

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**2219 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA  
NOKTA KAYNAKLI BAĞLANTILARININ ÖZELLİKLERİ VE  
DENEYSEL TASARIMLA OPTİMİZASYONU**

**OLATUNJI OLADIMEJI OJO**

**KOCAELİ 2016**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**


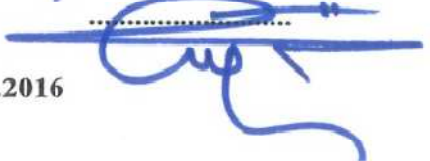
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**2219 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA**  
**NOKTA KAYNAKLI BAĞLANTILARININ ÖZELLİKLERİ VE**  
**DENEYSEL TASARIMLA OPTİMİZASYONU**

**OLATUNJI OLADIMEJI OJO**

**Doç.Dr. Emel TABAN**  
Danışman, Kocaeli Univ.  
**Prof.Dr. Erdinç KALUÇ**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Univ.  
**Doç.Dr. Kasım BAYNAL**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Univ.  
**Prof.Dr. Salim ASLANLAR**  
Jüri Üyesi, Sakarya Univ.  
**Doç.Dr. Uğur ÖZSARAÇ**  
Jüri Üyesi, Sakarya Univ.

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 26.10.2016

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu araştırmada ergitme esaslı yöntemlerle kaynağı zor yapılabilen alüminyum alaşımının katı faz sürtünme karıştırma nokta kaynağı, kaynaklanabilirliği incelenmesi ve plastikleştirilmiş malzemenin akışı kapsamaktadır. Ayrıca, kaynak özelliklerinin tek yanıt ve hibrid çok yanıtlı optimizasyonları sağlanmaktadır. Araştırmanın çoğu işlemleri, ICM Makina fabrikasında, Tubitak Marmara Arastırma Merkezi'nde, Assan Alüminyum'da, ve Gazi üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bu tez, elde edilen sonuçlara ve ilişkili kapsamlı çalışmalara yer vermektedir.

Danışmanım, Doç. Dr. Emel TABAN'ın ve Makina Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi, Prof. Dr. Erdinç KALUÇ'un paha biçilemez destekleri, proje yardımı, zihinsel mentorluğu ve araştırma işlemlerime karşı sınırsız proaktifliği için kendilerine en derin teşekkürlerimi onlara sunarım. Onların deneyim zenginlikleri ve yardımları, araştırma çalışmalarımın ilerlemesi üzerine muazzam bir başarı etkisi verdi. Doç. Dr. Emel TABAN ve Prof. Dr. Erdinç KALUÇ'ın katkıları ve destekleri olmadan benim programım süresince bazı karşılaşılan üzücü zorlukları giderilemezdi. Bu yüzden onların yaptıkları için çok teşekkür ediyorum. Tez izleme komitesi üyesi, Doç. Dr. Kasım Baynal'a da desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Gerekli alüminyum levhalarını teslim almak için verilen proje desteği için KOU'nin Bilimsel Araştırma Proje Bölümü'ne (BAP) teşekkür ederim. Ayrıca, tüm yürütölen sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemleri ve ilgili diğer deneysel işlemler için ICM Makina fakrikasının Genel Müdürü Çınar ULUSOY ve CNC freze makinesi operatörü, şenol AYDIN'a şükranlarımı sunarım.

Benzer şekilde, Tubitak Marmara Arastırma Merkezi'nin (MAM) Malzeme Enstitüsü'ndeki Dr. Bülent AYDEMİR ve Hasan TAşCAN tarafından verilen araştırma desteği için son derece minnettarım. Aynı şekilde, çekme testlerinin bir kısmının gerçekleştirilmesinde Kocaeli Üniversitesi'nin Makina Mühendisliği Bölümündeki Araştırma Görevlisi, Alp Eren şAHİN Bey'in çabalarını takdir ederim. Kaynaklı parçaların yorulma testi sırasında aldığım paha biçilemez destek için Gazi Üniversitesi'ndeki Doç. Dr. Aydın şık ve Aytekin BOZKURT'a teşekkür ederim. Ayrıca, birleştirilen parçaların metalografi ve kırılma analizini elde etmek için Assan Alüminyum'un araştırma-geliştirme bölümündeki Onur Binbasar'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Kocaeli Üniversitesi, Türkiye'de doktora çalışması fırsatının verilmesi ve verilen ayrıcalık için Türk Hükümeti Bursu Kurulu'na minnettarım. Son olarak, doktora programı süresince ailemle yaşamadığım için ve destek oldukları için eşim, Taiwo Ojo-Olatunji ve çocuklarım, Zion Iyanuloluwa Ojo ve Samuel Ojo'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ekim - 2016

Olatunji Oladimeji OJO

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
ÖZET.....	xxii
ABSTRACT .....	xxiii
GİRİŞ .....	1
1. ARAŞTIRMA MOTİVASYONU .....	5
1.1. Araştırma Hedefleri .....	7
1.2. Tez Yapısı.....	7
2. ALÜMİNYUM .....	10
2.1. Giriş .....	10
2.2. Alüminyum Özellikleri.....	11
2.3. Alüminyum Tarihçesi.....	13
2.4. Alüminyum Üretimi .....	16
2.4.1. Birincil alüminyum üretimi .....	19
2.4.1.1. Bayer yöntemi (alumina üretimi) .....	20
2.4.1.2. Hall-Heroult yöntemi (birinci alüminyum üretimi).....	22
2.4.2. İkincil Alüminyum Üretimi .....	23
2.5. Alüminyum Alaşımları .....	24
2.5.1. Dövme alüminyum alaşımları.....	26
2.5.2. Döküm alüminyum alaşımları .....	29
2.6. Alüminyum Alaşımlarının Evre Bağlıları .....	30
2.7. Alüminyum Alaşımlarının Uygulama Alanları .....	30
2.7.1. Binalar ve köprüler .....	31
2.7.2. Otomotiv endüstrileri.....	35
2.7.3. Havacılık sanayii, gemi yapımı ve trenler .....	35
2.8. Alüminyum Alaşımlarının Kuvvetlendirme Mekanizması .....	37
2.9. Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklanabilirliği.....	38
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI LİTERATÜR TARAMASI.....	40
3.1. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının (FSSW) Tarihçesi .....	40
3.1.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının mekanizması.....	43
3.1.2. FSSW'in donanımı .....	46
3.1.3. FSSW'in metalurjisi .....	49
3.1.4. FSSW'in avantajları.....	50
3.2. Literatürdeki Mevcut Olan Alüminyumun Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yöntemleri.....	52
3.2.1. Özel FSSW .....	53
3.2.1.1. Yeniden doldurulmalı FSSW.....	54
3.2.1.2. Ultrasonik FSSW.....	55

3.2.1.3.	Çift taraflı FSSW .....	56
3.2.1.4.	Abrasion circle FSSW .....	56
3.2.1.5.	Swing FSSW .....	57
3.2.1.6.	Swept FSSW .....	57
3.2.2.	Pimsiz FSSW .....	58
3.2.2.1.	Gömülmüş FSSW takımı .....	58
3.2.2.2.	Düz FSSW takımı .....	59
3.2.2.3.	Helezonik kıvrılmış takım .....	59
3.2.3.	Pimli FSSW .....	59
3.2.4.	Omuz Değiştirilmiş FSSW .....	60
3.3.	Literatürdeki Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı .....	61
3.4.	Mikroyapı .....	63
3.5.	Mekanik Özellikleri .....	66
3.5.1.	Mikro sertlik ölçümü .....	67
3.5.2.	Çekme mukavemeti ya da bağlantının kırılma yükü .....	69
3.5.3.	Bağlantının yorulma mukavemeti .....	72
3.6.	Malzeme Akışı .....	73
4.	DENEY TASARIMI VE LİTERATÜR TARAMASI .....	75
4.1.	Tek Yanıt Taguchi Analizi .....	76
4.1.1.	Kalite kayıp fonksiyonu .....	77
4.1.2.	Sinyal-gürültü (S/G) oranı .....	78
4.1.3.	Taguchi'nin dikey sıralar (DS) .....	79
4.2.	Taguchi'nin Deney Tasarımındaki İlgili Adımlar .....	80
4.3.	Çoklu Yanıtlar Optimizasyon Analizi .....	81
4.3.1.	Gri ilişkisel analiz (GİA) .....	82
4.3.2.	Taguchi yöntemi-gri ilişkisel analiz .....	85
4.3.3.	Taguchi parametrik tasarımı, gri ilişkisel analiz ve temel bileşen analizinin melez tümleştirmesi .....	87
4.3.3.1.	Temel bileşenler analizinin (tba) bakışı .....	87
4.4.	Model Geliştirme .....	91
4.5.	Literatürdeki Alüminyumun Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Optimizasyonu .....	91
5.	AMAÇ VE ÇALIŞMA PLANI .....	94
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA .....	96
6.1.	Malzemeler .....	97
6.1.1.	İş parçası malzemesi .....	97
6.1.2.	FSSW takım malzemesi .....	98
6.2.	Ön Çalışmalar .....	99
6.2.1.	FSSW takımının üretimi .....	99
6.2.2.	İş Parçası malzemesinin hazırlanması .....	101
6.2.3.	Malzemelerin temizlemesi .....	102
6.3.	Kaynak Prosedürleri .....	103
6.4.	Deney Tasarımı .....	109
6.5.	Test Numunelerinin Hazırlanması .....	112
6.5.1.	Test numunelerinin kodlanması .....	112
6.5.2.	Çekme kesme numunesi .....	113
6.5.3.	Sertlik numunesi .....	114
6.5.4.	Yorulma numunesi .....	116

6.5.5.	Mikroyapı incelenmesi .....	117
6.6.	Deneysel Çalışma .....	117
6.6.1.	Kaynak görünümünün görsel değerlendirilmesi.....	117
6.6.2.	Nokta bağlantılarının plastikleştirilmiş malzemesinin ölçümü ...	118
6.6.3.	Çekme testi .....	118
6.6.4.	Sertlik testi .....	120
6.6.5.	Yorulma testi .....	120
6.6.6.	Makro ve mikroyapı analizleri.....	123
6.6.7.	Kırılma yüzeyi analizi.....	124
7.	SONUÇLAR .....	125
7.1.	Görsel Sonuçlar .....	125
7.1.1.	Pimsiz kaynaklı bağlantının görsel sonuçları .....	125
7.1.1.1.	Pimsiz kaynaklı bağlantının çıkarılmış çapak hacmi .....	127
7.1.2.	Pimli kaynaklı bağlantının görsel sonuçları .....	129
7.1.2.1.	Konik pimli bağlantıların çapak hacmi .....	130
7.2.	Çapak Özelliklerinde Kaynak Parametrelerinin Analitik Rollerini.....	135
7.3.	Çapak Hacmi Üzerinde Tepe Sıcaklığında Karıştırılmış Bölge Enerjisinin Etkisi .....	144
7.4.	Çıkarılmış Çapak Ve Kaynak Mukavemeti Arasındaki İlişki.....	146
7.5.	Hesaplanmış Plastikleştirilmiş Malzemenin Nüfuz Hacmi.....	150
7.5.1.	Pimsiz kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi .....	152
7.5.2.	Konik pim kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi .....	154
7.6.	Plastikleştirilmiş Nüfuz Edilen Malzeme Üzerinde Kaynak Parametrelerinin Analitik Rollerini .....	158
7.7.	Çekme Sonucu.....	160
7.7.1.	Kaynak parametreleri ve çekme makaslama yükü arasındaki ilişki.....	161
7.7.2.	Kırılma sonrasında kaynakların boyutu veya nugget boyutu .....	162
7.7.3.	Eksenel yükleme altında kırılmış kaynak numunesi üzerinde gerilme analizi .....	166
7.8.	Sertlik Ölçümü.....	173
7.9.	Yorulma Sonuçları.....	176
7.10.	Makro ve Mikroyapı Sonuçları .....	180
7.10.1.	Kaynakların makroyapısı.....	180
7.10.2.	Kaynak bölgeleri ve kaynakların mikroyapısı.....	182
7.10.3.	Kaynakların bağlanmış boyutu .....	188
7.10.4.	Kaynaklı bağlantındaki mevcut olan mikroyapı kusurları.....	192
7.10.4.1.	Mikroyapı Sonuçlarına Göre Kaynaklarda Kırılma Analizi .....	194
7.11.	Kırılma Morfolojisi (çekme ve yorulma Sonuçları).....	196
7.11.1.	Monoton eksenel yükleme altında konik pim kaynaklı bağlantının kırılma modu .....	196
7.11.1.1.	Konik pim kaynaklarının kırılma yüzeylerinin SEM mikroyapıları.....	197

7.11.2. Monoton eksenel yükleme altında pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma modları .....	200
7.11.2.1. Pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin tem mikrografları .....	201
7.11.3. Dinamik veya çevrimsel yükleme altında yorulma numunesinin kırılma modları .....	204
7.12. Optimizasyon Sonuçları .....	213
7.12.1. Pimsiz kaynağın tek tepki optimizasyonu .....	213
7.12.1.1. Pimsiz kaynakların doğrulanması .....	218
7.12.2. Konik pim kaynaklı bağlantının tek tepki optimizasyonu .....	218
7.12.2.1. Konik pim kaynağının doğrulanması .....	223
7.12.3. Kırılma yükü, çapak hacmi ve plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacminin hibrid çok tepki optimizasyonu .....	223
7.12.3.1. S/G analizi .....	224
7.12.3.2. Normalleştirme .....	225
7.12.3.3. Gri ilişkisel katsayılarının hesaplanması .....	226
7.12.3.4. TBA yoluyla yüzde katkısının ya da ağırlık değerlerinin hesaplanması .....	228
7.12.3.5. Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması .....	230
7.12.3.6. Proses parametrelerinin optimal kombinasyonu .....	231
7.12.3.7. Varyans analizi .....	233
7.12.3.8. Doğrulama/onaylama testi .....	233
7.12.4. Kırılmayükü, çapak hacmi ve etkili bağlanmış uzunluğun hibrid çok tepki optimizasyonu .....	234
7.12.4.1. S/G analizi .....	234
7.12.4.2. Normalleştirme .....	235
7.12.4.3. Gri ilişkisel katsayılarının hesaplanması .....	236
7.12.4.4. TBA yoluyla yüzde katkısının ya da ağırlık değerlerinin hesaplanması .....	237
7.12.4.5. Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması .....	239
7.12.4.6. Proses parametrelerinin optimal kombinasyonu .....	240
7.12.4.7. Varyans analizi .....	241
7.12.4.8. Doğrulama/onaylama testi .....	241
8. TARTIŞMA .....	242
8.1. Görsel Görünüm .....	242
8.1.1. Kaynak yüzeyindeki delik şekli .....	242
8.1.2. Çıkarılmış çapak .....	243
8.1.2.1. Çapak oluşumunda takım geometrinin etkisi .....	245
8.2. Çapak Özelliklerinde Kaynak Parametrelerinin Rolü .....	251
8.3. Tepe Sıcaklığında Çapak Hacmi Üzerinde Karıştırma Bölgesi Enerjisinin Etkisi .....	253
8.4. Çıkarılan Çapak ve Kaynak Gücü Arasındaki İlişki .....	253
8.5. Plastikleştirilmiş Malzemenin Nüfuziyet Hacmi ve Onun Kaynak Parametrelerinin Etkisi .....	254
8.6. Çekmede Kırılma Yükü .....	256
8.7. Sertlik Dağıtımı .....	258
8.7.1. Sertlik üzerinde kaynak parametresi değişimlerinin etkisi .....	259
8.7.2. Kaynağın mikroyapıları ve sertliği arasında korelasyon .....	260
8.8. Yorulma .....	260

8.9. Bağlantıların Makro- ve Mikro Yapıları .....	262
8.10. Kırılma Morfolojisi (gerilme ve yorulma sonuçları).....	264
8.10.1. Eksenel yüklenen konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma morfolojileri.....	264
8.10.1.1. Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikrografları.....	265
8.10.2. Eksenel yüklenen pimsiz kaynağın kırılma morfolojisi .....	267
8.10.2.1. Konik pim kaynaklı bağlantının kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikro yakın çekimi.....	268
8.10.3. Dinamik yüklü bağlantıların kırılma morfolojileri .....	268
8.10.3.1. Kırılmış konik pim kaynakları.....	269
8.10.3.2. Kırılmış pimsiz kaynaklı bağlantılar .....	269
8.11. Optimizasyon.....	270
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	272
9.1. Sonuçlar .....	272
9.2. Öneriler.....	276
KAYNAKLAR .....	278
EKLER.....	294
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	304
ÖZGEÇMİŞ .....	306



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Çeşitli boksit şekilleri .....	14
Şekil 2.2.	Paul Louis Toussaint Héroult (sol) and Charles Martin Hall (sağ) - alüminyumun elektrolitik çıkarmasının yaratıcıları .....	16
Şekil 2.3.	Birincil ve yeniden kazanılmış alüminyumun küresel büyümesi .....	18
Şekil 2.4.	Birincil ve yeniden kazanılmış alüminyum .....	19
Şekil 2.5.	Bayer süreci .....	21
Şekil 2.6.	Alüminyum metalinin elektrolitik erimesi için Hall-Heroult hücresinin şeması .....	23
Şekil 2.7.	Biçimlenebilen alüminyum alaşımının sınıflandırılması .....	28
Şekil 2.8.	Üretilen alüminyumlu ürünler için evrensel son tüketicinin pıyasaları .....	31
Şekil 2.9.	Alüminyum köprüleri .....	32
Şekil 2.10.	Alüminyum alaşımlarından üretilen ikonik binalar .....	34
Şekil 2.11.	Alüminyum yoğun XE .....	35
Şekil 2.12.	Alüminyum alaşımından üretilen uçak, gemi ve tren .....	36
Şekil 2.13.	Alüminyum Alaşımının Çökeltme Sertleştirilmesi.....	38
Şekil 3.1.	Sürtünme karıştırma kaynağının sınıflandırılması .....	40
Şekil 3.2.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağının ilkeleri .....	44
Şekil 3.3.	Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojisinden oluşturulmuş alüminyum-magnezyum nokta kaynakları .....	45
Şekil 3.4.	Özel olarak tasarlanmış sürtünme kaynak makinesi .....	47
Şekil 3.5.	Çevre dostu CNC sürtünme karıştırma kaynağı makinesi .....	47
Şekil 3.6.	Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan temel takım profili .....	49
Şekil 3.7.	Metallerin FSSW kaynak bölgeleri .....	50
Şekil 3.8.	Mevcut olan alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynakları.....	53
Şekil 3.9.	Yeniden doldurulmalı FSSW işlemi.....	54
Şekil 3.10.	Üçgen biçimli pim .....	60
Şekil 3.11.	Silindrik pimler .....	61
Şekil 3.13.	Takım dönem hızı ve karıştırılmış bölgedeki ilişkisi .....	65
Şekil 3.12.	FSSW'ın 2024-T3 mikroyapısal bölgeleri .....	65
Şekil 3.14.	FSSW'lı kaynak mikro sertliğinde ultrasonik titreşimi etkisi .....	69
Şekil 3.15.	Çekme mukavemetinde sıcaklık etkisi .....	71
Şekil 3.16.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağında malzeme akışı .....	74
Şekil 4.1.	Taguchi'nin kayıp fonksiyonu .....	78
Şekil 4.2.	Taguchi'nin deney tasarımındaki ilgili adımların akım şeması .....	81
Şekil 4.3.	Gri ilişkisel analizin akış şeması.....	84
Şekil 4.4.	Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analizin akış şeması .....	86
Şekil 4.5.	Taguchi yöntemi, Gri ilişkisel analiz ve temel bileşenler analizinin melez tümleştirmesi akış şeması .....	90
Şekil 6.1.	İşlenmiş FSSW takımı malzemesi .....	100
Şekil 6.2.	Pimli FSSW takımı .....	101

Şekil 6.3.	Pimsiz FSSW takımı.....	101
Şekil 6.4.	İş parçası malzemesinin hassas kesimi için kullanılan hidrolikle tahrik edilen giyotin metal kesme makinesi .....	102
Şekil 6.5.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin tasarlanmış bindirme kaynaklanma modeli.....	104
Şekil 6.6.	Adapte edilen sürtünme karıştırma nokta kaynak makinesi .....	105
Şekil 6.7.	CNC freze makinesinde iş parçası malzemesinin kenetlenmesi.....	107
Şekil 6.8.	CNC feze makinesi ile kaynak işlemi.....	108
Şekil 6.9.	Tasarlanmış kaynak modeline göre tipik bindirmeli bağlantılar .....	109
Şekil 6.10.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağının çekme kesme numunesi.....	113
Şekil 6.11.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağı'lı çekme kesme numuneleri .....	114
Şekil 6.12.	Pimsiz bağlantının kesiti .....	115
Şekil 6.13.	Konik pimli bağlantının kesiti .....	115
Şekil 6.14.	Yorulma test numunesinin geometrik şeması.....	116
Şekil 6.15.	Kaynaklanmış bağlantılarından üretilen yorulma test numuneleri.....	117
Şekil 6.17.	Çekme makinesindeki nokta kaynaklı AA2219-O numunesinin çekme kesme testi işlemi .....	119
Şekil 6.16.	Çekme makaslama numunesi için eksenel yükleme deseninin şematik gösterimi .....	119
Şekil 6.18.	Kesme numunesinin dinamik yüklemesi şeması .....	120
Şekil 6.19.	Eğilmeli yorulma makinesi .....	121
Şekil 6.20.	Yorulma makinesindeki monte edilmiş yorulma numunesi .....	122
Şekil 6.21.	Konik pimli FSSW'li bağlantının kesit görünüşü.....	123
Şekil 6.22.	Pimsiz FSSW'li bağlantının kesit görünüşü .....	124
Şekil 7.1.	Üretilmiş pimsiz bağlantının yüzey görünüşleri .....	126
Şekil 7.2.	1,6mm kalınlığındaki AA2219-O alaşımının pimsiz kaynaklı bağlantının özellikleri .....	126
Şekil 7.3.	Pimsiz kaynaklı bağlantıdaki çapağın morfolojisi (a) kesit görünüşü; (b) şematik plan illüstrasyonu.....	127
Şekil 7.4.	1400dev/dak'lık takım dönme hızı ile üretilen bağlantıların yüzey görünümü (a) 2,90mm dalma derinliğinde elde edilen pim deliği ile çevresel çapak (b) 2,92mm dalma derinliğinde elde edilen pim deliği ile çevresel çapak (c) 2,95mm dalma derinliğinde elde edilen pim deliği ile çevresel çapak.....	129
Şekil 7.5.	1,6mm kalınlığındaki AA2219-O alaşımının konik pim ile kaynak edilmiş bağlantı.....	130
Şekil 7.6.	Konik pim ile kaynaklı bağlantının çapak morfolojisi (a) kesit görünüşü; (b) şematik görünümü.....	131
Şekil 7.7.	Konik pimli ve pimsiz bağlantıların çapak özelliklerinde farklı kaynak parametre kombinasyonlarının grafiksel değerlendirmesi (a) halka çapağın dışarı itilen uzunluğu; (b) halka çapağın kalınlığı .....	136
Şekil 7.8.	Konik pimli ve pimsiz bağlantıların çapak özelliklerinde farklı kaynak parametre kombinasyonlarının grafiksel değerlendirmesi (a) çıkarılmış halka çapak hacmi; (b) genel çıkarılmış çapak hacmi.....	137
Şekil 7.9.	Aynı seviyede konik pimli ve pimsiz kaynaklı bağlantılarda çıkarılmış çapak hacimlerinin karşılaştırılması (a) takım dönme hızı; (b) omuz daldırılma derinliği; (c) kalma süresi .....	140

Şekil 7.10.	0,95Ts tepe sıcaklığını elde etmek için gerekli karıştırma bölgesinin enerjileri ile çıkarılmış çapak karşılaştırılması (a) pimsiz kaynaklarda; (b) konik pimli kaynaklarda .....	146
Şekil 7.11.	Pimsiz takım ile kaynaklanmış bağlantılarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki ilişki (a) basit korelasyon (b) parametre birleşimi ayarlarında korelasyon .....	147
Şekil 7.12.	Konik pimli takım ile kaynaklanmış bağlantılarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki ilişki (a) basit korelasyon (b) parametre birleşimi ayarlarında korelasyon .....	148
Şekil 7.13.	Kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki optimum polinom regresyon (a) pimsiz kaynaklarda; (b) konik pimli kaynaklarda .....	149
Şekil 7.14.	Pimsiz FSSW’de tipik bir malzeme akışının şematik diyagramı .....	151
Şekil 7.15.	Konik pimli FSSW’de tipik bir malzeme akışının şematik diyagramı .....	151
Şekil 7.16.	Pimsiz takım tarafından oluşturulan yüzey boşluğunun hacminin diyagram temsili .....	152
Şekil 7.17.	Pimsiz kaynaklarda çıkarılmış çapak hacmi ve plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmi arasındaki ilişki (a) trend/regresyon grafiği; (b) çubuk grafiği .....	154
Şekil 7.18.	Konik pim tarafından oluşturulan boşluk .....	155
Şekil 7.19.	Konik pimli kaynakların çıkarılmış çapak hacmi ve nüfuziyet hacmi arasındaki ilişki (a) trend/regresyon grafiği; (b) çubuk grafiği .....	157
Şekil 7.20.	Pimsiz ve konik pimli kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi üzerinde kaynak parametrelerinin etkileri (a) takım dönme hızı; (b) omuz dalma derinliği; (c) kalma süresi .....	159
Şekil 7.21.	Pimsiz ve konik pimli kaynaklı bağlantılarında çekme makaslama yükleri ve kaynak parametreleri arasındaki ilişki (a) takım dönme hızı; (b) omuz dalma derinliği; (c) kalma süresi .....	162
Şekil 7.22.	Konik pim kaynaklı bağlantının kırık deseni ve bağlanmış boyutu ...	163
Şekil 7.23.	Konik pimli kaynakların bağlanmış boyutları veya Nuggetleri ve çekmede kesme yükleri arasındaki ilişki .....	165
Şekil 7.24.	Eksenel yüklü pimsiz kaynak (a) kaynağın nugget rotasyonu; (b) nuggetin açısız yer değiştirmesi; (c) kırılmış numune ile gerilmeler; (d) kırılmış kesme deneyi numunesinin serbest cisim diyagramı; (d) kuvvet çözünürlüğü .....	167
Şekil 7.25.	Eksenel yüklü konik pimli kaynak (a) kaynağın zayıf nugget rotasyonu; (b) kırılmış numune ile gerilmeler .....	171
Şekil 7.26.	Konik pim kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (TEN1 kaynak numunesi) .....	173
Şekil 7.27.	Konik pim kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (TEN1 kaynak numunesi) .....	174
Şekil 7.28.	Pimsiz kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (P-TEN3 kaynak numunesi) .....	175
Şekil 7.29.	Pimsiz kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (P-TEN7 kaynak numunesi) .....	176
Şekil 7.30.	İki konik pim kaynaklı bağlantının yorulma verilerinin karşılaştırması (FAT1 and FAT8) .....	178

Şekil 7.31.	İki pimsiz kaynaklı bağlantının yorulma verilerinin karşılaştırması (P-FAT3 and P-FAT7).....	178
Şekil 7.32.	En düşük çekmede kesme yüklerine dayalı pimsiz ve konik pim kaynaklı birleştirmelerin yorulma verilerinin karşılaştırılması .....	179
Şekil 7.33.	En büyük çekmede kesme yükleri dayalı pimsiz ve konik pim kaynaklı birleştirmelerin yorulma verilerinin karşılaştırılması .....	179
Şekil 7.34.	Konik pim destekli kaynağın makroyapısı (TEN1 kaynaklı bağlantı) .....	180
Şekil 7.35.	Konik pim destekli kaynağın makroyapısı (TEN8 kaynaklı bağlantı) .....	181
Şekil 7.36.	Pimsiz takım destekli kaynağın makroyapıları (a) P-TEN3 kaynaklı bağlantı; (b) P-TEN7 kaynaklı bağlantı .....	182
Şekil 7.37.	Konik pim kaynaklı bağlantıda kaynak bölgelerinin illüstrasyonu (TEN1 kaynaklı bağlantı) (SZ- karıştırılmış bölge, TMEB- Termo-mekanik etkilenen bölge, IEB- ısıdan etkilenen bölge ve EM- Esas metal).....	183
Şekil 7.38.	Konik pim destekli bağlantının mikroyapısı (TEN8 birleştirilmiş bağlantı) .....	184
Şekil 7.39.	Konik pim kaynaklı bağlantının mikroyapısı (TEN1 kaynaklı bağlantı) .....	185
Şekil 7.40.	Pimsiz kaynağın makroyapısında kaynak bölgelerinin illüstrasyonu (P-TEN3 kaynaklı bağlantı) (SZ- karıştırılmış bölge, TMEB- Termo-mekanik etkilenmiş bölge, IEB- ısıdan etkilenmiş bölge ve EM- esas metal).....	186
Şekil 7.41.	Tane boyutunu gösteren pimsiz kaynağın mikroyapıları (P-TEN3 kaynaklı bağlantı) .....	187
Şekil 7.42.	Pimsiz kaynağın mikrografları (P-TEN7 kaynaklı bağlantı).....	188
Şekil 7.43.	FSSW'li bağlantının birleştirilmiş genişliği/bölgesi (a) konik pim kaynaklı bağlantının bağlanmış bölgesi (TEN1). A – Üstteki levhaya yakın karıştırılmış bölge, B – arayüzey alanına yakın karıştırılmış bölge, ve C- etkili bağlanmış bölge/genişlik; (b) Pimsiz kaynaklı bağlantının birleştirilmiş bölgesi (P-TEN3).....	189
Şekil 7.44.	Etkili bağlanmış uzunluğu gösteren konik pim kaynaklı bağlantıların mikrografları (TEN1 kaynaklı bağlantı).....	191
Şekil 7.45.	Konik pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu (TEN8) .....	191
Şekil 7.46.	Kaynaklı birleştirmelerde kaplama etkilenmiş alanlarını gösteren mikrograflar (a) pimsiz kaynak bağlantıları; (b) konik pim kaynaklı bağlantılar.....	192
Şekil 7.47.	Kaynaklı birleştirmelerde çentik veya çatlak (a) pimsiz kaynakta malzeme akışından çentik; (b) bağlanmamış çatlak yolu .....	193
Şekil 7.48.	Konik pim kaynaklı bağlantıda olusabilen kırılma yolu.....	194
Şekil 7.49.	Pimsiz kaynaklı bağlantıda olası kırılma yolu.....	195
Şekil 7.50.	Monoton eksenel yükleme koşulu altında konik pim kaynaklı bağlantının alt sacın kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt plakanın plan görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri .....	198
Şekil 7.51.	Monoton eksenel yükleme koşulu altında konik pim kaynaklı bağlantının üst plakasının kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt plakanın plan görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri .....	199

Şekil 7.52.	Monoton aksenal yükleme koşulu altında pimsiz kaynaklı bağlantının alt plakasının kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt sac görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri .....	202
Şekil 7.53.	Monoton aksenal yükleme koşulu altında pimsiz kaynaklı bağlantının alt plakasının kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt sac görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri .....	203
Şekil 7.54.	Çevrimsel yükleme altında konik pim destekli bağlantıların kırılma deseni.....	204
Şekil 7.55.	Çevrimsel yükleme altında pimsiz takım destekli bağlantıların kırılma deseni.....	205
Şekil 7.56.	Pimsiz kaynaklarda kırılma desenleri (a) P-FAT3 (mini); (b) P-FAT 7 (max) (S- kırılma başlangıcı, P- kırılma ilerlenmesi, F- son kırılma).....	206
Şekil 7.57.	Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma desenleri (a) FAT 1 (max); (b) FAT 8 (mini). (S- kırılma başlangıcı, P- kırılma ilerlenmesi, F- son kırılma).....	207
Şekil 7.58.	Yorulmaya tabi tutulan pimsiz kaynağın SEM mikroyapıları - P-FAT7 numunesi .....	209
Şekil 7.59.	Yorulmaya tabi tutulan pimsiz kaynağın SEM mikroyapıları - P-FAT3 numunesi .....	209
Şekil 7.60.	Yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynağının SEM mikroyapıları - FAT1 numunesi .....	211
Şekil 7.61.	Yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynağının SEM mikroyapıları - FAT8 numunesi .....	212
Şekil 7.62.	Pimsiz kaynakların ana etki grafiği .....	215
Şekil 7.63.	Pimsiz kaynakların kalite yanıtının etkileşim grafiği .....	216
Şekil 7.64.	Pimsiz kaynakların artık grafiği.....	216
Şekil 7.65.	Pimsiz kaynaklı bağlantıların optimizasyon grafikleri (a) takım dönme hızı ile dalma derinliği; (b) takım dönme hızı ile kalam süresi; (c) dalma derinliği ile kalm süresi.....	218
Şekil 7.66.	Konik pim kaynaklarının ana etki grafiği .....	220
Şekil 7.67.	Konik pim kaynaklı bağlantıların etkileşim grafiği .....	221
Şekil 7.68.	Konik pim kaynaklı bağlantıların artık grafiği .....	221
Şekil 7.69.	Konik pim kaynaklı bağlantının optimizasyon grafiği: (a) takım dönme hızı ile dalma derinliği; (b) takım dönme hızı ile kalma süresi; (c) dalma derinliği ile kalma süresi .....	223
Şekil 7.70.	Temel bileşenlerin grafikleri: (a) temel bileşenin gözlem çizisi; (b) temel bileşenin ikili çizisi (1st PC- birinci temel bileşen ve 2nd PC- ikinci temel bileşen).....	230
Şekil 7.71.	Gri ilişkisel sınıfın ana etki grafiği .....	232
Şekil 7.72.	Gri ilişkisel sınıf üzerinde parametrelerin etkileşim etkileri .....	232
Şekil 7.73.	Temel bileşenlerin grafikleri: (a) temel bileşenin gözlem çizisi; (b) temel bileşenin ikili çizisi (1st PC- birinci temel bileşen ve 2nd PC- ikinci temel bileşen).....	239
Şekil 7.74.	Gri ilişkisel sınıfın ana etki grafiği .....	240
Şekil 8.1.	Pimsiz kaynaklarında çapak oluşumuna santrifüj sürüklenme etkisi: (a) şematik diyagram; (b) kaynak görüntüsü .....	247
Şekil 8.2.	Konik pimli kaynaklarında çapak oluşumuna santrifüj sürüklenme etkisi: (a) şematik diyagram; (b) kaynak görüntüsü .....	249

Şekil 8.3.	Baskın takım-malzeme temas bölgeleri veya akış bölgeleri (a) pimsiz kaynak (I- Omuz-malzeme teması); (b) Konik pimli kaynak (I- pin ucu-malzeme teması veya burulma bölgesi; II- pim uzunluğu-malzeme teması veya karıştırılmış bölgesi; III- Omuz-malzeme teması veya akış bölgesi). IZ bölgeler arası malzeme taşımasıdır.....	250
Şekil 8.4.	Nugget bölgesi veya bağlanmış bölgede takım morfolojisinin etkisi (a) pimsiz kaynakta disk/plaka benzeri bağlanmış morfoloji; (b) konik pimli kaynakta halka benzeri bağlanmış morfoloji.....	256
Şekil 8.5.	Eksenel yükleme koşulunda konik pim takımı kaynaklı bağlantındaki kırılma modunun şematik gösterim/resimlendirilmesi .....	265
Şekil 8.6.	Monoton eksenel yükleme koşulunda pimsiz kaynaklı bağlantının kırılma modunun şematik temsili .....	267



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Alüminyumun fiziksel özellikleri .....	11
Tablo 2.2.	Saf alüminyum ile diğer malzemelerin karşılaştırılması .....	12
Tablo 2.3.	Özetlenmiş esas alüminyumun özellikleri .....	12
Tablo 2.4.	Tropikal boksitin esas mineralojik bileşenleri .....	14
Tablo 2.5.	Alüminyum çıkarılması tarihi .....	14
Tablo 2.6.	Dünya çapındaki boksit üreticileri .....	17
Tablo 2.7.	Özetlenmiş Bayer Sürecisinin Aşamaları .....	21
Tablo 2.8.	Alüminyumda alaşımlama elemanlarının etkileri .....	25
Tablo 2.9.	Biçimlenebilen alüminyum alaşımının işlenmesi .....	27
Tablo 2.10.	Alüminyum işlem simgelerinin sistemi .....	28
Tablo 2.11.	H'nin alt bölümleri – işlem sertleştirilmesi .....	28
Tablo 2.12.	T'nin H'nin alt bölümleri – ısı uygulanmış .....	29
Tablo 2.13.	Döküm alüminyum alaşımlarının işlenmesi .....	29
Tablo 2.14.	Bazı binary alüminyum alaşımlarının ever bağlantıları .....	30
Tablo 2.15.	ikonik Alüminyumlu binalar .....	33
Tablo 2.16.	Sertleştirme çöktürmelerinin kompozisyonu .....	37
Tablo 3.1.	Sürtünme karıştırma kaynağı için üretim uygulamalarının kronolojik listesi .....	41
Tablo 3.2.	Başlıca FSSW'nin işlem parametreleri .....	43
Tablo 3.3.	Tasarlanmış kaynak takımının özellikleri özetlenmesi .....	48
Tablo 3.4.	Sürtünme karıştırma nokta kaynağının faydaları ve genel eksiklikleri .....	51
Tablo 3.5.	Literatürdeki ısı işlem uygulanmayan alüminyum alaşımları .....	62
Tablo 3.6.	Literatürdeki ısı işlemli alüminyum alaşımları .....	62
Tablo 3.7.	Karıştırılmış ortalama tane büyüklüğü .....	64
Tablo 6.1.	AA2219-O alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (wt %) .....	97
Tablo 6.2.	AA2219-O alüminyum alaşımının mekanik özellikleri .....	97
Tablo 6.3.	HSS takım çeliğinin kimyasal bileşimi (wt %) .....	99
Tablo 6.4.	HSS takım çeliğinin mekanik özellikleri .....	99
Tablo 6.5.	Pimli FSSW parametreleri ve düzeyleri .....	110
Tablo 6.6.	Pimsiz FSSW parametreleri ve düzeyleri .....	110
Tablo 6.7.	L9 dikey sırası .....	111
Tablo 6.8.	Pimsiz FSSW işleminin dikey sırası .....	111
Tablo 6.9.	Pimli FSSW işleminin dikey sırası .....	111
Tablo 6.10.	Pimsiz FSSW'li numunelerin bağlantı, yorulma, ve çekme kodları .....	112
Tablo 6.11.	Pimli FSSW'li numunelerin bağlantı, yorulma, ve çekme kodları .....	112
Tablo 7.1.	Pimsiz bağlantının halka çapağının dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığı .....	128
Tablo 7.2.	Pimsiz bağlantıların çıkarılmış çapak hacmi .....	128
Tablo 7.3.	Konik pim ile kaynaklı bağlantıların halka çapak özellikleri .....	132
Tablo 7.4.	Konik pim ile kaynaklı bağlantıların hesaplanmış halka çapağın hacmi .....	132
Tablo 7.5.	Kırık çapağın maksimum ve minimum dışarı itilen uzunlukları .....	134

Tablo 7.6.	Kırık çapağın yaklaşık dışarı itilen uzunlukları ve kalınlıkları.....	134
Tablo 7.7.	Hesaplanmış kırık çapağın hacimleri.....	134
Tablo 7.8.	Konik pim ile kaynaklanmış bağlantıların çapağın genel hacimleri...	135
Tablo 7.9.	Varyans Analizi (halka çapağın hacmi) – pimsiz takım.....	140
Tablo 7.10.	Varyans Analizi (genel çapağın hacmi) – konik pimli takım.....	141
Tablo 7.11.	Varyans Analizi (halka çapağın dışarı itilen uzunluğu) - konik pimli takım.....	141
Tablo 7.12.	Varyans Analizi (halka çapağın dışarı itilen uzunluğu) - pimsiz takım.....	141
Tablo 7.13.	Varyans Analizi (halka çapağın kalınlığı) - konik pimli takım.....	142
Tablo 7.14.	Varyans Analizi (halka çapağın kalınlığı) - pimsiz takım.....	142
Tablo 7.15.	Varyans Analizi (kırık çapağın dışarı itilen uzunluğu) - konik pimli takım.....	142
Tablo 7.16.	Varyans Analizi (kırık çapağın kalınlığı) - konik pimli takım.....	143
Tablo 7.17.	Varyans Analizi (halka çapağın hacmi) - pimsiz takım.....	143
Tablo 7.18.	Varyans Analizi (halka çapağın hacmi) - konik pimli takım.....	143
Tablo 7.19.	Varyans Analizi (kırık çapağın hacmi) - konik pimli takım.....	144
Tablo 7.20.	Pimsiz bağlantılar üzerinde tepe sıcaklığında karıştırılmış bölgenin enerjileri.....	145
Tablo 7.21.	Konik pimli bağlantılar üzerinde tepe sıcaklığında karıştırılmış bölgenin enerjileri.....	145
Tablo 7.22.	R2 değerlerine dayalı pimsiz kaynaklarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki korelasyon.....	150
Tablo 7.23.	R2 değerlerine dayalı konik pimli kaynaklarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki korelasyon.....	150
Tablo 7.24.	Pimsiz takım tarafından oluşturulan sığ bir boşluğun hacminin hesaplanması.....	153
Tablo 7.25.	Pimsiz kaynak bağlantılarında plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacimleri.....	153
Tablo 7.26.	Pimsiz kaynaklı bağlantılarda çapak hacminin ve plastikleştirilmiş malzeme nüfuziyet hacminin yüzdeleri.....	153
Tablo 7.27.	Hesaplanmış boşluğun hacmi.....	156
Tablo 7.28.	Nüfuz edilen plastikleştirilmiş malzemenin hacmi.....	156
Tablo 7.29.	Konik pimli kaynaklı bağlantılarda çapak hacminin ve plastikleştirilmiş malzeme nüfuziyet hacminin yüzdeleri.....	156
Tablo 7.30.	Varyans analizi (nüfuz edilen hacim) – pimsiz takım.....	159
Tablo 7.31.	Varyans analizi (nüfuz edilen hacim) – konik pimli takım.....	159
Tablo 7.32.	Pimsiz kaynaklı bağlantıların çekmede kesme yükleri.....	160
Tablo 7.33.	Konik pimli kaynaklı bağlantıların çekme makaslama yükleri.....	160
Tablo 7.34.	Pimsiz kaynaklı bağlantıların varyans analizi (kesme yükü).....	162
Tablo 7.35.	Konik pimli kaynaklı bağlantıların varyans analizi (kesme yükü).....	162
Tablo 7.36.	Konik pimli kaynaklı bağlantıların kırık veya bağlanmış boyutları... ..	163
Tablo 7.37.	Konik pimli kaynaklı bağlantıların bağlanmış boyutları.....	164
Tablo 7.38.	Konik pim kaynaklı bağlantılarda bağlanmış boyutun varyans analizi.....	164
Tablo 7.39.	Konik bağlantıların nugget endeksleri.....	165
Tablo 7.40.	Konik pim Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (TEN1 kaynak numunesi).....	173



Tablo 7.41. Konik pim Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (TEN8 kaynak numunesi).....	174
Tablo 7.42. Pimsiz Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (P-TEN3 kaynak numunesi).....	175
Tablo 7.43. Pimsiz Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (P-TEN7 kaynak numunesi).....	176
Tablo 7.44. Pimsiz bağlantıların eğilmeli yorulma sonuçları .....	177
Tablo 7.45. Konik pimli bağlantıların eğilmeli yorulma sonuçları.....	177
Tablo 7.46. Konik pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu ve çengel yüksekliği arasındaki ilişki.....	190
Tablo 7.47. Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma modları .....	196
Tablo 7.48. Pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma modu.....	200
Tablo 7.49. Pimsiz kaynakların kalite yanıtları (dB) ve kırılma yüklerinin ortalaması.....	213
Tablo 7.50. Sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu (pimsiz kaynak).....	213
Tablo 7.51. Ortalamalar için tepki Tablosu (pimsiz kaynak).....	214
Tablo 7.52. Pimsiz kaynakların varyans analizi (S/G oranı) .....	214
Tablo 7.53. Kırılmış numunelerin S/G oranı ortalaması (pimsiz kaynak).....	215
Tablo 7.54. Pimsiz kaynaklı bağlantının doğrulanması .....	218
Tablo 7.55. Konik pim kaynaklı bağlantıların kalite tepkileri (dB) ve çekmede kesme yüklerinin ortalaması .....	219
Tablo 7.56. Sinyal gürültü oranı için tepki tablosu (konik pim kaynaklı bağlantılar) .....	219
Tablo 7.57. Kırılma yüklerin ortalaması için tepki tablosu (konik pim kaynaklı bağlantılar) .....	219
Tablo 7.58. Konik pim kaynaklı bağlantıların varyans analizi (S/G oranı) .....	220
Tablo 7.59. Kırılma yüklerinin S/G oranı (konik pim kaynaklı bağlantı) .....	220
Tablo 7.60. Konik pim destekli bağlantının doğrulanması .....	223
Tablo 7.61. Yanıtlar/tepkiler ve onların amaç fonksiyonları .....	224
Tablo 7.62. Yanıtlar/tepkiler ve onların S/G oranı .....	225
Tablo 7.63. Verinin Normalleştirmesi .....	226
Tablo 7.64. Hesaplanmış sapma dizileri .....	227
Tablo 7.65. Yanıtların Gri ilişkisel katsayısı .....	227
Tablo 7.66. Temel bileşenlerin özdeğeri ve değişkenliği .....	228
Tablo 7.67. Temel bileşenler için özvektörler .....	228
Tablo 7.68. Temel bileşene yanıtların katkısı .....	229
Tablo 7.69. Gri ilişkisel sınıf ve onun sırası .....	231
Tablo 7.70. Gri ilişkisel sınıfın ana etki tablosu .....	232
Tablo 7.71. Gri ilişkisel sınıf üzerinde parametrelerin etkileşim etkileri .....	233
Tablo 7.72. Doğrulama testinin sonucu .....	234
Tablo 7.73. Tepkiler ve onların amaç fonksiyonları .....	234
Tablo 7.74. Tepkiler ve onların S/G oranı .....	235
Tablo 7.75. Verinin Normalleştirmesi .....	235
Tablo 7.76. Hesaplanmış sapma dizileri .....	236
Tablo 7.77. Yanıtların Gri ilişkisel katsayısı .....	236
Tablo 7.78. Temel bileşenlerin özdeğeri ve değişkenliği .....	237
Tablo 7.79. Temel bileşenler için özvektörler .....	237
Tablo 7.80. Temel bileşene yanıtların katkısı .....	238
Tablo 7.81. Gri ilişkisel sınıf ve onun sırası .....	239

Tablo 7.82.	Gri ilişkisel sınıfın ana etki tablosu .....	240
Tablo 7.83.	Gri ilişkisel sınıf için varyans analizi tablosu.....	241
Tablo 7.84.	Doğrulama testinin sonucu .....	241
Tablo 8.1.	Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılar arasında görsel görünümün özetlenen karşılaştırmaları.....	244
Tablo 8.2.	Özetlenen pimsiz bağlantıların çapak özelliklerinde kaynak parametrelerinin katkıları.....	252
Tablo 8.3.	Konik pimli bağlantıların çapak özelliklerinde özetlenen kaynak parametrelerinin katkıları.....	253



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$C_p$	: Alaşımın özgül ısı kapasitesi, (J/kg.K)
$h_{rf}$	: Konik pim bağlantısındaki halka çapağın kalınlığı, (mm)
$h_{sf}$	: Konik pim bağlantısındaki kırık çapağın kalınlığı, (mm)
$h_c$	: Konik pimin yüksekliği, (mm)
$L_s$	: Konik pim bağlantısındaki kırık çapağın yakın dışarı itilen uzunluğu, (mm)
$L_{s-max}$	: Konik pim bağlantısındaki kırık çapağın en yüksek dışarı itilen uzunluğu, (mm)
$L_{s-min}$	: Konik pim bağlantısındaki kırık çapağın en düşük dışarı itilen uzunluğu, (mm)
$Q_{sz}$	: Tepe sıcaklıkta karıştırılmış bölgenin enerjisi, (J)
$T_o$	: Oda sıcaklığı
$T_p$	: Alaşımın tepe sıcaklığı (alüminyum alaşımının katılma sıcaklığı ( $T_s$ ) %95 olarak belirlenmiştir)
$V_{rf}$	: Konik pim bağlantısında halka çapağın hacmi, (mm <sup>3</sup> )
$V_{sf}$	: Konik pim bağlantısında kırık çapağın hacmi, (mm <sup>3</sup> )
$\xi_i(k)$	: Gri ilişkisel katsayısı
$F_S$	: Bağlanmış bağlantı üzerinde kesme kuvveti
$F_T$	: Bağlanmış bağlantı üzerinde çekme kuvveti
$H_p$	: Takım omuzunun daldırılma derinliği
$L_f$	: Konik pim kaynaklı bağlantıda halka çapağın dışarı itilen uzunluğu, (mm)
$R_{rf}$	: Konik pim kaynaklı bağlanmış bağlantıda karıştırılmış bölgenin merkezinden halka çapağın yarıçapı, (mm)
$V_f$	: Pimsiz kaynaklı bağlantı üzerindeki çıkarılan çapak hacmi veya konik pim destekli bağlantısındaki genel çıkarılan çapak hacmi, (mm <sup>3</sup> )
$r_1$	: Konik pimin ucu yarıçapı
$r_2$	: Konik pimin tabanında yarıçapı
$r_f$	: Pimsiz kaynaklı bağlantı üzerindeki halka çapağın dışarı itilen uzunluğu, (mm)
$\sigma_e$	: Kaynak noktası üzerine etkiyen eşdeğer gerilme
$b$	: Bağlanmış bölge/nugget boyutu
$d$	: Bağlanmış bölge boyutu
$F$	: Uygulanan aksenal kuvvet
FAT 1	: 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
FAT 2	: 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,92mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi

- FAT 3 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,95mm dalma derinliği ve 6s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- FAT 4 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- FAT 5 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,92mm dalma derinliği ve 6s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- FAT 6 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,95mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- FAT 7 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 6s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- FAT 8 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 2,92mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- FAT 9 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 2,9mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- F-value : Varyans oranı veya F-oranı
- h : Pimsiz bağlantında halka çapağın kalınlığı, (mm)
- L-9 : Ortogonal dizi veya masası
- PL-FAT 1 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,43mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 2 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,45mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 3 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,8mm dalma derinliği ve 8s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 4 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 0,43mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 5 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 0,45mm dalma derinliği ve 8s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 6 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 0,8mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 7 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 0,43mm dalma derinliği ve 8s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-FAT 8 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 0,45mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi

- PL-FAT 9 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,8mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının yorulma numunesi
- PL-TEN 1 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,43mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 2 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,45mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 3 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 0,8mm dalma derinliği ve 8s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 4 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 0,43mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 5 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 0,45mm dalma derinliği ve 8s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 6 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 0,8mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 7 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 0,43mm dalma derinliği ve 8s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 8 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 0,45mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- PL-TEN 9 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 0,8mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında pimsiz ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- P-value : Önem olasılığı
- $R^2$  : Belirleme katsayısı
- $R_{sf}$  : Konik pim kaynaklı bağlanmış bağlantında karıştırılmış bölgenin merkezinden kırık çapağın yarıçapı, (mm)
- $S_{SD}$  : Konik pim kaynağında omuz yüzey çapları
- t : Sac kalınlığı
- TEN 1 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- TEN 2 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,92mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- TEN 3 : 1400dev/dak takım dönme hızı, 2,95mm dalma derinliği ve 6s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- TEN 4 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- TEN 5 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 2,92mm dalma derinliği ve 6s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- TEN 6 : 1500dev/dak takım dönme hızı, 2,95mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
- TEN 7 : 1600dev/dak takım dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 6s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi

TEN 8	: 1600dev/dak takım dönme hızı, 2,92mm dalma derinliği ve 4s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
TEN 9	: 1600dev/dak takım dönme hızı, 2,95mm dalma derinliği ve 5s kalma zamanı altında konik pim ile kaynaklanmış bağlantının çekme numunesi
V	: Dönen takımın dalma işlemi sırasında oluşan karıştırma bölgesi, (mm <sup>3</sup> )
V <sub>p</sub>	: Plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmi
V <sub>T</sub>	: Omuz-pim boşluğunun hacmi
ρ	: Alüminyum alaşımının yoğunluğu
Ψ	: Ayırt edici katsayısı
A	: Bağlanmış/nugget alan
R	: Takım omuzunun yarıçapı
θ	: Nugget rotasyonu/kaynak bağlantısının açısıl dönmesi
σ	: Bağlanmış bağlantı üzerinde çekme gerilmesi
τ	: Bağlanmış bağlantı üzerinde kesme gerilmesi

### Kısaltmalar

AA	: Aluminium Association (Alüminyum Birliği)
Alclad	: Aluminium Clad (Alüminyum Giydirmesi)
ANOVA	: Varyans Analizi
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
EB	: Konik Pim Destekli Bağlantının Etkili Bağlanmış Uzunluğu
EM	: Esas Metal
ESW	: Electroslag Welding (Elektrocüruf Kaynağı)
ET	: Konik Pim Destekli Bağlantının Etkili Sac Uzunluğu
FCAW	: Flux Core Arc Welding (Eritken Çekirdekli Ark Kaynağı)
FSSW	: Friction Stir Spot Welding (Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
FZ	: Ergime Bölgesi
GIA	: Gri İlişkisel Analiz
GMAW	: Gas metal arc welding (Gaz Metal Ark Kaynağı)
GRC	: Grey Relational Coefficient (Gri İlişkisel Katsayısı)
GRG	: Grey Relational Grade (Gri İlişkisel Sınıf)
GTAW	: Gas Tungsten Arc Welding (Gaz Tungsten Ark Kaynağı)
HH	: Hook Height (Çengel Yüksekliği)
HSS	: High speed steel (Yüksek Hızlı Çelik)
IEB	: Isıdan Etkilenmiş Bölge
KB	: Karıştırılmış Bölge
LSFL	: Lap shear failure load (Kesme Kırılma Yüğü)
MS	: Mean Square (Kareler Ortalaması)
MSD	: Mean Square Deviation (Kareler Ortalaması Sapması)
OA	: Orthogonal Array (Ortogonal Diziler)

OM	: Optik Mikroskop
PAW	: Plasma Arc Welding (Plazma Ark Kaynağı)
PCA	: Principal Component Analysis (Temel Bileşenler Analizi)
PMZ	: Partially Melted Zone (Kısmen Erimiş Bölge)
RF	: Ring Flash (Halka Çapak)
RSW	: Resistance Spot Welding (Elektrik Direnç Nokta Kaynağı)
S/G	: Sinyal Gürültü Oranı
SAW	: Submerged Arc welding (Tozaltı Kaynağı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SF	: Serrated Flash (Kırık Çapak)
SLS	: Space Launch System (Uzaya Fırlatma Sistemi)
SMAW	: Shielded Metal Arc Welding (Korunmalı Metal Ark Kaynağı)
SS	: Sum of Square (Kareler Toplamı)
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten İnerit Gaz Kaynağı)
TMEB	: Termomekanik Etkilenmiş Bölge
TY	: Taguchi Yöntemi

## 2219 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAKLI BAĞLANTILARININ ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL TASARIMLA OPTİMİZASYONU

### ÖZET

Bu çalışmada, yaygın olarak uzay fırlatma sistemi ve süpersonik uçakların parçalarının imalatı için kullanılan ve vazgeçilmez bir havacılık malzemesi olan 2219 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarının özellikleri incelenmiştir. Takım dönme hızı, dalma ve omuz derinlikleri ve kaynak süresi gibi kaynak parametrelerinin kontrolü altında değişen takım morfolojileri kullanılarak bu alaşımın sürtünme karıştırma nokta kaynağı gerçekleştirilmiştir. Mekanik özellikler, makro ve mikro özellikler ve plastikleştirilmiş malzeme akışının özellikleri açısından kaynak bağlantıları karakterize edilmiştir. Oluşturulan bağlantıların mekanik özellikleri, çekmede kırılma yükü, eğilmeli yorulma dayanımı ve kaynak bölgelerinin mikro sertlik dağıtımı özellikleri incelenmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile elde edilen bağlantıların çıkarılan çapak hacmi ve plastikleştirilmiş miktarını hesaplamak için matematiksel türetimler geliştirilmiştir. Ek olarak, optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (TEM) altında monoton aksel yüklenme ve eğilmeli yorulma yüklenmesi koşullarına maruz kalan bağlantıların kırılma modları incelenmiştir. Tepe sıcaklığında kaynakların karıştırılmış bölgesinin enerjisi ile çıkarılan çapak hacmi arasındaki ilişki ve kırılma yükleri ve genel çapak hacmi arasındaki ilişki incelenmiştir. Kaynak kalitelerinin tek ve hibrid/melez çok tepkili optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Hibrid çok tepkili optimizasyon için Taguchi metodu (TM), temel bileşenler analizi (TBA) ve Gri ilişkisel analizin (GİA) tümleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeleri:** Alüminyum Alaşımı, Hibrid Çok Tepkili Optimizasyon, Makro- ve Mikroyapı, Mekanik Özellikler, Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı



## **PROPERTIES AND EXPERIMENTAL DESIGN OPTIMIZATION OF FRICTION STIR SPOT WELDED 2219 ALUMINIUM ALLOY**

### **ABSTRACT**

An indispensable aerospace aluminium alloy typically used for the fabrication of space launch system and other parts of supersonic aircrafts was investigated. Solid state friction stir spot welding of the alloy was performed with varying tool morphologies such as pinless-featureless and conical pin tools; and under the control of welding parameters like tool rotational speed, plunge and shoulder depths, and dwell time. The welded joints were characterized in terms of mechanical properties, macro- and microstructural properties, and plasticized material-flow properties. The mechanical properties of joints examined are the lap shear failure loads, bending fatigue strength and micro-hardness of weld zones. Mathematical derivations were developed for the computation of expelled flash volume and penetrated volume of plasticized materials of friction stir spot welds. Equally, the fracture modes under monotonic axial loading and bending fatigue loading conditions were examined via the use of optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The stir zone energy of welds at peak temperature was correlated with the volume of expelled flash. The relationship between lap shear failure loads and overall volume of flash was examined. Single and hybrid multi response optimizations of weld qualities were carried out. Hybrid multi response optimization of weld qualities was carried out via the integration of Taguchi method (TM), principal component analysis (PCA) and Grey relational analysis (GRA).

**Keywords:** Aluminium Alloy, Hybrid Multi Response Optimization, Macro- and Microstructure, Mechanical Properties, Friction Stir Spot Welding

## GİRİŞ

Modern üretimde hafif yapıların küresel süreci, ağırlık azaltması yaklaşımlarının zirvesinde alüminyum yerleşmiştir. Çeşitli nedenlerden dolayı endüstriyel/sanayi, inşaat ve yardımcı imalatı endüstrilerinde en uygulanan ve kabul edilen yapısal mühendislik malzemelerinden birisi, alüminyum ve alaşımlarıdır. Bu alaşımların kullanımının sebepleri, alüminyum alaşımlarının üstün özellikleri ile ilişkilendirilmektedir. Önemli Al özellikleri, hafiflik, üstün yansıtıcı görünüm [1], yüksek mukavemet-ağırlık oranı [2-4], birçok çevrelerde mükemmel korozyon direnci [1, 5-15], maliyet etkinliği, iyi termal ve elektriksel iletkenlikler [9, 11, 13, 16-17], iyi çarpışma dayanıklılığı [18], daha az tutuşabilirlik, süper geri dönüştürülebilirlik [1, 9] ve şekillendirilebilirlik [19-21] özelliklerini içermektedir.

Benzer şekilde, modern ulaşım endüstrilerinde örneğin uzay ve havacılık, gemi yapımı (deniz gemileri ve donanma gemileri), yüksek hızlı tren imalat ve otomotiv [19, 22-24] endüstrilerinde alüminyum alaşımlarının uygulaması ile ilgili/ilişkili elde edilen faydaları vardır. Bu elde edilen faydalar, yakıt verimliliğini ve çevreye düşük CO<sub>2</sub> yayımını kapsamaktadır. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının kullanımı için bazı diğer nedenler bulunmaktadır. Örneğin modern üretimlerde teknolojik ilerleme ihtiyacı, güvenlik ve dayanım, estetik, iyileştirme taşıması, gelişmiş performans ve yakıt ekonomisi, rekabetçi piyasa talepleri, çevre kirliliğinin azaltılması ve karbon yayımındaki devlet düzenlemesi nedenlerini elde etmek için hafif alüminyum alaşımları kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [5-21, 25].

Kaynak, imalatı ayrılmaz bir parçasıdır ve istenilen mühendislik yapılarını oluşturmak için önemlidir. Fakat, kaynak teknolojisinin tercihi, alüminyum kaynaklı yapıların kalitesini ve performansını etkilemektedir. Ergitme kaynağı teknolojileri alüminyum kaynaklarının mikroyapısı, kimyasal bileşimi ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Sonuç olarak, kaynaklı parçanın çarpılması ve ısıl büzülme, gözeneklilik, alaşım elemanlarının yanması, kaynak kalıntıları, katılma çatlama, gerilmeli korozyon çatlama ve zayıflamış mekanik dayanım problemleri, ergitm

kaynaklı alüminyum alaşımlarının sorunlarıdır. Benzer şekilde, alüminyum alaşımlarının özelliklerinden bazıları örneğin sıkı oksit tabakası, yaklaşık 933.4 K (660.4°C) düşük ergime noktası [18], yüksek katılaşma kendini çekmesi [26], yüksek ısı iletkenliği ve yüksek termal genleşme katsayısı, ve yüksek hidrojen çözünürlüğü özelliklerinden dolayı geleneksel ergitme kaynağı teknolojileri ile alüminyum alaşımlarının kaynak yapılması daha zor olmaktadır. Böylece, söz konusu kaynaklanabilirlik endişelerini azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla yeni kaynak teknolojileri ile alüminyum alaşımları birleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Geleneksel ergitme kaynağı yöntemlerine göre sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) veya sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) daha iyi bir alternatif yöntemidir. çünkü birleştirme işlemi, alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Böylece, oluşturan ısı girişinin seviyesi, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilememektedir [27]. Metal birleştirilmesi için gerekli üretilen düşük ısı girişi (alaşım erime sıcaklığının altındaki sıcaklık) nedeniyle FSSW yöntemi, yüksek enerji verimli bir işlem olarak adlandırılmaktadır. Diğer FSSW'ın temel özellikleri ve yararları, en düşük çarpılma [1,5,7-8, 26, 28] veya düşük termal deformasyon [29], ağız hazırlamaya gerek duyulmaması, düşük gerilme kalıntısı düzeyleri [30] [31], kaynak sarf malzemelerine gerek duyulmaması [7] (dolgu metali, koruyucu gaz, vb), yüksek kaynak verimliliği [12, 29], manyetik kuvvetler etkisinde olmaması, iyi mekanik özellikleri, ince ve düzgün kaynak yapısı [29], basitlik ve otomasyon uygunluğu [4] içermektedir. Ek olarak, FSSW yöntemi, sağlık üzerine hiçbir etkisine sahip olmamakta ve hiçbir kalıntı radyasyon, duman oluşmaması ve çok düşük işletme tehlikeleri nedeniyle operatör güvenliği çok yüksek olmaktadır. Aslında, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında FSSW yöntemi uygulanmıştır ve birleştirme özelliklerinin iyi olduğu tespit edilmiştir. Son zamanlarda, FSSW yöntemi kullanılarak farklı metaller örneğin alüminyum-magnezyum, alüminyum-çelik, alüminyum- bakır, ve çinko alaşımları birleştirilmektedir [32].

Böylece, bu araştırma için ergitme kaynağı uygun olmayan ve kaynak edilebilen alüminyum alaşımlarının (çökelme sertleştirmeli alaşımların) birisi örneğin 2xxx serisi kabul edilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, bu araştırma için AA2219-O

alaşımı seçilmiştir. Mevcut literatürde ergitme kaynak yaklaşımları kullanılarak elde edilen AA2219-O'nun bağlantılarının iyi olmadığı rapor edilmiş ve kaynağının zor olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ergitme kaynağı kullanıldığı zaman bu alaşımdaki yüksek bakır içeriği nedeniyle alaşım birikimi/ayırımı, taneler arası veya gerilmeli korozyon çatlamasına neden olmaktadır. AA2219-O alüminyum alaşımının kaynaklı bağlantılarında kısmen parçalanmış/ayrılmış çökeltileri, ince veya mikro gözenekliliği, çökeltileri ve ince eş eksenli tane yapısını elde etmek için bu alaşımın katı faz sürtünme karıştırma nokta kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, AA2219-O alüminyum alaşımının kaynak kabiliyetinin değerlendirilmesi için FSSW teknolojisi seçilmiştir [27].

Bu nedenle, bu araştırma için AA2219-O alaşımının kaynaklanabilirlik değerlendirilmesi ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemlerinin kullanımına odaklanmıştır. Alınan AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynakları için uyarlanmış/adapte edilmiş CNC freze kullanılmıştır. Ayrıca, farklı takım morfolojileri altında örneğin konik pim takımı ve özelliksiz pimsiz takımı altında FSSW'li bağlantıların elde edilen makro- ve mikroyapıları incelenmiştir. Aynı şekilde, bağlantıların mekanik özellikleri örneğin çekmede kırılma yükü, eğilmeli yorulma mukavemetleri ve kaynak bölgelerinin (ısıyandan etkilenmiş bölge (IEB), termomekanik etkilenmiş bölge (TMEB) ve kaynak metali (KM) mikro-sertlik değerleri değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, kırılmış numunelerin kırılma desenlerini veya modlarını belirlemek için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (TEM) yardımıyla çekmeye ve yorulmaya maruz kalan ve kırılmış olan numunelerin kırılma morfolojileri incelenmiştir.

Çıkarılmış çapak özellikleri örneğin çapağın dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığı ölçülmüştür. Konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların çıkarılan çapak hacimlerini belirlemek için matematiksel türetimler yürütülmüştür. Kaynağın kırılma yükü ve çıkarılmış çapak arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla değiştirilmekte olan takım morfolojileri ve kaynak parametreleri altında bağlantıların çıkarılan çapak özellikleri incelenmiştir. Bağlanmış alan/nuggetin rotasyonuna veya nuggetin açısız yer değiştirmesine dayanılarak monoton eksenel yüklenme altındaki kırılmış çekme numunelerinin teorik gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bağlantıların kırılma yüküne göre proses parametrelerinin tek tepki optimizasyonu yerine

getirilmiştir. Aynı zamanda, Taguchi metodu (TM), temel bileşenler analizi (TBA) ve Gri ilişkisel analizin (GİA) tümleştirmesi yoluyla elde edilen kaynak özelliklerinin hibrid çok tepkili optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu hibrid yöntemiyle mevcut olan Taguchi metodu-Gri ilişkisel analizi problemi giderilmiştir.



## 1. ARAŞTIRMA MOTİVASYONU

Malzeme akışı, sürtünme karıştırma nokta kaynağının belirgin fenomenlerinin biridir ve literatürde sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında plastikleştirilmiş malzemenin dışarı doğru akışı (çapak olarak) tamamen terk edilmiştir. Şu anda, açık literatürde sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların estetik görünümü ile ilgili araştırmalar hala eksik olmaktadır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojisinin kritik yönünü araştırmak amacıyla plastikleştirilmiş malzemenin dışarı doğru akışının değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Ancak, birkaç araştırmacı, izleyici malzemesi tekniğini kullanarak malzemenin karıştırılmış bölgesi içindeki akışını araştırmıştır. Yine de, literatürde yumuşatılmış/plastikleştirilmiş malzemenin dışarı atmasında kaynak parametreleri ve takım profilinin etkileri olmadığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, çıkarılmış çapak özellikleri ve kaynakların mekanik özellikleri arasında kesin bir ilişki araştırılmamıştır. Aynı şekilde, çıkarılan plastikleştirilmiş malzemenin morfolojisi üzerinde takım profilin rolü mevcut olmamıştır. Böylece, genel çıkarılan çapak hacmini en aza indirmek için ve kaynakların estetiğini geliştirmek için FSSW işlemi sırasındaki oluşturulan çapak değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmakta ve bu konu önemli bir araştırma alanı olmaktadır. Bu yüzden, literatürde mevcut olan araştırma boşluğunu doldurmak amacıyla sürtünme karıştırma nokta kaynaklarının çıkarılan çapak özelliklerini değerlendirmek için deneysel bir yaklaşım göz önünde bulundurulmuştur.

Ayrıca, bu araştırma için AA2219-O alüminyum alaşımı, malzeme seçimidir ve literatür taramasında bu alaşımın FSSW'li özelliklerinin henüz saptanmadığı gösterilmektedir. Ancak, açık literatürde birkaç FSW'li 2219 alaşımı mevcut olmaktadır. Benzer bir şekilde, AA2219-O alaşımı, mevcut olan dövme (hadde) alüminyum alaşımlarından birisidir ve ergitme kaynağı işlemi esnasında yüksek bakır içeriği veya kaynak bölgesindeki  $CuAl_2$  çökeltilerinin oluşumu nedeniyle çukurcuklanma yenimi ve gerilmeli korozyon çatlakları ortaya çıkmaktadır. Aslında,

2219 alaşımının yanlış kaynaklanması veya ısıl işlemi olsa her turlu korozyon duyarlılığı/hassasiyeti gerçekleştirilmekte [33] ve bu konuda 2219 alaşımının birleştirilmesi önemli bir sorundur. Ayrıca, 2219-T87 alaşımın gaz tungsten ark kaynağı'lı bağlantılarının tane sınırlarında kabalaştırılmış çökeltiler ve kapsamlı bakır ayrımı/birikimi gerçekleştirilmiş ve bu nedenle 2219-T87 alaşımının kaynaklı birleştirilmesinde çukurcuk korozyonuna neden olmuştur [27]. Yüksek ısı girdişi olan diğer alışılmış kaynak yöntemleri de 2219 alaşımının kaynaklı bağlantısında korozyon meydana getirmektedir. Belirgin rapor edilmiş AA2219 alaşımının kaynak edilebilirlik problemleri, katılaşma atlamaşı ve kaynak metalinde ve ısıdan etkilenmiş bölgede mukavemet kaybını içermektedir [27]. Bu nedenle, ergitme kaynağı yapıldıktan sonra bu alaşımın korozyon direncini yeniden kazanmak için ısıl işlem ihtiyaı duymaktadır.

Alışılmış ergitme kaynaklı AA2219 alaşımının katılaşma çatlağı ve korozyon hassasiyeti dışında kaynak metalinde gözeneklilik, kötü gerilme ve yorulma özellikleri, bileşenlerin homojen olmayan dağılımı oluşmaktadır. Böylece, uygun kaynak yöntemi seçimi 2219 alaşımının özelliklerini etkilemektedir. Örneğin, gaz tungsten ark kaynaklı AA2219-T87 alaşımında elde edilen gözenek boyutları 60-80µm arasında olmuş ve elde edilen kaynağın mukavemetinde önemli bir kayba neden olmuştur [27]. Ayrıca, 2219 alaşımı üzerinde alışılmış kaynak yöntemleri kullanılarak geniş ısıdan etkilenmiş bölge ya da daha yüksek ısı girdişi oluşturulmakta ve bu oluşturulan ısı miktarı kaynak kabiliyetini etkilemektedir.

Ancak, AA2219 alüminyum alaşımının kaynağı sırasında kaynak metalinde mukavemeti kaybı her zaman oluşmaktadır. Ergitme ve hızlı katılaşmadan dolayı AA2219 alüminyum alaşımında mukavemet kaybı olmaktadır. Bu durumda çökeltiler çözünüp ve tane sınırlarında ökelererek mukavemeti düşürmektedir. Bu nedenle, AA2219 alüminyum alaşımının matrisi içinde çözünen ökeltlerin/birikimi ve büyük sütunlu taneleri ortaya çıkmaktadır [34]. Aynı şekilde, AA2219 alaşımının farklı ergitme kaynağında veya dolgu metallerinin uygulamasında örneğin 2319 dolgu metali kullanıldığında AA2219 alaşımının kaynak metalinde ikinci fazları veya metallerarası bileşikler oluşturulmuştur [33]. Alüminyum ve diğer katkı maddelerinin tepkimesinden/reaksiyonundan oluşturulan ikinci fazlar örneğin çökeltiler ve metallerarası bileşikler, AA2219 alaşımının mukavemetlendirme etkisini

etkilemektedir. Ayrıca, bu alaşımın ergitme kaynağı işlemi sırasında çökeltilerin irileşmesi ve çözünmesi nedeniyle alaşımın mekanik özellikleri bozulmaktadır [32]. Bu nedenle, AA2219 alaşımının kaynak edilebilirliğini geliştirmek için yeni kaynak teknolojilerine büyük bir ihtiyaç vardır.

AA2219 alaşımını kaynak etmek için gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ve gaz metal ark kaynağı (GMAW) en çok arzu edilen yöntemler değildir. Çünkü bu yöntemler kullanılarak 2219 alaşımında bakır çökeltilerin çözünmesi, geniş ısı girdişi oluşumu ve ilişkili mekanik özelliklerinin kaybı oluşturulmaktadır. Aslında, 2219 alaşımını birleştirmek için elektrocüruf kaynağı ve tozaltı ark kaynağı (SAW) yöntemleri, tercih edilmeyen kaynak teknolojileridir. Çünkü cüruftan korunan ısı, kaynaklı bağlantıların özelliklerini düşürmektedir [35]. AA2219 alaşımı için ince eş eksenli tane yapısı, metalin matrisinde üniform bakır çökelti dağılımı, ince mikro gözeneklilik ve kısmen çözülmüş çökeltiler geliştirilecek/üretilen kaynak yöntemleri, tercih edilen özellikler olmaktadır [27]. Böylece, mevcut olan bilgilere göre AA2219 alüminyum alaşımını birleştirmek için sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) teknolojisi daha iyi bir teknolojidir.

### **1.1. Araştırma Hedefleri**

Başlıca araştırma amaçları aşağıda verilmektedir:

- Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri, makro- ve mikroyapısı, ve kırılma modları üzerinde takım morfolojisinin rolünü anlamak. Bağlantıların statik eksenel yüklemeleri ve dinamik yüklemeleri ile birlikte kaynak bölgeleri arasında mikro-sertlik dağılımları incelenecektir;
- Farklı takım geometri ve kaynak parametreleri altında plastikleştirilmiş malzemenin dışarıya doğru akışı (çapak olarak) ve içe akışı (nüfuz edilen hacim olarak) deneysel olarak karakterize edilmektedir; ve
- Kaynak kalite özelliklerinin tekli ve çoklu yanıt optimizasyonlarını incelemek

### **1.2. Tez Yapısı**

Bu tez dokuz bölüme bölünmüş ve istenilen araştırma tanıtımından başlanmış ve sonuç ile tavsiyeler bitirilmiştir. Böylece, incelenecek mühendislik malzemeninin tercihi ve arzu edilen kaynak teknolojisi açıklanarak tezin birinci bölümde araştırma



girişini kapsamıştır. Aynı zamanda araştırma motivasyonu hakkında ayrıntılı bilgi verilmiş ve temel araştırma hedeflerini ortaya koymuştur.

Tezin ikinci bölümünde alüminyum alaşımlarının hakkında kısa ve öz bir bakış sunulmuştur. Alüminyumun genel fiziksel özellikleri ve tarihçesi verilmiştir. Alüminyum alaşımının üretim işlemi ve uygulama alanlarından bahsedilmiştir. Ayrıca, bu bölümde diğer ilgili alüminyum alaşımları açıklanmış ve alüminyum alaşımlarının belirgin ve genel kaynak kabiliyeti endişeleri açıklanmıştır.

Aynı şekilde, tezin üçüncü bölümünde alüminyumun sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıları hakkında ayrıntılı bilgi ve onun detaylı literatür taraması sağlanmıştır. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının FSSW'li teknolojik geliştirilme aşamaları açıklanmıştır. Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı temel mekanik özellikleri örneğin bağlantının çekme ve makaslama mukavemeti, yorulma mukavemeti ve mikro sertlik özellikleri açıklanmıştır. Literatürdeki alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı mikroyapısı değerlendirilmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi esnasında plastikleştirilmiş malzemenin akışı ile ilgili kısa bir açıklaması tarif edilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde ilgili araştırmanın deney tasarımı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemleri üzerinde literatür değerlendirmesi kapsamıştır. Deneylerin tek yanıt optimizasyonu ve çok tepki optimizasyonu kısaca bir şekilde açıklanmıştır. Ancak, tezin beşinci bölümünde araştırma amacını ve çalışma planı sağlanmıştır.

Altıncı bölümde araştırma için ihtiyaç duyulan araştırma malzemeleri ve kullanılan metodolojisi hakkında bilgiler sağlanmıştır. Aynı zamanda bu bölümde FSSW'li bağlantıların tahribatlı (mekanik ve mikro analizleri) ve tahribatsız (görsel değerlendirme) analitik prosedürleri verilmiştir.

Benzer şekilde, yedinci bölümde deneysel çalışmanın sonuçları, analitik karşılaştırma ve elde edilen sonuçların incelenmesi sağlanmıştır. Kaynakların görsel görünüşleri ve çıkarılan çapak morfolojileri kısa ve öz bir şekilde açıklanmıştır. Aynı zamanda FSSW'li bağlantıların diğer mekanik ve mikroyapısal özellikleri saptanmıştır. Monoton aksenal yüklenmeye ve dinamik yüklenmeye maruz kalan

numunelerin kırılma yüzeylerinin analizleri yapılmıştır. Aynı şekilde, bu bölümde de birleştirilmiş bağlantıların tek yanıt ve çok yanıt optimizasyonları saptanmıştır.

Sekizinci bölümde fiziksel gözlemlere ve deneysel analizlere dayanılarak, yedinci bölümdeki elde edilen sonuçlar detaylı tanımlanmıştır. Ancak, tezin dokuzuncu bölümünde araştırmanın genel sonuçları ve gerekli önerileri sunulmuştur.



## 2. ALÜMİNYUM

### 2.1. Giriş

Yer kabuğundaki en çok bulunan metallere birisi alüminyumdur. Alüminyum, dünyadaki yer kabuğunun yaklaşık %7,5 - % 8'ini oluşturmaktadır [36-38]. Aslında yer kabuğundaki su olmayan içeriğin 15.3 ağırlık yüzdesi (wt%) alüminyumdur [39]. Alüminyumun esas cevheri, boksit olarak adlandırılmaktadır. Genellikle boksit, alüminyum hidroksitler ve oksihidroksitler ile çeşitli demir oksitler, silikatlar ve kirlilik miktarlarının karışımıdır [39]. Normalde boksit, çamur gibi bir madde görünmekte fakat çok silikalı maddelerde beyazımsı olmakta ve çok demir oksitli maddelerde kırmızımsı görünmektedir [40].

Bilinen en hafif metallere birisi alüminyumdur ve alüminyum, demir olmayan bir metal ile yüksek yansıtma özelliğine sahip olmaktadır. Alüminyum reaktif bir metaldir. Bu nedenle alüminyum doğal olarak saf halde bulunmamakta ama yer kabuğunda bileşik şeklinde bulunmaktadır [1, 41].

Ekonomik biçimde önemli metallere alüminyum çeliğin ardından ikinci sıradadır. Ayrıca, bütün dünyada alüminyum ikinci olarak en kullanılan metaldir [41]. Boksitten alüminyuma enerji yoğunlaştırılmış çıkarma sürecinden dolayı alüminyum nispeten pahalı bir metal olarak öne çıkmaktadır. Fakat alüminyum, önemli özelliklerinin kombinasyonuna sahiptir. Örneğin düşük yoğunluk, yüksek süneklik, yüksek mukavemet, geri kazanılabilirlik, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, iyi korozyona dayanıklılık, dekoratif görünüm, ve nontoksik özellikleri gösterir. Bu özelliklerinden dolayı uzay, otomobil, yapısal tasarımlar, ısı ve elektrik iletkenliği, gıda işlenmesi vb alanlarda alüminyum daha uygun bir uygulama tercihidir [18].

İyi yakıt verimliliği, çevre güvenliği ve bunun gibi nedenleri karşılamak için son günlerde hafif olan metallere örneğin alüminyum alaşımlarının kullanılmasına başlanmıştır. Aslında otomotiv sektöründe alüminyumun ihtiyacı ve kullanması her geçen gün arttırılmakta ve 2025 yılında otomobil imalatçısı tarafından araç

ortalamasının alüminyum içeriğinin iki katı seviyesi hedeflenmektedir [42]. Alüminyum kullanılarak ağırlık azaltması, araçların yakıt verimliliğini arttırmaktadır. Bunun nedeniyle az egzoz emisyonu elde edilmektedir [42].

## 2.2. Alüminyum Özellikleri

Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunluk (az ağırlık), iyi mukavemet, geri kazanılabilirlik kolaylaştırması, üstün dövülebilirlik, mükemmel korozyona dayanıklılık, rahat talaşlı imalat ve iyi ısı ve elektrik iletkenliği gibi önemli özelliklere sahiptir [21]. Tablo 2.1’de alüminyumun fiziksel özellikleri gösterilmektedir. Alüminyum, yüzey merkezli kübik yapıda (YMK) kristalleştirmekte ve bir küp içinde 4 atom, 4 sekiz yüzlü boşluk ve 8 dörtyüzlü boşluk vardır [18]. Aslına bakıldığında çeliğin yoğunluğuna göre alüminyumun yoğunluğu yaklaşık %65 daha düşüktür ( $2.7\text{g/cm}^3:7.87\text{g/cm}^3$ ) [4, 43] ve üretilen alüminyum beyaz gövde için yaklaşık % 50’ye kadar ağırlık azaltması sağlanabilmektedir [13].

Diğer alüminyum özellikleri; iyi şekillenebilirlik, dayanıklılık, yüksek süneklik [9,11,13], yüksek mukavemet-ağırlık oranı [7, 13-14], yüksek katılma büzülmesi (yaklaşık demir metallerinin ikisi) [26], mükemmel korozyona dayanıklılık [1, 5-15], tokluk [43], dekoratif görünüm ve yansıtma kabiliyeti [26], kaynak edilebilirlik, kolay bir şekilde geri kazanılabilirlik [1, 8-9], mukavemet/yoğunluk oranı [4], iyi dövülebilirlik ve nontoksik özelliğidir [18]. Alüminyumun diğer kimyasal ve fiziksel özellikleri çeşitli literatürde mevcuttur [1, 10-12, 43-48].

Tablo 2.1. Alüminyumun fiziksel özellikleri [41, 49]

S/N	Alüminyumun fiziksel özellikleri	Değerler
1	Sembol	Al
2	Atom numarası	13
3	Atomik ağırlık	27
4	Oda sıcaklığındaki yoğunluk temperature	$2,7\text{ g/cm}^3$
5	Erime sıcaklığındaki sıvı yoğunluk	$2,375\text{ g/cm}^3$
6	Erime sıcaklığı ya da noktası	933,47 K (660,32 °C)
7	Kaynama sıcaklığı ya da noktası	2300 deg. Celcius
8	Erime ısısı	10,71 kJ/mol
9	Buharlaştırma sıcaklığı	294,0 kJ/mol
10	Özgül ısı kapasitesi	(25°C) 24200 J/(mol·K)
11	Elektrik özdirenci	(20°C) 26,50 nΩ·m
12	Isıl iletkenlik	2,37 W/cm/K (25 deg. Celcius)
13	Isıl genişleme	(25°C) 23,1 μm/(m·K)

Tablo 2.1. (Devam) Alüminyumun fiziksel özellikleri

S/N	Alüminyumun fiziksel özellikleri	Değerler
14	Elektriksel iletkenlik	64,94%IACS (Saf Al, 25°C)
15	Young modülü	70 GPa

Tablo 2.2’de ticari olarak saf metallerin özellikleri ve diğer metal dışı malzemelerin özellikleri ile karşılaştırılmaktadır. Tablo 2.2’ye göre bahsedilen hafif metallere alüminyum en hafif olmaktadır.

Tablo 2.2. Saf alüminyum ile diğer malzemelerin karşılaştırılması [21]

Özellikler	Al	Fe	Cu	Zn	Naylon (poliamit)	Delrin (poliasetal)
Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	2,7	7,9	8,9	7,1	1,1	1,4
Erime noktası, °C	658	1540	1083	419	255	175
Isıl kapasite, J/kg, °C	900	450	390	390	1680	1470
Isıl iletkenlik, W/m,°C	230	75	390	110	0.23	0.23
Doğrusal genişleme katsayısı, x 10 <sup>-6</sup> /°C	24	12	16	26	70-100	80-90
Elektrik iletkenlik, %(I.A.C.S.)	60	16	100	30	-	-
Elektrik direnci, x 10 <sup>-9</sup> Ωm	70	105	17	58	-	-
Elastiklik katsayısı, GPa	70	220	120	93	3	3

I.A.C.S. (uluslararası tavlınmış bakır standardı)

Taşıma sanayiilerinde örneğin gemi yapımı, tren imalatı, uzay ve havacılık, ve otomotiv endüstrilerinde alüminyum büyük bir şekilde aranıp kullanılmaktadır. Buna rağmen tablo 2.3’te alüminyumun özellikleri açıklanmaktadır.

Tablo 2.3. Özetlenmiş esas alüminyumun özellikleri [21, 49]

Esas alüminyumun özellikleri	Yorumlar
Yoğunluk	2.7g/cm <sup>3</sup> yoğunluğuna sahip olmakta ve çeliğin 2/3 yoğunluğuna eşit olmaktadır.
Mukavemet	70-700MPa arasındadır
İşlenebilirlik	Freze, matkap, bükülme, biçimlendirme, kesme, delme ve bunun gibi işlemler, kolayca gerçekleştirilebilir
Şekillendirilebilirlik	Mükemmel dövülebilirlik özelliğine sahip olmakta ve sıcak ile soğuk haddelenme ve presleme rahatça yapılabilir

Tablo 2.3. (Devam) Özetlenmiş esas alüminyum özellikleri

İletkenlik	Elektronik ve elektrik uygulamaları (ısıtma ve soğutma) için alüminyum gereklidir. Aynı ağırlıklı bakıra göre alüminyum iletkenleri iki kat daha büyük akım taşır.
Yansıtma kabiliyeti ve görünüm	Alüminyum iyi bir görünür ışık ve ışınmış ısının yansıtıcısıdır.
Korozyona dayanıklılık ya da mukavemet	Alüminyum ile oksijen yüzeydeki vazgeçmeyen oksit tabakasını oluşturmaktadır. Bu tabaka alüminyum korozyondan korumaktadır.
Geri kazanılabilirlik	Birincil döküm enerjisinin %5'i kullanılarak alüminyum kolay yeniden işlenebilir
Sıfır toksiklik	Alüminyum nontoksik bir metaldir ve bu özellikten dolayı ambalaj sanayiinde (folyo ve kutu) kullanılmaktadır.

### 2.3. Alüminyum Tarihçesi

Saf alüminyumdan yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının elde edilmesi uzun süre sürmüştür. Birkaç bin yıl önce (7,000 yıl üzerinde) alüminyum oksitli çamurdan en mukavemetli Perslerin çanak çömleği yapılmıştır [38]. Yaklaşık üç bin yıllık dönem sonra Mısırda, Mısırlılar tarafından bulunmuş alüminyumun bileşimleri birinci olarak kaydedilmiştir. Mısırlılar, ilaç, kozmetik ve boya fiksatifi olarak alümeni (alum ya da alüminyum sülfat) kullanmıştır [37, 38]. İkinci olarak alum birleşiminden ( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ ) alüminyum kelimesi türetilmiştir. 18. yüzyılda alum kompozisyonu öğrenilmeye başlanmış ve onun içinde diğer metalin olmadığı özel baz bulunmuştur [41].

Ayrıca alüminyum cevheri, boksittir ve 1821 yılında Les Baux Fransa'da kırmızımsı kahverengi kayalı boksit keşfedilmiştir. Şekil 2.1'de çeşitli yer kabuğundan çıkarılmış boksit şekli gösterilmektedir ama tablo 2.4'te tropikal boksitin esas mineralojik bileşenleri sıralanmaktadır. Boksit normalde  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  ya da  $Al_2O_3 \cdot xH_2O$  olarak gösterilmektedir [38].



Şekil 2.1. Çeşitli boksit şekilleri [50]

Tablo 2.4. Tropikal boksitin esas mineralojik bileşenleri [37]

Bileşenler	İçindeki yüzde ( metalik oksit olarak)
$Al_2O_3$ (gibsitik)	30 – 60
$Al_2O_3$ (böhmistik)	< 0,2 – 20
$Fe_2O_3$	1,0 – 30
$TiO_2$	0,3 – 10
$SiO_2$ (çamur olarak)	0,3 – 6
$SiO_2$ (kuartz olarak)	0,2 – 10

Sonuç olarak alüminyum tarihçesinde bazı önemli mihenk taşlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tablo 2.5'te tarihsel gerçekleştirilmiş saf alüminyum eldesine ilişkin çalışmalar gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Alüminyum çıkarması tarihi [1, 37-38, 41, 51]

Bilim insanlarının adı	Yapılan işler	Yıl	Genel tasvir
Sir Humphry Davy (Londra'da)	Boksitten alüminyum oksit (alumina) üretilmiştir.	1808	Alüminyum, nadir ve pahalı metal olarak bilinmiştir
Hans Christian Oersted (danimarkalı bilimadamı)	Potasyum merkur ile alüminyum klorid saf bir alüminyum metal elde edilmiştir.	1825	Kirlenmiş alüminyum metaline kalay rengine benzer üretilmiştir

Tablo 2.5. (Devam) Alüminyum çıkarması tarihi

Friedrich Wöhler (almanyalı bilimadamı)	Platin potasında susuz klorid ( $AlCl_3$ ) ve potasyum (K) karışımı ısıtılarak alüminyum üretilmiştir	1825 sonra	Üretilmiş alüminyum kirlenmiştir ve Potasyum, alüminyum klorid ve potanın malzemesi, kirileyiciler olmuşturlar.
French Henri Sainte-Claire Deville	alüminyum klorid redüksiyonundan alüminyum metali üretilmiştir.	1855	Alüminyumun büyük ölçekli üretimi için bu yöntem uygun olmamıştır.
Paul Louis Toussaint Hérault (Fransa'da) ve Charles Martin Hall (Amerika Birleşik Devletleri'de)	Alüminyumun elektrolitik indirgemeden alüminyum yapılmıştır.	1886	Alüminyumun ticari ya da endüstriyel üretimidir.

Ayrıca, 18. yüzyıl ve 1886 ortasında alüminyumun toplu üretimi için ekstraksiyon metodu geliştirilmiştir [1, 51]. Aslında Hans Christian Oersted'in işlerinden sonra alüminyum, laboratuvar merakı olarak kalmıştır ve sonraki 30 yıl boyunca az bir şekilde alüminyumun ticari üretimine başlanmıştır. Fakat 1886 yılında boksitten uygulanabilir ticari alüminyumun elde edilme süreci ortaya çıkmıştır [1]. Ayrıca 1886 yılında Fransa'daki Paul Louis Toussaint Hérault ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Charles Martin Hall tarafından alüminyumun elektrolitik indirgemesi yapıp patentlenmiştir [1, 37, 41]. Bu önemli bilimadamlarının resimleri şekil 2.2'de gösterilmektedir. Bugüne kadar onların geliştirdiği yöntem hala uygundur ve kullanılmaya devam edilmektedir.





Şekil 2.2. Paul Louis Toussaint Hérault (sol) and Charles Martin Hall (sağ) - alüminyumun elektrolitik çıkarmasının yaratıcıları [38]

Ancak 1852 yılında alüminyumun eldesi için kullanılmış üretim prosesi çok pahalı olmuştur ve mevcut olan alüminyum miktarı çok az olmuştur. Bu nedenle alüminyum çok kıymetli bir metal olarak her alüminyum kilosu için yaklaşık 1200 dolar maliyet oluşturulmuştur [41]. Son 100 yılda alüminyum sanayii için Hall Hérault'un alüminyum eldilmesi en önemli destek olmuştur. Şimdi alüminyum için hızlı büyüyen piyasa bulunmaktadır [37]. EAA'na göre 1998 yılında birincil alüminyumun 2,2 milyon tonu ve geri dönüşümünün 5 milyon tonu üretilmiştir. Aynı zamanda alüminyum tüketiminin %30'su, taşıma uygulamalara girilmektedir [37].

#### **2.4. Alüminyum Üretimi**

Alüminyum hidroksit (gibsit) ve onunla yakından ilgili oksit-hidroksitler (böhmit ve diaspor), en bilinen alüminyum kaynaklarıdır ve bu sayede alüminyum metali elde edilmektedir [52]. Alüminyum üretim prosesinin birinci adımı, alüminyum cevherinin ya da yer kabuğundan boksitin elde edilmesidir. ACS Chemistry Life'ne göre boksit, alüminyum oksitçe zengin olup ve milyon yıllar yer kabuğunda alüminyum silikatlı kayanın kimyasal bozunması gerçekleştirilerek boksit oluşturulmaktadır [38]. Bunun yanı sıra ABD'nin jeolojik incelemesine göre boksit, heterojen bir malzeme olarak tarif edilmiş ve içinde çeşitli silikat, titanya,

alüminosilikat ve diğer katışkı miktarının karışımı olduğu açıklanmıştır [53]. Ayrıca Tomago Alüminyum'un gösterdiğine göre boksit içinde susuz alüminyum oksit ile birlikte demir silikonun oksiti, titanium ile diğer elemanlar, ve diğer değişmekte olan çamur ile diğer silikatlar mevcut olmuştur [54].

Dünyanın çeşitli bölgelerinde büyük ölçüde boksit madeni çıkarılmaktadır. Kıtasal boksit yüzdesine göre Afrika %32'ne, Güney Amerika ile Karayipler % 21'ne, Asya %18'ne ve diğerleri %6'ne sahip olmuştur. Yerküre boyunca Avustralya en büyük boksit üretim ülkesidir. Tablo 2,6'de 2013 ve 2014 yılındaki boksit üretilen ülkelerinin listesi ve üretim miktarı gösterilmektedir [53]. Ancak dünya çapında boksit üretilmesi arttırılmaktadır. Örneğin 1988 yılında çıkarılmış boksit, yaklaşık 81 milyon tonu ve 2013 yılında yaklaşık 283,000 milyon tonu üretilmiştir [52].

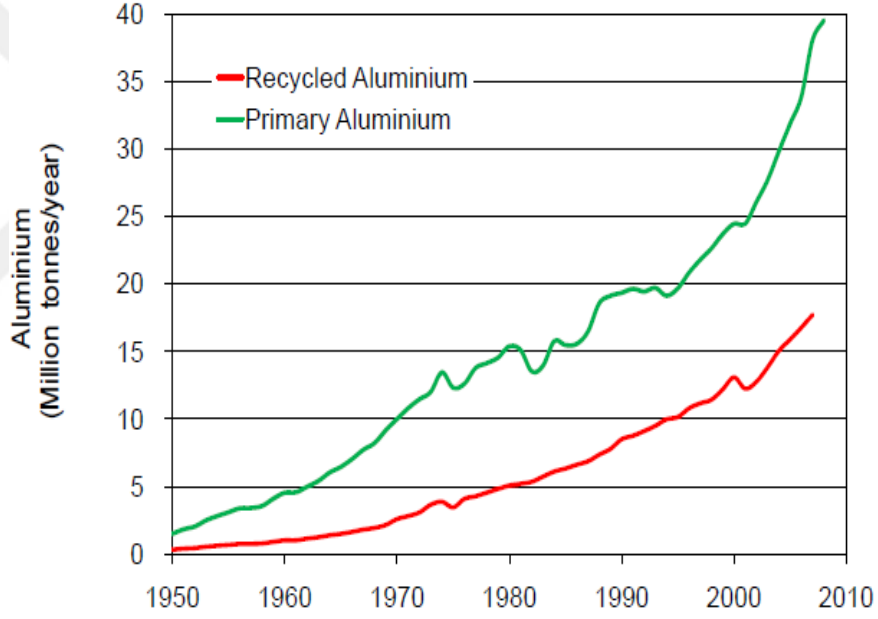
Tablo 2.6. Dünya çapındaki boksit üreticileri [53]

	Maden üretilmesi		Rezervler
	2013	2014	
ABD	Yok	Yok	20,000
Avustralya	81,100	81,000	6,500,000
Brezilya	32,500	32,500	2,600,000
Çin	46,000	47,000	830,000
Yunanistan	2,100	2,100	600,000
Gine	18,800	19,300	7,400,000
Guyana	1,710	1,800	850,000
Hindistan	15,400	19,000	540,000
Endonezya	55,700	500	1,000,000
Jamaika	9,440	9,800	2,000,000
Kazakistan	5,400	5,500	160,000
Rusya	5,320	5,300	200,000
Surinam	2,700	2,700	580,000
Venezuela	2,160	2,200	320,000
Vietnam	250	1,000	2,100,000
Diğer ülkeler	4,570	4,760	2,400,000
Dünya toplamı	283,000	234,000	28,000,000

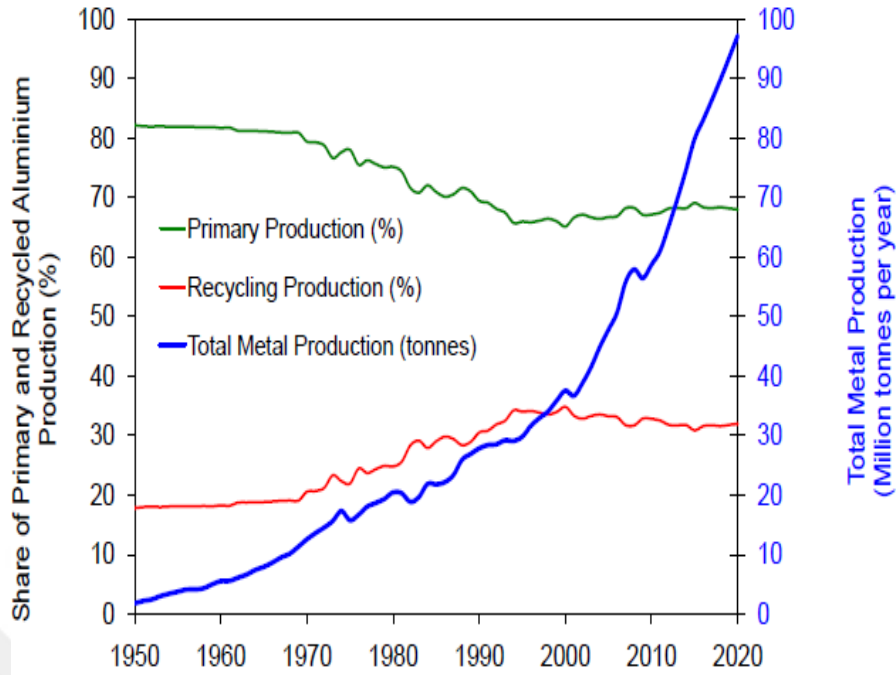
Şekil 2.3'te alüminyum üretilmesi (birincil ve yeniden kazanılmış alüminyum) her geçen yıl arttırılmaktadır. Uluslararası Alüminyum Enstitüsü'ne (IAI) göre sonraki 5

yıl için tahmin edilmiş birincil ve yeniden kazanılmış alüminyum toplamı devamlı yükselecektir. Örneğin şekil 2.4'ta gibi 2020 yılındaki tahmin edilmiş üretilecek alüminyum 98 milyon ton olarak beklenmektedir [55]. Üretimin türüne göre alüminyum, iki kategori olarak sınıflandırılmıştır. Bunlar:

- Birincil alüminyum: Bu alüminyum türü, aluminadan ya da boksitten doğrudan üretilmektedir. Aynı anda alumina ergimesi için ihtiyaç duyulan elektrik gücü ya da enerjisi çok yüksektir. Normalde 16,000 kW'a kadar elektrik gücü gereklidir çünkü alumina ya da alüminyum oksitin ergime sıcaklığı, yaklaşık 2050oC'dir.
- İkincil ya da yeniden kazanılmış alüminyum: Bu alüminyum türü, geri dönüşüm prosesinden alüminyumlu parçaların israfı ya da hurdadan üretilmektedir. Bu alüminyum türünün üretilmesi için ihtiyaç duyulan enerji düzeyi çok azdır.



Şekil 2.3. Birincil ve yeniden kazanılmış alüminyumun küresel büyümesi [55]



Şekil 2.4. Birincil ve yeniden kazanılmış alüminyum [55]

#### 2.4.1. Birincil alüminyum üretimi

Uluslararası alüminyum işbirliğine (IAI) göre metalurjik alüminanın ( $Al_2O_3$ ) elektrolitik indirgemesi yapılırken elektrolitik hücreden alüminyum dökülmektedir. Ancak bu proseste alaşımlama katkılarına ve yeniden kazanılmış alüminyuma dahil etmemektedir [56]. Alüminyum eldesi prosesi, iki aşamayı içermektedir. Birinci aşamada boksitten alumina (ya da alüminyum oksit) üretilmekte ve ikinci aşamada yüksek sıcaklıklı ( $950^{\circ}C - 1000^{\circ}C$ ) kriyolit ( $Na_3AlF_6$ ) banyosunda alüminanın elektrolitik indirgemesi yapılır ve saf alüminyum metali üretilmektedir [1, 51]. Bu prosesin sonunda, alüminyum ile %5-%10 silikonlu ve demirli birleşik elde edilmektedir. Alüminyum %99,9'nı elde edilmek için çıkarılmış alüminyumun rafinasyonu gerekmektedir [1]. Bunun yapılması için %99,9 saf olmayan alüminyum kullanılarak tekrar elektrolitik indirgemesi ya da bölgesel ergitme gerçekleştirilebilmektedir [1].

Alüminyum metalinin elde edilmesi için iki bağımsız enerji tüketen proses gerekmektedir [57]. Bunlar:

- Bayer süreci (Alumina üretimi): boksitten alüminyum oksit ya da alumina elde edilmektedir. Genel olarak alumina kullanılarak alüminyum üretilmektedir. Aynı

zamanda kimyasal, refrakter, seramik, petrol ve doğal gaz sanayilerinde Bayer sürecinden elde edilmiş alüminanın uygulamaları vardır [58].

- Hall-Heroult süreci (birinci alüminyum üretimi): Kriyolitli erimiş tuz banyosundaki alüminanın elektrolitik indirgemesi yapıp ve ergimiş saf alüminyum elde edilmektedir [36, 57].

Boksitten alumina üretilmesi için Bayer süreci en ekonomik yöntemdir. Bu nedenle alumina eldesi için Bayer süreci, ticari üretim yöntemidir. Ancak başka alumina çıkarma yöntemleri de vardır ama ekonomik olarak uygun olmamaktadır. Bazı ekonomik olmayan alumina çıkarma yöntemleri aşağıda listelenmektedir;

- Pedersen süreci
- Nefelin sinterlemesine bağlı olarak alumina üretimi
- Yüksek silikali cevher için kireç-soda sinterleme işlemi/süreci [52]
- Çamurdan alumina çıkarması için asit (HCl) süreci [52]

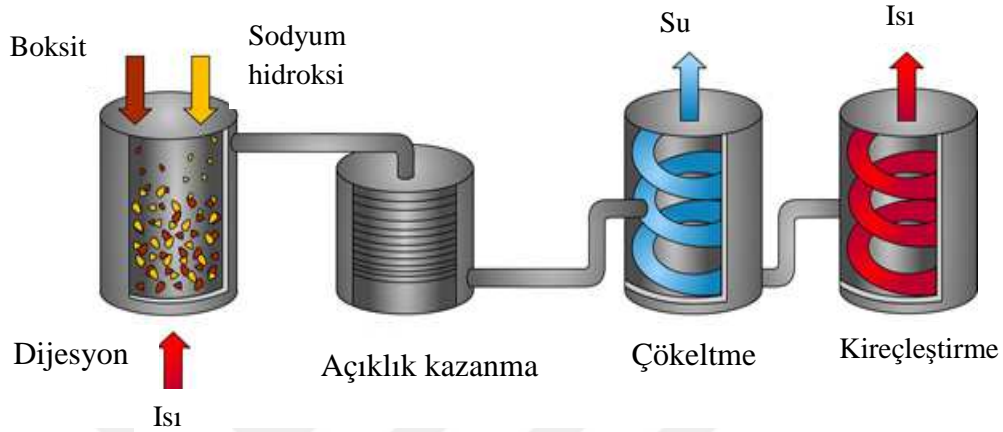
#### **2.4.1.1. Bayer yöntemi (alumina üretimi)**

Alumina çıkarması süreçlerinden Bayer yöntemi en ekonomik yöntemdir ve yaygın biçimde en kabul edilen prostestir. Red Mud Project'e göre alüminyum cevherinin kalitesi, alumina miktarı belirlenmektedir. 1,9 - 3,6 tonlu Boksit miktarı, alüminanın 1 tonunu üretmekte ve 4 tonlu boksit, 2 tonlu alüminayı üretmektedir. Bayer sürecinden üretilmiş alumina, saf alumina sınıflandırılmıştır. Çünkü bu proses ile %1'den daha az demir ve silikon içerikleri elde edilmektedir [58].

Zengin gibsitte olan boksit indirgenmek için 1888 yılında Karl Josef Bayer tarafından Bayer süreci keşfedilip patentlenmiştir. Alüminyum cevheri ezilerek Bayer sürecine başlanmaktadır. Boksitten silika parçacıklarının kaldırılması için ıslak eleme işi gerçekleştirilmektedir [50]. Yüksek sıcaklıklı ve basınçlı otoklavda ezilmiş boksitin yakıcı dijesyonu, açıklık kazanması, çökeltmesi, yıkaması ve kireçleştirilmesi görüldüğünde saf susuz alumina çıkarılmaktadır [39, 58].

Genel anlamıyla alüminyum cevheri ya da boksit öğütlenmektedir. Başınçlı tankta öğütlenmiş boksit, yakıcı soda ve kireç karışımı ısınmaktadır. Bu karışım ışınarak yakıcı soda, alüminyum oksiti çözmekte ve elde edilmiş çözümden alüminyum oksit

çökelmektedir. Ayrıca süzgeçleme süreci yapılarak kirlilik kaldırılıp ve alumina kristalleri elde edilmektedir. Genellikle elde edilmiş alüminanın rengi, beyaz tozlu şekere benzemektedir [38] [59]. Ancak literatürde de Bayer süreci, Bayer çevrimi tarif edilmektedir. Şekil 2.5'te Bayer süreci açıklanmakta ve onda 4 önemli aşama vardır. Tablo 2.7'de Bayer sürecinin aşamaları açıklanmaktadır.



Şekil 2.5. Bayer süreci [59]

Bayer sürecinde küreç kullanmasına ihtiyacı vardır çünkü küreç alumina çıkarmasını ve kirlilik kaldırmasını kolaylaştırır. Aynı zamanda yakıcı soda kaybetmesini azaltmaktadır [58].

Tablo 2.7. Özetlenmiş Bayer Sürecisinin Aşamaları [50, 52, 58]

Aşamalar	Tayin	Faaliyetler
Ön aşama	Öğütme	Boksit öğütlenmekte ve öğütlenmiş boksit ile yakıcı soda (NaOH) karıştırılmaktadır
1. aşama	Dijesyon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek sıcaklıkta boksit karışımı basınçlandırılmaktadır.</li> <li>NaOH ile boksitin alüminyumlu mineralleri, kimyasal tepki görünmekte ve tepkiden doymuş sodyum alüminat ile çözülmez kirlilik (kırmızı çamur) elde edilmiştir.</li> <li>Dijesyon yapılırken alüminyumun hidroksitleri ve oksihidroksitleri çözünmekte ama diğer boksit kısımları katı durumda kalmaktadır.</li> <li>Doymuş sodyum alüminat süspansiyonda ve elde edilmiş karışım, açıklık kazanmaya gönderilmektedir.</li> </ul>

Tablo 2.7. (Devam) Özetlenmiş Bayer Sürecisinin Aşamaları

2. aşama	Açıklık kazanma	<ul style="list-style-type: none"><li>• Başınç azaltması ve filtreleme gerçekleştirilmektedir.</li><li>• Atmosferik basınçlı sonucun elde edilmesi için 1. aşamadaki karışım, bir dizi basınçlı-indirgeyici tanklerden geçirilmektedir</li><li>• Kum kapını kullanılarak sodyum alüminattan çözülmez kırmızı çamur kaldırılmakta</li><li>• Kalıntılar ıskartaya çıkarılmakta ve sodyum alüminat daha soğutulmaktadır</li></ul>
3. aşama	Çökeltme	Çözünmüş alumina, kristalleşme ya da çökeltme tanklerine pompalanmaktadır Hızlı çökeltme için alüminyum hidroksitli krystal, elde edilmiş çözüme eklenmektedir.
4. aşama	Kireçleştirme	Susuz alüminyum hidroksit ( $Al(OH)_3$ ) kireçleştirildiğinden sonra döner fırında alumina ( $Al_2O_3$ ) oluşturulmaktadır.

#### 2.4.1.2. Hall-Heroult yöntemi (birinci alüminyum üretimi)

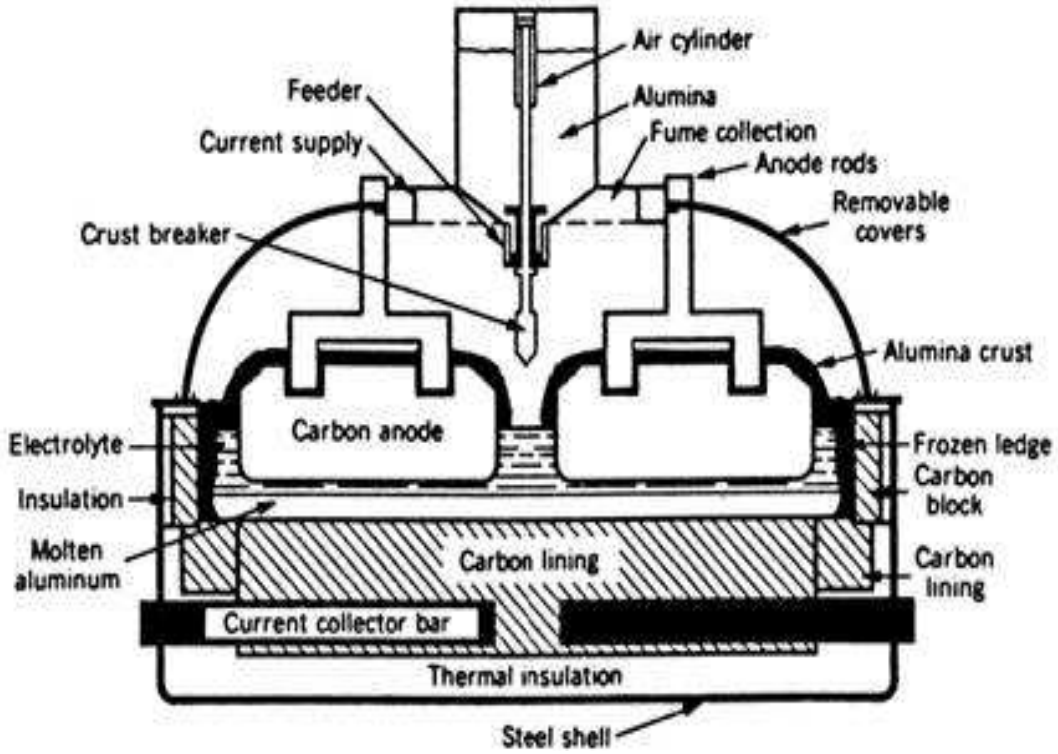
Geçen 100 yılında Hall–Heroult'nın süreci kullanılarak endüstriyel alüminyum ergimesi gerçekleştirilmiştir [36]. 1886 yılında Hall-Heroult tarafından kurulmuş elektrolitik indirgeme yönteminin hala kullanılmasına devam edilmektedir [38]. Ayrıca Hall-Heroult'nın elektrolitik indirgeme süreci kullanılarak %99.6-99.9 saf alüminyum metali oluşturulmaktadır [52].

Alumina, beyaz tablodaki tuz gibi benzemekte ve 2050°C sıcaklığı üstünde ergitmektedir. Fakat alumina kimyasal olarak çok dayanıklı bileşiktir. Aluminanın özelliklerinden dolayı aluminadan alüminyum çıkarması için çok miktarda enerji gereklidir [39]. Bu nedenle alüminyumun elektrik indirgeme tesisi çok güç yoğun bir tesistir ve bir ton alüminyum üretilmesi için 16,000kW'lı elektrik gücüne ihtiyaç duyulmaktadır [50]. Elektrik indirgeme hücresinden alüminyum üretilmekte ve alümina indirgindikten sonra alüminyum ve karbondioksit elde edilmektedir. Ayrıca indirgeme hücresinin altında ergimiş alüminyumu dökülmektedir [50].

Hall-Heroult prosesinde elektrik enerji kullanılarak elektrolitik hücresinde aluminadan alüminyum ve oksijen ayrıştırılmakta ve bir alüminyum tonu üretilmek

için yaklaşık 15, 000 kWh gerekmektedir. Elektrolitik hücresi, karbonlu anot elektrotunu (pozitif) ve katot elektrotunu (negatif) içermektedir. Bu elektrotların ayrılmış mesafesinde erimiş kryolit ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  - sodyum alüminyum florür) elektroliti yerleştirilmektedir. Elektrolitik hücresinin duvarı, ergimeyen seramiklerin çeşitli tabakalarıyla kaplanmıştır. Elektrotlara bağlandığı zaman kototta indirgeme süreci gerçekleştirilmekte ve anot elektrotunda oksitlenme süreci olmaktadır. Karbonlu anot ile oksijen iyonu arasında tepkisinden dolayı karbon dioksit oluşmakta ve elektroliz süresince anottaki karbonu tüketmektedir. Aynı zamanda hücrenin altında ergimiş alüminyum metali toplanmaktadır [52].

Şekil 2.6'de Hall-Heroult hücresinin şeması gösterilmektedir. Bu hücrenin çalışma sıcaklığı,  $930-980^\circ\text{C}$  arasında olması gereklidir [46]. Ayrıca alüminyum alaşımılması için ergimiş alüminyum fırına koyulmakta ve alaşımılmaktadır.



Şekil 2.6. Alüminyum metalinin elektrolitik erimesi için Hall-Heroult hücresinin şeması [52]

#### 2.4.2. İkincil alüminyum üretimi

Alüminyum, %100 geri dönüştürülebilir ve bu yapıldığı zaman alüminyum, hiçbir özelliğini kaybetmemektedir. Bu nedenle ve bugüne kadar her üretilen alüminyumun



%75'i hatalı kullanılmaktadır [60]. Alüminyum cevherinden alüminyum çıkarılmasından başka atık ve hurdaya ayrılan alüminyum ile alüminyum oluşturulmaktadır. Alüminyumun önemli özelliği vardır örneğin geri kazanılabilirlik özelliğidir. 20. yüzyılın sonunda geri dönüşüm prosesi kullanılarak büyük bir şekilde alüminyum oranı kazanılmıştır. Her yıl Batı Avrupa'da birincil alüminyumun 3 milyon tonu ve geri dönüşümlü alüminyumun 2 milyon tonu kazanılmaktadır [1].

Alüminyumun geri dönüşüm prosesi alüminyumlu ürünlerin ömür süresini uzatmaktadır. Alüminyumun geri dönüşüm prosesinde Al'lu atıkları erimekte ve yeni Al'lu ürünleri üretilmektedir. 2014 yılında Al'lu atıklardan alüminyumun yaklaşık 3,63 milyon tonu geri kazanılmıştır [53]. Atık alüminyum iki gruba bölünmektedir.

Şunlar:

- Yeni atık (üretim prosesinden gelenler): alüminyumlu yarı üretilen ürünler ve final ürünlerin imalat sürecinde böyle atıklar çıkarılmaktadır [61].
- Yaşlı atık (tüketici tarafından gelenler): yaşlı atıklar, tüketici tarafından atıklardır. Genellikle yaşlı atıklar daha kirletmiş gibi olmaktadır. Örneğin Yaşlı atıklar, makine-teçhizat, yıkılmış binalar ve Al'lu maddelerden gelmektedir [61].

İkinci olarak alüminyum sanayiinde alüminyumun geri dönüşümü sayesinde büyük biçimde enerji tasarrufu gerçekleştirilmektedir [52, 60].

## **2.5. Alüminyum Alaşımları**

Alaşımlama hedefi, metalin mukavemetinin geliştirilmesidir. Mekanik mukavemetinde ve elastikiyet modülünde saf alüminyum güçsüzdür. Bu yüzden iyi saf alüminyumun özellikleri kaybedilmeden onun geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [18]. Alüminyum alaşımlanması elde edilmek için en önemli alaşımlama elemanları, bakır, magnezyum, silisyum, çinko ve manganezdır. Aynı zamanda alüminyuma eklenebilir alaşım elementleri örneğin nikel, kobalt, krom, demir, titanium ve zirkonyum ilave edilebilmektedir.

Alüminyumda silisyum, çinko ve bakır elemanlarının çökeltmesinden dolayı metalin sertleştirilmesi kurulmakta ve onun mekanik dayanımı arttırılmaktadır [46]. Tablo 2.8'de alüminyumda alaşımlama elemanlarının esas özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2.8. Alüminyumda alaşımlama elemanlarının etkileri [46]

Alaşımlama elemanları	Elemanların katkıları ve etkileri
Magnezyum	Magnezyum, sıcaklık noktasını (451°C'ya kadar) azaltmakta ve işlem sertleşmesi ile tuzlu suda korozyona dayanıklılığı arttırmaktadır.
Silisyum	Silisyum, Al'un mukavemetini ve sünekliği arttırmakta ama sıcaklık noktasını azaltmaktadır. Ancak Si ile Mg birlikte çökeltme sertleştirmesine izin vermektedir.
Çinko	Çinko büyük biçimde mukavemeti arttırmakta ve sıcak ya da soğuk çökeltme sertleştirmesine izin vermektedir.
Bakır	Bakır daha büyük mukavemeti vermekte ve sıcak ya da soğuk çökeltme sertleştirmesine izin vermektedir. Ancak Cu korozyona dayanıklılığı, kaynaklanabilirliği ve sünekliği azaltmaktadır.
Nikel	Yüksek sıcaklık durumları altında nikel, Al dayanımını arttırmaktadır
Titanyum	Titanyum, tane boyutunu azaltmaktadır.
Zirconyum	Zirconyum dengeleyici bir elemandır
Krom	Krom, gerilme korozyonuna dayanıklılığı arttırmaktadır
Demir	Genel olarak demir bir gayrisafiyettir ama az yüzdesini kullandığında saf alüminyumun mukavemetini attırabilir.

Ancak çeşitli yollarda alüminyum alaşımları sınıflandırılabilir. Fabrikasyon prosesine göre alüminyum alaşımları iki gruba ayrılmaktadır. İki önemli Al grubu, Şunlar:

- Döküm alaşımlar: bu grupta kolayca yeniden ergitilmiş ve dökülmüş Al alaşımları içermektedir. Kum dökümü ya da basınçlı döküm yöntemi kullanılarak bu gruptaki alaşımlar doğrudan final şekillere dökülmektedir. Döküm kabiliyetini geliştirilmek için bu alaşımlar yüksek silisyum yüzdesi içermektedir [62].
- Dövme alüminyum alaşımları: bu gruptaki alaşımlar eritilmeden kolayca sıcak veya soğuk işlem yapılabilir. Bu alaşımlarda sıcak ya da soğuk haddeleme prosesleri örneğin dövme işi, ekstrüzyon ve çekme yapılabilir. Bu gruptaki alaşımlar daha iki önemli gruba bölünmektedir. Bunlar; ısıtma işlemi yapılamayan alaşım ve ısıtma işlemi yapılabilen alaşımlardır. Birincisi bu alaşımlar, kütükler ya

da külçeler halinde dökülmekte ve daha sonra sıcak ya da işlem ile mekanik olarak istenen şekiller biçimlendirilmektedir [62].

Dövme alüminyum alaşımların isimlendirmesi için 4-hane sistemi kullanılmakta ve döküm alüminyum alaşımları için 3-hane ile 1- ondalık hanesi sistemi kullanılmaktadır [63].

### **2.5.1. Dövme alüminyum alaşımları**

Dövme alüminyum alaşımları 9 gruba bölünmektedir [64]. Tablo 2.9’da bu grupların başlıca alaşım elementleri gösterilmektedir. Isıl işlem yapılamayan alaşımlar ve ısıl işlem yapılabilen alaşımlar, dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırmasıdır ve şekil 2.7’de detaylı sınıflandırılmasının bilgisine verilmektedir. Isıl işlem uygulanmaz alaşımların grubuna 1xxx, 3xxx, ve 5xxx seri biçimlenebilen alüminyum alaşımları koyulmuştur ve bu gruptaki Al alaşımları sadece işlem sertleşmesi görülebilir. Ayrıca ısıl işlemlik alaşımlarının grubuna 2xxx, 6xxx, ve 7xxx seri biçimlenebilen alüminyum alaşımları koyulmuştur. Fakat 4xxx seri alüminyum alaşımları, hem işlem uygulanmaz alaşımlar hem de ısıl işlemlik alaşımları olabilir [63]. AlMn, AlMg, ve AlMnMg alaşımları, işlem uygulanmaz alaşımlardır ve soğuk şekillendirmeye tabi tutulabilir. Ancak soğuk şekillendirme yapıldıktan sonra alaşımların mukavemeti arttırılmakta ama sünekliği azaltılmaktadır. Ayrıca bu alaşımlar için kaynak işlemlerinden dolayı onun mukavemeti azaltılmaktadır [46]. Böylelikle çökertme sertleştirmesinden ısıl işlemlik alaşımlarının mukavemeti yükselmektedir.

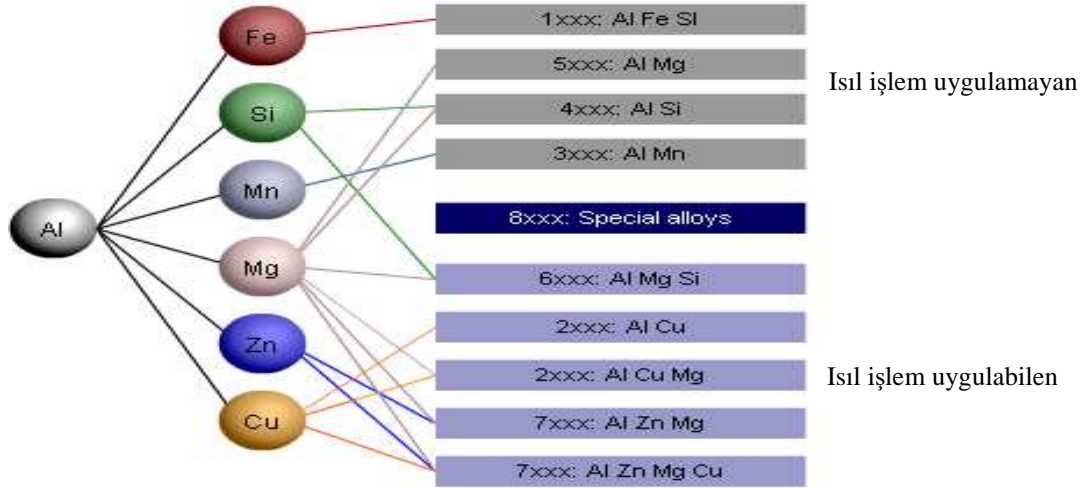
Biçimlenebilen alüminyum alaşımlarının isimlendirmesi için 4-hane sistemi kullanılmaktadır. Birinci hane (Xxxx), başlıca alüminyumun alaşımlama elemanına işaret edilmekte ve genellikle o alüminyum serisi olarak açıklanmaktadır. Örneğin 1000 serisi, 2000 serisi, ve 8000 serisine kadar olmaktadır [63].

İkinci hane (xXxx) için 0 olmadan özgül alaşımın modifikasyonuna işaret edilmektedir. Fakat üçüncü ve dördüncü haneler (xxXX) için keyfi numaralardır ama serindeki özgül alaşımı belirlemektedir. Örneğin 5183 alaşımında numara 5, magnezyum alaşım serisine işaret etmektedir. Numara 1, birinci alaşımının modifikasyonuna işaret etmektedir [63].

Fakat yukarıdaki açıklanmış işlendirmeye sisteminde bir tane istisna vardır. 1xxx alüminyum serisinde sonundaki iki hane, asgari alüminyum yüzdesidir. Örneğin 1350 alaşımında asgari alüminyum yüzdesi %99,50 olmalıdır [63].

Tablo 2.9. Biçimlenebilen alüminyum alaşımının işlendirilmesi [63-64]

S/N	Alaşım serisi	Başlıca elemanları	alaşımlama	Özellikler
1	1xxx	alaşımlanmaz alüminyum)/asgari yüzdesi %99,00	(saf	Isıl işlem uygulanmaz alaşımlar; 10-27 ksi kopma çekme mukavemeti; mükemmel korozyona dayanıklılık; az mekanik özellikleri; yüksek termal ve elektrik iletkenlik
2	2xxx	Bakır		Isıl işlemli alaşımları; 27-62 ksi kopma çekme mukavemeti; yüksek mekanik özellikleri; atırılmış akma mukavemeti; hava taşımanın alaşımıdır
3	3xxx	Manganez		Isıl işlem uygulanmaz; 16-41 ksi kopma çekme mukavemeti; iyi işlenebilir ve kaynaklanabilir; yüksek korozyona dayanıklılık; orta mukavemet
4	4xxx	Silisyum		Isıl işlem uygulanmaz alaşımlar ve ısıl işlemli alaşımları; 25-55 ksi kopma çekme mukavemeti; az ergitme noktası; ilave metaller ve brazing alaşımlardır
5	5xxx	Magnezyum		Isıl işlem uygulanmaz alaşımlar; 18-51 ksi kopma çekme mukavemeti; orta-yüksek mukavemet; iyi korozyona dayanıklılık; iyi kaynaklanma özellikleri; gemicilik çevresinde kullanılmaktadır -
6	6xxx	Magnezyum ve silisyum		Isıl işlemli alaşımları; 18-58 ksi kopma çekme mukavemeti; iyi işlenebilir ve korozyona dayanıklılık; orta mukavemet
7	7xxx	Başlıca eleman çinkodur ama diğer elemanlar örneğin bakır, magnezyum, krom ve zirconyum eklenebilir.		Isıl işlemli alaşımları; 32-88 ksi kopma çekme mukavemeti; en yüksek mevcut mukavemet; uçak yapısında kullanılmaktadır
8	8xxx	Diğer elemanlar (kalay ve bazı lityum içeriği içermektedir)		
9	9xxx	Gelecek kullanılmak için reserve edilmektedir		



Şekil 2.7. Biçimlenebilen alüminyum alaşımının sınıflandırılması [62]

Ayrıca Al işimlendirilmesinin 4-hanesine başka harf eklenmektedir. Alüminyum işlemlere tabi tutulmakta ve bu işlemler çeşitli harflere işaret etmektedir. Tablo 2,10'da Al isimlendirilmesinde mevcut olan 5 proses gösterilmektedir.

Tablo 2.10. Alüminyum işlem simgelerinin sistemi [63]

S/N	Harf	Anlam
1	F	Üretilmiş olan gibi
2	O	Tavlanmış
3	H	İşlem sertleştirilmiş
4	W	Çözelti ısıl işlemi uygulanmış
5	T	Isıl uygulanmış

Bundan başka 'H' ve 'T' harflerinin altbölümleri vardır ve tablo 2.11'de ve 2.12'de altbölümler açıklanmaktadır.

Tablo 2.11. H'nin altbölümleri – işlem sertleştirilmesi [63]

H'den sonradaki 1. Hane (HXx)	Anlama	H'den sonraki 2. hane (HxX)	Anlama
H1	Sadece işlem sertleştirilmesi	Hx2	Çeyrek (¼) sert
H2	İşlem sertleştirilmiş ve kısmi tavlama	Hx4	Yarı (½) sert
H3	İşlem sertleştirilmiş ve Stabilize edilmiş	Hx6	Üç çeyrek (¾) sert
H4	İşlem sertleştirilmiş ve laklı yada boyanmış	Hx8	Tam sert
		Hx9	Ekstra sert

Tablo 2.12. T'nin H'nin altbölümleri – ısı uygulanmış [63]

T'ten sonradaki hane	Anlama
T1	Yüksek sıcaklıktan doğal olarak yaşlanmış
T2	Yüksek sıcaklıktan soğutulmasından sonra soğuk işlenmiş ve yaşlanmış
T3	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve doğal olarak yağlanmış
T4	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış ve doğal olarak yağlanmış.
T5	Yüksek sıcaklıktan soğutulmasından sonra yapay yaşlanmış.
T6	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış ve yapay yaşlanmış.
T7	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış ve stabilize edilmiştir (aşırı yaşlanmış).
T8	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlanmış.
T9	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış, yapay yaşlanmış ve soğuk işlenmiştir.
T10	Yüksek sıcaklıktan soğutulmasından sonra soğuk işlenmiş ve yapay yaşlanmış

### 2.5.2. Döküm alüminyum alaşımları

Tablo 2,13'te döküm alüminyum alaşımlarının başlıca alaşımlama elemanları gösterilmektedir. Döküm alüminyum alaşımlarının sisteminde 3-hane ile ondalık işimlendirilmesi kullanılmaktadır. Örneğin xxx.x (356.0) gibi kullanılmaktadır. Birinci hane (Xxx.x) esas alaşımlama elemanına işaret etmektedir [63]. İkinci ve üçüncü haneler, keyfi numaralardır ve alaşım serisindeki özgül alaşımdır. Ayrıca ondalığın sonra gelen numarası kalıp (.0) ya da kütük (.1 or .2) olabilir [63].

Tablo 2.13. Döküm alüminyum alaşımlarının işimlendirilme sistemi [63]

S/N	Alaşım serisi	Başlıca alaşımlama elemanı
1	1xx.x	99.000% asgari alüminyum
2	2xx.x	Bakır
3	3xx.x	Silisyon ile bakır ve ya da magnezyum
4	4xx.x	Silisyon
5	5xx.x	Magnezyum

Tablo 2.13. (Devam) Döküm alüminyum alaşımlarının işlendirmeye sistemi

6	6xx.x	Kullanılmamış seri
7	7xx.x	Çinko
8	8xx.x	Kalay
9	9xx.x	Diğer elemanlar

## 2.6. Alüminyum Alaşımlarının Evre Bağlılıları

Katı alüminyumda bakır, lityum, magnezyum ve çinko iyice geniş çaplı çözülebilirliklerine sahip olmaktadır. Ancak alüminyumda diğer elemanların çözülebilirlikleri sınırlanmaktadır [18]. Ayrıca alüminyumda yüksek valency ve yüksek electronegativity olmasından dolayı çeşitli intermetallic compounds oluşturulabilir [18]. Tablo 2.14'te biçimlendirilen alüminyum alaşımlarının evre bağlantıları gösterilmektedir.

Tablo 2.14. Bazı binary alüminyum alaşımlarının evre bağlantıları [18]

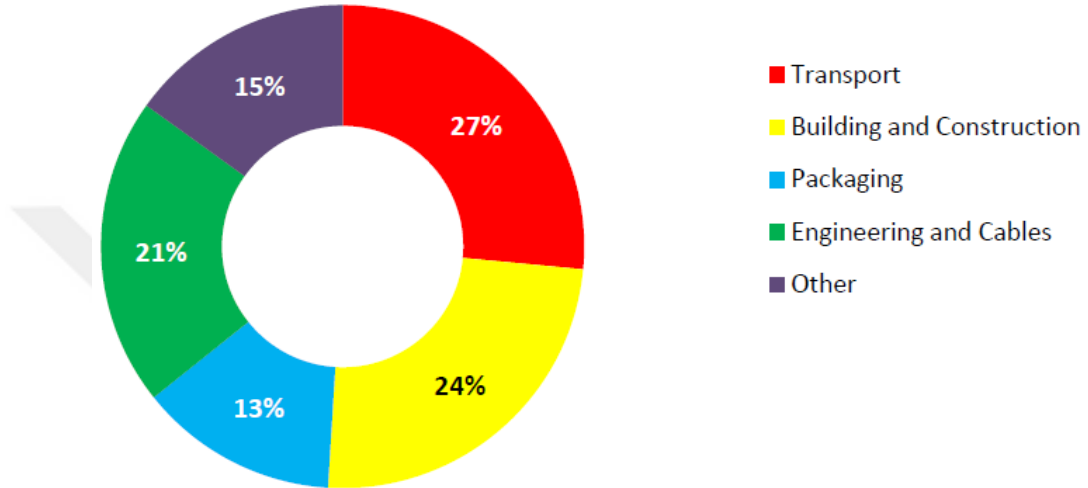
Sistem	Alaşım elemanının maksimum katı çözünebilirliği Wt. %	Alaşım elemanının ötektik bileşimi Wt. %	Ötektik sıcaklık oC	Ötektik bileşimleri
Alüminyum-bakır	5,7	33,2	548	Al* + CuAl <sub>2</sub>
Alüminyum-demir	<0,1	1,7	655	Al* + FeAl <sub>3</sub>
Alüminyum-Lityum	5,2	9,9	600	Al* + LiAl
Alüminyum-Magnezyum	14	35	450	Al* + Mg <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>
Alüminyum-Manganez	1,8	1,9	660	Al* + MnAl <sub>6</sub>
Alüminyum-Silisyum	1,65	12,5	580	Al* + Si†
Alüminyum-çinko	82,8	94,9	382	Al* + Zn‡

\* katı çözünebilirlikte ikinci elemanın maksimum çözünebilirliği; † katı çözünebilirlikte alüminyumun 0,5 wt% içeriği; ‡ katı çözünebilirlikte alüminyumun 1,1 wt% içeriği.

## 2.7. Alüminyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

Tasit sanayiinde ve diğer insan sektöründe hafif-ağırlık tasarımı için alüminyum alaşımları büyük bir önem taşımakta ve kullanılmaktadır [13, 30, 65-72]. Aslında alüminyumun uzun ömrü, mukavemeti ve hafif ağırlık özelliklerinden dolayı büyük biçimde taşıt endüstrisine etkilemektedir. Taşıt endüstrileri, örneğin otomotiv, gemicilik, uçak ve havacılık, hızlı tren üretimi endüstrilerinde alüminyum alaşımları

büyük şekilde kullanılmaktadır [1, 7, 13, 31, 44, 65, 73-74]. Diğer sektörlerde, örneğin bina yapımı, ısıl değiştirici (radyatör, kondenser borusu ve fitiller (hadde)), elektrik taşınma, besin işlenmesi [1, 10, 18, 69, 73] ve bunun gibi, alüminyum ihtiyacı vardır. Alüminyum kullanılması için Şekil 2,8’de IAI statistical sınıflandırılması gösterilmektedir [55]. Buna göre taşıt sektöründe en büyük alüminyum miktarı kullanılmaktadır.



Şekil 2.8. Üretilen alüminyumlu ürünler için evrensel son tüketicinin piyasaları [55]

### 2.7.1. Binalar ve köprüler

Binalarda alüminyum kullanılması, uzun ömürlüdür ve gücü kanıtlanmıştır. Bu nedenle yıllar içinde binalarda kullanılmış alüminyumun üstün durumda olacağı beklenmektedir. IAI’ne göre 100 yıldan fazla binalarda alüminyum kullanılmıştır. İlk alüminyumlu bina için 1895 yılında ve Derbyshire St Edmunds’un kilisesinde kullanılmıştır. Çekmiş alüminyumun kullanılarak pencere tasarımında çekicilik ve güvenilirlik kurulmaktadır. Yapısal elemanlar örneğin köprüler için yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları kullanılmaktadır [41, 55]. Şekil 2,9’da alüminyum köprüleri gösterilmektedir.



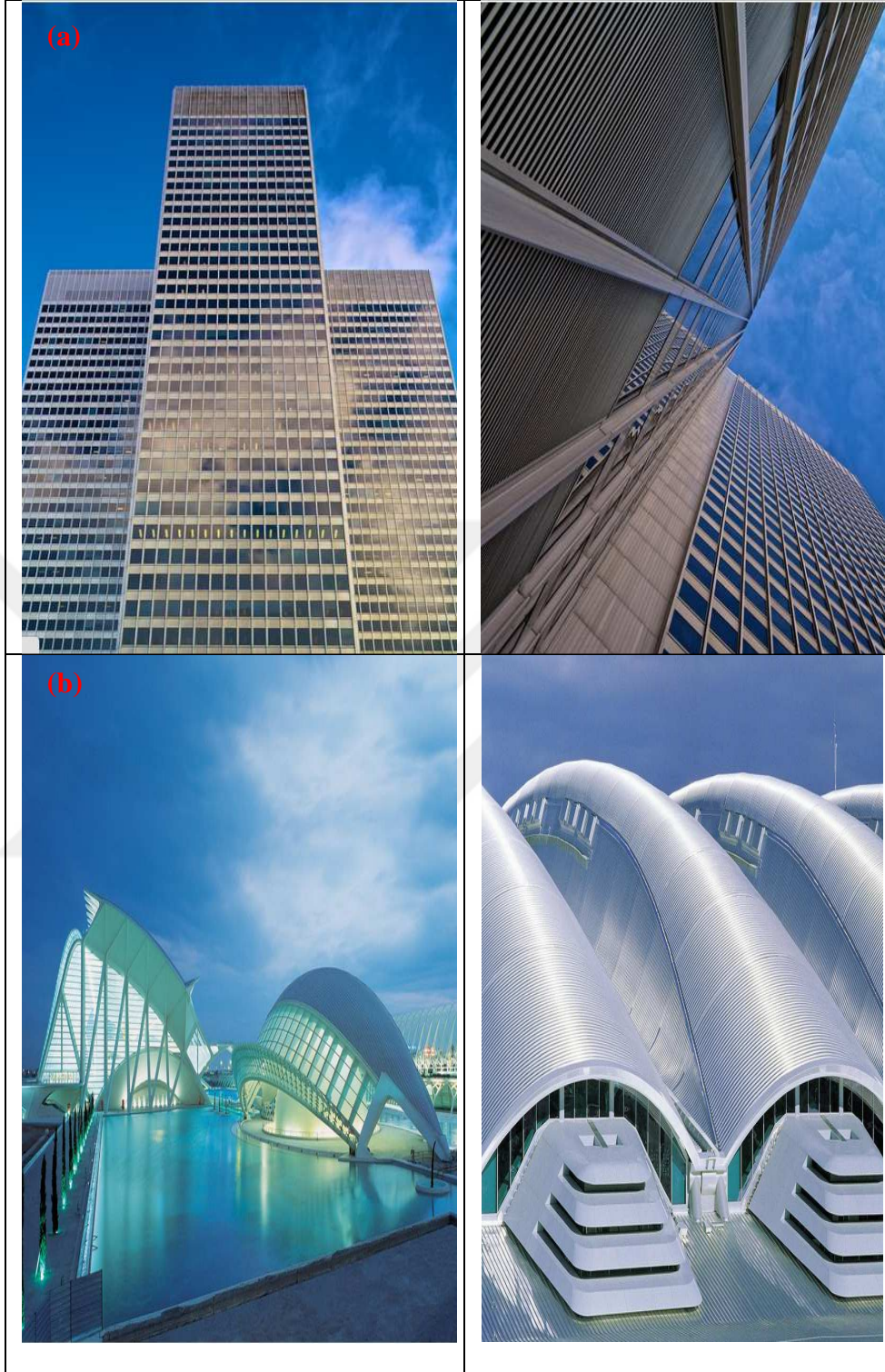


Şekil 2.9. Alüminyum köprüleri (a) Blainville, Quebec, Canada'daki alüminyumlu equestrian köprüsü [75]; (b) Friedrichsthal'da demiryolunun üstündeki yaya ve bisiklet köprüsü [76]

Prof. Michael Stacey'in araştırmasına göre alüminyumla kaplı binalara 40 yıla kadar güvence belgesi verilmelidir. Aynı zamanda alüminyumlu pencere yapısına 80 servis ömrü verilmelidir. Böylece ev içinde kullanılmış alüminyum, sonsuz yaşam süresine sahip olmaktadır [77]. Bu bahsedilmiş neden ile birlikte iyice Al mukavemetinden dolayı dünya civarında ikonik binaların yapımında alüminyum alaşımlarının kullanılması arttırılmaktadır. Tablo 2.15'te alüminyum alaşımlarıyla yapılmış ikonik binalar gösterilmektedir. Şekil 2.10'da bazı alüminyumlu ikonik mimari binalar gösterilmektedir.

Tablo 2.15. İkonik Alüminyumlu binalar [55]

S/N	İkonik mimari binalar	Yer/lke	Mimarlar
1	McGill Universitesindeki Schulich'un müzik okulu	Montreal, Kanada	Saucier ve Perrotte mimarları
2	Westmount Square	Montreal, Kanada	Mies Van Der Rohe
3	Place Ville-Marie	Montreal, Kanada	I.M. Pei ve dostlar
4	Lvis'in su arıtma tesisi	Lvis, Kanada	STGM ve dostlar mimarları
5	Théâtre de Quat'Sous	Montreal, Kanada	FABG mimarları
6	Trade Fair	Frankfurt, Almanya	
7	Grandstand	Dubai, Birleşik arap emirlikleri	
8	Nobel Centre,	Oslo, Norveç	
9	Clyde Auditorium ("The Armadillo")	Glasgow, Birleşik krallık	
10	Science Museum	Valencia, İspanya	
11	Yanchep Bridge	Yanchep, Avustralya	
12	The Wave	Almere, Hollanda	
13	Cellophane House	New York, ABD	
14	Rich Mix	Londra, Birleşik krallık	Penoyre & Prasad Architects
15	Hongkong ve Shanghai Bankasının HQ	Hong Kong, in	Foster and Partners
16	Melvin J. ve Claire Levine Hall	Philadelphia, ABD	
17	Sugar City Silos	Halfweg, Danimarka	
18	Nasher Sculpture Center	Dallas, ABD	Renzo Piano binalar alıştayı



Şekil 2.10. Alüminyum alaşımlarından üretilen ikonik binalar (a) Place Ville-Marie, Montreal Canada; (b) Science Museum, Valencia İspanya; (c) Trade Fair, Frankfurt Almanya [55]

### 2.7.2. Otomotiv endüstrileri

Bütün dünyada alüminyum kullanılması ile arabaların üretimini yoğun ilgi görmektedir. Alüminyumlu hafif-ağırlık yapısından yeni araba türü üretilmektedir. Örneğin Jaguar XE 75mpg yakıt ekonomisine ve ağırlık azaltmasına sahiptir. Ayrıca bu arabanın türü %70 alüminyum içeriği kullanılmaktadır [55]. Audi A2 gövdesinde alüminyum alaşımları kullanılmıştır ve büyük biçimde arabanın ağırlığı azaltılmıştır. Şekil 2,11'de alüminyumlu beyaz gövde gösterilmektedir. Genellikle otomotiv sanayiinde arabanın gövde yapısı, arka tekerleği, poyrası ve kaputunun üretilmesi için alüminyum alaşımları kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. Alüminyum yoğun XE [78]

### 2.7.3. Havacılık sanayii, gemi yapımı ve trenler

Havacılık, gemicilik ve hızlı tren üretimi sanayiinde alüminyum alaşımlarının uygulamaları çok büyük olmuştur. Bu taşıt alanlarında alüminyum ile yapısal parçalar üretilmektedir. Örneğin güverte, kanatlar, iç ve dış panoları alüminyum alaşımlarıyla üretilmektedir. Şekil 2,12'de alüminyum ile üretilen uçak, gemi ve tren gösterilmektedir. Önemli alüminyumlu gemi, Borkumriff-IV yatıdır. Bugünlerde tam olarak alüminyumlu tek ve katlı tekneler mevcut olmaktadır [41]. Aslında ticari uçaklarda alüminyum etkisi çok müthiştir. Yeni A380 uçağının yapısında alüminyumun %66'i kullanılmakta ve Boeing 747 uçağında alüminyumun 75 tonu içermektedir [41].



Şekil 2.12. Alüminyum alaşımından üretilen uçak, gemi ve tren (a) A380 uçağı [62]; (b) Yolcu gemisi [79]; (c) kurşun hızında trenin alüminyumlu gövde kabuğu [80]

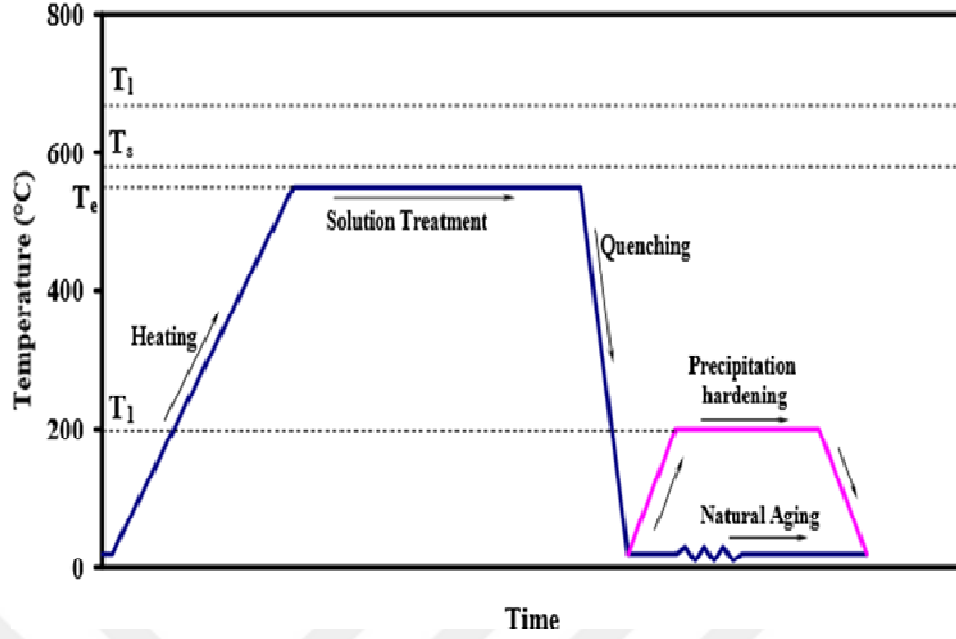
## 2.8. Alüminyum Alaşımlarının Kuvvetlendirme Mekanizması

Alüminyum alaşımları kuvvetlendirilmek için iki başlıca proses vardır ve onlar, işlem sertleşmesi ve çökertme sertleştirilmesi (yaşlandırma) prosesleridir. Alaşımlama elemanının türü, alüminyum alaşımının kuvvetlendirilmesini etkilemektedir. Mesela tablo 2,16'da biçimlendirilen alüminyum alaşımlarındaki sertleştirme çökeltilerinin listesi gösterilmektedir. Listelenmiş çökeltileri, alaşımların mukavemetini etkilemektedir.

Tablo 2.16. Sertleştirme çökeltilerinin kompozisyonu [48]

Alaşım türü	Çökeltme kompozisyonu	Çökeltme terimlendirmesi
Al-Cu	$Al_2Cu$	$\theta$
Al-Mg	$Al_8Mg_5$	$\beta$
Al-Si	Si	-
Al-Cu-Mg	$Al_2CuMg$	S
Al-Mg-Si	$Mg_2Si$	$\beta$
Al-Zn-Mg	$MgZn_2$	$\eta$
	$(Al_2(Cu_2Zn))_{49}Mg_{32}$	T
Al-Li-Mg	$Al_3Li$	$\delta$
	$Al_2LiMg$	-
Al-Li-Cu	$Al_3Li$	$\delta$
	$Al_2CuLi$	$T_1$

Çökeltme sertleştirilmesi tarafından en mukavemetli alüminyum alaşımları kuvvetlendirilmektedir. Aşırı doymun katı çözeltilerin dekompozisyonu kontrol edilerek alaşım mukavemeti kurulmaktadır [18]. Şekil 2,13'te gibi çökeltme sertleştirilmesi için 3 başlıca işlem vardır ve onlar, katı çözeltilerin kurulması, su verme ve yaşlandırma işlemleridir. Katı çözeltilerinde bir alaşım yüksek sıcaklığa kadar ısınır ve solüt çözünmesi için bir sürede o sıcaklıkta tutulmaktadır. Aşırı doymuş haldeki solüt elde tutulmak için aşırı doymuş katı çözeltilerin hızlı soğutulması yapılmaktadır. Bunun yapılması için su verilme işlemi kullanılmaktadır. Bundan sonra yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemde kararsız aşırı doymuş çözüme orta sıcaklık verilmekte ve o metalde kararlı ince çözeltiler oluşturulmaktadır. Çökeltme sertleştirilmesinden ısı işlemlik alaşımları kuvvetlendirilmektedir [18].



Şekil 2.13. Alüminyum Alaşımını Çökeltme Sertleştirilmesi

İşlem sertleştirilmesi kullanılarak ısıl işlem uygulanmayan alüminyum alaşımları kuvvetlendirilmektedir. Şekil değiştirme sertleşmesinden dolayı bu alaşımların mekanik özellikleri iyileştirilmektedir [1, 12, 81-82].

## 2.9. Alüminyum Alaşımlarının Kaynaklanabilirliği

İmalat parçaları, donanımları ya da tamamlanmış makinelerde kaynak önemli bir işlemdir [84]. Ancak alüminyum alaşımlarının kaynaklanması için bütün mevcut olan kaynak yöntemleri uygun değildir. Çünkü bazı alüminyum özellikleri örneğin yüksek ısıl ve elektrik iletkenlikleri ve düşük eritme noktasının sayesinde kaynaklanmış bölgelere zarar gelmektedir. Sonuç olarak alüminyum alaşımlarının kaynaklanması için geleneksel eritme kaynakları uygun değildir. Ancak alüminyum reaktif bir metal olduğu için onun üstünde oksit tabakası kurulmaktadır [85]. Alüminyum kaynaklanmasında bu oksit tabakası, iyice eritme kaynağını etkilemekte ve kaynak dolgu metalinde kalıntılar oluşturulmaktadır. Aynı zamanda kaynak malzemeleri üzerinde hidrokarbon maddesi olmaksızın alüminyumun kaynak metalinde hidrojen tutulması gerçekleştirilmekte ve kaynaklanabilirlik problemleri ortaya çıkarmaktadır [86]. Bu nedenle kaynak yapılmasından önce alüminyumun üzerindeki oksit tabakası ve hidrojen maddeleri kaldırılması ihtiyaç duyulmaktadır [64]. Literatürde alüminyum kaynaklanması için çeşitli kaynak yöntemleri kullanılmıştır. Fakat aşağıdaki problemler alüminyum kaynaklanmasında gerçekleşmektedir.

- Gözeneklilik
- Isıl gerilme çatlaması
- Gerilmeli korozyon çatlağı [81]
- Oksit oluşumu ya da kaynak kalıntıları

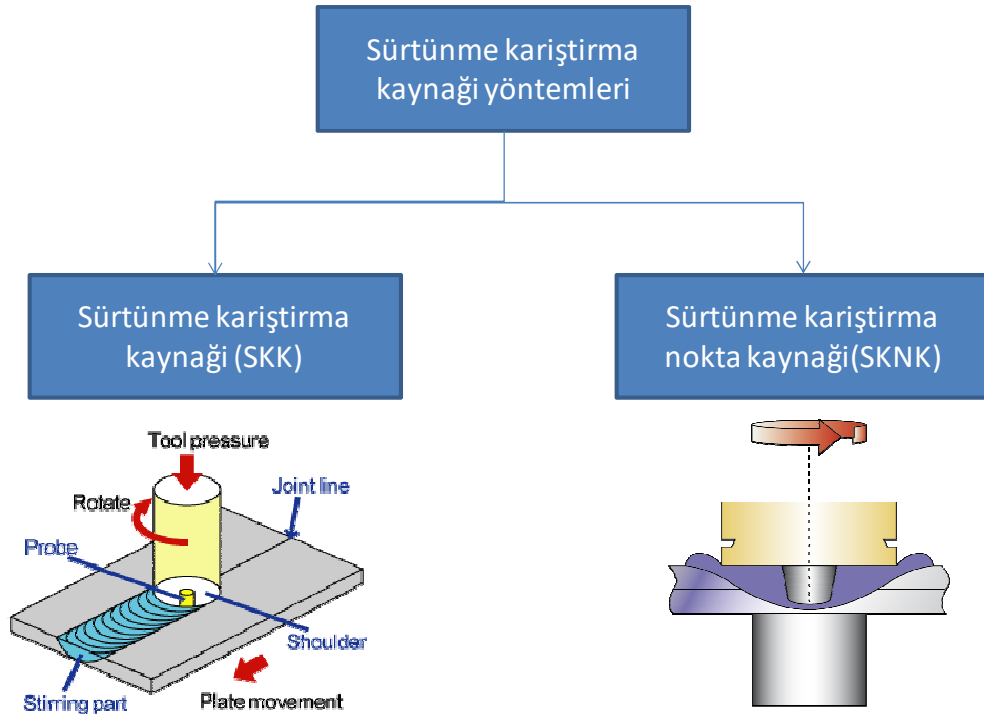
Kaynak banyosundaki tutulmuş hidrojen gazından dolayı kaynak metalinde boşluklar ya da hatalar kalmaktadır. Çeşitli hidrojen kaynakları vardır ve onların kaldırılması gereklidir. Böylece alüminyum kaynaklamasında gözeneklilik oluşturan kaynakları, hidrokarbonlar (yağ, boya, gres, kirlilik, ve yağlayıcı maddeler), susuz alüminyum oksit, ve rutubet kaynaklardır. Kalıcı erime, dendritler arasındaki hacimi tamamen doldurmadan alüminyumun erime metalinde ısıl gerilme çatlaması oluşturulup ilerlenmektedir [87].



### 3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI LİTERATÜR TARAMASI

#### 3.1. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağının (FSSW) Tarihiçesi

Şimdilik sürtünme karıştırma kaynağı (FSW), iki önemli gruba bölünmekte ve şekil 3.1’de bahsedilen gruplar gösterilmektedir. 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından katı faz ve çevre dostu sürtünme karıştırma kaynağı teknolojisi keşfedilmiş ve patentlenmiştir [1, 7, 8, 14, 15, 29-31, 71-74, 89-101]. Böylece sürtünme karıştırma kaynağının (FSW) yenilikçi ilerlenmesinde sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) geliştirilmiştir. 2003 yılında Mazda kurumu ve Kawasaki ağırlık sanayileri tarafından sürtünme karıştırma nokta kaynağı kurulmuştur [66, 95, 98-105]. Mazda RX-8 modelinin kaputları ve arka kapılarının toplu üretiminde Mazda motoru sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi başarıyla uygulamıştır [97, 103, 111, 112]. Ayrıca sürtünme karıştırma nokta kaynağının uygulandığı fabrikalardan Almanyanın GKSS fabrikası birisidir [30, 106].



Şekil 3.1. Sürtünme karıştırma kaynağının sınıflandırılması [113, 114]

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, yeni bir yaklaşımdır. Çok kısa çevrim süresinde sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla ince metal levhalarının bağlanmaktadır [115]. Böylece sürtünme karıştırma nokta kaynağı, geçiş bir işlemdir [67, 91,117] ve doğrusal sürtünme karıştırma kaynağının bir değişkesidir [29, 31, 65, 91, 92, 106]. Nokta gibi bir bağlantılar üretilmek için hafif ağırlık metallere sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla oluşturulabilmektedir [111]. Temel olarak sürtünme karıştırma kaynağında kaynaklanma takımın malzemeye daldırıldığından sonra doğrudan hareketi gerçekleştirilmektedir. Ancak sürtünme karıştırma nokta kaynağında sadece takımın eksenel hareketi oluşturulmakta ve nokta kaynağı yapılmaktadır. Aynı zamanda ana metalin erime sıcaklığına erişilmeden sürtünme karıştırma nokta kaynağı'lı bağlantılar elde edilmektedir. Bu özellik, FSSW'nın benzersiz özelliğidir. Böylece sürtünme karıştırma nokta kaynağında erime kaynağı hataları örneğin gözeneklilik ve bunun gibi yoktur. Onun buluş zamanından itibaren çeşitli sanayilerde Kabul edilmiştir. Örneğin uçak ve havacılık, gemcilik, hızlı tren üretimi ve otomotiv sanayilerinde sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulanmıştır [90]. Aslında tablo 3,1'de diğer sürtünme karıştırma nokta kaynağının uygulanmış alanları gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Sürtünme karıştırma kaynağı için üretim uygulamalarının kronolojik listesi [102]

Yıl	Uygulama	Firma
1995	Oyuk ısı eşanjörleri	Deniz Alüminyum, Norveç
1996	Ticari gemi yapımı	Deniz Alüminyum, Norveç
1998	Delta II roketler	Boeing, ABD
1999	Ticari gemi yapımı	Sapa, İsveç
2000	Otomotiv parçaları	Sapa, İsveç
2000	Lazer sistem hücreleri	Genel takım, ABD
2001	Motor hücreleri	Hidro alüminyum (eskiden deniz alüminyum), Norveç
2001	Otomotiv parçaları	Showa, Japonya
2001	Tren gövdesi	Hitachi, Japonya
2002	Otomotiv parçaları	Tower Otomotiv, ABD
2003	Uçak yapısı	Eclipse, ABD
2003	Ticari gemi yapımı	İleri birleştirme teknolojileri, ABD
2004	Uzay mekiği dış tankları	Lockheed Martin, ABD
2004	Besin tepsileri	RIFTEC, Almanya

Çeşitli farklı metallerin bağlanması sürtünme karıştırma nokta kaynağı çok etkili bir yöntemdir. Farklı metaller örneğin alüminyum alaşımları, titanium, magnezyum, bakır, kalay ve demir bile kaynaklanabilir. Fakat FSSW'yla yüksek erime noktası'lı malzemelerin kaynaklanması zordur çünkü kaynak takımının malzemesi sert işlem koşullarında çalıştırılmaktadır. Böylece malzemeler için sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılmadan önce performans ve ekonomik sebepleri değerlendirilmelidir [102].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla yapılabilir bağlantı türü çok sınırlıdır. Böylece sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılmak için sadece bindirme bağlantı uygundur ve uygulanabilir. Aslında sürtünme karıştırma nokta kaynağında dolgu ya da açığı kaynağı mümkün olmayan bağlantı türüdür. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmadan önce iş bağlama düzeni kullanılarak bağlanacak metallerin sıkıca tutulması gerekmektedir [102]. Bu nedenle uygun FSSW'nın bağlantısı elde edilebilmek için metallerin rijit kenetlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için bağlantının iş bağlama düzeni tasarımında gerekenler aşağıda listelenmektedir [102].

- i. Takım daldırılma durumunda kaynak takımının omuzu için yeterli alan sağlanmalıdır;
- ii. Plastize edilmiş kaynak metalinin yeterli tutulması sağlanmalıdır;
- iii. Kaynaklanacak metallerin hareketi önlenmek için yeterli kuvvet sağlanmalıdır; ve
- iv. Kaynak ısı dağıtılmak için uygun ısı giderici sağlanmalıdır.

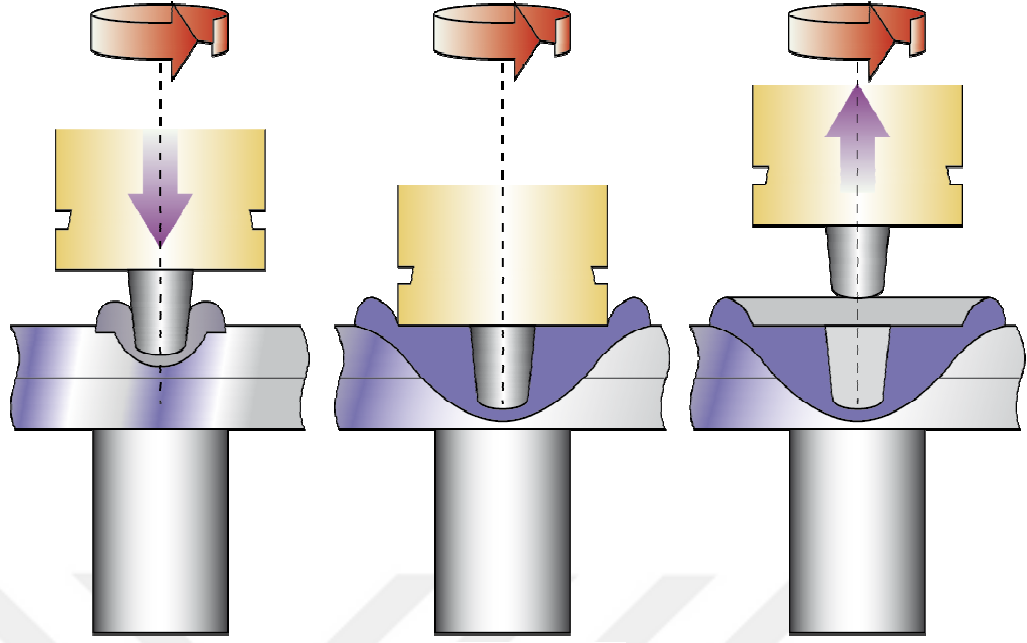
Bir sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımında iki önemli bölüm vardır. Onlar, takımın omuzu ve pimidir. Takımın omuzu, malzeme kalınlığına ve alaşımına bağlıdır. Örneğin demir ve titanium için daha az omuz alanı ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü alüminyuma göre bu malzemelerin ısı iletkenlikleri çok azdır. Böylece onların sürtünme karıştırma nokta kaynağı için az çaplı omuz alanı gerekmektedir [102]. Bunun yanı sıra sürtünme karıştırma nokta kaynağında az bir şekilde değiştirilebilir parametreler mevcuttur. Tablo 3,2'de başlıca FSSW'nın işlem parametreleri listelenmektedir.

Tablo 3.2. Başlıca FSSW'nın işlem parametreleri [102]

Takım tasarlama değişkenleri	Makine değişkenleri	Diğer değişkenler
Omuz ve pim malzemesi	Kaynak hızı	Örs malzemesi
Omuz çapı	İğ devri	Örs büyüklüğü
Pim çapı	Daldırılma kuvveti/derinliği	İş parçasının büyüklüğü
Pim uzunluğu	Takım eğiklik açısı	İş parçasının özellikleri
Diş hatvesi		
Geometri özellikleri		

### 3.1.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının mekanizması

Şekil 3.2'de gibi sürtünme karıştırma nokta kaynağının işletme ilkesi gösterilmekte ve tükenmeyen döner takım kullanılarak kontrollü durumda iş parçasına girilmektedir [8, 74, 117-122]. Kaynak yapılırken kaynak takımı ve iş parçası arasındaki temasta sürtünmeli ısı kurulmakta ve takımın civarındaki malzeme yumuşatılmaktadır. Ayrıca plastikleştirme, malzeme akışı, ve üstteki ile alttaki malzemelerin karıştırılması yapılmak için takımın döner etkisi ve aşağıya doğru olan eksenel kuvvet kolaylaştırılmaktadır. W. Yuan ile arkadaşlarının çalışmasında takımın döndürmesi ve aşağıya hareketinden dolayı malzeme akışının çevresel ve eksenel hareketi oluşturulmuştur ve plastikleştirilmiş malzemelerin birbirine karıştırmasından sonra katı birleştirilmiş bölge kurulmuştur [101]. Ayrıca tükenmeyen takım önceden belirlenmiş daldırılma mesafesine erişildiğinde birkaç saniyelikte tutulmalıdır. Daha sonra kaynak takımı, iş parçalarından kaldırılmakta. Ancak sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla yapılmış bölgeler, takım geometrisine bağlı olmaktadır. Mesela pimli takım ile yapılmış bağlantılarda pim deliği bırakılmaktadır. FSSW'da takım dönme hareketisinden dolayı bükme olası görünmekte ama FSW'da doğrusal ve dönme hareketlerinden nedeniyle takımın bükme ve eğilme birleşmesi görünmektedir [123].



**Daldırılma**

**Karıştırılma**

**Geri çekilme**

Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının ilkeleri [113]

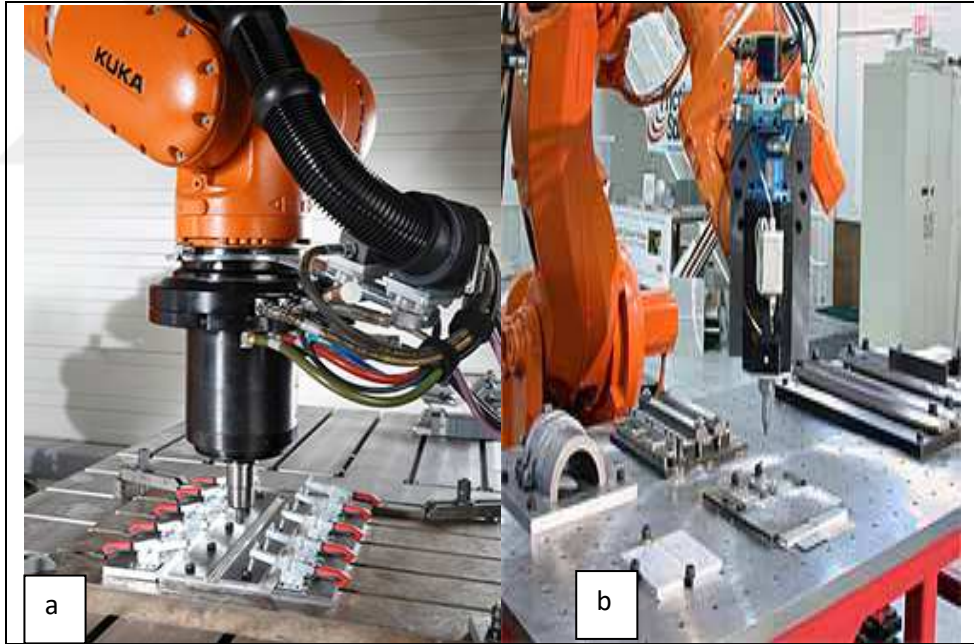
Uygulanan takım başıncından dolayı iş parçalarının arasında sıkı teması kurulmakta, bu durumda sürtünmeli ısı da kurulmakta ve metalurjik bağlanma oluşumu kolaylaştırılmaktadır [72, 73]. Takım daldırılma derinliği ile onun kalma süresi büyük biçimde pim civarındaki ısı üretmesi, malzeme akışı ya da plastikleştirilmesini etkilemektedir. Aynı zamanda seçilmiş takım geometrisi, bağlantıların mekanik özelliklerini ve bağlantı geometrisini etkilemektedir [66, 67, 91]. Roket yakıt tankları, demiryolundaki motris, köprü, uçak iskeleti, yapısal parçalar, kriyojenik tanklar, gemi serisi, binalar, karadan gelen sanayiinde ve bunun gibi uygulama alanlarında sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi kullanılmıştır [97]. Şekil 3,3'te tipik sürtünme karıştırma nokta kaynağı'lı bağlantılar gösterilmektedir.



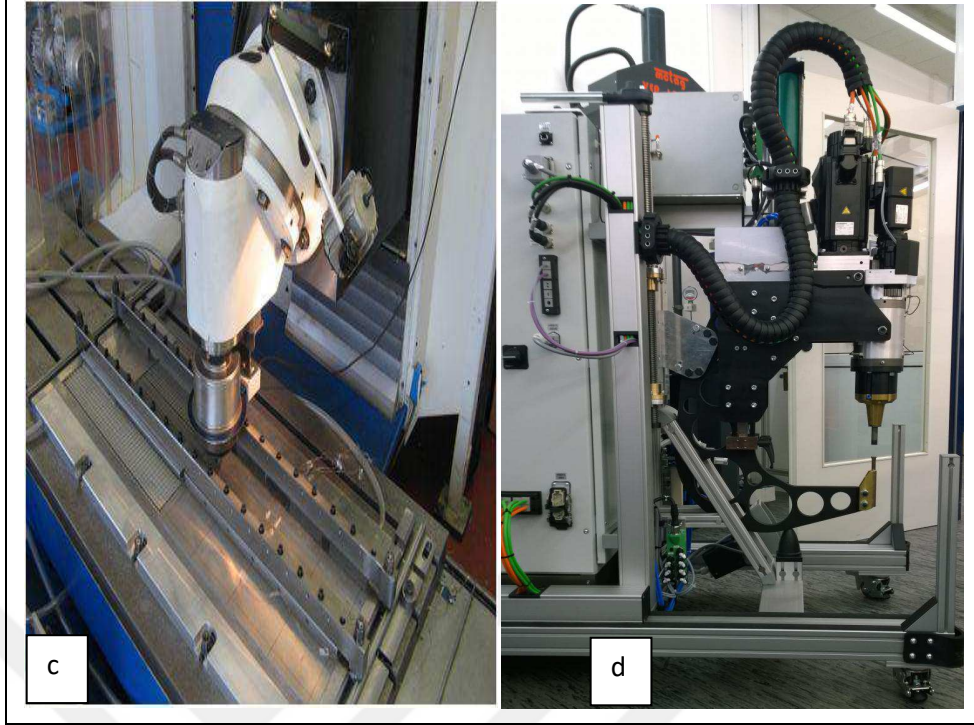
Şekil 3.3. Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojisinden oluşturulmuş alüminyum-magnezyum nokta kaynakları [124]

### 3.1.2. FSSW'in donanımı

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılabilmesi için özel tasarlanmış sürtünme kaynak makinesi ya da adapte edilen geleneksel CNC freze tezgahı uygulanabilmektedir. Şekil 3,4'ta özel tasarlanmış sürtünme kaynak makinesi gösterilmekte ve şekil 3,5'te tipik geleneksel CNC freze tezgahı sağlanmaktadır. Her hangi bir makinede tipik sürtünme karıştırma nokta kaynağı düzenlenmesinde kaynak takımı ve tasarlanmış çalışma masası vardır. Seçilen kaynak takımına bağlı bir tipik takımda iki bölüm içermektedir. Şunlar, pim ve omuz bölümleridir. Bugüne kadar FSSW makinesinin güç kaynağı, elektrik gücüdür. Ayrıca takım pimiyle karıştırma bölgesindeki malzeme akışı kolaylaştırılmakta ama takım omuzu, sürtünmeli ısıyı oluşturmaktadır [91]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için tablo 3,3'te kaynak takımı tasarımlarının özetlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca şekil 3,6'te FSSW'in temel takım profilleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Özel olarak tasarlanmış sürtünme kaynak makinesi: (a) KUKA Sistemlerinin GmbH FSW Makinesi [125]; (b) The RoboStir TM sürtünme karıştırma kaynağı sistemi [126]; (c) Sürtünme karıştırma kaynağı makinesi [127]; (d) BWI'nın sürtünme karıştırma nokta kaynağı



Şekil 3.4. (Devam) Özel olarak tasarlanmış sürtünme kaynak makinesi: (a) KUKA Sistemlerinin GmbH FSW Makinesi [125]; (b) The RoboStir TM sürtünme karıştırma kaynağı sistemi [126]; (c) Sürtünme karıştırma kaynağı makinesi [127]; (d) BWI'nın sürtünme karıştırma nokta kaynağı

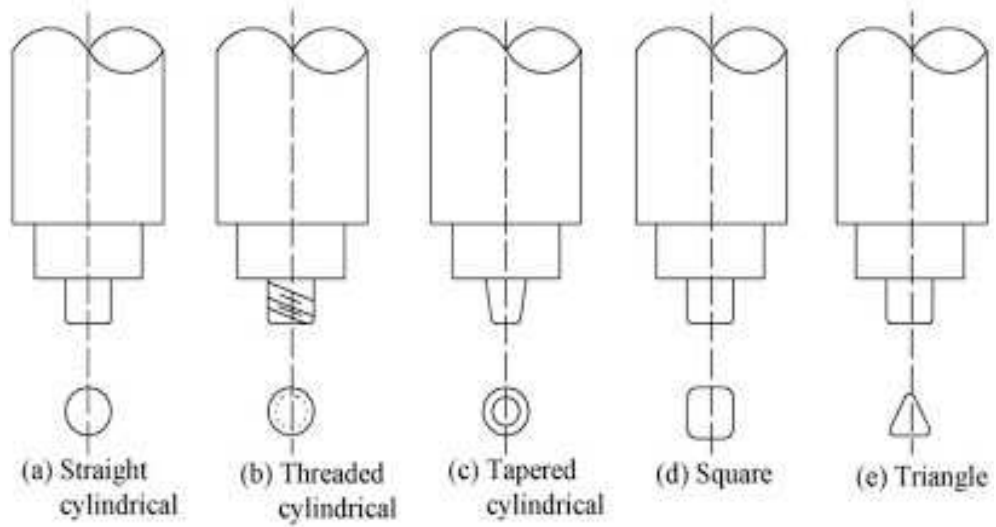


Şekil 3.5. Çevre dostu CNC sürtünme karıştırma kaynağı makinesi [129]



Tablo 3.3. Tasarlanmış kaynak takımının özellikleri özetlenmesi [102]

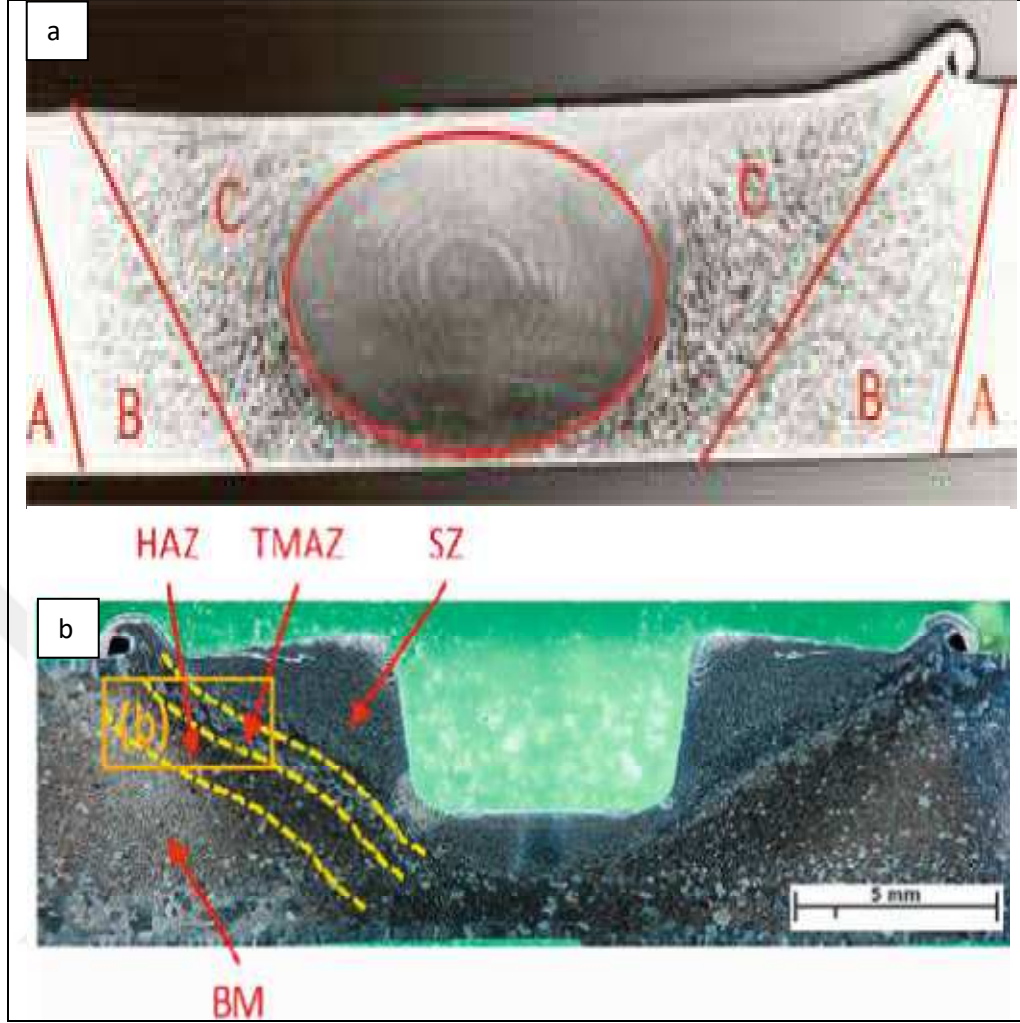
Özellikler	İstenen etkiler	Örnekler
Pimdeki vida dişleri	Örse karşı kaynak bölgesi sıkıştırması	
Düzler ya da diğer yeniden özellikleri	Plastik işlemin yeni modu, kalın kısım kaynaklanması, daha yüksek ısı girişi	
Düz pim ucu	Geliştirilmiş TMAZ daldırılması, daha yüksek daldırılma bağları, daha iyi sağlamlık	
kesik konili pim profile	Azaltılmış yanal kuvvetler, daha kalın kısım kaynaklanması	
genişletilmiş uçlu pim profile	Daha geniş kök profile	
Taslaklı omuz	Takım eğim açısı ihtiyacının kaldırılması, yumuşatılmış malzemenin tutulması	
konik uçlu omuz	Değişken omuz temasının eni, değişken omuz daldırılması	



Şekil 3.6. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan temel takım profili [130]

### 3.1.3. FSSW'ın metalurjisi

Metallerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılarırken içyapısal çözümlemelere göre üç kaynak bölgesi belirlenmiştir. Onlar, karıştırılmış bölge (SZ), termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TMAZ) ve ısıdan etkilenmiş (HAZ) bölgedir. Şekil 3,7'de bu bölgeler gösterilmektedir. Kaynak bölgesinin kristalleştirilmiş kısmına, karıştırma bölgesi olarak denilmektedir. Bu bölge, takımın doğrusal sürtünmeli ısısı görünmektedir. Ancak ısıdan etkilenmiş bölge ve karıştırma bölgesi arasındaki bölgeye termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge denilmektedir. Aslında bu bölgede termal etki ve az şekilde karıştırma etkisi ya da malzeme akışı ortaya çıkarılmaktadır. Öte yandan ısıdan etkilenmiş bölgede sadece ısı etkisi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.7. Metallerin FSSW kaynak bölgeleri: (a) üstten görünüş [A-BM; B-HAZ; C-TMAZ] (TWI); (b) yandan görünüş [122]

### 3.1.4. FSSW'ın avantajları

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, çevre dostu bir katı faz birleştirme teknolojisidir ve aynı zamanda az ısı girişinin nedeniyle yüksek bir enerji tasarruflu işlemdir [1, 5, 7, 8, 30, 73, 91, 92, 99, 105, 109, 131-133]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla erime kaynağının bozulabilir malzemeleri kaynaklanabilir. Bundan başka hiç artık radyasyon, duman ve işletme kazaları olmadığı için FSSW kullanılarak çalıştıran kişilerin sağlığı ve emniyeti korulmaktadır. Ancak diğer önemli FSSW'ın özellikleri ve faydaları vardır. Onlar, asgari çarpılma [1, 5, 7, 8, 12, 73, 134] ya da termal şekil değiştirmesi [29], hiç ağız hazırlanmaması, az kalıntı gerilme düzeyleri [30-31], hiç kaynak sarf malzemeleri [8], yüksek kaynaklanma verimi [12, 29, 73], hiç mıknatis kuvveti etkisi, iyi mekanik özellikleri, tekdüze kaynak yapısı [29], basitlik ve otomasyon uygunluğu içermektedir [4]. Uçak, havacılık ve otomotiv sektöründe

direnc nokta kaynağı ve perçinleme yenisiyle değiştirme, sũrtũnme karıştırma nokta kaynağı olmaktadır [29, 120]. Genellikle alũminyum alaşımları iãin bu kaynak yũntemi uygundur. Sũrtũnme karıştırma nokta kaynağıyla diğer ileri malzemeler ørneđin magnezyum alaşımları, bakır alaşımları, titanyum alaşımları kaynaklanabilir [29, 65]. Aslında erime kaynağıyla bağlanmış alũminyum alaşımına gũre FSSW’li alũminyum alaşımları daha iyi ÷ekme ve yorulma øzelliklerine sahip olmaktadır [97].

Ayrıca bazı FSSW’ın dezavantajları da vardır. Onlar, pim deliği [4, 72, 73] ve kaynaktan sonra bırakılmış delikte korozyon etkisi iãermektedir [72, 106]. Ayrıca sũrtũnme karıştırma nokta kaynağında destek ørs ve rijit kenetlenme ihtiyaã duyulmaktadır. Bu yũzden ark kaynaklamasına gũre FSSW yũntemi ÷ok esnek olmamaktadır [4]. FSSW kullanılarak sadece ince metal levahaları kaynaklanabilir ve sınırlanmalıdır. yine de tablo 3,4’ta sũrtũnme karıştırma nokta kaynağının øzetlenmiř faydaları ve genel eksiklikleri listelenmektedir.

Tablo 3.4. Sũrtũnme karıştırma nokta kaynağının faydaları ve genel eksiklikleri [1, 4-8, 12, 29-30, 73, 74, 91, 92, 99, 102, 105, 109-134]

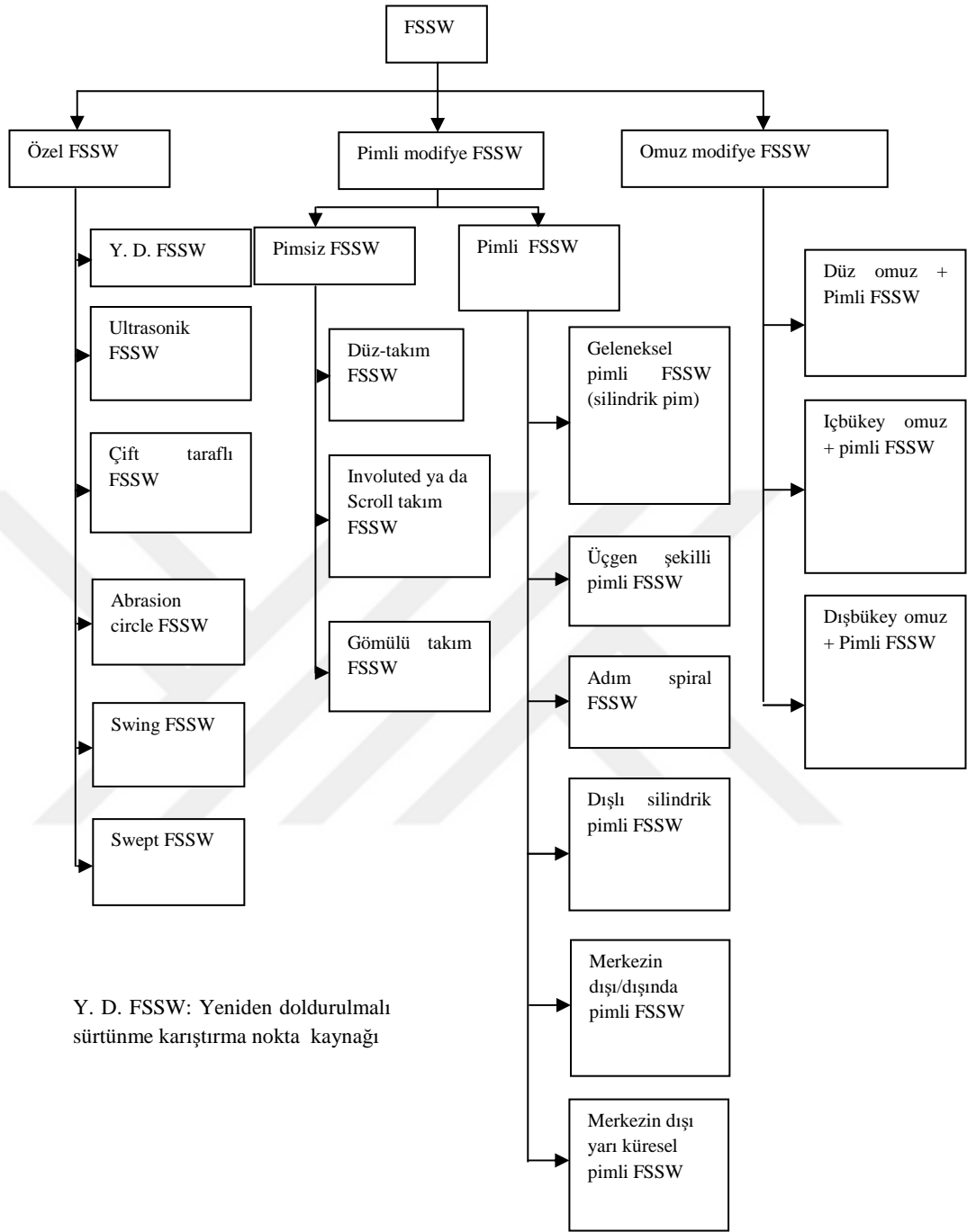
FSSW’ın katkılar	Sağlık faydaları	Maliyet faydaları	Genel eksiklikler
Yũksek enerji etkili proses (az ısı girişi)	Hiã artık radyasyon	Hiã kaynak sarf malzemeleri	Destek ørs kullanılması
Yũksek kaynaklama verimi (yũksek kaynak hızı)	Hiã tehlikeli duman	øzel beceri gerekmiyor	Kaynaktan sonra pim delikleri
Hiã erime (az ısıdan etkilenmiş bũlge)	Çevresel dostu	Az takım maliyeti	øzel sabitlik tasarlaması gereklidir
Az ÷apılma	Çok az işletme kazası	Sıçrama yoktur	İş parçalarının rijit kenetlenmesi
Hiã ağız hazırlaması	İnsan emniyeti ve hiã sağlık etkisi	Gøzeneklik yoktur	Esnek değildir
Basitlik ve otomasyon uygunluğu		Kaynak banyosu korunması yoktur	İnce metal levhalarına sınırlıdır
Az kalıntı gerilmesi		Azaltılmış işletme zamanı ya da iřgũcũ	Bağlantı tasarlama sınırlanması

Tablo 3.4. (Devam) Sürtünme karıştırma nokta kaynağı faydaları

İyi kaynak yapısı		Azaltılmış sermaye yatırımı	
İyi mekanik özellikleri		Artırılmış üretim hacmi	
Benzemez malzeme kaynaklanması			
Seviye altı kaynak metalli gidermesi			

### **3.2. Literatürdeki Mevcut Olan Alüminyumun Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yöntemleri**

Literatürdeki mevcut olan sürtünme karıştırma nokta kaynağının detaylı incelenmesi yapılmıştır. Ondan çeşitli yenileyici çalışmaların olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağındaki yeniliklerin hedefleri, örneğin hata kaldırılması ve bütün bağlantının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Ancak alüminyum alaşımlarının bağlantı gelişimlerinde takım geometrisi ve bağlantı oluşumu yaklaşımları kullanılmaktadır. Bunun açıklanma basitliği yapılmak için FSSW yöntemleri 3 bölüme bölünmüştür. Şunlar, pim değişimi, omuz değişimi ve takımın (özel FSSW) hareket değişimidir. Şekil 3,8'te özetlenmiş mevcut olan alüminyum alaşımlarının FSSW yöntemleri sağlanmaktadır.



Şekil 3.8. Mevcut olan alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynakları

### 3.2.1. Özel FSSW

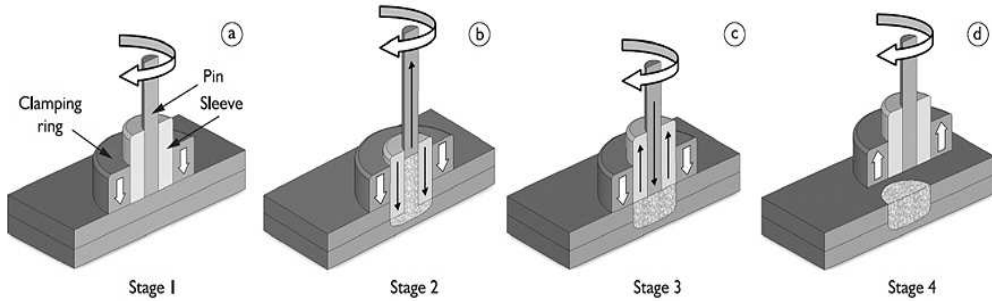
Özel FSSW teknolojisinde birden fazla takım hareketi ya da takım hareketinin kompleksi/karışığı oluşturulmaktadır. Aynı zamanda dış aygıttan gelen takımın titreşimi bu sınıfa koyulmaktadır. Melez kaynaklama teknolojisi örneğin laze ile

FSSW yöntemi ve bunun gibi bu grupta kapsamamaktadır. Böylece kullanılmış özel FSSW yöntemleri aşağıda listelenmektedir.

- Yeniden doldurulmalı FSSW;
- Ultrasonik FSSW;
- Çift taraflı FSSW;
- Abrasion circle FSSW;
- Swing FSSW; ve
- Swept FSSW

### 3.2.1.1. Yeniden doldurulmalı FSSW

Yeniden doldurulmalı FSSW yönteminde takım hareketinin karışık olduğu için özel FSSW sınıfına bölünmektedir. Bu yöntem ile geleneksel FSSW'nin pim deliği giderilmektedir. Helmholtz-Zentrum Geesthacht tarafından yeniden doldurulmalı FSSW yöntemi kurulmuştur [29, 104, 106, 111, 135, 136]. Aynı zamanda Yeniden doldurulmalı FSSW yaklaşımı kullanılarak yorulma çatlakları tamiri yapılabilmektedir [106].



Şekil 3.9. Yeniden doldurulmalı FSSW işlemi

Şekil 3.9'de yeniden doldurulmalı FSSW işlemi gösterilmektedir. Bu işlemde takım montajı kullanılmakta ve bu takımda 3 bölüm vardır. Şunlar, kenetleme halkası, kılıf/kovan ve pim parçalarıdır. Bu yöntemde 4 işletme aşaması vardır. Şunlar

- Sürtünme işlemi;
- Birinci sıkma/ekstrüzyon işlemi;
- İkinci sıkma/ekstrüzyon işlemi; ve
- Geri çekilme/çıkarma işlemi

Malzeme akışı işlemi kontrol edilmek için kenetleme halkası, kaynaklanacak malzemesi örse karşı tutulmaktadır [29]. kılıf/kovan ve pim parçaları sadece eksenel yönünde hareketlenmekte ve işlem durumunda iki parça aksi yönde olmaktadır.

Pimin daldırılması sırasında kaynaklanmakta olan malzeme plastikleştirilmiş ve yerinden çıkarılmış olmaktadır. Kılıf/kovan tarafından yerinden çıkarılmış malzeme sıkıştırılmaktadır. Bu yüzden kurulmuş pim deliği tamamen doldurulmakta ve düz yüzeyli bağlantı noktası elde edilmektedir. Y. Uematsu ve onun arkadaşları, 2mm kalınlığındaki 6061-T4 alüminyum alaşımının yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağını incelemiştir [137]. T. Rosendo ve arkadaşları, M.D. Tier ve arkadaşları, Tobias Montag ve arkadaşları, Zhikang Shen ve arkadaşları, ve S. Venukumar ve arkadaşları, yeniden doldurulmalı FSSW'ı kullanarak 1.7mm kalınlığındaki AA6181-T4 alaşımında, 5042 alaşımında, 2.0mm kalınlığındaki 6082-T6 alaşımında, 7075-T6 ve AA6061-T4 alaşımında ve AA6061-T6 alaşımında çalışmaları yapmışlardır [13, 15, 104, 133, 136].

Bu proses kullanılarak bağlantı olması sırasında malzeme kaybı minize edilmekte ve tamamen pim deliği kaldırılmaktadır. Ayrıca yeniden doldurulmalı FSSW'li bağlantıların mukavemeti iyileştirilmektedir. Ancak onun dezavantajları vardır. Örneğin karışık takım ve prosedür, yüksek maliyet, uzun kalma süresi, bazı dezavantajlardır [29].

### **3.2.1.2. Ultrasonik FSSW**

Takımın endüklenmiş sesüstü titreşiminden dolayı bu FSSW yöntemi, özel FSSW sınıfına bölünmektedir. Bu kaynak yönteminde sesüstü titreşimi ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı birleşimi kullanılmaktadır. Y. Rostamiyan ve arkadaşları, AA6061 alüminyum alaşımının sesüstü titreşimli sürtünme karıştırma nokta kaynağını yapmıştır.

Sesüstü titreşiminden dolayı kaynak bölgesinde ince ve daha homojen tane dağıtımı elde edilmiş ve bağlantının mekanik özellikleri örneğin sertliği ve kesme mukavemeti iyileştirilmiştir [138].



### 3.2.1.3. Çift taraflı FSSW

Aynı zamanda birden fazla daldırılma takımı kullanılarak iki taraflı FSSW yöntemi, özel FSSW bölümüne bölünmektedir. İki taraflı FSSW yöntemi, Twin-stir™ kaynak teknolojisine benzemekte ama iki taraflı FSSW yönteminde takımın doğrusal hareketi olmamaktadır [26] [118]. İki taraflı FSSW'ın iki sınıfı vardır. Bu FSSW'ın grubu tepkisel torkta azaltması sağlanmaktadır [118].

Birinci iki taraflı FSSW'ın sınıfında aynı zamanda iki takımın dönme hareketi gerçekleştirilmektedir. Chase D. Cox ve arkadaşları, 1mm ve 2mm kalınlığındaki alüminyum levhalarında iki taraflı FSSW yöntemini incelemiştir. Bir tarafta taslak pimsiz takım kullanılmış ve diğer tarafta dönmekte olan örs, pimsiz takım olarak kullanılmıştır [103]. Dönmekte olan örs FSSW'ı kullanılarak daha kalın kesitler/parçalar bağlanmakta ve iyileştirilmiş bağlantının mekanik özellikleri elde edilebilmektedir. Aynı zamanda bu yöntemde kaynak noktasında eksensel ya da tepki kuvvet azaltılmaktadır[103].

İkinci iki taraflı FSSW'ın sınıfında taraftaki nokta kaynağı sadece tek tek yapılmaktadır. Üstteki iş parçasının yüzeyinde sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapıldığından sonra iş parçası çevrilip ve ikinci tarafta kaynaklanmaktadır. Bunun yapılması için aynı kaynak parametreleri kullanmaya ihtiyaç duyulmaktadır. M. Cabibbo ve arkadaşları tarafından 2mm kalınlığındaki AA6082-T6 alüminyum alaşımında bu kaynak yöntemini kullanmıştır. Geleneksel FSSW yöntemine göre iki taraflı FSSW yöntemiyle daha iyi şekillenebilirlik ve homojen dinamik yeniden krystalleştirilmiş tane yapısı elde edilmiştir [97].

### 3.2.1.4. Abrasion circle FSSW

Y.C. Chen ve arkadaşları tarafından abrasion circle FSSW değerlendirilmiştir [115]. Aşınma çemberi FSSW'ında kaynak takımı, iş parçasına daldırılmakta ve dairesel yol hareketlendirilmektedir. Bu arada hareketlendirilen dairesel yol, takımın yarıçapına eşit olmalıdır. Böylece dairesel yol yapıldıktan sonra takım, kaynak merkezine taşınmakta ve geri çıkarılmaktadır. Abrasion circle FSSW kullanılarak yüksek kaliteli kaynak elde edilmekte ve etkili daha büyük metalurjik bağlanma alanı elde edilmektedir. Bu kaynak yöntemiyle aynı olmayan malzemeler uygun bir

şekilde kaynaklanabilmektedir. Y.C. Chen ve onun dostları, 1mm kalınlığındaki 6111-T4 alaşımı ile DC04 az karbonlu demir levhalarının aşınma çemberi FSSW'ını gerçekleştirmiş ve yüksek kaliteli bağlantıları elde etmiştir [115].

### **3.2.1.5. Swing FSSW**

Hitachi tarafından bu katı faz kaynak yöntemi kurulmuştur [139]. Bu yöntem, geleneksel FSSW yöntemine benzemektedir ama takım hareketinde bir değişiklik vardır. Swing FSSW yönteminde takımın iki adım yaklaşımı kullanılmaktadır. Swing FSSW kaynağı yapılmak için takım malzemeye daldırılarak nokta kaynağı üretilmekte ve kısa mesafede hemen takımın doğrusal ya da yatay hareketi gerçekleştirilmektedir. Bu FSSW yöntemiyle daha yüksek mukavemet ve daha geniş temas alanı oluşturulmaktadır. Ayrıca Zhaohua Zhang ve arkadaşları tarafından yürüyen FSSW yönteminin kopyası geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Ancak bu yazılara göre bu yöntem, yürüyen FSSW işlemine denilmiştir [110].

### **3.2.1.6. Swept FSSW**

Swept FSSW işlemi azıcık bir karışık işlemdir ve iki önemli işlemleri içermektedir. Birincisi belirli bir derinlikte dönmekte olan takım, iş parçasına daldırılmaktadır. İkincisi takım, belirli bir dışa doğru olan mesafeye taşınmakta ve malzeme daha karıştırılmak için takım, dairesel yol süpürülmektedir. Sonunda kaynak takımı, takımın ilk başlangıcına ya da dairesel yoluna geri götürülmekte ve bir swept FSSW'li bağlantı elde edilmektedir [109]. Bu yöntemde dairesel yolun çapları değiştirilebilir ama aşınma devir FSSW yönteminde takımın omuz çapı, dairesel yolun çapıdır. Aynı zamanda Wenya Li ve onun arkadaşları, 1,5mm kalınlığındaki AA2024 alüminyum alaşımının swept FSSW'li bağlantılarını yapmıştır. Ancak onlara göre bu yöntem FSSW-FSW işlemi denilmiştir [140]. Bu yöntem ile yapılmış bağlantıdaki çengel hatası giderilmektedir. Ayrıca gerçek kaynak alanı ve bağlantının mukavemeti arttırılmaktadır [140]. Z.M. Su ve arkadaşlarına göre elde edilmiş daha geniş karıştırma bölgesinden dolayı iyileştirilmiş bağlantının mekanik özellikleri olmuştur [109].

### 3.2.2. Pimsiz FSSW

Pimsiz FSSW yönteminde pim olmayan ve değiştirilen ya da düz omuzlu takım kullanılmaktadır. 2009 yılında sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde Tazokai ve arkadaşları pimsiz takım kullanılmasını geliştirmiş ve uygulanmıştır. Bu yazılar, kıvrılmış omuzlu takımı kullanarak ince alüminyum alaşımlarının levhalarını kaynaklamıştır [118].

Pimsiz FSSW işlemi kullanılarak yüksek mukavemetli ve anahtar deliği olmayan kaynaklı bağlantılar elde edilmektedir [112, 118].

Diğer pimsiz FSSW yönteminin avantajları, basitlik, daha iyi görünüş ya da malzemedeki sığ boşluktur [29]. Alüminyum alaşımlarında uygulanmış pimsiz FSSW'ın örnekleri aşağıda listelenmektedir.

- i. Gömülü takım FSSW
- ii. Düz takım FSSW
- iii. Involute/Scroll takım FSSW

#### 3.2.2.1. Gömülmüş FSSW takımı

Yuang-Cherng Chiou ve arkadaşları tarafından gömülmüş FSSW takımı icat edilmiştir [141]. Bu kaynak yönteminde alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken kendiliğinden eşleştirilmiş çiftin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu proseste pimsiz takımın yüzeyi sondaj yapılması ve elde edilmiş sondaj deliğine alüminyumlu çubuğun sıkı eklenmesi içermektedir. Böylece gömülmüş çubuk ve takımın omuzu aynı düzeyde kalmalıdır. Yuang-Cherng Chiou ve arkadaşları, 3mm kalınlığındaki 6061-T6 alüminyum alaşımında pimsiz gömülmüş takımın etkisini incelemiştir. Bu yöntemden daha yüksek mukavemetli bağlantılar elde edilmiştir [141]. Alüminyumun kendiliğinden eşleştirilmiş çiftinden dolayı sıcaklık oranı, maximum kazanılabilir sıcaklık ve karıştırılmış bölgenin derinliği arttırılmaktadır. Bu yüzden bağlantının mekanik özellikleri etkilenmektedir [141].

### **3.2.2.2. Düz FSSW takımı**

Düz FSSW takımına omuz değiştirilmez pimsiz takım denilmektedir. P.C. Lin ve arkadaşları, düz omuzlu takımı kullanarak 0,94mm kalınlığındaki 6111-T4 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağını yapmıştır. Onlara göre takım türünden elde edilmiş bağlantıların mikroyapısı, geometrisi ve kırılma modu etkilenmiştir [108].

### **3.2.2.3. Helezonik kıvrılmış takım**

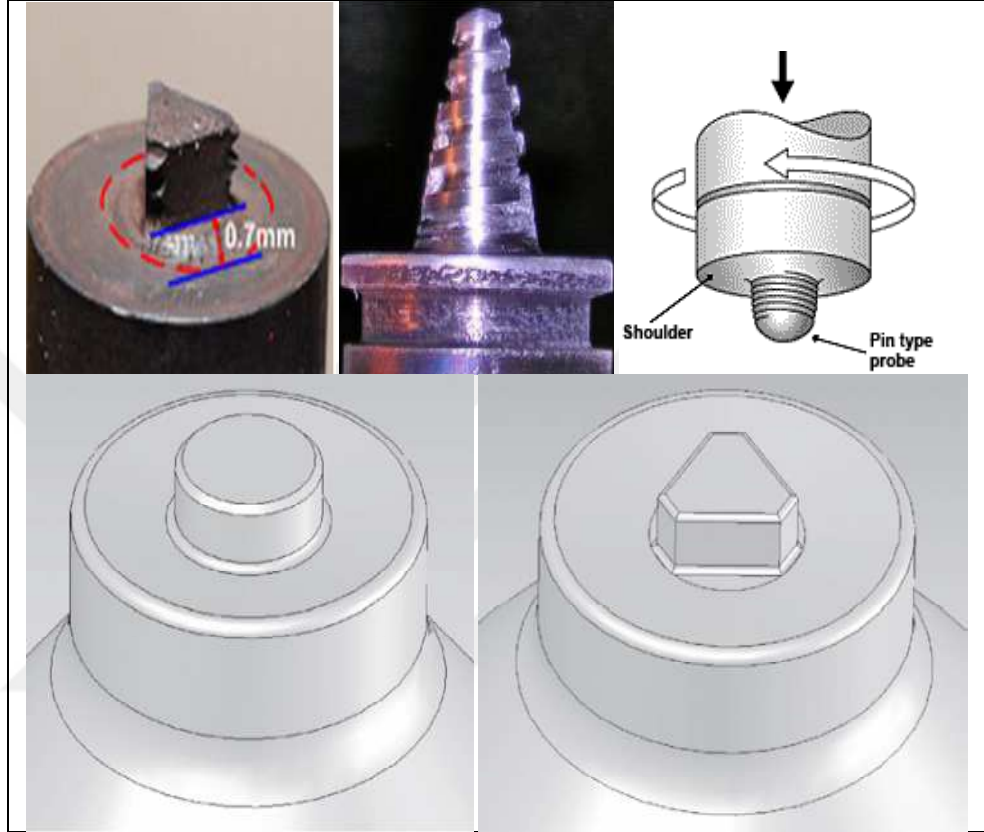
Helezonik kıvrılmış omuzlu bir takıma işaret edilmektedir. Sonuç olarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken helezonik kıvrılmış omuzden dolayı daha iyi malzeme karıştırılması ve akışı oluşturulmaktadır [31]. Aynı zamanda helezonik kıvrılmış omuzlu takım kullandığı zaman süreç dengesi geliştirilmektedir [123]. Y. Tozaki ve arkadaşları, 2mm kalınlığındaki 6061-T4 alüminyum alaşımında helezonik kıvrılmış omuzlu takımı kullanmıştır. Geleneksel pimli takımın soncuna göre helezonik kıvrılmış omuzlu takımın mekanik özellikleri daha iyi olmuştur. Çünkü iyice malzeme akışı ve karıştırılması oluşturulmuştur. Aynı şekilde anahtar deliği olmayan bağlantı elde edilmiştir [31].

### **3.2.3. Pimli FSSW**

Pimli FSSW yönteminde geometrik olarak tasarlanmış takım ile belirlenmiş pimin şekli ve uzunluğu kullanılmaktadır. Pimin geometrisi, bağlantının termo-mekanik çevresini etkilemektedir. Aynı anda pim şekli tarafından plastize edilmiş malzeme akışı ve bağlantının özellikleri etkilenmektedir. Aslında takım piminden dolayı tabaka tabakaya malzeme akışına yardım edilmektedir [123]. Şekil 3.10'da bazı mevcut olan pimli FSSW takımları gösterilmektedir.

Bu takım türüyle anahtar deliği gerçekleştirilmekte ve bunun nedeniyle çekme ya da dinamik yüklenme durumunda çatlak ilerlemesi ve bağlantı kırılması etkilenmektedir. Silindirik pimin uzunluğu, çekme-kesme mukavemetine doğrudan ilişkili olmaktadır [123]. Bağlantının geometrisi ve statik mukavemeti belirlenmesinde takımın pim profili önemli faktördür [66]. Silindirik pime göre üçgen biçimli pim malzeme akışı daha arttırılmaktadır. Bu yüzden daha sert olan

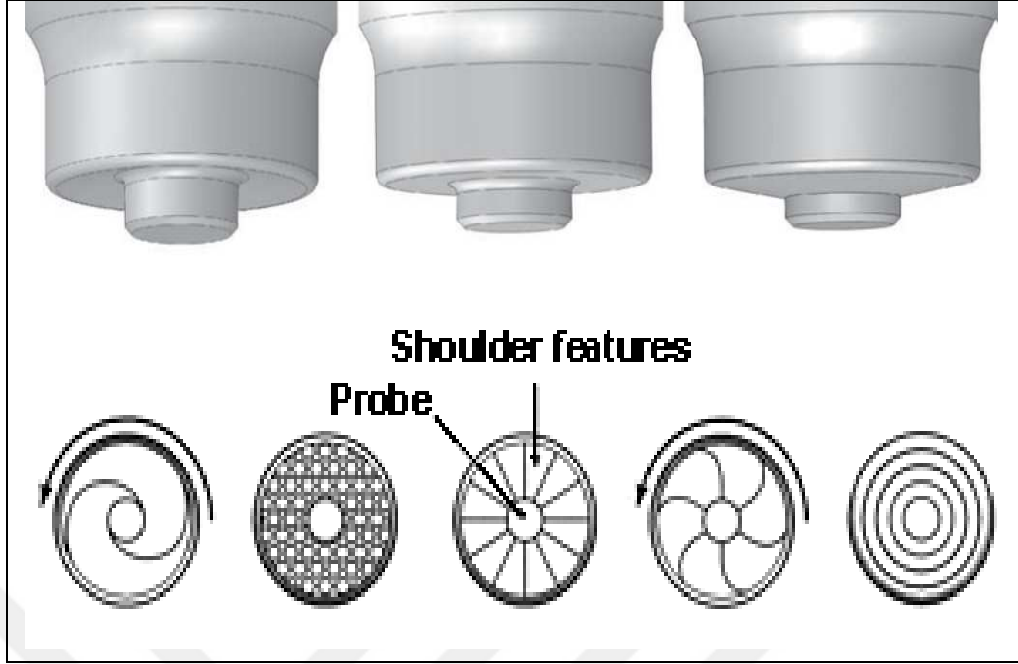
alaşımlar için üçgen biçimli pim tavsiye edilmiştir. Genel olarak kaynak takımının özellikleri örneğin dişli ve oluklu pim ve bunun gibi aksenal kuvvetin etkilenmesi, malzeme akışının geliştirilmesi ve ısı oluşum oranının artırılması gerçekleştirilmektedir [123, 132].



Şekil 3.10. Üçgen biçimli pim [123]; Dışlı konik pim [123]; Silindirik dışlı pim; Silindirik pim (dış olmayan), üçgen biçimli pim (dış olmayan) [66]

#### 3.2.4. Omuz değiştirilmiş FSSW

Bir pimli takım ile düz, dışbükey ya da içbükey omuz, bu gruba bölünmekte ve şekil 3.11'de sağlanmaktadır. Şekil 3.11'de diğer omuz değiştirilebilir profiller gösterilmektedir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında takım omuzu, takım tasarımının bir kritik parçasıdır. Takım omuzunun şekli ve çapı, ısı oluşumunu ve malzeme akışını etkilemektedir [123]. FSSW'de daha iyi kontrol edilen malzeme süpürülmesi üzerinde merkezden sapmış takım kullanılmaya ihtiyaç duyulmaktadır [101].



Şekil 3.11. Silindrik pimler (a) içbükey omuz, (b) düz omuz (c) dışbükey omuz [66]; (d) Takım omuzunun geometrisi

Shigeki Hirasawa ve arkadaşları tarafından kaynak bağlantılarının mukavemetinde içbükey, düz ve dışbükey etkileri ve üçgen biçimli pim, konik pim ve silindirik pim etkileri incelenmiştir [91]. Fakat üçgen biçimli pim ve içbükey omuzlu takım en iyi bağlantının mukavemeti üretilmiştir [91] [95]. P.C. Lin ve onun arkadaşları, içbükey omuzlu takımı kullanarak 0,94mm kalınlığındaki AA6111-T4 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağını gerçekleştirmiştir. Onlara göre merkez deliğinin civarındaki kaynak dikişinin kalınlığı artırılmıştır [107].

### 3.3. Literatürdeki Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

Literatürdeki alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında incelenmiştir. Araştırılmış sonuçlara göre alüminyum üzerinde geleneksel sürtünme karıştırma nokta kaynağı ve modifiye edilmiş sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknolojileri kullanılmıştır. Böylece tablo 3.5 ve 3.6'da araştırılmış alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı özetlenmesi listelenmektedir. Tablo 3.5'te FSSW'li ısıtılmayan alüminyum alaşımları ile kalınlıkları gösterilmektedir. Aynı şekilde tablo 3.6'da literatürdeki FSSW'li ısıtılabilen alüminyum alaşımları gösterilmektedir. Böylece, bu araştırma için daha önce kullanılmamış alüminyum alaşımının seçilmesi ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 3.5. Literatürdeki ısıtıl işlem uygulanmayan alüminyum alaşımları

S/n	Al malzemesi	Kalınlık (mm)	FSSW'ın türü	Takım geometrisi	Kaynak mukavemeti	Ref.
1	AA1050-H18	300µm		Düz omuz; pim	154N	[142]
2	5052-H32/6061-T6	3	G-FSSW	Pim	5732,9N	[94]
3	5J32	-	G-FSSW	Silindirik pim	4,6kN	[132]
4	AA 5182-O	1,2 & 2	G-FSSW	-	99MPa	[143]
5	5754	1,32	G-FSSW	Pim		[66]
6	AA5042-O	1,5	Y-FSSW	-	6,31kN	[104]
7	AA3003-H12	3	G-FSSW	Dişli pim	4,22kN	[117]
8	5083-O	1,64 & 1,24	G-FSSW	cylindrical pim	1420N	[67]
9	5083-O	1,64 & 1,24	G-FSSW	Üçgen biçimli pim	3630N	[67]
10	5052-H112	1	G-FSSW	Dişli pim	2847,7 N	[110]
11	5052-H112	1	Yü-FSSW	-	incr 6,3% - 21,5%	[110]
12	AA5754-O	2	ıçbükey omuz	Dişli pim	4,34kN	[105]
13	1050/6061-T6	2	ıçbükey omuz	Dişli pim	4127N	[65]
14	2024-T3/AA5754-H22	1,6/1,5	G-FSSW	Silindirik pim	5,36kN	[92]

Not: Incr- artırma; G-FSSW – geleneksel FSSW; Y-FSSW- yeniden doldurulmalı FSSW; Yü-FSSW- Yürüyen FSSW

Tablo 3.6. Literatürdeki ısıtıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları

S/n	Al malzemesi	Kalınlık (mm)	FSSW'ın türü	Takım geometrisi	Kaynak mukavemeti	Ref
1	Alclad 2024-T3	1.6	S-FSSW	Düz		[109]
2	AA2024-T3	1.5		Pimsiz	12.01kN	[140]
3	AA2024-T3	1.5	G-FSSW	Pimsiz	6.95kN	[140]
4	AA2024-T3	1.5	G-FSSW	Pim	9.39kN	[140]
5	6061-T6	3	Gömülü takım	Pimsiz	2 kN	[141]
6	6061-T6	3	Düz takım	Pimsiz	1.35 kN	[141]
7	AA6061-T4	2		-	4.6kN	[31]
8	AA6061-T4	2	Pimli takım	-	3.9kN	[31]
9	AA 6061-T4	2	G-FSSW	İçbükey; pim	2107 N	[106]
10	6061-T4	2	Y-FSSW	-	7117.0 N	[106]
11	AA6061-T4	2	G-FSSW	Silindirik pim	2564N	[137]
12	AA6061-T4	2	Y-FSSW	-	3458 N	[137]
13	AA6061-T4	2	G-FSSW	İçbükey	2948 N	[137]

Tablo 3.6. (Devam) Literatüdeki ısıtma işlemi uygulanabilen alüminyum alaşımları

14	AA6061-T6	2	Y-FSSW	-	9520N	[13]
15	AA6061-T6	2	G-FSSW	-	6972N	[13]
16	6061-T6	1	Düz takım	Dişli pim	2.12kN	[108]
17	6061	3		Pimli takım	12.3kN	[138]
18	6061	3		-	9.11kN	[138]
19	6016-T4	1	G-FSSW	Pim	3.3kN	[101]
20	6016-T4	1	G-FSSW	yarım küresel pim	3.3kN	[101]
21	AA 6060-T5	1.77	Pimli	Düz pim	3.32kN	[144]
22	AA6082-T6	2	İki taraflı	Pim; Pimsiz	-	[97]
23	AA6111-T4	0.94	Pimli	İçbükey	2.59kN	[107]
24	AA6111-T4	1.94	Düz takım	-	1.94kN	[108]
25	AA6111-T4	0.94 & 1.04	Düz takım	-	3.38kN	[105]
26	AA6111-T4	0.9	G-FSSW	-	2.9 kN	[115]
27	AA6111-T4	0.93	FSSW	-	4 kN	[115]
28	6111-T4	1.3 & 1.5	FSSW	Silindirik pim	4.462kN	[100]
29	AA6181-T4	1.7	Y-FSSW	-	6.8kN	[133]
30	7075-T6	2	Y-FSSW	-	7031.0 N	[15]
31	7075-T6	2	G-FSSW	Pim	12.39 kN	[30]

Not: G-FSSW – geleneksel FSSW; Y-FSSW- yeniden doldurulmalı FSSW; S-FSSW- Süprülmiş FSSW

### 3.4. Mikroyapı

Alüminyumun sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında sıcaklık atırılmasından orta şekil değiştirme hızı gerçekleştirilmekte ve kaynak bölgelerinin mikroyapısı değiştirilmektedir [133]. AA6061-T4 alüminyum alaşımının FSSW’li deneysel araştırmasında proses parametrelerinin değiştirilmesinden dolayı bu alaşımın mikroyapı ve mekanik özellikleri büyük biçimde değiştirilmiştir [106]. Alüminyumun mikroyapısal özellikleri örneğin tane büyüklüğü ve dağılımı, kaynak kalitesini etkilemektedir. Daha ince ve tekdüze dağılımlı taneler, kaynağın mukavemetini ve sertliğini arttırmaktadır. Ancak büyük taneli kaynak yapısının olduğunda kötü kaynak mukavemeti elde edilmektedir [138]. Takım dönme hızı arttırılınca sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile üretilmiş bağlantıların mikroyapısı daha kaba oluşturulmaktadır. Çünkü yüksek takım dönme hızı durumunda daha çok sürtünmeli ısı ve şekil değiştirme enerjisi ortaya çıkarmakta ve kaynağın mikroyapısını etkilemektedir [110]. Genel olarak optik mikroskop (OM), tarama

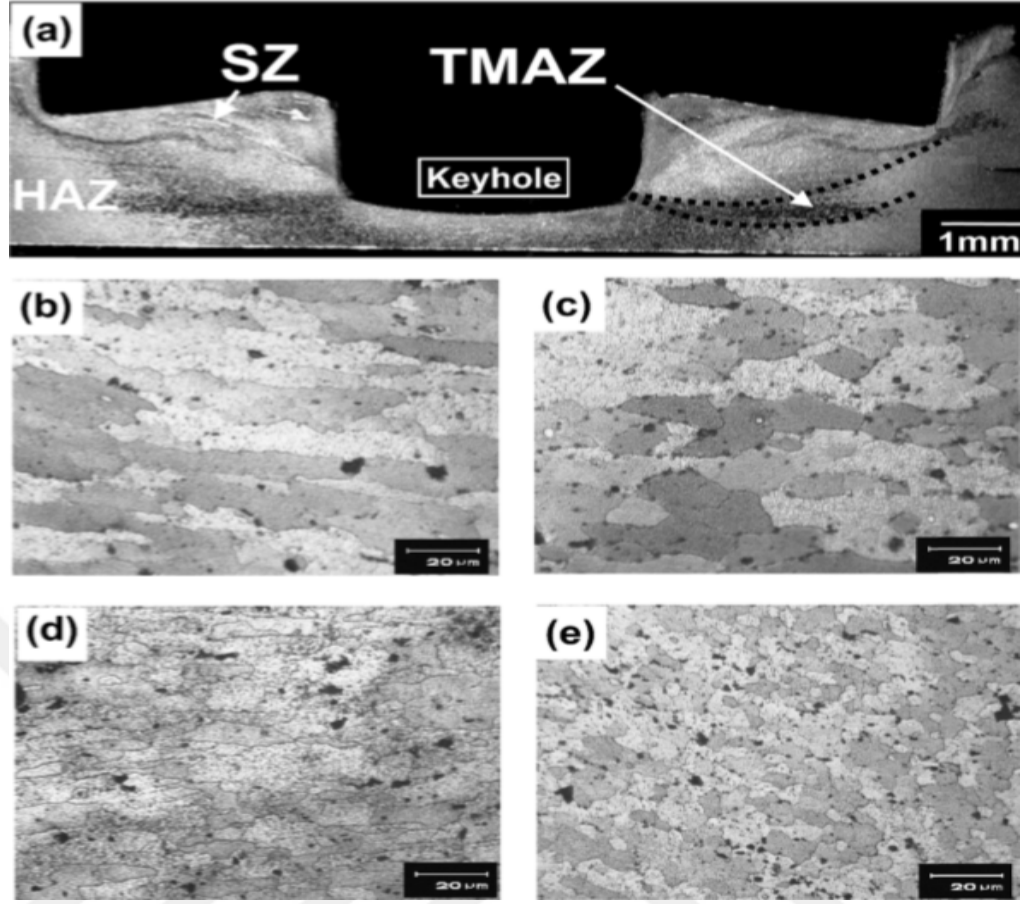


elektron mikroskobu (SEM) ile enerji dağınımlı x- ışınları görüngenölçeri (EDS), elektron geri saçılım kırınımı (EBD) ve geçirimli elektron mikroskopisi (TEM) kullanılarak çeşitli kaynak bölgelerinin mikroyapısal analizleri yapılabilmektedir. Bu cihazlar ile kaynak bölgesindeki taneler, tane sınırı, metallerearası ever oluşumu, metallerearası bileşikler kırılma oluşu biçimi incelenebilmektedir.

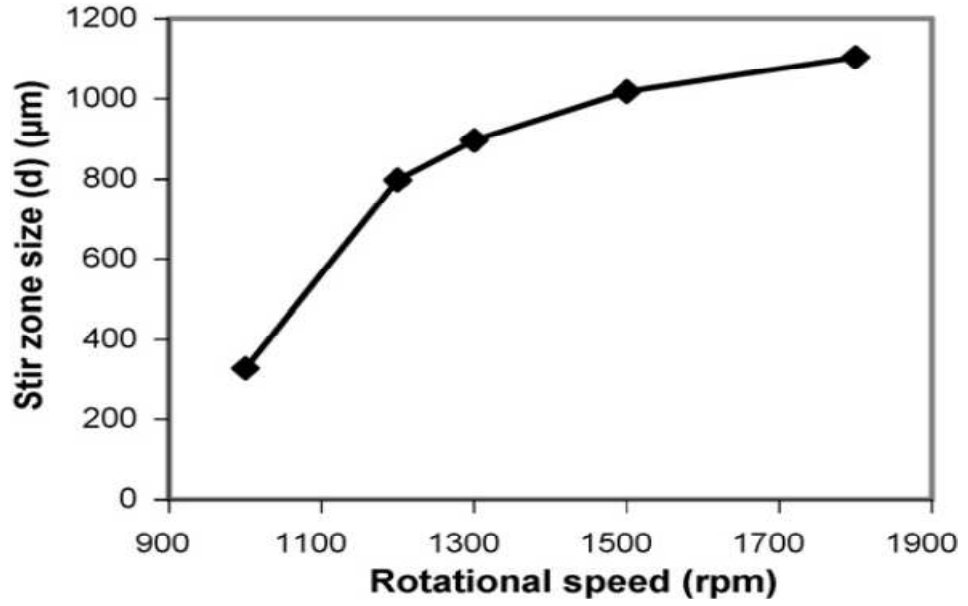
FSSW'li karıştırılmış bölgelerde inceltmiş ve eş eksenli taneler içermektedir. Dinamik yeniden kristalleşmeden dolayı bu bölge gerçekleştirilmektedir [106, 133, 134]. Aynı şekilde bu bölgede yoğun plastic şekil değıştirmesi ve sürtünmeli ısınması oluşturulmaktadır. Karıştırılmış bölgede yüksek sıcaklık kurulmasından dolayı büyük çökeltler kırılarak yeniden çökeltme ve ince taneli kaynak yapısı oluşturulmaktadır [106, 137]. Tablo 3.7'de tane büyüklüğü ile ana metal malzemeleri karşılaştırılmaktadır. Kurulmuş sürtünmeli ve şekil değıştirmeli ısıdan tane küçültme kolaylaştırılmaktadır [31]. Ayrıca şekil 3.12'de FSSW'li 2024-T3 alaşımının mikroyapısal bölgeleri gösterilmektedir.

Tablo 3.7. Karıştırılmış ortalama tane büyüklüğü

Ortalama tane büyüklüğü ( $\mu\text{m}$ )	Tane büyüklüğü				Esas metal	Ref
	900rpm	950rpm	1000rpm	***rpm		
6061-T6	2,9 $\mu\text{m}$	3,4 $\mu\text{m}$	3,8 $\mu\text{m}$	-	18 $\mu\text{m}$	[58]
1050	5,9 $\mu\text{m}$	5,8 $\mu\text{m}$	5,9 $\mu\text{m}$	-	0,3 $\mu\text{m}$	[58]
AA6061-T4	-	-	-	5 $\mu\text{m}$	35 $\mu\text{m}$	[137]
6061-T4	-	-	5,5 $\mu\text{m}$	17 $\mu\text{m}$		[106]
AA6061-T4	-	-	4 $\mu\text{m}$	35 $\mu\text{m}$		[137]



Şekil 3.12. FSSW'ın 2024-T3 mikroyapısal bölgeleri (a) Bağlantının makroyapısı; (b) BM; (c) HAZ; (d) TMAZ; (e) SZ [145]



Şekil 3.13. Takım dönme hızı ve karıştırılmış bölgedeki ilişkisi [143]

Şekil 3.13'te takım dönme hızı ve karıştırılmış bölgedeki ilişkisi gösterilmektedir. 2mm kalınlığındaki 6061-T4 alüminyum alaşımı üzerinde yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi kullanılarak bu Al'un kaynak bölgesinde ince yeniden kristalleşmiş taneler oluşturulmuştur [137]. Ancak M. Cabibbo ve arkadaşları'nın çalışmasında FSSW'li 2mm kalınlığındaki AA6082-T6 alaşımının kaynak bölgesinde ince taneli yapı oluşturmuş ve termo mekanik etkilenmiş bölgede kaba taneler gözlemlenmiştir [97]. Y. Tozaki ve arkadaşları tarafından sürtünme karıştırma kaynağı yapılmıştır ve kaynak bölgesinde 10 µm büyüklüğündeki ortalama taneleri gözlemlenmiştir [31]. Ayrıca M. Cabibbo ve arkadaşları alüminyumun sürtünme karıştırma nokta kaynağı mikroyapısını incelemiştirler. Onlara göre kaynak bölgesinin karıştırılma hareketi görününce tane büyüklüğü azaltılmış ve ana metalin tanelerinden termo mekanik olarak etkilenmiş bölgedeki taneler daha ince olmuştur [97]. Kaynak yapılırken oluşturulmuş ısıdan dolayı malzeme akışı ve kaynak performansı etkilenmekte ama bu ısı girişinin çok yüksek olması durumunda kaynak kalitesi negatif olarak etkilenmektedir [97]. Bu durumda ve yüksek sıcaklıkta çökeltme ve çökeltinin çözünmesi gerçekleştirilmektedir [137].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağında ısı girişi, takım dönme hızına ve kalma süresine bağlı olmaktadır. Daha yüksek takım dönme hızından dolayı daha çok malzeme karıştırması gerçekleştirilmekte ve ısı girişi arttırılmaktadır. Aynı anda mikroyapıda tane büyümesi ve ikinci faz tanelerinin oluşturulduğundan dolayı kaba mikroyapı elde edilmektedir. Bunun nedeniyle uygun dönme hızı ve kalma süresinin seçilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [110].

### **3.5. Mekanik Özellikleri**

Literatürdeki incelenmiş alüminyumun sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantılarının mekanik özellikleri, mikro sertlik ölçümü, çekme ya da kırılma yükü ve yorulma mukavemeti içermektedir. FSSW'li alüminyum alaşımlarının bağlantıları üzerinde detaylı literatür taraması yapılmıştır. Açık literatürdeki FSSW'li ısıl uygulanmayan alüminyum alaşımları ve ısıl işlem yapılabilen alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri incelenmiştir.

### 3.5.1. Mikro sertlik ölçümü

Genel olarak Vickers sertlik test cihazı kullanılarak sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların mikro sertliği incelenmektedir. Bu mikro sertlik ölçümü yapılmak için kaynak bölgeleri kapsamaktadır. Bütün kaynak bölgeleri örneğin esas metal, karıştırılmış bölge, ısıdan etkilenmiş bölge, ve termo mekanik olarak etkilenmiş bölge içermelidir. Tane büyüklüğü ve çökelti değiştirmesi tarafından alüminyum alaşımlarının kaynak bölgelerinin sertlik değerleri etkilenmektedir [106]. Hall-Petch ilişkisine göre sertlik değeri, tane büyüklüğüne bağlı olmaktadır. Çok yüksek sürtünmeli ısı devir ve şekil değiştirme enerjisinden dolayı tane kabalaştırılması ve çökelti oluşturulmakta ve ısıdan etkilenmiş bölgedeki ortalama sertlik değeri azalmaktadır [106].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken tane büyüklüğü ve çökeltilerin çözünmesi büyük biçimde kaynak sertliğini etkilenmektedir [106]. Takım dönme hızı arttırılınca bağlantının sertlik değerleri azalmaktadır [106].

Isıl işlem uygulanmayan alüminyum alaşımları için karıştırılmış bölgedeki sertlik değerlerinin arttırılması, ince tanenin büyüklüğüne bağlıdır [104]. Ancak AA5042-O alüminyum alaşımında bir farklılık gözlemlenmiştir. Bu alüminyum alaşımının ısıdan etkilenmiş bölgesindeki sertlik değeri azaltılmış ve bu bölgedeki çökelti sertleştirilmesi yetersizliğinden dolayı azaltılmış sertlik değeri ortaya çıkarmaktadır [104].

Zhikang Shen ve arkadaşlarına göre çökelti boyutu, tane büyüklüğü ve dağıtımı tarafından AA6061-T4 ısı işlem uygulanabilen alaşımının mekanik özellikleri mesela sertlik değeri etkilenmiştir. [106]. Ayrıca M. Cabibbo ve dostları tarafından kaynak bölgelerindeki sertlik profiline, çökelti dağıtımına ya da çökelti değiştirilmesine ve tane yapısına bağlı olmuştur [97, 133]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında mekanik ve ısı girişleri tarafından tane yapısı ve çökelti dağıtımı etkilenmiştir [133]. Karıştırılmış bölgede yüksek plastik deformasyon ve yüksek sıcaklıklar gerçekleştirilmekte ve bu bölgedeki mikroyapı, dinamik yeniden kristalleştirilme geçirmektedir. Bunun nedeniyle bu bölgedeki sertlik arttırılmaktadır. Ancak termo mekanik olarak etkilenmiş bölgede kaba taneler

oluşmaktadır [133]. Çünkü termo mekanik olarak etkilenmiş bölgede ısı girdisi artışından dolayı ortalama sertlik değeri etkilenmekte ve arttırılmaktadır [133].

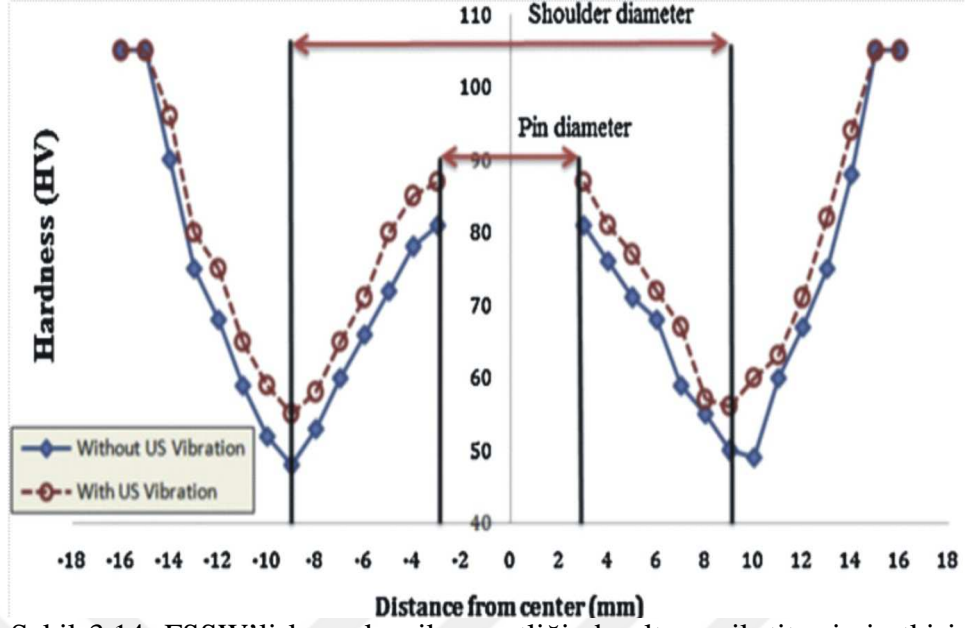
Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken oluşan sürtünme ısı, alaşımın sertlik değeri etkilemektedir. Zhaohua Zhang ve arkadaşları tarafından 5052-H112 alaşımının ısıdan etkilenmiş bölgesindeki sertlik asgari değer olmuştur ama termo mekanik olarak etkilenmiş ve karıştırılmış bölgelerindeki sertlik değerleri arttırılmıştır [110].

T. Rosendo ve arkadaşları 1,7mm kalınlığındaki AA6181-T4 alüminyum alaşımının mikroyapı ölçümünü incelemişlerdir. Kaynak yapıldığından sonra 3-5 günlük doğal yaşlandırma gerçekleştirilmiştir ve sonuçta sonuçlarında karıştırılmış bölgedeki sertlik değeri ve esas metalin arttırılmıştır [133].

Zhikang Shen ve arkadaşları tarafından yeniden doldurmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak 2mm kalınlığındaki 7075-T6 alüminyum alaşımının kaynağı yapılmıştır ve Vickers sertlik profili incelenmeden önce 40 günlük doğal yaşlandırma yapılmıştır. Isıdan etkilenmiş bölge ve termo mekanik olarak etkilenmiş bölge arasındaki sınırdan en az sertlik değeri gözlemlenmiştir, Ayrıca termo mekanik olarak etkilenmiş bölgeden karıştırılmış bölgeye kadar sertlik değeri arttırılmıştır. Kaynağın merkezindeki ve esas metalin sertlik değerleri yaklaşık eşit olmuştur [15].

Ultrason ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak 3mm kalınlığındaki 6061 alüminyum alaşımı kaynak edilmiştir. Karıştırılmış ve termo mekanik olarak etkilenmiş bölgelerdeki daha ileri tane küçültmesinden dolayı sertlik özellikleri iyileştirilmesine neden olmuştur. Ayrıca 6061 alüminyumunun sertliğinde takım dönme hızı en büyük etkisi olmuştur. Örneğin takım dönme hızı arttırılınca bölgelerin sıcaklığı arttırılmış ve elde edilmiş sertlik değerleri azaltılmıştır. Şekil 3.14'de kaynak bölgelerinin sertliğinde sesüstü titreşimi etkisi gösterilmiştir [138].

W. Yan ve arkadaşları 1,0mm kalınlığındaki 6016-T4 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağını ve mikro yapısını gerçekleştirmiştir. Onlara göre mikro sertlik dağıtımı ve ayrılma yerleri arasında hiç bir ilişki olmamıştır [101].



Şekil 3.14. FSSW'li kaynak mikro sertliğinde ultrasonik titreşimi etkisi [138]

Y.C. Chen ve arkadaşları 0,9mm kalınlığındaki AA6111-T4 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağını yapmış ve bağlantılarda boya kurutmalı termal işlemi bir kaynak sonrası uygulamıştır. Kaynak sonrası kaynak bölgesinin sertliği esas malzemeninden daha yüksek bulunmuştur. Kaynaklama ve yapay yaşlanma arasındaki zaman daha kısa olduğu için bu sertlik özellikleri gözlemlenmiştir [116].

### 3.5.2. Çekme mukavemeti ya da bağlantının kırılma yükü

Bağlantının kopma çekme mukavemetinin belirlenmesi için çekme kesme testi ya da çapraz çekme testi kullanılarak bağlantının çekme mukavemeti incelenmektedir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında alüminyum alaşımlarının güçlendirilmesi için kaynak bölgesinde tane büyüklüğü azaltılmasına ve yeniden çökmesine ihtiyaç duyulmaktadır [133]. Takım dönme hızı ve dalma derinliği, bindirme-kesme yüklerinde ya da ayrılma yüklerinde büyük biçimde etkilemektedir [101, 119]. Ayrıca alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti, kaynaklama parametrelerine ve kaynaktaki hataların mevcutuna bağlı olmaktadır. Örneğin çengel hatası olmayan bağlantıda 12kN çekme-kesme yükü elde edilmiş ama hatalı bağlantıda 6,9kN yükü gözlemlenmiştir [140].

Yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak kaynak dolgusunun kesit alanı ve çekme mukavemeti arttırılmaktadır. 2mm kalınlığındaki AA6061-T4 alüminyum alaşımının yeniden doldurulmalı FSSW işleminde yaklaşık 3kN yükü elde edilmiştir ve geneksel FSSW'ye göre daha yükselmiştir. Aslında geleneksel FSSW sonuçlarına göre 2mm kalınlığındaki 6061-T4 alaşımının yeniden doldurulmalı kaynağında yaklaşık %30 daha büyük çekme yükü gözlemlenmiştir [137].

Tobias Montag ve arkadaşları, 2,0mm kalınlığındaki 60682-T6 alüminyum alaşımının yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırma nokta kaynağında bindirme kesme mukavemetini incelemiştir. Sonuçta bu kaynak yöntemiyle daha yüksek bağlantı mukavemetleri elde edilmiştir (Tobias Montag et al. 2014).

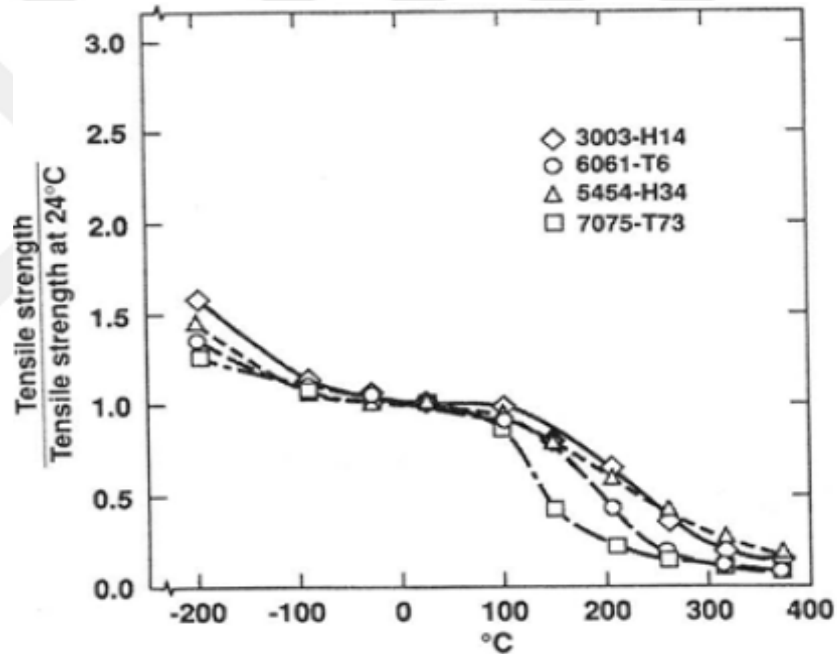
T. Rosendo ve arkadaşları tarafından 1,7mm kalınlığındaki AA6181-T4 alüminyum alaşımının mukavemeti incelenmiştir. Onlara göre değişen kaynaklanma parametrelerinden dolayı bağlantının çekme mukavemeti büyük şekilde değiştirilmiştir. Sabit 2,6s kalma süresinde ve değişen takım dönme hızı kullanılarak bağlantının mukavemeti azaltılmıştır. Ancak kısa zamanda ve daha az dönme hızı kullanılıncaya daha yüksek bağlantının mukavemeti elde edilmiştir [136].

Ayrıca S. Venkumar ve arkadaşları, 2mm kalınlığındaki AA6061-T6 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırılma nokta kaynağını gerçekleştirmiştir. 900rpm ve 800rpm parametreleri kullanıldığı zaman geneksel sürtünme karıştırılma nokta kaynağında 6972N bağlantı mukavemeti elde edilmiş ve yeniden doldurulmalı sürtünme karıştırılma nokta kaynağında 9520N bağlantı mukavemeti gözlemlenmiştir [13].

Bazı çalışmalarda, çekme yüklenmesi ardından bağlantıların kırılma modu incelenmiştir. Örneğin P.C. Lin ve arkadaşları, FSSW'li AA6111-T4 alaşımının kırılma modunu incelemiştir [107]. Ayrıca Z.M. Su ve arkadaşları, alclad 2024-T3 alaşımında çalışmıştır [109]. V.X. Tran ve arkadaşları, 5754-O ve 6111-T4 alaşımındaki kırılma yolunu belirlemiştir [105]. Y. Uematsu ve arkadaşları, 6061-T4 alaşımının kırılmasını gözlemiştir. Pim deliği ya da pim deliği olmayan kaynak dolgularından kesme kırılma modu gözlemlenmiştir [137].

Zhaohua Zhang ve arkadaşları, 1mm kalınlığındaki 5052-H112 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırılma nokta kaynağının mukavemetini incelemiştir. Bu alaşımda yürüyen FSSW ve geleneksel FSSW yöntemlerini kullanmıştır. 1541rpm ile 2256rpm dönme hızları kullanıldığında yürüyen FSSW olan bağlantılarda çekme kesme mukavemeti artırılmıştır. Ayrıca aynı bağlantıların çapraz çekme mukavemeti de artırılmıştır [110].

Zhikang Shen ve arkadaşları tarafından 2mm kalınlığındaki 7075-T6 alüminyum alaşımının yeniden doldurulmalı FSSW'li bağlantılarını incelemiştir. Onlara göre az dönme hızında ve az kalma süresinde istenen bağlantının mukavemeti elde edilmiştir. Ancak takımın kalma süresi azaltılınca bağlantının mukavemeti artırılmıştır [15].



Şekil 3.15. Çekme mukavemetinde sıcaklık etkisi [46]

Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırılma nokta kaynağı süresince sıcaklık artırılması, bağlantının kırılma yükünü azaltmaktadır [46]. Şekil 3.15'te 3003-H14, 6061-T6, 5454-H34 and 7075-T73 alaşımlarının FSSW'li bağlantılarındaki sıcaklık etkileri gösterilmektedir.

Chase D. Cox ve arkadaşları, 1mm kalınlığındaki 6061-T6 alüminyum alaşımının FSSW'li bağlantılarının enerji girişini incelemiştir. Pimsiz takım kullanılarak çekme mukavemeti ve enerji girişi arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu özellikler arasında



güçlü bir doğrusal ilişki mevcut olmuştur. Ayrıca bağlantılar üzerinde takım dönme hızı ve çekme kesme mukavemeti arasında güçlü bir ilişki gözlemlenmiştir [103].

Taslak takım için omuz daldırılma derinliği (0,5mm – 0,7mm) ve kalma süresi arttırılınca çekme kesme mukavemeti arttırılmıştır. Taslak takım kullanılarak malzeme akışı kolaylaştırılmıştır. Geneksel pimli takıma göre taslak takım daha yüksek bağlantının mukavemeti üretilmiştir [31]. Ancak üçgen biçimli pim kullanılarak 5083 alüminyum alaşımında daha uygun ve yüksek bağlantının mukavemeti elde edilmiştir. Aynı anda silindirik pimli takım gelen bağlantının özelliklerine göre üçgen biçimli pim olan bağlantılarda daha ince tane büyüklüğü ve mukavemeti elde edilmiştir [66].

### **3.5.3. Bağlantının yorulma mukavemeti**

Açık literatürdeki az yazılar alüminyumun sürtünme karıştırma nokta kaynağında dinamik ya da çevrim etkisini incelemiştir. P.C. Lin ve arkadaşları, 0,94mm kalınlığındaki AA6111-T4 alüminyum alaşımının FSSW yorulma özelliklerini incelemiştir. R = 0.2 yük oranı ve 10Hz test frekansı kullanılarak bağlantıların düşük çevrimli yorulması ve yüksek çevrimli yorulması belirlenmiştir. Yazılara göre düşük çevrimli yorulmadaki (103–104 yorulma ömrüsü) ve yüksek çevrimli yorulmadaki (104–105 yorulma ömrüsü) kırılma modları farklı olmuştur. Ancak altaki levhada dominant yorulma çatlakları gözlemlenmiştir [107].

Y. Uematsu ve arkadaşları, 2mm kalınlığındaki 6061-T4 alüminyum alaşımını yeniden doldurulmalı FSSW'li yorulma özelliklerini belirlemiştir. Ayrıca R=0.1 gerilim oranı ve 10Hz frekansı kullanılarak doldurulmuş bağlantılar ve pim deliği olan bağlantılar incelenmiştir. Yorulma çevrim yüklenmesi durumunda ve doldurulmuş bağlantılar üzerinde kaynak dolgusunun çekilmesi çatlakları, dominant çatlak olmuştur ama pim deliği olan bağlantılarda kaynak dolgusundan kesme kırılma modu gözlemlenmiştir. Fakat yüksek ve düşük çevrimli yüklenme durumlarında yeniden doldurulmuş bağlantılarda az yorulma mukavemetleri elde edilmiştir [137].

V.X. Tran ve arkadaşları, 5754-O ve 6111-T4 alüminyum alaşımlarının FSSW bağlantılarının yorulma özelliklerini incelemiştir. R = 0.2 yük oranı ve 10Hz frekansı kullanılarak yüksek ve düşük çevrimli yorulmalar gerçekleştirilmiştir. Düşük çevrim

yüklenmesinde 5754-O ve 6111-T4 alüminyum alaşımlarının bağlantıları aynı çatlama modu gözlemlenmiştir. Böylece bu durumda üstteki levha kalınlığından ve kaynak dolgusundan çatlakları olmuştur. Ancak yüksek çevrim yüklenmesinde ve iki alışımda üstteki ve alttaki levhaların kalınlığından çatlaklar gözlemlenmiştir [105].

S. Venukumar ve arkadaşları, 2mm kalınlığındaki AA6061-T6 alüminyum alaşımının bağlantılarının yorulma kırılması modlarını incelemiştir. Yeniden doldurulmalı FSSW ve geneksel FSSW bağlantılarında ve yüksek ve düşük çevrim yüklenmesi kullanılarak kesme kırılma modları elde edilmiştir [13].

Z.M. Su ve arkadaşları, 1,6mm kalınlığındaki Alclad 2024-T3 alüminyum alaşımının yürüyen FSSW bağlantılarının yorulma analizini incelemiştir. Ayrıca dinamik yüklenmedeki kırılma modları incelemiştir. Düşük çevrimli yüklenme durumunda çatlak ucundan zikzak şekilde üstteki levhaya girilmiştir. Fakat yüksek çevrimli yüklenme durumunda çatlak, bağlantının arayüzünden alttaki levhaya girilmiştir [109]. P.C. Lin ve arkadaşları, AA6111-T4 alaşımının FSSW bağlantısının yorulma çatlak büyümesi modelini kurulumuştur [108]. Aynı zamanda Z.M. Su ve arkadaşları [109], V.X. Tran ve arkadaşları [105], ve Y. Uematsu ve arkadaşları [137], alclad 2024-T3, 5754-O ile 6111-T4, ve 6061-T4 alaşımlarının FSSW bağlantılarının yorulma çatlak büyümesi modellerini oluşturmuşlardır.

Soran Hassanifard ve arkadaşları, 2mm kalınlığındaki 7075-T6 alüminyum alaşımının FSSW bağlantılarının yorulma ömrünü incelemiştir. Yorulma testi yapılmadan bağlantılarda soğuk genleşme işlemi uygulanmıştır. Onların sonucunda soğuk genleşme işlemi kullanılarak yorulma ömrünün artırılması elde edilmiştir. Ancak bu uygulanan işlem ile çatlak modunu değiştirmemiştir [30].

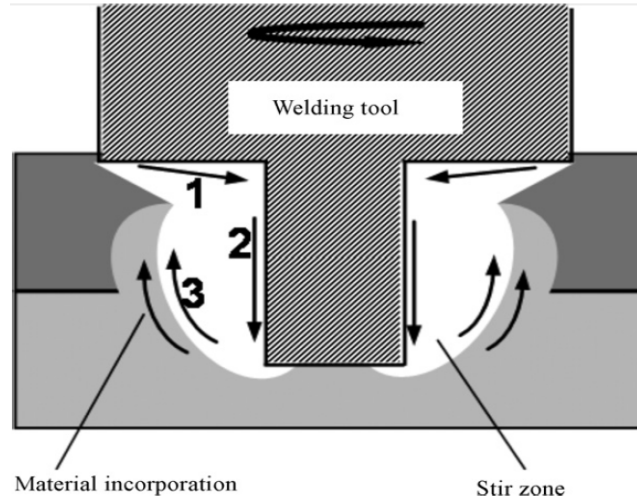
### **3.6. Malzeme Akışı**

Alüminyumun sürtünme karıştırma nokta kaynağındaki malzeme akışı bir kompleks işlemdir. Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulandığı zaman takım profili tarafından malzeme akışı ve karıştırılması büyük biçimde etkilenmektedir[134]. Ayrıca pimin kesit geometrisi ve yüzündeki özelliklerinden ısı oluşum oranı, eksenel kuvvetler ve malzeme akışı etkilenmektedir [123]. Malzeme karıştırma düzeyi, doğrusal olarak takım türüne ve seçilmiş kaynaklanma

parametrelerine bağılı olmaktadır. Özellikle kaynaklanma parametreleri örneğin takımın daldırılma derinliğı ve dönme hızı, malzeme akışını etkilemektedir [101, 123]. Shigeki Hirasawa ve arkadaşları, FSSW takımının geometrisi ile malzeme akışını, karıştırmasını ve bağlantının mukavemetini büyük şekilde etkilemiştir [91].

2010 yılında Y. Tozaki ve arkadaşları tarafından deneysel yaklaşım ile malzeme akışı incelenmiştir [31]. Malzeme karıştırmasının gözlemi yapılmak için üstteki levhada 1mm çabındaki ve 0,7mm derinliğindeki delik yapılmış ve üretilmiş deliğe 0,3 çabındaki bakır tozu koyunmuştur ya da doldurulmuştur. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken kaynak bölgesinde bakır tozları dağılmıştır. Böylece kaynak bölgesinin dağılmasından sonra malzeme akışı ya da karıştırma deseni/modeli belirlenmiştir [31].

Pimli takım kullanılarak bir pim deliğı kaynak bölgesinin merkezinde bırakılmaktadır. Kaynaklanacak malzemede takımın sürtünmeli işleminden dolayı malzeme yumuşaklaştırması haline gelmektedir. Bu yüzden yumuşaklaştırılmış malzeme, alt yüzeye ve yukarıya itelenmektedir. Üstteki levhanın aşağıya malzeme akışı olmakta ve alttaki levhanın yukarıya malzeme akışı olmaktadır. Böylece kaynaklanma yapılırken üstteki levhanın kalınlığı azaltılmaktadır [31, 123]. Şekil 3.16'da bir tipik pimli takım ile malzeme akışı gösterilmektedir [146].



Şekil 3.16. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında malzeme akışı [146]

#### 4. DENEY TASARIMI VE LİTERATÜR TARAMASI

İlk 1920 yıllarında İngiltere’de Sir R. A. Fisher tarafından deney tasarımı bir istatistiksel teknik olarak getirilmiştir. Tarım deneylerinde inceleme yapılmış ve en iyi olan etkin elde edilmiştir [147]. Zaman gittikçe deney tasarımı büyük biçimde geliştirilmiştir. Deneysel tasarımda önemli gelişmelerden birisi kurt tasarımıdır. Kurt deney tasarımı kullanılarak maliyet azaltılması, geliştirilmiş ürün performansı, artırılmış kar vb. elde edilmektedir. Endüstriyel deneylerin analizi ve optimizasyonu için deney tasarımı güçlü bir istatistiksel araçtır [148]. Literatür taramasında farklı kaynak yöntemlerinde çeşitli deney tasarımı teknikleri uygulanmıştır. Şimdi kaynak işlemlerinde merkezi birleşik tasarım (MBD), yanıt yüzey yöntemi (YYY), faktöryel dizayn ya da tam faktöryel dizayn, yapay sinir ağları (YSA), ve Taguchi yöntemi, bazı uygulanmış deneysel planlama ve analiz yöntemleridir [149]. Bütün bunlara rağmen çok proses parametreleri deneyi olsa tam faktöryel dizayn ve bir zamanda tek faktör deneylerinde büyük deney sayılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak kurt deney yönteminin kullanılması gerekmektedir [150].

Kurt deney yöntemlerinden bir tanesi Taguchi deney tasarımıdır. Proses parametreleri, performansı ve deney maliyeti eniyileştirilmek için Taguchi yöntemi bir basit, sistematik ve etkili bir metodolojidir [151-152]. 1950 ve 1960 yıllarında Japon endüstri kolları örneğin elektronik, otomotiv, fotoğrafçılık vb alanlarda Taguchi yöntemi tanıtılmıştır [150, 153]. Taguchi yöntemi kullanılarak klasik deney tasarımında problem giderilmektedir. Aslında Taguchi yönteminde bütün parametre uzayının incelenmesi için ve daha az deney sayısının uygulanması için dikey sıraların özel bir tasarımı kullanılmaktadır [154]. Ayrıca parametreler, üretim maliyeti ve süresi eniyileştirilmek için Taguchi deney tasarımı basit bir tekniktir [154].

Japon bilimadami, Dr. Genichi Taguchi tarafından Taguchi deney tasarımı kurulmuştur [153]. Taguchi yönteminin hedefi, düşük maliyetli ve yüksek kaliteli ürün elde edilmesidir. Bu yöntemde asgari deney sayısı kullanılmaktadır, Bu yüzden zaman tasarrufu ve kaynak tasarrufu örneğin sermaye ya da maliyet ve malzeme

tasarrufu sağlanmaktadır. Taguchi yönteminin değişken parametreler, proses yanıtların ortalaması ve varyansı nasıl etkilendiği incelenmektedir [155].

Araştırmacılar için Taguchi deney tasarımının seçilme sebepleri aşağıda listelenmektedir.

- Arttırılmış güvenilirlik elde edilebilmek;
- Daha düşük gelişim zamanı;
- Hem deney sayısı azaltılması ve hem de maliyet azaltılması;
- Sinyal-gürültü oranı kullanılarak proses farklılığı azaltılması;
- Taguchi yöntemi ile nominal durumdaki performans elde edilebilmesi

Taguchi deney tasarımı yönteminde en mantıklı, ekonomik ve istatistiksel yolda deneysel plan gerçekleştirilmektedir [156-158].

Arzu edilen ürün kalite tasarımının başarılması için Dr. Genichi Taguchi tarafından 3 aşamalı proses ya da deney yaklaşımı önerilmiştir. Bunlar system, parametre ve tolerans tasarımlarıdır. Sistem tasarımında kullanılacak proses ya da ürünün kavramsallaştırılması ve sentezi yapılmalıdır. Bu aşamada uygun bilimsel kavramlar, bilgi ve modern teknoloji kullanılarak iyi malzemelerin, parçaların, proseslerin ve deney faktörlerinin kombinasyonu belirlenmektedir. Parametre aşamasında uygun dizayn faktörü düzeyleri bulunmalıdır. Sistem değişkenler deneysel olarak analiz edilmektedir. Ayrıca Taguchi yaklaşımının hedeflerinden önemli bir tanesi parametre tasarımıdır. Ürünün üretim maliyeti ve ömür süresi maliyetinin minimuma indirilmesi için Tolerans dizayn kurulmaktadır [153, 159].

#### **4.1. Tek Yanıt Taguchi Analizi**

Taguchi deney tasarımı bir tek yanıt analitik yöntemdir. Çünkü bir zamanda sadece tek yanıt ya da amaç işlevi yapılabilmektedir. Bu yöntemde deney tasarımı yapılması için yüksek derecede kesri dikey sıralar ya da matris kullanılmaktadır. Ayrıca yanıt performansının istatistiksel olarak ölçülmesi için sinyal-gürültü oranı kullanılmaktadır. Taguchi yönteminin özgül araçları ya da kavramları aşağıda listelenmektedir [157].

- Kalite kayıp zarar fonksiyonu;
- Sinyal-gürültü oranı; ve

- Dikey sıralar

#### 4.1.1. Kalite kayıp fonksiyonu

Taguchi tarafından bir matematiksel formül önerilmiş ve ona kayıp fonksiyonu denilmiştir. Kalite yokluğundan gelen mali kayıp hesaplanması için kalite kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır [147]. Bir parça, hedef spesifikasyonundan değişiklik gösterirse kayıp vardır. Bir başka ifadeyle hedef değeri ve ürünün spesifikasyonu arasında farklılık varsa kalite kaybı elde edilmekte ve bu kayba kalite kayıp fonksiyonu denilmektedir. Taguchi'ye göre kalite kaybı bir ikinci dereceden denklem olarak tanımlanmıştır [147]. Denklem (4.1)'de Taguchi'nin matematiksel ifadesi ya da kalite kayıp fonksiyonu gösterilmektedir [160].

$$L = k(y - m)^2 \quad (4.1)$$

Bu denklemde L- kalite kayıp fonksiyonu, k- bir sabit (Taguchi'nin kayıp katsayısı ya da tolerans ve müşterinin oranı), y- ürünün gerçek büyüklüğü ya da ölçülen değeri, m- teorik hedef değeri ya da belirlenmiş ideal değeri demektir [160].

Müşterinin tolerans arası, Denklem (4.2) varsayılmaktadır [161]

$$(m - \Delta, m + \Delta) \quad (4.2)$$

Ayrıca müşteri tarafından ürünün tamir masrafına \$ işaret edilmektedir. Böylece Denklem (4.3)'te \$ ifadesi gösterilmektedir.

$$\$ = k\Delta^2 \quad (4.3)$$

Denklem (4.3) yeniden düzeltilerek Denklem (4.4) elde edilmektedir [161].

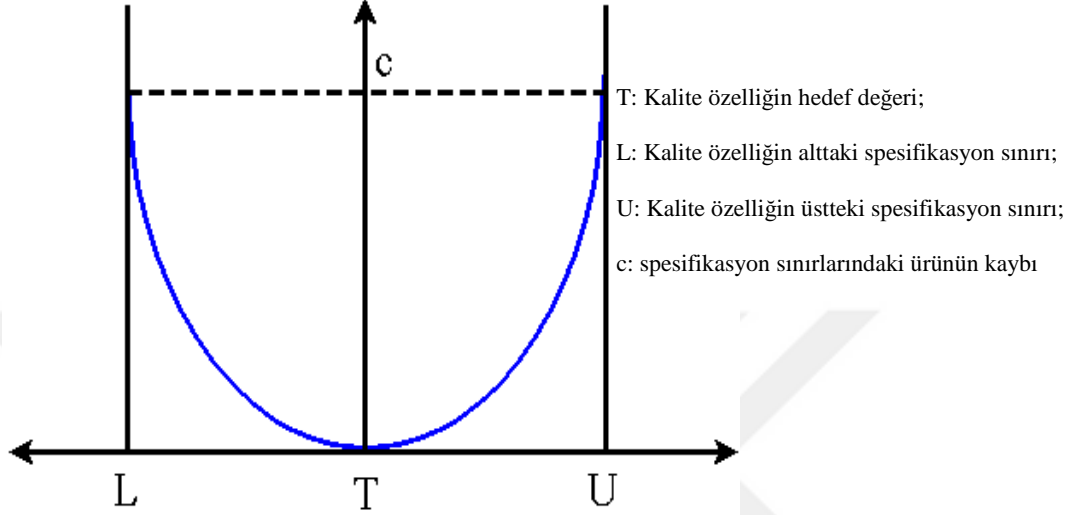
$$k = \frac{\$}{\Delta^2} \quad (4.4)$$

Katlı ürünlerin kayıp fonksiyonu Denklem (4.5) olarak ifade edilmektedir [160].

$$L = k[s^2 + (\bar{y} + m)^2] \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'te  $s^2$ - ürün büyüklüğünün varyansı, s - standart sapma ve  $\bar{y}$  - ürün büyüklüğünün ortalaması anlamına gelmektedir

Ancak hedef değeri ve spesifikasyon sınırı arasındaki kayıp, parabolik şekil gibi olmakta ve bu kayıp, hedef civarında simetrik olmaktadır. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu grafik olarak ifade edilmektedir. Şekil 4.1'de Taguchi'nin kayıp fonksiyonunun şekli gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Taguchi'nin kayıp fonksiyonu [162]

#### 4.1.2. Sinyal-gürültü (S/G) oranı

Sinyal-gürültü oranları, ikinci dereceden denklem kayıp fonksiyonundan türetilmekte ve desibel ölçeğinde ifade edilmektedir. ortalama kare sapmasının logaritmik transformasyonuna sinyal-gürültü oranı denilmektedir [147, 163]. Ayrıca sinyal-gürültü oranı, verinin büyüklüğü ile ilgili olarak standart sapma ölçüsüdür [152]. Sinyal, ürünün istenen değerini ya da ortalamasını temsil etmektedir. Ama gürültü, ürünün istenmez değerini temsil etmektedir [154, 164]. Gürültü faktörleri çevresel etkilerdir. Örneğın bağıl nem, sıcaklık ve diğeri hava koşulları kontrol edilmesi zordur. Bunlar kontrol edilemez faktörlerdir. Taguchi, sinyal-gürültü oranlarını kullanarak istenen değerden kalite özellikler ölçüsünü hesaplamaktadır [154]. Optimizasyon için Taguchi deney tasarımında 3 tane sinyal-gürültü oranı kullanılmaktadır [165-173]. Şunlar:

- i. Daha küçük - daha iyi S/G oranı

Amaç fonksiyonu ya da yanıtın küçültmesi için daha küçük-daha iyi S/G oranı kullanılmaktadır. Denklem (4.6)'de küçük-daha iyi S/G oranının matematiksel şekli ifade edilmektedir.

$$S/G = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (4.6)$$

Bu denklemde n satırdaki ölçülerin sayısıdır ve  $Y_i$  ölçülen değer ya da yanıttır.

ii. Daha büyük - daha iyi S/G oranı

Yanıtın maksimizasyonu için daha büyük-daha iyi S/G oranı kullanılmaktadır. Aynı anda matematiksel ifadesi Denklem (4.7)'de gösterilmektedir.

$$S/N = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (4.7)$$

iii. Nominal - daha iyi S/G oranı

Üretimde tanımlı değer arz edildiği zaman nominal-daha iyi S/G oranı kullanılmaktadır. matematiksel ifadesi Denklem (4.8)'de sağlanmaktadır.

$$S/N = 10 \log \left[ \frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right] \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'de  $\bar{Y}$  ölçülen yanıtın ortalamasıdır,  $S^2$  varyanstır ve S standart sapmadır.

Aynı ölçüde proses parametresinin optimal düzeyi kullanılarak S/G oranının kestirimi yapılabilmekte ve Denklem (4.9) ile yapılabilmektedir.

$$\hat{Y} = Y_m + \sum_{i=1}^o (\bar{Y}_i - Y_m) \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da  $Y_m$  toplam ortalama S/G oranıdır,  $\bar{Y}_i$  optimal düzeydeki S/G oranının ortalamasıdır, bu tasarlanmış parametrenin sayısıdır.

#### 4.1.3. Taguchi'nin dikey sıralar (DS)

Çoklu faktörler olan deney tasarımında dikey sıralar (DS) ya da matris kullanılmaktadır. Genel olarak deney yapılması için dikey sıralar bir plandır.



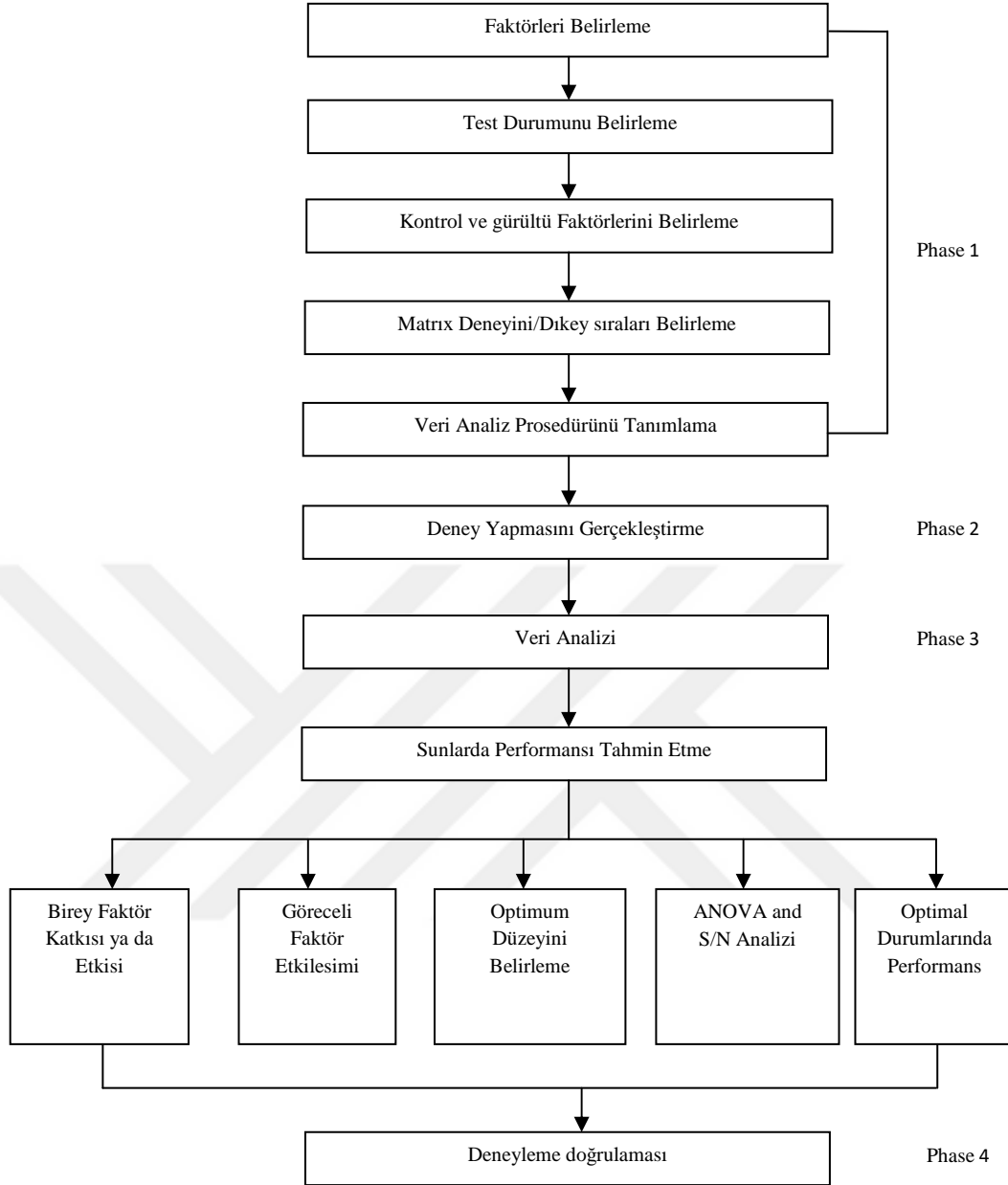
Taguchinin dikey sıraları, kesirli çok etkenli deney tasarımı türleridir. Ayrıca deneysel sayı elde edilmesi için Taguchi'nin dikey sıralarında faktör düzeylerinin kombinasyonu gösterilmektedir [175].

#### **4.2. Taguchi'nin Deney Tasarımındaki İlgili Adımlar**

Taguchi'nin deney tasarımındaki başlıca adımlar aşağıda özetlenmektedir.

- Problem tanımlama: Bu aşamada proses amacı ya da hedef değeri belirlenmeli ve araştırma amacı tanımlanmalıdır.
- Parametrelerinin belirlenmesi: Bu aşamada bütün ilgili proses parametreleri belirlenmelidir. Bu parametreleri iki sınıfa bölünmelidir. Onlar kontrol edilen ve kontrol edilemez proses parametreleridir.
- Deneysel tasarım: Parametre sayısına ve parametrelerin düzeyine göre dikey sırası seçilmektedir.
- Deneyleme: tasarlanmış dikey sıralara göre ihtiyaç duyulan deneyleme yapılacaktır
- Veri analizi: Gerçekleştirilmiş deneyin analizi yapılmakta ve yanıt özelliklerinde parametrenin etkileri belirlenmektedir.
- Sonucun doğrulanması: optimal düzeydeki faktörler kullanılarak elde edilen sonuçların doğrulanması gerçekleştirilmektedir.

Ayrıca detaylı Taguchi'nin deney tasarımı adımları şekil 4,2'de açıklanmaktadır. Bütün adımlar 4 başlıca alt aşamaya bölünmektedir. Birinci aşamada sistemin ya da prosesin anlayışı, kontrol edilen ve kontrol edilemez faktörlerin belirlenmesi ve deney için dikey sıraların belirlenmesi kaplanmaktadır. İkinci aşamada gerçek deney yapma içermektedir. Ancak üçüncü ve dördüncü aşamalarda veri analizi ve elde edilen doğrulanması yapılmaktadır.



Şekil 4.2. Taguchi'nin deney tasarımındaki ilgili adımların akım şeması [155]

### 4.3. Çoklu Yanıtlar Optimizasyon Analizi

Kaynak yapılırken kaynak giriş parametreleri tarafından bağlantının kalitesi doğrusal olarak etkilenmektedir [149]. Sonuç olarak kaynak proseslerinin optimizasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Kaynak prosesi, çoklu giriş-çoklu çıktı prosesi olarak göz önünde bulundurulmaktadır [149]. Ancak çoğu araştırmacıların analizinde sadece tek yanıt incelenmesi sınırlanmıştır. Optimal kaynaklanma durumu bulunmak için iki optimizasyon yaklaşımının birleştirmesinde iyi sonuçlar gözlemlenmektedir.

Taguchi deney tasarımının başlıca eksikliği, çoklu yanıt problemleri ya da prosesleri kullanılamamasıdır. Taguchi yönteminde sadece tek yanıt prosesinin optimizasyonu incelenebilmektedir. Çoklu yanıt prosesinin analizinin yapılması için iki ya da daha fazla deney tasarımı yaklaşımının birleştirilmesi gerekiyor.

Böylece çoklu yanıt Taguchi'ne dayanmış yönteminden prosesin karışık çoklu-yanıt özellikleri optimizasyonu iyice incelenebilmektedir. Bu yaklaşımda iki ya da daha fazla deney tasarımının yöntemleri birleştirilerek çoklu-yanıt problemlerinin analizi yapılmaktadır.

#### 4.3.1. Gri ilişkisel analiz (GİA)

Çoklu-yanıt prosesleri örneğin kaynak prosesinin optimizasyonu için Gri ilişkisel analiz tarafından ihtiyaç duyulan analitik prosedür sağlanmaktadır. Gri ilişkisel analizindeki başlıca prosedürler, Gri ilişkisel nesil ya da normalleştirme, Gri ilişkisel katsayısının hesaplanması ve Gri ilişkisel sınıfın Kestirimidir [152, 176-178].

Gri ilişkisel analizinde birinci adım deneysel verilerin normalleştirmesidir ve normalleştirilmiş veriler 0 ve 1 arasında olmalıdır. Verinin normalleştirilmesi için aşağıda durumlar kullanılmaktadır ya da Denklemler (4.10), (4.11) ve (4.12) kullanılmaktadır [152, 169-184].

i. Daha yüksek hedef değeri-daha iyi (daha büyük-daha iyi)

$$x_i(k) = \frac{x_i^{(q)}(k) - \min x_i^{(q)}(k)}{\max x_i^{(q)}(k) - \min x_i^{(q)}(k)} \quad (4.10)$$

ii. Daha küçük hedef değeri-daha iyi (daha küçük-daha iyi)

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^{(q)}(k) - x_i^{(q)}(k)}{\max x_i^{(q)}(k) - \min x_i^{(q)}(k)} \quad (4.11)$$

iii. Hedef değeri belirli bir değer olsa hedef değeri TV olarak ayarlanmalı (nominal-daha iyi)

$$x_i(k) = 1 - \frac{x_i^{(q)}(k) - TV}{\max\{\max x_i^{(q)}(k) - TV; TV - \min x_i^{(q)}(k)\}} \quad (4.12)$$

Bu denklemlerde  $x_i^{(q)}(k)$ , kalite özelliğinin ölçülmüş değeridir,  $\max x_i^{(q)}(k)$  kalite özelliğinin en yüksek değeridir,  $\min x_i^{(q)}(k)$  kalite özelliğinin en küçük değeridir ve TV hedef değeridir.

Deneysel verileri normalleştirildikten sonra kalite özelliklerinin Gri ilişkisel katsayısı hesaplanacaktır. Bir Gri ilişkisel sınıf, Gri ilişkisel katsayılarının ağırlıklı toplamıdır. Gri ilişkisel katsayısı belirlenmek için aşağıdaki ifadenin (Denkem (4.13)) yoluyla hesaplanabilir [152, 169, 179-188]:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \Psi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \Psi \Delta_{\max}} \quad (4.13)$$

$$\Delta_{oi} = \|x_o(k) - x_i(k)\| \quad (4.14)$$

Denklemler (4.13) ve (4.14)'te  $\Psi$  kimlik katsayısıdır (genellikle, 0 ve 1 arasında yer alan). Bu açıklanmada  $0 \leq \Psi \leq 1$  ima edilmektedir. En çok çalışma setlerinde  $\Psi$  değeri 0.5'a eşit olmaktadır.

$x_o(k)$  ve  $x_i(k)$  setlerin normalleştirilmiş değerleridir ( $x_o(k)$  en yüksek normalleştirilmiş değer temsil edilmektedir ve  $x_i(k)$ ,  $i = 0$  ile  $i = n$  arasındaki normalleştirilmiş değerler kümesini temsil edilmektedir)

$\Delta_{oi}(k)$  farkı sekansıdır ve  $x_o(k)$  ile  $x_i(k)$  arasındaki farkın mutlak değeri olarak tanımlanmaktadır.

$\Delta_{\min}$  fark sırasındaki en az bir değerdir ve  $\Delta_{\max}$  fark sırasındaki en büyük bir değerdir.

Gri ilişkisel katsayısı hesaplandıktan sonra Gri ilişkisel sınıf tahmini elde edilmektedir. Gri ilişkisel katsayısının ortalaması ya da ağırlıklı tahmi kullanılarak Gri ilişkisel sınıf elde edilebilmektedir [169, 182, 185, 189].

Gri ilişkisel katsayısı ortalamasını alarak tahmin tekniği için Denklem (4.15) kullanılmalıdır.

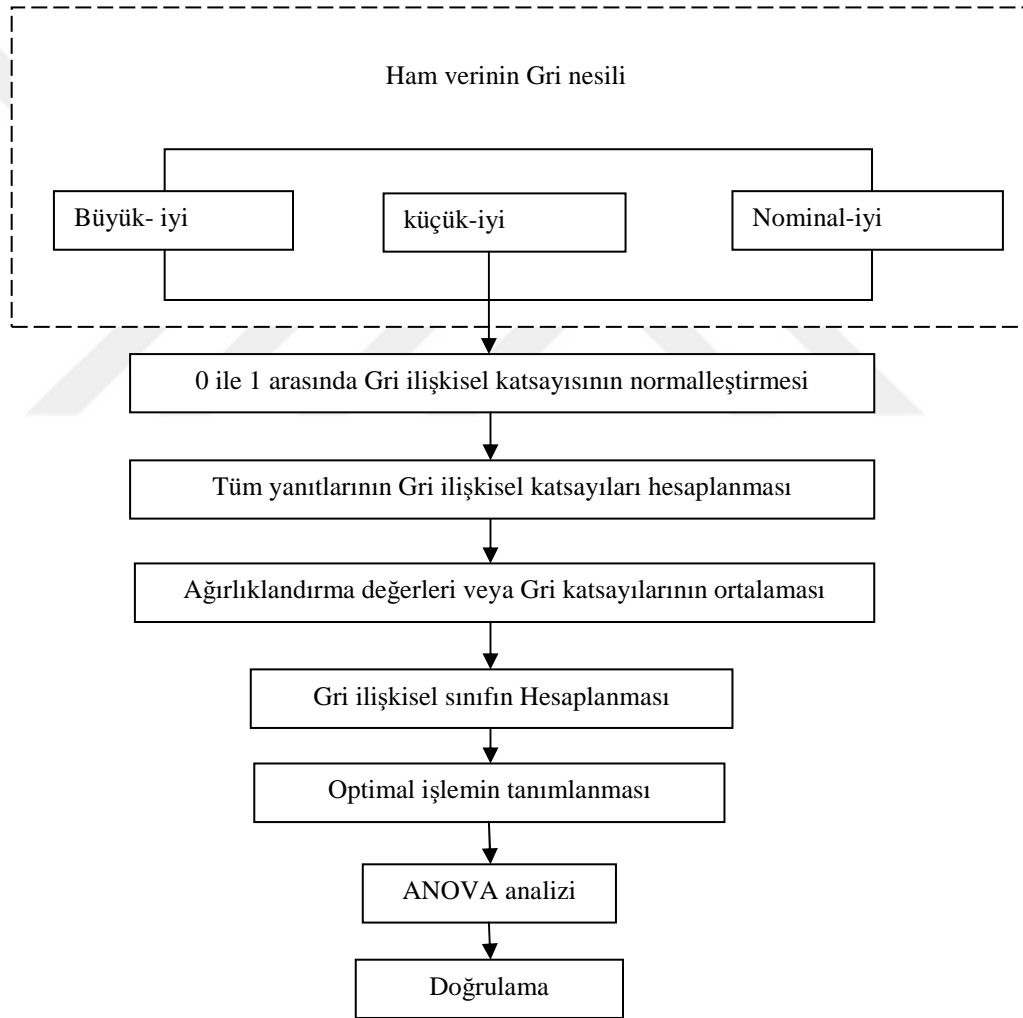
$$Y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(k) \quad (4.15)$$

ağırlıklandırma değerlerinin uygulaması üzerinden Gri ilişkisel sınıf tahmin tekniği için Denklem (4.16) kullanılmalıdır.

$$Y_i = \sum_{k=1}^n w_k \cdot \xi_i(k) \quad (4.16)$$

Denklem (4.16)'da  $w_k$ , k faktörü normalleştirilmiş ağırlık değeridir.  $\xi_i(k)$  Gri ilişkisel katsayısıdır.

Kısaca şekil 4.3'te akış şeması ya da Gri ilişkisel analizi yürütmek amacıyla takip edilmesi gereken temel süreçleri gösterilmektedir.

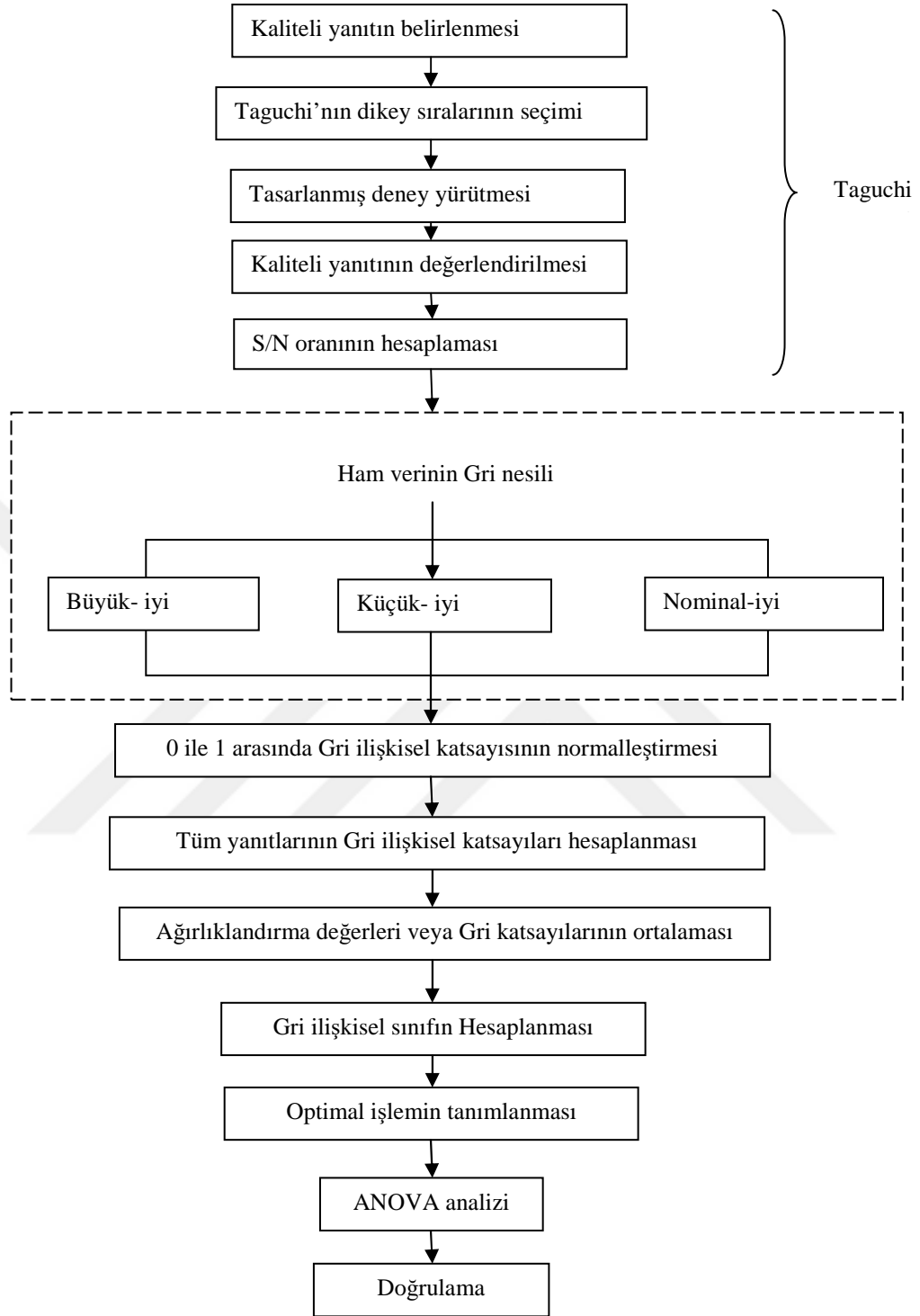


Şekil 4.3. Gri ilişkisel analizin akış şeması

#### 4.3.2. Taguchi yöntemi-gri ilişkisel analiz

Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analiz, çok tepki sorunu veya süreci optimizasyonunda Taguchi yöntemi ve Gri ilişkisel analizi birleştirmektedir. Taguchi deney tasarımı, tasarım deneyinde ve yanıtların gerekli sinyal-gürültü oranının tahmininde uygulanmaktadır. Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analitik yaklaşımında genel Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması için tek bir eşdeğer amaç fonksiyonlu optimizasyon problemi haline çok tepki süreç optimizasyonu problemi dönüştürülmektedir [152].

Hesaplanmış Gri ilişkisel sınıf, çok tepki sürecinin genel performans özelliğini büyük ölçüde etkilemektedir [152]. Bu nedenle, Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması için gerekli olan gerçek ağırlık değerlerinin tahmini son derece önemlidir. Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analizinde Gri ilişkisel sınıf elde edilmek için gerekli ağırlık değerleri subjektiftir. Çünkü genellikle deneyime dayalı kabul kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analizindeki bir gelişme, Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analizi-temel bileşen analizi beraberinde getirilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 4.4'te Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analiz uygulamak için akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analizin akış şeması

### **4.3.3. Taguchi parametrik tasarımı, gri ilişkisel analiz ve temel bileşen analizinin melez tümleştirmesi**

Bu melez tümleştirme, çoklu tepkiler ya da yanıtların optimize edilmesi için üç deneysel tasarım yaklaşımı bir araya getirilmektedir. Taguchi yöntemi, Gri ilişkisel analiz ve temel bileşenler analizinin melez tümleştirilmesi etkin bir şekilde çok tepki sorunu optimize edilebilmektedir. Çünkü temel bileşenler analizi nedeniyle gereken gerçek ağırlık değerleri elde edilmekte ve ihtiyaç duyulan Gri ilişkisel sınıf hesaplanabilmektedir. Ancak Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analiz yaklaşımında gereken ağırlık değerleri farzedilmektedir. Böylece ortaya çıkan optimizasyon sonucu üzerinde büyük biçimde etkilenmektedir.

Ayrıca Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analiz yaklaşımı kullanılarak çoklu yanıt problemlerinde yanıtların ağırlık değerleri belirlenmesi için mühendislik hükmü veya öznel kararlar uygulanmaktadır. Bu kaliteli yanıtların ağırlıklı değerleri tahmin edilmesinin geleneksel yaklaşımı, tecrübeye ve deneme-yanılmaya bağlıdır. Bu nedenle, karar verme sürecine belirsizlik artırılması getirilmektedir. Ayrıca, ağırlık değerleri veya yanıtların katkı değerleri büyük ölçüde Gri ilişkisel sınıf sonucunu etkilemeye ve bu da sonuçta meydana gelen optimizasyon sonuçlarını etkileyecektir. Ancak, temel bileşen analiz kullanılarak kalite yanıtları için gerçek ilgili ağırlıklandırma değerleri belirlenbilmektedir. Böylece, öznellik ve sonucun belirsizliği ortadan kaldırılmaktadır [189].

#### **4.3.3.1. Temel bileşenler analizinin (TBA) bakışı**

Temel bileşenler analizi güçlü bir istatistiksel değişkenli analitik bir araçtır. 1901 yılında Pearson tarafından temel bileşen analizi ilk olarak tanıtılmıştır ve 1933 yılında Hotelling tarafından bağımsız olarak geliştirilmiştir. Bilgilerden herhangi önemli bir kayıp olmadan veri boyutları (veya bir veri kümesinin boyutluluğu) sayısını azaltarak veri analizi temel bileşenler analizi bir araçtır [190]. Veri seti arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları vurgulamak için temel bileşenler analizi kullanılarak yüksek boyutlu bir veri kümesi desen bulunmaktadır [191]. Böylece, temel bileşenler analizi, kalite yanıtlarının verilen bir grubu arasındaki varyans-kovaryansı incelemektedir. Bunun bir sonucu olarak temel bileşenler analizi ile en iyi şekilde ağırlıklı görülen değişkenlerin lineer kombinasyonu sağlamaktadır. Çünkü



tepkilerinin her birinin katkısı kolayca değerlendirilebilir [192]. Böylece, Gri ilişkisel sınıfı tahmin etmek için gerekli olan ağırlık değerleri, aşağıdaki adımları ile elde edilebilir:

Gözlenen yanıtların veri matrisi (çoklu-tepki dizisi): Veri azaltmasını başlamak için gözlemlenen tepkilerin bir matrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, gözlemlenen tepkilerin Gri ilişkisel katsayısı gerekmektedir ve bununla birlikte veri matrisi formüleştirilmektedir. Veri matrisi  $Y_i(k)$ , Denklemi (4.17) olarak ifade edilmektedir. Denklem (4.17)'de  $i$ , 1'den  $m$ 'a kadar değişir ayarlanmaktadır ve  $k$  ise, 1 ile  $n$  arasında değişir tanımlanmaktadır.

$$Y_i = \begin{bmatrix} Y_1(1) & Y_1(2) & Y_1(3) & \dots & \dots & \dots & Y_1(n) \\ Y_2(1) & Y_2(2) & Y_2(3) & \dots & \dots & \dots & Y_2(n) \\ Y_3(1) & Y_3(2) & Y_3(3) & \dots & \dots & \dots & Y_3(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_m(1) & Y_m(2) & Y_m(3) & \dots & \dots & \dots & Y_m(n) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Ayrıca  $Y_i$  yanıtlar ya da tepkilerdir,  $n$  sütun sayısı veya yanıtlar sayısıdır, ve  $m$  satır sayısı ya da deneylerin sayısıdır. Sonuç olarak melez tümeleştirme yaklaşımında  $Y$  gözlenen tepkilerin Gri ilişkisel katsayılarıdır.

Korelasyon matrisi: Nik Mizamzul Mehat ve diğ. [189] ve Chin-Ping Fung ve diğ. [166] göre Denklem (4.18)'de gösterildiği gibi korelasyon matrisi tanımlanmaktadır

$$R_{kl} = \left[ \frac{\text{Cov}(Y_i(k), Y_i(l))}{\sigma_{Y_i(k)} \times \sigma_{Y_i(l)}} \right] \quad (4.18)$$

$k$  ve  $l$ , 1 ile  $n$  arasında değişmektedir. Ayrıca,  $Y_i(k)$  ve  $Y_i(l)$  dizilerin kovaryansı,  $\text{Cov}(Y_i(k), Y_i(l))$  gibi tanımlanmıştır ama  $Y_i(k)$  ve  $Y_i(l)$  dizilerinin standart sapması,  $\sigma_{Y_i(k)}$  ve  $\sigma_{Y_i(l)}$  gibi tanımlanmıştır.

Özdeğer ve özvektörler değerlendirilmesi: Denklem (4.19)'de özdeğer, özvektör ve korelasyon matrisi arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu matematiksel ifade ile, bilinmeyen, özdeğer ve özvektörler değerleri hesaplanmaktadır.

$$[R - \lambda I]V = 0 \quad (4.19)$$

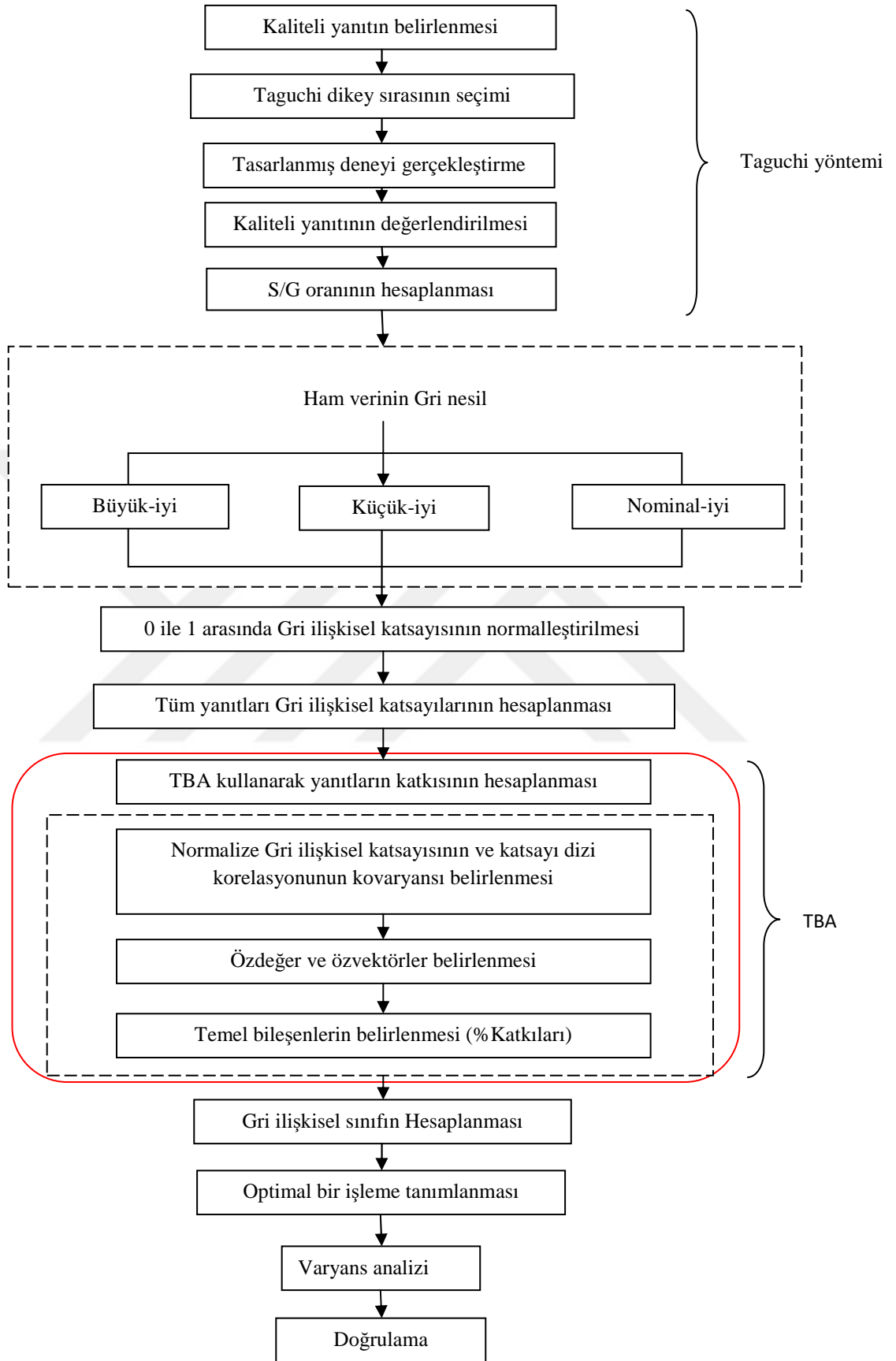
Denklem (4.19)'de  $\lambda$  özdeğerdir,  $I$  bir kimlik matrisidir,  $V$  özvektördür ve  $R$  korelasyon matrisidir.

Temel bileşenler (Her bir tepki katkısı): Denklem (4.20) kullanılarak temel bileşenler belirlenmektedir [166, 189].

$$P_{mi} = \sum_{i=1}^n Y_m(i) \times V \quad (4.20)$$

Denklem (4.20)'da  $P_{mi}$  temel bileşenlerdir ( $P_{m1}$ ,  $P_{m2}$  ve  $P_{m3}$ , birinci, ikinci ve üçüncü temel bileşenlerdir). Temelde, ilk temel bileşen verilerinde çoğu varyans hesaplanmaktadır [166].





Şekil 4.5. Taguchi yöntemi, Gri ilişkisel analiz ve temel bileşenler analizinin melez tümleştirmesi akış şeması

#### 4.4. Model Geliştirme

İki ögeli bir deneyde (A ve B), karşılık gelen model Denklemin (4.21)'i gösterilebilir [150]

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.21)$$

i faktör A seviyelerinin sayısıdır, j faktör B seviyelerinin sayısıdır, k kopyalarının sayısıdır,  $\mu$  genel ortalamadır,  $A_i$  faktör A'in i-inci işlemi etkisi,  $B_j$  faktör B'in j-inci işlemi etkisi,  $AB_{ij}$  faktörler arasındaki ij-inci AB etkileşiminin etkisidir ve  $\varepsilon_{ijk}$  rastgele hata bileşenidir.

#### 4.5. Literatürdeki Alüminyumun Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Optimizasyonu

Merkezi karma tasarımı (MKT) ve yanıt yüzey yöntemini (YYY) kullanarak Elatharasan ve arkadaşları, AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı modellemesini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Alaşımlarının üst çekme dayanımı, akma dayanımı ve şekil değiştirmesi incelenmiş ve optimize edilmiştir [193]. Aynı şekilde, Taguchi parametre tasarım yaklaşımını kullanarak A. K. Lakshminarayanan ve diğ., RDE-40 alüminyum alaşımının çekme mukavemetini optimize etmiştir. Onlara göre kaynak bağlantısının çekme mukavemeti üzerinde takım dönme hızı, travers hızı ve ugulanan aksel kuvvet, %41, %33 ve %21 katkılarına sahip olmuştur [165]. Ayrıca, Merkezi karma tasarımı (MKT) ve benzetilmiş tavlama algoritmasını (BTA) kullanarak G. Rambabu ve diğ. 2219 alaşımının sürtünme karıştırma kaynaklı bağlantılarını optimize etmiştir [194]. Faiz F. Mustafa ve diğ., AA6061-T6 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında takım geometrisi optimizasyonunu gerçekleştirmiştir [195]. Benzer şekilde I. Dinaharan ve diğ. tarafından deneyi planlamak için merkezi kompozit dönebilen tasarımı (MKDT) kullanılmıştır ve AA6061/ZeB2 In-situ kompozitin sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirilmiştir. Ancak genelleştirilmiş azaltılmış gradyan yöntemi (GAGY) ile bağlantının üst çekme mukavemeti optimize edilmiştir [196]

Eşit olarak, C.Elanchezian ve onun arkadaşları tarafından Taguchi yöntemi kullanılarak AA8011-AA6062 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı optimal

durumu incelenmiştir. Bu çalışmada iki yanıt (çekme mukavemeti ve çarpma dayanımı) seçilip analiz edilmiştir. Taguchi yönteminin tek bir tepki optimizasyon yeteneği nedeniyle uygun çekme mukavemeti oluşturulan parametre kombinasyonu ve uygun darbe mukavemeti üretilen parametre kombinasyonu farklı olmuştur. Örneğin 1400dev/dak dönme hızı, 75mm/dak kaynak hızı ve 7kN eksenel kuvveti kullanıldığında optimum çekme dayanımı elde edilmiştir. Fakat 1200dev/dak dönme hızı, 100mm/dak kaynak hızı ve 5kN eksenel kuvveti kullanıldığı zaman optimum çarpma dayanımı oluşturulmuştur [197]. Böylece tek bir zamanda Taguchi yöntemi kullanılarak hem yüksek çekme mukavemeti olan ve hem de yüksek çarpma dayanımı olan bağlantılar elde edilemezdir. Sonuç olarak kaliteli yanıtların birleştirilmesi için çoklu yanıt optimizasyonu yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürdeki mevcut olan çoklu yanıt optimizasyonu yöntemleri, Gri ilişkisel analize ya da Gri ilişkisel analiz ve diğer tasarım yaklaşımlarına dayalıdır. Örneğin R. K. Kesharwani ve diğ. tarafından AA5052-H32 and AA5754-H22 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında Taguchi Gri'ye dayalı yaklaşımı kullanılmış ve alaşımların ihtiyaç duyulan yanıtları optimize edilmiştir [198]. Ayrıca K. Palani ve diğ., AA8011 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonunu gerçekleştirmiş ama yanıt yüzey yöntemi ve Gri ilişkisel analizin birleştirmesini kullanmıştır [185]. Aynı şekilde Sanjay Kumar ve diğ., 6061 ve 6082 alaşımlarının bağlantılarında Taguchi-Gri ilişkisel analizine dayalı yaklaşımını kullanarak proses parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonunu yapmıştır. Çalışmada Gri ilişki sınıflarının formülasyonu için ağırlıklandırma değerleri veya faktörleri, mühendislik kararına dayanmaktadır. Çekme mukavemetinin ağırlıklandırma değeri 0,70 ve şekil değiştirmesi 0,30 seçilmiştir [186].

Böylece, literatürdeki mevcut olan alüminyum alaşımlarının FSSW kaynaklı çoklu yanıt optimizasyonu için Taguchi'ye dayalı Gri ilişkisel analiz kullanılmıştır. Ancak bir sistemin çoklu yanıt analizi için Taguchi'ye dayalı Gri ilişkisel analizin kullanılması, öznelidir ya da mühendislik kararına dayanmaktadır. Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması için ağırlıklandırma değerleri genellikle farzedilmektedir. Böylece, bu öznelin giderilmesi için temel bileşenler analizi ve Taguchi'ye dayalı Gri ilişkisel analizin tümleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, sürtünme karıştırma

nokta kaynağı gibi çok girişli, çok tepki s¼reçleri için çoklu tepki optimizasyon yaklaşımı olarak melez Taguchi metodu-Gri ilişkisel analizi-temel bileşenler analizi kullanılması ihtiyaç duyulmaktadır.



## 5. AMAÇ VE ÇALIŞMA PLANI

Hafif metallerin dizileri arasında alüminyum alaşımları modern ulaşım sektörlerinde örneğin uzay ve havacılık, yüksek hızlı tren imalatı, gemi yapımı ve otomotiv endüstrilerinde üretim için çok yönlü yapısal metaller biri olarak gelişmiştir. Yukarıda adı geçen sanayide yüksek yorulma ve çekme mukavemetleri için yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, özellikle aranmaktadır. Dövme alüminyum alaşımlarının serileri arasında 2xxx ve 7xxx serisi, yüksek mukavemetli alaşımlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlardan birisi AA2219 alaşımıdır ve bu araştırma için AA2219 alaşımı seçilmiştir. AA2219 alaşımı tipik bir havacılık alaşımıdır ile yüksek tokluk ve kırılma dayanımı, ve mükemmel kriyojenik özelliklerine sahiptir.

Modern süpersonik uçaklarda iyi kırılma dayanımı, iyi sürünme mukavemeti, yüksek gerilme dayanım sınırı, makul korozyon direnci, yüksek çekme özellikleri (Yüksek mukavemet ve esneklik), yüksek donma noktası ve yüksek tolerans için uzay Al-Cu alaşımları örneğin AA2219 alaşımı gibi vazgeçilmez bir alaşım olarak yapılmıştır [20, 22, 33, 43, 199-203]. AA2219 alaşımı, fonksiyonel uzay güçlendiriciler, yakıt tankı, roket kabukları, süpersonik uçak gövdesi, uydu fırlatma araçlarının sıvı yakıt tankları ve uçaklar ve uzayların diğer yapısal bileşenleri üretimlerinde kullanılabilir [3, 23, 25, 199, 202-206].

Havacılık uygulamalarından başka 2219 alaşımı için askeri araçların imalatı bileşenlerinde, ev aletlerinde mesela buzdolabı ve mikrodalga fırın gibi, ve iç dekorasyonda mesela asansörler ve dolapları gibi son derece yararlı bir alaşımdır [205]. Diğer yapısal bileşenler örneğin motor muhafazaları, kamyon tekerleği ve vida elemanları gibi 2219 alüminyum alaşımından üretilme yeteneğine sahip olmaktadır [25, 202, 207]. Ek olarak 200 ile -200 ° C aralığındaki çok düşük sıcaklıklarda iyi mukavemet muhafaza ettiği için 2219 alaşımının kriyojenik uygulamaları son derece uygundur [3, 34, 200, 202, 208, 209] or -250°C [33]. Böylece AA2219 alaşımının (çökelme sertleşmeli yaşlandırılabilir alaşımı) günümüzde ve gelecekteki ihtiyaçları son derece geniştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada AA2219 alaşımının kaynaklanabilirlik incelemesi amaçlanmaktadır. Bu araştırmanın çalışma planı aşağıdakileri içermektedir.

- Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için deney planı ve tasarımında Taguchi deney tasarımını uygulamak. Zamandan tasarruf etme, malzeme maliyetinin kurtarılması, deney sayısı azaltılması için Taguchi yöntemi gereklidir;
- Haddelenmiş 1.6mm kalınlığında AA2219-O alüminyum alaşımı saçların sürtünme karıştırma nokta kaynağını araştırmak. Bağlantıların mekanik özellikleri örneğin yorulma davranışı, bindirme çekme-makaslama dayanımı ve sertlik ölçümleri incelenecektir. Kaynak bölgelerinin metalografik veya mikroyapı özellikleri incelenecektir;
- Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların kırılma yüzey morfolojisi incelenecektir. Kırılma modları veya deseni ve mekanik özellikleri (yorulma dayanımı, çekme-makaslama yükü ve mikrosertlik değeri) arasındaki ilişkisi değerlendirmeye alınacaktır;
- Kaynak yöntemleri ve işlem parametrelerinin her biri ile ilişkili kaynak hataları (makro ve mikro-yapı hataları) değerlendirilecektir. Kaynak işlemlerinin her birinden sonra, çıplak gözle ve mikroskop da yardımıyla bağlantıların görsel değerlendirmesi yapılacaktır;
- Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken takım profilinin işleme parametrelerin değişimleri altında çapak özellikleri ve yumuşatılmış malzemenin içe nüfuz hacmi deneysel ve metodolojik olarak incelenecektir;
- Tek yanıt ve melez çok tepki optimizasyon yaklaşımları kullanılarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı süreci optimize edilecektir; ve
- Kaynak işlemleri deneysel olarak karşılaştırılacaktır. Pimsiz ve pim destekli kaynak prosesleri arasında farklılıkların bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tipik uzay alüminyum alaşımının kaynakl edilmesinde mevcut olan yeni kaynak teknolojilerinden birisi kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) işlemi ile 1.6mm kalınlığında Alclad AA2219-O alaşımı saçları kaynaklanmıştır. Kaynak nitelikleri üzerinde örneğin çekme-makaslama yükü, yorulma mukavemeti, çapak, makro- ve mikroyapı özelliklerinde vb. özelliklerinde takım morfolojisinin rolünü tespit etmek için sürtünme karıştırma nokta kaynağında pimsiz ve pim destekli takım geometrileri kullanılmıştır.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağından elde edilen bağlantıların ortak özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Monoton aksenal yükleme durumunda FSSW'li bağlantıların bindirme çekme-makaslama yükü elde edilmiştir. Aynı şekilde tekrarlı/devirli yükleme durumunda elde edilen birleştirilmiş iş parçalarının eğmeli yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dönme düzeyi ile kaynak gücünü ilişkilendirmek için aksenal monoton yük altında bağlantının çevrimi incelenmiştir. Ayrıca kaynak edilmiş bağlantıların metalurjik özellikleri optik mikroskop (OM) yardımıyla ve mikrosertlik analizi yardımıyla incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak çelmeye ve yorulmaya maruz kalan numunelerin kırılma morfolojileri gözlemlenmiştir.

Değişen takım profili altında elde edilmiş kaynaklı birleştirmelerin görsel değerlendirmesi yapılmış ve kumpas yardımıyla bağlantıların çıkarılmış çapak özellikleri ölçülmüştür. Çapağın tüm hacmi metodolojik olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçların analitik değerlendirmesinin yapılması beklenmektedir. Böylece kaynak mukavemetleri (bindirme çekme-makaslama yükü, yorulma dayanımı ve mikro sertlik sonuçları) ve kaynakların makro- ve mikro-yapıları da analiz edilmiştir. Çapak özelliklerinin morfolojisinde takım profilinin etkileri incelenmiştir. Aynı biçimde gözlenen çapak özelliklerine kaynak parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Tepe sıcaklığında karıştırma bölgesi enerji ve genel çapak hacmi arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca üstel, doğrusal, logaritmik, polinom ve güç

regresyon teknikleri kullanılarak çekme-makalasma yükü ve genel çapak hacmi arasındaki ilişki araştırılmıştır. İhtiyaç duyulan alaşımın sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında yumuşatılmış malzeme nüfuziyet hacmi deneysel ve metodolojik olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, sonuçlar üzerinde kaynak parametreleri ve kaynak kalitesi arasındaki olası ilişkiyi belirlemek için daha ileri analiz edilmiştir. Hem Taguchi yöntemi kullanılarak ve hem de melez çoklu tepki Taguchi metodu (TM), Gri ilişkisel analiz (GİA) ve temel bileşen analizi (TBA) yaklaşımı kullanılarak bağlantıların tek tepki optimizasyonu ve çoklu tepki optimizasyonu incelenmiştir.

## 6.1. Malzemeler

Bu araştırma için gerekli olan en önemli malzemeler, iş parçası malzemesidir ve sürtünme karıştırma nokta kaynağının (FSSW) takım malzemesidir. Ancak mukavemetli bir alaşım, bir FSSW takım malzemesi olarak ihtiyaç duyulup seçilmiştir.

### 6.1.1. İş parçası malzemesi

Bu çalışmada, 1,6mm kalınlığında Alclad AA2219-O alüminyum alaşımı saçları kullanılmıştır. Alaşım tedarikçisi tarafından 1000mm × 2000mm × 1,6mm boyutlarında malzeme sağlanmıştır. Böylece sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için alındığı gibi Alclad AA2219-O alaşımı, esas metal olarak kullanılmıştır. ASTM E1251 standardına göre belirtilen esas metalin kimyasal bileşimi tablo 6.1’de gösterilmekte ve ASTM E8/B557 standardına göre belirtilen mekanik özellikleri tablo 6.2’de gösterilmektedir.

Tablo 6.1. AA2219-O alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (wt %)

Alaşım	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	Zr	Diğer
2219-O	Kalan	0,06	0,14	6,6	0,32	0,02	0,00	0,03	0,04	0,06	0,13	0,03

Tablo 6.2. AA2219-O alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

Max. çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama %
146	63	22.3

### 6.1.2. FSSW takım malzemesi

Bir sürtünme karıştırma nokta kaynak işlemini gerçekleştirmek için gerekli en önemli malzemelerden birisi sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) takımıdır. Sonuç olarak sürtünme karıştırma nokta kaynak işlemi için dikkat, gerekli takım malzemesi seçimine verilmelidir. Böylece alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) mevcut literatürüne dayalı ve FSW/FSSW takımını tasarım kriterlerine dayalı bu araştırma için seçilmiş FSSW takım malzemesi, yüksek hız çeliğidir (HSS).

Bu araştırma için FSSW takım malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken kriterler şunlardır:

- Sertlik: takım malzemesinin sertliği, AA2219 alüminyum alaşımından daha sert olmalıdır;
- Mukavemet: takım malzemesinin maks. çekme mukavemeti, AA2219 alüminyum alaşımından daha büyük olmalıdır;
- Tokluk ve rijitlik: takım malzemesi 550°C'dan daha yüksek sıcaklıklarda mükemmel bir sertlik ve bükülmezlik sergileyebilme yeteneğine sahip olmalıdır;
- Ergime sıcaklığı: takım malzemesi, mükemmel ve yüksek erime sıcaklığına sahip olmalıdır ve saf alüminyumun sıcaklığı (660°C) üstündeki daha yüksek sıcaklığına dayanmalıdır ;
- Eğme yükü: takım malzemesi, eğme ve burulma yüklerine dayanacak şekilde olmalıdır; ve
- Aşınma ve aşınma direnci/ takım ömrü: takım malzemesi değişimi öncesinde kabul edilebilir takım ömrü göstermelidir. Bu takım malzemesi, yüksek sıcaklıkta aşınma direnci sergilemelidir.

Benzer bir şekilde, HSS takım çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri tablo 6.3'te ve tablo 6.4'ta gösterilmektedir. FSSW takım malzemesinin mekanik özellikleri ile iş parçası malzemesinin karşılaştırmasında takım malzemesi, tercih edilir ve yukarıda belirtilen kriterlere uyması beklenir.

Tablo 6.3. HSS takım çeliğinin kimyasal bileşimi (wt %) [210]

Alaşım	Cr	Mo	Si	V	C	W	Cu	Mn	P	S
HSS	3,50- 4,00	8,20- 9,20	0,20- 0,50	1,00- 1,35	0,78- 0,88	1,40- 2,10		0,15- 0,40	0,03	0,03

Tablo 6.4. HSS takım çeliğinin mekanik özellikleri [210]

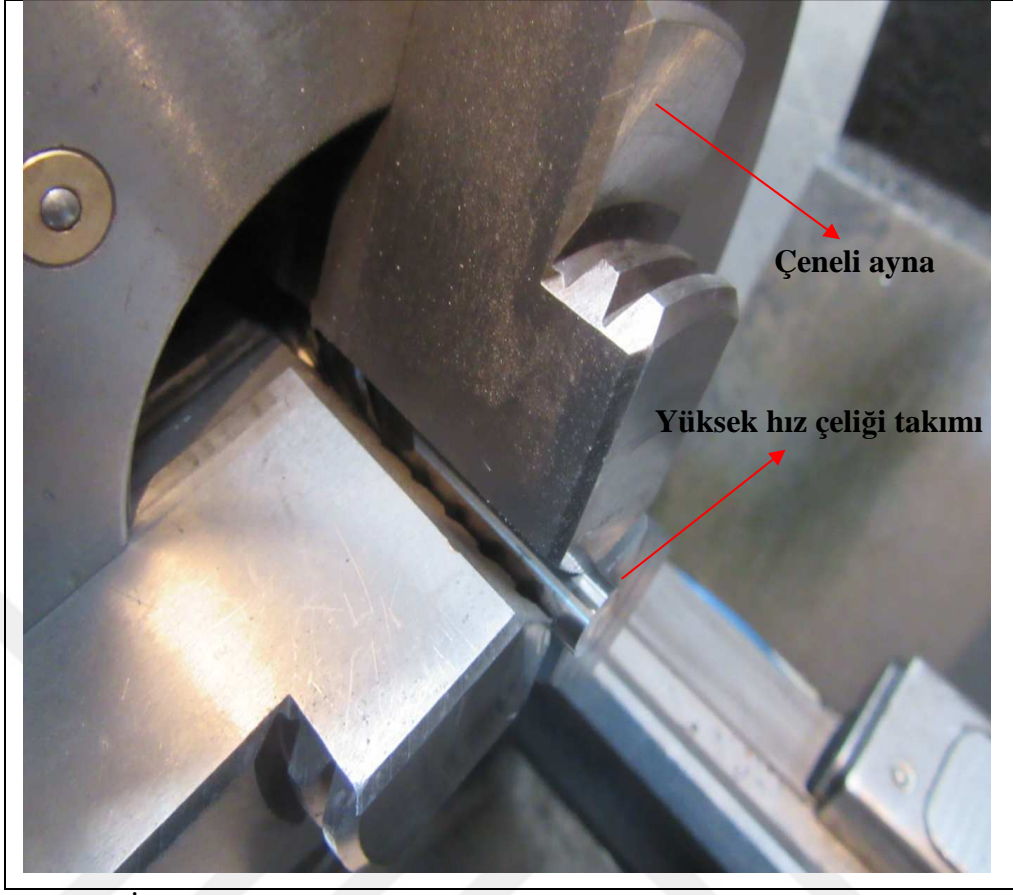
Poisson oranı	Sertlik, Rockwell C	Elastik modülü (GPa)
0,27 - 0,30	60,0 - 65,0	190 – 210

## 6.2. Ön Çalışmalar

AA2219-O alaşımının kaynağı başlanmadan önce gerekli görülen temel ön çalışmalar vardır. İş parçası malzemesinin etkili taşınmasını kolaylaştırmak için ve boya, kir veya toz kaldırılması için bu başlıca ön çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı ön çalışmalar, esas metalin temizlemesi, alındığı iş parçasının boyutlarından yönetilebilir boyutlara azalması, arz edilen FSSW takımı geometrilerinin üretimi içermektedir.

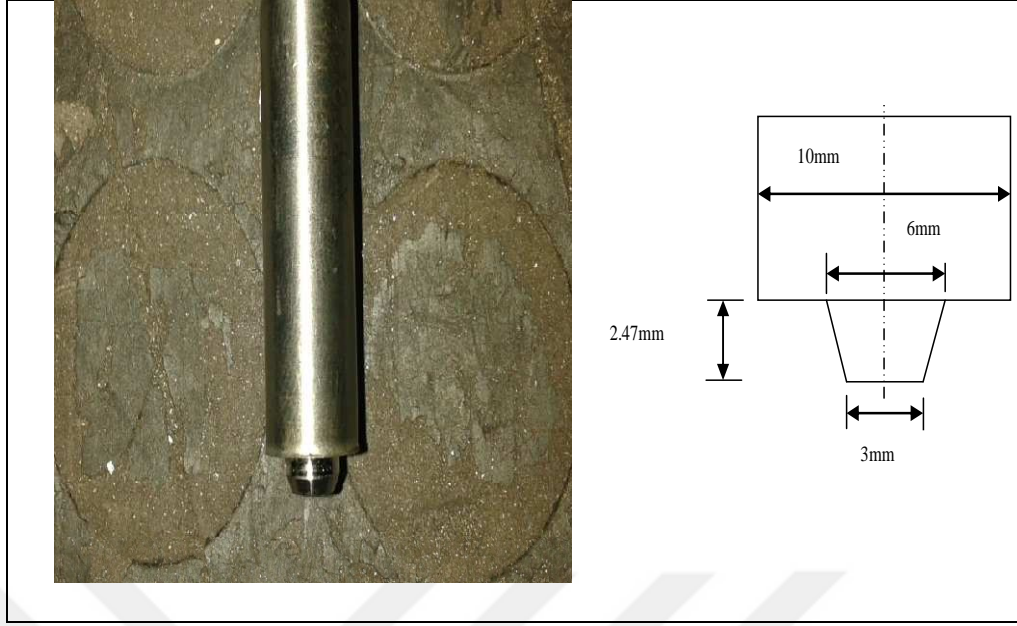
### 6.2.1. FSSW takımının üretimi

İş parçası malzemesinin sürtünme karıştırma nokta kaynağının gerçekleştirilebilmesi için ihtiyaç duyulan tasarlanmış takımın geometrileri üretilmiştir. Takım malzemesi (HSS), işlenerek istenilen geometriler elde edilmiştir. Makinede işleme başlanmadan önce FSSW takım malzemesinin bir görsel temsili şekil 6.1'de gösterilmiştir. 1,6mm kalınlığındaki AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı için hem pimsiz takım hem de pimli takım işlenerek elde edilmiştir.

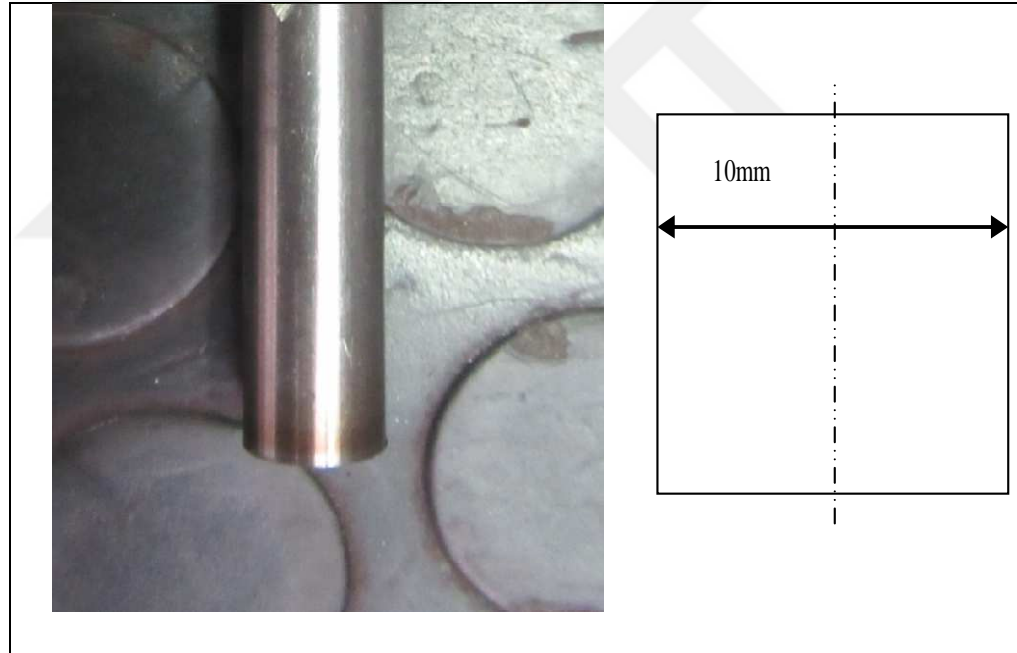


Şekil 6.1. İşlenmiş FSSW takımı malzemesi

Literatürdeki sonuçlara dayanarak takım piminin uzunluğu, sürtünme karıştırma nokta kaynaklı birleştirmelerin çekme veya çekme-makaslama mukavemetinde önemli bir rol oynamaktadır. Çok kısa bir takım pimi, bağlantıların gücünü tehlikeye atmaktadır. Sonuç olarak Şekil 6.2'de gösterildiği gibi, alt saç içerisinde nüfuz edebilen bir pimli takım tasarlanmış ve işlenmiştir. Ancak Şekil 6.3'te tasarlanmış ve işlenmiş pimsiz takım gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Pimli FSSW takımı



Şekil 6.3. Pimsiz FSSW takımı

### 6.2.2. İş parçası malzemesinin hazırlanması

AA2219-O alaşımının alındığı boyutlar 1000mm x 2000mm x 1,6mm olarak teslim alınmış. Saçların yüzeyi etkin temizliğine ve kolay ulaşımına yardımcı olmak amacıyla bu teslim alınmış alaşımın boyutları, yönetilebilir boyutlarının kesilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle 1000mm x 2000mm x 1,6mm boyutlarındaki saçlar

kesilmiştir. Her kesilmiş parça, 1000mm x 500mm x 1,6mm boyutlarına sahip olmuştur.

İş parçası numunesinin hassas kesimi için kullanılan giyotin makinesinin seçimi bir resimsel diyagramı şekil 6.4 de gösterilmiştir. Bu giyotin türünün daha yüksek kesme hassasiyeti olması nedeniyle kullanılmıştır.



Şekil 6.4. İş parçası malzemesinin hassas kesimi için kullanılan hidrolikle tahrik edilen giyotin metal kesme makinesi

### 6.2.3. Malzemelerin temizlemesi

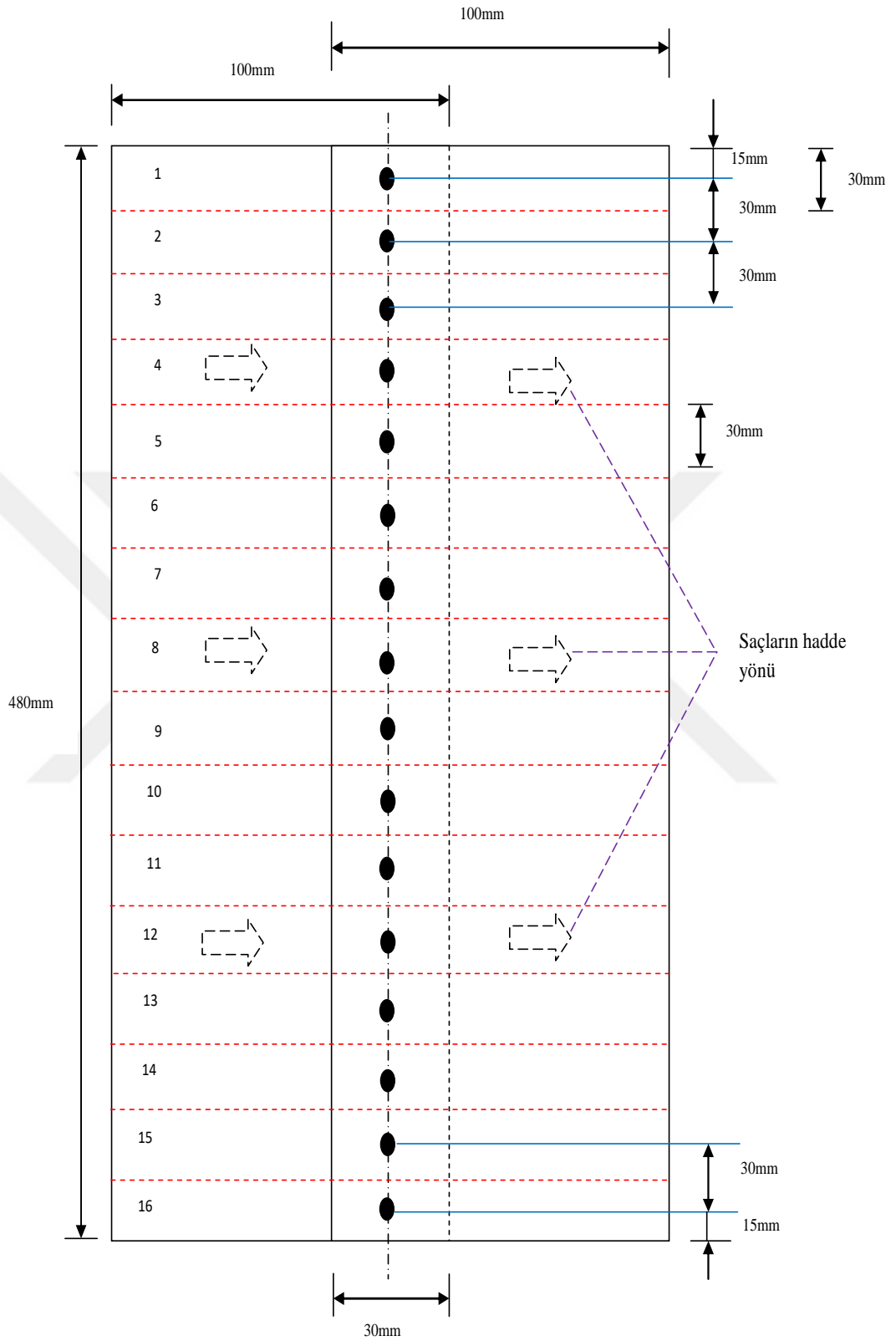
Aseton kullanılarak AA2219-O alaşımının yüzeyleri temizlenmiştir. Alaşımın yüzeyindeki yabancı maddeleri örneğin kir, toz ve boya iyice kaldırılmış veya temizlenmiştir. Malzemenin temizlik işlemi yapıldıktan sonra iş parçaları oda sıcaklığında kuru tutulmuştur. Benzer şekilde, gerçek kaynak işlemi öncesinde FSSW takımlarının yüzeyleri iyice temizlenmiştir.

### 6.3. Kaynak Prosedürleri

Sürtünme karıştırma nokta kaynağının kaynak prosedürlerinde iş parçalarının sıkma düzenlenmesi ve kaynak kalıpları/modelleri, temel süreçler olarak kabul edilmiştir. Kaynak işlemleri öncesinde kaynak prosedürü veya modeli tasarlanmış ve bu araştırma için bindirme kaynak prosedürü seçilmiş ve kabul edilmiştir. İki tane 480mm × 100mm × 1,6mm boyutları üst üste binen düzende yerleştirilmiştir ve elde edilen bindirme alanı 480mm × 30mm boyutlarında olmuştur. Böylece üst üste binme alanı boyunca 16 nokta bağlantısı üretilecek şekilde tasarlanmış ve her bir nokta arasındaki mesafe 30 mm olarak ayarlanmıştır. Şekil 6.5'te tasarlanmış bindirme kaynak prosedürünün diyagramı gösterilmektedir.







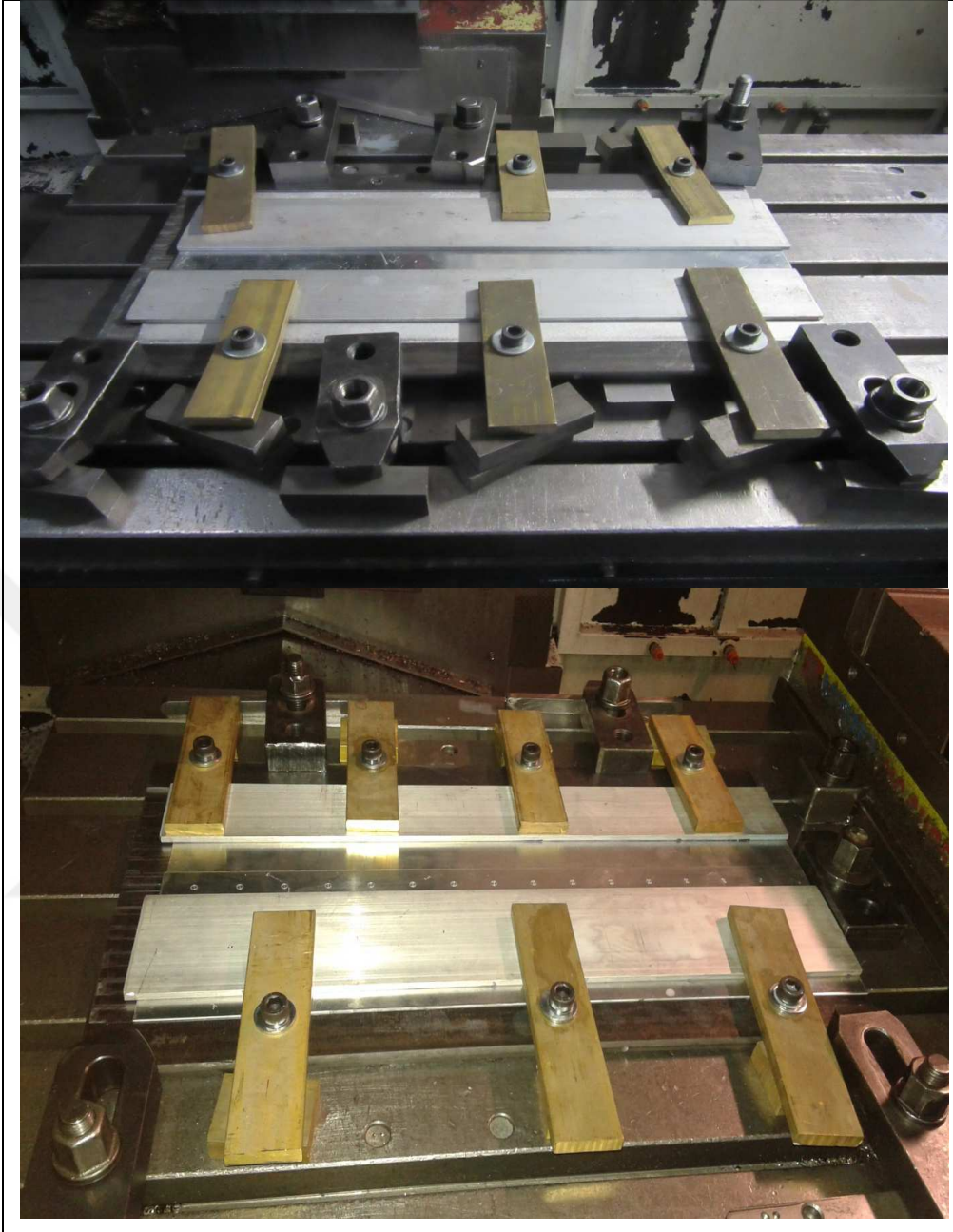
Şekil 6.5. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin tasarlanmış bindirme kaynaklanma modeli

CNC freze makinesinde sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinin otomatik seçimini elde etmek için bu CNC freze makinesi türü seçilmiş ve kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için kullanılan CNC freze resimsel temsili şekil 6.6'da gösterilmektedir. Bu CNC freze makinesinde üç temel işlem gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler, bindirmeli parçalar (sıkıştırma düzenlenmesi) için çalışma tablosunun hazırlanmasını, makine mili üzerinde takımın aynaya bağlamasını ve ayarı, ve otomatik sürtünmeli kaynak işlemi için kontrol paneli sayesinde makine içine proses parametrelerinin girmesini içermektedir.



Şekil 6.6. Adapte edilen sürtünme karıştırma nokta kaynak makinesi: (a) Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için CNC freze makinesi; (b) Proses parametrelerinin otomatik ayarlanması için kontrol paneli

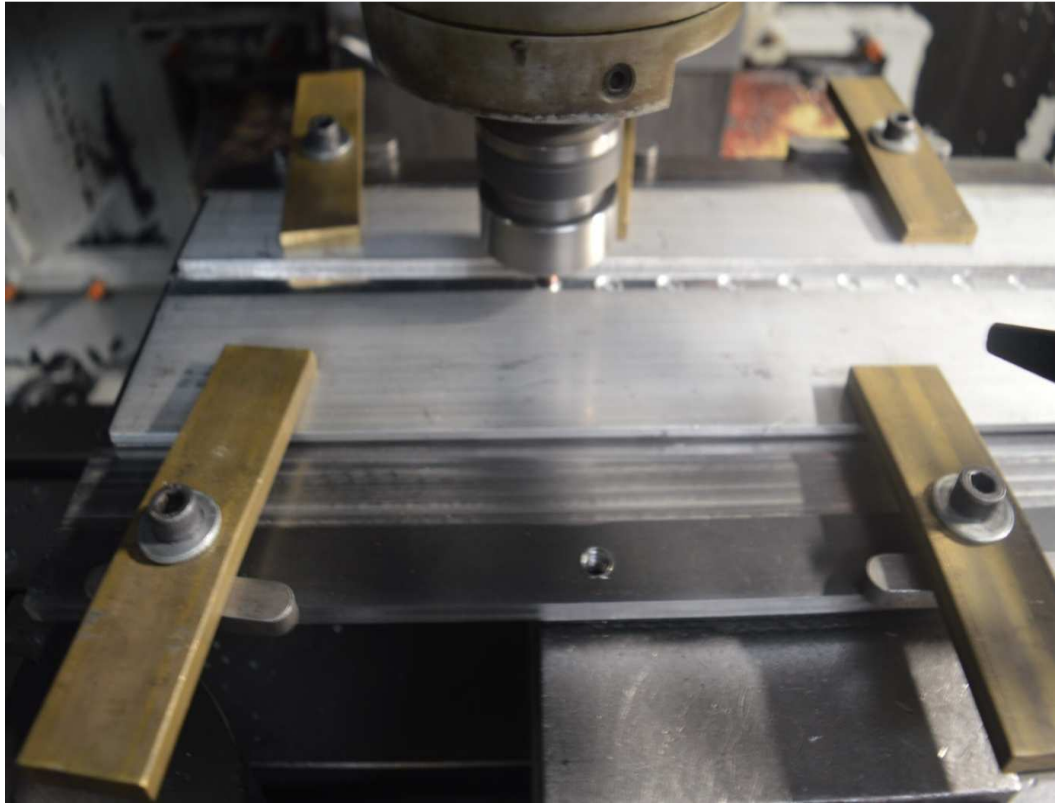
Böylece sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için özel bir çalışma alanı hazırlanmıştır. Hazırlanan tabloda, tüm iş parçası kurulumu (480mm x 170mm) veya iş parçasının istenen uzunluğu ve genişliği tutması tasarlanmıştır. Sonuç olarak, destekli iş bağlama düzeni kullanılarak hazırlanan tablo, CNC freze makinesinin masasına monte edilmiş. özel çalışma masasına iş parçasının fikstürle sabitlenmesi son derece önemlidir. Çünkü kaynağı elde etmek için kaynak sırasında herhangi bir serbestlik derecesi giderilmesi ihtiyaç duyulmaktadır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında kenetlenmiş parçasının herhangi bir küçük hareketi olursa giriş takım kuvvetine, nokta büyüklüğüne, plastikleştirilmiş malzemenin akışına ve bağlantıların elde edilen kalitesine zarar vermektedir. Böylece şekil 6.7'de gösterildiği gibi iş parçası malzemeleri, iş tablosuna sıkı sıkıya kenetlenmiştir. Şekil 6.7'de gösterildiği gibi, 480 mm uzunluk ve 30mm daha az genişliğe sahip olan iki levha, iş parçası üzerine yerleştirilerek nokta kaynaklarının ara uzaklığı sağlanmıştır. Sonuç olarak, altı (6 veya 7) tane iş bağlama düzeni kullanılarak özel olarak tasarlanmış çalışma masasına iş parçası kurulumu gerçekleştirilmiştir. Böylece, dönme takımının daldırılmasından sonra iş parçasının düşey ve yatay hareketleri tamamen elimine edilmiş ve verimli kaynak işlemi yapılmıştır.



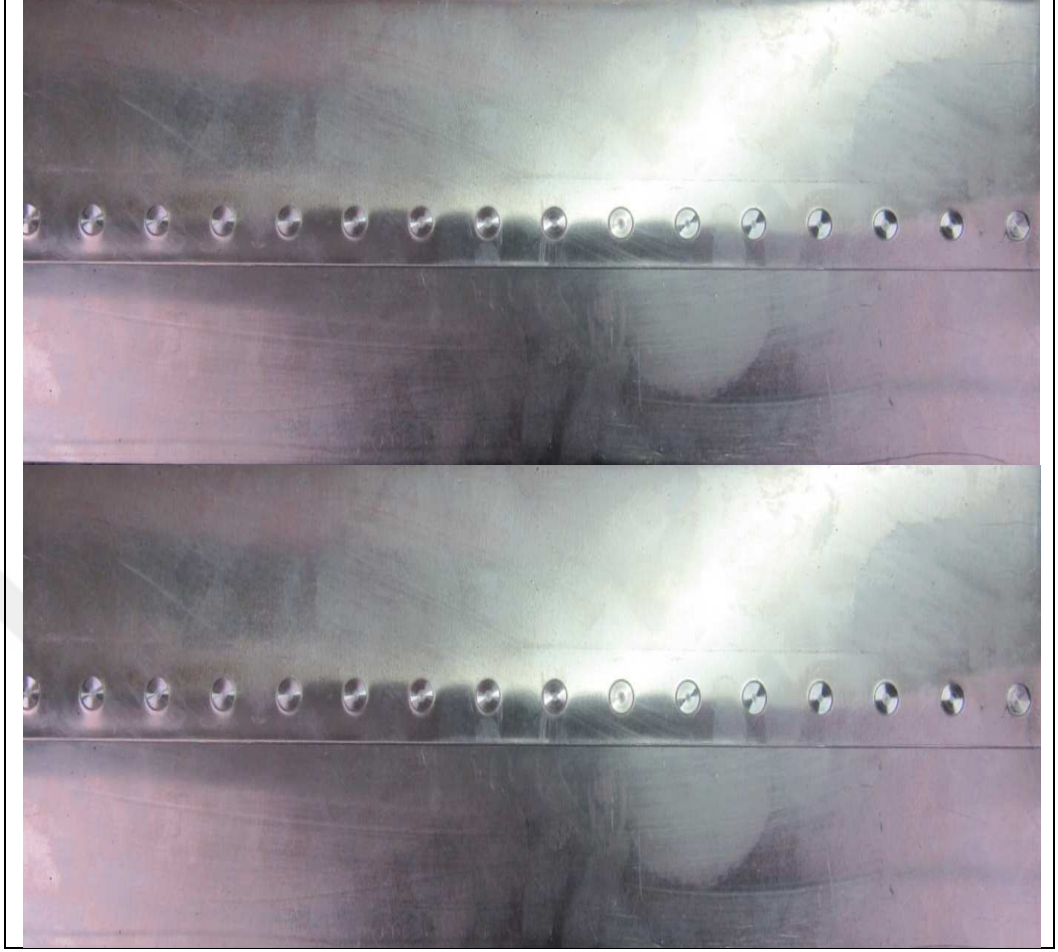
Şekil 6.7. CNC freze makinesinde iş parçası malzemesinin kenetlenmesi

Daha sonra üretilen kaynak takımı, CNC freze makinesine bağlanmış ve CNC freze makinesinin kontrol sistemi kullanılarak iş parçası ile FSSW takımının uyumu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gerçek kaynak işlemlerine başlamadan önce sürtünme karıştırma nokta kaynağı işleminin başlangıç hareket noktası belirlenmiştir. Bundan başka her deneysel deneme için CNC freze makinesinin kontrol paneli (şekil 6.6 b ) sayesinde işlem parametre seviyeleri, makinenin içine girilmiştir. Ancak bu araştırmanın kaynak prosedürü için temel sürtünme karıştırma nokta kaynağının ilkesi uygulanmıştır. Bu yüzden FSSW takımı, iş parçası malzemesi içine daldırılmış

ve bir süre sonra geri çekilmiştir. Sonuç olarak, nokta kaynaklarının tasarlanmış sayısına göre, kenetlenmiş iş parçaları üzerinde 16 tane nokta kaynağı üretilmiştir. Şekil 6.8'te AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi gösterilmekte ve tasarlanmış iş planına göre şekil 6.9'ta FSSW'li bağlantıların şekli verilmektedir. Bundan dolayı hidrolik CNC giyotin kesme makinası kullanılarak kaynaklı numuneler hadde yönünde kesilmiştir. Sonuç olarak 100mm x 30mm x 1,6mm boyutlu parçalar kesildikten sonra tek bir nokta bindirmeli sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantı elde edilmiştir.



Şekil 6.8. CNC feze makinesi ile kaynak işlemi



Şekil 6.9. Tasarlanmış kaynak modeline göre tipik bindirmeli bağlantılar

#### 6.4. Deney Tasarımı

Maliyet ve zamandan tasarruf etmek ve gerekli deney sayısını azaltmak için deney tasarımı önemli bir yönetim ya da planlama yaklaşımıdır. Bu yüzden bu araştırmanın deneysel planlanması için Taguchi'nin deney tasarımı kabul edilmiş ve kullanılmıştır. Esas teşkil eden işlem parametreleri ve değişken tepkiler tespit edilmiştir. Gerçek deneylere önceki kaynak parametrelerinin optimum değişkenlik aralığını belirlemek için deneme deneyleri yapılmıştır.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi için üç kategorili kaynak parametresi seçilmiştir. AA2219-O alaşımının kaynak edilebilirliğini incelemek için takım dönme hızı, dalma derinliği veya omuz dalma derinliği, ve takım süresi, kaynak parametreleri olarak kullanılmıştır. Deneyler için gerekli parametre düzeylerini belirlemek gereklidir. Bu yüzden kaynak parametrelerinin değişen seviyeleri ile deneme deneyleri yapılmıştır. Böylece AA2219-O alaşımı plakalarının pimli ve pim

destekli sürtünme karıştırma nokta kaynaklı ön veya deneme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre sırasıyla masaya 6.5 ve 6.6'de gösterildiği gibi kaynak parametreleri ve onların seviyeleri belirlenmiştir.

Tablo 6.5. Pimli FSSW parametreleri ve düzeyleri

Kaynak Parametreleri	Parametre düzeyleri		
	1	2	3
A Takım dönme hızı (rpm)	1400	1500	1600
B Omuz dalma derinliği (mm)	0,43	0,45	0,80
C Kalma süresi (s)	4	5	8

Tablo 6.6. Pimsiz FSSW parametreleri ve düzeyleri

Kaynaklanma Parametreleri	Parametre düzeyleri		
	1	2	3
A Takım dönme hızı (rpm)	1400	1500	1600
B Omuz dalma derinliği (mm)	2,90	2,92	2,95
C Kalma süresi (s)	4	5	6

Sürtünme karıştırma nokta kaynağının her kategorisi (pimli ve pimsiz kaynaklar) için Taguchi deney tasarımının uygulaması ile L9 matrisi tasarlanmıştır. Bu parametre birleştirmesi tablo 6.7'de gösterilmektedir. Seçilen sütün, en düşük deney sayısını veya minimum parametre kombinasyonunu sağlamaktadır. Sonuç olarak AA2219-O alaşımının pimsiz ve pimli sürtünme karıştırma nokta kaynakları için tasarlanmış L9 dikey sıraları sırasıyla tablo 6.8'de ve tablo 6.9'da verilmektedir. Yabancı değişkenlerin etkilerini kontrol etmek için genel deneyler oluşturulmuştur. Tasarlanmış ya da planlanmış deneysel matrisine göre ihtiyaç duyulan sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.7. L9 dikey sırası

S/N	Takım dönme hızı (rpm)	Dalma derinliği (mm)	Kalma süresi (s)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Key: 1- birinci parametre düzeyi; 2- ikinci parametre düzeyi; 3- üçüncü parametre düzeyi

Tablo 6.8. Pimsiz FSSW işleminin dikey sırası

Deney sırası	Deney sayısı	Takım dönme hızı (rpm)	Dalma derinliği (mm)	Kalma süresi (s)
3	1	1400	0,43	4
6	2	1400	0,45	5
8	3	1400	0,80	8
1	4	1500	0,43	5
9	5	1500	0,45	8
4	6	1500	0,80	4
7	7	1600	0,43	8
5	8	1600	0,45	4
2	9	1600	0,80	5

Tablo 6.9. Pimli FSSW işleminin dikey sırası

Deney sırası	Deney sayısı	Takım dönme hızı (rpm)	Dalma derinliği (mm)	Kalma süresi (s)
3	1	1400	2,90	4
6	2	1400	2,92	5
8	3	1400	2,95	6
1	4	1500	2,90	5
9	5	1500	2,92	6
4	6	1500	2,95	4
7	7	1600	2,90	6
5	8	1600	2,92	4
2	9	1600	2,95	5



## 6.5. Test Numunelerinin Hazırlanması

Bu araştırma için gerekli analiz hazırlıkları bazı seviyeleri gerektirmektedir. Böylece, bazı seçilen nokta kaynakları (veya numuneleri) işleme belli bir düzeyde geçmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak gerekli standartlara göre yorulma, çekme, mikroyapı ve sertlik test numuneleri uygun olarak hazırlanmıştır. Bu duruma göre çekme ve yorulma analizleri için test numunelerinin kodlanması yapılmıştır.

### 6.5.1. Test numunelerinin kodlanması

Gerçek test veya analiz öncesinde deney numunelerinin kodlanması gerçekleştirilmiştir. Yorulmaya ve çekmeye maruz kalacak pimsiz ve pim destekli numunelerinin kullanılan kodları sırasıyla tablo 6.10'da ve tablo 6.11 'de verilmiştir.

Tablo 6.10. Pimsiz FSSW'li numunelerin bağlantı, yorulma, ve çekme kodları

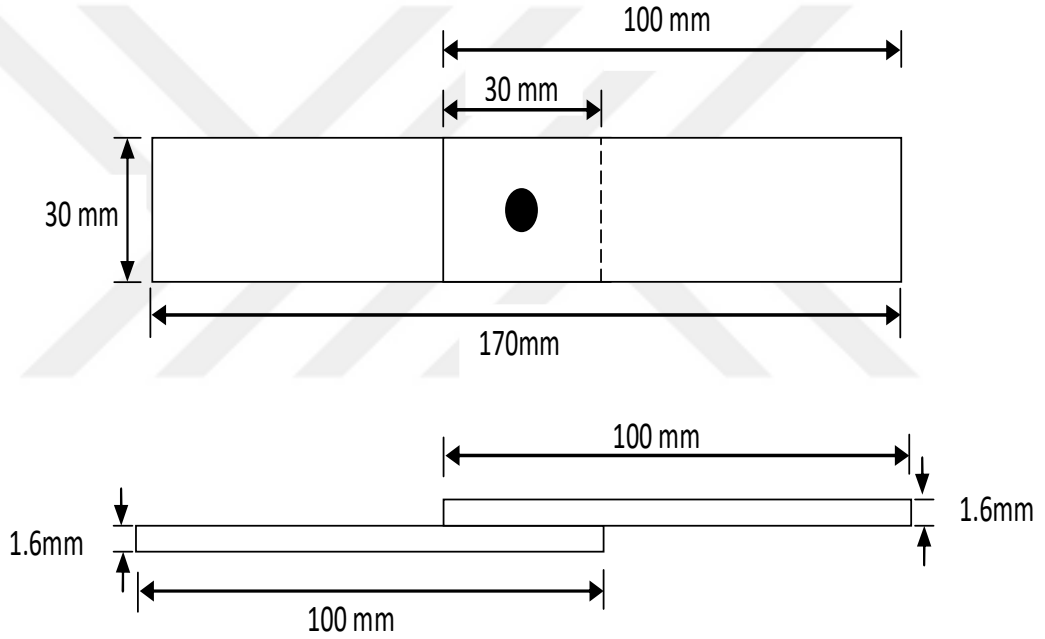
Bağlantı kodları	Yorulma kodları	Çekme kodları	Takım dönme hızı (rpm)	Dalma derinliği (mm)	Kalma süresi (s)
PL 1	PL-FAT 1	PL-TEN 1	1400	0,43	4
PL 2	PL-FAT 2	PL-TEN 2	1400	0,45	5
PL 3	PL-FAT 3	PL-TEN 3	1400	0,80	8
PL 4	PL-FAT 4	PL-TEN 4	1500	0,43	5
PL 5	PL-FAT 5	PL-TEN 5	1500	0,45	8
PL 6	PL-FAT 6	PL-TEN 6	1500	0,80	4
PL 7	PL-FAT 7	PL-TEN 7	1600	0,43	8
PL 8	PL-FAT 8	PL-TEN 8	1600	0,45	4
PL 9	PL-FAT 9	PL-TEN 9	1600	0,80	5

Tablo 6.11. Pimli FSSW'li numunelerin bağlantı, yorulma, ve çekme kodları

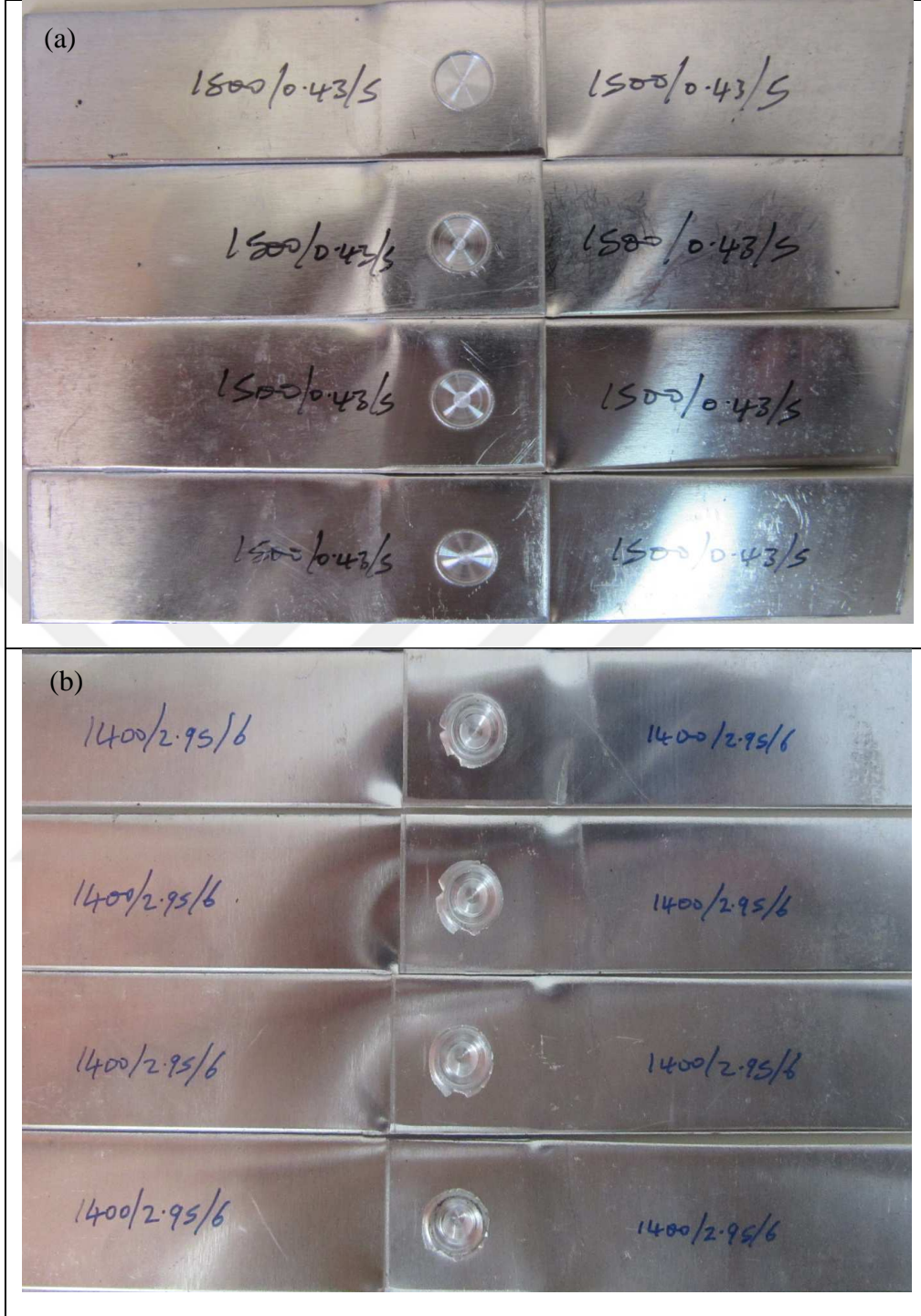
Bağlantı kodları	Yorulma kodları	Çekme kodları	Takım dönme hızı (rpm)	Dalma derinliği (mm)	Kalma süresi (s)
P 1	FAT 1	TEN 1	1400	2,90	4
P 2	FAT 2	TEN 2	1400	2,92	5
P 3	FAT 3	TEN 3	1400	2,95	6
P 4	FAT 4	TEN 4	1500	2,90	5
P 5	FAT 5	TEN 5	1500	2,92	6
P 6	FAT 6	TEN 6	1500	2,95	4
P 7	FAT 7	TEN 7	1600	2,90	6
P 8	FAT 8	TEN 8	1600	2,92	4
P 9	FAT 9	TEN 9	1600	2,95	5

### 6.5.2. Çekme kesme numunesi

Hidrolik CNC giyotin metal-kesme makinesi kullanılarak AA2219-O alaşımının 480mm × 100mm bindirme sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarından bireysel nokta kaynakları kesilmiştir. Bağlantının çekme-makaslama yükünü değerlendirmek için her kesilen nokta kaynağı (kaynaklı parça), ihtiyaç duyulan çekme numunesi anlamına gelmiştir. Şekil 6.10'da gerekli olan çekme numunesinin geometrisi sağlanmaktadır. Ayrıca şekil 6.11'de 480mm x 100mm üst üste saçlarından üretilen pimsiz ve pim destekli çekme numunelerinin örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 6.10. Sürtünme karıştırma nokta kaynağının çekme kesme numunesi

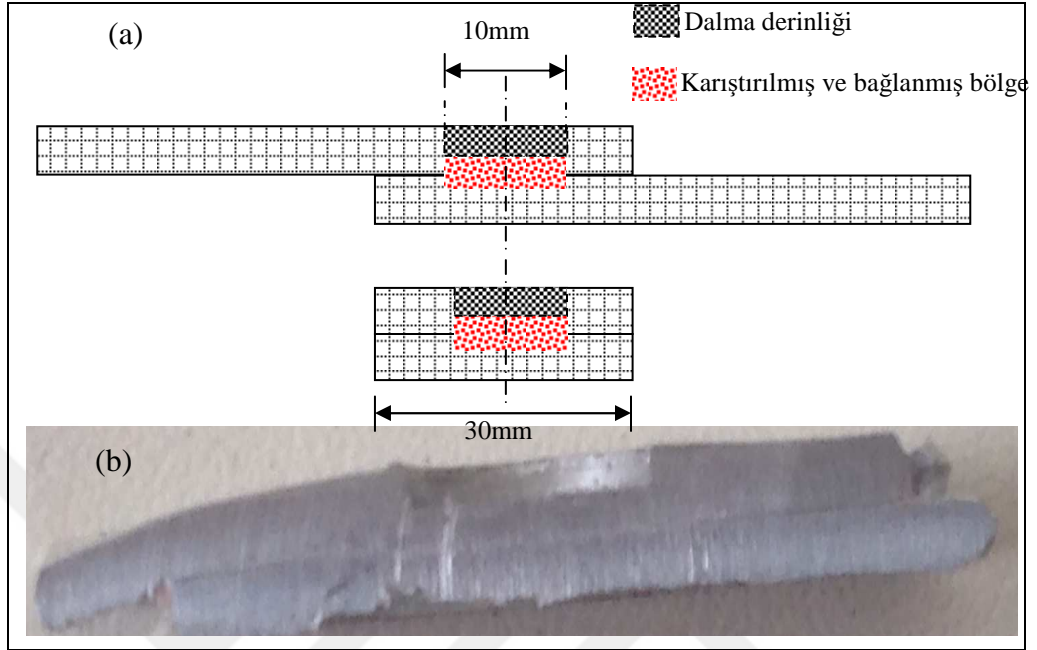


Şekil 6.11. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı'lı çekme kesme numuneleri (a) pimsiz bağlantı; (b) pimli bağlantı

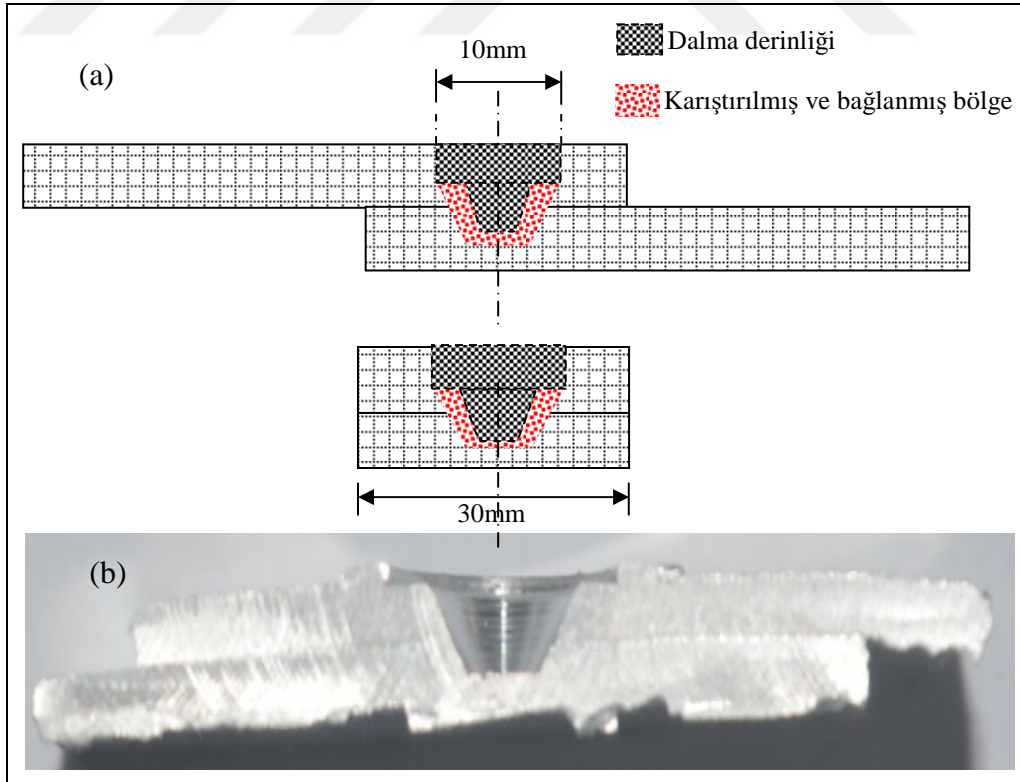
### 6.5.3. Sertlik numunesi

Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantının simetri düzlemi boyunca enine kesiti yapılmıştır. Konik ve pimsiz kaynakların düz enine kesitlerini elde etmek amacıyla kaynakların enine kesitleri frezleme ile hazırlanmıştır. Pimsiz ve konik pimli

kaynaklarının kesitleri şematik görünümü sırasıyla 6.12'de ve 6.13'te gösterilmektedir.



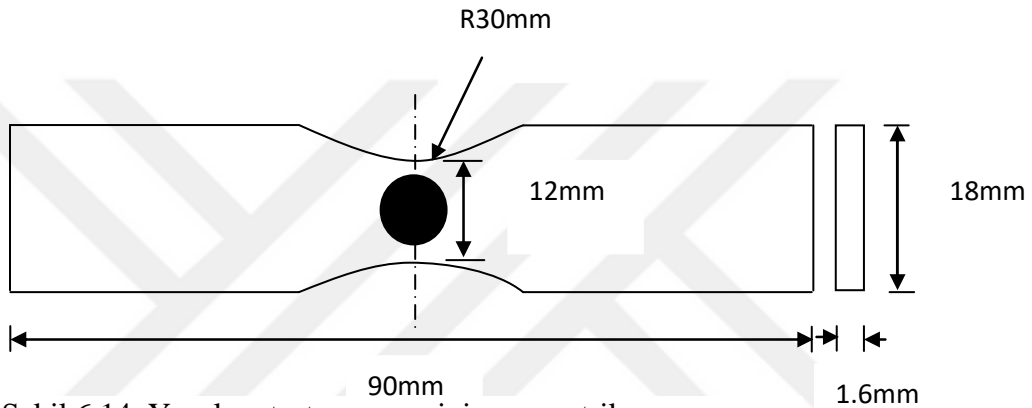
Şekil 6.12. Pimsiz bağlantının kesiti: (a) şematik görünümü; (b) gerçek görünüm



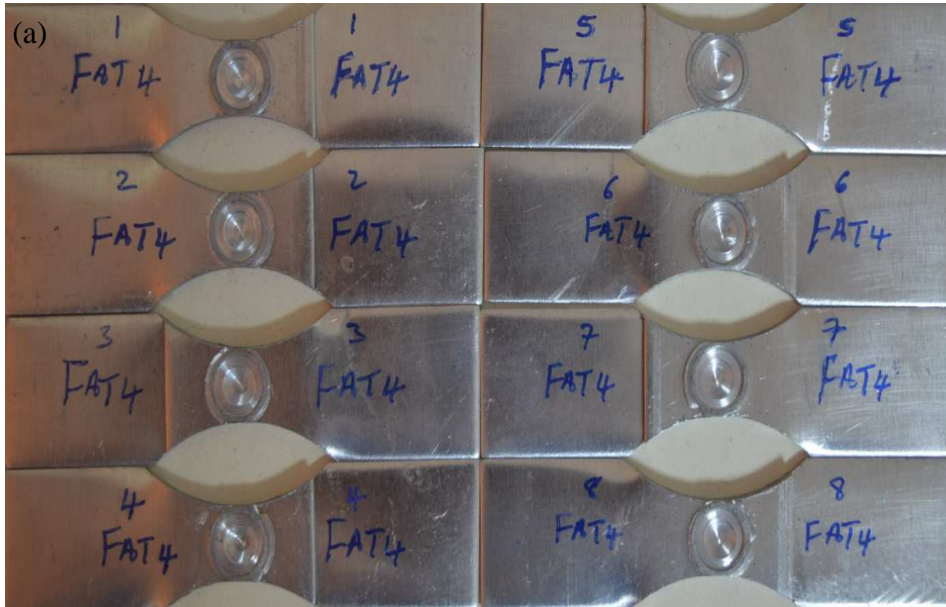
Şekil 6.13. Konik pimli bağlantının kesiti: (a) şematik görünümü, (b) gerçek görünüm

#### 6.5.4. Yorulma numunesi

Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımını değerlendirmek için gerekli yorulma numunelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle DIN 50100 standardına göre yorulma numunesi hazırlanmıştır. Bu standardın tanımı şekil 6.14'ta gösterilmektedir. Bir 8mm matkap ucu, bir CNC freze mili üzerine monte edilmiş ve bu maktap ile kaynaklı numunenin merkezinde eğrilik işlenmiştir. Bu arada, işlenmiş pimsiz ve konik pim destekli kaynakların yorulma numunelerinin görüntüleri şekil 6.15' te gösterilmektedir.



Şekil 6.14. Yorulma test numunesinin geometrik şeması



Şekil 6.15. Kaynaklanmış bağlantılarından üretilen yorulma test numuneleri: (a) konik pimli olan numune; (b) pimsiz olan numune



Şekil 6.15. (Devam) Kaynaklanmış bağlantılarından üretilen yorulma test numuneleri: (a) konik pimli olan numune; (b) pimsiz olan numune

### 6.5.5. Mikroyapı incelenmesi

Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların simetri düzlemi boyunca (ya da kaynak merkezinden) frezelenerek kaynakların kesitleri hazırlanmıştır. İşlenmiş numuneler reçinede kaplanmış ve sertleşmeye bırakılmıştır. Zımparalama sonucunda 220 saniye ve 20V de elektro parlatma ünitesi (disk parlatma makinesi) kullanarak  $3\mu\text{m}$  ve  $0,25\mu\text{m}$  elmas macunları ile numune parlatması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, numunelerin kaynak bölgenin mikroyapsını ortaya çıkarmak için % 2 tetraflorür asit ile dağlamıştır.

## 6.6. Deneysel Çalışma

### 6.6.1. Kaynak görünümünün görsel değerlendirilmesi

Elde edilen kaynaklı nokta bağlantılarının geometrisi, belli kaynak kusurları ve diğer görülebilir kaynak özellikleri, kaynakların görsel görünümüleri olarak sınıflandırılmıştır. Bu özelliklerin gözlemi veya muayenesi çok önemlidir çünkü bu özelliklerden biri veya ikisi ile kaynak kalitesi olumsuz şekilde bozulabilir. Sonuç olarak çıplak göz yardımıyla bütün kaynak bağlantılarının görsel görünümü incelenmektedir. Renk, çıkarılan plastikleştirilmiş malzeme veya çapak ve geometri

açısından AA2219-O alaşımı levhalarının sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantılarının görsel görünümü incelenmiştir.

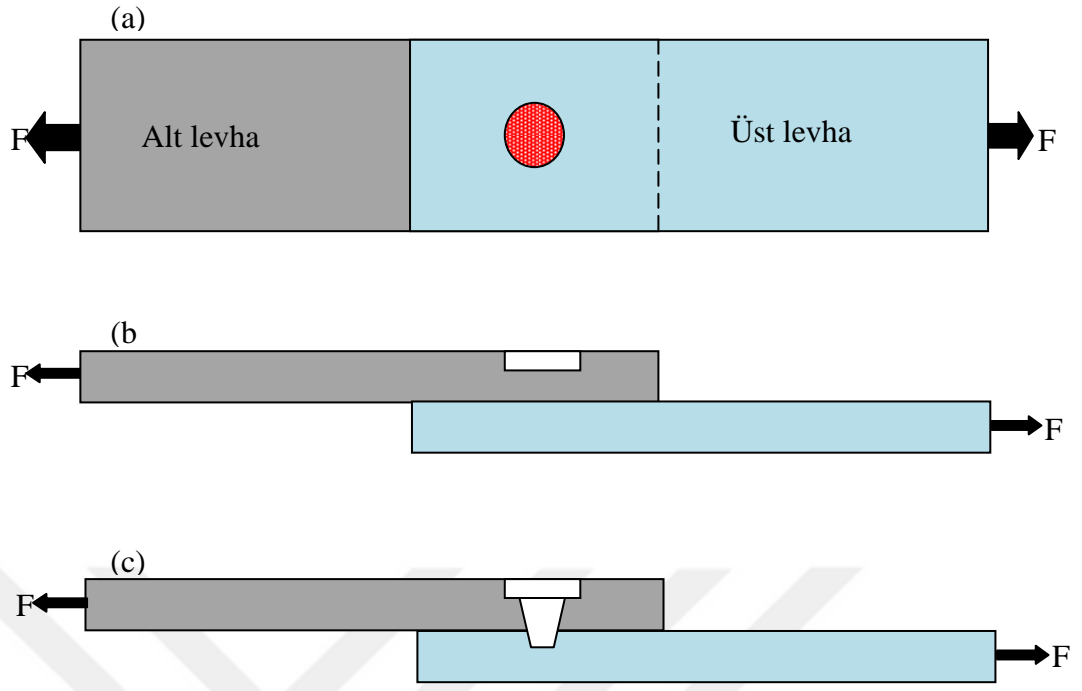
### **6.6.2. Nokta bağlantılarının plastikleştirilmiş malzemesinin ölçümü**

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında iki önemli plastikleştirilmiş malzemesi türü ortaya çıkmaktadır. Bunlar, malzemenin dışa akışı ve malzemenin nüfuziyet derinliğidir. Dijital sürmeli kompas kullanılarak çıkarılan çapak özellikleri örneğin çapakların dışarı itme uzunluğu ve kalınlığı ölçülmüştür. Ayrıca sürtünme karıştırma nokta kaynağı bağlantılarının çıkarılan çapak hacmini hesaplamak için uygun ilişkinin matematiksel türetmesi kullanılmıştır. Benzer şekilde, plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi de hesaplanmıştır.

### **6.6.3. Çekme testi**

Eksenel yükleme altında AA2219-O alüminyumunun sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarının çekme makaslama yükleri elde edilmiştir. Şekil 6.16'da eksenel yükleme modelinin şematik bir temsili görüntülenmiştir.

TS EN ISO 6892-1 standardına göre 30kN bilgisayar kontrollü Zwick çekme makinesi kullanılarak bağlantıların testleri yapılmıştır. 0.5mm/s'lik bir yer değiştirme oranı, deneme numuneleri üzerinde numunelerin tamamen kopmasına kadar uygulanmıştır. Testler normal laboratuvar sıcaklığı altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.17'de monotonik yük altındaki AA2219-O alaşımını nokta bağlantılarının şematik görünümü gösterilmiştir. Parametreler setinin biri için üç çekme numunesi test edilmiştir ve ortalaması her bir parametre setinin çekme-makaslama yükü olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.16. Çekme makaslama numunesi için aksenal yükleme deseninin şematik gösterimi (a) çekme numunesinin ön görünüm; (b) pimsiz numune; (c) konik pimli numune



Şekil 6.17. Çekme makinesindeki nokta kaynaklı AA2219-O numunesinin çekme kesme testi işlemi

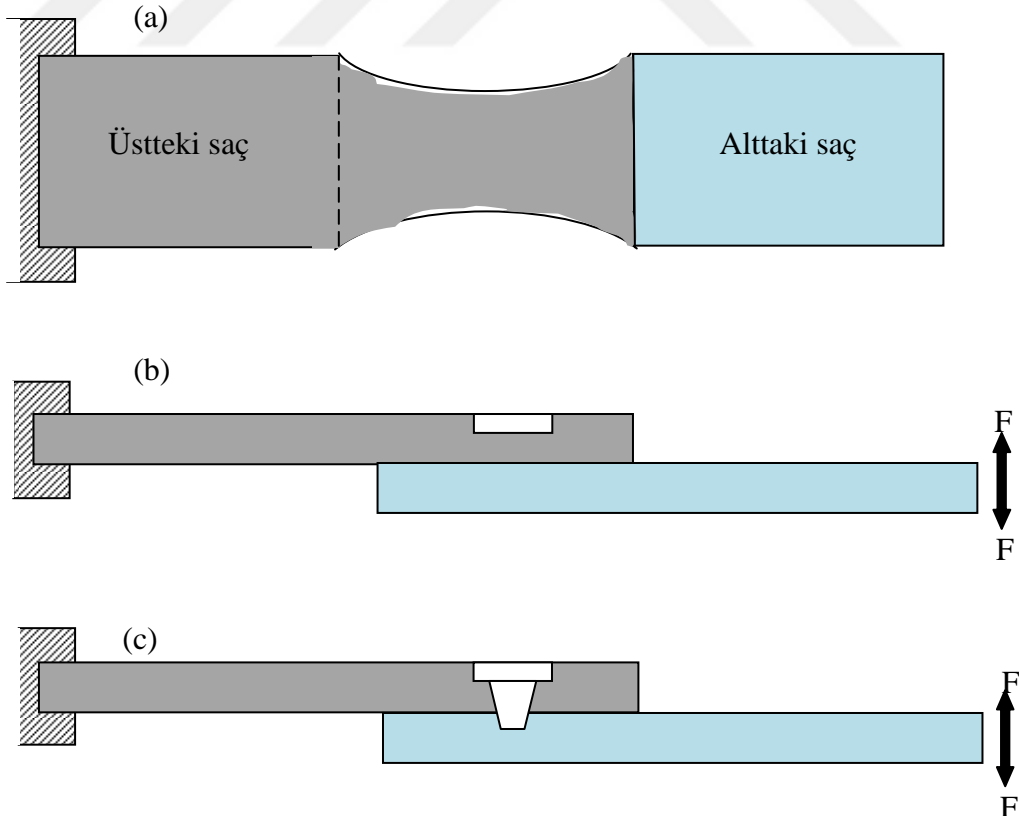


#### 6.6.4. Sertlik testi

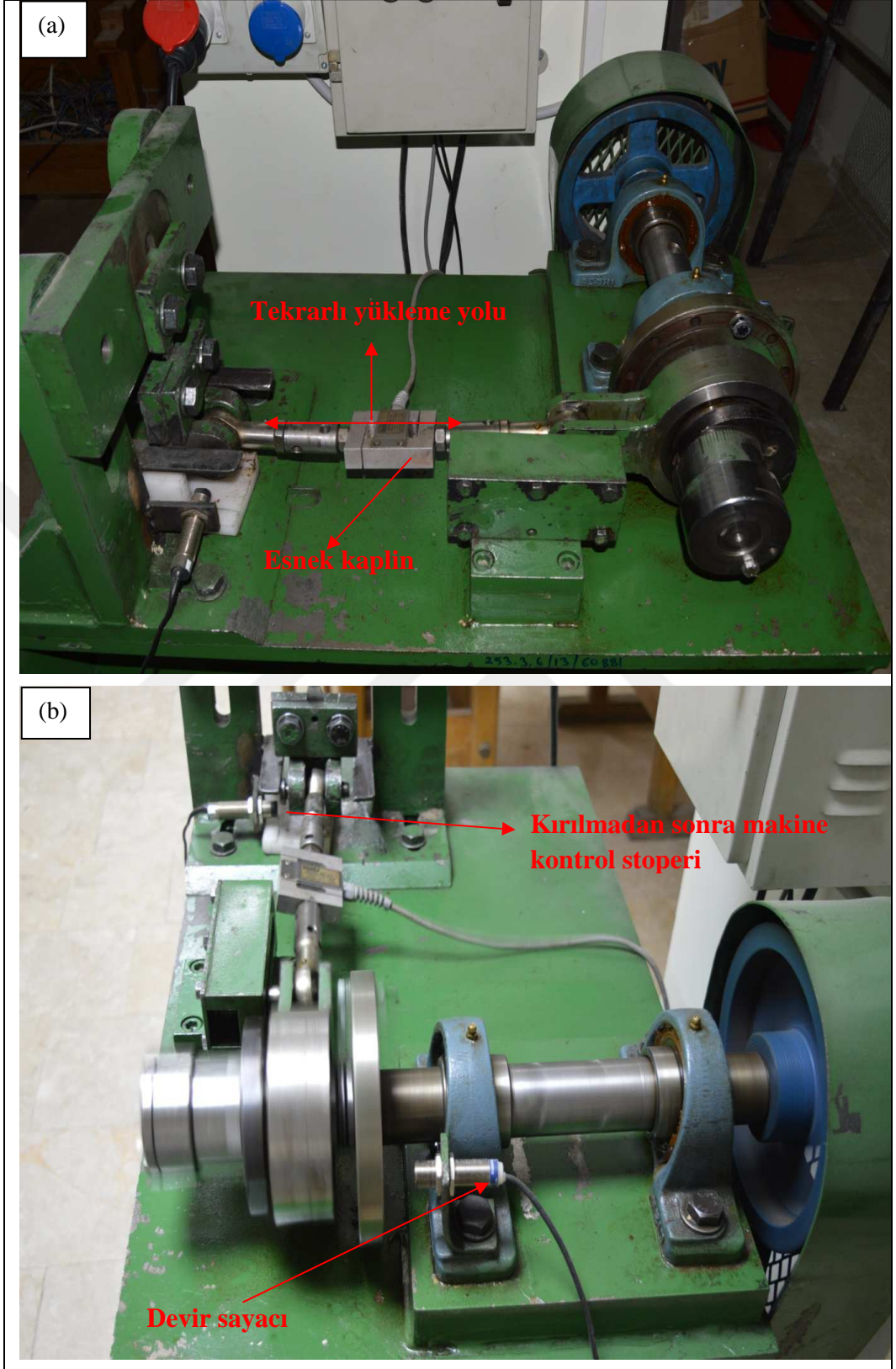
Kaynak bölgeleri üzerinde sertliği ölçmek için Vickers mikro sertlik test makinesi kullanılmıştır. Ayrıca, 500g yük ve 10s süre kullanılarak kaynak bölgelerinin mikro sertlikleri ölçülmüştür. Böylece, pimsiz ve konik pim destekli kaynakların mikro sertlik ölçümleri elde edilmiştir.

#### 6.6.5. Yorulma testi

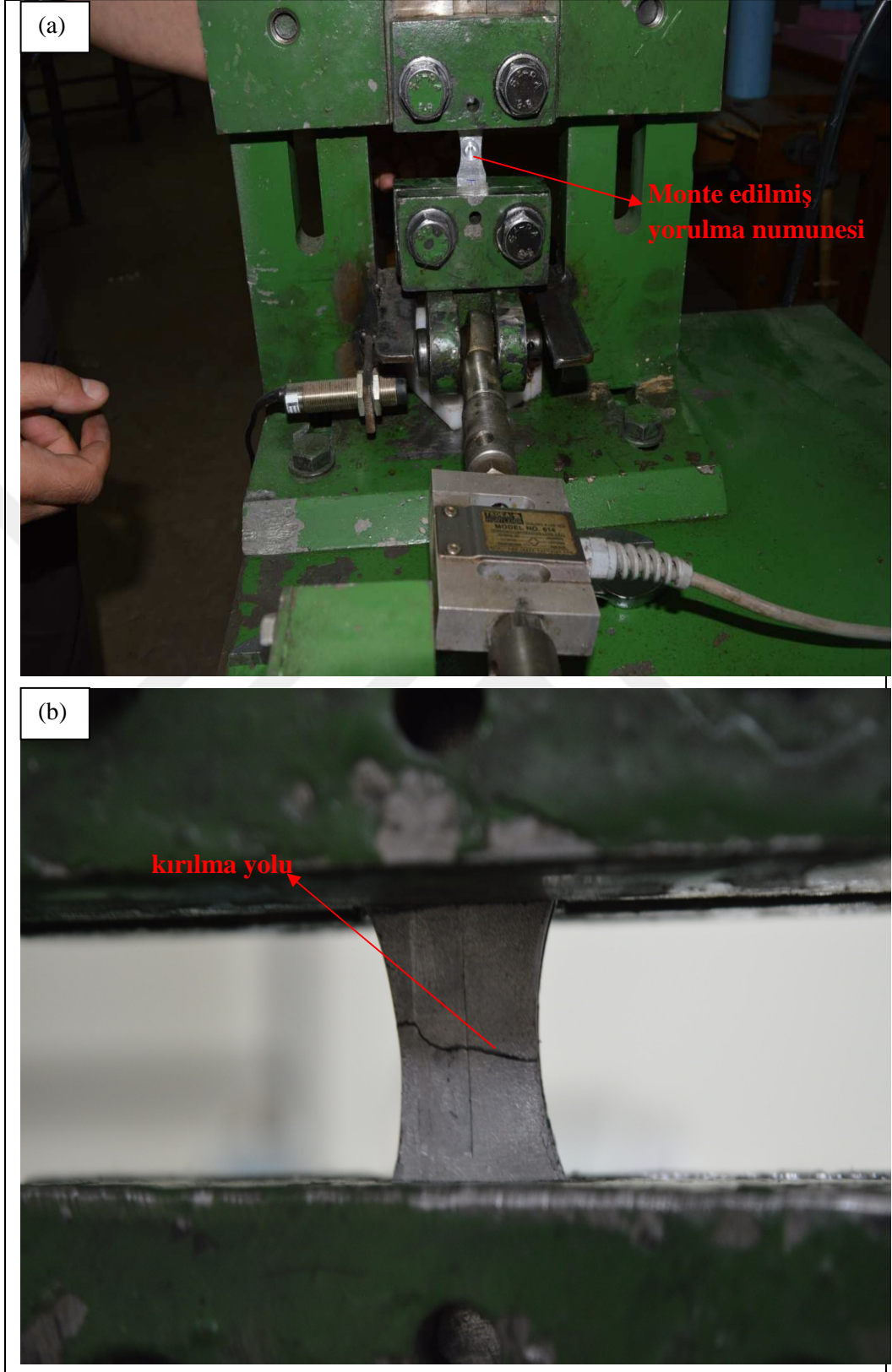
Şekil 6.18’de eğilmeli yorulma yüklemesinin şematiği görüntülenmiştir. Şekil 6.19’daki gösterilen eğme yorulması test makinesi ile bütün yorulma testleri için kullanılmıştır. Yorulma numuneleri makineye monte edilmiş ve değişen yük koşulları altında tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneysel testler için tamamen ters sinüs biçimli kuvvet yüklemesi ( $R = -1$ ) kullanılmıştır. Şekil 6.20’de eğmeli yorulma testi makinesi üzerinde monte edilmiş yorulma numunesi gösterilmektedir. Ayrıca, dinamik yükleme devirleri sırasında, bir numunede gözlemlenen tipik kırılma modeli gösterilmektedir.



Şekil 6.18. Kesme numunesinin dinamik yüklemesi şeması (a) ön/üstten görünüm; (b) pimsiz kaynaklı yorulma numunesinin yan görünümü; (c) konik pimli kaynaklı yorulma numunesinin yan görünümü



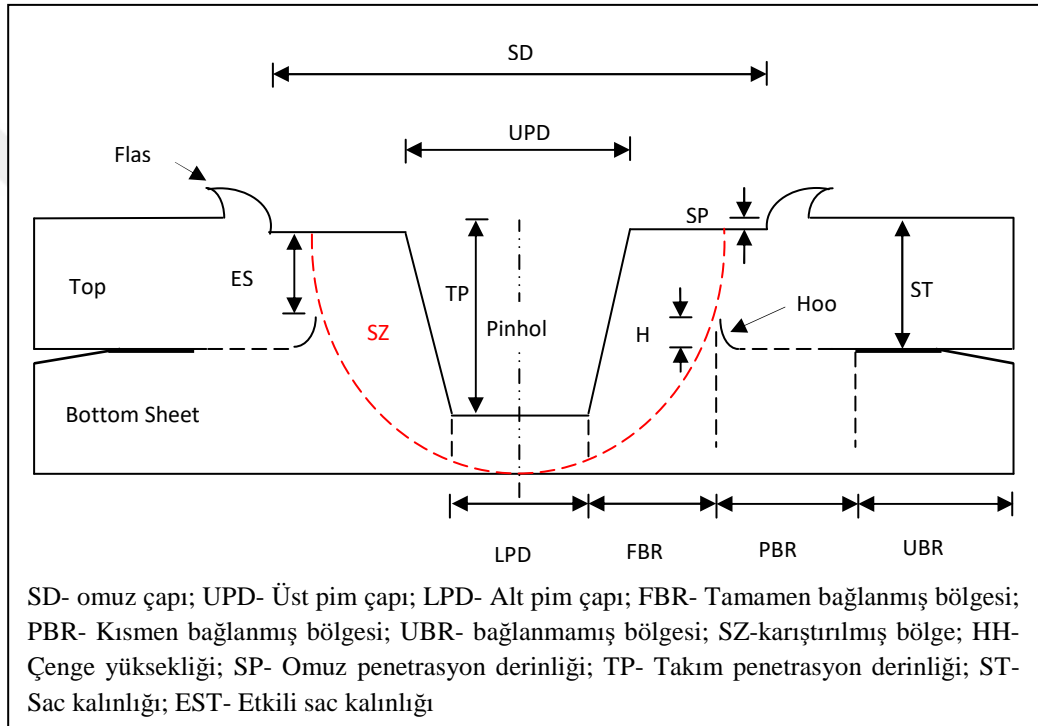
Şekil 6.19. Eğilmeli yorulma makinesi: (a) önden görünüş; (b) yandan görünüş



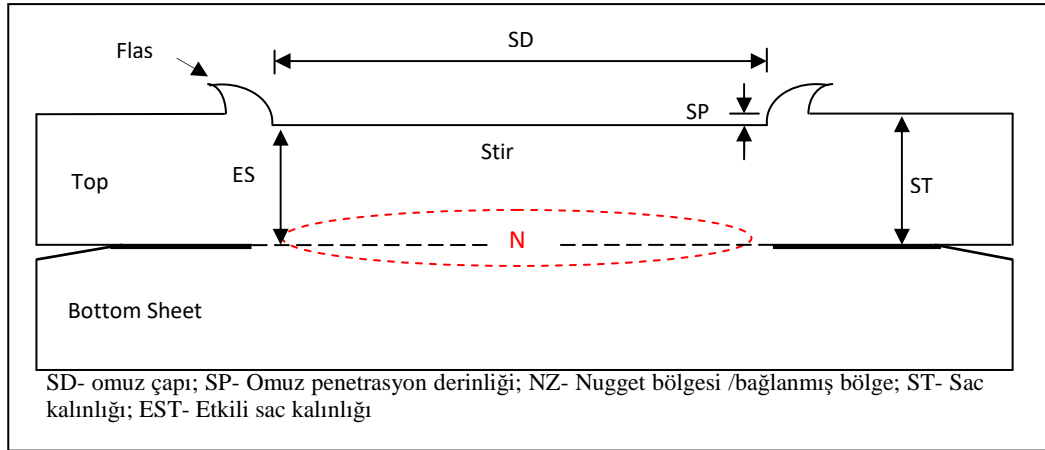
Şekil 6.20. Yorulma makinesindeki monte edilmiş yorulma numunesi: (a) tekrarlı yükleme öncesi yorulma numunesi; (b) tekrarlı yükleme koşulu sırasında yorulma numunesi

### 6.6.6. Makro ve mikroyapı analizleri

Çeşitli büyütmelemlerde ZEISS ışık optik mikroskop (OM) kullanılarak hazırlanan metalografik numuneleri incelenmiştir. Optik mikroskop yardımıyla kaynak bölgelerinin mikroyapıları gözden geçirilmiş ve analiz edilmiştir. Tipik konik pimli ve pimsiz bağlantıların kesit görünüşleri sırasıyla şekil 6,21 ve 6,22'de gösterilmektedir. Sonuç olarak, mikro analizlere göre bazı vurgulanmış kaynak özellikleri (Şemalar 6,21 ve 6,22) araştırılacaktır.



Şekil 6.21. Konik pimli FSSW bağlantının kesit görünüşü



Şekil 6.22. Pimsiz FSSW bağlantının kesit görünüşü

### 6.6.7. Kırılma yüzeyi analizi

Bağlantıların kırılma morfolojilerini tespit etmek için taramalı elektron mikroskopu yardımıyla monoton ve tekrarlı yükler altındaki kırılmış yüzeyler incelenmiş ve analiz edilmiştir. Aynı şekilde, ZEISS optik mikroskop kullanılarak kırılma yüzeylerinin makroskopik görünümleri incelenmiştir.

## 7. SONUÇLAR

### 7.1. Görsel Sonuçlar

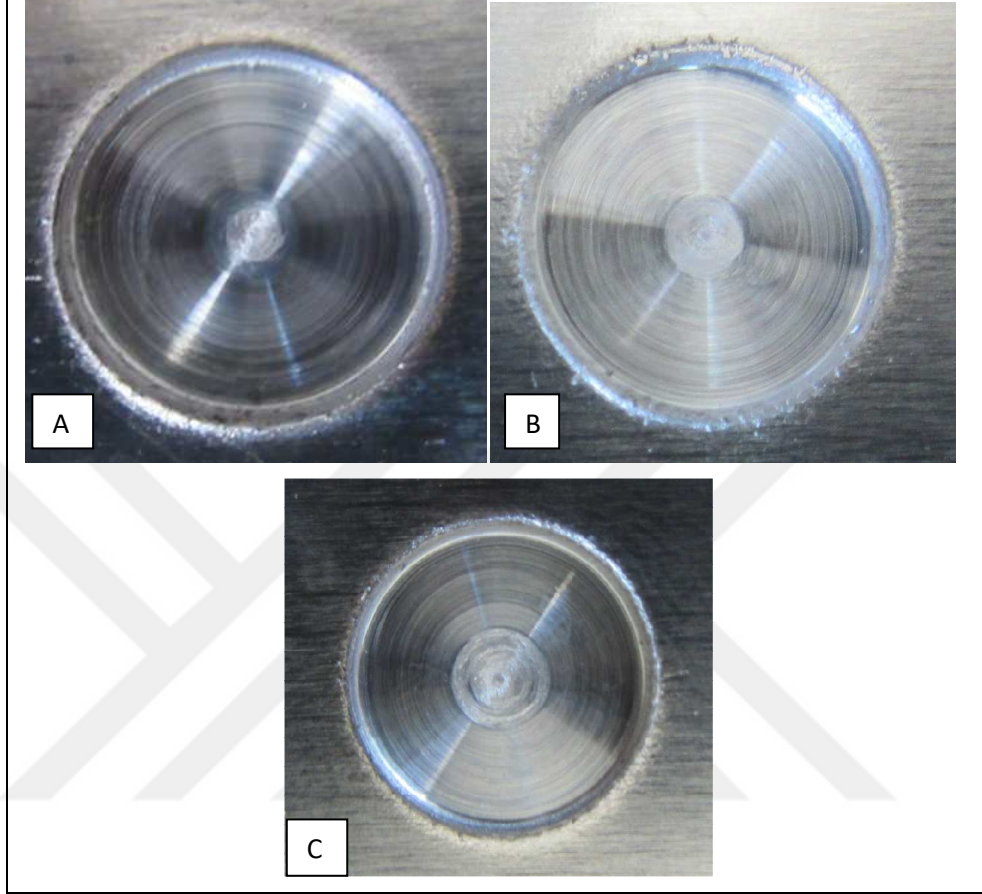
AA2219-O alaşımı levhalarının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantı yüzey görünümleri incelenmiştir. Geometrik görünüm, renk ve diğer gözlemlenebilir bilgisi açısından bağlantının görünümleri tarif edilmiştir. Böylece, sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların görünümünü tespit etmek için çapak morfolojileri, oluşturulan takım delikleri, omuz penetrasyonu ve karıştırılmış bölgenin rengi gibi özellikleri gözlemlenmiştir. Çıplak göz yardımıyla tüm kaynaklı bağlantılar ilişkili olası kaynak hataları dikkatle incelenip ve rapor edilmiştir.

#### 7.1.1. Pimsiz kaynaklı bağlantının görsel sonuçları

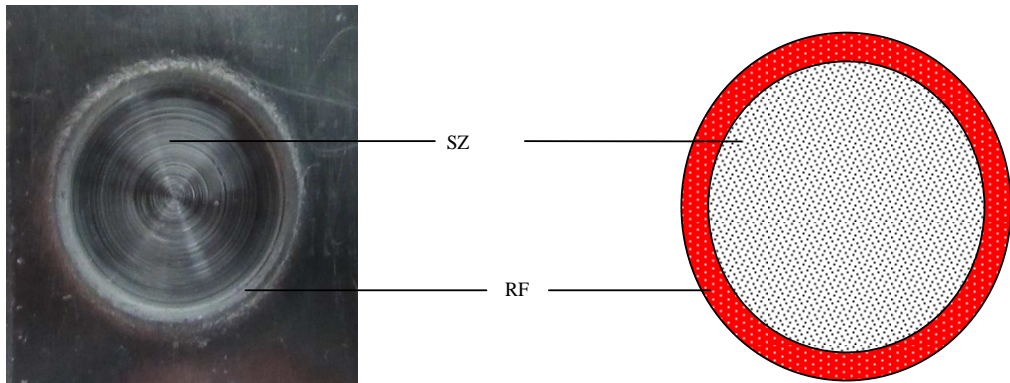
AA2219-O alaşımli plakalarının pimsiz sürtünme karıştırma nokta kaynağı, sığ bir kaviteye ya da oyuğa sahip olmuştur. Elde edilen pimsiz bağlantının sığ boşlukları, takımın omuz penetrasyon derinliğine eşit olmuştur. Pimsiz takım yardımıyla elde edilen sığ ortak görünümler şekil 7.1'de gösterilmiştir. Pimsiz kaynaklı bağlantının oluşturulan sığ boşluğunda son derece yansıtıcı halkalar görülmektedir. Bu özellik, sürtünme karıştırma işlemi sırasında malzeme süzmesi ilişkilendirilmektedir. Benzer şekilde, 0o eğim açısından dolayı bütün FSSW'li bağlantılarda düzgün malzeme dışarı akması (çapak olarak) gözlemlenmiştir.

Aynı şekilde AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağında pimsiz takım kullanılarak sığ boşluğunun çevresi boyunca evrensel ince ve küçük çapak hacmi oluşturulmuştur. Şekil 7,1'de pimsiz FSSW'li bağlantının çapak morfolojisi gösterilmiş ama şekil 7,2'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bütün pimsiz sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarda halka çapak (RF) gözlemlenmiştir. Halka çapak, pimsiz takımın daldırılmasından ve geri çekilmesinden sonra karıştırılmış bölgenin çevresindeki dış etrafında ekstrüde edilmiş malzemenin düzgün çevresel yakasıdır. Her kaynakta oluşan halka çapak aynı biçime sahip olmuştur. Aynı

zamanda oluşturulmuş halka çapakta düzgün kalınlık ve ince dışarı itilmiş uzunluk özelliklerine sahip olmuştur.



Şekil 7.1. Üretilmiş pimsiz bağlantının yüzey görünümleri: (a) 1500dev/dak'lık takım dönme hızı, 0,45mm'lik dalma derinliği ve 8s'lik kalma süresi; (b) 1600dev/dak'lık takım dönme hızı, 0,45mm'lik dalma derinliği ve 4s'lik kalma süresi; (c) 1400dev/dak'lık takım dönme hızı, 0,45mm'lik dalma derinliği ve 5s'lik kalma süresi

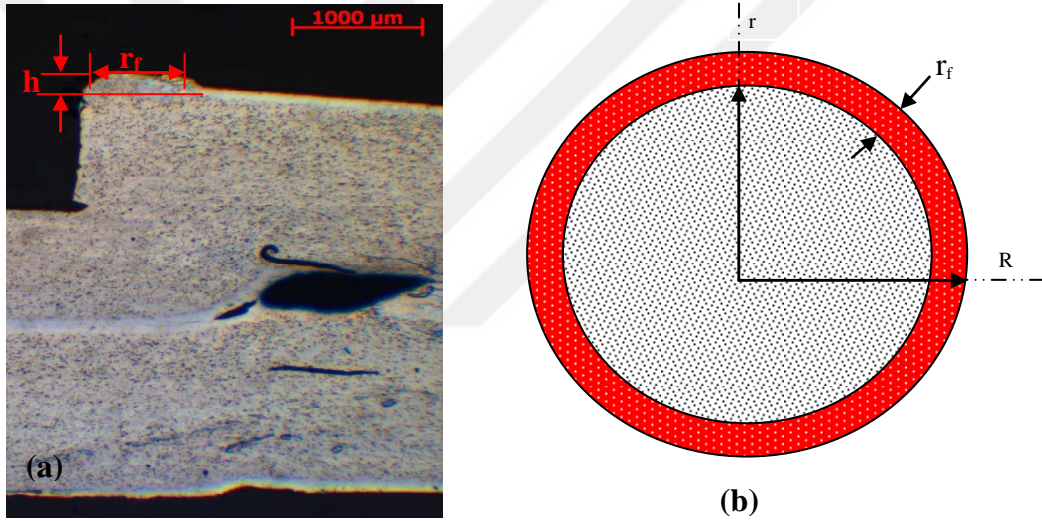


SZ: karıştırılmış bölge; RF: halka çapak (ile düzgün dışarı ettilen uzunluğu)

Şekil 7.2. 1,6mm kalınlığındaki AA2219-O alaşımının pimsiz kaynaklı bağlantının özellikleri

### 7.1.1.1. Pimsiz kaynaklı bağlantının çıkarılmış çapak hacmi

Karıştırılmış bölgenin çevresi etrafında düzgün dairesel çıkarılan çapak oluşturulmuş ve bu çapağın kolaylık analizini sağlamak için halka çapak olarak adlandırılmıştır. Pimsiz FSSW'li bağlantında çıkarılmış çapak hacminin belirlenmesi için şekil 7.3'ye dayanmaktadır. Şekil 7.3a'da halka çapağın kesit görünümü ve onun özellikleri gösterilmektedir.  $r_f$  ve  $h$ , sırasıyla halka çapağın (RF) dışarı ettilen uzunluğu ve kalınlığıdır. Ayrıca şekil 7.3b'de  $r$ , takımın yarıçapıdır ve Denklem (7.1)'de gösterildiği gibi  $R$ , takımın yarıçapı ile RF'in dışarı ettilen uzunluğu toplamıdır. Ayrıca, katı boş silindir veya katı halka matematiksel ifadesine dayalı olarak elde edilen çapak hacmi değerlendirilmiştir.



Şekil 7.3. Pimsiz kaynaklı bağlantındaki çapağın morfolojisi (a) kesit görünüşü; (b) şematik plan illüstrasyonu

$$R = r + r_f \quad (7.1)$$

Bu nedenle Denklem (7.2)'de verilen ifade ile çapak hacmi  $V_f$  hesaplanmıştır. Bu çalışma için kullanılan yarıçap  $r$ , 5mm olmuştur. Azaltılmış çapak hacminin değerlendirilmesi için Denklem (7.2) içine bu değer ( $r=5\text{mm}$ ) ve Denklem (7.1) ikame edilerek Denklem (7.3) elde edilmiştir.

$$V_f = \pi(R^2 - r^2)h \quad (7.2)$$

$$V_f = \pi[10r_f + r_f^2]h \quad (7.3)$$



Pimsiz bağlantılar için tablo 7.1’de ölçülmüş halka çapak özellikleri gösterilmektedir. Halka çapağın dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığı yardımıyla (Denklem (7.3) kullanılarak) elde edilen çapak hacimleri değerlendirilmiştir. Böylece, şekil 7,2’de 1,6mm kalınlığındaki AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında elde edilen pimsiz bağlantıların hesaplanmış çapak hacimleri gösterilmektedir. Pimsiz kaynaklı bağlantılar üzerinde oluşan halka çapak ve diğer kaynak parametreleri arasındaki ilişkiler incelenebilir.

Tablo 7.1. Pimsiz bağlantının halka çapağının dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığı

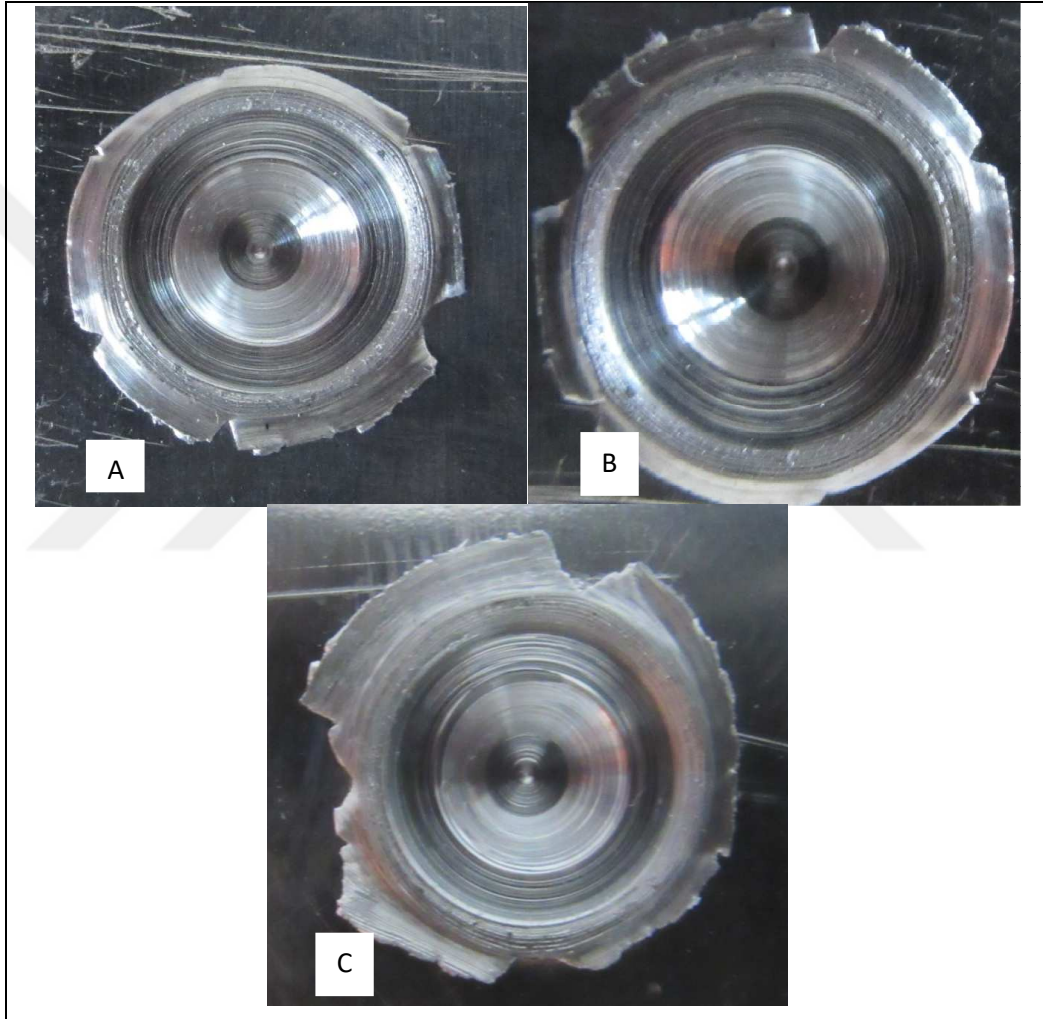
Kaynak kodu	Halka dışarı uzunluğu	çapağın itilen $r_f$ (mm)	$r_f$ 'nin ortalaması (mm)	Halka kalınlığı h (mm)	çapağın h (mm)	h'nin ortalaması (mm)
PL 1	0,4	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1
PL 2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1
PL 3	0,4	0,5	0,7	0,5	0,2	0,2
PL 4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1
PL 5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,2	0,2
PL 6	0,6	0,7	0,5	0,6	0,3	0,3
PL 7	0,4	0,5	0,5	0,5	0,2	0,1
PL 8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1	0,2
PL 9	0,6	0,4	0,4	0,5	0,2	0,2

Tablo 7.2. Pimsiz bağlantıların çıkarılmış çapak hacmi

Kaynak kodu	Halka dışarı itilen ortalaması $r_f$ (mm)	Halka çapağın kalınlığı h (mm)	Çapak hacmi $V_f$ (mm <sup>3</sup> )
PL 1	0,3	0,1	0,97
PL 2	0,3	0,1	0,97
PL 3	0,5	0,2	3,30
PL 4	0,3	0,1	0,97
PL 5	0,5	0,2	3,30
PL 6	0,6	0,3	6,00
PL 7	0,5	0,1	1,65
PL 8	0,4	0,1	1,31
PL 9	0,5	0,2	3,30

### 7.1.2. Pimli kaynaklı bağlantının görsel sonuçları

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapıldıktan sonra malzeme yüzeyinde pimli kaynak edilmiş AA2219-O alaşımının bağlantıları, anahtar deliğine sahip olmuştur. 2,90mm, 2,92mm ve 2,95mm dalma derinlikleri ile elde edilen bağlantıların yüzey görünümleri şekil 7.4'ta gösterilmektedir. Pimli FSSW takımının yapısı nedeniyle elde edilen bağlantılarda pim şekilli deliği bırakmaktadır.

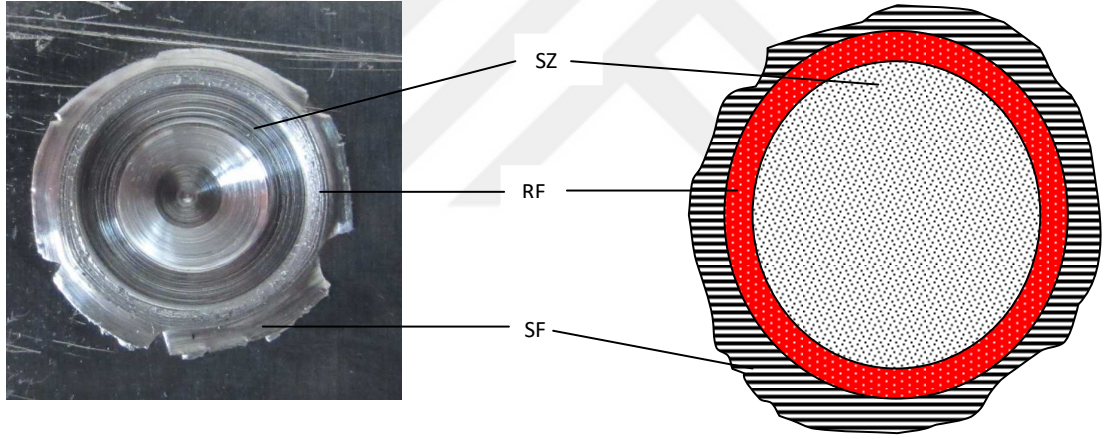


Şekil 7.4. 1400dev/dak'lık takım dönme hızı ile üretilen bağlantıların yüzey görünümü (a) 2,90mm dalma derinliğinde elde edilen pim deliği ile çevresel çapak (b) 2,92mm dalma derinliğinde elde edilen pim deliği ile çevresel çapak (c) 2,95mm dalma derinliğinde elde edilen pim deliği ile çevresel çapak

Normal atmosferik koşullar altında elde edilen FSSW'li bağlantıların omuz daldırılan yüzeylerde ve pim daldırılan bölümlerde göze çarpan şekillendirici yansıtıcı özellikleri vardı. Aynı biçimde ana metalin malzemesine göre pimli kaynağın karıştırılmış bölgeler daha yüksek yansıtıcı özelliklerine sahip olmuştur. Ayrıca

omuz daldırılan yüzeylerde ve pim daldırılan yüzeylerde halkaların konsantrik seti gözlemlenmiştir. İşparçalarının deformasyonundan dolayı bu gözlemler ortaya çıkmıştır. Böylece, malzemenin kademeli süzmesinin nedeniyle daldırılmış kaynak bölgelerinde konsantrik halka benzeri bir görünüm ortaya çıkmıştır. Bu konsantrik halka benzeri bir görünüm, karıştırılmış bölümlerin şekillendirici yansıtıcı özelliklerine katkıda bulundurmuş olabilir.

Şekil 7.5'te konik pim destekli kaynak gerçekleştirilmiş ve bu şekilde oluşturulan çapak, iki önemli bölüme bölünmüştür. Onlar, halka çapak (düzgün geometri olan bölüm) ve kırık çapak (düzgün geometri olmayan bölüm) bölgeleridir. Ayrıca şekil 7.5'de oluşan çapakların grafik bir gösterimi gösterilmektedir. Halka çapağın düzgün/eşit geometrisi gözlemlendiğinden dolayı dijital kumpas kullanılarak oluşan halka çapak ölçümü gerçekleştirilmiştir.



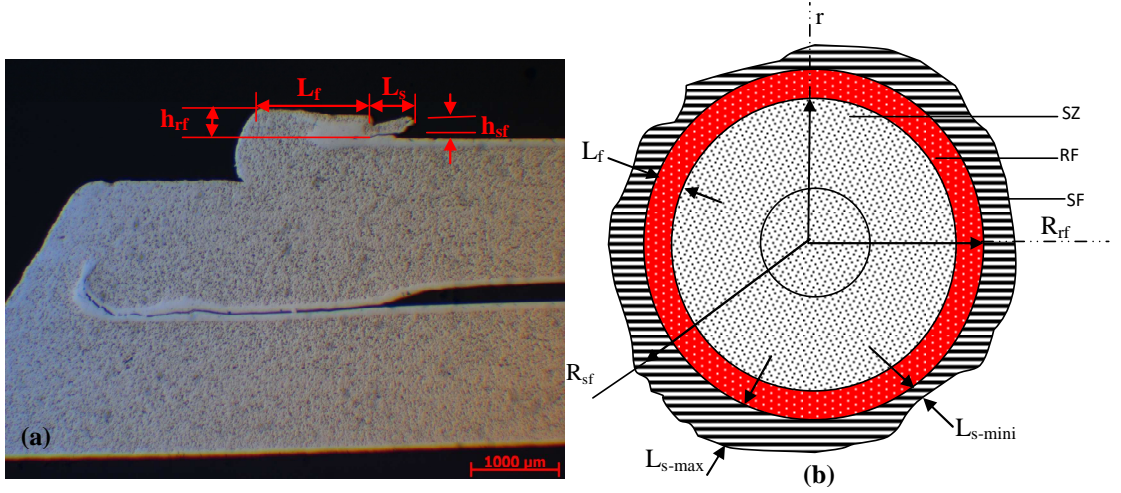
SZ: karıştırılmış bölge; RF: halka çapak (eşit/düzgün dışarı ettilen uzunluk); SF: kırık çapak (eşit/düzgün olmayan dışkenar uzunluğu)

Şekil 7.5. 1,6mm kalınlığındaki AA2219-O alaşımının konik pim ile kaynak edilmiş bağlantı

#### 7.1.2.1. Konik pimli bağlantıların çapak hacmi

Şekil 7.6'da konik pim ile elde edilen çapak morfolojisi örneklenmiştir. Bahsedildiği üzere pimli kaynaklar yapıldıktan sonra iki çapak türü (halka çapak –RF ve kırık çapak-SF) oluşturulmuştur. Böylece halka çapağın dış uzunluğu, karışmış bölgenin çevresel eksenine etrafında düzgün şekilde oluşturulmuştur. Fakat kırık çapak dış düzgün şekilde değildir. Karıştırma bölgesinden çapak dışına sürekli itilmesinden sonra, çapağın dışındaki çevresinde bazı kırılmalar ya da kırık gözlemlenmiştir. Aşırı

dışarı itme kuvveti nedeniyle çapağın dışındaki çevresinin kesmesi oluşturulmuştur.



$L_f$ : halka çapağın dışarı itilen uzunluk;  $r$ : karıştırılmış bölgenin yarıçapı ya da daldırılmış omuz deriniği;  $R_{rf}$  karıştırılmış bölgenin merkezinden halka çapağın yarıçapı;  $R_{sf}$  karıştırılmış bölgenin merkezinden kırık çapağın yarıçapı;  $L_{s-max}$  kırık çapağın maksimum dışarı itilen uzunluğu;  $L_{s-mini}$  kırık çapağın asgari dışarı itilen uzunluğu;  $h_{rf}$  halka çapağın kalınlığı;  $h_{sf}$  kırık çapağın kalınlığı

Şekil 7.6. Konik pim ile kaynaklı bağlantının çapak morfolojisi (a) kesit görünüşü; (b) şematik görünümü

Bu nedenle, yukarıda açıklandığı gibi çapağın genel hacmi, halka çapak hacmini ve kırık çapak hacmini içermektedir. Denklem (7.4)'te çapağın genel hacminin matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$V_f = V_{rf} + V_{sf} \quad (7.4)$$

Bu denklemde  $V_f$  çapak genel hacmidir,  $V_{rf}$  halka çapağın hacmidir ve  $V_{sf}$  kırık çapağın hacmidir.

(a) Halka çapağın hacmi

Böylece, Denklem (7.5) kullanılarak halka çapağın (konik pim takımı) hacmi hesaplanmaktadır.

$$V_{rf} = \pi [R_{rf}^2 - r^2] h_{rf} \quad (7.5)$$

Denklem (7.5) ifadesinde  $R_{rf}$  karıştırılmış bölgenin merkezinden halka çapağın yarıçapıdır,  $r$  daldırılan omuzun yarıçapıdır ve  $h_{rf}$  halka çapağın kalınlığıdır.

Denklem (7.6)'de karıştırılmış bölgenin merkezinden halka çapağın yarıçapı ifade edilmekte ve  $r$ 'nin değeri, 5mm'ye eşittir.

$$R_{rf} = L_f + r \quad (7.6)$$

Bu nedenle, halka çapağın hacmi denkleminin indirgenmesi için Denklem (7.5)'e  $r$  değeri ve Denklem (7.6) değerinin yerine konmasıyla azaltılabilir. Sonuç olarak konik pimli kaynaktaki halka çapağı hesaplamak için Denklem (7.7) ifadesi kullanılmaktadır.

$$V_{rf} = \pi[L_f^2 + 10L_f]h_{rf} \quad (7.7)$$

Konik pimli kaynaklar için halka çapak özelliklerinin ölçülen değerleri (RF'ın dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığı) tablo 7.3 de verilmiştir. Ancak Denklem (7.7) kullanılarak halka çapağın hacmi hesaplanıp ve tablo 7.4'de gösterilmiştir.

Tablo 7.3. Konik pim ile kaynaklı bağlantıların halka çapak özellikleri

Kaynak kodu	Halka itilen $L_f$ (mm)	çapağın dışarı uzunluğu $L_f$	Ortalaması $L_f$ (mm)	Halka çapağın kalınlığı $h_{rf}$ (mm)	Ortalaması $h_{rf}$ (mm)
P 1	0,8	0,8	0,80	0,7	0,63
P 2	0,9	0,9	0,93	0,6	0,57
P 3	1,1	1,1	1,10	0,8	0,67
P 4	0,8	0,8	0,87	0,6	0,63
P 5	1,06	0,9	0,95	0,4	0,53
P 6	1,2	1,1	1,13	0,6	0,70
P 7	0,7	0,6	0,63	0,6	0,57
P 8	0,7	0,9	0,80	0,6	0,60
P 9	1,0	1,0	0,97	0,6	0,63

Tablo 7.4. Konik pim ile kaynaklı bağlantıların hesaplanmış halka çapağın hacmi

Kaynak kodu	Halka çapağın uzunluğu $L_f$ (mm)	Halka çapağın kalınlığı $h_{rf}$ (mm)	Halka çapağın hacmi $V_{rf}$ (mm <sup>3</sup> )
P 1	0,80	0,63	17,11
P 2	0,93	0,57	18,21
P 3	1,10	0,67	25,71
P 4	0,87	0,63	18,72
P 5	0,95	0,53	17,33
P 6	1,13	0,70	27,67
P 7	0,63	0,57	12,00
P 8	0,80	0,60	16,29
P 9	0,97	0,63	21,07

(b) Kırık çapağın hacmi

Benzer şekilde, Denklem (7.8)'de gösterildiği gibi, kırık çapağın hacmi olarak ifade edilebilir.

$$V_{sf} = \pi[R_{sf}^2 - R_{rf}^2]h_{sf} \quad (7.8)$$

Bu Denklem (7.8)'de  $h_{sf}$  kırık çapağın kalınlığıdır. Ayrıca, Denklem (7.8) içine  $R_{sf}$  (Denklem (7.9)) ve  $r$  (5mm) değerleri yerine konularak Denklem (7.8) azaltılabilir. Denklem 7.8, Denklem (7.11) olmuştur. Ayrıca  $R_{rf}$  'ın ifadesi Denklem (7.10)'da verilmektedir.

$$R_{sf} = R_{rf} + L_s \quad (7.9)$$

$$R_{rf} = L_f + r \quad (7.10)$$

$$V_{sf} = \pi[(2L_f + 10)L_s + L_s^2]h_{sf} \quad (7.11)$$

Kırık çapağın maksimum ve minimum dışarı itilen uzunlukları ölçülmüştür. Ortalama değeri, kırık çapağın yaklaşık uzunluğu olarak kullanılmıştır. Denklem (7.12)'de yaklaşık uzunluk ifadesi gösterilmiştir.

$$L_s = \frac{[L_{s-max} + L_{s-mini}]}{2} \quad (7.12)$$

$L_s$  kırık çapağın yaklaşık uzunluğudur,  $L_{s-max}$  kırık çapağın maksimum itilen uzunluğudur ve  $L_{s-mini}$  kırık çapağın minimum itilen uzunluğudur. Bu nedenle, Denklem (7.11)'de Denklem (7.12) yerine konularak ihtiyaç duyulan kırık çapağın hacmi ifadesi elde edilmiştir. Bu ifade, Denklem (7.13)'de verilmiştir.

$$V_{sf} = \pi \left[ (2L_f + 10) \left( \frac{L_{s-max} + L_{s-mini}}{2} \right) + \left( \frac{L_{s-max} + L_{s-mini}}{2} \right)^2 \right] h_{sf} \quad (7.13)$$

Aynı şekilde, ölçülen kırık çapağın dışarı itilmiş uzunlukları tablo 7.5'de verilmiştir. Ayrıca tablo 7.6'da hesaplanmış kırık çapağın yaklaşık itilen uzunlukları ve kalınlıkları gösterilmiştir. Denklem 7.13 ya da 7.11 kullanılarak tablo 7.7'de görüldüğü gibi kırık çapağın hacmi hesaplanmıştır.

Tablo 7.5. Kırık çapağın maksimum ve minimum dışarı itilen uzunlukları

Kaynak kodu	Max. kırık çapağın dışarı itilen (mm)	uzunluğu $L_{s-max}$	Ortalama $L_{s-max}$ (mm)	Mini. kırık çapağın dışarı itilen (mm)	uzunluğu $L_{s-mini}$	Ortalama $L_{s-mini}$ (mm)		
P 1	1,40	1,50	1,40	1,43	0,90	1,20	1,20	1,10
P 2	1,20	1,90	1,70	1,60	1,40	0,70	0,40	0,83
P 3	1,20	1,30	1,50	1,33	0,90	0,40	0,50	0,60
P 4	1,50	1,50	1,30	1,43	0,30	0,30	0,30	0,30
P 5	1,94	1,43	2,20	1,86	0,04	0,20	0,10	0,11
P 6	0,80	1,20	1,00	1,00	0,80	0,50	0,30	0,53
P 7	2,00	1,70	2,40	2,03	0,10	1,00	0,80	0,63
P 8	1,50	1,40	1,30	1,40	0,80	0,40	0,00	0,40
P 9	1,20	1,10	1,30	1,20	0,10	0,40	0,10	0,20

Tablo 7.6. Kırık çapağın yaklaşık dışarı itilen uzunlukları ve kalınlıkları

Kaynak kodu	Ortalama $L_{s-max}$ (mm)	Ortalama $L_{s-mini}$ (mm)	Yaklaşık uzunluk $L_s$ (mm)	kırık çapağın kalınlığı $h_{sf}$ (mm)	Ortalama $h_{sf}$ (mm)		
P 1	1,43	1,10	1,27	0,10	0,12	0,10	0,11
P 2	1,60	0,83	1,22	0,10	0,10	0,12	0,11
P 3	1,33	0,60	0,97	0,20	0,12	0,18	0,17
P 4	1,43	0,30	0,87	0,10	0,10	0,08	0,09
P 5	1,86	0,11	0,99	0,10	0,08	0,10	0,09
P 6	1,00	0,53	0,77	0,10	0,08	0,10	0,09
P 7	2,03	0,63	1,33	0,08	0,06	0,10	0,08
P 8	1,40	0,40	0,90	0,08	0,10	0,08	0,09
P 9	1,20	0,20	0,70	0,10	0,08	0,10	0,09

Tablo 7.7. Hesaplanmış kırık çapağın hacimleri

Kaynak kodu	Yaklaşık uzunluk $L_s$ (mm)	Ortalama $h_{sf}$ (mm)	Ortalama $L_f$ (mm)	Kırık çapağın hacmi $V_{sf}$ (mm <sup>3</sup> )
P 1	1,27	0,11	0,80	5,65
P 2	1,22	0,11	0,93	5,52
P 3	0,97	0,17	1,10	6,83
P 4	0,87	0,09	0,87	3,10
P 5	0,99	0,09	0,95	3,61
P 6	0,77	0,09	1,13	2,84
P 7	1,33	0,08	0,63	4,21
P 8	0,90	0,09	0,80	3,18
P 9	0,70	0,09	0,97	2,50

(c) Çapağın genel hacmi

Tek denkleme dayanılarak çıkarılmış çapağın genel hacmi hesaplanabilir ve verilen Denklem (7.14) ile genel hacmi belirlenmektedir. Denklem (7.14)'i elde etmek için Denklem (7.4) içine Denklemler (7.7) ve (7.13) konulmuştur. Bu nedenle, halka çapağın hacmi ve kırık çapağın hacminin eklenmesi, konik pim kaynaklarının genel çapak hacmini sağlamıştır.

$$V_f = \pi[L_f^2 + 10L_f]h_{rf} + \pi[(2L_f + 10)L_s + L_s^2]h_{sf} \quad (7.14)$$

Sonuç olarak, Denklem (7.14) kullanılarak konik pim ile kaynaklı bağlantıların genel veya toplam çapak hacimleri tespit edilmiştir. Diğer yandan RF ve SF hacimleri ekleyerek toplam çapak hacimleri belirlenebilir. Tablo 7.8'de gösterildiği gibi toplam/genel çapak hacimleri sağlanmıştır.

Tablo 7.8. Konik pim ile kaynaklanmış bağlantıların çapağın genel hacimleri

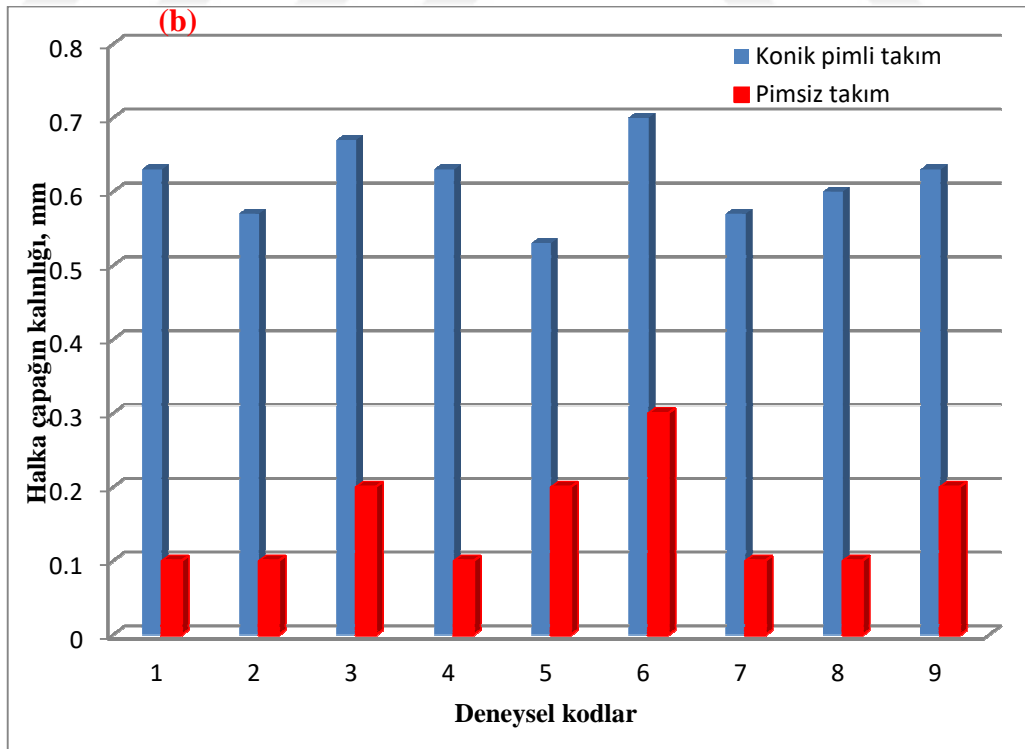
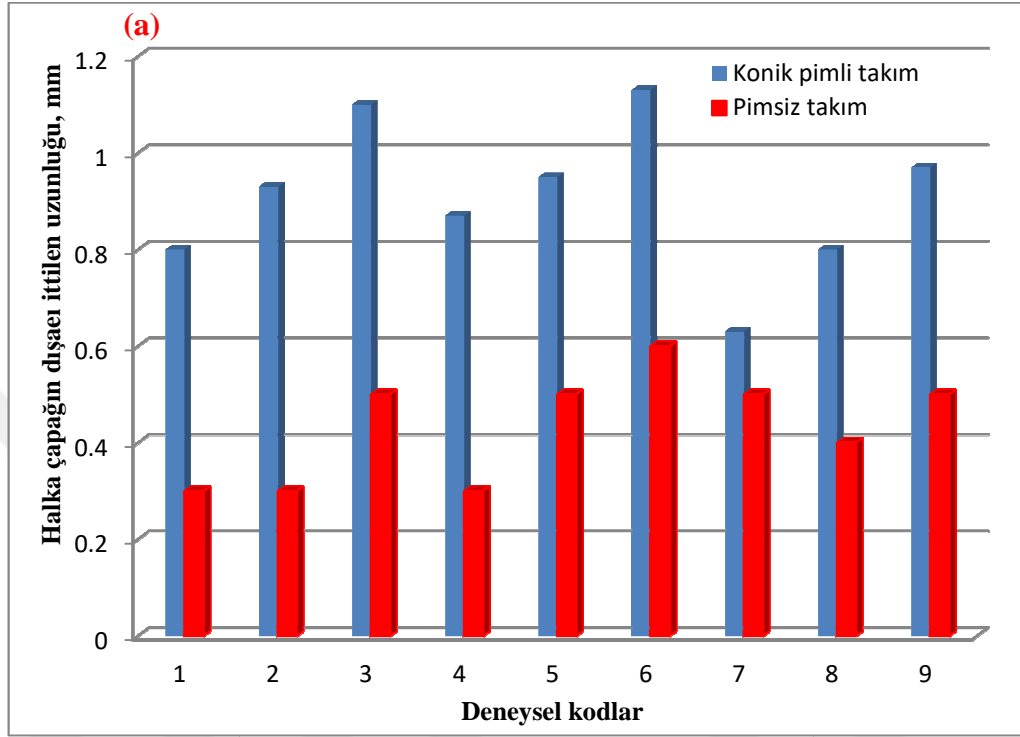
Kaynak kodu	Halka çapağın hacmi $V_{rf}$ (mm <sup>3</sup> )	Kırık çapağın hacmi $V_{sf}$ (mm <sup>3</sup> )	Çapağın genel hacmi $V_f$ (mm <sup>3</sup> )
P 1	17,11	5,65	22,76
P 2	18,21	5,52	23,73
P 3	25,71	6,83	32,54
P 4	18,72	3,10	21,83
P 5	17,33	3,61	20,94
P 6	27,67	2,84	30,51
P 7	12,00	4,21	16,21
P 8	16,29	3,18	19,47
P 9	21,07	2,50	23,57

## 7.2. Çapak Özelliklerinde Kaynak Parametrelerinin Analitik Rollerini

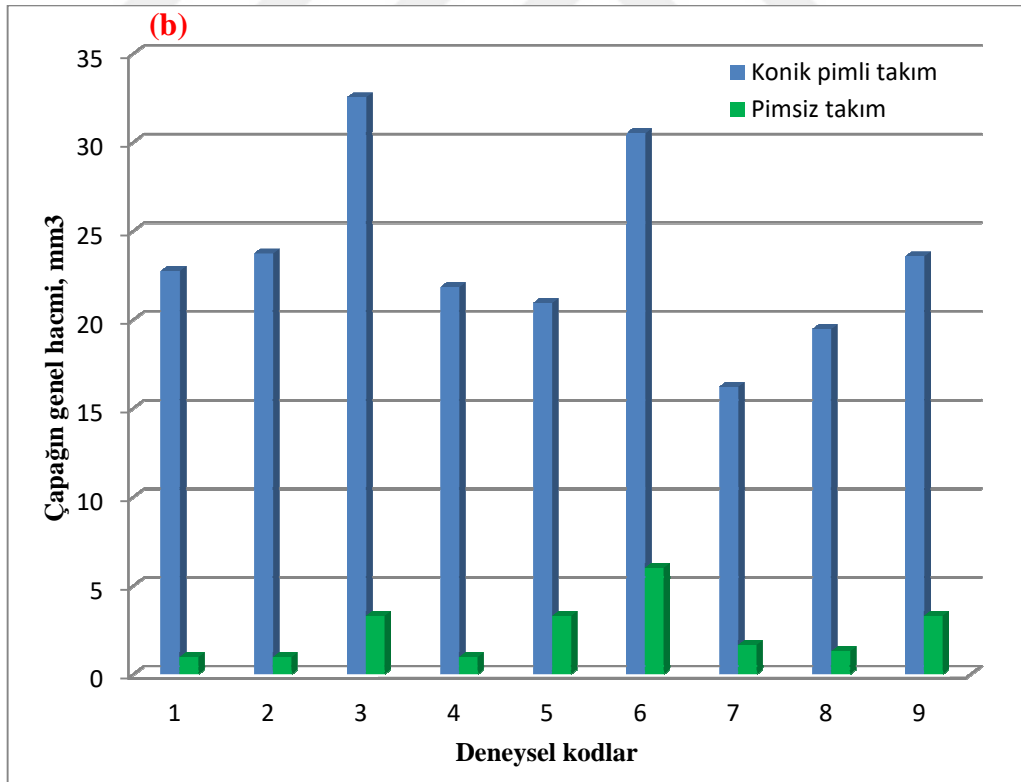
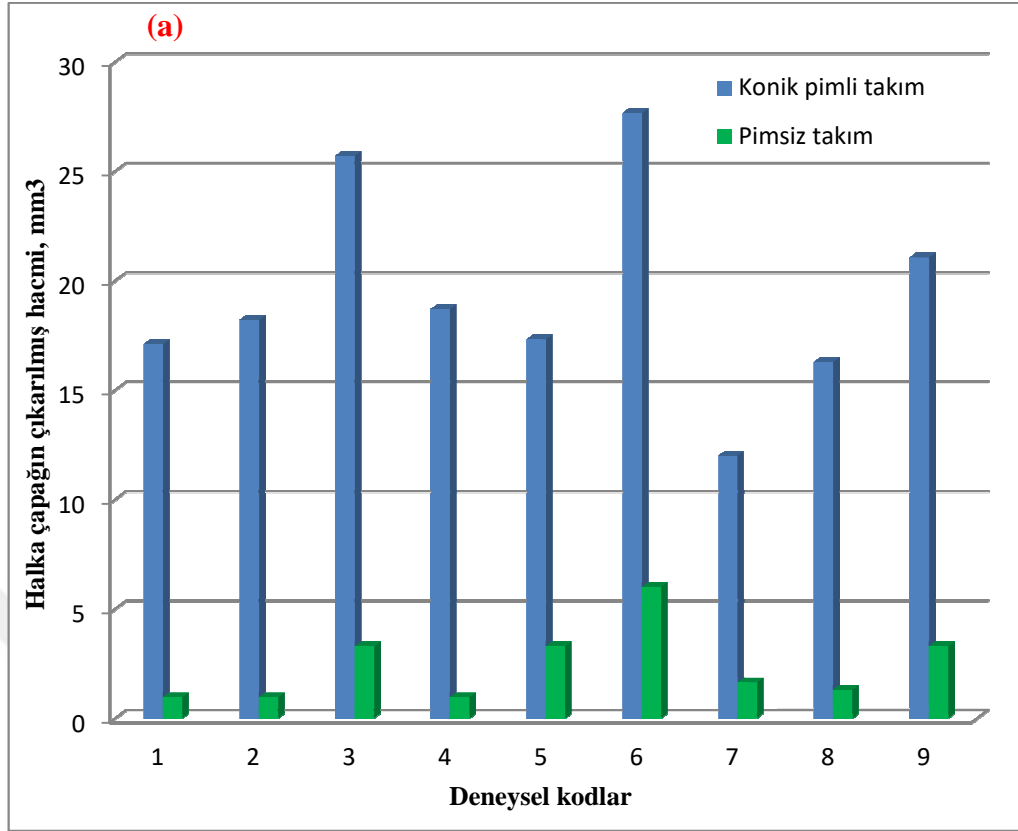
Çapağın dışarı itilen uzunluğu, kalınlığı ve hacmi, çapak özellikleri olarak tarif edilmiştir. Konik pim ve pimsiz ile kaynaklı bağlantılarda çıkarılmış çapak özelliklerinin grafiksel karşılaştırmaları sırasıyla şekil 7.7 ve 7.8'de gösterilmiştir. Şekil 7.7'de pimsiz ve konik pimli kaynaklı bağlantılardaki halka çapakların kalınlıkları ve dışarı itilen uzunlukları karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde, şekil 7.8'de ilgili kaynak kategorilerinin genel çapak hacimleri arasındaki karşılaştırma



gösterilmiştir. Bu arada pimsiz kaynaklarda kırık çapak özellikleri mevcut olmadığını bilmek önemlidir. Bunun bir sonucu olarak, kırık çaptan dolayı konik pimli bağlantıların genel çapak hacmi artmaktadır.



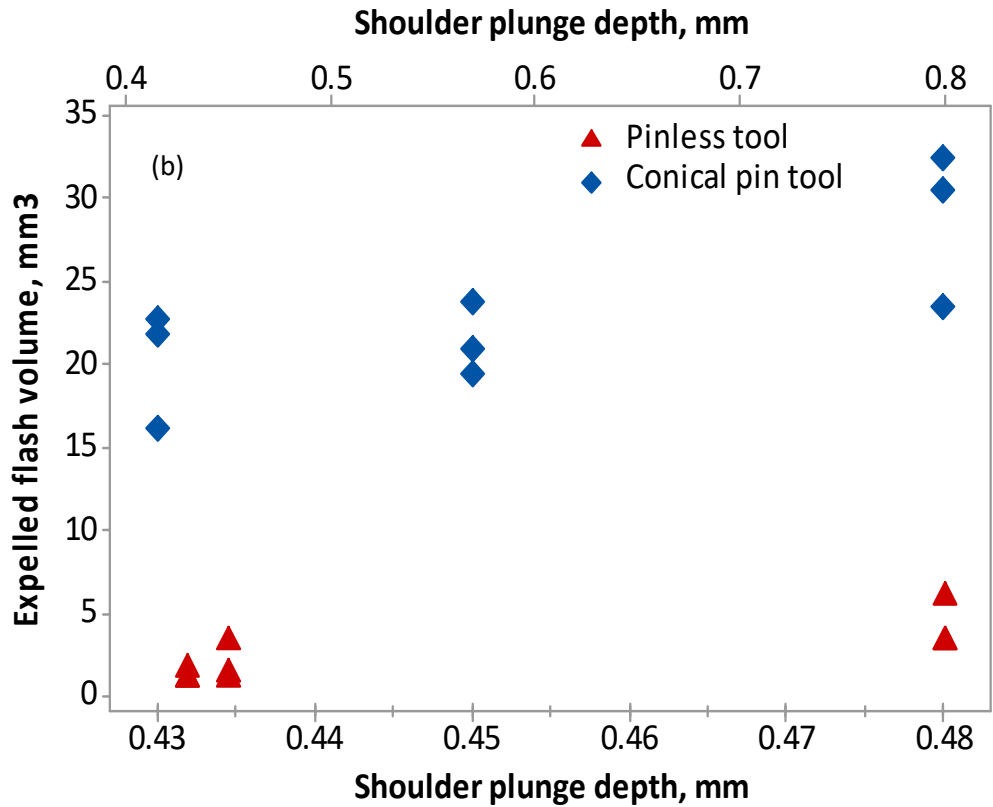
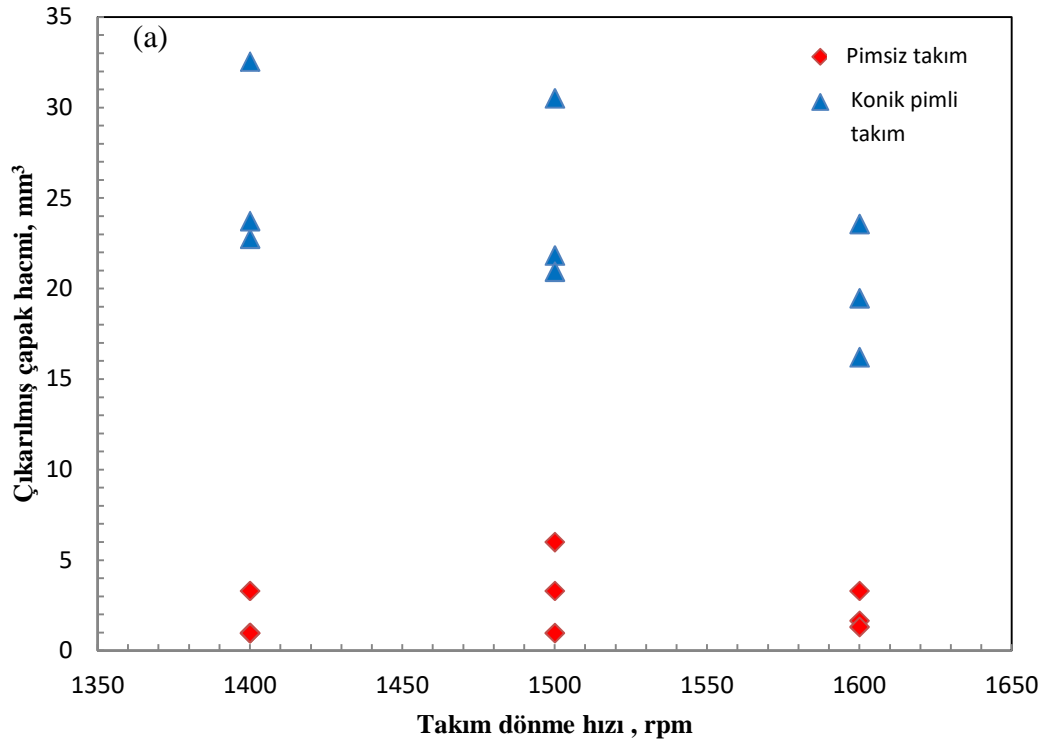
Şekil 7.7. Konik pimli ve pimsiz bağlantıların çapak özelliklerinde farklı kaynak parametre kombinasyonlarının grafiksel değerlendirmesi (a) halka çapağın dışarı itilen uzunluğu; (b) halka çapağın kalınlığı



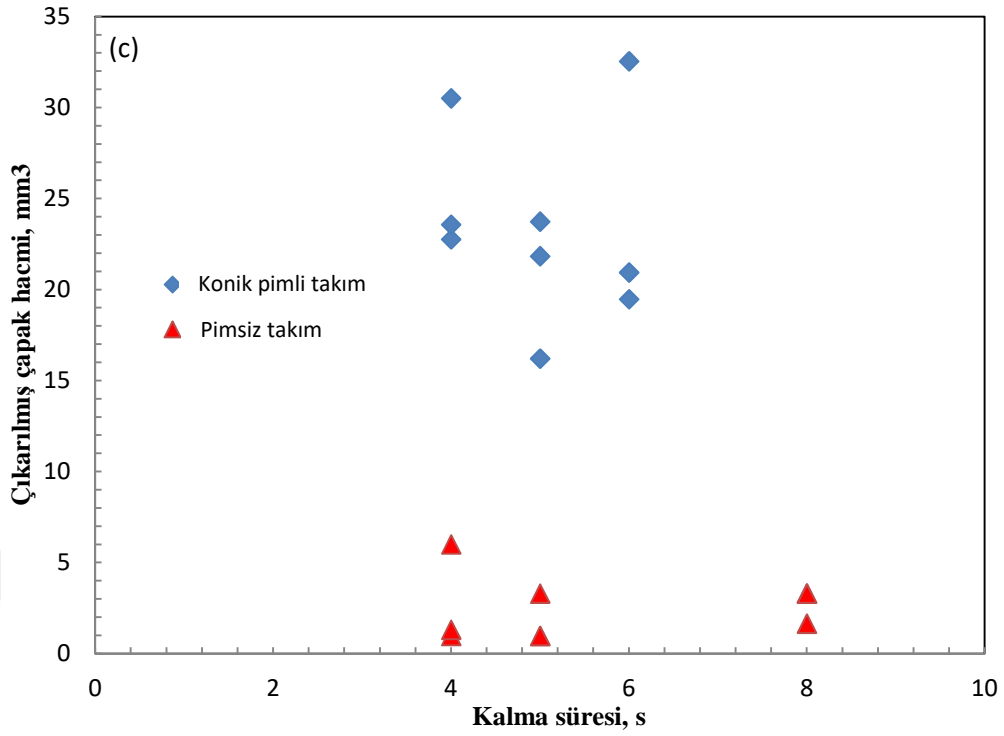
Şekil 7.8. Konik pimli ve pimsiz bağlantıların çapak özelliklerinde farklı kaynak parametre kombinasyonlarının grafiksel değerlendirilmesi (a) çıkarılmış halka çapak hacmi; (b) genel çıkarılmış çapak hacmi

Pimli ve pimsiz bağlantıların genel çapak hacimlerinde kaynak parametrelerinin örneğin takım dönme hızı, omuz daldırılma derinliği ve kalma süresi, rolleri incelenmiştir. Şekil 7.9 a-c'da bu parametre etkileri gösterilmiştir. Her iki kaynak kategorisi üzerinde kaynak parametreleri değiştirilince çıkarılmış çapak hacimleri değiştirilmiştir. Böylece kaynak parametrelerinin seçimi, pimli ve pimsiz bağlantılardaki genel çıkarılmış çapak hacmini etkilemiştir. Aynı kaynak parametre seviyelerinde şekil 7.9 a-c'de gösterildiği gibi pimsiz kaynaklı bağlantılardan elde edilen genel çapak hacmi küçük olmuştur ve konik pimli kaynakları ile karşılaştırılmıştır.

Konik pim takımının yardımı ile yapılan kaynaklarda takım dönme hızı artırılınca çıkarılmış çapak hacmi azalmıştır (Şekil 7.9a'ya bakınız). Ayrıca daldırılma derinliği artırılınca çıkarılmış çapak hacmi arttırılmıştır (Şekil 7.9b'ya bakınız). Böylece, daldırılma derinliği ile çıkarılmış çapak hacmi arasında doğrusal bir ilişki ortaya çıkmıştır. Ancak grafiksel değerlendirme kullanılarak çıkarılmış çapak hacminde kalma süresinin etkileri kolayca tespit edilememiştir. Sonuç olarak, kalma süresinin detaylı değerlendirilmesi için bir başka analiz yöntemini kullanmaya ihtiyaç duyulmuştur. Benzer bir şekilde, çıkarılmış çapak hacminin değerlerinin yakınlığı nedeniyle pimsiz kaynaklı bağlantılarda çıkarılmış çapak hacmine kaynak parametrelerinin rolü kolayca tespit edilememiştir. Böylece çıkarılmış çapak hacminde kaynak parametrelerinin rollerini analiz etmek için varyans Analizi kullanılmıştır.



Şekil 7.9. Aynı seviyede konik pimli ve pimsiz kaynaklı bağlantılarda çıkarılmış çapak hacimlerinin karşılaştırılması (a) takım dönme hızı; (b) omuz daldırılma derinliği; (c) kalma süresi



Şekil 7.9. (Devam) Aynı seviyede konik pimli ve pimsiz kaynaklı bağlantılarda çıkarılmış çapak hacimlerinin karşılaştırılması (a) takım dönme hızı; (b) omuz daldırılma derinliği; (c) kalma süresi

Böylece, varyans analizi (ANOVA) kullanılarak çıkarılmış çapak hacimleri üzerinde kaynak parametrelerinin katkıları incelenmiştir. Pimsiz ve konik pimli ile kaynaklanmış bağlantılar için tablolar 7.9 ve 7.10'da ANOVA tabloları gösterilmiştir.

Tablo 7.9. Varyans Analizi (halka çapağın hacmi) – pimsiz takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	AdjMS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı	2	4,713	4,713	2,3567	2,97	0,252	20,25%
Dalma derinliği	2	14,936	14,936	7,4678	9,40	0,096	64,18%
Kalma süresi	2	2,034	2,034	1,0168	1,28	0,439	8,74%
Hata	2	1,589	1,589	0,7947			
Toplam	8	23,272					

S- 0,891447; R-sq - 93,17%; R-sq (adj) -72,68%

Tablo 7.10. Varyans Analizi (genel çapağın hacmi) – konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı	2	69,017	69,017	34,508	9,59	0,094	32,83%
Dalma derinliği	2	131,464	131,464	65,732	18,27	0,052	62,54%
Kalma süresi	2	2,516	2,516	1,258	0,35	0,741	1,20%
Hata	2	7,197	7,197	3,598			
Toplam	8	210,194					

S- 1,89692; R-sq - 96,58%; R-sq (adj) -86,30%

Bu arada halka çapağın ve kırık çapağın kalınlıkları ve dışarı itilen uzunlukları, Çapak özellikleridir. Yukarıda işaret edildiği gibi, pimsiz kaynaklarda sadece halka çapak görülmüştür ve konik pimli kaynaklarda hem halka çapak hem de kırık çapak gözlemlenmiştir. Böylece, varyans Analizi kullanılarak çapak özelliklerinde kaynak parametrelerinin rolleri tespit edilmiştir. Tablolar 7.11 ve 7.12’de konik pimli ve pimsiz kaynaklarda halka çapağın dışarı itilen uzunluğunun varyans analizleri sağlanmıştır.

Tablo 7.11. Varyans Analizi (halka çapağın dışarı itilen uzunluğu) - konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,055756	0,055756	0,027878	51,20	0,019	28,70%
Dalma derinliği	2	0,136089	0,136089	0,068044	124,98	0,008	70,04%
Kalma süresi	2	0,001356	0,001356	0,000678	1,24	0,445	0,70%
Hata	2	0,001089	0,001089	0,000544			
Toplam	8	0,194289					

S- 0,0233333; R-sq - 99,44%; R-sq (adj) -97,76%

Tablo 7.12. Varyans Analizi (halka çapağın dışarı itilen uzunluğu) - pimsiz takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,020000	0,020000	0,010000	3,00	0,250	20,00%
Dalma derinliği	2	0,046667	0,046667	0,023333	7,00	0,125	46,67%
Kalma süresi	2	0,026667	0,026667	0,013333	4,00	0,200	26,67%
Hata	2	0,006667	0,006667	0,003333			
Toplam	8	0,100000					

S- 0,0577350; R-sq - 93,33%; R-sq (adj) -73,33%

Tablolar 7.13 ve 7.14 sırasıyla konik pimli ve pimsiz kaynaklarda halka çapağın kalınlığının varyans analizleri gösterilmektedir.

Tablo 7.13. Varyans Analizi (halka çapağın kalınlığı) - konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,000956	0,000956	0,000478	0,47	0,679	4,26%
Dalma derimliği	2	0,015089	0,015089	0,007544	7,46	0,118	67,29%
Kalma süresi	2	0,004356	0,004356	0,002178	2,15	0,317	19,43%
Hata	2	0,002022	0,002022	0,001011			
Toplam	8	0,022422					

S- 0,0317980; R-sq - 90,98%; R-sq (adj) -63,92%

Tablo 7.14. Varyans Analizi (halka çapağın kalınlığı) - pimsiz takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,008889	0,008889	0,004444	4,00	0,200	21,05%
Dalma derimliği	2	0,028889	0,028889	0,014444	13,00	0,071	68,42%
Kalma süresi	2	0,002222	0,002222	0,001111	1,00	0,500	5,26%
Hata	2	0,002222	0,002222	0,001111			
Toplam	8	0,042222					

S- 0,0333333; R-sq - 94,74%; R-sq (adj) -78,95%

Tablolar 7.15 ve 7.16 sırasıyla konik pimli ve pimsiz kaynaklarda kırık çapağın dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığının varyans analizleri gösterilmektedir.

Tablo 7.15. Varyans Analizi (kırık çapağın dışarı itilen uzunluğu) - konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,11776	0,11776	0,05888	2,06	0,327	29,37%
Dalma derimliği	2	0,18216	0,18216	0,09108	3,19	0,239	45,43%
Kalma süresi	2	0,04389	0,04389	0,02194	0,77	0,566	10,95%
Hata	2	0,05716	0,05716	0,02858			
Toplam	8	0,40096					

S- 0,169050; R-sq - 85,75%; R-sq (adj) -42,98%

Tablo 7.16. Varyans Analizi (kırık çapağın kalınlığı) - konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,003489	0,003489	0,001744	3,65	0,215	58,58%
Dalma derimlği	2	0,000956	0,000956	0,000478	1,00	0,500	16,04%
Kalma süresi	2	0,000556	0,000556	0,000278	0,58	0,632	9,33%
Hata	2	0,000956	0,000956	0,000478			
Toplam	8	0,005956					

S- 0,0218581; R-sq - 83,96%; R-sq (adj) -35,82%

Tablolar 7.17 ve 7.18 sırasıyla pimsiz ve konik pimli kaynaklarda çıkarılmış çapak hacminin varyans analizleri gösterilmektedir.

Tablo 7.17. Varyans Analizi (halka çapağın hacmi) - pimsiz takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	4,713	4,713	2,3567	2,97	0,252	20,25%
Dalma derimlği	2	14,936	14,936	7,4678	9,40	0,096	64,18%
Kalma süresi	2	2,034	2,034	1,0168	1,28	0,439	8,74%
Hata	2	1,589	1,589	0,7947			
Toplam	8	23,272					

S- 0,891447; R-sq - 93,17%; R-sq (adj) -72,68%

Tablo 7.18. Varyans Analizi (halka çapağın hacmi) - konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	38,848	38,848	19,424	8,56	0,105	20,80%
Dalma derimlği	2	137,365	137,365	68,683	30,28	0,032	73,53%
Kalma süresi	2	6,061	6,061	3,030	1,34	0,428	3,24%
Hata	2	4,536	4,536	2,268			
Toplam	8	186,811					

S- 1,50604; R-sq - 97,57%; R-sq (adj) -90,29%

Tablo 7.19’da konik pimli kaynaklarda çıkarılmış kırık çapak hacminin varyans analizi gösterilmektedir.



Tablo 7.19. Varyans Analizi (kırık çapağın hacmi) - konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	15,2545	15,2545	7,62723	49,56	0,020	84,35%
Dalma derimlği	2	0,1185	0,1185	0,05923	0,38	0,722	0,66%
Kalma süresi	2	2,4049	2,4049	1,20243	7,81	0,113	13,30%
Hata	2	0,3078	0,3078	0,15390			
Toplam	8	18,0856					

S- 0,392301; R-sq - 98,30%; R-sq (adj) -93,19%

### 7.3. Çapak Hacmi Üzerinde Tepe Sıcaklığında Karıştırılmış Bölge Enerjisinin Etkisi

Karıştırılmış bölgenin oluşması için sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında kaynak yapılacak malzeme enerjisi belirli bir miktar gerektirir. Çıkarılmış hacim ya da takımın daldırılması bakımından P. Su ve onun arkadaşları tarafından doruk sıcaklığında karıştırma bölgesinin ihtiyaç duyulan enerjisi önerilmiştirler. Denklem (7.15)'de bu enerji ifadesi gösterilmektedir.

$$Q_{sz} = \rho C_p (T_p - T_o) \quad (7.15)$$

Bu arada  $Q_{sz}$  doruk sıcaklığını elde etmek için gerekli karıştırma bölgesinin enerjisidir (J),  $\rho$  alüminyum alaşımının yoğunluğudur,  $C_p$  alaşımın özgül ısı kapasitesidir (J/kg.K),  $T_p$  alaşımın doruk sıcaklığıdır, % 95 olarak ayarlanmıştır,  $T_o$  25oC veya 298 K olarak verilen oda sıcaklığıdır ve V dönen takımın dalan işlemi sırasında oluşan karıştırma bölgesinin hacmidir (mm<sup>3</sup>). Tablolar 7.20 ve 7.21 sırasıyla pimsiz ve konik pimli kaynaklarda doruk sıcaklığında tahmin edilen karıştırma bölgesinin enerjileri göstermektedir.

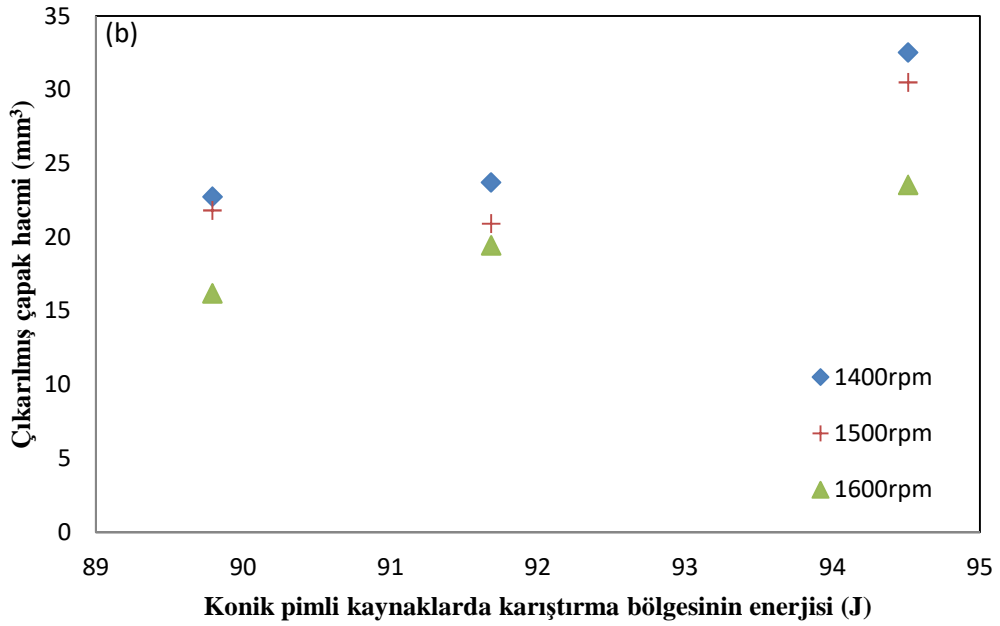
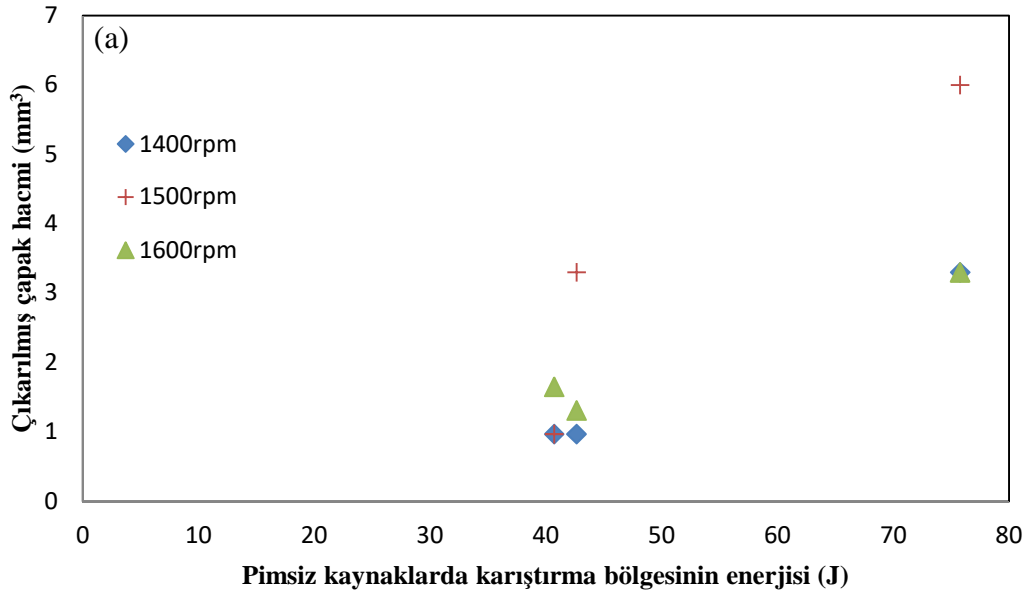
Tablo 7.20. Pimsiz bağlantılar üzerinde tepe sıcaklığında karıştırılmış bölgenin enerjileri

Karıştırılma bölgesinin hacmi (mm <sup>3</sup> )	Karıştırılmış bölgenin enerjisi(J)	Farklı takım dönme hızında çıkarılmış çapak hacmi (mm <sup>3</sup> )		
		1400dev/dak	1500 dev/dak	1600 dev/dak
33,8	40,71	0,97	0,97	1,65
35,4	42,64	0,97	3,30	1,31
62,9	75,76	3,30	6,0	3,30

Tablo 7.21. Konik pimli bağlantılar üzerinde tepe sıcaklığında karıştırılmış bölgenin enerjileri

Karıştırılma bölgesinin hacmi (mm <sup>3</sup> )	Karıştırılmış bölgenin enerjisi(J)	Farklı takım dönme hızında çıkarılmış çapak hacmi (mm <sup>3</sup> )		
		1400dev/dak	1500 dev/dak	1600 dev/dak
74,55	89,79	22,76	21,83	16,21
76,12	91,68	23,73	20,94	19,47
78,47	94,51	32,54	30,51	23,57

Şekil 7.10'da pimsiz ve konik pimli kaynaklarda tepe sıcaklığına ulaşmak için gerekli tahmin edilen karıştırma bölgesinin enerjileri ile çıkarılmış çapak hacimleri karşılaştırılmıştır.

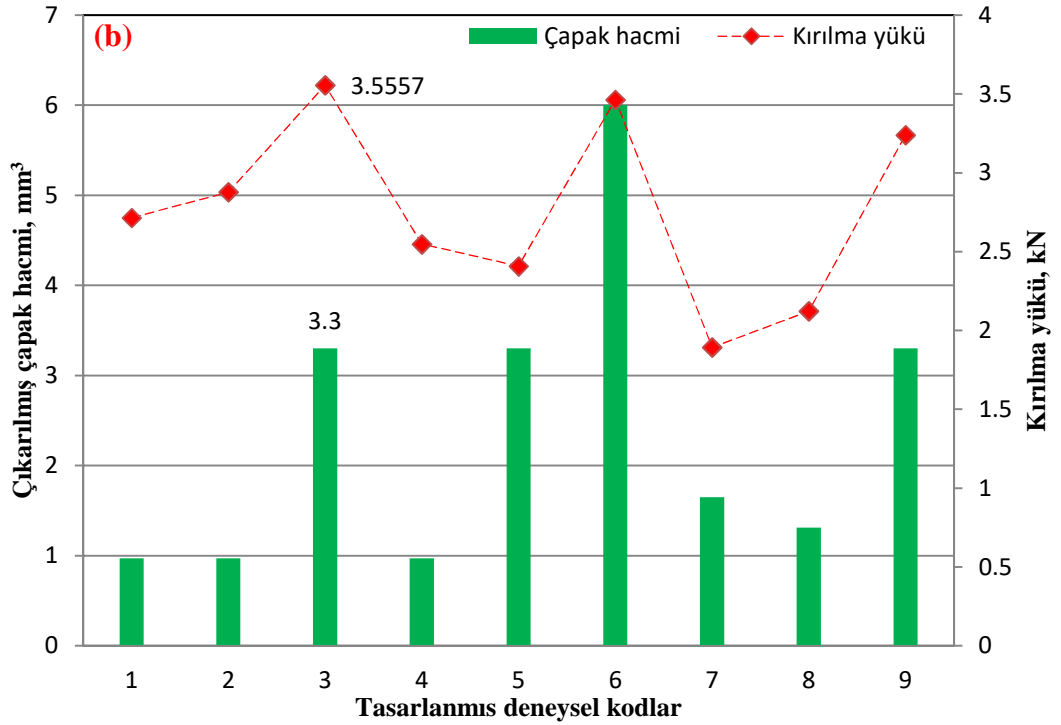
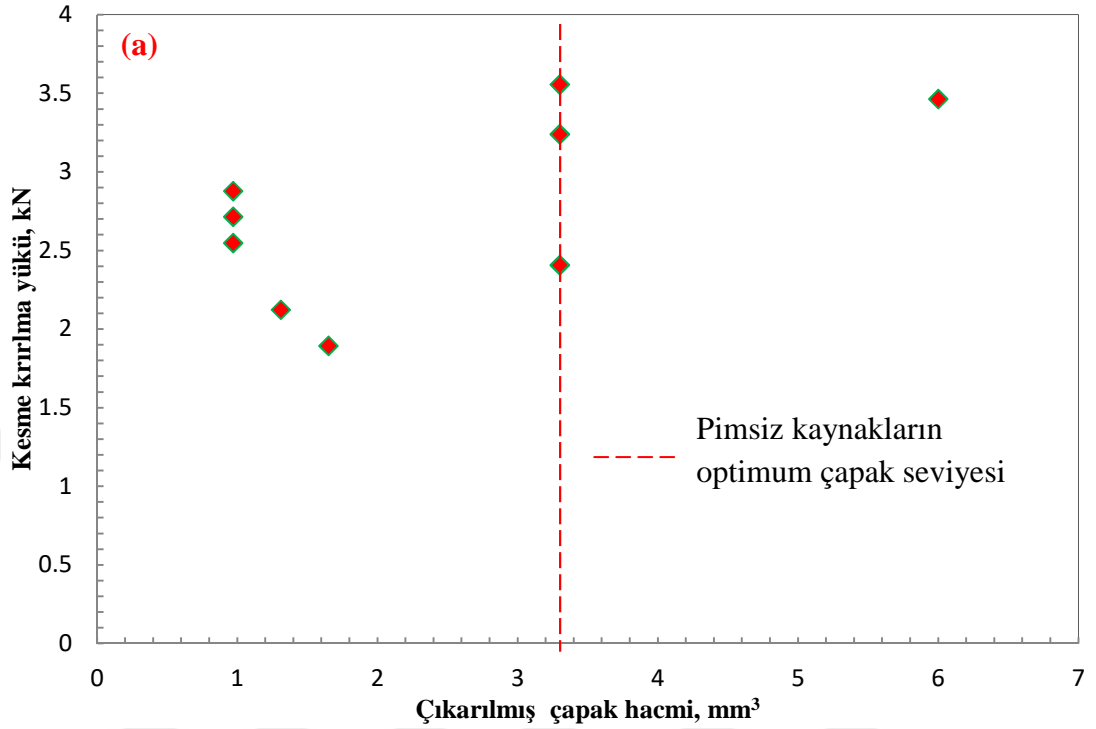


Şekil 7.10. 0.95Ts tepe sıcaklığını elde etmek için gerekli karıştırma bölgesinin enerjileri ile çıkarılmış çapak karşılaştırılması (a) pimsiz kaynaklarda; (b) konik pimli kaynaklarda

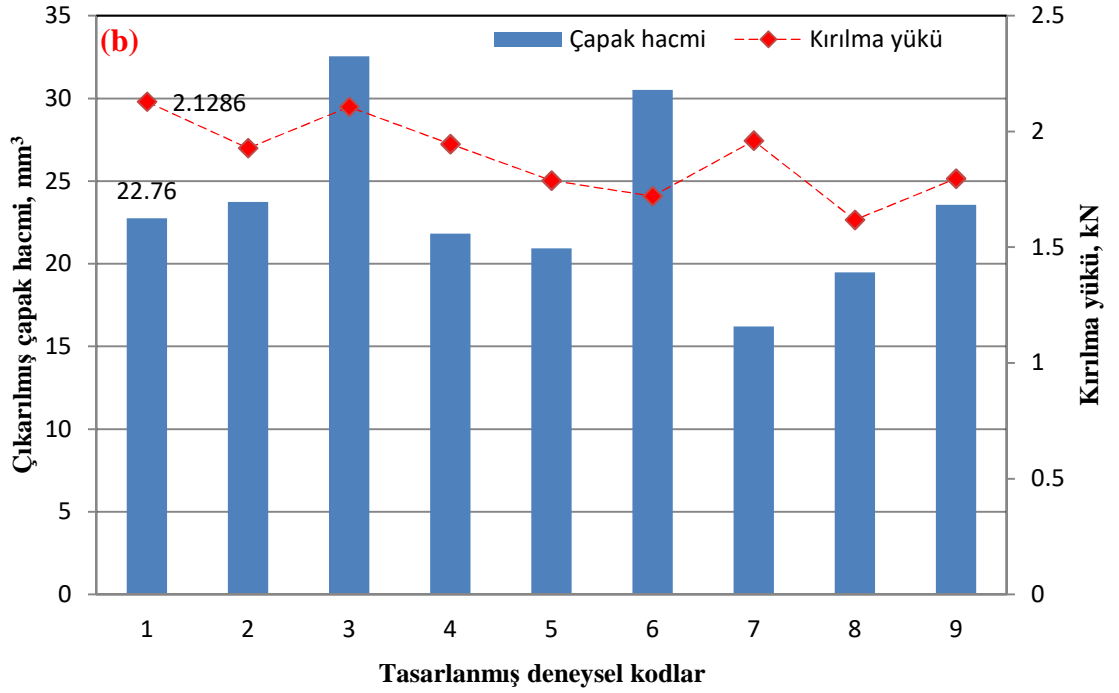
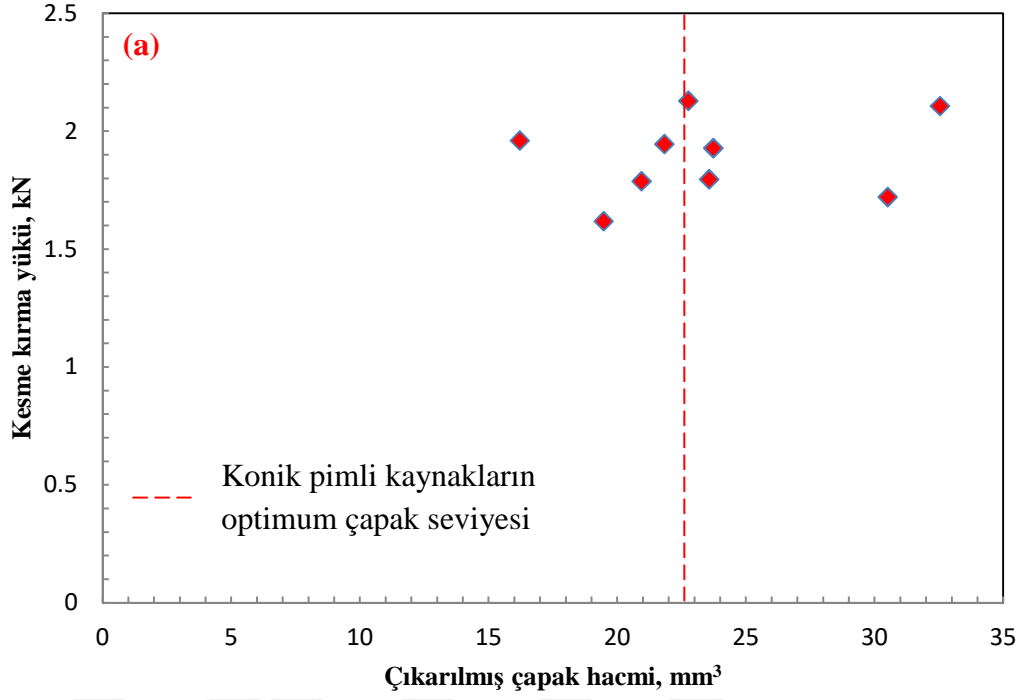
#### 7.4. Çıkarılmış çapak ve kaynak mukavemeti arasındaki ilişki

Şekil 7.11 ve 7.12’de pimsiz ve konik pimli kaynaklarda çıkarılmış çapak hacim ve kaynak mukavemeti arasındaki ilişkiler sırasıyla gösterilmiştir. Maksimum kırılma yükü elde edildiği kritiç çapağı belirlemek için bağlantının kesme yükleri ve çıkarılmış çapak hacimleri arasındaki basit ilişkiyi incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Ayrıca şekil 7.11b ve 7.12b’de çıkarılmış çapak hacmi ve kırılma yükü arasındaki değişimini gösteren parametre kombinasyon ayarları gösterilmiştir.



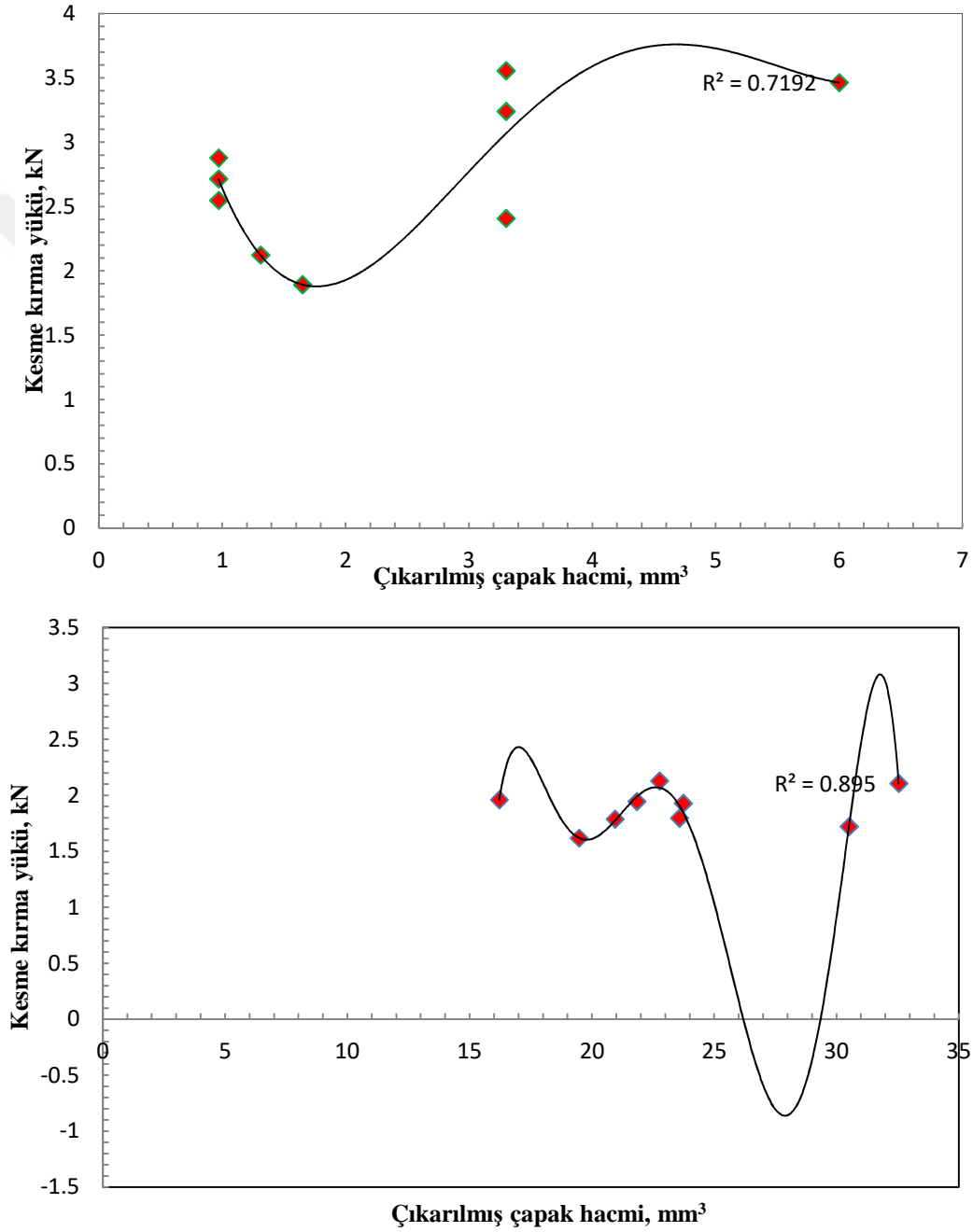
Şekil 7.11. Pimsiz takım ile kaynaklanmış bağlantılarda kesme kırılma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki ilişki (a) basit korelasyon (b) parametre birleşimi ayarlarında korelasyon



Şekil 7.12. Konik pimli takım ile kaynaklanmış bağlantılarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki ilişki (a) basit korelasyon (b) parametre birleşimi ayarlarında korelasyon

Pimsiz ve konik pimli kaynaklarında  $R^2$  değeri kullanılarak çıkarılmış çapak hacmi ve kesme kırma yükü arasındaki en iyi korelasyon veya regresyon belirlenmiştir. Bağlantıların çıkarılmış çapak hacmi ve kesme yükü arasındaki mevcut ilişki için

üstel, doğrusal, logaritmik, çok terimli ve güç regresyon uyum hatları katkıda bulundurulmuştur. Böylece, şekil 7.13a ve 7.13b'de pimsiz ve konik pimli kaynakların optimum korelasyonları sağlanmıştır. Benzer şekilde, pimsiz ve pimli kaynakların regresyon uyum hatları için tablolar 7.22 ve 7.23'te onların özetlenmiş  $R^2$  değerleri sağlanmıştır. Bu tez ekinde mevcut ilişkilerin grafiksel çizimleri verilmektedir.



Şekil 7.13. Kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki optimum polinom regresyon (a) pimsiz kaynaklarda; (b) konik pimli kaynaklarda

Tablo 7.22. R2 değerlerine dayalı pimsiz kaynaklarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki korelasyon

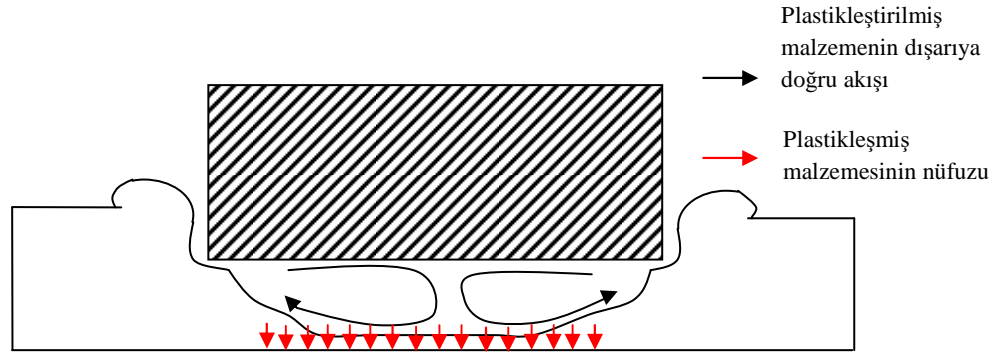
Regresyon tipi	Sıra	R <sup>2</sup> değeri	Optimum
Üstel	-	0,3375	
Doğrusal	-	0,3832	
Logaritmik	-	0,3107	
Logaritmik	2	0,3841	
Logaritmik	3	0,7188	
Logaritmik	4	<b>0,7192</b>	En iyi
Logaritmik	5	-	
Logaritmik	6	-	
Güçlü	-	0,2626	

Tablo 7.23. R2 değerlerine dayalı konik pimli kaynaklarda kesme kırma yükü ve çıkarılmış çapak hacmi arasındaki korelasyon

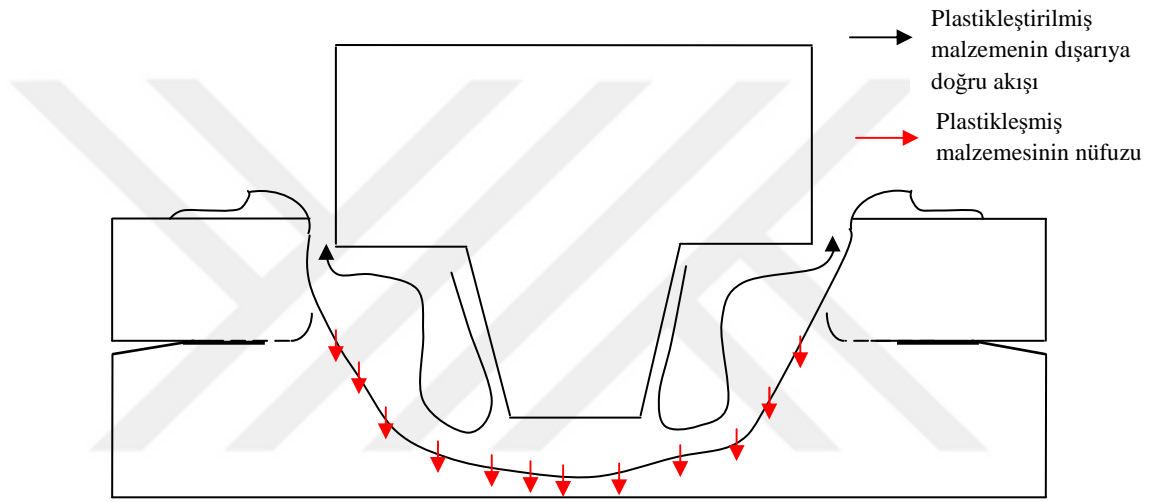
Regresyon tipi	Sıra	R2 değeri	Optimum
Üstel	-	0,0338	
Doğrusal	-	0,0367	
Logaritmik	-	0,0305	
Logaritmik	2	0,0547	
Logaritmik	3	0,0634	
Logaritmik	4	0,0663	
Logaritmik	5	0,8009	
Logaritmik	6	<b>0,8950</b>	En iyi
Güçlü	-	0,0280	

### 7.5. Hesaplanmış Plastikleştirilmiş Malzemenin Nüfuz Hacmi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında iki önemli malzeme akışı modeli ortaya çıkmaktadır. Bunlar, plastikleştirilmiş malzemenin yukarı akışı ve içe nüfuz akışıdır. Plastikleştirilmiş malzemenin yukarı veya dışarıya akışı nedeniyle çapak oluşumu gerçekleştirilmektedir. Ama malzemenin içe nüfuz akışından dolayı alt plaka üst plakanın birleştirilmesi oluşturulmaktadır. Sırasıyla, şekil 7.14 ve 7.15’de gösterildiği gibi tipik pimsiz ve pimli malzeme akışları gösterilmektedir.



Şekil 7.14. Pimsiz FSSW'de tipik bir malzeme akışının şematik diyagramı



Şekil 7.15. Konik pimli FSSW'de tipik bir malzeme akışının şematik diyagramı

Sürtünme karıştırma nokta kaynağında iş parçasının yüzeyi üzerinde kalan omuz-pim boşluğu kullanılarak plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi hesaplanmıştır. Denklem (7.16)'de gösterildiği gibi omuz-pim boşluğu (iş parçasında boşluk) ve genel olarak çıkarılmış çapak hacmi arasındaki fark, plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmine eşittir.

$$V_T = V_f + V_p \quad (7.16)$$

$V_T$  omuz-pim boşluğunun hacmidir,  $V_f$  çıkarılmış çapak hacmidir ve  $V_p$  plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmidir.

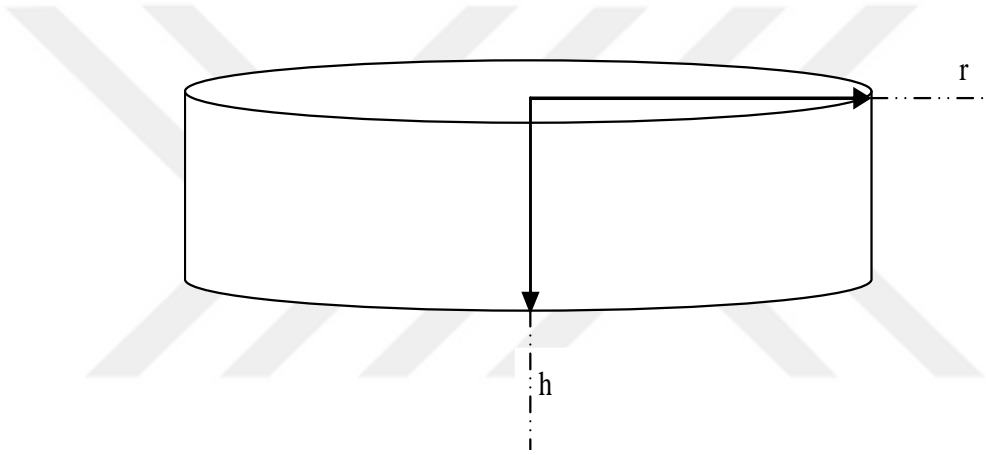


### 7.5.1. Pimsiz kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi

Şekil 7.16'da pimsiz kaynak sonrası iş parçası üzerinde kalan yüzeysel boşluğunun şematik bir temsili gösterilmiştir. Şekil 7.16'ya göre, pimsiz kaynak işlemi nedeniyle sığ bir boşluğun hacmi, silindirin hacmi olarak ifade edilmiş ve Denklem (7.17)'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

$$V_T = \pi r^2 h \quad (7.17)$$

$V_T$  iş parçasının yüzeyi üzerinde oluşturulan, sığ boşluğun hacmidir,  $r$  daldırılmış takımın omuz yarıçapıdır, ve  $h$  takımın omuzunun daldırılmış derinliği



Şekil 7.16. Pimsiz takım tarafından oluşturulan yüzeysel boşluğunun hacminin diyagram temsili

Denklem 7.17'ye göre tasarlanmış deneye dayanan tüm pimsiz bağlantılar için sığ boşluğun hacimleri tahmin edilmiştir. Böylece tablo 7.24'de bu hesaplanmış boşluğun hacimleri gösterilmektedir. Ayrıca denklem 7.16 kullanılarak tablo 7.25'de gösterildiği gibi plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmi hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak tablo 7.26'da pimsiz kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmi yüzdeleri ve çıkarılmış çapak yüzdeleri sağlanmıştır.

Tablo 7.24. Pimsiz takım tarafından oluşturulan sığ bir boşluğun hacminin hesaplanması

Kaynak kodları	Dalma derinliğinin yarıçapı r (mm)	Dalma derinliği h (mm)	Sığ boşluğunun hacmi $V_T$ (mm <sup>3</sup> )
PL 1	5	0,43	33,8
PL 2	5	0,45	35,4
PL 3	5	0,80	62,9
PL 4	5	0,43	33,8
PL 5	5	0,45	35,4
PL 6	5	0,80	62,9
PL 7	5	0,43	33,8
PL 8	5	0,45	35,4
PL 9	5	0,80	62,9

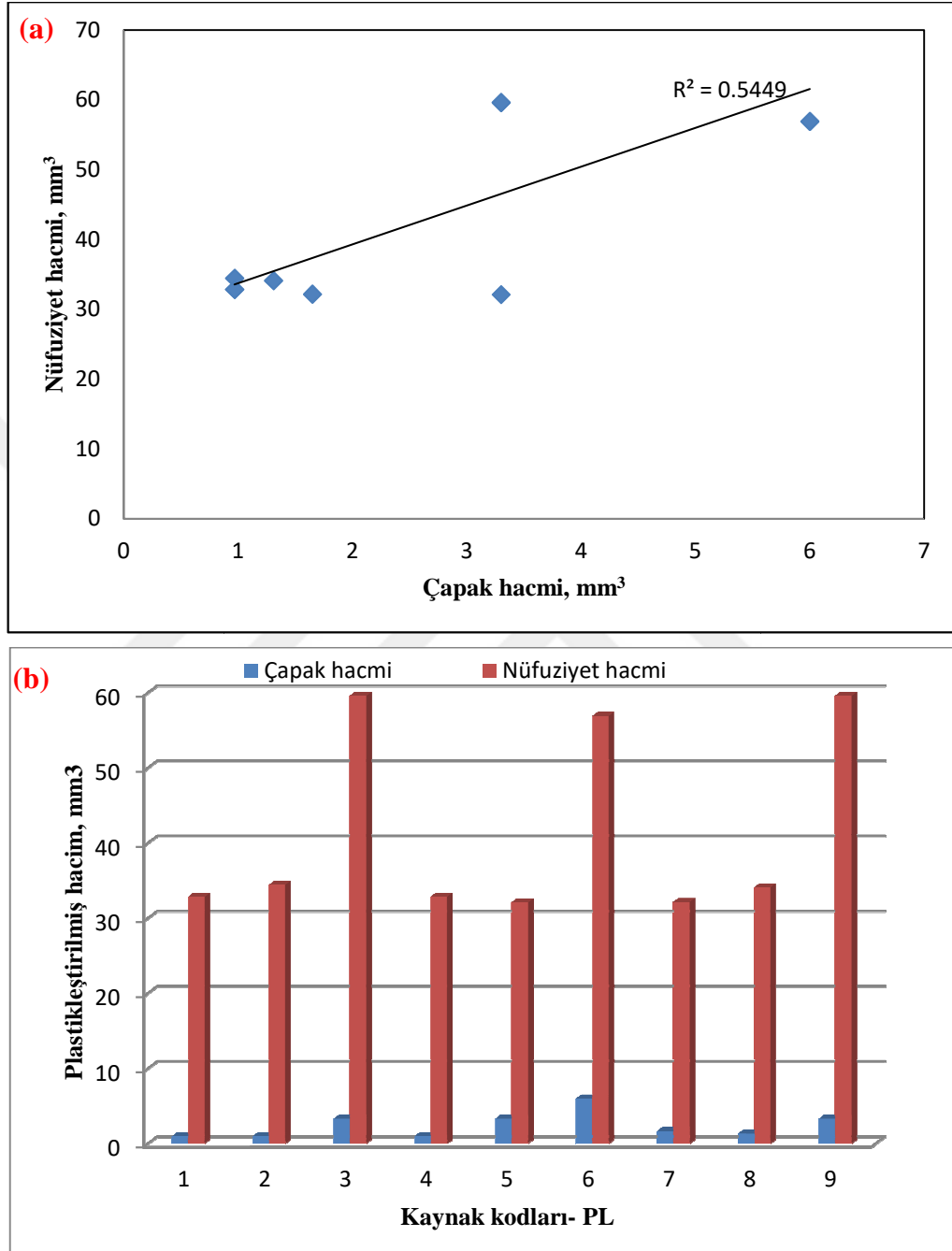
Tablo 7.25. Pimsiz kaynak bağlantılarında plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacimleri

Kaynak kodları	Sığ boşluğunun hacmi $V_T$ (mm <sup>3</sup> )	Çapak hacmi $V_f$ (mm <sup>3</sup> )	Plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmi $V_p$ (mm <sup>3</sup> )
PL 1	33,8	0,97	32,83
PL 2	35,4	0,97	34,43
PL 3	62,9	3,30	59,60
PL 4	33,8	0,97	32,83
PL 5	35,4	3,30	32,10
PL 6	62,9	6,00	56,90
PL 7	33,8	1,65	32,15
PL 8	35,4	1,31	34,09
PL 9	62,9	3,30	59,60

Tablo 7.26. Pimsiz kaynaklı bağlantılarda çapak hacminin ve plastikleştirilmiş malzeme nüfuziyet hacminin yüzdeleri

Kaynak kodları	Nüfuz edilen hacmin yüzdesi (%)	Çapak hacminin yüzdesi (%)
PL 1	97,13	2,87
PL 2	97,26	2,74
PL 3	94,75	5,25
PL 4	97,13	2,87
PL 5	90,68	9,32
PL 6	90,46	9,54
PL 7	95,12	4,88
PL 8	96,30	3,70
PL 9	94,75	5,25

Ancak, şekil 7.17’de pimsiz kaynakların çıkarılmış çapak hacmi ve nüfuz hacmi arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

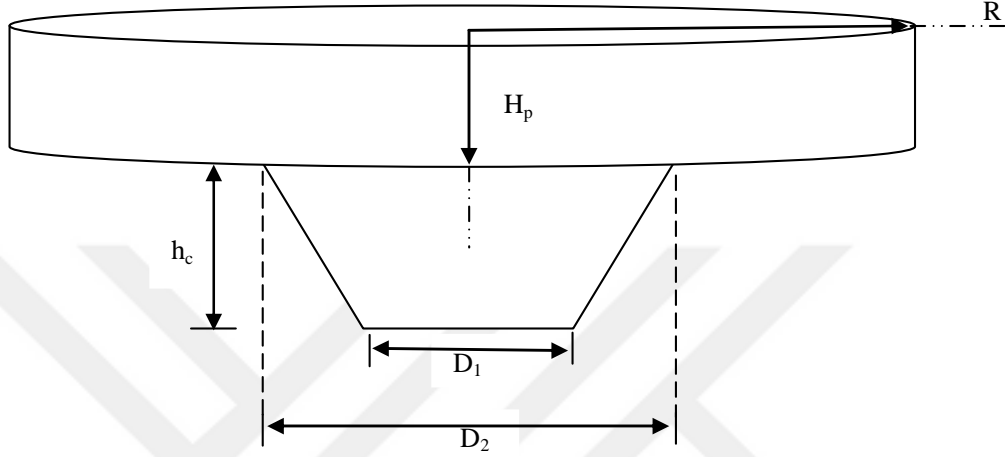


Şekil 7.17. Pimsiz kaynaklarda çıkarılmış çapak hacmi ve plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacmi arasındaki ilişki (a) trend/regresyon grafiği; (b) çubuk grafiği

### 7.5.2. Konik pim kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi

Konik pim takımı ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi yapıldıktan sonra iş parçası malzemesinin yüzeyi üzerinde kalan kavitenin temsili şekil 7.18 'de

gösterilmektedir. Bu şekilde, iki ana parça vardır. Bu parçalar, üstteki silindir şekil ve alttaki konik şekil parçalarıdır. Bunun bir sonucu olarak, bu iki bölümün hacimsel şekillerinin kombinasyonu, iş parçasının yüzey üzerindeki kalan omuz-pim boşluğun hacmine eşit olmuştur. Böylece, konik pimli kaynağın omuz-pim boşluğunu hesaplamak için elde edilen formül, Denklem (7.18)'de verilmiştir.



Şekil 7.18. Konik pim tarafından oluşturulan boşluk

$$V_T = \frac{1}{3} \pi [r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2] h_c + \pi R^2 H_p \quad (7.18)$$

$r_1$  konik pimin ucu yarıçapıdır,  $r_2$  konik pimin kökü yarıçapıdır,  $h_c$  konik pimin yüksekliğidir,  $R$  takım omuzunun yarıçapıdır, ve  $H_p$  takım omuzunun daldırma derinliğidir.

Ayrıca,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $h_c$  ve  $R$  sabitlerdir ve onlar değişmeyen takım parametreleridir. Konik pimin bilinen sabitler değerleri aşağıdaki gibidir:  $r_1 = 1,5$  mm,  $r_2 = 3$  mm,  $h_c = 2,47$  mm, ve  $R = 5$  mm.

Denkleme (7.18) içine bu sabit değerleri yerine konularak omuz-pim boşluğunun denklemi azaltılmış ve Denklem (7.19) elde edilmiştir. Denklem (7.19)'ya göre tablo 7.27'de gösterildiği gibi konik pim takım tarafından oluşturulan boşluğun hacmi hesaplanmıştır. Denklem (7.16) kullanılarak, tablo 7.28'de gösterildiği gibi konik pimli kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi hesaplanmıştır. Ayrıca tablo 7.29'da konik pimli kaynaklarındaki plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi yüzdeleri ve çıkarılmış çapağın yüzdeleri verilmiştir.

$$V_T = 40.76 + 78.57H_p \quad (7.19)$$

Tablo 7.27. Hesaplanmış boşluğun hacmi

Kaynak kodları	Omuz dalma derinliği $H_p$ (mm)	Boşluğun hacmi $V_T$ (mm <sup>3</sup> )
P 1	0,43	74,55
P 2	0,45	76,12
P 3	0,48	78,47
P 4	0,43	74,55
P 5	0,45	76,12
P 6	0,48	78,47
P 7	0,43	74,55
P 8	0,45	76,12
P 9	0,48	78,47

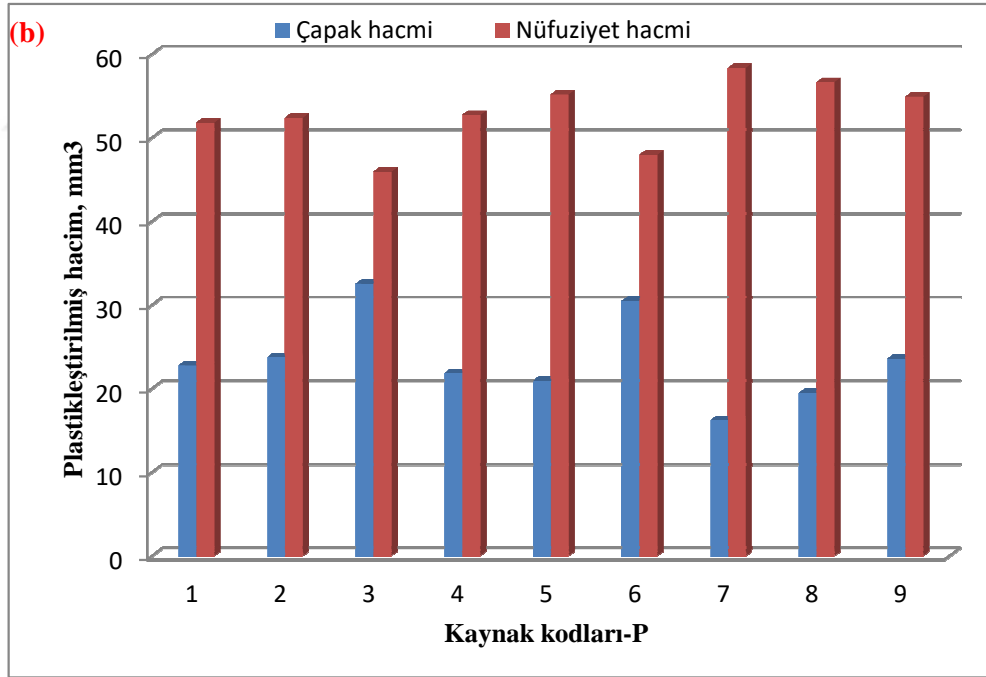
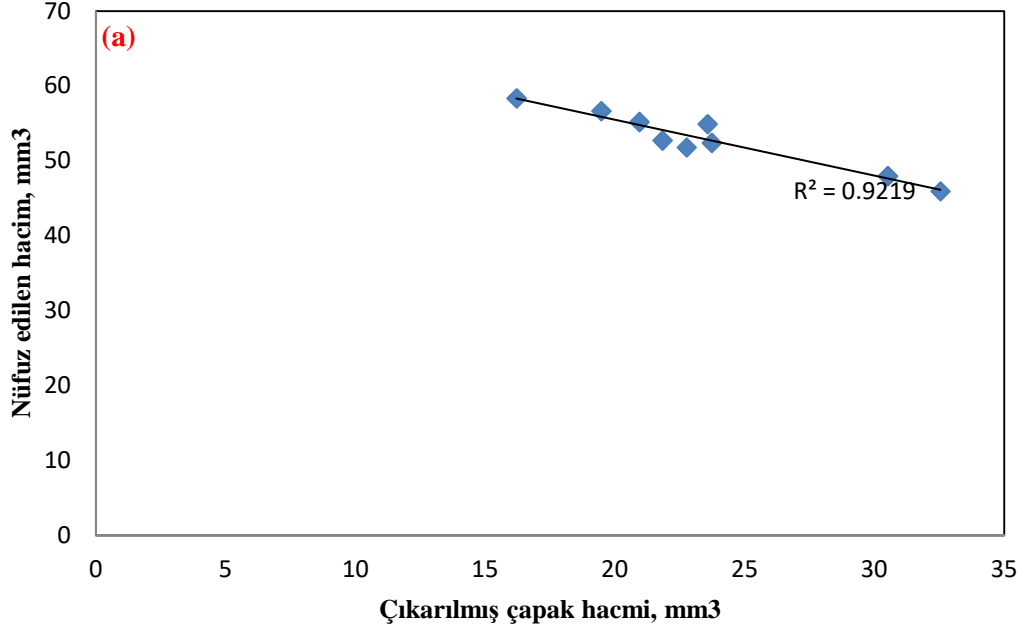
Tablo 7.28. Nüfuz edilen plastikleştirilmiş malzemenin hacmi

Kaynak kodları	Boşluğun hacmi $V_T$ (mm <sup>3</sup> )	Genel çapak hacmi $V_f$ (mm <sup>3</sup> )	Plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi $V_p$ (mm <sup>3</sup> )
P 1	74,55	22,76	51,79
P 2	76,12	23,73	52,39
P 3	78,47	32,54	45,93
P 4	74,55	21,83	52,72
P 5	76,12	20,94	55,18
P 6	78,47	30,51	47,96
P 7	74,55	16,21	58,34
P 8	76,12	19,47	56,65
P 9	78,47	23,57	54,90

Tablo 7.29. Konik pimli kaynaklı bağlantılarda çapak hacminin ve plastikleştirilmiş malzeme nüfuziyet hacminin yüzdeleri

Kaynak kodları	Nüfuz edilen hacmin yüzdesi (%)	Çapak hacminin yüzdesi (%)
P 1	69,47	30,53
P 2	68,83	31,17
P 3	58,53	41,47
P 4	70,72	29,28
P 5	72,49	27,51
P 6	61,12	38,88
P 7	78,26	21,74
P 8	74,42	25,58
P 9	69,96	30,04

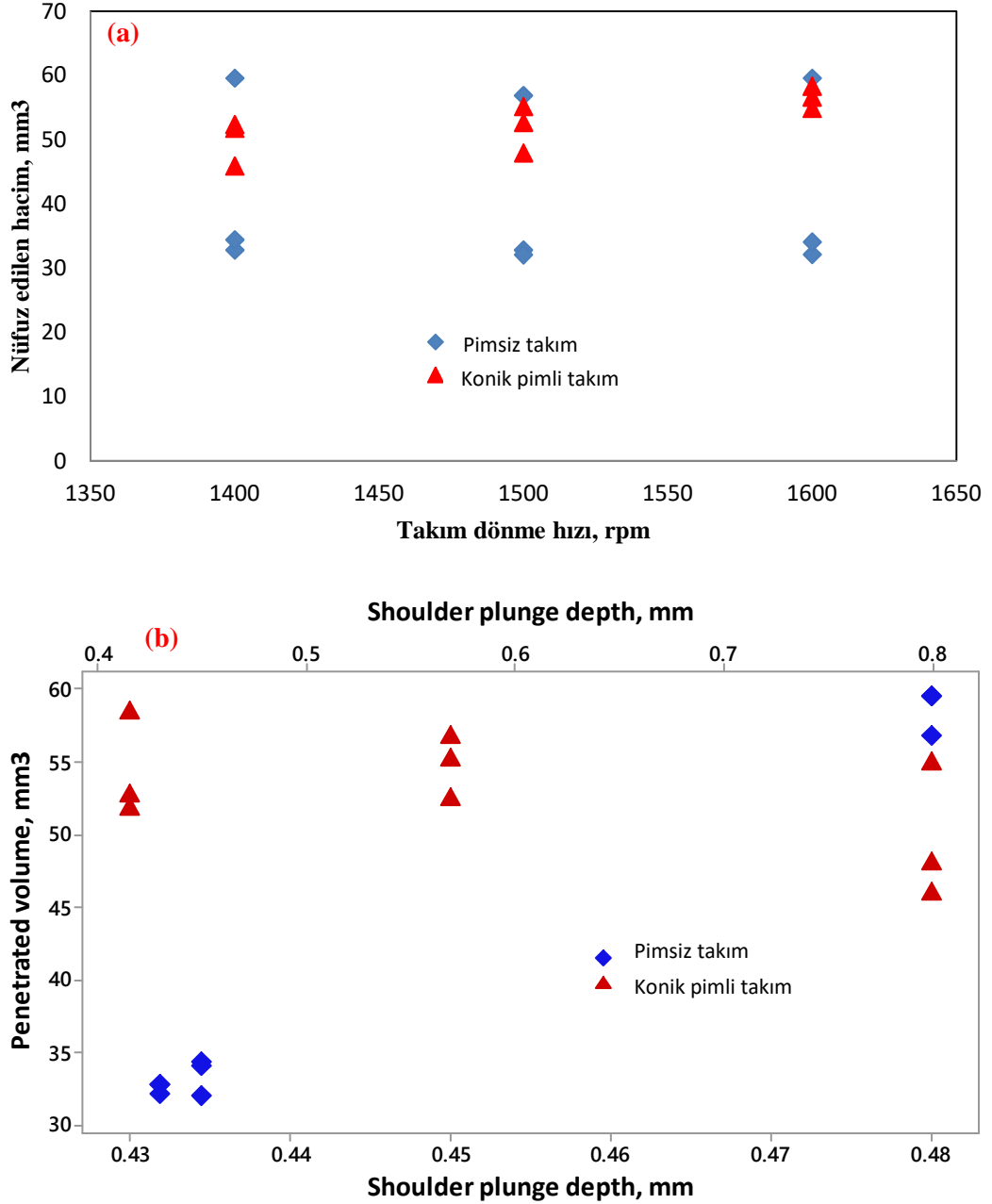
Ancak, şekil 7.1’de konik pimli kaynakların çıkarılmış çapak hacmi ve nüfuziyet hacmi arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



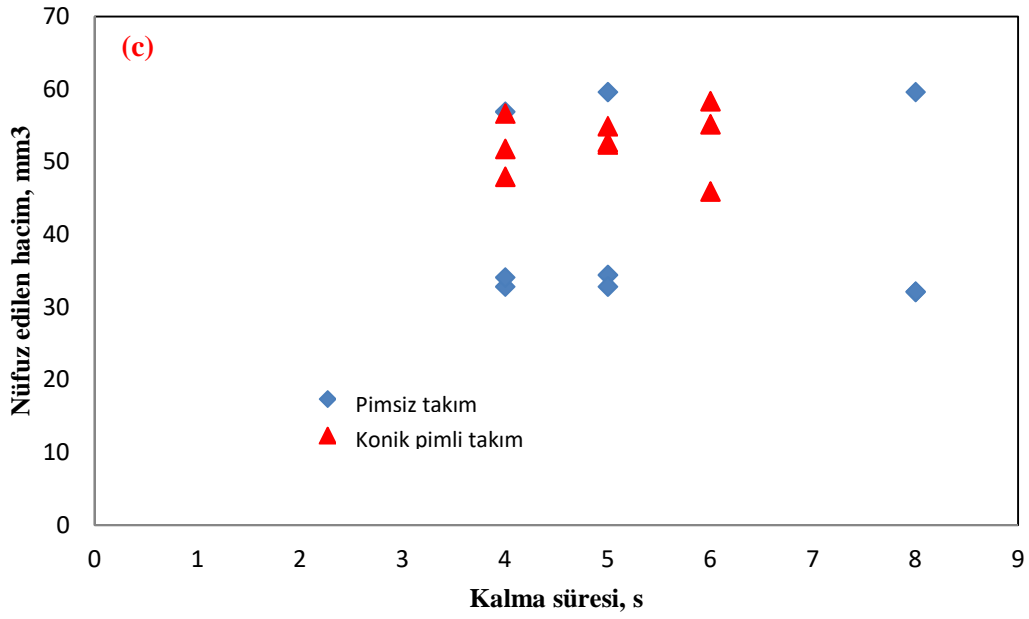
Şekil 7.19. Konik pimli kaynakların çıkarılmış çapak hacmi ve nüfuziyet hacmi arasındaki ilişki (a) trend/regresyon grafiği; (b) çubuk grafiği

## 7.6. Plastikleştirilmiş Nüfuz Edilen Malzeme Üzerinde Kaynak Parametrelerinin Analitik Rollerini

Pimsiz ve konik pimli kaynaklar için plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacimleri ve kaynak parametreleri arasındaki ilişkiyi gösteren saçılım grafikleri şekil 7.20a-c'de gösterilmiştir.



Şekil 7.20. Pimsiz ve konik pimli kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi üzerinde kaynak parametrelerinin etkileri (a) takım dönme hızı; (b) omuz dalma derinliği; (c) kalma süresi



Şekil 7.20. (Devam) Pimsiz ve konik pimli kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi üzerinde kaynak parametrelerinin etkileri (a) takım dönme hızı; (b) omuz dalma derinliği; (c) kalma süresi

Pimsiz ve konik pimli kaynaklarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz hacminin varyans analizleri (ANOVA) sırasıyla tablo 7.30 ve 7,31’de verilmiştir.

Tablo 7.30. Varyans analizi (nüfuz edilen hacim) – pimsiz takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	4,71	4,71	2,357	2,97	0,252	0,36%
Dalma derinliği	2	1314,94	1314,94	657,469	827,34	0,001	99,37%
Kalma süresi	2	2,03	2,03	1,017	1,28	0,439	0,15%
Hata	2	1,59	1,59	0,795			
Toplam	8	1323,28					

S- 0,891447; R-sq - 99,88%; R-sq (adj) -99,52%

Tablo 7.31. Varyans analizi (nüfuz edilen hacim) – konik pimli takım

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	69,017	69,017	34,508	9,59	0,094	54,19%
Dalma derinliği	2	48,627	48,627	24,314	6,76	0,129	38,18%
Kalma süresi	2	2,516	2,516	1,258	0,35	0,741	1,98%
Hata	2	7,197	7,197	3,598			
Toplam	8	127,357					

S- 1,89692; R-sq - 94,35%; R-sq (adj) -77,40%



## 7.7. Çekme Sonucu

Pimsiz ve pimli kaynaklı bağlantıların çekme makaslama yükleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla tablo 7.32 ve 7.33’de gösterilmektedir. Aynı parametre ayarlarında üç çekme testi yükünün ortalaması, gerçek kaynak kuvveti (gerçek kesme yükü) olarak alınmıştır. Şekil 7,21’de pimsiz ve pimli kaynaklı bağlantıların çekmede kesme yükünün grafik karşılaştırması gösterilmektedir.

Tablo 7.32. Pimsiz kaynaklı bağlantıların çekmede kesme yükleri

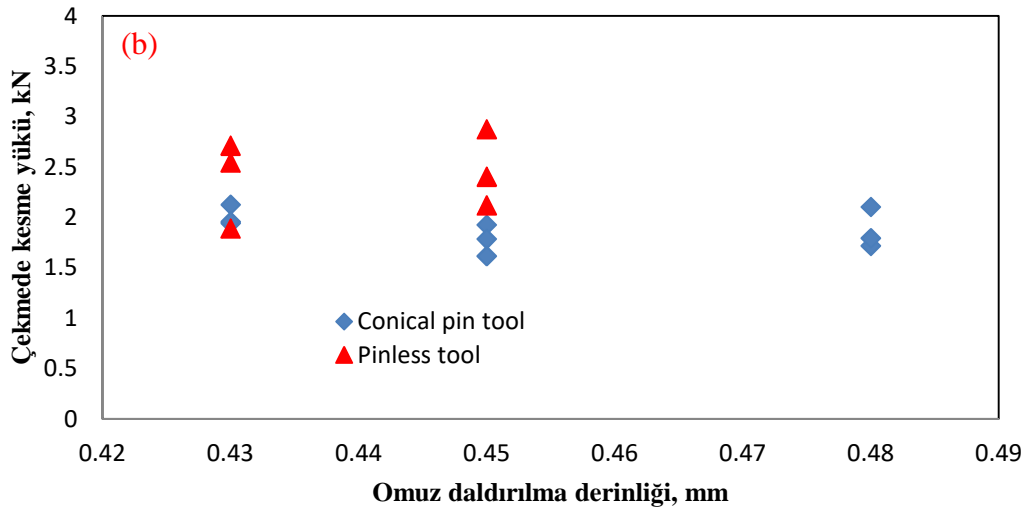
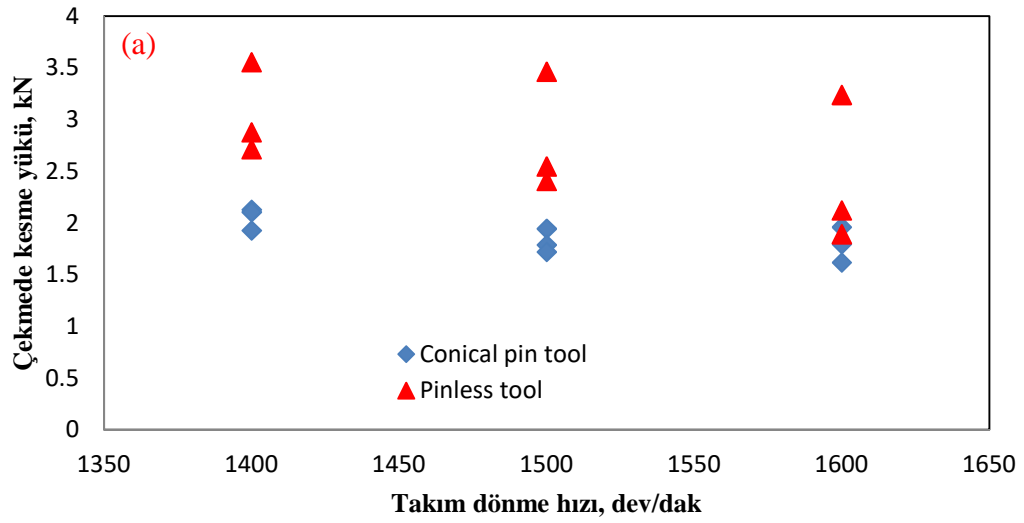
Kaynak kodları	Çekme-makaslama yükü (N)			Çekme makaslama yükünün ortalaması (N)	Çekme makaslama yükünün ortalaması (kN)
PL-TEN 1	2574,6	2726,7	2842,2	2714,5	2,71
PL-TEN 2	2994,2	2799,5	2839,6	2877,8	2,88
PL-TEN 3	3404,7	3704,3	3558,2	3555,7	3,56
PL-TEN 4	2691,0	2476,9	2474,3	2547,4	2,55
PL-TEN 5	2086,2	2924,1	2211,5	2407,3	2,41
PL-TEN 6	3394,8	3359,4	3635,6	3463,3	3,46
PL-TEN 7	1700,6	1737,5	2241,1	1893,1	1,89
PL-TEN 8	2116,1	2246,0	2006,0	2122,7	2,12
PL-TEN 9	3234,8	3292,1	3191,5	3239,5	3,24

Tablo 7.33. Konik pimli kaynaklı bağlantıların çekme makaslama yükleri

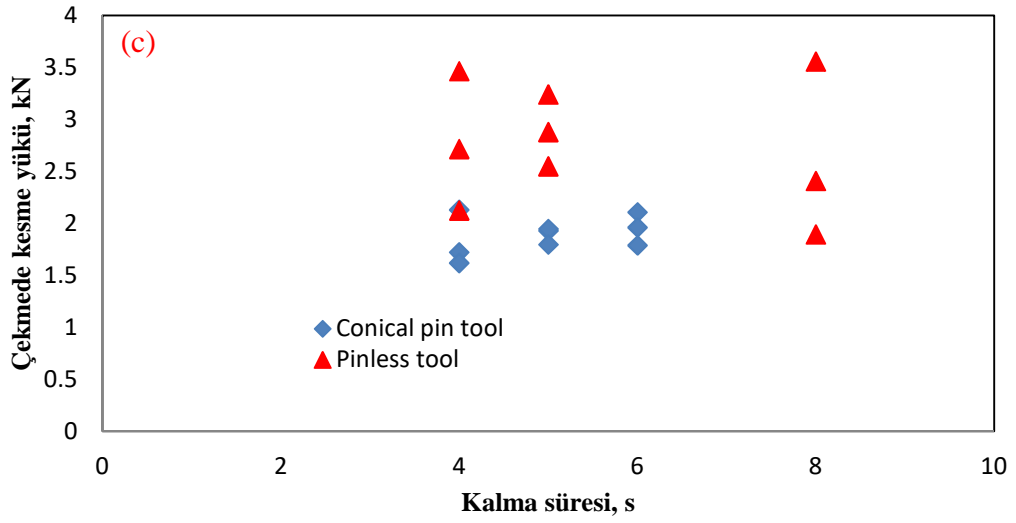
Kaynak kodları	Çekme makaslama yükü (N)			Çekme makaslama yükünün ortalaması (N)	Çekme makaslama yükünün ortalaması (kN)
TEN 1	2128,2	2068,9	2188,7	2128,6	2,13
TEN 2	1882,9	1928,1	1973,3	1928,1	1,93
TEN 3	2162,6	2106,5	2050,1	2106,4	2,11
TEN 4	1831,1	1945,2	2060,0	1945,4	1,95
TEN 5	1752,7	1895,5	1715,4	1787,9	1,79
TEN 6	1532,0	1980,8	1649,3	1720,7	1,72
TEN 7	2028,1	1917,7	1935,1	1960,3	1,96
TEN 8	1668,9	1555,5	1629,9	1618,1	1,62
TEN 9	1879,6	1775,0	1733,6	1796,1	1,80

### 7.7.1. Kaynak parametreleri ve çekme makaslama yükü arasındaki ilişki

Grafikte bağlantıların (konik pimli ve pimsiz) çekme makaslama yükleri ve kaynak parametreleri (örneğin takım dönme hızı, omuz daldırılma derinliği ve kalma süresi) arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun üzerinde elde edilen grafikleri şekiller 7.21a-c'da gösterilmektedir. Aynı şekilde sırasıyla tablolar 7.34 ve 7.35'te pimsiz ve pimli kaynaklı bağlantıların çekme makaslama yükü üzerinde bütün kaynak parametrelerinin bireysel katkıları sağlanmaktadır.



Şekil 7.21. Pimsiz ve konik pimli kaynaklı bağlantılarında çekme makaslama yükleri ve kaynak parametreleri arasındaki ilişki (a) takım dönme hızı; (b) omuz dalma derinliği; (c) kalma süresi



Şekil 7.21. (Devam) Pimsiz ve konik pimli kaynaklı bağlantılarında çekme makaslama yükleri ve kaynak parametreleri arasındaki ilişki (a) takım dönme hızı; (b) omuz dalma derinliği; (c) kalma süresi

Tablo 7.34. Pimsiz kaynaklı bağlantıların varyans analizi (kesme yükü)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	7,427	7,427	3,713	38,77	0,025	26,21%
Dalma derinliği	2	18,871	18,871	9,435	98,50	0,010	66,61%
Kalma süresi	2	1,842	1,842	0,921	9,62	0,094	6,50%
Hata	2	0,192	0,192	0,096			
Toplam	8	28,331					

S- 0,309500; R-sq - 99,32%; R-sq(adj) -97,30%

Tablo 7.35. Konik pimli kaynaklı bağlantıların varyans analizi (kesme yükü)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	2,61172	2,61172	1,30586	82,52	0,012	51,78%
Dalma derinliği	2	1,78849	1,78849	0,89425	56,51	0,017	35,46%
Kalma süresi	2	0,61241	0,61241	0,30620	19,35	0,049	12,14%
Hata	2	0,03165	0,61241	0,30620			
Toplam	8	5,04427	0,03165	0,01582			

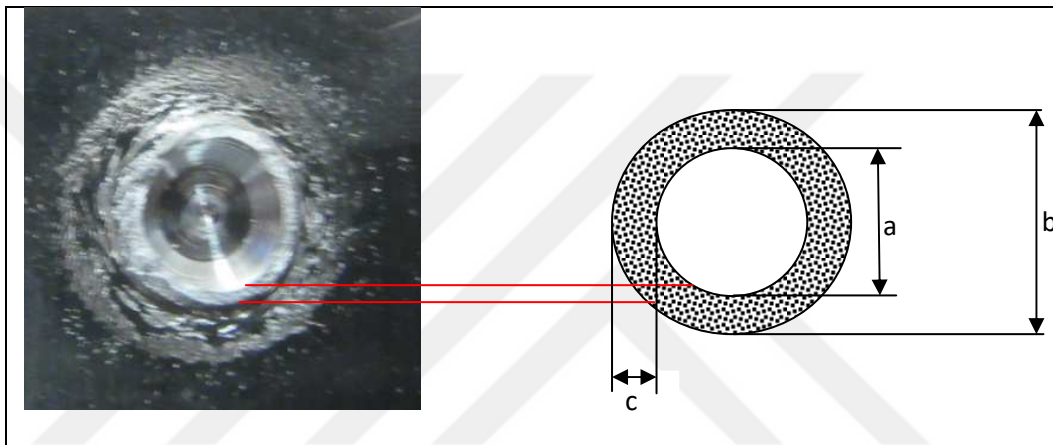
S-0,125797; R-sq - 99,37%; R-sq(adj) -97,49%

### 7.7.2. Kırılma sonrasında kaynakların boyutu veya nugget boyutu

Eksenel yüklemeye sonra kaynakların boyutları gözlemlenmiştir. Böylece, kırılma yüzeyleri boyutları ölçülerek konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin (bağlanmış boyutların) değerlendirilmesi yapılmıştır. Ancak, bu yaklaşım ile pimsiz

kaynaklı bağlantıların etkili boyutları verimli tespit edilememiştir. Çünkü görsel olarak gerçek ya da etkili bağlanmış boyutlardan iyice ayırt edilememiştir.

Böylece, konik pim kaynaklı bağlantılar için şekil 7.22’de kırılma yolu boyunca kırılma deseninin tipik temsili ve bağlanmış boyut gösterilmektedir. Bahsedilmiş gibi pimsiz bağlantılar için kaynakların arayüzey kayma kırık deseni nedeniyle bağlanmış boyut tespit edilememiştir. Sonuç olarak, şekil 7.22’deki belirtmeler aşağıdaki gibi açıklanmıştır. Sırasıyla a, b ve c, çapraz nugget kırığının iç çapı, dış çapı ve bağlanmış boyutu olarak ifade edilmiştir.



Şekil 7.22. Konik pim kaynaklı bağlantının kırık deseni ve bağlanmış boyutu

Benzer şekilde, tablolar 7.36 ve 7.37’de konik pim takımının yardımı ile elde edilen bağlantıların kırılma boyutları gösterilmektedir.

Tablo 7.36. Konik pimli kaynaklı bağlantıların kırık veya bağlanmış boyutları

Kaynak kodları	Bağlanmış dış çap, b (mm)			Bağlanmış dış çapın ortalaması, b (mm)	Bağlanmış iç çap, a (mm)			Bağlanmış iç çapın ortalaması, a (mm)
TEN 1	6,1	5,8	5,8	5,90	4,5	4,7	4,7	4,63
TEN 2	6,1	6,0	6,1	6,07	5,0	4,8	5,0	4,93
TEN 3	5,8	5,9	5,8	5,83	4,7	4,5	4,6	4,60
TEN 4	5,7	5,2	6,4	5,77	4,4	4,2	5,0	4,53
TEN 5	5,8	6,0	5,7	5,83	4,5	4,9	4,7	4,70
TEN 6	5,7	6,0	5,5	5,73	4,8	4,7	4,6	4,70
TEN 7	6,1	5,7	6,0	5,93	4,8	4,8	4,6	4,73
TEN 8	6,0	5,6	5,6	5,73	4,7	5,0	4,8	4,83
TEN 9	6,0	5,6	5,8	5,80	4,6	4,6	4,7	4,63

Tablo 7.37. Konik pimli kaynaklı bağlantıların bağlanmış boyutları

Kaynak kodları	Bağlanmış dış çapın ortalaması, b (mm)	Bağlanmış iç çapın ortalaması, a (mm)	Bağlanmış bölüm boyutu, c (mm)	Bağlanmış alan (mm <sup>2</sup> )
TEN 1	5,90	4,63	0,63	10,48
TEN 2	6,07	4,93	0,57	9,80
TEN 3	5,83	4,60	0,62	10,11
TEN 4	5,77	4,53	0,62	9,98
TEN 5	5,83	4,70	0,57	9,38
TEN 6	5,73	4,70	0,52	8,47
TEN 7	5,93	4,73	0,60	10,06
TEN 8	5,73	4,83	0,45	7,47
TEN 9	5,80	4,63	0,58	9,56

Varyans analizi yöntemi kullanılarak bağlanmış boyutlar üzerinde kaynak parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Kopan çekme numunelerinin takım dönme hızı, daldırılma derinliği ve kalma süresi düzeylerinin yüzde katkıları belirlenmiştir. Tablo 7.38'de konik pim kaynaklı bağlantılar için elde edilen varyans analizi gösterilmektedir.

Tablo 7.38. Konik pim kaynaklı bağlantılarda bağlanmış boyutun varyans analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F- değer	P- değer	Katkı
Dönme hızı	2	0,006067	0,006067	0,003033	3,37	0,229	22,98%
Dalma derinliği	2	0,011267	0,011267	0,005633	6,26	0,138	42,68%
Kalma süresi	2	0,007267	0,007267	0,003633	4,04	0,199	27,53%
Hata	2	0,001800	0,001800	0,000900			
Toplam	8	0,026400					

S- 0,141892; R-sq -75,54%; R-sq(adj)- 72,73%

FSSW takımının pimi, malzeme akışını kolaylaştırmakta ve kaynağın bağlanmış genişliğini azaltmaktadır. Öte yandan sağlam bağlanmış boyutu oluşumu için takım omuzu tarafından en dominant ısı girişi ve gerekli olan sıkıştırma kuvveti sağlanmaktadır. Takımın omuz çapına göre nugget/külçe boyutunun genişliğini incelemek için bir bağlama endeksini veya kesirini tahmin etmeye ihtiyaç duyulmuştur. Konik pim kaynaklı bağlantıların bağlama endeksi veya kesiri, takımın omuz çapına nugget/külçe boyutu veya genişliği oranı olarak ifade edilmiştir. Omuz yüzeyi çapına bağlanmış genişliği (nugget/külçe endeksi) kısmını elde etmek için

Denklem (7.20) kullanılmıştır. Böylece konik pim kaynaklı bağlantıların nugget/külçe endekslerini hesaplamak için Denklem (7.20) ile hesaplanmıştır. Tablo 7.39’da hesaplanmış nugget/külçe endeksleri gösterilmiştir.

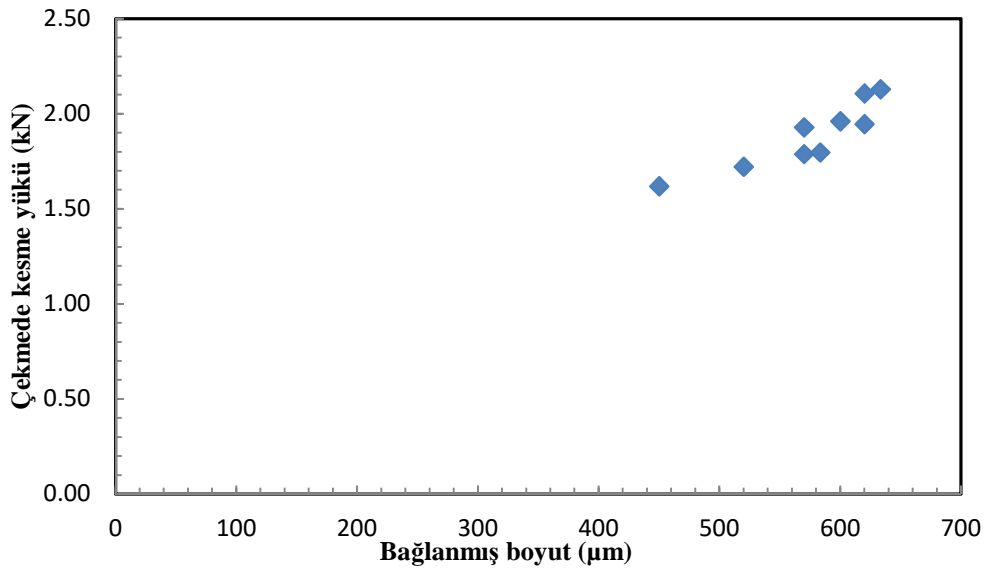
$$I_{CP} = \frac{b}{SSD} \quad (7.20)$$

Bu denklemde, b bağlanmış veya nugget boyutudur ve SSD konik pim takımının omuz yüzeyi çapıdır.

Tablo 7.39. Konik bağlantıların nugget endeksleri

Kaynak kodları	Nugget endeksleri ( $I_{CP}$ )
TEN 1	0,46
TEN 2	0,29
TEN 3	0,31
TEN 4	0,31
TEN 5	0,29
TEN 6	0,26
TEN 7	0,30
TEN 8	0,19
TEN 9	0,29

Aynı şekilde, şekil 7.23’te konik pim kaynaklı bağlantıların kesme yükü ve bağlanmış boyutu veya genişliği arasındaki korelasyon gösterilmektedir.

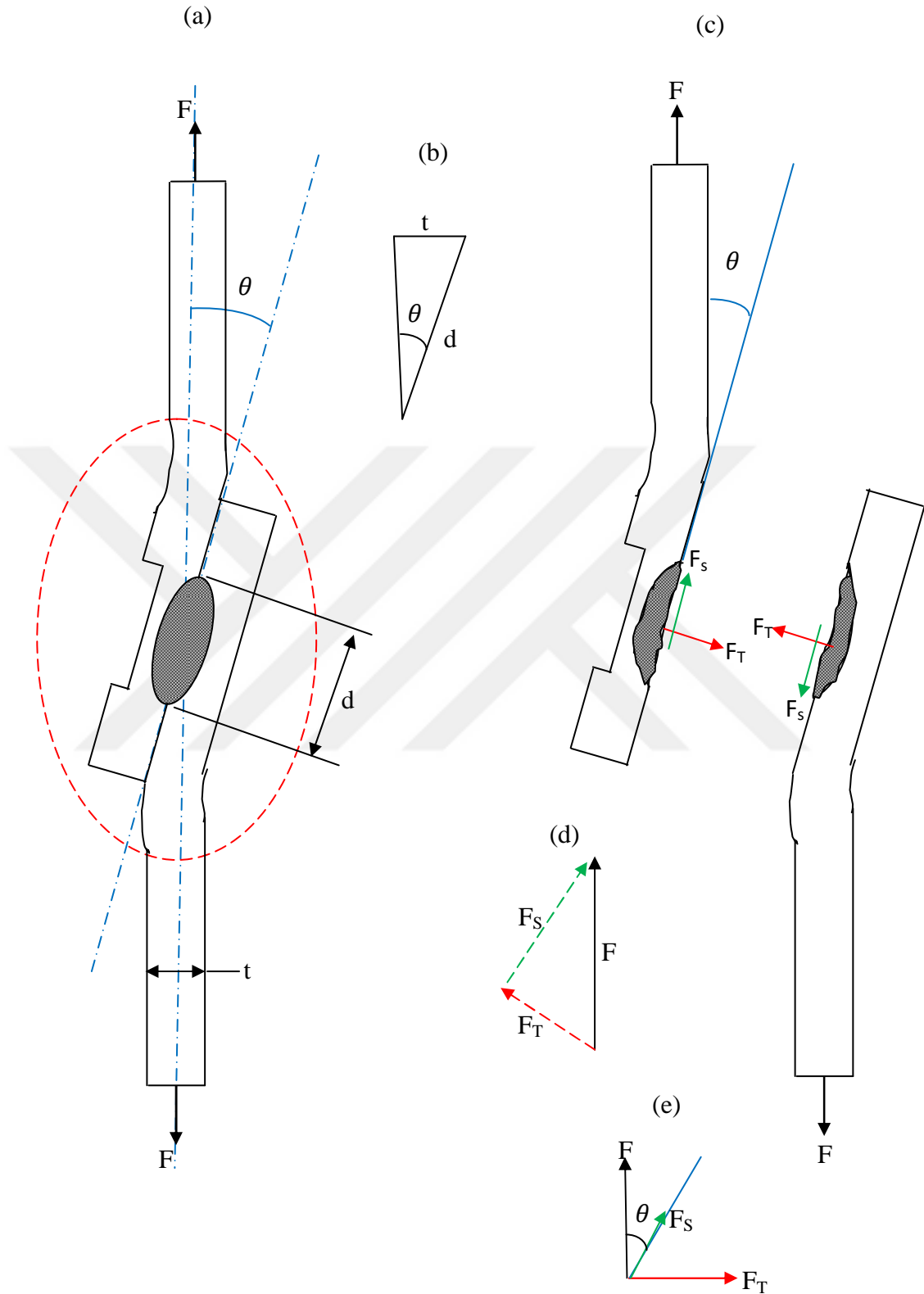


Şekil 7.23. Konik pimli kaynakların bağlanmış boyutları veya Nuggetleri ve çekmede kesme yükleri arasındaki ilişki

### 7.7.3. Aksenal yükleme altında kırılmış kaynak numunesi üzerinde gerilme analizi

Pimsiz ve pimli kaynaklarda kırılma deseni göz önüne alındığında kaynak nuggeti üzerinde gerilme analizleri incelenmiştir. Sürtünme karıştırmaya nokta kaynağı ile elde edilen konik pimli kaynakta nugget kesme kırılması ve pimsiz kaynakta ara yüzey kesme kırılması olmuştur. Şekil 7.24 yapılandırmalarında dayalı ve kırılma başlatmak için nugget üzerinde iki gerilme türü etkilenmektedir. Bunlar, ekme (dik veya normal) gerilmesi ve kesme veya teğet gerilmeleridir.

Şekil 7.24'te  $F$  aksenal kuvvettir,  $\theta$  açısal yer değiştirmesidir ya da kaynak nugget rotasyonudur,  $t$  sac kalınlığıdır,  $d$  nugget çapı veya bağlanmış boyut veya genişliktir,  $F_T$  kaynak üzerinde çekme gerilimini oluşturmak için nugget etkileyen çekme kuvveti veya yüktür ve  $F_S$  kaynak üzerinde kayma gerilmesini oluşturmak için kesme kuvveti veya yüktür.



Şekil 7.24. Aksenal yüklü pimsiz kaynak (a) kaynağın nugget rotasyonu; (b) nuggetin açısal yer değıştirmesi; (c) kırılmış numune ile gerilmeler; (d) kırılmış kesme deneyi numunesinin serbest cisim diyagramı; (e) kuvvet çözünlüğü



Pisagor teoremine göre (şekil 7.24'e göre) kaynağın nugget rotasyonu ya da açısallık yer değıştirmesi Denklem (7.21)'de ifade edilenmiştir. Denklem (7.21)'in formül konusunun değışikliği yoluyla Denklem (7.22) olarak yeniden yazılmıştır.

$$\sin \theta = \frac{t}{d} \quad (7.21)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{t}{d} \right) \quad (7.22)$$

Şekil 7.24d veya 7.24e'ye göre nuggetin açısallık yer değıştirmesine ilişkin kuvvetlerin (çekme ve kesme kuvvetleri) çözümlüğü gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, çözümlü çekme ve kesme kuvvetleri, sırasıyla Denklem (7.23) ve (7.24)'te verilmektedir.

$$F_T = F \sin \theta \quad (7.23)$$

$$F_S = F \cos \theta \quad (7.24)$$

Bunun bir sonucu olarak, şekil 7.24c'ye göre nugget üzerinde etki edilen gerilmeler (çekme ve kesme gerilmeleri) hesaplanmaktadır. Sırasıyla Denklemler (7.23) ve (7.24) kullanılarak açısallık kesme ve çekme kuvvetleri hesaplanmaktadır. Ayrıca, kaynağın nuggeti veya bağlanmış alanı, Denklem (7.25) olarak ifade edilmektedir. Aynı şekilde Denklem (7.26)'da çekme gerilmesi ifade edilmektedir.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (7.25)$$

$$\sigma = \frac{4F_T}{\pi d^2} \quad (7.26)$$

Denklem (7.26) içine  $F_T$  değeri (Denklem (7.23) olarak) ikame edilerek kaynak nuggeti üzerine etkiyen çekme gerilmesi Denklem (7.27) olarak yeniden yazılmaktadır. Benzer şekilde, çekme gerilmesi için  $t/d$  ile  $\sin \theta$  değıştirilerek Denklem (7.27) azaltılmakta ve türetilmiş Denklem (7.28) elde edilecektir.

$$\sigma = \frac{4F \sin \theta}{\pi d^2} \quad (7.27)$$

$$\sigma = \frac{4Ft}{\pi d^3} \quad (7.28)$$

Aynı şekilde, kaynağın aksenal yüklemesi sırasında üretilmiş kesme gerilmesi Denklem (7.29) olarak ifade edilmektedir. Denklem (7.29) içerde  $F_S$  ile  $F \cos \theta$

değiştirilerek kayma gerilmesi, Denklem (7.30) elde edilmektedir.  $F_s$ , nugget alanı (A) üzerinde etkili olan bileşke kuvvettir.

$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad (7.29)$$

$$\tau = \frac{F \cos \theta}{A} \quad (7.30)$$

Trigonometrik kurallarına göre, Denklem (7.31) gösterildiği gibi kosinüs  $\theta$ , sin  $\theta$  cinsinden ifade edilebilir. Bunun bir sonucu olarak, ifade sinüs  $\theta$ , Denklem (7.32)'de indirgenmektedir.

$$\cos \theta = (1 - (\sin \theta)^2)^{1/2} \quad (7.31)$$

$$\cos \theta = \left(1 - \left(\frac{t}{d}\right)^2\right)^{1/2} \quad (7.32)$$

Bu nedenle, kaynak nuggeti üzerinde etki yapan kesme kuvveti için Denklem (7.30) içine Denklem (7.32) değiştirilerek Denklem (7.33) elde edilmektedir.

$$\tau = \frac{F}{A} \left[1 - \left(\frac{t}{d}\right)^2\right]^{1/2} \quad (7.33)$$

Denklem (7.34)'te gösterilen kaynak nuggeti üzerinde etki yapan kesme gerilmesini elde etmek için Denklem (7.25)'de gösterildiği gibi A değeri (nugget alanı), Denklem (7.33)'de yerine konmaktadır.

$$\tau = \frac{4F}{\pi d^2} \left[1 - \left(\frac{t}{d}\right)^2\right]^{1/2} \quad (7.34)$$

Bununla birlikte, Denklem (7.35)'te gösterilen Von Mises denklemine göre kaynak nuggetinde etkiyen eşdeğer gerilme hesaplanmaktadır. Denklem (7.35) içine Denklem (7.28) ve (7.34) değerleri ikame edilerek kaynak nuggetinin üzerine etkiyen elde edilen eşdeğer gerilmesi Denklem (7.36)'da gösterilmektedir. İndirgenmiş Denklem (7.36), Denklem (7.37) olmakta ve şekil 7.38'te son türetilmiş eşdeğer gerilme sağlanmaktadır.

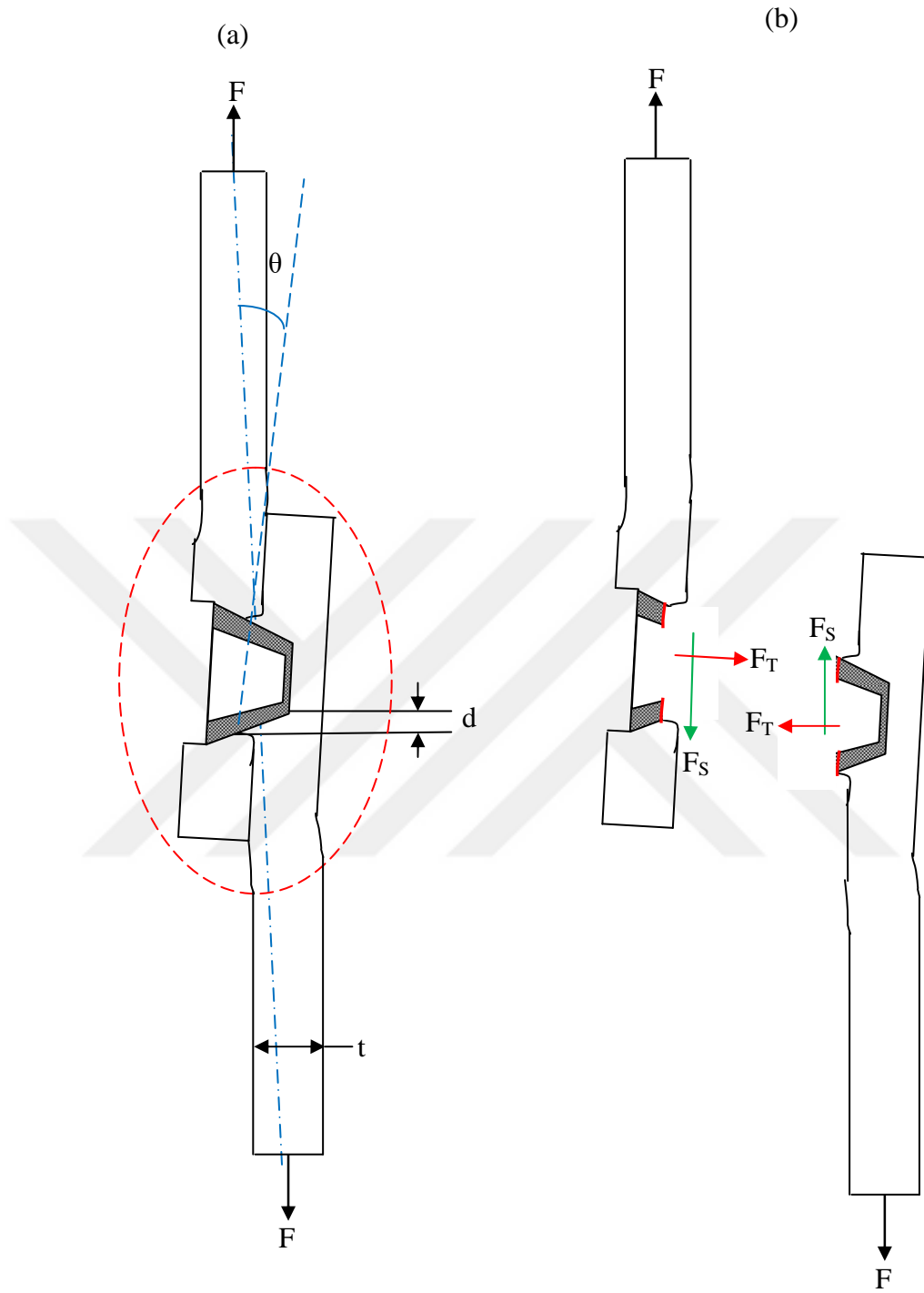
$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma^2 + 3\tau^2)} \quad (7.35)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\left[ \left( \frac{4Ft}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left( \frac{4F}{\pi d^2} \left( 1 - (t/d)^2 \right)^{1/2} \right)^2 \right]} \quad (7.36)$$

$$\sigma_e = \sqrt{\left( \frac{4F}{\pi d^2} \right)^2 \left[ \left( \frac{t}{d} \right)^2 + 3 \left( \left( 1 - (t/d)^2 \right)^{1/2} \right)^2 \right]} \quad (7.37)$$

$$\sigma_e = \frac{4F}{\pi d^2} \left[ 3 - \frac{2t^2}{d^2} \right]^{1/2} \quad (7.38)$$

Konik pimli kaynaklarda gerilme analizi, pimsiz kaynağın prosedürü gibidir. Ancak, konik pimli kaynağın bağlanmış boyutunu ve pimsiz kaynakların bağlanmış alanı farklıdır. Sonuç olarak, her iki kaynaklarda gerilme dağılımına maruz bölge benzer değildir. Eksenel yük altında konik pimli kaynaklanmış bağlantının şematik gösterimi şekil 7.25'te gösterilmektedir. Konik pimli kaynağın pim derinliği nedeniyle kaynaklı bağlantıda bir halka benzeri bağlanmış alan veya nugget oluşturulmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, konik pimli kaynak gerilmesi analizi için bu halka benzeri bağlanmış alanı, gerekli etkili bağlanmış alan olmaktadır.



Şekil 7.25. Eksenel yüklü konik pimli kaynak (a) kaynağın zayıf nugget rotasyonu; (b) kırılmış numune ile gerilmeler

Bu nedenle, Denklem (7.39)'da konik pimli kaynak bağlantısının etkili alanı verilmektedir.

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (7.39)$$

D ve d, konik pimli bağlantının bağlanmış halka benzeri nuggetinin dış ve iç çaplarıdır.

Denklem (7.40) gösterildiği gibi konik pim kaynaklı bağlantı üzerinde etkin çekme gerilmesi ifade edilmekte ve Denklem (7.41)'de kesme gerilmesi gösterilmektedir.

$$\sigma = \frac{4F_T}{\pi(D^2-d^2)} \quad (7.40)$$

$$\tau = \frac{4F_S}{\pi(D^2-d^2)} \quad (7.41)$$

$F_T$  ve  $F_S$  aksenal yükleme koşulu sırasında kaynak üzerinde etkili çekme ve kesme kuvvetleridir. Dönme açısı ya da nugget rotasyonu bakımından/açısından bu kuvvetler ifade edilebilir ve Denklemler (7.42) ve (7.43)'te gösterilmektedir. Ancak, F, aksenal yükleme işlemi sırasında iş parçasına uygulanan aksenal kuvvettir.

$$F_T = F \sin \theta \quad (7.42)$$

$$F_S = F \cos \theta \quad (7.43)$$

Konik pimli kaynaklı bağlantında nugget rotasyonu ise ortak ihmal edilebilir ya da yaklaşık sıfır olmaktadır. Bağlantının aksenal yüklenmesi sırasında en baskın güç, kesme kuvveti ( $F_S$ ) olmakta ve gerilme kuvveti ( $F_T$ ) ihmal edilecektir. Bunun bir sonucu olarak, iş parçasının ya da kaynak yerinde uygulanan aksenal kuvvet, kaynak nuggetinin kesmesini oluşturmaktadır. Böylece, iş parçasına etkiyen kesme-kuvveti Denklem (7.44)'te verilmekte ve kesme gerilmesi, Denklem (7.45) olarak yeniden yazılmaktadır.

$$F_S = F \quad (7.44)$$

$$\tau = \frac{4F}{\pi(D^2-d^2)} \quad (7.45)$$

Ayrıca, konik pim kaynaklı bağlantı üzerinde etkili baskın gerilme, kesme gerilmesidir. Ancak pimsiz kaynaklı bağlantı üzerinde hem çekme gerilmesi hem de kesme gerilmesi ortaya çıkmaktadır.

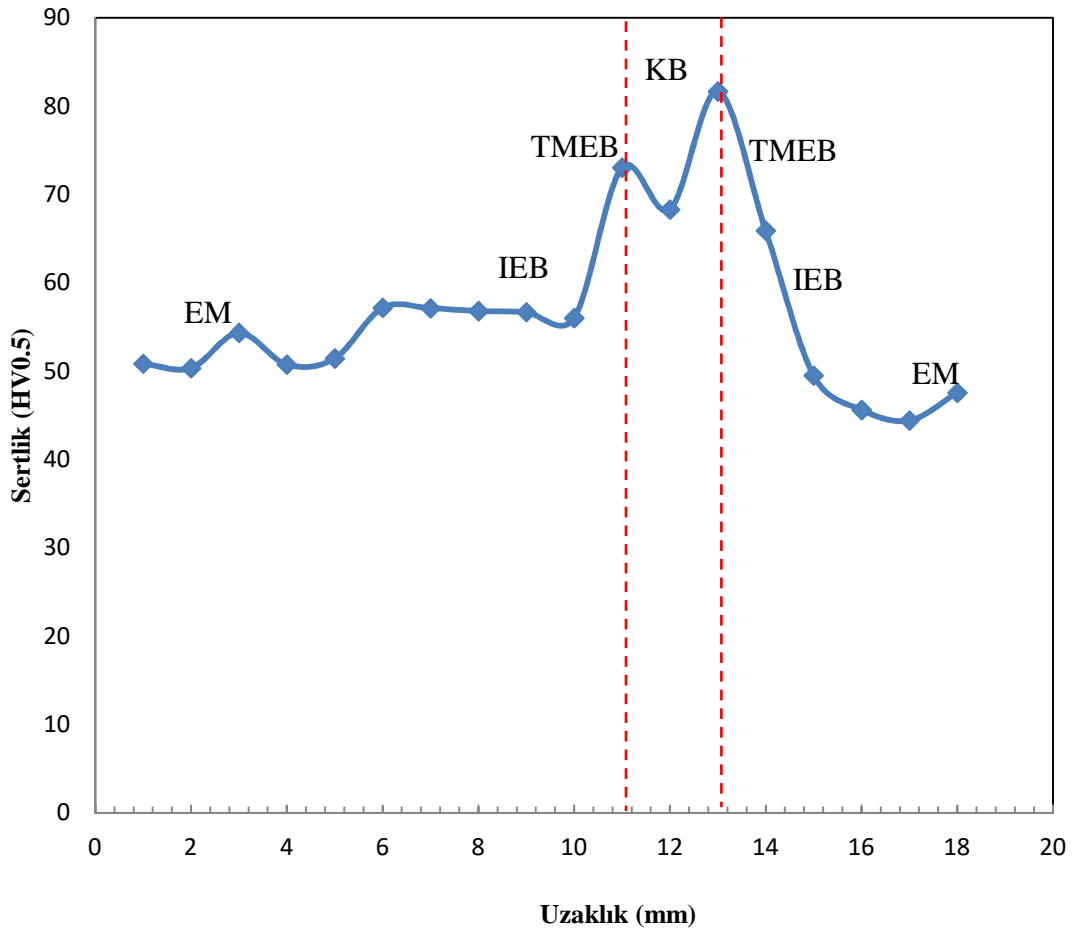
## 7.8. Sertlik Ölçümü

Tablolar 7.40 - 7.43'de kaynak bölgeleri boyunca gözlenen mikrosertlik ölçümleri verilmektedir. Ayrıca, şekiller 7.26 -7.29'da mikrosertlik değerlerinin grafiksel çizimleri veya görüşleri gösterilmektedir.

Tablo 7.40. Konik pim Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (TEN1 kaynak numunesi)

Kaynak kodları	EM	IEB	TMEB	KB	TMEB	IEB	EM
TEN1	50,33- 51,42	56,00- 57,15	57,15- 68,28	68,28- 81,64	81,64- 65,88	65,88- 49,49	47,54- 49,49

EM- esas metal; IEB- ısıdan etkilenen bölge; TMEB- termo-mekanik etkilenen bölge; KB- karıştırılmış bölge

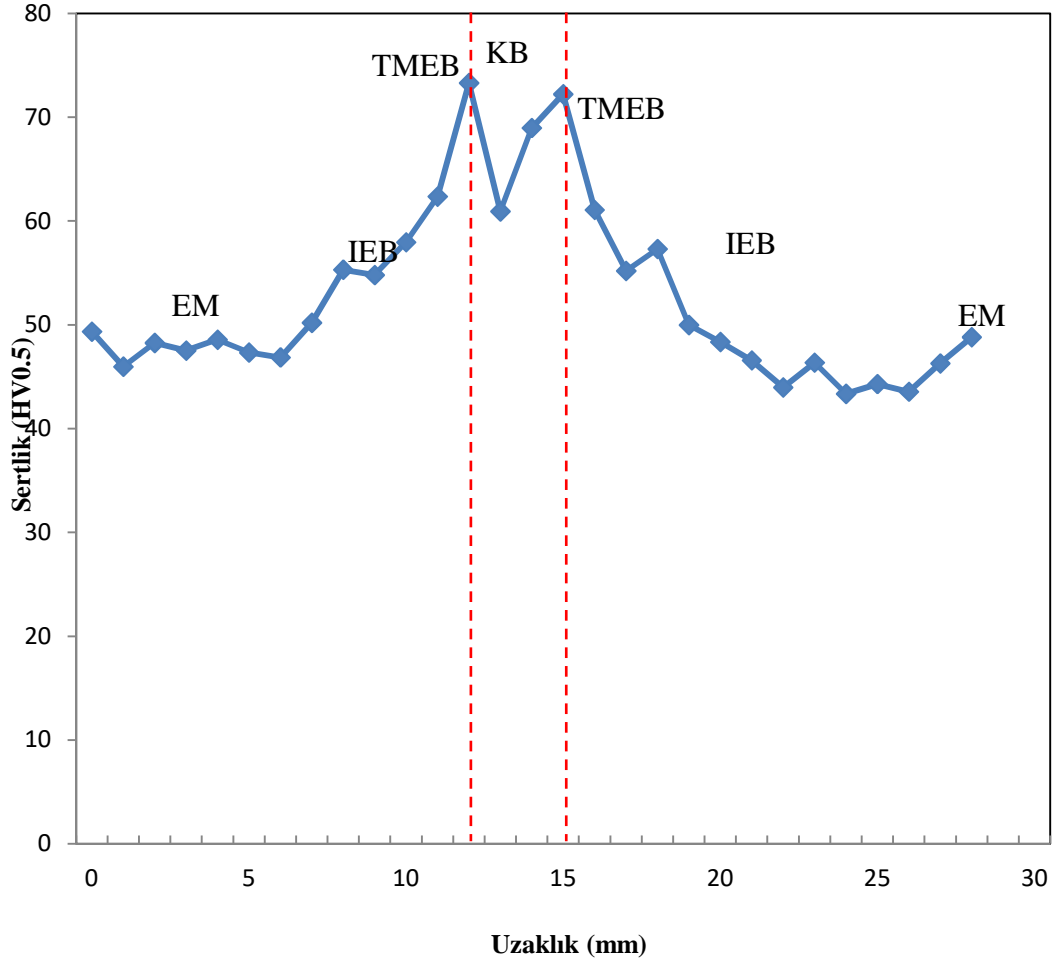


Şekil 7.26. Konik pim kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (TEN1 kaynak numunesi)

Tablo 7.41. Konik pim Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (TEN8 kaynak numunesi)

Kaynak kodları	EM	IEB	TMEB	KB	TMEB	IEB	EM
TEN8	47,52- 50,2	54,8- 57,96	57,96- 73,30	62,36- 73,30	73,30- 55,20	49,98- 57,31	46,36- 49,98

EM- esas metal; IEB- ısıdan etkilenen bölge; TMEB- termo-mekanik etkilenen bölge; KB- karıştırılmış bölge

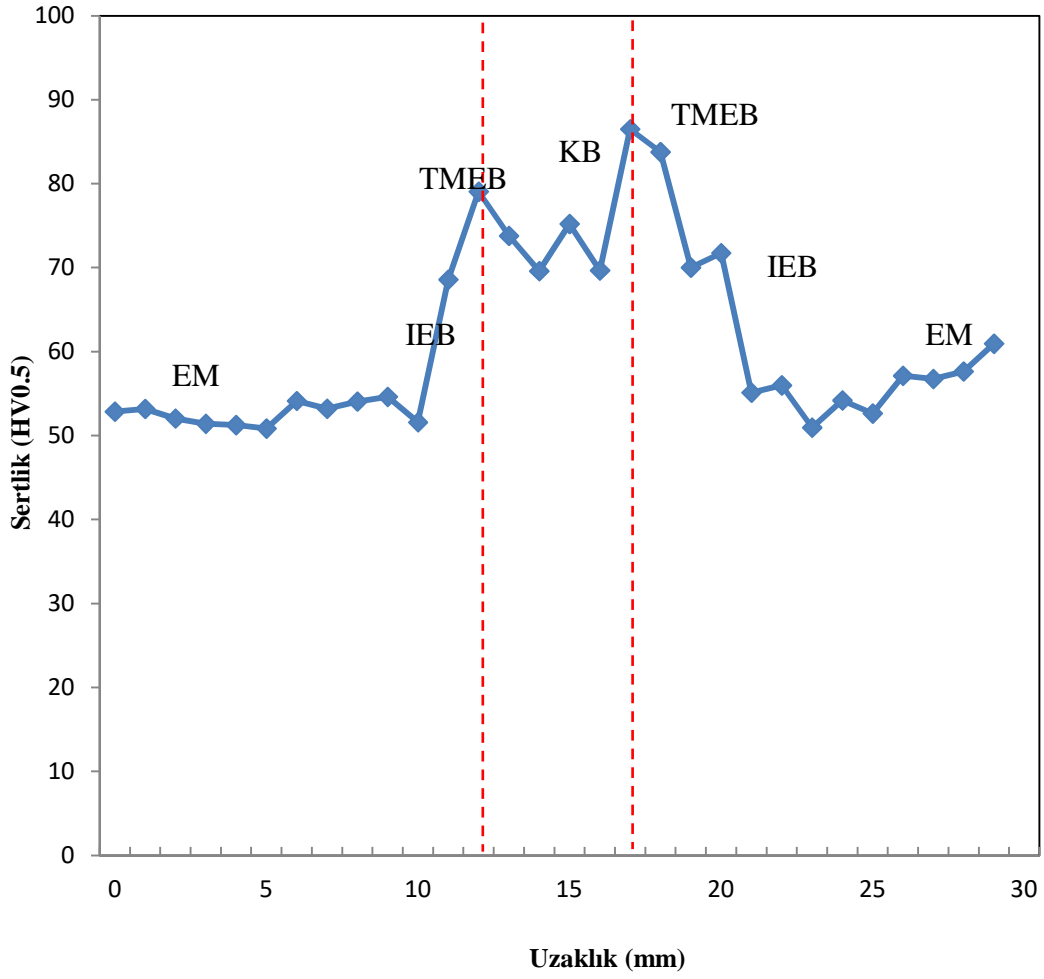


Şekil 7.27. Konik pim kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (TEN1 kaynak numunesi)

Tablo 7.42. Pimsiz Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (P-TEN3 kaynak numunesi)

Kaynak kodları	EM	IEB	TMEB	KB	TMEB	IEB	EM
P-TEN3	50,85-53,18	54,13-73,79	73,79-79,06	79,06-86,5	86,50-71,44	71,44-55,99	55,99-50,95

EM- esas metal; IEB- ısıdan etkilenen bölge; TMEB- termo-mekanik etkilenen bölge; KB- karıştırılmış bölge



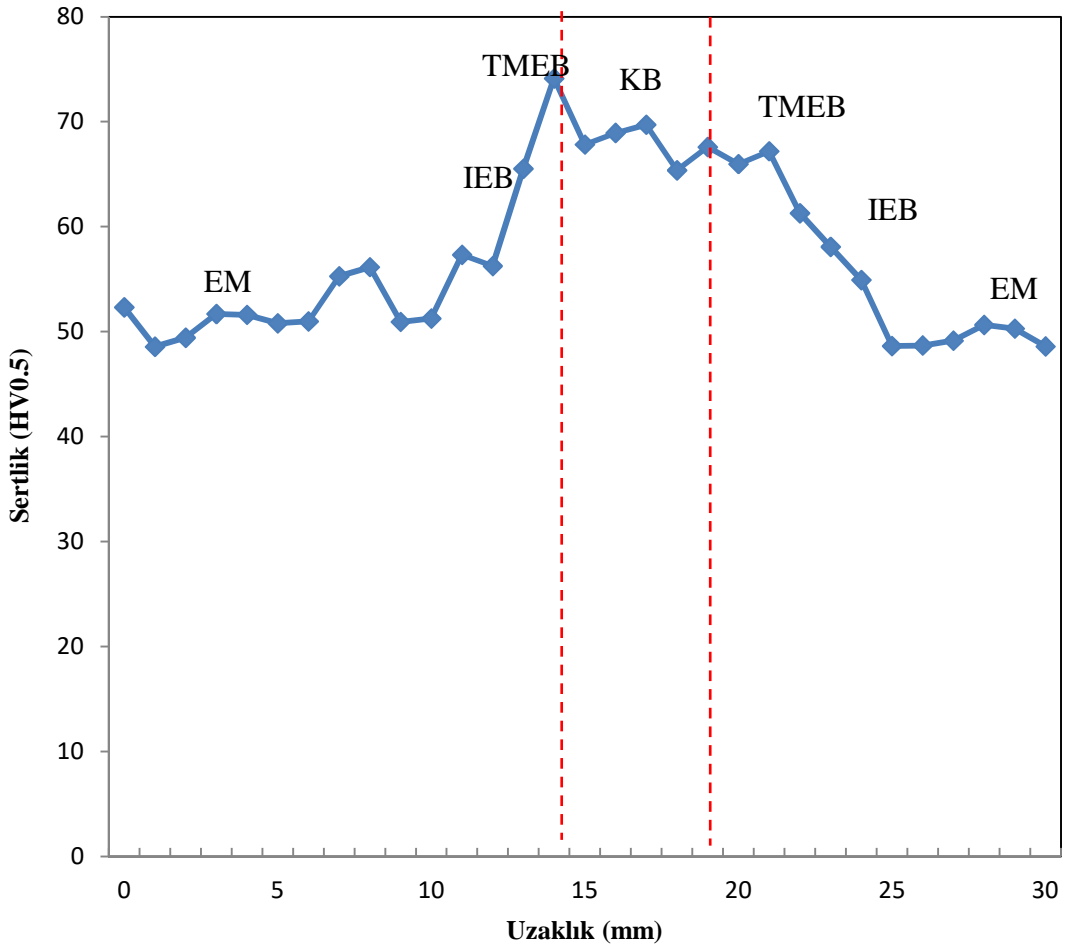
Şekil 7.28. Pimsiz kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (P-TEN3 kaynak numunesi)



Tablo 7.43. Pimsiz Kaynaklı bağlantıların mikrosertlik ölçümü (P-TEN7 kaynak numunesi)

Kaynak kodları	EM	IEB	TMEB	KB	TMEB	IEB	EM
P-TEN7	48,56- 52,32	52,32- 57,32	57,32- 74,12	74,12- 67,59	67,59- 61,29	61,29- 54,92	48,59- 50,64

EM- esas metal; IEB- ısıdan etkilenen bölge; TMEB- termo-mekanik etkilenen bölge; KB- karıştırılmış bölge



Şekil 7.29. Pimsiz kaynaklı bağlantılar genişliğinde mikrosertlik değerlerinin dağılımı (P-TEN7 kaynak numunesi)

## 7.9. Yorulma Sonuçları

Sırasıyla tablolar 7.44 ve 7.45'te pimsiz ve konik pim kaynaklı birleştirmelerin eğilmeli yorulma sonuçları gösterilmektedir. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların yorulma ömürlerinin değişimini görmek için yorulma sonuçlarının grafik temsilleri şekiller 7.30 ve 7.31'de gösterilmektedir. Benzer şekilde, şekiller

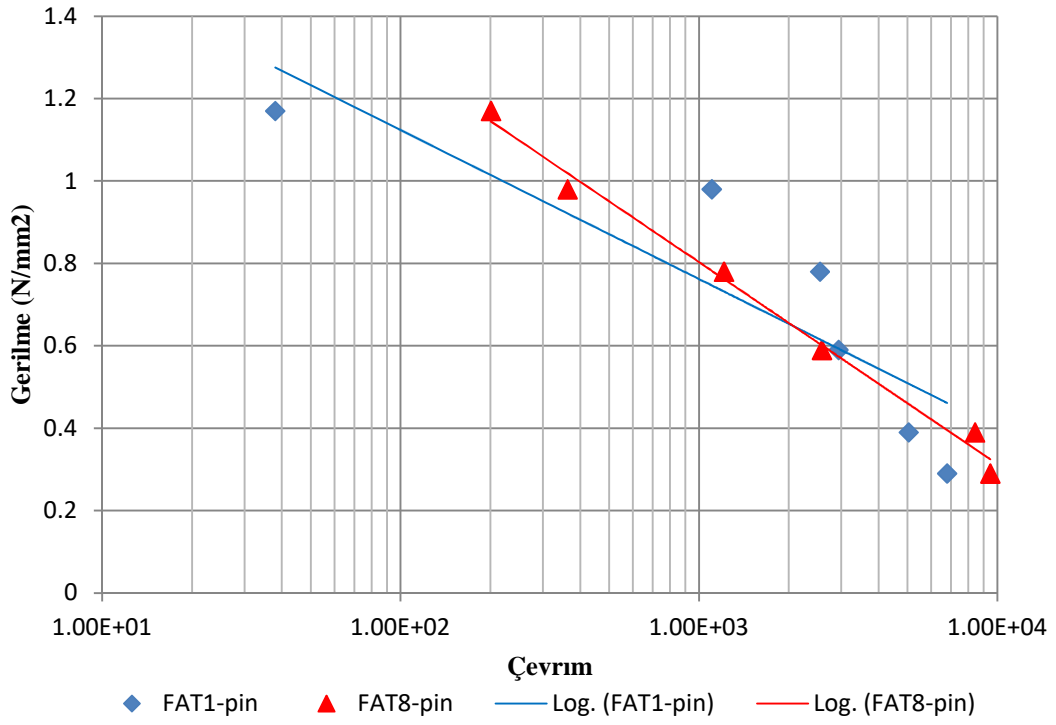
7.32 ve 7.33'te minimum ve maksimum çekmede kesme yükleri üzerinde konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların yorulma ömürlerinin karşılaştırılmaları gösterilmektedir.

Tablo 7.44. Pimsiz bağlantıların eğilmeli yorulma sonuçları

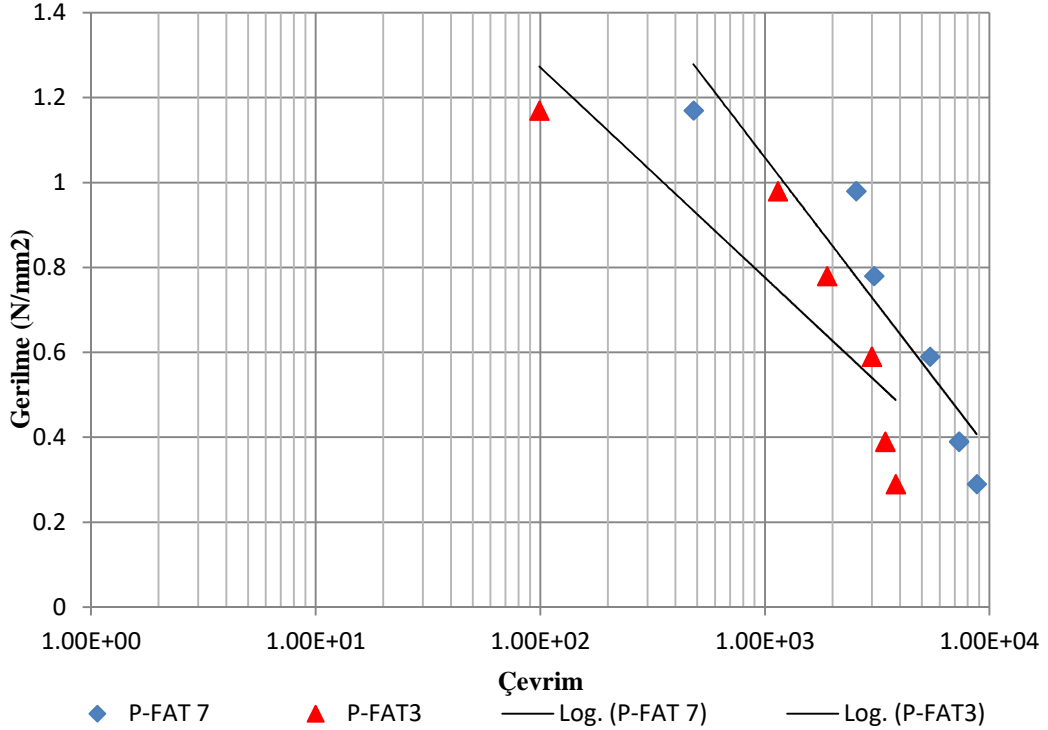
P-FAT7		P-FAT 3	
Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Yorulma ömrü	Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Yorulma ömrü
0,29	8771	0,29	3818
0,39	7312	0,39	3433
0,59	5430	0,59	2990
0,78	3060	0,78	1891
0,98	2547	0,98	1141
1,17	481	1,17	99

Tablo 7.45. Konik pimli bağlantıların eğilmeli yorulma sonuçları

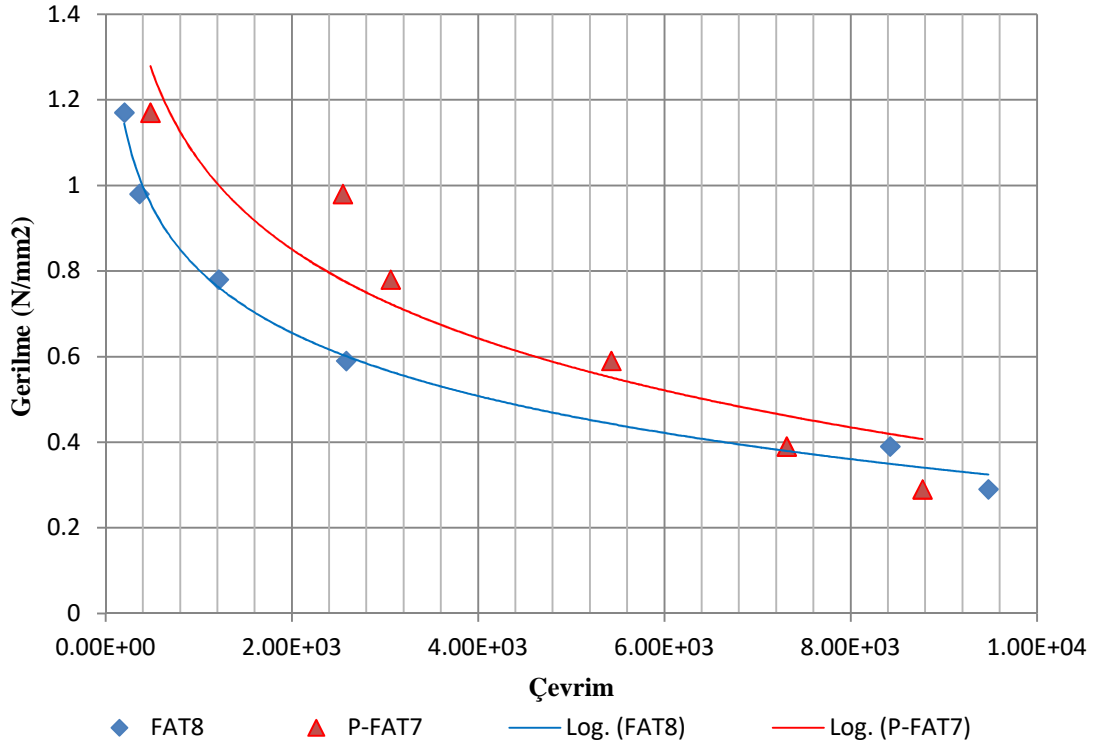
FAT8		FAT 1	
Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Yorulam ömrü	Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )	Yorulam ömrü
0,29	9478	0,29	6788
0,39	8423	0,39	5046
0,59	2583	0,59	2937
0,78	1214	0,78	2545
0,98	363	0,98	1104
1,17	201	1,17	38



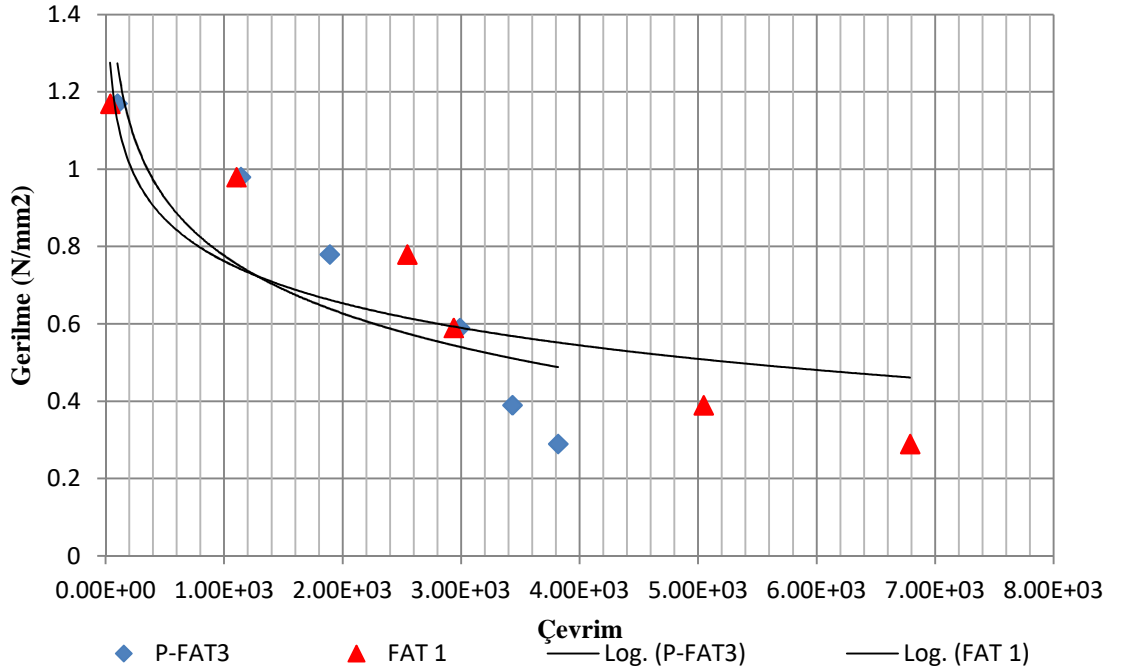
Şekil 7.30. İki konik pim kaynaklı bağlantının yorulma verilerinin karşılaştırması (FAT1 and FAT8)



Şekil 7.31. İki pimsiz kaynaklı bağlantının yorulma verilerinin karşılaştırması (P-FAT3 and P-FAT7)



Şekil 7.32. En düşük çekmede kesme yüklerine dayalı pimsiz ve konik pim kaynaklı birleştirmelerin yorulma verilerinin karşılaştırılması

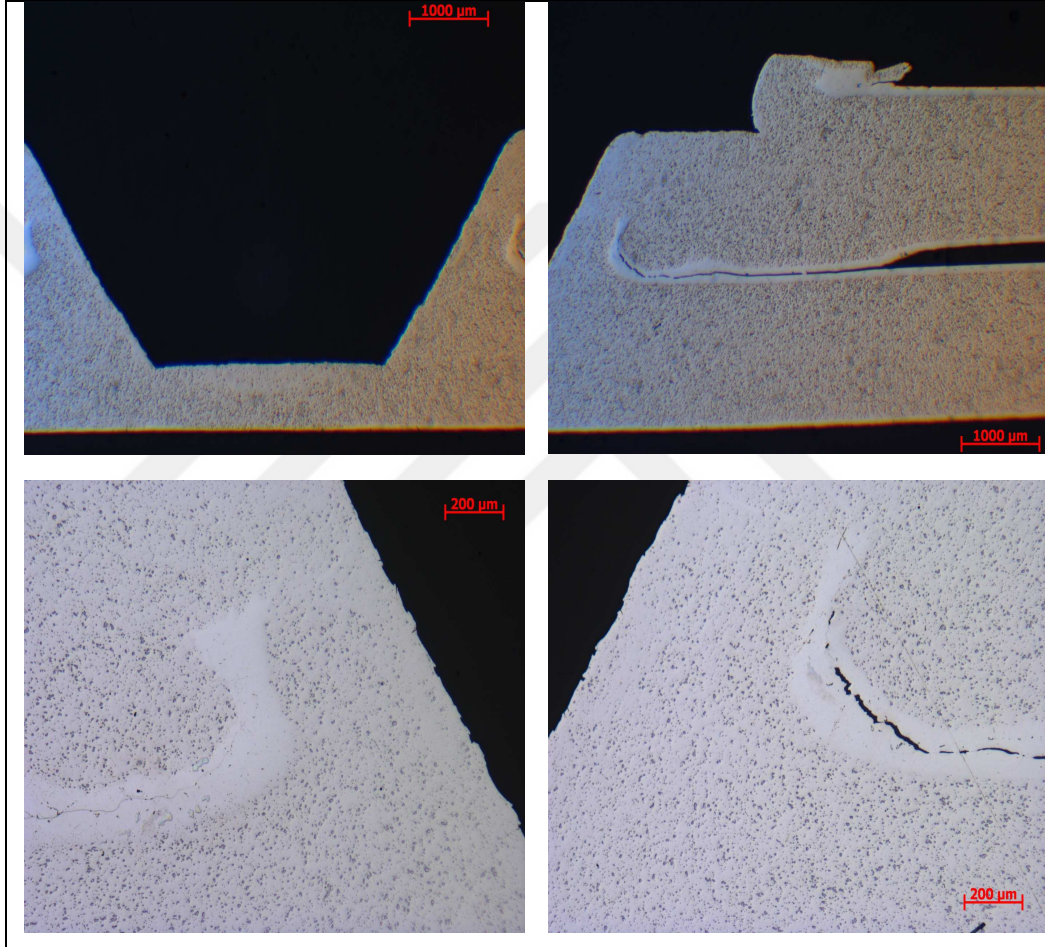


Şekil 7.33. En büyük çekmede kesme yükleri dayalı pimsiz ve konik pim kaynaklı birleştirmelerin yorulma verilerinin karşılaştırılması

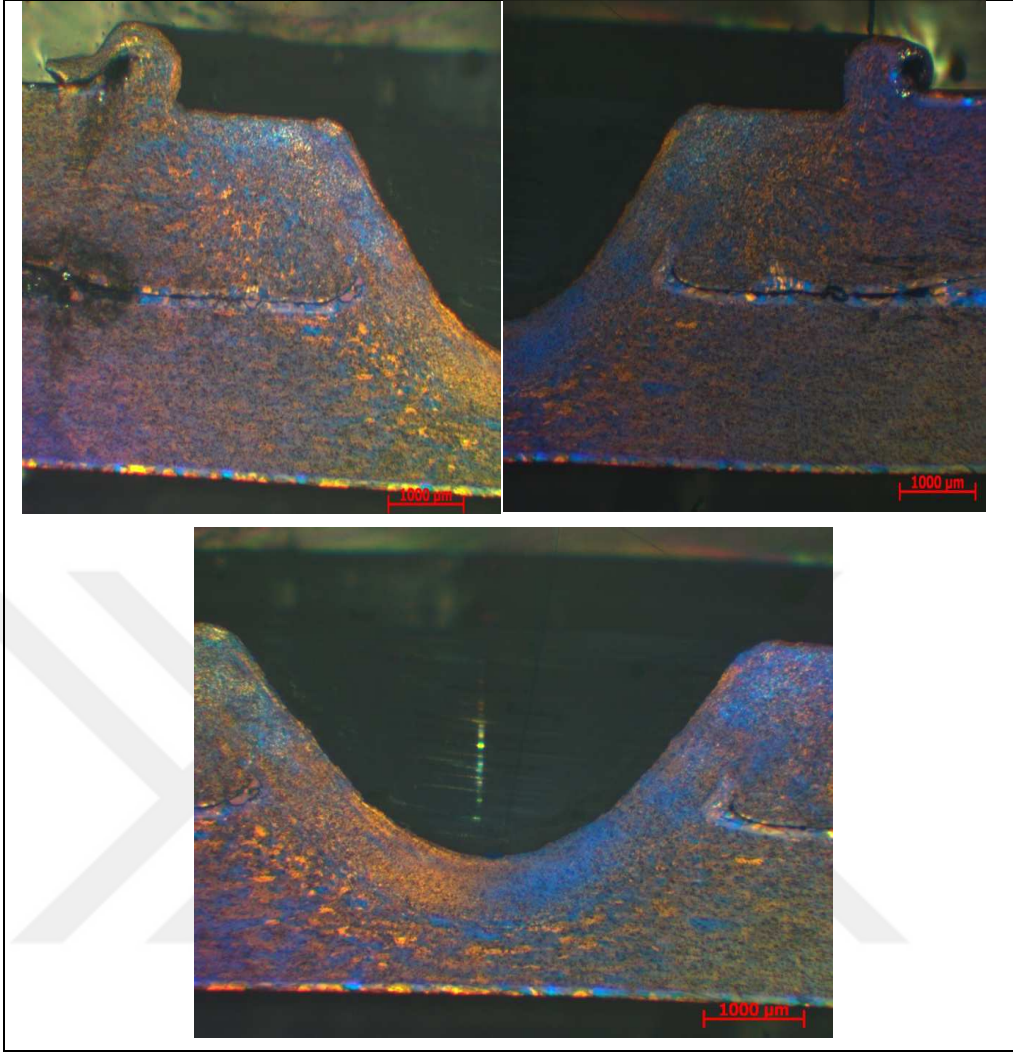
## 7.10. Makro ve Mikroyapı Sonuçları

### 7.10.1. Kaynakların makroyapısı

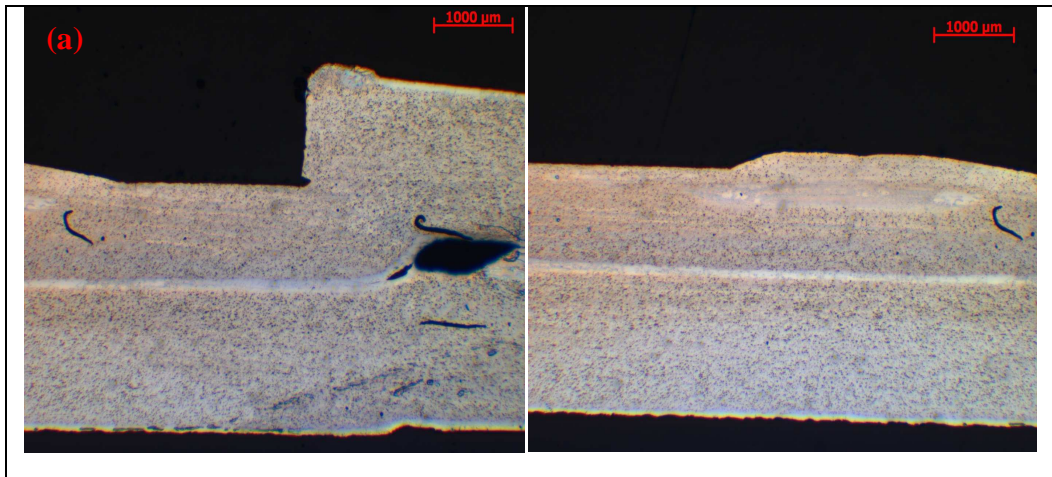
Şekiller 7.34 ve 7.35'te elde edilen konik pim kaynaklı bağlantıların makroyapıları gösterilmektedir. Benzer şekilde, şekil 7.36'da gösterilen pimsiz kaynaklı bağlantıların makroyapısı verilmektedir.



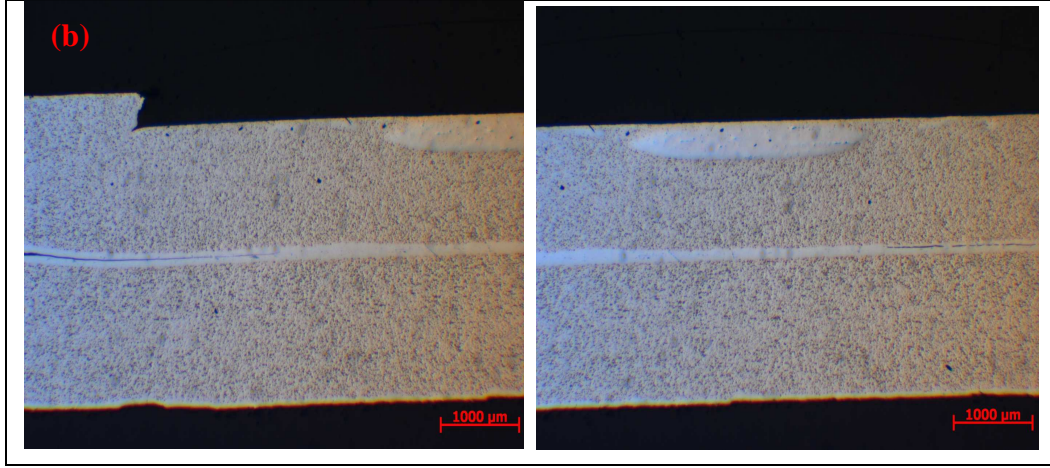
Şekil 7.34. Konik pim destekli kaynağın makroyapısı (TEN1 kaynaklı bağlantı)



Şekil 7.35. Konik pim destekli kaynağın makroyapısı (TEN8 kaynaklı bağlantı)



Şekil 7.36. Pimsiz takım destekli kaynağın makroyapıları (a) P-TEN3 kaynaklı bağlantı; (b) P-TEN7 kaynaklı bağlantı

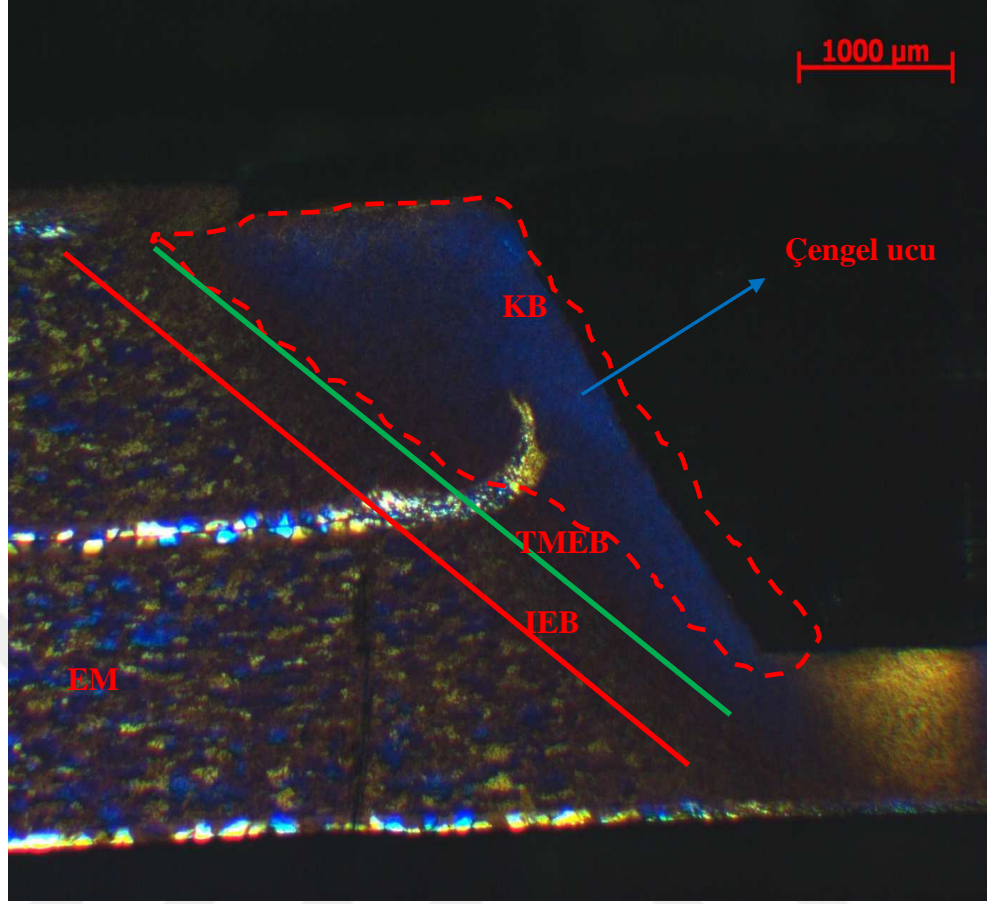


Şekil 7.36. (Devam) Pimsiz takım destekli kaynağın makroyapıları (a) P-TEN3 kaynaklı bağlantı; (b) P-TEN7 kaynaklı bağlantı

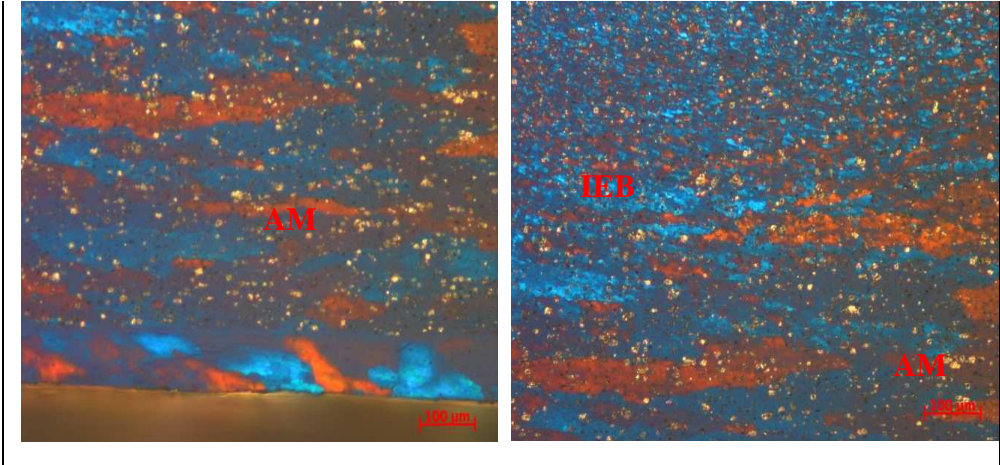
### 7.10.2. Kaynak bölgeleri ve kaynakların mikroyapısı

Sürtünme karıştırma nokta kaynağının kaynak bölgesi, karıştırma bölgesi (KB), termo-mekanik etkilenen bölge (TMEB), ısıdan etkilenmiş bölge (IEB) ve esas metal (EM)'den oluşmaktadır. Böylece, bu anlayışa göre elde edilen konik pimli sürtünme karıştırma nokta kaynağının kaynak bölgeleri şekil 7.37'de gözlemlenmiştir.

Ayrıca, bölgelerin kendi tane boyutlarını görmek için optik mikroskop altında kaynak bölgelerinin mikroyapısı incelenmektedir. Sonuç olarak, şekiller 7.38 ve 7.39'da incelenmiş konik pim kaynaklı bağlantıların mikroyapıları gösterilmiştir.

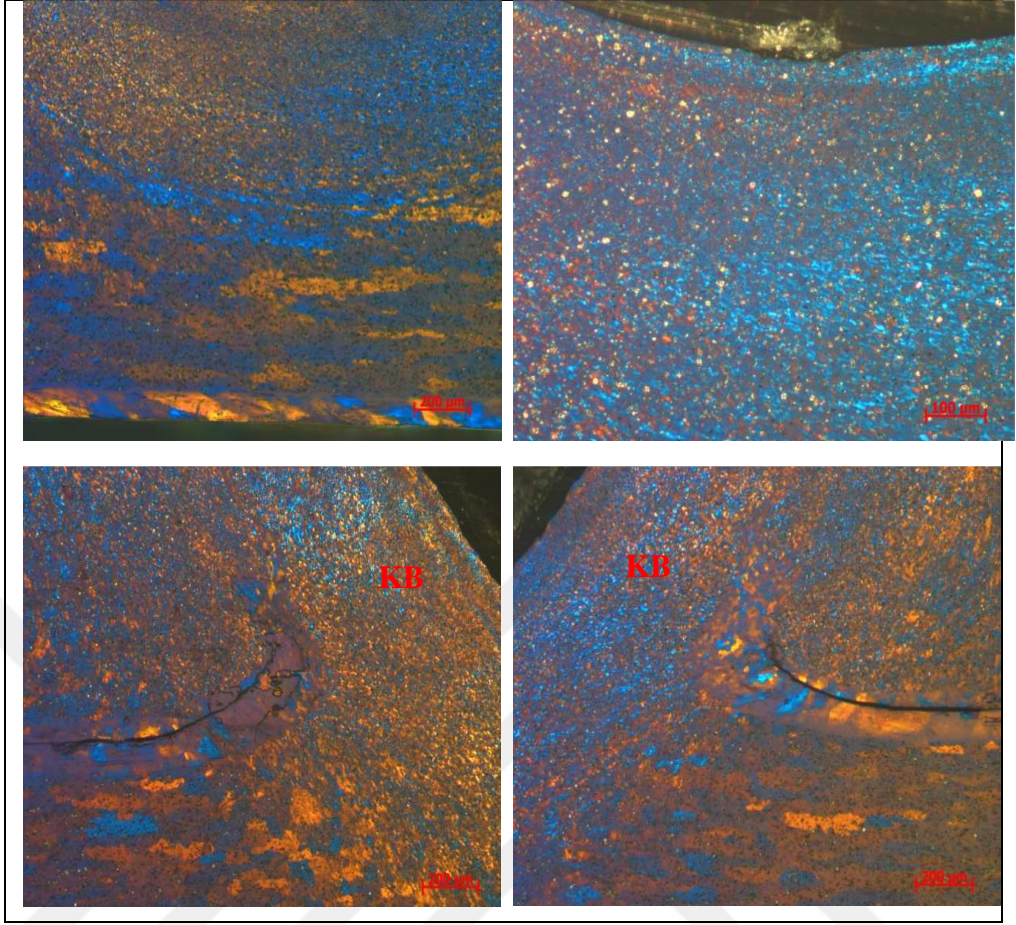


Şekil 7.37. Konik pim kaynaklı bağlantıda kaynak bölgelerinin ilüstrasyonu (TEN1 kaynaklı bağlantı) (SZ- karıştırılmış bölge, TMEB- Termo-mekanik etkilenen bölge, IEB- ısıdan etkilenen bölge ve EM- Esas metal)

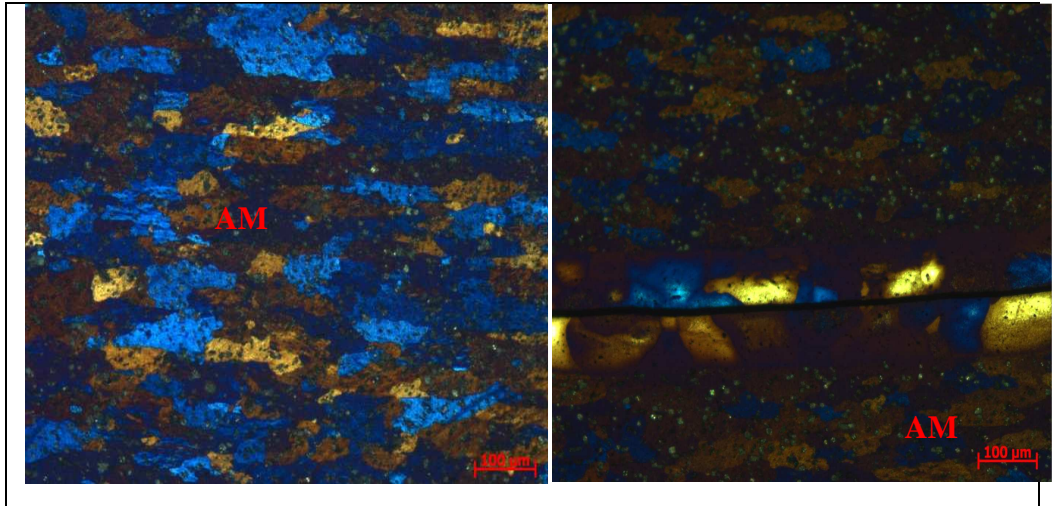


Şekil 7.38. Konik pim destekli bağlantının mikroyapısı (TEN8 birleştirilmiş bağlantı)

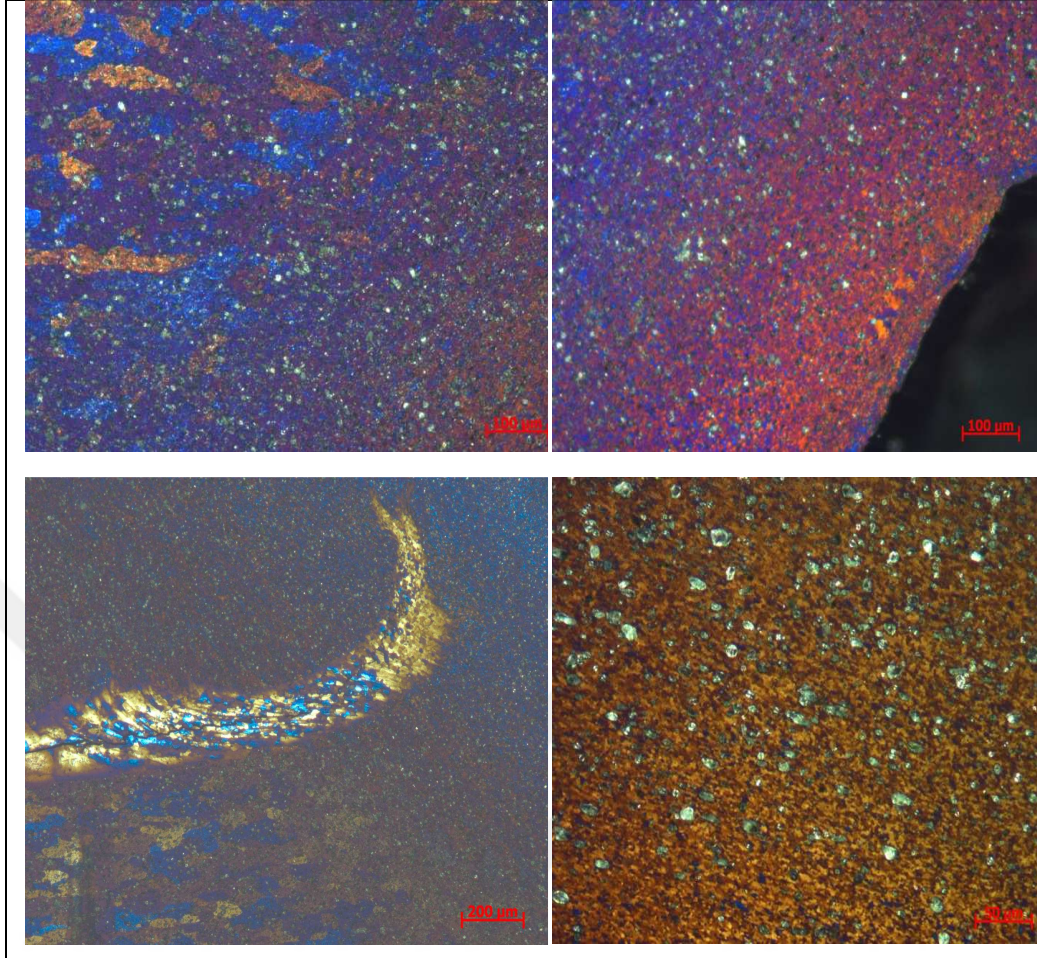




Şekil 7.38. (Devam) Konik pim destekli bağlantının mikroyapısı (TEN8 birleştirilmiş bağlantı)

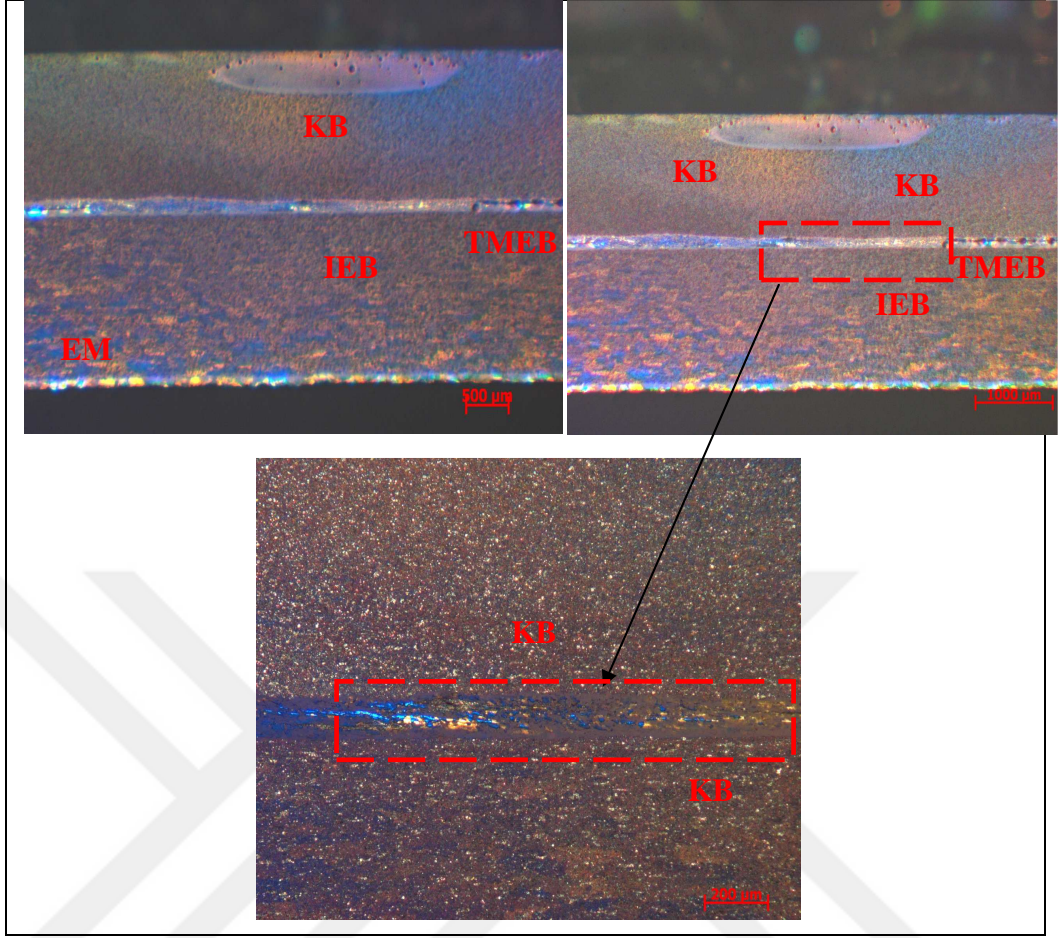


Şekil 7.39. Konik pim kaynaklı bağlantının mikroyapısı (TEN1 kaynaklı bağlantı)

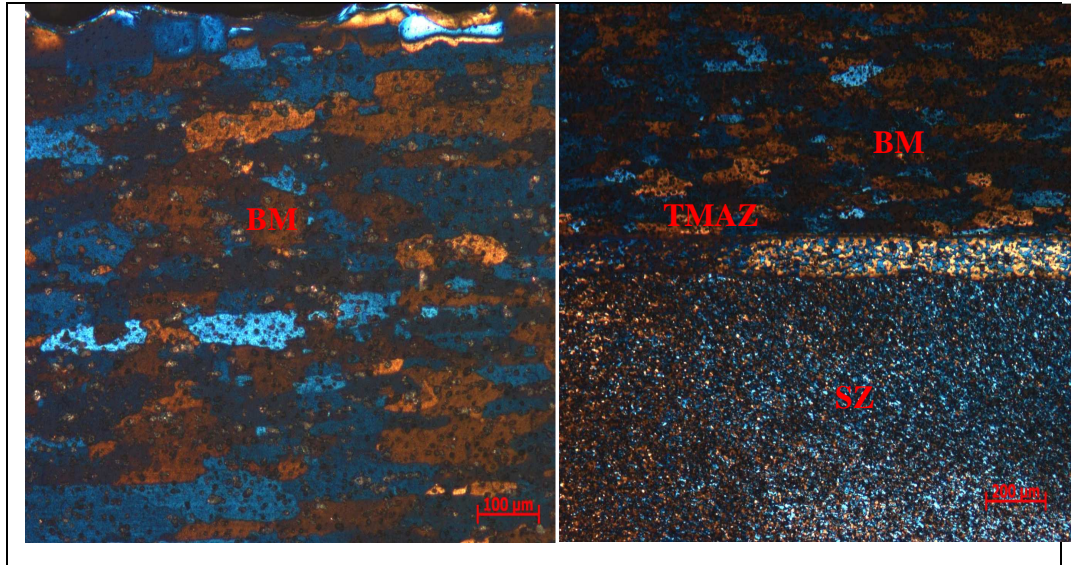


Şekil 7.39. (Devam) Konik pim kaynaklı bağlantının mikroyapısı (TEN1 kaynaklı bağlantı)

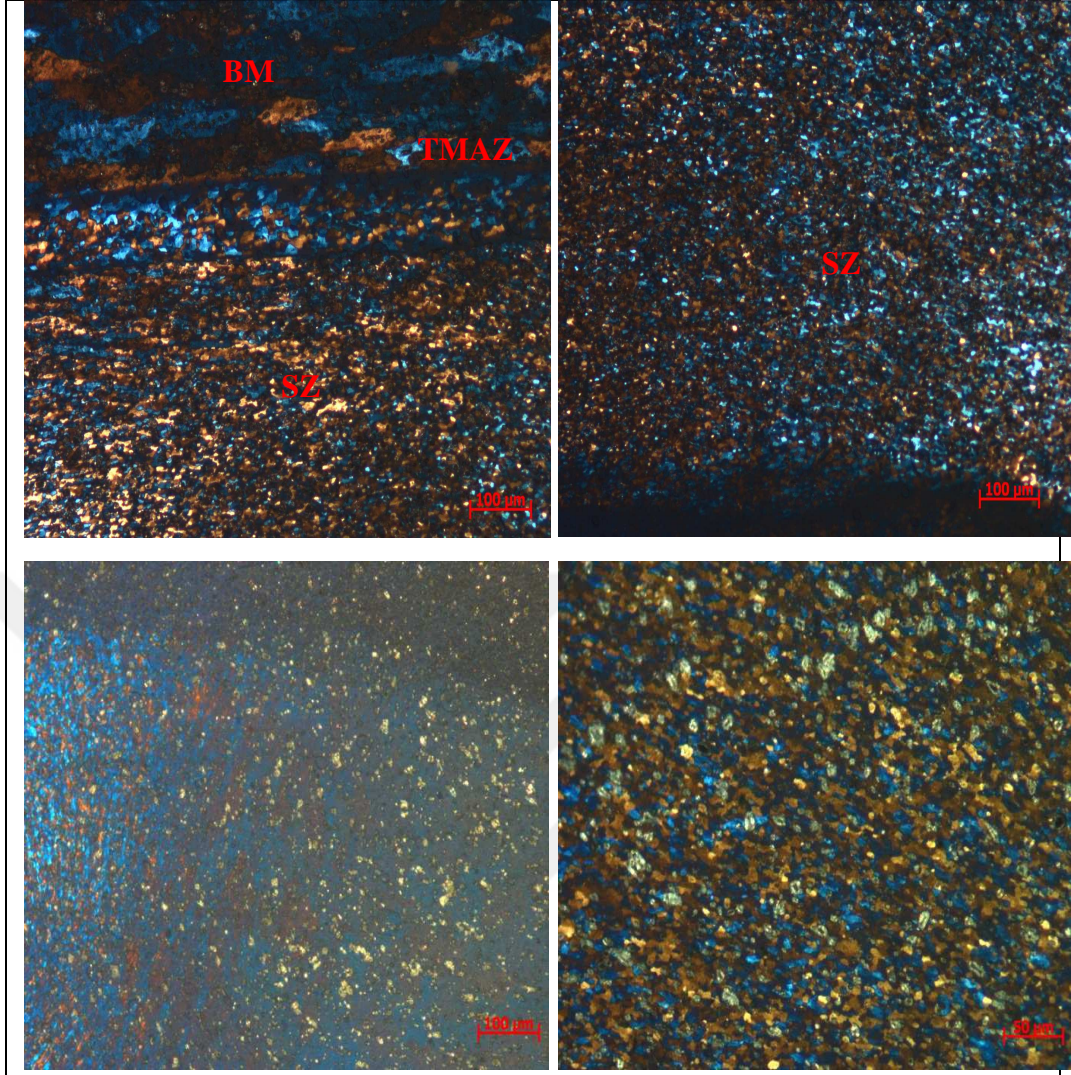
Benzer şekilde, şekil 7.40'de tipik pimsiz kaynaklı bağlantının kaynak bölgeleri gösterilmektedir. Fakat, şekiller 7.41 ve 7.42'de pimsiz birleştirilmiş bölgelerin tane dağılımı verilmiştir.



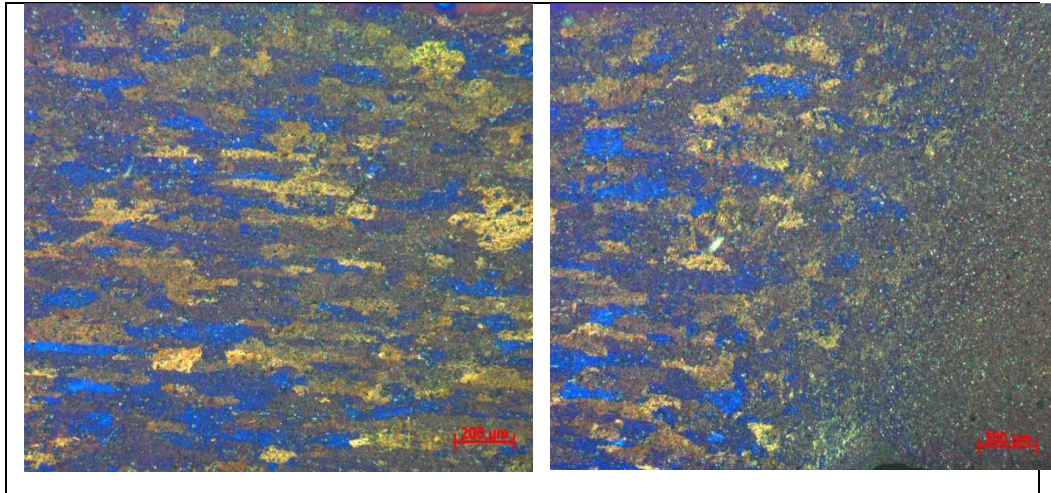
Şekil 7.40. Pimsiz kaynağın makroyapısında kaynak bölgelerinin illüstrasyonu (P-TEN3 kaynaklı bağlantı) (SZ- karıştırılmış bölge, TMEB- Termo-mekanik etkilenmiş bölge, IEB- ısıdan etkilenmiş bölge ve EM- esas metal)



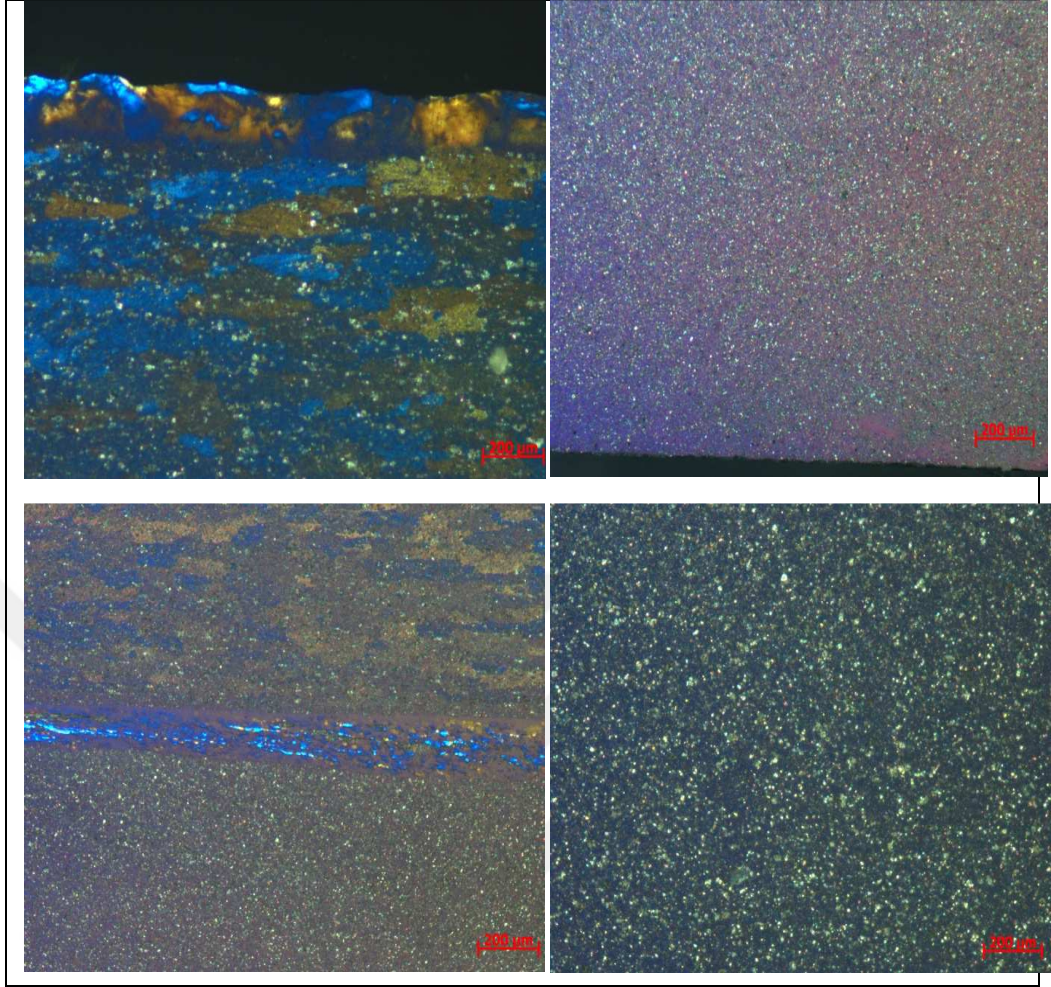
Şekil 7.41. Tane boyutunu gösteren pimsiz kaynağın mikroyapıları (P-TEN3 kaynaklı bağlantı)



Şekil 7.41. (Devam) Tane boyutunu gösteren pimsiz kaynağın mikroyapıları (P-TEN3 kaynaklı bağlantı)



Şekil 7.42. Pimsiz kaynağın mikrografları (P-TEN7 kaynaklı bağlantı)

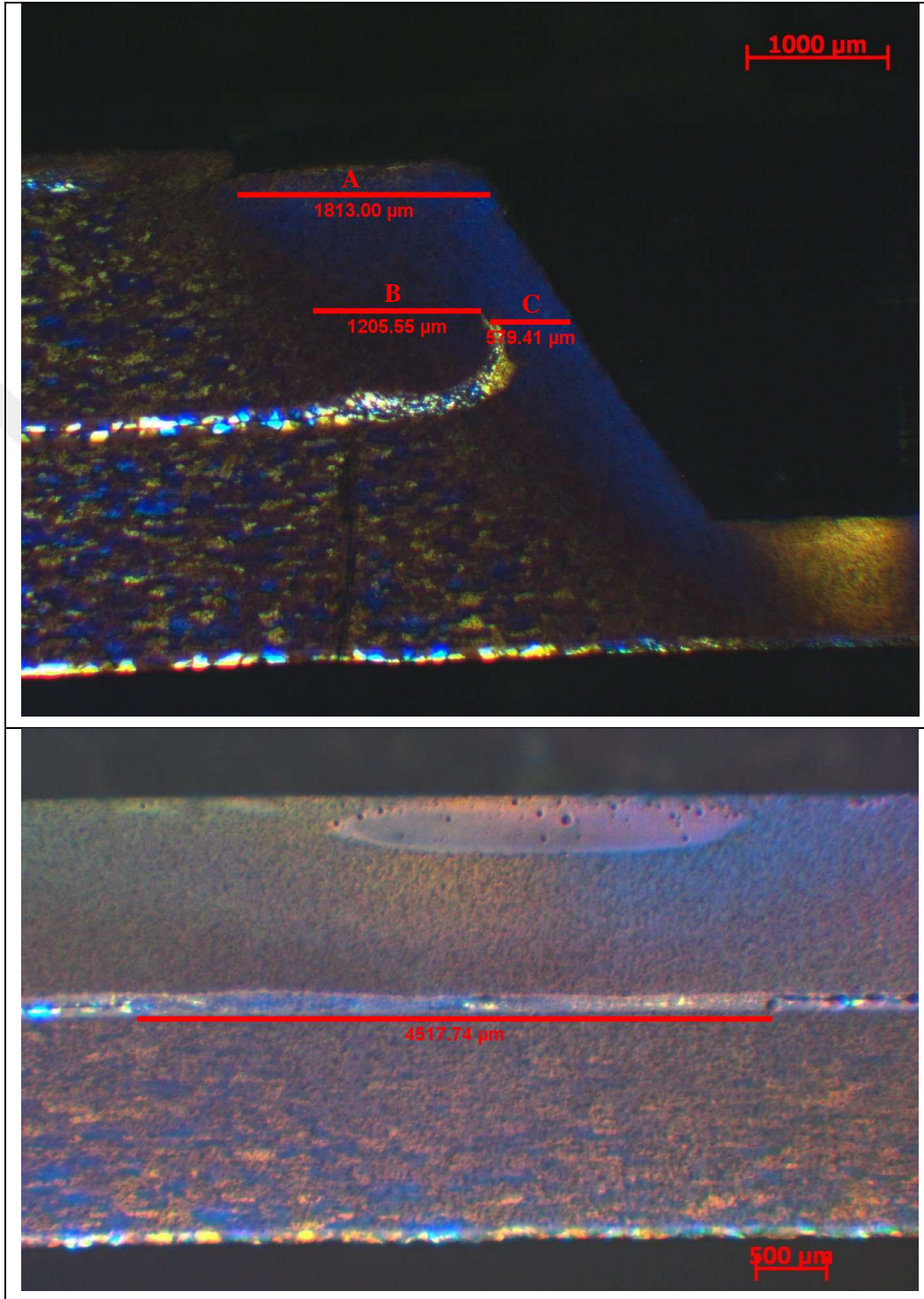


Şekil 7.42. (Devam) Pimsiz kaynağın mikrografları (P-TEN7 kaynaklı bağlantı)

### 7.10.3. Kaynakların bağlanmış boyutu

Bindirmeli iş parçasının kalınlığı boyunca konik pim kaynaklı bağlantıların karıştırılmış bölgesi/genişliği azaltılmıştır. Takım omuzunun çarpan alanına bölgede konik pim kaynaklı bağlantının karıştırılmış genişliği en yüksek olduğu tespit edilmiş ve takım ucundaki alanda karıştırılmış genişlik en küçük olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, şekil 7.43a'ya göre konik pim kaynaklı bağlantının karıştırılmış bölge, üç (3) bölüm sınıflandırılmıştır. Bu bölümler, üst levhaya yakın karıştırılmış bölge A, arayüzey civarındaki karıştırılmış bölge B ve bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu C bölümleridir. Ayrıca, konik pim kaynaklı bağlantının mikroyapısal incelenmesine dayanılarak kaynağın etkili bağlanmış uzunluğu iyice ölçülebilir. Ancak, gerçek karıştırılmış bölgenin başlangıcı uygun bir şekilde belirlenmediği için diğer bölgelerin (A ve B bölgelerinin uzunluğu) uzunluğu ölçülmemiştir. Diğer yandan,

şekil 7.43b’de tipik pimsiz kaynaklı bağlantının etkili birleştirilmiş genişliği verilmiştir.

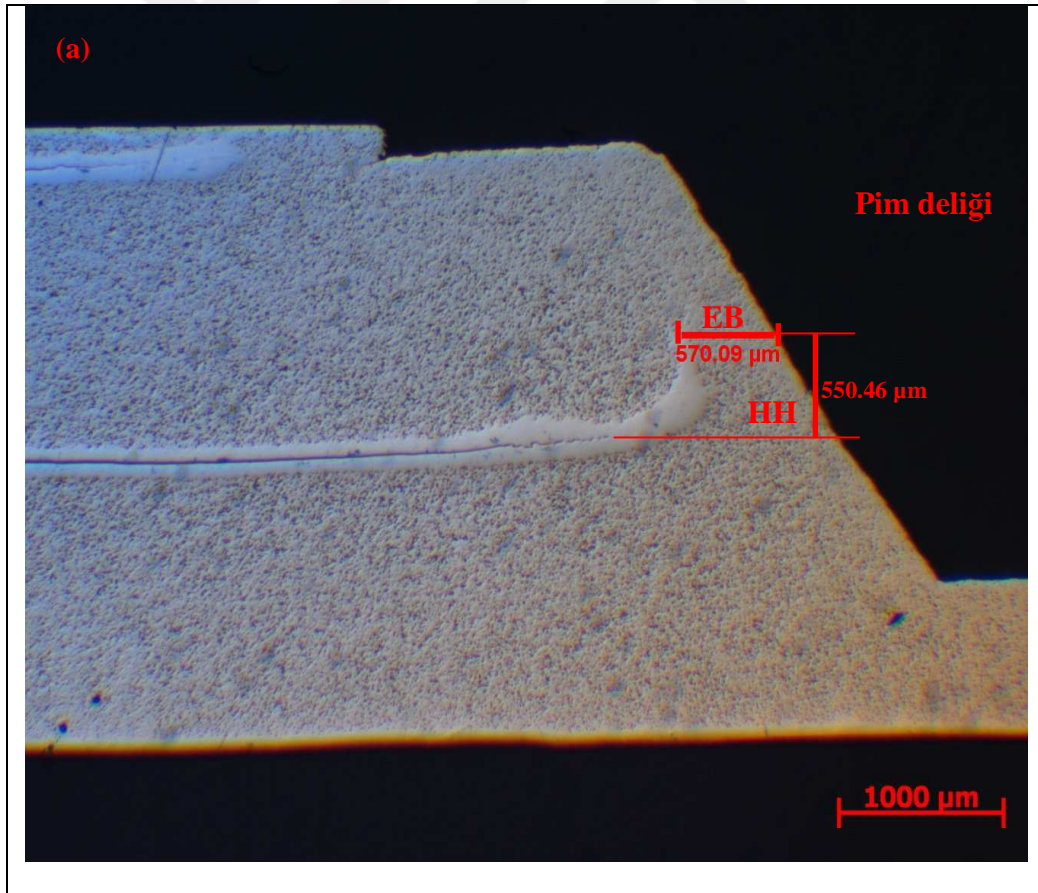


Şekil 7.43. FSSW’li bağlantının birleştirilmiş genişliği/bölgesi (a) konik pim kaynaklı bağlantının bağlanmış bölgesi (TEN1). A – Üstteki levhaya yakın karıştırılmış bölge, B – arayüzey alanına yakın karıştırılmış bölge, ve C- etkili bağlanmış bölge/genişlik; (b) Pimsiz kaynaklı bağlantının birleştirilmiş bölgesi (P-TEN3)

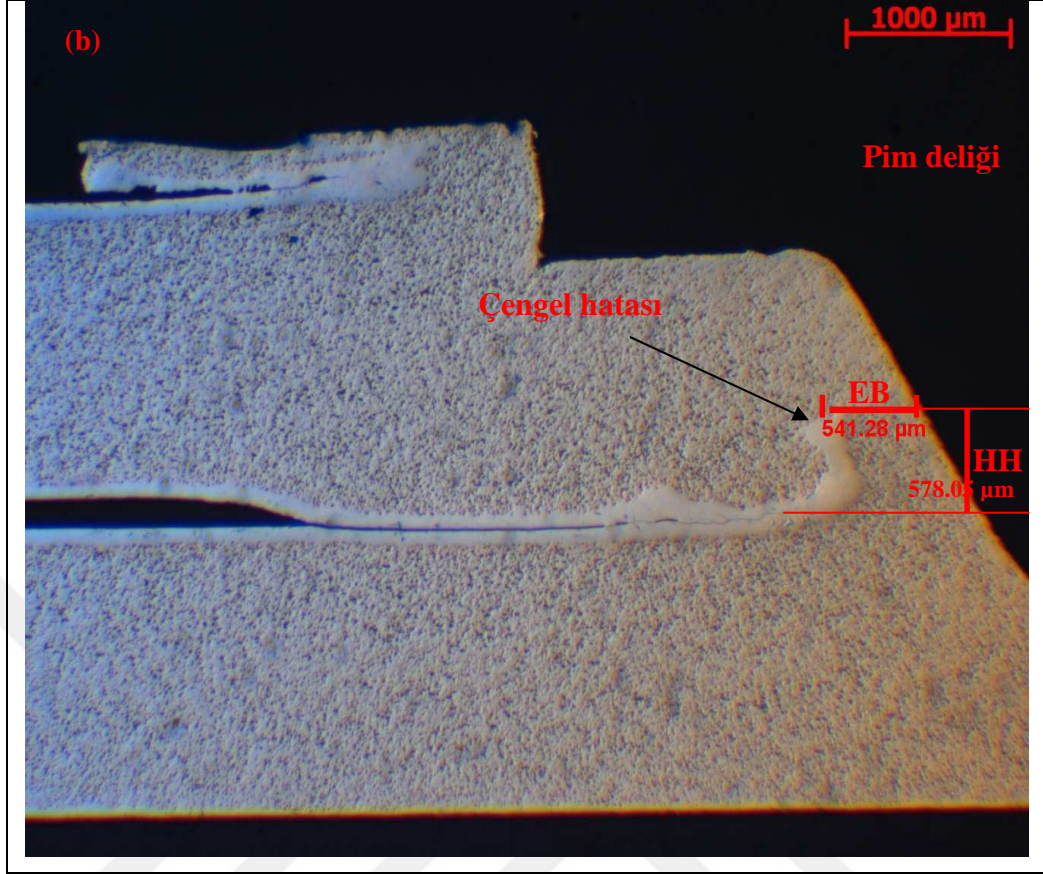
Sonuç olarak, bu anlayışa göre elde edilen mikrograflardan konik pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu ölçülmüştür. Şekiller 7.44 ve 7.45'te bazı ölçülen etkili bağlanmış uzunluklar verilmiştir. Aynı zamanda, şekiller 7.44a ve 7.44b'de konik pim destekli bağlantının çengel yükseklikleri gösterilmiştir. Bununla birlikte, tablo 7.46'da konik pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu ve çengel yüksekliği arasındaki ilişki sağlanmıştır.

Tablo 7.46. Konik pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu ve çengel yüksekliği arasındaki ilişki

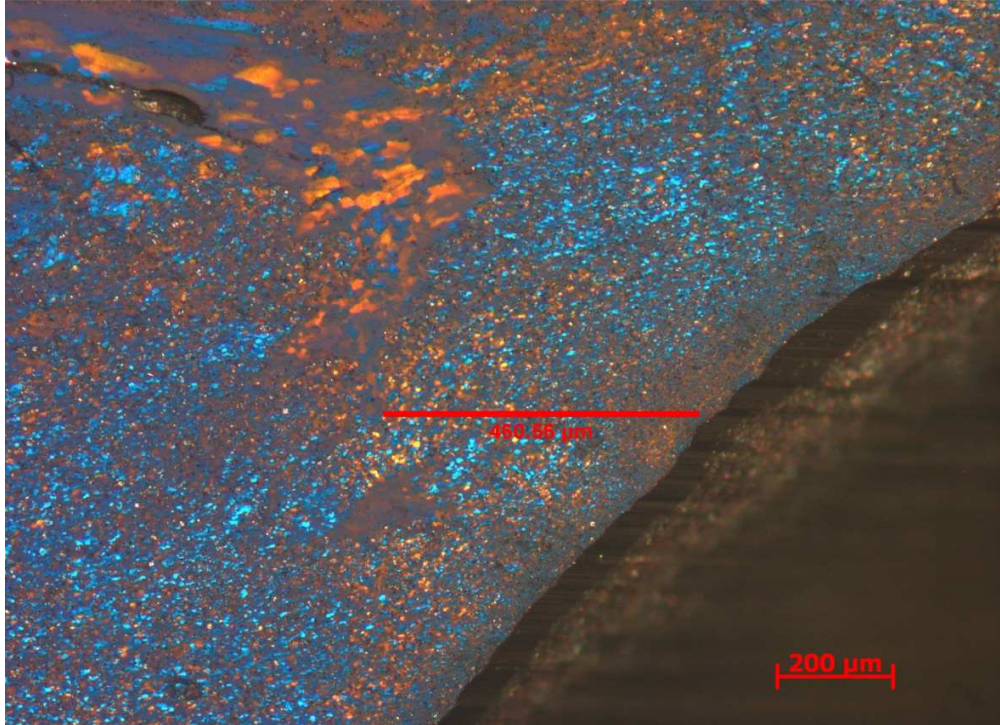
Kaynak kodu	Etkili bağlanmış uzunluk, EB ( $\mu\text{m}$ )	Çengel yüksekliği, HH ( $\mu\text{m}$ )	Etkili levha kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
TEN 1	570,09	550,46	1066,78
TEN 1	541,28	578,05	944,11
TEN 8	460,56		



Şekil 7.44. Etkili bağlanmış uzunluğu gösteren konik pim kaynaklı bağlantıların mikrografları (TEN1 kaynaklı bağlantı)



Şekil 7.44. (Devam) Etkili bağlanmış uzunluğu gösteren konik pim kaynaklı bağlantıların mikrografları (TEN1 kaynaklı bağlantı)

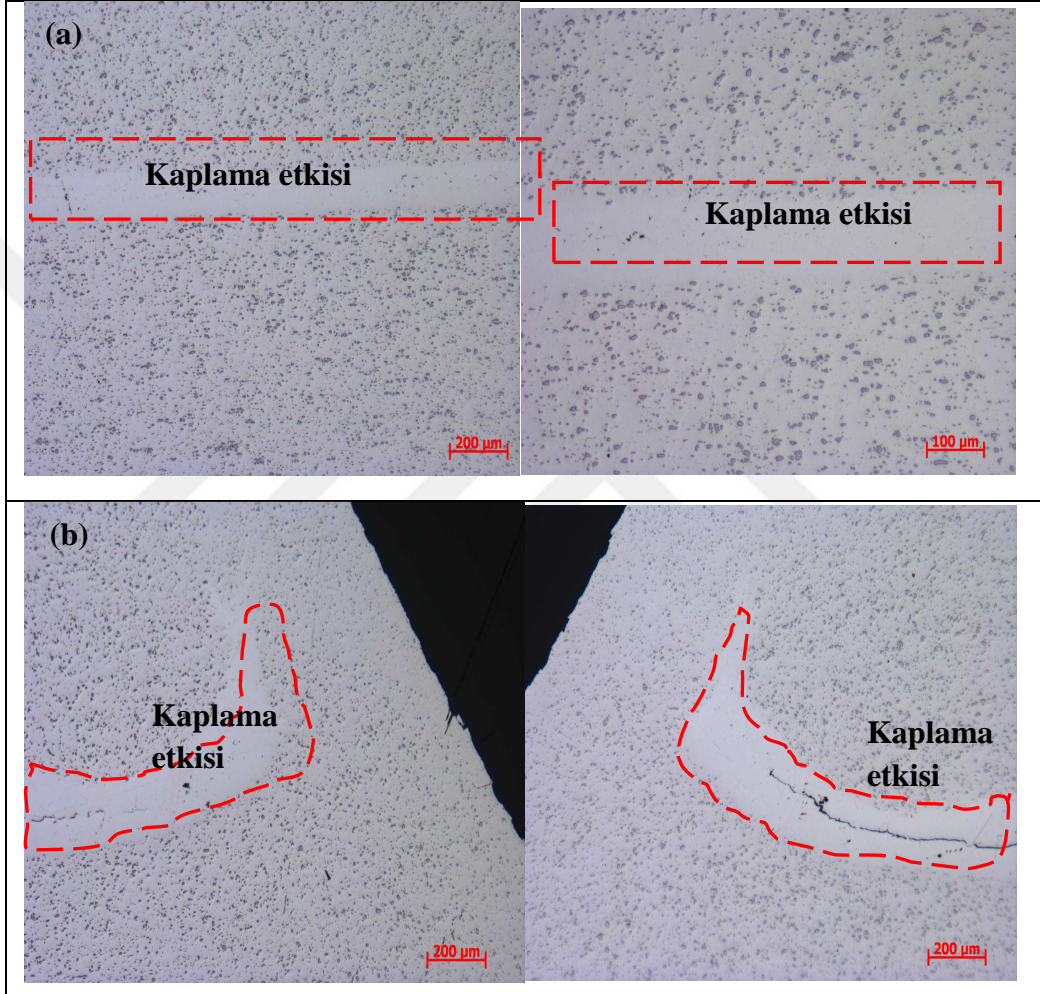


Şekil 7.45. Konik pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış uzunluğu (TEN8)

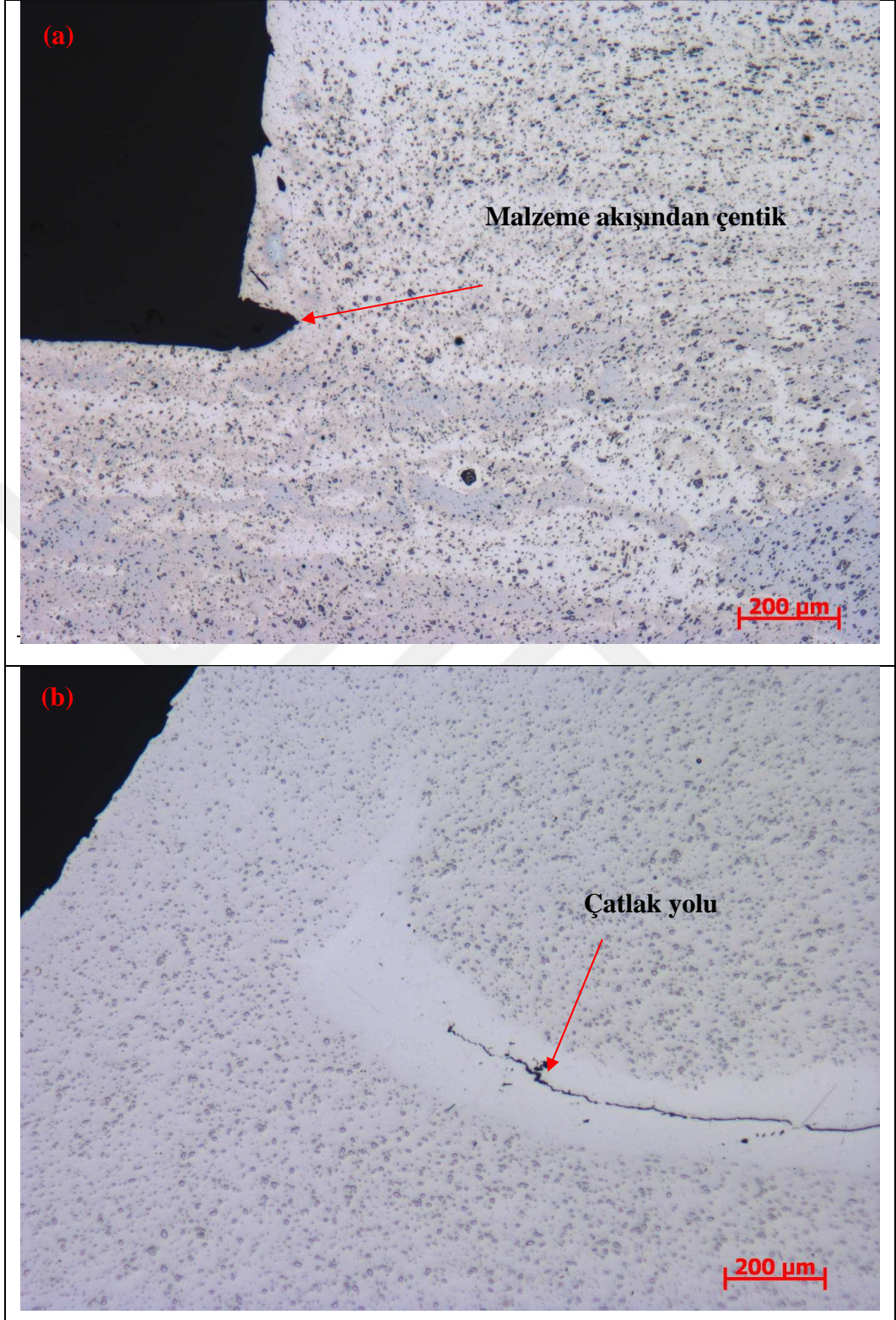


#### 7.10.4. Kaynaklı bağlantındaki mevcut olan mikroyapı kusurları

Şekil 7.46'da pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılardaki kaplama malzemesinin etkisi gözlemlenmiştir. Benser şekilde, şekil 7.47'de pimsiz kaynaklı birleştirmesinin çentiği (malzeme akışından etkilenmiş çentik) ve konik pim destekli bağlantının kırılma görünümü verilmektedir.



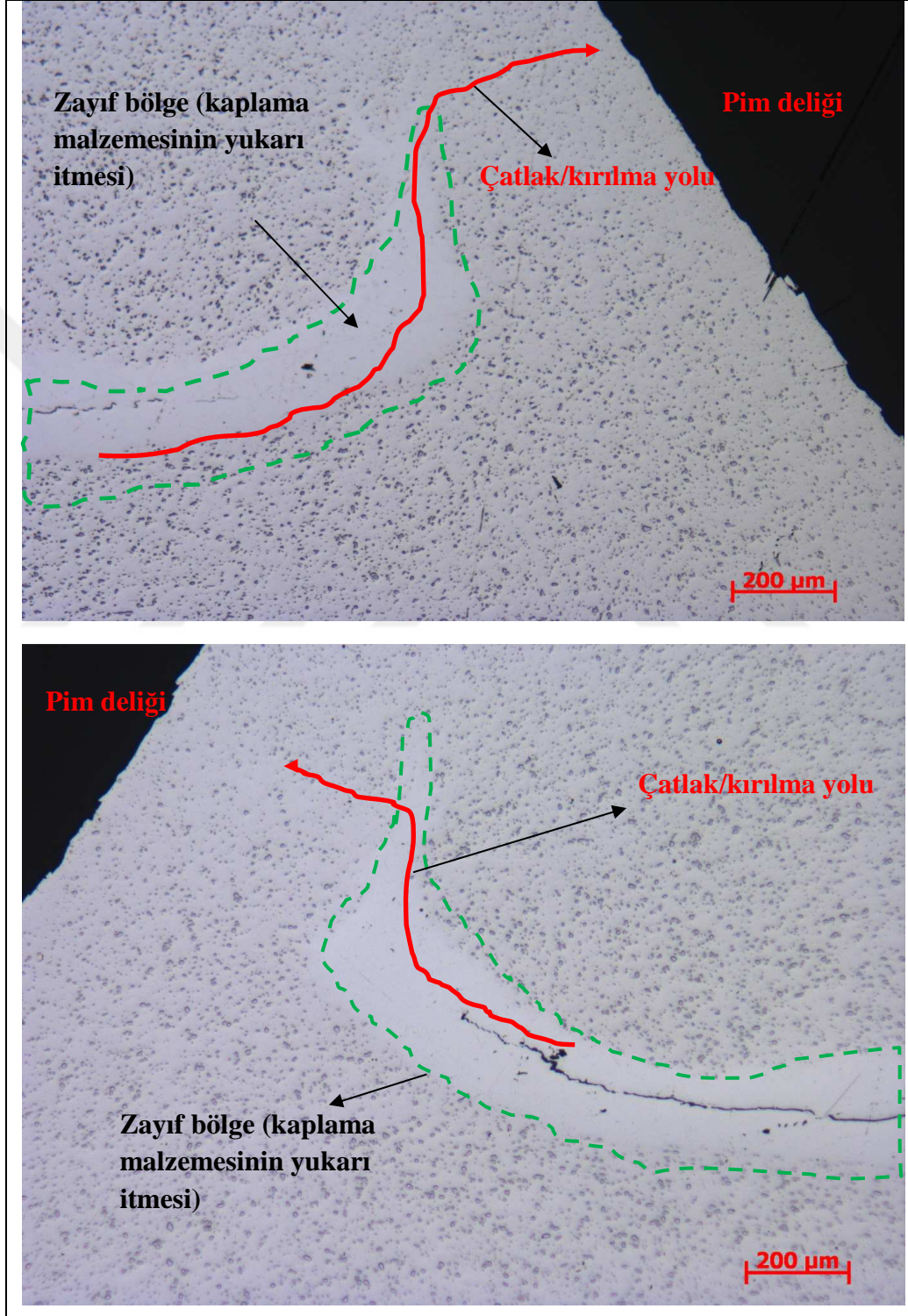
Şekil 7.46. Kaynaklı birleştirmelerde kaplama etkilenmiş alanlarını gösteren mikrograflar (a) pimsiz kaynak bağlantıları; (b) konik pim kaynaklı bağlantılar



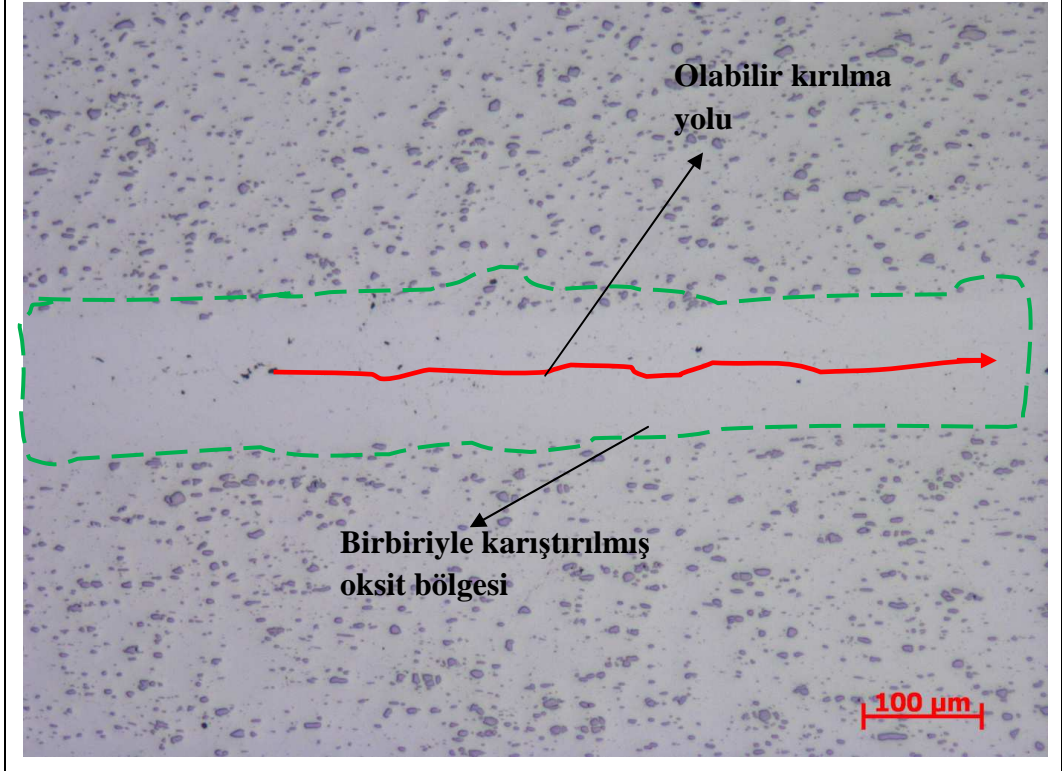
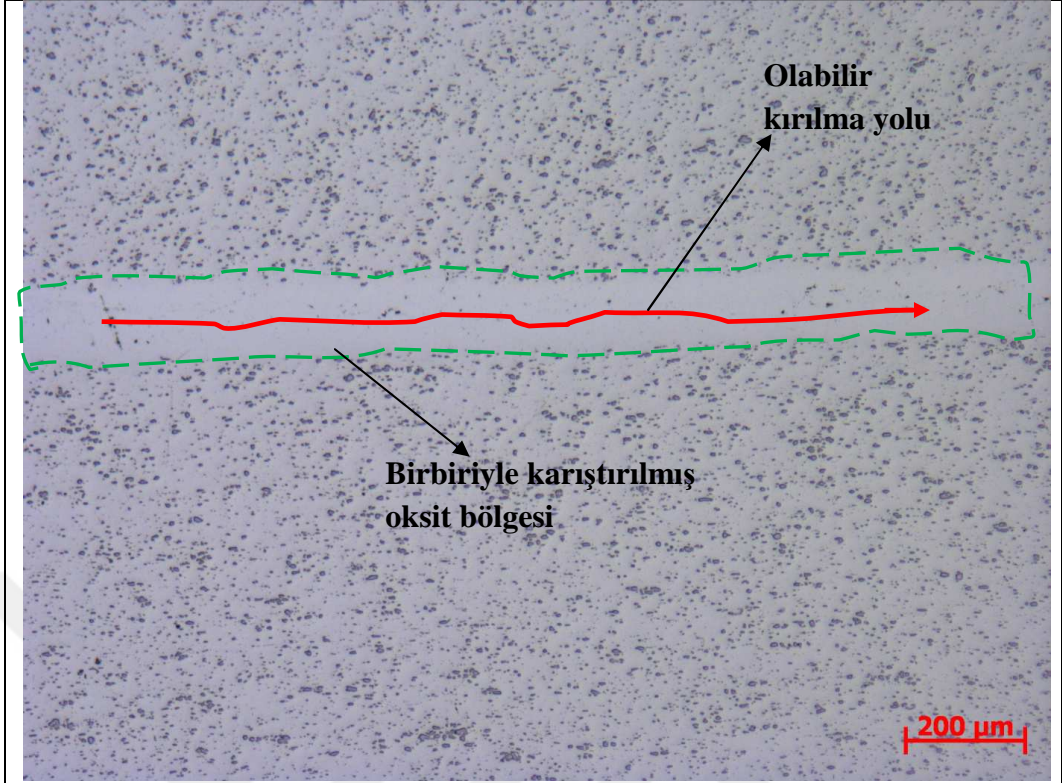
Şekil 7.47. Kaynaklı birleştirmelerde çentik veya çatlak (a) pimsiz kaynakta malzeme akışından çentik; (b) bağlanmamış çatlak yolu

#### 7.10.4.1. Mikroyapı sonuçlarına göre kaynaklarda kırılma analizi

Sözü edilen/gösterilen pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılardaki kaynak kusurlarına göre oluşabilen kırılma yolları şekiller 7.48 ve 7.49’da verilmiştir.



Şekil 7.48. Konik pim kaynaklı bağlantıda oluşabilen kırılma yolu



Şekil 7.49. Pimsiz kaynaklı bağlantıda olası kırılma yolu



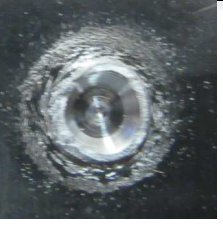
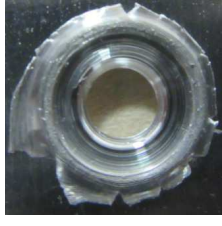

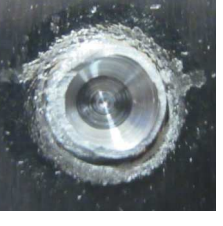
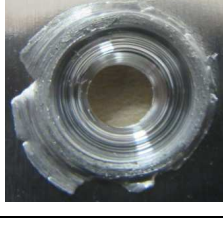


## 7.11. Kırılma morfolojisi (çekme ve yorulma Sonuçları)

Çekme ve yorulma numunelerinin kırılma yüzeylerinin makroskobik ve mikroskobik morfolojileri incelenmiştir. Tüm kaynaklarda (konik pimli ve pimsiz kaynaklarda) kırılma desenlerinin makroskobik ve mikroskobik incelemesi yapılmıştır



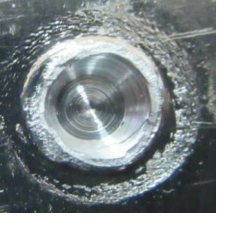


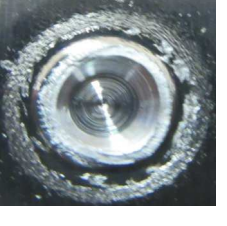




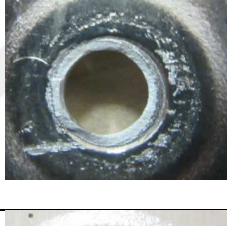
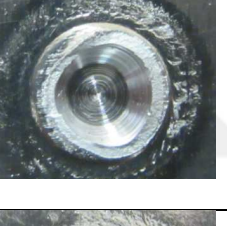


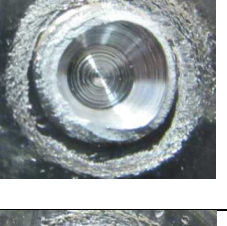



### 7.11.1. Monoton aksel yüklemeye altında konik pim kaynaklı bağlantının kırılma modu

Bütün konik pim destekli FSSW'li bağlantıların kırılma morfolojisi incelenmiş ve tablo 7.47'de monoton aksel yüklemeye koşulları altındaki tüm kırılmış bağlantıların makroskobik görünümüleri gösterilmiştir. Ayrıca, bütün konik pim kaynaklı bağlantılarda tek bir kırılma deseni gözlemlenmiştir. Bunun bir sonucu olarak, konik pim kaynağı sırasında parametre seviyelerinin değişik kombinasyonları, konik pim kaynağının kırılma desenini etkilememiştir.

Tablo 7.47. Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma modları

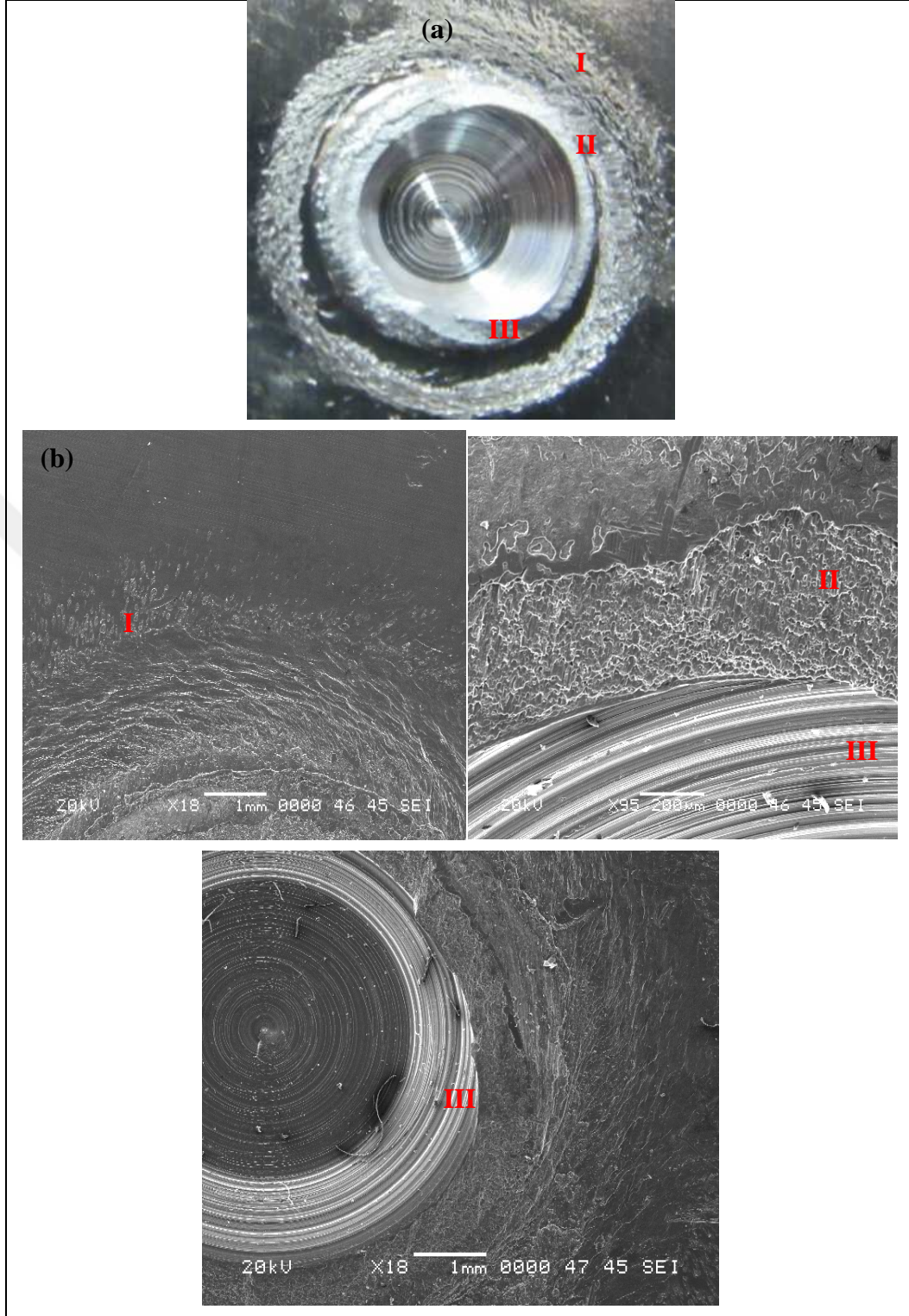
Kaynak kodu	Üst sac-yüzü	Üst sac-arkası	Alt sac-yüzü	Açıklama
TEN1				Bağlantı kesme kırılması
TEN2				Bağlantı kesme kırılması
TEN3				Bağlantı kesme kırılması

Tablo 7.47. (Devam) Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma modları

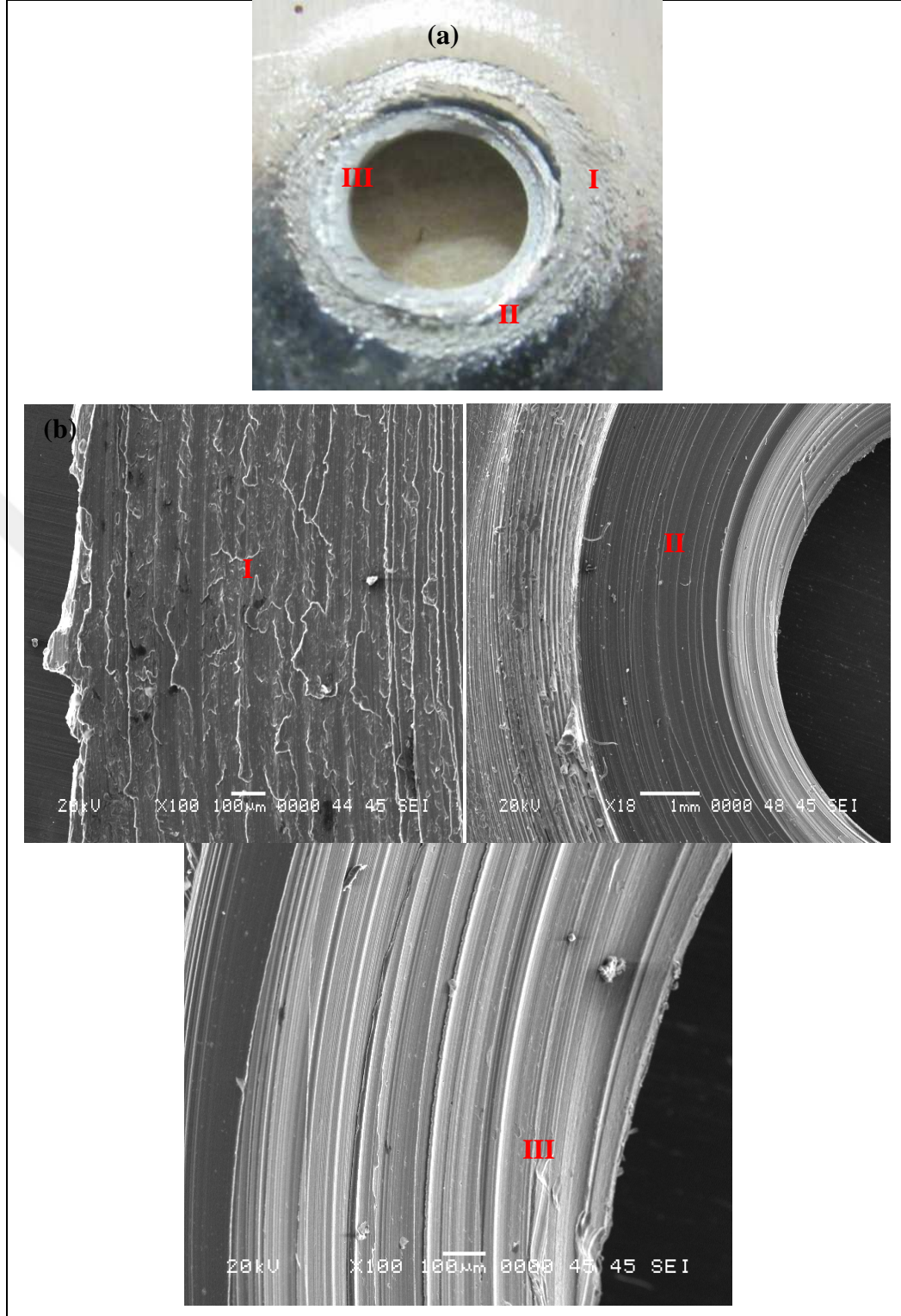
TEN4				Bağlantı kesme kırılması
TEN5				Bağlantı kesme kırılması
TEN6				Bağlantı kesme kırılması
TEN7				Bağlantı kesme kırılması
TEN8				Bağlantı kesme kırılması
TEN9				Bağlantı kesme kırılması

#### 7.11.1.1. Konik pim kaynaklarının kırılma yüzeylerinin sem mikroyapıları

Taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak konik pim kaynaklı birleştirmelerin kırılma yüzeyleri gözlemlenmiştir. Böylece, şekiller 7.50 ve 7.51’de konik pimli takımla kaynak edilen numunenin alt ve üst sacların kırılma yüzeyleri gösterilmektedir. Sonuc olarak, kırılma başlangıcı ve ilerlemesi belirlenebilir.



Şekil 7.50. Monoton aksel yüklemeye koşulu altında konik pim kaynaklı bağlantının alt sacın kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt plakanın plan görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri




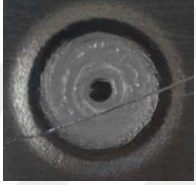











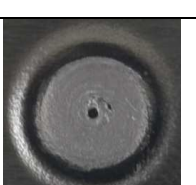

Şekil 7.51. Monoton aksenal yükleme koşulu altında konik pim kaynaklı bağlantının üst plakasının kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt plakanın plan görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri




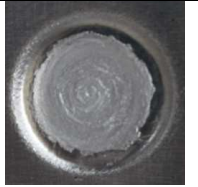










### 7.11.2. Monoton aksenal yükleme altında pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma modları

Kırılma desenini görmek için aksenal yüklemeye maruz kalan pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeyleri makroskopik ölçekte incelenmiştir. Sonuç olarak, tablo 7.48’de pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma morfolojisi gösterilmektedir. Pimsiz kaynaklı bağlantılarda iki kırılma modunun türü gözlemlenmiştir. Bunlar, arayüzey çekme makaslama kırılması ve arayüzey kesme kırılması ile ekili üst levha kalınlığının kesmesidir.

Tablo 7.48. Pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma modu

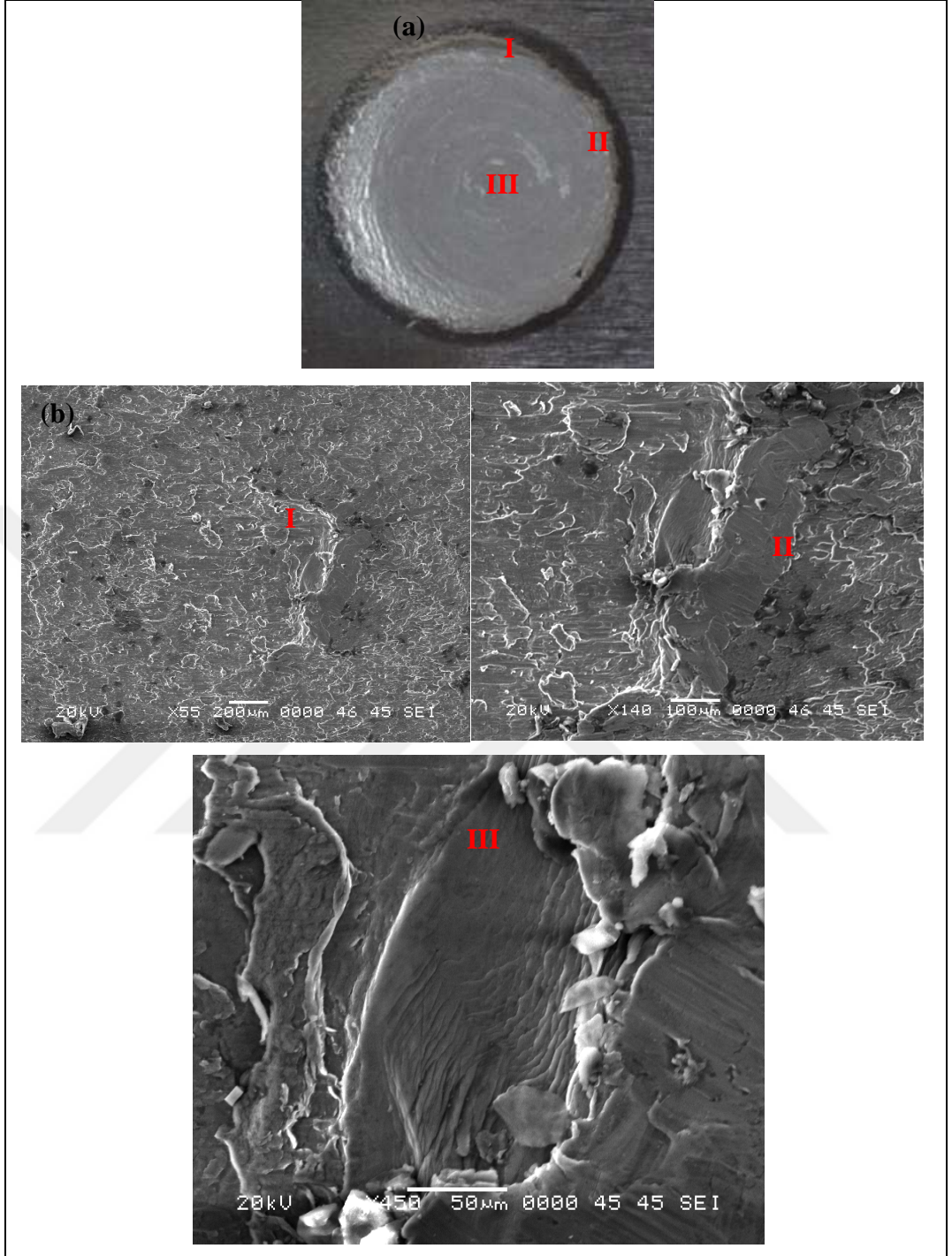
Kaynak kodu	Üst sac-yüzü	Üst sac-arkası	Alt sac-yüzü	Açıklama
PL-TEN1				Arayüzey kesme kırılması ile üst levha kalınlığının kesmesi
PL-TEN2				Arayüzey kesme kırılması
PL-TEN3				Arayüzey kesme kırılması ile üst levha kalınlığının kesmesi
PL-TEN4				Arayüzey kesme kırılması
PL-TEN5				Arayüzey kesme kırılması ile üst levha kalınlığının kesmesi

Tablo 7.48. (Devam) Pimsiz kaynaklı baplantıların kırılma modu

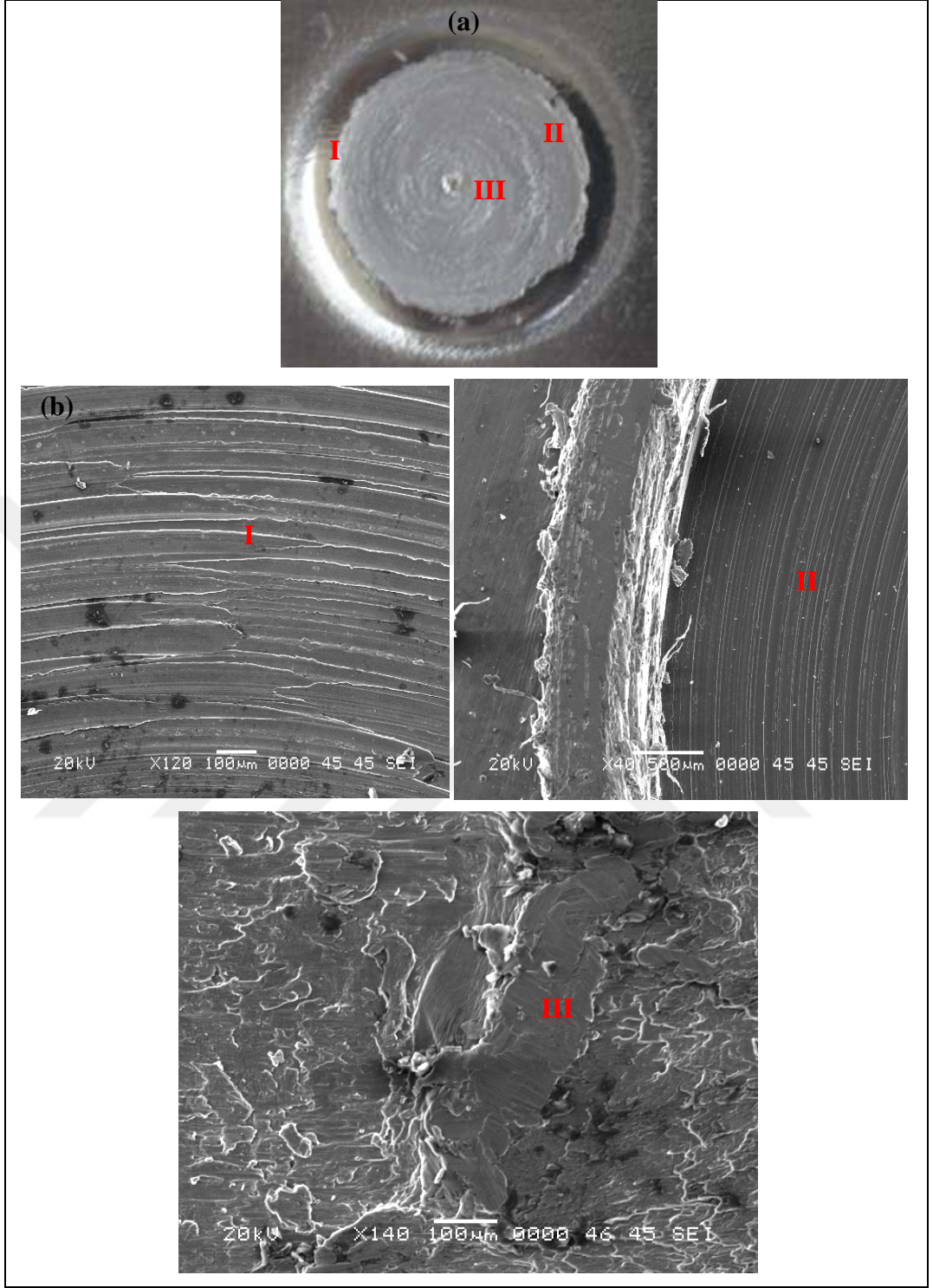
PL-TEN6				Arayüzey kesme kırılması
PL-TEN7				Arayüzey kesme kırılması ile üst levha kalınlığının kesmesi
PL-TEN8				Arayüzey kesme kırılması
PL-TEN9				Arayüzey kesme kırılması ile üst levha kalınlığının kesmesi

### 7.11.2.1. Pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin tem mikrografları

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla, aksenal yüklemeye maruz kalan ve kırılmış pimsiz kaynakların kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Şekiller 7.52 ve 7.53'te seçilen pimsiz kaynaklı numunenin alt ve üst sacların kırılma yüzeyleri gösterilmektedir.



Şekil 7.52. Monoton aksel yüklemeye koşulu altında pimsiz kaynaklı bağlantının alt plakasının kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt sac görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri



Şekil 7.53. Monoton aksenal yükleme koşulu altında pimsiz kaynaklı bağlantının alt plakasının kırılma yüzeyi (a) kırılmış alt sac görünümü (b) bölgeler I, II ve III'nun SEM görüntüleri

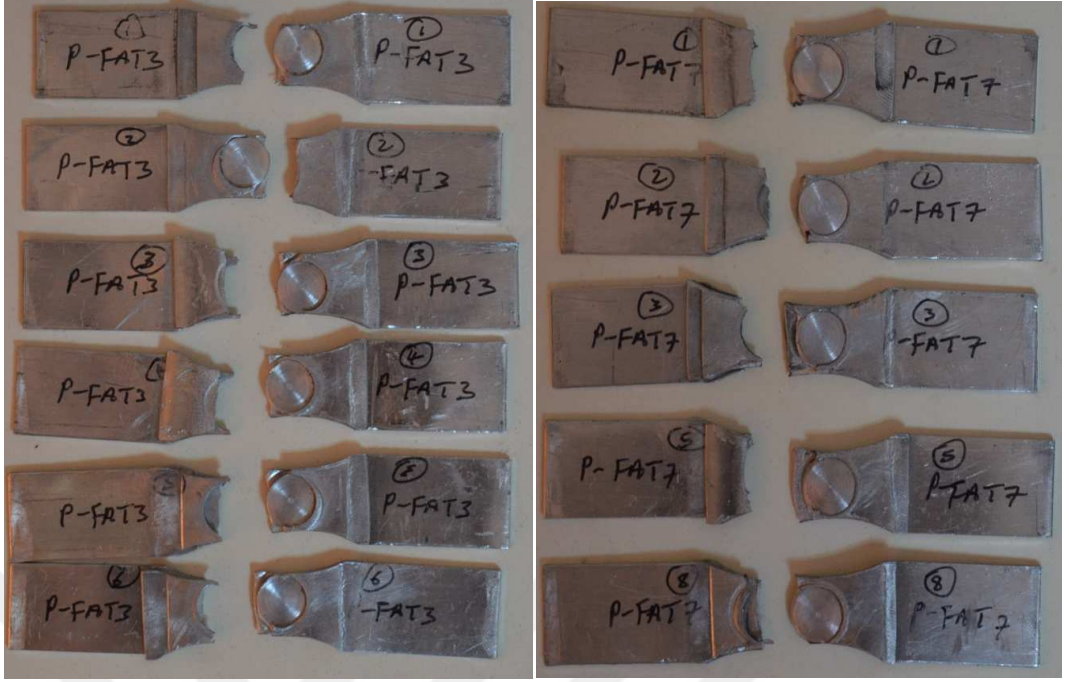
### 7.11.3. Dinamik veya çevrimsel yükleme altında yorulma numunesinin kırılma modları

Eğilmeli yorulma yüklemesine maruz kalan numunelerin kırılma modları şekiller 7.54 ve 7.55'te gösterilmektedir. Şekil 7.54 kırılmış konik pim kaynaklı bağlantıları temsil etmekte ve şekil 7.55 kırılmış pimsiz kaynaklı numuneleri temsil etmektedir.

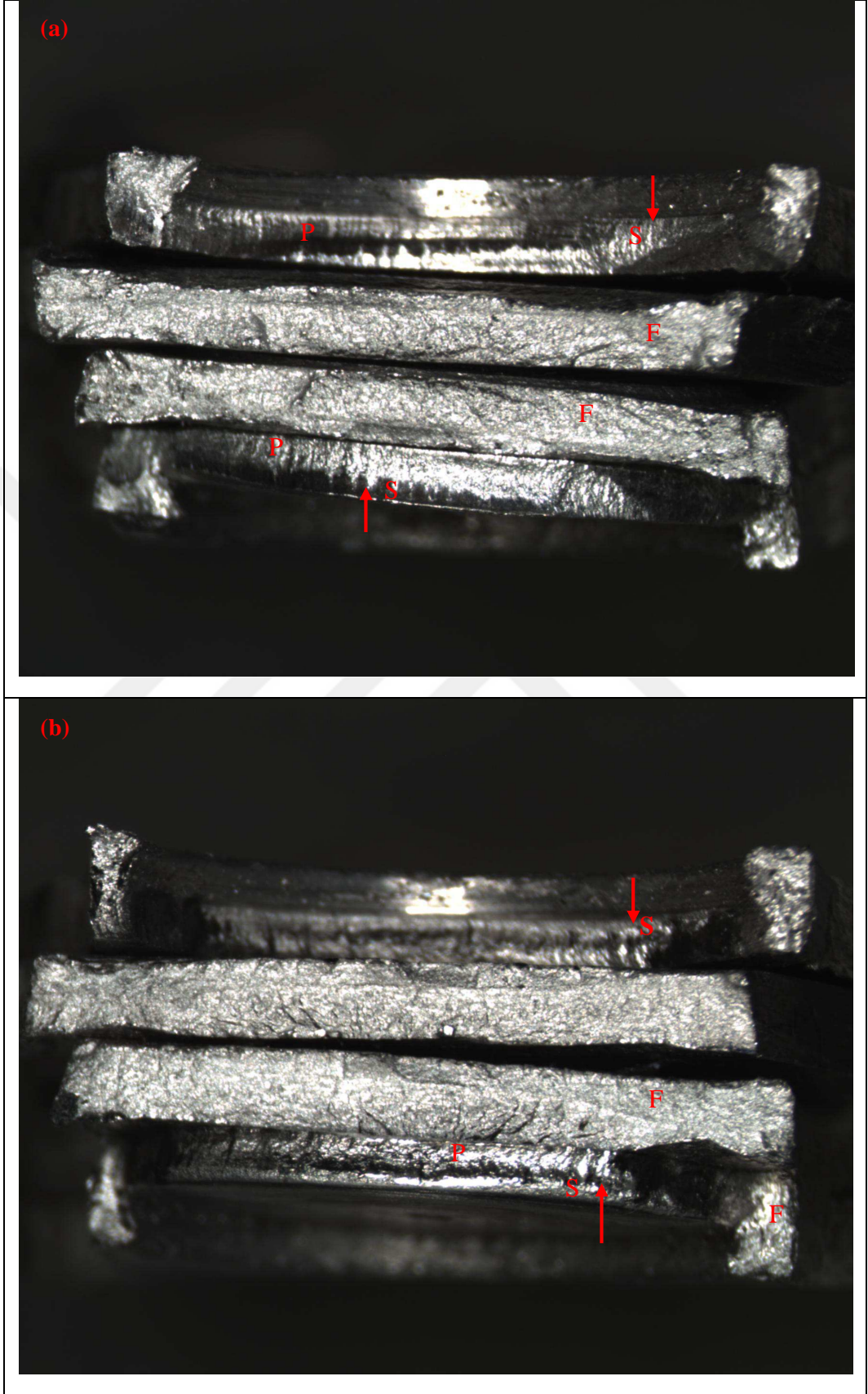
Çevrimsel yükleme koşulları altında pimsiz kaynaklı bağlantılarda tek bir kırılma deseni gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.56 gösterildiği gibi pimsiz kaynaktaki üst tabakanın çevresel omuz alanından kırılma oluşturulmuştur. Bunun yanısıra şekil 7.57'de eğilmeli yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeyleri gösterilmektedir.



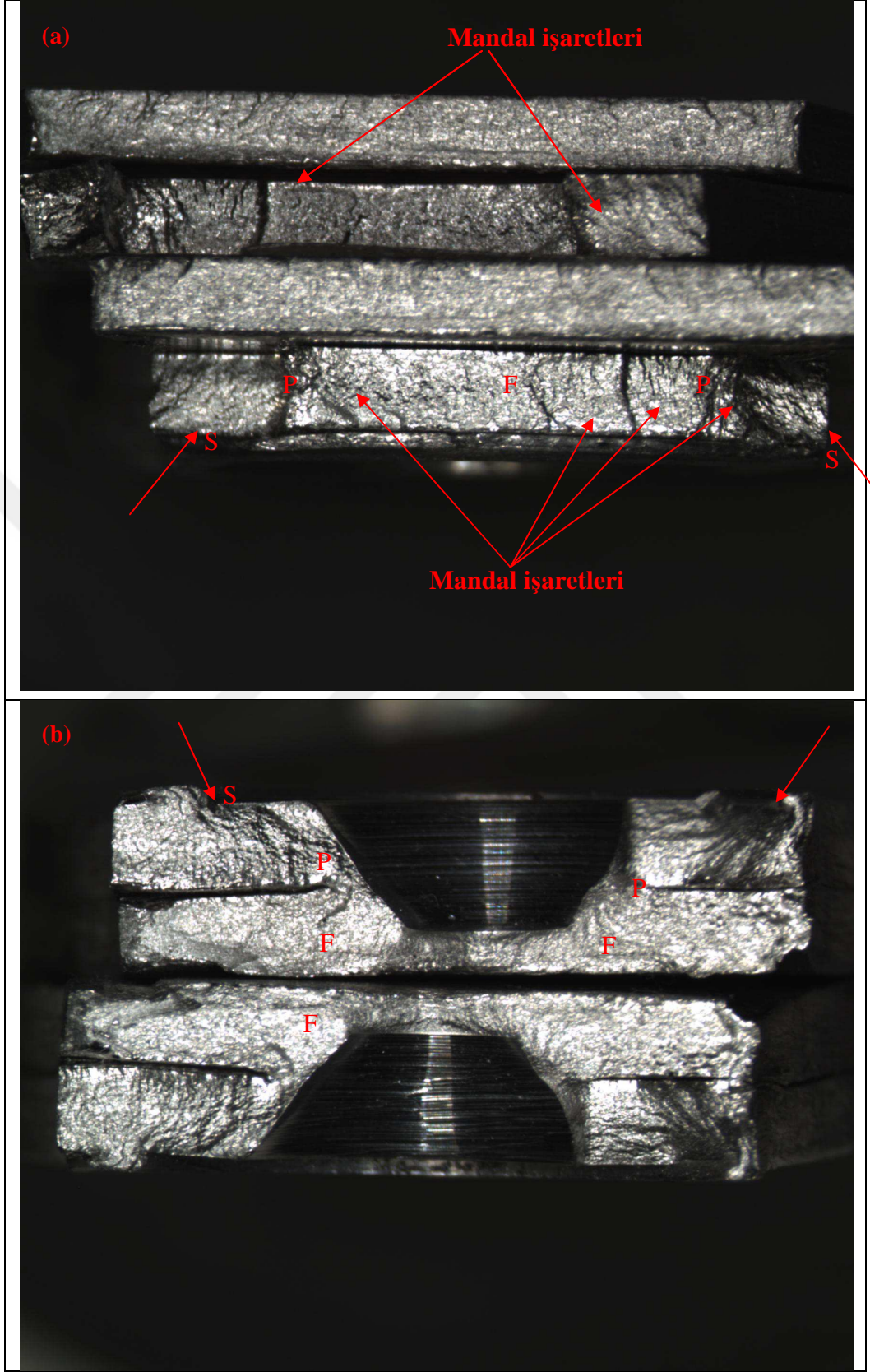
Şekil 7.54. Çevrimsel yükleme altında konik pim destekli bağlantıların kırılma deseni



Şekil 7.55. Çevrimsel yükleme altında pimsiz takım destekli bağlantıların kırılma deseni



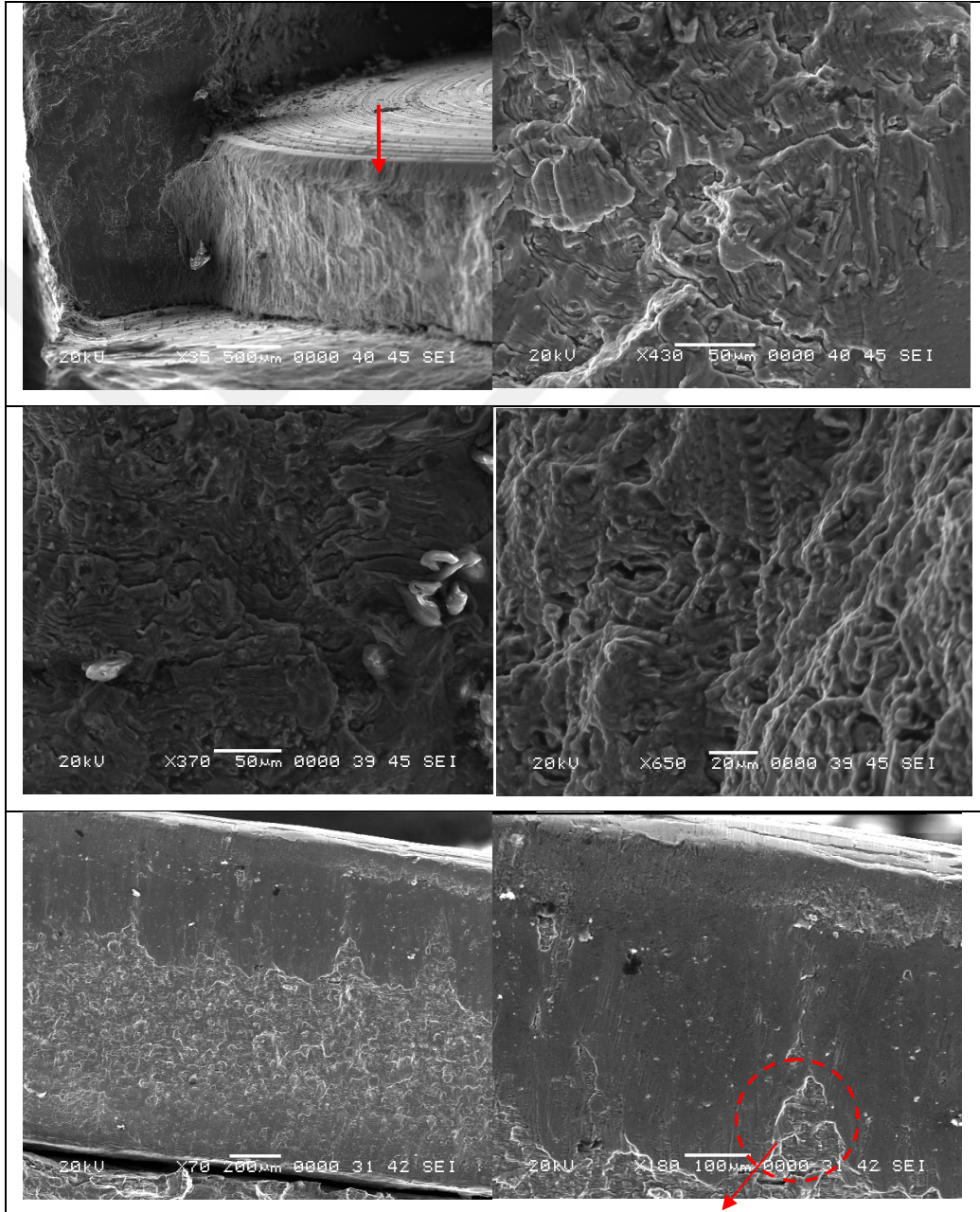
Şekil 7.56. Pimsiz kaynaklarda kırılma desenleri (a) P-FAT3 (mini); (b) P-FAT 7 (max) (S- kırılma başlangıcı, P- kırılma ilerlenmesi, F- son kırılma)



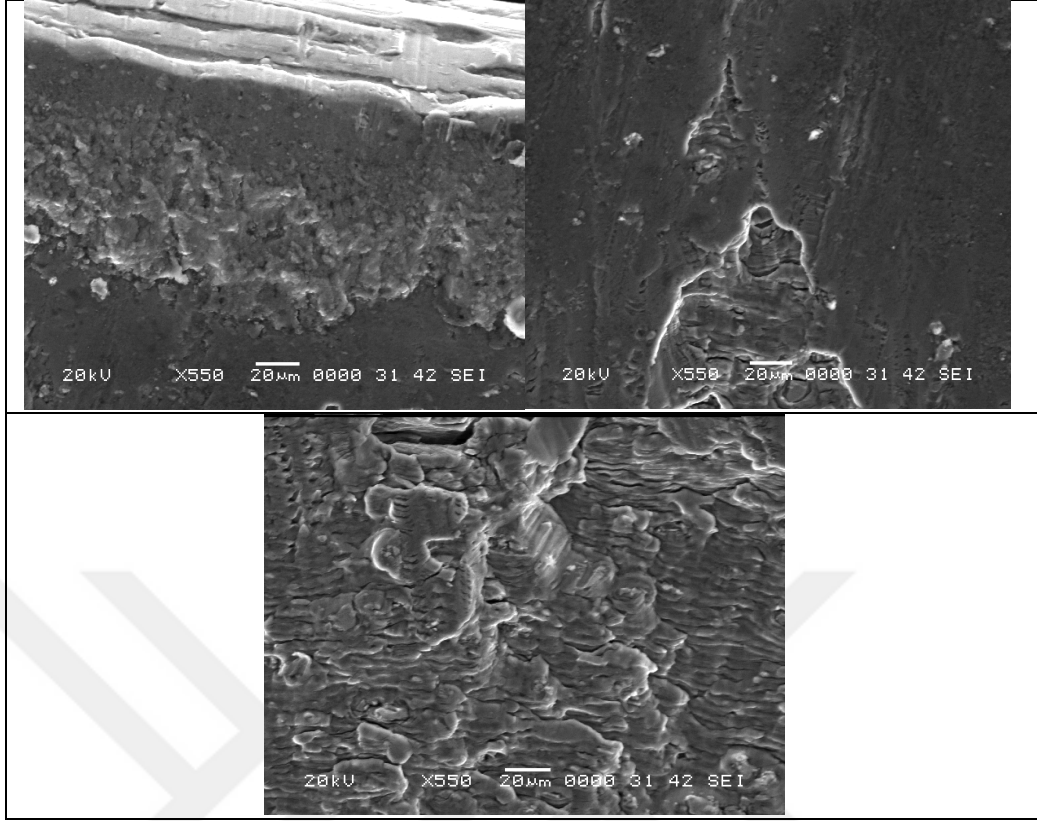
Şekil 7.57. Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma desenleri (a) FAT 1 (max); (b) FAT 8 (mini). (S- kırılma başlangıcı, P- kırılma ilerlemesi, F- son kırılma)



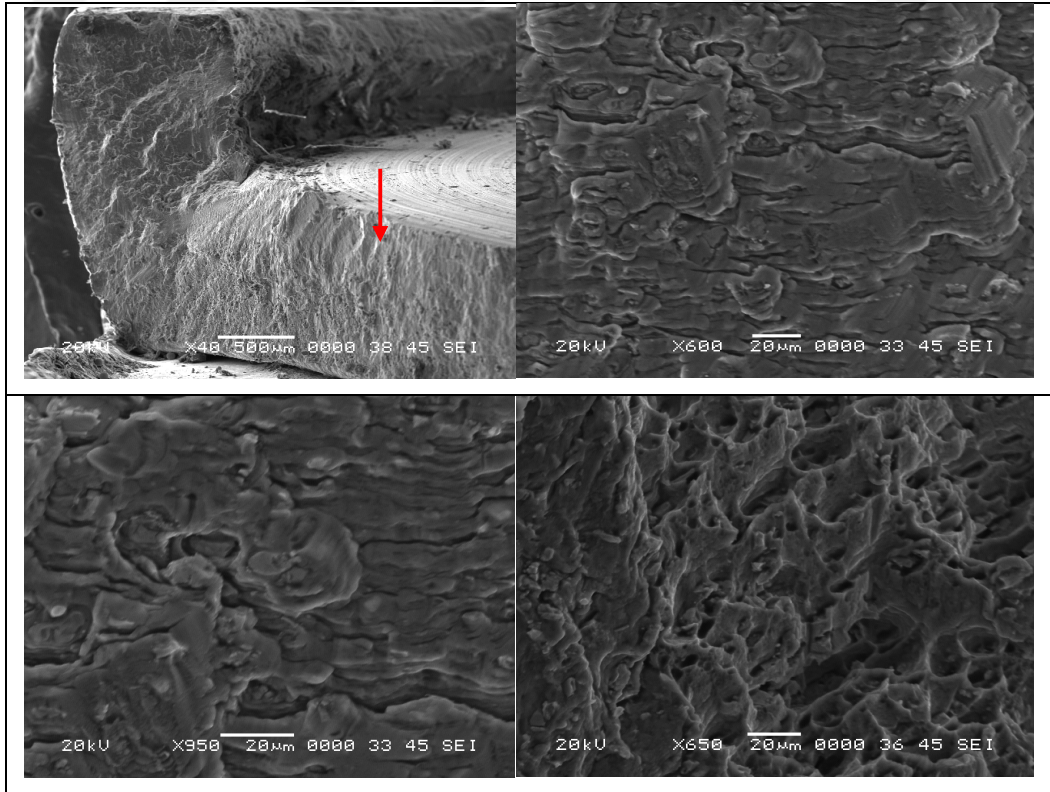
Böylelikle, şekiller 7.56a ve 7.56'de verilen pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin yakın çekim görüntüleri sırasıyla şekiller 7.58 ve 7.59'de sağlanmaktadır. Aynı şekilde şekiller 7.57a ve 7.57b'de gösterilen konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin görüntüleri şekiller 7.60 ve 7.61'de verilmektedir.



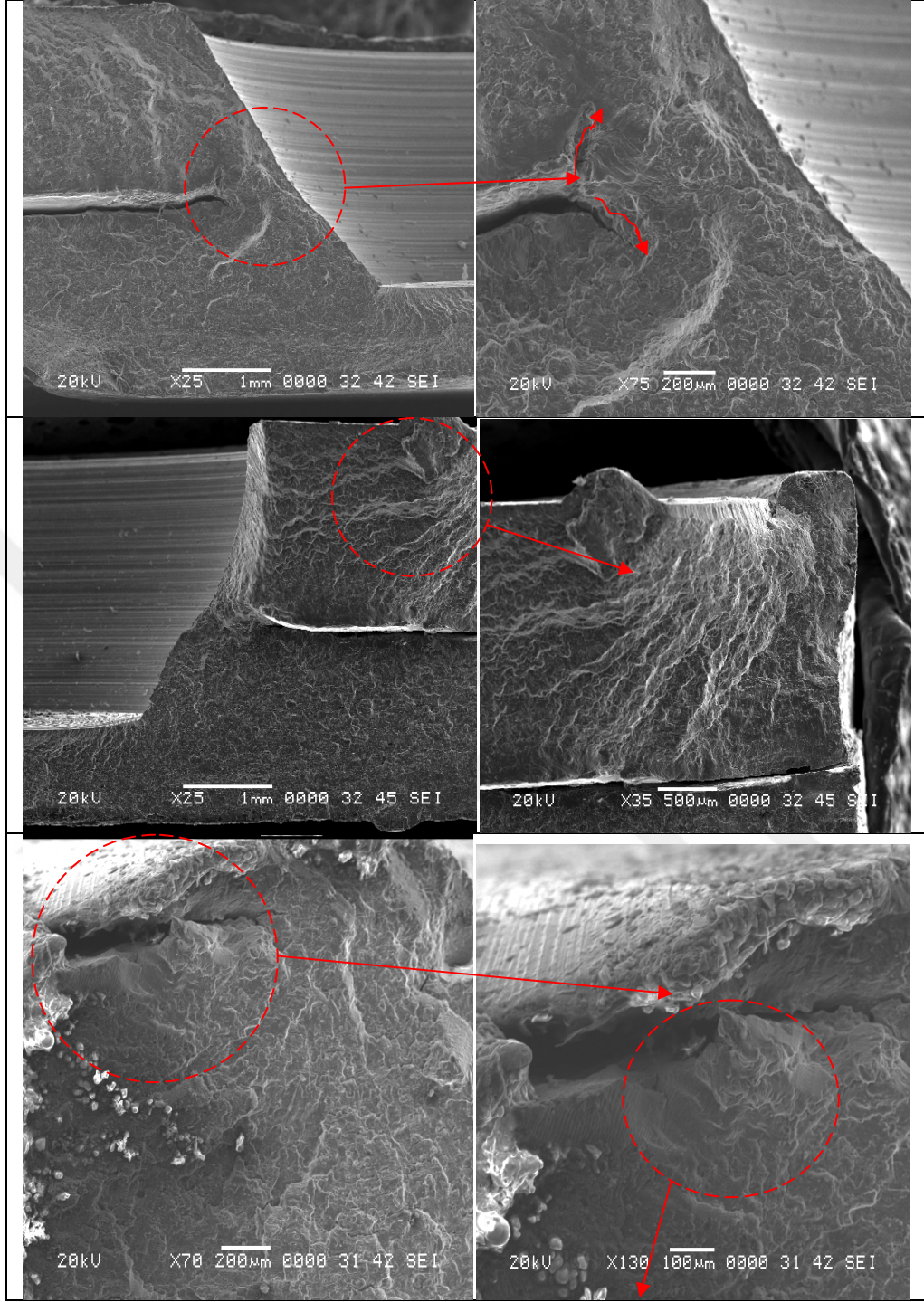
Şekil 7.58. Yorulmaya tabi tutulan pimsiz kaynağın SEM mikroyapıları - P-FAT7 numunesi kaynaklı bağlantı)



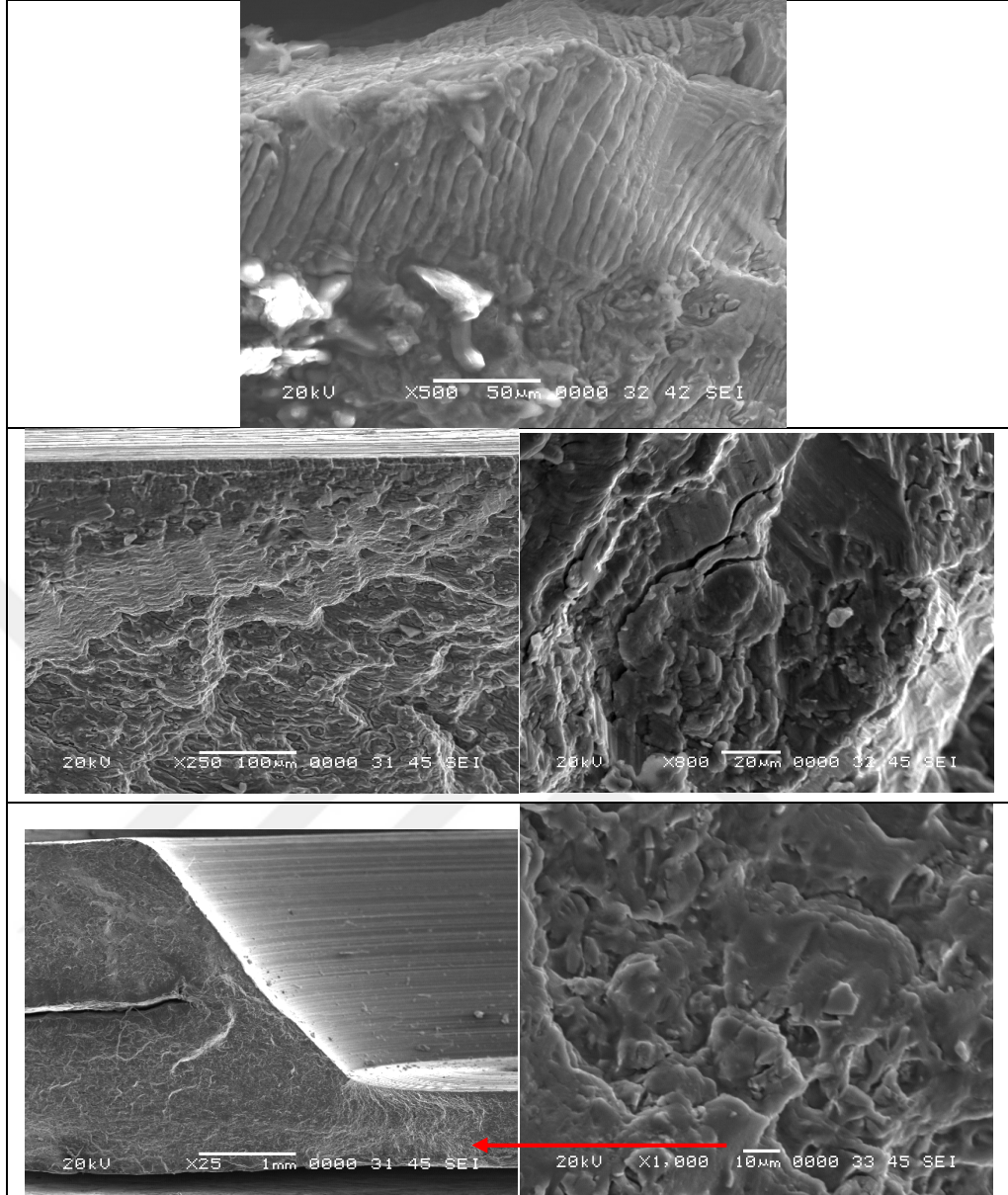
Şekil 7.58. (Devam) Yorulmaya tabi tutulan pimsiz kaynağın SEM mikroyapıları - P-FAT7 numunesi



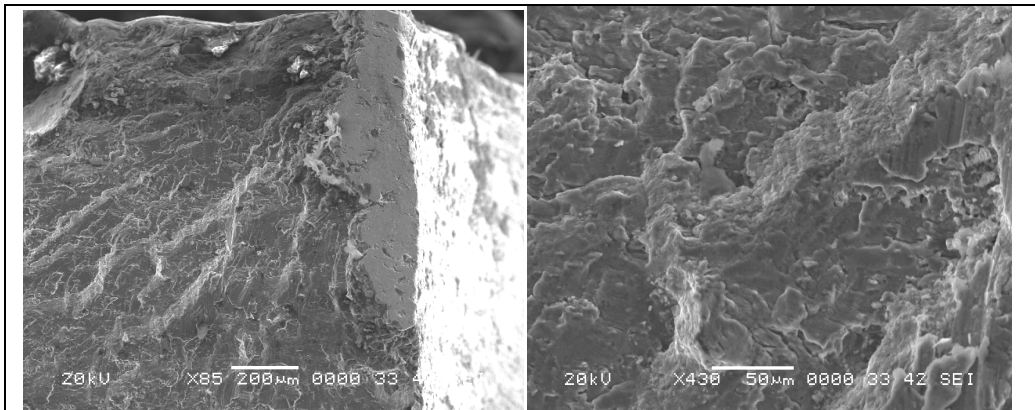
Şekil 7.59. Yorulmaya tabi tutulan pimsiz kaynağın SEM mikroyapıları - P-FAT3 numunesi



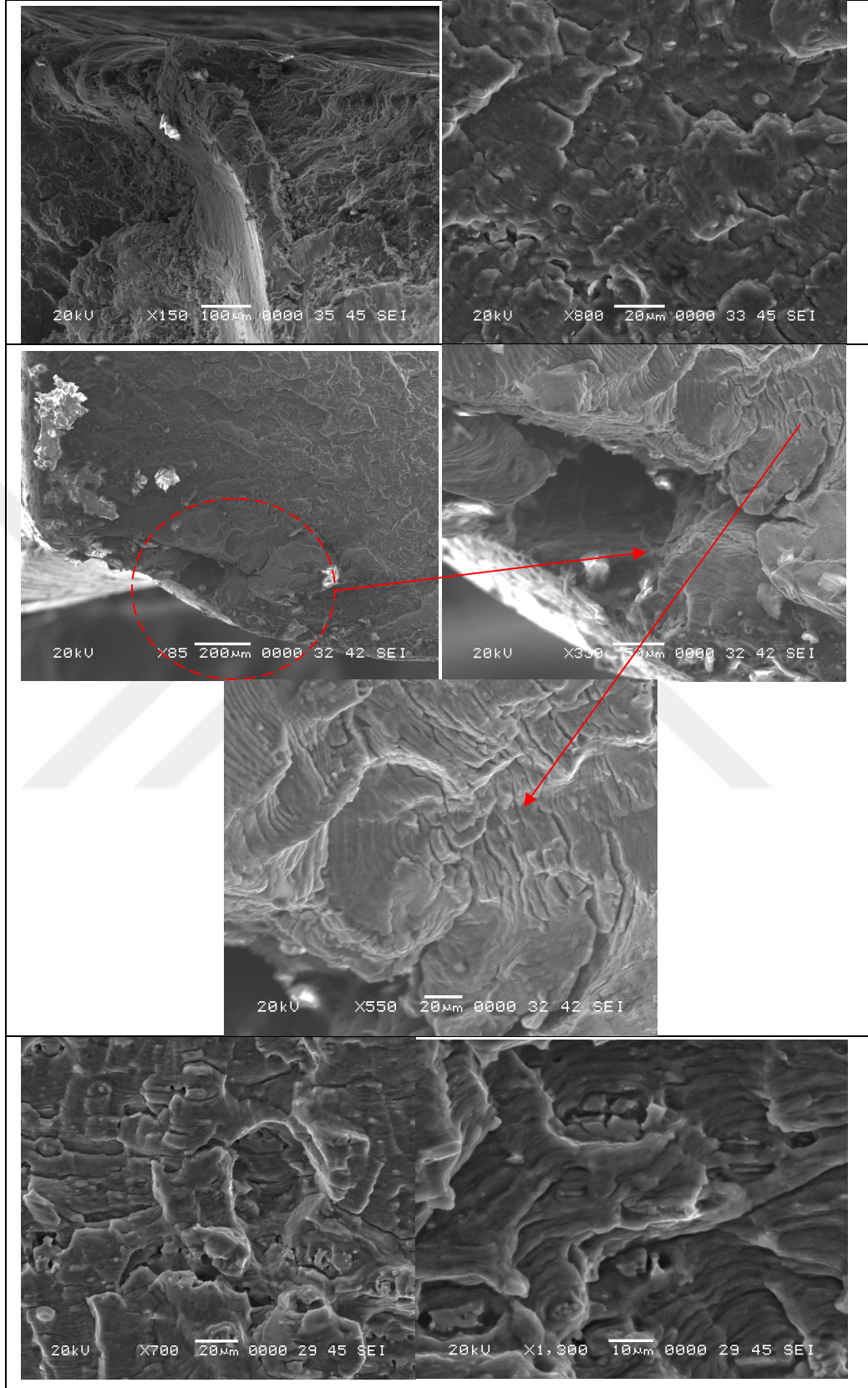
Şekil 7.60. Yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynağının SEM mikroyapıları – FAT1 numunesi bağlantı)



Şekil 7.60. (Devam) Yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynağının SEM mikroyapıları – FAT1 numunesi



Şekil 7.61. Yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynağının SEM mikroyapıları – FAT8 numunesi bağlantı)



Şekil 7.61. (Devam) Yorulmaya tabi tutulan konik pim kaynağının SEM mikroyapıları – FAT8 numunesi

## 7.12. Optimizasyon Sonuçları

### 7.12.1. Pimsiz kaynağın tek tepki optimizasyonu

Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların tek tepki optimasyonlarını gerçekleştirmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu tek tepki optimasyonu için pimsiz kaynağın çekme-kesme aksinel yüklemesi yapıldığından elde edilen çekmede kesme yükü kullanılmıştır. Daha büyük - iyi S/G oranı kullanılarak tablo 7.49'de pimsiz kaynaklı bağlantıların elde edilen kalite tepkileri gösterilmiştir. Taguchi analitik yöntemine dayanılarak tablolar 7.50 ve 7.51'de pimsiz bağlantıların sinyal-gürültü oranı ve çekmede kesme yükü verilmiştir. Sonuç olarak, tanımlanan işlem parametrelerinin önem sırası tablolar 7.50 ve 7.51'da gösterilmektedir.

Tablo 7.49. Pimsiz kaynakların kalite yanıtları (dB) ve kırılma yüklerinin ortalaması

Kaynak kodları	Çekmede kesme yükünü ortalaması (N)	S/G oranı (dB)
PL-TEN 1	2714,5	68,6738
PL-TEN 2	2877,8	69,1812
PL-TEN 3	3555,7	71,0185
PL-TEN 4	2547,4	68,1219
PL-TEN 5	2407,3	67,6306
PL-TEN 6	3463,3	70,7898
PL-TEN 7	1893,1	65,5435
PL-TEN 8	2122,7	66,5378
PL-TEN 9	3239,5	70,2096

Tablo 7.50. Sinyal-gürültü oranı için tepki tablosu (pimsiz kaynak)

Düzye	Dönme hızı (A)	Dalma derinliği (B)	Kalma süresi (C)
1	69,62	67,45	68,67
2	68,85	67,78	69,17
3	67,43	70,67	68,06
Delta	2,19	3,23	1,11
Sıra	2	1	3

Tablo 7.51. Ortalamalar için tepki Tablosu (pimsiz kaynak)

Düzyey	Dönme hızı (A)	Dalma derinliği (B)	Kalma süresi (C)
1	3049	2385	2767
2	2806	2469	2888
3	2418	3420	2619
Delta	631	1035	270
Rank	2	1	3

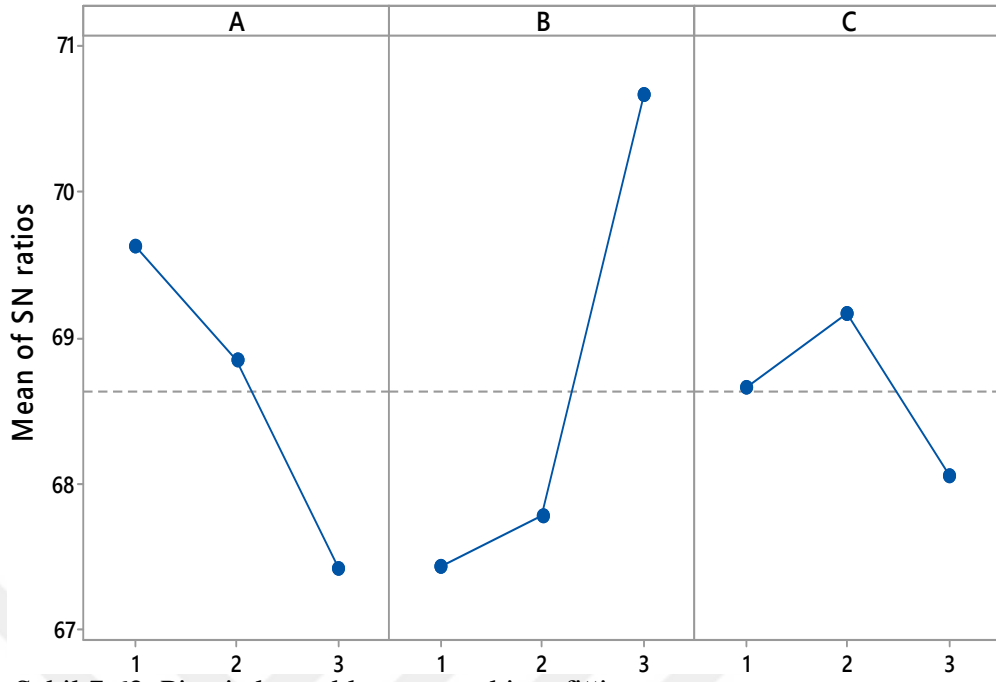
Aynı şekilde, tablo 7.49 ve 7.50’de gösterilen parametre sırasını (sonuçlarını) doğrulamak için elde edilen kaynağın çekmede kesme yükünün varyans analizi (VA) gerçekleştirilmiştir ve elde edilen VA analitik sonuçları tablo 7.52’de verilmiştir. Aynı zamanda tablo 7.52’de çekmede kesme yükü üzerindeki proses parametrelerinin katkısı gösterilmiştir.

Tablo 7.52. Pimsiz kaynakların varyans analizi (S/G oranı)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı	2	607454	607454	303727	158,08	0,006	22,49%
Dalma derinliği	2	1980235	1980235	990117	515,31	0,002	73,32%
Kalma süresi	2	109330	109330	54665	28,45	0,034	4,05%
Hata	2	3843	3843				
Toplam	8	2700861					

S- 43,8338; R-sq -99,86%; R-sq(adj) - 99,43%

Sinyal-gürültü (S/G) oranının ana etki grafiği şekil 7.62’de resimlendirilmiş ve bu grafik ile pimsiz kaynağın çekmede kesme yükünün optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Pimsiz kaynak işlemi için optimum parametre kombinasyonu, 1400dev/dak, 0,80mm ve 5s olacağı gösterilmiştir. Ayrıca, tablo 7.52’da yanıtın or tepkinin S/G oranı sağlanmıştır. Bunu elde etmek için her parametre düzeyinin ortalaması bulundurulmuştur.



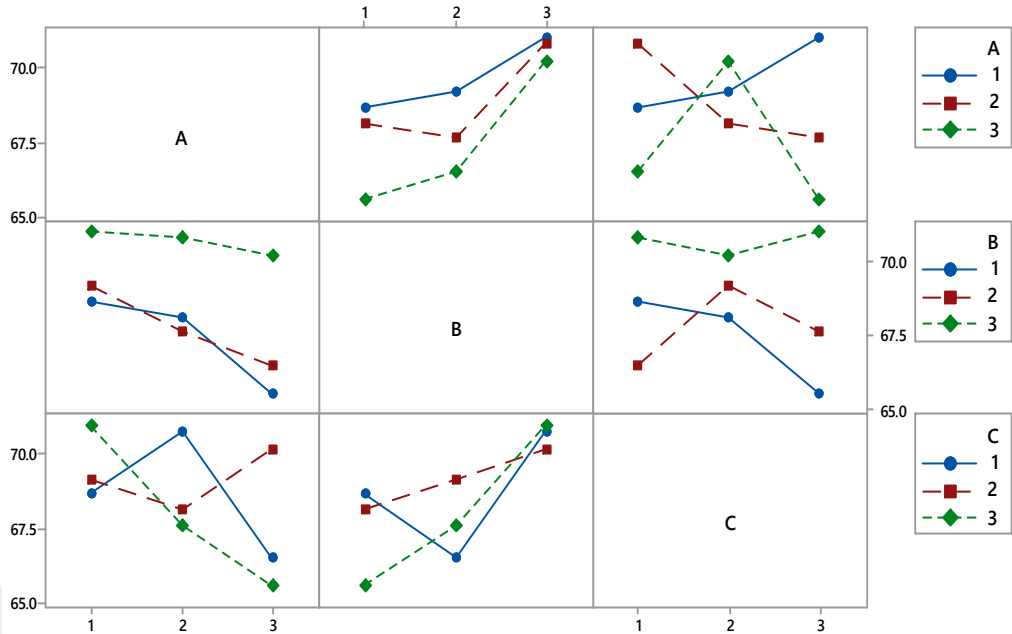
Şekil 7.62. Pimsiz kaynakların ana etki grafiği

Tablo 7.53. Kırılmış numunelerin S/G oranı ortalaması (pimsiz kaynak)

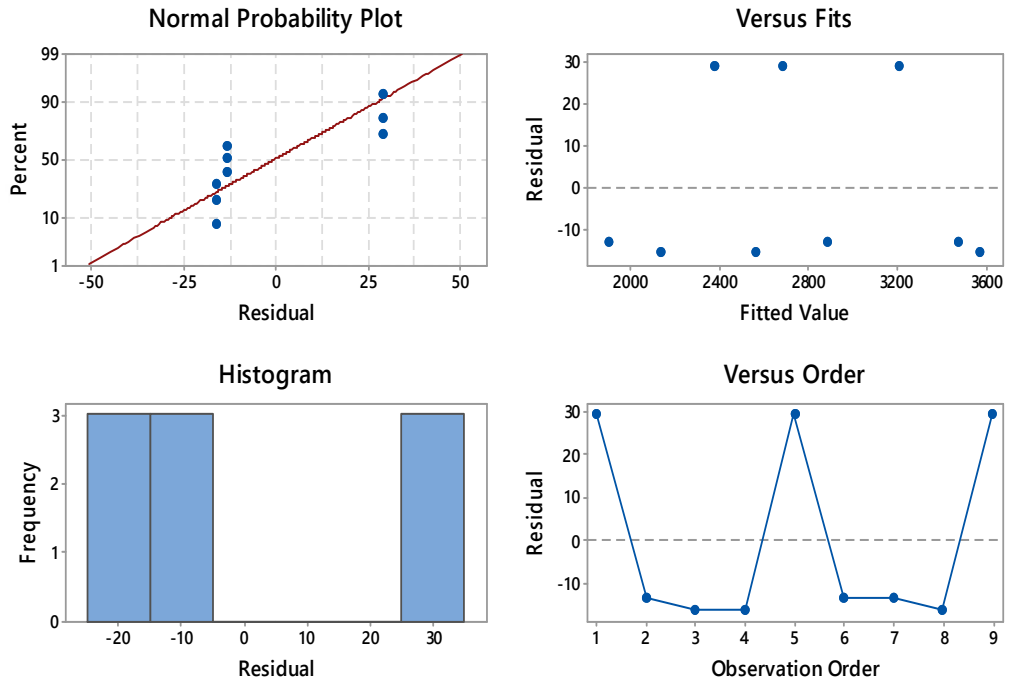
Kaynak parametreleri	S/N oranının ortalaması, dB		
	Düzyey 1	Düzyey 2	Düzyey 3
Dönme hızı (A)	69,6245	68,84745	67,43027
Daldırılma derinliği (B)	67,4464	67,7832	70,67262
Kalma süresi (C)	68,66712	69,1709	68,06419

Çekmede kesme yükü üzerinde proses parametrelerinin etkileşim grafikleri şekil 7.63'te gösterilmiştir. Aynı şekilde, pimsiz kaynakların çekmede kesme yükü için artık grafiği elde edilmiş ve şekil 7.64'te elde edilen artık grafiği bulunmuştur.



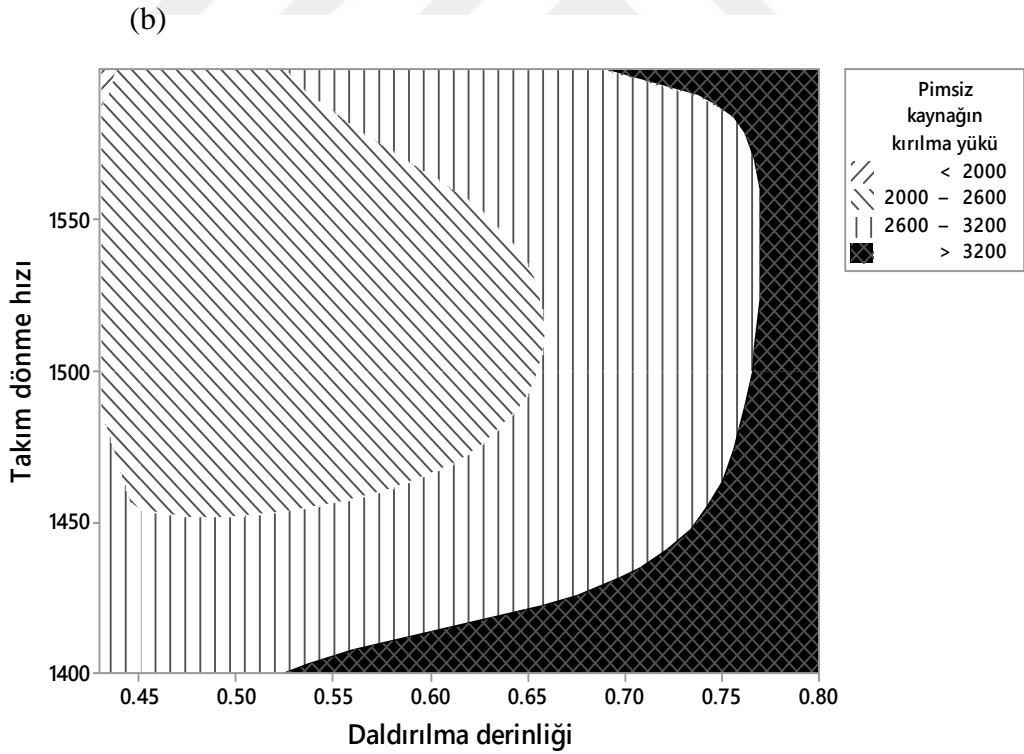
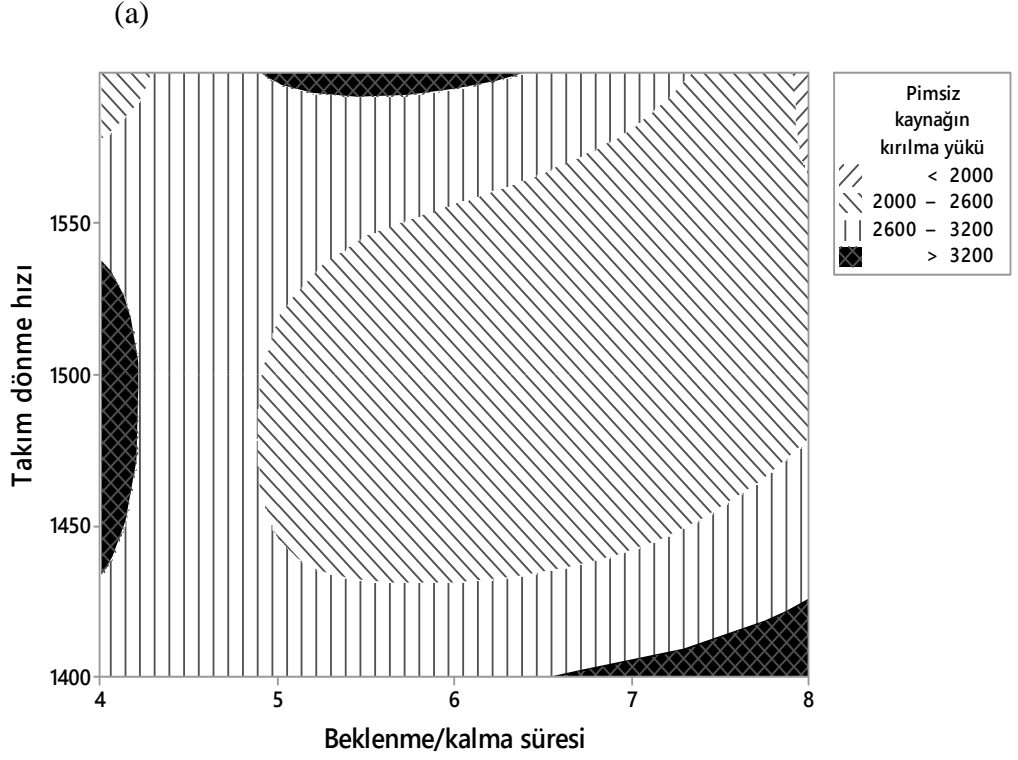


Şekil 7.63. Pimsiz kaynakların kalite yanıtının etkileşim grafiği

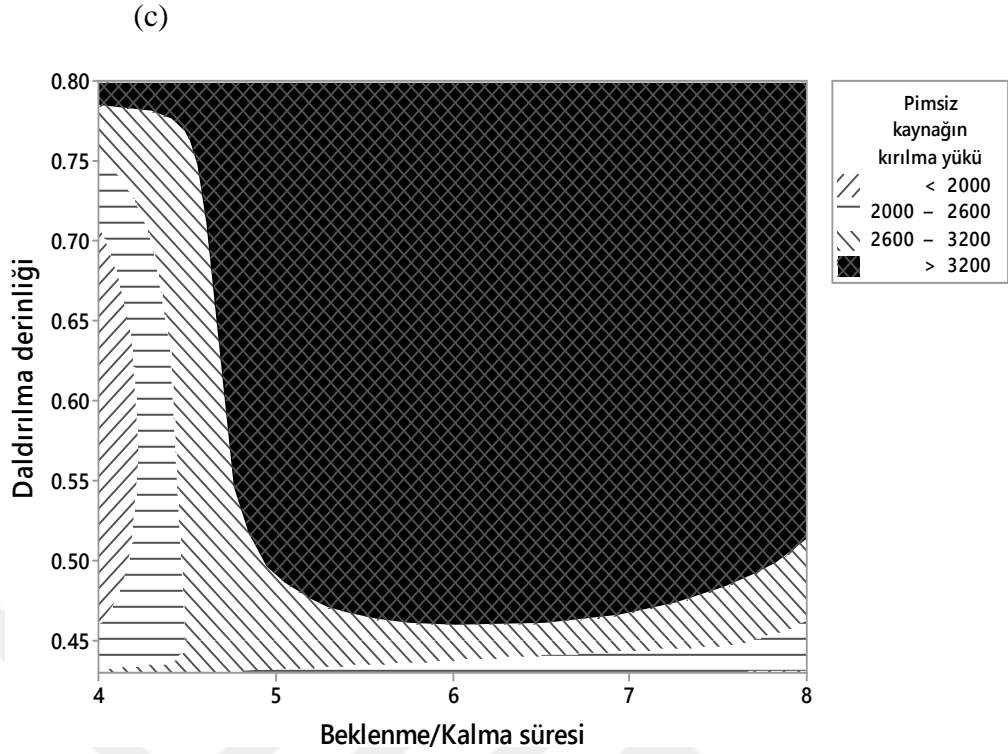


Şekil 7.64. Pimsiz kaynakların artık grafiği

Pimsiz kaynaklarda en büyük çekmede kesme yükünü belirlemek için kaynak parametresinin optimizasyon grafikleri çizilmiştir. Şekil 7.65'de pimsiz bağlantının optimizasyon grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerde siyah olan işaretlendirilmiş bölümler, yüksek çekmede kesme yüklerini göstermektedir.



Şekil 7.65. Pimsiz kaynaklı bağlantıların optimizasyon grafikleri (a) takım dönme hızı ile dalma derinliği; (b) takım dönme hızı ile kalm süresi; (c) dalma derinliği ile kalm süresi bağlantı)



Şekil 7.65. (Devam) Pimsiz kaynaklı bağlantıların optimizasyon grafikleri (a) takım dönme hızı ile dalma derinliği; (b) takım dönme hızı ile kalam süresi; (c) dalma derinliği ile kalm süresi

#### 7.12.1.1. Pimsiz kaynakların doğrulanması

Ana etki grafiğe dayanarak 1400dev/dak'lık takım dönme hızında, 0,8mm'lik omuz dalma derinliğinde ve 5s'lik kalma süresinde optimum parametre kombinasyonu elde edilmiştir. Böylece, bu parametre kombinasyonu ile deneyin yeni bir dizi yapılmıştır. Tablo 7.54'de pimsiz kaynaklı bağlantı için optimize edilmiş sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 7.54. Pimsiz kaynaklı bağlantının doğrulanması

	ilk kaynak	Optimal kaynak parametreleri		İyileştirme
		Kestirim	Deney	
Parametre düzeyleri	1600-0.8-5	1400-0,8-5	1400-0,8-5	
Çekmede kesme yükü (N)	3192	3841	3796	19%
S/G oranı	70.2	72.20		

#### 7.12.2. Konik pim kaynaklı bağlantının tek tepki optimizasyonu

Aynı şekilde, daha büyük-daha iyi S/G oranı yaklaşımı kullanılarak konik pim kaynaklı birleştirmelerin kalite tepkileri belirlenmiştir ve onların sonucu tablo

7.55’de verilmiştir. Taguchi analitik bir yöntemi kullanarak proses parametrelerinin sıralaması gerçekleştirilmiştir. Sinyal gürültü oranının tablosu ve çekmede kesme yüklerinin ortalaması tablosu, sırasıyla tablolar 7.56 ve 7.57’de sağlanmıştır.

Tablo 7.55. Konik pim kaynaklı bağlantıların kalite tepkileri (dB) ve çekmede kesme yüklerinin ortalaması

Kaynak kodları	Çekmede kırılma yuklerinin ortalaması (N)	S/G oranı (dB)
TEN 1	2128,6	66,5619
TEN 2	1928,1	65,7026
TEN 3	2106,4	66,4708
TEN 4	1945,4	65,7802
TEN 5	1787,9	65,0469
TEN 6	1720,7	64,7141
TEN 7	1960,3	65,8465
TEN 8	1618,1	64,1801
TEN 9	1796,1	65,0866

Tablo 7.56. Sinyal gürültü oranı için tepki tablosu (konik pim kaynaklı bağlantılar)

Düzy	Dönme hızı	Daldırılma derinliği	Kalma süresi
1	66,25	66,06	65,15
2	65,18	64,98	65,52
3	65,04	65,42	65,79
Delta	1,21	1,09	0,64
Sıra	1	2	3

Tablo 7.57. Kırılma yüklerin ortalaması için tepki tablosu (konik pim kaynaklı bağlantılar)

Düzy	Dönme hızı	Daldırılma derinliği	Kalma süresi
1	2054	2011	1822
2	1818	1778	1890
3	1792	1874	1952
Delta	263	233	129
Sıra	1	2	3

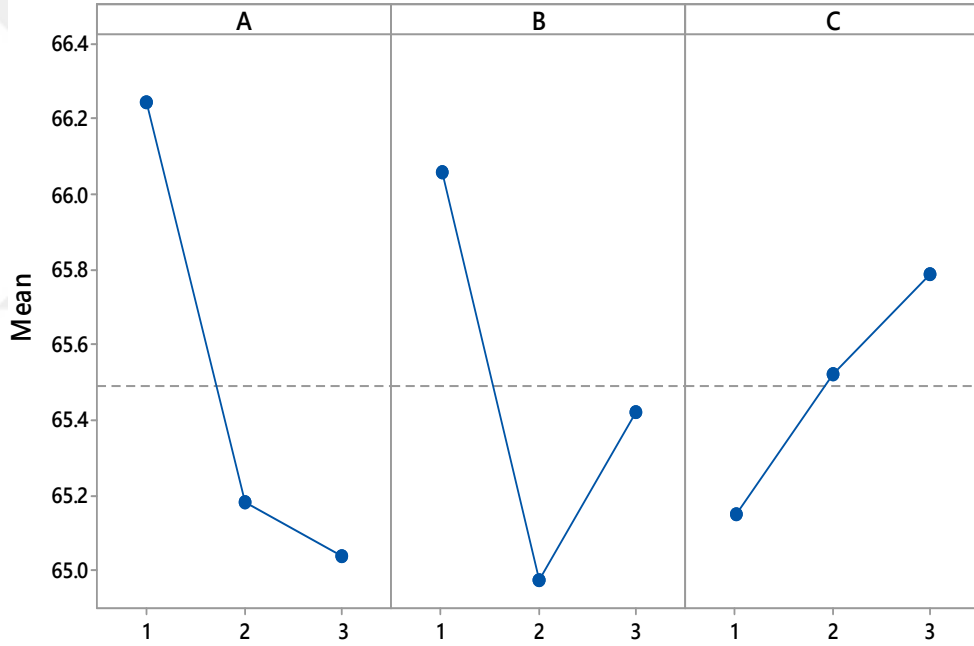
Ayrıca, tablo 7.58’de S/G oranlarının varyans analizi gösterilmiş ve şekil 7.66’da onun ana etki grafiği sağlanmıştır. Böylece, konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yükünü optimize etmek için bu etki grafiği kullanılmıştır. Konik pim kaynakları için

optimum parametre kombinasyonu 1400dev/dak dönme hızı, 0,43mm omuz dalma derinliği ve 6s bekleme süresinde elde edilmiştir. Benzer şekilde, her parametre düzeyi/seviyesi için elde edilen S/G oranının ortalamaları tablo 7.59’de sağlanmıştır.

Tablo 7.58. Konik pim kaynaklı bağlantıların varyans analizi (S/G oranı)

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı	2	125670	125670	62835,2	69,68	0,014	53,47%
Dalma derinliği	2	82540	82540	41270,1	45,76	0,021	35,12%
Kalma süresi	2	25004	25004	12501,9	13,86	0,067	10,64%
Hata	2	1804	1804	901,8			
Toplam	8	235018					

S-30,0298; R-sq - 99,23%; R-sq(adj) -96,93%

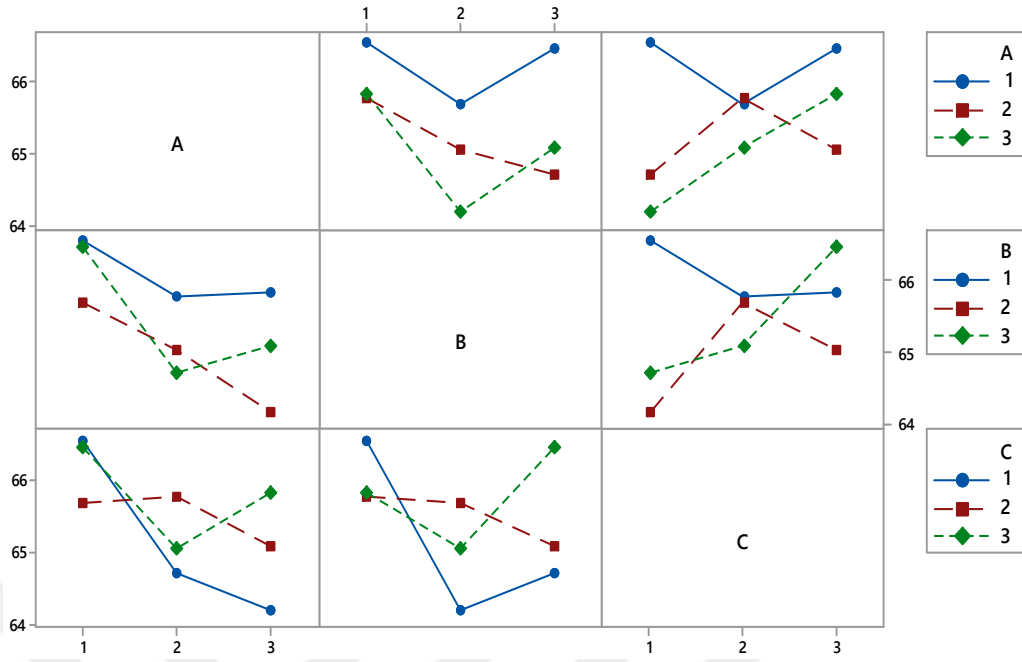


Şekil 7.66. Konik pim kaynaklarının ana etki grafiği

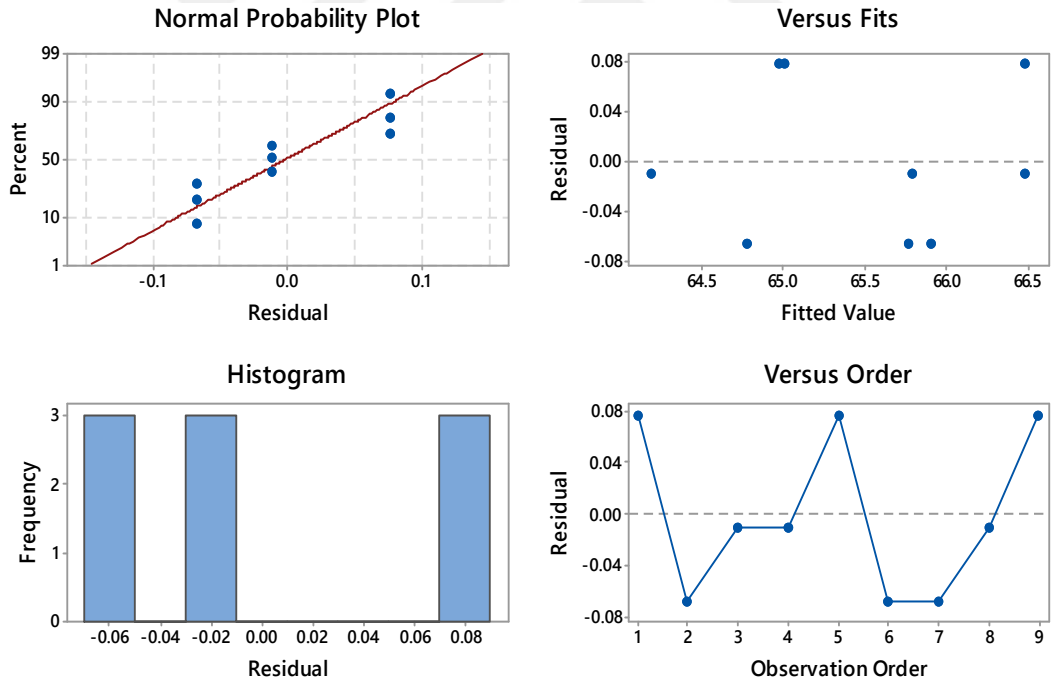
Tablo 7.59. Kırılma yüklerinin S/G oranı (konik pim kaynaklı bağlantı)

Kaynak parametreleri	S/G oranının ortalanması, dB		
	Düzyen 1	Düzyen 2	Düzyen 3
Dönme hızı (A)	66,2451	65,18038	65,03772
Dalma derinliği (B)	66,06284	64,97652	65,42384
Kalma süresi (C)	65,15203	65,52313	65,78804

Şekil 7.67’de seçilen proses parametrelerinin etkileşim grafikleri gösterilmekte ve şekil 7.68’de konik pim kaynaklı bağlantıların artık grafiği sağlanmaktadır.

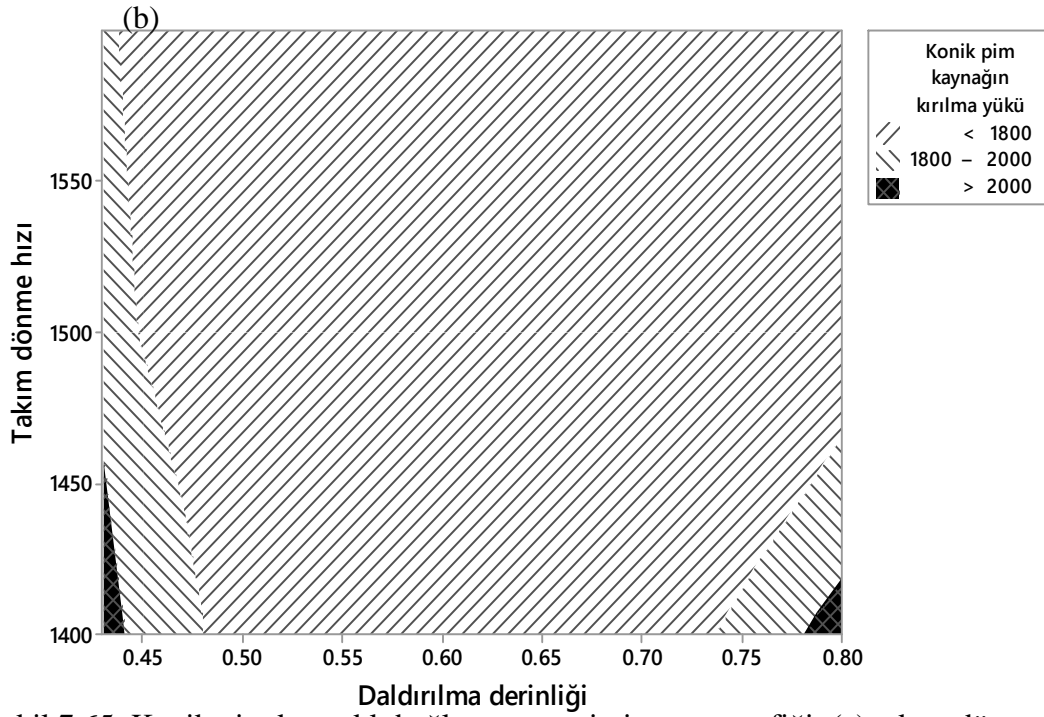
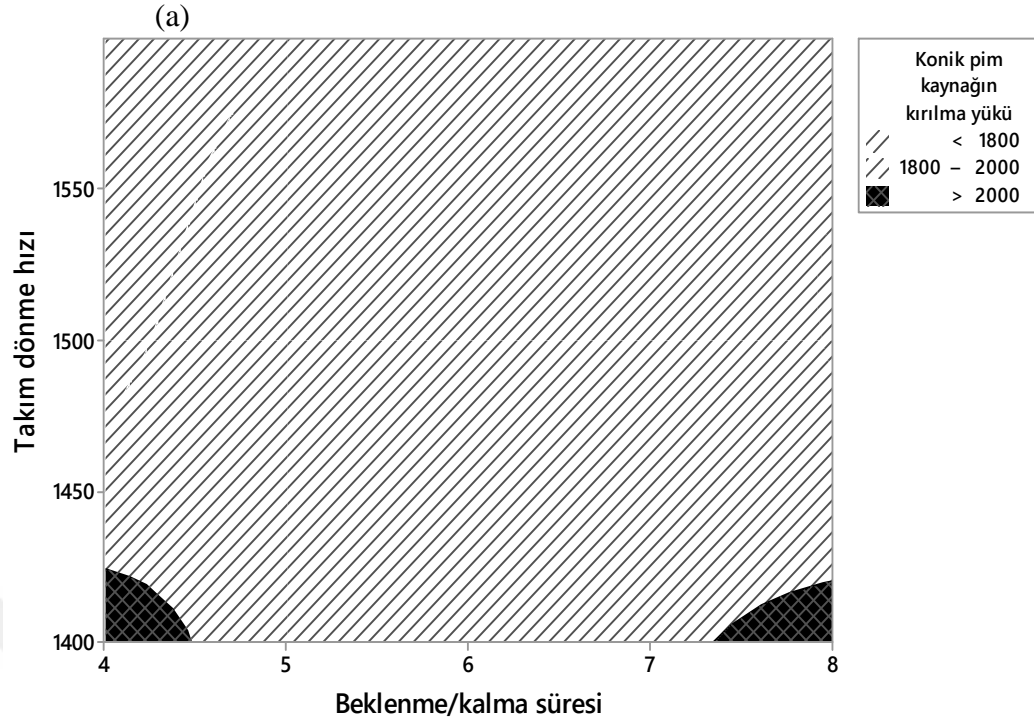


Şekil 7.67. Konik pim kaynaklı bağlantıların etkileşim grafiği

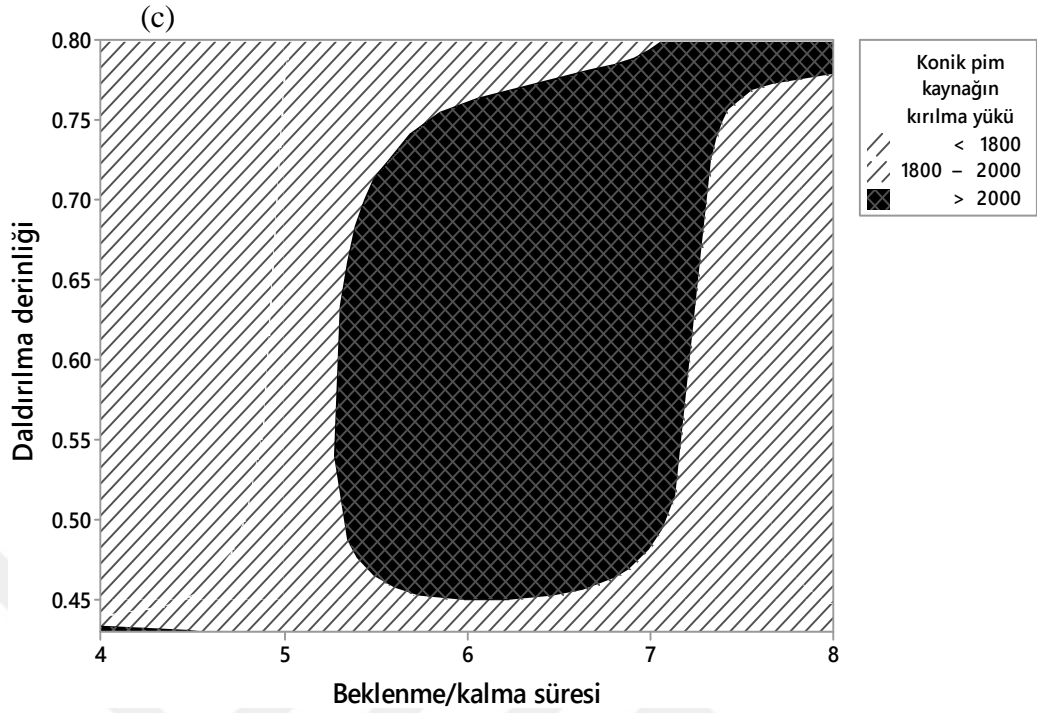


Şekil 7.68. Konik pim kaynaklı bağlantıların artık grafiği

Ayrıca, şekiller 7.69a-c'de konik pim kaynaklı bağlantıları için optimizasyon grafikleri sağlanmıştır.



Şekil 7.65. Konik pim kaynaklı bağlantının optimizasyon grafiği: (a) takım dönme hızı ile dalma derinliği; (b) takım dönme hızı ile kalma süresi; (c) dalma derinliği ile kalma süresi



Şekil 7.69. (Devam) Konik pim kaynaklı bağlantının optimizasyon grafiği: (a) takım dönme hızı ile dalma derinliği; (b) takım dönme hızı ile kalma süresi; (c) dalma derinliği ile kalma süresi

### 7.12.2.1. Konik pim kaynağının doğrulanması

Optimize edilmiş sonuca dayanarak ve konik pimli takım kullanılarak doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Böylece, tablo 7.60'de konik pim kaynaklı bağlantı için doğrulama sonuçları sağlanmıştır.

Tablo 7.60. Konik pim destekli bağlantının doğrulanması

	ilk kaynak	Optimal kaynak parametreleri		İyileştirme
		Kestirim	Deney	
Parametre düzeyleri	1600-0.45-4	1400-0,43-6	1400-0,43-6	
Çekmede kesme yükü (N)	1556	2241.22	2313	48.7%
S/G oranı	64.2	67.12		

### 7.12.3. Kırılma yükü, çapak hacmi ve plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacminin hibrid çok tepki optimizasyonu

Seçilmiş kaynak yanıtları/tepkilerini optimize etmek için Taguchi yöntemi (TY), Gri ilişkisel analiz (GİA) ve temel bileşenler analizinin (TBA) tümleştirilmesi, bir hibrid



çok tepkili optimizasyon yaklaşımı olarak kullanılmıştır. Tablo 7.61’de optimize edilecek kaynak yanıtları/tepkileri ve onların amaç fonksiyonları gösterilmektedir. Böylece, sürtünme karıştırma nokta kaynağının çok tepkili optimasyonunda hybrid TY-GIA-TBA yaklaşımının uygulanması gerçekleştirilmiştir. Kırılma yükü, çapak hacmi ve nüfuz edilen plastikleştirilmiş malzemenin hacmi, tepkiler/yanıtlar olarak kullanılmıştır. Pimsiz bağlantılara göre konik pim kaynaklı bağlantındaki çıkarılan çapak hacmi oldukça büyük olduğu için onun optimize edilmesi göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 7.61. Yanıtlar/tepkiler ve onların amaç fonksiyonları

Yanıtlar/tepkiler	Amaç fonksiyonları
Kırılma yükü	Maksimizasyon
Çapak hacmi	Minimizasyon
Plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi	Maksimizasyon

Deney sayısını belirlemek için Taguchi deney tasarımı kullanılmış ve uygun dikey sıraları seçilmiştir. Aynı şekilde, uygun S/G oranının seçilmesinden yanıtların kalite kayıp değerleri (dB’de) hesaplanmıştır. Sonradan, Gri ilişkisel analizin başlangıcını işaretlemek için yanıtların kalite kayıp değerlerinin ön işleme veya normalleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yanıtların Gri ilişkisel katsayısı belirlenmiştir. Gri ilişkisel sınıfı hesaplamak için uygun ağırlık değerlerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Böylece, temel bileşenler analizi kullanılarak ihtiyaç duyulan ağırlık değerleri elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen optimal ağırlık değerlerinin kullanılmasıyla Gri ilişkisel sınıfları belirlenmiştir.

#### 7.12.3.1.S/G analizi

Tablo 7.62’de gösterildiği gibi yanıtların (örneğin kırılma yükü, çapak hacmi ve plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi) kalite kayıp değerleri hesaplanmıştır. Daha büyük-daha iyi S/G oranı kullanılarak kırılma yükünün ve plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacminin kalite kayıp değerleri (dB) hesaplanmıştır. Ancak, Daha küçük-daha iyi S/G oranıyla çapak hacminin kalite kayıp değeri (dB) hesaplanmıştır.

Tablo 7.62. Yanıtlar/tepkiler ve onların S/G oranı

Kaynak kodu	Yanıtların ortalaması			S/G oranları		
	Kırılma yükü (N)	Çapak hacmi (mm <sup>3</sup> )	Nüfuz edilen hacmi (mm <sup>3</sup> )	Kırılma yükü (dB)	Çapak hacmi (dB)	Nüfuz edilen hacim (dB)
TEN 1	2128,6	22,76	51,79	66,5619	-27,1434	34,2849
TEN 2	1928,1	23,73	52,39	65,7026	-27,5060	34,3850
TEN 3	2106,4	32,54	45,93	66,4708	-30,2484	33,2419
TEN 4	1945,4	21,83	52,72	65,7802	-26,7811	34,4395
TEN 5	1787,9	20,94	55,18	65,0469	-26,4195	34,8356
TEN 6	1720,7	30,51	47,96	64,7141	-29,6888	33,6176
TEN 7	1960,3	16,21	58,34	65,8465	-24,1957	35,3193
TEN 8	1618,1	19,47	56,65	64,1801	-25,7873	35,0640
TEN 9	1796,1	23,57	54,90	65,0866	-27,4472	34,7914

### 7.12.3.2. Normalleştirme

Kırılma yükü, çapak hacmi ve nüfuz edilen hacim için kalite kayıp değerlerinin normalleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Tablo 7.63'te gösterildiği gibi normalleştirme işlemi, ilgili S/G oranlarının değerleri 0 ile 1 arasında azaltmıştır. Denklem (4.10)'a göre (bölüm 4'e bakılır), kırılma yükü,  $x_1(k)$  için normalleştirilmiş değerler, Denklemler (7.46a), (7.46b) ve (7.46c)'de gösterildiği gibi resimlendirilip sağlanmıştır.

$$x_1(1) = \frac{x_1^{(q)}(1) - \min x_1^{(q)}(1)}{\max x_1^{(q)}(1) - \min x_1^{(q)}(1)} = \frac{66.5619 - 64.1801}{66.5619 - 64.1801} = 1.0000 \quad (7.46a)$$

$$x_1(2) = \frac{x_1^{(q)}(2) - \min x_1^{(q)}(2)}{\max x_1^{(q)}(2) - \min x_1^{(q)}(2)} = \frac{65.7026 - 64.1801}{66.5619 - 64.1801} = 0.6392 \quad (7.46b)$$

$$x_1(3) = \frac{x_1^{(q)}(3) - \min x_1^{(q)}(3)}{\max x_1^{(q)}(3) - \min x_1^{(q)}(3)} = \frac{66.4708 - 64.1801}{66.5619 - 64.1801} = 0.9618 \quad (7.46c)$$

Tablo 7.63. Verinin Normalleştirilmesi

Ideal dizisi	Normalleştirilmiş very		
	Kırılma yükü	Çapak hacmi	Nüfuz edilen hakim
1	1,0000	0,5130	0,5151
2	0,6392	0,4531	0,5632
3	0,9618	0,0000	0,0130
4	0,6718	0,5729	0,5895
5	0,3639	0,6326	0,7802
6	0,2242	0,0924	0,1938
7	0,6996	1,0000	1,0000
8	0,0000	0,7370	0,8901
9	0,3806	0,4628	0,7589

### 7.12.3.3. Gri ilişkisel katsayılarının hesaplanması

Gri ilişkisel katsayılarının hesaplanması önce normalleştirilmiş kalite yanıtlarının sapma dizileri belirlenmiştir ve tablo 7.64'te hesaplanmış yanıtların sapma dizileri verilmiştir. Denklem (4.14)'e göre (bölüm 4'de), kırılma yükünün sapma dizileri,  $\Delta_{o1}(k)$  hesaplanmış ve Denklemler (7.47a), (7.47b) ve (7.47c)'da kırılma yükünün ilk üç sapma dizisi sağlanmıştır.

$$\Delta_{o1}(1) = \|x_o(1) - x_1(1)\| = \|1,0000 - 1,0000\| = 0,000 \quad (7.47a)$$

$$\Delta_{o1}(2) = \|x_o(2) - x_1(2)\| = \|1,0000 - 0,6392\| = 0,3608 \quad (7.47b)$$

$$\Delta_{o1}(3) = \|x_o(3) - x_1(3)\| = \|1,0000 - 0,9618\| = 0,0382 \quad (7.48c)$$

Bu nedenle, sapma dizilerinin en büyük ve en düşük değerleri kullanılarak yanıtların Gri ilişkisel katsayısı belirlenmiş ve Tablo 7.65'te elde edilen Gri ilişkisel katsayısı gösterilmiştir. Ayrıca, tüm Gri ilişkisel katsayılarının belirlenmesi için Gri ilişkisel katsayısının kimlik katsayısı 0,5 olarak ayarlanmıştır. Benzer şekilde, Denklem (4.13)'e göre (bölüm 4'te) kırılma yükünün Gri ilişkisel katsayısı,  $\xi_1(k)$  belirlenmiş ve onun ilk üç Gri ilişkisel katsayısı, Denklemler (7.48a), (7.48b) and (7.48c)'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\xi_1(1) = \frac{0,0000+(0,5)(1,0000)}{0,0000+(0,5)(1,0000)} = 1,0000 \quad (7.48a)$$

$$\xi_1(2) = \frac{0,0000+(0,5)(1,0000)}{0,3608+(0,5)(1,0000)} = 0,5809 \quad (7.48b)$$

$$\xi_1(3) = \frac{0,0000+(0,5)(1,0000)}{0,0382+(0,5)(1,0000)} = 0,9290 \quad (7.48c)$$

Tablo 7.64. Hesaplanmış sapma dizileri

Sapma denemesi	Kırılma yükü ( $\Delta_{01}$ )	Çapak hacmi ( $\Delta_{02}$ )	Nüfuz edilen hakim ( $\Delta_{03}$ )
İdeal dizisi	1	1	1
1	0,0000	0,4870	0,4849
2	0,3608	0,5469	0,4368
3	0,0382	1,0000	0,9870
4	0,3282	0,4271	0,4105
5	0,6361	0,3674	0,2198
6	0,7758	0,9076	0,8062
7	0,3004	0,0000	0,0000
8	1,0000	0,2630	0,1099
9	0,6194	0,5372	0,2411

Tablo 7.65. Yanıtların Gri ilişkisel katsayısı

İdeal dizisi	Çapak hacmi		
	Kırılma yükü $\xi_{01}(k)$	$\xi_{02}(k)$	Nüfuz edilen hacim $\xi_{03}(k)$
	1	1	1
1	1,0000	0,5066	0,5076
2	0,5809	0,4776	0,5337
3	0,9290	0,3333	0,3362
4	0,6037	0,5393	0,5491
5	0,4401	0,5764	0,6946
6	0,3919	0,3552	0,3828
7	0,6247	1,0000	1,0000
8	0,3333	0,6553	0,8198
9	0,4467	0,4821	0,6747

#### 7.12.3.4. TBA yoluyla yüzde katkısının ya da ağırlık değerlerinin hesaplanması

Gri ilişkisel sınıfın hesaplaması önce yanıtların ağırlık değerlerinin hesaplanmasına ihtitaç duyulmuştur. Böylece, bu optimazasyonda temel bileşenler analizi (TBA) kullanılmasıyla yanıtların ağırlık değerleri elde edilmiştir. Ağırlık değerlerini belirlemek için TBA yöntemi kullanılarak mühendislik kararı veya varsayım kullanımı giderilmiş ve sonuçların özneliği giderilmiştir. Böylece, bölüm 4.3.3.1'de kullanılan TBA'nın adımlarına takip edilerek yanıtların ağırlık faktörü hesaplanmış ve bu optimasyon prosesinde kullanılmıştır.

Bu nedenle, TBA analizi için Tablo 6'da hesaplanan Gri ilişkisel katsayısı, gerekli veri matrisi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, bu TBA analizi için XLSTAT 2014 (Excel'de bir istatistik yazılım ve veri analizi) kullanılmıştır. Veri matrisinden, korelasyon matrisi değerlendirilmiştir. Böylece, Denkem (13) (bölüm 4'te) kullanılarak ihtiyaç duyulan özdeğerler ve özvektörler belirlenmiştir. Böylece, tablo 7.66'da değerlendirilen özdeğerler gösterilmiştir. Tablo 7.67'de özdeğerlerin mütekabil özvektörleri verilmiştir.

Tablo 7.66. Temel bileşenlerin özdeğeri ve değişkenliği

Temel bileşenler	Özdeğer	Değişkenlik (%)
Kırılma yükü	2,0740	69,1321
Çapak hacmi	0,8896	29,6546
Nüfuz edilen hacim	0,0364	1,2133

Tablo 7.67. Temel bileşenler için özvektörler

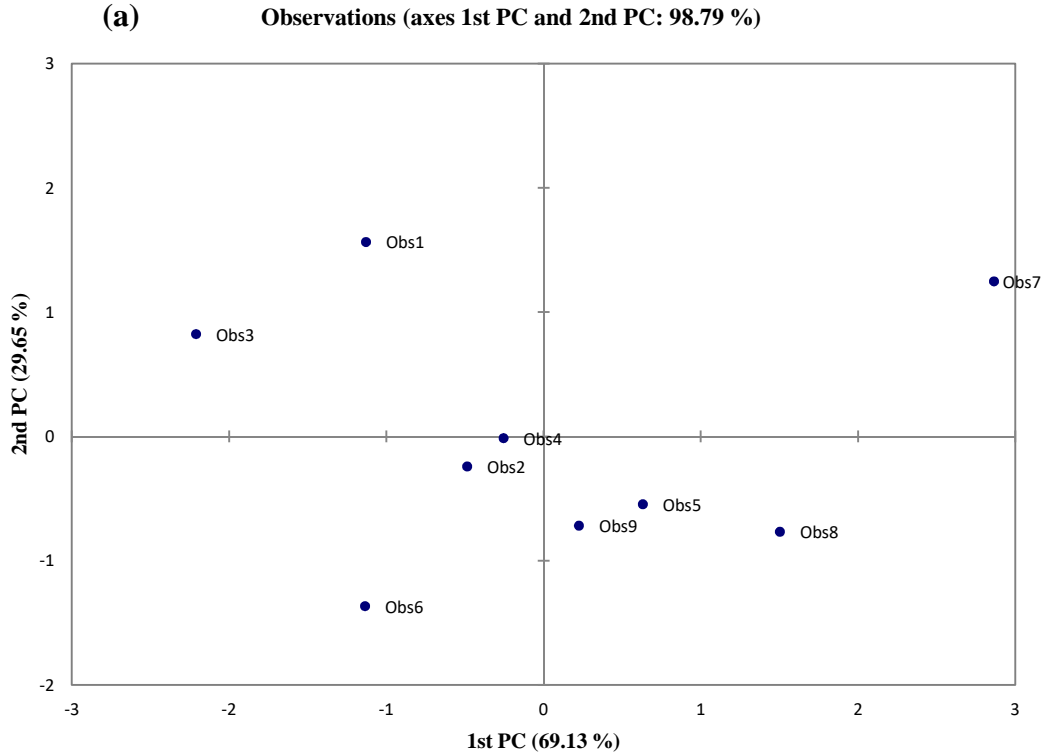
Yanıtlar	Birinci temel bileşen	İkinci temel bileşen	Üçüncü temel bileşen
Kırılma yükü	-0,3421	0,9219	0,1819
Çapak hacmi	0,6444	0,3711	-0,6686
Nüfuz edilen hacim	0,6839	0,1115	0,7210

Şekil 7.70'de yanıtların birinci temel bileşenlerinin varyans katkısı % 69,13 civarında olduğu gösterilmiştir. Bu varyans katkısı çok yüksek olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bunun bir sonucu olarak, özvektörlerin karesi, yanıtların katkısı olarak hesaplanmıştır. Tablo 7.68'de yanıtların değerlendirilmiş katkıları

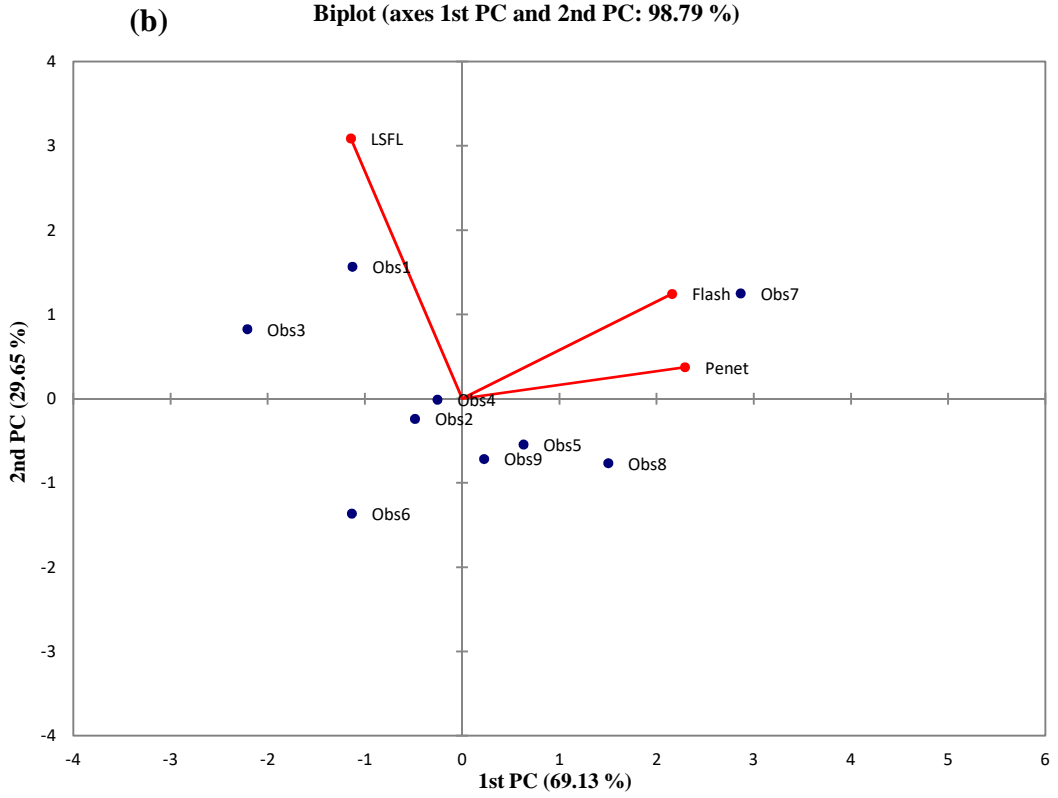
gösterilmiştir. İstenen yanıtlar için bu elde edilen katkılar, optimal-ağırlıklandırma değerleri olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, kırılma yükünün, çapak hacminin ve nüfuz edilen hacminin ağırlıklandırma/ağırlık değerleri, sırasıyla 0,1170 ( $w_1$ ), 0,4153 ( $w_2$ ) ve 0,4677 ( $w_3$ ) olarak belirlenmiştir.

Tablo 7.68. Temel bileşene yanıtların katkısı

Yanıtlar	Katkı
Kırılma yükü	0,1170
Çapak hacmi	0,4153
Nüfuz edilen hakim	0,4677



Şekil 7.70. Temel bileşenlerin grafikleri: (a) temel bileşenin gözlem çizilişi; (b) temel bileşenin ikili çizilişi (1st PC- birinci temel bileşen ve 2nd PC- ikinci temel bileşen)



Şekil 7.70. (Devam) Temel bileşenlerin grafikleri: (a) temel bileşenin gözlem çizilişi; (b) temel bileşenin ikili çizilişi (1st PC- birinci temel bileşen ve 2nd PC- ikinci temel bileşen)

### 7.12.3.5. Gri ilişkisel sınıfın hesaplaması

Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması için gerekli olan üç yanıtı ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, Denklem (4.16) (bölüm 4'te) azaltılarak verilen matematiksel Denklem (7.49) elde edilmiştir. Bu nedenle, temel bileşenler analizinden hesaplanan ağırlıklandırma değerleri Denklem (7.49)'de yerine koyulmuş ve Tablo 7.69'da gösterildiği gibi, Gri ilişkisel sınıflar hesaplanmıştır. Denklem (7.49) dayanılarak, ilk üç deneysel çalışmada Grey ilişkisel sınıfları ( $Y_i$ ) hesaplamak için sırasıyla Denklemler (7.50a), (7.50b) ve (7.50c)'de gösterilmiştir.

$$Y_i = (w_1 \times \xi_1(1)) + (w_2 \times \xi_2(1)) + (w_3 \times \xi_3(1)) \quad (7.49)$$

$$Y_1 = (0,1170 \times 1,0000) + (0,4153 \times 0,5066) + (0,4677 \times 0,5076) = 0,5648 \quad (7.50a)$$

$$Y_2 = (0,1170 \times 0,5809) + (0,4153 \times 0,4776) + (0,4677 \times 0,5337) = 0,5159 \quad (7.50b)$$

$$Y_3 = (0,1170 \times 0,9290) + (0,4153 \times 0,3333) + (0,4677 \times 0,3362) = 0,4044 \quad (7.50c)$$

Tablo 7.69. Gri ilişkisel sınıf ve onun sırası

İdeal dizisi	Gri ilişkisel sınıf	Sıra
	1	1
1	0,5648	5
2	0,5159	7
3	0,4044	8
4	0,5514	6
5	0,6157	3
6	0,3724	9
7	0,9561	1
8	0,6946	2
9	0,5680	4

#### 7.12.3.6. Proses parametrelerinin optimal kombinasyonu

Çapak hacmi en aza indirilen ve kırılma yükü ile nüfuz edilen hacim maksimuma çıkarılan optimum parametre kombinasyonu, bu araştırmanın temel odak noktasıdır. Böylece, Gri ilişkisel sınıfın değerlendirilmesi ve ana etki analizi kullanılarak optimal veya en uygun proses parametrelerinin kombinasyonu tespit edilmiştir. Şekil 7.71'de Gri ilişkisel sınıfın ana etki çizisi gösterilmiş ve tablo 7.70'de ilgili GIS'in parametre seviyeleri/düzeyleri sağlanmıştır. Örneğin Denklemler (7.51a), (7.51b) ve (7.51c)'de takım dönme hızının belirlenmiş parametre seviyeleri, gösterilmiştir. Bununla birlikte, şekil 7.71'deki ana etki grafiğine dayanılarak proses parametrelerinin optimal kombinasyonu 1600rpm, 2.9mm ve 6s (veya A<sub>3</sub>, B<sub>1</sub>, ve C<sub>3</sub>) olarak görülmüştür. Aynı şekilde, şekil 7.72'de seçilen kaynak parametreleri arasındaki etkileşimler görülmüştür.

$$\bar{A}_1 = \frac{(0,5648+0,5159+0,4044)}{3} = 0,4950 \quad (7.51a)$$

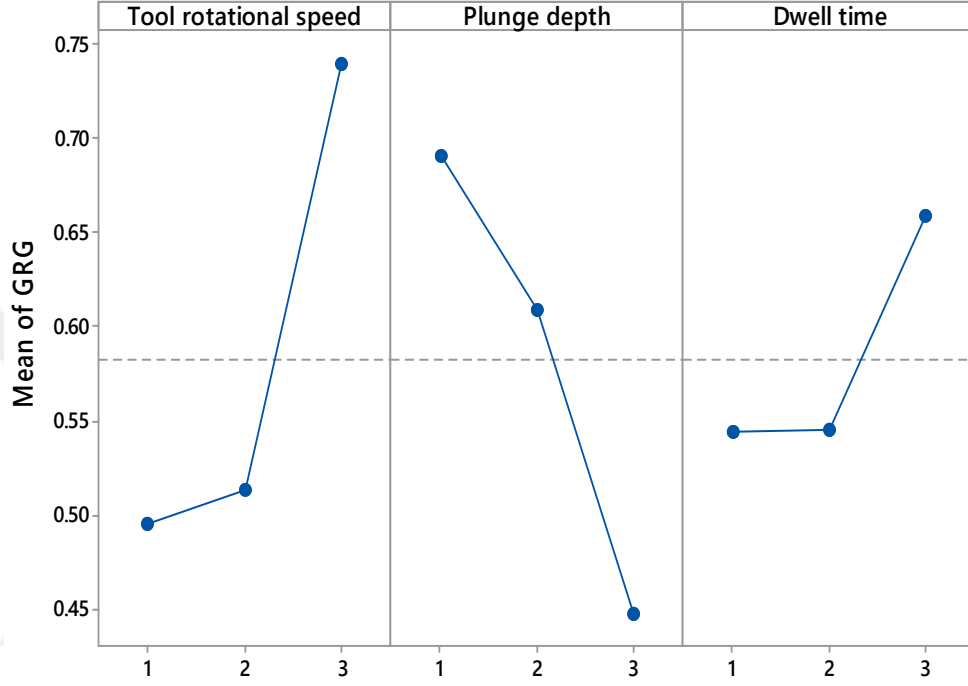
$$\bar{A}_1 = \frac{(0,5514+0,6157+0,3724)}{3} = 0,5132 \quad (7.51b)$$

$$\bar{A}_1 = \frac{(0,9561+0,6946+0,5680)}{3} = 0,7396 \quad (7.51c)$$

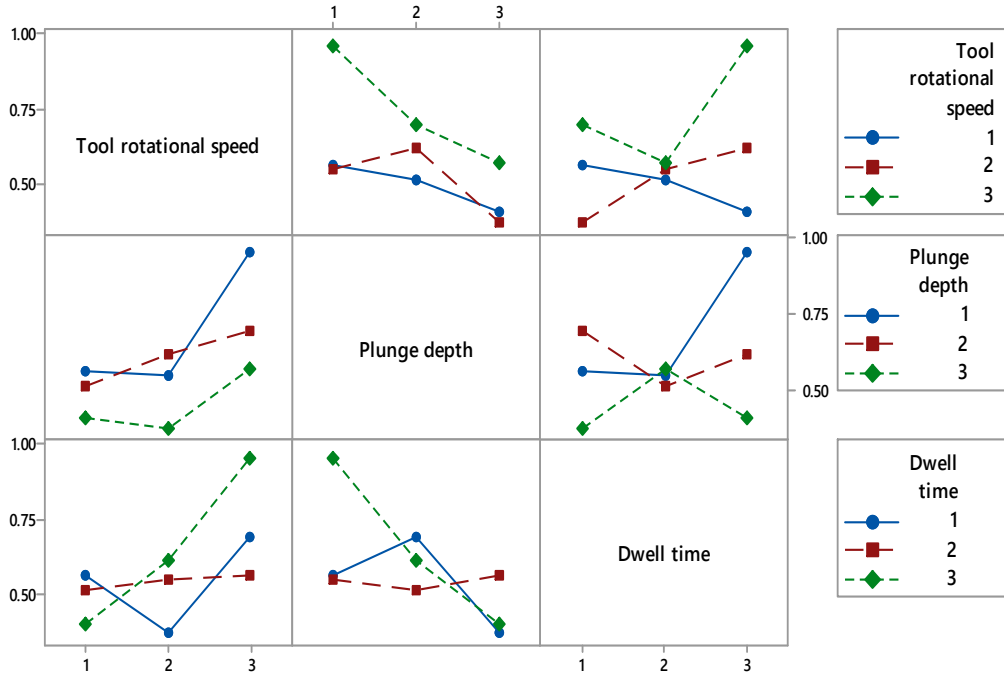


Tablo 7.70. Gri ilişkisel sınıfın ana etki tablosu

Semboller	Parametreler	Düzye1	Düzye 2	Düzye 3
A	Dönme hızı	0,4950	0,5132	0,7396
B	Dalma derinliği	0,6908	0,6088	0,4483
C	Kalma süresi	0,5439	0,5451	0,6587



Şekil 7.71. Gri ilişkisel sınıfın ana etki grafiği



Şekil 7.72. Gri ilişkisel sınıf üzerinde parametrelerin etkileşim etkileri

Optimal parametre kombinasyonunu tanımlamak için ve her parametre kombinasyonunun önem sırasını sağlamak için elde edilen çok tepkiler/yanıtların Gri ilişkisel sınıfları ile ideal dizisi (1) karşılaştırılmalıdır. En büyük (1'e en yakın) Gri ilişkisel sınıf, kalite yanıtlarının iyi/optimum kombinasyonunu sağlamaktadır. Bu kavramına dayanılarak deneysel deneme sayısı 7 (tablo 7.69'da) büyük Gri ilişkisel sınıfa sahip olmuş ve en iyi yanıtları üretmiştir. Çıkarılan çapak hacmi küçültülmüş olmak için ve kırılma yükü ile nüfuz edilen hacim maksimize etmek için tasarlanmış deneysel deneme sayısı 7'de en iyi parametre kombinasyon düzeyleriyle elde edilmiştir. Böylece, 1600dev/dak dönme hızı, 2,90mm dalma derinliği ve 6s kalma süresi altında en iyi parametre kombinasyonu ve yanıtlar elde edilmiştir.

#### 7.12.3.7. Varyans analizi

Çok tepkili FSSW'li proseste proses parametrelerinin etkisi veya katkısını belirlemek için varyans analizi kullanılmıştır. Tablo 7.71'de elde edilen Gri ilişkisel sınıf üzerindeki seçilen proses parametrelerinin varyans analizi gösterilmiştir. Varyans analizi tablosuna göre en önemli parametre, takım dönme hızı gibi görülmüştür.

Tablo 7.71. Gri ilişkisel sınıf üzerinde parametrelerin etkileşim etkileri

Parametreler	DOF	SS	MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı (A)	2	0,1114	0,0557	17,74	0,053	47,38%
Dalma derinliği (B)	2	0,0913	0,0456	14,55	0,064	38,85%
Kalma süresi (C)	2	0,0261	0,0130	4,16	0,194	11,10%
Hata	2	0,0063	0,0031			
Toplam	8	0,2350				

R-sq value is 97,33%; DOF- degree of freedom; SS- sum of square; MS- mean of square

#### 7.12.3.8. Doğrulama/onaylama testi

Çıkarılan çapak azaltılması için ve kırılma yükü ile nüfuz edilen hacim maximize edilmesi için A3B1C3 (1600dev/dak, 2,90mm ve 6s) parametre kombinasyonu bulundurulmuştur. Böylece, hibrid çok tepki optimizasyonu yaklaşımının etkinliğini ve sağlamlığını teyit etmek için gözlenen optimum parametre ayarlarına dayanılarak doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Tablo 7.72'de doğrulanmış deneylerin sonuçları gösterilmektedir

Tablo 7.72. Doğrulama testinin sonucu

	ilk kaynak	Optimal kaynak parametreleri		İyileştirme
		Kestirim	Deney	
Parametre düzeyi	A3B2C1	A3B1C3	A3B1C3	
Kırılma yükü (N)	1618,1	1960,3	1981,6	23%
Çapak hacmi (mm <sup>3</sup> )	19,47	16,21	15,30	21%
Nüfuz edilen hacim (mm <sup>3</sup> )	56,65	58,34	59,25	5%

#### 7.12.4. Kırılma yükü, çapak hacmi ve etkili bağlanmış uzunluğun hibrid çok tepki optimizasyonu

Benzer şekilde, konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yükü, çapak hacmi ve etkili bağlanmış uzunluğu optimizasyonunda hibrid çok tepkili optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Tablo 7.73'te seçilmiş kalite yabıtlarının amaç fonksiyonları gösterilmiştir.

Tablo 7.73. Tepkiler ve onların amaç fonksiyonları

Yanıtlar/tepkiler	Amaç fonksiyonları
Kırılma yükü	Maksimizasyon
Çapak hacmi	Minimizasyon
Etkili bağlanmış uzunluk	Maksimizasyon

##### 7.12.4.1.S/G analizi

Benzer şekilde, Tablo 7.74'de elde edilen kalite tepkileri ve onların kalite kayıp değerleri sağlanmıştır. Denklem 4.7'de (bölüm 4.1.2'e bakınız) ifade edilen daha büyük-daha iyi S/G oranı kullanılarak kırılma yükünün ve etkili bağlanmış uzunluğun kalite kaybı değerlerinin hesaplanmıştır. Ancak, Denklem (4.6)'de (bölüm 4.1.2'e bakınız) gösterilen daha küçük-daha iyi S/G oranı kullanılarak çıkarılan çapak hacminin kalite kaybı değerleri belirlenmiştir.

Tablo 7.74. Tepkiler ve onların S/G oranı

Kaynak kodu	Yanıtların ortalaması			S/G oranları		
	Kırılma yükü (N)	Çapak hacmi (mm <sup>3</sup> )	Bağlanmış uzunluk (mm)	Kırılma yükü (dB)	Çapak hacmi (dB)	Bağlanmış uzunluk (dB)
1	2128,6	22,76	0,63	66,5619	-27,1434	-4,013
2	1928,1	23,73	0,57	65,7026	-27,5060	-4,883
3	2106,4	32,54	0,62	66,4708	-30,2484	-4,152
4	1945,4	21,83	0,62	65,7802	-26,7811	-4,152
5	1787,9	20,94	0,57	65,0469	-26,4195	-4,883
6	1720,7	30,51	0,52	64,7141	-29,6888	-5,680
7	1960,3	16,21	0,60	65,8465	-24,1957	-4,437
8	1618,1	19,47	0,45	64,1801	-25,7873	-6,936
9	1796,1	23,57	0,58	65,0866	-27,4472	-4,731

#### 7.12.4.2. Normalleştirme

Denklem (4.10)'a göre kırılma yükü ve etkili bağlanmış uzunluk için kalite kaybı değerlerinin Normalleştirmeleri hesaplanmıştır. Ayrıca, Denklem (4.11)'e (Bölüm 4.3.1 bakınız) göre çapak hacminin kalite kaybı değerlerinin normalleştirilmesi yapılmıştır. Tablo 7.75'te gösterildiği gibi normalleştirme işlemi, ilgili S/G oranlarının değerlerini 0 ve 1 arasında azaltmıştır.

Tablo 7.75. Verinin Normalleştirilmesi

İdeal dizisi	Normalleştirilmiş veri		
	Kırılma yükü	Çapak hacmi	Bağlanmış uzunluk
	1	1	1
1	1,0000	0,4869	1,0000
2	0,6394	0,5469	0,7024
3	0,9618	1,0000	0,9524
4	0,6717	0,4271	0,9524
5	0,3640	0,3675	0,7024
6	0,2242	0,9076	0,4297
7	0,6998	0,0000	0,8549
8	0,0000	0,2629	0,0000
9	0,3808	0,5372	0,7544

### 7.12.4.3. Gri ilişkisel katsayılarının hesaplanması

Denklem (4.14)' de (bölüm 4.3.1 'de verilen denklem) gösterildiği gibi sapma dizileri  $\Delta_{oi}(k)$  hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar tablo 7.76'da verilmiştir. Böylece, yanıtların Gri ilişkisel katsayılarının hesaplanması için sapma dizilerinin maksimum ve minimum değerleri kullanılmıştır. Tablo 7.77'de elde edilen Gri ilişkisel katsayıları verilmiştir. Ancak, tüm Gri ilişkisel katsayıları  $\xi_i(k)$  belirlemek için bölüm 4.3.1'de gösterildiği gibi Denklem (4.13)'nün kimlik katsayısının değeri 0.5 olarak ayarlanmıştır.

Tablo 7.76. Hesaplanmış sapma dizileri

Sapma denemesi	Kırılma yükü ( $\Delta_{01}(k)$ )	Çapak hacmi ( $\Delta_{02}(k)$ )	Bağlanmış uzunluk ( $\Delta_{03}(k)$ )
İdeal dizisi	1	1	1
1	0,0000	0,5131	0,0000
2	0,3606	0,4531	0,2976
3	0,0382	0,0000	0,0476
4	0,3283	0,5729	0,0476
5	0,6360	0,6325	0,2976
6	0,7758	0,0924	0,5703
7	0,3002	1,0000	0,1451
8	1,0000	0,7371	1,0000
9	0,6192	0,4628	0,2456

Tablo 7.77. Yanıtların Gri ilişkisel katsayısı

Sapma denemesi	Kırılma yükü ( $\xi_1(k)$ )	Çapak hacmi ( $\xi_2(k)$ )	Bağlanmış uzunluk ( $\xi_3(k)$ )
İdeal dizisi	1	1	1
1	1,0000	0,4936	1,0000
2	0,5810	0,5246	0,6268
3	0,9290	1,0000	0,9132
4	0,6036	0,4660	0,9132
5	0,4401	0,4415	0,6268
6	0,3919	0,8441	0,4672
7	0,6249	0,3333	0,7751
8	0,3333	0,4042	0,3333
9	0,4467	0,5193	0,6706

#### 7.12.4.4. TBA yoluyla yüzde katkısının ya da ağırlık değerlerinin hesaplanması

Çok tepkili optimizasyon işleminde kalite yanıtlarının optimum ağırlıklandırma değerlerinin (katkı değerleri) belirlenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Böylece, öncelikle gerekli ağırlıklandırma değerlerini sağlamak için temel bileşenler analizi (TBA) kullanılmıştır. Optimizasyon yapılmasında bu yaklaşım kullanılarak sonuçların özneliği veya mühendislik kararı veya varsayım kullanımı giderilmektedir. Bu nedenle, temel bileşenler analizi gerçekleştirerek XLSTAT 2014 da kullanılmıştır. Sonuç olarak TBA analizi için tablo 6'da gösterilen Gri ilişkisel katsayılar, gerekli veri matrisi olarak kullanılmıştır. Bu veri matrisinden korelasyon matrisi değerlendirilmiştir. Özdeğeri ve özvektörü hesaplamak için Denklem (4.19) kullanılmıştır. Böylece, değerlendirilen özdeğerler tablo 7.78'de verilmiş ve tablo 7.79'da özvektörler verilmiştir

Tablo 7.78. Temel bileşenlerin özdeğeri ve değişkenliği

Temel bileşenler	Özdeğer	Değişkenlik (%)
Kırılma yükü	1,9578	65,2584
Çapak hacmi	0,9364	31,2134
Bağlanmış uzunluk	0,1058	3,5282

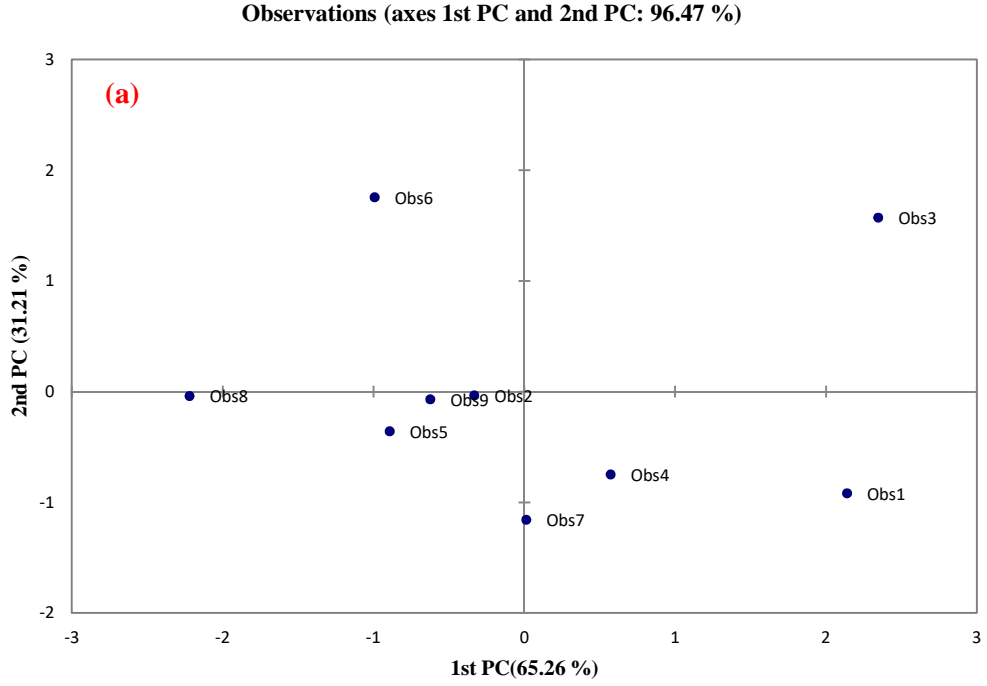
Tablo 7.79. Temel bileşenler için özvektörler

Yanıtlar	Birinci temel bileşen	İkinci temel bileşen	Üçüncü temel bileşen
Kırılma yükü	0,6922	-0,0908	0,7160
Çapak hacmi	0,2873	0,9447	-0,1579
Bağlanmış uzunluk	0,6621	-0,3150	-0,6800

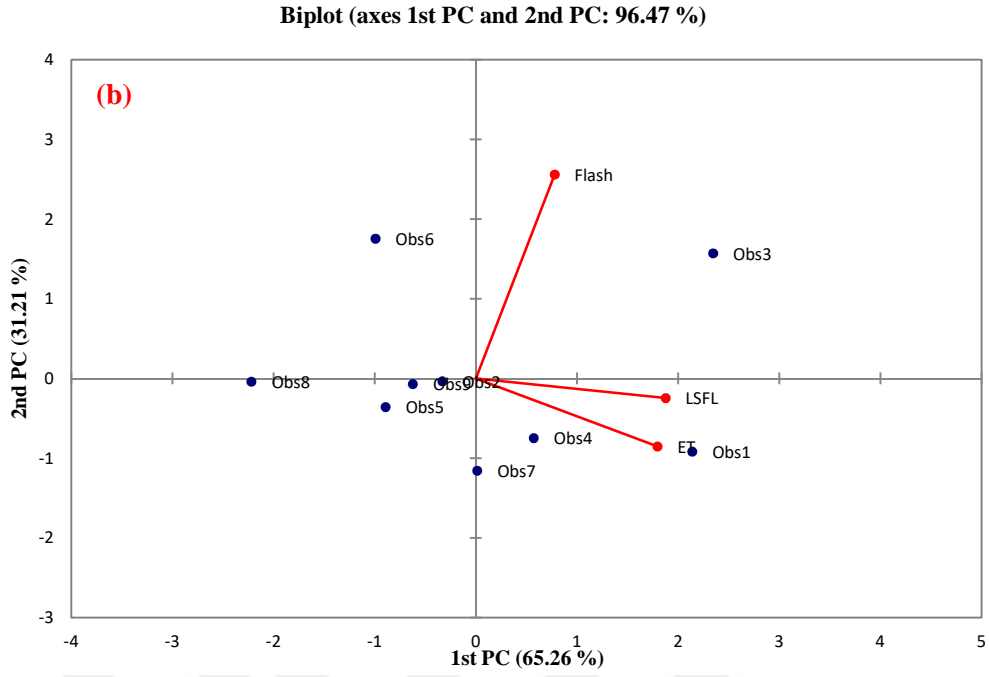
Şekil 7.73'te yanıtların birinci temel bileşeninin varyans katkısı %65,26 gösterilmiştir. Bu varyans katkısı çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Böylece, tablo 7.80'de yanıtların değerlendirilen katkıları gösterilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, kırılma yükünün, çapak hacminin ve bağlanmış uzunluğun ağırlıklandırma değerleri sırasıyla 0,4791, 0,0826 ve 0,4383 bulunmuştur.

Tablo 7.80. Temel bileşene yanıtların katkısı

Yanıtlar	Katkı ( $w_k$ )
Kırılma yükü	0,4791
Çapak hacmi	0,0826
Bağlanmış uzunluk	0,4383



Şekil 7.73. Temel bileşenlerin grafikleri: (a) temel bileşenin gözlem çizisi; (b) temel bileşenin ikili çizisi (1st PC- birinci temel bileşen ve 2nd PC- ikinci temel bileşen)



Şekil 7.73. (Devam)Temel bileşenlerin grafikleri: (a) temel bileşenin gözlem çizizi; (b) temel bileşenin ikili çizizi (1st PC- birinci temel bileşen ve 2nd PC- ikinci temel bileşen)

#### 7.12.4.5. Gri ilişkisel sınıfın hesaplaması

(Bölüm 4.3.1’de gösterildiği gibi) Denklem (4.16)’e göre elde edilen yanıtların ağırlıklandırma değerleri ile tablo 7.77’deki Gri ilişkisel katsayıları kullanılarak Gri ilişkisel sınıflar belirlenmiştir. Böylece, Çok tepki optimizasyonu için tablo 7.81’da hesaplanan Gri ilişkisel sınıflar verilmiştir.

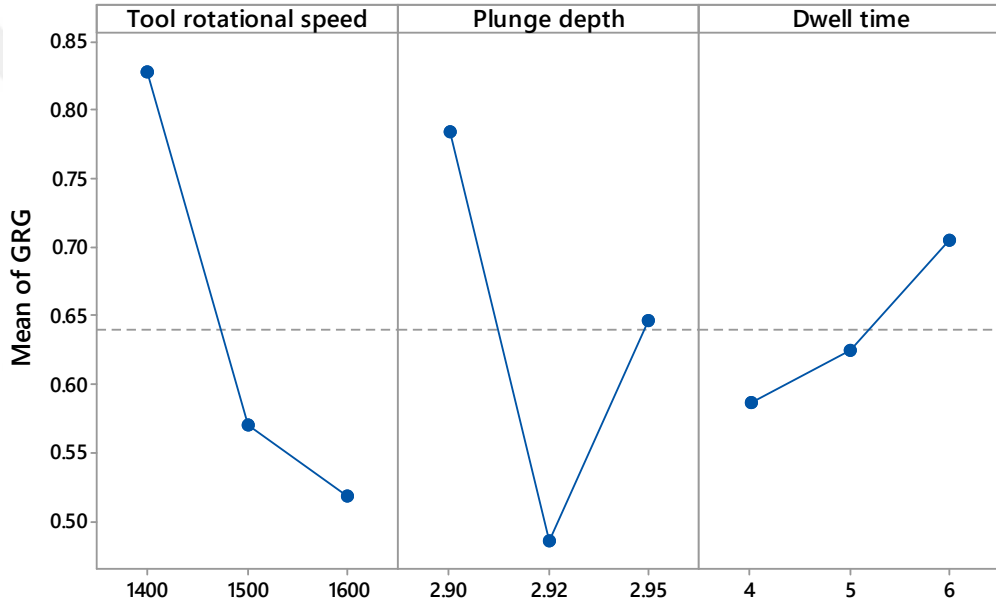
Tablo 7.81. Gri ilişkisel sınıf ve onun sırası

İdeal dizisi	Gri ilişkisel sınıf	
	1	Sıra
1	0,95817	1
2	0,59643	5
3	0,92793	2
4	0,72794	3
5	0,52208	7
6	0,46224	8
7	0,66665	4
8	0,33918	9
9	0,55084	6



#### 7.12.4.6. Proses parametrelerinin optimal kombinasyonu

Sonuçların Gri ilişkisel sınıf (GIS) dikkate alınarak ve ana etkisi analizi kullanılarak proses parametrelerinin optimal kombinasyonu belirlenmiştir. Şekil 7.74'te Gri ilişkisel sınıfların temel etki grafiği gösterilmiş ve tablo 7.82'de parametre seviyeleri için ilgili GIS gösterilmiştir. Tanımlanmış parametre seviyesinin her birine göre yeniden düzenlenmiş Gri ilişkisel sınıfın ortalaması bulunarak parametre düzeylerinin değerleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte, GIS'nin temel etkisi şekline (Şekil 7.74) göre, proses parametrelerinin optimal kombinasyonu 1400dev/dak, 2,90mm ve 6s (ya da A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, ve C<sub>3</sub>) olarak görülmektedir



Şekil 7.74. Gri ilişkisel sınıfın ana etki grafiği

En iyi parametre kombinasyonu tanımlamak için ideal dizisi (1) ile çoklu yanıtların Gri ilişkisel sınıfları karşılaştırılmalıdır. En büyük Gri ilişkisel sınıf (1'e yakın olan GIS), kalite tepkilerinin en iyi kombinasyonunu sağlamıştır. Böylece kavramına dayanarak, deneysel deneme sayısı 1, en büyük Gri ilişkisel sınıfa (0,95817) sahip olmuş ve en iyi yanıtların kombinasyonunu sağlamıştır.

Tablo 7.82. Gri ilişkisel sınıfın ana etki tablosu

Parametreler	Düzye 1	Düzye 2	Düzye 3
Takım dönme hızı	0,827507	0,570753	0,518889
Dalma derinliği	0,78425	0,485898	0,647
Kalma süresi	0,58653	0,625067	0,705552

#### 7.12.4.7. Varyans analizi

Tablo 7.83 ortaya çıkan Gri ilişkisel sınıflarda seçilen kaynak parametrelerinin varyans analizini göstermektedir. Varyans analizi tablosuna dayanılarak en önemli parametre, takım dönme hızı görünmüş ve tablo 7.83'te diğer parametre katkıları sağlanmıştır.

Tablo 7.83. Gri ilişkisel sınıf için varyans analizi tablosu

Parametreler	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-değer	P-değer	Katkı
Dönme hızı (A)	2	0,16386	0,16386	0,081930	8,80	0,102	48,42%
Dalma derinliği (B)	2	0,13381	0,13381	0,066905	7,19	0,122	39,54%
Kalma süresi (C)	2	0,02213	0,02213	0,011065	1,19	0,457	6,54%
Hata	2	0,01862	0,01862	0,009308			
Toplam	8	0,33842					

S- 0,0964793; R-sq -94,50%; R-sq(adj)- 78,00%

#### 7.12.4.8. Doğrulama/onaylama testi

A1B1C3 (1400dev/dak, 2,90mm and 6s) parametre kombinasyonunda yeni deneyler yapılarak kaynak parametrelerinin optimum ayarı doğruluğu veya hassasiyeti doğrulanmıştır. Böylece, doğrulama sonuçları Tablo 7.84'de verilmiştir.

Tablo 7.84. Doğrulama testinin sonucu

Parametre düzeyleri	ilk kaynak	Optimal kaynak parametreleri		Iyileştirme
		Kestirim	Deney	
Parametre düzeyleri	A2B3C1	A1B1C3	A1B1C3	
Kırılma yükü (N)	1816	2241	2313	27%
Çapak hacmi (mm <sup>3</sup> )	31.23	22.82	22.48	28%
Bağlanmış uzunluk (mm)	0,54	0,67	0,66	22%

## 8. TARTIŞMA

### 8.1. Görsel Görünüm

Omuz-pim deliği ve çapağın özellikleri açısından pimsiz ve konik pimli sürtünme karıştırma nokta kaynağı'lı bağlantıların görsel görünümü tartışılmıştır. Bütün FSSW'li bağlantıların karıştırılmış bölgelerinde görünür yansıtıcı halkaları oluşturulmuştur. Aynı şekilde, kaynak yapıldıktan sonra sürtünme karıştırma nokta kaynaklı birleştirmelerin karıştırılmış bölgelerinin (SZ) rengi ve esas metalin rengi aynı olmuştur ya da değişmemiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında oluşturulan termo-mekanik enerjisi kaynakların karıştırılan bölgeleri görünümünü değiştirmez anlamına gelmektedir. Bu termal enerji veya ısı, alüminyum alaşımlarının rengini değiştirmek olmadığını haklı çıkarmaktadır. Karıştırılmış bölgelerin yüzeylerinde karıştırma bölgesinin süzmesi nedeniyle yansıtıcı halkaları yaratmıştır.

#### 8.1.1. Kaynak yüzeyindeki delik şekli

Konik pim takımı ile üretilen tüm bağlantılarda önemli bir kaynak bozukluğu gözlenmiştir. Kaynak yapıldıktan sonra iş parçası malzemesinin yüzeyinde pim deliği bırakılmıştır. Pim delikleri, konik pim şekline veya geometrisine sahip olmuştur. Yanı sıra, üst plakanın yüzeyine omuz penetrasyon derinliğinden başka takım pimi alt plakaya girilmiş ve tüm konik pimli kaynaklarda oluşturulan pim deliğinin yüksekliği yaklaşık 2.47mm olmuştur. Böylece, konik pim nedeniyle oluşturulan pim deliği, bağlantıların estetik görünümünü azaltmıştır. Bu nedenle, yükleme altında konik pim delikleri çatlak başlaması kaynakları olacaktır.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında pimsiz bağlantıda sığ boşluğu oluşturulmuş ve bu boşluğun derinliği, takım omuzunun penetrasyon derinliğine eşdeğerde olmuştur. Ayrıca, tüm pimsiz kaynak işlemlerinde ve pimsiz kaynağı oluşturmak için alt plaka içerisine takımın omuzu erişmemiştir. Bu araştırmada

kullanılan maksimum omuz penetrasyon derinliği 0.8mm olmuş ve konik pimli kaynağına göre bu pimsiz derinlik değeri önemli ölçüde daha küçük olmuştur. Bunun bir sonucu olarak, pimsiz takım yardımıyla elde edilen kaynaklarda estetik bir bakış oluşturulmuştur. Bununla birlikte, tüm pimsiz bağlantılarda hiçbir grnt bozukluğu olmamıştır. Bu nedenle, görünüm açısından pimsiz kaynaklar konik pimli kaynakların ele gelen pim deliği ortadan kaldırılmasına yardımcı olmuştur.

### **8.1.2. Çıkarılmış apak**

Konik pim ve pimsiz takımlar yardımıyla elde edilen sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarda apak görülmüştür. Bununla beraber, oluşan apak miktarı takım geometrileri ile değiştiği belirtilmiştir. AA2219-O alaşımlı plakaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında iş parçası malzemesinin viskoplastik davranışı veya plastikleştirilmesinden dolayı kaynak yzeyide apak oluşturulmuştur.

Dönmekte olan takımın 0° eğim açısı kullanılarak karıştırma bölgesi dışına plastikleştirilmiş malzemenin akışı, takım dönme eksenini etrafında eksenel simetrik olmuştur. Böylece, girintili omuz boşluğu etrafında dışarı ittilen çapağın uzunluğu ve kalınlığı düzenli olduğu grlmştir. Ayrıca, dönen takım ve kaynakların plastikleştirilmemiş (tahribat olmamış) ışıdan etkilenen bölgesi (IEB) arasındaki sıkı aralık, plastikleştirilmiş malzemenin çıkarma yolu olmuştur. apak oluşması için onun ilerleme yolu, termo-mekanik etkilenmiş bölge (TMEB) olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çapağın çıkarılan alanı, takımın omuz milinin dönen yüzeyi tarafından ışıtılan ve mekanik olarak etkilenen alan olmuştur. Plastikleştirilmiş malzemenin ie akışı göz önünde bulundurulmamadan malzemenin dışa akışı, sıkılmış kütle olarak gözlemlenmiştir.

Böylece AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı yapılırken oluşturulan çapağın makro ölçekli değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. FSSW kaynağı sırasında kullanılan takım geometrisinin türü, oluşturulan vresel çapağın morfolojisini etkilenmiştir. İki takım geometrisi kullanıldığından farklı vresel çapağın morfolojisini gözlemlenmiştir. Halka apak (RF) ve kırık apak (SF) türleri elde edilmiştir. Halka apak, kaynağın bosluğu/deliğinin çemberi etrafındaki geometrik olarak düzgün oluşturulan apaktır. Ancak kırık apak, ileri dışarı ittilen plastikleştirilmiş apaktır ve dengesiz/düzgün olmayan bir vresel Şekillere sahip

olmaktadır. Ayrıca kırık çapağın kenarında kırılma/tırtık olmaktadır. Konik pim destekli kaynaklarda çapak kırılması, dışarı akan sıcak çapağın aşırı çevresel kenarından başlanmış ve oluşan çapağın içine doğru ilerlenmiştir ( ya da birincil ve halka çapağına doğru). Yine de, kaynak takımının eğim açısı sıfır olduğundan dolayı pimsiz ve pimli destekli kaynaklarda düzgün halka çapağın dışarı itilmesi elde edilmiştir.

Halka çapağın (RF) ve kırık çapağın (SF) kalınlıkları ve dışarı itilen uzunlukları, çapak özellikleri olarak tanımlanmıştır. Bu özellikler ölçülmüştür. Ölçülen sonuçlara göre konik pimli kaynakların çapak özellikleri (kalınlığı ve uzunluğu) pimsiz kaynakların daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılarda genel çıkarılan çapak hacimlerini elde etmek için matematiksel sözcükler üretilip ve kullanılmıştır. Böylece hesaplanan çapak hacimlerine göre pimsiz kaynaklı bağlantılarda daha küçük halka çapak hacmi üretilmiştir. Ancak konik pim kaynağında çapak hacmi önemli miktarda oluşturulmuştur. Aynı şekilde bütün pimsiz destekli kaynaklarda sadece halka çapak türü gözlemlenmiş ve konik pim kaynaklarında halka çapak ve kırık çapak birleşimi gözlemlenmiştir. Ayrıca pimsiz bağlantıların genel çapak hacmine göre konik pim destekli kaynakların genel çapak hacmi daha yüksek olmuştur. Böylece, özet tablo 8.1’de pimsiz ve konik pim kaynaklarının görsel görünümü gösterilmiştir.

Tablo 8.1. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılar arasında görsel görünümün özetlenen karşılaştırmaları

Bağlantı türü	Bağlantının özellikleri				
	Renk	Işık altında yansıtıcılık	Karıştırılmış bölgenin Görünümü	Boşluk	Çapak
Pimsiz kaynaklar	Hiçbir renk değişimi	Yansıtıcı karıştırma bölgesi	Karıştırılmış bölgede süzme halkalar görünümü mevcut olmuştur	Sığ boşluk ya da girinti	Halka çapak (RF)
Konik pimli kaynaklar	Hiçbir renk değişimi	Yansıtıcı karıştırma bölgesi	Karıştırılmış bölgede süzme halkalar görünümü mevcut olmuştur	Konik şekilli pim deliği	Halka çapak (RF) ve kırık çapak (SF)

### 8.1.2.1. Çapak oluşumunda takım geometrinin etkisi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında iki önemli akış deseni gerçekleştirilmektedir. Onlar, plastikleştirilmiş malzemenin yukarı akışı ve içe nüfuzudur. Plastikleştirilmiş malzemenin yukarı veya dışa akışı, çapak oluşumunu üretmektedir. Daha fazla malzemenin dışa veya yukarıya doğru akışı oluşturulan takım profili, çok çapak oluşumunu kurmaktadır. Bu durumda, konik pim takımı fazla çapak hacmini oluşturmuş ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında konik pimli takım, plastikleştirilmiş malzemenin daha yukarı ya da dışarı akışına neden olmuştur.

Konik pimli kaynaklarda daha fazla çapak elde edilir nedenlerini belirlemek amacıyla takım profilinin özelliklerini bir değerlendirme incelenmiştir. Takım omuzu ve pimi, sürtünme karıştırma kaynağı takımlarının özellikleridir. Bu takım özelliklerinin rolleri çapak oluşumu üzerindeki etkilerini belirlemek için incelenmiştir. Temelde, sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında takım omuzu, iki önemli etki gerçekleştirilmektedir. Bunlar (omuz etkileri) sıkıştırma ve kesme etkileridir. Ancak FSSW sırasında takım pimi sadece kesme etkisini gerçekleştirir. Böylece, konik pim destekli kaynaklarda pimin ek kesme etkisinden dolayı daha fazla çapak hacmi üretilmiştir. Pimsiz kaynakta takımın omuz yüzeyi etrafında sadece tek kesme etkisi gerçekleştirilmiş ve daha küçük çapak hacmi elde edilmiştir.

Benzer şekilde, Denklem (8.1) ve (8.2)'de gösterildiği gibi yarıçapının (R) değerleri arttırılınca merkezkaç kuvveti (F) ve hız ( $V_R$ ) değerleri arttırılmaktadır. Bu arada M ve  $\omega$  kütle ve açısal hızdır. Bu nedenle, R = 5mm altında santrifüj kuvveti etkisine göre R = 0 altındaki santrifüj kuvveti etkisi ihmal edilebilir. Bu anlayışa dayanarak farklı omuz yüzeyleri altında çapak oluşumunu açıklamak için omuz yüzeyinin altında plastikleştirilmiş malzeme üzerinde santrifüj sürüklenme etkisi tartışılmıştır.

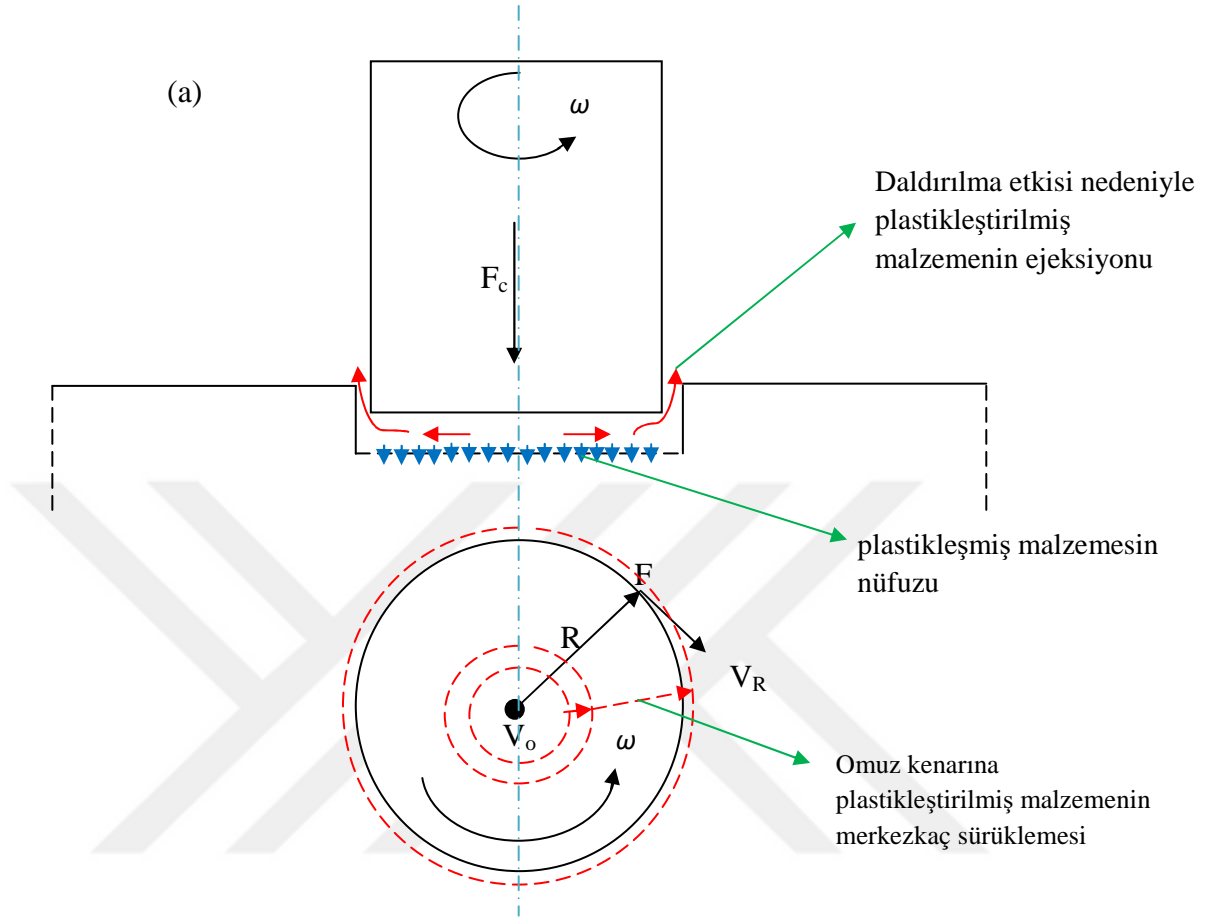
$$F = M\omega^2R \quad (8.1)$$

$$V_R = \omega R \quad (8.2)$$

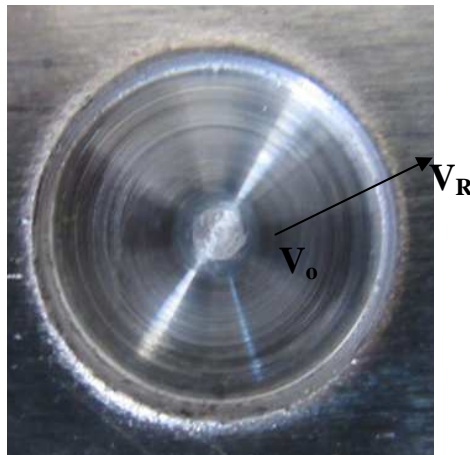
Şekil 8.1'de pimsiz FSSW sürecinde plastikleştirilmiş malzeme üzerinde merkezkaç etkisi temsili gösterilmektedir. Omuz daldırılmasından sonra omuz yüzeyinin

merkezinde merkezkaç kuvveti veya hız ihmal edilebilir ve bu kuvvet/hız, omuz kenarına doğru artmaktadır. Bu nedenle, karıştırma bölgesinin merkezinde sıkıştırma kuvveti etkisi santrifüj etkisi ile karşılaştırıldığında çok önemlidir. Bunun bir sonucu olarak, şekil 8.1b'de pimsiz kaynağın karıştırılmış bölgenin resimsel diyagramı gösterilmektedir. Bu şekil 8.1b'de kaynağın karıştırılmış bölgesi merkezinde (kaba karıştırılmış bölgenin merkezinde,  $R = 0$ ) merkezkaç sürükme etkisi ihmal olduğunu doğrulanmıştır. Böylece karıştırma bölgesinin merkezinde ( $R = 0$ ) yoğun karıştırma olarak elde edilemezmiş ama sıkıştırma etkisi olmuştur.

Aynı şekilde, dinamik tekrar kristalleşme ve deformasyon nedeniyle bazı plastikleştirilmiş malzeme iş parçasının toplu malzemenin içine nüfuz edilmiştir. Omuz bölgesinde plastikleştirilmiş malzemenin küçük bir kısmı omuz kenarına doğru santrifüj sürüklemeye ilerlenmiş ve daha sonra plastikleştirilmiş malzemenin ardışık santrifüj sürüklemesi tarafından kaynak bölgesi dışında çapak çıkarılmıştır. Böylece, pimsiz kaynaklarda takımın daldırılma etkisi (omuz daldırılma etkisi) veya sıkıştırma etkisi ile birleştiğinde santrifüj etkisi nedeniyle çapak oluşumu gerçekleştirilmiştir.



(b)

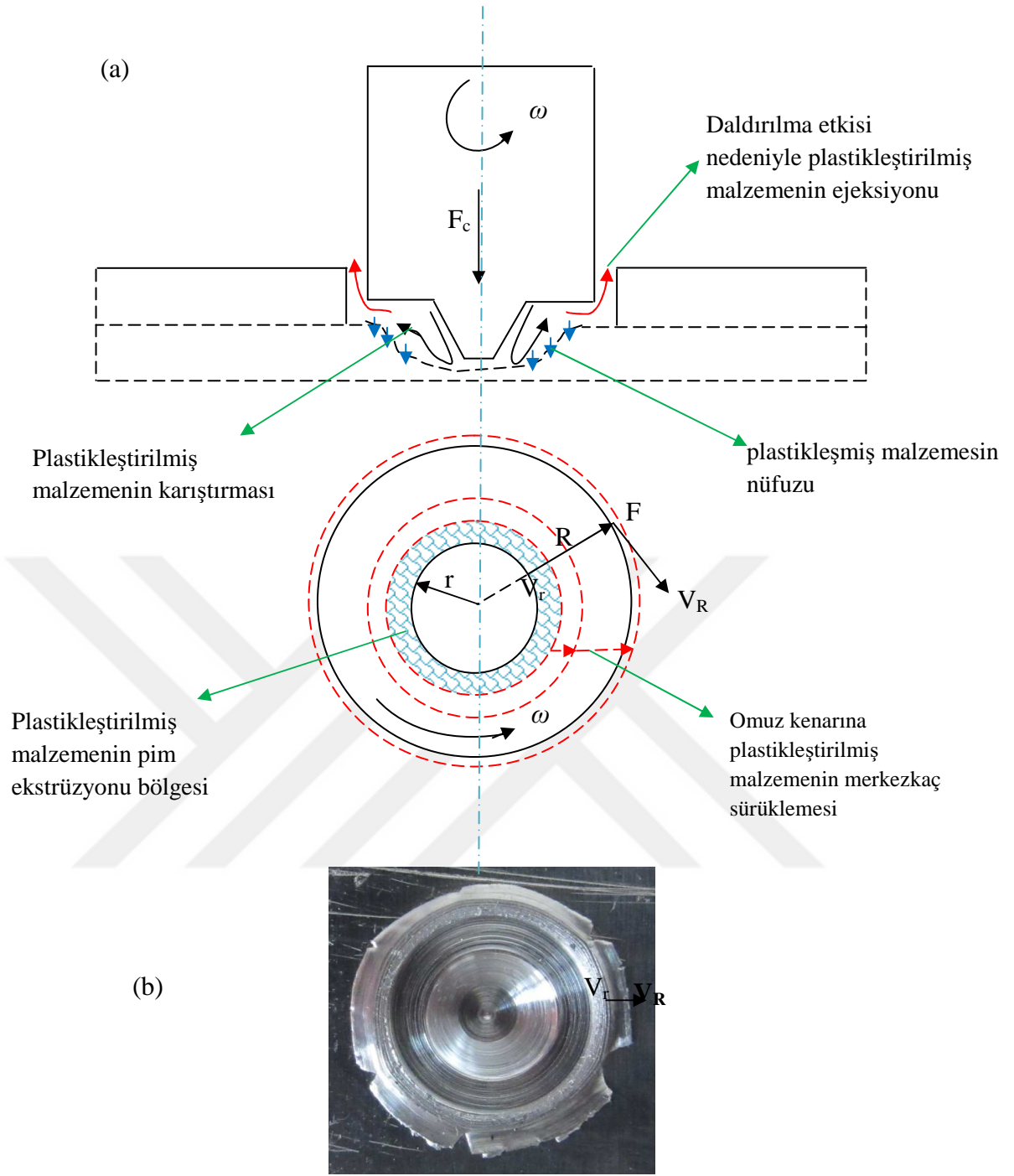


$F$  merkezkaç kuvvetidir;  $V_R$  omuz kenarında santrifüj hızıdır;  $V_o$  omuz merkezinde santrifüj hızıdır;  $\omega$  açısal hız veya takım dönme hızıdır;  $R$  takım omuzun yarıçapıdır;  $F_c$  takımdaki basınç kuvveti veya sıkıştırılma kuvvetidir

Şekil 8.1. Pimsiz kaynaklarında çapak oluşumuna santrifüj sürüklenme etkisi: (a) şematik diyagram; (b) kaynak görüntüsü



Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında şekil 8.2 konik pim destekli kaynak üzerindeki merkezkaç etkisinin temsili gösterilmektedir. Omuz yüzeyi veya takım omuzu ve iş parçasının malzemesi arasındaki ara yüzeyde merkezkaç etkisi oluşmaktadır. Pimden ekstrüde edilen malzeme (pim daldırılma etkisi) ile takım omuzundan oluşturan plastikleştirilmiş malzeme, basınç/sıkıştırma ve santrifüj etkilerine maruz kalmaktadır. Basınç/sıkıştırma etkisinden dolayı omuzdaki ekstrüde edilen malzeme, karıştırma bölgesine geri yönlendirilmekte ve merkezkaç sürüklenme etkisinden dolayı bazı plastikleştirilmiş malzemenin bir kısmı, omuz kenarına doğru itilmektedir. Sonunda omuz yüzeyi kenarındaki plastikleştirilmiş malzeme dışarı atılmakta. Benzer şekilde, şekil 8.2b'de gösterildiği gibi konik pim destekli kaynaklarda takım omuzu yüzeyinde ihmal edilebilir merkezkaç etkisi ( $R = 1,5\text{mm}$ 'den  $5\text{mm}$ 'a kadar) hiçbir omuz bölgesinde olmadığını göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak, omuz yüzeyi altındaki plastikleştirilmiş malzeme, omuz kenarına doğru merkezkaç sürüklenme etkisi bir seviyede maruz kalmaktadır. Sonuç olarak, pim daldırılma etkisi, omuz daldırılma etkisi ve omuz yüzeyindeki plastikleştirilmiş malzemenin merkezkaç sürüklenme etkisi nedeniyle konik pim destekli kaynaklarda çapak oluşumu elde edilmiştir.

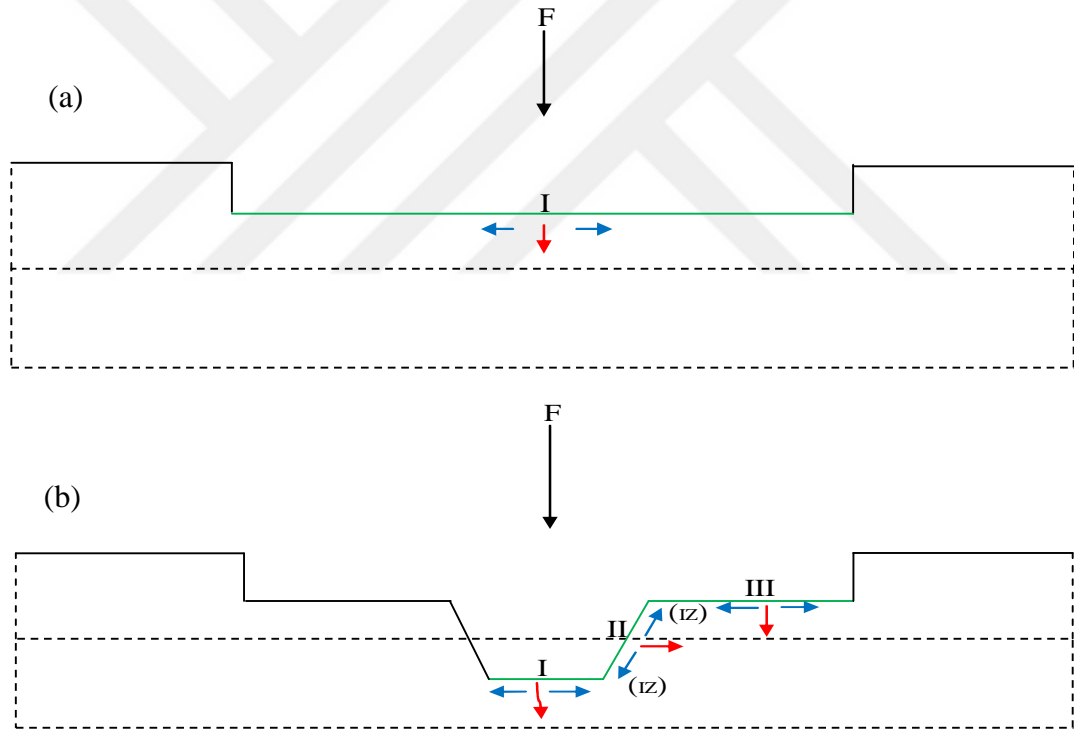


F merkezkaç kuvvetidir;  $V_R$  omuz kenarında santrifüj hızıdır;  $V_t$  omuz tabanında santrifüj hızıdır;  $\omega$  açısal hız veya takım dönme hızıdır; R takım omuzun yarıçapıdır; r Takım omuzunun tabanının yarıçapıdır;  $F_c$  takımdaki basınç kuvveti veya sıkıştırılma kuvvetidir

Şekil 8.2. Konik pimli kaynaklarında çapak oluşumuna santrifüj sürüklenme etkisi: (a) şematik diyagram; (b) kaynak görüntüsü

Benzer şekilde, şekil 8.3'de gösterildiği gibi, takım-malzeme teması bölgesinin açısından kaynaklar üzerinde çapak oluşumu tarif edilmiştir. Şekil 8.3'a'de pimsiz kaynaklarda tek bir takım-malzeme teması (omuz-malzeme) bölgesinin (I) oluşturulduğu gösterilmektedir. Böylece, pimsiz kaynak olası malzeme taşınması ya da akışı, iş parçasının yığın malzemeye nüfuzunu ve omuz kenarına doğru malzeme

akışını içermektedir. Ancak, konik pim destekli kaynaklarda (şekil 8.3b' e bakınız), üç (3) olası temas bölgesi gerçekleştirilmektedir. Bunlar, omuz-malzeme (I), pim uzunluğu-malzeme, pim ucu-malzeme bölgeleri olduğu tespit edilmiştir. Konik pim kaynaklarında birden fazla takım-malzeme teması bölgelerinden dolayı bölge arası malzeme taşınması/akışı (IZ) kolaylaştırılıp ve gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, konik pimli destekli kaynaklarda takım-malzeme teması bölgeleri olası nedeniyle omuz yüzeyine daha fazla malzeme akışının olduğundan plastikleştirilmiş malzeme, çapak olarak çıkarılmıştır. Bu nedenle, pimsiz kaynaklarda bölgeler arası malzeme taşınması bulunmayan ek bir nitelik olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, bu özelliğe göre konik pim kaynaklarında çapak hacmi büyük olduğu gözlemlenmiş ve pimsiz kaynaklarda az bir şekilde çapak hacmi elde edilmiştir.



Şekil 8.3. Baskın takım-malzeme temas bölgeleri veya akış bölgeleri (a) pimsiz kaynak (I- Omuz-malzeme teması); (b) Konik pimli kaynak (I- pin ucu-malzeme teması veya burulma bölgesi; II- pim uzunluğu-malzeme teması veya karıştırılmış bölgesi; III- Omuz-malzeme teması veya akış bölgesi). IZ bölgeler arası malzeme taşınmasıdır

## 8.2. Çapak Özelliklerinde Kaynak Parametrelerinin Rolü

Pimsiz ve konik pim destekli kaynaklarda parametre kombinasyonunun seçimi, çıkarılan çapak özelliklerini ya da genel çapak hacmini etkilemiştir. Her iki kaynak kategorisinde kaynak parametrelerinin düzeyi değiştirilince ihraç/çıkarılan çapak hacimlerinin farklı olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, aynı kaynak parametre seviyelerinde ve konik pim kaynaklarına göre pimsiz kaynakların elde edilen çıkarılan genel çapak hacimleri küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Konik pim takımının yardımı ile yapılan kaynaklarda dönme hızı arttırılınca (1400dak/dev-1600dak/dev) çıkarılan çapak hacimleri azaltılmıştır. Ancak dalma derinliği arttırılınca genel çıkarılan çapak hacmi arttırılmıştır. İdeal olarak, sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlem sırasında takım dönme hızı veya oranı üretilen sürtünme ısı girişi miktarının başlıca sorumlu olduğu açıklanmıştır. Aynı şekilde dönme hızı tarafından takım profili etrafındaki taşınan ve serbest malzeme hacmini etkilenmiştir. Daha yüksek bir takım dönme hızında takım çevresindeki plastikleştirilmiş malzemenin indirgenmiş viskozitesi nedeniyle sürtünmeyle ısıtılan malzeme daha iyi akışkanlık özelliğine sahip olmaktadır. Bunun dolayısıyla takım çevresinde daha fazla plastikleştirilmiş malzemenin ya da çapağın yer değiştirilmesi beklenmektedir. Ancak, takım dönme hızını arttıktça ortaya çıkan çapak hacmi azaltılmıştır.

Ayrıca, konik pim destekli kaynaklarda daldırılma derinliği ile çıkarılan çapak hacmi arasında doğrusal bir ilişki mevcut olmuştur. İş parçası malzemesinin içine pim penetrasyonu/daldırılmasından dolayı plastikleştirilmiş malzemenin yukarı akışına neden olmuştur. Sonuç olarak, çıkarılan çapak hacmi de arttırılmıştır. Benzer şekilde pimsiz kaynaklarda çıkarılan çapak hacimleri üzerinde dalma derinliği doğrudan etkisi ortaya çıkmıştır. Aynı anda grafiksel analiz sonucuna göre çapak ve kalma/bekleme süresi arasında açık bir korelasyon belirlenememiştir.

Aynı şekilde, pimsiz kaynaklar üzerinde çıkarılan çapak hacmi değerlerinin yakınlığı olduğu nedeniyle çapak hacmine kaynak parametrelerinin rolü kolayca tespit edilememiştir. Böylece, pimsiz ve konik pim destekli kaynaklar için çıkarılan çapak hacimleri üzerindeki

işlem parametrelerinin gerçek katkıları varyans analizi ile belirlenmiştir. Her iki kaynak kategorisinde dalma derinliği ve takım dönme hızı, çapak hacminin etkileyen baskın parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Konik pim kaynaklarında dalma derinliği ve takım dönme hızının katkıları sırasıyla %62.54 ve %32.83 olmuştur. Ayrıca, pimsiz kaynaklarda dalma derinliği ve takım dönme hızının katkıları %64.18 ve %20.25 elde edilmiştir.

İki kaynak kategorisinde çıkarılan çapak hacmi üzerinde takımın kalma/bekleme süresinin önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Diğer çapak özellikleri (kalınlıkları ve uzunlukları) üzerinde kaynak parametrelerinin rolleri varyans analizi ile incelenmiştir. Ayrıca, tablo 8.2 ve 8.3 sırasıyla pimsiz kaynakların çapak özellikleri ve konik pim destekli kaynakların çapak özellikleri üzerinde özetlenmiş kaynak parametresinin rolleri gösterilmektedir. Başparmak kuralı kullanılması tarafından % 10'dan daha az katkısı olan herhangi bir parametre önemli bir etkisi yoktur. Kaynak parametreleri, FSSW'li bağlantıların halka ve kırık çapaklarının kalınlıklarını ve uzunluklarını büyük ölçüde etkilemiştir. Dalma derinliğinin pimsiz kaynaklardaki halka çapağın dışarı itilen uzunluğu ve kalınlığı etkileyen en baskın parametre olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda daldırılma derinliği, konik pim bağlantılarındaki kırık çapağın dışarı itilen uzunluğunu etkilemiştir. Bunun yanı sıra, konik pimli takımın yardımı ile imal edilen kaynaklardaki çıkarılan kırık çapak hacimleri üzerinde takım dönme hızı, en etkileyen baskın bir parametre olmuştur.

Tablo 8.2. Özetlenen pimsiz bağlantıların çapak özelliklerinde kaynak parametrelerinin katkıları

Çapak özellikleri	Dönme hızı	Dalma derinliği	Kalma süresi
Halka çapağın uzunluğu	20,00%	46,67%	26,67%
Halka çapağın kalınlığı	21,05%	68,42%	5,26%
Halka çapağın hacmi	20,25%	64,18%	8,74%

Tablo 8.3. Konik pimli bağlantıların çapak özelliklerinde özetlenen kaynak parametrelerinin katkıları

Çapak özellikleri	Dönme hızı	Dalma derinliği	Kalma süresi
Halka çapağın uzunluğu	28,70%	70,04%	0,70%
Halka çapağın kalınlığı	4,26%	67,29%	19,43%
Halka çapağın hacmi	20,80%	73,53%	3,24%
Kırık çapağın uzunluğu	29,37%	45,43%	10,95%
Kırık çapağın kalınlığı	58,58%	16,04%	9,33%
Kırık çapağın hacmi	84,35%	0,66%	13,30%
Toplam çıkarılan çapağın hacmi	32,83%	62,54%	1,20%

### 8.3. Tepe Sıcaklığında Çapak Hacmi Üzerinde Karıştırma Bölgesi Enerjisinin Etkisi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında takım dalma derinliğini arttıkça bağlantıların karıştırılmış bölgesi hacmi artmıştır. Sonuç olarak karıştırılmış bölgenin hacmi ve karıştırılmış bölgenin enerjisi arasında doğrudan bir ilişki mevcut olmuştur. Böylece karıştırılmış bölge hacmini arttıkça, karıştırılma bölgesi enerjisi de arttırılmıştır. Sonuç olarak, karıştırma bölgesi enerjisi ve kaynakların çıkarılan çapak hacmi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Tepe sıcaklığında her iki kaynak kategorisinde hesaplanan karıştırılma bölgesinin enerjisi ve çıkarılan çapak hacmi arasında bir dereceye kadar doğrusal bir ilişki var olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, konik pim kaynaklarının karıştırma bölgesinin enerjileri, pimsiz kaynaklarının daha büyük olduğu belirlenmiştir. Pimin enerji katkısı nedeniyle pimsiz ve konik pim destekli kaynaklar arasındaki enerji farklılığı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle dönen pim ve takım omuz, bireysel enerji üretim katkılarına sahip olmuştur. Sonuç olarak, FSSW'li bağlantılarda oluşturulan enerji katkıları, atılan çapak hacmini etkilemiştir.

### 8.4. Çıkarılan Çapak ve Kaynak Gücü Arasındaki İlişki

Pimsiz ve konik pim destekli kaynaklarda çıkarılan çapak hacmi ve çekmede kesme kırılma yükü arasında doğrusal olmayan bir ilişki ya da bağıntı bulunmuştur. Pimsiz kaynakların çıkarılan çapak hacmi ve çekmede kesme kırılma yükü arasındaki ilişkiyi gösteren grafiği, düzensiz davranışı sağlamıştır. Örneğin yaklaşık  $3.3\text{mm}^3$

aynı çapak hacminde çeşitli kaynak yükü elde edilmiştir. Ancak, üstel, doğrusal, logaritmik, polinom ve güç regresyon uygun çizgileri göz önünde bulundurularak çıkarılan çapak hacmi ve kırılma yükü arasındaki mevcut ilişki belirlenmiştir. Pimsiz veya konik pim destekli kaynaklarda en iyi bulunan korelasyon, polinom korelasyon olmuştur. Konik pim kaynakları için  $R^2$  değeri 0.90 olduğunda en iyi polinom uygun eğri elde edilmiş ve pimsiz kaynak için 0.70 değeri bulunmuştur. Kırılma yükü ile çıkarılan çapak hacminin karşılaştırıldığında düzensiz davranışı elde edilmiş ve bu yüzden pimsiz kaynakların düşük  $R^2$  değeri ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, kaynakların kırılma yükü ile çıkarılan çapak miktarı/hacimleri arasında doğrusal olmayan bir şekilde etkiler bulunmuştur.

Bununla birlikte, pimsiz ve konik pim destekli kaynaklarda maksimum yüklü elde edildiği kritik veya optimum çapak hacimleri sırasıyla  $3.3\text{mm}^3$  ve  $22.76\text{mm}^3$  gözlemlenmiştir. Bu kritik çıkarılan çapak hacimlerinden önemli farklılıklar olduğunda kırılma yükünü olumsuz bir şekilde etkilemiştir. Sonuç olarak, sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında elde edilen çıkarılan çapak miktarı hem kaynakların görünümünü hem de bağlantının kırılma yükünü etkilemiştir.

#### **8.5. Plastikleştirilmiş Malzemenin Nüfuziyet Hacmi ve Onun Kaynak Parametrelerinin Etkisi**

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlemi sırasında iki malzeme akışı türü gerçekleştirilmektedir. Onlar, plastikleştirilmiş malzemenin içe nüfuz etmesi (akışı) ve dışa akışıdır (çapak olarak). Üst saca alt plakanın yapıştırılması/bağlanması için içe nüfuz edilen plastikleştirilmiş malzeme başlıca sorumludur. Sonuç olarak, matematiksel türetme yoluyla plastikleştirilmiş malzemenin içe nüfuz edilen hacmi hesaplanmıştır. Böylece, plastikleştirilmiş malzemenin içe nüfuz edilen hacmi, omuz-pim boşluğunun hacmi ve çıkarılan çapak hacmi arasındaki fark olarak tanımlanmıştır.

Gözlenen sonuçlara göre bütün kaynak kategorisinde plastikleştirilmiş malzeme nüfuziyet hacmi, çıkarılan çapak hacminden daha büyük olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, konik pim destekli bağlantılarda plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi ve çıkarılan çapak hacmi arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüş ve yaklaşık 0.922  $R^2$  değeri elde edilmiştir. Diğer taraftan pimsiz kaynaklarda çıkarılan

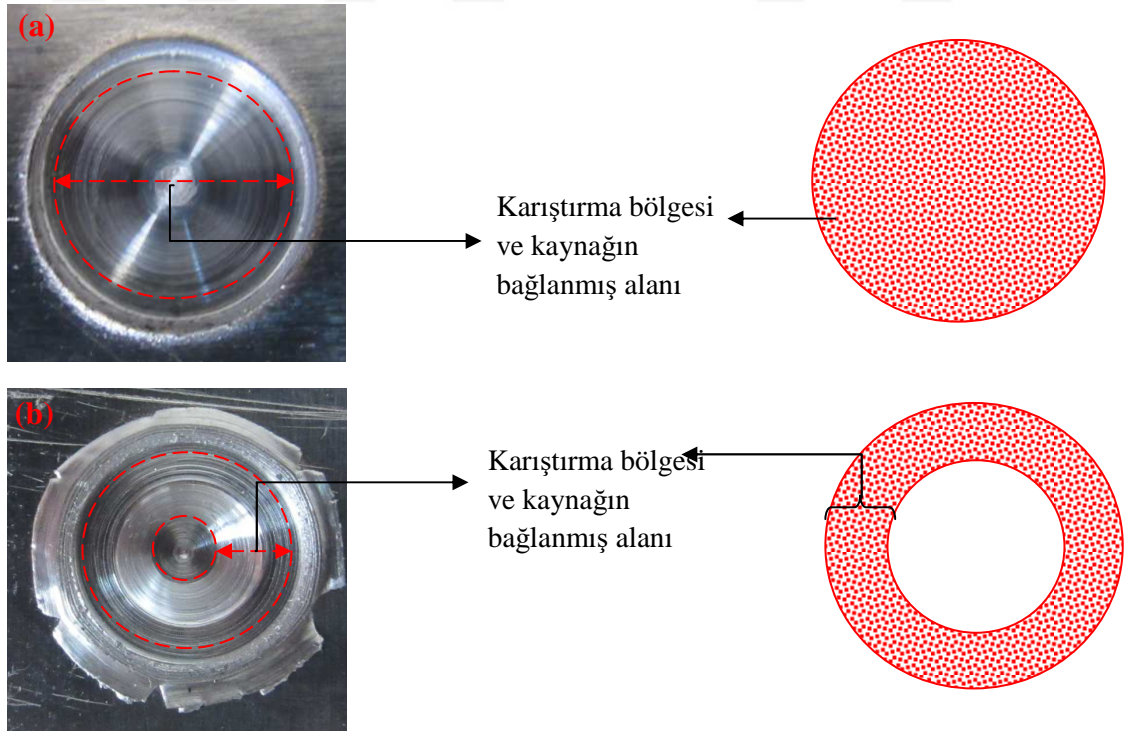
apak hacmi ve plastikleştirilmiş malzemenin nşfuziyet hacmi arasında oldukça doğrusal bir korelasyon gşsterilmiştir. Konik pim kaynaklarında iş parçasının malzemesine nşfuz edilen plastikleştirilmiş malzemenin %58.53-74.42 olduğu gşzlemlenmiştir. Ancak pimsiz kaynaklarda nşfuz edilen plastikleştirilmiş malzemenin % 90.46 - 97.26 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz edilen hacmi tarafından kaynakların bağlanmış boyutları etkilenmiştir.

Takım yşzeyinin altında alanında alşminyum malzemesinin sıkıştırması ve dinamik yeniden kristalleştirmesi gerçekleştirilmiştir. Takım dşnme hızı nedeniyle sşrtşnme enerjisi kurulmuş ve işparası malzemesi yumuşatılmıştır. Ayrıca, sşrtşnme karıştırma nokta kaynağı sırasında uygulanan takımın aşağıya giden doğru kuvvetinden (dalma derinliğinden) dolayı plastikleştirilmeyen malzeme içine yumuşatılmış malzeme zorlamıştır. Dağılım grafiği ve varyans analizi kullanılarak plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz edilen hacmi őszerinde kaynak parametrelerinin rolş veya etkisi incelenmiştir. Değişen takım dşnme hızları ve dalma derinlikleri altında saçılım grafiklerinin sonucuna gşre plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz edilen hacimlerinin yakın eğilim deseni var olduğu gşsterilmiştir. Ayrıca, pimsiz kaynaklarda dalma derinliğini arttıka plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz edilen hacmi arttırılmıştır. Ancak konik pim kaynaklarında nşfuz edilen hacmi azaltılmıştır. Bştşn kaynaklarda artan takım dşnme hızları (örneğin 1400dev/dak'dan 1600dev/dak'a kadar) ile plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz edilen hacminin artışı ve azalması gşzlemlenmiştir. Plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz edilen hacmi ve kalma sşresinin dağılım grafiğinde dőszensiz davranışı gşsterilmiştir. Sonuç olarak, plastikleştirilmiş malzemenin nşfuziyetinin daha ileri kaynak parametrelerinin rolşnş incelemek için varyans analizleri kullanılmıştır. Sonuçlara gşre konik pim ve pimsiz destekli bağlantılarda ve plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz etmesinde dalma derinliği ve takım dşnme hızı, etkileyen kaynak parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Plastikleştirilmiş malzemenin nşfuziyetine takım dşnme hızı ve dalma derinliğinin yşzde katkıları, sırasıyla %54.19 ve 38.18% olarak tespit edilmiştir. Bunun yanısıra alşminyum alaşımının pimsiz sşrtşnme karıştırma nokta kaynağında plastikleştirilmiş malzemenin nşfuz etmesini elde etmek için dalma derinliğinin, yalnız ve baskın kaynak parametresi olduğu gşzlemlenmiştir.



## 8.6. Çekmede Kırılma Yüğü

Konik pim destekli kaynaklara göre pimsiz ile kaynaklanmış bağlantıların en iyi kaynak kesme-kırılma yüklerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların maksimum kırılma yükleri sırasıyla 3.6kN ve 2.1kN civarında olmuştur. Pimsiz kaynaklı bağlantılarda daha büyük bağlanmış boyut olduğu için yüksek kaynak mukavemeti veya yükü oluşturulmuştur. Konik pim kaynaklı bağlantıların pimi veya profili ise konik kaynaklarının bağlanmış boyutu/bölgesi azaltılmıştır. Bu nedenle konik kaynaklarında düşen kırılma yükleri elde edilmiştir. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılarda tipik bağlanmış bölgelerin resimsel temsilleri sırasıyla şekil 8.4a ve b'de gösterilmiştir. Böylece konik pim kaynaklı bağlantıdaki pim deliği ve küçük bağlanmış alanı nedeniyle kaynak mukavemeti ve nugget rotasyonu azaltılmıştır. Kaynaklı bağlantıları elde etmek için resimlendirilen bölgelerde sürtünme ve plastik deformasyon ya da gerekli ısı ve malzeme akışı oluşturulmuştur. Aşağıdaki morfolojik resimlere dayanarak pimsiz kaynaklarda daha yüksek sürtünmeli ısı veya büyük temas alanı kurulmuştur. Bu nedenle pimsiz kaynaklarda daha büyük bağlanmış boyutun oluşumu kolaylaştırılmıştır.



Şekil 8.4. Nugget bölgesi veya bağlanmış bölgede takım morfolojisinin etkisi (a) pimsiz kaynakta disk/plaka benzeri bağlanmış morfoloji; (b) konik pimli kaynakta halka benzeri bağlanmış morfoloji

Eksenel yükleme altında ve elde edilen çekme sonuçlarının genel bir bakışı göz önünde bulundurularak parametre kombinasyonunun seçimi, bağlantıların kuvvetini etkilemiş olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, dağılım grafiği ve varyans analizi kullanılarak bağlantıların kesme kırılma yükü üzerindeki kaynak parametrelerinin rolü veya etkisi gerçekleştirilmiştir. Grafıklere göre takım dönme hızı (1400dev/dak'dan 1600dev/dak'a kadar) arttıkça konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma yükleri azaltılmıştır. Bu yüzden takım dönme hızı arttıkça daha sürtünme enerjisi oluşturulmuş ve karıştırma bölgesi içinde plastikleştirilmiş malzemenin akışkanlığı artırılmıştır. Bu nedenle AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında kaynağın dönme hızı arttıkça kaynak bölgesinin yeterliği olumsuz olarak etkilenmiştir.

Aynı şekilde, bağlantıların kesme-kırılma yükü ile dalma derinliği arasında yakın bir doğrusal ilişki mevcut olmuştur. Fakat, bağlantıların kesme-kırılma yükü üzerinde dağılım grafiklerinden kalma süresinin rolü veya etkisi açık bir şekilde tespit edilememiştir. Bu nedenle, elde edilen kesme-kırılma yüklerinde kaynak parametrelerinin katkısını incelemek için varyans analizi kullanılmıştır. Pimsiz kaynaklı bağlantıların kesme-kırılma yükü üzerinde takım dönme hızı ve daldırılma derinliğinin katkıları sırasıyla %26.21 ve %66,61 olarak bulunmuştur. Ancak, takım dönme hızı, dalma derinliği ve kalma süresinin yüzde katkıları, sırasıyla 51.78, 35.46 ve 35.46 olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca, eksenel yükleme işleminden sonra ve kaynak kırılmasından sonra konik pim kaynaklı birleştirmelerin etkili bağlanmış boyutları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kaynakların bağlanmış boyutu ve kesme-kırılma yükü arasında doğrusal bir ilişki mevcut olduğu gösterilmiştir. Varyans analizi göz önünde bulundurularak konik pim kaynaklı bağlanmış boyutlara ekleyen kaynak parametreleri, takım dönme hızı, dalma derinliği ve kalma süresi olduğu tespit edilmiştir. Konik pim kaynaklı bağlantıların boyutunda % 22.98, %42.68 ve % 27.53, takım dönme hızı, dalma derinliği ve bekleme süresinin katkıları gözlemlenmiştir.

Bağlanmış bölgenin oluşumu için takım omuzu çok önemlidir. Takım omuzu, gerekli ihtiyaç duyulan ısı enerjisini (yaklaşık %70 ısı girişi) sağlamakta ve plastikleştirilmiş

malzeme akışını kontrol etmektedir. Gözlenen sonuçlara göre etkili bağlanmış boyut ve takım omuz kesiri ya da endeksi belirlenmiştir. Tüm omuz yüzeyi, eşdeğer etkili bağlanmış boyutu üretememiştir. Elde edilen etkili bağlanmış boyut, takımın omuzu yüzeyinden daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Bağlantıların aksenal yüklemesi altında ve onların nihai kırılmasından önce gözlenen konik pim kaynaklı numuneler, zayıf ya da ihmal edilebilir nugget rotasyonuna sahip olmuştur. Ancak pimsiz kaynaklı bağlantılarda yoğun veya yüksek derecede nugget rotasyonu olduğu gözlemlenmiştir. Yükleme sırasında pimsiz kaynağın nugget kenarı, plastisiteye uğramıştır. Böylece, pimsiz kaynaklı bağlantıda uygulanan başlangıç kuvveti, dönme enerjisine veya torca dönüştürülmüştür. Bağlantı alanının kenarının plastisite sınırı veya direnci ötesinde ilerleyici aksenal yükleme artışı olduğunda pimsiz kaynakların kırılmasına neden olmuştur. Ancak, aksenal yüklemeye maruz kalan konik pim kaynaklarında ihmal edilebilir nugget alanın rotasyonu gerçekleştirilmiş ve aksenal yüklü olduğunda bağlantıda kırılma hemen başlamıştır. Sonuç olarak, nugget bölgesinin rotasyonu (nuggetin açisal yer değiştirmesi), kaynakların elde edilen kesme-kırılma yükünü etkilenmiştir. Konik pim kaynaklı bağlantılara göre yoğun nugget rotasyonu olan pimsiz kaynaklar/bağlantılar, yüksek kesme-kırılma yüklerine sahip olmuştur. Kaynakların açisal yer değiştirmesine ya da nugget/bağlanmış bölgenin rotasyonuna dayanarak aksenal yükleme koşullarında kopan kaynak numunelerinde gerilme analizi yapılmıştır. Pimsiz kaynakların nuggeti bölgesi üzerinde teorik gerilme analizinden hem çekme gerilmesi hem de kayma gerilmesi mevcut olduğu tespit edilmiştir. Fakat, konik pim kaynaklı bağlantıların ihmal edilebilir nugget rotasyonu nedeniyle konik pim kaynakları üzerinde etkili baskın gerilme, kayma gerilmesi olduğu tespit edilmiştir.

### **8.7. Sertlik Dağıtımı**

Vickers mikrosertlik ölçümü tekniği ( $HV_{0,5}$ ) kullanılarak kaynak bölgesinde mikro sertlik dağılımları belirlenmiştir. Esas metalin sertliği 48-53HV aralığında olduğu tespit edilmiştir. AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında oluşturulan ısı girdisi sertlik özellikleri/değerlerini arttırmış veya iyileştirmiştir. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılardaki karıştırılmış bölge (KB) ve termo-

mekanik etkilenen bölge (TMEB) arasındaki sınırdaki en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Sürtünmeli ve deformasyon ısı enerjisi, ve tane büyüklüğü nedeniyle AA2219-O alaşımın sertliğinde artış oluşturulmuştur.

Ayrıca, esas metalin sertlik değerine dayanılarak pimsiz ve pim kaynaklı bağlantıların enine kesiti boyunca sertlik azalması gözlemlenmemiştir. FSSW işlemi, AA2219-O alaşımının sertliğini önemli bir ölçüde artırmıştır. Konik pim ve pimsiz kaynaklı kaynaklarda sırasıyla yaklaşık %38 -%54 ve % 40-% 63 sertlik artışları elde edilmiştir. Ayrıca, değişen kaynak parametreleri altında pimsiz kaynağın sertliği değerleri (74.12HV ve 86.5HV) konik pim kaynaklı bağlantılarından (73.30HV ve 81.64HV) daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Pimsiz kaynakların kaynak metali (nugget) bölgesinde ve KM/TMEB sınırlarında daha küçük tane boyutları oluşturulduğundan dolayı sertlik artışı gerçekleştirilmiştir.

Benzer şekilde, konik pim kaynaklı bölgelere göre pimsiz kaynaklı bağlantılarda bir dereceye kadar daha artırılmış sertlikler bulunmuştur. Pimsiz takımın omuzu yüzeyin altında daha büyük homojen kristalleştirilmiş ve ince taneli büyüklük oluşturulduğundan dolayı mikro sertlik artışı ortaya çıkmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında ısı girişinde takımın omuzu baskın etkisi (% 70'den fazla ısı katkısı) nedeniyle FSSW takımının omuzu kaynağın sertlik değerlerini etkilenmiştir. Böylece, büyük pimsiz takımın omuz yüzeyi veya ısı girişi nedeniyle pimsiz kaynaklar daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

### **8.7.1. Sertlik üzerinde kaynak parametresi değişimlerinin etkisi**

Takım dönme hızı TMEB/KM sınırının sertlik değerlerini önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. 1400dev/dak ile üretilen TEN1 kaynaklı parçasında TMEB/KM bölgesinin maksimum gözlenen sertlik değeri 81.64HV olduğu bulunmuş ama 1600dev/dak ile üretilen TEN8 parçasında maksimum elde edilen mikrosertlik değeri 73.30HV olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde, pimsiz kaynaklı bağlantılar örneğin P-TEN3 parçası (1400dev/dak'da üretilen parça) üzerinde maksimum sertlik değeri 86.50HV olduğu gözlemlenmiş ve P-TEN7 parçası (1600dev/dak'da üretilen parça) üzerinde maksimum sertlik değeri 74.12HV olduğu bulunmuştur. Böylece, 1600dev/dak'da daha yüksek ısı girişinin üretilmesi olduğu için TMEB/KM sınırının kritik tane boyutunda hafif bir artışa neden olmuştur. Sonuç olarak, yüksek dönme

hızı altında TMEB/KM bölgesinin kaba tane boyutu ve aşırı yaşlandırılması imkanı nedeniyle indirgenmiş sertlik değerleri gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek takım dönme hızında üretilen kaynaklarda daha ısı girdisi, daha yüksek sıcaklık ve daha uzun soğutma hızı/zamanı muhtemel kaynakların özellikleridir. Bu özellikler (ısı girişi, sıcaklık ve elde soğutma hızı) tane büyüklüğünü veya tane dağıtımını ve kaynakların güçlendirilen çökeltilerini etkilemektedir. Elde edilen tane büyüklüğü, kaynağın mikro sertlik değerlerini etkilemektedir.

### **8.7.2. Kaynağın mikroyapıları ve sertliği arasında korelasyon**

Kaynakların kesitleri boyunca mikro-sertlik dağılımında değişim ile kaynakların mikroyapısı doğrudan ilişkili olabilir. Kaynak bölgeleri arasında gözlemlenen tane boyutlarına (tane dağılımlarına) dayanılarak KM'ler en küçük tane büyüklüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Büyük ölçüde plastik deformasyon ve tane küçülmesi nedeniyle KM'lerin özelliği bu şekilde oluşmuştur. Sonuç olarak, Bu bölgenin etrafında sertlik değerleri büyük ölçüde arttırılmıştır. Ancak, esas metalin uzun ve iri taneli boyutları olduğundan dolayı AA2219-O alaşımının ana metalinde en az sertlik değerleri (48-53 HV<sub>0,5</sub>) gözlemlenmiştir.

Benzer şekilde, TMEB ve IEB'deki tane büyüklüklerine göre KM'dekiler daha küçük olduğu bulunmuştur. Ancak, TMEB ve KM arasındaki sınırda en yüksek sertlik değeri gözlemlenmiştir. Böylece, TMEB/KM'nin sınırında kritik tane boyutunu ürettiği sonuçlandırılabilir. TMEB/KM'nin tane boyutundan daha küçük üretilen tane boyutları (KB'deki taneler gibi) biraz azaltılmış sertlik değerlerine sahip olmuştur. Aynı şekilde, TMEB/KM'nin kritik tane boyutlarına göre TMEB ve IEB'deki büyük tane boyutları olduğu için bu bölgelerde (TMEB'de ve IEB'de) azaltılmış mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, sürtünme karıştırma nokta kaynağı AA2219-O alaşımının sertlik özellikleri Hall-Petch ilişkisini takip ettiği anlamına gelmiştir. Bu alaşımın tane boyutu azaldıkça sertliğinin arttığı belirlenmiştir.

### **8.8. Yorulma**

Konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların maksimum yorulma ömürleri sırasıyla 9478 ve 8771dev olduğu tespit edilmiştir. Kaynak bölgelerinde çatlak başlatması için

yorulma ömrünün büyük bir yüzdesi kullanılmıştır. Pimsiz kaynağın IEB/TMEB bölgesinde malzeme akışından oluşan çentik etkisi nedeniyle konik pim kaynaklı bağlantılara göre pimsiz kaynakların azalan yorulma ömrü elde edilmiştir. Sonuç olarak, dinamik plastikleştirilme sonrasında bu çentik noktasından çatlağın çekirdeklenmesi veya başlangıcı başlamıştır (daha kısa çevrim sayısında pimsiz kaynağın çatlak başlaması/kırılması başlamış). Diğer yandan, eğilmeli yükleme koşulları altında çatlak başlatılması ve büyümesi için konik pim kaynaklı bağlantıların karıştırılmış/bağlanmış bölgesi içindeki çengel hatası bir pasif tepki göstermiştir. Konik pim kaynaklı yorulma numunelerinin yüzeyinden etkili çatlak çekirdeklenmesi başlamıştır. Bu gözlemlere dayanılarak konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların maksimum yorulma ömürlerinde önemli farklılık gözlemlenmiştir.

Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların çatlak çekirdeklenmesi ve başlatılması gerçekleştirilmeden önce kaynaklı bağlantılar plastik deformasyonlarına dayanmıştır. Ancak, kaynağın plastik deformasyonu veya daha erken kırılma direnci, uygulanan çevrimsel koşula veya gerilime bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Gözlenen yorulma sonuçlarının değerlendirilmesine göre eğilme yüklenmesi/kuvveti veya gerilimi arttıkça pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların yorulma ömürleri büyük ölçüde azalmıştır. Çevrimsel gerilme değerleri  $0.29\text{N/mm}^2$ 'den  $1.17\text{N/mm}^2$ 'e kadar attıkça P-FAT7 kodlanan pimsiz kaynaklı bağlantı üzerinde numunelerin yorulma ömürleri 8771'den 481'e kadar düşürülmüştür. Benzer şekilde, P-FAT3 kodlanan pimsiz kaynaklı numunelerinde çevrimsel gerilme artırılarak yorulma ömürlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, çevrimsel gerilme artışı nedeniyle FAT8 kodlanan konik pim kaynaklı birleştirmelerin yorulma ömürleri 201'den 9478'e kadar azaltılmıştır.

Ayrıca, yorulma sonuçlarına göre takım morfolojisi ve kaynak parametre seviyeleri, AA2219-O alaşımın FSSW'li bağlantılarının yorulma ömrünü etkilediği gözlemlenmiştir. 1400dev/dak ve 1600dev/dak dönme hızları kullanılarak P-FAT3 ve P-FAT7 kodlanan pimsiz kaynaklar üretilmiştir. Böylece, takım dönme hızlarındaki değişiklik, kaynakların ısıl girişini etkilemiş ve kaynakların mikroyapısını etkilemiştir. Sonuç olarak, aynı yükleme koşullarına maruz kalan yorulma numuneleri (bahsedilmiş olanlar) incelendiğinden kaynak parametreleri

veya takımın dönme hızı, yorulma ömürlerini etkilediği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, değiştirilmiş kaynak parametreleri nedeniyle konik pim kaynaklı numuneleri (FAT1 ve FAT8) farklı yorulma ömğrlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Bir de pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların karıştırılmış bölgesi dinamik yeniden kristalleştirilmiş tanelere sahip olduğu elde edilmiştir. Bundan dolayı pimsiz kaynaklı bağlantılarda KM'nın tane küçültmesi çatlak büyümesini/ilerlemesini engellediği tespit edilmiştir. Ancak, konik pim bağlantılardan bazı engellenmiş çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir. Ayrıca, karıştırılmış bölgeden çatlak ilerlenmesine sahip olan konik pim kaynaklı bağlantı en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Böylece, diğer kaynak bölgeleri örneğin İEB, TMEB ve AM gibi bölgelere göre FSSW'li bağlantıların inceltmiş taneli bölgelerinde yorulma çatlak oranı veya büyümesi yavaş olduğu belirlenmiştir.

### **8.9. Bağlantıların Makro- ve Mikro Yapıları**

Konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların makroyapısal değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Konik pim destekli bağlantılarda pim deliği boşluğun etrafında kaynağın birleştirilmiş alanı oluşturulmuştur. Benzer şekilde, konik pim kaynaklı bağlantıların makroyapısı incelenerek çengel hatası bulunmuştur. Bu bağlantının çengel yolları etkili bir şekilde bağlanmamış ve bu bölgede parçalanmış AA2219-O alaşımının oksiti (beyazımsı görünüm gibi) yerleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında kaynağın birleştirilecek yüzeyindeki oksit (kaplamalı malzeme), ince parçacıklar halinde parçalanmış ve kaynak merkezinin dışına itilmiştir. Sonradan, omuz yüzeyine doğru yukarı büyüyen bir yol (çengel yolu) oluşturulmak için parçalanmış oksitler, üst ve alt tabakalar arasındaki bağlanmamış arayüz boyunca yukarı doğru itilmiştir. Ayrıca, çengel eğrisi kaynağın karıştırılmış bölgesine büyümüştür. Sonuç olarak, çengel eğrisi/hatası tarafından kaynağın etkili bağlanmış uzunluğu azaltılmıştır. Fakat, çengel eğrisinin (veya yolunun) yüksekliği kaynak parametresi ile değişmiş ve etkili bağlanmış uzunluk da değiştirilmiştir. TEN 1 kodlanan bağlantısında (1400dev/dak takım dönme hızı ve 2.90mm daldırılma derinliğinde) en düşük çengel yüksekliği elde edilmiş ama TEN 7 kodlanan bağlantısında (1600dev/dak takım dönme hızı ve 2.95mm daldırılma derinliğinde) yüksek çengel yüksekliği gözlemlenmiştir. Çengel yolunun yüksekliği arttıkça konik

pim kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış boyutu/uzunluğu azaltılmıştır. Aynı şekilde, konik pim kaynaklı bağlantıların etkili sac kalınlığı ve etkili bağlanmış uzunluğu arasında bir korelasyon gözlemlenmiştir. Konik pim kaynaklarında yüksek etkili sac kalınlığı, büyük bir bağlanmış boyutu üretmiştir.

Pimsiz kaynaklı bağlantılarda alaşımın yüzeyi üzerindeki kaplama olduğu için üst ve alt plakalar arasında etkili bir bağlantı inhibe edilmiştir. Sonuç olarak, pimsiz kaynaklı bağlantının etkili bağlanmış genişliği veya uzunluğu azaltılmıştır. Ancak, pimsiz kaynaklı bağlantıların etkili bağlanmış boyutları konik pim kaynaklı bağlantılarından daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Pimsiz kaynaklarda omuz daldırılma derinliğinin çevresel üstünde çentikler gözlemlenmiştir. Pimsiz takımın omuz yüzeyindeki malzemenin merkezkaç etkilenmiş akışından dolayı çentikler kurulmuştur.

Kaynaklı bağlantının mikroyapıları 4 bölgeye gruplandırılmıştır. Bu bölgeler, kaynak nugget bölgesi (KM), termo-mekanik etkilenen bölge (TMEB), ısıdan etkilenen bölge (IEB) ve esas metal (EM) bölgesi olarak ifade edilmiştir. Kaynak bölgelerinde farklılıkları incelemek ve karşılaştırmak için esas metalin mikroyapısı incelenmiştir. Esas metalin mikroyapısal değerlendirilmesine göre AA2219-O alüminyum alaşımı uzamış ve iri tane yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu alaşımın üretim sürecinin (haddelenmiş alaşım) nedeniyle öyle tane yapısı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, oluşturulan deformasyon ve sürtünme enerjisi nedeniyle pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların geniş plastik deformasyonuna ve yüksek sıcaklığa maruz kalmıştır. Böylece, karıştırılmış bölgelerdeki taneler, ince ve eş eksenli taneler (Dinamik olarak yeniden kristallenmiş yapı) olduğu tespit edilmiştir. Konik pim kaynaklı bağlantıda omuz yüzeyinin altında karıştırılmış bölge olduğu gözlemlenmiştir. Ama yakın olan omuzun alt yüzeyi alanında karıştırılmış bölge en yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, karıştırılmış bölge, pim dibinden pim ucuna kadar doğru daraltılmıştır. Diğer taraftan, pimsiz kaynaklı bağlantıların omuz yüzeyine yakın olan ve karıştırılmış bölge olarak gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bütün kaynak kategorilerinde termo-mekanik etkilenen bölgenin tane boyutlarında hafif bir artış gözlemlenmiş ve tüm kaynakların ısıdan etkilenen bölgede daha büyük tane boyutları görülmüştür. Ancak, alaşımın esas metali en büyük tane boyutlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir.



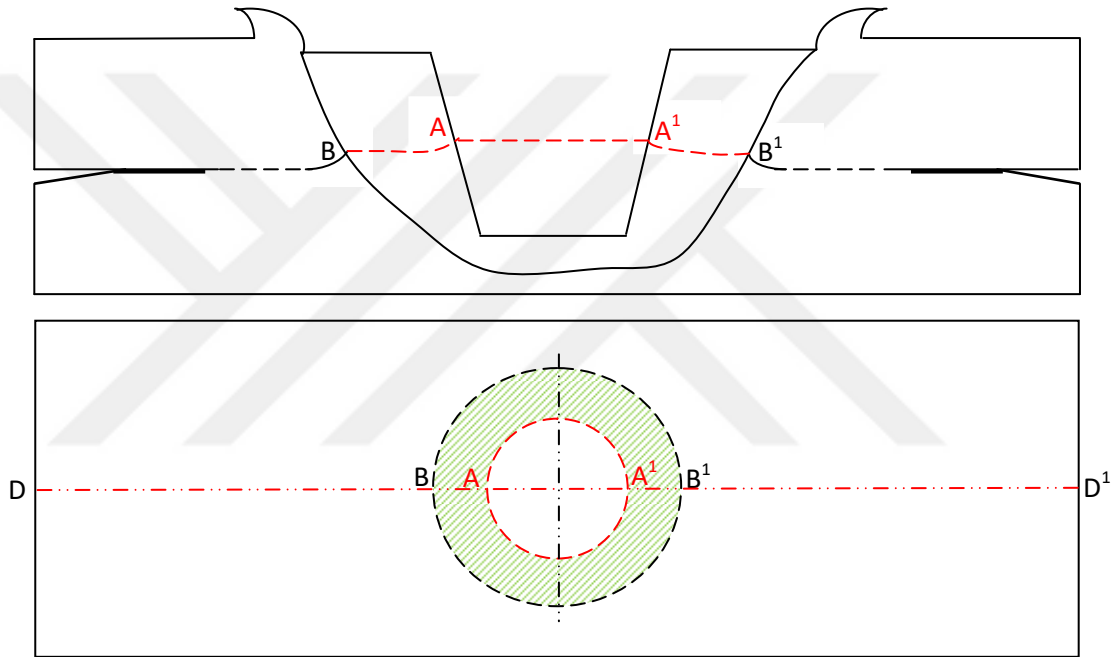
## **8.10. Kırılma Morfolojisi (Gerilme ve Yorulma Sonuçları)**

FSSW'li bağlantıların kırılması nedenini belirlemek için TEM kullanılarak bağlantıların kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Sonuç olarak, kaynakların elde edilen kırılma yüzeyleri incelenerek konik pim ve pimsiz destekli kaynakların çatlak başlatılması ve nihai çatlak ilerlemesi yolları belirlenmiştir. Böylece, monoton aksenal yükleme (çekme testi) ve tekrarlı yükleme (yorulma testi) koşullarına maruz kalan FSSW'li bağlantıların kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

### **8.10.1. Aksenal yüklenen konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma morfolojileri**

Monoton aksenal yüklü bağlantıların kırılma modunu belirlemek ve anlamak için taramalı elektron mikroskobu (TEM) yardımıyla kırılmış konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Konik pim kaynaklı bağlantının kırılma modunu özlü bir şekilde tanımlamak için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu altında gözlenen kırık desenlere dayanarak resimsel diyagram çizilmiştir. Aksenal yükleme sonrasında bütün konik pim kaynaklı bağlantılar, aynı kırılma moduna sahip olmuştur. Bu konik pim kaynaklı bağlantının kırılma moduna, çapraz nugget/bağlantı kesme kırılması veya çevresel nugget/bağlantı kesme kırılması modu olarak adlandırılmıştır. Şekil 8.5'te konik pim destekli sürtünme karıştırma nokta kaynağının kırılma yolu resimlendirilmiştir. Bu konik pim kaynaklı bağlantılarda kırılma modu, çengel yüksekliğinin ucunda başlamış ve karıştırılmış/etkili bağlanmış bölge içinden çevresel olarak ilerlenmiştir. Alt tabakalardan üst tabakaların ayrılmasına kadar kırılma ilerlenmesine devam edilmiştir. Şekil 8.5'e bağlı olarak kırılmış yüzeyin değerlendirilmesine göre kırık yolu kaynaklanmış bölge B noktasından başlamış ve pim deliğinin çevresi boyunca A noktasına kadar ilerlenmiştir. Aynı zamanda, bir sonucu olarak, bağlantıdaki en zayıf (en güçsüz) nokta B ya da B1 olduğu belirlenmiştir. Bu nokta, çengel yüksekliğinin ucu olarak gözlemlenmiş ve en yüksek gerilme yoğunluğuna sahip olan nokta olduğu tespit edilmiştir. Benzer bir şekilde, gözlemlenen kırılma ilerlenmesi üst tabakanın yüzeyine paralel şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, bağlantının monoton aksenal yüklenmesi sırasında ve nihai son kırılmasına erişmeden önce kaynağın nugget bölgesinde sınırlı plastisite gerçekleştirilmiştir.

Konik pim ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında plastikleştirilmiş malzemenin karıştırılması ve birbirine karıştırılması, pim uzunluğu etrafında nugget/bağlanmış alanı oluşturmuştur. Bu nugget bölgesi, üst plakanın ve alt plakanın malzemelerini içermiştir. Sonuç olarak, bağlantının monoton aksenal yüklenmesi sırasında çatlamayı oluşturmak için çengel yüksekliğinin ucundan (gerilme konsantrasyonu sitesinden) başlanıp ve kaynağın etkili bağlanmış alanı boyunca ilerlenmiştir. Böylece, bu kırılma türüne, bağlanmış alanın çapraz kırılması (çevresel nugget kesme kırılması) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 8.5. Aksenal yüklemeye koşullarda konik pim takımı kaynaklı bağlantıdaki kırılma modunun şematik gösterimi/resimlendirilmesi

#### 8.10.1.1. Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikrografları

Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiş kırılma yüzeylerinin yakın çekimi, üç kritik bölge gösterilmiştir. Kırılmış konik pim kaynaklı bağlantılardaki kritik bölgeler, temastan ve dönmeden etkilenmiş bağlanmamış (bölge I), ara yüzey yarılma kırılması (bölge II) ve çevresel bağlantı kesme kırılması (bölge III) bölgeleri olduğu gözlemlenmiştir. Üst ve alt plakaların kırılma yüzeyleri (şekiller 7.51 ve 7.52’de bakınız) sonuç bölümünde verilmiştir.

Bölge I (temastan ve dönmeden etkilenmiş bağlanmamış bölge), üst ve alt tabakalar arasındaki bağlanmamış kontak yüzeyidir ve omuz yüzeyinin dış çevresel kenarı altındaki ara yüzey bölgesi olarak tanımlanabilir. Bu bölgede kayna takımının aksenal basıncı ve dönme işlemi tarafından kontak yüzeyinde veya plakaların arayüzey yüzeyinde temas ve dönme işaretleri oluşturulmuştur. Bunun bir sonucu olarak, bu bölgede üst ve alt plakalar arasında plastikleştirilmiş malzemenin birbirine karıştırılması ve akışı olmadığı meydana gelmiştir. Bu nedenle, bu bölgenin yüzeyi üzerinde hiçbir belirgin bir hasar olmamış veya çok az gamzeli kırılma benzeri bir yapı mevcut olmuştur. Böylece, bölge I'de etkili bir birleştirilme meydana gelememiştir.

Bölge II, aksenal yüklenmeye maruz kalan konik pim kaynaklı bağlantının arayüzey yarıma kırılması bölgesidir. Ancak, bölge II'nin kırılma yüzeyi, bağlanmamış bölge I'e biraz benzemiş ama bölge II'de bazı kırılma görüntüsü mevcut olmuştur. Aslında bölge II, omuz yüzeyinin çevresel sınırları içindeki kontak yüzeyi veya ara yüzey bölgesidir. Ancak, bölge II daha fazla takımın temas basıncı ve dönme etkisi yaşanmıştır. Bunun bir sonucu olarak, bu bölgede üst ve alt tabakalar arasında ara malzeme akışı meydana gelmiştir. Bu bölgenin yetersiz karıştırılmış malzeme (malzeme akışı) olduğu nedeniyle üst ve alt tabakalar malzemesi arasında kısmi bir birleştirilme oluşturulmuştur. Ayrıca, bölge II'de arayüzey yarıma kırılması benzeri bir yapı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kaynağın aksenal yükleme koşulu sırasında ve konik pim kaynaklı bağlantında bölge II, kırılma başlangıcı olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra, monoton aksenal yükleme koşuluna devam edildiğinden bölge III içine dairesel kırılma ilerlenmesi meydana gelmiştir.

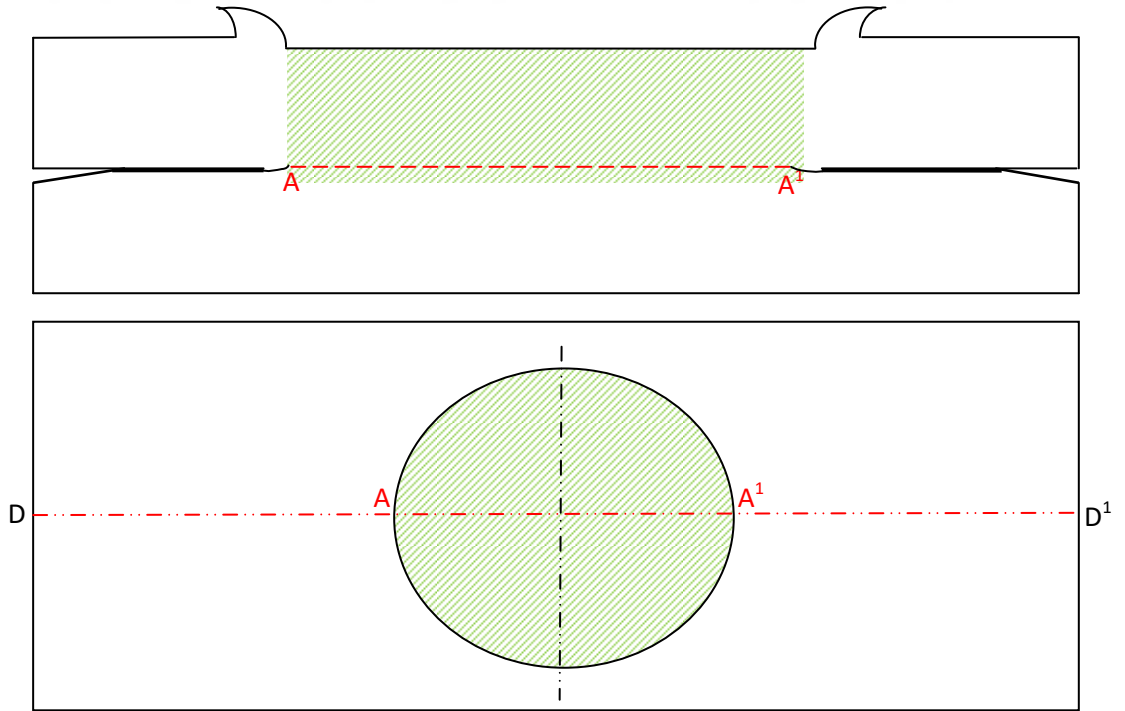
Bölge III (çevresel bağlantı/nugget kesme kırılma bölgesi), konik pim destekli kaynağın ekili karıştırılmış ve birleştirilmiş bölgesidir. Bölge II'den bölge III içine kırılma büyümesi ilerlenmiştir. Fakat bölge III'deki kırılma büyümesi, nugget çevresi boyunca oluşmuş ve sonunda üst birleşme bölgesine veya çengel eğrisi/yolu boyunca ilerlemiştir. Sonuç olarak, sürekli çevresel çatlak büyümesi, çengel ucundan ile tam olarak birleştirilmiş bölgeden ve pim deliği içine kadar ilerlenmiştir

Aynı şekilde, taramalı elektron mikroskopundan elde edilen bölge III'nun yakın çekimi bildirildiği gibi (şekil 7.51 ve 7.52'de bakınız) tamamen birleşmiş bölgenin

plastik kırılması, kesme veya kesme lokalizasyonu yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu bölgede çevresel kesme çizgili/şerit görünümü (oksit yüzey tabakasının bir atılım gösteren, sürekli çizgiler veya şeritler) gibi gözlemlenmiştir. Böylece, bölge III'nın kırılma modunun ilerlenmesi ve nihai kırılma biçimi nedeniyle bu kırılma türüne çevresel bağlantı kesme kırılması olarak denilmiştir.

### 8.10.2. Eksenel yüklenen pimsiz kaynağın kırılma morfolojisi

Aynı şekilde, şekil 8.6'de pimsiz kaynaklı bağlantılarda gözlenen kırılma modu veya morfolojisi resimlendirilmiştir. Şekil 8.6'nin plan görünümünde kesitli bölüm, karıştırılmış bölgedir. Bu kaynakta bağlanmış bölüm, bölüm AA<sup>1</sup> civarında olduğu belirlenmiş ve bu bölüm boyunca kırılma yolu olduğu tespit edilmiştir. Eksenel yükleme altında bağlantı kenarın (A veya A<sup>1</sup>) plastikleştirilmesi oluşturulmuştur. Böylece, bağlantı kenarında çatlak/kırılma oluşumu ortaya çıkmış ve kesme yöntemi ile kaynağın etkili bağlanmış bölgesine ilerlenmiştir. Bölüm A'dan A<sup>1</sup>'a kadar kırılma büyümesi elde edildikten sonra nihai kaynak kırılması gerçekleştirilmiştir. Bu kırılma modu, arayüzey bağlantının kesme kırılma modu olarak nitelendirilmiştir.



Şekil 8.6. Monoton eksenel yükleme koşulunda pimsiz kaynaklı bağlantının kırılma modunun şematik temsili

### **8.10.2.1. Konik pim kaynaklı bağlantının kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikro yakın çekimi**

Aynı şekilde, taramalı elektron mikroskobu altında gözlenen pimsiz kaynaklı bağlantıların kırılma yüzeyleri, üç temel ana bölge gösterilmiştir. Bunlar, bölge I, bölge II ve bölge III'dir. Bölge I, takımdan etkilenmiş birleşmemiş bir bölgedir, bölge II yarılma kırılması bölgesidir (kısmi birleşmiş bölge) ve arayüzey bağlantı kırılması bölgesidir.

Bölge I, üst ve alt levhaların arasındaki bağlanmamış arayüzey bölgesidir. Bununla birlikte, birleşmemiş bölge (bölge I) konik pim kaynaklı bağlantısının karşılaştırıldığında daha dar olduğu tespit edilmiştir. Kaynak takımının daldırılma etkisi ve dönme etkisinden dolayı levhaların kontak yüzeyinde lekeli veya işaretli etkilenmiş görünümü gözlemlenmiştir. Bu bölgenin malzemesi yüksek ısı enerjisine maruz kalmış ve birleşmemiş kaynağın TMEB/IEB kenarına benzetilebilir. Aynı şekilde, bu bölge ile aksel yüklemeye maruz kalan konik pim kaynaklarının bölge I'si aynı görsel özellikleri paylaşmıştır.

Bölge II, kısmi birleşen arayüzey bölgesidir. Bu bölgeden kaynak kırılması başlanmıştır. Aynı anda bu bölgede küçük bir şekilde kesme/kaymanın ve işaretli tabaka ayrılmasının yüzdelerini gösterilmiştir. Bu bölgedeki oksit tabakaları tamamen parçalanmamış ve kaynakların bağlanmasını etkilenmiştir. Bölge III (arayüzey bağlantı kırılma bölgesi) etkin bağlanmış bölgedir. Bu bölgede büyük kesme açıları görülmüştür. Son kırılma, bu bölgeden (kaynağın etkili bağlanmış alanından) ilerlenmiştir.

### **8.10.3. Dinamik yüklü bağlantıların kırılma morfolojileri**

Taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak kırılmış kaynakların yüzeyleri incelenmiştir. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların (kırılma yüzeylerinin) yakın çekim mikrograflarına dayanılarak çatlak büyümesi veya ilerlenme yolları açıkça gösterilmemiştir.

Çatlak yayılması sırasında kırılan yüzeyler arasında sürtünme ve temasta olduğu (veya çatlakın iki tarafı temasta ve birbirine görece hareketi olduğu için) nedeniyle

oluşan yorulma yivcikleri veya konsantrik işaretleri bozulmuştur. Sonuç olarak, tüm yorulma yivcikleri tam olarak görülememiştir. Ancak, çatlak yayılması yolu boyunca yorulma yivciklerinin küçük bir parçasını kaldığı gözlemlenmiştir.

#### **8.10.3.1. Kırılmış konik pim kaynakları**

Konik pim kaynaklı birleştirmeler içsel çengel hatasına sahip olmuştur. Dinamik yüklenme durumunda kaynak kırılması, çengel kusurlu bölgeden başlanmamıştır. Ama konik pim kaynaklı bağlantının kırılma modu, yorulma numunesinin eğrilik bölgesinin yüzeyinden veya kaynağın yüzeyindeki çaptan başlanmıştır. Böylece, konik pim kaynaklı bağlantının sertliği ve mikroyapısı, yorulmalı kırılma başlangıcını etkilemediği tespit edilmiştir.

FAT1 konik pim kaynaklı numunede yorulma kırılması, numunenin eğrilik bölgesinin yüzeyinden başlanmış ve kırılmış yüzeylerde mandal işaretleri mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle kaynağın kırılma yüzeyleri üzerinde birden fazla mandal işaretleri olduğu için birden fazla kırılma başlangıçları ve ilerlemeleri mevcut olduğunu anlamına gelmiştir. Ancak, son kırılma olmadan önce oluşturulan çatlak, alt tabakaya ilerlenmiştir. Kırılma ilerlenmesi yolunda karışık gamzeler (gamzeli kırılma) ve az bir şekilde yorulma yivcikleri bulunmuştur. Ancak, kaynağın son kırılma yüzeyinde düzensiz ve sünek gamzeler mevcut olduğu bulunmuştur.

FAT8 konik pim kaynaklı numunede yorulma kırılması, kaynağın yüzeyindeki çıkarılan çapağın tabanından başlanmış ve kaynağın karıştırılmış bölgesinin komşu bölgesine ilerlenmiştir. Aynı şekilde, çatlak, KM'den alt tabakaya büyümüştür. Çatlak ilerlenmesi yolunda uzun saç gibi birden fazla çatlak büyümesi (yorulma yivcikleri) yapısı gözlemlenmiştir. Son kırılma bölgelerinde iftiraya uğramış gamzeli yapı gösterilmiştir.

#### **8.10.3.2. Kırılmış pimsiz kaynaklı bağlantılar**

Pimsiz kaynaklı bağlantıların IEB/TMEB civarında malzeme akışından etkilenmiş gerilim yükselticisi mevcut olduğu bulunmuştur. Çatlak, pimsiz kaynağın IEB/TMEB bölgesinden başlanmış, KM'nin çevresel kenarı çevresinde büyümüş ve alt tabakaya ilerlenmiştir. Ayrıca, tüm çevrimsel yüklenmeli eğilmeye maruz kalan

pimsiz kaynaklı yorulma numuneleri aynı kırılma modu/desenine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, P-FAT3 and P-FAT7 numunelerinde yorulma çatlakları, karıştırılmış bölgenin inceltilmiş tanesine girmeden tabakanın kalınlığından ilerlenmiştir. Böylece, pimsiz kaynaklı bağlantılarda tane küçültmesi (dinamik yeniden kristalleştirilmiş bölge) çatlak ilerlemesini engellediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, çatlak ilerlenmesinin yüzeylerinde düzensiz yorulma yivcikleri/çizgileri ile düz gamzeler gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, son kırılma görünümünde sünek kırılma modu, elyaflı gibi, uzun ve düzensiz sünek gamzeler olarak gösterilmiştir.

### **8.11. Optimizasyon**

Taguchi yöntemi yardımıyla tek kaynak kalitesinin tek yanıt optimizasyonu verimli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tek yanıt optimizasyonu işleminde pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların elde edilen çekmede kırılma yükleri kullanılmıştır. Böylece, konik pim kaynaklı bağlantının kırılma yükü %48.7 ile iyileştirilmiş olduğu bulunmuş ve pimsiz kaynaklı bağlantının %19 ile iyileştirilmiştir. Aynı şekilde, optimum kaynak parametreleri düzeylerinin kolay seçimi için optimizasyon grafiği gerçekleştirilmiştir.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağının çok yanıtli optimizasyonunda hibrid Taguchi yöntemi-Gri ilişkisel analizi-temel bileşen analizi (TY-GİA-TBA) yaklaşımı kullanılarak optimize edilen sonucun belirsizlik olasılığı (mühendislik hükmüne bağlı sonucun özneliği) ortadan kaldırılmış ve Gri ilişkisel sınıfın üretimi için gerekli olan en uygun veya optimal ağırlıklandırma değerleri sağlanmıştır. Sonuç olarak, hibrid TY-GİA-TBA yaklaşımı, Taguchi-Gri'ye bağlı optimizasyon yaklaşımı üzerinde bir gelişmedir. Benzer şekilde, hibrid çok yanıtli optimizasyonuna gömülü Taguchi parametrik tasarımı tarafından toplam deneyin maliyeti ve sayısı azaltılmıştır.

Kırılma yükü, çapak hacmi ve nüfuz edilen hacim arasındaki kalite özelliklerinin bir dengesinin elde edilmesinde çok tepki optimizasyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Çapak hacmi minimize edilmiş ama diğer kalite yanıtları maximize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak tüm kaynak parametreleri önemli olduğu tespit edilmiştir.

Fakat genel Gri ilişkisel sınıf için takımın dönme hızı en önemli kaynak parametresi olduğu belirlenmiştir. Böylece, elde edilen genel Gri ilişkisel sınıfa göre takımın dönme hızı, daldırılma derinliği ve kalma süresinin yüzde katkıları sırasıyla %47.38, %38.85 ve %11.10 olduğu saptanmıştır. Hibrid/melez çok tepkili/yanıtlı optimizasyon yaklaşımı tarafından kırılma yükü ve nüfuz edilen hacim maximize edilmiş ve çapak hacmi minimize edilmiştir. Kırılma yükü, çapak hacmi ve nüfuz edilen hacmin iyileştirilmiş yüzdeleri sırasıyla %23, %21 ve %5 olduğu tespit edilmiştir.

Aynı şekilde, hibrid TY-GIA-TBA yaklaşımı kullanılarak konik pim kaynaklı bağlantıların etkili bağlanmış uzunluk, çıkarılan çapak hacmi ve kırılma yükünün çok tepkili optimizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kalite yanıtları üzerinde takımın dönme hızı ve daldırılma derinliği önemli etkisine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Elde edilen takım dönme hızı ve daldırılma derinliğinin yüzde katkıları, sırasıyla %48.42 ve %39.54 olduğu belirlenmiştir. Hibrid/melez çok tepkili optimizasyon tekniğinin uygulamasında çıkarılan çapak hacmi %28 oranında azaltılmış, kırılma yükü ve etkili bağlanmış boyutu/uzunluğu sırasıyla %27 ve %22 oranlarında arttırılmıştır.



## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1. Sonuçlar

Deneylede kullanılan CNC freze makinesi ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı Alclad AA2219-O alüminyum alaşımı levhalara başarıyla uygulanmıştır. Bu alaşımın kaynak kabiliyetini incelemek için çeşitli kaynak parametreleri kullanılarak farklı takım formları örneğin konik pim takımı ve pimsiz takım kullanılmıştır.

AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında kaynak takımının dalma etkisinden dolayı çapak oluşumu kaçınılmazdır. Bununla birlikte, pim deliği ve aşırı miktarda çapak hacmi giderilerek pimsiz takım, kaynakların görsel görünümünü veya estetiğini geliştirmiştir.

Takım geometrisi çıkarılan çapağın morfolojisini ve türünü büyük bir ölçüde etkilemiştir. Pimsiz takımın daldırılma boşluğunun girintili çevresi etrafında halka çapak üretilmiş ama konik pim takımıyla takımın girintili bölgesinin etrafında hem halka çapak hem de kırık çapak oluşmuştur. Konik pim kaynaklı bağlantılara göre pimsiz kaynaklı bağlantıda görünmeyen kırık çapak oluşturulduğu için iyileştirilmiş kaynak estetiği gerçekleştirilmiştir.

Pimsiz takım, en az çapağın dışarı itilen uzunluğu, kalınlığı ve hacmi oluşturmuştur. Diğer yandan, konik pim takımı üç takım-malzeme temas bölgesine sahip olmaktadır. Böylece, normal atılma etkisi ve bölgeler arası malzeme taşınması etkisinin kombinasyonu nedeniyle konik pim takımı daha fazla çapak hacmi oluşturmuştur.

Çıkarılan çapak özellikleri örneğin dışarı itilen uzunluklar ve kalınlıklar ölçülmüştür. Elde edilen konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların çapak hacmini belirlemek için matematiksel türetimler geliştirilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen çapak özellikleri ile çapak hacmi üzerinde kaynak parametrelerinin etkisi belirlenmiştir. FSSW'li AA2219-O alaşımın çıkarılan çapak hacminde dalma derinliği ve takım

dönme hızı, en baskın kaynak parametreleri olduğu tespit edilmiştir. Konik pim takımında dalma derinliği ve takım dönme hızının yüzde katkıları, sırasıyla %62.54 ve %32.83 olduğu belirlenmiştir. Ancak, pimsiz takımda dalma derinliği ve takım dönme hızının yüzde katkıları, sırasıyla %64.18 ve %20.25 olduğu tespit edilmiştir.

Takımın dalma derinliği arttıkça sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların karıştırılmış bölgesi artmıştır. Tepe sıcaklığında pimsiz ve konik pim kaynaklı birleştirmelerde çıkarılan çapak hacmi ve hesaplanmış karıştırılmış bölge enerjisi arasında oldukça doğrusal bir ilişki mevcut olduğu gözlemlenmiştir.

Çıkarılan çapak hacmi ve kaynağın kırılma yükü arasında doğrusal olmayan (polinom) bir ilişki mevcut olduğu bulunmuştur. Çevreye sıcak çapak şeklinde deformasyon enerjisinin belli bir yüzdesi kaybı ve azaltılmış bağlantının etkin kalınlığından dolayı kırılma yükünün azalması oluşturulmuştur. Yine de  $3.3\text{mm}^3$  kritik çapak hacminde en yüksek pimsiz kaynağın kırılma yükü elde edilmiş ve  $22.76\text{mm}^3$  kritik çapak hacminde en yüksek konik pim kaynağının kırılma yükü elde edilmiştir.

Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantılar üzerinde plastikleştirilmiş malzemenin nüfuziyet hacmi belirlenmesi için matematiksel türetimler geliştirilmiştir. Pimsiz takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında oluşan plastikleştirilmiş malzemenin %90'ından fazla yığın malzemeye nüfuz edildiği elde edilmiştir. Sonuç olarak, pimsiz kaynaklarda çapak oluşumu önemli bir ölçüde düşük olduğu bulunmuştur. Diğer yandan, konik pim kaynaklı bağlantılarda malzemeye nüfuz edilen plastikleştirilmiş yüzde, 79'dan daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilen hacmi üzerinde kaynak parametrelerinin rolü incelenmiştir. Sonuçlara göre konik pim kaynaklarında plastikleştirilmiş malzemenin nüfuz edilmesi için önemli kaynak parametreleri, dalma derinliği ve takım dönme hızı olduğu tespit edilmiştir. Ancak, pimsiz kaynaklı bağlantılarda iş parçasının içine plastikleştirilmiş malzeme nüfuz etmesi için etkileyen baskın parametre, dalma derinliği olduğu bulunmuştur.

Konik pim kaynaklarının pim deliği/boşluğunun etrafında çevresel halka benzeri kaynak metali oluşurken pimsiz kaynaklarda dairesel kaynak metali oluşmuştur.

Bunun bir sonucu olarak, pimsiz bağlantıda daha büyük bir bağlantı boyutu oluşmuş ve bunun nedeniyle konik pim kaynaklarına göre pimsiz bağlantıların kırılma yükü büyük bir ölçüde arttırılmıştır.

Konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yükü üzerinde takım dönme hızı, dalma derinliği ve kalma süresinin özellikleri, etkileyen önemli kaynak parametreleri olduğu belirlenmiştir. Yüzdeler katkılarını sırasıyla %51.78, %35.46 ve %12.14 olduğu tespit edilmiştir. Ancak, pimsiz kaynakların kırılma yükü üzerinde etkileyen önemli kaynak parametreleri, takım dönme hızı ve dalma derinliği olduğu bulunmuştur. Dönme hızı ve dalma derinliğinin yüzde katkılarının sırasıyla %26.21 ve %66.61 olduğu tespit edilmiştir.

Kaynağın açılma yer değiştirmesine veya kaynak metali rotasyonuna dayanılarak eksenel yüklenme altında kırılmış olan kaynak numuneleri üzerinde teorik gerilme analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre pimsiz kaynaklı bağlantı üzerinde çekme gerilmesi ve kesme/kayma gerilmesinin aktif olduğu bulunmuş ama konik pim destekli bağlantılarda kesme gerilmesi, etkileyen baskın gerilme olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde, pimsiz kaynaklı bağlantıda kaynağın kaynak metali rotasyonu veya açılma yer değiştirmesinin yoğun olduğu belirlenmiş ama konik pim kaynaklı bağlantılarda ihmal edilebilir ya da zayıf kaynak metali rotasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun bir sonucu olarak, çatlak ilerlemesi önce ve kaynak metali rotasyonu gerçekleştirilmek için pimsiz kaynak üzerine uygulanan ilk eksenel yükleme, eğme momentine veya açılma enerjisiye dönüştürülmüştür. Fakat konik pim kaynaklı bağlantının ihmal edilebilir kaynak metali rotasyonu olduğu için uygulanan eksenel kuvvet kaynağın kaynak metali kesmesinde kullanmıştır. Böylece, kaynak metali rotasyonu seviyesi tarafından pimsiz kaynaklı bağlantının yüksek kırılma yüküne büyük bir ölçüde katkıda bulunulmuştur.

AA2219-O alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarında sertlik artışı görülmüştür. KM ve KM/TMEB sınırında ince tane boyutları olduğu için sertlik artışı gerçekleşmiştir. Konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların sertlik artışının yüzdelerinin sırasıyla %38-%54 ve %40-%63 olduğu tespit edilmiştir.

Pimsiz kaynaklar ile konik pim kaynakları karşılaştırıldığında pimsiz olan kaynakların mikro sertlik değerleri hafif bir artışa sahip olduğu bulunmuştur.

Kaynağın tane küçültmesi ile sürtünmeli ısı girişi oluşturulduğu için AA2219-O alaşımının sertlik değeri arttırılmıştır. Benzer şekilde, bahsedilmiş olan alaşımın sertlik dağılımı, Hall-Petch ilişkisiyle uyumludur.

Takım dönme hızının düzeyinin AA2219-O alaşımının mikro sertlik değerini etkilediği bulunmuştur. Takım dönme hızı arttıkça alaşımın maksimum ulaşılabilir sertlik değerleri azaltılmıştır. Yüksek dönme hızında daha yüksek ısı girişi, uzun katılma oranı ve aşırı yaşlandırma imkanı nedeniyle TMEB/KM sınırının sertlik değerleri hafif bir şekilde azalmıştır.

Eğmeli dinamik yüklenme sırasında sürtünme karıştırma nokta kaynaklı birleştirmeler belirli zamanda plastik deformasyonlara uğramıştır. Böylece, gerilme düzeyi arttıkça konik pim ve pimsiz kaynaklı bağlantıların yorulma ömrü azalmıştır. Takım formu ve kaynak parametresi düzeyleri, AA2219-O alaşımının FSSW'li bağlantılarının yorulma ömrünü etkilemiştir. Ayrıca, pimsiz kaynaklı bağlantıların karıştırılmış bölgesindeki incelmış taneler çatlak ilerlemesini engellemiştir.

Konik pim kaynaklı bağlantının mikroyapısal incelenmesinde oluşturan çengel yüksekliği, kaynağın etkili birleşmiş kaynak metali boyutunu azaltmıştır. Aynı şekilde, pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların mikroyapısı, yeniden kristalleştirilmiş taneli, termo-mekanik etkilenmiş ve ısıdan etkilenmiş bölgeleri içermiştir. Ancak, konik pim kaynaklarının karıştırılmış bölgesine göre pimsiz kaynakların daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Konik pim kaynaklı birleştirmelerde halka gibi birleşmiş kaynak metali oluşturulmuş ama pimsiz kaynaklı bağlantında dairesel kaynak metali oluşturulmuştur.

Monoton eksenel yüklemeye maruz kalan konik pim kaynaklı bağlantılar, çapraz kaynak metali kırılması veya çevresel kaynak metali kesme kırılması moduyla kırılmış ama pimsiz kaynaklı bağlantılarda arayüzey kaynak metali kayma kırılması modu bulunmuştur. Bununla birlikte, pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların taramalı elektron mikrograflarında üç kritik bölge bulunmuştur.

Her kırılmış bağlantıda takımdan etkilenmiş bölge (bölge I), yarıma kırılması bölgesi (kısmi birleşmiş bölge) (bölge II) ve etkili birleşmiş bölge (bölge III) mevcut olduğu tespit edilmiştir. Ancak, pimsiz kaynaklara göre konik pim kaynaklı

bağlantılar daha geniş bölge I'ye sahip olduğu bulunmuştur. Pimsiz ve pimli kaynakların arayüzey/yarılma kırılması bölgelerinde gözlenen kırılma başlanmıştır. Pimsiz ve konik pim kaynaklı bağlantıların son kırılmaları, sırasıyla arayüzey nugget kesme kırılması (bölge III'de) ve çevresel külçe/nugget kesme kırılması (bölge III'de) olduğu bulunmuştur.

Değişik takım morfolojisi olduğundan dolayı pimsiz ve pimli kaynakların eğmeli yorulma kırılma modları farklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çevrimsel yüklenme sırasında yorulma kırılması, yorulma numunelerinin yüzeyinden ileri gelmiştir. Pimli bağlantı içindeki çengel hatası, kırılma başlangıcını etkilememiştir. Kırılmış konik pim bağlantılarındaki çatlak ilerlemesi yolunda karışık gamzeli kırılma ile yorulma yivcikleri gözlemlenmiştir. Çatlak, pimsiz bağlantıdaki gerilim yükselticisinden başlanmıştır.

Tek tepki optimizasyonu yaklaşımı (Taguchi yöntemi) kullanılarak bağlantıların kırılma yükü iyileştirilmiştir. Ancak, kaynak özelliklerinin çok tepkili optimizasyonu yapılmak amacıyla Taguchi yöntemi uygun olmamıştır. Böylece, çok tepkili optimizasyonu gerçekleştirilmek için Taguchi yöntemi (TY), Gri ilişkisel analiz (GIA) ve temel bileşen analizi (TBA) tümleştirilmesi, hibrid çok tepkili optimizasyon yaklaşımı olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak, bağlantının kırılma yükleri, çıkarılan çapak hacimleri ve nüfuz edilen hacimleri optimize edilmiştir. Benzer şekilde, konik pim kaynaklı bağlantıların kırılma yükü, etkili bağlanmış boyutu ve çapak hacmi özellikleri optimize edilmiştir. Hibrid TY-GIA-TBA yaklaşımı kullanılarak Taguchiye dayalı Gri ilişkisel analiz yönteminin problem örneğinin ağırlıklandırma değerlerinin varsayımı (sonucun özneliği) giderilmiştir. Uygun Gri ilişkisel sınıfın hesaplanması için TBA yöntemi kullanıp ve ihtiyaç duyulan optimal ağırlıklandırma değerleri bulunmuştur.

## 9.2. Öneriler

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı sırasında takım yapısı, bindirmeli iş parçasının alt plaka içine plastikleştirilmiş malzemenin nüfuzunu etkilemektedir. Böylece, malzeme akışı ve çapak morfolojisi üzerinde diğer takım türlerinin etkisi incelenmelidir.

Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantılarında takım aşınmasının mikroparçacıkları etkisi, incelenecek kritik bir alandır. Yüksek sıcaklık altında ve sürekli/seri üretim durumunda takım malzemesinden kaynak metaline eleman difüzyonunun incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Benzer şekilde, sürtünme takımının aşınması azaltılabilmek için ve onun etkisi giderilmesi için sürtünme karıştırma nokta kaynağı takımının aşınma mekanizması kavrayışı detaylı incelenmelidir.

FSSW'li bağlantındaki mikroskobik malzeme akışının boşlukları, gerilme konsantrasyonu olarak davranacaktır. Aynı şekilde, FSSW'li alüminyum alaşımlarının malzeme akışı ve boşlukları, ve takım türü ile kaynak parametreleri arasındaki bir mevcut olan ilişki incelenebilir. Böylece, kaynak bağlantılarının mekanik özellikleri üzerinde malzeme akışının boşluğunun/hacimsel kusurlarının etkisi ileri araştırmaları gerekmektedir.

Genellikle, otomotiv endüstrisinde ve hızlı trenler üretiminde sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi kullanılmaktadır. Sonuç olarak, kaza olduğu durumda kayıp ve yaralanma sayısını en aza indirmek amacıyla FSSW'li bağlantının çarpışma dayanıklılığı incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Gene M., *The welding of aluminium and its alloys*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2002.
- [2] Weifeng X., Jinhe L., Daolun C., Guohong L., Junshan Y., Tensile Properties and Strain Hardening Behavior of a Friction Stir Welded AA2219 Al Alloy, *Advanced Materials Research*, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.833.
- [3] Sijo J., Sivaraman P. S., Experimental Study on the Effect of Forging Temperature on Mechanical Properties of AA2219, *Proceedings of International Conference on Materials for the Future - Innovative Materials, Processes, Products and Applications*, Tamilnadu India, 6-8 Kasım, 2013.
- [4] Zaki A., *Aluminium Alloys New Trends in Fabrication and Applications*, InTech Publishing, Croatia, 2012.
- [5] Güven I., Gürel Ç., Effects of Initial Temper Condition and Postweld Heat Treatment on the Properties of Dissimilar Friction-Stir-Welded Joints between AA7075 and AA6061 Aluminum Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, **45A**, 3074-3087.
- [6] <http://www.omegaresearchinc.com/> (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2015).
- [7] Taban E., Kaluç E., Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2006, **44**(1), 25-33.
- [8] Taban E., Kaluç E., Comparison between microstructure characteristics and joint performance of 5086-H32 aluminium alloy welded by MIG, TIG and friction stir welding processes, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2007, **45**(5), 241-248.
- [9] James F. K., *The aluminium industry*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2001.
- [10] Christian V., *Corrosion of Aluminium translated by Dr. Martin P. Schmidt*, Elsevier Ltd, Oxford UK, 2004.
- [11] John D., *Aluminium Design and Construction*, Taylor & Francis Group, UK, 1999.
- [12] Roger L., *Fundamentals of aluminium metallurgy-Production, processing and applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2011.

- [13] Venukumar S., Muthukumar S., Swaroop G. Y., Satish V. K., Failure modes and fatigue behavior of conventional and refilled friction stir spot welds in AA 6061-T6 sheets, *International Journal of Fatigue*, 2014, **61**, 93-100.
- [14] Bing H., Yongxian H., Shixiong L., Long W., Jicai F., Guansheng F., AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding, *Materials and Design*, 2013, **51**, 25-33.
- [15] Zhikang S., Xinqi Y., Zhaohua Z., Lei C., Tielong L., Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints, *Materials and Design*, 2013, **44**, 476-486.
- [16] Biju S. N., Phanikumar G., Prasad R. K., Sinha P. P., Improvement of mechanical properties of gas tungsten arc and electron beam welded AA2219 (Al-6 wt-%Cu) alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, DOI: 10.1179/174329307X227210.
- [17] Kishore B. N., Mahesh K. T., D. Pan, J. W., High-temperature mechanical properties investigation of Al-6.5 % Cu gas tungsten arc welds made with scandium modified 2319 filler, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, DOI 10.1007/s00170-012-4297-7.
- [18] Talbot D. E. J., *The Effects of Hydrogen in Aluminium and its Alloys*, Maney Publishing for the Institute of Materials, Minerals and Mining, London, 2004.
- [19] <http://www.aeroprecisionmetals.com/aluminum> (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2016).
- [20] [www.flightmetals.com](http://www.flightmetals.com) (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2016).
- [21] <http://www.aluminiumdesign.net/why-aluminium/properties-of-aluminium/> (Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2015).
- [22] Anooplal A., Nagarajan N. M., Studies of age-hardening heat treatment on duralumin brick blocks for aerospace applications, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2015, **2(8)**, 335-338.
- [23] <http://www.rickardmetals.com/products/2219-aluminum-alloy/> (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2016).
- [24] Dungore P., Agnihotri A., special heat treatment practices for aerospace aluminium alloys, *heat treating progress*, 1 Mayıs/Haziran 2008.
- [25] Yongxian H., Long W., Shixiong L., Jian Z., Guansheng F., In-situ rolling friction stir welding for joining AA2219, *Materials and Design*, 2013, **50**, 810- 816.
- [26] Gurel C., Selcuk M., Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, **23(6)**, 1936-1953.



- [27] Koteswara S. R. R., Madhusudhan R. G., Srinivasa R. K., Kamaraj M., Prasad R. K., Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminium alloy electron beam welds, *materials characterization*, 2005, **55**, 345-354.
- [28] Da Silva A. A. M., Arruti E., Janeiro G., Aldanondo E., Alvarez P., Echeverria A., Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds, *Materials and Design*, 2011, **32**, 2021-2027.
- [29] Yang X. W., Fu T., Li W. Y., Friction Stir Spot Welding: A review on joint macro- and microstructure, property, and process Modelling, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1-11.
- [30] Soran H., Masoud M., Hossein A. R., A novel method for improving fatigue life of friction stir spot welded joints using localized plasticity, *Journal of Materials and Design*, 2013, **53**, 962-971.
- [31] Tozaki Y., Uematsu Y., Tokaji K., A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 844-851.
- [32] Chang-Yong L., Don-Hyun C., Won-Bae L., Sun-Kyu P., Yun-Mo Y., Seung-Boo J., Microstructures and Mechanical Properties of Double-Friction Stir Welded 2219 Al Alloy, *Materials Transactions*, 2008, **49**(4), 885-888.
- [33] Dunn B. D., *The corrosion properties of Spacelab structural alloy aluminium 2219 - T851 (ESA STR-212)*, European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, The Netherlands, 1984.
- [34] Malarvizhi S., Balasubramanian V., Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties, *Transaction of nonferrous metals society of China*, 2011, **21**, 962-973.
- [35] Sindo K., *welding metallurgy second edition*, John Wiley and sons incorporated publishing, New York, 2003.
- [36] Geoff D., *Materials for Automobile Bodies*, Butterworth-Heinemann, Elsevier limited, Oxford UK, 2003.
- [37] <http://www.alueurope.eu/aam/> (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2014).
- [38] <http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/aluminumprocess.html> (Ziyaret tarihi: 14 Aralık 2014).
- [39] Metson J., *Fundamentals of aluminium metallurgy, Production, Processing and applications edited by Rodger Lumley*, Woodhead Publishing, UK, 2011.

- [40] Grard C., Phillips C. M., Phillips H. W. L., *Aluminium and its alloys, their properties, thermal treatment and industrial application*, Constablo & Company Ltd, London, 1921.
- [41] [http://www.aluminum-production.com/process\\_thermodynamic\\_enthalpy.html](http://www.aluminum-production.com/process_thermodynamic_enthalpy.html) (Ziyaret tarihi: 21 Kasım 2014).
- [42] <http://www.drivealuminum.org/> (Ziyaret tarihi: 21 Kasım 2014).
- [43] Jason R., *Advanced materials in automotive engineering*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2012.
- [44] Tapany U. *Aluminium and its alloys, Lecture 2 by Tapany Udomphol*, Suranaree University of Technology, Thailand, 2007
- [45] John E. H., *Aluminum Properties and Physical Metallurgy edited by John E. Hatch*, ASM International, USA, 1984.
- [46] Federico M. M., *Aluminium Structural Design, International Centre For Mechanical Sciences, Courses and Lectures - No. 443*, Springer-Verlag Wien, New York, 2003.
- [47] Jacobs M. H., *Metallurgical Background to Alloy Selection and Specifications for Wrought, Cast and Special Applications*, Training in Aluminium Application Technologies (TALAT) Lecture-1255, European Aluminium Association, Brussels, 1999.
- [48] Muster T. H., Hughes A. E., Thompson G. E., *Copper Distributions in Aluminium Alloys*, Nova Science Publishers, New York, 1-23, 2009.
- [49] <http://www.aluminyumsanayi.com/aluwebsayfam2.html> (Ziyaret tarihi: 21 Kasım 2014).
- [50] <http://mine-engineer.com/mining/minproc/bauxite-processing.htm> (Ziyaret tarihi: 10 Şubat 2015).
- [51] Ambroziak A., Korzeniowski M., Using resistance spot welding for joining aluminium elements in automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2010, X(1), 5-13.
- [52] <http://www.metaldoc.com/metaldoc/paper.aspx?docID=36> (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2015).
- [53] <http://www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2015).
- [54] <http://www.tomago.com.au/raw-materials> (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2015).
- [55] [http://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2013/.../fl0000181.pdf](http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/.../fl0000181.pdf) (Ziyaret tarihi: 14 Mart 2015).

- [56] <http://www.world-aluminium.org/statistics/#data> (Ziyaret tarihi: 22 Ekim 2014).
- [57] Kvande H., *Fundamentals of aluminium metallurgy, Production, Processing and applications edited by Rodger Lumley*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2011.
- [58] <http://www.redmud.org/red-mud/production/> (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2015).
- [59] <http://www.aluminiumville.co.uk/bapro.html> (Ziyaret tarihi: 11 Mart 2015).
- [60] <http://www.aluminium.org.au/recycling> (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2015).
- [61] <http://www.recycling.world-aluminium.org/resources/materials.html> (Ziyaret tarihi: 13 Mart 2015).
- [62] <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417044> (Ziyaret tarihi: 1 Aralık 2015).
- [63] <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/techknowledge/trouble-shooting-for-aluminum-welding.cfm> (Ziyaret tarihi: 29 Ağustos 2014).
- [64] [http://www.weldingengineer.com/Aluminum\\_.htm](http://www.weldingengineer.com/Aluminum_.htm) (Ziyaret tarihi: 29 Ağustos 2014).
- [65] Sun Y.F., Fujii H., Tsuji N., Microstructure and mechanical properties of spot friction stir welded ultrafine grained 1050 Al and conventional grained 6061-T6 Al alloys, *Materials Science & Engineering A*, 2013, **585**, 17-24.
- [66] Badarinarayan H., Yang Q., Zhu S., Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, **49**, 142-148.
- [67] Badarinarayan H., Shi Y., Li X., Okamoto K., Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2009, **49**, 814-823.
- [68] Marcello C., *New Trends and Developments in Automotive Industry*, InTech Publishing, Croatia, 2011.
- [69] Nnamdi A., *Aluminium the challenges ahead*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2002.
- [70] <http://www.siemens.com/plm> (Ziyaret tarihi: 20 Şubat 2015).
- [71] Chowdhury S. H., Chen D. L., Bhole S. D., Cao X., Wanjara P., Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys, *Materials Science & Engineering A*, 2012, **556**, 500-509.

- [72] Sun Y. F., Fujii H., Takaki N., Okitsu Y., Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique, *Materials and Design*, 2013, **47**, 350-357
- [73] Kaluç E., Taban E., *Sürtünen eleman ile kaynak (FSW) yöntemi*, Ankamat Matbacılık Limited, Türkiye, 2007.
- [74] Kaluc E., Taban E., Investigation on Mechanical and Microstructural Properties of TIG, MIG and FS Welded 5083-5086 Aluminium Alloys, *DVS Annual Welding Conference*, Essen, Germany, 12 Eylül 2005.
- [75] <https://www.lightmetalage.wordpress.com/category/online-exclusives/> (Ziyaret tarihi: 14 Mart 2015).
- [76] <http://www.pml.de/anenewsletter.php?L=2> (Ziyaret tarihi: 14 Mart 2015).
- [77] <http://www.aluminiumtoday.com/news/view/study-aluminium-shown-to-last-longer-in-buildings> (Ziyaret tarihi: 16 Eylül 2015).
- [78] <http://articles.sae.org/13509/> (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2015).
- [79] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/progress-in-friction-stir-welding-of-aluminium-and-steel-for-marine-applications-october-2003/> (Ziyaret tarihi: 14 Mart 2015).
- [80] <http://www.gosubscriber.com/2013/08/the-famous-types-trains-of-world.html> (Ziyaret tarihi: 15 Mart 2015).
- [81] Wei Z., *Problems in Welding of High Strength Aluminium Alloys*, Singapore Welding Society Newsletter, Singapore, September, 1999.
- [82] Ron C., Alcan B., *Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys*, Training in aluminium application technologies (TALAT), Basic Level-Lecture 1501, European Aluminium Association, Brussels, 1994.
- [83] <http://www2.mazda.com/en> (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2015).
- [84] Darwish S. M., Al-Dekhial S. D., Micro-hardness of spot welded (B.S. 1050) commercial aluminium as correlated with welding variables and strength attributes, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **91**, 43-51.
- [85] <http://www.hobartbrothers.com/index.php?mact=News,cntnt01,print,0&cntnt01articleid=172&cntnt01showtemplate=false&cntnt01returnid=523> (Ziyaret tarihi: 29 Ağustos 2014).
- [86] AlShaer A. W., Li L., Mistry A., The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture, *Optics and Laser Technology*, 2014, **64**, 162-171.

- [87] <http://www.metalformingmagazine.com/magazine/article.asp?aid=9112>  
(Ziyaret tarihi: 29 Ağustos 2014).
- [88] Weller D., Bezençon C., Stritt P., Weber R., Graf T., Remote laser welding of multi-alloy aluminum at close-edge position, *Physics Procedia*, 2013, **41**, 164-168.
- [89] Long W., Yongxian H., Zongliang L., Shixiong L., Jicai F.: Effect of self-support friction stir welding on microstructure and microhardness of 6082-T6 aluminum alloy joint, *Materials and design*, 2014, **55**, 197-203.
- [90] Lakshminarayanan A. K., Balasubramanian V., Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel, *Metals and Materials International*, 2011, **17**(6), 969-981.
- [91] Shigeki H., Harsha B., Kazutaka O., Toshio T., Tsuyoshi K., Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 1455-1463.
- [92] Yahya B., Mustafa K. B., Application of Taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloys, *Materials and Design*, 2013, **51**, 513-521.
- [93] Gerlich A. P., Shibayanagi T., Grain boundary sliding during friction stir spot welding of an aluminum alloy, *Scripta Materialia*, 2009, **60**(4), 236-239.
- [94] Chi-Sung J., Sung-Tae H., Yong-Jai K., Hoon-Hwe C., Heung N. H., Material properties of friction stir spot welded joints of dissimilar aluminum alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2012, **22**, s605-s613.
- [95] D'Urso G., Thermo-mechanical characterization of friction stir spot welded AA6060 sheets: Experimental and FEM analysis, *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, **17**, 108-119.
- [96] Kathryn J. D., Chase D. C., Alvin M. S., George E. C., Ultrasonic thermometry for friction stir spot welding, *Measurement*, 2014, **49**, 226-235.
- [97] Cabibbo M., Forcellese A., El Mehtedi M., Simoncini M., Double side friction stir welding of AA6082 sheets: Microstructure and nanoindentation characterization, *Material science and engineering A*, 2014, **590**, 209-217.
- [98] Lacki P., Kucharczyk Z., Śliwa R.E., Gałaczyński T., Effect of Tool Shape on Temperature Field in Friction Stir Spot Welding, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, **58**(2), 595-599.
- [99] Pierluigi F., Francesco V., Vincenzo V., Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Welded joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, **81**, 17-25

- [100] Srinivasa D. T., Ronald F. G., Mechanical characterization of spot friction stir welded joints in aluminum alloys by combined experimental/numerical approaches Part I: Micromechanical studies, *Materials characterization*, 2009, **60**, 1342-1351
- [101] Yuan W., Mishra R. S., Webba S., Chen Y. L., Carlson B., Herling D. R., Grant G. J., Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, **211**, 972-977.
- [102] Colligan K. J., *Solid state joining-fundamentals of friction stir welding in Failure mechanisms of advanced welding processes Edited by Xin Sun*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2010.
- [103] Chase D. C., Brian T. G., David R. D., Alvin M. S., George E. C., A method for double-sided friction stir spot welding, *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, **16**, 241-247.
- [104] Tier M. D., Rosendo T. S., Dos-Santos J. F., Huber N., Mazzaferro J. A., Mazzaferro C. P., Strohaecker T. R., The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **213**, 997-1005.
- [105] Tran V. X., Pan J., Pan T., Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens, *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**, 2175-2190.
- [106] Zhikang S., Xinqi Y., Zhaohua Z., Lei C., Yuhuan Y., Mechanical properties and failure mechanisms of friction stir spot welds of AA 6061-T4 sheets, *Materials and Design*, 2013, **49**, 181-191.
- [107] Lin P. C., Pan J., Pan T., Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool, *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**, 74-89.
- [108] Lin P. C., Pan J., Pan T., Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool, *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**, 90-105.
- [109] Su Z. M., He R. Y., Lin P. C., Dong K., Fatigue analyses for swept friction stir spot welds in lap-shear specimens of alclad 2024-T3 aluminum sheets, *International Journal of Fatigue*, 2014, **61**, 129-140.
- [110] Zhaohua Z., Xinqi Y., Jialong Z., Guang Z., Xiaodong X., Binlian Z., Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, *Materials and Design*, 2011, **32**, 4461-4470.

- [111] Leonardo C. C., Uceu F. H. S., Jorge F. S., Nelson G. A., Parameters optimization for friction spot welding of AZ31 magnesium alloy by Taguchi method, *Journal Soldagem & Inspeção*, 2012, **17**(1), 26-31.
- [112] Binbin K., Yifu S., Wenhua C., Xin Y., Haisheng X., Jicheng G., Jingqing Z., The dissimilar friction stir lap welding of 1A99 Al to pure Cu using Zn as filler metal with “pinless” tool configuration, *Materials and Design*, 2014, **68**, 54-62.
- [113] <http://www.metalworkingworldmagazine.com/friction-stir-spot-welding-applied-to-tp-aa6061-t4-sheet-metals/> (Ziyaret tarihi: 20 Ekim 2015).
- [114] [http://www.m-osaka.com/fsw/en/fsw/about\\_fsw.html](http://www.m-osaka.com/fsw/en/fsw/about_fsw.html) (Ziyaret tarihi: 21 Ekim 2015).
- [115] Chen Y.C., Gholinia A., Prangnell P.B., Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet, *Materials Chemistry and Physics*, 2012, **134**, 459-463.
- [116] Chen Y.C., Liu S.F., Bakavos D., Prangnell P.B., The effect of a paint bake treatment on joint performance in friction stir spot welding AA6111-T4 sheet using a pinless tool, *Materials Chemistry and Physics*, 2013, **141**, 768-775.
- [117] Mumin T., Hakan A., Celalettin Y., Nurettin Y., Ali B., The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array, *Materials and Design*, 2014, **63**, 789-797.
- [118] <http://www.alueurope.eu/> (Ziyaret tarihi: 12 Şubat 2015).
- [119] Huijie L., Yunqiang Z., Xingye S., Lilong Y., Juncai H., Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded 2A12-T4 Aluminum Alloy, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1-10.
- [120] Mohamed M., Mohamed M., Lahcene B., Abdellatif I., Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys, *Materials & Design*, 2010, **31**(6), 3023-3028.
- [121] Nathan D. S., High Speed Friction Stir Spot Welding on DP 980 Steel: Joint Properties and Tool Wear, *All Theses and Dissertations*, 2012, paper 3003.
- [122] Saleem U. K., Thomas W., Norbert E., Thermo-Mechanical Investigations during Friction Stir Spot Welding (FSSW) of AA6082-T6, *Welding in the World*, 2010, **54**(5-6), R134-R146.
- [123] Rai R., De A., Bhadeshi H. K. D. H., DebRoy T., Review: friction stir welding tools, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, **16**(4), 325-342.

- [124] <http://www.huysindustries.com/index.php?id=friction-stir-spot-welding> (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2016).
- [125] [http://www.kuka-systems.com/en/technologies/friction\\_stir\\_welding/](http://www.kuka-systems.com/en/technologies/friction_stir_welding/) (Ziyaret tarihi: 24 Nisan 2016).
- [126] <http://www.twi-global.com/> (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2016).
- [127] <http://www.assemblymag.com/articles/93337-friction-stir-spot-welding> (Ziyaret tarihi: 21 Nisan 2016).
- [128] <http://www.bil-ibs.be/en/onderzoeksproject/innojoin-development-and-evaluation-advanced-welding-technologies-multi-material-d> (Ziyaret tarihi: 13 Nisan 2016).
- [129] [https://www.annamalaiuniversity.ac.in/deptfacil\\_0164.php?deptcode=0164](https://www.annamalaiuniversity.ac.in/deptfacil_0164.php?deptcode=0164) (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2016).
- [130] <http://www.fswelding.com/application-of-friction-stir-welding-in-aircraft-structures/fsw-application> (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2016).
- [131] Yang C. W., Hung F. Y., Lui T. S., Chen L. H., Juo J. Y., Weibull Statistics for Evaluating Failure Behaviors and Joining Reliability of Friction Stir Spot Welded 5052 Aluminum Alloy, *Materials Transactions*, 2009, **50**(1), 145-151.
- [132] Choi D. H., Ahn B. W., Lee C. Y., Yeon Y. M., Keun S., Jung S. B., Effect of Pin Shapes on Joint Characteristics of Friction Stir Spot Welded AA5J32 Sheet, *Materials Transactions*, 2010, **51**(5), 1028-1032.
- [133] Rosendo T., Parra B., Tier M.A.D., Da Silva A.A.M., Dos Santos J.F., Strohaecker T.R., Alcântara N.G., Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy, *Materials and Design*, 2011, **32**, 1094-1100.
- [134] Da Silva A.A.M., Arruti E., Janeiro G., Aldanondo E., Alvarez P., Echeverria A., Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds, *Materials and Design*, 2011, **32**, 2021-2027.
- [135] Sergio T. A., Ana P. C. C., Luciano B., Jorge F. S., Sebastiao E. K., Nelson G. A. M., Preliminary Investigation of the Microstructure and Mechanical Behaviour of 2024 Aluminium Alloy Friction Spot Welds, *Materials Transactions*, 2011, **52**(5), 985-991.
- [136] Tobias M., Wulfsberg J., Hameister H., Marschner R., Influence of Tool Wear on Quality Criteria for Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) Process, New Production Technologies in Aerospace Industry, *5th Machining Innovations Conference (MIC 2014)*, *Procedia CIRP*, 2014, **24**, 108-113.



- [137] Uematsu Y., Tokaji K., Tozaki Y., Kurita T., Murata S., Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy, *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**, 1956-1966.
- [138] Rostamiyan Y., Seidanloo A., Sohrabpoor H., Teimouri R., Experimental studies on ultrasonically assisted friction stir spot welding of AA6061, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, **15**(2), 335-346.
- [139] Badarinarayan H., Hunt F., Okamoto K., *Friction Stir Welding and Processing*, ASM international, New York, 2007.
- [140] Wenya L., Infeng L., Zhihan Z., Dalu G., Weibing W., Chunlin D., Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect, *Materials and Design*, 2014, **62**, 247-254.
- [141] Chiou Y. C., Liu C. T., Lee R. T., A pinless embedded tool used in FSSW and FSW of aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **213**, 1818-1824.
- [142] Wanga D. A., Chao C. W., Lin P. C., Uan J. Y., Mechanical characterization of friction stir spot microwelds, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 1942-1948.
- [143] Bozzi S., Helbert-Etter A.L., Baudin T., Klosek V., Kerbiguet J.G., Criqui B., Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 1429-1435.
- [144] Lathabai S., Painter M. J., Cantin G. M. D., Tyagi V. K., Friction spot joining of an extruded Al–Mg–Si alloy, *Scripta Materialia*, 2006, **55**, 899-902.
- [145] Moslem P., Alireza K., Hamidreza N., Alireza S. R., An investigation on mechanical and metallurgical properties of 2024-T3 aluminum alloy spot friction welds, *Int J Adv Manuf Technol*, DOI: 10.1007/s00170-015-6997-2.
- [146] Yang Q., Mironov S., Sato Y. S., Okamoto K., Material flow during friction stir spot welding, *Materials Science and Engineering A*, 2010, **527**, 4389-4398.
- [147] Ranjit K. R., *Design of experiments using the Taguchi Approach 16 steps to product and process improvement*, John Wiley and sons incorporated, New York, 2001.
- [148] Sergio T. A., Ana P. C. C., Luciano B., Jorge F. S., Sebastiao E. K., Nelson G. A. M., Preliminary Investigation of the Microstructure and Mechanical Behaviour of 2024 Aluminium Alloy Friction Spot Welds, *Materials Transactions*, 2011, **52**(5), 985-991.
- [149] Benyounis K. Y., Olabi A. G., Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches- A reference guide, *Advances in engineering softwares*, 2008, **39**, 483-496.

- [150] Helder J. C. S, Messias B. S., Cinthia B. M., Fernando L. A., Fabrício J. P., Ubirajara R. F., Roberto N. D., Carlos E. S., Robust Design and Taguchi Method Application, *InTech Publishing*, DOI: 10.5772/56580
- [151] Athreya S., Venkatesh Y. D., Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation, *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 2012, **1**(3), 13-19.
- [152] Kazancoglu Y., Esmé U., Bayramoglu M., Guven O., Ozgun S., multi-objective optimization of the cutting forces in turning operations using the grey-based taguchi method, *Materials and technology*, 2011, **45**(2), 105-110.
- [153] Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y., *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons Incorporated, UK, 2005.
- [154] Mustafa K. B., Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene, *Materials and Design*, 2012, **35**, 113-119.
- [155] [https://www.controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Design\\_of\\_experiments\\_via\\_taguchi\\_methods:\\_orthogonal\\_arrays](https://www.controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/Design_of_experiments_via_taguchi_methods:_orthogonal_arrays) (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2015).
- [156] <http://www.nutek-us.com/wp-doe.html> (Ziyaret tarihi: 24 Şubat 2015).
- [157] <http://www.isixsigma.com/methodology/robust-design-taguchi-method/introduction-robust-design-taguchi-method/> (Ziyaret tarihi: 3 Mart 2015).
- [158] <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/mda/fea/sankar/chap2.html> (Ziyaret tarihi: 3 Mart 2015).
- [159] Wysk R. A., Niebel B. W., Cohen P. H., and Simpson T. W., *Manufacturing Processes: Integrated Product and Process Design*, McGraw Hill, New York, 2000.
- [160] <http://www.brighthubpm.com/six-sigma/88546-taguchi-loss-function-definition-and-example/> (Ziyaret tarihi: 2 Mart 2016).
- [161] Khosrow D., Quality control, robust design, and the Taguchi method, *AT & T Bell Laboratories*, DOI: 10.1007/1978-1-4684-1472-1
- [162] <http://www.maaw.info/ArticleSummaries/KimLiaoŞekil1.gif> (Ziyaret tarihi: 2 Mart 2016).
- [163] Ranjit K. R., *A primer on the Taguchi method second edition*, Society of Manufacturing Engineers, USA, 2010.
- [164] Farhad K., Mohsen M., Abbas H., Application of Taguchi Method and ANOVA Analysis for Simultaneous Optimization of Machining Parameters

and Tool Geometry in Turning, World Academy of Science, *Engineering and Technology*, 2011, **74**, 82-85.

- [165] Lakshminarayanan A. K., Balasubramanian V., Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique, *Transaction of nonferrous metals society of China*, 2008, **18**, 548-554.
- [166] Fung C. P., Kang P. C., Multi-response optimization in friction properties of PBT composites using Taguchi method and principal component analysis, *Journal of materials processing technology*, 2005, **170**, 602-610.
- [167] Mohammad H. S., Mostafa A., Abolfazi K., Parviz A., optimization of microstructural and mechanical properties of friction stir welding using cellular automation and Taguchi method, *Materials and design*, 2014, **64**, 660-666.
- [168] Roy R. K., *Design of Experiment Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [169] Jailani H. S., Rajadurai A., Mohan B., Kumar A. S., Sornakumar T., Multi-response optimisation of sintering parameters of Al-Si alloy/fly ash composite using Taguchi method and grey relational analysis, *Int. J Adv. Manuf. Technol.*, DOI: [10.1007/s00170-009-1973-3](https://doi.org/10.1007/s00170-009-1973-3)
- [170] Surendra K. S., Sharad K. P., Optimization of Multi-Objective Response during CNC Turning using Taguchi-Fuzzy Application, *12th global congress on manufacturing and management, GCMM 2014*, Vellore, India, 8-10 Aralık 2014.
- [171] Zulfiqar Ali Raza, Naseer Ahmad, Shahid Kamal: Multi-response optimization of rhamnolipid production using Grey rational analysis in Taguchi method, *biotechnology reports*, 2014, **3**, 86-94.
- [172] Karnwal A., Hasan M. M., Kumar N., Siddiquee A. N., Khan Z. A., multi response optimization of diesel engine performance parameters using Thumba biodiesel-diesel blend by applying Taguchi method and grey relational analysis, *International Journal of Automotive Technology*, DOI: [10.1007/s12239-011-0070-4](https://doi.org/10.1007/s12239-011-0070-4)
- [173] <http://www.mne.psu.edu/simpson/courses/ie466/ie466.robust.handout.PDF> (Ziyaret tarihi: 3 Mart 2015).
- [174] [https://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV\\_PRA\\_TAGUCHI\\_INTRO.htm](https://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm) (Ziyaret tarihi: 3 Mart 2015).
- [175] Raghu N. K., Eric S. L., James J. F., Taguchi's Orthogonal Arrays Are Classical Designs of Experiments, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1991, **96**(5), 577-591.

- [176] Durairaj M., Sudharsun D., Swamynathan N., Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade, *Procedia Engineering*, 2013, **64**, 868-877.
- [177] Shouvik G., Prasanta S., Goutam S., Tribological Performance Optimization of Al-7.5% SiCp Composites Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis, *Journal of Composites*, DOI: [10.1155/2013/274527](https://doi.org/10.1155/2013/274527).
- [178] Suman K. D., Prasanta S., Study of Potentiodynamic Polarization Behaviour of Electroless Ni-B Coatings and Optimization using Taguchi Method and Grey Relational Analysis, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, DOI: [10.4236/jmmce.2011.1014103](https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.1014103).
- [179] Jayaraman P., Kumar M. L., Multi-response Optimization of Machining Parameters of Turning AA6063 T6 Aluminium Alloy using Grey Relational Analysis in Taguchi Method, *Procedia Engineering*, 2014, **97**, 197-204.
- [180] Reddy V. C., Deepthi N., Jayakrishna N., Multi response optimization of wire EDM on aluminium HE30 by using Grey relational analysis, *Material Today: Proceedings*, 2015, **2**(4-5), 2548-2554.
- [181] Lohithaksha M Maiyar, Dr.R.Ramanujam , K.Venkatesan , Dr.J.Jerald: Optimization of Machining Parameters for End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis, *Procedia Engineering*, 2013, **64**, 1276-1282.
- [182] Bobbili R., Madhu V., Gogia A. K., Multi response optimization of wire-EDM process parameters of ballistic grade aluminium alloy, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, **18**(4), 720-726.
- [183] Milan K. D., Kaushik K., Tapan K. B., Prasanta S., optimization of process parameters in plasma arc cutting of EN 31 steel based on MRR and multiple roughness characteristics using Grey relational analysis, *Procedia Materials Science*, 2014, **5**, 1550-1559.
- [184] Mustaji M. I., Prasetyo T., Ilhamsah H. A., R. S. Sugiono, Optimizing Multi Response Green Machining using Taguchi Method Based on Grey Relational Analysis, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **747**, 277-281.
- [185] Palani K., Elanchezhian C., Multi Response Optimization of Process Parameters on AA8011 Friction Stir Welded Aluminium Alloys using RSM Based GRA Coupled With DEA, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, **813-814**, 446-450.
- [186] Sanjay K., Sudhir K., Multi-response optimization of process parameters for friction stir welding of joining dissimilar Al alloys by gray relation analysis and Taguchi method, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2014, **37**(2), 665-674.
- [187] Hari S., Abhishek K., Sudhir K., Multi Response Optimization in Drilling Al6063/SiC/15% Metal Matrix Composite, *International Journal of*

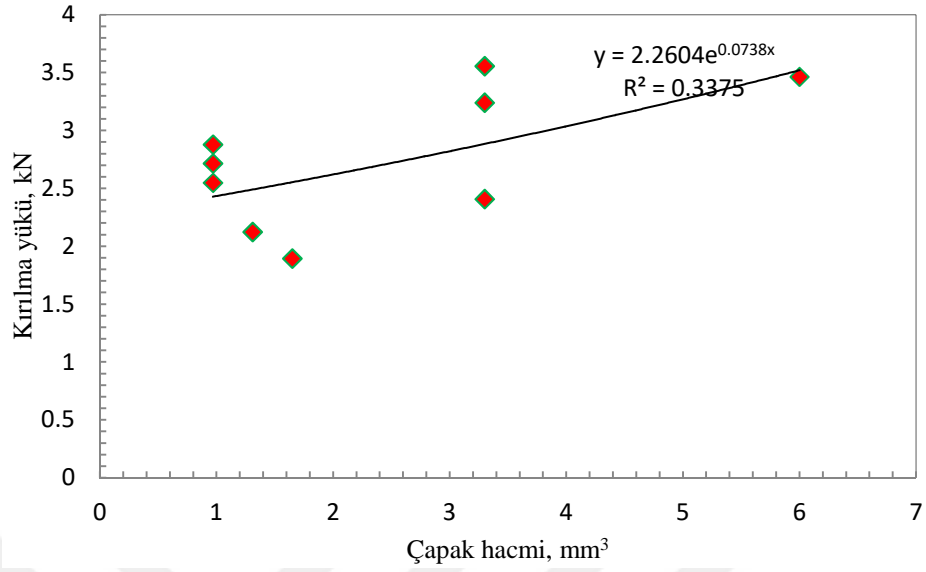
*Chemical, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2014, **8**(4), 281-286.

- [188] Noorul-Haq A., Marimuthu P., Jeyapaul R., Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method, *Int J Adv Manuf Technol.*, 2008, **37**, 250-255.
- [189] Nik-Mizamzul M., Shahrul K., Othman A. R., Hybrid Integration of Taguchi Parametric Design, Grey Relational Analysis, and Principal Component Analysis Optimization for Plastic Gear Production, *Chinese Journal of Engineering*, 2014, **2014**, 1-11.
- [190] I. T. Jolliffe: *Principal component analysis - second edition*, Springer-Verlag New York, 2002.
- [191] [http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student\\_tutorials/principal\\_components.pdf](http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf) (Ziyaret tarihi: 2 Mart 2016).
- [192] <http://www.arxiv.org/pdf/1404.1100.pdf> (Ziyaret tarihi: 3 Mart 2016).
- [193] Elatharasan G., Senthil-Kumar V. S., Modelling and optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminium alloys using RSM, *Procedia Engineering*, 2012, **38**, 3477-3481.
- [194] Rambabu G., Naik D. B., Venkata R. C. H., Srinivasa R. K., Reddy G. M., Optimization of friction stir welding parameters for improved corrosion resistance of AA2219 aluminium alloy joints, *Defence technology*, 2015, **11**, 330-337
- [195] Mustafa F. F., Kadhym A. H., Yahya H. H., tool geometries optimization for friction stir welding of aa6061-t6 aluminum alloy T-joint using Taguchi method to improve the mechanical behaviour, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, DOI: [10.1115/1.4029921](https://doi.org/10.1115/1.4029921)
- [196] Dinaharan I., Murugan N., Optimization of Friction Stir Welding Process to Maximize Tensile Strength of AA6061/ZrB2 In-Situ Composite Butt Joints, *Met. Mater. Int.*, 2012, **18**(1), 135-142.
- [197] Elanchezhian C., Ramnath B. V., Venkatesan P., Sathish S., Vignesh T., Siddharth R.V., Vinay B., Gopinath K., Parameter Optimization of Friction Stir Welding Of AA8011-6062 Using Mathematical Method, *Procedia Engineering*, 2014, **97**, 775-782.
- [198] Kesharwani R. K., Panda S. K., Pal S. K., Multi Objective Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Joining of Two Dissimilar Thin Aluminum Sheets, *Procedia Materials Science*, 2014, **6**, 178-187.
- [199] <http://www.kaiseraluminum.com> (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2016).

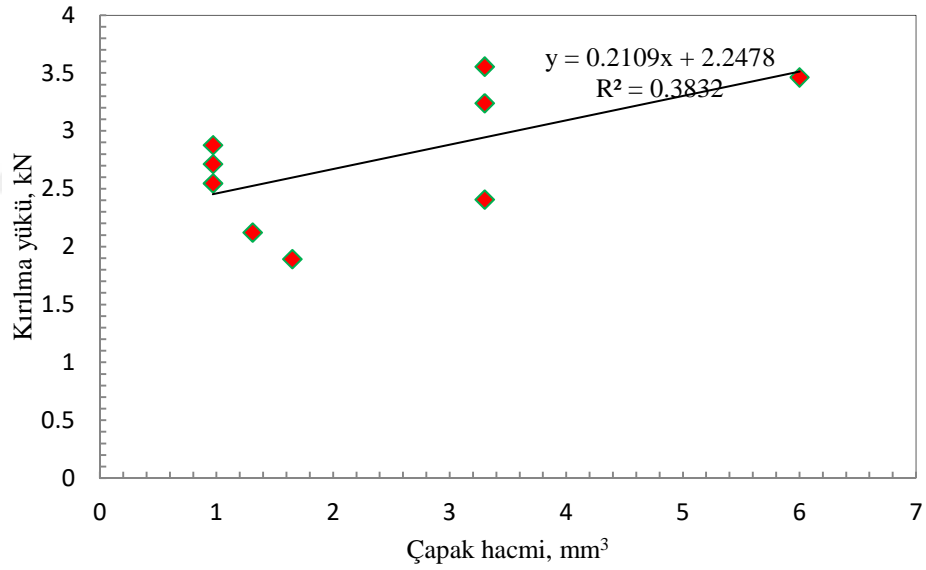
- [200] Ding J., Wang D., Wang Y., Du H., Effect of post weld heat treatment on properties of variable polarity TIG welded AA2219 aluminium alloy joints, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2014, **24**, 1307-1316
- [201] Arora K.S., Pandey S., Schaper M., Kumar R., Microstructure Evolution during Friction Stir Welding of Aluminum Alloy AA2219, *Journal of Material Science Technology*, 2010, **26**(8), 747-753.
- [202] Koteswara R. S. R., Reddy G. M, Srinivasa R. K., Kamaraj M., Rao P. K., Gas Tungsten Arc Welded AA2219 Alloy using Scandium Containing Fillers Mechanical and Corrosion Behavior, *Trans. Indian Inst. Met*, 2004, **57**(5), 451-459.
- [203] Kumar V. A., Karthikeyan M. K., Gupta R. K., Kumar P. R., Sinha P. P., Equal Channel Angular Pressing of Al Alloy AA2219, *Advanced Materials Research*, 2009, **67**, 53-58.
- [204] Jha A. K., Diwakar V., Sreekumar K., Metallurgical analysis of burst tested aluminium alloy AA 2219 miniature assembly, *Indian journal of engineering and material sciences*, 2010, **17**, 67-71.
- [205] <http://www.tritonalloysinc.com/aluminum/aluminum-plate-aluminum-plates/aluminum-plate-type-2219-plate/> (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2016).
- [206] <http://www.aubertduval.com> (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2016).
- [207] [http://gangsteel.net/product/Aluminium/aluminium\\_series\\_2/2015/0210/Aluminium/plate/2219.html](http://gangsteel.net/product/Aluminium/aluminium_series_2/2015/0210/Aluminium/plate/2219.html) (Ziyaret tarihi: 6 Şubat 2016).
- [208] Rajasekaran N. R., Sampath V. , Effect of In-Situ TiB<sub>2</sub> Particle Addition on the Mechanical Properties of AA 2219 Al Alloy Composite, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2011, **10**(6), 527-534.
- [209] Nayan N., Murty S. V. S., Jha A. K., Pant B., Sharma S.C., George K. M., Sastry G.V.S., Mechanical properties of aluminium–copper–lithium alloy AA2195 at cryogenic temperatures, *Materials and Design*, 2014, **58**, 445-450
- [210] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6155> (Ziyaret tarihi: 21 Şubat 2016).



## EK A. Pimsiz kaynaklarda yükü kırılma yükü ve çapak hacmi arasındaki ilişki

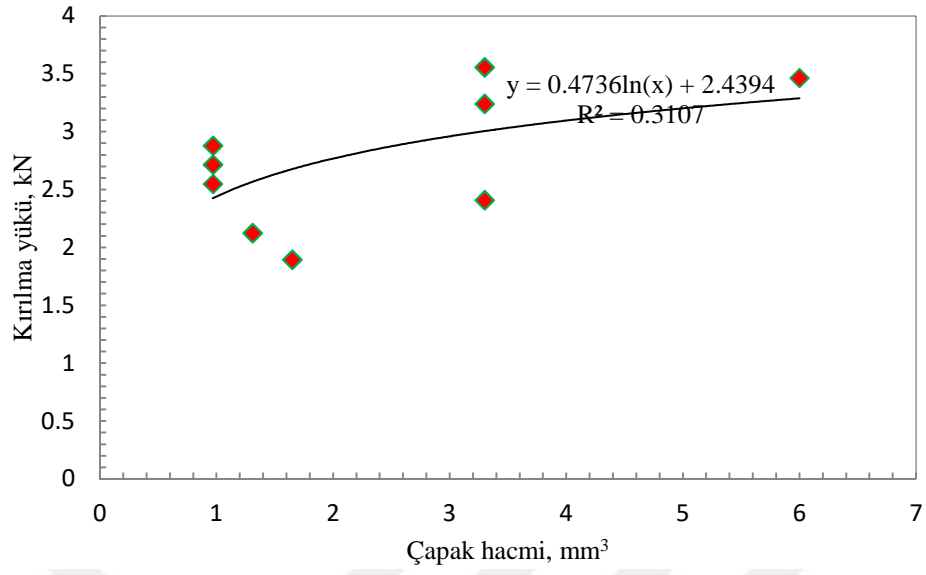


Şekil 1. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında üstel eğilim/regresyon

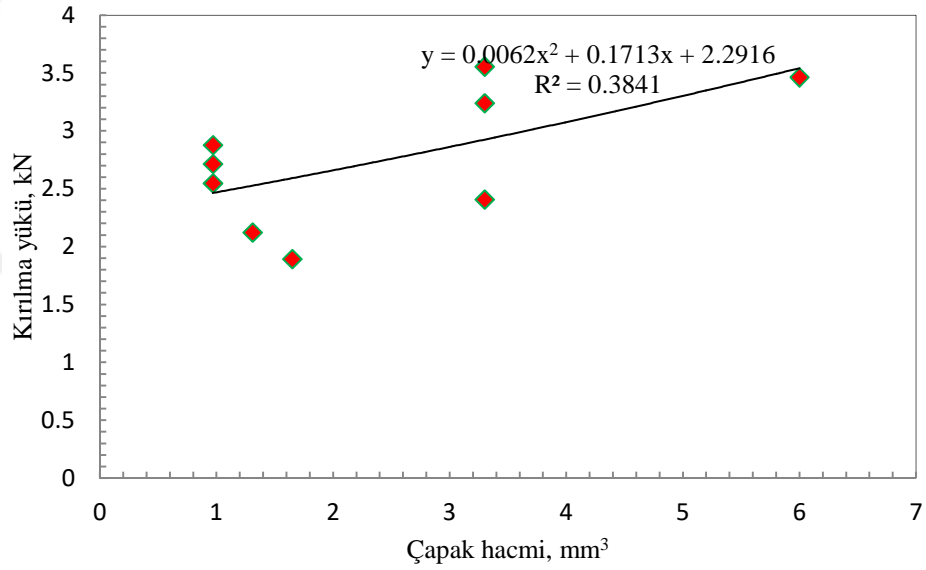


Şekil 2. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında doğrusal eğilim

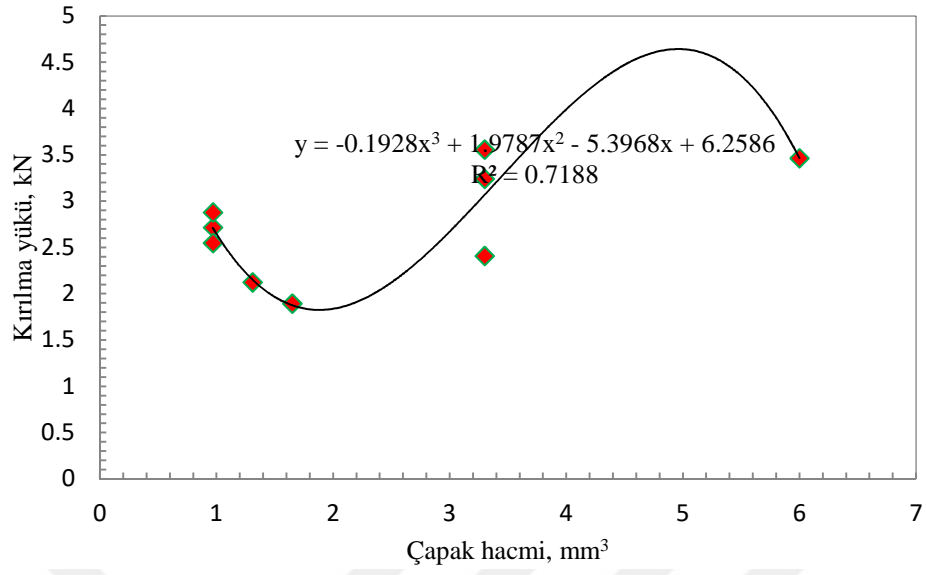




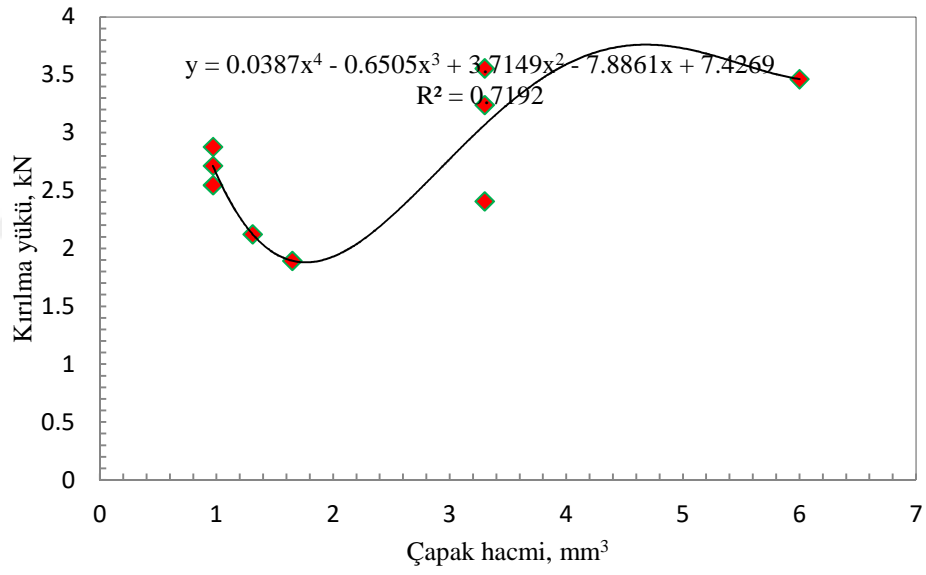
Şekil 3. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında logaritmik eğilim



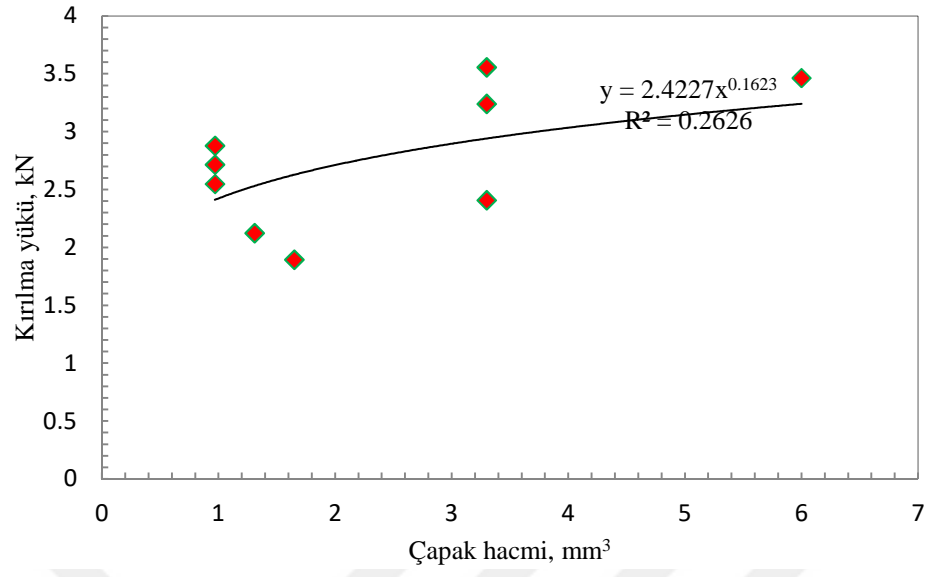
Şekil 4. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında ikinci derece polinom eğilim



Şekil 5. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında üçüncü derece polinom eğilim

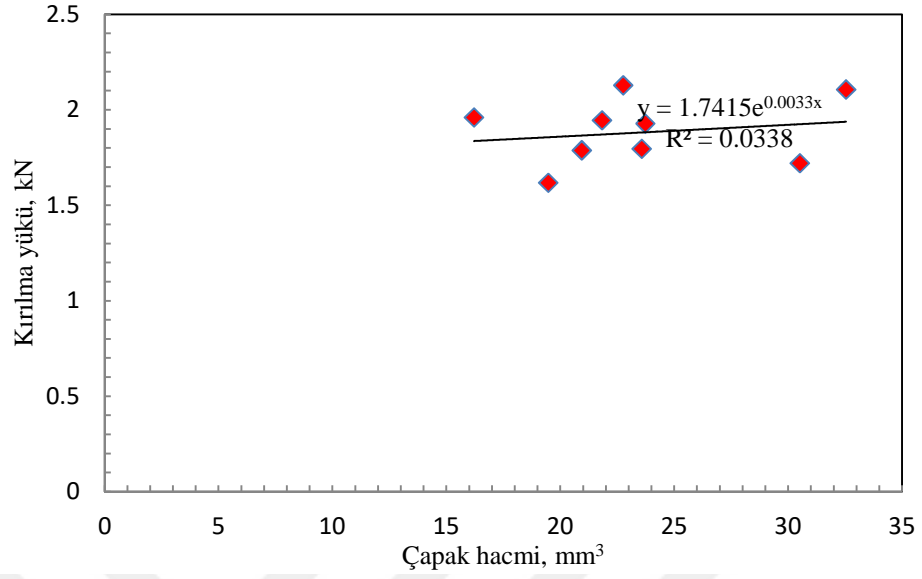


Şekil 6. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında dördüncü derece polinom eğilim

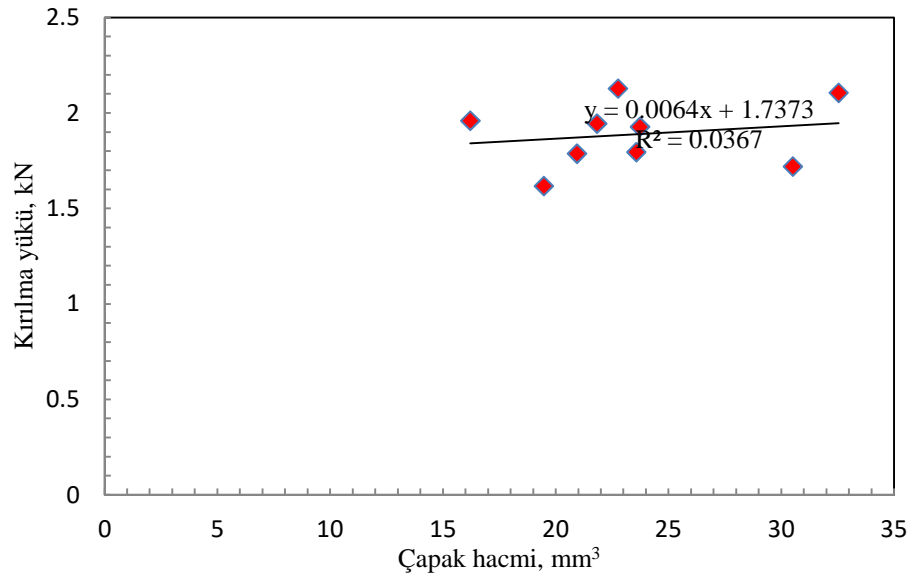


Şekil 7. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında güç eğilim

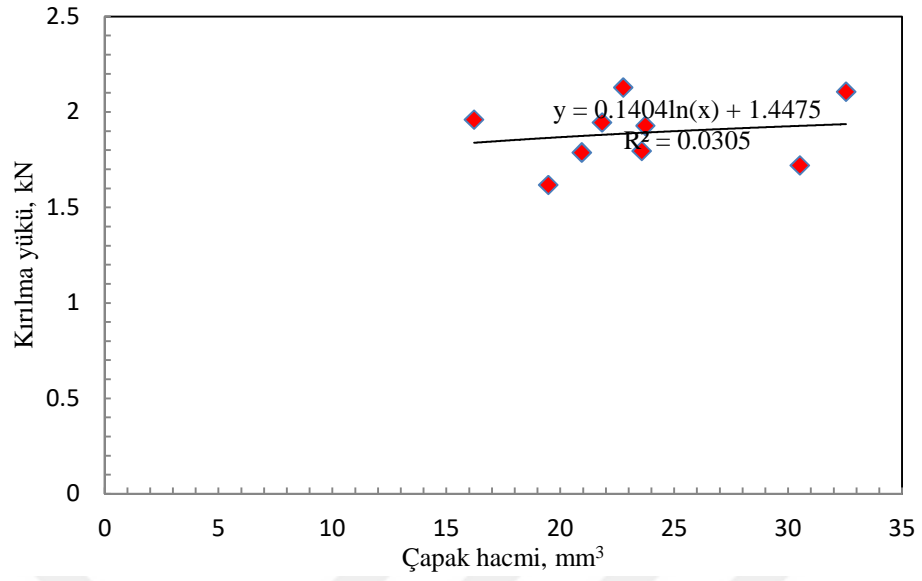
## Ek B. Konik pimli kaynaklarda kırılma yükü ve çapak hacmi arasındaki ilişki



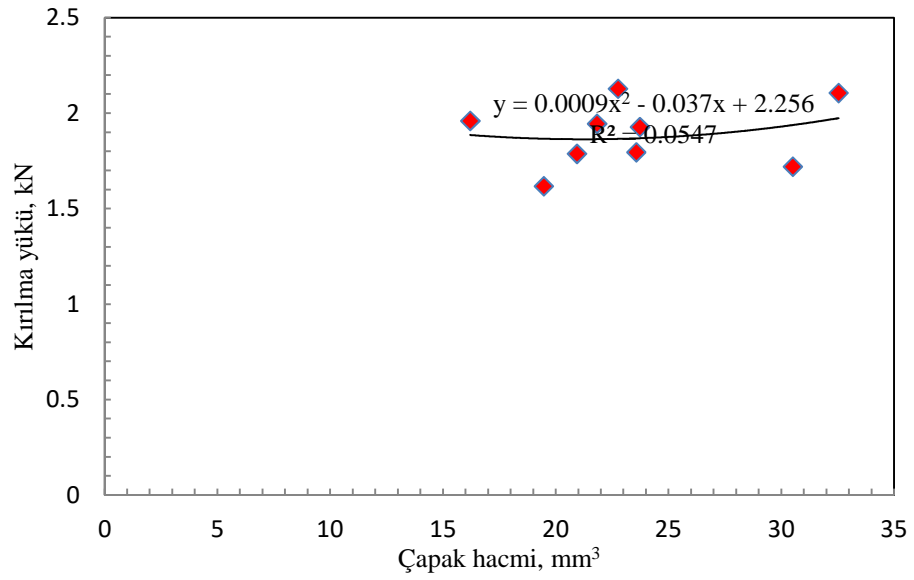
Şekil 8. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında üstel eğilim



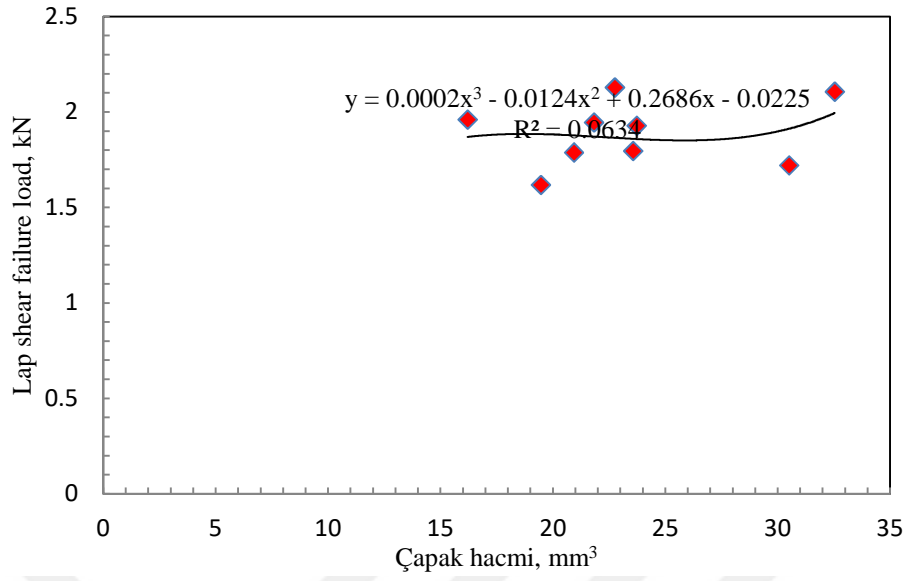
Şekil 9. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında doğrusal eğilim



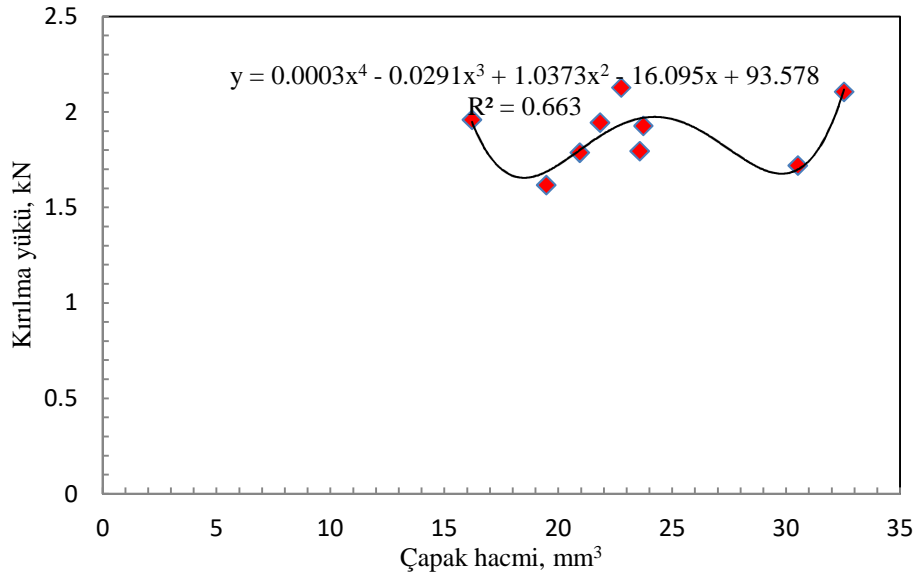
Şekil 10. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında logaritmik eğilim



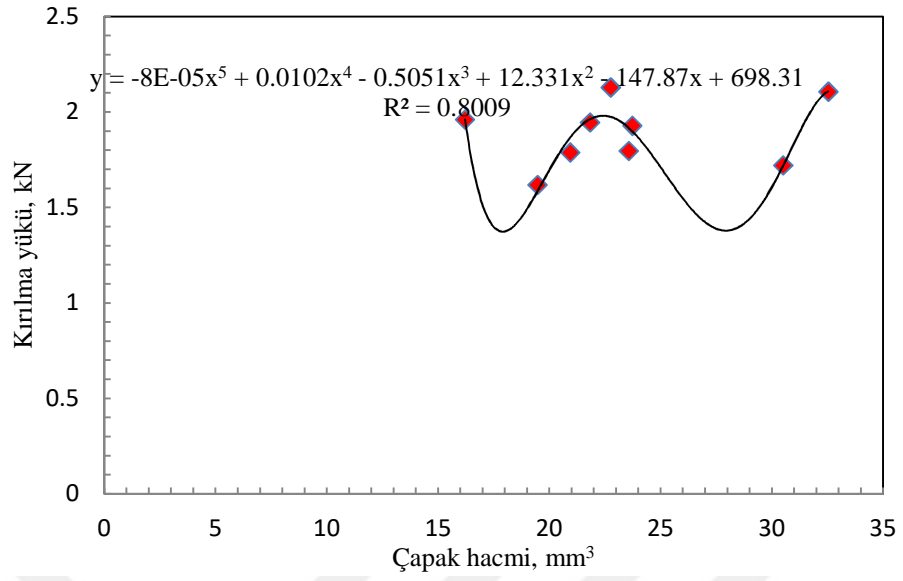
Şekil 11. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında ikinci derece polinom eğilim



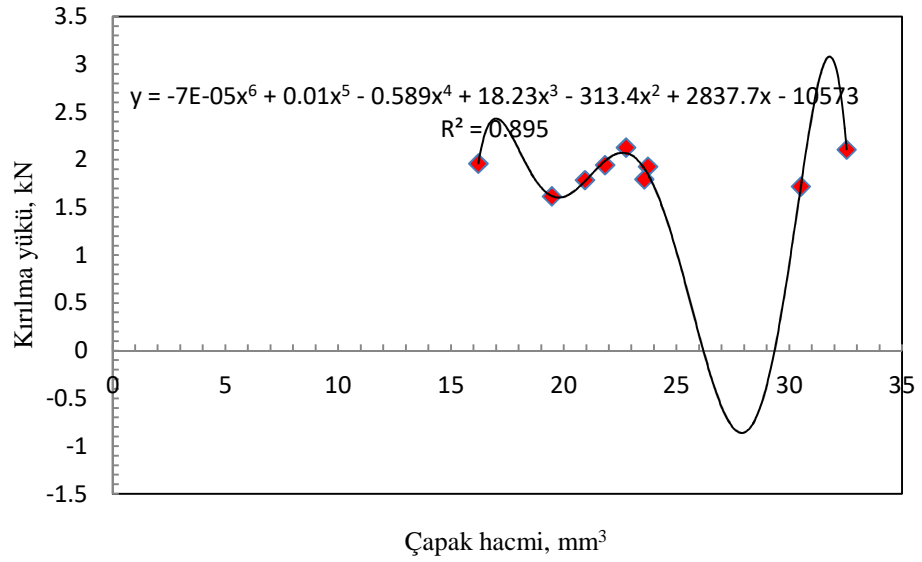
Şekil 12. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında üçüncü derece polinom eğilim



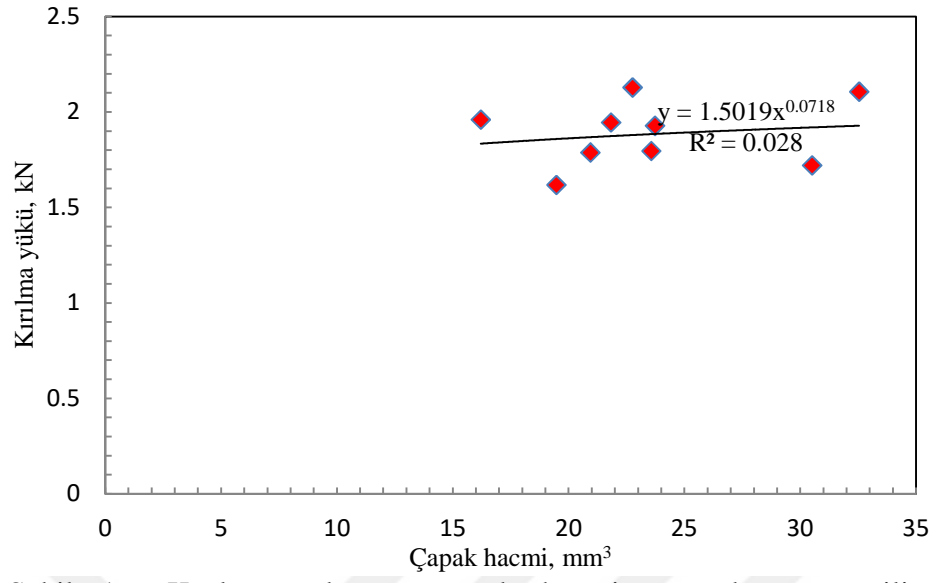
Şekil 13. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında dördüncü derece polinom eğilim



Şekil 14. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında beşinci derece polinom eğilim



Şekil 15. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında altıncı derece polinom eğilim



Şekil 16. Kırılma yükü ve çapak hacmi arasında güç eğilim



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Ojo O. O.**, Taban E., Kaluç E., Understanding the role of welding parameters and tool profile on the morphology and properties of expelled flash of spot welds, *Materials & design*, 2016, **108**, 518-528.

**Ojo O. O.**, Taban E., Kaluç E., Friction stir spot welding of aluminium alloys: A recent review, *Materials testing*, 2015, **57**(7-8), 609-627.

**Ojo O. O.**, Taban E., Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys, *Welding in the World*, 2016, 1-43.

Taban E., Kaluç E., **Ojo O. O.**, Properties, weldability and corrosion behavior of supermartensitic stainless steels for on- and offshore applications, *Materials testing*, 2016, **58**(6), 501-518.

**Ojo O. O.**, Ogedengbe T. I., Kareem B., Development of dynamic strategy of estimating cost of jobs on lathe with varying complexity, *International journal of research in engineering and technology*, 2015, **3**(10), 43-54.

Ogedengbe T. I., Kareem B., **Ojo O. O.**, Effects of varying job parameters on release time using lathe machine, *International Journal of Engineering Innovation and Management*, 2013, **3**, 1-8.

**Ojo O. O.**, Ogedengbe T. I., Kareem B., Effect of cutting conditions on release time of jobs using lathe machine, *International Journal of Engineering Innovation and Management*, 2012, **2**, 59-66

Kareem B., **Ojo O. O.**, Ewetumo T., Development of a Digital Temperature Control Device for a Preservative System, *The 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application (PACIIA2010)*, China, 4-5 December 2010.

Ogedengbe T. I., Kareem B., Oke P. K., Ayodeji S. P., Akinnuli B. O., Akinola A. O., **Ojo O. O.**, Olusegun O., Abadariki S. O., *Engineering Drawing Manual Volume I*, Pin-funky Ventures Akure, Nigeria, 2011.

Ayodeji S. P., Kareem B., Oke P. K., Akinnuli B. O., Ijagbemi C. O., Ogedengbe T. I., Adeyeri M. K., Olabanji O. M., **Ojo O. O.**, Abadariki S. O., Abban S., Fasan J. O., Adewole A. K., *Engineering Workshop Practice Manual*

*Volume I*, Besade Publishing Press, Ondo, Nigeria, 2012.



## ÖZGEÇMİŞ

Olatunji Oladimeji OJO 1983 yılında Akure, Nijerya’da doğdu. Nijerya’daki The Federal University of Technology Akure, Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2008 yılında Makina Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı okuldan 2012 yılında yüksek lisan eğitimini tamamlayıp ve üretim mühendisi olarak mezun oldu. 2009-2010 yılları arasında Nijerya’daki Mobil Producing Nigeria Unlimited, Victoria Island, Lagos’ta bir yıl ulusal gençlik hizmet programı tamamlandı. Mart 2010 ve Haziran 2012 tarihleri arasında Nijerya’daki The Federal University of Technology Akure’de araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2012 yılından beri Aynı okuldaki Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. 2012 yılında Türkiye Hükümeti Bursu kazandı ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doç. Dr. Emel Taban danışmanlığında doktora programına başladı. Doç. Dr. Emel Taban’ın araştırma alanları, üretim/imalat mühendisliği, kaynak teknolojisi ve kaynak metalurjisi içermektedir.