
6.3 Mekanik Özelliklerin Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması	56

7. MALZEME VE YÖNTEM	59
7.1 Deneysel Çalışmalar	59
7.1.1 Malzeme.....	59
7.1.2 Kalıp Tasarımı ve Üretimi	59
7.1.3 Takım Tasarımı ve Üretimi.....	60
7.1.4 Kaynak Parametreleri	62
7.1.5 Çekme Deneyleri	63
7.1.6 Yorulma Deneyleri	64
7.1.7 Mikro-Makro Yapı ve Sertlik İncelemeleri	65
7.1.8 SEM incelemeleri	66
7.2 Sayısal Çalışmalar	66
7.2.1 Model Geometrisi ve Ağ Özellikleri	67
7.2.2 Malzeme Akış Modeli	69
7.2.3 Termal Model ve Temas Koşulları	70
7.2.4 Sınır Koşulları.....	73
7.2.5 Kütle Ölçeklendirme	75
8. SONUÇLAR.....	77
8.1 Deneysel Çalışma Sonuçları.....	77
8.1.1 Kaynak Parametrelerinin Ön Değerlendirilmesi.....	77
8.1.2 Çekme Deneyi Sonuçları	80
8.1.3 Mikro-Makro Yapı İnceleme Sonuçları.....	82
8.1.4 Sertlik İnceleme Sonuçları.....	85
8.1.5 Düşük Çevrim Yorulma Deneyi Sonuçları.....	86
8.1.6 SEM İnceleme Sonuçları	89
8.2 Sayısal Çalışma Sonuçları	91
9. TARTIŞMA	108
9.1 Literatür Taraması Hakkında Tartışma	108
9.2 Deneysel Çalışma Hakkında Tartışma	109
9.3 Sayısal Çalışma Hakkında Tartışma.....	109
10. KAYNAKLAR.....	112
11. ÖZGEÇMİŞ.....	140

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Mg-Al ikili faz diyagramı	7
Şekil 3.1: Çekme bölgesindeki dalgalanan gerilmenin şematik gösterimi.....	9
Şekil 3.2: Yükleme türleri.....	10
Şekil 3.3: Çevrimsel yüklemde şematik gerilme-uzama tepkisi.....	11
Şekil 3.4: Tipik bir histerezis çevrimi.....	12
Şekil 3.5: Tipik bir S-N eğrisi.....	13
Şekil 3.6: Basquin denkleminde göre log-log skalasında S-N eğrisi.....	14
Şekil 3.7: Ortalama gerilmenin yorulma ömrüne etkisi.....	15
Şekil 3.8: Çentikte gerilme konsantrasyonu oluşumu	16
Şekil 3.9: Yaygın olarak karşılaşılan kaynak kusurları	18
Şekil 4.1: Klasik SKK sürecinin şematik gösterimi	20
Şekil 4.2: SKK sürecinde malzeme akışının şematik gösterimi	21
Şekil 4.3: SKK işleminde mikro yapısal bölge sınıflandırması.....	22
Şekil 4.4: BT-SKK sürecinin şematik gösterimi	24
Şekil 4.5: BT-SKK işleminde oluşan mikro yapı	24
Şekil 4.6: SO-SKK sürecinin şematik gösterimi	25
Şekil 4.7: SO-SKK işleminde oluşan mikro yapı ve sertlik dağılımı	26
Şekil 4.8: Yardımcı dış sabit omuz sistemi a) Fotoğrafı, b) Ölçüleri	26
Şekil 4.9: SO-SKK ile köşe kaynağının yapılması.....	27
Şekil 4.10: D-SKK işleminde kullanılan bir takımın fotoğrafı	27
Şekil 4.11: SKK ve D-SKK'lı plaka a) SKK anahtar deliği kusurları, b) D-SKK ile onarılan anahtar deliği, c) D-SKK+SKİ'den sonra onarılan anahtar deliği	28
Şekil 4.12: KD-SKK sürecinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.13: TD-SKNK kullanarak anahtar deliği kapatma işleminin şematik gösterimi.....	30
Şekil 4.14: Gong ve diğ. (2022) tarafından önerilen SKK a) Dalma aşaması, b) Kaynak aşaması, c) Yeniden doldurma aşaması.....	31
Şekil 5.1: Euler, Lagrange ve ALE formülasyonunun ağ-malzeme hareketine göre karşılaştırılması	34
Şekil 5.2: Ağ ızgarasının karşılaştırılması a) Geleneksel sonlu elemanlarda, b) SPH elemanında.....	35
Şekil 5.3: SPH yöntemiyle kusur oluşumu tahmini a) İç kusurlar, b) Çapak oluşumu	36
Şekil 5.4: CEL tekniğindeki bölme operatörünün şematik gösterimi.....	38
Şekil 5.5: 200 rpm'de kesitte işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL	39
Şekil 5.6: 300 rpm'de kesitte işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL	39
Şekil 5.7: 400 rpm'de kesitte işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL	39
Şekil 5.8: 200 rpm'de üst yüzeyde işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL	40
Şekil 5.9: 300 rpm'de üst yüzeyde işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL	40

Şekil 5.10: 400 rpm'de üst yüzeyde işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL	40
Şekil 5.11: CEL ve ALE formülasyonlarında işlem sürelerinin karşılaştırılması	41
Şekil 6.1: Temel bir SKK takımının boyutsal özellikleri	43
Şekil 6.2: Omuz çapının ısı girdisine etkisi.	44
Şekil 6.3: AZ31B alaşımında omuz çapının birleştirme kalitesine etkisi.....	45
Şekil 6.4: SKK işleminde kullanılan bazı geleneksel pim geometrileri	45
Şekil 6.5: AZ31B alaşımında pim geometrilerinin birleştirme kalitesine etkisi	46
Şekil 6.6: Pim geometrisinin çekme dayanımına etkisi.....	47
Şekil 6.7: SKK ile birleştirilmiş magnezyum alaşımlarının kesit sertliği	50
Şekil 6.8: AZ80A alaşımında takım dönüş hızının birleştirme kalitesine etkisi	51
Şekil 6.9: Takım eğim açısının birleştirme kalitesine etkisi a) 2° eğim açısı, b) 0° eğim açısı.....	52
Şekil 6.10: Tünel ve çapak kusurları	54
Şekil 6.11: Kaynak parametrelerinin dikey kuvvet ve sıcaklık değişimine etkisi	54
Şekil 6.12: 6 mm kalınlığında AZ61A alaşımında eksenel kuvvetin birleştirme kalitesine etkisi.....	55
Şekil 6.13: Yaygın olarak kullanılan birleştirme türleri	56
Şekil 6.14: Kaynak metalinin mikro yapısı a) SKK, b) TIG	56
Şekil 6.15: Kaynaklı parçaların kesiti.....	58
Şekil 7.1: Malzeme tutucu kalıp a) 3B modeli, b) Montajlanmış hali.....	60
Şekil 7.2: Talaşlı imalat ile üretilen takımların ölçüleri	61
Şekil 7.3: Takımların ısıl işlem öncesi fotoğrafı	62
Şekil 7.4: Çekme deney numunesi ölçüleri	63
Şekil 7.5: Bir kaynaklı plakadan çıkarılan yorulma deney numunelerinin tam konumları.	64
Şekil 7.6: Yorulma deney numunesi nihai ölçüleri.	65
Şekil 7.7: Kaynaksız ve kaynaklı yorulma deney numuneleri.	65
Şekil 7.8: Mikro sertlik ölçüm noktaları.....	66
Şekil 7.9: Modelde kullanılan takım geometrisi.....	67
Şekil 7.10: Model geometrisi ve ağ.	69
Şekil 7.11: Modifiye edilmiş Coulomb sürtünme yasası.....	71
Şekil 7.12: Sürtünme katsayısı seçimini açıklayan akış diyagramı.....	73
Şekil 7.13: Sayısal modeldeki malzeme akışı.	75
Şekil 7.14: Sayısal modeldeki hız sınır koşulları.	75
Şekil 7.15: Tüm metodoloji.	76
Şekil 8.1: 15 mm omuz çapına sahip takımda malz. takıma sıvanması	78
Şekil 8.2: 600 rpm 300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. ..	78
Şekil 8.3: 800 rpm 400 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. ..	78
Şekil 8.4: 1000 rpm 500 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. 79	
Şekil 8.5: 1250 rpm 600 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. 79	
Şekil 8.6: 1600 rpm 500 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. 79	
Şekil 8.7: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. 79	
Şekil 8.8: 1000 rpm 300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. 80	
Şekil 8.9: 1600 rpm 400 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü. 80	

Şekil 8.10: Çeşitli parametrelerden elde edilen çekme dayanımının esas metal ile karşılaştırılması.	81
Şekil 8.11: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş kaynaklı numuneler ile kaynaklı numunelerin çekme diyagramlarının karşılaştırılması.	81
Şekil 8.12: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafı	82
Şekil 8.13: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde kaynak kesitinin makro görüntüsü.....	83
Şekil 8.14: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin EM mikroyapısı.....	83
Şekil 8.15: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin ITAB mikroyapısı	84
Şekil 8.16: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin TMEB mikroyapısı	84
Şekil 8.17: 1250 rpm 400 mm.min ⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin KB mikroyapısı.....	85
Şekil 8.18: Kaynak kesitinde sertlik dağılımı.....	86
Şekil 8.19: Kaynaklı numunelerin uzama kontrollü düşük çevrim yorulma deney sonuçları.....	87
Şekil 8.20: Kaynaklı numunelerin uzama kontrollü düşük çevrim yorulma deney sonuçları.....	87
Şekil 8.21: Kaynaklı numunelerin Coffin-Manson-Basquin denklemine göre kısa zaman yorulma parametreleri.	88
Şekil 8.22: Kaynaklı numunelerin Coffin-Manson-Basquin denklemine göre kısa zaman yorulma parametreleri.	88
Şekil 8.23: Kaynak metali kırık yüzey SEM görüntüsü.	89
Şekil 8.24: Yorulma deneyi sonucunda kaynaklı kırık yüzey a) Genel görüntü, b) Son kırılma bölgesi.	90
Şekil 8.25: Oluşturulan sayısal modelde sıcaklığın ölçüldüğü noktalar.....	92
Şekil 8.26: 400 rpm-300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde oluşturulan sayısal modelden elde edilen sıcaklığın literatürdeki deneysel çalışma ile karşılaştırılması.	92
Şekil 8.27: Sayısal modelde iç ısı enerjilerinin karşılaştırılması.....	94
Şekil 8.28: Sayısal modelde kaynak merkezinden 12 mm uzaklıkta sıcaklık değişimi.	95
Şekil 8.29: 400 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde enine kesit sıcaklık dağılımı.	96
Şekil 8.30: 600 rpm-300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde enine kesit sıcaklık dağılımı.	96
Şekil 8.31: 600 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde enine kesit sıcaklık dağılımı.	96
Şekil 8.32: 400 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi kesit görünümüleri a) PEEQVAVG dağılımı, b) EVF dağılımı, c) Deneysel makro yapı.....	98
Şekil 8.33: 600 rpm-300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi kesit görünümüleri a) PEEQVAVG dağılımı, b) EVF dağılımı, c) Deneysel makro yapı.....	99

Şekil 8.34: 600 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresi kesit görünümüleri a) PEEQVAVG dağılımı, b) EVF dağılımı, c) Deneysel makro yapı.....	100
Şekil 8.35: 400 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde kaynak merkezi boyunca boyuna kesitte plastik deformasyon.....	101
Şekil 8.36: 600 rpm-300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde kaynak merkezi boyunca boyuna kesitte plastik deformasyon.....	101
Şekil 8.37: 600 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresinde kaynak merkezi boyunca boyuna kesitte plastik deformasyon.....	102
Şekil 8.38: 400 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresindeki kesit yüzey görünümleri a) Plastik deformasyon dağılımı, b) EVF dağılımı..	103
Şekil 8.39: 600 rpm-300 mm.min ⁻¹ kaynak parametresindeki kesit yüzey görünümleri a) Plastik deformasyon dağılımı, b) EVF dağılımı..	104
Şekil 8.40: 600 rpm-200 mm.min ⁻¹ kaynak parametresindeki kesit yüzey görünümleri a) Plastik deformasyon dağılımı, b) EVF dağılımı..	105
Şekil 8.41: Kaynak sonrası kesitin üst yüzeyindeki Von Mises gerilme dağılımı.....	106
Şekil 8.42: Kaynak sonrası kesitin üst yüzeyindeki enine normal gerilme dağılımı (x eksenini boyunca).	107
Şekil 8.43: Kaynak sonrası kesitin üst yüzeyindeki boyuna normal gerilme dağılımı (z eksenini boyunca).	107

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Alaşım elementlerinin magnezyum elementi üzerine etkileri	4
Tablo 2.2: Magnezyum alaşımları için standart dört kısımlı ASTM alaşım sistemi ve temper tanımlamaları	6
Tablo 2.3: Yaygın olarak kullanılan magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	7
Tablo 4.1: Diğer kaynak işlemleri ile kıyaslandığında SKK'nın avantajları ...	21
Tablo 6.1: Mekanik özelliklerin karşılaştırılması	57
Tablo 7.1: AZ31 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).	59
Tablo 7.2: Kaynak parametreleri.....	63
Tablo 7.3: J-C plastik malzeme akış modelinde kullanılan sabitler.....	70
Tablo 7.4: Modelde kullanılan sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri ...	72
Tablo 7.5: AZ61 magnezyum alaşımı için sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri.....	74

SEMBOL LİSTESİ

σ_a	:	Gerilme Genliği
$\Delta\sigma$:	Gerilme Aralığı
σ_m	:	Ortalama Gerilme
σ_{max}	:	Maksimum Gerilme
σ_{min}	:	Minimum Gerilme
R	:	Gerilme Oranı
A	:	Genlik Oranı
ε	:	Uzama Genliği
N_f	:	Yorulma Ömrü-Hasara Kadar Çevrim
ε_{el}	:	Elastik Uzama
ε_{pl}	:	Plastik Uzama
σ'_f	:	Eksenel Yorulma Mukavemeti Katsayısı
b	:	Eksenel Yorulma Mukavemeti Üssü
ε'_f	:	Eksenel Yorulma Süneklik Katsayısı
c	:	Eksenel Yorulma Süneklik Üssü
σ_f	:	Yorulma Limiti
K_t	:	Çentik Form Sayısı
σ_n	:	Nominal Gerilme
K_f	:	Yorulma Çentik Katsayısı
σ_R	:	Yorulma Dayanımı Sınırı
q	:	Çentik Hassasiyeti
ϕ	:	Keyfi Çözüm Değişkeni
v	:	Malzeme Hızı
ρ	:	Yoğunluk
σ	:	Cauchy Gerilmesi
b	:	Gövde Kuvvetlerinin Vektörü
e	:	Şekil Değiştirme Enerjisi
D	:	Şekil Değiştirme Hızı
Φ	:	Akış Fonksiyonu
S	:	Kaynak Terimi
σ_y	:	Akış Gerilmesi
ε_p	:	Eşdeğer Plastik Uzama
$\dot{\varepsilon}_p$:	Eşdeğer Plastik Uzama Hızı
$\dot{\varepsilon}_0$:	Referans Uzama Oranı
T	:	Referans Sıcaklık
T_{ergime}	:	Malzemenin Ergime Noktası
T_{ortam}	:	Ortam Sıcaklığı
q_p	:	Plastik Deformasyonun Neden Olduğu Isı
η	:	Plastik Enerjinin Sıcaklığa Dönüşüm Oranını Belirleyen Katsayı
τ	:	Kayma Gerilimi
ε_{pl}	:	Plastik Uzama Oranı
q_f	:	Takım ve İş Parçası Arasındaki Sürtünmeden Kaynaklanan Isı
τ_f	:	Sürtünmeden Kaynaklanan Kayma Gerilimi
$\dot{\gamma}$:	Kayma Hızı
P	:	Takım-İş Parçası Ara Yüzündeki Basınç Gerilimi

μ	:	Sürtünme Katsayısı
τ_{max}	:	Maksimum Kesme Gerilimi
u	:	Yer Değişirme Vektörü
E	:	Lineer Uzama Tensörü
α	:	Termal Genleşme Katsayısı
λ ve μ	:	Lamé Katsayıları
ρ^*	:	Yapay Yoğunluk
k_m	:	Kütle Ölçeklendirme Değeri
Q	:	Isı Girdisi
r_o	:	Takım Omuzunun Yarıçapı
r	:	Takım Piminin Yarıçapı
ω	:	Açısal Hız
n	:	Takım Dönüş Hızı
v	:	Takım İlerleme Hızı

KISALTMALAR LİSTESİ

ALE	:	Arbitrary Lagrangian Eulerian
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
BT-SKK	:	Bobin Takımla Sürtünme Karıştırma Kaynağı
CEL	:	Coupled Eulerian Lagrangian
CFD	:	Computational Fluid Dynamics
D-SKK	:	Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Kaynağı
EM	:	Esas Malzeme
EN	:	European Standarts
EVF	:	Element Volume Fraction
HRC	:	Hardness Rockwell C
HV	:	Hardness Vickers
Hz	:	Hertz
ISO	:	International Organization for Standardization
ITAB	:	Isı Tesiri Altındaki Bölge
İT	:	İlerleme Tarafı
J-C	:	Johnson-Cook
KB	:	Karıştırma Bölgesi
KD-SKK	:	Kendinden Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Kaynağı
PEEQVAVG	:	Equivalent Plastic Shear Strain
RPM	:	Revolutions per Minute
SEM	:	Scanning Electron Microscope
SKİ	:	Sürtünme Karıştırma İşlemi
SKK	:	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SO-SKK	:	Sabit Omuzla Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SPH	:	Smoothed Particle Hydrodynamics
TD-SKNK	:	Tekrar Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı
TIG	:	Tungsten Inert Gases
TMEB	:	Termo-Mekanik Etkilenen Bölge
TS	:	Türk Standardı
YT	:	Yığılma Tarafı

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının belirlenmesinden bugüne her zaman yanımda olan tez danışmanım Prof. Dr. Özler Karakaş'a, bu çalışmanın Tez İzleme Komisyonu'nda bulunarak beni değerli görüşleriyle yönlendiren Doç. Dr. Arzum Işıtan'a ve Dr. Öğr. Üyesi Recep Yurtseven'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını 2019FEBE039 nolu proje ile destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

2014 yılından beri bünyesinde öğretim görevlisi olarak çalıştığım İzmir Ekonomi Üniversitesi'ndeki mesai arkadaşlarıma ve yöneticilerime bu süreçte bana verdikleri destekten dolayı çok teşekkür ederim.

Bu süreçte tecrübeleri ile bana yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Bülent Bilir'e çok teşekkür ederim.

Benim bu günlere gelmemde büyük emekleri olan özellikle sevgili babama, anneme ve ağabeyim Doç. Dr. Mehmet Türkan'a çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Magnezyum alaşımları düşük yoğunluğa ve yüksek özgül dayanım (dayanım / yoğunluk) değerlerine sahip olduğundan otomotiv ve uzay-havacılık endüstrileri için büyük bir potansiyele sahiptir. Magnezyum alaşımlarının bu sanayilerdeki uygulamaları kaçınılmaz olarak kaynaklı imalatı içerir. Bu durum magnezyum alaşımlarının kaynaklı imalatla birleştirilmesine akademik ilginin artmasına neden olmuştur. Bir katı hal kaynak tekniği olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) sıcaklık, mekanik, metalürji ve etkileşimlerin dikkate alınmasını içerir ve enerji verimliliği, çevre dostu olma ve dikiş kalitesi açısından devrim niteliğinde bir kaynak tekniğidir.

SKK işleminin avantajları arasında magnezyum alaşımları ve diğer hafif metallerin birleştirilmesinde iyi mukavemet, tokluk ve kaynaklı parçalarda minimum çarpılma elde edilmesi yer alır. Bu yöntemde, kendi eksenini etrafında dönen bir pim ve omuzdan oluşan takım kullanılır. Bu takım, kaynak yapılacak malzemeye kendi eksenini etrafında dönerek girer ve kaynak yönü boyunca dönerek ilerler. Bu yöntemde esas malzeme ergimez ve kaynak için gereken ısı takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve esas malzemenin plastik deformasyonu ile sağlanır. Bu kaynak yönteminde ergime olmaması, magnezyum alaşımlarının kaynağında sıklıkla karşılaşılan ergime ve katılaşma kaynaklı kusurları önler.

Magnezyum alaşımlarının sanayi uygulamalarının çoğunlukla kaynaklı imalatı içerdiği görülmektedir. Kaynaklı birleştirmeler, kaynağın gerçekleştirilmesi esnasında meydana gelen çentiklerden dolayı yorulma hasarına çok yatkındır. Kaynaklı birleştirmeler, kaynak işleminin doğasında bulunan çentiklerin varlığından dolayı işletme koşulundaki ömrünün çoğunu çatlak ilerleme aşamasında geçirir.

Kaynak genellikle, kaynak boyunca mikro yapısal değişiklikler ve/veya potansiyel kaynak hataları oluşumu nedeniyle malzemelerin dayanımının azalmasına neden olduğundan, kaynaklı birleştirmelerin karakterizasyonu, değerlendirilmesi ve işlemin optimizasyonu, yapısal parçalarda büyük hasarların meydana gelmesini önlemek açısından özellikle önemlidir. Magnezyum alaşımlarının güvenli ve emniyetli uygulamalarını sağlamak için özellikle kaynak ve birleştirmeden sonra magnezyum

alaşımlarının yorulma dayanımının incelenmesi gerekir, çünkü böyle bir üretim süreci normalde meydana gelen farklı iç yapı bölgelerinden dolayı malzemenin farklı davranış göstermesine ve dolayısıyla malzemenin dayanımının azalmasına neden olabilir.

SKK işleminin sayısal modellemesi, süreç sırasında meydana gelen karmaşık malzeme davranışının ayrıntılı olarak incelenmesine olanak sağlaması açısından çok önemlidir. Sayısal modelleme ile en uygun kaynak parametrelerinin tahmin edilebilmesi sayesinde çok önemli zaman ve maliyet tasarrufu elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle deneysel ve sayısal çalışmalar için magnezyum alaşımları, SKK, magnezyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi ve metallerin yorulması konularında detaylı literatür taraması yapılmıştır. Deneysel alışma olarak ticari olarak temin edilen 5.2 mm kalınlığındaki AZ31 levhalar klasik SKK yöntemi ile çeşitli parametrelerde birleştirilmiştir. Çekme dayanımını referans olarak en uygun kaynak parametresi belirlenmiştir. En uygun parametrede birleştirilen numunelerin mikro-makro yapı, sertlik incelemeleri, uzama kontrollü düşük çevrim yorulma davranışları deneyler yapılarak incelenmiştir. Sayısal alışma olarak magnezyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi modellenmiştir. Bu sayısal model ısı girdisi, sıcaklık dağılımı, plastik deformasyon tipi-miktarı ve kaynak bölgesinde kaynak hatası oluşumu açısından literatürdeki deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

2.1 Magnezyum ve Alaşımlarının Özellikleri

Dünyada en bol bulunan metallere biri magnezyumdur. Magnezyum sıkı düzen hekzagonal kristal kafes yapısına sahiptir ve parlak gümüş rengindedir. Magnezyum, mukavemet, şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri geliştirmek için birçok elementle alaşımlandırılabilir.

Magnezyum alaşımları imal edilen parçalar için malzeme olarak kullanıldığında hafiflik, mukavemet ve rijitlik gibi özelliklerin benzersiz bir kombinasyonunu sunar. 1.74 g/cm^3 yoğunluğa sahip olan magnezyum alaşımları, çelik (7.86 g/cm^3) ve alüminyumdan (2.7 g/cm^3) sırasıyla yaklaşık %80 ve %35 daha hafiftir. Ayrıca yapısal metallere en hafif olanıdır (Moosbrugger 2017, Sahoo ve diğ. 2011). Magnezyum alaşımları, çelik ve alüminyumdan sonra yapı elemanı olarak kullanımında üçüncü sırada yer almaktadır (Prasad ve diğ. 2022).

Yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip magnezyum alaşımları otomotiv ve havacılık endüstrilerinde enerji tasarrufu için çok önemli bir potansiyele sahiptir (Karakas 2006, Kiełbus 2018, Kierzek ve Adamiec 2011, Kulecki 2008, Monteiro 2011, Ullmann ve diğ. 2019). Magnezyum alaşımları plastikten daha yüksek mukavemete, sertliğe, termal kararlılığa ve termal iletkenliğe sahiptir; alüminyumdan ise daha yüksek özgül mukavemete, esnekliğe ve darbe direncine sahiptir (Johari ve diğ. 2022). Ayrıca magnezyum alaşımları, otomotiv ve havacılık endüstrileri için önemli bir faktör olan mükemmel bir titreşim sönümlenme özelliği ve ısı yayma özelliği sunar (Loukil 2022).

Saf magnezyumun düşük mekanik özelliklerinin üstesinden gelmek ve istenen mekanik özelliklere sahip magnezyum alaşımları elde etmek için farklı elementlerin saf magnezyum ile alaşımlanması gerekir. Alaşımlama ile çeşitli ortamlar da kullanılabilen özellikleri kazandırılabilen magnezyuma alaşım elementlerinin etkisi Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1: Alaşım elementlerinin magnezyum elementi üzerine etkileri
(Sankaranarayanan ve Gupta 2021).

Alaşım elementi	Alaşım elementi ilavesinin etkileri
Al	En yaygın olarak kullanılan elementtir. Mukavemeti, sertliği ve dökülebilirliği artırır. Artan alüminyum sünekliği azaltır. %6'dan fazlası ısıl işlem görebilir.
Ca	Oksidasyon dayanımını, termal ve mekanik özellikleri iyileştirir. Yüzey çeki gerilimini azaltır. Kaynak çatlakları riski oluşturur.
Ce	Korozyon direncini ve deformasyon davranışını iyileştirir (daha iyi süneklik ve deformasyon sertleşmesi). Akma mukavemetini azaltır.
Cu/Ni	Oda ve yüksek sıcaklık mukavemetini iyileştirir. Korozyon direncini ve sünekliği azaltır.
Mn	Alüminyum içeren alaşımlarda tuzlu su korozyon direncini artırır.
RE	Yüksek sıcaklık sürünme ve korozyon direncini iyileştirir.
Si	Eriyik akışkanlığını, yüksek sıcaklık (sürünme) özelliklerini iyileştirir. Basınçlı dökümde kullanılır.
Sr	Kombinasyon halinde kullanıldığında sürünme performansını iyileştirir.
Sn	Sünekliği artırır ve işleme sırasında çatlama eğilimini azaltır.
Y	Diğer RE ile birleştirildiğinde yüksek sıcaklık mukavemetini ve sürünme performansını artırır.
Zn	İkinci en yaygın kullanılan elementtir. Dökümde eriyik akışkanlığını iyileştirir. Nikel veya demir safsızlıklarını içeren magnezyum alaşımlarının korozyon direncini artırır.
Zr	Dökme alaşımlarda tane boyutunu küçültür. Alüminyum ile kullanılmaz.

2.2 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Ticari magnezyum alaşımları, dökme alaşımlar ve dövme alaşımlar olarak iki ana gruba ayrılır. Dövme magnezyum alaşımlarının kullanımı toplam magnezyum kullanımında %10'dan daha azdır. Bunun nedeni, magnezyumun sıkı düzen hekzagonal kristal yapıya sahip yapısının oda sıcaklığında düşük soğuk işlenebilirliğe neden olmasıdır (Loukil 2022). Magnezyum alaşımlarının kötü şekillendirilebilirliği nedeniyle (Javaid ve diğ. 2019) magnezyum ürünleri genellikle döküm işlemleri ile üretilir (Abbott ve diğ. 2004, Śliwa ve diğ. 2017). Bununla birlikte, dökme magnezyum alaşımlarının uygulamaları hala sınırlıdır. Bunun nedenlerinden biri, alüminyum alaşımlarına kıyasla yetersiz mekanik özellikleridir (Pan ve diğ. 2016). Dövme magnezyum alaşımları, döküm bileşenlerine kıyasla daha homojen mikro yapıya ve mekanik özelliklere sahiptir (Letzig ve diğ. 2008, You ve diğ. 2017). Son yıllarda, tatmin edici mekanik özelliklere sahip dövme magnezyum alaşımlarının üretiminde büyük gelişmeler olmuştur. 300 MPa nihai çekme dayanımı dövme magnezyum alaşımlarından elde edilebilir. Bazıları, alaşımlama ve sonraki işlemlerle daha da mukavemetli olabilir (You ve diğ. 2017). Dövme alaşımlar şekillendirme için dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi mekanik işlemler görürler. Alüminyum, mangan ve çinko ana alaşım elementleridir. Magnezyumun dövme alaşımları, ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem görmeyen alaşımlar olarak sınıflandırılır.

Sık kullanılan bazı dökme magnezyum alaşımları AZ91, AM50 ve AM100'dir. Elektronik, otomotiv ve havacılık uygulamalarında döküm magnezyum alaşımları yaygın olarak tercih edilmektedir. Bazı dövme magnezyum alaşımları AZ31, AZ61 ve AZ80'dir. Burada önek harfleri alaşım elementi kodlarıdır ve magnezyum alaşımlarında ASTM B275'e göre geliştirilmiş iki ana alaşım elementini gösterirler. Magnezyum alaşımlarındaki alaşım element kodları Tablo 2.2'de gösterilmektedir. Tablo 2.3'te ise yaygın olarak kullanılan bazı magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir.

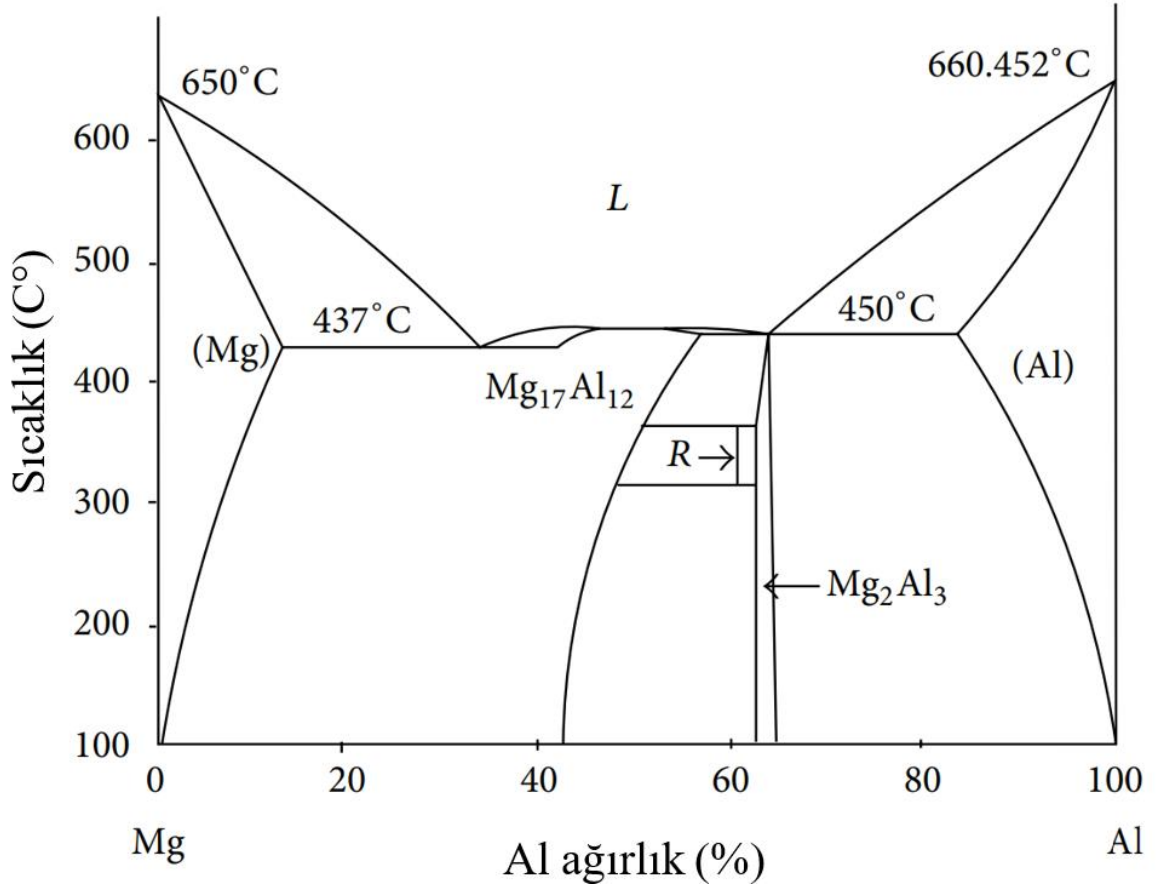
Tablo 2.2: Magnezyum alaşımları için standart dört kısımlı ASTM alaşım sistemi ve temper tanımlamaları (Örnek olarak ilk satırda bulunan parantez içlerinde AZ91E-T6 alaşımı tanımlıdır) (Moosbrugger 2017).

Birinci kısım (AZ)	İkinci kısım (91)	Üçüncü kısım (E)	Dördüncü kısım (T6)
<p>*İki ana alaşım elementini gösterir.</p> <p>*Azalan yüzde sırasına göre (veya yüzdelere eşitse alfabetik olarak) düzenlenmiş iki ana alaşım elementini temsil eden iki kod harfinden oluşur.</p> <p>*Harflerin belirttiği elementler aşağıda listelenmiştir.</p> <p>A, Alüminyum B, Bizmut C, Bakır D, Kadmiyum E, Nadir element F, Demir H, Toryum J, Stronsiyum K, Zirkonyum L, Lityum M, Manganez N, Nikel P, Kurşun Q, Gümüş R, Krom S, Silisyum T, Kalay V, Gadolinyum W, İtiryum Y, Antimon Z, Çinko</p>	<p>*İki ana alaşım elementinin miktarını gösterir.</p> <p>*İki ana alaşım elementinin yuvarlatılmış yüzdelere karşılık gelen ve birinci kısımdaki alaşım tanımlarıyla aynı sırada düzenlenmiş iki sayıdan oluşur.</p> <p>*Tüm sayılar kullanılır.</p>	<p>*İki ana alaşım elementinin aynı yüzdelere sahip farklı alaşımlar arasında ayırım yapar.</p> <p>*Kompozisyonlar standart hale geldikçe sıraya göre atanan alfabenin bir harfinden oluşur.</p> <p>I ve O hariç alfabenin tüm harfleri kullanılır.</p>	<p>*Temper durumunu gösterir.</p> <p>*Bir harfin ardından bir rakamdan oluşur (adlandırmanın üçüncü bölümünden bir tire ile ayrılır).</p> <p>F, Üretilen şekliyle, O, Tavlanmış olarak, H, Deformasyonla sertleştirilmiş (sadece dövme ürünler için), H temper alt bölümleri: H1, bir ya da daha fazla basamak sadece deformasyon sertleşmesi yapılmış, H2, bir ya da daha fazla basamak deformasyon sertleştirilmesi yapılmış ve kısmen tavllanmış, H3, bir ya da daha fazla basamak deformasyon sertleştirilmesi yapılmış ve ardından stabilize edilmiş, W, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş, kararsız temperli, sadece oda sıcaklığında kendiliğinden yaşanan alaşımlar için kullanılır. T, Kararlılığı sağlamak için ısıl temperlenmiş, T temper'in alt bölümleri: T1, Soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış, T3, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş ve soğuk işlenmiş, T4, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş, T5, Sadece soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmış, T6, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş ve yapay olarak yaşlandırılmış, T7, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş ve stabilize edilmiş, T8, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış, T9, Çözeltiye alma ısıl işlemi görmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş, T10, Soğutulmuş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş.</p>

Tablo 2.3: Yaygın olarak kullanılan magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri (Czerwinski 2011).

Malzeme		Akma	Çekme	Uzama
ASTM Gösterim	ISO Gösterim	Mukavemeti (MPa)	Mukavemeti (MPa)	(%)
AZ31	MgAl3Zn1	200	255	12
AZ91	MgAl9Zn1	160	250	3
AZ61	MgAl6Zn1	230	310	25
AM50	MgAl5Mn	125	230	15

Şekil 2.1’de magnezyum-alüminyum ikili faz diyagramı gösterilmektedir. Saf magnezyumun ergime sıcaklığı 650 °C’dir. Alüminyum eriyiğindeki magnezyum çözünürlüğü, 450 °C ötektik sıcaklıkta maksimum %18.92’a ulaşır. Alüminyumun ötektik sıcaklıkta magnezyum içinde maksimum çözünürlüğü %11.8’dir (Djurđjević ve diğ. 2013).



3. YORULMA

3.1 Yorulma Teorisi

Tekrarlayan veya dalgalanan bir gerilmeye maruz kalan bir metalin, tek bir yük uygulanmasında kırılmaya neden olan gerilmeden çok daha düşük bir gerilmede hasara uğrayabileceği bilinmektedir. Dinamik yükleme koşulları altında meydana gelen bu tür bir hasara yorulma hasarı denir. Mekanik nedenlerden kaynaklanan tüm işletme hasarlarının yaklaşık %90-95'ini yorulma hasarının oluşturduğu sıklıkla belirtilmektedir.

Yorulma hasarı özellikle tehlikelidir çünkü herhangi bir belirgin uyarı olmadan meydana gelir. Makro bir ölçekte, yorulma kırılmasında kırılma yüzeyi genellikle asal gerilme yönüne normaldir. Yorulma hasarının meydana gelebilmesi için üç temel faktör gereklidir. Bunlar;

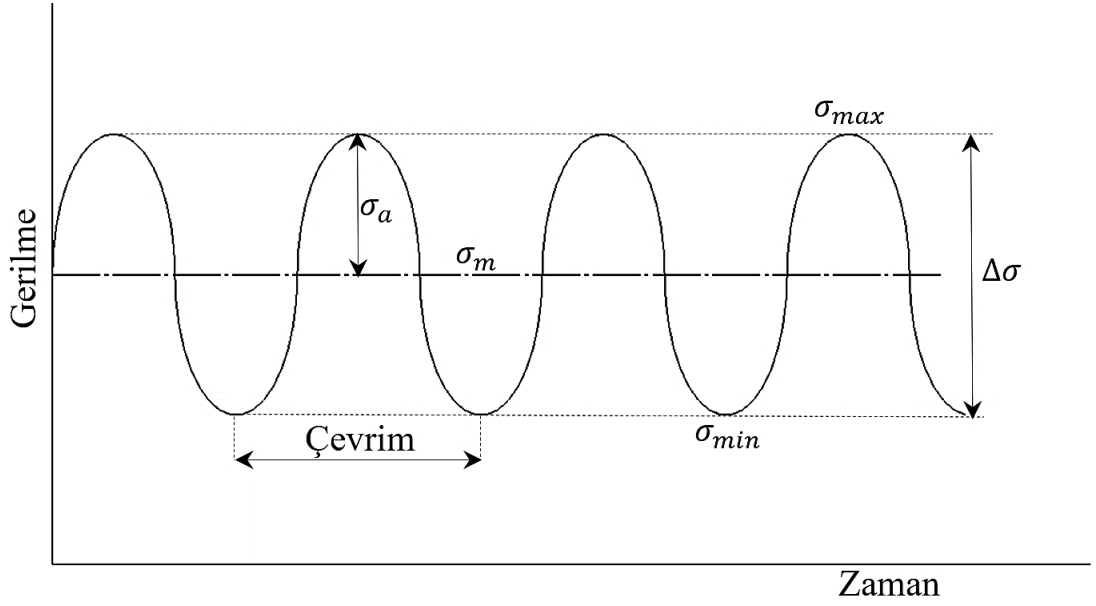
1. Yeterince yüksek değerde bir maksimum çeki gerilmesi,
2. Uygulanan gerilmede yeterince büyük bir değişim veya dalgalanma,
3. Yeterince fazla sayıda uygulanan çevrimdir.

Yorulma süreci üç farklı aşamada meydana gelir. İlk aşamada, bir mikro çatlak malzemenin bir veya bazen birkaç yerinde çekirdeklenir. Ardından, çevrimsel yükleme sırasında bir ana çatlak (makro çatlak) kararlı bir şekilde büyür. Son olarak, çatlak kritik bir boyuta ulaştığında kararsız hale gelir ve genellikle bir veya birkaç çevrim içinde ani kırılma meydana gelir. Çoğu durumda, bu aşamalar daha sonra kırılma yüzeyinde tanımlanabilir (Silitonga 2017).

3.2 Yorulma Gerilmeleri

Yorulma hasarı, maksimum gerilmeden ziyade gerilmelerdeki dalgalanmalar tarafından yönlendirilir. Bu nedenle gerilme genliği (σ_a) veya gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) ve ortalama gerilme (σ_m) malzemelerin yorulma davranışının değerlendirmesindeki en

önemli parametrelerdir (Pedersen 2018). Şekil 3.1 çekme bölgesinde dalgalanan bir gerilmeye bu gerilmelerin konumlarını göstermektedir.



Şekil 3.1: Çekme bölgesindeki dalgalanan gerilmenin şematik gösterimi.

$\Delta\sigma$, bir çevrimdeki maksimum gerilme (σ_{max}) ve minimum gerilme (σ_{min}) arasındaki farktır;

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \quad (3.1)$$

σ_a , $\Delta\sigma$ 'nin yarısına eşittir;

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

σ_m , σ_{max} ve σ_{min} 'nin cebirsel ortalamasıdır;

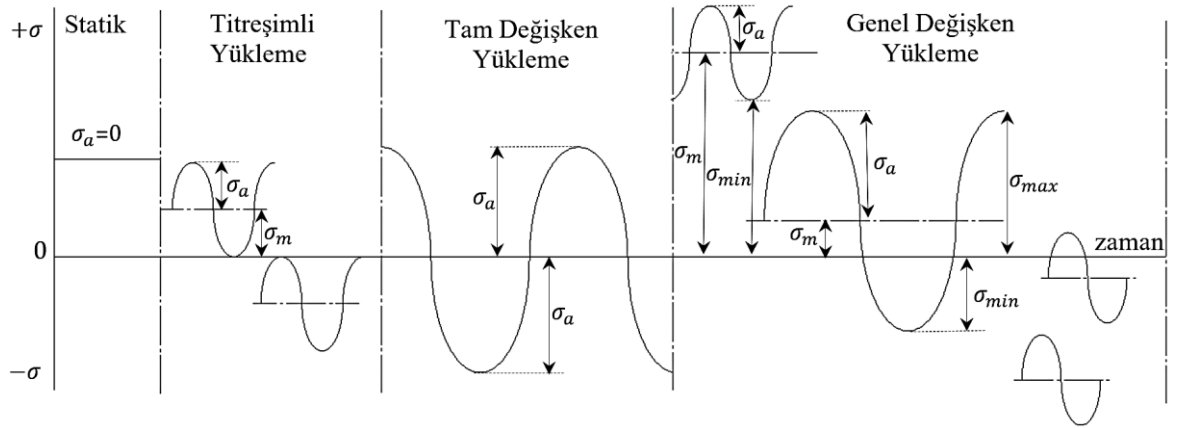
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.3)$$

Yorulma verilerinin değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan iki oran olan gerilme oranı (R) ve genlik oranı, (A) sırasıyla denklem 3.4 ve 3.5 ile elde edilir.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (3.5)$$

Malzemelerin yorulma davranışlarının değerlendirilmesinde gerilmenin yönüne bağlı olarak titreşimli, tam değişken ve genel değişken olmak üzere çeşitli yükleme türleri vardır. Bunlar Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Yükleme türleri.

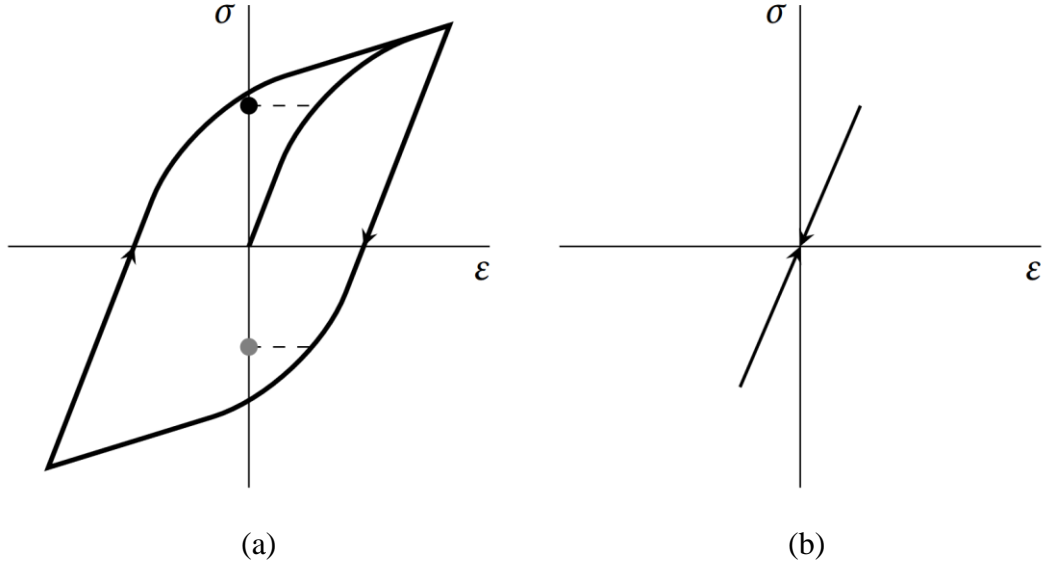
Yorulma davranışının incelenmesinde yaygın bir sınıflandırma yorulma ömrüne dayanmaktadır. Buna göre yorulma deneyleri düşük çevrimli yorulma (ilk 50000 çevrim sayısı), orta çevrimli yorulma (50000 – 2000000 çevrim sayısı arası) ve yüksek çevrimli yorulma (2000000 çevrim sayısından fazla) deneyleri olarak sınıflandırılabilir.

3.3 Düşük Çevrim Yorulma

Yüksek çevrimli yorulma deneylerine benzer şekilde, malzemelerin düşük çevrimli yorulma davranışı, uzama kontrollü deneyler gerçekleştirilerek bir uzama modu, yani normal veya kesme uzaması için karakterize edilebilir.

Düşük çevrimli yorulma deneyleri ile yüksek çevrimli yorulma deneyleri arasındaki gerilme-uzama ilişkisindeki fark Şekil 3.3’te şematik olarak gösterilmektedir. Yüksek çevrimli yorulma deneylerinde çatlak ucunda plastik deformasyon meydana gelebilir fakat genel olarak değerlendirildiğinde uygulanan

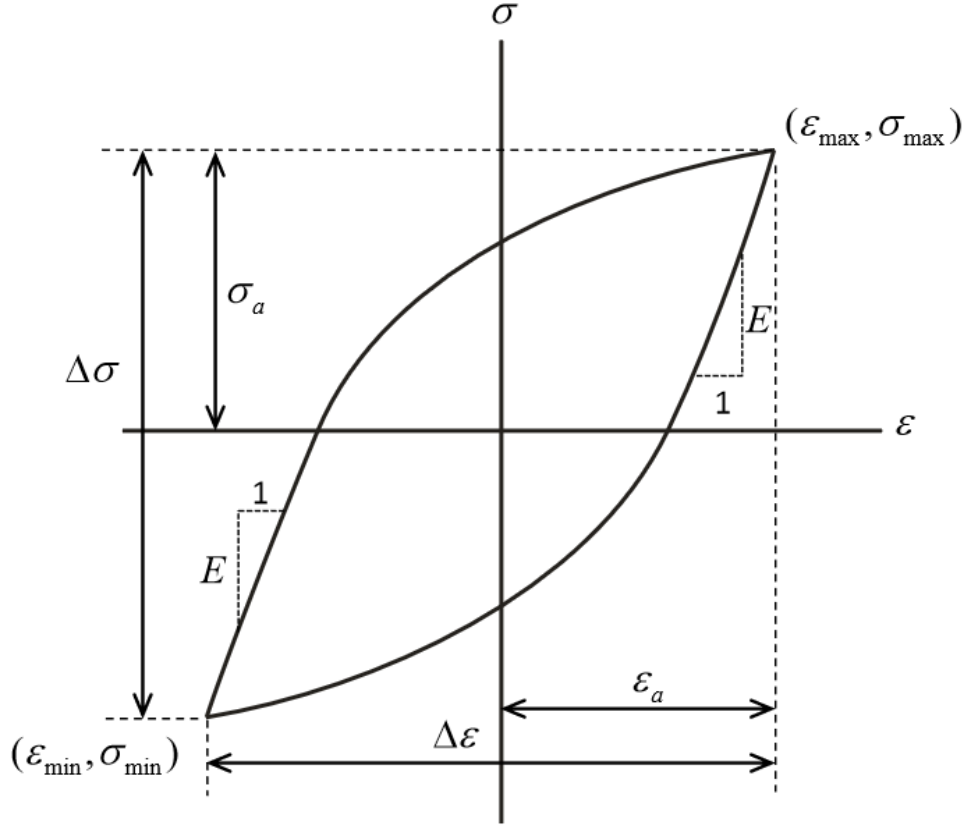
gerilme malzemede elastik deformasyon oluşturacak kadar düşüktür. Düşük çevrimli yorulma deneylerinde ise plastik deformasyon etkili olmaktadır.



Şekil 3.3: Çevrimsel yüklemeye şematik gerilme-uzama tepkisi a) Düşük çevrim yorulma, b) Yüksek çevrim yorulma (Silitonga 2017).

Düşük çevrimli yorulma deneylerinde uzama kontrol edilirken ekstansometre gibi uzama ölçüm cihazları kullanılarak yük sinyali de elde edilir. Bu şekilde Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bir histerezis döngüsü ile belirli bir döngü için temsil edilebilecek hem gerilmenin hem de uzamanın hesaplanmasını sağlar. Uzama-ömür ($\epsilon - N$) eğrisi genellikle uygulanan uzama genliği (ϵ) ve yorulma ömrü (N_f) arasındaki ilişkiyi bir log-log ölçeğinde göstermek için kullanılır (Albinmoussa 2020). ϵ , elastik uzama (ϵ_{el}) ve plastik uzamanın (ϵ_{pl}) toplamına eşittir;

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} \quad (3.6)$$



Şekil 3.4: Tipik bir histerezis çevrimi (Mousa 2011).

Düşük çevrim yorulma testi verileri Coffin-Manson denklemi ile temsil edilir (Albinmoussa 2020, Karakaş ve diğ. 2010):

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^b + \varepsilon'_f (2 N_f)^c \quad (3.7)$$

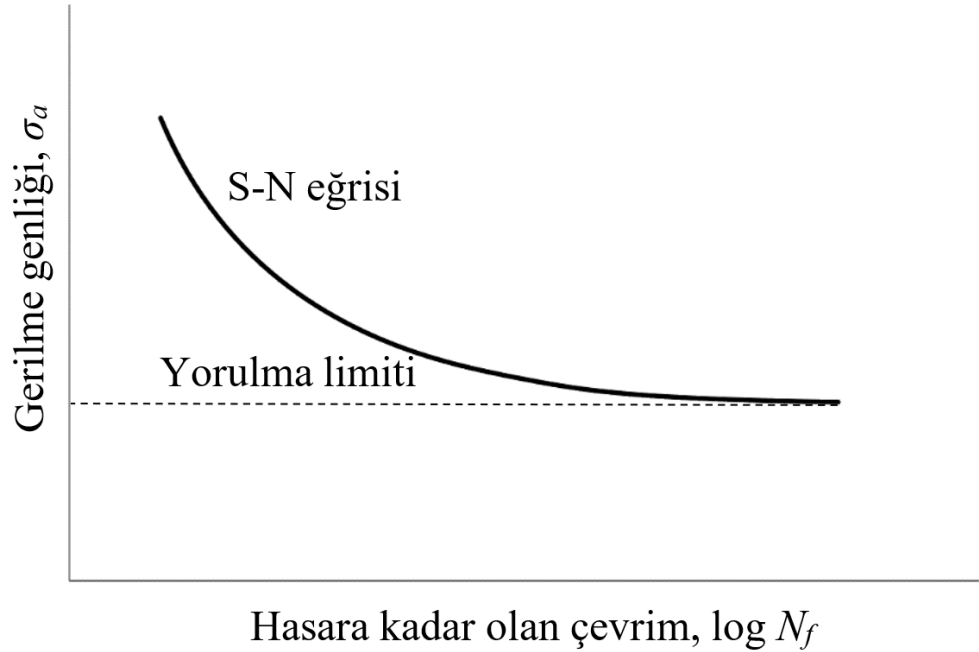
Bu denklemde σ'_f aksenal yorulma mukavemeti katsayısı ve b aksenal yorulma mukavemeti üssü, N_f hasara kadar olan çevrimdir. ε'_f ve c sırasıyla aksenal yorulma süneklik katsayısı ve aksenal yorulma süneklik üssüdür.

3.4 Yüksek Çevrim Yorulma

Yüksek çevrimli yorulma deneyleri çok sayıda devir ve elastik olarak uygulanan bir gerilme içerir. Yüksek çevrimli yorulma deneyleri genellikle demir dışı metaller için 10^7 devir ve bazen 5×10^8 devirde yapılır. Uygulanan gerilme elastik olacak kadar düşük olmasına rağmen, çatlak ucunda plastik deformasyon meydana gelebilir (Campbell 2008).

Yüksek çevrimli yorulma deneylerinde yorulma mukavemeti genellikle bir gerilme-ömür (S-N) eğrisi ile ifade edilir. Bu eğri Wöhler eğrisi olarak da bilinir. S-N eğrilerinin birçok benzer varyantı literatürde kullanılmaktadır (örneğin; doğrusal, çift doğrusal veya doğrusal olmayan). S-N eğrileri genellikle çift logaritmik eksenlerde çizilirler, ancak bazen gerilme eksenini doğrusaldır. Ayrıca, gerilme eksenini ya aralık olarak ya da genlik olarak verilebilir. Belirli bir gerilme genliğinde beklenen ömrün ne olduğunu tanımladıkları için kavramsal olarak aynıdır (Pedersen 2018). Tipik bir S-N eğrisi, Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

Göreceli olarak düşük gerilme seviyesinde, eğri, yorulma limiti adı verilen bir yorulma özelliğini tanımlayan davranış gösterir. Yorulma limiti, altında yorulma hasarının beklenmediği çevrimsel gerilme seviyesidir (Silitonga 2017). Yorulma ömrü ise belirli bir gerilme seviyesinde hasara kadar olan çevrim sayısıdır. Uygulanan gerilme seviyesi azaldıkça, hasara kadar olan çevrim sayısı artar. Normal olarak, statik çekme mukavemeti arttıkça yorulma mukavemeti de artar (Campbell 2008).

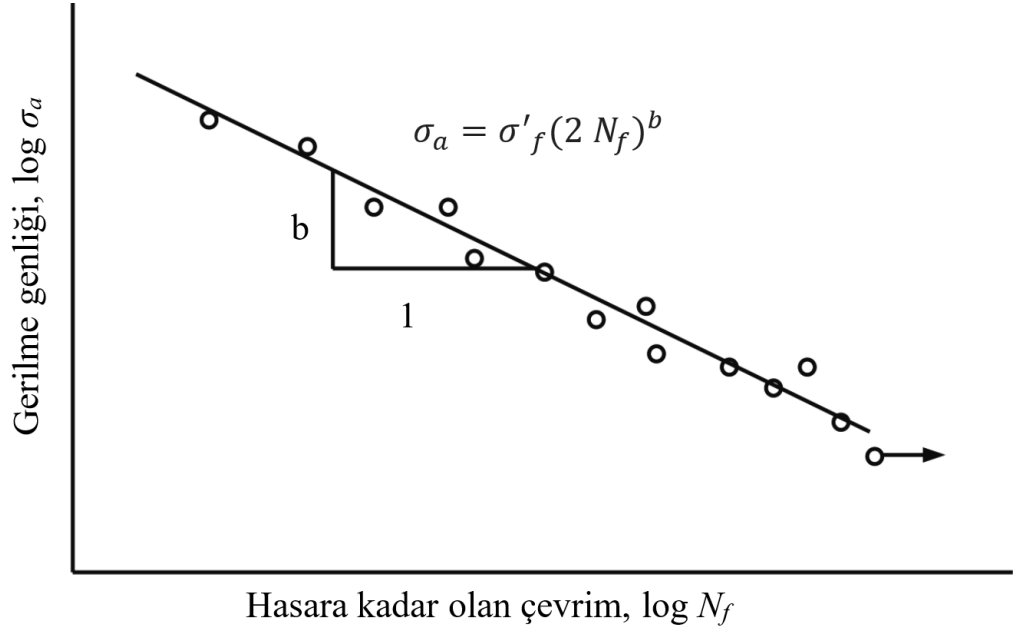


Şekil 3.5: Tipik bir S-N eğrisi.

Bir log-log skalasında özellikle yüksek çevrim yorulma bölgesinde gerilme genliği ve yorulma ömrü arasındaki ilişkinin lineer olduğunu anlayan Basquin denklem 3.8'i önermiştir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f (2 N_f)^b \quad (3.8)$$

σ'_f , b , N_f denklem 3.7'de tanımlanmıştır. Denklem 3.8'e göre oluşan S-N eğrisi Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Basquin denklemine göre log-log skalasında S-N eğrisi (Albinmoussa 2020).

3.5 Ortalama Gerilmenin Yorulmaya Etkisi

Ortalama gerilme, malzemelerin yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Karakaş 2013). Ortalama gerilmenin yorulma ömrüne etkisi Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Artan çekme ortalama gerilmesi ile yorulma mukavemeti düşmektedir. Yorulmada genel olarak çekme ortalama gerilmeleri yorulma dayanımını düşürmekte ve basma ortalama gerilmeleri ise yorulma dayanımını arttırmaktadır. Ortalama gerilmenin yorulmaya etkisini açıklayan gerilmeye dayalı yöntemler için farklı modeller vardır (Albinmoussa 2020). Bunlar;

Modifiye edilmiş Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (3.9)$$

Gerber:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1 \quad (3.10)$$

Morrow:

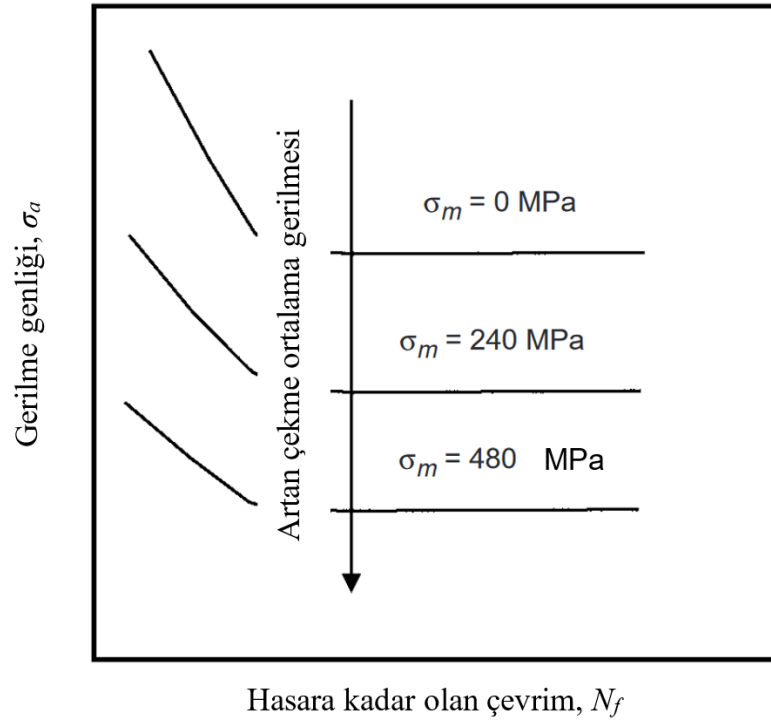
$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)^2 = 1 \quad (3.11)$$

Bu denklemlerde σ_f yorulma limitidir.

Morrow'un denklemi uzama tabanlı yöntem için şu şekilde kullanılabilir:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \varepsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2 N_f)^b + \varepsilon'_f (2 N_f)^c \quad (3.12)$$

Büyük miktarda plastik deformasyonun ortalama gerilmenin herhangi bir olumlu veya olumsuz etkisini ortadan kaldırdığı düşük çevrim yorulma bölgesinde, ortalama gerilmenin yorulma mukavemeti üzerinde çok az etkisi vardır veya hiç etkisi yoktur (Silitonga 2017).

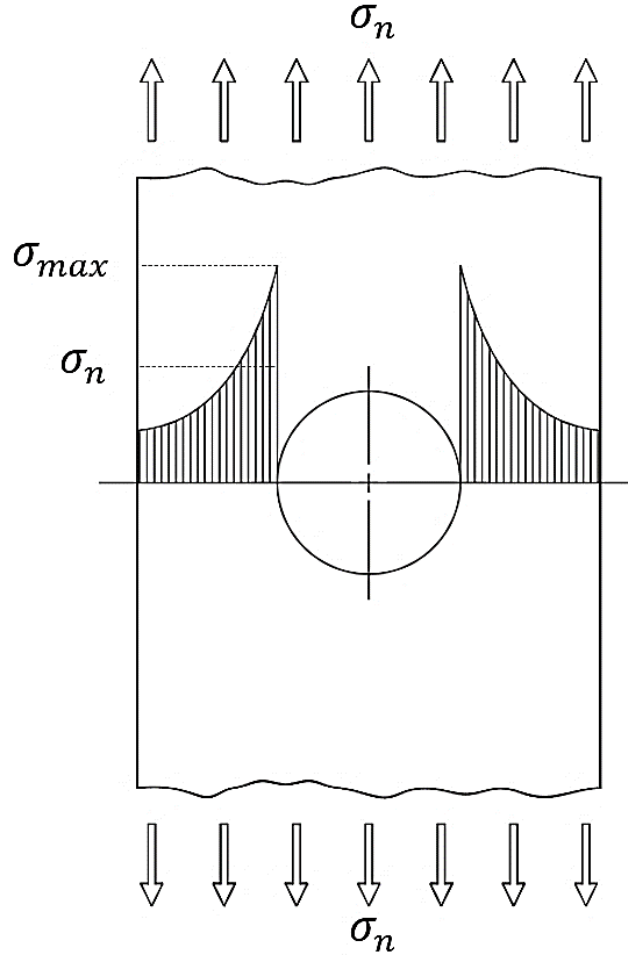


Şekil 3.7: Ortalama gerilmenin yorulma ömrüne etkisi (Campbell 2008).

3.6 Gerilme Konsantrasyonunun Yorulmaya Etkisi

Çentik form sayısı (K_t) geometrideki değişikliklerden dolayı gerilme seviyesindeki artışı tanımlar. Bu nedenle bazen geometrik veya teorik gerilme konsantrasyon faktörü olarak adlandırılır (dolayısıyla t alt simgesi vardır). Şekil 3.8 aksenal yükleme sonucu bir çentik kesitinde oluşan gerilmenin dağılımını şematik olarak göstermektedir. K_t σ_{max} 'ın (örneğin sonlu elemanlar yönteminden elde edilen) kesitteki nominal gerilme, σ_n 'ye oranıdır (Pedersen 2018):

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (3.13)$$



Şekil 3.8: Çentikte gerilme konsantrasyonu oluşumu.

Bunun yanında bir çentiğin yorulma mukavemeti üzerindeki etkisi, yalnızca geometriden kaynaklanan gerilme artışı ile tam olarak açıklanamaz çünkü diğer faktörler de bu duruma katkıda bulunur. Tipik olarak denklem 3.13, özellikle keskin çentiklerde gerçekçi değerler vermeyecektir (Pedersen 2018). Çentiklerin yorulma dayanımı üzerindeki etkisi, çentikli ve çentiksiz numunelerin S-N eğrileri karşılaştırılarak belirlenir. Çentiğin yorulma mukavemetini azaltmadaki etkisi, yorulma mukavemeti azaltma faktörü veya yorulma çentik katsayısı, K_f olarak rapor edilir (Campbell 2008):

$$K_f = \frac{\sigma_{R,\text{çentiksiz}}}{\sigma_{R,\text{çentikli}}} \quad (3.14)$$

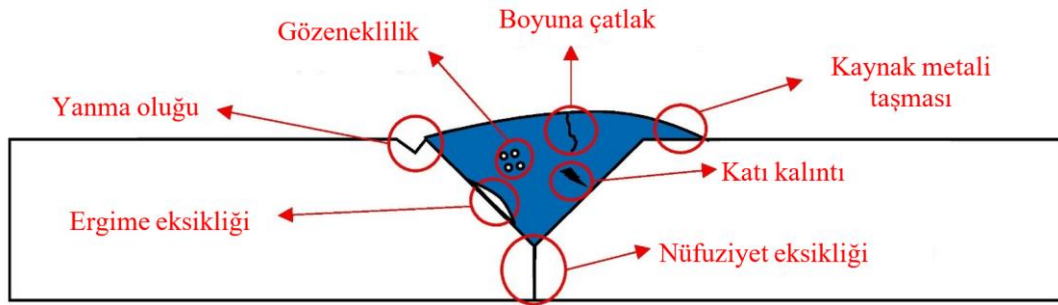
Bu denklemde σ_R , yorulma dayanımı sınırır.

K_f ve K_t ile ilgili olan çentik hassasiyeti, q denklem 3.15 ile elde edilir (Silitonga 2017).

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (3.15)$$

Kaynaklı yapılarda yorulma, hasar gelişimi noktasında gerilme/uzama alanını etkileyen birçok farklı faktör tarafından yönlendirilen karmaşık bir fiziksel süreçtir. Kaynaklı birleştirmelerde, birleştirmenin tipine ve geometrisine bağlı olarak, rijitlikteki ani değişiklikler nedeniyle yorulma açısından kritik konumlarda, bilhassa çentik içeren bölgelerde yüksek gerilme konsantrasyonları meydana gelebilir. Bu noktalar yorulma açısından kritik yerlerdir. Bir çalışmada çatlakların her zaman gerilme konsantrasyonunun en yüksek olduğu kaynak uçlarında ve çentik köklerinde başladığı belirtilmiştir (Karakaş ve diğ. 2008, Karakaş ve diğ. 2020, Zhou ve diğ. 2020). Kaynaklı yapı elemanlarının yorulma davranışlarının kök aralıksız alın dikişi, kök aralıklı alın dikişi olan numuneler üzerinde değerlendirilmesi önemlidir (Karakaş ve diğ. 2007). Çünkü kaynak, Şekil 3.9'da gösterilen bir takım geometrik kusurlar ortaya çıkarabilir. Bu kusurlar bağlantıların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Türkan 2013, Türkan ve Karakaş 2017a). Kaynaklı yapıların yorulma ömründe, kaynak nedeniyle çatlak başlangıcı son derece kısa ve ihmal edilebilir olduğundan, esas olarak çatlak ilerlemesi ile karşılaşılır (Aygül 2013). Bunun yanında kaynaklı birleştirmelerde yüzeyde oluşturulan basma gerilmeleri sonucunda çentik

dibi yarıçapları büyümekte, lokal gerilme konsantrasyonları düşmekte ve böylece yorulma dayanımı artırmaktadır (Karakaş ve diğ. 2022).



Şekil 3.9: Yaygın olarak karşılaşılan kaynak kusurları (Amirafshari 2021).

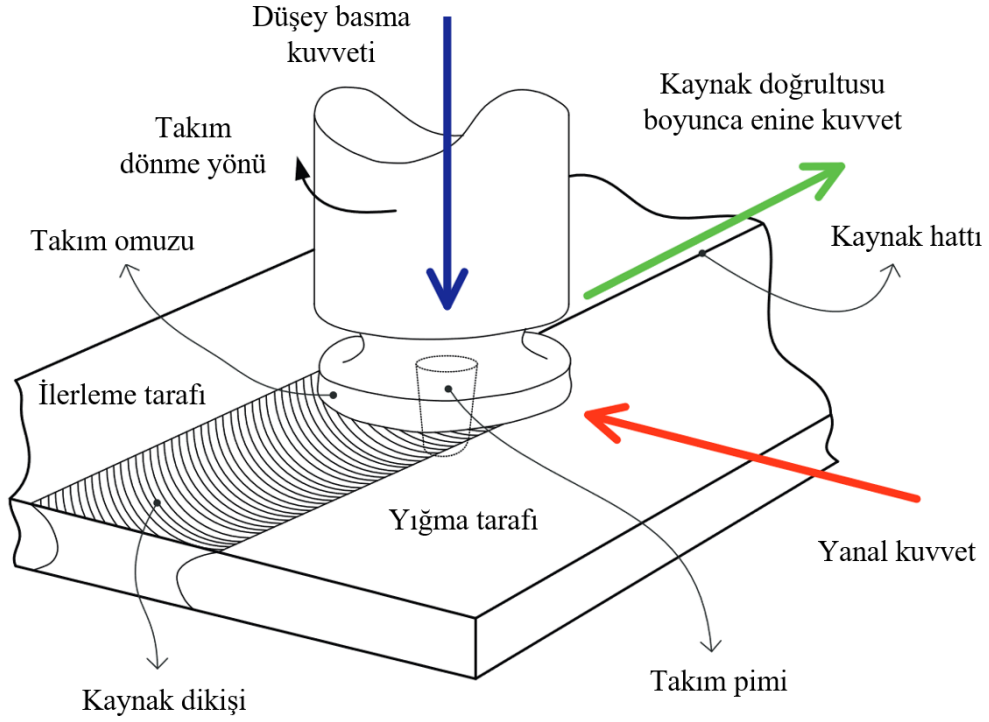
Ayrıca, gerilme konsantrasyonun yanında malzemelerin yorulma dayanımlarını değiştirme eğiliminde olan korozyon, sıcaklık, aşırı yük, metalürjik yapı, artık gerilme ve birleşik gerilmeler gibi bir dizi başka değişken vardır (Mirza ve Chen 2013).

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

4.1 Klasik Sürtünme Karıştırma Kaynağı

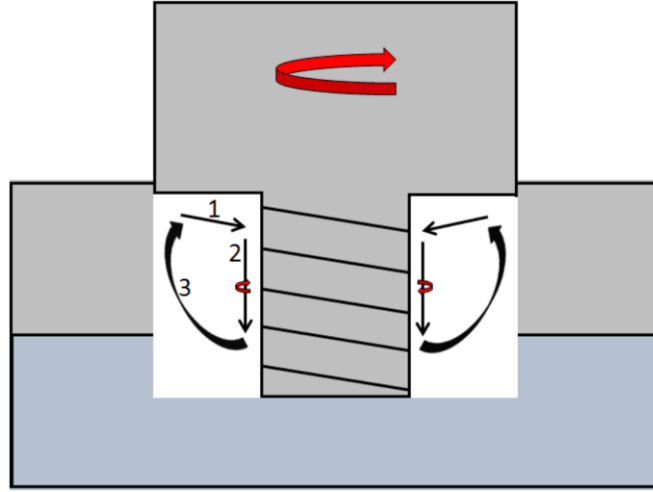
Katı hal kaynak tekniği olan SKK işlemi sıcaklık, mekanik, metalürji ve etkileşimlerin dikkate alınmasını içerir (Meng ve diğ. 2021), enerji verimliliği, çevre dostu olma ve dikiş kalitesi açısından devrim niteliğinde bir kaynak tekniğidir. SKK işleminin avantajları arasında magnezyum alaşımları ve diğer hafif metallerin birleştirilmesinde iyi mukavemet, tokluk ve kaynaklı parçalarda minimum çarpılma elde edilmesi yer alır (Mishra ve Ma 2005).

Klasik SKK işleminde, kendi eksenini etrafında dönen bir pim ve omuzdan oluşan yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilen bir takım kullanılır. Takım, kaynak yapılacak malzemelere dönerek girer ve kaynak yönü boyunca dönerek ilerler (Thomas 1991). Bu işlemde esas malzeme ergimez ve kaynak için gerekli ısı takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve esas malzemenin plastik deformasyonu ile sağlanır (Kumar ve Kumar 2021). Şekil 4.1 klasik bir SKK işlemini şematik olarak göstermektedir. İş parçasında takım dönüş yönünün kaynak yönü ile aynı olduğu tarafa ilerleme tarafı (İT), takım dönüş yönünün kaynak yönüne zıt olduğu tarafa ise yığıma tarafı (YT) denir. Takımın dönerek kaynak yönünde hareketi ile malzeme İT'den YT'ye hareket eder ve katı hal birleştirme meydana gelir (Wahid ve diğ. 2018). Bu kaynak yönteminde ergime olmaması, magnezyum alaşımlarının kaynağında sıklıkla karşılaşılan ergime ve katılaşma kaynaklı kusurları önler (Razal Rose ve diğ. 2011). SKK, magnezyum veya diğer hafif metallerin birleştirilmesinde birçok avantaja sahiptir. Bunlar Tablo 4.1'de listelenmiştir.



Şekil 4.1: Klasik SKK sürecinin şematik gösterimi (Mendes ve diğ. 2014).

SKK yüksek deformasyon oranlarında malzeme akışı içeren termo-mekanik bir işlemdir. SKK sırasında malzeme akışı kaynak parametrelerine, takım geometrisine, kaynak yapılacak malzemenin özelliklerine bağlı olarak çok karmaşık bir şekilde gerçekleşir. SKK sırasında meydana gelen malzeme akışı hakkında bilgi edinmek önemlidir. Şekil 4.2 SKK için kullanılan dişli bir pimin dönme eksenini etrafındaki metal akışını göstermektedir. Önce omuzun sürtünmesinden dolayı, omuzun altındaki metal pime doğru hareket eder (hareket 1) ve sonra malzeme pim yüzeyi boyunca aşağı doğru hareket eder (hareket 2). Metal pimin ucuna geldikten sonra Şekil 4.2’de oklarla gösterildiği gibi spiral bir yol izleyerek (hareket 3) geriye doğru hareket eder. Yukarıdaki üç hareketin tekrarı ile birleştirmede soğan halkaları yapısı oluşur (Li ve diğ. 2017).



Şekil 4.2: SKK sürecinde malzeme akışının şematik gösterimi (Li ve diğ. 2017).

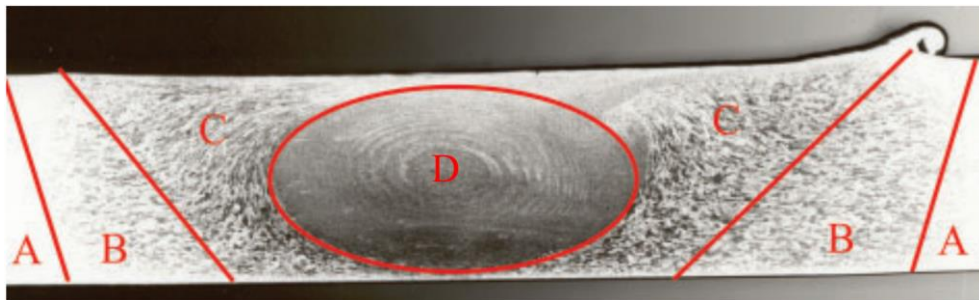
Tablo 4.1: Diğer kaynak işlemleri ile kıyaslandığında SKK'nın avantajları (Mishra ve Ma 2005).

	Konu	Avantajlar
1	Metalürjik	a) İnce mikro yapı oluşur b) Çatlaklar oluşmaz c) Katı hal sürecidir d) Alaşım elementi kaybı yoktur e) Düşük çekme ve dolayısıyla az çarpılma oluşur f) İyi bir boyutsal kararlılık vardır g) Birleştirme bölgesinde iyi metalürjik özellikler elde edilir
2	Çevresel	a) Taşlama artığı yoktur b) Koruyucu gaz gerektirmez c) Yüzey temizliği gerektirmez d) Yağ giderme için gerekli çözücü kullanılmaz e) Sarf malzeme tüketimi yoktur
3	Enerji	a) Hafif yapıların birleştirilmesiyle yakıt tüketiminde düşüş sağlanır b) Geliştirilmiş malzeme kullanımı ağırlıkta azalma sağlar (örneğin, farklı kalınlıktaki malzemeler birleştirilebilir) c) Çok az enerji gerektirir
4	Güvenlik	a) Kaynak arkı ve duman oluşmaz b) UV ışınları oluşmaz c) Kaynak metali sıçraması yoktur
5	Mekanik Özellikler	a) Kaynak metalinde iyi mukavemet ve tokluk elde edilir b) Birleştirme bölgesi yorulmaya karşı dayanıklıdır c) Kaynaklı parçalarda minimum çarpılma meydana gelir

Sürtünme karıştırma işlemi (SKİ) mikro yapıyı yerel olarak inceleyebilen, döküm hatalarını ortadan kaldıracak şekilde malzemelerin sünekliğini ve mukavemetini artırabilen (Dubey ve Deep 2018) SKK işleminden geliştirilmiş (Simar ve Avettand-Fènoël 2019) bir malzeme işleme yöntemidir (Patel ve Vora 2019, Qin ve diğ. 2020). Ayrıca magnezyum alaşımlarının işleme özelliklerini de değiştirir (Surya Kiran ve diğ. 2017). Geleneksel olarak, magnezyum alaşımlarının yüzey özellikleri eriyik bazlı yöntemlerle iyileştirilir. Ancak bu yöntemler kusurlara ve zararlı faz oluşumuna yol açabilir. SKİ bu sorunların üstesinden gelme potansiyeline sahiptir (Vigneshkumar ve diğ. 2018). Ayrıca SKİ, hacim hatalarını gidermek için kullanılabilir (Huang ve diğ. 2018a). Kullanım amacı farklı da olsa işlem parametreleri ve ortaya çıkan yapı SKK ile benzer olduğu için bu çalışmada SKİ ile yapılan çalışmalara da atıfta bulunmaktadır.

4.1.1 Klasik Sürtünme Karıştırma Kaynağında Mikro Yapı

Kaynak parametreleri kaynak bölgesi mikro yapısını belirler (Türkan ve Karakaş 2017b, Türkan ve Karakaş 2019). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, SKK işleminin esas malzemenin (EM) mikro yapısını değiştirdiği görülmektedir. Kaynak bölgesinde ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), termo-mekanik etkilenen bölge (TMEB) ve karıştırma bölgesi (KB) oluşur (Şekil 4.3) (Cao ve Jahazi 2007, Chowdhury ve diğ. 2013, Jayaraj ve diğ. 2017, Muruganandam ve diğ. 2015, Singh ve diğ. 2018b, Xunhong ve Kuaishe 2006, Yang ve diğ. 2019). Tane büyüklüğü, dislokasyon yoğunluğu, artık gerilmeler, çökelti dağılımı ve çökelti boyutu her bölgede farklıdır. Bu bölgelerdeki bu mikro yapısal farklılıklar, birleştirmenin kaynak sonrası özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Park 2003, Singh ve diğ. 2018b).



Şekil 4.3: SKK işleminde mikro yapısal bölge sınıflandırması (A: EM, B: ITAB, C: TMEB, D: KB) (Threadgill ve diğ. 2009).

EM:

Mekanik ve mikro yapı özellikleri açısından ısıdan etkilenmeyen ve deforme olmayan kısım EM olarak adlandırılır.

ITAB:

Kaynak bölgesindeki sürtünme ve yoğun plastik deformasyondan kaynaklanan ısı nedeniyle termal olarak etkilenen bölgeye ITAB denir. ITAB’da plastik deformasyon meydana gelmez (Singh ve diğ. 2018b, Wahid ve diğ. 2018).

TMEB:

TMEB, SKK işleminden hem ısıl hem de mekanik olarak etkilenir. TMEB’de sıcaklık ve deformasyon KB’den daha azdır ve bu nedenle işlemin bu bölgedeki mikro yapısal özellikler üzerindeki etkisi KB’den daha azdır. Uzatma ikizlenmesi ve dinamik yeniden kristalleşme, TMEB’nin mikro yapısı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Shang ve diğ. 2017).

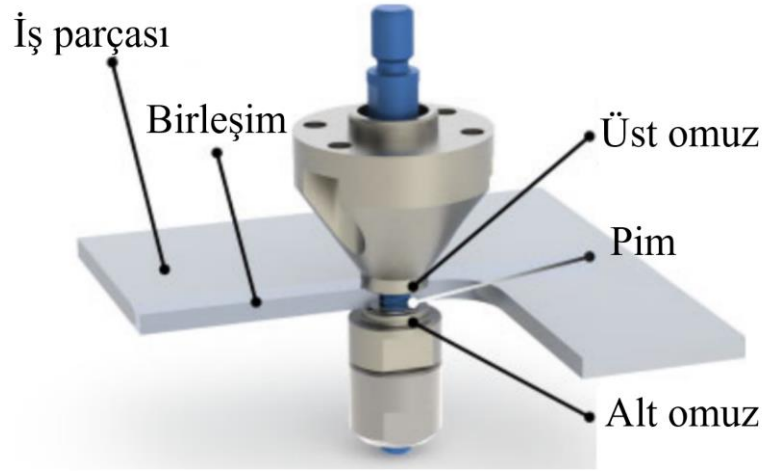
KB:

SKK sırasında, KB’deki sıcaklık, kaynak yapılacak malzemenin ergime noktasının 0.6 ila 0.9 katına ulaşır. Alışımardaki çökelti, bu yüksek sıcaklık nedeniyle alaşım tipine bağlı olarak irileşebilir veya matris içinde çözünebilir (Asadi ve diğ. 2012). SKK sırasında, plastik deformasyon ve sürtünmeden kaynaklanan ısı, KB’de ince taneli, yeniden kristalize mikro yapının oluşmasına neden olur (Aydin ve Bulut 2010, Chaudhary ve diğ. 2018, Jaiganesh ve Sevel 2015, Kashaev ve diğ. 2018, Lee ve diğ. 2003, Masoudian ve diğ. 2014, Mishra ve Ma 2005, Prasanna ve diğ. 2017).

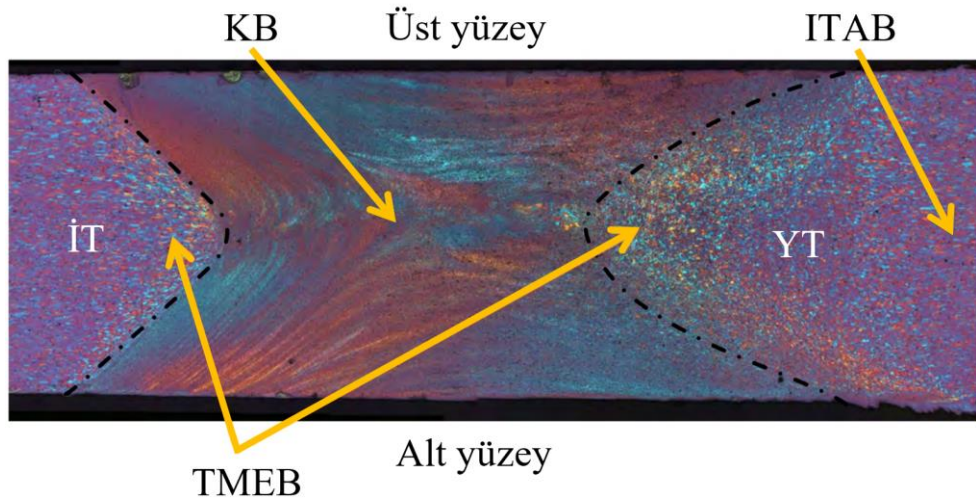
4.2 Bobin Takımla Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Bobin takımla sürtünme karıştırma kaynağı (BT-SKK) veya başka bir deyişle kendinden tepkimeli SKK, biri iş parçasının üstünde ve diğeri altında olmak üzere iki omuzlu bir bobin takım kullanılan bir SKK türüdür. İş parçasının tüm kalınlığı boyunca geçen bir pim iki omuzu birbirine bağlar. Alt omuz, ayrı bir taban plakası

ihtiyacını ortadan kaldırır ve üst omuzun aksenal kuvvetine tepki verir, böylece tepki veren kuvvetler takımın içinde tutulur. Şekil 4.4 BT-SKK sürecini şematik olarak göstermektedir. Şekil 4.5'te BT-SKK ile yapılan birleştirmede elde edilen mikro yapı gösterilmektedir.



Şekil 4.4: BT-SKK sürecinin şematik gösterimi (Hilgert ve diğ. 2012).



Şekil 4.5: BT-SKK işleminde oluşan mikro yapı (Hilgert 2012).

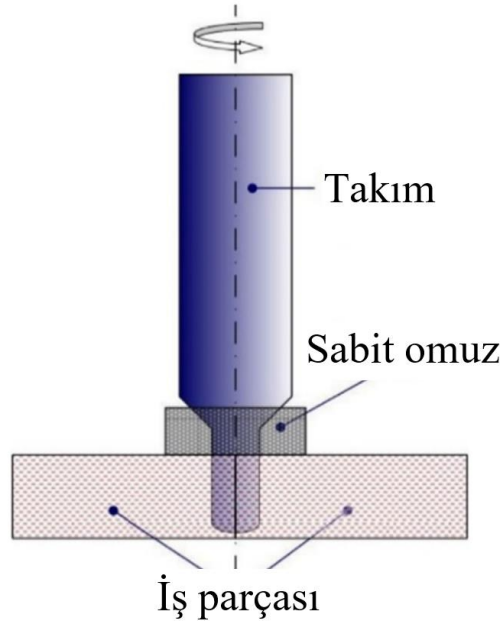
SKK esnasında ısı girdisinin büyük bir kısmı takım omuzu tarafından sağlanır. BT-SKK işleminde iki omuzun kullanılması ısı girdisini klasik SKK ile yapılmış birleştirmelere göre artırmaktadır. Li ve diğ. (2014) AZ31 alaşımıyla yaptıkları çalışmada BT-SKK birleştirmelerinin çekme özelliklerinin, iki omuz tarafından uygulanan daha fazla ısı girdisi nedeniyle klasik SKK birleştirmelerinden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Benzer durumu Lafly ve diğ. (2006) alüminyum alaşımı için

rapor etmiştir. Dolayısıyla bu yöntemim magnezyum alaşımlarında kullanımında ısı girdisinin kontrol edilmesi çok önemlidir.

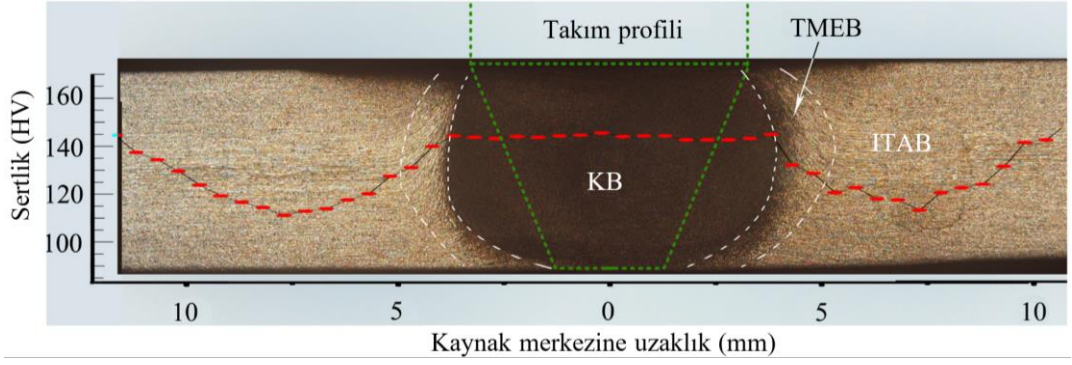
BT-SKK ile yapılan çalışmalar incelendiğinde haddelenmiş AZ31B-O ile %74 (Li ve diğ. 2014), sıcak haddelenmiş ZK60 ile %84.4 (Li ve diğ. 2020) dövme AZ61B ile %79.8 (Zhou ve diğ. 2018), ekstrüde AMX602 ile %87 (Chen ve diğ. 2017) çekme dayanımına göre maksimum birleştirme verimliliği elde edildiği görülmektedir.

4.3 Sabit Omuzla Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sabit omuzla sürtünme karıştırma kaynağı (SO-SKK), yeni bir SKK teknolojisidir. SO-SKK, belirli bir sabit omuz şekli kullanarak, herhangi bir açıda kaynak yapımına izin verir (örneğin T-tipi kaynak gibi). SO-SKK takımının yapısında omuz pimden ayrılmıştır. Kaynak yaparken, pim tek başına döner ve omuz, malzemenin yüzeyinde nispeten kayar. Klasik SKK yöntemiyle karşılaştırıldığında, SO-SKK kaynak sırasında ısı girdisini azaltabilir ve kalınlık yönünde düzgün bir ısı dağılımını elde edilmesine neden olur, böylece birleştirmenin yüzey kalitesini iyileştirebilir. Şekil 4.6 SO-SKK sürecini şematik olarak göstermektedir. Şekil 4.7’de SO-SKK ile yapılan birleştirmede elde edilen mikro yapı ve sertlik dağılımını göstermektedir.



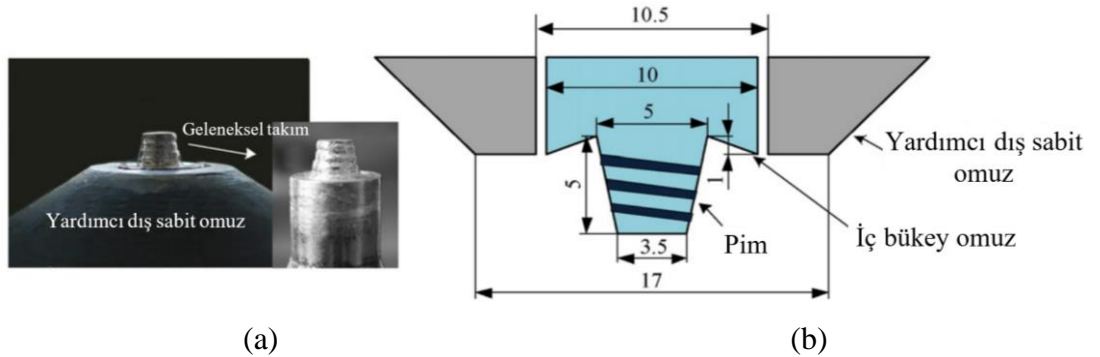
Şekil 4.6: SO-SKK sürecinin şematik gösterimi (Wei ve Martin 2014).



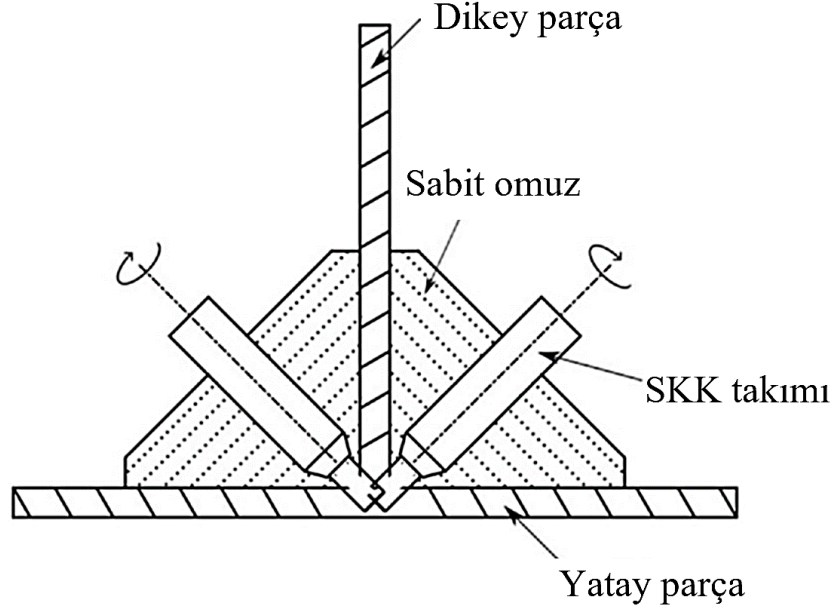
Şekil 4.7: SO-SKK işleminde oluşan mikro yapı ve sertlik dağılımı (Li ve diğ. 2015a).

Li ve diğ. (2019) SO-SKK yöntemini kullanarak AZ31B alaşımı ile yaptıkları çalışmada maksimum çekme mukavemetine göre %97'lik bir birleştirme verimliliği elde etmişlerdir. SO-SKK yüzey bitirme için son işlem ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. AZ31 için yüzeyde az miktarda çapak oluşumuna yol açarak pürüzsüz bir yüzey elde edildiği rapor edilmiştir (Patel ve diğ. 2019b). Bu yöntem düşük ısı girdisi ve kalınlık boyunca homojen sıcaklık dağılımı gibi doğal özelliklere sahip bir SKK çeşidi olarak düşünülebilir. SO-SKK omuzun durağan hareketinden dolayı, homojen tane inceltmesi ve sonuç olarak kalınlık boyunca homojen geliştirilmiş mekanik özelliklere neden olur (Patel ve diğ. 2019c).

Uygulamada kullanılan bir sabit omuzlu takım Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Ayrıca sabit bir omuz sayesinde SO-SKK köşe kaynağı veya T-birleştirme konfigürasyonları söz konusu olduğunda üstün bir avantaja sahiptir. Döner olmayan omuz, plakalar arasındaki iç köşeye dayalı olarak istenen şekle göre tasarlanabilir (Sejani ve diğ. 2021) (Şekil 4.9).



Şekil 4.8: Yardımcı dış sabit omuz sistemi a) Fotoğrafı, b) Ölçüleri (Ji ve diğ. 2016).



Şekil 4.9: SO-SKK ile köşe kaynağının yapılması (Sun ve diğ. 2019).

4.4 Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Doldurmalı sürtünme karıştırma kaynağı (D-SKK), kaynak sonrası anahtar deliğini ortadan kaldırmak için geliştirilmiş yeni bir SKK teknolojisidir. Bu yöntemde SKK için tasarlanan takımda omuz ve pim birbirinden ayrılmıştır. Örneğin takım omuzu alaşımlı çelikten ve takım pimi bir yarı sarf malzeme olarak birleştirme ucundan imal edilir. Kaynak bitişindeki anahtar deliğini kapatmak için yarı sarf malzeme olan birleştirme ucu kullanılır. Şekil 4.10 D-SKK işleminde kullanılan bir takımını gösterilmektedir.



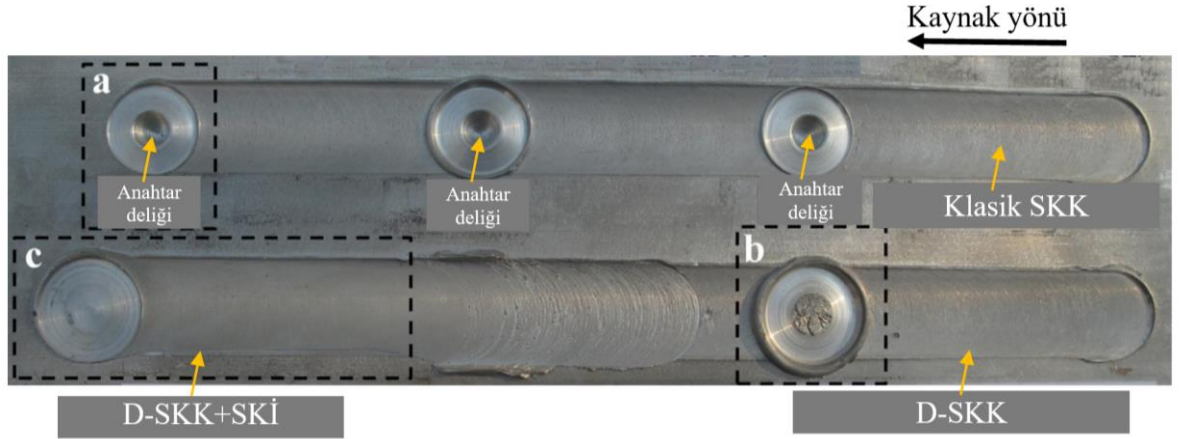
(a)

(b)

(c)

Şekil 4.10: D-SKK işleminde kullanılan bir takımın fotoğrafı a) Çelik omuz, b) Alüminyum alaşımı birleştirme ucu, c) Birleştirilmiş takım (Huang ve diğ. 2011).

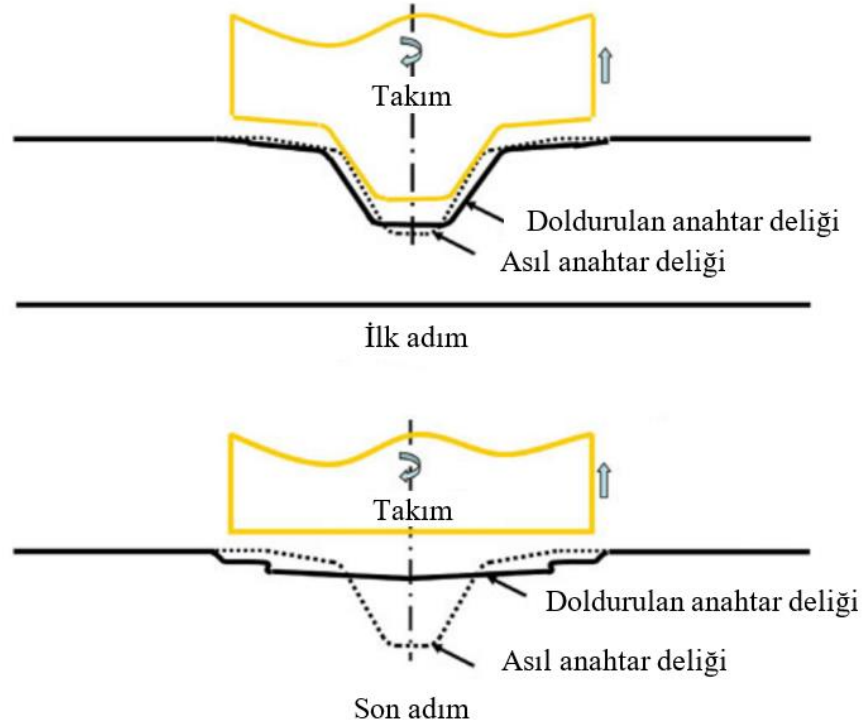
Şekil 4.11’de klasik SKK işleminden sonra kaynak bitişinde meydana gelen anahtar delikleri açıkça görülmektedir. D-SKK yöntemiyle kaynak bitişindeki bu anahtar delikleri sarf malzeme olarak birleştirme ucu kullanılarak kapatılabilmektedir. Ayrıca D-SKK sonrasında yapılan SKİ ile yapının yüzey ve mekanik özellikleri daha da geliştirebilir.



Şekil 4.11: SKK ve D-SKK'lı plaka a) SKK anahtar deliği kusurları, b) D-SKK ile onarılan anahtar deliği, c) D-SKK+SKİ'den sonra onarılan anahtar deliği (Han ve diğ. 2013).

4.5 Kendinden Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Kaynağı

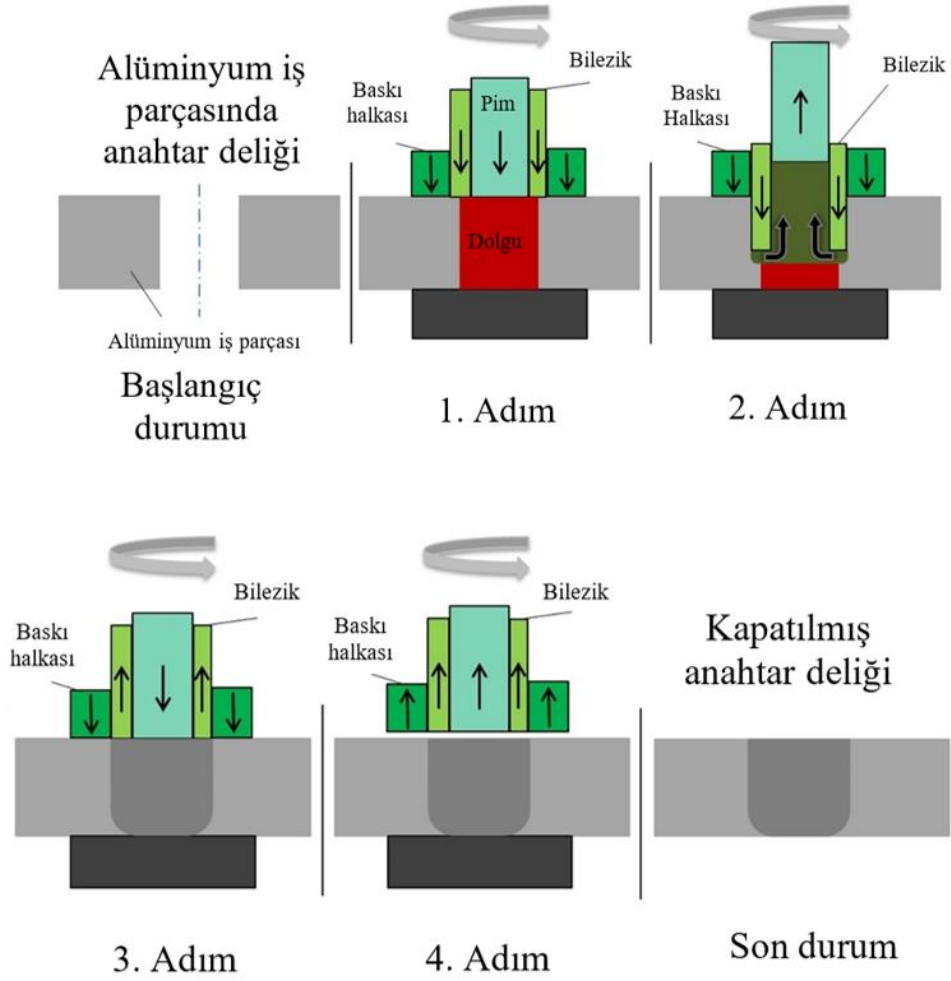
Kendinden doldurmalı sürtünme karıştırma kaynağı (KD-SKK) için pimi geri çekilebilen bir takım kullanılmaktadır. Geri çekilen pim kullanılarak yapılan SKK, kaynak sonrası anahtar deliğini ortadan kaldırmak için geliştirilmiş yeni bir tür SKK teknolojisidir. Bu yöntemde takım omuzu ve pim birbirinden ayrılmıştır. Pimin yukarı ve aşağı hareketi tahrik makinesi tarafından ayarlanabilir, böylece kaynak anahtar deliğini doldurmak ve ortadan kaldırmak için kaynak tamamlanmadan önce pim kademeli olarak omuza çekilir bu şekilde anahtar deliği oluşmaz (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: KD-SKK sürecinin şematik gösterimi (Zhou ve diğ. 2012).

4.6 Tekrar Doldurmalı Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

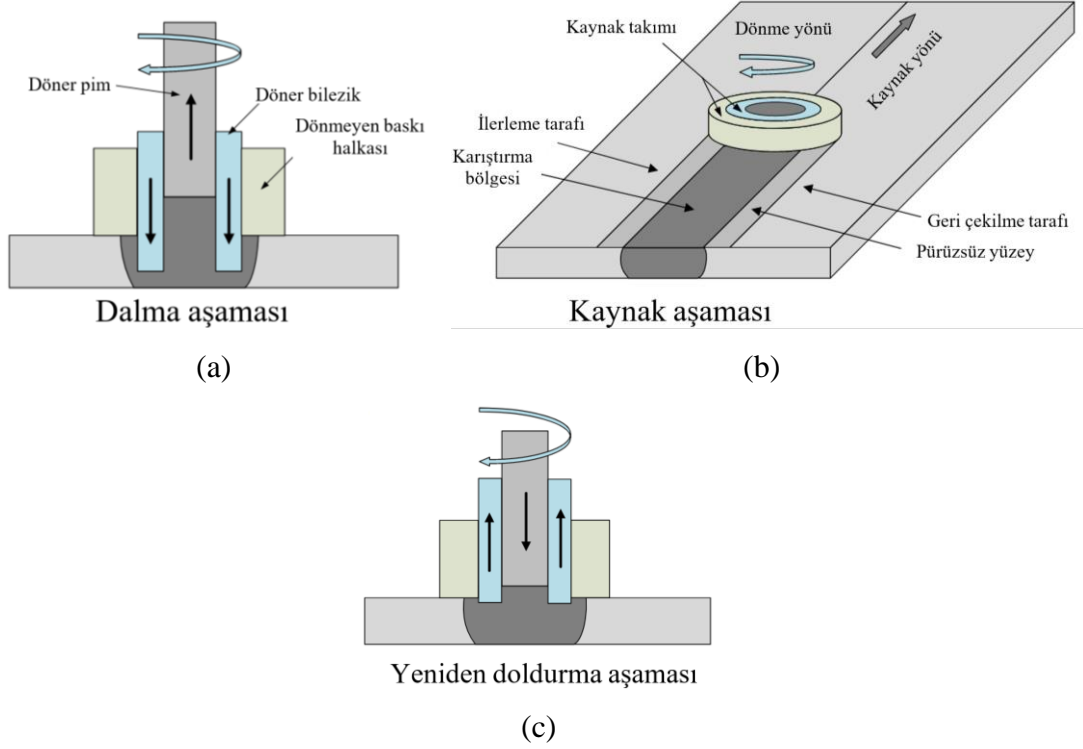
Tekrar doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağında (TD-SKNK) baskı halkası, bilezik ve pimden oluşan üç parçalı bir takım kullanılmaktadır. Doğrudan bağlantılarından kaçınmak için bu üç parçanın montajı yapılırken boşluklu geçme kullanılır. Baskı halkası kaynak sırasında dönmemektedir. Baskı halkasının ana görevi, levhaları sıkıca tutmak ve plastikleştirilmiş malzemelerin kaynak bölgesinden kaçmasını önlemektir. Malzemeleri karıştıran ana bileşenler pim ve bileziktir. Bu nedenle hem pim hem de bilezik dış yüzeylerine diş açılmıştır. TD-SKNK süreci temel olarak dört adımda gerçekleşir. Bu adımlar Şekil 4.13'te gösterilmektedir. İlk adımda, dönen takım parçalarının ön yüzeyleri plakanın yüzeyine temas ederek sürtünme kaynaklı ısıyı ortaya çıkarır. İkinci adımda, bilezik aşağı doğru dalar ve geri çekilen pimin altındaki boşluğa malzeme akar. Üçüncü adımda, pim aşağı doğru hareket eder ve bilezik geri çekilerek yumuşatılmış malzemeleri kaynağa geri iter. Son adımda takım, dolguyu ve çevresindeki iş parçalarını birleştirilmiş halde bırakarak iş parçalarından geri çekilir (Meng ve diğ. 2021).



Şekil 4.13: TD-SKNK kullanarak anahtar deliği kapatma işleminin şematik gösterimi (Reimann ve diğ. 2016).

Gong ve diğ. (2022) tek seferlik bir işlemle çapak ve omuz izini önleyen ve anahtar deliği olmayan yeni bir SKK teknolojisi önermişlerdir. Bu işlem, Şekil 4.14'te gösterildiği gibi dalma, kaynaklama ve yeniden doldurma aşamalarını içeren üç aşamaya ayrılabilir. Dalma aşamasında, döner bilezik levhanın içine doğru hareket eder ve döner pim yukarı doğru hareket eder. Bu şekilde döner bilezik tarafından ekstrüde edilen plastikleştirilmiş malzemeyi barındırabilecek boşluk oluşturulmuş olur. Kaynak aşamasında ise pim ile bilezik arasındaki konum değişmeden kalır ve takım sistemi kaynak boyunca hareket eder. Plastikleştirilmiş malzemeler, kaynak sırasında akışa bilezik tarafından sürülür. Yeniden doldurma aşamasında ise döner dış bilezik yukarı hareket eder ve döner pim, boşlukta toplanan plastikleştirilmiş malzemeleri kullanarak anahtar deliğini yeniden doldurmak için aşağı doğru hareket eder. Kaynak takımı kaynaklı birleştirmeden çekilmeden önce bilezik ve pim alın birleştirmesinin üst yüzeyinde birkaç saniye döner. Sonuç olarak, iyi bir birleştirme

elde edilir. Kaynak sırasında malzeme akışını kolaylaştırmak için dişler her zaman bileziğin dış yüzeyinde tasarlanır ve dönüş yönü diş şekline göre seçilmelidir (Gong ve diğ. 2022).



Şekil 4.14: Gong ve diğ. (2022) tarafından önerilen SKK a) Dalma aşaması, b) Kaynak aşaması, c) Yeniden doldurma aşaması.

5. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ SAYISAL MODELLENMESİ

SKK işleminin sayısal modelleme ile analizi, işlem sırasında oluşabilecek hataları tahmin etmek ve deney sayısını zaman ve maliyet açısından optimize etmek için etkili bir yöntemdir. Ayrıca SKK işleminin sayısal modellenmesi, işlem sırasında meydana gelen karmaşık malzeme davranışının ayrıntılı olarak incelenmesine olanak sağlaması açısından da önemlidir (Türkan ve Karakaş 2022). SKK işlemi, yüksek derecede malzeme deformasyonu ve ısı akışı içeren çok fazla değişkene sahip bir konudur.

SKK termomekanik bir işlemdir ve termomekanik bir işlemin denklemleri geleneksel olarak iki farklı formülasyon ile ifade edilebilir. Bunlar Lagrange ve Euler formülasyonlarıdır. Lagrange formülasyonunda ağ malzeme noktalarındadır. Euler formülasyonunda ise ağ konumsal noktalardadır. Lagrange formülasyonunda ağ malzeme akışı sırasında hareket eder ve malzeme noktalarını takip eder. Euler formülasyonunda ise ağ sabittir (Turkan ve Karakas 2021). SKK işleminin sayısal modellenmesi bu iki geleneksel yöntemin özelliklerinden ayrı ayrı veya birlikte faydalanılarak yapılabilir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SKK işleminin sayısal modellenmesinde CFD (Computational Fluid Dynamics - Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği), ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian - Keyfi Lagrange Euler) formülasyonu, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics - Pürüzsüz Parçacık Hidrodinamiği) yöntemi ve CEL (Coupled Eulerian Lagrangian – Birleştirilmiş Euler Lagrange) formülasyonunun yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

5.1 CFD Yöntemi

SKK işlemini sayısal olarak analiz etmek için CFD yöntemi kullanılabilir (Al-Badour ve diğ. 2013). CFD yönteminde Euler ağ kullanılır. Bu yöntemde malzeme ve ağ birbirinden bağımsız olduğu için ağ bozulma sorunu meydana gelmez.

SKK işleminin CFD yöntemi ile analizi sürtünme kaynaklı ısı üretimi, sıcaklık dağılımı ve malzeme akışı hakkında detaylı bilgilerin elde edilmesini sağlar (Memon ve diğ. 2021a). Bununla birlikte CFD yöntemi, malzeme sınırı hakkında bilgi edinme ve doğru bir şekilde malzeme sınırını tanımlama konusunda zorluklar içerir. Bu tekniğin diğer bir zorluğu, malzemenin elastik özelliklerini ve malzeme sertleşme davranışını hesaba katmanın bu yöntemde imkânsız olmasıdır. SKK işlemi CFD yöntemi ile analiz edildiğinde, kaynak yapılacak iş parçası sadece rijit visko-plastik malzeme olarak basitleştirilebilir. Ayrıca, takım ve iş parçası arasındaki etkileşimde kesin yapışma koşullarının gerçekleştiği varsayımı, takım reaksiyon kuvvetlerinde ve kaynak bölgesi sıcaklığında önemli bir simülasyon hatasına yol açabilir (Türkan ve Karakaş 2022).

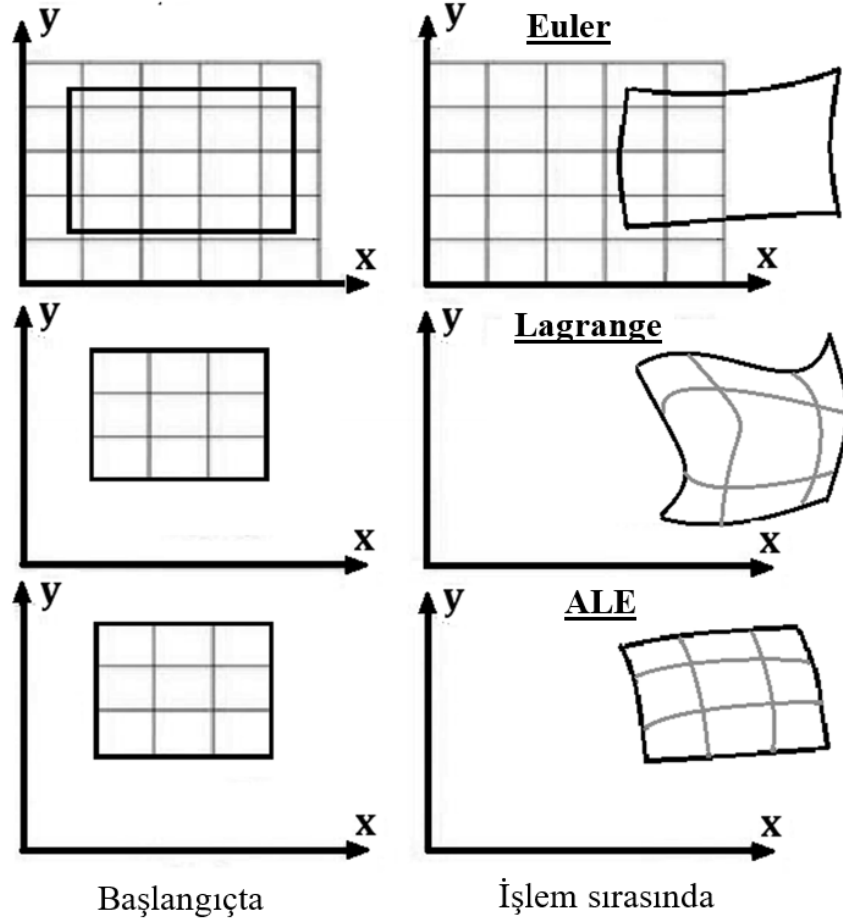
5.2 ALE Formülasyonu

Malzemenin sınırları boyunca hareket edebildiği ve ayrıca eleman şekli ve boyutunun işlem sırasında meydana gelen deformasyonlara göre optimize edilebileceği bir yöntem olan ALE formülasyonunda takım ve iş parçası arasındaki etkileşimi tanımlamak için kayan sınır koşulları uygulanabilir. ALE formülasyonu malzemenin sertleşme davranışını, malzemenin deformasyon hızına bağımlılığını ve malzeme sıcaklığını aynı anda hesaba katabilir.

ALE formülasyonunda Lagrange cisimleri kullanılır ve ALE formülasyonunda kullanılan Lagrange cisimleri, deformasyon sırasında boşluklar oluştuğunda çalışamaz ve sürekliliği sağlamak için tamamen malzeme ile doldurulmaları gerekir. Bu nedenle, SKK gibi aşırı deformasyon içeren işlemlerin modellenmesinde ALE formülasyonu kullanıldığında ciddi ağ bozulması problemleri ile karşılaşılabilir (Turkan ve Karakas 2021, Zhu ve diğ. 2017). Fakat buna rağmen Guerdoux ve Fourment (2007), ALE formülasyonu ile SKK işleminde kusur oluşumunu tahmin edebilmiştir.

Şekil 5.1'de Euler, Lagrange ve ALE ağ teknikleri uygulandığında işlem sırasındaki bu ağların davranışları gösterilmektedir. Euler ağda deformasyonda malzeme ve ağ birbirinden bağımsız olarak hareket eder. Lagrange ağda, ağ, malzeme akışı sırasında hareket eder ve malzeme noktalarını takip eder. Dolayısıyla saf Lagrange cisimleri, deformasyon sırasında boşluklar oluştuğunda çalışamaz ve

sürekliği sağlamak için tamamen malzeme ile doldurulmaları gerekir. Bu nedenle yoğun deformasyona maruz kalacak Lagrange cisimlerde yaygın olarak ALE formülasyonu kullanılır.



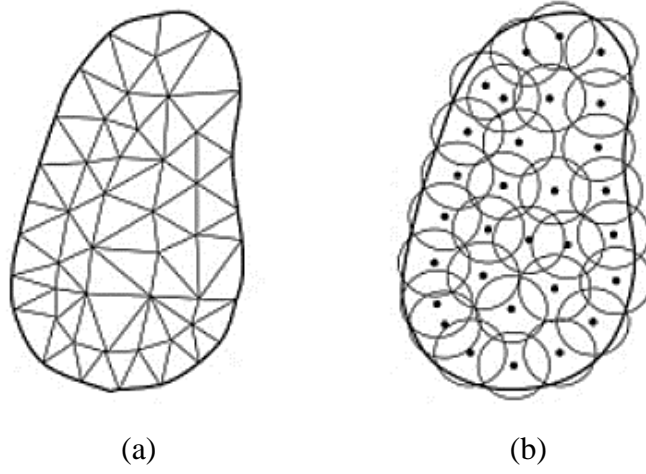
Şekil 5.1: Euler, Lagrange ve ALE formülasyonunun ağ-malzeme hareketine göre karşılaştırılması (Soliman ve diğ. 2020).

5.3 SPH Yöntemi

Serbest bir ağ modelleme tekniği olan SPH yöntemi, SKK sürecini modellemek için kullanılabilir (Meyghani ve diğ. 2020). Bu yaklaşım serbest ağ modelleme özelliği sayesinde Lagrange yapısından formüle edilebilir (Bagheri ve diğ. 2020). SPH yöntemi karmaşık takip şemaları kullanmadan arayüzlerin dinamiklerini, büyük malzeme deformasyonlarını, boşluk oluşumlarını ve malzemenin şekil değiştirme ve sıcaklık geçişini analiz edebilir (Tartakovsky ve diğ. 2006). Bu tekniğin temel avantajı, diğer sayısal yöntemlerle elde edilmesi çok zor veya imkânsız

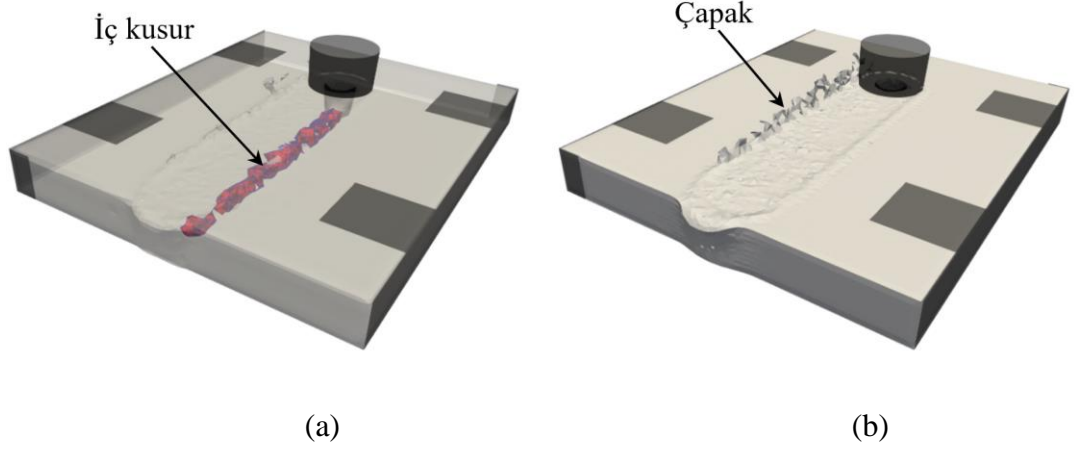
olan malzemenin takım etrafında karıştırılmasının sonlu elemanlar yöntemi ile detaylı analiz edebilmesidir. Bu yöntemde parçacıkların geçmişi mevcuttur ayrıca artık gerilmeler elde edilebilir (Timesli ve diğ. 2011).

Geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında birincil fark, bir ağ ızgarasının olmamasıdır (Şekil 5.2). Böylece parçacıklar, üzerinde yönetim denklemlerinin çözüldüğü hesaplama çerçevesi olur. SPH yöntemi, malzemenin belirli bir kütle ile ilişkili düğümlere konumsal ayrıklaştırılmasını kullanır. Bu kütle, malzemenin bilinen bir yoğunluğu ve hacmi için kolaylıkla hesaplanabilir.



Şekil 5.2: Ağ ızgarasının karşılaştırılması a) Geleneksel sonlu elemanlarda, b) SPH elemanında (Bhojwani 2007).

SPH yöntemi SKK işleminde kusur oluşumunu tahmin etmek içinde kullanılabilir (Fraser ve diğ. 2013). Fraser ve diğ. (2018) tarafından SPH tekniği kullanılarak yapılan bir çalışmada, grafik işlem birimi üzerindeki kod sayesinde SKK işlem süresi birkaç saate düşürülmüştür. Ayrıca bu çalışmada kusur oluşumu da tahmin edilmiştir. Bu çalışmada tahmin edilen iç ve dış kusurlar Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3: SPH yöntemiyle kusur oluşumu tahmini a) İç kusurlar, b) Çapak oluşumu.

5.4 CEL Formülasyonu

Noh (1963) tarafından önerilen CEL formülasyonu, kontrol hacmi boyunca hem Euler hem de Lagrange etki alanlarını kullanır. CEL formülasyonunda Lagrange ağı, Euler ağı ile temas halindedir. CEL formülasyonu, aşırı malzeme deformasyonu içeren işlemlerde kullanılabilir. CFD yönteminde sürtünmeyi ve Lagrange cisimlerinde büyük deformasyonu içeren modelleme zorluklarını ortadan kaldırır (Türkan ve Karakaş 2022).

Euler analizlerinde konumsal zaman türevleri kullanılarak denklemler yazılırken, katı ve yapısal analizler için Lagrange yaklaşımlarında malzeme zaman türevleri uygulanmaktadır. Malzeme zaman ve konumsal zaman türevleri arasındaki ilişki denklem 5.1 ile ifade edilir (Benson ve Okazawa 2004).

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla\phi) \quad (5.1)$$

Bu denklemde, ϕ keyfi çözüm değişkeni, \mathbf{v} malzeme hızı, $D\phi/Dt$ ve $\partial\phi/\partial t$ sırasıyla ϕ 'nin malzeme zaman ve konumsal zaman türevleridir.

Euler (konumsal türevler) korunum denklemlerine aktarılan Lagrange kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri denklem 5.2 ile 5.4 arasında gösterilmektedir (Benson ve Okazawa 2004).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \rho) + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{v}) = \frac{1}{\rho} (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}) + \mathbf{b} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla e) = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \quad (5.4)$$

Bu denklemlerde; ρ yoğunluk, $\boldsymbol{\sigma}$ Cauchy gerilmesi, \mathbf{b} gövde kuvvetlerinin vektörü, e şekil değiştirme enerjisi, \mathbf{D} şekil değiştirme hızıdır.

Bahsedilen Euler denklemleri denklem 5.5 ile 5.7 arasında gösterilen şekilde korunumlu yapılarda düzenlenebilir (Benson ve Okazawa 2004):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{v}) = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \quad (5.7)$$

Euler'i yöneten denklemler (denklem 5.5-5.7), ortak genel korunumlu yapıda denklem 5.8'de tanımlanabilir (Benson ve Okazawa 2004).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{S} \quad (5.8)$$

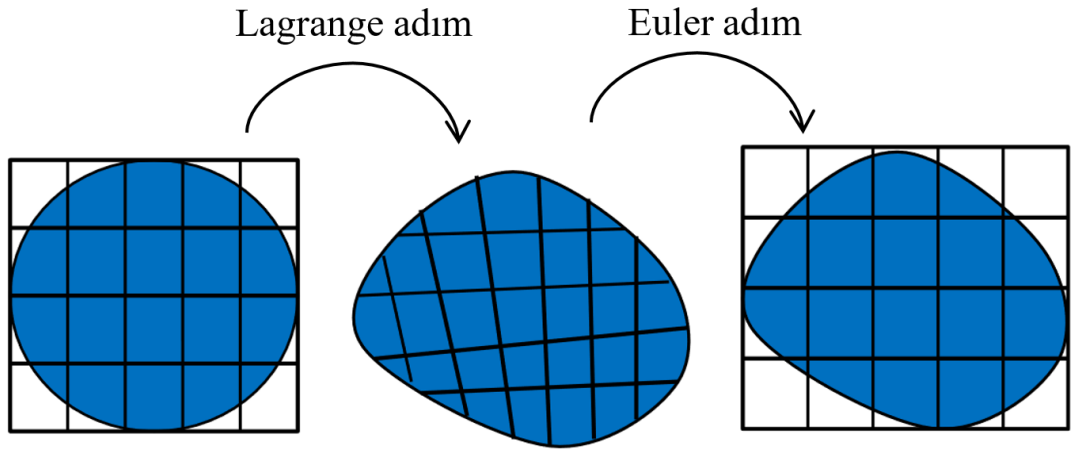
Bu denklemde; $\boldsymbol{\Phi}$ akış fonksiyonu, \mathbf{S} kaynak terimidir.

Operatör bölme işlemi, denklem 5.8'i ardışık olarak çözülen iki denkleme böler (denklem 5.9-5.10):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \mathbf{S} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{\Phi} = 0 \quad (5.10)$$

Denklem 5.9 kaynak terimi içerir ve Lagrange adımı temsil eder ve Denklem 5.10 konvektif terimi içerir ve Euler adımı temsil eder (Wójcik ve Skrzat 2021). Denklem 5.9 ile standart Lagrange yöneten denklemler arasındaki fark zaman türevinin türüdür. Bölme operatörünün grafiksel yorumu Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Denklem 5.10'u çözmek için, deforme olmuş Lagrange ağ, orijinal Euler sabit ağa taşınır ve bitişik elemanlar arasında taşınan malzemenin hacmi hesaplanır. Kütle, enerji, momentum, gerilme ve diğerleri gibi Lagrange çözüm değişkenleri, daha sonra, taşıma algoritmaları tarafından bitişik elemanlar arasındaki malzemenin akışını hesaba katacak şekilde ayarlanır.



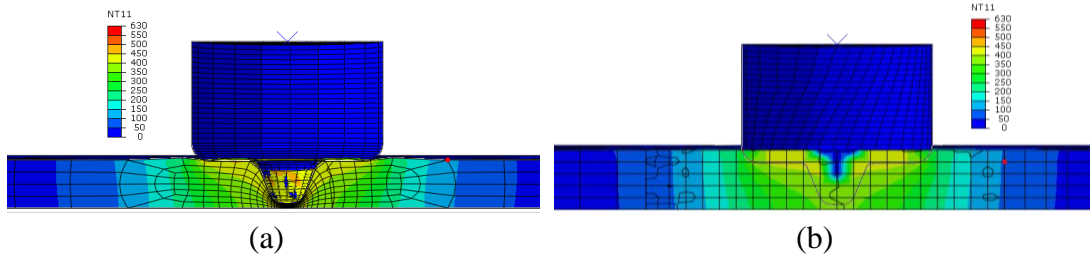
Şekil 5.4: CEL tekniğindeki bölme operatörünün şematik gösterimi (Akbari ve diğ. 2021).

CEL formülasyonu hem Euler hem de Lagrange ağlarının özelliklerine sahip olduğundan (Wang ve diğ. 2020), CEL formülasyonunun daha önce bahsedilen CFD ve ALE sayısal modellerine göre avantajları vardır. Belki de en önemlisi, SKK işlemi sırasında kusur oluşumunu açıkça tahmin etme yeteneğidir (Türkan ve Karakaş 2022).

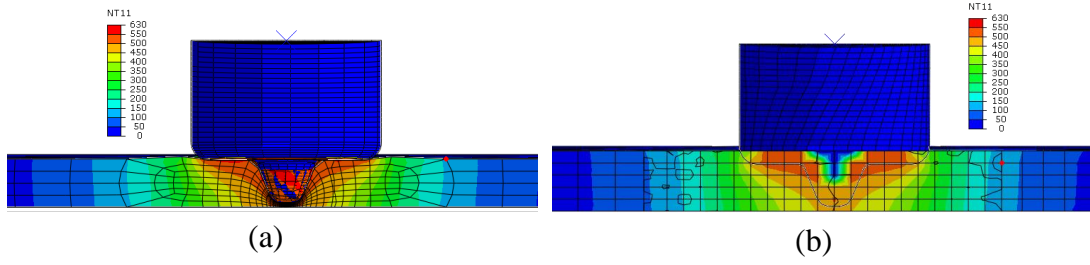
5.4.1 CEL ile ALE Formülasyonunun Karşılaştırılması

AZ31B magnezyum alaşımının SKK ile birleştirilmesindeki dalma aşamasını CEL ve ALE formülasyonlarını kullanarak modelleyen çalışmada her iki formülasyonda da kaynak bölgesinde çok benzer sıcaklık ve deformasyon dağılımları gözlemlendiği belirtilmiştir. Her iki modelde de takımın dönüş hızı arttığında kaynak bölgesindeki sıcaklık benzer şekilde artmıştır. Devir sayısına göre modellerdeki sıcaklık dağılımları Şekil 5.5 ile 5.10 arasında gösterilmektedir. CEL

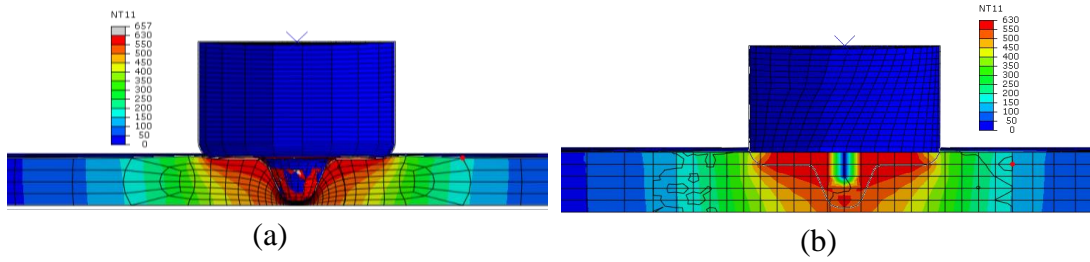
formülasyonunun kullanıldığı modelde ağ yoğunluğu ile ilgili herhangi bir problem gözlenmemesine rağmen ALE formülasyonunun kullanıldığı modelde, pimin dalma bölgesinde yüksek ağ yoğunluğu oluşturulmadığında ağ bozulmaları meydana geldiği belirtilmiştir. Bu nedenle ALE formülasyonunun kullanıldığı modelde takım dalma bölgesinde daha yüksek bir ağ yoğunluğu oluşturulmuştur (Turkan ve Karakas 2021). Ayrıca CEL formülasyonunun kullanıldığı modelde işlem süresinin daha düşük olduğu ve bu sürenin takım dönüş hızından bağımsız olduğu belirtilmiştir (Şekil 5.11).



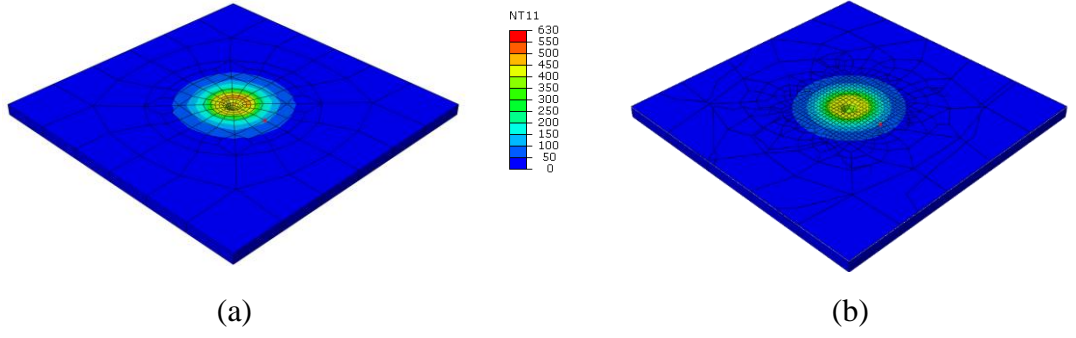
Şekil 5.5: 200 rpm’de kesitte işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL.



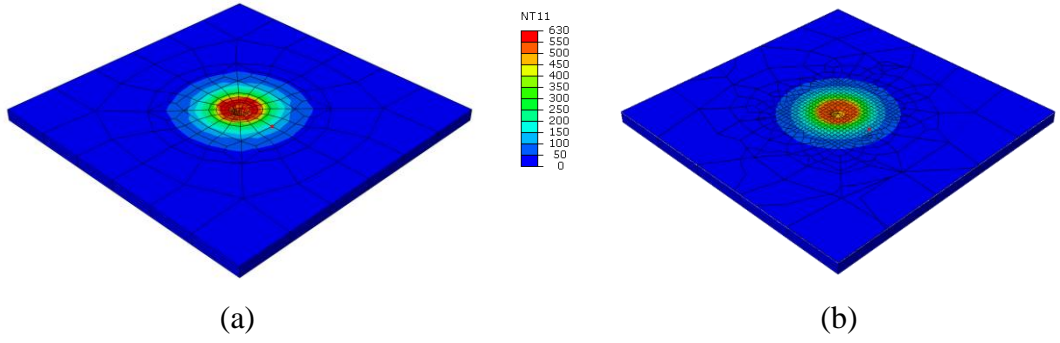
Şekil 5.6: 300 rpm’de kesitte işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL.



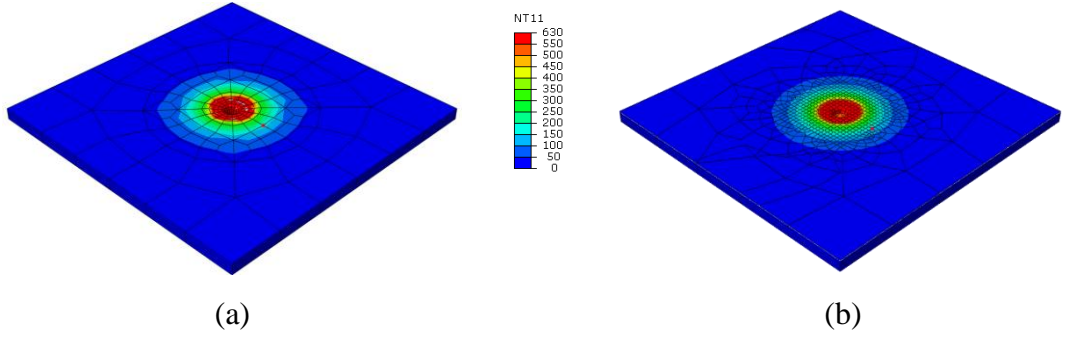
Şekil 5.7: 400 rpm’de kesitte işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL.



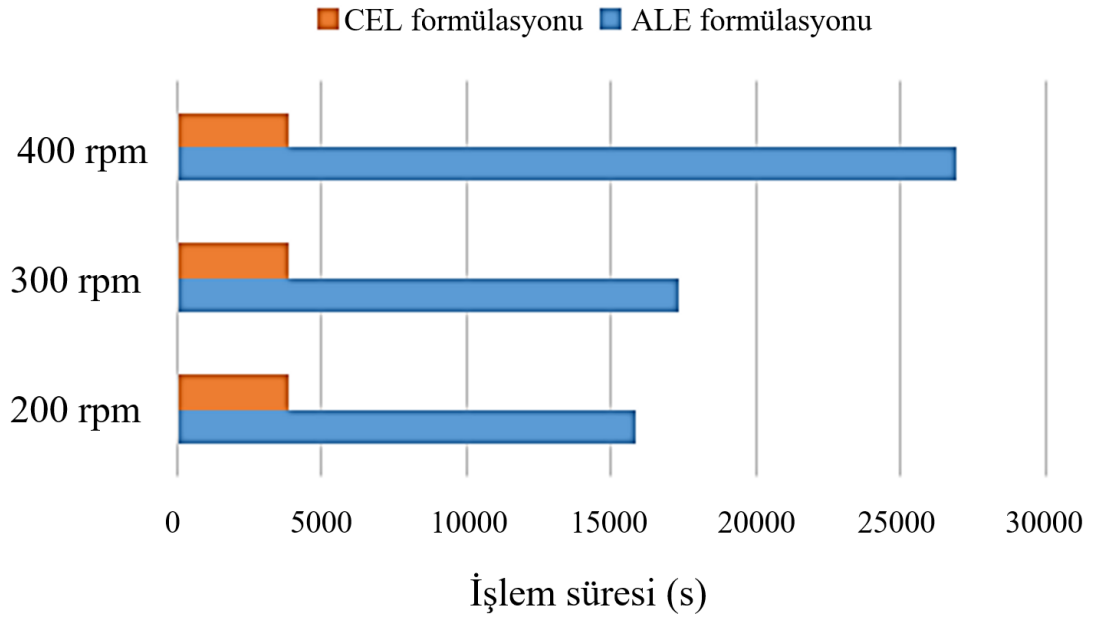
Şekil 5.8: 200 rpm’de üst yüzeyde işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL.



Şekil 5.9: 300 rpm’de üst yüzeyde işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL.



Şekil 5.10: 400 rpm’de üst yüzeyde işlem sonundaki sıcaklık dağılımları a) ALE, b) CEL.



Şekil 5.11: CEL ve ALE formülasyonlarında işlem sürelerinin karşılaştırılması.

6. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

6.1 Magnezyum Alaşımının Kaynağında Karşılaşılan Problemler

Magnezyum alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak teknikleri ile birleştirilmesinde genellikle kaynak metalinde gözenekler meydana gelir ve bu gözenekler birleştirmelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler (Cao ve diğ. 2006, Czerwinski 2011, Mirza ve Chen 2013, Padmanaban ve Balasubramanian 2010a, Padmanaban ve diğ. 2010, Templeman ve diğ. 2017). Bunun yanında, magnezyum alaşımlarının sahip olduğu yüksek genleşme katsayısı, kaynak yapılan parçanın büyük deformasyonuna-çarpılmasına neden olur (Asadi ve diğ. 2012). Magnezyum alaşımları çok çeşitli kaynak teknikleri ile birleştirilebilir, ancak geleneksel yöntemlerde geniş ısıdan etkilenen bölge, alaşım elementi kaybı, yüksek artık gerilmeler ve çatlaklar gibi çeşitli dezavantajlar sergilediği bildirilmiştir (Sun ve diğ. 2009, Ugender 2018, Luo ve diğ. 2011, Yang ve diğ. 2014).

Magnezyum alaşımlarının kaynağında kontrolsüz ergime ve katılaşma ayrıca yüksek ısı girişi problemlere neden olur. Bu nedenle düşük ısı girdisi ile ergimenin gerçekleşmediği termomekanik işlem olan SKK işlemi magnezyum alaşımlarının birleştirilmesinde güçlü bir alternatiftir.

Bu bölümde klasik SKK birleşiminin kalitesini belirleyen parametreler, literatürdeki magnezyum alaşımı kullanılarak yapılan çalışmalar incelenerek detaylı bir şekilde yorumlanmıştır.

6.2 Sürtünme Karıştırma Kaynak Kalitesini Belirleyen Faktörler

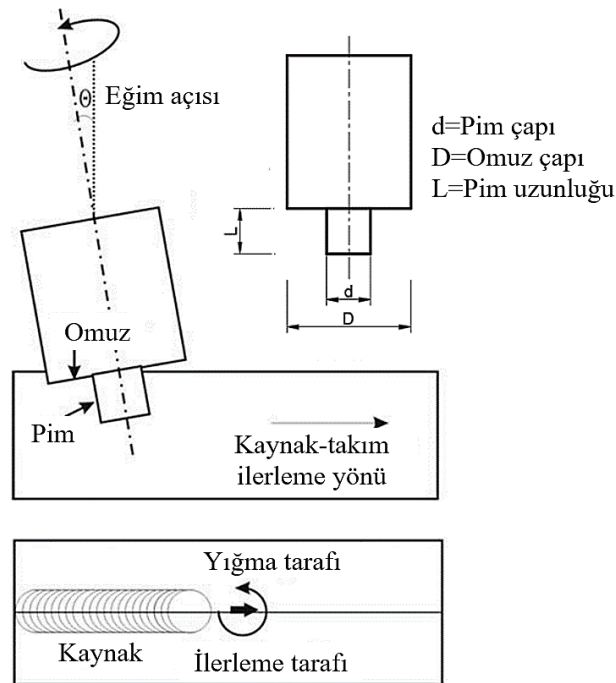
Magnezyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesinde karmaşık malzeme hareketi ve yoğun plastik deformasyon meydana gelir. Malzeme akışı ve sıcaklık dağılımı, takım geometrisine, kaynak parametrelerine ve birleştirme tasarımına oldukça bağlıdır. Bu faktörler, malzemenin kaynak sonrası mikro yapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini belirler (Mishra ve Ma 2005, Dobriyal ve diğ. 2008,

O. Cooke ve diğ. 2020). SKK ile birleştirmede ana süreç parametreleri aşağıda listelenmiştir.

- Takım geometrisi
 - Omuz geometrisi
 - Pim geometrisi
- Kaynak parametreleri
 - Takım dönüş hızı
 - Birleştirme hattı boyunca takım ilerleme hızı
 - İş parçası yüzeyine göre takım eğim açısı
 - Takım dalma derinliği
 - Eksenel kuvvet
- Birleştirme tasarımı

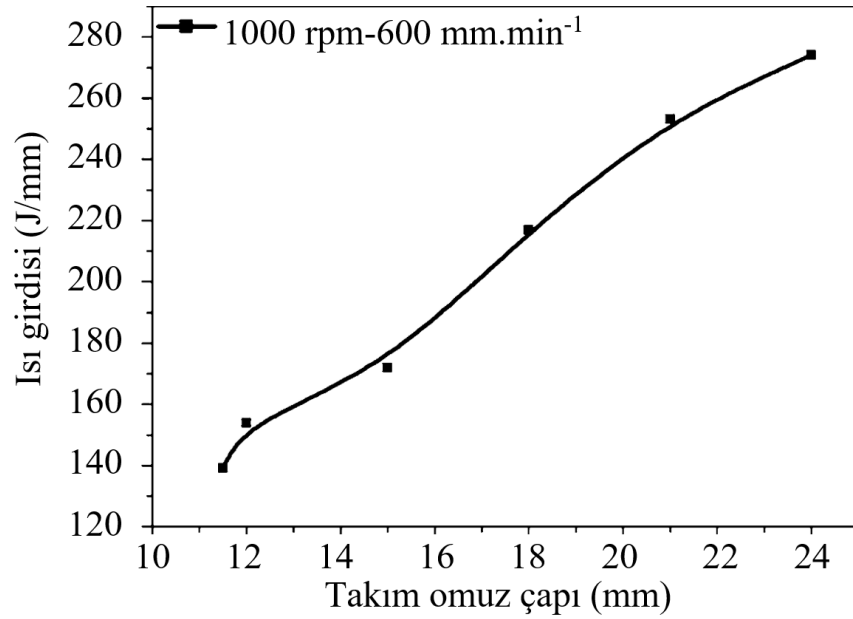
6.2.1 Takım Geometrisi

Temel bir SKK takımının Şekil 6.1’de gösterildiği gibi bir omuzu ve bir pimi vardır. SKK takımının temel boyutsal özellikleri pim ve omuz çapları, pim uzunluğu ve eğim açısıdır (Dabeer ve Shinde 2018).



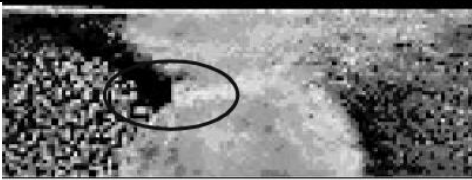


Şekil 6.1: Temel bir SKK takımının boyutsal özellikleri (Meshram ve diğ. 2016).

SKK işleminde takım geometrisi, malzeme akışını ve ısı girdisini kontrol eden ve dolayısıyla kaynak kalitesini belirleyen ana parametrelerden biridir (Kumar ve Kailas 2008). Takım omuzu, birleştirmenin üst kısmındaki malzeme akışını önemli ölçüde etkiler (Suhuddin ve diğ. 2009). Takım omuzu, iş parçası sıcaklığı üzerinde takım pimine göre daha fazla etkiye sahiptir (Bisadi ve diğ. 2014). Takım omzunun çapı çok önemlidir çünkü SKK sırasında gerekli olan ısının büyük bir kısmının oluşmasını sağlar (Mironov ve diğ. 2019, Rai ve diğ. 2011, Singh 2012) ve omuz çapı arttıkça sürtünme alanındaki artıştan dolayı ısı girdisi artacaktır (Şekil 6.2). Şekil 6.3 6 mm kalınlığında AZ31B alaşımının SKK ile birleştirilmesinde omuz çapının birleştirme kalitesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Sabit bir takım dönüş ve ilerleme hızı için, omuz çapı gereğinden küçükse, yetersiz ısı oluşumundan kaynaklanan kusurlar oluşabilir. Gerekenden daha büyük omuz çaplarında aşırı ısı girdisinden dolayı da kusurlar meydana gelebilir.

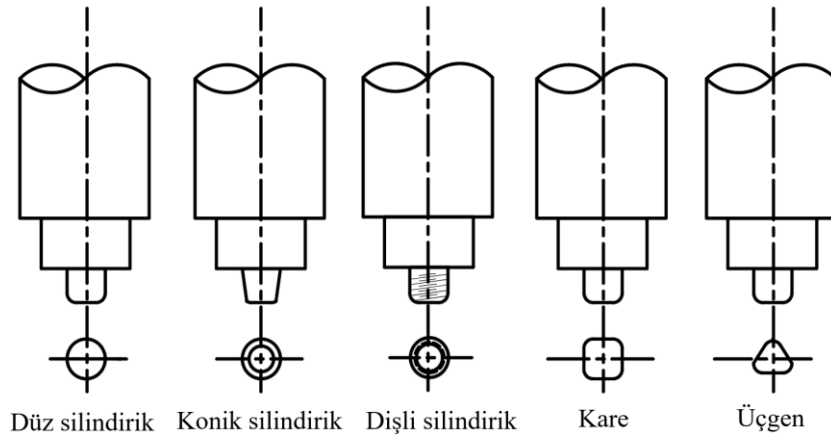


Şekil 6.2: Omuz çapının ısı girdisine etkisi (Ramanjaneyulu ve diğ. 2014).


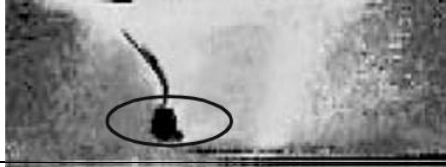



Takım omuz çapı (mm)	Kaynak kesit görüntüsü		Kusurun muhtemel nedeni	Çekme deneyinde hasarın yeri
	İT	YT		
15			Yetersiz ısı girişi	Kusur boyunca
18			Kusursuz	İT-TMEB
21			Aşırı ısı girişi	Kusur boyunca

Şekil 6.3: AZ31B alaşımında omuz çapının birleştirme kalitesine etkisi
(Padmanaban ve Balasubramanian 2009).

ZE42 alaşımı ile yapılan bir çalışmada, ANOVA sonuçları takım pim geometrisinin en önemli işlem parametresi olduğunu göstermiştir (Darwins ve diğ. 2018). Takım piminin geometrisi, kaynak bölgesinin özelliklerini ve plastikleştirilmiş malzemenin akışını önemli bir şekilde etkiler. Şekil 6.4 SKK işleminde kullanılan bazı geleneksel pim geometrilerini göstermektedir. Şekil 6.5 farklı pim geometrileriyle birleştirilen 6 mm kalınlığındaki AZ31B magnezyum alaşımındaki makro yapıları ve kusurları göstermektedir. Pim geometrisi, malzemenin omuza doğru dikey hareketini önemli ölçüde etkilediği için çok önemli bir parametredir.



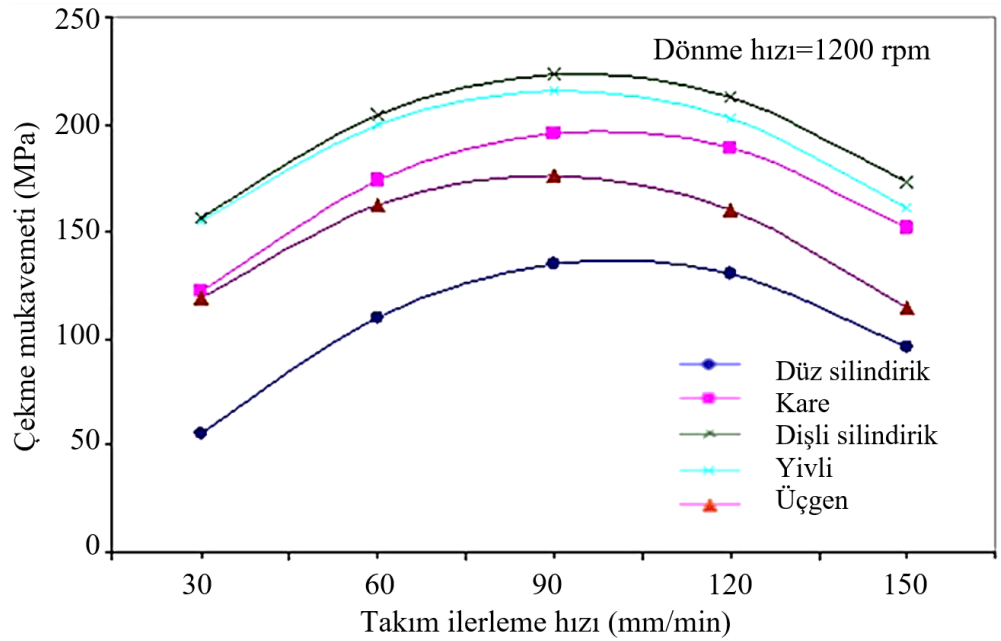
Şekil 6.4: SKK işleminde kullanılan bazı geleneksel pim geometrileri (Dabeer ve Shinde 2018,
Padmanaban ve Balasubramanian 2009).

Pim geometrisi	Kaynak kesit görüntüsü		Kusurun muhtemel nedeni	Çekme deneyinde hasarın yeri
	İT	YT		
Düz silindirik			Malzemenin dikey hareket eksikliği	Kusur boyunca
Konik silindirik			Malzemenin dikey hareket eksikliği	Kusur boyunca
Dişli silindirik			Kusursuz	İT-TMEB
Kare			KB'den büyük miktarda metal süpürme	Kusur boyunca
Üçgen			Yetersiz ısı girişi	Kusur boyunca

Şekil 6.5: AZ31B alaşımında pim geometrilerinin birleştirme kalitesine etkisi
(Padmanaban ve Balasubramanian 2009).

Takım pim geometrisi birleştirmelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Farklı iki çalışmada Sevvel ve Jaiganesh (2016, 2017a) üç farklı pim geometrisi (düz kare, düz silindirik ve konik silindirik) kullanmıştır. Konik silindirik pim ile birleştirilen numuneler, her iki çalışmada da diğer iki geometriyle birleştirilen numunelere göre daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca birleştirme veriminin %110 olduğu bir çalışmada konik silindirik pim geometrisi kullanılmıştır (Jaiganesh ve diğ. 2017). Bunun yanında koniklik oranı takım pimi için önemli bir kaynak parametresi olabilir. Othman ve diğ. (2016) AZ31 alaşımının SKK ile birleştirilmesinde pim koniklik oranının etkisini incelemişlerdir. En iyi mekanik özellikler, daha düşük ısı girdisinden kaynaklanan daha ince tane oluşumu nedeniyle en yüksek koniklik oranında (6:1) elde edilmiştir. ZE41 ile yaptıkları çalışmada, Singh ve diğ. (2018a) düz silindirik, konik silindirik, dişli düz silindirik, konik dişli ve üçgen pim profilleri arasında düz silindirik pim geometrisi ile en yüksek çekme mukavemetini elde etmişlerdir. Bununla birlikte,

Chauhan ve Kumar (2018) silindirik, konik ve dişli pim profilleri arasında dişli pimli birleştirmelerin daha iyi karıştırma nedeniyle en iyi darbe dayanımını gösterdiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Rajakumar ve diğ. (2013b), AZ61A alaşımı ile yaptıkları çalışmada, dişli silindirik pim profili ile birleştirilmiş numunelerden en iyi çekme mukavemeti değerlerini elde etmişlerdir (Şekil 6.6). Patel ve diğ. (2016) AZ91 alaşımı ile yaptıkları çalışmada, dişli düz silindirik pim, konik silindirik pim ve düz silindirik pim arasında en yüksek çekme mukavemetini dişli düz silindirik pimli takımdan elde etmişlerdir. Benzer şekilde, Singh ve diğ. (2018c) ZE41 alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada düz silindirik pim geometrisine göre dişli silindirik pim geometrisi ile daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Pim geometrisinde diş bulunmasının malzemenin dikey yönde hareketini kolaylaştırdığı söylenebilir.



Şekil 6.6: Pim geometrisinin çekme dayanımına etkisi (Rajakumar ve diğ. 2013b).

Patle ve diğ. (2018), SKİ sırasında pim geometrisinin AZ91 alaşımının mikro yapısı, korozyon ve işleme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada basit konik, dişli konik ve kare konik pim geometrileri kullanılmıştır. SKİ sonucunda $Mg_{17}Al_{12}$ ikincil fazı tüm numunelerde azalmıştır. Ayrıca kaynaklı birleştirme için en iyi malzeme akışının konik dişli pim tarafından sağlandığını belirtmişlerdir.

Takım omzunun ve pimin boyutları, hatasız birleştirmelerin elde edilmesi açısından önemlidir. Omuz çapının pim çapına oranı da birleştirme verimliliğini

etkileyebilir. AZ31 ile yapılan bir çalışmada (Othman ve diğ. 2017) omuz çapının pim çapına oranı 3.33 olduğunda en yüksek çekme mukavemetini elde etmişlerdir. Ayrıca, 6 mm kalınlığındaki AZ31B ile yapılan bir çalışmada, takım omuz çapının pim çapına oranı 3'tür (Padmanaban ve Balasubramanian 2010a).

6.2.2 Kaynak Parametreleri

SKK esnasındaki ana kaynak parametreleri takım dönüş hızı, takım ilerleme hızı, takım eğim açısı, pim dalma derinliği ve aksel kuvvettir. Kaynak parametreleri, her kaynak tekniğinde olduğu gibi SKK işleminde de kaynak kalitesini belirler. Kaynak parametrelerinin doğru seçilmesi, kaynak sonrası mikro yapı ve dolayısıyla mekanik özellikler açısından oldukça önemlidir (Unnikrishnan ve Edwin 2016).

6.2.2.1 Takım Dönüş Hızı ve Takım İlerleme Hızı

Takım dönüş hızı (saat yönünde veya saat yönünün tersine) ve takımın ilerleme hızı çok önemli kaynak parametreleridir (Mishra ve Ma 2005, Patel ve diğ. 2019a, Singh 2012, Ugender 2018). Takım dönüş hızı ve takım ilerleme hızı, birleştirmelerin çekme mukavemetini güçlü bir şekilde etkiler (Kumar 2013, Sevvell ve Jaiganesh 2014, Śliwa ve Myśliwiec 2018). Genel olarak, daha yüksek bir takım dönüş hızı ısı girdisini artıracak ve daha yüksek bir takım ilerleme hızı ısı girdisini azaltacaktır (Chowdhury ve diğ. 2013). Bunun nedeni takım iş parçası temas süresinin daha yüksek takım dönüş hızlarında ve daha düşük takım ilerleme hızlarında herhangi bir nokta için daha büyük olmasıdır. Makul düzeyde ısı girişi birleştirmelerin oluşumunu ve mukavemetini belirleyen plastik deformasyon için faydalıdır (Padhy ve diğ. 2018, Padmanaban ve Balasubramanian 2010a). Bunun yanında, takımı çevreleyen malzemede büyük bir plastik akışı gerçekleştirmek ve takım üzerindeki kuvvetlerin etkisini azaltmak için takım yeterince sıcak olmalıdır (Singh 2012).

Dövme AZ31 ve AZ61 ve pres döküm AZ91D test edildiğinde limit takım ilerleme hızları $AZ91D < AZ61 < AZ31$ olarak belirlenmiştir. Özellikle AZ31 alaşımında ilerleme hızı 1000 mm.min^{-1} 'dan daha hızlı olduğunda iyi kaynak elde edilir. AZ91D alaşımı için, sınır ilerleme hızı $100-150 \text{ mm.min}^{-1}$ 'dir. Limit takım

dönüş hızı, büyük ölçüde alaşımdaki alüminyum miktarına bağlıdır. Alaşımlardaki alüminyum miktarı arttığında, alaşımın yüksek sıcaklık deformasyon direnci yükselir ve alaşımın plastik akışı daha zor gerçekleşir (Nakata 2009).

Takım dönüş hızı ve takım ilerleme hızı, birleştirmelerin sertlik dağılımlarını da etkiler. AZ31B-H24 (Cao ve Jahazi 2009) ve AZ31 (Kouadri-Henni ve diğ. 2016) ile yapılan iki farklı çalışmada sertliğin kademeli olarak EM'den KB'ye düştüğü belirtilmiştir. Bu iki çalışmada da KB'de en düşük sertlik elde edilmiştir. Daha yüksek kaynak hızlarının KB'de biraz daha yüksek sertlik oluşturduğunu belirtmişlerdir. Singarapu ve diğ. (2015), dönme hızının artmasının AZ31B magnezyum alaşımı için mikro sertliği arttırdığını, ardından sertliğin giderek azaldığını belirtmişlerdir.

KB'deki sertlik artışı aşağıdaki faktörlerle ilişkilidir (Zeng ve diğ. 2008);

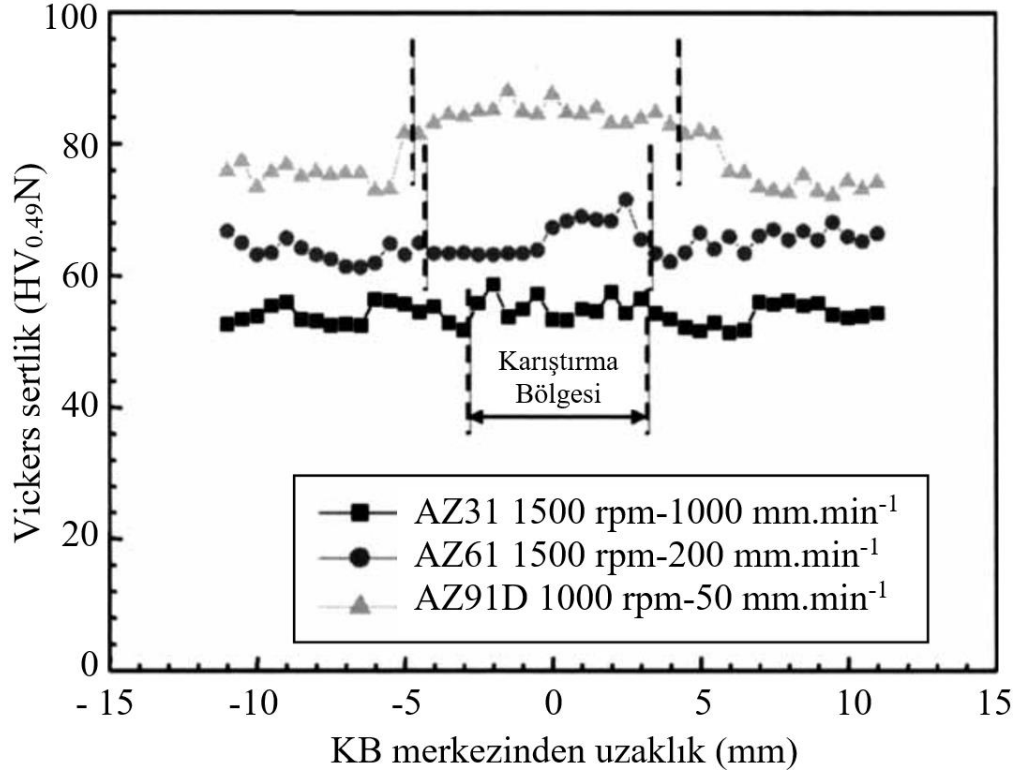
(i) KB'deki tane boyutu EM'dekinden daha küçüktür, tane küçültme, malzemenin mukavemet kazanmasında önemli bir faktördür.

(ii) metallar arası bileşiklerin küçük parçacıkları sertliği arttırmada etkilidir.

Sertlikteki artış, esas olarak tane boyutunun küçülmesine bağlıdır. KB'de elde edilen daha küçük taneler bu bölgedeki sertliği artırır (Babu ve diğ. 2018, Li ve diğ. 2017). Takımın dönme hızı, malzemenin sertliğinin değişmesi üzerinde en yüksek etkiye sahiptir (Naser ve Darras 2017, Ugender 2018). Gulati ve Shukla (2019) maksimum çekme mukavemeti ve darbe enerjisi elde etmek için dönme hızının en önemli parametre olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ilerleme ve dönüş hızının farklı kombinasyonları ile malzemenin orijinal sertliğinden daha yüksek sertlik değerleri elde edilebilir. Bunun yanında mikro yapı sonuçlarının sıcaklık ölçümleri ile değerlendirilmesi önemlidir (Darras ve diğ. 2007). SKK termomekanik bir işlemdir ve termomekanik işlemlerin magnezyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği bilinmektedir (Figueiredo ve Langdon 2019).

Şekil 6.7'de gösterildiği gibi, AZ31 gibi tek fazlı α -Mg yapıları bir alaşımın KB sertliği, EM'nin sertliğinden sadece biraz daha büyüktür. Bununla birlikte, AZ91D gibi iki fazlı alaşımların sertlik dağılımı, EM'de ötektik ürünler ve intermetalik bileşikler içerdiğinden nispeten daha yüksek olma eğilimindedir (Nakata 2009).

Ayrıca AZ91alaşımında tane sınırları çevresinde sert intermetalik çökeltilerin (β fazı) varlığından dolayı, TMEB deforme olmuş tanelere sahip belirgin bir bölge olarak ortaya çıkar (Zolghadr ve diğ. 2019).



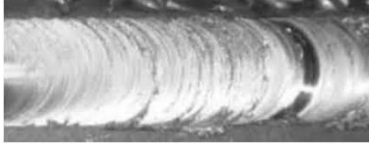

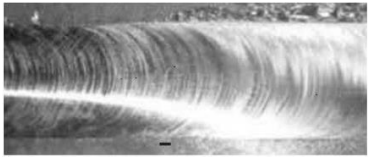
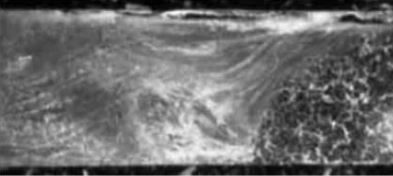
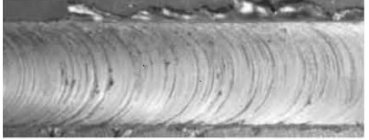

Şekil 6.7: SKK ile birleştirilmiş magnezyum alaşımlarının kesit sertliği (Nakata ve diğ. 2002).

AZ31B ile (Hossein Baghdadi ve diğ. 2018), AZ31B-H24 ile (Afrin ve diğ. 2008), AM60 ile (Richmire ve diğ. 2018a, 2018b) yapılan çalışmalarda ısı girdisinin azaltılmasının mekanik özellikleri artırdığı belirtilmiştir. Bunun yanında ikizleme mekanizması sayesinde, çok düşük dönüş hızında (20 rpm) ve ilerleme hızında (10 mm.min⁻¹), Xu ve diğ. (2018), süneklik kaybı olmadan AZ31B alaşımındaki mukavemeti geliştirmişlerdir.

5 mm kalınlıkta AZ61 ile yaptıkları çalışmada Sun ve diğ. (2017), dönme hızının ilerleme hızına oranı üçe eşit olduğunda birleştirme verimliğinin %100.8 olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmada dişli konik pimli takım kullanılmıştır. İT'nin YT'den nispeten daha zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Bunun nedeni, tane oryantasyon değişikliğinin İT'de çok daha belirgin bir şekilde meydana gelmesidir. AZ31B ile yapılan bir çalışmada, Luna ve diğ. (2018) dönüş hızının ilerleme hızına oranındaki

azalmanın KB’de sertlik, çekme ve yorulma mukavemetinde hafif bir artışa neden olduğunu bildirmiştir.

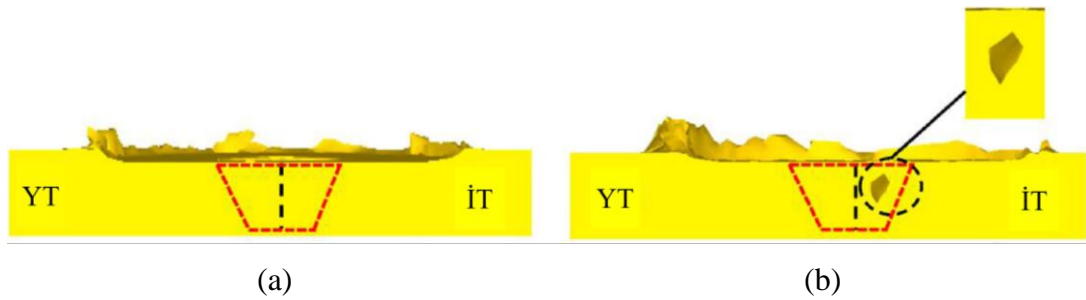
Kaynak hızı çok yüksek olduğunda, yetersiz plastik deformasyon ve malzeme akışının yüksek türbülansı nedeniyle boşluk, gözenek ve tünel gibi kaynak hataları meydana gelebilir (Gulati ve diğ. 2017). Darwins ve diğ. (2017) yüksek takım dönüş hızlarının, yüksek ısı oluşumu nedeniyle ZE42 alaşımı için kaynak hatalarını oluşturduğunu belirtmişlerdir. Pan ve diğ. (2017) Mg-5Al-1Sn alaşımını SKK ile birleştirirken düşük dönüş hızı (600 rpm) kullanılmasının delik tipi hatalara neden olduğunu belirtmişlerdir. Optimize edilmiş ısı girişi ve malzemenin plastik olarak akışı sağlanarak çok soğuk işlem koşullarının önüne geçilebilir ve tünel hataları önlenir. Nispeten büyük omuz çapına sahip takımların kullanılması tünel hatalarının oluşumunun azaltılmasına yardımcı olabilir (Kah ve diğ. 2015). Şekil 6.8 75 mm.min⁻¹ sabit ilerleme hızı için AZ80A alaşımının SKK ile birleştirilmesinde takım dönüş hızının etkisini gösterir.

Takım dönme hızı (rpm)	Görünüş	Makro yapı		Gözlem
		YT	İT	
500				YT alt kısımda pim deliği var.
750				Kusursuz.
1000				İT alt kısımda tünel hatası var.

Şekil 6.8: AZ80A alaşımında takım dönüş hızının birleştirme kalitesine etkisi (Sevvel ve Satheesh 2018).

6.2.2.2 Takım Eğim Açısı ve Dalma Derinliği

SKK işleminde bir diğer önemli kaynak parametresi, iş parçası yüzeyine ve dalma derinliğine göre takım eğim açısıdır. İlerleme yönünün tersi yönde olan uygun bir takım eğim açısı, takım omzunun pim ile karıştırılan malzemeyi tutmasını ve karıştırılan malzemeyi etkili bir şekilde yönlendirmesini sağlar (Asadi ve diğ. 2012, John ve diğ. 2016, Singh ve diğ. 2021). Zhang ve diğ. (2012) takımın düzgün bir şekilde SKK işlemini yapabilmesi için takım eğim açısının 1° ile 3° arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Takım eğim açısı birleştirme kalitesini ve kusur oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Long ve diğ. (2017) sonlu elemanlar yöntemiyle SKK işleminde takım eğim açısının kaynak özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Takım eğim açısı 0° olduğunda solucan deliği kusurları oluşurken, takım eğim açısı 2° olduğunda bu kusurlar oluşmamıştır (Şekil 6.9). Benzer şekilde SiCp ile döküm ZK60 alaşımının yüzey özelliklerini iyileştirmek için yaptıkları çalışmada, Vigneshkumar ve diğ. (2019) en uygun takım açısının 2° (0° ile 4° arasında) olduğunu belirtmişlerdir. 2° eğimli takım ile ısı üretimi, malzeme akışı, tane sınırı güçlendirme ve homojen parçacık dağılımının optimizasyonu gerçekleşmektedir. Benzer şekilde %100.8 gibi yüksek birleştirme verimliliğinin elde edildiği bir çalışmada takım eğim açısı 2° 'dir (Sun ve diğ. 2017). AZ31 ile yapılan bir çalışmada (Ugunder ve diğ. 2014) ise takım eğim açısı 2.5° 'dir.



Şekil 6.9: Takım eğim açısının birleştirme kalitesine etkisi a) 2° eğim açısı, b) 0° eğim açısı (Long ve diğ. 2017).

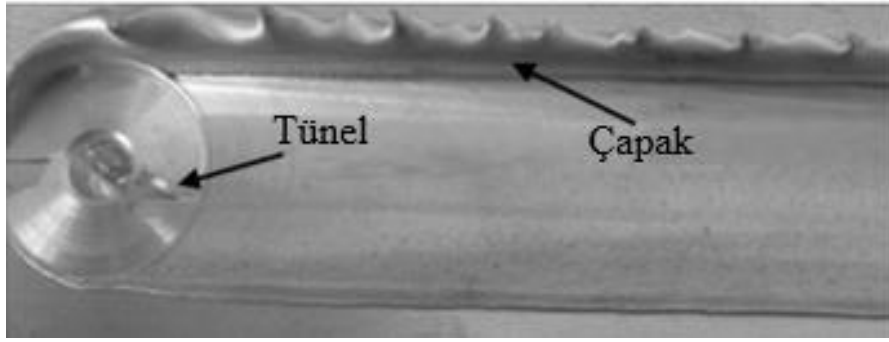
İş parçasına omuzun dalma derinliği önemli bir SKK işlem parametresidir. Dalma derinliği çekme mukavemeti ve çentik darbe enerjisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Goel ve diğ. 2018). Dalma derinliği doğrudan pim uzunluğuna bağlıdır. Ayrıca, SKK esnasında karıştırılan malzemeyi etkin bir şekilde hareket ettirebilmek için takımın omuz yüzeyi iş parçasının yüzeyi ile sürekli temas halinde olmalıdır.

Dalma derinliği olarak 0.03 mm, 0.12 mm ve 0.21 mm'nin kullanıldığı iki farklı çalışmada en iyi mekanik özellikler 0.12 mm dalma derinliğinde elde edilmiştir (Sahu ve Pal 2018, Sahu ve Pal 2014). Dalma derinliği az olduğu zaman takım omuzu yeterli kadar dikey baskıyı yapamamaktadır. Tam tersi durumda yani dalma derinliği çok arttığı zaman yerel incelme gerçekleşir. Ayrıca artan ısı girdisi nedeniyle hatalar oluşabilir. Uygulamada omuzun iş parçasına dalma derinliği olarak 0.1 mm kullanılabilir (Ahmadkhaniha ve diğ. 2015).

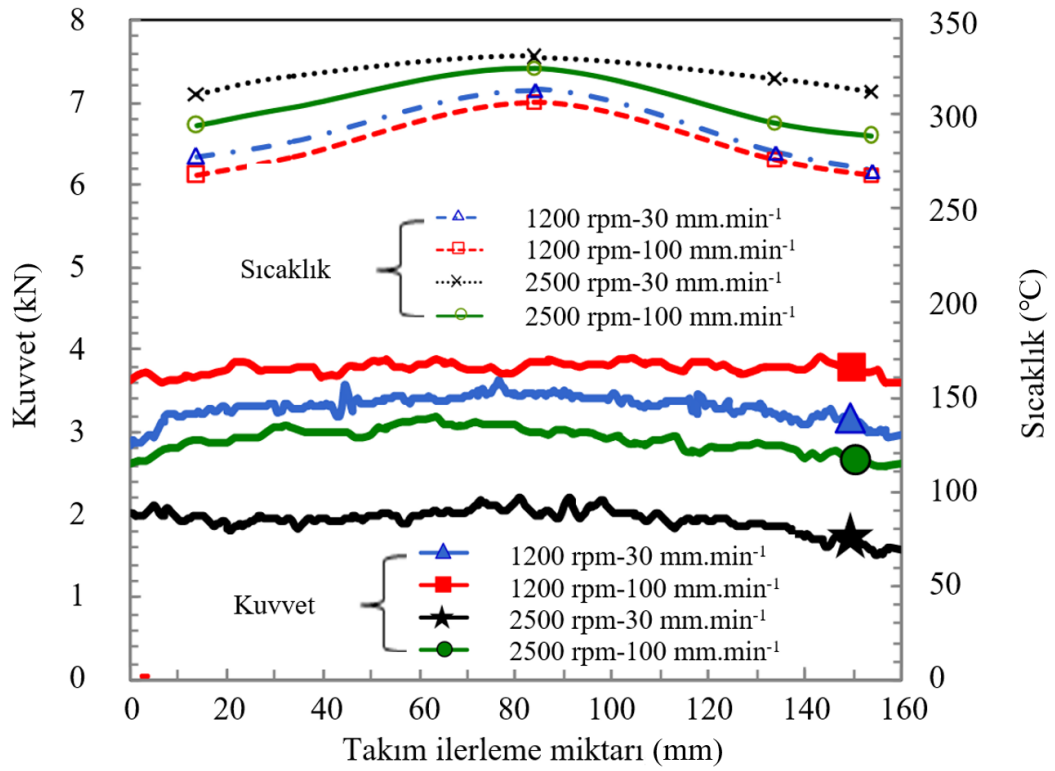
6.2.2.3 Kuvvetlerin Etkisi

Dikey yönde olan takımın iş parçasına uyguladığı aksenal kuvvet, malzemeyi yumuşatan sürtünme kaynaklı ısıyı sağlar (Prasanna ve diğ. 2016). Genel olarak daha düşük ilerleme hızında, daha yüksek takım dönüş hızında ve daha yüksek aksenal kuvvette daha fazla ısı girdisi elde edilir. Uygulanan aksenal kuvvet nispeten az ise, kaynak bölgesinin dip kısmında yetersiz birleştirme meydana gelebilir (Nandan ve diğ. 2008). Kaliteli birleştirmeler elde etmek için yeterli aksenal kuvvet gereklidir. Sürtünmenin neden olduğu sıcaklık, plastikleştirilmiş metalin hacmini belirler ve bu sıcaklık büyük ölçüde aksenal kuvvete bağlıdır. İki farklı çalışmada aksenal kuvvet 3 kN olduğu zaman en iyi mekanik özellikler elde edildiği rapor edilmiştir (Padmanaban ve Balasubramanian 2010a, Sevvil ve Jaiganesh 2017b).






SKK işleminde apak, omuz ve iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanan aşırı ısı nedeniyle iş parçasının yumuşamasıyla oluşur (Podrşaj ve diğ. 2015). Şekil 6.10'da gösterildiği gibi, aşırı takım omuz basıncı büyük miktarda apak oluşumuna neden olabilir (Li ve diğ. 2011). Sabit dalma derinliğinde yapılan bir kaynakta takım dönme hızına ve ilerleme hızına bağlı olarak aksenal kuvvet değişiklik gösterecektir. Örneğin AZ31 alaşımı ile yapılan bir çalışmada, kaynak parametrelerinin dikey kuvvet ve sıcaklık değişimi üzerindeki etkisi Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Takım dönüş hızının artması ve ilerleme hızının azalması ile dikey kuvvetin azaldığı görülmektedir. 6 mm kalınlığındaki AZ61A alaşımının SKK ile birleştirilmesinde aksenal kuvvetin birleştirme kalitesine etkisi Şekil 6.12'de gösterilmektedir.



Şekil 6.10: Tünel ve çapak kusurları (Li ve diğ. 2011).



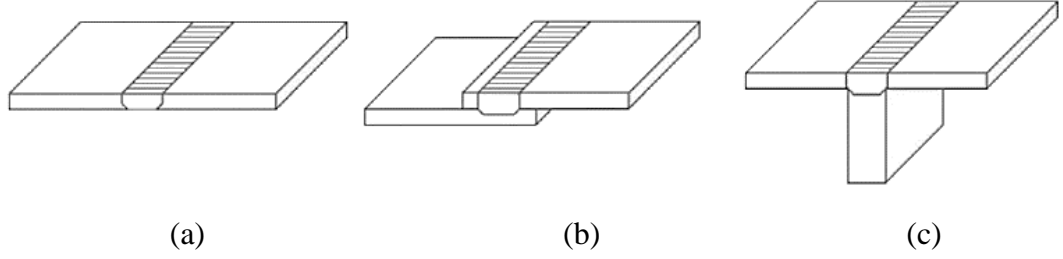
Şekil 6.11: Kaynak parametrelerinin dikey kuvvet ve sıcaklık değişimine etkisi (Forcellese ve diğ. 2016).

Eksenel kuvvet (kN)	Makro Yapı		Birleştirme kalitesi	Muhtemel neden
	YT	İT		
3			Zayıf	Düşük eksenel kuvvet nedeniyle yetersiz ısı üretimi
4			Zayıf	Yetersiz ısı üretimi ve plastikleştirilmiş malzemenin dikey akışının olmaması
5			İyi	Yeterli ısı üretimi ve düzgün malzeme akışı
6			Zayıf	Aşırı eksenel kuvvet nedeniyle dişlerin neden olduğu plastikleştirilmiş malzemenin aşırı yukarı akışı
7			Zayıf	Aşırı eksenel kuvvet, aşırı ısı girdisine ve kaynak bölgesinin incelmesine neden olur

Şekil 6.12: 6 mm kalınlığında AZ61A alaşımında eksenel kuvvetin birleştirme kalitesine etkisi (Razal Rose ve diğ. 2011).

6.2.3 Birleştirme Tasarımı

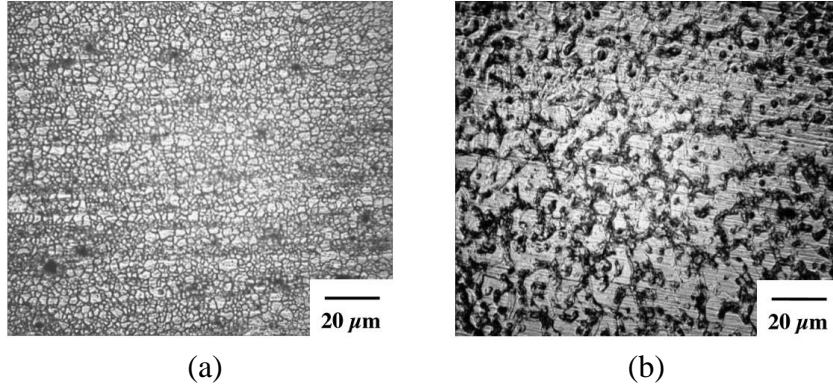
SKK, küt alın ve bindirme kombinasyonu da dahil olmak üzere bir dizi yaygın konfigürasyona uygulanabilir. Bunlar, bir T-birleştirmesi ile birlikte Şekil 6.13'te gösterilmektedir (Gibson ve diğ. 2014). Kaynak bölgeleri, süreksizliklerin oluşabileceği kritik konstrüksiyonlardır. Özellikle dinamik yükler altında çalışan yapılarda kaynak bölgesinde gerilme konsantrasyonuna neden olacak birleştirme tasarımlarından kaçınılmalıdır.



Şekil 6.13: Yaygın olarak kullanılan birleştirme türleri a) Küt alın, b) Bindirme, c) T birleştirme (Gibson ve diğ. 2014).

6.3 Mekanik Özelliklerin Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

SKK kaynak bölgesinde herhangi bir dolgu metali gerektirmediğinden dolgu metali ile ilgili metalürjik zorluklar bu yöntemde meydana gelmez, kaliteli kaynak metalleri elde edilebilir (Hussain 2014, Mohamed ve Alias 2017). Rajakumar ve diğ. (2013a) AZ61A levhalarını SKK ve darbeli TIG yöntemi ile birleştirmiştir. Deneyler, SKK ile birleştirilmiş numunelerin mekanik özelliklerinin, TIG yöntemiyle birleştirilmiş numunelerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Mukavemetteki gelişme, SKK sırasında kaynak metalinde oluşan soğuk işlenmiş mikro yapıya bağlanmıştır. Bu mikro yapıların karşılaştırılması Şekil 6.14'te gösterilmektedir.



Şekil 6.14: Kaynak metalinin mikro yapısı a) SKK, b) TIG (Rajakumar ve diğ. 2013a).

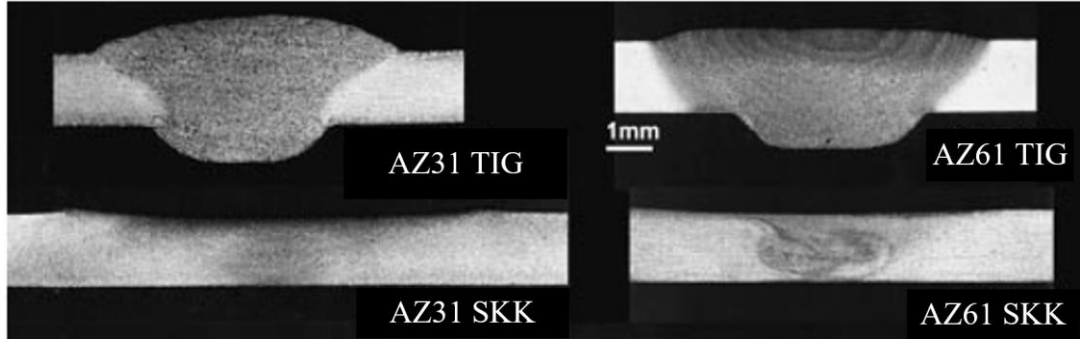
Kumar ve diğ. (2017) AZ91 levhalarını SKK ve TIG kaynak tekniği ile birleştirmişlerdir. SKK ile birleştirmelerin daha küçük tane boyutu nedeniyle üstün sertlik değerleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Carlone ve Palazzo (2015) ZE41A plakalarını TIG ve SKK ile birleştirmiştir. SKK ile yapılan birleştirmelerde daha yüksek akma dayanımı ve daha düşük süneklik elde edilirken, her iki birleştirme için benzer nihai çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Padmanaman ve

Balasubramanian (2010b) lazer ışını kaynağı, SKK ve TIG kaynağının AZ31B alaşımının yorulma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Lazer ışınli birleştirmeler, kaynak bölgesinde çok küçük tanelerin oluşması, daha yüksek füzyon bölgesi sertliği ve homojen olarak dağılmış daha ince çökeltiler nedeniyle daha yüksek yorulma mukavemeti göstermiştir. Benzer şekilde, Kramár ve diğ. (2019) lazer ışını kaynağı ile en iyi sonuçları elde etmişlerdir. Park ve diğ. (2003) SKK ile birleştirilen AZ61 alaşımının mekanik ve mikroyapısal özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. AZ61 alaşımının mekanik özelliklerinin parçacık boyutundan, kristalografik yönelimden ve dislokasyon yoğunluğundan güçlü bir şekilde etkilendiğini belirtmişlerdir. Nakata'nın çeşitli magnezyum alaşımlarının EM, SKK ve TIG kaynaklı birleştirmeleri için yaptığı mekanik özellikler karşılaştırması Tablo 6.1'de gösterilmektedir.

Tablo 6.1: Mekanik özelliklerin karşılaştırılması (Nakata ve diğ. 2002).

Alaşım	Yöntem	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Absorbe edilen enerji (J/cm ²)
AZ31	EM	251	13.2	9.3
	SKK	231	9.4	20.7
	TIG	222	5.3	12.2
AZ61	EM	308	15.2	8.7
	SKK	269	9.6	13.3
	TIG	265	7.0	9.9
AZ91D	EM	93	2.1	7.5
	SKK	115	-	8.6
	TIG	107	-	8.5

Şık (2021) AZ31 alaşımını hem TIG hem de SKK ile birleştirmiştir. SKK ile birleştirilen numunelerin daha pürüzsüz olmasına rağmen, TIG ile birleştirilen numunelere göre eğilmeli yorulma direncinin daha düşük olduğunu belirtmiştir. Padmanaban ve Balasubramanian (2010a) AZ31B ile yaptıkları çalışmada kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımının EM'den biraz daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. TIG ve SKK ile birleştirilen AZ31 ve AZ61 alaşımlarının kesit fotoğrafları Şekil 6.15'te gösterilmektedir. SKK ile birleştirmede kaynak kesitinde kalınlıkta bir azalma gözlenmektedir. Bu azalma takım omzunun dalma derinliğinden dolayı meydana gelir. Bu çalışmada kaynak kalınlığının en az olduğu bölgede yorulma çatlakları başlamıştır (Tsujikawa ve diğ. 2004).



Şekil 6.15: Kaynaklı parçaların kesiti (Tsujikawa ve diğ. 2004).

Chen ve diğ. (2019) SKK ile birleştirilen ZK60 alaşımının yüksek çevrim yorulma davranışını incelemişlerdir. Çatlak, TMEB ile ITAB arasındaki geçiş bölgesinde, kaynağın yumuşatıcı etkisinden dolayı daha yüksek gerilme değerlerinde veya gözeneklilik nedeniyle daha düşük gerilme değerlerinde KB'de başlamıştır.

7. MALZEME VE YÖNTEM

7.1 Deneysel Çalışmalar

7.1.1 Malzeme

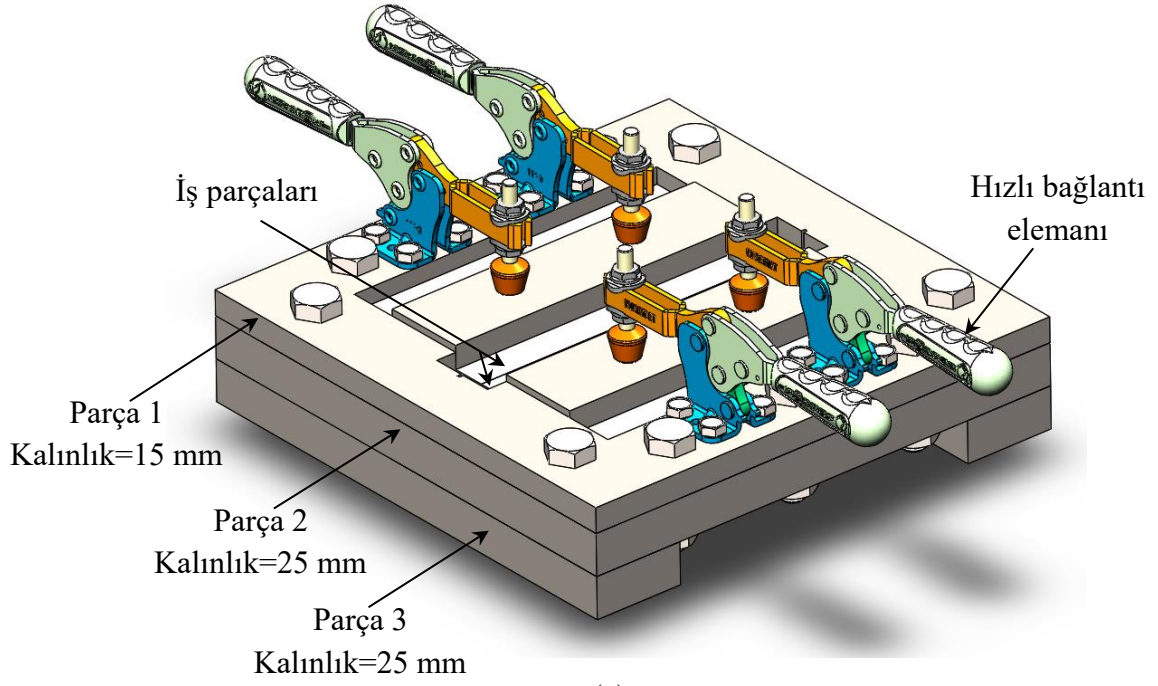
Deneysel çalışmalar için 5.2 mm kalınlığında 600×900 mm boyutlarında AZ31 magnezyum levhalar ticari olarak temin edilmiştir. Temin edilen AZ31 magnezyum levhaların kimyasal bileşimi Tablo 7.1’de gösterilmektedir.

Tablo 7.1: AZ31 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Alaşım	Al	Si	Zn	Fe	Mn	Cu	Ni	Mg
AZ31	2.5-3.5	≤0.30	0.7-1.3	≤0.005	≥0.2	≤0.05	≤0.005	Geri kalan

7.1.2 Kalıp Tasarımı ve Üretimi

SKK geleneksel yarı otomatik freze tezgahında yapılmıştır. SKK esnasında kaynak yapılan malzemeyi sabitlemek için kalıp tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. SOLIDWORKS yazılımında tasarlanan ve montajı yapılan malzeme tutucu kalıp Şekil 7.1a’da gösterilmektedir. Bu kalıp üç parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar S420 kalite çelikten lazer kesim ile elde edilmiştir. Lazer kesim sonrası yüzeyden frezeleme ve daha sonra taşlama ile talaş kaldırılarak boyutsal kararlılık sağlanmıştır. Kalıpta KUKAMET marka kilitli hızlı bağlantı elemanı kullanılmıştır. Bu sayede kaynaklanacak malzemelerin değişimi hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında kaynak yapılacak malzemeler kalıba yan yüzeylerden mümkün olduğunca sıkı olacak şekilde su jetiyle 100×200 mm boyutlarında kesilmiştir. Bu sayede kaynak yapılacak malzemenin hareket etmesi kalıp yan yüzeyleri tarafından engellenmiştir. Dolayısıyla hızlı kilit elemanları malzemenin sadece dikey yukarı yöndeki hareketini engellemektedir. Malzeme tutucu kalıbın montajlanmış halinin fotoğrafı Şekil 7.1b’de gösterilmektedir.



(a)



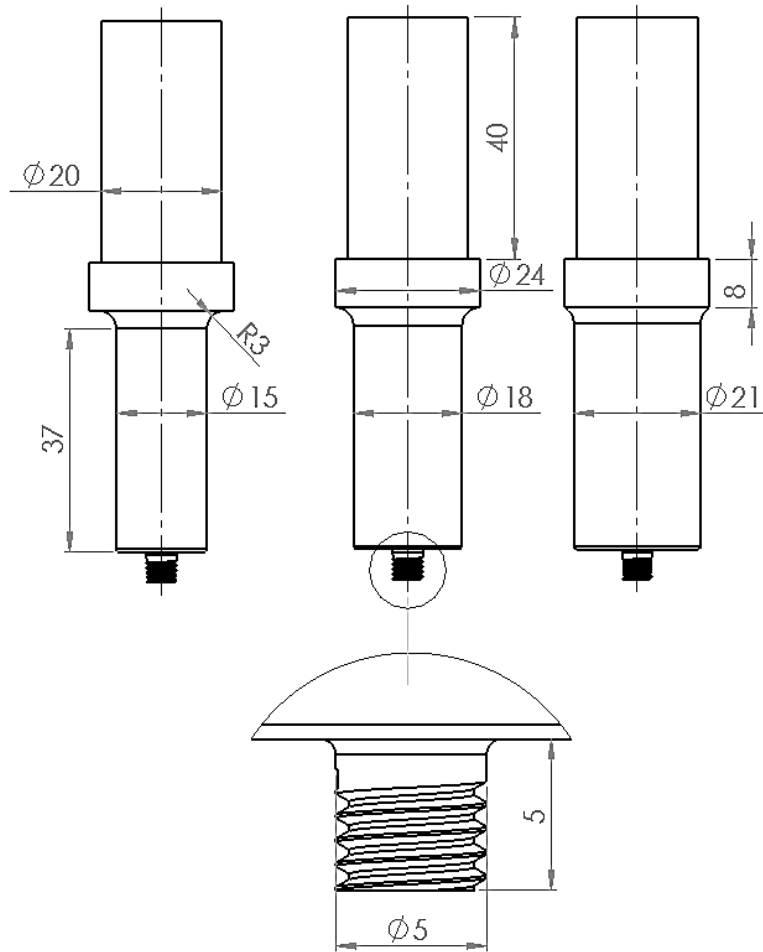
(b)

Şekil 7.1: Malzeme tutucu kalıp a) 3B modeli, b) Montajlanmış hali.

7.1.3 Takım Tasarımı ve Üretimi

15-18-21 mm omuz çapına sahip M5 vida dişli pime sahip pim uzunluğu 5 mm olan takımlar talaşlı üretimle üretilmiştir. Üretilen takımların ölçüleri Şekil 7.2’de ısıl işlem öncesindeki fotoğrafları Şekil 7.3’te gösterilmektedir. SKK esnasında yüksek

sıcaklıklara ulaşılmaktadır ve bu yüksek sıcaklıklarda takımın mekanik özelliklerini koruyabilmesi gereklidir. Bu nedenle takım malzemesi olarak X40CrMoV5-1 (H13) sıcak iş takım çeliği seçilmiştir. Bu çelikte molibden ve vanadyum mukavemet artırmak için kullanılmıştır. Krom içeriği ise yüksek sıcaklıklarda kullanıldığında yumuşamaya karşı dayanımının artmasına yardımcı olur. Bu çelik türü ısıtılma işlemiyle çok iyi bir darbe ve aşınma direnci kombinasyonu sunar ve kızıl sıcaklıklarda iyi sertliğe sahiptir. Ayrıca bu çelik türü hızlı soğumaya dayanıklıdır. Isıtılmadan olarak silindirik kesitte temin edilen takım malzemesi CNC torna tezgâhı ile nihai ölçülerine getirilmiştir. Talaşlı imalattan sonra ısıtılma işlemi İzmir ilinde bulunan DÖSAN firması tarafından yapılmıştır. Bu şekilde dış yüzeyde 54 HRC sertlik elde edilmiştir. Deneyler süresince takımlarda aşınma ve kırılma meydana gelmemiştir.



Şekil 7.2: Talaşlı imalat ile üretilen takımların ölçüleri.



Şekil 7.3: Takımların ısıtım işlem öncesi fotoğrafı.

7.1.4 Kaynak Parametreleri

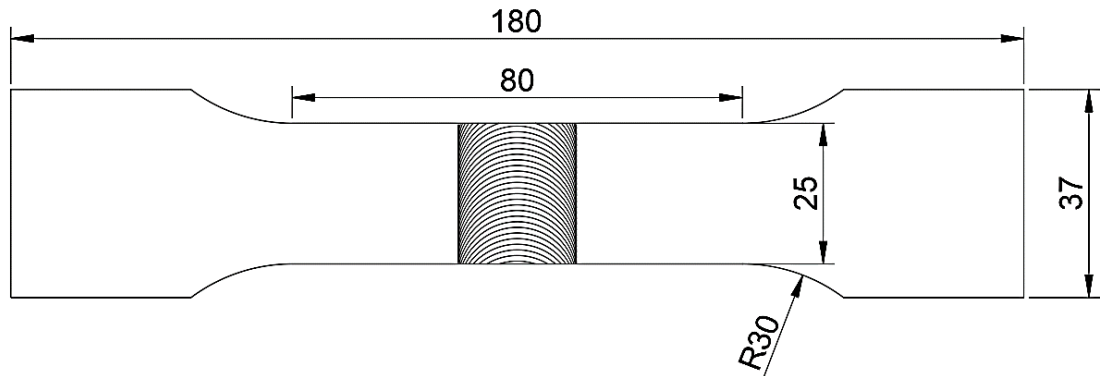
Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SKK ile etkili bir birleştirme gerçekleştirebilmek için takıma 2° eğim açısı verilmesi ve 0.10 ile 0.15 mm arası takım dalma derinliği kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu nedenle kaynak işlemlerinin tümü 2° takım eğim açısı ve 0.15 mm omuz dalma derinliği ile gerçekleştirilmiştir. Çok sayıda kaynak parametresi ile ön kaynaklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ön kaynaklama işlemlerine bağlı olarak 21 mm omuz çaplı takım ile takım dönme hızının takım ilerleme hızına oranı 2 ile 3 arasında olması gerektiği üzerine durulmuştur. Yarı otomatik freze tezgahının dönme ve ilerleme hızı limitlerine de bağlı olarak 21 mm omuz çaplı takım ile Tablo 7.2'de ki parametrelerde yorulma deneyleri için en uygun olan parametrenin belirlenebilmesi için birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.2: Kaynak parametreleri.

Deney no	Devir Sayısı (rpm)	İlerleme Hızı (mm.min ⁻¹)
1	600	300
2	800	400
3	1000	500
4	1250	600
5	1600	500
6	1250	400
7	1000	300
8	1600	400

7.1.5 Çekme Deneyleri

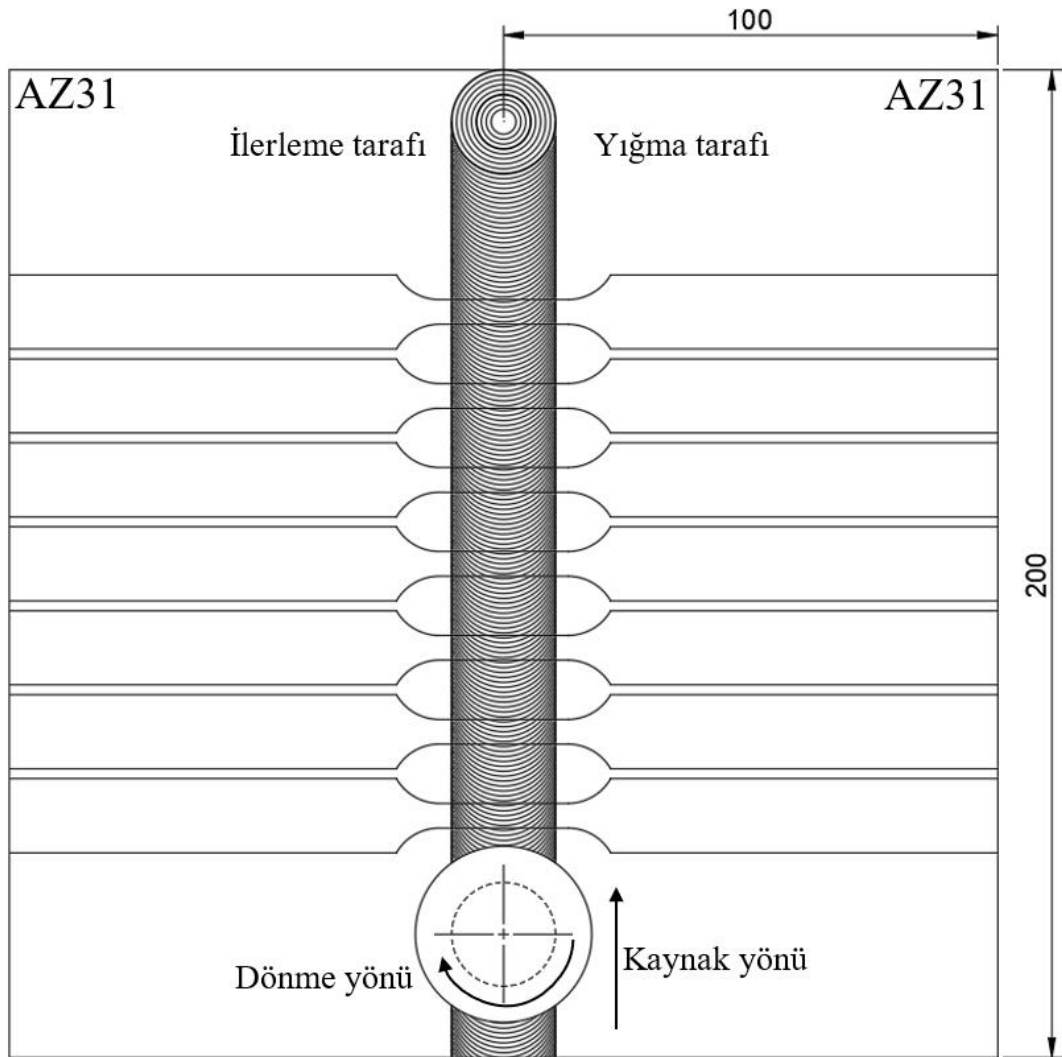
Yorulma deneyleri için en uygun kaynak parametresinin belirlenmesi için çekme deneyleri referans alınarak bir parametre analizi yapılmıştır. Tablo 7.2'deki parametrelerde birleştirilen parçalardan üçer adet çekme deney numunesi lazer kesim ile çıkarılmıştır. Kaynaksız ve kaynaklı çekme deney numuneleri, sırasıyla TS EN ISO 6892-1 ve TS EN ISO 4136 standartlarına bağlı kalınarak aynı ölçülerde çıkarılmıştır. Çekme deney numunelerinin ölçüleri Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Çekme deneyleri İzmir Ekonomi Üniversitesi'nde bulunan MTS CRITERION (Model 45) marka universal çekme cihazında yapılmıştır.



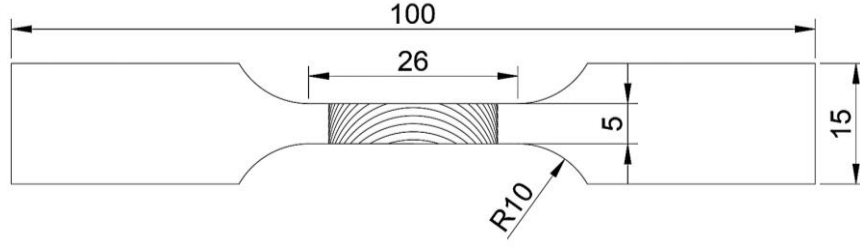
Şekil 7.4: Çekme deney numunesi ölçüleri.

7.1.6 Yorulma Deneyleri

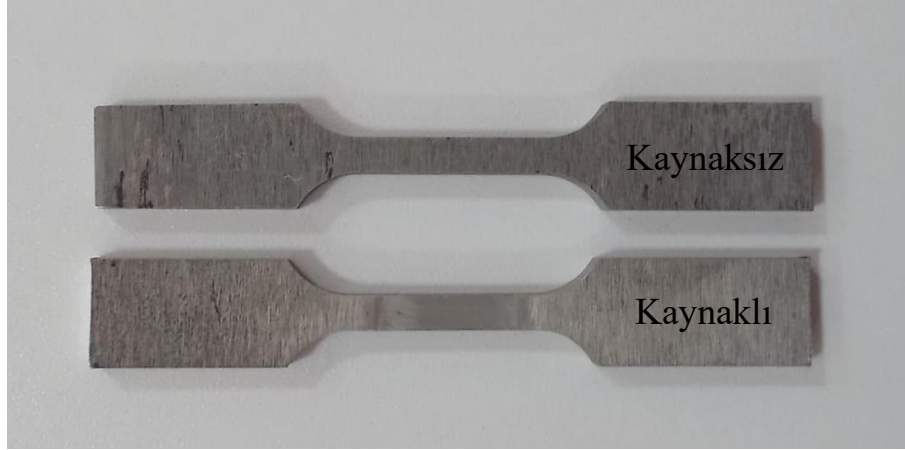
ISO 12106:2017 (Metalik malzemeler - Yorulma testi - Eksenel uzama kontrollü yöntem) standardı $R_\epsilon = -1$ dahil olmak üzere sabit genlik, sabit sıcaklık ve sabit uzama oranlarında uzama kontrolü altında tek eksenli olarak numunelerin yorulma davranışını belirlemek için kullanılmaktadır. Burada $R_\epsilon = \epsilon_{min}/\epsilon_{max}$ olarak tanımlanır. Bu standarda bağlı olarak kaynaklı ve kaynaklı plakalardan yorulma deney numuneleri tel erozyon yöntemiyle çıkarılmıştır. Her bir kaynaklı plakadan 7 adet yorulma deney numunesi çıkarılmıştır. Bu numunelerin kaynaklı parçalardan tam olarak çıkarılma yerleri Şekil 7.5'te gösterilmektedir. Çıkarılan bu numunelerin uzunlukları yorulma deneyinin yapıldığı cihazın çalışma aralığına uzun geldiği için numuneler talaşlı imalat ile kısaltılmıştır. Yorulma deney numunelerinin nihai ölçüleri Şekil 7.6'da fotoğrafları ise Şekil 7.7'de gösterilmektedir.



Şekil 7.5: Bir kaynaklı plakadan çıkarılan yorulma deney numunelerinin tam konumları.



Şekil 7.6: Yorulma deney numunesi nihai ölçüleri.



Şekil 7.7: Kaynaksız ve kaynaklı yorulma deney numuneleri.

Yorulma deneyleri Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan SHIMADZU (EHF-LV020K2-020) marka yorulma test cihazında yapılmıştır.

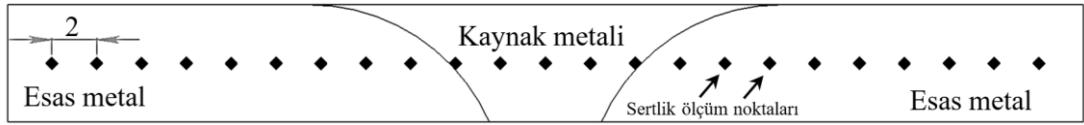
10 Hz'de, 6 farklı birim uzama değerinde (%0.2, %0.3, %0.35 %0.4, %0.5, %0.6) ve her bir birim uzama değerinde 3 adet numune ile uzama kontrollü düşük çevrim yorulma deneyleri hem kaynaklı hem de kaynaklı numunelerde gerçekleştirilmiştir.

7.1.7 Mikro-Makro Yapı ve Sertlik İncelemeleri

Mikro-makro yapı ve sertlik incelemeleri için kaynak bölgesinden enine kesit numuneler talaşlı imalat ile alınmıştır. Bakalite alınan numuneler kabadan inceye doğru zımparalanmış ve daha sonra elmas tozlu süspansiyon dökülmüş keçe kullanarak parlatılmıştır. Parlatılmış numuneler, kaynaklı birleştirmelerin mikro yapısını ortaya çıkarmak için 5 ml asetik asit, 6 g pikrik asit, 10 ml su 100 ml etanol kullanılan bir çözelti ile numune yüzeyinde kahverengi film oluşana kadar bekletilerek

dağlanmıştır. Mikro yapı fotoğrafları 20 kat ve 200 kat büyütme ile optik mikroskop vasıtasıyla KM, TMEB, ITAB ve EM'den alınmıştır. Makro yapı fotoğrafı ise 5 kat büyütme ile alınmıştır.

Mikro sertlik incelemeleri enine kesitinden alınmış ve parlatılmış numune üzerinden 2 mm aralıklarla 500 g yükün 10 s uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Enine kesit boyunca mikro sertlik ölçüm noktaları şematik olarak Şekil 7.8'de gösterilmektedir.



Şekil 7.8: Mikro sertlik ölçüm noktaları.

7.1.8 SEM incelemeleri

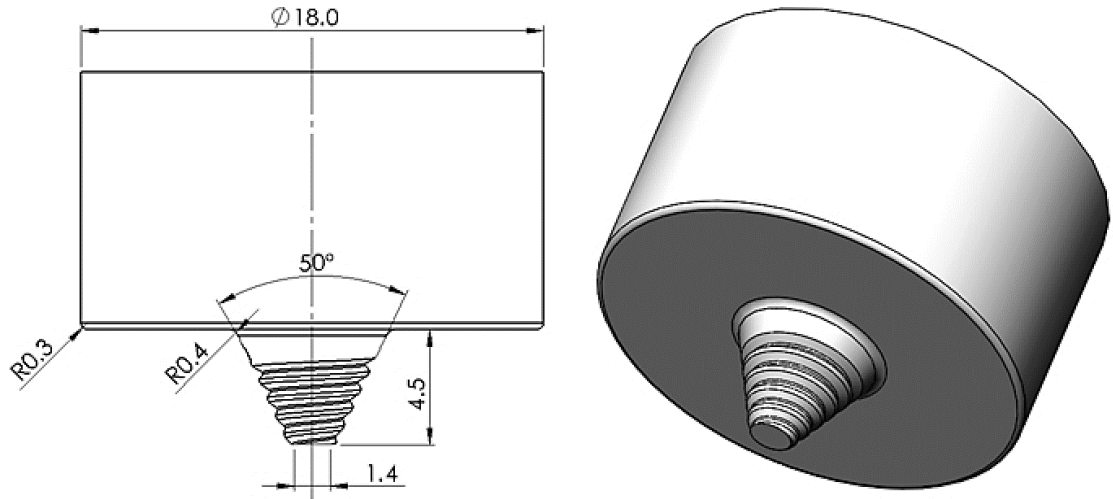
Yorulma deneyi sonucunda hasara uğrayan kaynaklı numunelerin hasar nedeninin daha iyi anlaşılabilmesi için hasar bölgeleri Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan SEM (Scanning Electron Microscope-Taramalı Elektron Mikroskobu) ile incelenmiştir.

7.2 Sayısal Çalışmalar

Bu tez çalışmasında sayısal çalışma olarak bir sonlu eleman modeli aracılığıyla AZ61 magnezyum alaşımının SKK ile birleştirilmesi analiz edilmiştir. Sayısal model ısı girdisi, sıcaklık dağılımı, plastik deformasyon tipi-miktarı ve kaynak bölgesinde kaynak hatası oluşumu açısından literatürdeki deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sayısal model ABAQUS yazılımında oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal modelde CEL formülasyonu, modifiye edilmiş Coulomb sürtünme yasası, Johnson-Cook (J-C) malzeme yasası, kütle ölçekleme tekniği ve sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri kullanılmıştır.

7.2.1 Model Geometrisi ve Ağ Özellikleri

Oluşturulan sayısal model bir sıvı-katı etkileşimi algoritması içermektedir ve bu modelde kaynaklanacak malzeme non-newtonyen akışkan olarak kabul edilmiştir (Huang ve diğ. 2019). Sayısal modelde, iş parçası bir Euler etki alanı olarak ve SKK takımı rijit bir Lagrange gövdesi olarak modellenmiştir. SKK işleminin modellenmesinde geleneksel hesaplama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeni bir takım tasarlarken geleneksel yöntemleri kullanmak bazen zorluklar içerebilir. Huang ve diğ. (2018b) takım kırılma analizini ve birleştirme kalitesini paralel olarak işleyen bir değerlendirme sistemi kullanarak yüksek verimli haritalar üretmiştir. Bu şekilde takım kırılma analizini de değerlendirmenin içerisine katmışlardır. Fakat sunulan bu tez çalışmasında, diğer literatürdeki çalışmalarda (Al-Badour ve diğ. 2013, Ansari ve diğ. 2019, Aziz ve diğ. 2018, Chauhan ve diğ. 2018, Zhu ve diğ. 2017) olduğu gibi takım kırılma analizleri dikkate alınmamıştır ve takım, çalışmanın yüksek hesaplama verimliliğine ulaşma amacı doğrultusunda rijit bir gövde olarak tasarlanmıştır. Modelde kullanılan takımın geometrisi Şekil 7.9’da gösterilmektedir. Sayısal modelde kullanılan takım, sayısal çalışmanın doğrulandığı deneysel çalışmalarda kullanılan takımlarla hemen hemen aynı geometri ve boyutlara sahiptir (Lee ve diğ. 2017, Sun ve diğ. 2017). Bu takım 18 mm çapında omuza ve konik dişli bir pime sahiptir.

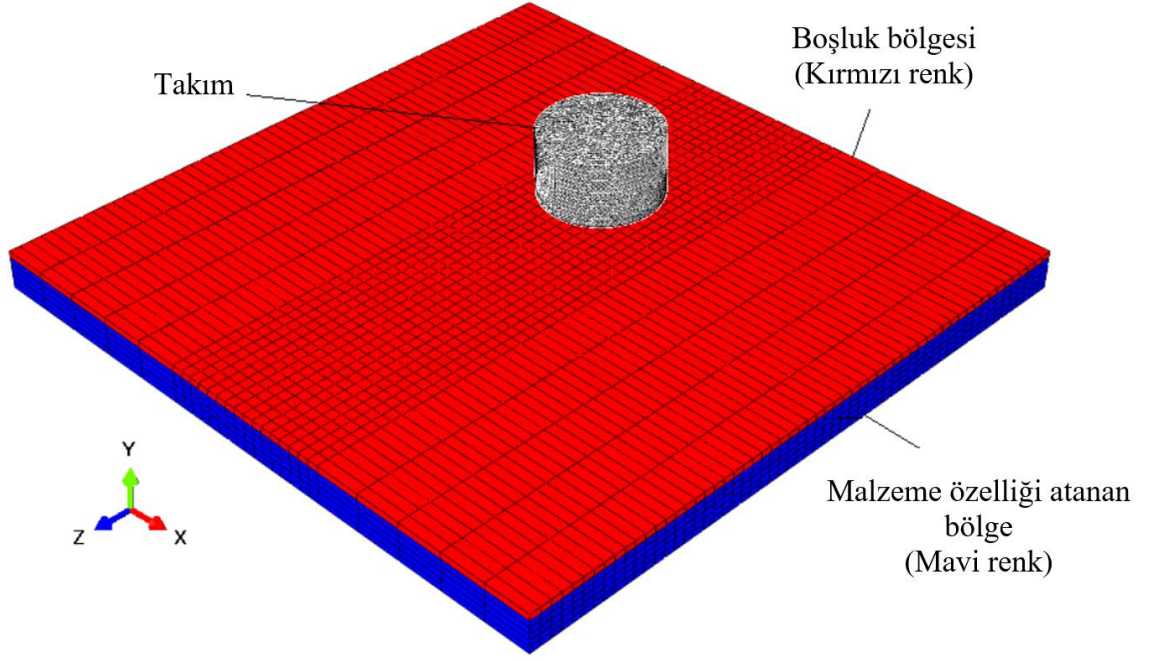


Şekil 7.9: Modelde kullanılan takım geometrisi.

Euler etki alanı, $100 \times 100 \times 6$ mm³ hacimli bir küboid gövde olarak oluşturulmuştur. İşlemi düşük hesaplama süresinde tamamlamak için Euler etki alanı,

gerilimsiz giriş koşuluna göre modellenmiştir (Ansari ve diğ. 2019). Euler etki alanı, 9048 termal olarak eşleştirilmiş Euler elemanı (EC3D8RT) ile ağlanmıştır. Sonuçların doğruluğunu artırmak için, iş parçasının rijit takımla temas halinde olacağı orta bölümünde yoğun bir ağ oluşturulmuştur. Ayrıca işlem süresini en aza indirmek için diğer kısımlarda kaba bir ağ oluşturulmuştur. Euler etki alanı, Şekil 7.10'da gösterildiği gibi, boşluk bölgesini (kırmızı) ve malzeme atanmış bölgeyi (mavi) belirlemek için iki bölgeye ayrılmıştır. Malzeme özellikleri boşluk bölgesine atanmamıştır. Boş bölge oluşturulmasının nedeni, dalma aşamasında takımın altındaki malzemenin kenarlara akmasını engellemek ve sonucun daha iyi tahmin edilmesini sağlamaktır (Chauhan ve diğ. 2018). Boş bir bölge tanımlamak zorunludur. Aksi takdirde analiz sonuçları doğru olmayacaktır. Takım, dalma aşamasında iş parçasına girdiğinde, Euler etki alanında (malzeme atanmış bölge) bir hacim işgal edecektir. Bu boşluk bölgesi mevcut değilse, malzeme dalma aşamasında yana doğru akacaktır. Bu boşluk bölgesi malzemenin yukarı doğru akmasını sağlar. CEL formülasyonunu kullanarak SKK işlemini sayısal olarak modelleyen çalışmalarda boşluk bölgesinin oluşturulduğu görülmektedir (Al-Badour ve diğ. 2013, Chauhan ve diğ. 2018, Turkan ve Karakas 2021, Zhu ve diğ. 2017). Boşluğun kalınlığı ve malzeme atanmış bölgelerin kalınlığı sırasıyla 1 ve 5 mm'dir.

CEL formülasyonunda, Euler yüzeyini ve içindeki malzeme miktarını belirlemek için EVF (Element Volume Fraction – Element Hacim Oranı) değeri kullanılabilir. Bu yöntemde akışkanın EVF'si izlenir. Hücre boşken EVF değeri sıfır, doluyken bir olur. Bu nedenle, EVF değeri sıfırdan bire kadar değişir. EVF, SKK işleminde kusur oluşumunu ve birleştirme kalitesini belirlemek için kullanılabilir. Boşluk şeklinde oluşan kusur bölgesinde EVF sıfır veya sıfıra yakın bir değer olacaktır (Chauhan ve diğ. 2018). Bu çalışmada EVF değeri birleştirme kalitesini belirlemek için kullanılmıştır.



Şekil 7.10: Model geometrisi ve ağ.

7.2.2 Malzeme Akış Modeli

SKK işleminde karmaşık malzeme akışı meydana gelir. Sayısal modelleme sonuçlarının doğruluğu, akış gerilmesinin doğru belirlenmesine büyük ölçüde bağlıdır. SKK sırasında akış gerilmesindeki değişiklikler sıcaklığa, deformasyon ve deformasyon hızına bağlıdır. J-C plastik malzeme akış modeli, sıcaklığa, deformasyona, deformasyon hızına bağlı visko-plastik bir modeldir ve yüksek deformasyon oranlı işlemlere en uygun modeldir (Chauhan ve diğ. 2018). SKK sırasında yüksek deformasyon oranları meydana geldiğinden bu çalışmada J-C plastik malzeme akış modeli kullanılmıştır. J-C plastik malzeme akış modeline göre, akış gerilmesi (σ_y) denklem 7.1 ile ifade edilir.

$$\sigma_y = [A + B(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ortam}}{T_{ergime} - T_{ortam}} \right)^m \right] \quad (7.1)$$

Bu denklemde; A, B, C, n ve m malzeme özelliklerine bağlı olan sabitlerdir ve bu çalışmada kullanılan değerleri Tablo 7.3'te gösterilmiştir. ε_p eşdeğer plastik uzama, $\dot{\varepsilon}_p$ eşdeğer plastik uzama hızı ve $\dot{\varepsilon}_0$ referans uzama oranıdır. T referans sıcaklık, T_{ergime} malzemenin ergime noktası, T_{ortam} ortam sıcaklığıdır. Bu

çalışmada, $\dot{\epsilon}_0=0.001$ (Feng ve diğ. 2014) , $T_{ergime}= 620$ °C, $T_{ortam}=20$ °C değerleri kullanılmıştır.

Tablo 7.3: J-C plastik malzeme akış modelinde kullanılan sabitler (Abbasi-Bani ve diğ. 2014).

Parametre	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
Değer	100.52	94.33	0.6312	0.3512	0.4367

7.2.3 Termal Model ve Temas Koşulları

SKK karmaşık malzeme hareketine sahip termomekanik bir süreçtir. SKK sırasında takımın iş parçasıyla teması sonucu iş parçasının plastik deformasyonu ve sürtünme kaynaklı ısı açığa çıkar. Mevcut modelde hem plastik deformasyon hem de sürtünme ısı üretimi açısından dikkate alınmıştır. SKK esnasında plastik deformasyonun neden olduğu ısı, (q_p) denklem 7.2 ile elde edilir.

$$q_p = \eta \tau \dot{\epsilon}_{pl} \quad (7.2)$$

Bu denklemde; η plastik enerjinin sıcaklığa dönüşüm oranını belirleyen katsayıdır ve bu çalışmada 0.9 alınmıştır. τ kayma gerilimi ve $\dot{\epsilon}_{pl}$ plastik uzama oranıdır.

Takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısı, (q_f) denklem 7.3 ile hesaplanır.

$$q_f = \tau_f \dot{\gamma} \quad (7.3)$$

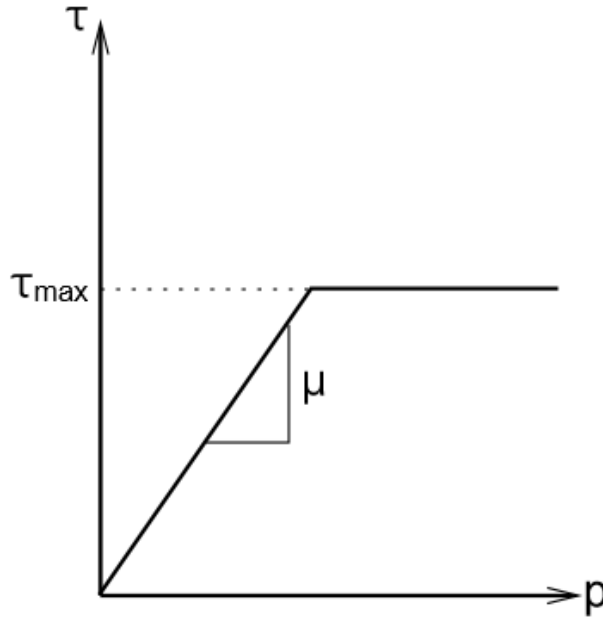
Bu denklemde; τ_f sürtünmeden kaynaklanan kayma gerilimi, $\dot{\gamma}$ kayma hızıdır. Klasik Coulomb sürtünme yasasına göre, τ_f denklem 7.4 ile hesaplanır.

$$\tau_f = \mu P \quad (7.4)$$

Bu denklemde; P takım ve iş parçası ara yüzündeki basınç gerilimi ve μ ise sürtünme katsayısıdır. Düşük açısal hızda, klasik Coulomb sürtünme kanunu, SKK işleminin modellenmesinde geçerli çıktılar verebilir ancak yüksek açısal hızda takımın artan dinamik etkisi nedeniyle çıktılar hatalı olabilir (Zhang 2008). Bu nedenle, bu

çalışmada modifiye edilmiş Coulomb sürtünme kanunu kullanılmıştır. Modifiye edilmiş Coulomb sürtünme kanununa göre temas kesme gerilmesi maksimum kesme gerilmesinden düşükse yapışma durumu vardır. Temas kesme gerilmesi maksimum kesme gerilmesinden daha yüksek ise kayma meydana gelir. Denklem 7.5 modifiye edilmiş Coulomb kanununa göre temas ara yüzü kesme gerilmesini tanımlar. Sayısal modelde kaynaklı malzemenin temas ara yüzündeki plastik deformasyon davranışı dikkate alındığında, Coulomb sürtünme kuvveti, Şekil 7.11’de gösterildiği gibi maksimum kesme gerilimi τ_{max} ’a ulaştıktan sonra daha fazla artmaz (Zhu ve diğ. 2016). Mevcut analizde, yapışma-kayma kriterini belirlemek için distorsiyon enerjisi kriteri, $\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = 0.58\sigma_y$ kullanılmıştır (Aziz ve diğ. 2018). Burada σ_y eşdeğer akma gerilmesidir.

$$\tau_f = \begin{cases} \mu P, & \text{for } \mu P < \tau_{max} \\ \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}, & \text{for } \mu P > \tau_{max} \end{cases} \quad (7.5)$$



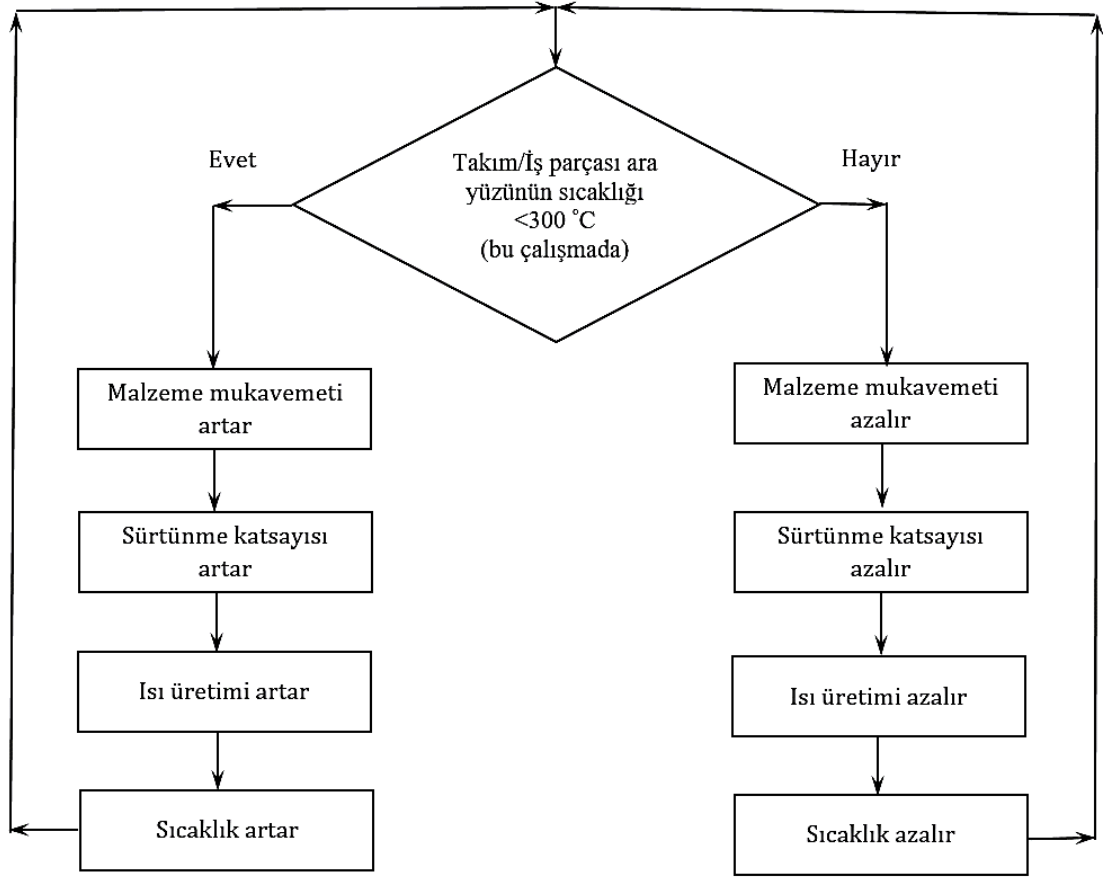
Şekil 7.11: Modifiye edilmiş Coulomb sürtünme yasası (Lorrain ve diğ. 2009).

SKK sırasında takım ve iş parçası arasındaki temasın doğru bir şekilde modellenebilmesi açısından sürtünme katsayısının seçimi önemli bir role sahiptir. Çünkü sürtünme katsayısı SKK sırasındaki ısı oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Chauhan ve diğ. (2018), Al-Badour ve diğ. (2013), Zhu ve diğ. (2017) ve Ansari ve diğ. (2019) sıcaklığa bağlı olmayan sabit sürtünme katsayısı değerleri kullanarak SKK sürecini modellemiştir. Fakat sürtünme katsayısı sıcaklığın yanı sıra, takımın ve iş

parçasının hareketinden, temas geometrisinden ve uygulanan kuvvetten de etkilenir (Aziz ve diğ. 2018). Bu nedenle oluşturulan modelde sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri kullanılmıştır. Modelleme, sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısının azalacağı ilkesine göre yapılmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak kullanılan sürtünme katsayısı değerleri Tablo 7.4'te gösterilmiştir. Zhang ve diğ. (2011) tarafından yapılan analize bağlı olarak artan sıcaklıkla sürtünme katsayısının azalması Şekil 7.12'de gösterilen akış diyagramı ile açıklanmaktadır. Modelde 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda malzeme mukavemetinde ve sürtünme katsayısında ve buna bağlı olarak ısı oluşumunda azalma olduğu öngörülmüştür.

Tablo 7.4: Modelde kullanılan sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri (Aziz ve diğ. 2018).

Sıcaklık, T , (°C)	Sürtünme katsayısı, μ
25	0.30
300	0.25
420	0.20
543	0.01



Şekil 7.12: Sürtünme katsayısı seçimini açıklayan akış diyagramı (Aziz ve diğ. 2018).

7.2.4 Sınır Koşulları

İş parçası, yüksek hesaplama verimliliği elde etmek amacıyla mümkün olduğunca küçük kenar uzunlukları kullanılarak oluşturulmuştur. SKK işlemi bir kontrol hacmi yaklaşımı uygulanarak modellenmiştir. Takımın dönüş ekseninde takımın ilerleme ve dönüş hareketlerini belirlemek için bir referans noktası tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda olduğu gibi takıma 2° eğim açısı uygulanmıştır. Bu şekilde takım dönüş eksenini ile malzeme giriş yönü arasında 88° açı oluşmuştur. Dalma aşaması mümkün olduğunca kısa tutulmuştur. Takım 5 saniyede dalma aşamasını tamamlamıştır. Dalma aşamasında ilerleme hızı (kaynak hızı) sıfıra ayarlanmıştır. Dalma aşamasından sonra malzeme akış yönüne dik Euler kontrol hacminin yüzeylerine giriş ve çıkış hızı sınır koşulları uygulanarak, iş parçası malzemesinin Euler iş parçasından 45 saniye boyunca akmasına izin verilmiştir (Şekil 7.13). Bu malzeme akışı ile kaynak işlemdeki ilerleme modellenmiştir. Yer değiştirme kısıtlamaları ile Euler etki alanının yan, alt ve üst yüzeylerinden malzemenin kaçması

engellenmiştir. Şekil 7.14 mevcut modelde uygulanan hız sınır koşullarını göstermektedir.

SKK sırasında iş parçası yüzeylerinden çevreye ısı transferi olacağı açıktır. Bu nedenle sayısal modelde çevreye aktarılan ısı dikkate alınmıştır. İş parçasından ısı transferi alt yüzeyden $700 \text{ W/m}^2\text{K}$, üst yüzeyden $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ısı transfer katsayısı ile sağlanmıştır. Takım ve Euler iş parçası arasında genel temas koşulları uygulanmıştır.

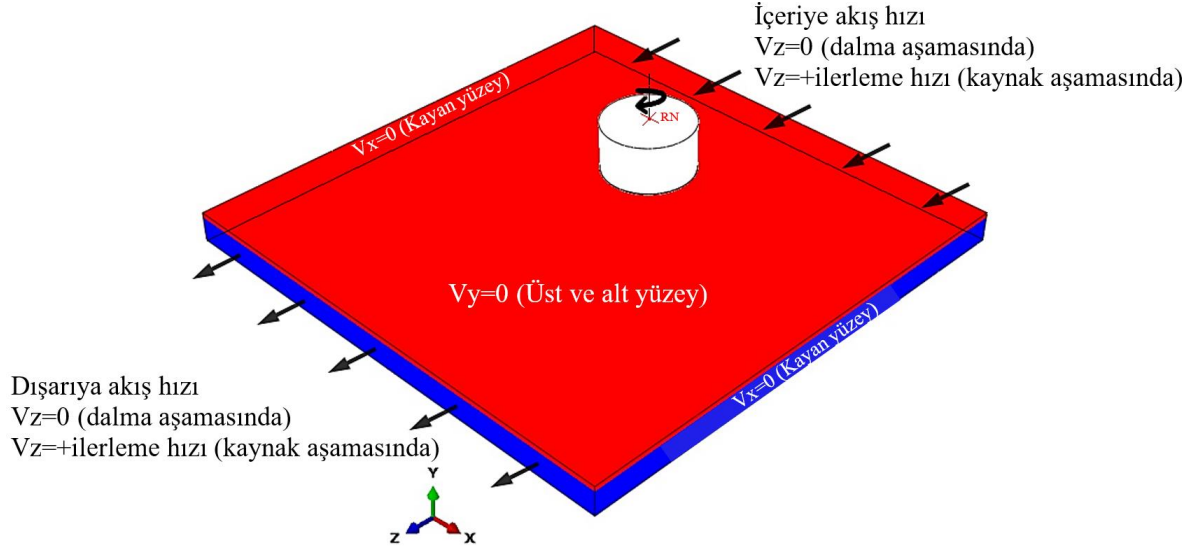
SKK işleminin modellenmesi, doğrusal olmayan malzeme davranışı nedeniyle zorluklar içermektedir. Malzemenin termal ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değiştiği bilinmektedir; bu nedenle oluşturulan modelde doğrusal olmayan sıcaklığa bağlı mekanik ve termal malzeme özellik değerleri kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 7.5'te gösterilmektedir.

Tablo 7.5: AZ61 magnezyum alaşımı için sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri.

Yoğunluk (Li ve diğ. 2015b)		Elastisite modülü (Ramezani ve Neitzert 2015)		Isı iletim katsayısı (Li ve diğ. 2015b)		Özgül ısı (Serindag ve Kiral 2017)	
T (°C)	(kg/m^3)	T (°C)	(GPa)	T (°C)	(W/m K)	T (°C)	(J/kg K)
20	1780	20	46	20	77	20	1050
200	1756	100	29	200	97	100	1130
300	1742	150	26	300	107	200	1170
400	1728	200	24	400	117	300	1210
500	1714	250	19	500	101	350	1260
600	1637	300	16	566	90	400	1300
		350	16			450	1340
		400	13			470	1340
						500	1360



Şekil 7.13: Sayısal modeldeki malzeme akışı.



Şekil 7.14: Sayısal modeldeki hız sınır koşulları.

7.2.5 Kütle Ölçeklendirme

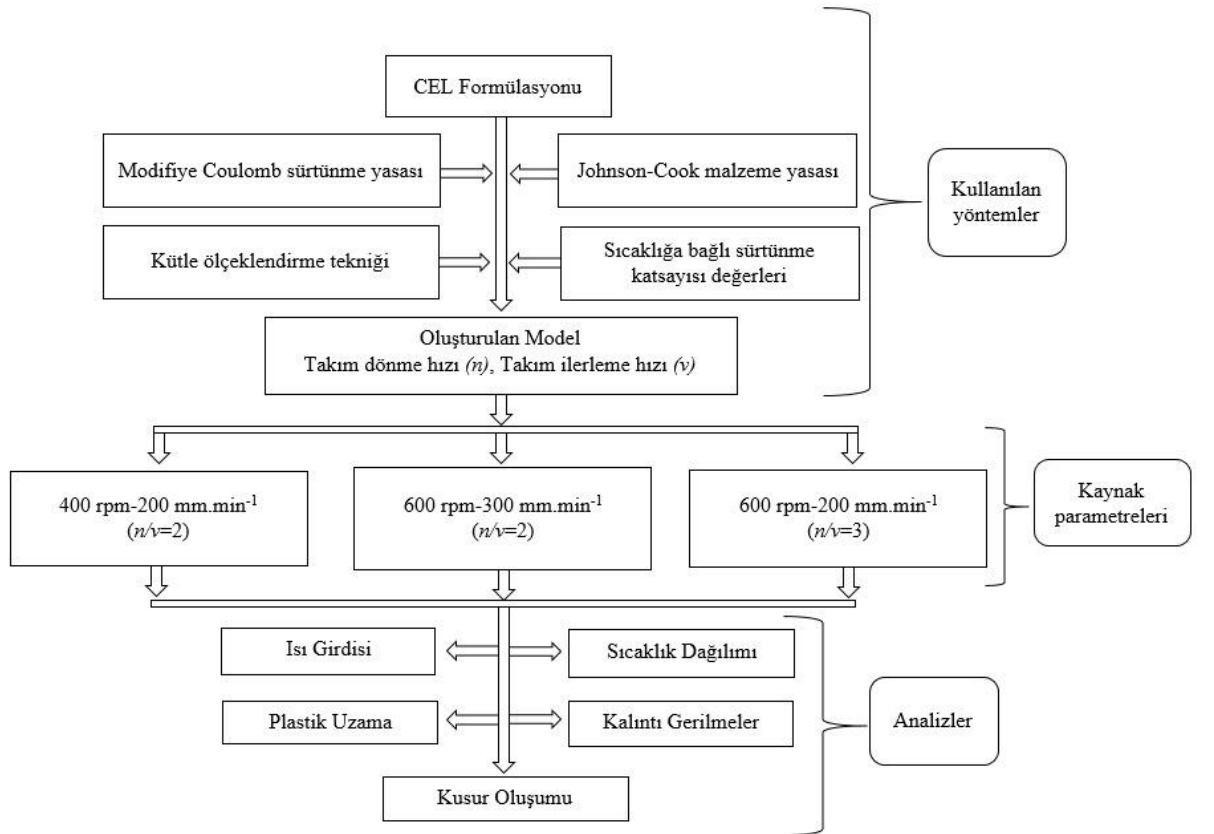
Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde karşılaşılan zorluklardan biri çözüm için gerekli olan bilgisayar işlem süresinin çok uzun olmasıdır. Daha büyük ağ boyutları oluşturularak bu işlem süresi kısaltılabilir, ancak bu durum sonuçların doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. SKK sürecini modelleme işleminde kütle ölçeklendirme tekniği kullanılarak simülasyon süresi en aza indirilebilir (Khosha ve diğ. 2010). Bir çalışmada, kütle ölçekleme tekniği plastik deformasyon ile metal şekillendirme sürecini modellemek için verimli bir şekilde kullanılmış (Hammelmüller ve Zehetner 2015) ve bir başkasında, SKK sürecinin dalma aşamasını modellemede başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Turkan ve Karakas 2021). Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde hesaplamaların kararlılığını sağlamak ve çözümdeki dalgalanmaları önlemek için zaman artışı belirli bir değer altında olmalıdır (Lorrain ve diğ. 2009). Kütle ölçeklendirmenin amacı malzeme yoğunluğunu yapay olarak artırarak sabit zaman artışı azaltmaktır. Bu yöntemde, termal özellikler,

termal zamanı sabit tutacak şekilde ayarlanır, bu da onu hıza bağlı veya zamana bağlı parametreler için uygun hale getirir (Ansari ve diğ. 2019). Navier denklemi, malzemenin termo-elastisitesini formüle etmek için kullanılır (Nicholson 2003):

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \text{tr}(\mathbf{E}) - \alpha \lambda \nabla T = \rho \frac{\delta^2 \mathbf{u}}{\delta t^2} \quad (7.6)$$

Bu denklemde; \mathbf{u} yer değiştirme vektörü, \mathbf{E} lineer uzama tensörü, α termal genişleme katsayısı ve ρ yoğunluktur. λ ve μ Lamé katsayılarıdır. Denklem 7.6'daki yoğunluk, yapay bir yoğunluk olan $\rho^* = k_m \rho$ ($k_m > 1$) ile değiştirildiğinde, kütle cinsinden ölçeklenir. Bu çalışmada k_m değeri 10^5 (Turkan ve Karakas 2021) olarak alınmıştır.

Bu çalışmadaki sayısal modelde kullanılan tüm yöntemler, kaynak parametreleri ve analizler Şekil 7.15'te bir akış şeması olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.15: Tüm metodoloji.

8. SONUÇLAR

8.1 Deneysel Çalışma Sonuçları

8.1.1 Kaynak Parametrelerinin Ön Değerlendirilmesi

Çok sayıda parametre ile ön kaynaklama işlemi yapılmıştır. 15 mm omuz çaplı takım ile yapılan bir deneme Şekil 8.1’de gösterilmektedir. Şekil 8.1 incelendiği zaman esas malzemede etkili bir birleştirme gerçekleştirilemediği ve malzemenin takıma sıvandığı görülmektedir. Burada omuz çapının boyut olarak yetersiz olmasından dolayı yeterli ısı girdisinin sağlanamadığı ve ayrıca omuzun pim tarafından karıştırılan malzemeye etkili bir şekilde baskı yapamadığı görülmektedir. 18 mm çaplı takım ile de benzer durumlar ile karşılaşıldığı için deneylere 21 mm çaplı takım ile devam edilmesi uygun bulunmuştur.

Ayrıca takım dönme hızının takım ilerleme hızına oranı çok yüksek olduğunda çok fazla çapak oluştuğu düşük olduğunda da yeterli plastik deformasyonun sağlanamadığı gözlenmiştir. Bu nedenle takım dönme hızının takım ilerleme hızına oranı 2 ile 3 arasında olması gerektiği üzerine durulmuş ve yarı otomatik freze tezgahının dönme ve ilerleme hızı limitlerine de bağlı kalarak kaynaklama işlemlerine devam edilmiştir.

21 mm omuz çaplı takım ile belirlenen parametrelerde (Tablo 7.2) birleştirilen numunelerin üst yüzey görünüşleri Şekil 8.2-8.9 arasında gösterilmektedir. 600 rpm 300 mm.min⁻¹, 1000 rpm 300 mm.min⁻¹ ve özellikle 1600 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametrelerinde çapak oluşumunun diğer parametrelere göre fazla olduğu görülmektedir. Çapak oluşumu kaynak bölgesinin kesitinin yerel olarak incelendiğinin bir göstergesidir ve istenilmeyen bir durumdur. Kaynak kalitesinin değerlendirilmesi ise çekme deneyi sonuçlarına göre yapılmıştır.



Şekil 8.1: 15 mm omuz çapına sahip takımda malzemenin takıma sıvanması.



Şekil 8.2: 600 rpm 300 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



Şekil 8.3: 800 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



Şekil 8.4: 1000 rpm 500 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



Şekil 8.5: 1250 rpm 600 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



Şekil 8.6: 1600 rpm 500 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



Şekil 8.7: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



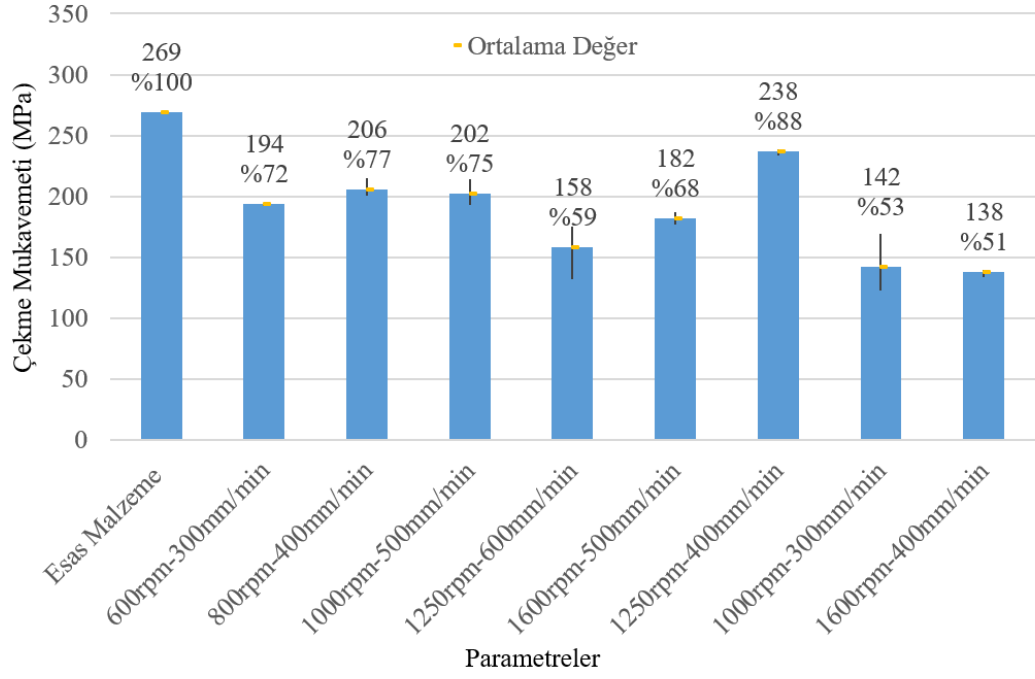
Şekil 8.8: 1000 rpm 300 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.



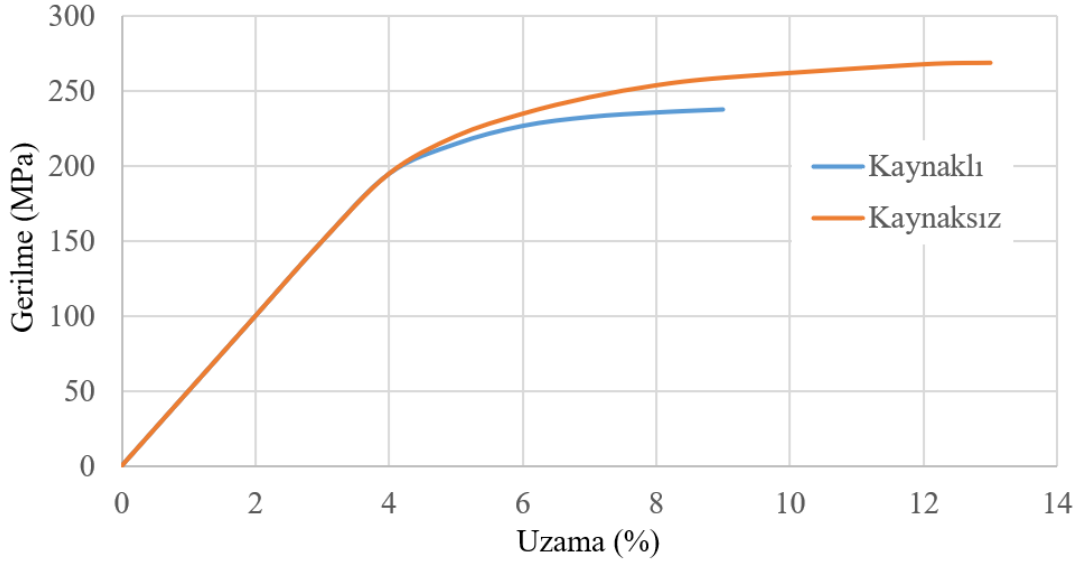
Şekil 8.9: 1600 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresi üst yüzey görünümü.

8.1.2 Çekme Deneyi Sonuçları

Yorulma deneyleri için en uygun kaynak parametresinin belirlenebilmesi için çekme deney sonuçları referans alınmıştır. Tablo 7.2’de belirlenen parametrelerde birleştirilen numunelerden elde edilen çekme dayanımının esas metalden elde edilen çekme dayanımı ile karşılaştırılması Şekil 8.10’da görülmektedir. Çekme dayanımına göre en yüksek mekanik özellikler %88’lik birleştirme verimliliği ile 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde elde edilmiştir. Bu kaynak parametresinde birleştirilmiş levhadan çıkarılan 3 adet numuneden oldukça benzer çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu durum kaynak dikişi boyunca sürekliliğin sağlandığını göstermektedir. Bu kaynak parametresinde birleştirilen numunelerden elde edilen gerilme birim uzama diyagramının esas malzemeden elde edilen gerilme uzama diyagramı karşılaştırılması Şekil 8.11’de gösterilmektedir. Kaynak işleminin malzemenin sünekliğini bir miktar azalttığı görülmektedir. 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafları Şekil 8.12’de gösterilmektedir. Çekme deneyi sonucu kırılmalar kaynak metalinden gerçekleşmiştir.



Şekil 8.10: Çeşitli parametrelerden elde edilen çekme dayanımının esas metal ile karşılaştırılması.



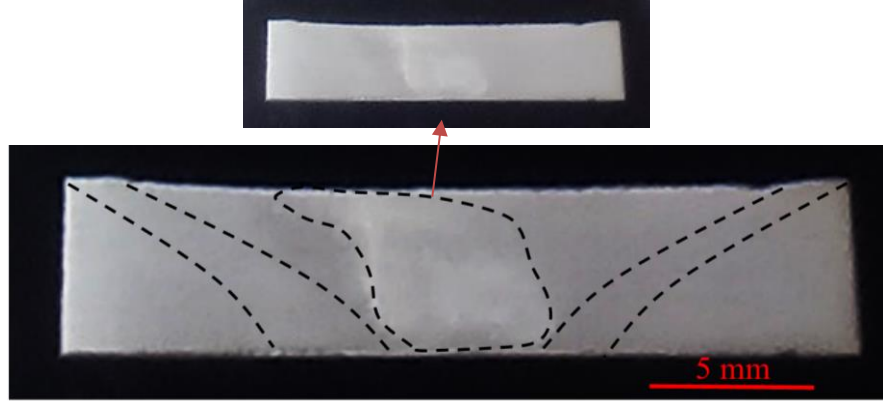
Şekil 8.11: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş kaynaklı numuneler ile kaynaksız numunelerin çekme diyagramlarının karşılaştırılması.



Şekil 8.12: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin çekme deneyi sonrası fotoğrafı.

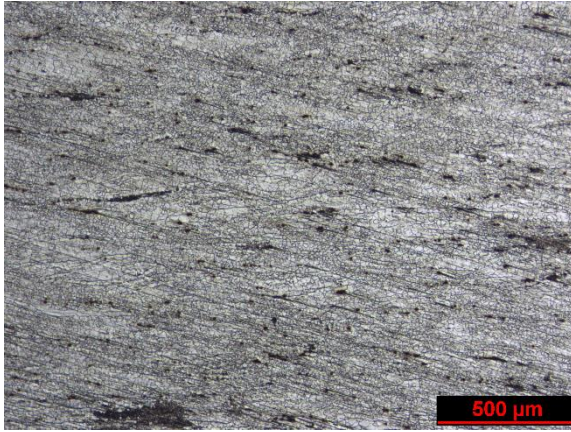
8.1.3 Mikro-Makro Yapı İnceleme Sonuçları

Çekme deneyi sonuçlarına göre en yüksek birleştirme verimliliğinin elde edildiği 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş levhanın enine kesitinin makro yapı fotoğrafı Şekil 8.13'te gösterilmektedir. Şekil 8.13 incelendiğinde 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirmenin tam olarak gerçekleştiği makro düzeyde herhangi bir kusurun oluşmadığı görülmektedir. KB belirgin bir şekilde görülmekle birlikte bütün bölgelerde tek fazlı α -Mg yapı oluştuğu için makro yapıda diğer bölgeler çok belirgin değildir. Ayrıca omuz dalma derinliğinden dolayı kesitte bir inceleme söz konusudur. Bu incelmenin mekanik olarak telafi edilebilmesi için incelmenin olduğu kaynak bölgesinde mekanik özelliklerin EM mekanik özelliklerinden daha yüksek olması gerekmektedir.

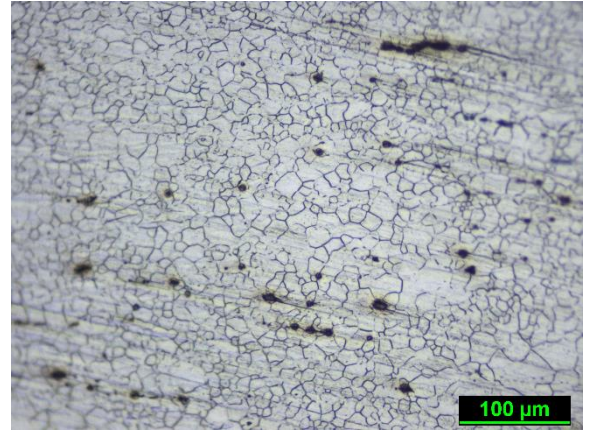


Şekil 8.13: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde kaynak kesitinin makro görüntüsü.

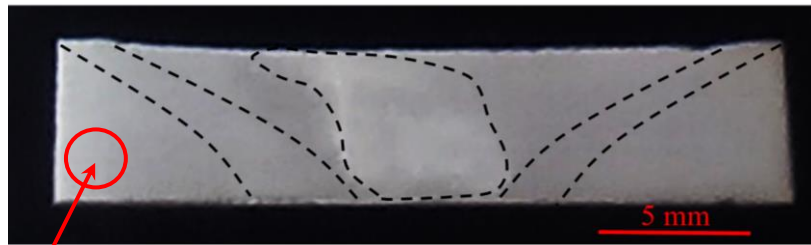
1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş levhanın enine kesitinden optik mikroskop ile iki farklı ölçekte mikro yapı fotoğrafları alınmıştır. EM, ITAB, TMEB ve KB'den alınmış mikroyapı fotoğrafları Şekil 8.14-8.17 arasında gösterilmektedir. Bütün bölgelerde tek fazlı α -Mg yapısının oluştuğu görülmektedir. KB ve EM'de TMEB ve ITAB'a oranla tanelerin daha küçük olduğu görülmektedir.



(a)



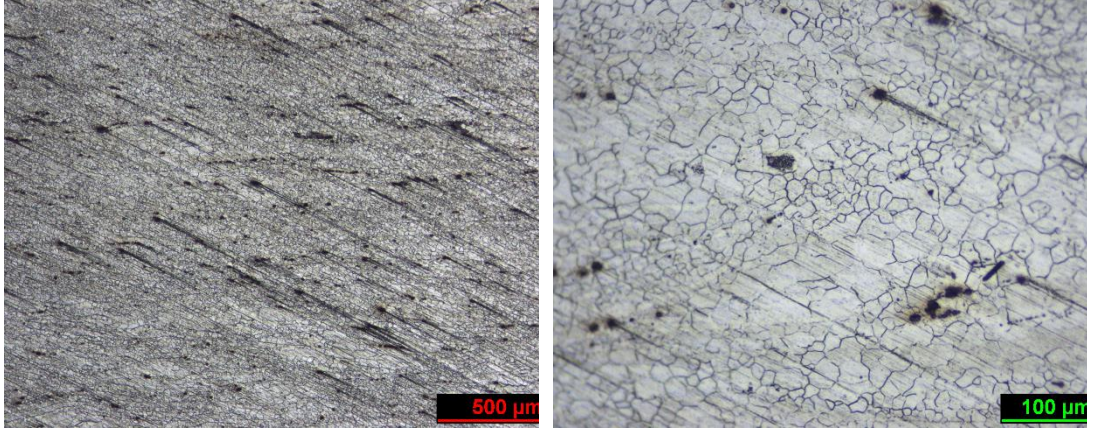
(b)



(c)

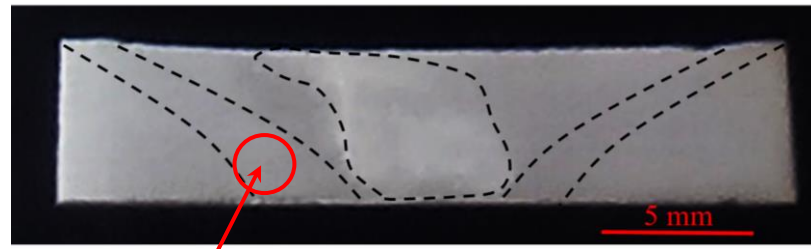
Görüntünün
alındığı yer

Şekil 8.14: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin EM mikroyapısı a) 1. Ölçek, b) 2. Ölçek, c) Görüntünün alındığı bölge.



(a)

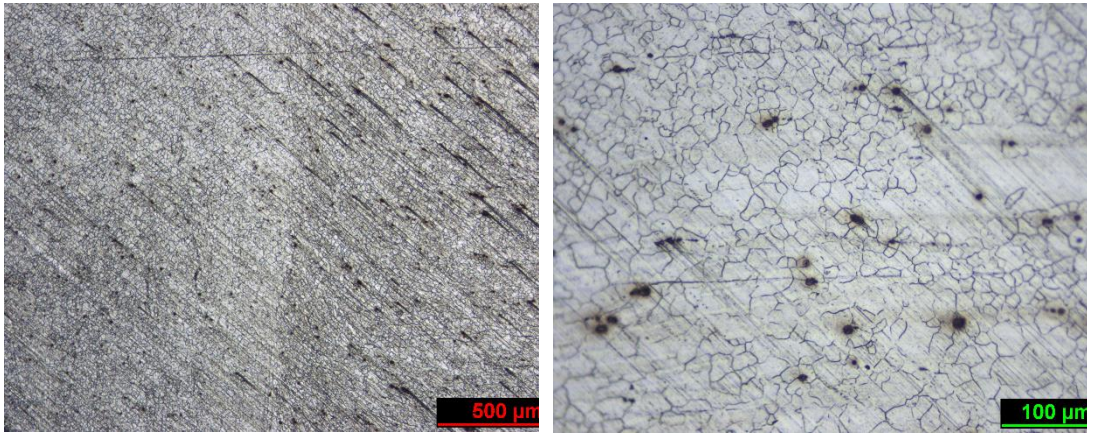
(b)



Görüntünün
alındığı yer

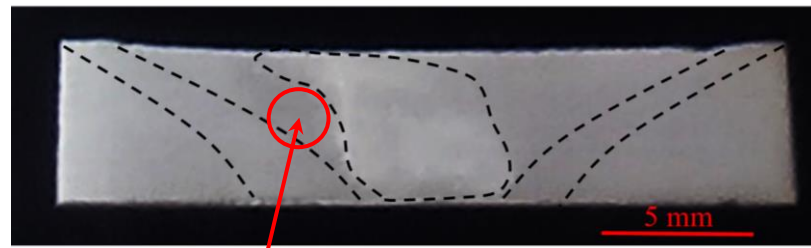
(c)

Şekil 8.15: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin ITAB mikroyapısı a) 1. Ölçek, b) 2. Ölçek, c) Görüntünün alındığı bölge.



(a)

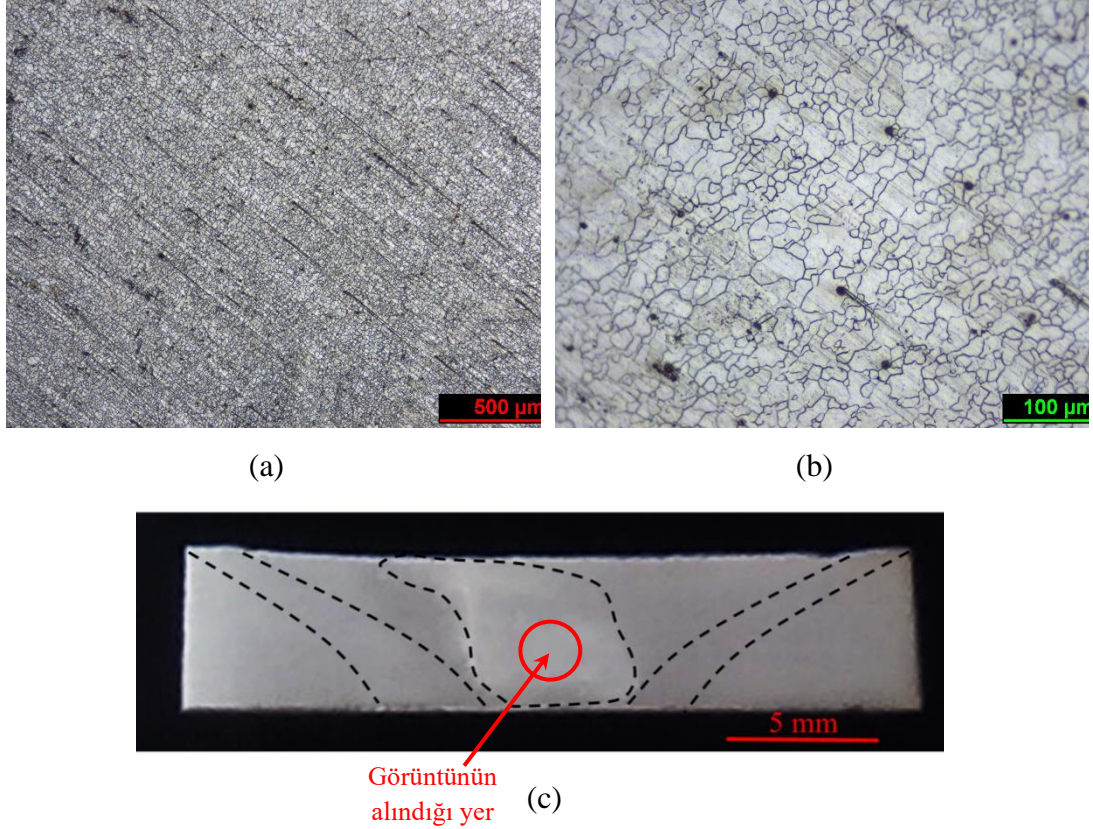
(b)



Görüntünün
alındığı yer

(c)

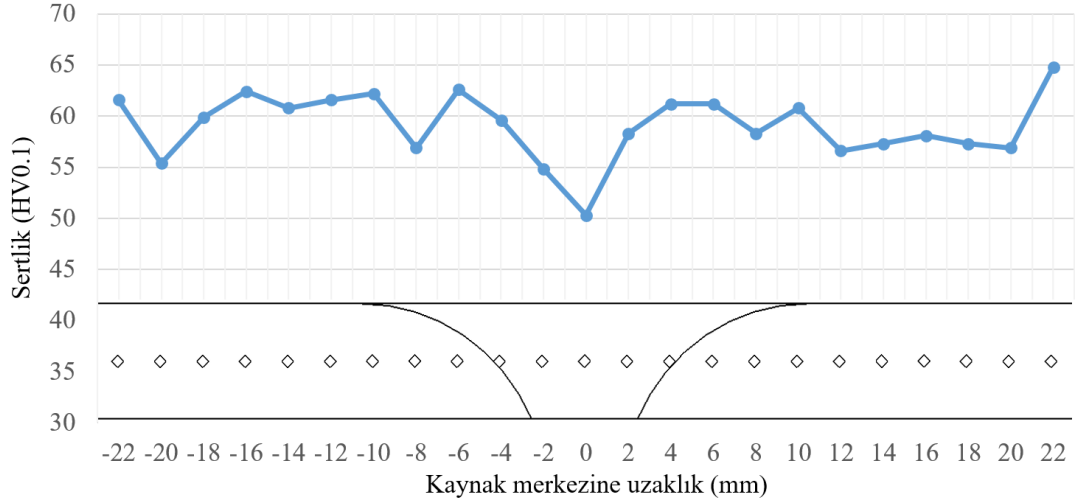
Şekil 8.16: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin TMEB mikroyapısı a) 1. Ölçek, b) 2. Ölçek, c) Görüntünün alındığı bölge.



Şekil 8.17: 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ parametresinde birleştirilmiş numunelerin KB mikroyapısı a) 1. Ölçek, b) 2. Ölçek, c) Görüntünün alındığı bölge.

8.1.4 Sertlik İnceleme Sonuçları

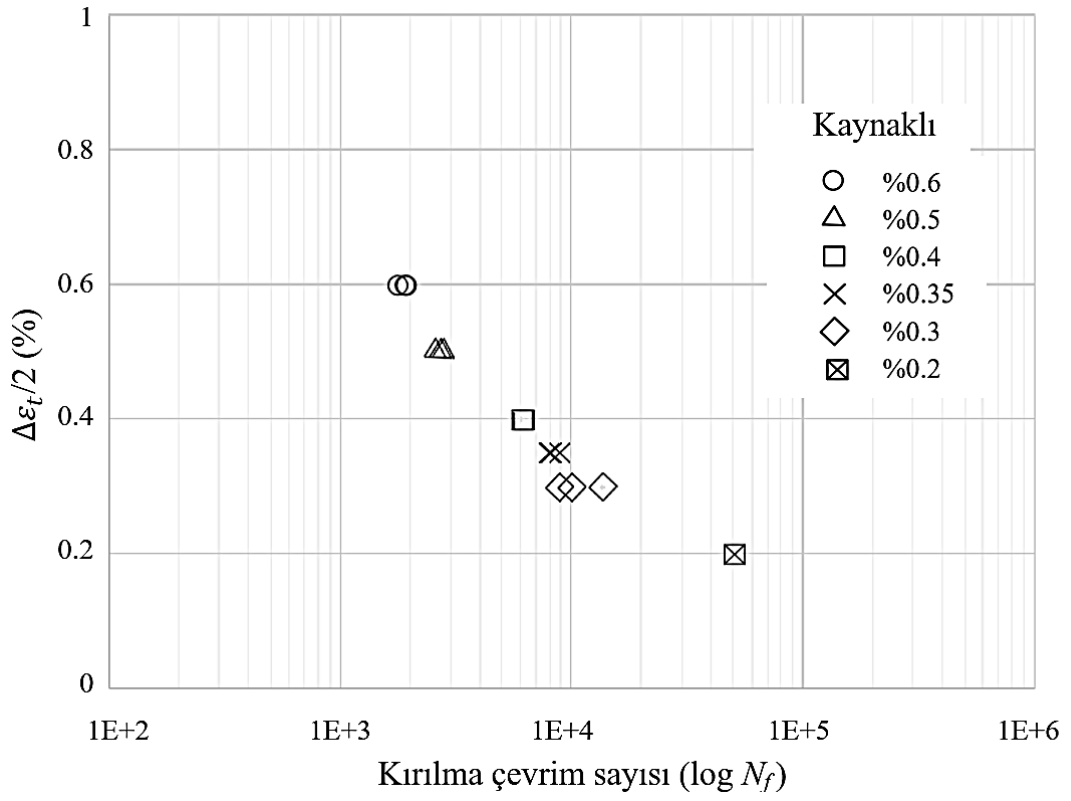
Çekme deneyi sonuçlarına göre en yüksek birleştirme verimliliğinin elde edildiği 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş levhanın enine kesitinden ölçülen mikro sertlik değerleri Şekil 8.18’de gösterilmektedir. En düşük sertliğin KB merkezinde elde edildiği KB’ye yakın olan TMEB’de sertliğin biraz daha yüksek olduğu ve ITAB ve EM’de sertliğin belirgin bir şekilde değişmediği görülmektedir. Genel olarak kaynak enine kesitindeki sertlik dağılımı değerlendirildiğinde sertlikte çok büyük dalgalanmalar tespit edilmemiştir. SKK işleminde düşük ısı girdisi ile kaynak işleminin gerçekleştirilmesinden ve bu nedenle bütün bölgelerde tek fazlı α -Mg yapı oluşmasından dolayı sertlikte büyük dalgalanmaların görülmemesi normal karşılanmıştır.



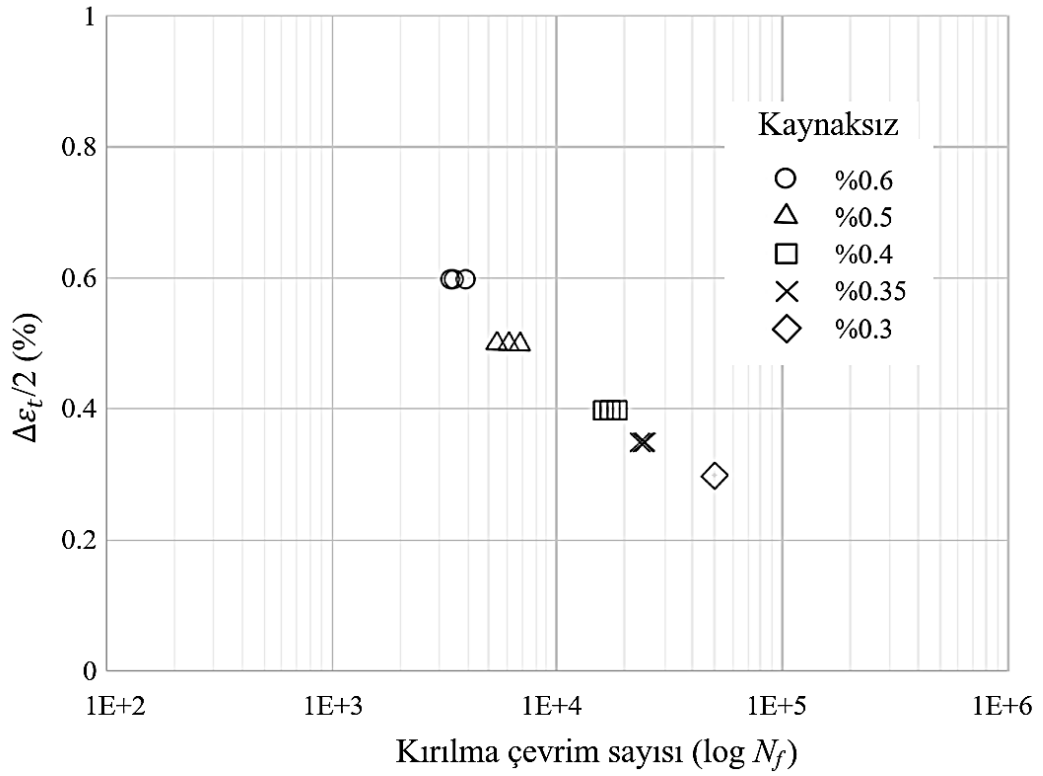
Şekil 8.18: Kaynak kesitinde sertlik dağılımı.

8.1.5 Düşük Çevrim Yorulma Deneyi Sonuçları

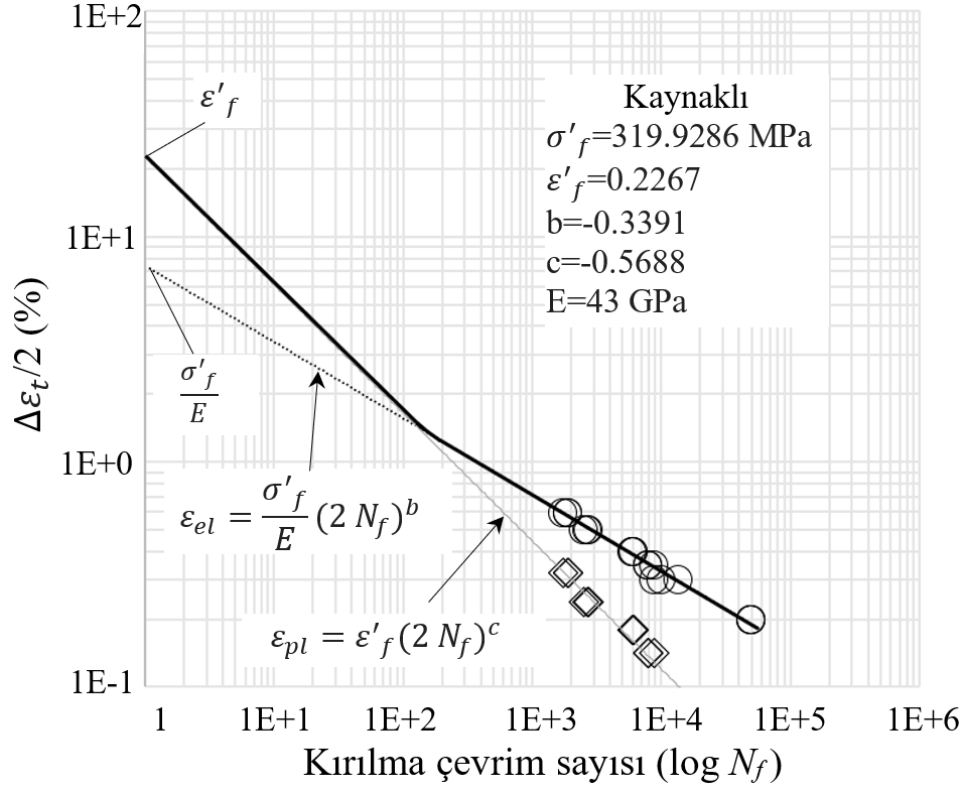
En yüksek birleştirme verimliliğinin elde edildiği 1250 rpm-400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerden elde edilen düşük çevrim yorulma deney sonuçları sırasıyla Şekil 8.19 ve Şekil 8.20’de gösterilmektedir. Düşük çevrim yorulma sınırı olarak 50000 çevrim dikkate alınmıştır. %0.2 uzama oranında hem kaynaklı hem de kaynaklı olmayan numunelerin tümü bu çevrim sınırını hasara uğramadan geçmiştir. %0.3 uzama oranında kaynaklı olmayan numunelerin tümü bu sınırı aşmıştır fakat bu uzama oranında kaynaklı numunelerin hasara uğramaya başladığı görülmüştür. Artan uzama oranıyla birlikte hem kaynaklı hem de kaynaklı olmayan numuneler hasara uğramıştır. Her bir uzama oranı için kaynaklı olan numunelerden elde edilen çok yakın hasara kadar olan çevrim sayısı sonuçları kaynak dikişi boyunca kaynak kalitesinin aynı olduğunu göstermiştir. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerin kısa zaman yorulma parametreleri Coffin-Manson-Basquin denklemine göre elde edilmiştir. Şekil 8.21 ve Şekil 8.22’de elastik ve plastik uzama oranına göre elde edilen parametreler gösterilmektedir.



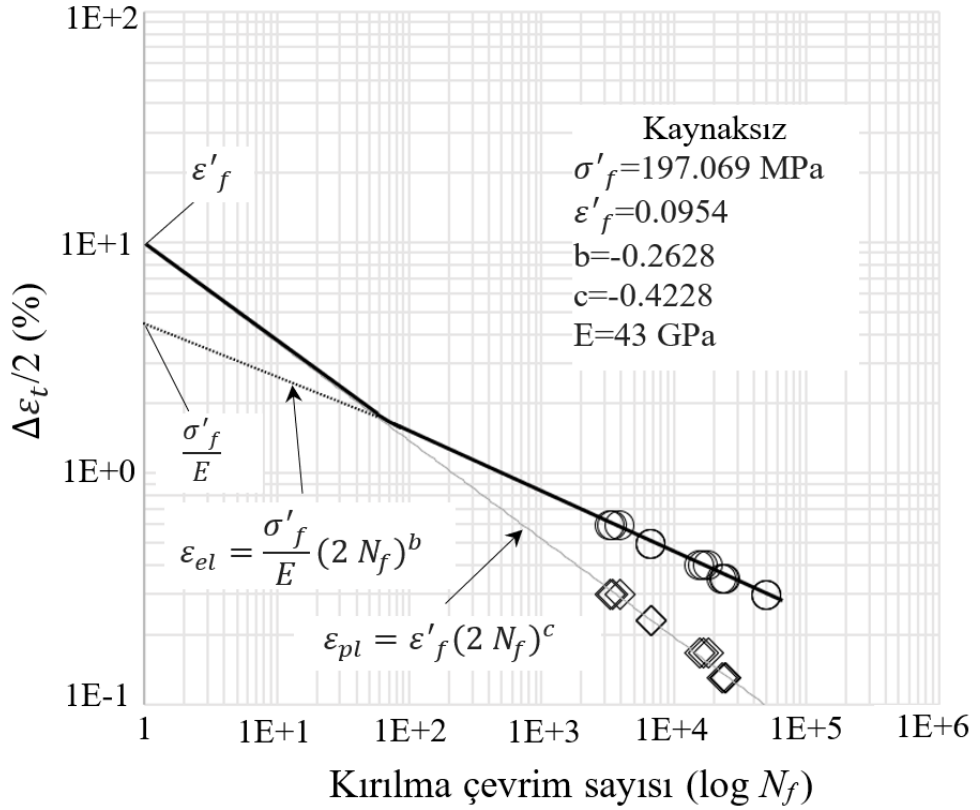
Şekil 8.19: Kaynaklı numunelerin uzama kontrollü düşük çevrim yorulma deney sonuçları.



Şekil 8.20: Kaynaksız numunelerin uzama kontrollü düşük çevrim yorulma deney sonuçları.



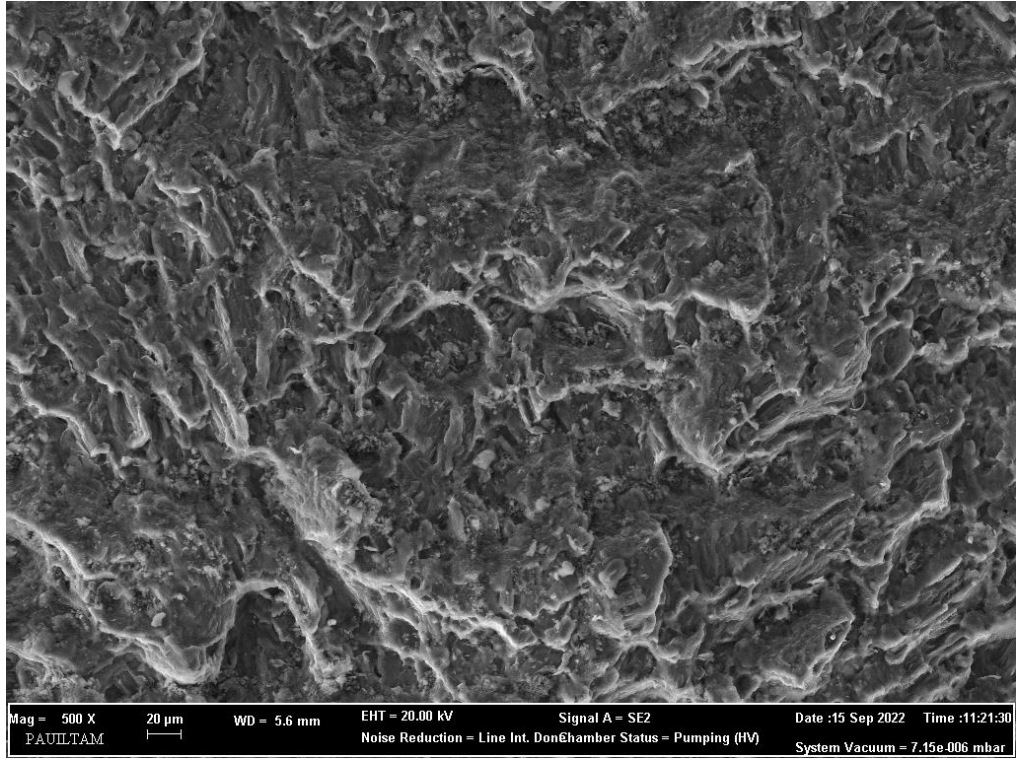
Şekil 8.21: Kaynaklı numunelerin Coffin-Manson-Basquin denklemine göre kısa zaman yorulma parametreleri.



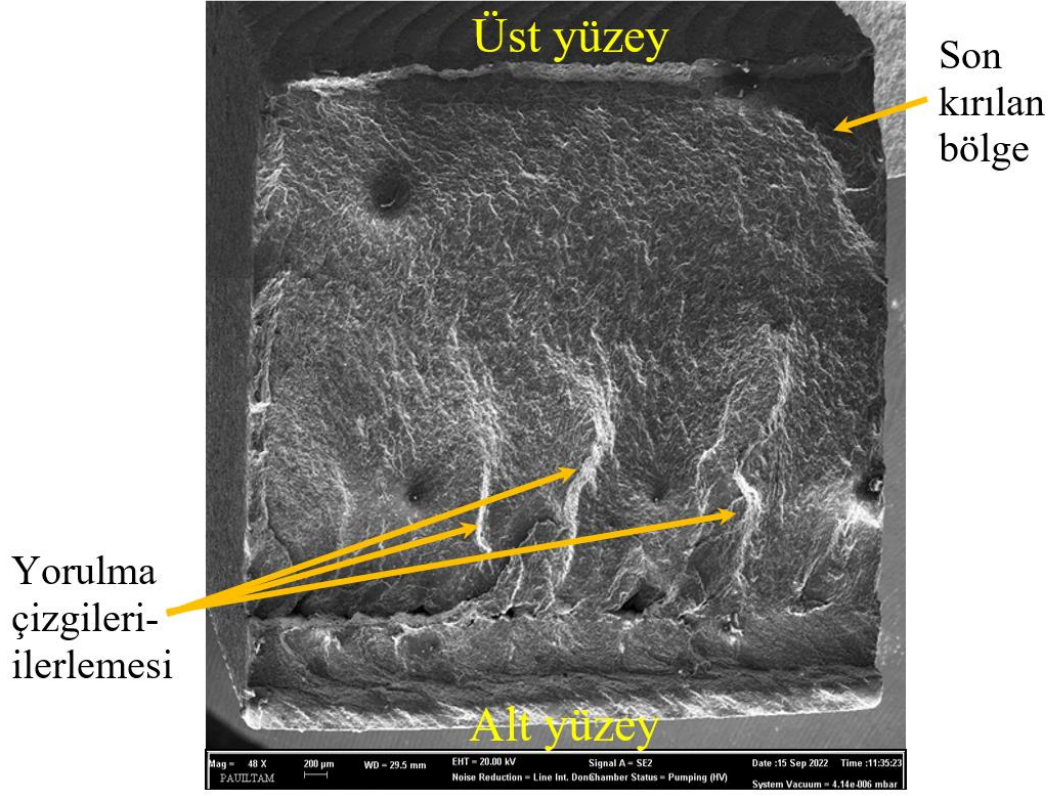
Şekil 8.22: Kaynaksız numunelerin Coffin-Manson-Basquin denklemine göre kısa zaman yorulma parametreleri.

8.1.6 SEM İnceleme Sonuçları

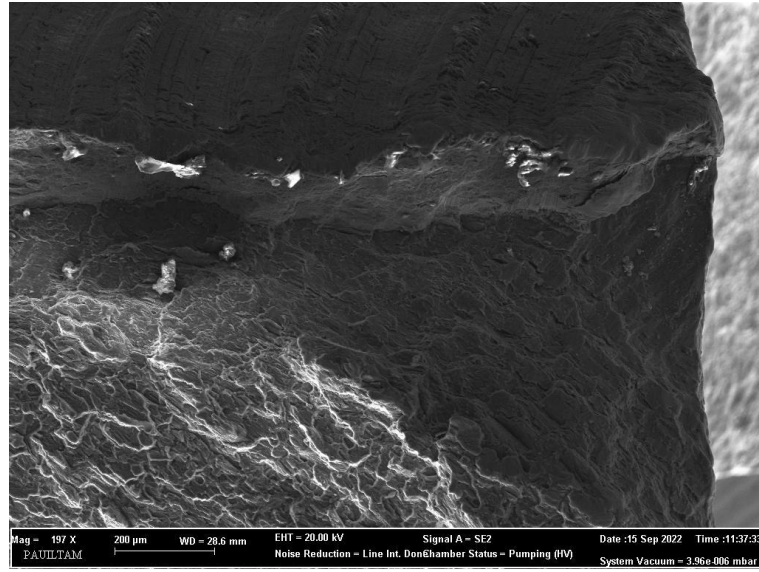
Yorulma deneyleri sonucunda kırılan kaynaklı deney numunelerinin kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Kaynaklı yorulma deney numunelerinin kırık yüzeyleri genel olarak değerlendirildiğinde kırılma yüzeyi asal gerilme yönünün normalindedir. Bu nedenle numunelerin gevrek kırılma özelliği gösterdiği söylenebilir (Şekil 8.23). Şekil 8.24'te görüldüğü üzere yorulmanın kaynağın alt yüzeyinden başlayıp üst yüzeye doğru ilerlediği görülmektedir. Klasik SKK işleminde kaynağın kök kısmının yorulma hasarında kritik bölge olduğu düşünülmektedir. Uygulamada takım piminin alt tablaya temasını engellemek için kaynak işlemi sırasında takım pimi ile alt tabla arasında 0.05 mm mesafeye müsaade edilmiştir. Bu nedenle kaynak kök kısmında işlemin doğasından kaynaklanan soğuk birleştirme oluşma ihtimali yüksektir.



Şekil 8.23: Kaynak metali kırık yüzey SEM görüntüsü.



(a)



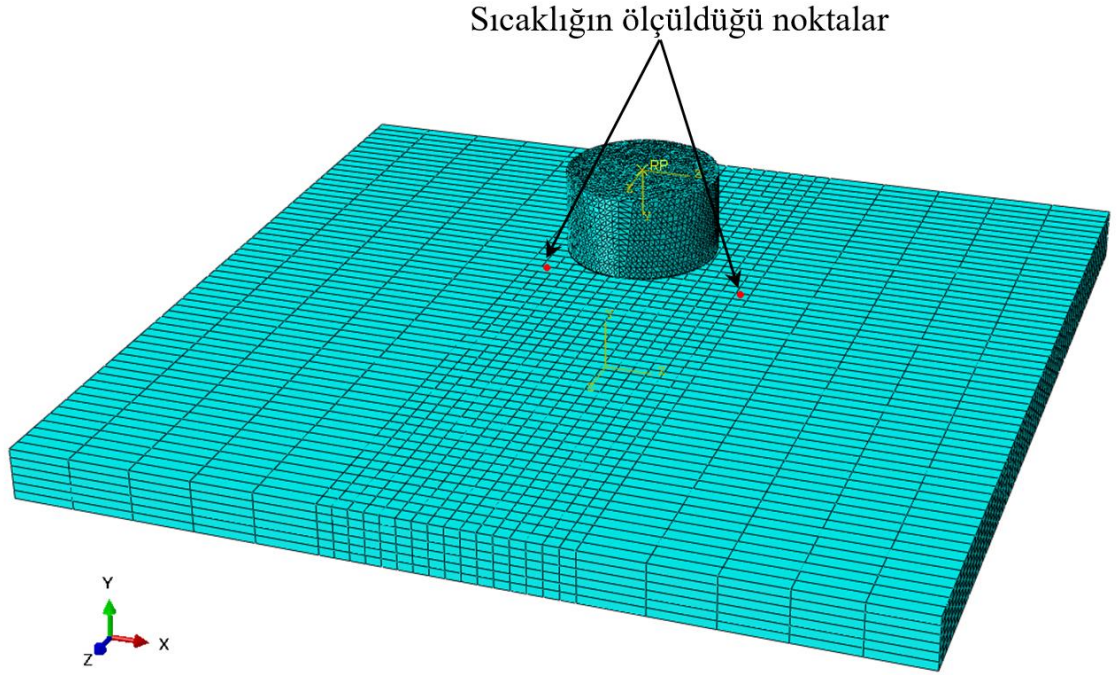
(b)

Şekil 8.24: Yorulma deneyi sonucunda kaynaklı kırık yüzey a) Genel görüntü, b) Son kırılma bölgesi.

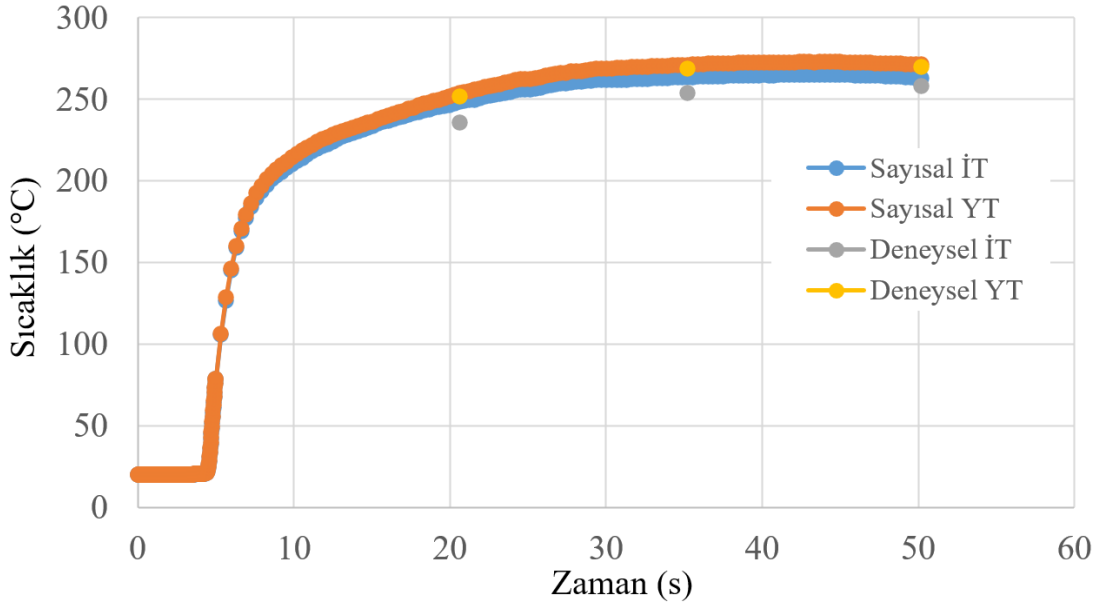
8.2 Sayısal Çalışma Sonuçları

Oluşturulan sayısal modelden elde edilen sıcaklık değerleri literatürdeki deneysel çalışmadan elde edilen sıcaklık değerleri (Lee ve diğ. 2017) ile karşılaştırılarak oluşturulan sayısal model doğrulanmıştır. Literatürdeki deneysel çalışmada, kaynak dikişi boyunca iş parçası üzerine yerleştirilen ısı-çiftler ile kaynak dikişinin her iki tarafında üç noktadan sıcaklık ölçülmüştür. Dolayısıyla literatürdeki deneysel çalışmada takım belirli bir ısı-çifti geçtikten sonra o ısı-çiftteki sıcaklık düşmüştür. Ancak oluşturulan sayısal modelde, kaynak için gerekli ilerleme hareketi, modelleme gereği giriş ve çıkış hız sınır koşulu ile sağlanmıştır. Bu nedenle oluşturulan sayısal modelde kaynak işlemi sırasında sıcaklık iki sabit noktadan ölçülmüştür. Bu noktalar Şekil 8.25'te gösterilmektedir. Dolayısıyla oluşturulan sayısal model ile deneysel çalışmadaki sıcaklığın karşılaştırılmasında deneysel çalışmadaki ısı-çiftlerden elde edilen sıcaklıkların sadece maksimum değerleri kullanılmıştır. Şekil 8.26 400 rpm takım dönüş hızı, 300 mm.min⁻¹ ilerleme hızı için kaynak merkezinden 12 mm mesafede literatürdeki deneysel çalışma ve oluşturulan sayısal modelden elde edilen sıcaklığın karşılaştırmasını göstermektedir. Oluşturulan modelde dalma aşaması sırasında sıcaklık, takım omuzu iş parçası ile temas edene kadar çok az artmıştır. Takım omuzunun iş parçası ile temasından sonra ise sıcaklık hızla artmıştır. SKK esnasında takım omuzunun ısı üretimi üzerinde takım piminden daha büyük bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Memon ve diğ. 2021b, Zhang ve diğ. 2014), ve takım omuzu ile iş parçasının teması sağlanana kadar önemli bir sıcaklık artışı beklenmemesi normaldir. Hem literatürdeki deneysel çalışmada hem de oluşturulan sayısal çalışmada zamana bağlı olarak sıcaklık dağılımının kaynak aşamasında azalarak artan bir büyüme eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu sıcaklık dağılımı belirli bir süre sonra sabitleme eğilimindedir çünkü yapılan modelleme gereği iş parçasının sıcaklığı arttığında, sürtünme katsayısı değeri ve dolayısıyla ısı girdisi azalmaktadır. Bu nedenle, kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık zamanla sabit olma eğilimindedir. Literatürdeki deneysel sonuçlar ve oluşturulan sayısal model karşılaştırıldığında, zaman içinde kaynak işlemi sırasında sıcaklık dağılımlarında çok benzer değişiklikler olduğu görülmektedir, bu da oluşturulan sayısal modeldeki malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının doğru bir şekilde belirlendiğini göstermektedir. 400 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde hem oluşturulan

sayısal modelde hem de literatürdeki deneysel çalışmada YT'de İT'den biraz daha yüksek sıcaklık değerleri ölçülmüştür.



Şekil 8.25: Oluşturulan sayısal modelde sıcaklığın ölçüldüğü noktalar.



Şekil 8.26: 400 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde oluşturulan sayısal modelden elde edilen sıcaklığın literatürdeki deneysel çalışma ile karşılaştırılması.

SKK sırasındaki ısı girdisi (Q), Frigaard denklemi ile takım ilerleme hızından bağımsız olarak hesaplanabilir (Frigaard ve diğ. 2001):

$$Q = \int_0^{r_o} 2\pi\mu\omega Pr^2 dr \quad (8.1)$$

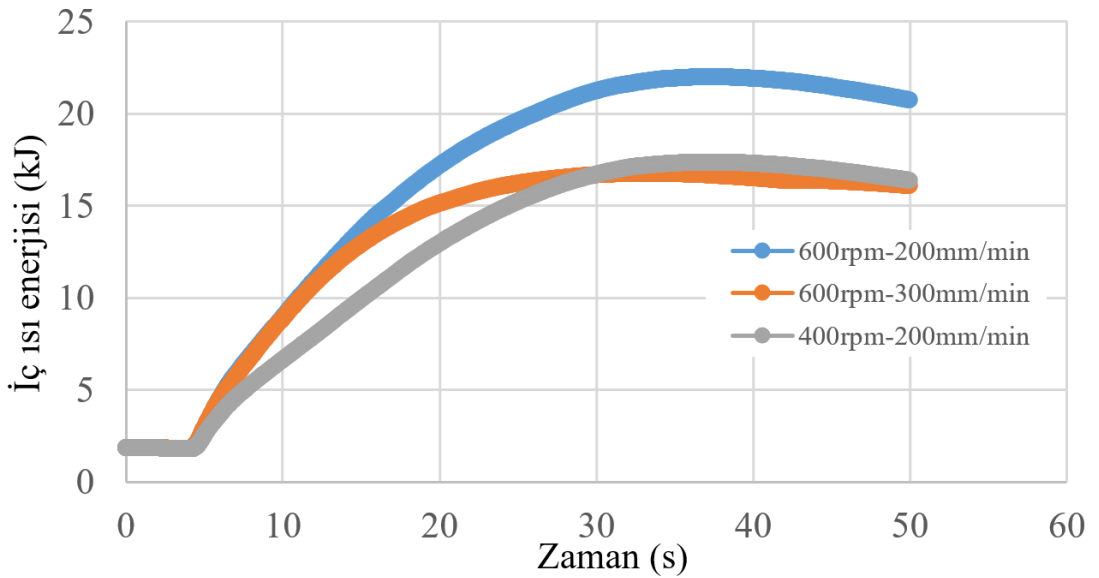
Bu denklemde, r_o takım omuzunun yarıçapıdır, r takım piminin yarıçapıdır, μ sürtünme katsayısıdır, P bası gerilmesidir ve ω açısal hızdır. Bu denkleme göre, SKK esnasında ısı girdisi sabit takım bası gerilmesi için takım dönüş hızının (n) takım ilerleme hızına (v) oranı ile doğru orantılı olarak değişir (denklem 8.2).

$$Q \propto \frac{n}{v} \quad (8.2)$$

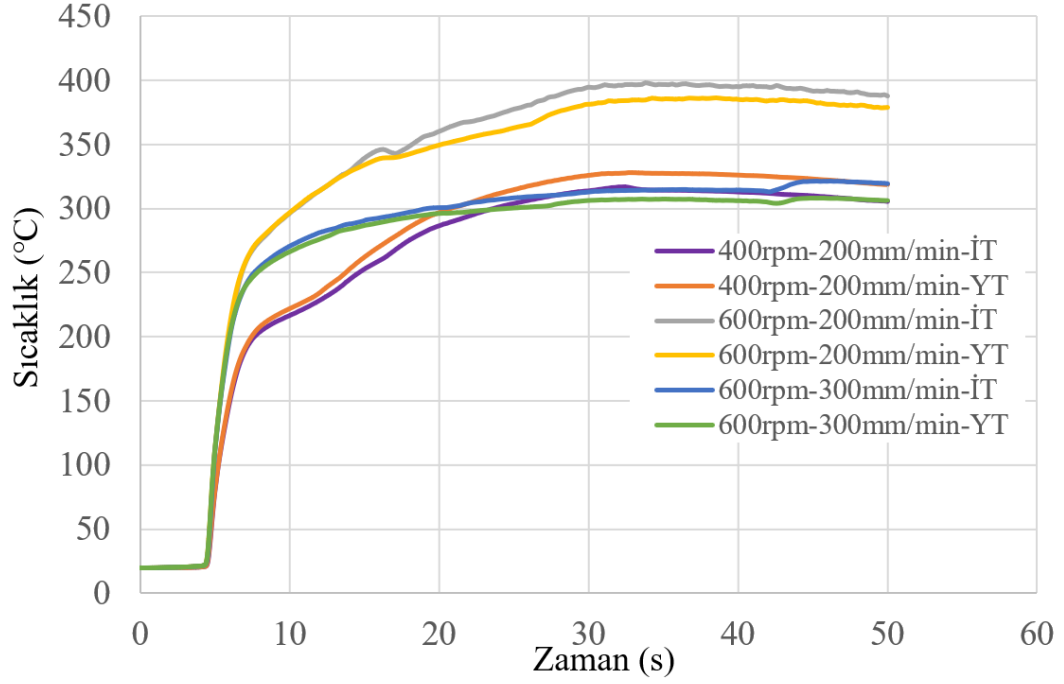
Bu oran arttıkça veya azaldıkça ısı girdisi de buna bağlı olarak artar veya azalır. Başka bir deyişle, daha yüksek ısı girdisinin, sabit bir takım ilerleme hızında takım dönüş hızının arttırılmasından veya sabit bir takım dönüş hızında takım ilerleme hızının azaltılmasından kaynaklanabileceği sonucuna varılabilir (Sun ve diğ. 2017). Takım dönüş hızının artması ve takım ilerleme hızının azalması sonucunda takım omuzunun iş parçası ile temas süresi artmakta ve dolayısıyla toplam ısı girdisi artmaktadır. Termomekanik bir süreç olan SKK işleminde kaynak sırasındaki ısı girdisi birleştirme kalitesi açısından önemlidir. Yüksek ısı girdisi nedeniyle kaynak hataları meydana gelebilir ayrıca düşük ısı girdisi nedeniyle yetersiz plastik deformasyon meydana gelebilir ve buda kaynak hatalarına neden olabilir (Khan ve diğ. 2017). Uygun ısı girdisi değerleri sağlamak için uygun dönüş ve ilerleme hızlarının seçilmesi önemlidir. Bunun yanında, kaynak parametrelerinin optimize edilmesi sayesinde düşük ısı girdisinde de takım etrafındaki plastikleşme ve malzeme akışının maksimize edilmesiyle kusurlar önlenir. Malzemenin plastik hareketinde takım geometrisi büyük önem taşımaktadır. Bazı çalışmalarda uygun takım geometrisi ile düşük ısı girdilerinde büyük deformasyon oranlarının sağlandığı ve hatasız birleştirmelerin elde edildiği rapor edilmiştir (Caetano ve diğ. 2018). Diş yapısı ve bu diş yapısında bulunan frezeleme yüzeyleri, düşük ısı girdisi altında deformasyon oranını artırarak kaynak hatalarını önleyebilir (Huang ve diğ. 2019, 2018b). Ancak deneysel çalışmalardaki kaynak hataları düşük ısı girdisi nedeniyle yetersiz plastik deformasyondan kaynaklandığından bu tez çalışmasında sayısal analiz ısı girdisi açısından değerlendirilmiştir.

Şekil 8.27 çeşitli kaynak parametreleri için oluşturulan sayısal modelden elde edilen iç ısı enerjisinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. 400 rpm-200

mm.min⁻¹, 600 rpm -300 mm.min⁻¹ kaynak parametrelerinde yani takım dönüş hızının takım ilerleme hızına oranı 2 olduğunda kaynakta yaklaşık olarak aynı ısı girdisi değerleri elde edilmiştir. Ancak 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde yani oran 3 olduğunda ısı girdisi daha yüksektir. Oran 3 olduğundaki maksimum ısı girdisi, oran 2 olduğu zamanki maksimum ısı girdisine göre yaklaşık 1/3 daha yüksektir. Bu durum denklem 8.2’de belirtilen ısı girdisinin sabit takım bası gerilmesi için takım dönüş hızının takım ilerleme hızına oranı ile doğru orantılı olarak değişir durumunu desteklemektedir. Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımlarının ısı girdisinden etkileneceği açıktır; daha yüksek ısı girdisi, kaynak bölgesinde daha yüksek sıcaklıklara neden olur. Ayrıca sıcaklık arttıkça malzemenin plastik deformasyonu daha kolay gerçekleşecektir. Şekil 8.28 400 rpm-200 mm.min⁻¹, 600 rpm-300 mm.min⁻¹, 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametrelerinde kaynak merkezinden 12 mm uzaklıkta ölçülen sıcaklıkların zamana bağlı değişimini göstermektedir. 400 rpm-200 mm.min⁻¹, 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametrelerinde (oran 2) işlem sonunda yaklaşık olarak aynı sıcaklıklar elde edilmiştir. Bunun yanında 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde (oran 3), daha yüksek ısı girdisi nedeniyle daha yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir.

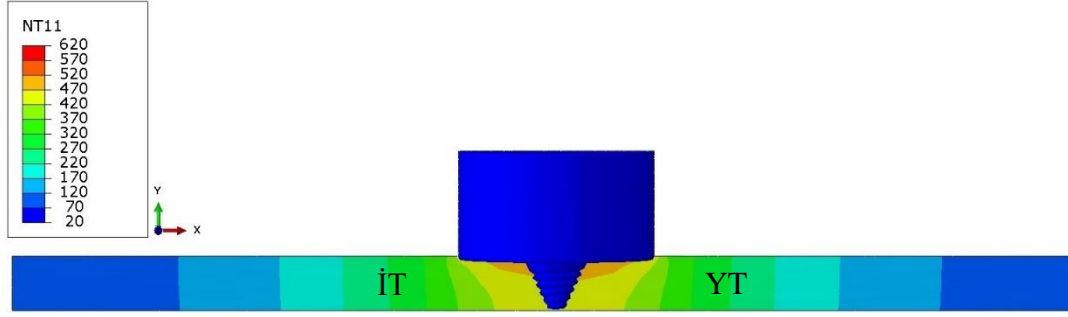


Şekil 8.27: Sayısal modelde iç ısı enerjilerinin karşılaştırılması.

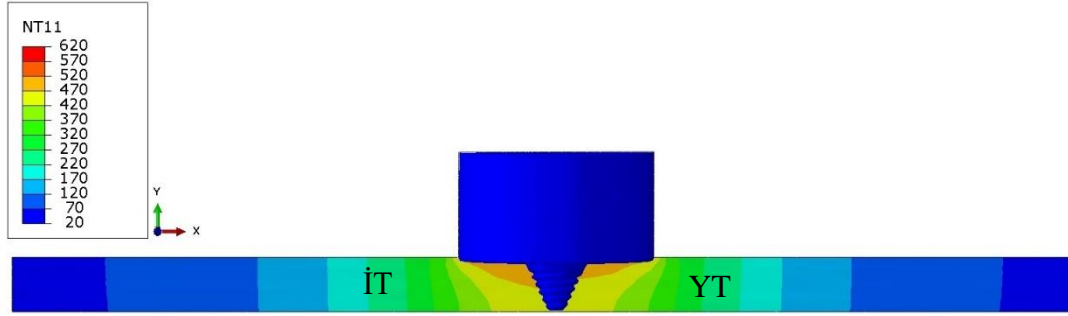


Şekil 8.28: Sayısal modelde kaynak merkezinden 12 mm uzaklıkta sıcaklık değişimi.

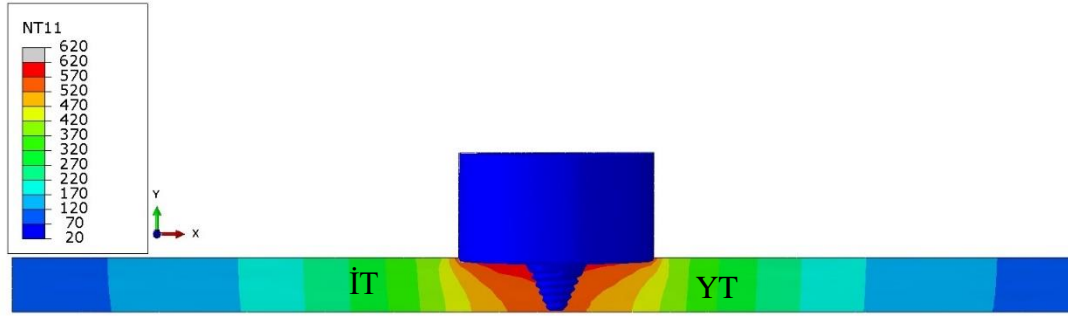
22.5 saniyede kaynak bölgesinin enine kesitindeki sıcaklık dağılımları Şekil 8.29 ile Şekil 8.31 arasında gösterilmiştir. 400 rpm-200 mm.min⁻¹, 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametrelerinde (oran 2), kaynak bölgesinin enine kesitindeki sıcaklık dağılımları oldukça benzerdir (Şekil 8.29 ve Şekil 8.30). Bu durum sabit takım baskı kuvvetinde ısı girdisinin takım dönüş hızının takım ilerleme hızına oranı ile doğru orantılı olduğu durumu destekler. 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde (oran 3), daha yüksek ısı girdisi nedeniyle daha yüksek kaynak bölgesi sıcaklık değerleri meydana gelmiştir (Şekil 8.31). Genel olarak değerlendirildiğinde temas yüzeylerinde yüksek sıcaklıklar meydana geldiği görülmüştür. Kütle ölçeklendirme yöntemi temas yönetimini etkilediğinden temas yüzeylerinde daha yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Temas yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinde kütle ölçeklendirmesi nedeniyle dalgalanmaların görülebildiği, ancak genel sıcaklık dağılımının iyi tahmin edilebileceği üç farklı çalışmada belirtilmiştir (Ansari ve diğ. 2019, Lorrain ve diğ. 2009, Turkan ve Karakas 2021). Ayrıca 400 rpm’de yapılan birleştirmelerde YT’de daha yüksek sıcaklık değerleri kaydedilirken, 600 rpm’de yapılan birleştirmelerde İT’de daha yüksek sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 8.29: 400 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde enine kesit sıcaklık dağılımı.



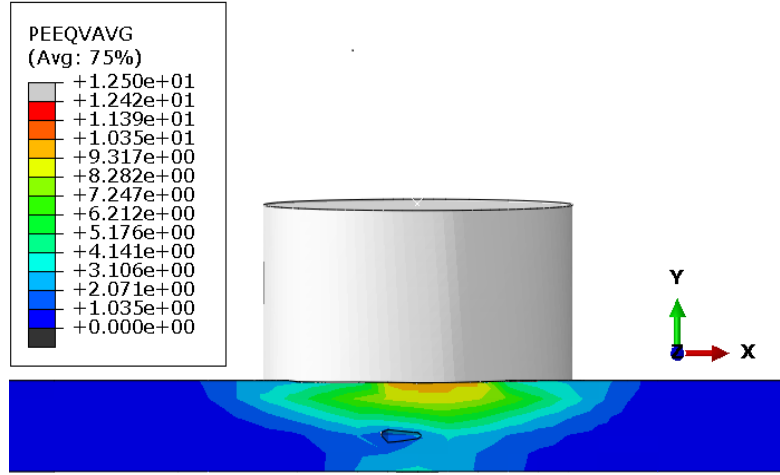
Şekil 8.30: 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde enine kesit sıcaklık dağılımı.



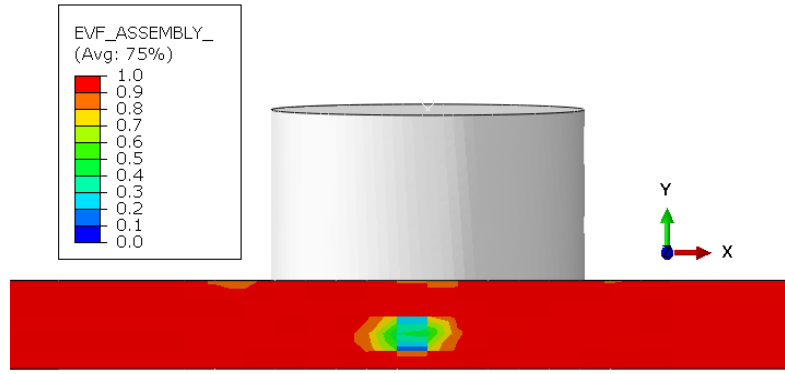
Şekil 8.31: 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde enine kesit sıcaklık dağılımı.

PEEQVAVG değeri, kaynak bölgesinde meydana gelen plastik deformasyon miktarının bir göstergesidir. ABAQUS yazılımındaki PEEQVAVG değeri, plastik kayma deformasyonu miktarını gösterir. Dönme hızı arttıkça ve ilerleme hızı azaldıkça kaynak kesitindeki plastik deformasyon artmıştır. 400 rpm-200 mm.min⁻¹, 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametrelerinde (oran 2) kaynak metalinin kesitindeki kusurlar Şekil 8.32 ve Şekil 8.33'te açıkça görülmektedir. Bu kusurların nedeni düşük ısı girdisi nedeniyle yetersiz plastik deformasyondur. Her iki kaynak parametresinde de hatalar İT'da oluşmuştur. Modelde oluşan kusurların deneysel çalışmadaki kusurlarla tam olarak aynı konumda olmadığı ve iş parçasına göre aynı en-boy oranına sahip olmadığı görülmektedir. Aynı durumu bildiren bir çalışmada (Zhu ve diğ. 2017) sabit bir sürtünme katsayısı değerinin kullanılmasının bu farklılığa neden olabileceği

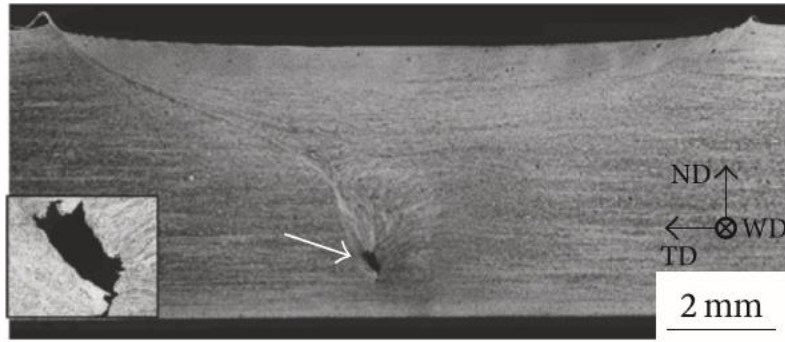
belirtilmiştir. Ancak oluşturulan sayısal modelde sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri kullanılmıştır. Ayrıca kütle ölçekleme tekniğinin kullanılması, ortama aktarılan ısı için kullanılan temas koşulunun basitleştirilmesi ve diğer idealleştirmeler bu duruma yol açmış olabilir. 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde (oran 3) kaynak bölgesinde herhangi bir kusur görülmemektedir (Şekil 8.34). Ayrıca sayısal model ve deneysel çalışma kaynak bölge enine kesit görünüşleri incelendiğinde, kaynak bölge şekillerinde çok benzer plastik deformasyona uğrayan bölge olduğu görülmektedir. Oluşturulan sayısal modelde 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde SKK sonrası elde edilmesi gereken belirli bir makro yapının elde edildiği görülmektedir. Bu makro yapıda, YT'ye oranla İT'ye doğru daha fazla malzeme yönelimi olduğu literatürdeki çalışmalarda da gözlenmiştir (Chowdhury ve diğ. 2013, Kosturek ve diğ. 2020, Msomi ve Mbana 2019, Ni ve diğ. 2013). Bu yapı, modelde tüm kaynak enine kesiti boyunca kesintisiz olarak elde edilmiştir, bu da kaynak dikişi boyunca bu parametrede kaynak kalitesinde bir değişiklik olmadığını göstermektedir.



(a)

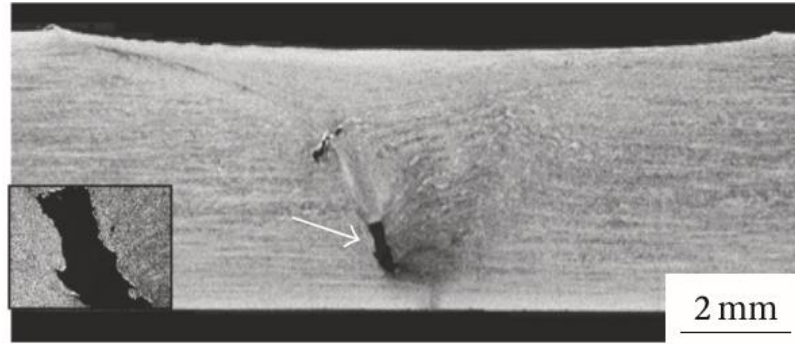
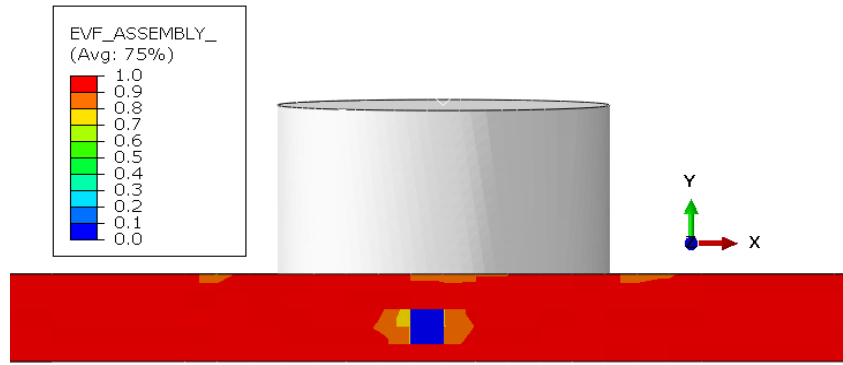
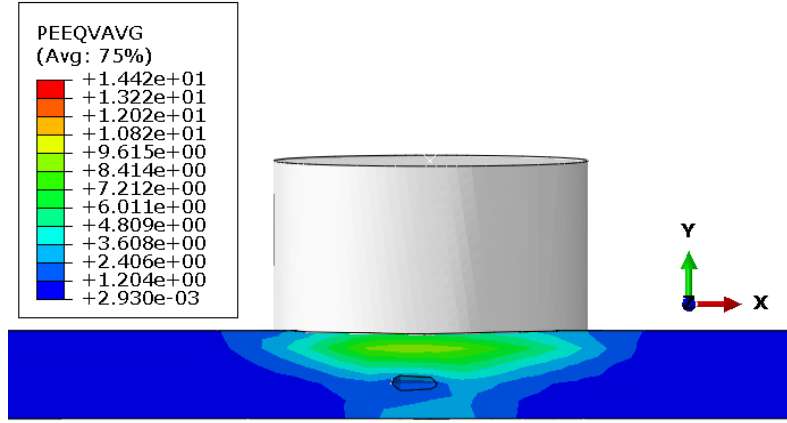


(b)

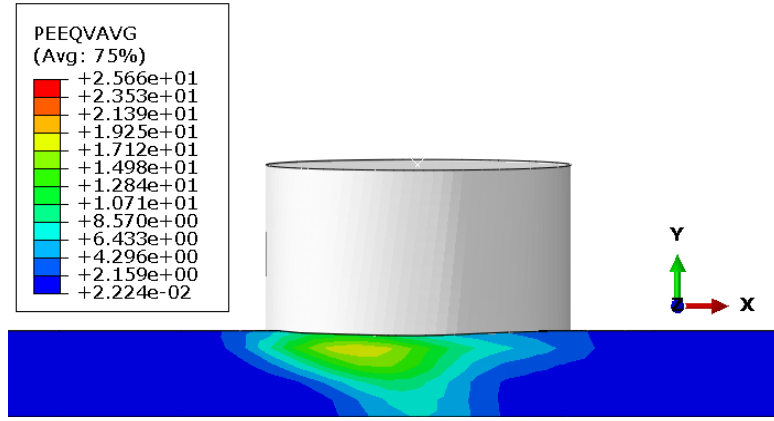


(c)

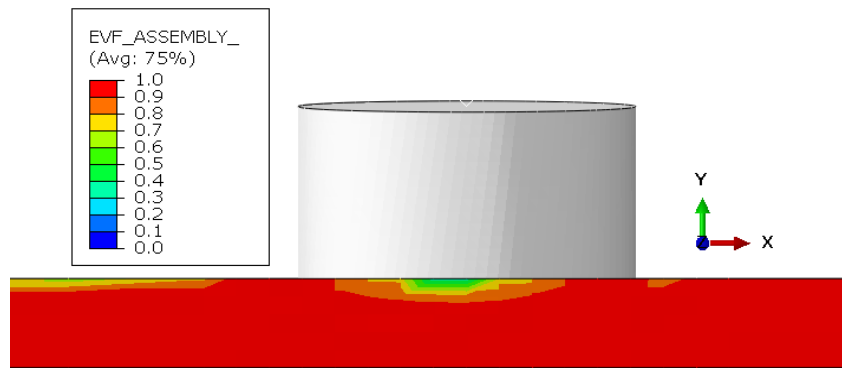
Şekil 8.32: 400 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresi kesit görüntüleri a) PEEQVAVG dağılımı, b) EVF dağılımı, c) Deneysel makro yapı (Sun ve diğ. 2017).



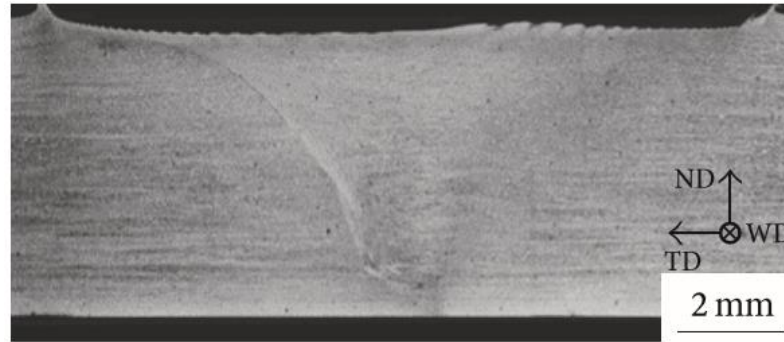
Şekil 8.33: 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametresi kesit görüntüleri a) PEEQVAVG dağılımı, b) EVF dağılımı, c) Deneysel makro yapı (Sun ve diğ. 2017).



(a)



(b)

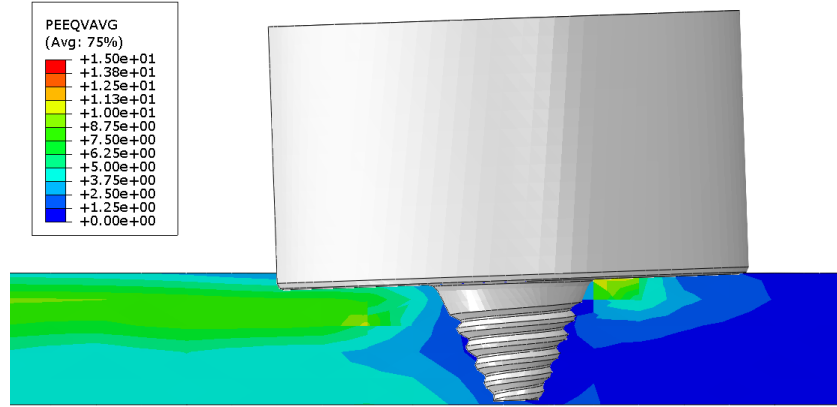


(c)

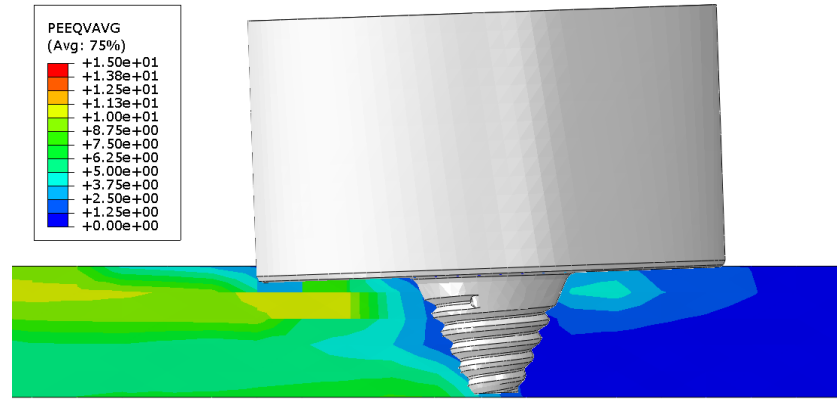
Şekil 8.34: 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresi kesit görüntüleri a) PEEQVAVG dağılımı, b) EVF dağılımı, c) Deneysel makro yapı (Sun ve diğ. 2017).

Kaynak işlemi sırasında kaynak merkezi boyunca kesitteki plastik deformasyon dağılımı Şekil 8.35 ile Şekil 8.37 arasında gösterilmektedir. Boyuna kesit görüntüleri en yüksek plastik deformasyonun 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde meydana geldiğini göstermektedir. Bu kaynak parametresinde herhangi bir kusur gözlenmemiştir.

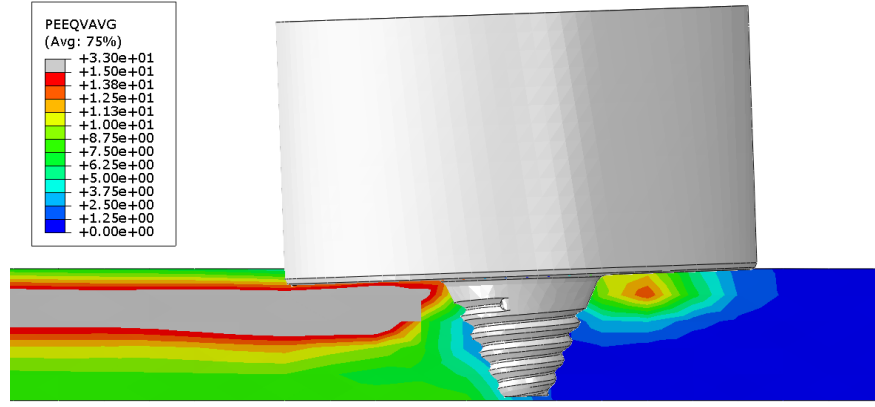
Takım omuzu, SKK sırasında ısı üretimi sağlamasının yanı sıra, pim tarafından karıştırılan malzemenin kaynak bölgesinden kaçmasını önlemek için de tasarlanmıştır ve bu durumda başarılı olmuştur. Ayrıca takım omuzunun malzemenin üst yüzeyine yaptığı basınçtan dolayı malzemedeki en büyük plastik deformasyon malzemenin üst kısmında meydana gelmiş ve kaynak dikişi boyunca devam etmiştir. En az plastik deformasyon 400 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde gözlenmiştir.



Şekil 8.35: 400 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde kaynak merkezi boyunca boyuna kesitte plastik deformasyon.

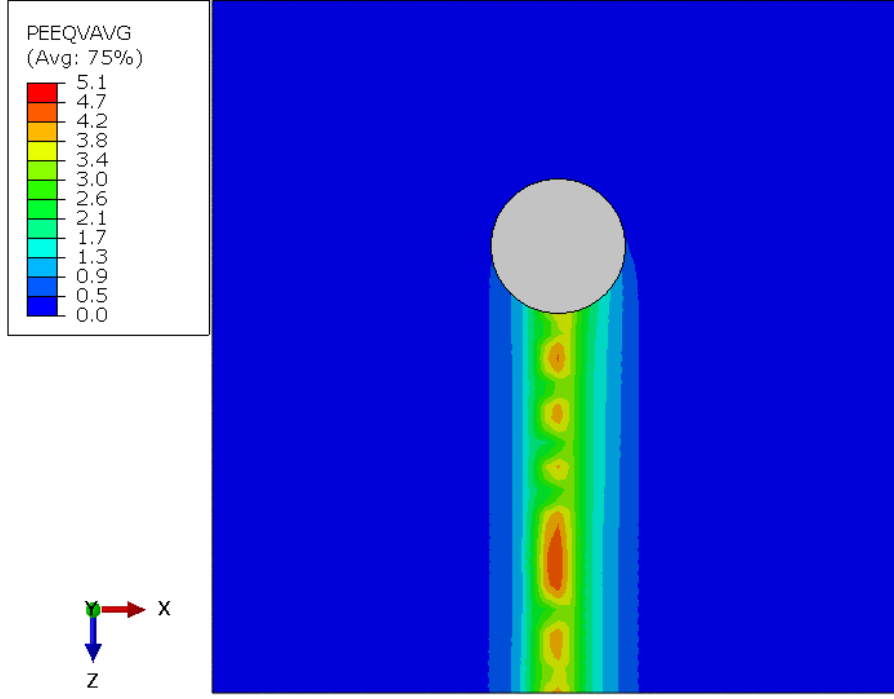


Şekil 8.36: 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde kaynak merkezi boyunca boyuna kesitte plastik deformasyon.

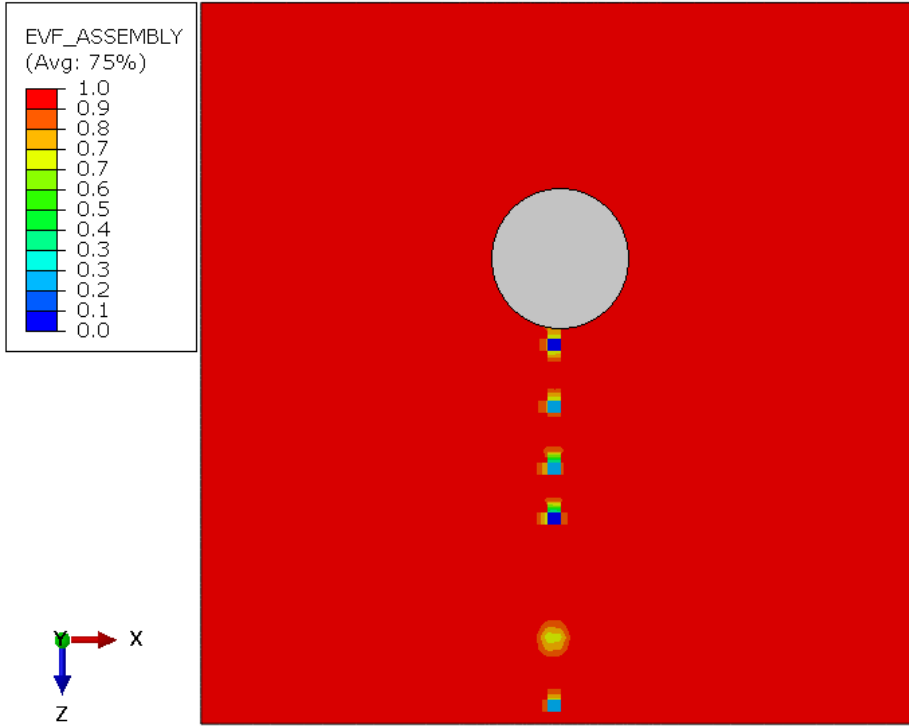


Şekil 8.37: 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde kaynak merkezi boyunca boyuna kesitte plastik deformasyon.

Üst yüzeyden 2.5 mm uzaklıkta bulunan kesit üzerindeki plastik deformasyon ve EVF değerlerinin görüntüsü Şekil 8.38 ile Şekil 8.40 arasında gösterilmektedir. Dönme hızının artması ve ilerleme hızının azalması ile kesit yüzeylerindeki plastik deformasyon miktarı artmıştır. Şekil 8.38b ve Şekil 8.39b’de 400 rpm-200 mm.min⁻¹, 600 rpm-300 mm.min⁻¹ (oran 2) kaynak parametrelerinde kesit yüzeylerinde açıkça görülebilir kusurlar vardır. Ancak en yüksek plastik deformasyonun meydana geldiği 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde kesit görünümde kaynak hatası görülmemektedir (Şekil 8.40b). Bu kaynak parametresinde tüm enine ve boyuna kesitlerde etkin bir birleştirmenin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 8.38b ve Şekil 8.39b’de görülen kusurlar tünel kusurları şeklinde olmayıp aralıklı olarak meydana gelmiştir. Bu duruma kütle ölçeklendirmesi nedeniyle temas yüzeyindeki beklenenden daha yüksek sıcaklıklar neden olmuştur. Temas yüzeyinde daha yüksek sıcaklıkların meydana gelmesi, temas yüzeyinde plastik deformasyonun aralıklarla kolayca oluşmasına neden olmuştur. Dolayısıyla kütle ölçekleme tekniği malzeme akışının sürekliliğini etkilemiştir.

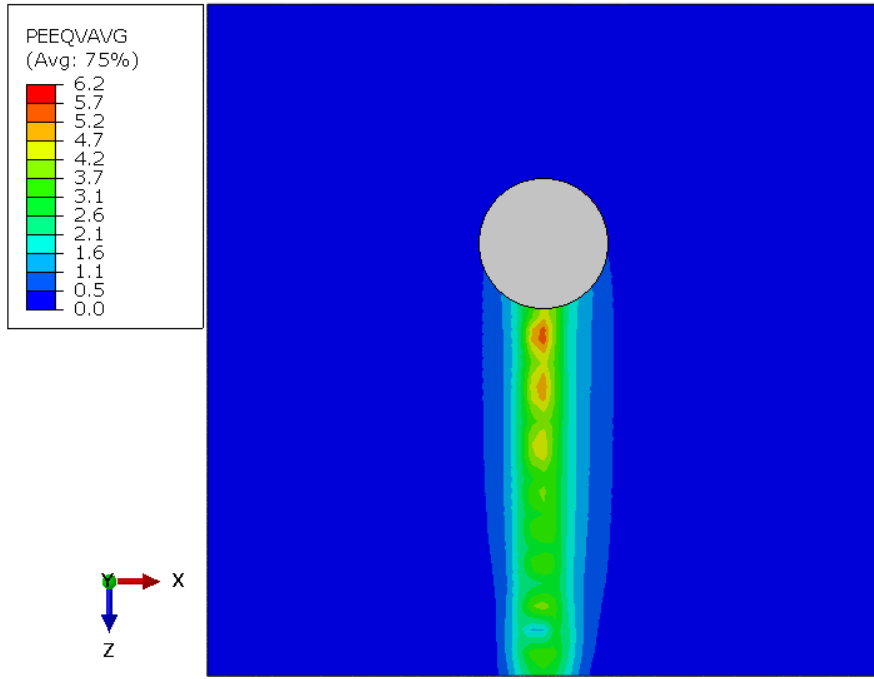


(a)

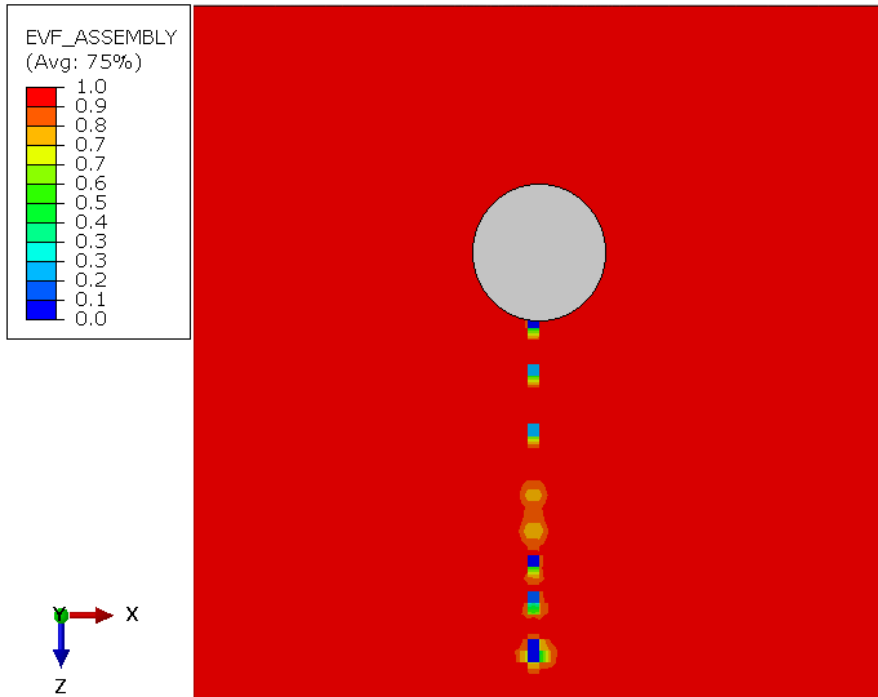


(b)

Şekil 8.38: 400 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresindeki kesit yüzey görünümleri a) Plastik deformasyon dağılımı, b) EVF dağılımı.

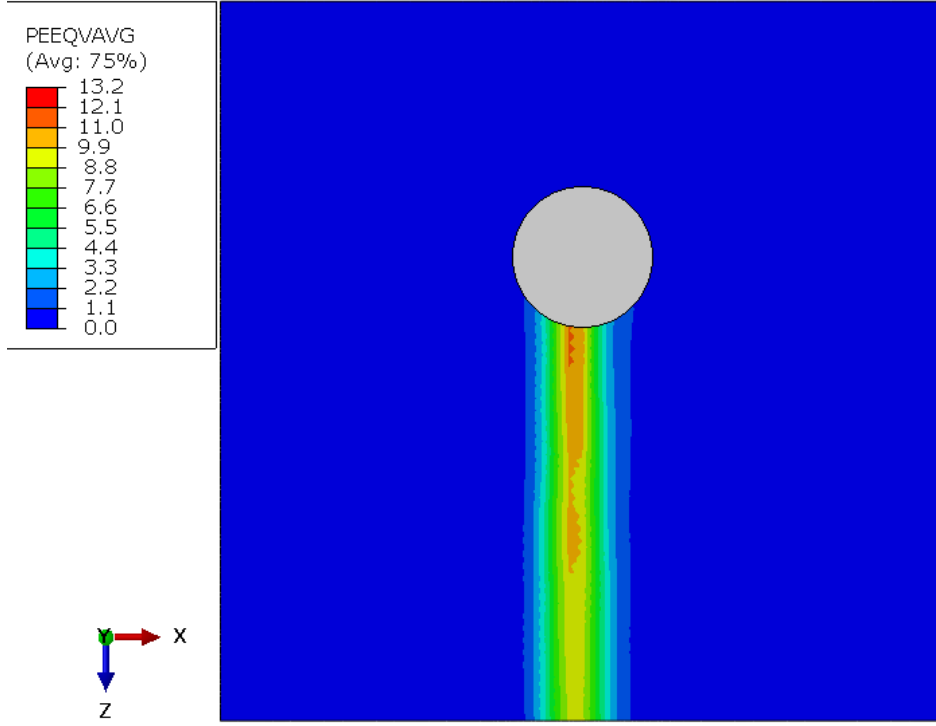


(a)

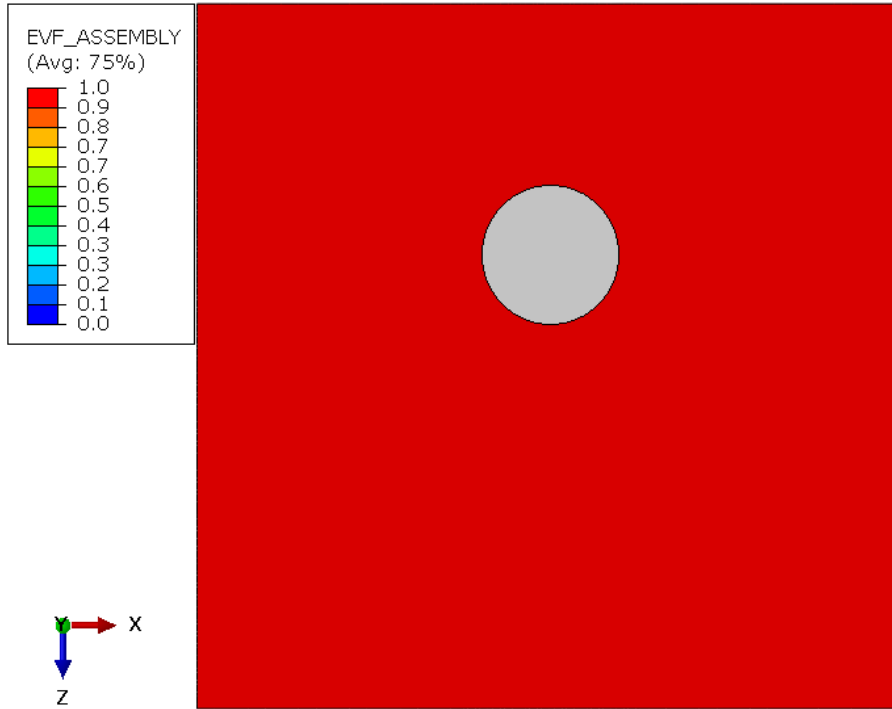


(b)

Şekil 8.39: 600 rpm-300 mm.min⁻¹ kaynak parametresindeki kesit yüzey görüntüleri a) Plastik deformasyon dağılımı, b) EVF dağılımı.



(a)

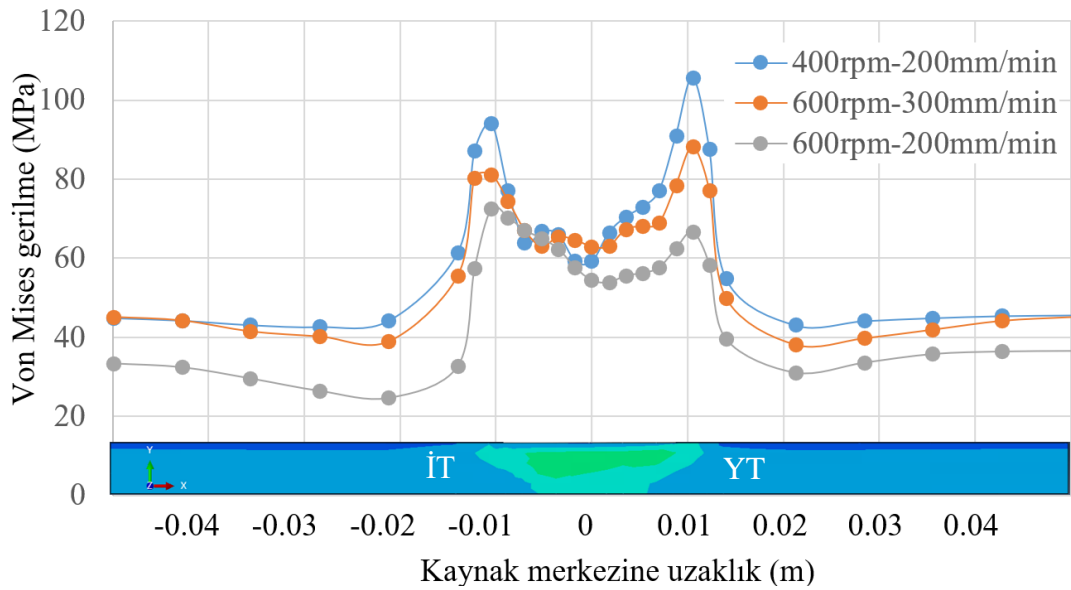


(b)

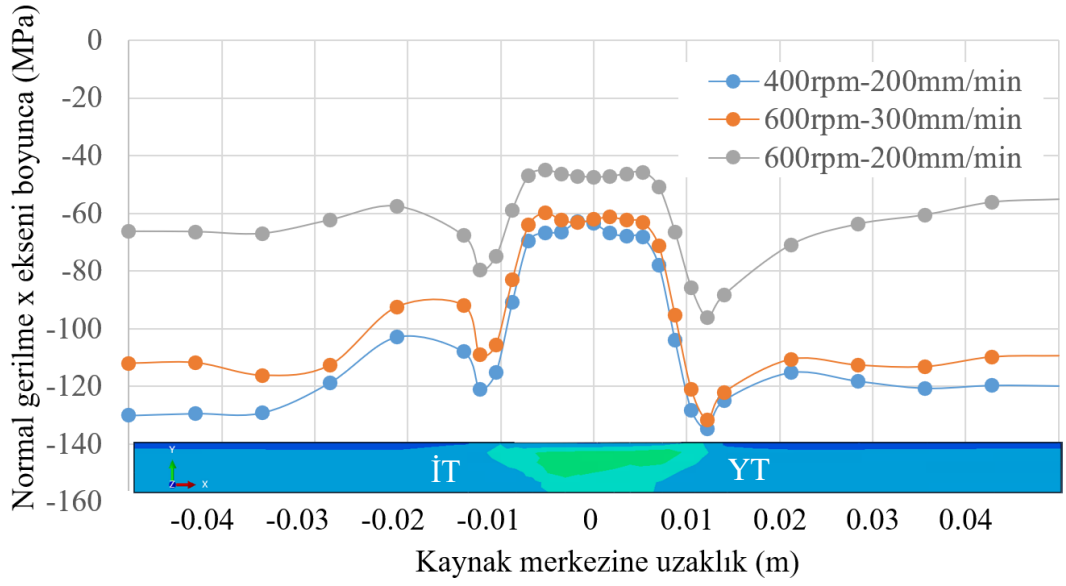
Şekil 8.40: 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresindeki kesit yüzey görünümleri a) Plastik deformasyon dağılımı, b) EVF dağılımı.

Kaynak sonrası oluşan artık gerilmeler yapının işletme koşullarında güvenli kullanımı açısından önemlidir. Artık gerilmeler, tüm yükler kaldırıldıktan sonra kalan

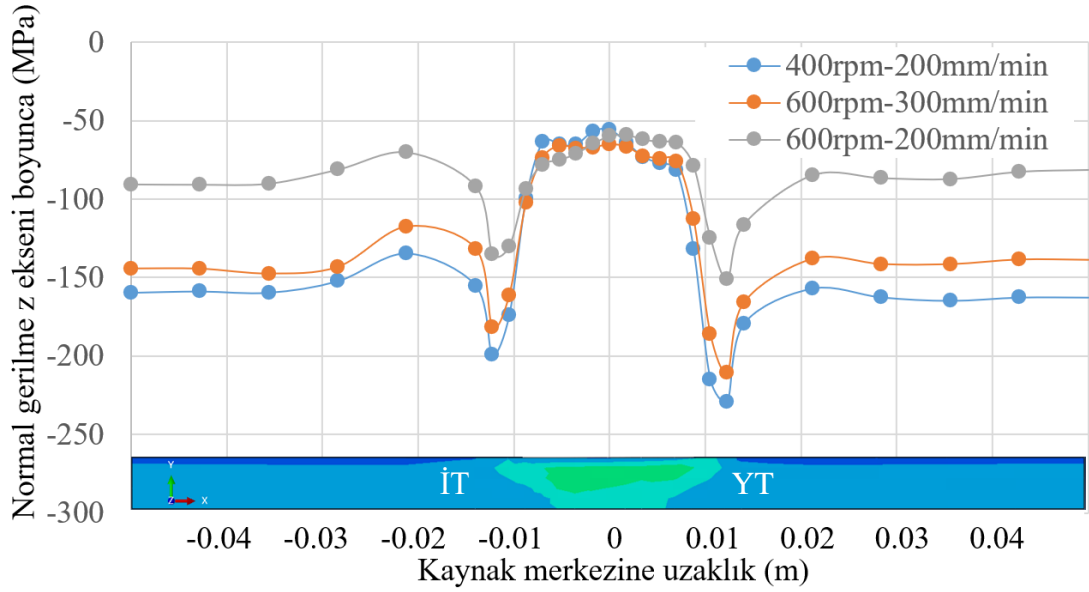
ikincil gerilmeler olarak sınıflandırılır. Artık gerilmenin türüne bağlı olarak, bazı elemanlar için olumlu, bazıları için olumsuz bir etkisi olabilir. Genel olarak değerlendirildiğinde artık çekme gerilimi bileşenlere zarar verebilirken artık bası gerilimi kalitelerini iyileştirebilir. Çekme artık gerilmesi; gerilmeli korozyon çatlama, yorulma hasarı ve gevrek kırılmanın ana nedenlerinden biridir. Enine kesit boyunca üst yüzeyde meydana gelen von Mises efektif gerilme dağılımının plastik deformasyon arttıkça azaldığı görülmektedir (Şekil 8.41). Enine kesit boyunca üst yüzeyden ölçülen enine ve boyuna yönlerdeki normal gerilmelerin dağılımı Şekil 8.42 ve 8.43'te gösterilmektedir. Şekiller genel olarak değerlendirildiğinde, gerilme dağılımının M şeklinde olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda şekil olarak benzer artık gerilme dağılımları belirtilmiştir (Bachmann ve diğ. 2017, Jamshidi Aval 2015, Riahi ve Nazari 2011, Staron ve diğ. 2004). Ancak artık gerilmeler dengeli gerilmelerdir. Bu nedenle kesitte belirli noktalarda bası gerilmesi oluşurken, diğer noktalarda çeki gerilmesi oluşması beklenir. Ancak oluşturulan modelde bu gerilmeler sadece negatif değerlerdedir yani sadece bası gerilmeleri oluşmuştur. Bu durumun sınır koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde bulunan bir çalışmada (Venkatkumar ve Ravindran 2019) kaynak artık gerilmelerinin ve distorsiyonlarının modelde kullanılan sınır koşullarından oldukça etkilendiğini belirtilmiştir. Kaynak işlemi sırasında iş parçasının yan, alt ve üst yüzeylerine sıfır hız sınır koşulları verildiğinden enine ve boyuna gerilme dağılımları negatif değerler olarak ölçülmüştür.



Şekil 8.41: Kaynak sonrası kesitin üst yüzeyindeki Von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 8.42: Kaynak sonrası kesitin üst yüzeyindeki enine normal gerilme dağılımı (x eksenini boyunca).



Şekil 8.43: Kaynak sonrası kesitin üst yüzeyindeki boyuna normal gerilme dağılımı (z eksenini boyunca).

9. TARTIŞMA

9.1 Literatür Taraması Hakkında Tartışma

SKK, geleneksel kaynak teknikleri ile birleştirilmesinde ergime ve katılma kaynaklı zorluklar içeren magnezyum alaşımlarının birleştirilmesi için optimum bir seçenek olarak düşünülebilir. Uygun kaynak parametreleri, uygun-yeterli ısı girdisi ve uygun takım kullanıldığında kaynak bölgesinde termomekanik işlemin etkisiyle ince taneler oluşur. SKK işlemindeki önemli işlem parametreleri, takım geometrisi, takım dönüş hızı, takım ilerleme hızı, takım eksenel kuvveti ve dalma derinliğidir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SKK işleminde silindirik dişli, konik dişli ve düz konik pime sahip takımlar kullanıldığında iyi mekanik özellikler elde edildiği görülmektedir. Ayrıca SKK işleminde etkili karıştırma ve birleştirme için takım eğim açısı 2° ile 2.5° arası olmalıdır. Bu belirtilen takım eğim açılarında ısı üretimi, malzeme akışı, homojen parçacık dağılımının optimizasyonu sağlanmaktadır. SKK'da takım dönüş hızı, kaynak bölgesi özelliklerini çok etkiler. Artan takım dönüş hızı ve azalan ilerleme hızı ile ısı girdisi artar. Optimum ısı girdisi ile plastik deformasyon, birleştirmenin yüksek mekanik özellikleri açısından önemlidir. Birçok çalışmada kaynak metalinin mekanik özelliklerinin esas metale göre daha yüksek olduğu belirtilmektedir. SKK işleminin bu özelliğinin bilinmesi, SKİ ile malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yol açmıştır. SKİ ile magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştiren birçok çalışma bulunmaktadır. SKK işleminde omuz dalma derinliğinden dolayı kaynak bölgesindeki kalınlığın lokal olarak incilmesi bir dezavantajdır. Kaynak bölgesindeki yerel incelme, takım dalma derinliği azaltılarak azaltılabilir. Ancak takım omzunun her zaman iş parçası ile temas halinde olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Çünkü üretilen ısının çoğu, omuz iş parçası sürtünmesinden kaynaklanır. Ayrıca dalma derinliği etki eden eksenel kuvveti de etkileyecektir. Ek olarak, kaynak sonrası ısıl işlemlerle daha yüksek kaynak mukavemetleri elde edilebilir. Kaynak sonrası birleştirme bölgesinin korozyon direnci bölgenin mikro yapısından etkilenir. Bölgenin mikro yapısı kaynak parametrelerine bağlıdır.

Metallerin yorulma davranışının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan bir sınıflandırma yorulma ömrüne göre yapılmaktadır. Buna göre yorulma deneyleri düşük çevrimli yorulma, orta çevrimli yorulma ve yüksek çevrimli yorulma deneyleri olarak sınıflandırılabilir. Yüksek çevrimli yorulma deneylerinde uygulanan gerilme malzemede elastik deformasyon oluşturacak kadar düşüktür, fakat çatlak ucunda plastik deformasyon meydana gelebilir. Düşük çevrimli yorulma deneylerinde ise plastik deformasyon daha etkili olmaktadır. Düşük çevrim yorulma testi verileri Coffin-Manson denklemi ile temsil edilebilir.

9.2 Deneysel Çalışma Hakkında Tartışma

5.2 mm kalınlığında AZ31 magnezyum alaşımında 21 mm omuz çapında M5 vida dişli pime sahip pim uzunluğu 5 mm olan takım ile çekme dayanımına göre en yüksek mekanik özellikler %88'lik birleştirme verimliliği ile 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde elde edilmiştir. 1250 rpm 400 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde birleştirilmiş levhanın enine kesitinin mikro ve makro yapı fotoğrafı incelendiğinde birleştirmenin tam olarak gerçekleştiği makro düzeyde herhangi bir kusurun oluşmadığı görülmüştür. Makro yapıda KB belirgin bir şekilde görülmektedir fakat bütün bölgelerde tek fazlı α -Mg yapı oluştuğu için diğer bölgeler belirgin değildir. Ayrıca bu parametrede birleştirilmiş numunelerde bütün bölgelerde tek fazlı α -Mg yapı oluştuğu için sertlikte büyük dalgalanmalar görülmemiştir ve bu durum düşük ısı girdisi ile kaynak yapıldığı için normal karşılanmıştır. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerde yapılan düşük çevrim yorulma deney sonuçlarına göre kaynaklı numuneler %0.3 birim uzama oranında kaynaklı numuneler ise %0.2 birim uzama oranında belirlenen 50000 çevrim sınırını aşmıştır. Kaynaklı numunelerden her bir birim uzama oranı için çok benzer yorulma deney sonuçları alınmıştır, bu durum kaynak kalitesinin dikiş boyunca sağlandığını göstermiştir.

9.3 Sayısal Çalışma Hakkında Tartışma

Bu çalışmada, AZ61 magnezyum alaşımının SKK ile birleştirilmesi CEL formülasyonu, modifiye edilmiş Coulomb sürtünme yasası ve J-C plastik malzeme

yasasına dayalı bir 3B sonlu eleman modeli ile analiz edilmiştir. Sayısal model, analiz için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS yazılımında oluşturulmuş ve simüle edilmiştir. Euler ve Lagrange ağının avantajlarına sahip olan CEL formülasyonu, SKK işleminde kusur oluşumunu tespit etmek için uygun bir formülasyondur. SKK işlemi analiz edilirken yüksek açısal hızlarda klasik Coulomb yasası yerine takımın dinamik etkisinin dikkate alındığı modifiye edilmiş Coulomb yasasını kullanmak daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Modifiye edilmiş Coulomb yasasına göre kayma, temas kesme gerilmesi belirtilen maksimum kesme gerilmesinden daha yüksek olduğunda meydana gelir. Aksi takdirde bir yapışma durumu vardır. Karmaşık malzeme akışının meydana geldiği SKK işleminde, sayısal modelleme sonuçlarının doğruluğu büyük ölçüde akış geriliminin doğru belirlenmesine bağlıdır. SKK sırasındaki akış gerilimi, sıcaklığa, deformasyona ve deformasyon hızına bağlı olarak değişir. J-C plastik malzeme akış modeli sıcaklığa, deformasyon ve deformasyon hızına bağlı bir visko-plastik modeldir ve SKK gibi yüksek deformasyon oranlı işlemler için en uygun modeldir. Sonlu elemanlar yönetimiyle yapılan analizlerde önemli bir problem işlem süresinin uzunluğudur. SKK sürecindeki işlem süresi, termal süreyi sabit tutmak için termal özelliklerin uyarlandığı kütle ölçekleme tekniği uygulanarak kısaltılabilir. Ayrıca, SKK sırasında ısı oluşumunu doğru bir şekilde tahmin etmek için sürtünme katsayısının doğru seçimi gereklidir. Sürtünme katsayısı, takımın ve iş parçasının hareketine, temas geometrisine ve uygulanan kuvvetin yanı sıra sıcaklığa da bağlıdır. Bu nedenle bu çalışmada sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değerleri kullanılmış ve SKK termomekanik bir süreç olduğundan kusur oluşumu ısı girdisi açısından değerlendirilmiştir. Sayısal simülasyondan elde edilen sıcaklık dağılımını, plastik deforme olmuş bölgenin şeklini ve kaynak bölgesindeki kusuru doğrulamak için literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırma yapılmıştır. Aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir.

1. Oluşturulan model, plastik deformasyona maruz kalan bölgenin şekli, kaynak bölgesindeki kusurun varlığı ve sıcaklık dağılımı hakkında oldukça doğru tahminler üretmiştir.

2. Sayısal modelden alınan ısı girdisi değerleri, SKK işleminde bir takımla ısı girdisinin, sabit takım baskı kuvveti için takım dönüş hızının takım ilerleme hızına

oraniyla doğru orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Bu durum Frigaard denklemi ile desteklenmektedir.

3. Isı girdisi ve takım geometrisi, SKK sırasında plastik deformasyon miktarını ve kusur oluşumunu belirlemektedir. Kaynak bölgesindeki plastik deformasyon ısı girdisine bağlı olarak artar. Bunun yanında, uygun takım geometrileri, düşük ısı girdisi ile yeterli plastik deformasyonu sağlayarak kusurları önleyebilir. Omuz çapı 18 mm olan konik vida dişli bir takım kullanıldığında, takım dönüş hızının takım ilerleme hızına oranı 2 olduğunda yetersiz ısı girişi kaynak dikişinde boşluk şeklinde hatalar oluşturmuştur, ancak bu oran 3 olduğunda hatalar oluşmamıştır.

4. Sayısal modelde ısı girdisinin artmasıyla plastik deformasyonun daha kolay gerçekleşmesi nedeniyle kaynak sonrası en düşük gerilme dağılımı 600 rpm-200 mm.min⁻¹ kaynak parametresinde meydana gelmiştir.

5. Kütle ölçekleme tekniği, SKK işleminde kusur oluşumunu tahmin etmek için kullanılabilir. Bu sayede Intel i7-7700 işlemci ile birkaç saat içerisinde 50 saniye uzunluğundaki süreç analiz edilebilir. Ancak bu çalışmada, kütle ölçekleme tekniği, temas yüzeylerindeki yüksek sıcaklıklar nedeniyle tüm kaynak dikişi boyunca düzgün malzeme akışı davranışını engellemiştir.

10. KAYNAKLAR

Abbasi-Bani, A., Zarei-Hanzaki, A., Pishbin, M. H. and Haghdadi, N., "A comparative study on the capability of Johnson–Cook and Arrhenius-type constitutive equations to describe the flow behavior of Mg–6Al–1Zn alloy", *Mechanics of Materials*, 71, 52–61, (2014).

Abbott, T. B., Easton, M. A. and Ca, C. H., "Designing with Magnesium: Alloys, Properties, and Casting Processes", *Handbook of Mechanical Alloy _ Design*, 487, (2004).

Abhishek Chauhan et al., A. C., TJPRC ve diğ., "Effect of Friction Stir Welding Parameters on Impact Strength of the AZ31 Magnesium Alloy Joints", *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8(2), 615–622, (2018).

Afrin, N., Chen, D. L., Cao, X. and Jahazi, M., "Microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 472(1–2), 179–186, (2008).

Ahmadkhaniha, D., Heydarzadeh Sohi, M., Zarei-Hanzaki, A., Bayazid, S. M. and Saba, M., "Taguchi optimization of process parameters in friction stir processing of pure Mg", *Journal of Magnesium and Alloys*, 3(2), 168–172, (2015).

Akbari, M., Asadi, P. and Behnagh, R. A., "Modeling of material flow in dissimilar friction stir lap welding of aluminum and brass using coupled Eulerian and Lagrangian method", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(3–4), 721–734, (2021).

Al-Badour, F., Merah, N., Shuaib, A. and Bazoune, A., "Coupled Eulerian Lagrangian finite element modeling of friction stir welding processes", *Journal of Materials Processing Technology*, 213(8), 1433–1439, (2013).

Albinmousa, J., "Fatigue of Magnesium-Based Materials", (Ed.: Gupta, M.), *Magnesium - The Wonder Element for Engineering/Biomedical Applications*, IntechOpen, (2020).

Amirafshari, P., "Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures", *International Journal of Fatigue*, 15, (2021).

Ansari, M. A., Samanta, A., Behnagh, R. A. and Ding, H., "An efficient coupled Eulerian-Lagrangian finite element model for friction stir processing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5–8), 1495–1508, (2019).

Asadi, P., Kazemi-Choobi, K. and Elhami, A., "Welding of Magnesium Alloys", (Ed.: Monteiro, W. A.), *New Features on Magnesium Alloys*, InTech, (2012).

Aydin, M. and Bulut, R., "The weldability of AZ31 magnesium alloy by friction stir welding", *Metallic Materials*, 48(2), 97–104, (2010).

Aygül, M., "Fatigue evaluation of welded details", Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, (2013).

Aziz, S. B., Dewan, M. W., Huggett, D. J., Wahab, M. A., Okeil, A. M. and Liao, T. W., "A Fully Coupled Thermomechanical Model of Friction Stir Welding (FSW) and Numerical Studies on Process Parameters of Lightweight Aluminum Alloy Joints", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 31(1), 1–18, (2018).

Babu, J., Anjaiah, M. and Mathew, A., "Experimental studies on Friction stir processing of AZ31 Magnesium alloy", *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4515–4522, (2018).

Bachmann, M., Carstensen, J., Bergmann, L., dos Santos, J. F., Wu, C. S. and Rethmeier, M., "Numerical simulation of thermally induced residual stresses in friction stir welding of aluminum alloy 2024-T3 at different welding

speeds", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1–4), 1443–1452, (2017).

Bagheri, B., Abbasi, M., Abdolazadeh, A. and Kokabi, A. H., "Numerical analysis of cooling and joining speed effects on friction stir welding by smoothed particle hydrodynamics (SPH)", *Archive of Applied Mechanics*, 90(10), 2275–2296, (2020).

Benson, D. J. and Okazawa, S., "Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(39-41), 4277-4298, (2004).

Bhojwani, S., "Smoothed particle hydrodynamics modeling of the friction stir welding process", Master's Thesis, The University of Texas at El Paso, (2007).

Bisadi, H., Rasaei, S. and Farahmand, M., "Effects of Pin Shape on the Tool Plunge Stage in Friction Stir Welding", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67(6), 989–995, (2014).

Caetano, G. de Q., Silva, C. C., Motta, M. F., Miranda, H. C., Farias, J. P., Bergmann, L. A. and F. dos Santos, J., "Influence of rotation speed and axial force on the friction stir welding of AISI 410S ferritic stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 430–436, (2018).

Campbell, F. C. (Ed.), *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International, (2008).

Cao, X. and Jahazi, M., "Effect of welding speed on the quality of friction stir welded butt joints of a magnesium alloy", *Materials & Design*, 30(6), 2033–2042, (2009).

Cao, X. and Jahazi, M., "Use of laser and friction stir welding for aerospace magnesium alloys", In: *Proc third Int Conf on Light Metals Technology. Québec, Canada: Saint-Sauveur*, 158-163, (2007).

Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J. P. and Wallace, W., "A review of laser welding techniques for magnesium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 171(2), 188–204, (2006).

Carlone, P. and Palazzo, G. S., "Characterization of TIG and FSW weldings in cast ZE41A magnesium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 87–94, (2015).

Chaudhary, A., Kumar Dev, A., Goel, A., Butola, R. and Ranganath, M. S., "The Mechanical Properties of Different alloys in friction stir processing: A Review", *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5553–5562, (2018).

Chauhan, A. ve Kumar, S., "Effect of Friction Stir Welding Parameters on Impact Strength of the AZ31 Magnesium Alloy Joints", *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8(2), 615–622, (2018).

Chauhan, P., Jain, R., Pal, S. K. and Singh, S. B., "Modeling of defects in friction stir welding using coupled Eulerian and Lagrangian method", *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 158–166, (2018).

Chen, J., Fujii, H., Sun, Y., Morisada, Y. and Kondoh, K., "Optimization of mechanical properties of fine-grained non-combustive magnesium alloy joint by asymmetrical double-sided friction stir welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 242, 117–125, (2017).

Chen, Y., He, C., Yang, K., Zhang, H., Wang, C., Wang, Q. and Liu, Y., "Effects of microstructural inhomogeneities and micro-defects on tensile and very high cycle fatigue behaviors of the friction stir welded ZK60 magnesium alloy joint", *International Journal of Fatigue*, 122, 218–227, (2019).

Chowdhury, S. H., Chen, D. L., Bhole, S. D., Cao, X. and Wanjara, P., "Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy: Microstructure, Texture, and Tensile Properties", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(1), 323–336, (2013).

Czerwinski, F., "Welding and Joining of Magnesium Alloys", *Magnesium Alloys, Magnesium Alloys-Design, Processing and Properties*, 469-490, (2011).

Dabeer, P. and Shinde, G., "Perspective of Friction Stir Welding Tools", *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13166–13176, (2018).

Darras, B. M., Khraishah, M. K., Abu-Farha, F. K. and Omar, M. A., "Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1–3), 77–81, (2007).

Darwins, A. K., Satheesh, M., Pradeep, P. and Prakash, M. S., "Evaluation of Tensile and Hardness Properties for Friction Stir Welded ZE42 Magnesium Alloys", *Middle-East Journal of Scientific Research*, 25(7), 1611-1614, (2017).

Darwins, A. K., Satheesh, M. and Ramanan, G., "Modelling and optimization of friction stir welding parameters of Mg-ZE42 alloy using grey relational analysis with entropy measurement", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402, 012162, (2018).

Djurđević, M. B., Manasijević, S., Odanović, Z. and Dolić, N., "Calculation of liquidus temperature for aluminum and magnesium alloys applying method of equivalency", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 170527, (2013).

Dobriyal, R. P., Dhindaw, B. K., Muthukumaran, S. and Mukherjee, S. K., "Microstructure and properties of friction stir butt-welded AE42 magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 477(1–2), 243–249, (2008).

Dubey, M. K. and Deep, G., "Investigation of the process parameter and their influence on the mechanical properties of friction stir processed surface composite: A review", *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(9), 75-82, (2018).

Feng, F., Huang, S., Meng, Z., Hu, J., Lei, Y., Zhou, M. and Yang, Z., "A constitutive and fracture model for AZ31B magnesium alloy in the tensile state", *Materials Science and Engineering: A*, 594, 334–343, (2014).

Figueiredo, R. B. and Langdon, T. G., "Processing Magnesium and Its Alloys by High-Pressure Torsion: An Overview", *Advanced Engineering Materials*, 21(1), 1801039, (2019).

Forcellese, A., Martarelli, M. and Simoncini, M., "Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(1–4), 595–604, (2016).

Fraser, K., Kiss, L. I., St-Georges, L. and Drolet, D., "Optimization of Friction Stir Weld Joint Quality Using a Meshfree Fully-Coupled Thermo-Mechanics Approach", *Metals*, 8(2), 101, (2018).

Fraser, K., St-Georges, L. and Kiss, L. I., "Prediction of Defects in a Friction Stir Welded Joint using the Smoothed Particle Hydrodynamics Method", In: *Proceedings of the 7th Asia Pacific IIW International Congress*, Singapore Management University, Singapore, 8-10, (2013).

Frigaard, Ø., Grong, Ø. and Midling, O. T., "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(5), 1189–1200, (2001).

Gibson, B. T., Lammlein, D. H., Prater, T. J., Longhurst, W. R., Cox, C. D., Ballun, M. C., Dharmaraj, K. J., Cook, G. E. and Strauss, A. M., "Friction stir welding: Process, automation, and control", *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1), 56–73, (2014).

Goel, S., Naveen, G., Gupta, A. and Gulati, P., "Effect of process parameters on mechanical and metallurgical properties of friction stir processed AZ31Mg alloy", *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4575–4583, (2018).

Gong, P., Zuo, Y., Ji, S., Yan, D. and Shang, Z., "A novel non-keyhole friction stir welding process", *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 17–25, (2022).

Guerdoux, S. and Fourment, L., "Error Estimation And Accurate Mapping Based ALE Formulation For 3D Simulation Of Friction Stir Welding", *AIP Conference Proceedings*, vol. 908, Porto (Portugal): AIP, 185–190, (2007).

Gulati, P., Shukla, D. K. and Gupta, A., "Defect formation analysis of Friction Stir welded Magnesium AZ31B alloy", *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1005–1012, (2017).

Gulati, P. and Shukla, D. K., "On the mechanical characteristics and parametric optimisation of friction stir welded magnesium AZ31B alloy", *International Journal of Experimental Design and Process Optimisation*, 6(1), 50-73, (2019).

Hammelmüller, F. and Zehetner, C., "Increasing numerical efficiency in coupled Eulerian-Lagrangian metal forming simulations", In: *COMPLAS XIII: proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity: fundamentals and applications*, 727-733, (2015).

Han, B., Huang, Y., Lv, S., Wan, L., Feng, J. and Fu, G., "AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding", *Materials & Design*, 51, 25–33, (2013).

Hilgert J., "Knowledge Based Process Development of Bobbin Tool Friction Stir Welding", Ph.D. Thesis, Technischen Universität Hamburg, (2012).

Hilgert, J., dos Santos, J. F. and Huber, N., "Shear layer modelling for bobbin tool friction stir welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(6), 454–459, (2012).

Hossein Baghdadi, A., Fazilah Mohamad Selamat, N., Sajuri, Z. and Hossein Kokabi, A., "Effect of Travel Speed on Quality and Welding Efficiency of

Friction Stir Welded AZ31B Magnesium Alloy", *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.17), 94, (2018).

Huang, R., Ji, S., Meng, X. and Li, Z., "Drilling-filling friction stir repairing of AZ31B magnesium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 765–772, (2018)a.

Huang, Y. X., Han, B., Tian, Y., Liu, H. J., Lv, S. X., Feng, J. C., Leng, J. S. and Li, Y., "New technique of filling friction stir welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(6), 497–501, (2011).

Huang, Y., Xie, Y., Meng, X., Li, J. and Zhou, L., "Joint formation mechanism of high depth-to-width ratio friction stir welding", *Journal of Materials Science & Technology*, 35(7), 1261–1269, (2019).

Huang, Y., Xie, Y., Meng, X., Lv, Z. and Cao, J., "Numerical design of high depth-to-width ratio friction stir welding", *Journal of Materials Processing Technology*, 252, 233–241, (2018)b.

Hussain, M., "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Ze40 Magnesium Alloy", *Industrial Engineering and Management*, 6, (2014).

Jaiganesh, V. and Sevel, P., "Effect of Process Parameters on the Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of AZ80A Mg Alloy During Friction Stir Welding", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(S1), 99–104, (2015).

Jaiganesh, V., Vignesh, S. G. and Vignesh, S. M., "Investigation on Micro structural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AZ91E Mg Alloy", *Materials Today: Proceedings*, 4(6), 6704–6711, (2017).

Jamshidi Aval, H., "Microstructure and residual stress distributions in friction stir welding of dissimilar aluminium alloys", *Materials & Design*, 87, 405–413, (2015).

Javaid, A., Hadadzadeh, A. and Czerwinski, F., "Solidification behavior of dilute Mg-Zn-Nd alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 132–148, (2019).

Jayaraj, R. K., Malarvizhi, S. and Balasubramanian, V., "Electrochemical corrosion behaviour of stir zone of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminium–AZ31B magnesium alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(10), 2181–2192, (2017).

Ji, S., Li, Z., Zhang, L., Zhou, Z. and Chai, P., "Effect of lap configuration on magnesium to aluminum friction stir lap welding assisted by external stationary shoulder", *Materials & Design*, 103, 160–170, (2016).

Johari, N. A., Alias, J., Zanurin, A., Mohamed, N. S., Alang, N. A. and Zain, M. Z. M., "Recent progress of self-healing coatings for magnesium alloys protection", *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(3), 757–774, (2022).

John, J., Shanmughanatan, S. P. and Kiran, M. B., "Friction Stir Welding of Wrought Aluminium Alloys - A Short Review", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 32(2), 76–81, (2016).

Kah, P., Rajan, R., Martikainen, J. and Suoranta, R., "Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(1), 26, (2015).

Karakaş Ö., "Biçimlenebilen Magnezyum Alaşımlarından Kaynaklı Yapı Elemanlarının Yorulma Dayanımı Değerlendirmelerinde Çentik Gerilmesi Yönteminin Uygulanması", Ph.D. Thesis, Pamukkale University, (2006).

Karakaş, Ö., "Consideration of mean-stress effects on fatigue life of welded magnesium joints by the application of the Smith–Watson–Topper and reference radius concepts", *International Journal of Fatigue*, 49, 1-17, (2013).

Karakaş, Ö., Morgenstern, C., Sonsino, C. M., Hanselka, H., Vogt, H. M. and Dilger, K., "Grundlagen für die praktische Anwendung des Kerbspannungskonzeptes zur Schwingfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen aus Magnesiumknetlegierungen", Fraunhofer-Institute for Structural Durability and System Reliability (LBF), Darmstadt, Report No: FB-232, (2007).

Karakaş, Ö., Morgenstern, C. and Sonsino, C. M., "Fatigue design of welded joints from the wrought magnesium alloy AZ31 by the local stress concept with the fictitious notch radii of $r_f = 1.0$ and 0.05 mm", *International Journal of Fatigue*, 30(12), 2210-2219, (2008).

Karakaş, Ö., Gülsöz, A., Kaufmann, H. and Sonsino, C. M., "Fatigue behaviour of welded joints from magnesium alloy (AZ31) according to the local strain concept", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 41(2), 73-82, (2010).

Karakaş, Ö., Baumgartner, J. and Susmel, L., "On the use of a fictitious notch radius equal to 0.3 mm to design against fatigue welded joints made of wrought magnesium alloy AZ31", *International Journal of Fatigue*, 139, 105747, (2020).

Karakaş, Ö., Leitner, M. and Tüzün, N., "Application of critical distance approach for fatigue assessment of welded and HFMI-treated steel joints", *International Journal of Fatigue*, 154, 106534, (2022).

Kashaev, N., Ventzke, V. and Çam, G., "Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications", *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 571–600, (2018).

Khan, N. Z., Khan, Z. A., Siddiquee, A. N., Al-Ahmari, A. M. and Abidi, M. H., "Analysis of defects in clean fabrication process of friction stir welding", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(7), 1507–1516, (2017).

- Khosa, S. U., Weinberger, T. and Enzinger, N., "Thermo-Mechanical Investigations during Friction Stir Spot Welding (FSSW) of AA6082-T6", *Welding in the World*, 54(5–6), R134–R146, (2010).
- Kielbus, A., "Microstructure and Properties of Casting Magnesium Alloys Designed to Work in Elevated Temperature", (Eds.: Tański, T., Borek, W., and Król, M.), *Magnesium Alloys - Selected Issue*, IntechOpen, (2018).
- Kierzek, A. and Adamiec, J., "Evaluation of Susceptibility to Hot Cracking of Magnesium Alloy Joints in Variable Stiffness Condition", *Archives of Metallurgy and Materials*, 56(3), (2011).
- Kosturek, R., Śnieżek, L., Torzewski, J. and Wachowski, M., "The influence of welding parameters on macrostructure and mechanical properties of Sc-modified AA2519-T62 FSW joints", *Manufacturing Review*, 7, 28, (2020).
- Kouadri-Henni, A., Barrallier, L. and Badji, R., "Residual stresses of a magnesium alloy (AZ31) welded by the friction stir welding processes", (Ed.: Saanouni, K.), *MATEC Web of Conferences*, 80, 06003, (2016).
- Kramár, T., Vondrouš, P., Jáňa, M. and Kupec, T., "JOINIG OF MG ALLOY AZ31B BY SELECTED TECHNOLOGIES", *Acta Polytechnica*, 59(3), 292–298, (2019).
- Kulekci, M. K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9–10), 851–865, (2008).
- Kumar, K. and Kailas, S. V., "The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation", *Materials Science and Engineering: A*, 485(1–2), 367–374, (2008).
- Kumar, S. D. and Kumar, S. S., "Effect of heat treatment conditions on ballistic behaviour of various zones of friction stir welded magnesium alloy joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(1), 156–166, (2021).

Kumar, S. Prem., Vigneshwar, M., Selvamani, S. T., Prakash, A. S. and Hariprasath, P., "The Comparative Analysis on Friction Stir Welded and Gas Tungsten Arc Welded AZ91 Grade Magnesium Alloy Butt Joints", *Materials Today: Proceedings*, 4(6), 6688–6696, (2017).

Kumar, T. P., "Influence of Tool Geometry in Friction Stir Welding on Material Flow Pattern", *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2(2), 230–235, (2013).

Lafly, A. L., Alléhaux, D., Marie, F., Dalle Donne, C. and Biallas, G., "Microstructure and Mechanical Properties of the Aluminium Alloy 6056 Welded by Friction Stir Welding Techniques", *Welding in the World*, 50(11–12), 98–106, (2006).

Lee, W. B., Kim, J. W., Yeon, Y. M. and Jung, S. B., "The Joint Characteristics of Friction Stir Welded AZ91D Magnesium Alloy", *MATERIALS TRANSACTIONS*, 44(5), 917–923, (2003).

Lee, W. G., Kim, J. S. and Sun, S. J., "Temperature and Mechanical Properties of Welded Joints Under Friction Stir Welding Conditions of Mg Alloy (AZ61)", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 26(4), 378–386, (2017).

Letzig, D., Swiostek, J., Bohlen, J., Beaven, P. A. and Kainer, K. U., "Wrought magnesium alloys for structural applications", *Materials Science and Technology*, 24(8), 991–996, (2008).

Li, B., Shen, Y. and Hu, W., "The study on defects in aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple non-destructive testing methods", *Materials & Design*, 32(4), 2073–2084, (2011).

Li, D., Yang, X., Cui, L., He, F. and Zhang, X., "Investigation of stationary shoulder friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651", *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 391–398, (2015)a.

- Li, G., Zhou, L., Luo, S., Dong, F. and Guo, N., "Microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded ZK60 magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 776, 138953, (2020).
- Li, J. T., Xu, G. M., Yu, H. L., Deng, G. Y., Su, L. H., Lu, C., He, L. Z., Godbole, A. and Li, H. J., "Optimization of process parameters in twin-roll strip casting of an AZ61 alloy by experiments and simulations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9–12), 1769–1781, (2015)b.
- Li, W., Niu, P. L., Yan, S. R., Patel, V. and Wen, Q., "Improving microstructural and tensile properties of AZ31B magnesium alloy joints by stationary shoulder friction stir welding", *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 159–167, (2019).
- Li, W. Y., Fu, T., Hütsch, L., Hilgert, J., Wang, F. F., dos Santos, J. F. and Huber, N., "Effects of tool rotational and welding speed on microstructure and mechanical properties of bobbin-tool friction-stir welded Mg AZ31", *Materials & Design*, 64, 714–720, (2014).
- Li, Y., Qin, F., Liu, C. and Wu, Z., "A Review: Effect of Friction Stir Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloys", *Metals*, 7(12), 524, (2017).
- Long, L., Chen, G., Zhang, S., Liu, T. and Shi, Q., "Finite-element analysis of the tool tilt angle effect on the formation of friction stir welds", *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 562–569, (2017).
- Lorrain, O., Serri, J., Favier, V., Zahrouni, H. and El Hadrouz, M., "A contribution to a critical review of friction stir welding numerical simulation", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 4(2), 351–369, (2009).
- Loukil, N., "Alloying Elements of Magnesium Alloys: A Literature Review", (Eds.: Tański, T., and Jarka, P.), *Magnesium Alloys Structure and Properties*, IntechOpen, (2022).

- Luna, C. F., Arenas, F. F., Pereira, V. F. and Ávila, J. A., "Mechanical and Fatigue Strength Assessment of Friction Stir Welded Plates of Magnesium Alloy AZ31B", *Soldagem & Inspeção*, 23(1), 52–59, (2018).
- Luo, H., Hao, C., Zhang, J., Gan, Z., Chen, H. and Zhang, H., "Characteristics of resistance welding magnesium alloys AZ31 and AZ91", *Welding Journal*, 90, 249-257, (2011).
- Masoudian, A., Tahaei, A., Shakiba, A., Sharifianjazi, F. and Mohandesi, J. A., "Microstructure and mechanical properties of friction stir weld of dissimilar AZ31-O magnesium alloy to 6061-T6 aluminum alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(5), 1317–1322, (2014).
- Memon, S., Fydrych, D., Fernandez, A. C., Derazkola, H. A. and Derazkola, H. A., "Effects of FSW Tool Plunge Depth on Properties of an Al-Mg-Si Alloy T-Joint: Thermomechanical Modeling and Experimental Evaluation", *Materials*, 14(16), 4754, (2021)a.
- Memon, S., Tomków, J. and Derazkola, H. A., "Thermo-Mechanical Simulation of Underwater Friction Stir Welding of Low Carbon Steel", *Materials*, 14(17), 4953, (2021)b.
- Mendes, N., Loureiro, A., Martins, C., Neto, P. and Pires, J. N., "Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds", *Materials & Design*, 58, 457–464, (2014).
- Meng, X., Huang, Y., Cao, J., Shen, J. and dos Santos, J. F., "Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding", *Progress in Materials Science*, 115, 100706, (2021).
- Meshram, S. D., Reddy, G. M. and Rao, A. V., "Role of Threaded Tool Pin Profile and Rotational Speed on Generation of Defect Free Friction Stir AA 2014 Aluminium Alloy Welds", *Defence Science Journal*, 66(1), 57, (2016).

Meyghani, B., Awang, M. B. and Wu, C. S., "Thermal analysis of friction stir processing (FSP) using arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) and smoothed particle hydrodynamics (SPH) meshing techniques", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 51(5), 550–557, (2020).

Mironov, S., Sato, Y. S. and Kokawa, H., "Influence of Welding Temperature on Material Flow During Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(6), 2798–2806, (2019).

Mirza, F. A. and Chen, D. L., "Fatigue of Magnesium Alloys", *Aerospace Materials Handbook*, (2013).

Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1–2), 1–78, (2005).

Mohamed, N. S. and Alias, J., "A review on the effect of welding on the corrosion of magnesium alloys", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 257, 012028, (2017).

Monteiro, W. A. (Ed.), *Special issues on magnesium alloys*, Rijeka: InTech, (2011).

Moosbrugger, C. (Ed.), *Introduction to Magnesium Alloys*, ASM International, (2017).

Mousa, J. A. B., "Multiaxial Fatigue Characterization and Modeling of AZ31B Magnesium Extrusion", Ph.D. Thesis, University of Waterloo, (2011).

Msomi, V. and Mbana, N., *Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA1050-H14 and AA5083-H111 Joint: Sampling Aspect*, Preprint, ENGINEERING, <https://doi.org/10.20944/preprints201912.0156.v1>, (2019).

Muruganandam, D., Balasubramaniyan, C. and Gokulachander, B., "Review Paper on Friction Stir Welding of Aluminium and Magnesium Alloys", *Indian Journal of Science and Technology*, 8(35), (2015).

- Nakata, K., "Friction stir welding of magnesium alloys", *Welding International*, 23(5), 328–332, (2009).
- Nakata, K., Kim, Y. G. and Ushio, M., "Friction Stir Welding of Mg-Al-Zn Alloys (Physics, Processes, Instruments & Measurements)", *Transactions of JWRI*, 31(2), 141-146, (2002).
- Nandan, R., Debroy, T. and Bhadeshia, H., "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science*, 53(6), 980–1023, (2008).
- Naser, A. and Darras, B., "Micro-hardness prediction of friction stir processed magnesium alloy via response surface methodology", *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 13(3), 377–390, (2017).
- Ni, D. R., Chen, D. L., Wang, D., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y., "Influence of microstructural evolution on tensile properties of friction stir welded joint of rolled SiCp/AA2009-T351 sheet", *Materials & Design*, 51, 199–205, (2013).
- Nicholson, D. W., *Finite Element Analysis: Thermomechanics of Solids*, CRC Press, (2003).
- Noh, V. F., *CEL: A Time Dependent Two Space Dimensional Coupled Eulerian-Lagrange Code*, University of California, Technical Report, Livermore, California, (1963).
- O. Cooke, K., Alhazaa, A. and M. Atieh, A., "Dissimilar Welding and Joining of Magnesium Alloys: Principles and Application", (Ed.: Gupta, M.), *Magnesium - The Wonder Element for Engineering/Biomedical Applications*, IntechOpen, (2020).
- Othman, N. H., Ishak, M. and Shah, L. H., "Effect of shoulder to pin ratio on magnesium alloy Friction Stir Welding", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 238, 012008, (2017).

Othman, N. H., Udin, N., Ishak, M. and Shah, L. H., "Effect of Taper Pin Ratio on Microstructure and Mechanical Property of Friction Stir Welded AZ31 Magnesium Alloy", *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 10(5), 638-641, (2016).

Padhy, G. K., Wu, C. S. and Gao, S., "Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review", *Journal of Materials Science & Technology*, 34(1), 1–38, (2018).

Padmanaban, G. and Balasubramanian, V., "Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach", *Materials & Design*, 30(7), 2647–2656, (2009).

Padmanaban, G. and Balasubramanian, V., "An experimental investigation on friction stir welding of AZ31B magnesium alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(1–4), 111–121, (2010)a.

Padmanaban, G. and Balasubramanian, V., "Fatigue performance of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints", *Materials & Design*, 31(8), 3724–3732, (2010)b.

Padmanaban, G., Balasubramanian, V. and Sarin Sundar, J. K., "Influences of Welding Processes on Microstructure, Hardness, and Tensile Properties of AZ31B Magnesium Alloy", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(2), 155–165, (2010).

Pan, F., Xu, A., Ye, J., Tang, A., Jiang, X., Ran, Y. and Du, W., "Effects of rotation rate on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded Mg-5Al-1Sn magnesium alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1–4), 389–397, (2017).

Pan, F., Yang, M. and Chen, X., "A Review on Casting Magnesium Alloys: Modification of Commercial Alloys and Development of New Alloys", *Journal of Materials Science & Technology*, 32(12), 1211–1221, (2016).

Park, S., "Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test", *Scripta Materialia*, 49(2), 161–166, (2003).

Patel, N., Bhatt, K. D. and Mehta, V., "Influence of Tool Pin Profile and Welding Parameter on Tensile Strength of Magnesium Alloy AZ91 During FSW", *Procedia Technology*, 23, 558–565, (2016).

Patel, V., Li, W., Vairis, A. and Badheka, V., "Recent Development in Friction Stir Processing as a Solid-State Grain Refinement Technique: Microstructural Evolution and Property Enhancement", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 44(5), 378–426, (2019)a.

Patel, V., Li, W. and Wen, Q., "Surface analysis of stationary shoulder friction stir processed AZ31B magnesium alloy", *Materials Science and Technology*, 35(5), 628–631, (2019)b.

Patel, V., Li, W. and Xu, Y., "Stationary shoulder tool in friction stir processing: a novel low heat input tooling system for magnesium alloy", *Materials and Manufacturing Processes*, 34(2), 177–182, (2019)c.

Patel, V. V., and Vora, J. J., "Developments in Friction Stir Processing-A Near Net Shape Forming Technique", In: *Near Net Shape Manufacturing Processes*, 35-53. Springer, (2019).

Patle, H., Dumpala, R. and Sunil, B. R., "Machining Characteristics and Corrosion Behavior of Grain Refined AZ91 Mg Alloy Produced by Friction Stir Processing: Role of Tool Pin Profile", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(4), 951–959, (2018).

Pedersen, M. M., *Introduction to metal fatigue*, Technical report ME-TR-11, 91, (2018).

Podržaj, P., Jerman, B. and Klobčar, D., "Welding defects at friction stir welding", *Metalurgija*, 54(2), 387-389, (2015).

Prasad, S. V. S., Prasad, S. B., Verma, K., Mishra, R. K., Kumar, V. and Singh, S., "The role and significance of Magnesium in modern day research- A review", *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(1), 1–61, (2022).

Prasanna, V., Kumar, A. S. and Babu, P. R., "Aspects of Friction stir weldments of rare earth AE42 Magnesium Alloy", *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(17), 6647-6652, (2017).

Prasanna, V., Kumar, Dr. A. S. and Babu, Dr. P. R., "Friction Stir Welding Of Magnesium Alloys - A Review", *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12), (2016).

Qin, Q. dong, Zhao, H. long, Li, J., Zhang, Y. zhe and Su, X. dong, "Microstructure and mechanical properties of friction stir processed Al–Mg₂Si alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(9), 2355–2368, (2020).

Rai, R., De, A., Bhadeshia, H. K. D. H. and DebRoy, T., "Review: friction stir welding tools", *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(4), 325–342, (2011).

Rajakumar, S., Balasubramanian, V. and Razalrose, A., "Friction stir and pulsed current gas metal arc welding of AZ61A magnesium alloy: A comparative study", *Materials & Design*, 49, 267–278, (2013)a.

Rajakumar, S., Razalrose, A. and Balasubramanian, V., "Friction stir welding of AZ61A magnesium alloy: A parametric study", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1–4), 277–292, (2013)b.

Ramanjaneyulu, K., Madhusudhan Reddy, G. and Venugopal Rao, A., "Role of Tool Shoulder Diameter in Friction Stir Welding: An Analysis of the Temperature and Plastic Deformation of AA 2014 Aluminium Alloy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67(5), 769–780, (2014).

Ramezani, M. and Neitzert, T., "Investigation of Hot Formability of AZ61 Mg Alloy", *Modern Mechanical Engineering*, 05(02), 21–27, (2015).

- Razal Rose, A., Manisekar, K. and Balasubramanian, V., "Effect of axial force on microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ61A magnesium alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(5), 974–984, (2011).
- Reimann, M., Gartner, T., Suhuddin, U., Göbel, J. and dos Santos, J. F., "Keyhole closure using friction spot welding in aluminum alloy 6061–T6", *Journal of Materials Processing Technology*, 237, 12–18, (2016).
- Riahi, M. and Nazari, H., "Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(1–4), 143–152, (2011).
- Richmire, S., Hall, K. and Haghshenas, M., "Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy", *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(3), 215–228, (2018)a.
- Richmire, S., Sharifi, P. and Haghshenas, M., "On microstructure, hardness, and fatigue properties of friction stir-welded AM60 cast magnesium alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5–8), 2157–2172, (2018)b.
- Sahoo, M., Thomas-Sadowski, S., and American Foundry Society, *Technology for magnesium castings: design, products & applications*. (2011).
- Sahu, P. K. and Pal, S., "Effect of FSW parameters on microstructure and mechanical properties of AM20 welds", *Materials and Manufacturing Processes*, 33(3), 288–298, (2018).
- Sahu, P. K. and Pal, S., "Effect of Shoulder Diameter and Plunging Depth on Mechanical Properties and Thermal History of Friction Stir Welded Magnesium Alloy", In: *5th Int. 26th All India Manuf. Technol. Des. Res. Conf. (AIMTDR 2014)*, 12-17, (2014).

Sankaranarayanan, S. and Gupta, M., "Emergence of god's favorite metallic element: Magnesium based materials for engineering and biomedical applications", *Materials Today: Proceedings*, 39, 311–316, (2021).

Sejani, D., Li, W. and Patel, V., "Stationary shoulder friction stir welding – low heat input joining technique: a review in comparison with conventional FSW and bobbin tool FSW", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1–50, (2021).

Serindag, H. T. and Kiral, B. G., "Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloys - A Numerical and Experimental Study", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(1), 113–130, (2017).

Sevvel, P. and Jaiganesh, V., "Characterization of Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Friction Stir Welded AZ31B Mg Alloy Through Optimized Process Parameters", *Procedia Engineering*, 97, 741–751, (2014).

Sevvel, P. and Jaiganesh, V., "Impact of tool profile on mechanical properties of AZ31B mg alloy during FSW using optimized parameters", *FME Transaction*, 44(1), 43–49, (2016).

Sevvel, P. and Jaiganesh, V., "Investigation on Evolution of Microstructures and Characterization During FSW of Az80a Mg Alloy", *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(3), 1779–1785, (2017)a.

Sevvel, P. and Jaiganesh, V., "Effects of axial force on the mechanical properties of AZ80A Mg alloy during friction stir welding", *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1312–1320, (2017)b.

Sevvel, P. and Satheesh, C., "Role of tool rotational speed in influencing microstructural evolution, residual-stress formation and tensile properties of friction-stir welded AZ80A Mg alloy", *Materiali in tehnologije*, 52(5), 607–614, (2018).

Shang, Q., Ni, D. R., Xue, P., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y., "Evolution of local texture and its effect on mechanical properties and fracture behavior of

- friction stir welded joint of extruded Mg-3Al-1Zn alloy", *Materials Characterization*, 128, 14–22, (2017).
- Sik, A., "Comparison between microstructure characteristics and joint performance of AZ31 magnesium alloy welded by TIG and friction stir welding (FSW) processes", *Metallic Materials*, 51(03), 197–203, (2021).
- Silitonga, S., "Fatigue life estimation of metal structures based on damage modeling", Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, (2017).
- Simar, A. and Avettand-Fènoël, M. N., "Friction stir processing for architected materials", In: *Architected Materials in Nature and Engineering*, 195-229, Springer, Cham, (2019).
- Singarapu, U., Adepu, K. and Arumalle, S. R., "Influence of tool material and rotational speed on mechanical properties of friction stir welded AZ31B magnesium alloy", *Journal of Magnesium and Alloys*, 3(4), 335–344, (2015).
- Singh, B. R., *A Hand Book on Friction Stir Welding*, LAP Lambert Academic Publishing, UK, (2012).
- Singh, B., Singh, K. and Sahni, V., "Modeling of the Effect of Process Parameters on Tensile Strength of Friction Stir Welded Rare Earth ZE-41 Magnesium Alloy Joints", *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(5), 10, (2018)a.
- Singh, K., Singh, G. and Singh, H., "Review on friction stir welding of magnesium alloys", *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(4), 399–416, (2018)b.
- Singh, B., Singh, K. and Sahni, V., "Mechanical and metallurgical properties of friction stir welded magnesium alloy joints using different pin profiles", *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 6(8), (2018)c.
- Singh, R. P., Dubey, S., Singh, A. and Kumar, S., "A review paper on friction stir welding process", *Materials Today: Proceedings*, 38, 6–11, (2021).

Śliwa, R. E., Balawender, T., Hadasik, E., Kuc, D., Gontarz, A., Korbel, A. and Bochniak, W., "Metal Forming of Lightweight Magnesium Alloys for Aviation Applications", *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(3), 1559–1566, (2017).

Śliwa, R. E. and Myśliwiec, P., "Friction stir welding of thin sheets of magnesium alloy AZ31B", *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(1), (2018).

Soliman, H. A., Shash, A. Y., El Hossainy, T. M. and Abd-Rabou, M., "Investigation of process parameters in orthogonal cutting using finite element approaches", *Heliyon*, 6(11), e05498, (2020).

Staron, P., Koçak, M., Williams, S. and Wescott, A., "Residual stress in friction stir-welded Al sheets", *Physica B: Condensed Matter*, 350(1–3), E491–E493, (2004).

Suhuddin, U. F. H. R., Mironov, S., Sato, Y. S., Kokawa, H. and Lee, C. W., "Grain structure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy", *Acta Materialia*, 57(18), 5406–5418, (2009).

Sun, D. X., Sun, D. Q., Gu, X. Y. and Xuan, Z. Z., "Hot Cracking of Metal Inert Gas Arc Welded Magnesium Alloy AZ91D", *ISIJ International*, 49(2), 270–274, (2009).

Sun, S. J., Kim, J. S., Lee, W. G., Lim, J. Y., Go, Y. and Kim, Y. M., "Influence of Friction Stir Welding on Mechanical Properties of Butt Joints of AZ61 Magnesium Alloy", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–13, (2017).

Sun, T., Roy, M. J., Strong, D., Simpson, C., Withers, P. J. and Prangnell, P. B., "Weld zone and residual stress development in AA7050 stationary shoulder friction stir T-joint weld", *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 256–265, (2019).

Surya Kiran, G. V. V., Krishna, K. H., Sameer, Sk., Bhargavi, M., Kumar, B. S., Rao, G. M., Naidubabu, Y., Dumpala, R. and Sunil, B. R., "Machining characteristics of fine grained AZ91 Mg alloy processed by friction stir processing", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(4), 804–811, (2017).

Templeman, Y., Ben Hamu, G. and Meshi, L., "Friction stir welded AM50 and AZ31 Mg alloys: Microstructural evolution and improved corrosion resistance", *Materials Characterization*, 126, 86–95, (2017).

Tartakovsky, A., Grant, G., Sun, X., and Khaleel, M., "Modeling of friction stir welding (FSW) process with smooth particle hydrodynamics (SPH)", *SAE Technical Papers*, (2006).

Thomas, W. M., *Friction stir butt welding*, Int. Patent No. PCT/GB92/02203, (1991).

Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., and Withers, P. J., "Friction stir welding of aluminium alloys", *International Materials Reviews*, 54(2), 49-93, (2009).

Timesli, A., Zahrouni, H., Braikat, B., Moufki, A. and Lahmam, H., "Numerical model based on meshless method to simulate FSW", In: *PARTICLES II: proceedings of the II International Conference on Particle-Based Methods: fundamentals and applications*, 651-662, CIMNE, (2011).

Tsujikawa, M., Somekawa, H., Higashi, K., Iwasaki, H., Hasegawa, T. and Mizuta, A., "Fatigue of Welded Magnesium Alloy Joints", *MATERIALS TRANSACTIONS*, 45(2), 419–422, (2004).

Türkan, M., "Kaynaklı ve Kaynaksız Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Korozif Ortamlardaki Çekme Davranışları", Master's Thesis, Pamukkale University, (2013).

Türkan, M. and Karakaş, Ö., "The effect of welding defects to the tensile behavior in corrosive environment of AISI 304L stainless steel joined with shielded metal electrode", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 85(1), (2017a).

Türkan, M., Karakaş, Ö., "Corrosion and mechanical behaviour of TIG-welded AISI 304L stainless steel", *Journal of the Balkan Tribological Association*, 23(4) 653-663, (2017b).

Türkan, M., Karakaş, Ö., "The influence of corrosion on the mechanical behavior of AISI 316L stainless steel welds", *Mechanika*, 25(2) 114-118, (2019).

Turkan, M. and Karakas, Ö., "Two different finite element models investigation of the plunge stage in joining AZ31B magnesium alloy with friction stir welding", *SN Applied Sciences*, 3(2), 165, (2021).

Türkan, M., Karakaş, Ö., "Numerical modeling of defect formation in friction stir welding", *Materials Today Communications*, 31(103539), (2022).

Ugender, S., "Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy", *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(2), 205–213, (2018).

Ugender, S., Kumar, A. and Reddy, A. S., "Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy by Friction Stir Welding", *Procedia Materials Science*, 6, 1600–1609, (2014).

Ullmann, M., Kittner, K., Henseler, T., Stöcker, A., Prah, U. and Kawalla, R., "Development of new alloy systems and innovative processing technologies for the production of magnesium flat products with excellent property profile", *Procedia Manufacturing*, 27, 203–208, (2019).

Unnikrishnan, M. A, Edwin R. D. J., "A Comprehensive Survey on Friction Stir Welding of Magnesium Alloys", *International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE)*, 4(12), 16-21, (2016).

- Venkatkumar, D. and Ravindran, D., "Effect of Boundary Conditions on Residual Stresses and Distortion in 316 Stainless Steel Butt Welded Plate", *High Temperature Materials and Processes*, 38(2019), 827–836, (2019).
- Vigneshkumar, M., Padmanaban, G. and Balasubramanian, V., "Influence of tool rotational speed on the formation of friction stir processing zone in cast Zk60/SiCp magnesium alloy surface composites", *Materials Performance and Characterization*, 7(1), 579-590, (2018).
- Vigneshkumar, M., Padmanaban, G. and Balasubramanian, V., "Influence of Tool Tilt Angle on the Formation of Friction Stir Processing Zone in Cast Magnesium Alloy ZK60/SiCp Surface Composites", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8(1), 58–66, (2019).
- Wahid, Mohd. A., Khan, Z. A. and Siddiquee, A. N., "Review on underwater friction stir welding: A variant of friction stir welding with great potential of improving joint properties", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(2), 193–219, (2018).
- Wang, X., Gao, Y., McDonnell, M. and Feng, Z., "On the solid-state-bonding mechanism in friction stir welding", *Extreme Mechanics Letters*, 37, 100727, (2020).
- Wei, S. and Martin, J., "New techniques: robotic friction stir welding", In: *Proc. 10th Int. Symp. on Friction stir welding*, Beijing, China, (2014).
- Wójcik, M. and Skrzat, A., "The Coupled Eulerian-Lagrangian Analysis of the KOBO Extrusion Process", *Advances in Science and Technology, Research Journal*, 15(1), (2021).
- Xu, N., Song, Q., Fujii, H., Bao, Y. and Shen, J., "Mechanical properties' modification of large load friction stir welded AZ31B Mg alloy joint", *Materials Letters*, 219, 93-96, (2018).

Xunhong, W. and Kuaishe, W., "Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 431(1–2), 114–117, (2006).

Yang, J., Ni, D. R., Wang, D., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y., "Strain-Controlled Low-Cycle Fatigue Behavior of Friction Stir-Welded AZ31 Magnesium Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(4), 2101–2115, (2014).

Yang, X. wei, Feng, W. yuan, Li, W. ya, Dong, X. rong, Xu, Y. xin, Chu, Q. and Yao, S. tian, "Microstructure and properties of probeless friction stir spot welding of AZ31 magnesium alloy joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(11), 2300–2309, (2019).

You, S., Huang, Y., Kainer, K. U. and Hort, N., "Recent research and developments on wrought magnesium alloys", *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(3), 239–253, (2017).

Zeng, R. chang, Dietzel, W., Zettler, R., Chen, J. and Kainer, K. U., "Microstructure evolution and tensile properties of friction-stir-welded AM50 magnesium alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18, s76–s80, (2008).

Zhang, X. X., Xiao, B. L. and Ma, Z. Y., "A Transient Thermal Model for Friction Stir Weld. Part I: The Model", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(10), 3218–3228, (2011).

Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S. and Wanjara, P., "Review of tools for friction stir welding and processing", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(3), 250–261, (2012).

Zhang, Z., "Comparison of two contact models in the simulation of friction stir welding process", *Journal of Materials Science*, 43(17), 5867–5877, (2008).

Zhang, Z., Wu, Q. and Zhang, H. wu, "Numerical studies of effect of tool sizes and pin shapes on friction stir welding of AA2024-T3 alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3293–3301, (2014).

Zhou, W., Dong, P., Pei, X., Karakaş, Ö. and Li, X., "Evaluation of magnesium weldment fatigue data using traction and notch stress methods", *International Journal of Fatigue*, 138, 105695, (2020).

Zhou, L., Li, G. H., Zha, G. D., Shu, F. Y., Liu, H. J. and Feng, J. C., "Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded AZ61 magnesium alloy", *Science and Technology of Welding and Joining*, 23(7), 596–605, (2018).

Zhou, L., Liu, D., Nakata, K., Tsumura, T., Fujii, H., Ikeuchi, K., Michishita, Y., Fujiya, Y. and Morimoto, M., "New technique of self-refilling friction stir welding to repair keyhole", *Science and Technology of Welding and Joining*, 17(8), 649–655, (2012).

Zhu, Y., Chen, G., Chen, Q., Zhang, G. and Shi, Q., "Simulation of material plastic flow driven by non-uniform friction force during friction stir welding and related defect prediction", *Materials & Design*, 108, 400–410, (2016).

Zhu, Z., Wang, M., Zhang, H., Zhang, X., Yu, T. and Wu, Z., "A Finite Element Model to Simulate Defect Formation during Friction Stir Welding", *Metals*, 7(7), 256, (2017).

Zolghadr, P., Akbari, M. and Asadi, P., "Formation of thermo-mechanically affected zone in friction stir welding", *Materials Research Express*, 6(8), (2019).