

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**SÜRTÜNME KAYNAĞI VE MIAB KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ
BORULARIN MİKROYAPISAL VE MEKANİK
KARAKTERİZASYONU**

BERNA BALTA

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

SÜRTÜNME KAYNAĞI VE MIAB KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMİŞ BORULARIN MİKROYAPISAL VE
MEKANİK KARAKTERİZASYONU

BERNA BALTA

Doç.Dr. A. Armağan ARICI
Danışman, Kocaeli Üniv.
Prof.Dr. Muharrem YILMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Doç.Dr. Nejat SARI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Prof.Dr. Fazıl Önder SÖNMEZ
Jüri Üyesi, Boğaziçi Üniv.
Prof.Dr. Ahmet ÜNAL
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı ile imal edilmiş olan orta karbonlu çelik boru ve orta karbonlu dövme braket bağlantısının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu ve sürtünme kaynağının parametrik optimizasyonu amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmalarımın her safhasında yardımlarını esirgemeyen, katkılarıyla beni sonuna kadar destekleyen ve yönlendiren, tez sırasında karşılaştığım tüm engelleri kaldıran çok değerli danışman hocam Doç. Dr. A. Armağan ARICI'ya, çalışmayı her safhasında yönlendiren ve desteğini hiç esirgemeyen değerli tez izleme jürisi hocam Prof. Dr. Muharrem YILMAZ'a, değerli tez izleme jürisi hocam Doç. Dr. Nejat SARI'ya, laboratuvar çalışmalarında yardımları için değerli akademisyen Serap GÜMÜŞ ve Hasan TAŞCAN'a, bilimsel çalışmanın temellerini öğrettiği için saygıdeğer hocam Prof. Dr. Fazıl Ö. SÖNMEZ'e ve manevi destekleri için diğer tüm hocalarım ve arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım. Çok değerli hocam Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a, engin bilgisi ve titiz bakış açısıyla, tez çalışmasının nihai formunu alması konusundaki destekleri için kendisine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım için maddi destek sağlayan Kocaeli Üniversitesi BAP Birimine de teşekkür ederim.

Kesintisiz desteğinden dolayı sevgili eşim Bülent BALTA'ya sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Haziran - 2016

Berna BALTA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	iv
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	5
1.1. Katı Hal Kaynağı.....	5
1.2. Sürtünme Kaynağı.....	6
1.2.1. Sürtünme kaynağı çeşitleri.....	6
1.2.1.1. Sürekli sürtünme kaynağı.....	6
1.2.1.2. Volan tahrikli sürtünme kaynağı.....	6
1.2.1.3. Lineer sürtünme kaynağı.....	7
1.2.1.4. Kombine sürtünme kaynağı	7
1.2.2. Sürtünme kaynağı prosesi	7
1.2.3. Sürtünme kaynağı yapılabilen malzemeler	10
1.2.4. Sürtünme kaynağının endüstride kullanım alanları	11
1.2.5. Sürtünme kaynağında sürtünme olayı.....	13
1.2.6. Sürtünme kaynağında ısı girdisi	15
1.3. MIAB Kaynağı	17
1.3.1. MIAB kaynağı prosesi	18
1.3.2. MIAB kaynağının endüstride kullanım alanları	20
1.3.3. MIAB kaynağında ark oluşumu.....	21
1.3.4. MIAB kaynağında ısı girdisi.....	24
1.4. Endüstride Uygulanan Katı Hal Kaynağı Kalite Test Metodları	24
1.5. Sürtünme ve MIAB Kaynağının Karşılaştırması	26
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	28
2.1. Sürtünme Kaynağı Literatür Çalışması	28
2.2. MIAB Kaynağı Literatür Çalışması	44
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	57
3.1. Malzeme	57
3.2. Kullanılan Teçhizat	57
3.3. Kaynak Parametreleri	59
3.3.1. Sürtünme kaynağı parametreleri	59
3.3.2. MIAB kaynağı parametreleri	60
3.4. Numunelerin Hazırlanması.....	61
3.5. Kullanılan Mekanik ve Metalurjik Test Prosedürleri.....	63
3.6. Deney Tasarımı	67
3.6.1. Varyans analiz yöntemi (ANOVA)	71
3.6.2. Yüzey cevap yöntemi (RSM)	73
3.7. Parametrik Optimizasyon	74
3.7.1. İstenirlik fonksiyonu	75

4. DENEYLER VE BULGULAR.....	77
4.1. Sürtünme Kaynağı Deneyleri ve Sonuçları	77
4.1.1. Sürtünme kaynağı ön çalışma sonuçları	78
4.1.2. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: parametre ve sınır koşulları seçimi.....	83
4.1.3. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: parametre seviyelerinin kodlanması	84
4.1.4. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: numunelerin kaynatılması	84
4.1.5. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: RSM deneyleri	85
4.1.6. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: petal testi sonuçları	87
4.1.7. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: çekme testi sonuçları.....	88
4.1.8. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: mikro-sertlik analizi sonuçları.....	89
4.1.9. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: RSM sonuçları	92
4.1.10. Sürtünme kaynağı optimizasyon: ANOVA sonuçları	103
4.1.11. Sürtünme kaynağı optimizasyon: optimizasyon prosesi.....	107
4.1.12. Sürtünme kaynağı optimizasyon: istenirlik fonksiyonu	109
4.1.13. Sürtünme kaynağı optimizasyon: doğrulama testi.....	110
4.2. MIAB Kaynağı Deneyleri ve Sonuçları	116
4.2.1. MIAB kaynağı ön çalışma sonuçları	116
4.3. Sürtünme ve MIAB Kaynağı Karşılaştırması	125
4.3.1. Dudak oluşumu	125
4.3.2. Mikro-sertlik	126
4.3.3. Mikroyapı.....	127
4.3.4. Mekanik Dayanım.....	129
4.3.4.1. Çekme testi.....	129
4.3.4.2. Petal testi	130
4.3.5. Kırılma analizi	131
4.3.6. Kimyasal kompozisyon.....	132
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	134
5.1. Sonuçlar.....	134
5.2. Önerilen Çalışmalar.....	138
5.2.1. Sürtünme kaynağı ile kaynatılmış alüminyum parçaların optimizasyonu	138
5.2.2. MIAB kaynak yönteminin optimizasyonu.....	139
KAYNAKLAR	140
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	146
ÖZGEÇMİŞ	148

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Sürtünme kaynağı a) sürtünme fazı b) yığıma fazı	8
Şekil 1.2.	Sürekli sürtünme kaynağı prosesi	9
Şekil 1.3.	Sürtünme kaynağı yığıma halkası (kaynak dudağı) a) kaynatılmış parça b) kaynak kesidi	10
Şekil 1.4.	Malzemelerin, malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygunluğu	11
Şekil 1.5.	Sürtünme kaynağı örnek kullanım alanları	12
Şekil 1.6.	Sürtünme kaynak mekanizmaları	13
Şekil 1.7.	Dönmenin sürtünme kaynak mekanizmasına etkisi	14
Şekil 1.8.	Sürtünme kaynağında idealize ısı girdisi a) sürtünme kaynaklı b) deformasyon kaynaklı	15
Şekil 1.9.	Yüksek ve alçak ısı girdisi esnasında sürtünme yüzeyinde yapışma olayı	17
Şekil 1.10.	MIAB Kaynağı a) ark oluşumu b) basınç uygulaması	19
Şekil 1.11.	MIAB kaynağı prosesi şeması a) manyetik ark oluşumu b) basınç uygulaması	20
Şekil 1.12.	MIAB kaynağı yığıma halkası (kaynak dudağı) oluşumu a) kaynatılmış parça b) kaynak kesidi	20
Şekil 1.13.	MIAB kaynağı ile kaynatılmış kabin süspansiyon sistemi a) final parça resmi b) kabin süspansiyon burulma kolu ve döküm braketin kaynak lokasyonu	21
Şekil 1.14.	MIAB kaynağında akım ile uygulanan manyetik alan arasındaki etkileşim	22
Şekil 1.15.	Fleming'in sol el kuralı	23
Şekil 1.16.	MIAB kaynağında ark akımının radyal bileşeninin ark hareketine etkisi	24
Şekil 1.17.	Petal testi	25
Şekil 1.18.	Çekiç testi	26
Şekil 2.1.	Sürtünme kaynağında tork eğrisinin yükselen bölgesinin ölçülmesi ($\omega=2000$ dev/dk)	28
Şekil 2.2.	Sürtünme kaynağı prosesinde tork eğrisinin arttığı anda kaynatılan parçaların kesitleri a) sabit parça b) 2000 dev/dk'da döndürülen parça	29
Şekil 2.3.	Sürtünme kaynağı prosesinde en yüksek ilk tork değerinin sürtünme hızı ve eksenel kuvvetle değişimi	30
Şekil 2.4.	AISI 1040 ve AISI 304 malzemeleri kullanılarak üretilmiş optimum sürtünme kaynaklı numunenin yorulma dayanımının ana malzemelerle karşılaştırması ($\sigma_{ort} = 400$ MPa)	32
Şekil 2.5.	AISI 1040 malzemeden yapılmış içi dolu çubukların kaynatılmasında a) sürtünme zamanının çekme dayanımına etkisi b) sürtünme basıncının çekme dayanımına etkisi	33
Şekil 2.6.	AISI 1021 ve AISI 304 malzemelerinden imal edilmiş çubukların sürtünme kaynağı sonrası uygulanan çekme testi	

	kırılma yüzeylerinin SEM ile analizi a) 75 MPa yığıma basıncı uygulanmış numune b) 120 MPa yığıma basıncı uygulanmış numune	34
Şekil 2.7.	Sürtünme kaynağında sıcaklık değişiminin arayüze en yakın bölgede ölçülmesi	35
Şekil 2.8.	Sürtünme kaynağında arayüze en yakın bölgede sıcaklığın zamana göre değişimi	36
Şekil 2.9.	Selvamani ve arkadaşlarının optimum kaynaklı numunelerinin kırılma yüzeyi SEM analizi	38
Şekil 2.10.	INCOLOY 800H malzemesiyle imal edilmiş optimum sürtünme kaynağı a) doğrulama numunesi b) çekme testi sonrası parçaların durumu	41
Şekil 2.11.	Ajith ve arkadaşlarının optimum sürtünme kaynağı numunelerinin mikro-sertlik analizi	42
Şekil 2.12.	Kalın cidarlı boruların MIAB yöntemiyle kaynatılmasında borunun iç çapında ergime izleri	45
Şekil 2.13.	Tipik bir MIAB kaynağı mikroyapısı (x180) a) ITAB'dan ana malzemeye doğru bölgedeki rekristalizasyon oluşumu b) kaynak arayüzüne yakın bölgede tane büyümesi	46
Şekil 2.14.	MIAB kaynağı kaynak arayüzü (x100)	46
Şekil 2.15.	MIAB kaynak kesidi makroyapı resmi	47
Şekil 2.16.	SEM analizinde MIAB kaynağında gevrek kırılmanın gösterilmesi	48
Şekil 2.17.	MIAB kaynağında farklı ısı girdi miktarlarına bağlı olarak kaynak arayüzünde mikro-sertlik davranışı a) ark akım değeri 200 A b) ark akım değeri 250 A	49
Şekil 2.18.	MIAB kaynağında dudak oluşumu a) uniform dudak oluşumu ve tamalanmış kaynak penetrasyonu b) fazla erime ve yanma	50
Şekil 2.19.	St 37 malzemeden imal edilmiş boruların MIAB kaynak bölgesi mikroyapısı	51
Şekil 2.20.	St 37 malzemeden imal edilmiş boruların MIAB kaynak bölgesi mikroyapısı-panoramik görünüm	52
Şekil 2.21.	MIAB kaynak dudağı çapı ölçümü	53
Şekil 2.22.	Yüksek hızlı kamera ile MIAB kaynağında ark oluşumunun gösterilmesi	53
Şekil 2.23.	MIAB kaynağı mikro-sertlik analizi	54
Şekil 2.24.	Kaynak arayüzü mikroyapısı	55
Şekil 3.1.	Deney numunelerinin imal edildiği sürtünme kaynak makinası a) makinanın dış görünüşü b) çene ve fikstürler	58
Şekil 3.2.	Sürtünme kaynağı boru tutma ve karşı dayama aparatları	58
Şekil 3.3.	MIAB kaynağı makinası	59
Şekil 3.4.	MIAB kaynak makinası bobin ve fikstürleri.....	59
Şekil 3.5.	Numune geometrisi, t = 4 mm.....	62
Şekil 3.6.	Dövme braketin kaynak için hazırlanması a) alt görünüş b) yan görünüş c) üst görünüş	62
Şekil 3.7.	Kaynak için hazırlanmış dövme braket numuneleri.....	63
Şekil 3.8.	Petal testi numunesi hazırlanması, a) kısaltılmış petal testi numunesi b) eşit genişlikte dilim kesme aparatı c) numunenin eşit dilimlere ayrılması d) dilimlerin malafa ile eğilmesi	64

Şekil 3.9. Çekme testi numunesi ölçüleri	65
Şekil 3.10. Zwick Z250 marka çekme testi cihazı.....	66
Şekil 3.11. Jeol JSM marka SEM cihazı	67
Şekil 3.12. Emco-Test Durascan Vickers mikro-sertlik test cihazı.....	67
Şekil 3.13. Deney tasarımı aşamaları	69
Şekil 3.14. DoE metodolojisi seçim kriterleri	70
Şekil 3.15. Optimizasyon akış şeması	75
Şekil 4.1. Sürtünme kaynaklı numunenin ITAB bölgesi ve ana malzeme mikro resimleri a) kaynaklı bölge makro resim b) çelik boru ana malzeme (St 52-3) c) dövme braket ana malzeme (AISI 1141).....	79
Şekil 4.2. Sürtünme kaynağı mikro-sertlik değerleri.....	80
Şekil 4.3. Sürtünme kaynağı arayüzü	80
Şekil 4.4. Sürtünme kaynağı ITAB mikro resimleri a) ITAB ve ana malzeme arayüzü, boru tarafı b) ITAB, boru tarafı c) ITAB, dövme tarafı d) yeniden kristalleşme arayüzü, dövme tarafı e) yeniden kristalleşme bölgesi, dövme tarafı	81
Şekil 4.5. Sürtünme kaynak çizgisi üzerinde farklı bölgelerin mikroyapısı a) A bölgesi b) B bölgesi.....	82
Şekil 4.6. Sürtünme kaynağı kırılma yüzeyi SEM resmi	83
Şekil 4.7. Kaynatılmış numuneler	85
Şekil 4.8. Petal testi uygulanmış deney numuneleri.....	87
Şekil 4.9. Çekme testi numuneleri.....	89
Şekil 4.10. Farklı kaynak parametrelerinde mikro-sertlik dağılımları a) minimum (17) ve maksimum (18) sürtünme basıncı b) minimum (19) ve maksimum (20) yığılma basıncı.....	90
Şekil 4.11. Çekme dayanımı için RSM ve kontür grafikleri a) yığılma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığılma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığılma basıncı.....	93
Şekil 4.12. % uzama için RSM ve kontür grafikleri a) yığılma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığılma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığılma basıncı e) yığılma süresi ve yığılma basıncı f) yığılma süresi ve sürtünme süresi.....	98
Şekil 4.13. Petal çatlak uzunluğu için RSM ve kontür grafikleri a) yığılma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığılma süresi ve sürtünme basıncı d) yığılma süresi ve yığılma basıncı.....	101
Şekil 4.14. Sürtünme basıncının mikro-sertlik değerlerine etkisi (15: minimum sürtünme basıncı, maksimum sürtünme süresi, yığılma basıncı ve yığılma süresi, 16: maksimum sürtünme basıncı, maksimum sürtünme süresi, yığılma basıncı ve yığılma süresi).....	103
Şekil 4.15. Optimum kaynak koşulları için örtülü kontür grafiği a) sürtünme süresi ve sürtünme basıncına göre optimum bölgeler b) yığılma süresi ve yığılma basıncına göre optimum bölgeler	108
Şekil 4.16. Maksimum çekme dayanımı, maksimum % uzama ve minimum petal çatlak hedefleri için istenirlik grafiği a) sürtünme basıncı ve sürtünme süresi b) yığılma basıncı ve yığılma süresi koşullarında	110

Şekil 4.17. Optimum numune ve diğer deney numunelerinin kaynak eksenine boyunca mikro-sertlik değerleri	112
Şekil 4.18. Ana malzemelerin mikroyapıları a) boru b) dövme braket	112
Şekil 4.19. Optimum kaynaklı numunenin mikroyapı resimleri a) boru tarafı ITAB bölgesi b) kaynak arayüzü c) dövme braket tarafı ITAB bölgesi	113
Şekil 4.20. Optimum numunenin kırılma yüzeyinin SEM ile çekilmiş mikroresmi	114
Şekil 4.21. Optimum numunenin kaynak arayüzü EDX analizi	115
Şekil 4.22. Optimum numunenin kırılma yüzeyindeki SEM mikroresmi ve ilgili EDX kimyasal spektrumu	116
Şekil 4.23. MIAB kaynaklı numunenin ITAB bölgesi ve ana malzeme mikro resimleri a) kaynaklı bölge makro resim b) dövme braket ana malzeme (C35R) c) çelik boru ana malzeme (St 52-3)	118
Şekil 4.24. MIAB kaynağı mikro-sertlik değerleri	119
Şekil 4.25. Phillips'in çalışmasındaki MIAB kaynağı makro resmi	119
Şekil 4.26. MIAB kaynak arayüzü	120
Şekil 4.27. Phillips'in çalışmasındaki MIAB kaynak arayüzü	121
Şekil 4.28. Kachinsky'nin çalışmasındaki MIAB kaynağı kaynak arayüzü (x100)	121
Şekil 4.29. Iordachescu'nun çalışmasındaki MIAB kaynağı arayüzü (x100)	122
Şekil 4.30. MIAB kaynağı ITAB mikro resimleri a) R1, boru tarafı b) R1, boru tarafı, kaynak arayüzüne yakın bölge c) R1, dövme tarafı d) R1 ve R2 arayüzü, dövme braket tarafı, e) R2, yeniden kristalleşme bölgesi, dövme tarafı	124
Şekil 4.31. MIAB kaynağı kırılma yüzeyi SEM resmi	125
Şekil 4.32. Kaynak dudacağı kesit resmi a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı	126
Şekil 4.33. Optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı mikro-sertlik karşılaştırması	127
Şekil 4.34. Optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı mikroyapı karşılaştırması a) sürtünme kaynağı, boru ITAB b) sürtünme kaynağı kaynak arayüzü c) sürtünme kaynağı, dövme ITAB d) MIAB kaynağı, boru ITAB e) MIAB kaynağı kaynak arayüzü f) MIAB kaynağı, dövme tarafı kaynak arayüzü ve ITAB	128
Şekil 4.35. Kaynak arayüzü SEM mikro resmi a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı	129
Şekil 4.36. Optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı çekme testi grafiği	130
Şekil 4.37. Optimum sürtünme ve MIAB kaynağı petal çatlak uzunluğu grafiği	131
Şekil 4.38. Kırılma yüzeyi SEM mikro resimleri a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı	132
Şekil 4.39. Kırılma yüzeyleri SEM mikro resmi ve ilgili EDX spektrumları a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı	133

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Selvamani ve arkadaşlarının sürtünme kaynağı optimizasyon deney matris ve sonuçları	37
Tablo 2.2.	Vairamani ve arkadaşlarının sürtünme kaynağı optimizasyon deney matris ve sonuçları	39
Tablo 3.1.	AISI 1045 (C45) ve ERD 9056, kimyasal kompozisyonlar (ağırlık %)	57
Tablo 3.2.	AISI 1045 (C45) ve ERD 9056, çekme dayanımları	57
Tablo 3.3.	Tahribatlı muayene yöntemleri ve tespit edilebilecek kaynak kusur ve karakteristikleri	63
Tablo 3.4.	En çok kullanılan modelleme/optimizasyon metodlarının karşılaştırılması	73
Tablo 4.1.	EN 10305-2 (St 52-3) ve AISI 1141, kimyasal kompozisyonlar (ağırlık %)	78
Tablo 4.2.	AISI 1141 ve St 52-3, mekanik özellikler	78
Tablo 4.3.	Seçilen parametreler ve sınır koşulları.....	84
Tablo 4.4.	Deney matrisi ve sonuçlar.....	86
Tablo 4.5.	Çekme dayanımı için ANOVA tablosu (geriye doğru eleme yapılmış durum)	104
Tablo 4.6.	% uzama için ANOVA tablosu (geriye doğru eleme yapılmış durum).....	105
Tablo 4.7.	Petal çatlak uzunluğu için ANOVA tablosu (geriye doğru eleme yapılmış durum)	106
Tablo 4.8.	Çekme dayanımının ve % uzamanın maksimum, petal çatlak uzunluğunun minimum olduğu optimum deney koşulları	109
Tablo 4.9.	Maksimum çekme dayanımı, maksimum % uzama ve minimum petal çatlak için model ve doğrulama deneyi karşılaştırması (kodlanmış ve kodlanmamış değerler ile gösterim)	111
Tablo 4.10.	EN 10305-2 (St 52-3) ve EN 10083-2 (C35R), kimyasal kompozisyonlar (ağırlık %)	117
Tablo 4.11.	St 52-3 ve C35R, mekanik özellikler.....	117

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

a	:Sıcaklık geçirgenlik katsayısı
A	:Amper
A ₁	:Fiili alan
A ₂	:Tüm alan
B	:Manyetik alanın yoğunluğu
B _a	:Manyetik alanın eksenel bileşeni
B _L	:Manyetik alanın radyal bileşeni
d	:Tekil istenirlik fonksiyonu
D	:Desirability Function (İstenirlik Fonksiyonu)
δ	:% kopma uzaması
δ ₁	:Sürtünme fazındaki deformasyon mesafesi
δ ₁	:Yığılma fazındaki deformasyon mesafesi
f	:Lorentz Kuvveti (Elektromanyetik kuvvet)
F	:Eksenel kuvvet
Φ	:Gauss olasılık fonksiyonu
F _L	:Elektromanyetik kuvvetin eksenel bileşeni
HV	:Vickers Hardness (Vickers Sertliği)
I	:Ark akımının yoğunluğu
I _L	:Elektrik akımının eksenel bileşeni
I _r	:Ark akımının radyal bileşeni
J	:Akım yoğunluğu
k	:Proses girdi adedi
K	:Kelvin
λ	:Isıl geçirgenlik katsayısı
M _d	:Tane çapı
MnS	:Mangan sülfür
μ	:Sürtünme katsayısı
μ	:Veri ortalaması
n	:Veri adedi
N	:Çevrim sayısı
v	:Çizgisel hız
ϑ _δ	:Yanma oranı
m	:Proses çıktı adedi
ω	:Açısal hız
P	:Probability Value (Olasılık Değeri)
P ₁	:Sürtünme basıncı
P ₂	:Yığılma basıncı
Pb	:Kurşun
q	:Arkın ısı girdisi
Q	:Toplam ısı girdisi
Q ₁	:Sürtünme kaynaklı ısı girdisi
Q _{1P1}	:Sürtünme fazındaki sürtünme kaynaklı ısı girdisi
Q _{1P2}	:Yığılma fazındaki sürtünme kaynaklı ısı girdisi

Q_2	:Deformasyon kaynaklı ısı girdisi
Q_{2P1}	:Sürtünme fazındaki deformasyon kaynaklı ısı girdisi
Q_{2P2}	:Yığılma fazındaki deformasyon kaynaklı ısı girdisi
r	:Yarı çap
R^2	:Coefficient of correlation (Korelasyon katsayısı)
S	:Sülfür
$^{\circ}C$:Celcius (Santigrad)
σ_x	:Standart sapma
T	:Sıcaklık
t_1	:Sürtünme süresi
t_2	:Yığılma süresi
X_i	:Proses girdi değişkenleri
Y	:Proses çıktısı

Kısaltmalar

adj	:Adjusted (Ayarlanmış)
ANN	:Artificial Neural Networks (Yapay Sinir Ağları)
ANOVA	:Analysis of Variance (Varyans Analizi)
BM	:Base Material (Ana Malzeme)
DF	:Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
DoE	:Design of Experiments (Deney Tasarımı)
DSS	:Duplex Stainless Steel (Duplex Paslanmaz Çelik)
EDX	:Electron Dispersive X-ray (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi)
GA	:Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
ITAB	:Isı tesiri altındaki bölge (HAZ-Heat Affected Zone)
KA	:Kaynak Arayüzü
MIAB	:Magnetically Impelled Arc Butt Welding (Manyetik Ark Kaynağı)
OFAT	:One Factor at a Time (Tek Seferde Tek Faktörün Değiştirilmesi)
pred	:Predicted (Tahmin Edilmiş)
R1	:Birinci Bölge
R2	:İkinci Bölge
RSM	:Response Surface Methodology (Yüzey Cevap Yöntemi)
SDSS	:Super Duplex Stainless Steel (Süper Duplex Paslanmaz Çelik)
SEM	:Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
SS	:Sum of Squares (Kareler Toplamı)
TEM	:Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskopu)

SÜRTÜNME KAYNAĞI VE MIAB KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BORULARIN MİKROYAPISAL VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Yapısal dayanım, hafiflik ve fiyat avantajlarından ötürü, boru kesitli parçalar otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar. Akslar, kardan milleri, çamurluk braketleri gibi parçalar, genellikle boru kesitli parçalar ve uçlarına kaynatılmış dövme braketlerden oluşurlar. Bu tür parçalarda ömür beklentisi araç ömrüne eşdeğer, yani hiç servis görmeyecelermiş gibi oldukları için, boru kesitli parçalar ve dövme braketler sürtünme kaynağı veya manyetik ark kaynağı (MIAB) gibi katı hal kaynak yöntemlerinden biri kullanılarak kaynatılırlar. Geleneksel füzyon kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında katı hal kaynak yöntemleri ömür olarak daha üstündürler.

Bu çalışmada sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı ile imal edilmiş olan orta karbonlu çelik boru ve orta karbonlu dövme braket bağlantısının mikro ve mekanik karakterizasyonu ve sürtünme kaynağının parametrik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara başlamadan önce, ilk olarak literatür taraması yapılmıştır. Buradan elde edilen bilgiler ışığında, sürtünme ve MIAB kaynağı yöntemiyle imal edilmiş deneysel numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra, boru ve braket sürtünme kaynak bağlantısı için kaynak parametreleri, mekanik özellikler bakımından optimize edilmiştir. Sürtünme kaynağı kaynak parametreleri optimizasyonu Yüzey Cevap Metodu (RSM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. RSM kullanılarak kurulan matematiksel model, Varyans Analizi (ANOVA) yöntemiyle doğrulanmıştır. Hazırlanan sürtünme kaynağı deney numunelerine çekme testi, mikro-sertlik ve petal testleri uygulanmıştır. Isıdan etkilenen bölgenin (ITAB) makro ve mikroyapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde İstenirlik (Desirability) Fonksiyonu yöntemi uygulanarak kaynak parametreleri optimize edilmiştir. Optimizasyon neticesinde elde edilen, en uygun parametreler kullanılarak üretilen doğrulama numunesi üzerinde en yüksek çekme dayanımı, en yüksek % uzama ve en küçük petal çatlak uzunluğu değerlerine ulaşılmıştır. Son olarak, optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı numuneleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Amaçlı Optimizasyon, MIAB Kaynağı, Orta Karbonlu Çelik, Sürtünme Kaynağı.

MICRO AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF TUBULAR PARTS WELDED VIA FRICTION AND MIAB WELDING

ABSTRACT

Tubular section components are widely used in automotive industry due to their structural stiffness, minimized weight and cost. Generally, tubular section parts are coupled with forging end caps when assembled to upper sub-system components such as axles, propelled drive shafts, fender brackets. In order to achieve lifetime and no-service design expectancies, these tubular section components' end brackets are usually joined to the tubular sections by using a solid state welding process, such as friction welding or Magnetically Impelled Arc Butt (MIAB) welding. Solid state welding techniques have greater advantage on the overall durability performance as compared to traditional fusion welding.

In this study, micro and mechanical characterization of the medium carbon steel tube and forging bracket joint which was produced by using friction and MIAB welding, and optimization of friction welding parameters were developed. Before the experimental study, literature survey was completed. In the light of the findings of the survey, experimental parts were produced by using friction and MIAB welding techniques. Afterwards, friction welding parameters were optimized interms of mechanical properties by using response surface methodology (RSM). The mathematical model, established by using RSM, was validated through Analysis of Variance (ANOVA) technique. Tensile testing, micro-hardness analysis and petal tastings were applied to the friction welding samples. Macro and microstructural features of Heat Affected Zone (HAZ) were investigated. Desirability function was applied to optimize the friction welding process parameters. In order to achieve maximum elongation (%) and tensile strength with minimum petal crack length, a confirmation sample was produced. Results were in good agreement with the predicted values. At the end, optimum friction welding and MIAB welding samples were compared.

Keywords: Multi-objective Optimization, MIAB Welding, Medium Carbon Steel, Friction Welding.

GİRİŞ

Pratikte, sağladıkları tasarım kolaylığı, hafiflik, düşük fiyat ve dayanım gibi avantajlarından ötürü, boru profilli orta karbonlu çelik parçalar, otomotiv şasi ve güç aktarma organları elemanlarında yaygın olarak kullanılırlar. Bu boru profilli parçaların uçlarına genellikle yine orta karbonlu dövme/döküm braketler birleştirilerek, makina elemanları oluşturulur. Elde edilen bu makina elemanları uçlarındaki braketler vasıtasıyla, şanzıman, kardan mili, çamurluk braketleri, şasi kolu krosları gibi üst sistemlere monte edilirler. Kullanım bölgelerinden dolayı, bu parçaların, aracın satışından sonra hiçbir zaman servis ihtiyacı gerektirmeyecek, ömürlük parçalar olması beklenir. Beklendiği üzere, bu tip parçaların en zayıf bölgesi de boru tipi profilin, uç braketle birleştirildiği birleşme bölgesi olmaktadır. Mukavemet özellikleri daha iyi olduğu için bu tip parçalar, sürtünme kaynağı yada MIAB kaynağı gibi katı hal kaynağı yöntemlerinden birisi kullanılarak birleştirilip son halleri verilir.

Katı hal kaynak yöntemleri sayesinde, klasik füzyon kaynak yöntemlerine nazaran, daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir. Katı hal kaynağı, kaynak yapılan malzemelerin birleşim yüzeyinde ergime sıcaklığının 50-100°C altına kadar ısıtılıp, basınç marifetiyle kaynak bağı elde edilen kaynak türüdür. Sürekli sürtünme kaynağı (çalışmanın bundan sonrasına sürtünme kaynağı olarak adlandırılacaktır) ve MIAB kaynağı katı hal kaynağına en yaygın olarak kullanılan iki örnektir. Her iki kaynak türü otomotiv ve havacılıkta başarıyla yaygın olarak kullanılır.

Boru profille birleştirilecek uç braketler, kullanıldıkları yer sebebiyle genellikle karmaşık geometriye sahip parçalardır. Karmaşık geometrili parçaları istenilen tasarım geometrisinde imal edebilmek, döküm ya da dövme proseslerinden faydalanılarak gerçekleştirilebilir. Döküm ile imal edilen parçaların kaynak proseslerinde yaşanabilen zorluklardan dolayı, dövme yöntemi ile imal edilen uç braketler, sanayide daha çok tercih edilir. Dolayısıyla, bir boru profilin dövme bir braketle katı hal kaynağıyla kaynatılarak oluşturulduğu parçalar, pratikte yaygın kullanım alanı ve önem arz etmektedir. Kullanım alanının yaygınlığına rağmen,

optimum kaynak parametrelerinin tayini için genellikle deneme yanılma yöntemi kullanılır, hazırda pratik bir optimum parametre cetveli mevcut değildir, kimi zaman deneme yanılma yöntemiyle en uygun kaynağı elde edene kadar yüzlerce prototip numune imal edilebilir. Bazen bu çalışmaların sonucunda dahi hala optimum numuneye ulaşılammış olunabilir. Optimum numune, yapısal parçalar için ana malzemenin dayanım özelliklerine benzer özelliklerde, hafif ve ucuz olmalıdır.

Bu çalışmada, orta karbonlu çelikten imal edilmiş boru profil ve orta karbonlu çelik dövme braketten oluşan parçaların katı hal kaynağı incelenecektir. İlk olarak, sanayide en geniş kullanıma sahip olan sürtünme kaynağı prosesi belirtilen malzemeler üzerinde uygulanacak ve bu çalışma sürecinde sürtünme kaynağı proses parametreleri optimize edilecektir. Daha sonra, optimize edilmiş numuneler, aynı malzemeler için MIAB kaynağı kullanılarak imal edilmiş eş parçalarla mikro ve mekanik özellikler bakımından karşılaştırılacaktır.

Bu çalışmanın temel hedefleri şunlardır:

- Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş orta karbonlu çelikten imal edilmiş boru/dövme braket tipi yapıların, ana malzemeye en yakın mekanik özelliklere sahip olacak şekilde kaynak parametreleri optimize edilerek, matematiksel model kurulacaktır. Kullanılan malzemeler sanayide benzer yöntemlerde en sık karşılaşılan malzemeler olacaktır.
- Sürtünme kaynağı proses parametreleri ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiler ortaya konulacaktır.
- Optimizasyon neticesinde en uygun parametrelerle ana malzemeye en yakın çekme dayanımı ve % uzama değerlerine sahip, petal testi çatlağı en küçük olan optimum numune imal edilecektir.
- Petal testi bu tür kaynak yöntemleri için ilk defa optimizasyon prosesinde, çekme testine ek olarak kullanılacaktır.
- Sürtünme kaynağı optimizasyon prosesinde, % uzamalar, ilk defa ana malzemeye benzer özelliklere sahip olacak şekilde optimize edilecektir. Literatürde, genellikle çekme dayanımı optimizasyonu incelenmektedir, % uzamalar gözardı edilmektedir.
- İmal edilen optimum numune ile optimizasyon yönteminden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak model doğrulaması gerçekleştirilecektir.

- Model doğrulandıktan sonra, orta karbonlu çelik boru profiller ile orta karbonlu çelik dövme braketlerin sürtünme kaynağı yöntemiyle kaynatılması, endüstride deneme yanılma yöntemleriyle imal edilmesine rağmen, benzer özelliklere sahip makina elemanlarında, istenilen özellikteki numunelerin kurulacak olan model yardımıyla imal edilmesine olanak verilecektir. Kurulan bu matematik model sayesinde, deneme yanılma metoduna dayalı kayıpların önüne geçmek mümkün olacaktır.
- Boruların imalatında kullanılan sürtünme ve MIAB kaynak yöntemleri mikroyapı ve mekanik karakterizasyon bakımından eş parçalar kullanılarak, birbiriyle karşılaştırılacaktır.

Bu hedefleri gerçekleştirmek için kullanılacak başlıca prosedürler şunlardır: orta karbonlu çelikten imal edilmiş boru ve orta karbonlu çelik dövme braketler, farklı sürtünme kaynağı parametreleri (sürtünme basıncı (P_1 (bar)), sürtünme süresi (t_1 (sn)), yığma basıncı (P_2 (bar)), yığma süresi (t_2 (sn))) kullanılarak kaynatılacaktır. Aynı şartlar altında kaynatılmış ikişer set deney numunesi hazırlanacaktır. Kaynatılan parçaların birleşme bölgelerinin dayanımları, bir set numunede çekme deneyleri ile ölçülecektir. Diğer set numune petal testine tabi tutulacaktır. Ayrıca, numuneler mikro-sertlik özellikleri bakımından ana malzeme, kaynak arayüzü ve ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) içerecek şekilde incelenecektir. Yapılan çalışmaları tamamlayıcı olması bakımından, en geniş mikroyapısal karakterizasyonu yöntemleri ile (optik mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX)) kaynak bölgesi, ana malzeme, kaynak arayüzü ve kırılma yüzeyleri incelenerek, sonuçlar desteklenecektir.

Bu çalışma kendi alt başlıkları olan ve aşağıda belirtilen şekilde altı bölümden oluşmaktadır:

1. Giriş: Tezin konusunu, bu konunun seçilme amacını ve tezin hedeflerini içermektedir.
2. Genel Bilgiler: Bu bölümde sürtünme ve MIAB kaynağıyla ilgili proseslerin tanıtımı yapılarak, bu iki kaynağın genel prensipleri incelenmiştir.
3. Literatür Çalışması: Bu bölümde araştırmacıların günümüze kadar konu üzerinde yapmış oldukları çalışmalar ve elde ettikleri sonuçlar özetlenmiştir.

4. Malzeme ve Yöntem: Bu bölümde deneylerde kullanılan orta karbonlu çeliğin mekanik ve malzeme özellikleri, kullanılan deney yöntemleri ve optimizasyon yöntemleri anlatılmıştır.

5. Deneysel Bulgular: Bu bölümde, sürtünme kaynağı optimizasyonu çıktıları ve elde edilen matematiksel model anlatılmıştır. Deneysel bulguların değerlendirilmesi ve varılan sonuçlar mevcut literatür bilgisi ile karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Optimizasyon prosedürü neticesinde elde edilmiş olan parametrelerle, optimum sürtünme kaynağı numunesi fiili olarak imal edilmiş, modelden hesapla elde edilen optimum numunenin sonuçlarıyla karşılaştırılmış, böylelikle, model doğrulaması yapılmıştır. Doğrulanmış model sonucunda elde edilmiş optimum numune mikroyapısal ve mekanik özellikler bakımından detaylı olarak incelenmiştir. Optimum sürtünme kaynağı numunesi ile deneme yanılma yöntemiyle imal edilmiş optimum MIAB kaynağı numunesi karşılaştırılmıştır.

6. Sonuçlar ve Öneriler: Bu bölümde çalışmada elde edilen tüm sonuçlar maddeler halinde verilerek yapılması önerilen çalışma konuları verilmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Katı Hal Kaynağı

Katı hal kaynağı ya da diğer adıyla basınç kaynağı, ilave metal kullanmadan, kaynak yapılan malzemelerin birleşim yüzeyinde ergime sıcaklığının hemen altına kadar ısıtılıp, uygulanan basınç marifetiyle nihai kaynak bağının gerçekleştirildiği kaynak türüdür. Difüzyon kaynağı, sürtünme kaynağı, MIAB kaynağı ve ultrasonik kaynak, katı hal kaynağına verilebilecek en bilinen örneklerdir. Her bir katı hal kaynak yöntemi, temas yüzeylerinde bağ oluşturmak için kendi özgün yöntemine sahiptir. Bu çalışmada en yaygın katı hal kaynağı metodlarından olan sürtünme ve MIAB kaynağı incelenecektir.

Katı hal kaynağında, metalurjik bağ, malzemede ya hiç ya da çok az ergime ile gerçekleşir. Eğer erime olmazsa, ITAB oluşmaz, ya da çok dar bir bölgede oluşur; böylece bağlantı çevresindeki metal, başlangıçtaki özelliklerini sürdürür.

Çoğu katı hal kaynak yöntemi, ayrı noktalar veya dikişler şeklinde değil, temas eden arayüzeyin tamamını birleştiren kaynaklı bağlantılar şeklinde oluşturulur. İki benzer ya da benzemez metal parçasını metalurjik olarak birleştirebilmek için, iki metalin atomik kuvvetletlerinin birbirine çekebilecek kadar yakın temas haline getirilmeleri gerekir. İki yüzeyin normal fiziksel teması sırasında, yüzeylerde bulunan kir, yağ, kimyasal film tabakaları vb. kirleticiler sebebiyle, birleşme için ihtiyaç olan çok yakın fiziksel temas engellenmektedir. Atomsal bağlanmanın sağlanabilmesi için, yüzeydeki kirleticilerin tamamen temizlenmesi gerekir. Füzyon kaynak yöntemlerinde, bu kirleticiler yakılarak uzaklaştırılır, böylece atomsal bağlanma metalin erimesi ve soğuması esnasında meydana gelir. Katı hal kaynağında, atomik bağlanmayı sağlayabilmek için, yüzeydeki kirleticilerin veya tabakaların başka bir yöntemle yüzeyden uzaklaştırılması gereklidir [1, 2].

1.2. Sürtünme Kaynağı

Tarihte ilk insan, ateşi bulmak için bir tahta parçasını diğerlerinin üzerine sürttüğünde, henüz sürtünmeyle ısı oluşumunun meydana gelebileceğinin farkında değildi.

Malzemelerin kaynak edilmesinde kullanılan enerji kaynaklarından birisi de sürtünme enerjisidir. Sürtünme kaynağı ile ilgili ilk patent 1891'de Amerikalı makinist J. H. Bevington tarafından alınmıştır. Bevington sürtünme ısısından yararlanarak boru ve V şekilli bir kalıbın kaynatılabileceğini tescillemiştir. 1924 yılında W. Richter İngiltere'de, H. Klopstock Sovyetler Birliği'nde sürtünme kaynağıyla ilgili patentler almışlardır. 1941 yılında A.R. Nealson ve H. Klopstock silindirik parçaların sürtünme kaynağı için birer patent almışlardır. İkinci Dünya Savaşı sırasında, sürtünme kaynağı Almanlar tarafından plastik boruları alın alına kaynatılması için, yine plastik parçaların birbirine montajlanabilmesi için Amerikalılar tarafından kullanılmıştır. 1950'li yıllara gelindiğinde ise, prosesin uygulanması ve geliştirilmesi konusunda, Rus araştırmacıların büyük katkıları olmuştur. Sovyet mühendisi A. I. Chudikov 1950'lerin sonlarında, metallerin birleştirilmesi için ısı kaynağı olarak sürtünmenin kullanılmasını önermiştir [1, 3, 4, 5, 6, 7].

1.2.1. Sürtünme kaynağı çeşitleri

Sürtünme kaynağının başlıca çeşitleri; sürekli sürtünme kaynağı, volan tahrikli sürtünme kaynağı, lineer sürtünme kaynağı ve kombine sürtünme kaynağıdır.

1.2.1.1. Sürekli sürtünme kaynağı

Sürekli sürtünme kaynağı, direk sürtünme kaynağı olarak da bilinmektedir. Gerekli olan enerji sürekli bir tahrik grubu tarafında sağlanır. Bu yöntem genelde Avrupada kullanılmaktadır [1, 5].

1.2.1.2. Volan tahrikli sürtünme kaynağı

Volan tahrikli sürtünme kaynağı, atalet kaynağı olarak da bilinmektedir. Bu kaynakta, dönen parça, önceden saptanmış bir hızda dönen bir volana bağlıdır. Volan

tahrik sisteminden ayrılır ve parçalar birbirine bastırılır. Bu yöntem özellikle Amerikada de uçak ve uzay sanayiinde kullanılmaktadır [1, 5].

1.2.1.3. Lineer sürtünme kaynağı

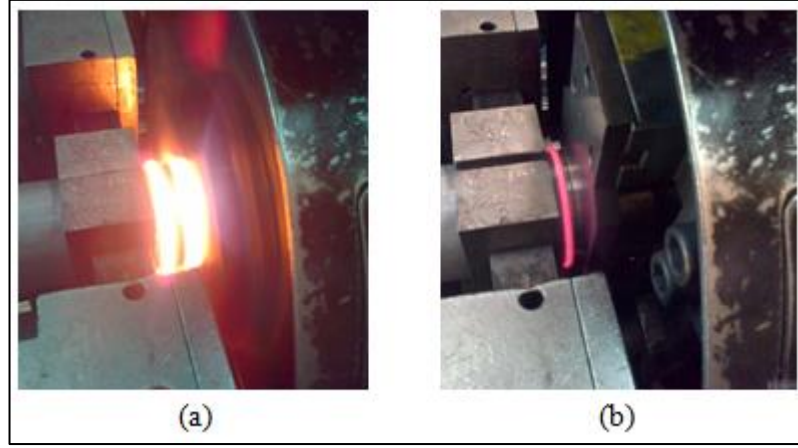
Volan tahrikli sürtünme kaynağından farkı, dairesel dönme hareketi yerine, lineer titreşim hareketi ile kaynağın yapılmasıdır. Diğer sürtünme kaynağı yöntemlerine göre daha karmaşık makina tasarımına ihtiyaç duysa da, dairesel kesitli olmayan parçaların sürtünme kaynağında kullanılabilirler [4, 6].

1.2.1.4. Kombine sürtünme kaynağı

Kombine kaynak yöntemi, atalet kaynağıyla sürekli sürtünme kaynağının ortaklaşa kullanıldığı bir methoddur. Büyük kapasiteli parçaların birleştirilmesinde kullanılır [1, 5].

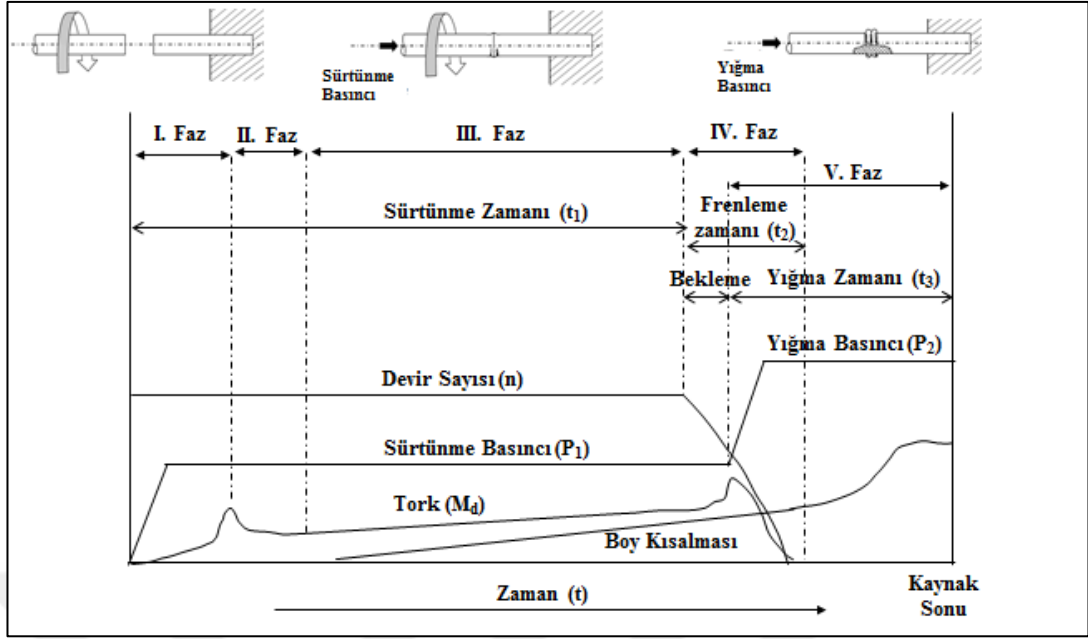
1.2.2. Sürtünme kaynağı prosesi

Sürtünme kaynağı, parçaların birbirine birleşmesini, elektrik ya da ısı enerjisi gibi, başka bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan, mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülerek sağlandığı bir katı hal kaynak yöntemidir. Sürtünme kaynağında, bir tarafından sabitlenmiş bir parça, sabit bir açısal hızla ve sabit bir eksen etrafında döndürülen diğer parçaya aynı dönme eksenini üzerindeki eksenel bir sürtünme kuvvetiyle bastırılarak, alın kısımlarından temas haline getirilir. Bu temas esnasında, mekanik sürtünme sayesinde, sabit parçadan mekanik parçaya doğru ısı iletilir, bu ısı da parçaların arayüzünde bulunan malzemenin plastik deformasyon sıcaklığına kadar yumuşamasına sebep olur. Genellikle, burada oluşan sıcaklık artışı malzemenin ergime sıcaklığından düşüktür. Arayüzde yumuşak duruma gelen parçalar, hemen akabinde uygulanan ve sürtünme kuvvetinden daha yüksek bir değerdeki eksenel dövme (yığma) kuvvetiyle, birleşme bölgesinde plastik deformasyona uğrar ve parçalar birbirine katı halde kaynatılırlar. Sürtünme ve basınç uygulama aşamaları Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Sürtünme kaynağı a) sürtünme fazı b) yığma fazı

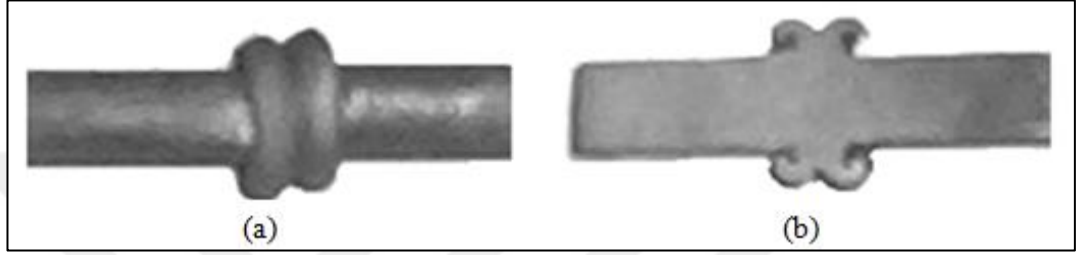
Parçaların kaynatılması esnasında ergime olayı gerçekleşmediği ve yardımcı malzeme kullanılmadığı için bu teknik bir kaynak prosesinden daha fazla, dövme prosesini andırmaktadır. Ergime olayı olmadığı için malzemede tane büyümesi büyük oranda gerçekleşmez, aksine tanelerde küçülmeyeyle beraber ince taneli bir mikroyapı meydana gelir. Hall-Petch denklemine göre, bu ince taneli yapının mekanik dayanımı, malzemede gevrekleşmeye yol açmadan, ana malzemenin dayanımından 3 kata kadar fazla olabilir. Sürtünme kaynağında, kaynak arayüzündeki yumuşamış bölgeler, soğuma esnasındaki plastik deformasyon sayesinde güçlendirilmiş olur [8]. Birleşme bölgesindeki yumuşamış malzemenin uygulanan basınç neticesinde plastik deformasyona uğrayarak parça yüzeylerine doğru taşmasına yığılma bölgesi denir. Yumuşamış malzemenin dışarı atılması sayesinde, ITAB diğer kaynak yöntemlerine göre çok daha küçük olmaktadır.



Şekil 1.2. Sürekli sürtünme kaynağı prosesi

Sürtünme Kaynağı başlıca beş fazdan oluşmaktadır (Şekil 1.2). Birinci faz, “sürtünme fazı” olarak adlandırılır ve iki parça birbirine temas ettikten sonra, kaynak yapılacak parçaların karşılıklı bakan arayüzlerinde sürtme olayı gerçekleşmeye başladıktan sonra başlar. Bu aşamada, açısal hız sabit tutulurken, termal enerjinin oluşumuna olanak verecek ölçüde sürtünme oluşturacak düzeyde bir sürtünme kuvveti uygulanır. Böylece iki parça arasında nisbi bir hareket meydana gelir. Bu nisbi hareket esnasında, noktasal temasla yerel kaynaklar oluşur, hemen akabinde kaynaklanmış bölgelerde tekrar birbirinden ayrılma, tekrar birleşme birbirini takip eder şekilde oluşmaya başlar. Bu fazda, tork değeri sıfırdan, proses boyunca rastlanacak ilk en yüksek değerine ulaşır. Parçanın toplam boyunda oluşacak olan kısalma ya da yanma mesafesi, bu faz esnasında çok küçüktür [9, 10]. İkinci faz, tork en yüksek değerine ulaştıktan itibaren başlar ve tekrar eden birleşme ve ayrılma olaylarını takiben, tüm temas yüzeyinde sıcaklık denge durumunu bulana kadar devam eder [11]. Sürtünme fazında parça iyice yumuşamış durumdadır ve boy kısalması esasen bu aşamada başlar. Uygulanan aksenal sürtünme kuvveti, yumuşamış malzemeyi kaynak arayüzünden radyal yöne bir yığıma halkası oluşacak şekilde dışarı doğru itmeye başlar. Üçüncü faz “denge” fazıdır ve bu fazda tork değeri neredeyse sabittir. “Frenleme Fazı”, “denge fazı”ni takiben gerçekleşir. Kaynak arayüzü ısındıktan ve istenilen ölçüdeki aksenal boy kısalmasını sağlayacak düzeyde bir sürtünme basıncı uygulaması gerçekleştirildikten sonra, elektrik motoru

kapatılır ve dönen parçaya frenleme uygulanır. Parça dönmesi hızını kaybetmeye başladığı esnada, en yüksek tork değerine ulaşılır. Parça dönmesi tamamen sonlanınca da, tork değeri azalarak sıfırlanır. Son aşama “Bitirme fazı”dır. “Bitirme” fazı, “Yığılma fazı” tamamen tamamlanmadan başlar. Bu fazda, sürtünme kuvveti, dövme kuvveti değerine yükseltilir. Yığılma fazı sonucunda parçaların kısılması limit durumdadır [9-13]. Tipik bir sürtünme kaynağı yığılma halkası (kaynak dudağı), Şekil 1.3’te görülmektedir.



Şekil 1.3. Sürtünme kaynağı yığılma halkası (kaynak dudağı) a) kaynatılmış parça b) kaynak kesidi

1.2.3. Sürtünme kaynağı yapılabilen malzemeler

Sürtünme kaynağı ile, demir bazlı malzemeler, düşük karbonlu çelikten yüksek alaşımlı çeliklere ve termoplastiklere kadar, geniş bir yelpazede malzemeler kaynatılabilmektedir. Paslanmaz çelikler, sinterlenmiş çelikler, verilen uygun kaynak parametrelerinde rahatlıkla kaynaklanabilirler. Yöntem, yüksek dayanımlı ısıl işlemler çeliklere de uygulanabilmektedir. Sürtünme kaynağında, kaynatılacak malzemenin, dövülebilir ve kuru sürtünme özellikleri iyi olan malzemeler arasından seçilmesi gerekir. Kuru yağlama sağlayan alaşım elementleri bağlantı bölgesi kaynak sıcaklığına erişmesini engeller [5, 14]. Şekil 1.4’te, malzemelerin ve malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağı kabiliyeti gösterilmiştir.

Aşağıdaki bazı sınırlamalardan dolayı metal ve alaşımlar bu yöntem ile kaynaklanamazlar:

1. Döküm malzemeler: içersinde bulunan serbet grafit, yağlama görevi görerek, sürtünme sıcaklığını azaltır
2. Pb içeriği % 0,3’den fazla olan bronz ve pirinç malzemeler
3. % 0,3’ten fazla S, Pb ya da tellerium içeren otomat çelikleri sürtünme sıcaklığını sınırlar

4. Yüksek derecede anizotropik malzemeler geçiş bölgesinde kırılmalığa yol açar
5. Yapısında hazır olarak grafit, MnS, serbest Pb gibi zayıflatıcı faz bulunan malzemeler [5, 14]

	Alüminyum ve alaşımları	Pirinç	Bronz	Sert metal	Kobalt alaşımları	Kolambiyum	Bakır	Bakır-Nikel	Kurşun	Magnezyum alaşımları	Molibden	Nikel alaşımları	Alaşımlı çelik	Karbonlu çelik	Otomat çeliği	Maraging çeliği	Çelik (YMK)	Paslanmaz çelik	Takım çelikleri	Tantalyum	Titanyum alaşımları	Tungsten	Otomotiv supabları	Zirkonyum alaşımları
Alüminyum ve alaşımları	Uygun						Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir						Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir					Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir						
Pirinç		Uygun																						
Bronz			Uygun																					
Sert metal				Uygun																				
Kobalt alaşımları					Uygun																			
Kolambiyum						Uygun																		
Bakır	Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir						Uygun																	Uygun
Bakır-Nikel								Uygun																
Kurşun									Uygun															
Magnezyum alaşımları										Uygun														
Molibden											Uygun													
Nikel alaşımları												Uygun												
Alaşımlı çelik	Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir											Uygun												
Karbonlu çelik	Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir											Uygun												
Otomat çeliği													Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir											
Maraging çeliği																								
Çelik (YMK)																								
Paslanmaz çelik	Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir																							
Takım çelikleri																								
Tantalyum																								
Titanyum alaşımları																								
Tungsten																								
Otomotiv supabları																								
Zirkonyum alaşımları																								

Uygun
 Uygulamada tam bir bağlanma olmayabilir
 Deneyimler yetersiz yada hiç yok

Şekil 1.4. Malzemelerin, malzeme kombinasyonlarının sürtünme kaynağına uygunluğu [5, 14]

1.2.4. Sürtünme kaynağının endüstride kullanım alanları

Sürtünme kaynağıyla imal edilen parçalar uçak ve uzay sanayii parçaları, otomotiv parçaları ve endüstriyel parçalarda kullanılabilir. Sürtünme kaynağıyla imal edilen parçalar arasında, kesme takımları, ziraat makineleri, muylu, şaft, motor valfleri, tork konverter kaplan ve eksantrik milleri gibi otomotiv parçaları, petrol kuyusu sondaj ekipmanları, çöp bidonları, askeri ekipmanlar sayılabilir.

Sürtünme kaynağında, yığılma basıncı uygulaması esnasında, yumuşamış bölge kaynak alanının dışına doğru itilir. Bu da sürtünme kaynağı yönteminin küçük ITAB bölgesine sahip olmasının başlıca sebebidir. Hızlı bir operasyon olduğu için kitle üretimine uygundur. Parçalardan bir tanesi döndüğü için, sürtünme kaynağı ile genellikle simetrik parçalar imal edilirler [15].

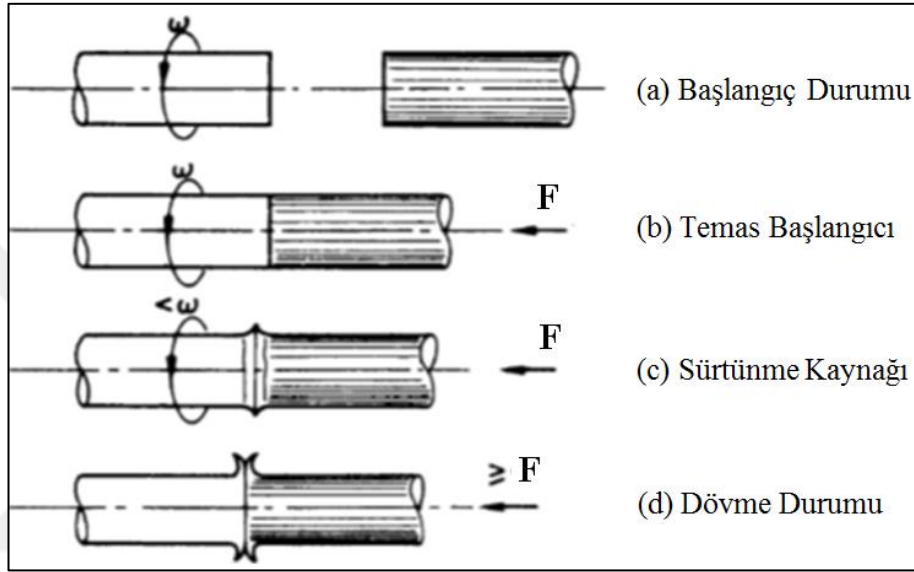
Sürtünme kaynağında diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi temizlik açısından özel bir uygulama gerekmez. Genelde alevle kesilmiş yüzeyler, gres, boya ve diğer bulaşıklar kaynağın yapılmasını engellemez. Yüzeyde bulunan pas ve kaplama kaynak işleminde problem oluşturmaz. Ancak kalın oksit tabakalardan, yüzeyde bulunan derin çizik ve deliklerden kaçınılmalıdır. Özellikle oksit tabakalarının sorun olduğu alüminyum-çelik gibi farklı metallerin kaynağında yüzey kalitesi son derece önemlidir [5].



Şekil 1.5. Sürtünme kaynağı örnek kullanım alanları [16]

1.2.5. Sürtünme kaynağında sürtünme olayı

Sürtünme kaynağında, ω açısal hızıyla dönen parça, sabit parçaya temas ettikten sonra, kısa bir süre içinde kaynağı gerçekleştirebilecek ısıyı yaymak için, sabit parça aksenal bir F kuvvetiyle, dönen parçanın üzerine bastırılır. Son dövme fazı, sürtünme durduktan sonra uygulanan F ya da F 'den daha büyük bir kuvvetin kısa bir zaman içerisinde uygulanmasıyla gerçekleşir. Toplam kaynak süresi 2-10 sn arasında değişir.



Şekil 1.6. Sürtünme kaynak mekanizmaları [3]

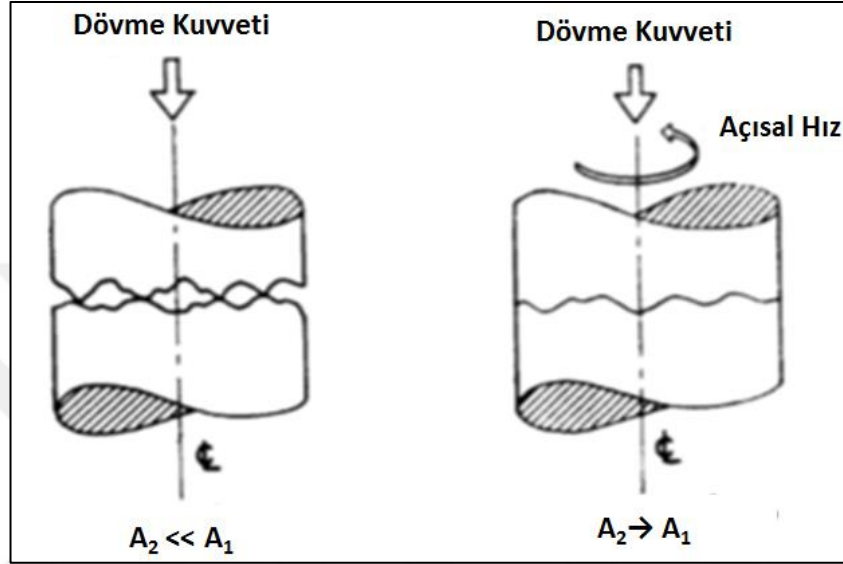
Uygulanan bir ω açısal hızı (dönme hızı) için, kaynak arayüzündeki herhangi bir noktanın çizgisel hızı, dönme ekseninden olan r uzaklığı ile orantılı olarak değişir:

$$v = \omega r \quad (1.1)$$

Bu yüzden, kaynatılan kesitte, sürtünme katsayısı da sürekli değişir. Eğer birbirine kaynatılan parçalar metalden yapılmış ise, sürtme ve bastırma esnasında arayüzde oluşan oksit film oluşumlarını kırarlar.

Takip eden aşamada, dövme fazında uygulanan baskı kuvvetindeki artışla beraber, parçanın anlık temas yüzey alanı (A_2), tüm kaynak yüzeyine (A_1) ulaşır ve böylece parçalar arasında çok kuvvetli bir difüzyon bağı oluşur. Öte yandan unutulmamalıdır ki, aynı normal kuvvet, teğetsel ve dönme hareketi olmadan ilk başta uygulanmış olsaydı, parçalar birbirine sadece izole noktalarda temas edip kaynayacaklardı ve kaynak yüzeyi parçanın tüm yüzeyinden çok daha küçük olacaktı ($A_2 \ll A_1$). Hızlı

nisbi dönme hareketlerinin normal kuvvet uygulamasına eklenmesiyle birlikte, çok kısa bir süre içerisinde lokal sıcaklıkların çok yüksek değerlere gelmesi sağlanır. Böylece, parçalar arasında tam temas oluşumu, sadece parçaların birbirine temas eden yüzeylerdeki pürüzlerin kaynaması ile değil, aynı zamanda pürüzler arasındaki boşlukların doldurulması ile de sağlanır. Bu oluşum Şekil 1.7’de görülmektedir.



Şekil 1.7. Dönmenin sürtünme kaynak mekanizmasına etkisi [3]

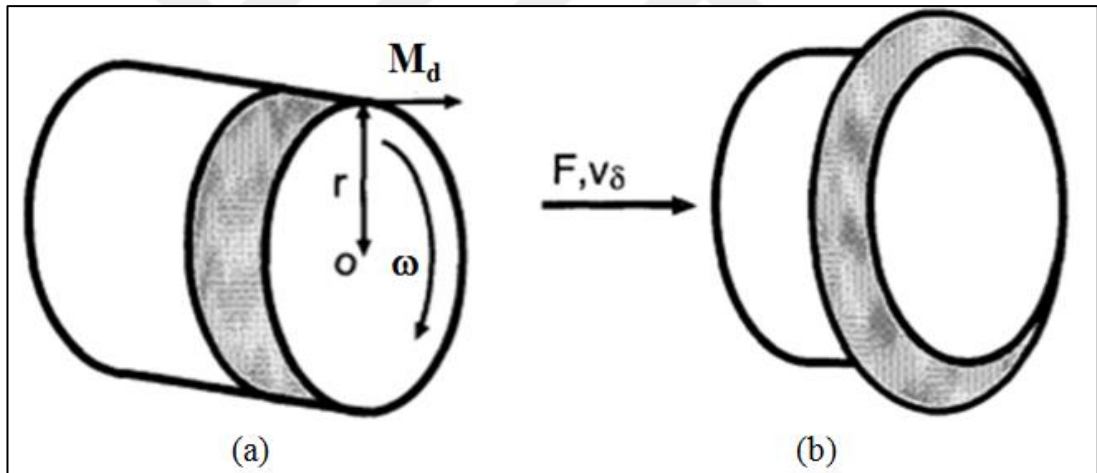
Sürtünme kaynağında, kaynatılacak parçalardan birinin ısı etkisi sağlaması için döndürülmesi, birbirine karşılık gelen yüzey pürüzlerine büyük ölçekli plastik deformasyon uygulanmasını sağlayarak, tüm kaynak yüzey alanında kuvvetli bir kaynak bağı oluşmasını sağlar. Aynı zamanda bu ısınma miktarı, konvansiyonel kaynak tekniklerinde olduğu gibi, malzemeyi eritecek düzeyde olmadığı için de kaynak arayüzeyinde ergimiş sıvı film tabakası oluşmaz. Sürtünme kaynağında, dikkat edilmesi gereken bir husus, belirli bir ω açısal hızı esnasında gerçekleşen ısınma hızının, simetri ekseninden r uzaklığında, bu uzaklıkla doğru orantılı olarak değişeceğidir. Bu yüzden, sürtünme kaynağında her noktada aynı anda aynı ısı oluşumu gerçekleşmez [3]. Bu durumu bertaraf etmek için uygun bir sürtünme süresi ve dövme prosesi uygulamak gerekebilir, bununla beraber boruların kaynağında nisbeten ince boru cidarı nedeniyle, iç çap ve dış çap üzerindeki sıcaklık dağılımı uniform kabul edilebilir.

Sürtünme kaynağında sürtünme katsayısı çizgisel hızla birlikte karmaşık bir şekilde değişir. Birleşim yerlerinin kesilmesinin yanı sıra, kontak noktalarının ve bu

noktaların gerisindeki malzemelerin deformasyonu da sürtünme kaynağında ısı kaynaklarıdır. Sıcaklık 200-300°C'ye yükseldiğinde, yağ, kir vb malzemeler yakılarak yüzeyden uzaklaştırılır, devamında kuru sürtünme durumu gerçekleşir ki bu da sürtünme kuvvetini artırır. Sürtünme kuvvetinin artması sonucunda, sıcaklık daha da yükselir. Yüzeydeki tüm pürüzler törpülenip, yapışma sağlanana kadar da parçalar arasında oluşan ve sürtünme direncinden doğan tork da tepe noktasına ulaşır (Şekil 1.2). Bu esnada sıcaklık 900°C'ye kadar çıkabilir. Bir noktadan sonra plastikleşmiş malzeme yırtılmaya başlar ve böylece, azalan dirençle birlikte, torkta ve neticesinde sıcaklıkta da düşüş gözlemlenir [3,10, 17].

1.2.6. Sürtünme kaynağında ısı girdisi

Prosesteki toplam ısı girdisi (Q), sürtünme kaynaklı ısı girdisi (Q_1) ve deformasyon kaynaklı ısı girdisinin (Q_2) toplamıdır [18].



Şekil 1.8. Sürtünme kaynağında idealize ısı girdisi a) sürtünme kaynaklı b) deformasyon kaynaklı [18]

Toplam ısı girdisi (kJ/sn) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1.2)$$

Sürtünme kaynaklı ısı girdisi, sürtünme hızı ve kaynatılmak istenilen parçaların dudak oluşumu esnasında oluşan sürtünme fazında birbirine uyguladığı nisbi hareketten kaynaklanan sürtünme torkuyla çarpımından elde edilir.

Sürtünme kaynaklı ısı girdisi (J/sn) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q_1 = (2\pi\omega M_d) \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)'te, ω , açısal hızdır (dev/dk), M_d , sürtünme momentidir (N.m). Sürtünme kaynağındaki sürtünme momenti aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$M_d = (2\pi\mu P_1 r^3)/3 \quad (1.4)$$

Burada, P_1 (N/m^2), sürtünme basıncı, r (m), kaynatılan parçanın yarıçapı ve μ 'de sürtünme katsayısıdır. Sürtünme kaynaklı ısı girdisi (Q_1), sürtünme fazı sırasındaki (Q_{1P1}) sürtünme kaynaklı ısı girdisi ile yığıma fazındaki sürtünme kaynaklı ısı girdisinin (Q_{1P2}) birleşimidir.

Deformasyon kaynaklı ısı girdisi, itme kuvvetiyle, parçadaki yanma oranının çarpımıdır. Parçadaki yanma oranı, aslında malzemenin deformasyon hızını vermektedir.

Deformasyon kaynaklı ısı girdisi (J/sn) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q_2 = Fv_\delta \quad (1.5)$$

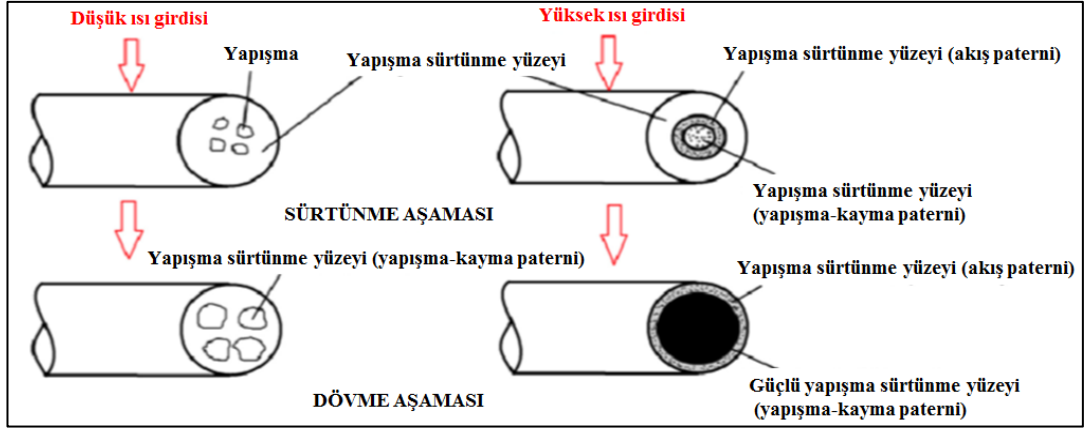
Denklem (1.5)'teki F (N), itme kuvveti, v_δ (m/sn) ise parçanın yanma oranıdır. Yanma oranları, sürtünme ve yığıma fazlarında farklılık göstermektedir:

$$v_1 = \delta_1/t_1 \quad (1.6)$$

ve

$$v_2 = \delta_2/t_2 \quad (1.7)$$

Denklem (1.6) ve (1.7)'de görülen δ_1 (m) ve δ_2 (m), sürtünme ve yığıma fazlarındaki deformasyon iken, t_1 (sn) ve t_2 (sn) ise, sürtünme süresi ve frenleme süresidir. Deformasyon kaynaklı ısı girdisi (Q_2), sürtünme fazı esnasında oluşan deformasyon kaynaklı ısı girdisi (Q_{2P1}) ve yığıma fazı esnasında oluşan deformasyon kaynaklı ısı girdisinin (Q_{2P2}) birleşiminden meydana gelmektedir [18].



Şekil 1.9. Yüksek ve alçak ısı girdisi esnasında sürtünme yüzeyinde yapışma olayı [18]

Şekil 1.9’da sol üstte görüldüğü gibi, düşük sürtünme basıncında, parçalar aralıklı olarak birbirine yapışırlar. Bu durumdaki parçaya eğer yığma basıncı uygulanırsa, yapışma yüzeyi genişlese de, tüm kaynak alanına asla ulaşamaz. Bu durumda, zayıf bir kaynak yapışması gerçekleşir ve mükemmel olmayan kaynak bağı oluşur. Yüksek sürtünme sıcaklıklarında, yüksek ısı girdisi ile beraber, Şekil 1.9’un sol üst bölgesindeki durum gerçekleşir. Burada, merkezde belirgin bir yapışma yüzeyi oluşmuştur. Bu durumdaki parçaya yığma basıncı uygulandığında, merkezdeki yapışma yüzeyi kesintisiz olarak tüm kaynak yüzeyine yayılarak, güçlü bir kaynak bağı oluşmasını sağlar. Bahsi geçen bu durum, içi dolu çubukların kaynağında geçerlidir. Boru şeklindeki parçaların kaynağında bu mekanizma ihmal edilebilir. Boru şeklindeki parçaların sürtünme kaynağında, içi dolu parçaların sürtünme kaynağından daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir [18, 19].

1.3. MIAB Kaynağı

MIAB kaynak yöntemi (Magnetically Impelled Arc Butt Welding), elektromanyetik kuvvet yardımıyla farklı veya aynı malzemelerin birleştirilmesini sağlayan bir katı faz prosesidir. MIAB kaynağı, manyetik alan yardımıyla, kaynak edilecek iki parçanın arasında dönen bir kaynak arkı oluşturma esasına dayanır. Bu yöntemde, hareketli parçanın ana parçaya “soğuk” kaynak edilmesi sağlanır. Sürtünme kaynağı gibi geleneksel katı hal kaynak yöntemleriyle birleştirilmeleri mümkün olmayan, belirli bir aksel simetriye sahip olmayan düzensiz geometrideki parçaların ve

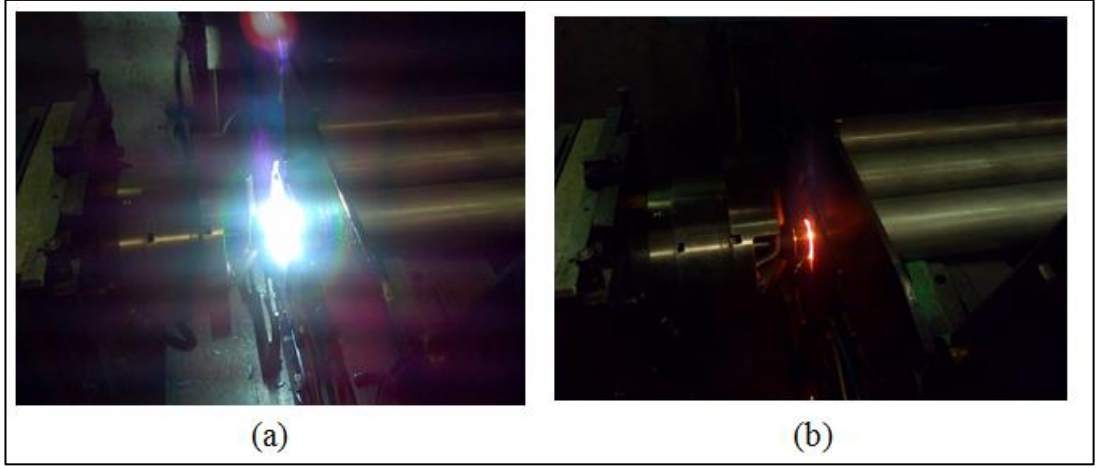
dairesel olmayan parçaların dahi tek seferde ve kabul edilebilir kalitede kaynak edilmesi MIAB kaynak yöntemiyle mümkündür.

1.3.1. MIAB kaynağı prosesi

Isı oluşum yöntemleri arasında farklılık olsa bile, MIAB kaynağı da tıpkı sürtünme kaynağı gibi bir katı hal kaynak yöntemidir [15]. MIAB kaynağı ilk olarak, 1950-1960 yılları arasında Paton Elektrik Kaynağı Enstitüsü tarafından araştırılmaya başlanmıştır. Daha sonra, KUKA Kaynak Sistemleri, yöntemin ticari uygulamasını geliştirmiştir. KUKA firması, piyasaya sunduğu MIAB kaynak makinasına Magnetarc adını vermiştir. Günümüzde, MIAB kaynak yöntemi, daha çok Avrupada kullanılmaktadır. Ülkemizde de büyük otomotiv ana sanayi ve bazı yan sanayi firmalarında seri imalat amaçlı kullanılmaktadır. Paton, MIAB araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam etmektedir.

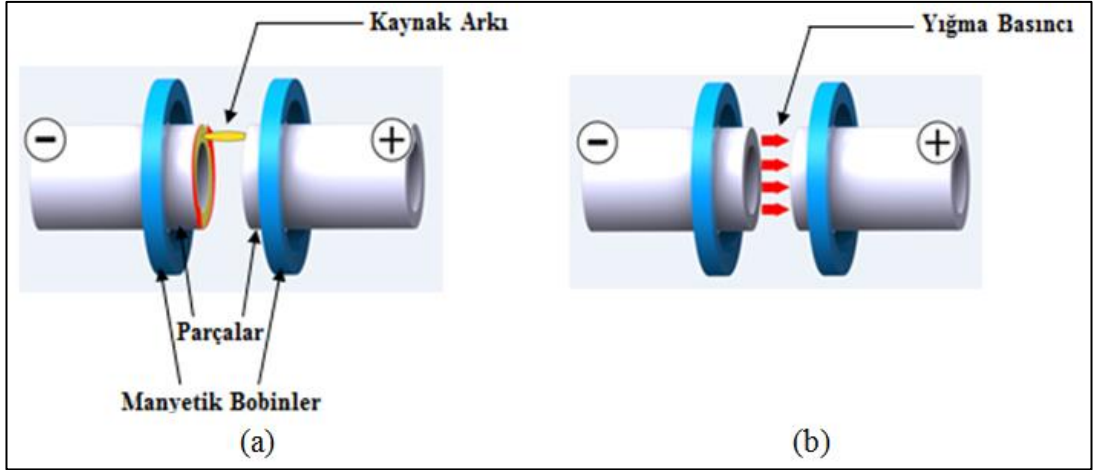
MIAB kaynağı, elektrik arkı sonucunda oluşturulan ısı ile kaynak edilecek parçaların karşılıklı yüzeylerinin kor hale getirilmeleri sonucunda, kor haline gelen parçaların dövülmesi esasına dayanan bir kaynak yöntemidir.

MIAB kaynağında, dönen bir kaynak arkı, parçaların alın kısımlarını solidus sıcaklığına kadar ısıtır ve bu sayede parçaların sadece alın kısımlarındaki malzemede yumuşamaya sebep olur [20] (Şekil 1.10a). Daha sonra, tıpkı sürtünme kaynağında olduğu gibi, iki parça birbirine belirli bir yığıma basıncıyla bastırılarak, kaynak prosesi tamamlanır (Şekil 1.10b). Manyetik akının oluşması için boşluk ihtiyacı olduğundan dolayı proses, ancak içi boş parçalara uygulanabilmektedir [15, 20-28]. MIAB kaynağında, gerekli ısı oluşumu elektrik akımı sayesinde olduğundan, yöntem sadece elektrik iletken malzemelere uygulanabilir.



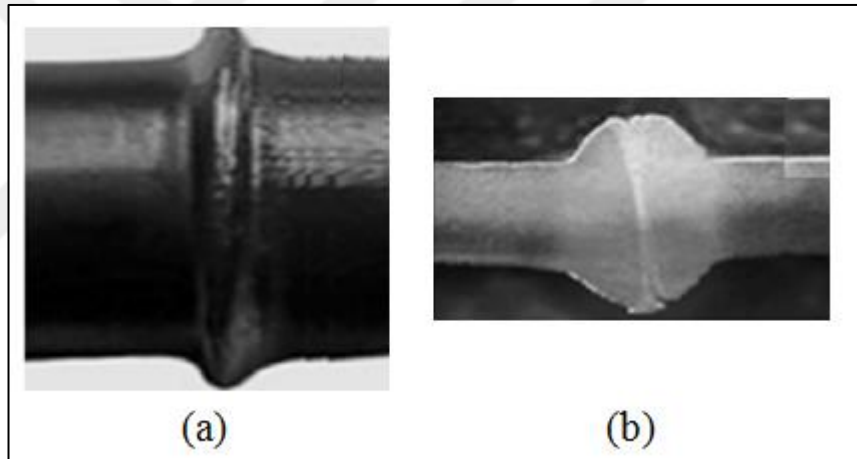
Şekil 1.10. MIAB Kaynağı a) ark oluşumu b) basınç uygulaması

Bu metotta kaynak prosesi beş fazda gerçekleşmektedir. Birinci fazda, iki adet boru şeklindeki parça birbirlerine temas etmeden aksenel olarak hizalanarak, rijit bir şekilde fikstürlerle tutturulurlar. Parçaların açıkta kalan uçlarına yakın bir lokasyonda her bir parça üzerine manyetik sargılar konumlandırılır. İkinci fazda, iki parça arasındaki boşluk sıfırlanacak şekilde birbirine yaklaştırılırlar. Bu esnada kaynak akımı ve manyetik sargıların akımlarının kontağı henüz açılmamıştır. Takip eden fazda, kaynak akımı ve sargı akımlarının kontağı açılır. Parçalar aynı anda birbirinden 1-6 mm arasında bir değerde uzaklaştırılmaya başlanırlar, ki bu da kaynak akımının bir parçadan diğerine atlayarak kaynak arkı oluşturmasına sebep olur. Dördüncü aşama “ark rotasyon fazı” olarak adlandırılır. Bu aşamada, sargılardaki manyetik alan, kaynak arkı ile etkileşim içine girerek, kaynak arkı dönmeye başlar (Şekil 1.10a ve Şekil 1.11a). Bu ark parçaların uç kısımlarının uniform olarak ısınmasına ve yumuşamasına sebep olur (Şekil 1.10a). Sonuncu aşama, “yığma fazı”dır. Bu fazda, kaynak ve manyetik sargı akımının kontağı kapatılmadan, parçalar dövme benzeri bir prosesle birbirleri üzerine güçlü bir şekilde bastırılırlar (Şekil 1.10b ve Şekil 1.11b) [22, 25, 26]. Literatürde bu baskı yaklaşık olarak 30 ila 150 N/mm² [15, 22-26] arasında uygulanmaktadır. Böylece, yığma ya da kaynak dudakları denilen boşluksuz bir ara bölge oluşur. Proses sonunda, kaynak ve manyetik sargı devresi kesilir.



Şekil 1.11. MIAB kaynağı proses şeması a) manyetik ark oluşumu b) basınç uygulaması

Tipik bir MIAB kaynak dudağı Şekil 1.12’de gösterilmiştir.



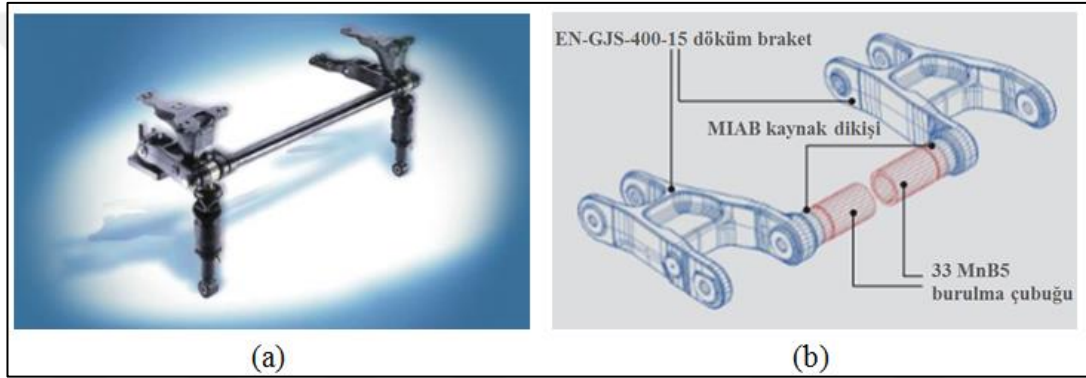
Şekil 1.12. MIAB kaynağı yığıma halkası (kaynak dudağı) oluşumu a) kaynatılmış parça b) kaynak kesidi

1.3.2. MIAB kaynağının endüstride kullanım alanları

MIAB kaynağı ile 6 mm et kalınlığına ve 219 mm çapa kadar olan boruların kaynağı, koruyucu atmosfer kullanımına gerek kalmadan yapılabilmektedir [25]. MIAB kaynak prosesi sayesinde, kaynatılacak olan parçalar dairesel kesite sahip olmak zorunda değildir. MIAB kaynağıyla, otomotiv kardan milleri, aksları, arka çamurluk braketleri, şok emiciler imal edilebilmektedir [15, 21]. MIAB kaynağı ile kaynatılmış arka aks parçaları, örneğin Ford Transit Connect, Fiesta ve Opel Astramax model araçlarda kullanılmaktadır. MIAB kaynak yöntemiyle, sondaj boruları, doğal gaz dağıtım boruları üretimi yapılabilmektedir.

Sürtünme kaynağı, tabiatı gereği simetrik silindirik parçaların imalatına elverişlidir, oysa asimetrik, silindirik olmayan muylunun cansız dingile kaynatılması için, MIAB kaynak yöntemi tasarımda ve imalatta daha fazla esneklik ve fizibilite sağlar.

Şekil 1.13’de görüldüğü üzere, MIAB kaynağı, ThyssenKrupp Otomotiv Sistemleri tarafından, Iveco Stralis’in kamyon kabin süspansiyon elemanı imalatında da kullanılmaktadır [22]. Bu uygulamada, dökme demir bir kol, çelik ekstrüzyondan imal edilmiş bir burulma koluna MIAB kaynağıyla kaynatılmıştır. Bu uygulamada, sürtünme kaynağının aksine, MIAB kaynağı dökme demir parçalarla çelik boruların kaynağında başarıyla uygulanmaktadır.

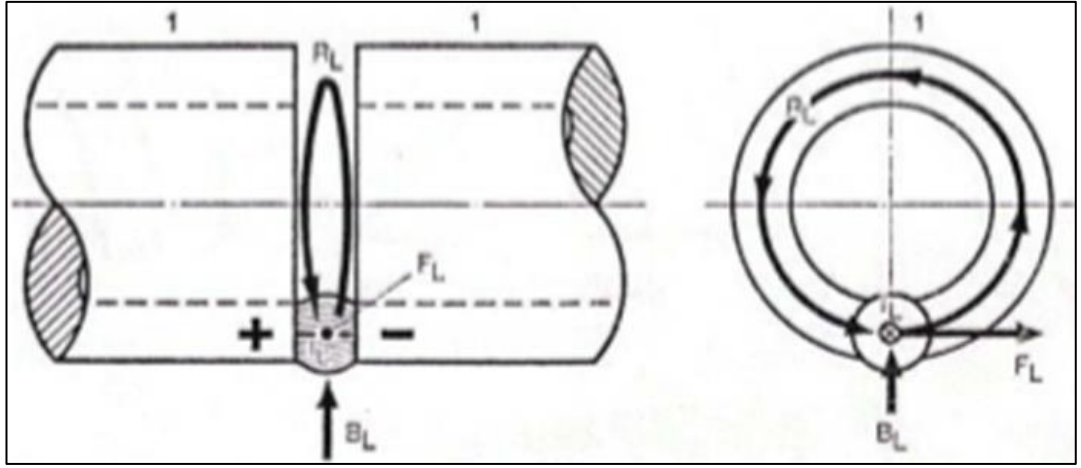


Şekil 1.13. MIAB kaynağı ile kaynatılmış kabin süspansiyon sistemi a) final parça resmi b) kabin süspansiyon burulma kolu ve döküm braketin kaynak lokasyonu [22]

Tıpkı sürtünme kaynağında olduğu gibi, MIAB kaynağı da sızdırmazlık özelliğine sahiptir. Bu sebeple, MIAB kaynağı yöntemiyle yapısal parçaların yanısıra basınçlı yaylar, kardan milleri, amortisörler, süspansiyon sistemleri ya da basınçlı kaplar imal edilebilir [22].

1.3.3. MIAB kaynağında ark oluşumu

Şekil 1.14’de görüldüğü üzere, MIAB kaynak prosesi, arkın içinden akan elektrik akımı ile manyetik alan arasındaki etkileşime dayanır.



Şekil 1.14. MIAB kaynağında akım ile uygulanan manyetik alan arasındaki etkileşim [15]

Arkın oluşturulmasından sonra, ark üzerinde elektromanyetik kuvvet (F_L) meydana gelir. Bu elektromanyetik kuvvet, ark içerisindeki elektrik akımının aksel bileşeni (I_L) ile, uygulanan manyetik alanın radyal bileşeni (B_L) ile kesişmesinden meydana gelir. Oluşan elektromanyetik kuvvet, Lorentz Kuvveti diye anılır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

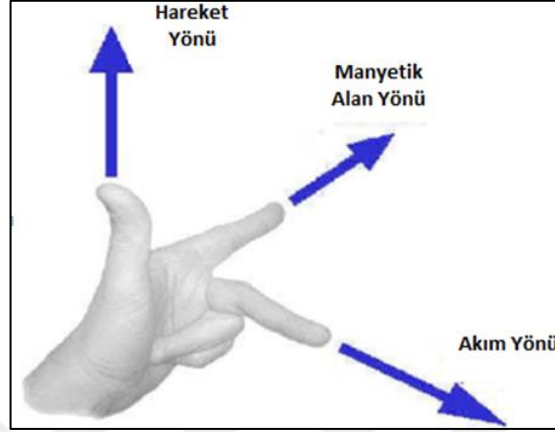
$$f = JB \quad (1.8)$$

Denklem (1.8)'de, f , elektromanyetik akımın yoğunluğu, J , akım yoğunluğu ve B , manyetik alan yoğunluğudur. Elektromanyetik kuvvetin büyüklüğü, manyetik alan yoğunluğu, B , ark akımı I ve ark uzunluğu L ile orantılıdır:

$$F \sim BIL \quad (1.9)$$

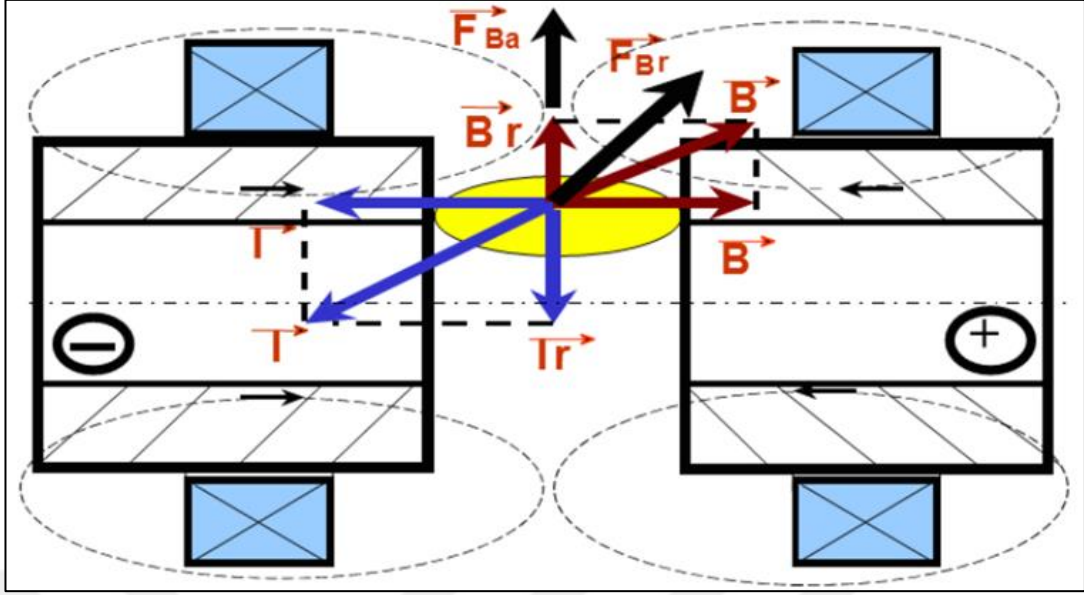
Kaynak akımına uygulanan elektromanyetik kuvvet, ark'ın dönerek hızlanmasını sağlar. Dolayısıyla, elektromanyetik alanın şiddeti, ark akımının büyüklüğü, ya da iki parça arasındaki boşluğu ayarlayarak, arkın hızı değiştirilebilir. Ark akımının büyüklüğünü değiştirerek dönen arkın hızını değiştirebilme yeteneği, MIAB kaynak prosesinde çok önemli bir rol oynar. Özellikle, dövme aşamasından hemen önce, çok kısa bir sürede çok hızlı olarak kaynak akımının artırılması sayesinde, hızlıca kor haline gelerek yumuşamış malzeme dışarı doğru fişkirir ve bu da yumuşayan yüzeydeki pisliklerin temizlenmesini sağlar. Bu durum, koruyucu gaz kullanma gereksinimini ortadan kaldırır.

Elektromanyetik kuvvetin yönü, Fleming'in sol el kuralı uygulanarak bulunabilir. Sol el kuralı Şekil 1.15'de gösterildiği gibi, baş parmak elektromanyetik kuvvetin (F_L) yönünü gösterirken, işaret parmağı elektromanyetik alanın radyal bileşenini (B_L), orta parmak da, elektrik akımının aksenal bileşenin (I_L) yönünü gösterir.



Şekil 1.15. Fleming'in sol el kuralı [29]

Fleming'in sol el kuralına göre, arkın dönme yönü, her zaman uygulanan manyetik alan ile kaynak akımına diktir. Oluşan elektromanyetik kuvvet, manyetik alan çizgileri ile etkileşime girer. Şekil 1.16'da, akım geçirilen iletken bir malzeme ile uygulanan manyetik alan arasındaki etkileşim gösterilmektedir. Elektromanyetik kuvvet, iletken malzemenin manyetik akı çizgilerinin hizalandığı, kaynak yapılacak malzemelerin karşılıklı bakan yüzeylerinde oluşur. Arkın parça çevresinde hızlıca dönmesine sebep olan elektromanyetik kuvvetin radyal bileşenine ek olarak, ark üzerinde etkili önemli bir kuvvet daha vardır. Bu kuvvet, arkın radyal bileşeni I_r ve manyetik alanın aksenal bileşeni B_a ile kesiştiğinde oluşur. Ark patlaması etkisiyle, MIAB prosesinin başlangıcında, ark, kaynak yapılacak olan birleşme yüzeyinin her iki tarafta iç çapına doğru itilir. Isınma gerçekleştikçe, kaynak yapılan ferromanyetik malzeme mıknatıslanma özelliğini kaybedip paramanyetik hale geçer. Bu andan itibaren, iç çap artık ısındığı için, manyetik akı yön değiştirerek, dış çapa doğru yönelir. Arkın iç çaptan dış çapa doğru yönelmesi sayesinde de, kaynak yapılacak parçaların arayüzünde uniform bir şekilde ısınma sağlanmış olur.



Şekil 1.16. MIAB kaynağında ark akımının radyal bileşeninin ark hareketine etkisi [25, 30]

1.3.4. MIAB kaynağında ısı girdisi

Başarılı bir MIAB kaynağı, birleşim bölgesinde bölgesel bir kaynak ısısı oluşturup, oluşan bu ısıyı parçalara gönderirken mümkün olduğunca sadece kaynak uygulanacak küçük bir bölgede yumuşama olmasını hedeflemelidir.

Dönen ark sabit bir ısı kaynağı olarak kabul edilirse, ark'dan y kadar uzaklıktaki bir mesafede oluşan sıcaklık Rykalin yöntemine göre hesaplanabilir:

$$T(y,t) = \frac{qy}{2\lambda\pi} \left\{ \left[\frac{\sqrt{4at}}{y} \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) - \sqrt{\pi} \left[1 - \Phi\left(\frac{y}{\sqrt{4at}}\right) \right] \right] \right\} \quad (1.10)$$

Denklem (1.10)'da, T (°C) sıcaklık, t (sn), ark dönme süresi, q (cal/cm °C), arkın ısı girdisi, y (cm), arkın borudan uzaklığı, λ, (cal/cmsn °C), ısı geçirenlik katsayısı, a, (cm²/sn), sıcaklık geçirenlik katsayısı, Φ, Gauss olasılık fonksiyonu'dur [15, 31].

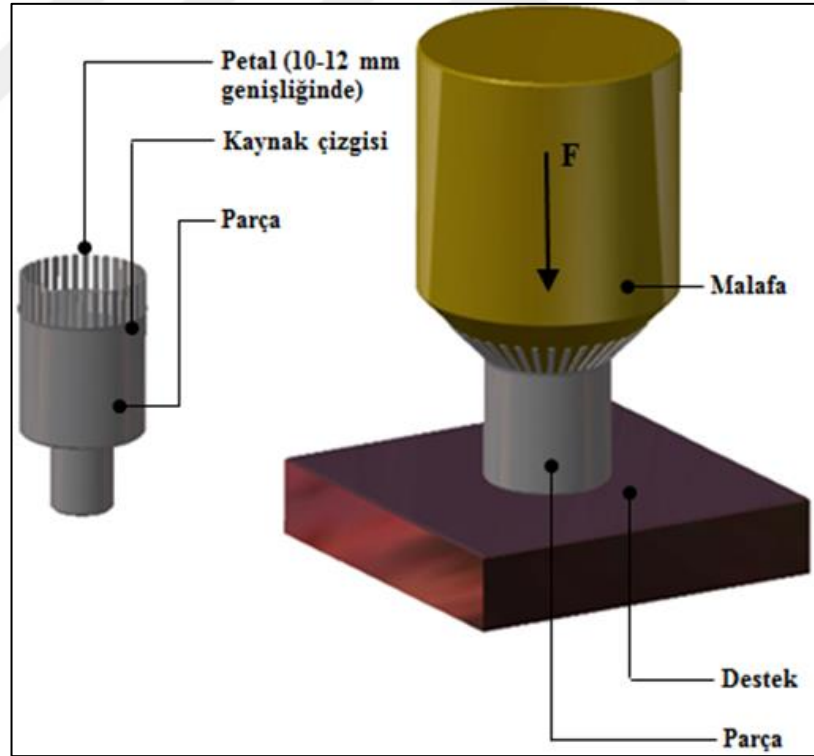
1.4. Endüstride Uygulanan Katı Hal Kaynağı Kalite Test Metodları

Endüstride katı hal kaynağının kalite kontrolü, çekme testine ek olarak, iki farklı tahribatlı test ile gerçekleştirilir, bunlar petal testi (Şekil 1.17) ve çekiç testidir (Şekil 1.18). Bu iki test doğru kaynak parametrelerine ulaşmak için yapılan deneme yanılma numunelerinin atölye ortamında hemen uygulanarak sonuç alınması

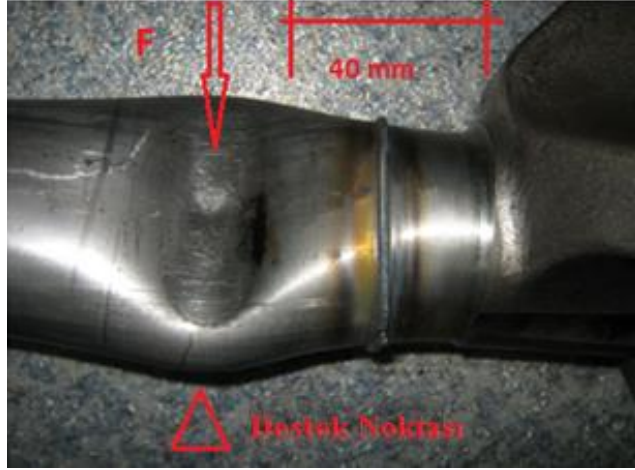
manasında çok pratik testlerdir ve hem sürtünme kaynağının hem de MIAB kaynağının kalite kontrolü için sanayide yaygın olarak kullanılırlar [15, 21].

Petal testinde, kaynatılmış parça Şekil 1.17’de görüldüğü gibi uygun bir boyutta kesilir. Daha sonra, kaynak bölgesinin yaklaşık 20 mm uzağında bir bölgeyi de içeri alacak şekilde, çevresel olarak 10-12 mm genişliğinde aksenal dilimler halinde testereyle kesilir. Bu dilimlere petal adı verilir, bu adlandırma şekil olarak bir çiçeğe benzediği için çiçek yaprağından gelmektedir. Bu parçalar 45° bükülerek, kaynak bölgesi üzerinde gözle görülür çatlak ya da kopma olup olmadığı kontrol edilir [21, 22].

Çekiç testinde, Şekil 1.18’de görüldüğü gibi, parçanın kaynak çizgisinin yakın bir bölgesine parçayı ezecek kuvvette bir çekiç yardımıyla vurulur. Başarılı bir kaynak için bu test sonrasında parçanın kaynak bölgesinde çatlak oluşmaması beklenir [15, 21, 22].



Şekil 1.17. Petal testi



Şekil 1.18. Çekiç testi

MIAB kaynağının başarılı olup olmadığı Şekil 1.12’de görülen kaynak çizgisinde dudak oluşumu ile de yakından ilgilidir. Katı hal kaynağı başarı ile uygulandığı takdirde, kaynatılan her iki parça bundan böyle tek bir bütün parça olarak davranmaya başlayacaktır [21].

1.5. Sürtünme ve MIAB Kaynağının Karşılaştırması

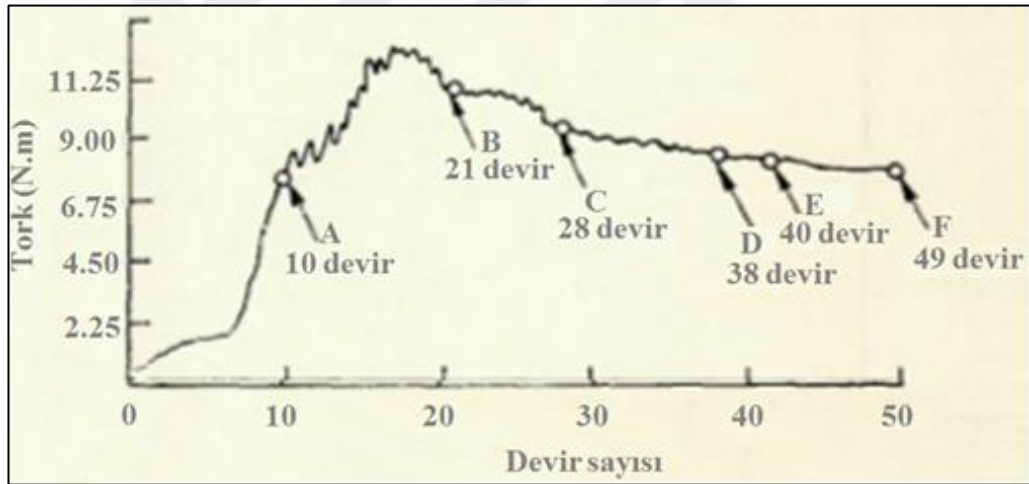
Sürtünme kaynağı gibi, MIAB kaynağında da ideal olan, yuvarlak kesitli parçaların, özellikle tüpler ve boruların, kaynatılmasıdır. Her ikisi de, birleşme yerinde katı hal kaynak bağı oluştururlar ve bu da mükemmel mekanik özelliklerde parça imal etmeye olanak verir. Katı hal kaynağında oluşturulan kaynak bağı, birbirine benzemeyen metallerin kaynağına da olanak verir. MIAB kaynak prosesinde parça döndürülmediği için, MIAB kaynak makinaları sürtünme kaynak makinalarına göre bir nebze daha basittirler. Fakat, MIAB kaynak makinaları, proses gereği üstün elektrik özellikleri gerektirir. MIAB kaynağında, sürtünme kaynağına nazaran daha küçük kaynak dudağı oluşumu mümkün olur. Her iki kaynak prosesi de benzer sürelerde tamamlanır. MIAB kaynağı alın yakma kaynağına benzese de, alın yakma kaynağında, MIAB kaynağında olduğu gibi dönen bir ark oluşturulmaz [15]. Alın yakma kaynağında, parçalar elektrik akımını iyi iletebilen çeneler arasına sıkıştırılır ve parçalara elektrik akımı uygulanır. Hareketli olan çene yavaş yavaş hareket ettirilerek parçaların teması sağlanır. Parça yüzeyleri ideal düzlem olmadığından bu temas ancak belli noktalarda gerçekleşir. Bu noktalar sekonder devreyi kapatırlar. Çok zayıf basma ile temas eden bu noktalar toplam yüzeye oranla çok küçük

olduklarından dirençleri de çok yüksektir. Bu noktalar, üzerlerinden geçen yoğun akımın etkisiyle süratle ısınıp ergirler. Ergiyen bu parçacıklar patlar ve yanan zerrecikler halinde dışarı fırlar. Fırlayan bu zerreciklerin yerine yeni kraterler ve pürüzler oluşur. Çene tekrar hareket ettiğinde bu olaylar tekrar gerçekleşir. Bu şekilde hareketli çenenin birkaç defa hareket ettirilmesi ile kıvılcım bütün yüzeyi kaplar ve yüzey erir. Parçalar bu konumda iken uygulanan ani ve yüksek basınç ile temas dirençleri yok edilip kaynak işlemi tamamlanır [1, 32]. Bu yüzden, alın yakma kaynağında, malzemedeki uniform bir yumuşama sağlanamaz, daha çok kısa devrenin meydana geldiği lokalize bölgelerde ani malzeme fıskırmasına sebep olunur. Bu durum, MIAB ve sürtünme kaynağına göre yığılma prosesi esnasında çok daha fazla malzeme kaybına sebep olur. Alın yakma kaynağında, kaynak arkının hareketini kontrol edebilmek için manyetik alandan faydalanılmaz. Alın yakma kaynağı, boru şeklinde parçaların kaynağı için endüstride kendine yer edinmemiştir [15].

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

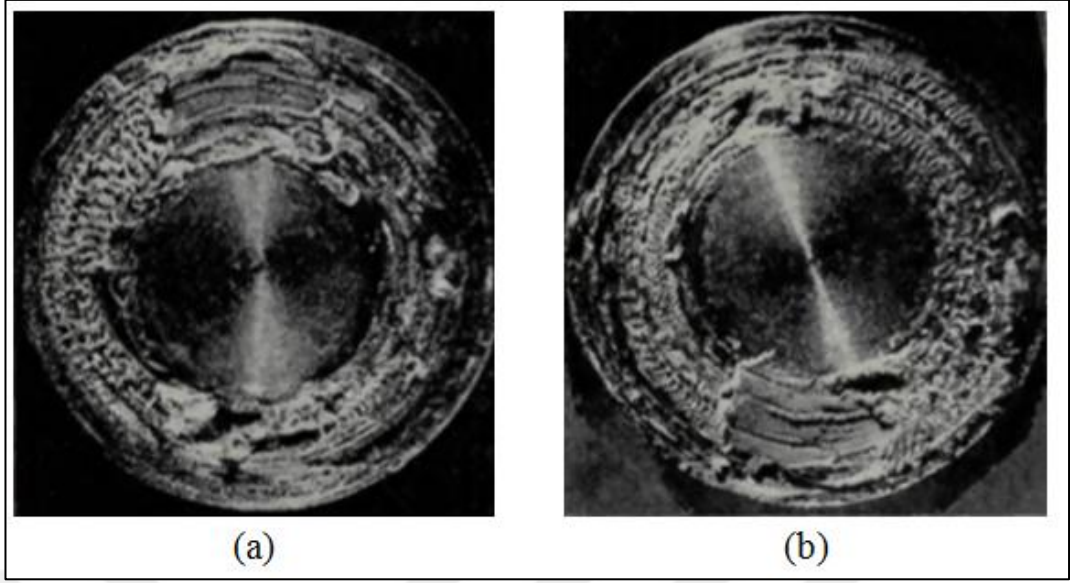
2.1. Sürtünme Kaynağı Literatür Çalışması

Sürtünme kaynağıyla ilgili literatürdeki ilk çalışmalar, sürtünme kaynağında parçanın yumuşaması, sürtünme davranışı, sürtünme kaynağındaki mekanizmalar üzerine yoğunlaşmıştır. 1970 yılında Rao ve arkadaşları alüminyum malzemeden yapılmış içi dolu çubukların sürtünme kaynağını, sürtünme mekanizmalarını incelemek için çalışmışlardır. Tork ölçer kullanarak, sürtünme kaynağı prosesinin tork eğrisinin sürtünme fazı esnasındaki yükselen kısmını konu malzeme için ortaya koymuşlardır. Şekil 2.1’de sürtünme kaynağında tork eğrisinin ilk yükseldiği bölgenin, artan devir sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.1. Sürtünme kaynağında tork eğrisinin yükselen bölgesinin ölçülmesi ($\omega=2000$ dev/dk) [10]

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere, Rao ve arkadaşları, kaynatmaya başladıkları numuneyi, proses adımı Şekil 2.1’deki A noktasına gelince, kaynak prosesi tamamlanmadan makinadan çıkarmış ve parçaların temas yüzeylerini incelemişlerdir. Şekil 2.2’deki kesit resimlerinden, beklendiği gibi kaynak prosesinin başlangıcında kaynatılan parçaların ciddi bir aksenal yüklerle karşılaşmadığı görülmektedir.

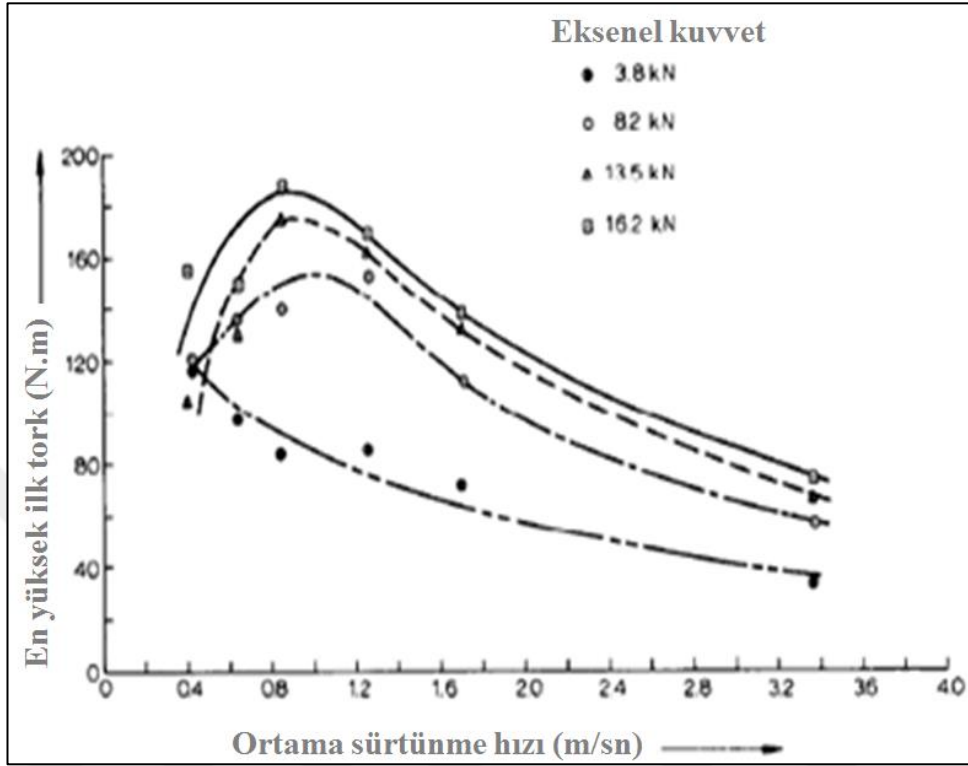


Şekil 2.2. Sürtünme kaynağı prosesinde tork eğrisinin arttığı anda kaynatılan parçaların kesitleri a) sabit parça b) 2000 dev/dk'da döndürülen parça [10]

Kreye ve arkadaşları, ultrasonik, patlama ve sürtünme kaynağı yöntemleriyle, alüminyum ve bakır alaşımlarını kaynatmışlardır. Her üç kaynak türü de, çok kısa sürede tamamlanan ve küçük bir bölgeyi etkileyen proseslerdir. Bu nedenle, kaynak esnasında sıcaklığın ölçümü zordur. Geçirimli elektron mikroskopu (TEM) ile yapılan mikroyapı analizleri neticesinde, ultrasonik ve patlamalı kaynak yöntemlerinde, birleşme için ergimenin gerekli olduğunu, oysa sürtünme kaynağında, sadece lokalize/noktasal bölgelerde ergime sıcaklığına çıktığını gözlemlemişlerdir [8].

Duffin ve arkadaşları, orta karbonlu çelik borularda, farklı dönme hızları ve farklı dövme kuvvetlerinde sürtünme kaynağı deneyleri yapmışlardır. Yapılan çalışmada deneysel olarak tork eğrisindeki değişimleri, aksenal kuvveti ve aksenal kısalmayı ölçmüşlerdir. Şekil 1.2'de görülen sürtünme kaynağı proses eğrisini ve prosesi oluşturan fazları deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Yağ ve kirden arıtılmış iki yüzeye kuru sürtünme uygulanması esnasında, aşınma ve bir parçadan diğerine küçük parçalar halinde metal transferinin gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Buradaki transfer olan malzeme miktarına, sürtünme hızı, aksenal kuvvet, sıcaklık ve çevre şartlarının etkili olduğunu söylemektedirler. Proseste karşılaşılan en yüksek ilk tork değerininin sürtünme hızı ve aksenal kuvvetle değişimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Elde ettikleri bulgulara göre, herhangi bir sürtünme hızında, artan aksenal kuvvetin, en yüksek ilk tork değerini yükselttiğini belirtmişlerdir [9].



Şekil 2.3. Sürtünme kaynağı prosesinde en yüksek ilk tork değerinin sürtünme hızı ve aksenal kuvvetle değişimi [9]

Healy ve arkadaşları, Duffin ve arkadaşlarının ortaya koyduğu, Şekil 2.3'te görülen, en yüksek ilk tork değeri üzerinde sürtünme hızı ve aksenal kuvvetin etkisini, analitik olarak modellemişler ve yaptıkları deneylerle modellerini doğrulamışlardır [13].

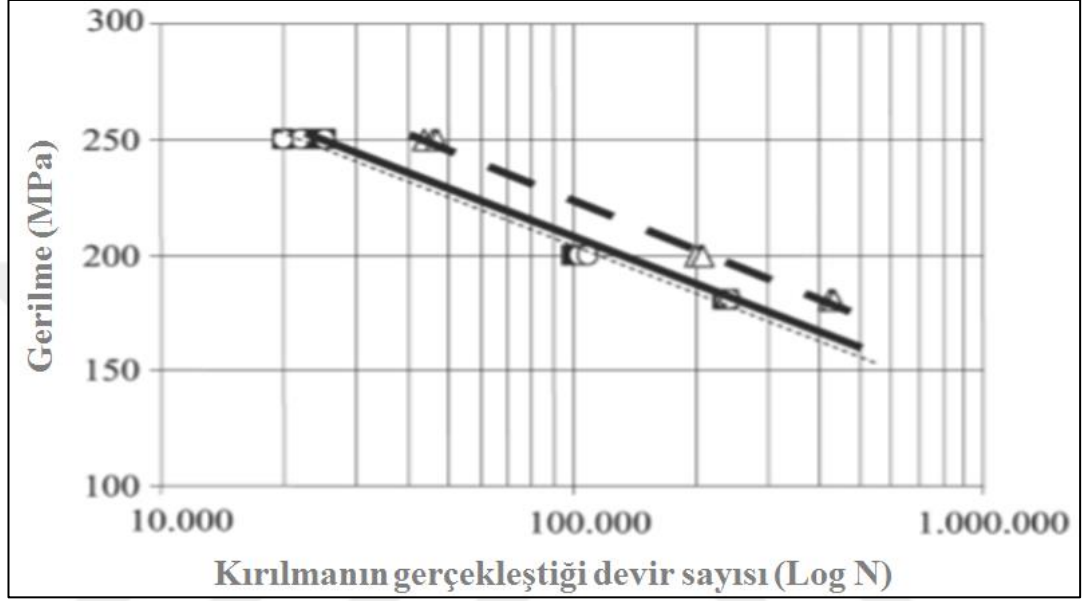
Francis ve arkadaşları, analitik olarak, sürtünme fazındaki, yumuşamış olan ince cidarlı orta karbonlu boru şeklindeki malzemeyi, yüksek vizkozitesi olan Newtonyan akışkan olarak modellemişlerdir. Aksenal kısalma etkisini modellerine dahil etmişlerdir [12].

Şahin ve arkadaşları [33-37], sürtünme kaynağının mikro ve makro karakterizasyonu konusunda pek çok çalışma yapmışlardır. Şahin ve arkadaşları [33], plastik deformasyona uğramış çeliklerin sürtünme kaynağı ile kaynatılması konusunda yaptıkları çalışmada, plastik deformasyonun çelik malzemelerin kaynak kabiliyeti üzerinde bir etkisinin olmadığını ortaya koymuşlardır. Dolayısıyla, sürtünme kaynağının plastik deformasyona uğramış çelik parçaların kaynatılması için uygun

bir yöntem olduğunu söylemişlerdir. Kendi yaptıkları sürtünme kaynağı makinası ile farklı çaplarda veya aynı çaplarda orta karbonlu çelik çubukları kaynatmışlardır. DoE yönteminin en basit şekli olan “İki Seviyeli İki Faktörlü Tam Faktöryel” metodunu kullanarak deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme basıncını ve sürtünme zamanını değişken kabul etmişlerdir. Bu esnada yığma zamanını, yığma basıncını ve dönme hızını sabit tutmuşlardır. Kaynattıkları parçalara çekme deneyleri uygulamışlar, giriş parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisini yorumlamışlardır. Ayrıca, kaynak bölgesinde dikey (kaynak çizgisi üzerinde) ve çubuk boyunca aksenal yönde mikro-sertlik ölçümleri yapmışlardır. DoE ve istatistik yöntemle parametrelerin yorumlanmasının kaynak prosesi için çok uygun ve verimli bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Kaynatılan çubukların çaplarının mikroyapı üzerinde etkili olduğunu, eşit çaplı çubukların birbirine kaynatılması ile daha iyi bir kaynak kabiliyeti ve malzeme iç yapısı elde edildiğini, farklı çaplarda parçaların birbirine kaynatılmasına nazaran iç yapının, martenzit değil de perlit şeklinde oluştuğunu göstermişlerdir. Yaptıkları deneylerde martenzit mikroyapılı parçalarda, çekme dayanımlarının da düştüğünü gözlemişlerdir.

Şahin ve arkadaşları yaptıkları başka bir çalışmada [34], orta karbonlu çeliklerle östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışma için, AISI 1040 ile AISI 304 malzemelerinden faydalanmışlardır. Her iki malzemenin karbon oranları farklı olsa da çekme dayanımı değerleri birbirine benzerdir. Önceki çalışmalarında yaptıkları test yöntemlerine ek olarak, bu çalışmalarında çentik darbe deneyleri ve yorulma deneyleri de uygulamışlardır. DoE yöntemini kullanarak, 10 mm çapında çubukları birbirine kaynattıkları [33] nolu çalışmalarındaki aynı parametreleri [34] nolu çalışmalarında da kullanmışlar ve bu parametrelerle kaynattıkları parçaların çekme dayanımlarını ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, sürtünme zamanının optimum olması durumunda parçaların çekme dayanımının en yüksek değerinin daha düşük çekme gerilmesine sahip olan ana malzeme seviyesinde olabildiğini (AISI 1040), sürtünme süresi arttırıldıkça, kaynaklı parçadaki çekme dayanımının düştüğünü belirtmişlerdir. Bu bağlamda, kaynağın dayanımının daha zayıf olan malzeme tarafından domine edildiğini söylemişlerdir. DoE sonucunda imal ettikleri optimum parçalara yorulma ve çentik darbe deneylerini uygulamışlardır. Çekme deneylerinde elde ettikleri sonuçlarla örtüşecek şekilde,

yorulma deneyinde de kaynaklı parçanın yorulma dayanımının en iyi durumda, AISI 1040 malzemesinin ana malzemesinin yorulma dayanım değerine sahip olabildiğini göstermişlerdir. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, sürtünme kaynağında yorulma dayanımı da, çekme dayanımında olduğu gibi, daha düşük dayanım değerine sahip olan parça tarafından domine edilmektedir.

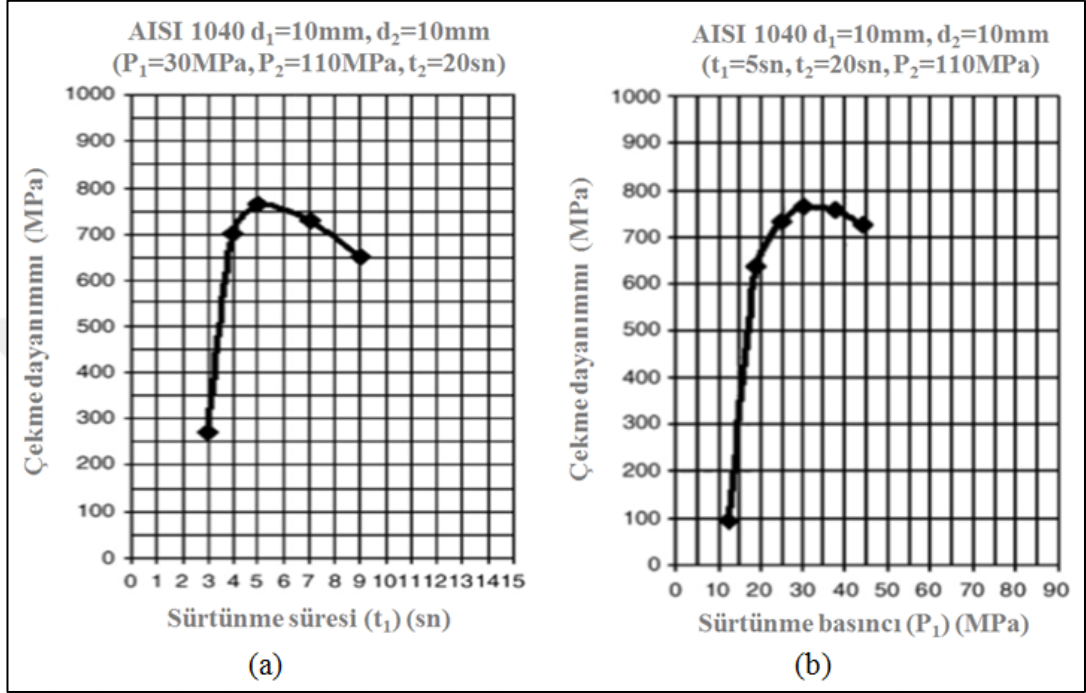


Şekil 2.4. AISI 1040 ve AISI 304 malzemeleri kullanılarak üretilmiş optimum sürtünme kaynaklı numunenin yorulma dayanımının ana malzemelerle karşılaştırması ($\sigma_{ort} = 400$ MPa) [33]

Şahin ve arkadaşları, aynı çalışmada [34], çentik darbe deneyleri sonucunda ölçülen kırılma enerjilerini incelediklerinde de benzer yorumlara ulaşmışlardır. Düşük karbonlu çeliklerin orta karbonlu çeliklerle kaynatılması esnasında, karbon atomlarının AISI 1040 malzemedan, AISI 304 malzemeye doğru yayındığını ve bunun sonucunda AISI 304 tarafında kaynak bölgesine yakın bölgede karbür tanelerinin gittikçe büyüdüğünü mikroyapı analizleriyle göstermişlerdir.

Şahin ve arkadaşları sadece AISI 1040 malzemedan imal edilmiş çubukları birbirleri ile kaynattıkları bir diğer çalışmalarında [35], önceki çalışmalarına [34] benzer metodlarla deneysel çalışma yapmışlardır. Buna göre, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, sürtünme süresi ve sürtünme basıncının çekme dayanımını belirli bir noktaya kadar yükselen bir trendle arttırdığı, kaynaklı parçanın çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımına yakın bir değere ulaştıktan sonra, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı arttırılmaya devam edildikçe, çekme dayanımının düştüğünü

gözlemlenmişlerdir. Çekme dayanımındaki düşüşün, kaynak esnasında oluşturulan ısının, malzemede erime bölgeleri yaratacak kadar artırılmasından kaynaklandığını söylemişlerdir. Şahin ve arkadaşları, çekme deneyleri esnasında, % uzamaları ölçmemişlerdir.



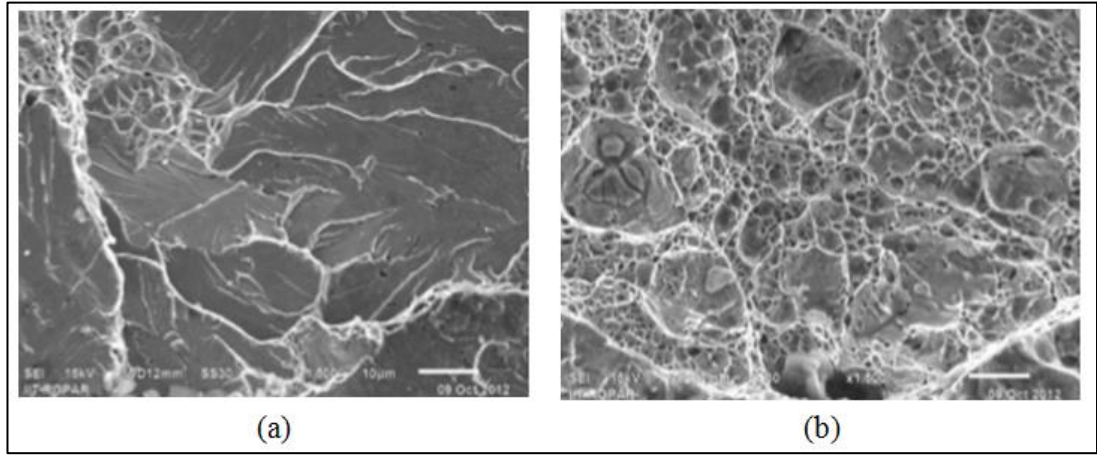
Şekil 2.5. AISI 1040 malzemeden yapılmış içi dolu çubukların kaynatılmasında a) sürtünme zamanının çekme dayanımına etkisi b) sürtünme basıncının çekme dayanımına etkisi [34]

Şahin ve arkadaşları yine benzer şekilde AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş çubukları sürtünme kaynağıyla kaydattıkları bir başka çalışmalarında [36], sürtünme kaynağının diğer kaynak yöntemlerine nazaran, östenitik paslanmaz çelikler için uygun bir kaynak yöntemi olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel yöntemlerle, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, gerilme korozyon çatlama ve tane sınırlarında krom karbür çökmesi gibi istenmeyen metalurjik değişiklikler meydana gelse bile, sürtünme kaynağında ITAB bölgesinin küçük olması sebebiyle bu tür etkilerle karşılaşılması kanaatine varmışlardır.

Şahin ve arkadaşları, bir başka çalışmada, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak AISI 304 malzemeden imal edilmiş çubukları sürtünme kaynağıyla kaynatıp, numunelerin kaynak çizgisi ve geçiş bölgelerini incelemişlerdir [37].

Akata ve arkadaşları [38], AISI 1040 malzemeden imal edilmiş çubukları sürtünme kaynağı ile önce kaynatmışlar, sonra bası kuvveti altında ezerek soğuk deformasyona uğratmışlardır; bu şekilde oluşturulan parçayı geri dönüşüme kazandırmışlardır. Bu çalışmalarında diğerlerinden farklı olarak parçaların burulma dayanımlarını ölçmüşlerdir.

Handa ve arkadaşları [39, 40], tıpkı Şahin ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [37] olduğu gibi AISI 304 malzemeden imal edilmiş çubukları 1000 dev/dak sabit hızda, 75 MPa ile 135 MPa arasında değişen beş farklı aksenal yığma bası değeri ile kaynatmışlardır. Kaynattıkları parçalarda çekme deneyleri, Charpy darbe deneyleri ve mikro-sertlik analizleri yapmışlardır. Çekme deneyi sonucunda elde ettikleri kırılma yüzeylerini inceleyerek, kırılmanın sünek mi gevrek mi olduğunun tayinini yapmışlardır. Şekil 2.6a'da görüldüğü üzere, yığma basıncının 75 MPa olduğu durumda, kırılma yüzeyinde gevrek kırılmayı işaret eden nehir izleri görülmektedir. Şekil 2.6b'de, yığma basıncının 75 MPa'dan 120 MPa'a arttırılmasıyla birlikte, kırılmanın sünek kırılma şeklinde gerçekleştiğini işaret eden mikro boşluk ve çukurluklar gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, yığma basıncının, çekme gerilmesi üzerinde etkili bir proses girdisi olduğu görülmektedir.

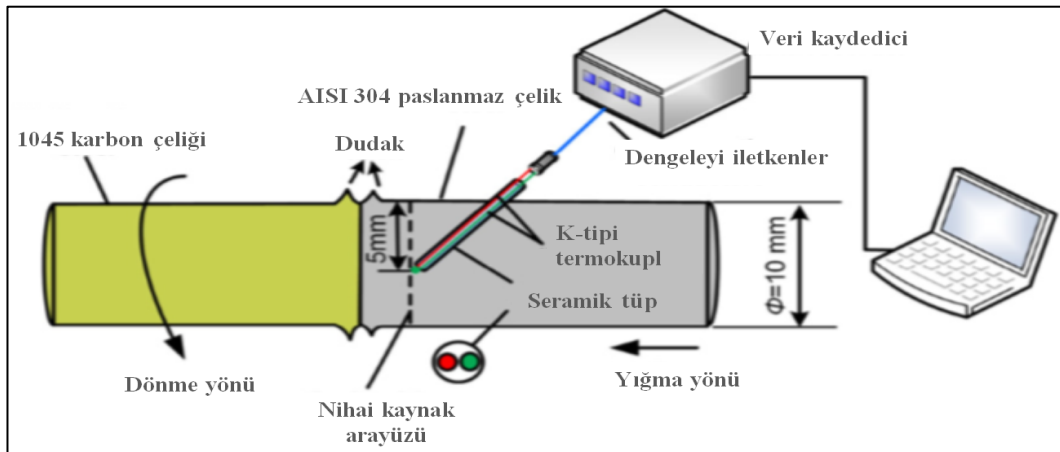


Şekil 2.6. AISI 1021 ve AISI 304 malzemelerinden imal edilmiş çubukların sürtünme kaynağı sonrası uygulanan çekme testi kırılma yüzeylerinin SEM ile analizi a) 75 MPa yığma basıncı uygulanmış numune b) 120 MPa yığma basıncı uygulanmış numune [39]

Her iki çalışma sonucunda [39, 40], yığma basıncı değerinin çekme dayanımı üzerinde etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.

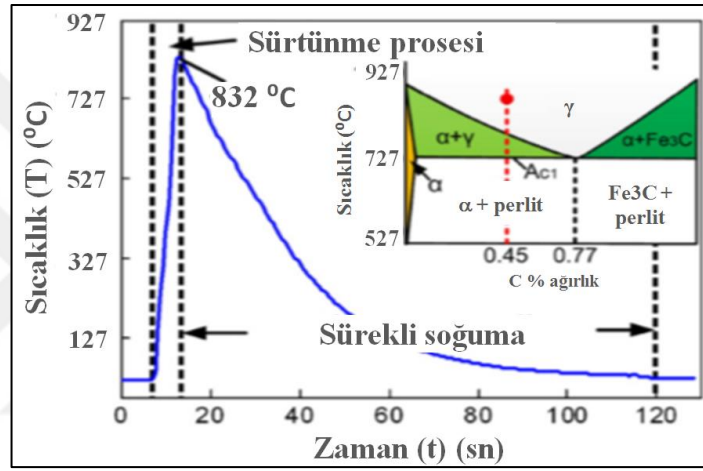
AISI 304 malzemesi kullanılarak yapılmış sürtünme kaynağı çalışmaları literatürde geniş yer bulmuştur. Sathiya ve arkadaşları, AISI 304 malzemeden elde edilmiş 16 mm çaplı çubukları, sürtünme kaynağıyla farklı parametrelerde, 1125 dev/dk sabit hızda kaynatmışlardır. Deneyler esnasında kullandıkları kaynak proses parametreleri; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Çekme dayanımı, mikro-sertlik, mikroyapı analizleri yapmışlardır. Numunelerde kaynak esnasında oluşan yakma mesafesinin, yükselen sürtünme süresiyle arttığını belirtmişlerdir. Sürtünme süresi arttığı zaman, ısı girişi de artacağı için, yakma mesafesinin artması beklenen bir durumdur. Kaynaklı parçanın mikroyapısını incelediklerinde, kaynak arayüzünde tane büyümesi gözlemlenirken, kaynak bölgesinin hemen yakınındaki ITAB bölgesinde tane inceliği görüldüğünü, ITAB'dan ana malzemeye giderken, tanelerde deformasyon ve bir miktar büyüme görüldüğünü belirtmişlerdir. Artan sürtünme süresiyle birlikte, malzemede oluşan gevrekleşme dolayısıyla, mikro-sertlik değerlerinde de yükselme gözlemlenmiştir [41].

Hong ve arkadaşları, 10 mm çapındaki AISI 304 ve AISI 1045 malzemeden yapılmış çubukları, sürtünme kaynağıyla kaynatmışlardır. Dönme hızını 2200 dev/dk'da sabit tutmuşlardır. Sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığma basıncını değiştirerek, bütün deney numuneleri için 10 sn yığma süresi uygulayarak, parçaları kaynatmışlardır. Şekil 2.7'de görüldüğü üzere, K tipi bir termokupl ile, sürtünme kaynağı prosesi esnasında oluşan sıcaklık değişimini proses süresince ölçmüşlerdir [42].



Şekil 2.7. Sürtünme kaynağına sıcaklık değişiminin arayüze en yakın bölgede ölçülmesi [42]

Hong ve arkadaşları, kaynaklı parçanın maruz kaldığı sıcaklık değişiminin malzemelerin mikroyapısı üzerindeki azımsanmayacak etkilerinden ötürü, sürtünme kaynağının termal çevrimini, termokupl ile, kaynattıkları borunun iç çap merkezinde, kaynak arayüzüne en yakın bölgede ölçmüşlerdir (Şekil 2.7 ve Şekil 2.8). Şekil 2.8’de görüldüğü üzere, sürtünme kaynağı prosesinin başlangıcında, sıcaklık keskin bir şekilde artmakta ve 827°C civarına çıkmaktadır. Bu değer, AISI 1045’in ergime sıcaklığı olan 1350°C’den ve AISI 304’ün ergime sıcaklığı olan 1443°C’den küçüktür, fakat metallerin rekristalizasyonu için uygun bir sıcaklıktır. Sıcaklıktaki düşüş ve soğuma hızı, iç merkezden parçanın dış yüzeyine gidildikçe artar [42].



Şekil 2.8. Sürtünme kaynağında arayüze en yakın bölgede sıcaklığın zamana göre değişimi [42]

Literatür çalışmalarından görüldüğü üzere, sürtünme kaynağının kalitesi, kaynak parametreleri ile ilintilidir. Başka bir deyişle, sürtünme kaynağı proses parametreleri değiştirilerek, istenilen özellikte optimum numune hazırlanabilir. Literatürde de görüldüğü üzere, sürtünme kaynaklı numunenin dayanım özellikleri üzerinde etkili proses parametreleri; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı, yığma süresi, dönme hızı ve yakma mesafesidir. Literatürde sürtünme kaynağının matematiksel modellenmesi ve optimizasyonu, farklı tipte malzemelerle kaynaklanmış parçalar için yapılmıştır.

Selvamani ve arkadaşları [43], AISI 1035 malzemedan imal edilmiş çubukları kaynatıp, istatistik yöntemler kullanarak süreci incelemişlerdir. AISI 1035, otomotiv endüstrisinde sıklıkla karşılaşılan orta karbonlu bir çeliktir. Tablo 2.1’de görüldüğü üzere, farklı sürtünme kaynağı parametreleri kullanarak hazırladıkları numunelerle,

çekme dayanımı, % uzama ve çentikli çekme dayanımı değerlerini ölçmüşlerdir. Selvamani ve arkadaşları, bu deney tasarımı ve sınırlarını kullanarak, sürtünme kaynak prosesini AISI 1035 malzemeden yapılmış çubuklar için en yüksek çekme dayanımı ve % uzama elde etmek amacıyla optimize etmişlerdir.

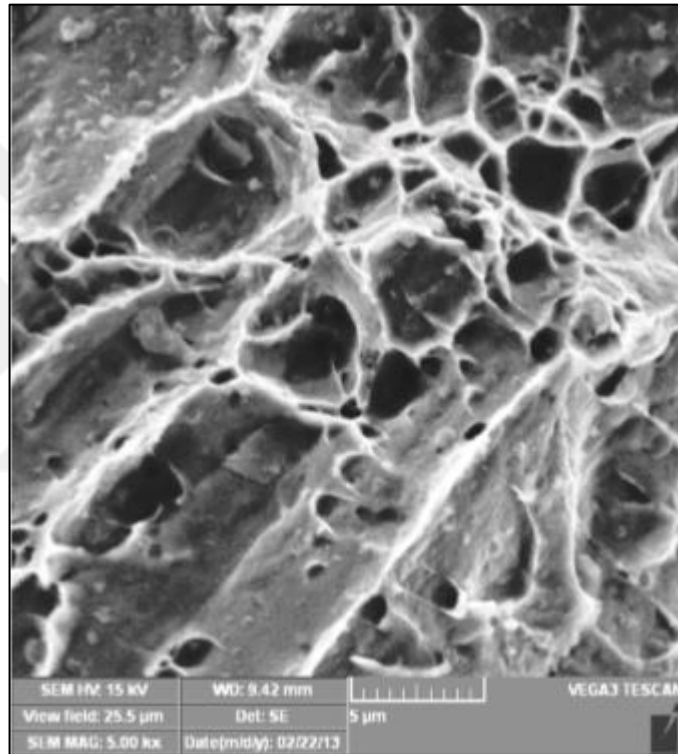
Tablo 2.1. Selvamani ve arkadaşlarının sürtünme kaynağı optimizasyon deney matris ve sonuçları [43]

Sıra	Test Sırası	Kodlanmış Değer			Gerçek Değer			Çekme Dayanımı (MPa)	Çentikli Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
		F	D	N	F	D	N			
1	3	-1	-1	-1	17,5	17,5	20,00	465	576	5,66
2	7	1	-1	-1	40,5	17,5	20,00	486	590	3,57
3	16	-1	1	-1	17,5	40,5	20,00	477	584	4,71
4	17	1	1	-1	40,5	40,5	20,00	487	593	3,02
5	9	-1	-1	1	17,5	17,5	26,66	498	601	2,42
6	8	1	-1	1	40,5	17,5	26,66	492	596	3,13
7	4	-1	1	1	17,5	40,5	26,66	503	601	1,87
8	11	1	1	1	40,5	40,5	26,66	489	593	3,08
0	12	-1,682	0	0	10	29	23,33	475	581	5,42
10	20	1,682	0	0	48	29	23,33	48	584	4,79
11	14	0	-1,682	0	29	10	23,33	484	589	3,81
12	10	0	1,682	0	29	48	23,33	491	595	2,89
13	15	0	0	-1,682	29	29	18,33	496	599	2,78
14	2	0	0	1,682	29	29	28,33	525	617	0,1
15	5	0	0	0	29	29	23,33	544	639	1,29
16	6	0	0	0	29	29	23,33	549	641	1,35
17	19	0	0	0	29	29	23,33	546	641	1,31
18	13	0	0	0	29	29	23,33	547	639	1,33
19	1	0	0	0	29	29	23,33	548	640	1,21
20	18	0	0	0	29	29	23,33	548	640	1,32

Optimizasyon sonucunda, en yüksek 549 MPa çekme dayanımı değerini yakalamışlardır. Bu değer ana malzemenin çekme dayanımından % 10 civarında daha düşüktür. Aynı numunenin maksimum % uzaması % 1,5'dan küçüktür ve bu değer, ana malzemenin % uzaması olan % 13'ten de, oldukça küçüktür. Şekil 2.9'da görülüşü üzere, çalışmalarında elde ettikleri optimum numunenin kırılma yüzeyindeki nehrsi yapılar gevrek kırılmayı işaret etmektedir. Buna ek olarak, kırılma kaynak bölgesinden gerçekleşmiştir [43].

Salvamani ve arkadaşlarının bu çalışmasında [43] ulaşılan ve optimum olduğu söylenen numunenin, yukarıda belirtilen bulgulara dayanılarak gerçekte optimum olmaktan oldukça uzak olduğu söylenebilir. Zira başarılı bir sürtünme kaynak numunesinde, kırılmanın ısıdan etkilenen bölgenin dışından gerçekleşmesi beklenir.

Ayrıca, hazırladıkları optimum numunedeki % uzama değeri (% 1,5), ana malzemenin % uzaması olan değerden (% 13) oldukça uzaktır ve yaptıkları deney tasarımı ve optimizasyonun başarılı olduğu söylenemez. % uzaması ana malzemenin % 90'ından daha küçük olan kaynaklı bir parça, herhangi bir otomotiv parçası ya da inşaat elemanı olarak kullanılmamalıdır. Bu sonuçlar, Şekil 2.9'da görülen kırılma yüzey analizleriyle de desteklenmektedir. Yapılan çalışma her ne kadar optimizasyon makalesi olarak adlandırılabilirse bile, burada proses modellemesi yapıp, optimizasyon yapılmadığı yorumunu yapmak yanlış olmayacaktır.



Şekil 2.9. Selvamani ve arkadaşlarının optimum kaynaklı numunelerinin kırılma yüzeyi SEM analizi [43]

Paventhian ve arkadaşları, alüminyum alaşımı (AA6082-T6) ve paslanmaz çelikten (AISI 304) imal edilmiş 12 mm çaplı çubukların sürtünme kaynağı proses parametrelerini kaynaklı parçadaki çekme dayanımını maksimize etmek için, RSM yöntemi kullanarak matematiksel olarak modellemişlerdir. Bu çalışmada seçilen parametreler; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yağma basıncı ve yağma süresidir. Sürtünme basıncını, bu malzemelerden imal edilmiş sürtünme kaynaklı numunelerin çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre olarak belirtmişlerdir. Sırasıyla, sürtünme süresi, yağma süresi ve yağma basıncının, sürtünme basıncından sonra

gelen etkili parametreler olduğunu ortaya koymuşlardır [44]. Ancak çekme dayanımını, uzamaları dikkate almadan ölçmüşlerdir. Dolayısıyla, hazırladıkları modelin optimum numuneye ulaşmakta kullanılıp kullanılmayacağı belirsizdir. Matematiksel modelin geçerliliğini ispatlamak için doğrulama deneyi yapmamışlardır. Optimum olarak adlandırdıkları numunenin, optimum olup olmadığını destekleyecek kırılma yüzeyi ve mikro-sertlik analizlerini yapmamışlar yada yayınlamamışlardır.

Tablo 2.2. Vairamani ve arkadaşlarının sürtünme kaynağı optimizasyon deney matris ve sonuçları [45]

No	F	D	N	F / (Mpa)x(s ⁻¹)	D/(Mpa)x(s ⁻¹)	N/(R)x(s ⁻¹)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Arayüz Sertliği (HV)
1	-1	-1	-1	10	10	16	148	203
2	+1	-1	-1	20	10	16	174	180
3	-1	+1	-1	10	20	16	247	131
4	+1	+1	-1	20	20	16	130	211
5	-1	-1	+1	10	10	24	122	228
6	+1	-1	+1	20	10	24	236	126
7	-1	+1	+1	10	20	24	141	205
8	+1	+1	+1	20	20	24	181	171
9	-1,682	0	0	7	15	20	238	124
10	+1,682	0	0	23	15	20	238	128
11	0	-1,682	0	15	7	20	173	175
12	0	+1,682	0	15	23	20	198	162
13	0	0	-1,682	15	15	13	232	124
14	0	0	+1,682	15	15	27	234	122
15	0	0	0	15	15	20	235	126
16	0	0	0	15	15	20	185	178
17	0	0	0	15	15	20	235	121
18	0	0	0	15	15	20	140	214
19	0	0	0	15	15	20	234	125
20	0	0	0	15	15	20	217	155

Vairamani ve arkadaşları, AISI 304 paslanmaz çelikten imal edilmiş çubuklarla, bakır alaşımından imal edilmiş çubukların sürtünme kaynağı parametrelerini, çekme dayanımını maksimize etmek ve kaynak arayüzündeki mikro-sertliği minimize etmek için, RSM yöntemi kullanarak modellemişlerdir. Dönme hızının, bu tür malzemelerden imal edilmiş sürtünme kaynaklarının maksimum çekme dayanımı ve minimum kaynak arayüzü mikro-sertliği için, en etkili parametre olduğunu belirtmişlerdir [45]. Tablo 2.11’de görüldüğü üzere, kullandıkları deney tasarımı sınırları içerisinde, daha düşük dayanım özellikleri olan bakır alaşımlı çubuğun ana malzeme çekme dayanımından (344 MPa) bile oldukça uzakta kalmışlardır. Ulaştıkları maksimum çekme dayanımı 247 MPa’dır. Ayrıca, kaynak arayüzünde

mikro-sertlik optimizasyonu, sonuçların tekrarlanabilirliği açısından güvenilir bir yöntem değildir. Çalışmalarını her ne kadar optimizasyon makalesi olarak adlandırılrsa bile, proses modellemesi yapıp, optimizasyon yapmadığını söylemek mümkündür. Buna rağmen, matematiksel modellerinin ispatlanması için doğrulama deneyleri mevcuttur. Vairamani ve arkadaşları da bu çalışmalarında, optimum olarak adlandırdıkları numunenin, optimum numune olup olmadığını destekleyen kırılma yüzeyi ve mikro-sertlik analizlerini yapmamışlardır yada yayınlamamışlardır. Netice itibarı ile yapılan bu çalışma da optimum olmaktan uzaktır.

Udayakumar ve arkadaşları, 16 mm çaplı, SDSS tipi paslanmaz çelikten (UNS S32760) imal edilmiş çubukların sürtünme kaynak parametrelerini, darbe tokluğu ve aynı zamanda korozyon dayanımını maksimize etmek için, RSM ve genetik algoritma (GA) yöntemlerini kullanarak optimize etmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları parametreler, sürtünme basıncı, yığma basıncı ve kaynak sırasında parçada oluşan yakma mesafesi uzunluğudur [46]. Udayakumar ve arkadaşları, kurdukları matematiksel modeli ispatlamak için doğrulama deneyi yapmadıklarından dolayı, çalışmanın gerçek durumu ne kadar doğru ifade edebildiği belirsizdir.

Paventhana ve arkadaşları, yaptıkları başka bir çalışmada, AISI 1040 ve AISI 304 malzemelerinden imal ettikleri 12 mm çaplı çubukların sürtünme kaynak parametrelerini, kaynaklı numunenin çekme dayanımını maksimize etmek için, RSM yöntemi kullanarak modellemişlerdir. Kullandıkları kaynak parametreleri sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Bu malzemelerin kullanıldığı kaynaklı parçalarda, sürtünme süresinin, maksimum çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre olduğunu belirtmişlerdir [47]. Yine, bu çalışmada da çekme deneyleri esnasında, % uzamalar ölçülmediği ve optimizasyon prosesine, hedeflenen proses çıktısı olarak dahil edilmediği için, çalışmalarında ürettikleri numunenin çekme dayanımını açısından optimum numune olup olmadığı belirsizdir. Buna ek olarak, optimum olarak adlandırdıkları numunenin, optimum olup olmadığını destekleyen kırılma yüzeyi ve mikro-sertlik analizlerini yapmadıkları için, modellemenin istenilen hedefi tutturmakta başarılı bir model olup olmadığı söylenemez. Her ne kadar optimizasyon makalesi olarak adlandırılrsa da, proses modellemesi yapıp, optimizasyon yapılmamıştır. Ek olarak, matematiksel modellemelerinin ispatlanması için doğrulama deneyleri yapmamışlardır.

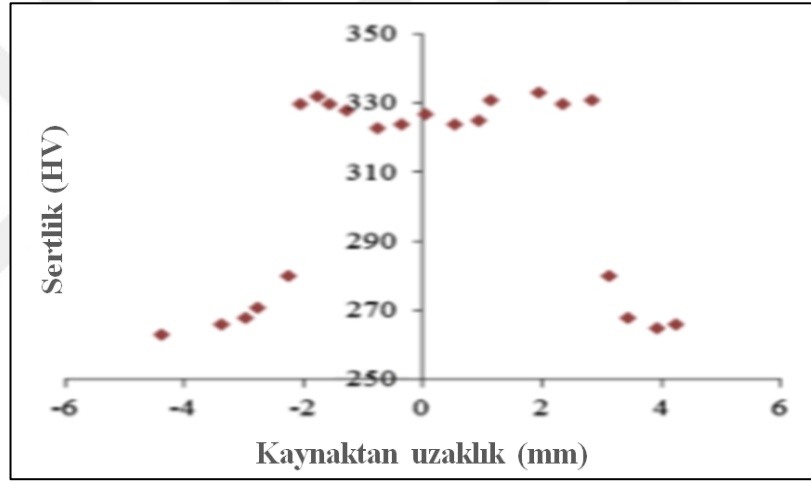
Sathiya ve arkadaşları, AISI 304 malzemeden yapılmış numunelerin sürtünme kaynak parametrelerini, yapay sinir ağları (ANN) yöntemini, GA ile birlikte kullanarak, çekme dayanımını maksimize edip, kaynaklı numune yakma mesafesi uzunluğunu minimize etmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları proses parametreleri; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Dönme hızını 1125 dev/dk'da sabit tutmuşlardır [48]. Modelin ispatlanması için, doğrulama deneyleri yapmışlardır. Fakat, çekme dayanımını maksimize ederken, % uzamaları dikkate almadıkları için, optimizasyonun başarılı olup olmadığı söylenemez.

Anand ve arkadaşları, INCOLOY 800H, ısıya dayanıklı malzemeden imal edilmiş 12 mm çapındaki çubukları kaynattıkları sürtünme kaynağı proses parametrelerini, çekme dayanımını maksimize edip, kaynak arayüzündeki mikro-sertliği minimize etmek için, ANN kullanarak modelleyip optimize etmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları proses parametreleri; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Uyguladıkları doğrulama deneyleri, oluşturdukları matematiksel modeli ispatlamaktadır. Kullandıkları ana malzemenin çekme dayanımı 683 MPa olmasına rağmen, elde ettikleri optimum numunenin çekme dayanımı 830 MPa'dır. Şekil 2.10'da doğrulama testi için hazırlanan optimum numune ve ilgili çekme testi sonucu görülmektedir. Şekil 2.10'da, parça kaynaktan kopmuştur [49]. Bu da, ana malzemenin çekme dayanımından oldukça yüksek çekme dayanımı olan, ana malzemeden daha gevrek bir numune elde ettiklerini gösterir. Deneysel çalışmalarını süresince % uzamaları ölçmemişlerdir. Dolayısıyla, doğrulanmış matematiksel bir modelleri olmasına rağmen optimum numuneyi elde ettikleri söylenemez.



Şekil 2.10. INCOLOY 800H malzemesiyle imal edilmiş optimum sürtünme kaynağı a) doğrulama numunesi b) çekme testi sonrası parçaların durumu [49]

Ajith ve arkadaşları, dubleks paslanmaz çelik (DSS) malzemeden imal ettikleri çubukların sürtünme kaynağı optimizasyonunu ANN yöntemiyle yapmışlardır. Kullandıkları proses parametreleri sürtünme basıncı, yığma basıncı, dönme hızı ve yakma mesafesidir. Çekme dayanımını maksimize edip, kaynak arayüzündeki mikro-sertliği minimize etmişlerdir. Deneyleri esnasında, % uzamayı ölçmemişlerdir. Şekil 2.11'de görüldüğü üzere, ITAB'da görülen mikro-sertlik değerlerindeki, kaynak arayüzünde ölçülen değerlere göre yükselişini, ITAB'da meydana gelen tane incelmeye bağlamışlardır. Doğrulama deneyleri mevcuttur [50]. Yine bu çalışmada, tekrarlanabilirliği çok düşük olan mikro-sertlik analizi kullanarak optimizasyon yapıldığı ve % uzamalar dikkate alınmadığı için, optimum numuneye ulaştıkları söylemek gerçekçi olmayacaktır.



Şekil 2.11. Ajith ve arkadaşlarının optimum sürtünme kaynağı numunelerinin mikro-sertlik analizi [50]

Selvamani ve arkadaşlarının, [43] nolu çalışmanın devamı niteliğinde yaptıkları bir diğer çalışmada [51], AISI 1035 malzemeden imal ettikleri çubuk şeklindeki sürtünme kaynağı numunelerinin proses parametrelerinin, % uzamaları dikkate almadan, maksimum çekme dayanımınıyla ilişkisini, RSM kullanarak ortaya koymuşlardır. Optimizasyon yapmamışlardır. Bu çalışma [43] numaralı çalışmanın devamı niteliğinde olduğundan, % uzamaları ana malzemenin çok altında olan numuneleri optimum numune olarak adlandırmışlardır. Daha önceki [43] çalışmalarına ilaveten, numunelere çukur korozyonu testi uygulamışlardır [51].

Asif ve arkadaşları, DSS malzemeden yapılmış 16 mm çapındaki çubukların sürtünme kaynak parametreleri ile sürtünme ve deformasyon kaynaklı ısı girdisi

arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Deneylerinde kullandıkları sürtünme kaynağı parametreleri; sürtünme basıncı, sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresidir. Deneysel çalışmaları esnasında dönme hızını 1500 dev/dk'da sabit tutmuşlardır. Isı girdisini analitik yöntemlerle hesaplamışlardır. Isı girdisiyle, çekme dayanımı, darbe tokluğu ve mikro-sertlik arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Isı girdisi arttıkça, ki bu artışı, sürtünme basıncı ve yığma basıncının artmasıyla ilintilendirmişlerdir, çekme dayanımı artarken, darbe tokluğunun azaldığını, mikro-sertliğin ise arttığını söylemişlerdir. Isı girdisi arttıkça, malzeme gevrekleşmektedir. Bu tür malzemelerin sürtünme kaynağında oluşturulan yüksek ısı girdisinin, korozyon dayanımına pozitif etkilerini ortaya koymuşlardır [52].

Pransanthi ve arkadaşları, düşük karbonlu çelik çubuklarla, titanyum plakaları sürtünme kaynağıyla kaynatmışlardır. Deneyleri esnasında, sürtünme kaynak parametrelerinden, sürtünme basıncı, yığma basıncı, yanma miktarı ve dönme hızını değişken olarak kabul etmişlerdir. Hazırladıkları numunelerin birleşme bölgesinin mikroyapısını, geçirimli elektron mikroskopuyla (TEM) incelemişlerdir. Ferrit matrisin içine yerleşmiş FeTi intermetalik fazları gözlemlemişlerdir. Numunelerin düşük karbonlu çelik ihtiva eden kaynak tarafında, kaynak arayüzüne yakın bölgede rekristalizasyon ve tane büyümesini tespit etmişlerdir [53].

Ajith ve arkadaşları, RSM yöntemi ve GA kullanarak, DSS (UNS S32205) malzemeden yapılmış 15 mm çapındaki çubukların sürtünme kaynağı parametrelerini maksimum çekme dayanımı ve minimum kaynak arayüz mikro-sertliği elde etmek için optimize etmişlerdir. Deneyleri esnasında kullandıkları parametreler; sürtünme basıncı, yığma basıncı, dönme hızı ve yakma mesafesidir. Modellerinin güvenilirliğini ispatlamak için doğrulama deneyleri yapmışlardır. Sürtünme basıncının, çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre olduğunu belirtmişlerdir [54]. Ancak % uzamayı dikkate almamışlardır, elde ettikleri optimum numunenin prosesin optimum numunesi olup olmadığı ispat edilememiştir.

Özetle, literatürdeki sürtünme kaynağı ile ilgili çalışmalarda görülmektedir ki, sürtünme kaynağı optimizasyonu, yapılan hiç bir çalışmada, optimum numuneyi elde etme garantisi verememektedir. Çalışmaların tamamına yakınında, % uzamalar ölçülmemiştir, optimizasyon başarısı sadece çekme dayanımına dayandırılmıştır. Bir

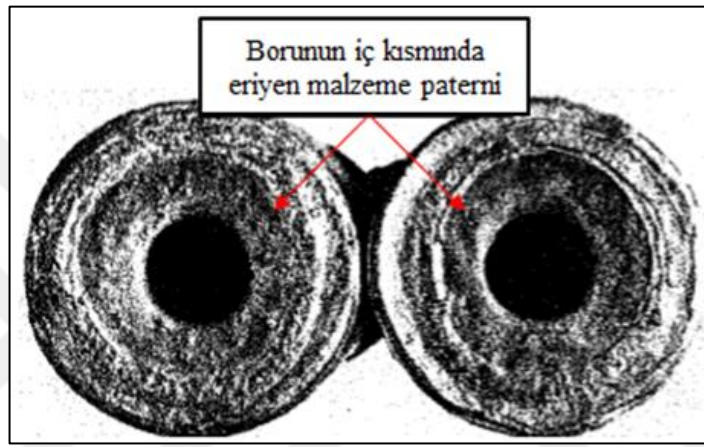
kısım çalışmada ise, tekrarlanabilirlik yeteneği çok düşük olan mikro-sertlik değerleri optimize edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra, % uzamaları dikkate alan birkaç çalışmada ise, elde edilen optimum numunenin % uzaması, ana malzemenin % uzamasından % 95'e varan değerlerde daha düşük çıkmıştır. Yapılan çalışmaların hemen hemen tamamına yakınında, doğrulama çalışmaları yapılmamıştır. Bazı çalışmalarda, optimizasyon yapıldığı ileri sürülse de, matematik modellemeden öteye geçilmemiştir. Bazı çalışmalarda, optimum olduğu söylenen numunenin kırılma yüzeyleri incelendiğinde, gevrek kırılma yüzeyi gözlemlenmiştir. Yapılan hiçbir çalışmada ise, endüstride yaygın olarak kullanılmasına rağmen, petal testi sonuçlarına ve petal çatlak uzunluğu optimizasyonuna yer verilmemiştir. Sürtünme kaynağı ile yapılan çalışmaların hiçbirinde, endüstride yaygın kullanım alanı bulan, özellikle otomotiv endüstrisinde çok sayıda parçanın yapımında kullanılan, orta karbonlu çelikten imal edilmiş dövme bir braketle, yine orta karbonlu çelik bir borunun kaynağıyla ilgili çalışma bulunmamaktadır. Bu yüzden, endüstride bu tür parçalar imal edilirken, ancak deneme yanılma yöntemleriyle belirlenen kaynak parametreleri kullanılarak seri imalat prosesinde kullanılmaya uygun parçalar tasarlanmaktadır. Ne yazık ki deneme yanılma yöntemiyle yapılan çalışmalarda, oldukça fazla malzeme hurda edilmekte, bazen en iyi olduğu düşünülen parça gerçekte en iyi parça olamamakta, bazen de en iyi parçayı imal etmek için, ihtiyacın ötesinde mühendislik özelliklerine sahip, gereğinden fazla ağır, gereğinden fazla kaynak dudağı oluşmuş, vs. parçalar imal edilebilmektedir. Bahsi geçen bu parçaların, genellikle otomobilin kritik parçaları olduğu gözönüne alınırsa, bu tür parçalarda proses optimizasyonuna ihtiyaç duyulduğu aşikardır.

2.2. MIAB Kaynağı Literatür Çalışması

Diğer katı hal kaynak yöntemlerine nazaran, MIAB kaynağı hakkında yapılmış literatür çalışmaları daha sınırlıdır.

Kuchuk ve Kachinsky, MIAB kaynak metodunun uygulanmasını sağlayan kaynak makinasının patentine sahiptir [55]. Paton Kaynak Enstitüsü'nden Dr. Kachinsky, kalın cidarlı boru şeklindeki parçaların MIAB yöntemiyle kaynatılması konusunda çalışmıştır. Bu çalışmada, kalın cidarlı boruların kaynatılmasında ark davranışını incelemiştir. Kalın cidarlı parçaların MIAB kaynağı zordur, çünkü ark borunun iç

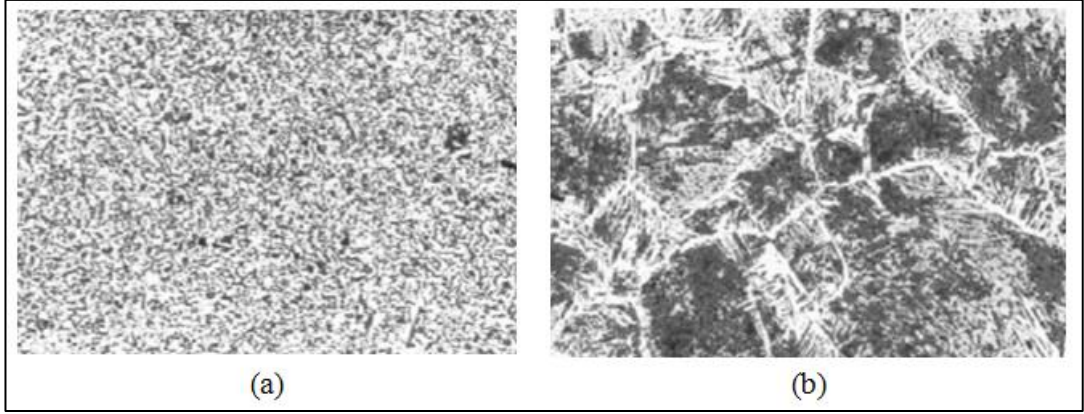
çapına doğru yönelmeye temayül gösterir bu da boru kesitinde homojen olmayan ısınmaya sebep olur. Kachinsky, homojen bir ısıtma elde edebilmek amacıyla, kalın cidarlı boruların kaynağında kullanılacak olan artı ve eksi kutup başlarının büyüklüğünün, boru cidar kalınlığından çok daha fazla olması gerektiğini önermektedir. Şekil 2.12’de görüldüğü üzere, kaynak prosesinin başlangıç aşamalarında, ark kolunun borunun iç çapını erittiği görülmektedir. Isıtma devam ettikçe ark kolunu dış çapa doğru yönelir. Fakat kalın boru cidarı, arkın stabil ilerlemesine engel teşkil eder, bu da heterojen ısınmaya sebep olur [25].



Şekil 2.12. Kalın cidarlı boruların MIAB yöntemiyle kaynatılmasında borunun iç çapında ergime izleri [25]

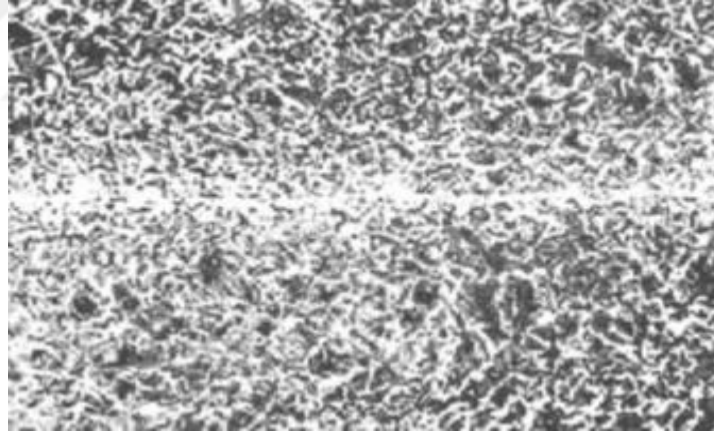
Kachinsky, koruyucu atmosfer uygulaması ile ergiyen metalin oksidasyonunun engellenmesi halinde boru cidar kalınlığının 16 mm’ye kadar çıkarılabileceğini ortaya koymuştur. Fakat, kaynak parametreleri ile kalınlık arasındaki bağıntıyı ortaya koyacak bir çalışma yapmamıştır.

Kachinsky, Şekil 2.13a’da, tipik bir MIAB kaynağı ITAB bölgesinden ana malzemeye doğru olan bölgenin mikroyapısını göstermiştir. Bu bölgede perlit egemen bir ferrit-perlit karışımı mikroyapı olduğunu söylemektedir. Bu bölge, rekristalizasyonun gerçekleştiği bölgedir. Şekil 2.13b’de görüldüğü üzere, ITAB bölgesinden, kaynak çizgisine doğru olan bölgede, aşırı ısınmadan kaynaklı kaba taneli dağınık bir yapı gözlemlenmektedir. Bu bölgede perlit hakimdir, yer yer beynitik yapıya rastlanabilir. Ferrit çoğunlukla grid yapıda olmakla beraber, kısmi olarak iğnesel Widmanstatten formunda bulunmaktadır [25, 30].



Şekil 2.13. Tipik bir MIAB kaynağı mikroyapısı (x180) a) ITAB'dan ana malzemeye doğru bölgedeki rekristalizasyon oluşumu b) kaynak arayüzüne yakın bölgede tane büyümesi [30]

Şekil 2.14'de, Kachinsky'nin çalışmasından tipik bir MIAB kaynak arayüzü görülmektedir. Kaynak çizgisinin bulunduğu bölgede yatayda beyaz bir çizgi halinde dekarbürize bir bölge görülmektedir, Kachinsky, bu çizgi için, aşırı ısınma bölgesi tanımlamasını yapmıştır.



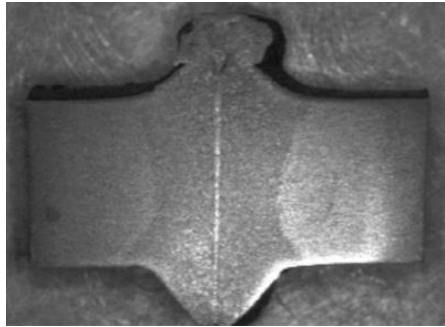
Şekil 2.14. MIAB kaynağı kaynak arayüzü (x100) [30]

Johnson ve arkadaşları, 3 mm cidar kalınlığındaki, 51 mm çapındaki, düşük karbonlu çelik boruların MIAB kaynağı ile imal edilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Koruyucu gaz kullanıldığı zaman, kaynak sonrası parçaya yapılan petal testinde, koruyucu gaz kullanılmadığı duruma nazaran daha başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Koruyucu gaz olarak karbondiyoksit gazından faydalanmışlardır. Karbondioksitin, kaynak çevrimi esnasında oluşabilecek oksidasyona karşı koruyucu bir atmosfer sağladığını belirtmişlerdir. Kaynak sonrası yaptıkları metalografik çalışmalarda, oksit

inklüzyonların sayıca da azalmasından ötürü daha az proötektoid ferrit görmüşlerdir [56].

Taneko ve arkadaşları, MIAB kaynağında ark hızını ve ark açılarını ölçebilmek amacıyla, çelik borunun farklı noktalarına voltaj dedektörü, osiloskop ve yüksek hızlı kamera enstrümanete etmişlerdir. Ark patlaması etkisi ve borunun elektriksel direncinden ötürü, boruya güç ünitesinin bağlandığı yere yakın bölgede, ark akımının arttığını tespit etmişlerdir. Arkın akımı arttıkça, manyetik patlama etkisi artmakta ve bu da arkı yavaşlatmaktadır. Güç ünitesi bağlantı noktasından uzaklaştıkça, dönen ark tekrar hızlanmaya başlamaktadır [57].

Vendan ve arkadaşları, MIAB kaynağının sızdırmazlık özelliğinden ötürü, basınçlı kaplardaki uygulamalarına yönelik birçok çalışma yapmışlardır [20, 23, 24, 27, 28, 58]. 47,6 mm çapındaki 6,6 mm et kalınlığındaki, ASTM A213 T11 malzemenin imal edilmiş basınçlı kap borularını, farklı MIAB kaynak parametreleri ile kaynatmışlardır. Şekil 2.15’de görüldüğü üzere, kaynak çizgisinin üzerinde açık renk belirgin bir çizgi görünmektedir. Bu çizgi, proses esnasında arayüzde yanan malzemenin kalıntısı olarak yorumlanmıştır. Kaynak dudağının borunun iç çapında, dış çapına nazaran daha büyük olduğunu göstermişlerdir [20, 23].

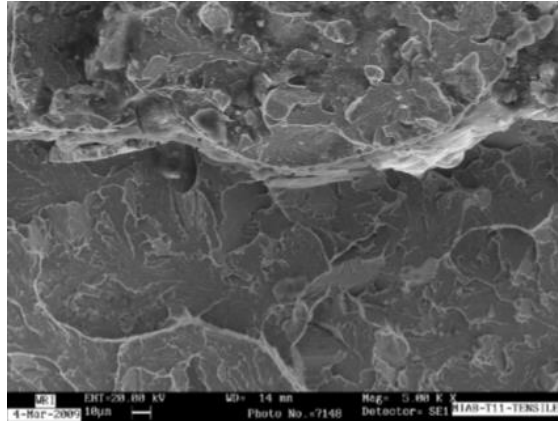


Şekil 2.15. MIAB kaynak kesidi makroyapı resmi [23]

MIAB kaynağında, sürtünme kaynağına nazaran daha hızlı soğuma gerçekleşmektedir. MIAB kaynağında ısı kaynağı aniden kapanmaktadır; kaynatılan parçalar dövme fazına geçerken birbirine dokundukları anda, bir başka deyişle parçalar arasındaki uzaklık sıfıra ulaştığı anda, kaynak prosesi tamamen sonlanmadan, ark oluşumu son bulmaktadır. Sürtünme kaynağında ise, frenleme ve yığıma fazları içiçe geçtiği için, dönme hızı sıfıra ulaşana kadar ısı üretimi devam

edecektir. Bu nedenle, sürtünme kaynağında, MIAB kaynağında gerçekleşen hızlı soğuma olayı gerçekleşmemektedir. MIAB kaynağında, arkın dönmesi esnasında yüksek sıcaklıklara çıkan kaynak arayüzünde, bir miktar karbon atomu yanmaya başlar, takiben gelişen hızlı soğuma fazında da, arayüzde bir miktar dekarbürizasyon görülür. Eğer yeterince yüksek dövme kuvveti parçalara uygulanır ve bu sayede dekarbürize bölge minimize edilirse, başarılı bir kaynak prosesi gerçekleştirilmiş olur [23].

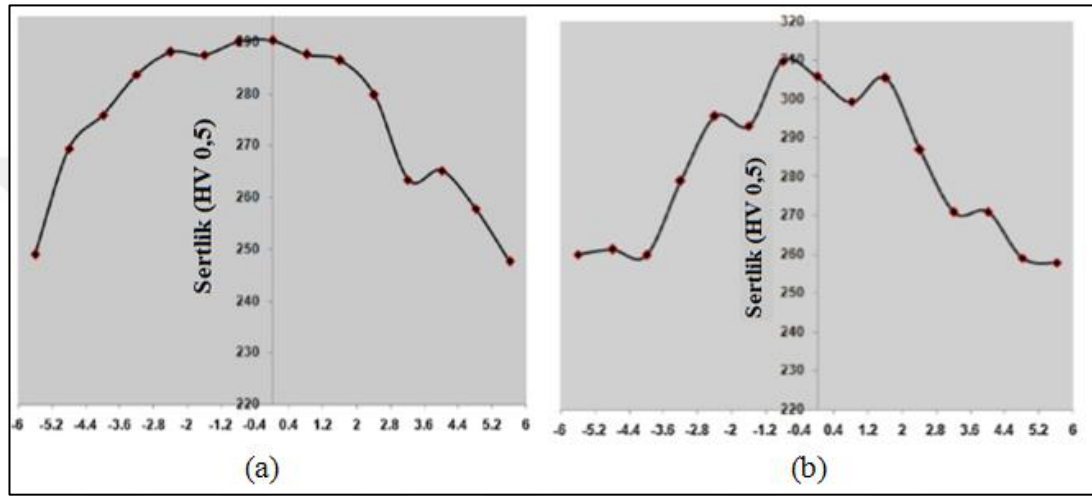
Vendan ve arkadaşları [20], kaynak arkının stabil bir hızla dönen bir ark haline geldiği faza, ark ısıtma fazı adını vermişlerdir. Farklı sürelerde ark ısıtma fazına tabi tuttukları numunelere çekme testi yapmışlardır. Isıtma fazının kısa tutulduğu numunede, kaynak dudağı oluşumu ve birleşme bölgesi iyi bir kaynak görüntüsü verse bile, diğer “iyi kaynak” özelliği gösteren numunelere nazaran, çekme testi sonrası yapılan görsel ve mikroskopik incelemelerde, kırılmanın kaynak çizgisine yakın yerde gerçekleştiği ve gevrek kırılmayla parçanın koptuğu görülmektedir. Şekil 2.16’de bu numunenin SEM analizi ve gevrek kırılma izleri görünmektedir. Şekil 2.16’de görülen gevrek kırılma oluşumu, yetersiz miktarda ya da sürede ısı girdisi sebebiyle oluşabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.16. SEM analizinde MIAB kaynağında gevrek kırılmanın gösterilmesi [20]

Vendan ve arkadaşları, hazırladıkları numunelere, eğilme testi de uygulamışlardır. Test sonucunda bazı numunelerde hiç ya da çok küçük çatlak gözlenirken, bazı numunelerde testin başarısız olduğunu, büyük çatlaklar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun sebebinin, aşırı ısınmadan kaynaklı malzemede gevrekleşme olduğunu

ve kaynak arayüzünde gözlemlenen yüksek mikro-sertlik değerlerinin de bu durumu desteklediğini belirtmişlerdir. Şekil 2.17’de ark akımının daha düşük olduğu numunede (200 A), kaynak arayüzünde daha düşük mikro-sertlikler ölçülmüştür. Bu numunede, eğme testi esnasında çatlak oluşumu da gözlemlenmemiştir. Ark akımının daha yüksek olduğu diğer numunede (250 A), kaynak arayüzü mikro-sertlik değeri bir önceki numuneye nazaran, 290 HV’den 340 HV’ye yükselmiştir. Ark akımının yüksek olduğu numunenin eğme testi sonrasında çatladığı görülmüştür [20].



Şekil 2.17. MIAB kaynağında farklı ısı girdi miktarlarına bağlı olarak kaynak arayüzünde mikro-sertlik davranışı a) ark akım değeri 200 A b) ark akım değeri 250 A [20]

Vendan ve arkadaşları, diğer bir çalışmalarında, 48 mm çapında, 6 mm et kalınlığındaki ASTM A213 T11 malzemeden imal edilmiş çelik basınçlı kap borularını, farklı kaynak akımı ve sürelerinde kaynatmışlardır. hazırlanan numuneleri kaynak kabiliyeti başarılı, başarısız, tamamlanmamış penetrasyon ve fazla penetrasyon (parçada gereğinden fazla kısalma) olup olmama durumuna göre sınıflandırmışlardır. MIAB kaynağında başarılı ve başarısız iki numune için kaynak dudağı yapısı, Şekil 2.18’de görülmektedir. Şekil 2.18a’da ark akımı daha düşükken (200 A), Şekil 2.18b’de daha yüksek bir değerdedir (300 A).

Burada görüldüğü üzere, kaynak arkının gereğinden fazla artırılması, aşırı ısınma sonucu malzemede ergimeye sebep olmakta, yığılma basıncı uygulaması esnasında da bu malzeme dışarıya doğru fişkırmaktadır [24].



Şekil 2.18. MIAB kaynağında dudak oluşumu a) uniform dudak oluşumu ve tamalanmış kaynak penetrasyonu b) fazla erime ve yanma [24]

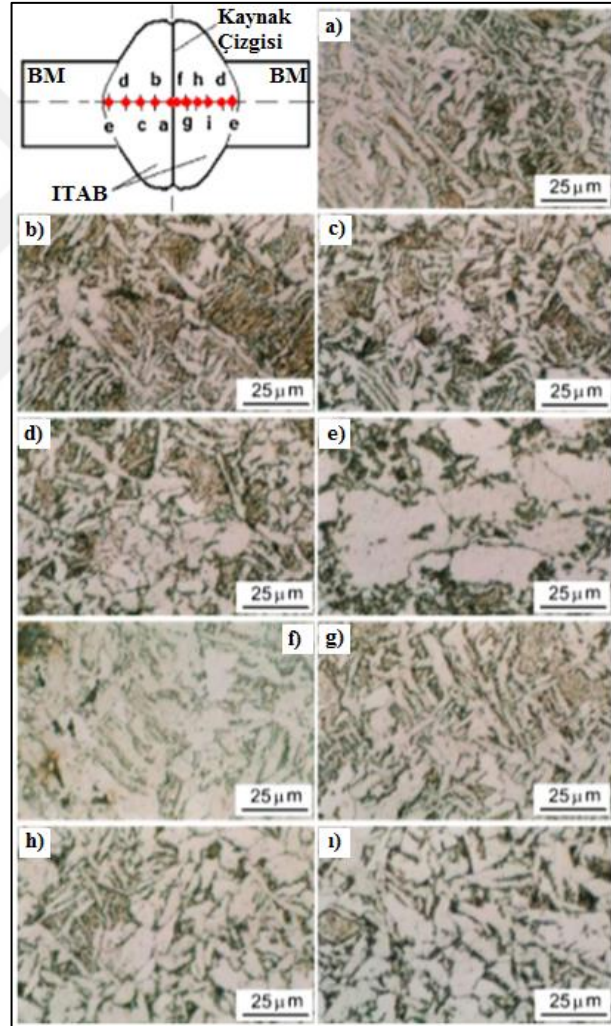
Vendan ve arkadaşları, yine bu çalışmalarında, MIAB kaynağı yapılacak parçaların kaynak prosesi öncesi yüzey temizliği yapılmasına gerek olmadığını, yüzeyde bulunan pisliklerin kaynak dudağına doğru atılabilmesi için, yığma basıncının artırılmasının yeterli olduğunu belirtmektedirler [24].

Yapılan diğer literatür çalışmalarında, elektromanyetik akı yoğunluğu ve yığma basıncının, MIAB kaynağının mekanik özellikleri üzerinde önemli iki parametre olduğu belirtilmiştir [24, 59]. Elektromanyetik akı yoğunluğu, kullanılan bobin sargı yoğunluğuna, kaynak akımına, bobin pozisyonu ve parçalar arasındaki uzaklığa bağlıdır [24, 59]. Manyetik akı yoğunluğu, parçalar arasındaki uzaklıkla ters orantılı olduğu için, başarılı bir MIAB kaynak prosesi için, parçalar arasında optimum uzaklık belirlenmelidir [26, 59].

Iordachescu ve arkadaşları, MIAB yönteminde kaynatılacak olan parçaların arasında bırakılan uzaklık miktarının ark oluşumu ve arkın dönme ve ısıtma süresi ile ilişkisini araştırmıştır. Bu amaçla parçalar arasındaki boşluğun 0,5 mm'den 1,5 mm arasında değiştirildiği numuneler hazırlamıştır. Iordachescu ve arkadaşlarının St 37 (EN 10025) malzemeden imal edilmiş, 25,4 mm çaplı, 3 mm et kalınlığındaki çelik boruları kaynatmışlardır. Yapılan mikroyapı analizlerine göre, Şekil 2.19'da görüldüğü üzere, kaynak çizgisinin her iki yanında (Şekil 2.19a ve Şekil 2.19f), kaba taneli iğnesel ferrit, beynit ve perlit varlığından bahsetmişlerdir. Kaynatılan boruların cidar kalınlığı küçük olduğu için, yığma fazında uygulanan deformasyon etkisi çok fazla görülememektedir. Kaynak çizgisinin sol tarafındaki perlit yapısının (Şekil 2.19a), sağ tarafına nazaran (Şekil 2.19f), daha fazla miktarda karbon içerdiği

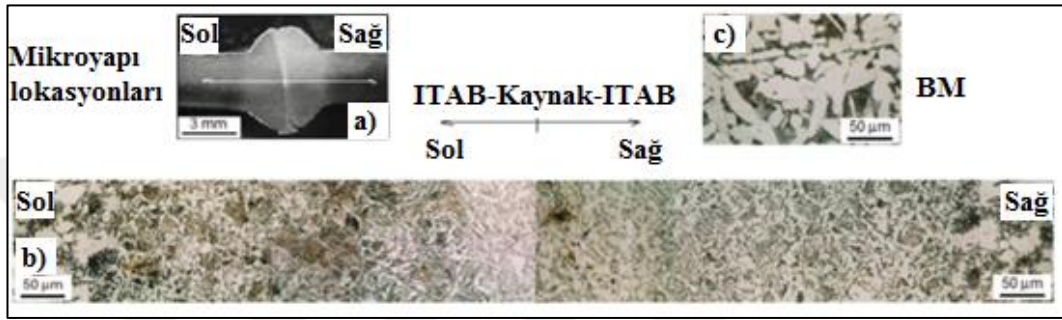
görülmektedir ki bu da kaynak çizgisi bölgesinde karbon difüzyonunun gerçekleştiğini göstermiştir. Yani, kaynak çizgisinin sol tarafında dekarbürize bir bölge oluşmuştur. Bu oluşumu, prosesteki en yüksek sıcaklığa çıkılmasına bağlamışlardır. Çünkü, numunelerin hepsinde Şekil 2.19a’da gözlemledikleri gibi, Widmanstatten morfoloji içerisinde iğnesel bir ferrit morfolojisini gözlemlemişlerdir. Bu oluşumun da yüksek soğuma hızına işaret ettiğini belirtmişlerdir [26, 60].

Mikroyapıda gözlemledikleri önemli bir özellik de, Şekil 2.19e’de görülen, ısınma esnasında oluşan perlitte kısmi çözünmedir. Bu da, soğuma esnasında ferrit ve küresel perlitte meydana gelen küçük küresel yapı oluşumuna sebep olur [26].



Şekil 2.19. St 37 malzemenen imal edilmiş boruların MIAB kaynak bölgesi mikroyapısı [26]

Iordachescu ve arkadaşları, MIAB kaynağının mikroyapısında, kaynak çizgisinin sağında ve solunda kalan bölgelerde, tane büyüklüğü arasında bir fark olduğunu belirtmektedir. Şekil 2.20’de görüldüğü üzere, kaynak çizgisinin sağ tarafındaki bölgede, sol tarafına nazaran daha küçük taneli yapı gözlemlenmektedir. Iordachescu ve arkadaşları bu oluşumu kaynatılan parçaların anot ya katot olmasından ötürü, kaynatılan parçaların her birinde arkın dönmesi esnasında daha farklı ısı girdisi olmasına bağlamışlardır [60].

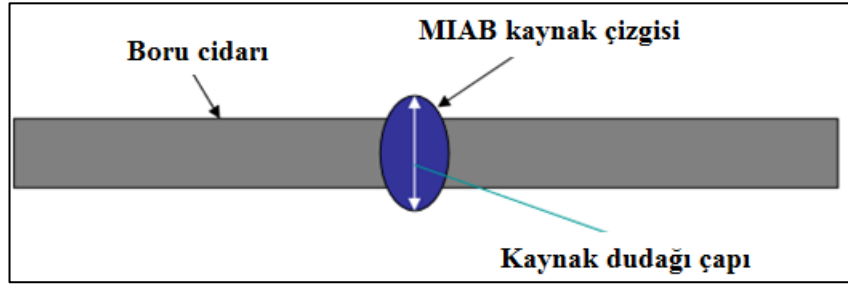


Şekil 2.20. St 37 malzemedan imal edilmiş boruların MIAB kaynak bölgesi mikroyapısı-panoramik görünüm [60]

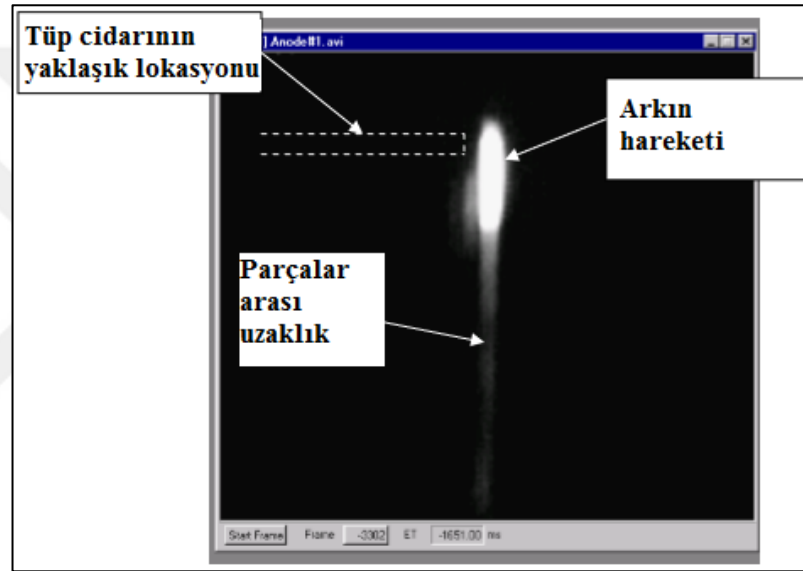
Hiller ve arkadaşları [22] dökme demir malzemedan yapılan braketleri 3 mm kalınlığında 60 mm çapındaki çelik bir boruya MIAB kaynağı ile kaynatarak, kamyon kabin süspansiyon elemanı hazırlamışlardır (Şekil 1.13). Hazırladıkları numunelere çekme, eğme ve petal testlerini uygulamışlardır. MIAB kaynak yönteminin diğer kaynak yöntemlerine nazaran daha hızlı, ucuz, dayanımı yüksek, küçük ITAB bölgesi, kaynak işleminden sonra parçaların çarpılmaması, proses esnasında parçaların döndürülmesine ihtiyaç olmadığı için simetrik parça tasarlanması zaruretinin olmaması gibi sebeplerle avantajlı olduğunu, ve fakat, içi boş tüp benzeri elektriksel olarak iletken malzemelerden yapılmış, karbon oranları birbirine benzer malzemelerde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Phillips yayınladığı doktora tezinde [15], krom kaplı AISI 1035 boruların, AISI 1018 malzemedan dövme prosesiyle imal edilmiş muyluya, MIAB kaynağıyla kaynatılmasını incelemiştir. Krom kaplı, 2 mm et kalınlığındaki 22 mm çapındaki çelik boruyla dövme muyluyu, farklı kaynak parametreleri ile kaynatarak kaynak arayüzünde oluşan kaynak dudacağının çapını ölçmüştür (Şekil 2.21). Değişken parametreler olarak kaynak akımı, kaynak süresi, yığma basıncını seçmiştir. Ayrıca, hazırladığı numunelere çekme testi ve petal testi uygulamış, kaynak arayüzünde

oluşan çatlakları ölçmüştür. Şekil 2.22’de görüldüğü gibi yüksek hızlı kamera ile kaynak prosesini görüntülemeyi başarmıştır.



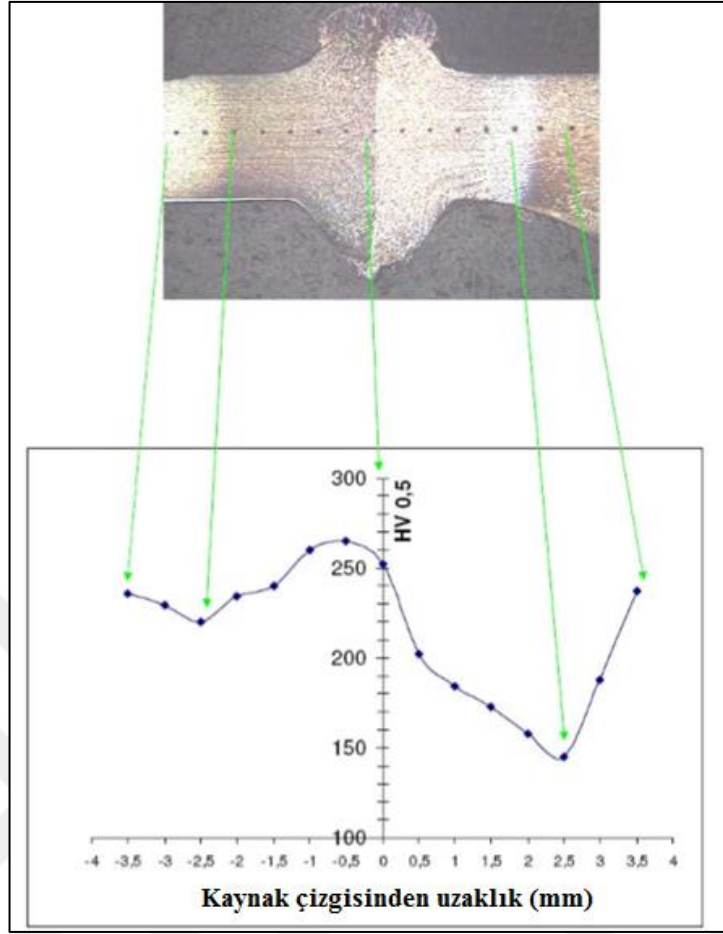
Şekil 2.21. MIAB kaynak dudağı çapı ölçümü [15]



Şekil 2.22. Yüksek hızlı kamera ile MIAB kaynağında ark oluşumunun gösterilmesi [15]

Phillips, mikroyapı ve mikro-sertlik ölçümleri sonrasında, Şekil 2.23’te görüldüğü üzere, kaynak arayüzünde oluşan sertlik artışını, yığma fazı esnasında dislokasyon yoğunluğunun artmasına bağlamıştır. Dövme muylu braketin ITAB bölgesinden ana malzemeye doğru mikroyapısında oluşan rekristalizasyona bağlamıştır [15].

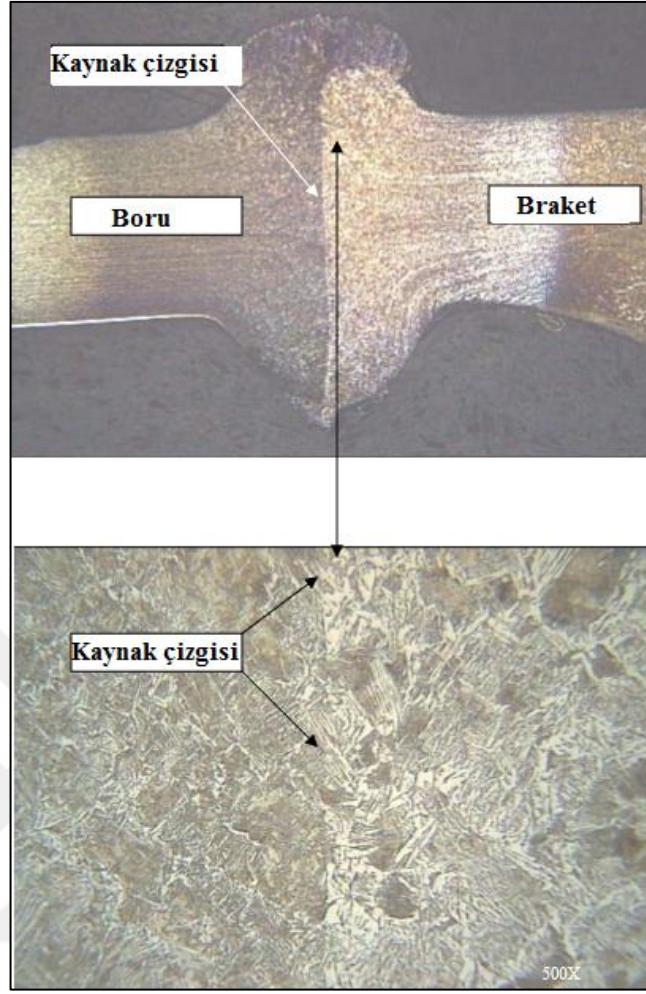
Phillips, Şekil 2.23 ve Şekil 2.24’ün üst bölgesinde bulunan kaynak kesidi mikroyapı resimlerinde, dövme muylu tarafında oluşan iki farklı ITAB bölgesi açıkça görülmesine rağmen, tezinde buna yer vermemesi, çalışmada bu detayın farkedilmediği yorumunu yapmamıza neder olmuştur.



Şekil 2.23. MIAB kaynağı mikro-sertlik analizi [15]

Şekil 2.24'nın alt kısmında x500 büyütme ile kaynak arayüzü gösterilmektedir. Aynı zamanda, bu resimde kaynak arayüzünde, kaynak çizgisinin dövme tarafında dekarbürize bir bölge de görülmektedir. Bu bölge de Phillips'in çalışmasında raporlanmamış başka bir önemli husustur.

Kalle ve arkadaşları [61], farklı dövme tipi kaynak yöntemlerini tanıtan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, sürtünme kaynağında yığılma bölgesinin işlem sonrası işlenmesi gerekirken, MIAB kaynak yönteminde yığılma bölgesinin kaynağın başarısının bir işareti olduğunu ve işlenmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma proses tanıtımı şeklindedir. Deneysel çalışma yapılmamıştır.



Şekil 2.24. Kaynak arayüzü mikroyapısı [15]

Balta [21], yaptığı çalışmada, MIAB kaynak yöntemi kullanarak EN 10083-2 C35R malzemeden üretilmiş dövme braketle, St 52-3 malzemeden imal edilmiş, 60 mm dış çapında 3 mm cidar kalınlığındaki boruları kaynatarak, kamyonlarda kullanılan arka çamurluk braketi imal etmiştir. İmal ettiği braketleri tasarımsal ve proses olarak, hem sonlu elemanlar yöntemiyle, hem de yol datası koşturduğu titreşimli ömür deneyleriyle iyileştirip, korele etmiştir.

Özetle, literatürdeki MIAB kaynağı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, kaynak arayüzünde genellikle gözardı edilen dekarbürize bir bölgeye rastlanmaktadır. ITAB bölgesinde oluşan iki farklı bölge ise, literatürde yayınlanmış resimlerde görülmesine rağmen gözardı edilmiş ve bahsedilmemiştir. Literatürdeki çalışmalar incelenince, MIAB kaynağı ile sürtünme kaynağı arasında bir karşılaştırma yapılmadığı görülmektedir. Kallee ve arkadaşlarının yaptığı tek çalışma, proses tanımlarınının yapılmasından öteye gidememiştir.

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde sıklıkla kritik parçaların tasarımında kullanılan, orta karbonlu çelikten imal edilmiş dövme bir braketle, orta karbonlu çelikten imal edilmiş bir borunun sürtünme kaynağı parametreleri, en yüksek çekme dayanımı, en yüksek % uzama ve en küçük petal çatlağı hedeflenerek optimize edilecek, optimizasyon ana hedefi ise, “ana malzemenin mekanik özelliklerine en yakın kaynaklı numune elde etmek” olarak seçilecektir. Çalışmanın ikinci kısmında ise, MIAB kaynağı yöntemiyle, deneme yanılma usülüyle imal edilmiş eş yapılar optimum sürtünme kaynağı numuneleriyle karşılaştırılacaktır.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Optimizasyon prosesi esnasında kullanılan dövme braket malzemesi AISI 1045 ve boru malzemesi ise DIN 2394-ERD 9056 olarak seçilmiştir. Bu malzemeler otomotiv endüstrisinde yapısal parçaların imalatında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Seçilen malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve çekme dayanımları Tablo 3.1 ve Tablo 3.2 de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. AISI 1045 (C45) ve ERD 9056, kimyasal kompozisyonlar (ağırlık %)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S
AISI 1045	0,42-0,50	0,15-0,35	0,5-0,8	<0,045	<0,045
ERD 9056	<0,23	<0,50	<1,5	<0,05	<0,05

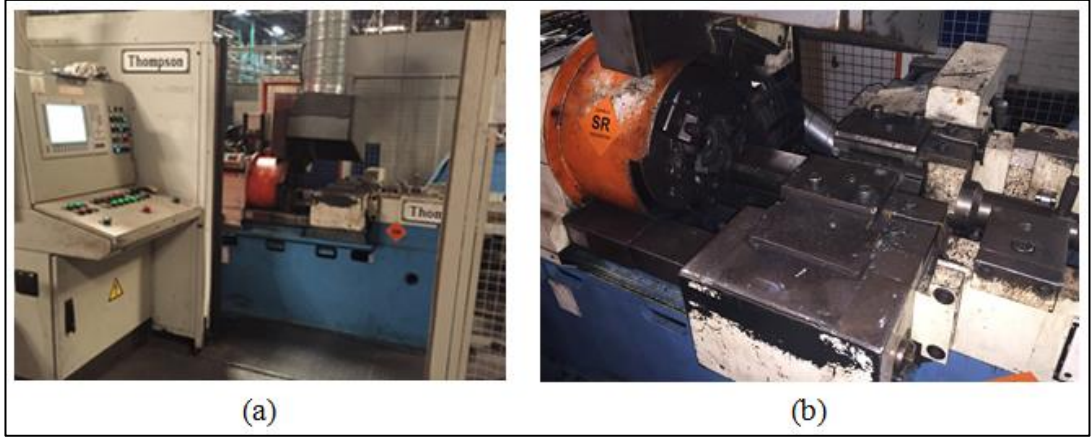
Tablo 3.2. AISI 1045 (C45) ve ERD 9056, çekme dayanımları

Malzeme	Akma Sınırı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Kopma Uzaması δ
AISI 1045	590	620	14
ERD 9056	590	670	14

3.2. Kullanılan Teçhizat

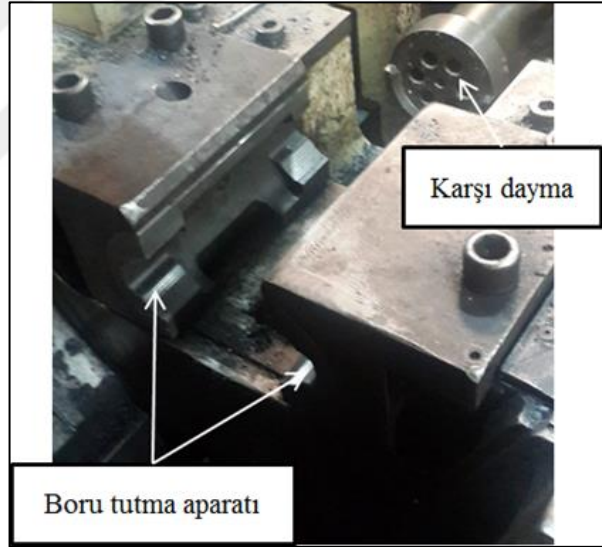
Bu çalışmada, hem sürtünme kaynağı hem de MIAB kaynağı yöntemiyle kaynak numuneleri hazırlanmıştır.

Sürtünme kaynağı deneyleri esnasında kullanılan Thompson Model 60 markalı sürtünme kaynağı makinası resimleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Makina ana gövde, tahrik ünitesi, numune bağlama ünitesi, dönme ve yığma mekanizması, frenleme sistemi, kontrol ve kumanda elemanlarında oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Deney numunelerinin imal edildiği sürtünme kaynak makinası a) makinanın dış görünüşü b) çene ve fiyistürler

Sürtünme kaynağı numunelerini kaynatmak için, Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, bu çalışmada kullanılan deney numunelerine özel, makinaya sıkma ayakları ve sıkma çenesi tasarlanmış ve monte edilmiştir.



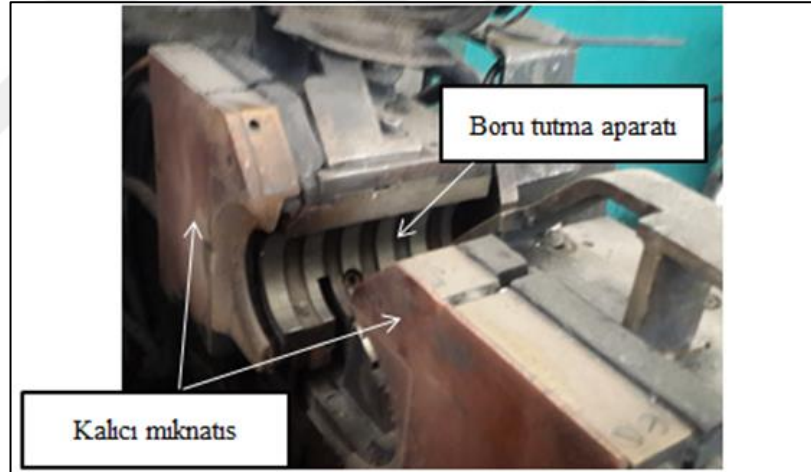
Şekil 3.2. Sürtünme kaynağı boru tutma ve karşı dayama aparatları

MIAB kaynağı deneyleri esnasında kullanılan Kuka marka kaynak makinası Şekil 3.3’te görülmektedir. MIAB kaynak makinası, ana gövde, hidrolik ünite, numune bağlama ünitesi, kalıcı mıknatıslar, elektrik ünitesi, kontrol ve kumanda elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.3. MIAB kaynağı makinası

MIAB kaynak makinasında kullanılan bobin (kalıcı mıknatıs) ve fikstürden oluşan mekanizma, Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. MIAB kaynak makinası bobin ve fikstürleri

3.3. Kaynak Parametreleri

3.3.1. Sürtünme kaynağı parametreleri

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi sürtünme kaynağında da, optimum kaynak parametrelerinin seçimi kaynağın kalitesini belirler. Sürtünme kaynak parametreleri; dönme hızı, sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi ve yığma süresidir. Kaynak parametreleri malzeme cinsine ve geometriye göre değişmektedir. Dönme hızı ITAB 'in genişliğine etki eder. Düşük hızlarda düzensiz

bir yığılma oluşurken, yüksek hızlarda kaynak bölgesi aşırı ısınır ve metalurjik dönüşümler meydana gelebilir; yakma mesafesi artar. Sürtünme ve yığılma basıncı malzemenin geometrisine ve malzemenin özelliklerine bağlıdır. Sürtünme basıncı arayüzdeki oksit filmlerini elimine edecek, yüzeylerin atmosfer ile ilişkilerini kesebilecek ve yüzeylerde uniform ısıtmayı sağlayacak biçimde seçilmelidir. Yığılma basıncı malzemelerin akma sınırına bağlıdır. Yüksek tutulduğunda aşırı sıcak şekillenmeye, düşük tutulduğunda ise yetersiz kaynak bağı oluşmasına neden olur. Farklı malzemelerde yığılma basıncı daha düşük mukavemetli olana göre seçilmelidir. Sürtünme ve yığılma süresi; malzemeye göre değişir. Bu süre sürtünen yüzeylerdeki kalıntı, oksit, tufal vb. uzaklaştırabilecek, aynı zamanda kaynak bölgesinin gerekli olan kaynak sıcaklığına en kısa zamanda ulaşmasını sağlayacak biçimde ayarlanmalıdır. Kaynak süresinin az veya çok olması kaynaklı parçadaki ısı girdisini etkileyeceğinden kaynağın kalitesini belirleyen en etkili parametrelerden bir tanesidir [5].

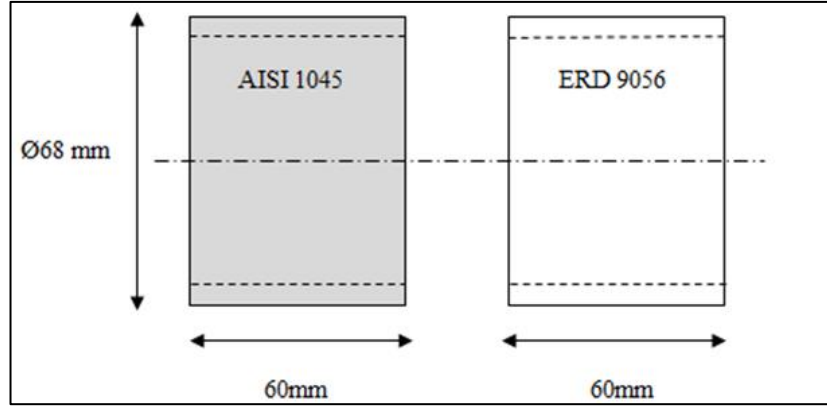
3.3.2. MIAB kaynağı parametreleri

MIAB kaynağı parametreleri başlıca; parçalar arası uzaklık, kaynak akımı, bobin akımı, bobin sargı miktarı, yığılma basıncı ve kaynak zamanıdır. Kaynak parametreleri malzeme cinsine ve geometriye göre değişmektedir. MIAB kaynak yönteminde iki temel esas vardır. Bunlardan ilki, uygun hızda dönen ark oluşturmak, ikincisi de, malzemeler yeterince yumuşadıktan sonra parçaların dövme prosesi için birbiri üzerine yığılma basıncıyla bastırmaktır. Kaynak akımı, bobin akımı, bobin malzemesi ve sargı miktarı, oluşturulacak manyetik kuvvetin büyüklüğünü ve arkın dönme hızını belirler. Arkın dönme hızının büyüklüğü, parçaların kaynak yapılacak yüzeylerinin ısınma miktarını belirler. Oluşturulan elektromanyetik kuvvetin büyüklüğü, manyetik alan yoğunluğu, ark akımı ve parçalar arası uzaklık ile orantılıdır. Bu sebeple, MIAB kaynağında bobin tasarımı son derece önemlidir. Doğru koşullar/kombinasyonlar uygulanmaz ise, MIAB kaynağında ısıtma prosesi için gerekli olan sabit hızda dönen ark hiç oluşturulamayabilir. Kaynak akımına bobin üzerindeki sargılar sayesinde uygulanan elektromanyetik kuvvet, ark'ın dönerek hızlanmasını sağlar. Dolayısıyla, elektromanyetik alanın şiddeti, ark akımının büyüklüğü, ya da iki parça arasındaki boşluk ayarlanarak, arkın hızı değiştirilebilir. Arkın dönme fazındaki (ki bu faza ısıtma fazı da denilir) kaynak

akımının büyüklüğü çok düşük olursa, dönen ark oluşamayacağı için hiç kaynak oluşmayabilir ya da çok yüksek olursa, ısı girdisinin fazla olmasından dolayı malzemede ergime gerçekleşebilir, aşırı dudak oluşumu ve yanık kaynak dudağı elde edilebilir. MIAB kaynağında, arkın dönme hızı ITAB 'in genişliğine etki eder. Düşük ark hızında arayüzde uniform olarak yumuşama gerçekleşmez. Yüksek ark hızında ise kaynak bölgesi aşırı ısınır ve metalurjik dönüşümler meydana gelebilir. Uygun ark dönme hızında, yumuşamış malzeme dışarı doğru fışkırır ve bu da yumuşayan yüzeydeki pisliklerin temizlenmesini sağlar. Parçalar arası uzaklık ise direk olarak dönen arkın oluşmasıyla ilintilidir. Uzaklık çok fazla olursa, kaynak arkı bir parçadan diğerine atlayamaz veya manyetik akı yoğunluğu azalır. Parçalar arası mesafe çok küçük olursa, elektrik arkı oluşturulamaz. Tıpkı sürtünme kaynağında olduğu gibi, MIAB kaynağında da yığma basıncı malzemelerin akma sınırına bağlıdır. Yüksek tutulduğunda aşırı sıcak şekillenmeye, düşük tutulduğunda ise yetersiz kaynak bağı oluşmasına neden olur. Farklı malzemelerde yığma basıncı daha düşük mukavemetli olana göre seçilmelidir. Ark ısıtma ve yığma süresi; malzemeye ve geometriye göre değişir. Dönen arkın oluşturulduğu ısıtma fazı kısa tutulursa, tamamlanmamış kaynak dudağı oluşabilir. Ark ısıtma fazı, yüzeylerdeki kalıntı ve pislikleri uzaklaştırabilecek, aynı zamanda kaynak bölgesini gerekli kaynak sıcaklığına ulaştıracak kısıklıkta olmalıdır. Kaynak süresinin az veya çok olması malzemenin ısınmasını etkileyeceğinden dolayı kaynağın kalitesini de etkileyecektir.

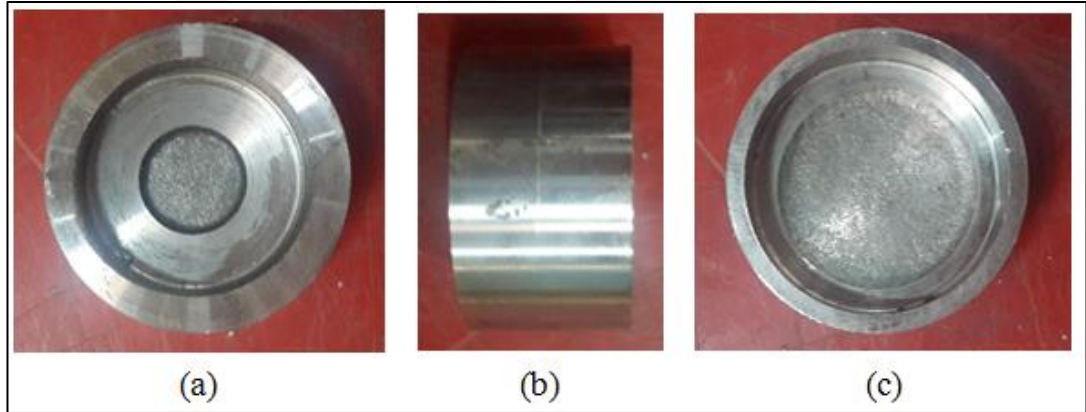
3.4. Numunelerin Hazırlanması

Çalışma esnasında kullanılacak olan parçalar, dış çapı 68 mm, et kalınlığı 4 mm olmak üzere, bir tarafı boru formunda işlenmiş dövme bir braket (arka aks) ile diğer tarafı da çelik borudan oluşmaktadır. Parça geometrisi Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Numune geometrisi, $t = 4$ mm

Önden çekişli hafif ticari bir aracın arka aksının dövme braketini, Şekil 3.5'te gösterilen boyutlara getirilmek üzere, Şekil 3.6'daki gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmiş ve kaynak öncesi nihahi formuna getirilmiştir. Numunelerin sürtünme kaynağı makinasının çenesine sabitlenecek bölgesindeki iç çapları uygun geometriye getirilmiştir.



Şekil 3.6. Dövme braketin kaynak için hazırlanması a) alt görünüş b) yan görünüş c) üst görünüş

Bu şekilde deneme numuneleriyle beraber, Şekil 3.7'de görüldüğü üzere, 80 numune imal edilmiştir.



Şekil 3.7. Kaynak için hazırlanmış dövme braket numuneleri

3.5. Kullanılan Mekanik ve Metalurjik Test Prosedürleri

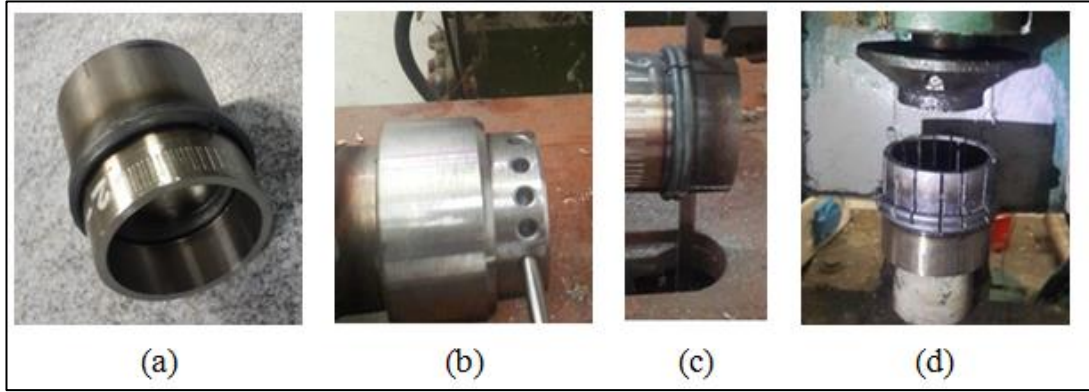
Her iki kaynak yönteminin kaynak kalitesini ölçebilmek ve kaynak karakteristiğini anlayabilmek için, uygulanacak olan tahribatlı deney yöntemleri, Tablo 3.3 yardımıyla, çalışmanın başında seçilmiştir [14, 62].

Tablo 3.3. Tahribatlı muayene yöntemleri ve tespit edilebilecek kaynak kusur ve karakteristikleri [14, 62]

Muayene Yöntemi	Kaynak Kusur veya Karakteristiği				Malzeme Kompozisyonu	Kaynak Sertlik ve pozisyonu	Çizgisi ITAB
	Çatlak	Tamamlanmamış Kaynak	Inklüzyon	Mekanik Özellikler			
Eğme	X	X	X	X			
Çekme	X	X	X	X			
Darbe	X	X	X	X			
Metalografi	X	X	X				X
Yorulma	X	X	X	X			
Mikro-sertlik				X		X	X
Kimyasal analiz			X		X		
Kırılma yüzeyi	X	X	X				
Burulma	X	X	X	X			
Kesme	X	X	X	X			

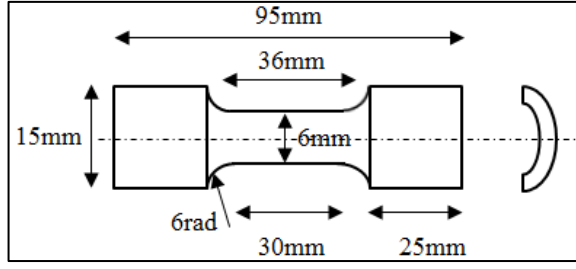
Çekme testi, çalışmanın ana test prosedürlerinden biri olmak üzere, literatürdeki katı hal kaynağı üzerine yapılan çalışmalardan edinilen bilgiye istinaden seçilmiştir.

Çekme testine ilaveten, tamamlayıcı bir yöntem olarak, petal testi de, yine literatürden ve endüstriden elde edilen bilgiye dayanarak, kaynak kalite kontrol testlerinden biri olacak şekilde seçilmiştir [15, 21, 23]. Çekme testi ve petal testi tahribatlı testlerdir. Petal testi parçanın tamamına uygulandığı için, çekme testleri numuneleri de hazırlayabilmek için, aynı kaynak parametreleri kullanılarak ikişer set deney numunesine ihtiyaç vardır. Bu numunelerden biri çekme testi, mikro-sertlik ve mikroyapı analizleri için kullanılırken, diğeri de petal testi için kullanılacaktır. Petal testi numuneleri Şekil 3.8’de görüldüğü gibi hazırlanmıştır. Kaynaklanmış parçalar önce 12 cm boyunda kesilmiş ve kısaltılmıştır (Şekil 3.8a). Petal testinde, parçanın çevresi boyunca eşit uzunlukta toplam 16 dilim kesmek için, kaynaklı numunenin ölçülerine uygun bir aparat yapılmıştır (Şekil 3.8b). Kısaltılmış numuneler, aparat yardımıyla, elektrikli şerit testeresi kullanılarak eşit dilimlere bölünmüştür (Şekil 3.8c). Kaynaklı parçanın çevresi boyunca eşit dilimler kesildikten sonra, dilimler malafa marifetiyle dışa doğru eğilmeye zorlanmıştır (Şekil 3.8d). 45⁰’lik malafa açısı sayesinde, her bir petal dışarı doğru bükülürken, hangilerinde çatlak oluştuğu gözlenmiş ve toplam çatlak boyu her bir numune için ölçülerek kaydedilmiştir.



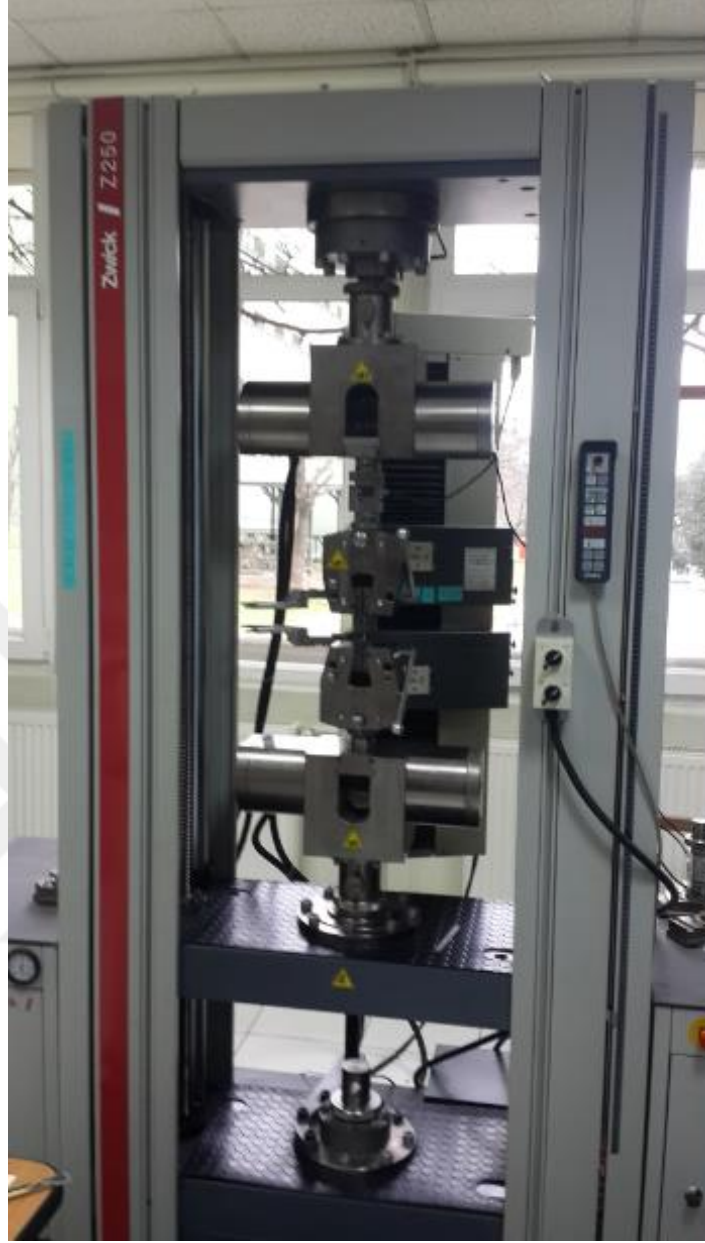
Şekil 3.8. Petal testi numunesi hazırlanması, a) kısaltılmış petal testi numunesi b) eşit genişlikte dilim kesme aparatı c) numunenin eşit dilimlere ayrılması d) dilimlerin malafa ile eğilmesi

Aynı şartlar altında yapılan ikinci set deney numuneleri çekme testi ve diğeri analizler için kullanılmıştır. Kaynak çizgisi numunenin ortasında kalacak şekilde, her bir numune için üçer adet eş özellikte çekme testi numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan çekme testi numunelerinin ölçüleri Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. Çekme testi numunesi ölçüleri

Çekme testleri, ISO EN TS 6892-1 standartına uygun olarak, 2 mm/dk test hızında, Zwick Z250 çekme testi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. % uzamaları ölçebilmek için, her bir çekme numunesine ekstensometre enstrümante edilmiştir. Şekil 3.10'da kullanılan çekme testi cihazı görülmektedir.



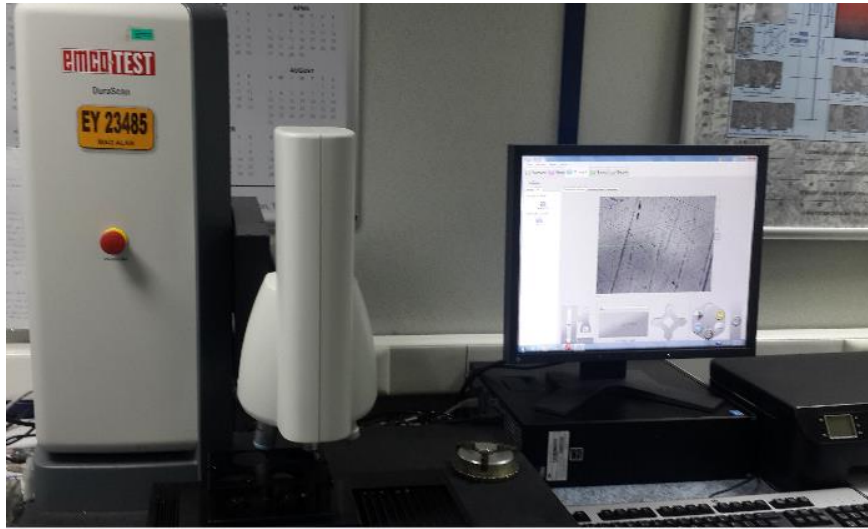
Şekil 3.10. Zwick Z250 marka çekme testi cihazı

Çekme testi sonrası numunelerin kırılma yüzeyleri SEM yöntemiyle incelenmiştir. Kullanılan Jeol JSM marka SEM cihazı Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Kaynak bölgesinde malzemenin kimyasal kompozisyonunu incelemek üzere EDX cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Jeol JSM marka SEM cihazı

Mikro-sertlik analizi, kaynak çizgisi ve ITAB uzunluğunu ölçmek ve kaynağın kabuledilebilirliğini anlamak için kullanılmıştır. Mikro-sertlik analizleri her bir numune için, TS EN ISO 6507 standartına uygun olarak, 300 gr test yükü (HV 0,3) kullanılarak, Emco-Test Durascan Vickers sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikro-sertlik cihazı Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Emco-Test Durascan Vickers mikro-sertlik test cihazı

3.6. Deney Tasarımı

Klasik deney yöntemleri, her bir proses girdisinin proses çıktısı üzerindeki etkilerini görebilmek için teker teker değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu tip deney yöntemlerine “tek seferde tek faktörün değiştirildiği (OFAT)” deney adı verilir.

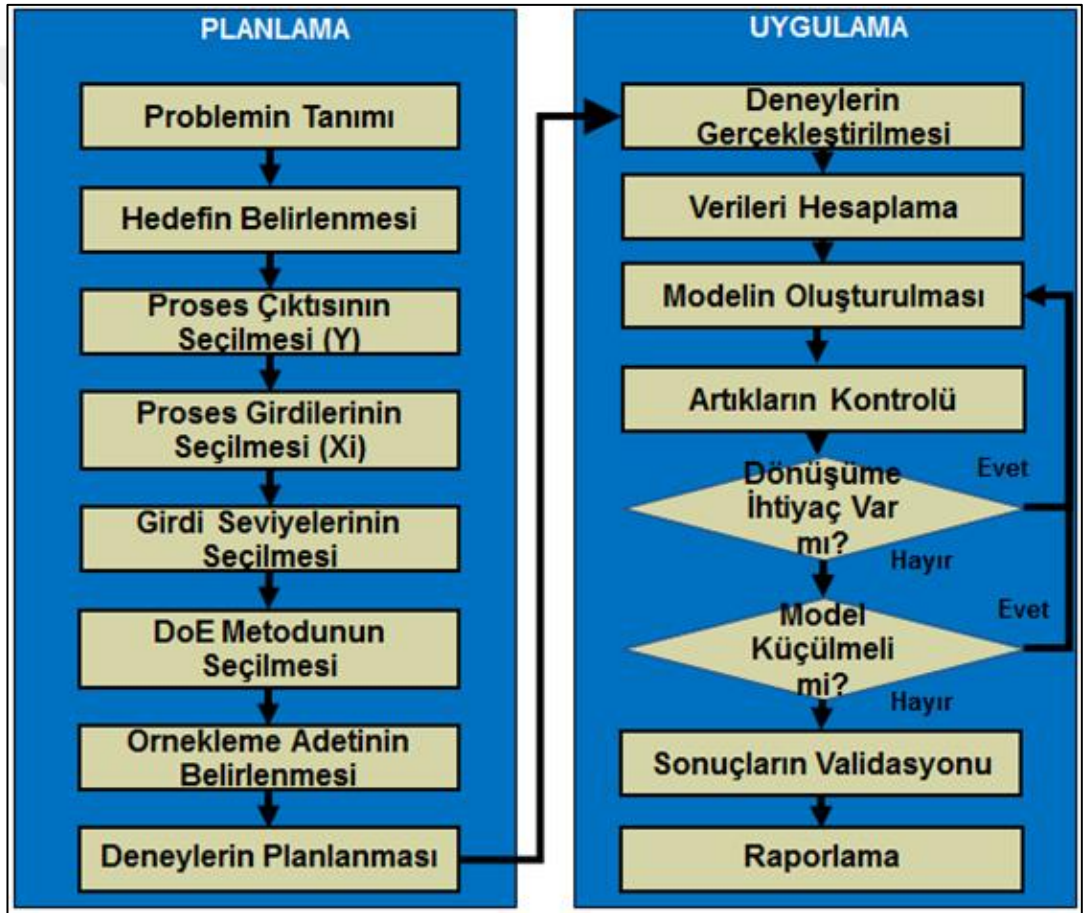
OFAT deneylerinde her girdi tek tek denendiğinden dolayı, prosesin doğasını tamamen tanımak için çok fazla sayıda deney yapılması gerekir. OFAT deneylerinde, deney sayısı az olursa ya da doğru deney sınırları seçilmemişse, prosesle ilgili varılacak olan sonuçlar ve kararlar, gerçekte olması gerekenden farklı olabilir. OFAT deneylerinde, proses üzerinde etkili olduğu düşünülen faktörler sıra ile teker teker değiştirilerek, bu esnada diğer faktörler sabit tutulur. Faktörlerin teker teker değiştirilmesi, birbiriyle etkileşen faktörlerin sonuç üzerindeki etkisini görmemizi engeller. Eğer, proses girdileri arasında birbirleriyle bir etkileşim varsa ve bu da prosesin doğasına etki ediyorsa, ya da test zamanı ve kaynaklar kısıtlıysa, farklı bir deney tasarımı yöntemini seçmek gerekir [63].

İyi tasarlanmış deneyler, planlanmamış deneylerden çok daha az denemeyle daha değerli bilgiler edinilmesine yardım ederler. DoE yöntemi; proses girdi değişkenleriyle proses çıktı değişkenleri arasındaki istatistiksel ilişkiyi kurmak için kullanılan deneyler bütünüdür. Bu ilişki Denklem (3.1)'de gösterilmektedir. Burada Y, proses çıktısı, X_i , girdi değişkenleridir.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i) \quad (3.1)$$

DoE, genellikle dört fazda gerçekleştirilir: planlama, uygulama (proses karakterizasyonu olarak da adlandırılır), optimizasyon ve doğrulama [63, 64]. DoE aşamaları Şekil 3.13'te gösterilmektedir. İyi bir deney tasarımı problemin tanımı yapılarak başlar. Problemin tanımı metriklerle belirlenmiş, net ve açık olmalıdır. Örneğin, sadece sürtünme kaynağının proses optimizasyonu, net ve açık bir problem tanımı değildir. Hangi tip sürtünme kaynağı ile çalışılmak istendiği, kullanılacak malzemenin ne olduğu, kullanılacak geometrinin ne olacağı, başlangıçta belirlenmelidir. Problem tanımı doğru olarak yapıldıktan sonra, hedefler seçilmelidir. Örneğin, dayanım özellikleri ana malzemeye benzer kaynaklı bir parça üretmek için gerekli olan proses parametreleri, bu tezde kullanılacak deney tasarımının hedefidir. Hedef belirlendikten sonra, bu hedefe ulaşmak için metrik olarak ölçülebilecek proses çıktıları seçilir. Bu çalışmada, dayanım özellikleri ana malzemeye en yakın sürtünme kaynaklı parça üretmek hedefidir. Bu durumda; kaynaklı parçadaki çekme dayanımı, kopma uzaması gibi değerlerin, ana malzeme değerlerine yakın olması beklenir. Dolayısıyla proses çıktıları; kaynaklı parçada çekme dayanımı, kopma

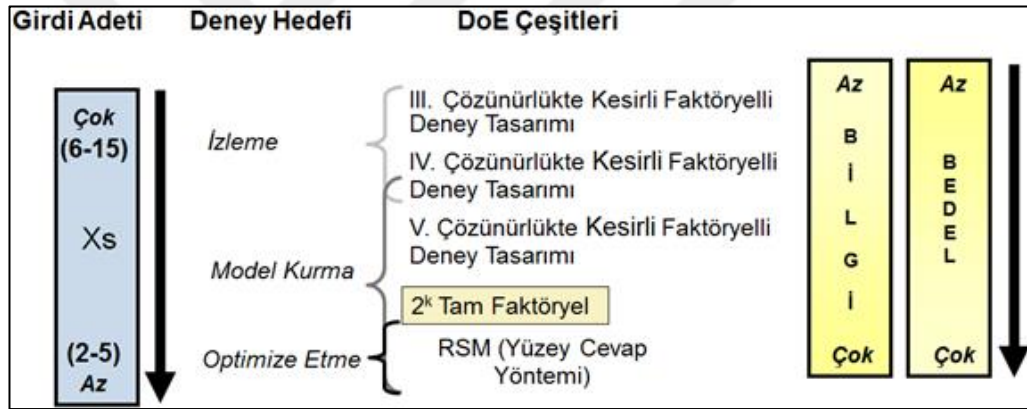
uzaması ve katı hal kaynağı kalite kontrol yöntemlerinden olan petal testinde oluşan çatlak boyu olarak sıralanabilir. Proses çıktıları belirlendikten sonra, Şekil 3.13'te gösterildiği üzere, proses çıktıları üzerinde etkili proses girdilerine karar verilir. Karar verme aşaması, sadece literatürdeki bilgilere dayandırılmaz, deney ekibinin konu üzerindeki kendi tecrübelerinden ve deneme numuneleri üretme safhasından da faydalanılır. Proses girdileri seçildikten sonra, girdi seviyeleri seçilir. Girdi seviyeleri, girdi parametrelerinin kendi sınırları dahilinde kaç farklı değerde olabileceğinin bilgisidir. En az girdi seviyesi ikidir. Buna göre, proses girdi parametresi kendi sınırının minimum ya da maksimum değerini alabilir.



Şekil 3.13. Deney tasarımı aşamaları

Proses girdi seviyelerinin belirlenmesinden sonra, DoE metodu seçilir. DoE metodu seçme kriterleri Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Deneyin amacı, prosesi sadece izlemek, prosesin matematiksel modelini oluşturmak, ya da prosesi optimize etmek olabilir. Prosesin sadece izlenmesi için, o prosesle ilgili bütün seviyeleri içeren kombinasyondaki deneylerin yapılmasına gerek yoktur. Yeterli miktarda deneyle,

prosesin doğası gereği nasıl davrandığı anlaşılabilir. Eğer prosesle ilgili matematiksel bir model çıkartılmak isteniyorsa, tam faktöryelli deneylerden birini seçmek gerekir. Bu da, k girdi (faktör) adeti olmak üzere, iki seviyeli tam faktöryelli bir deney tasarımı için, 2^k adet deney şeklinde ifade edilir. Çözünürlük azaldıkça, deney sayısı azalır, bu durumda matematiksel model oluşturmaktan ziyade, prosesin doğasının inceleneceği ve izleneceği deney tasarımları oluşturulmuş olur. Bu yöntem genellikle, proses girdi parametrelerinin beşten çok olduğu durumlarda uygulanır. Aksi halde, yapılması gereken deney sayısı oldukça artacaktır (2^5). Eğer proses girdi parametreleri adetçe 3-5 arasında ise, RSM yöntemi seçilebilecek en uygun yöntem haline gelir [63, 65-70]. DoE metodolojisinin seçimi eldeki kaynaklarla yakından ilgilidir, deney sayısı arttıkça, kullanılacak olan malzeme ve zaman ihtiyacı da artacaktır.



Şekil 3.14. DoE metodolojisi seçim kriterleri

Seçilen DoE deneyleri gerçekleştirildikten sonra, veriler hesaplanır, matematiksel model kurulur. Kurulan matematiksel modelin doğruluğunu kontrol etmek için öncelikle model doğruluk kontrolünün yapılması gerekmektedir. Model doğruluk kontrolü, kurulmuş olan modelin, deneyin tümünü ifade edip edemediğinin incelenmesidir. Bu kontrol için uygulanacak en önemli diagnostik yöntemi artık analizi yöntemidir. Artık değer, deney tasarımındaki her bir çıktı değerinin, gerçekte gerçekleşen değeriyle, model tarafından temin edilen değeri arasındaki farktır. Eğer bir modelin doğruluğu yeterli ise, artıkların dağılımı normal dağılıma uygun olmalıdır [63, 65, 70]. Artıkların normal çıkmadığı durumlar da olabilir, bu durumda, matematiksel modelin oluşturulma adımına geri dönülüp, veri dönüşümü metodlarından birini uygulamak gerekebilir. Modelin incelenmesi ve verilerin

kontrolü esnasında, değerli bir bilgi edinememe riski her zaman vardır. Bu durum genellikle, deneyle ilgili ön bilginin olmadığı proseslerde meydana gelir. Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda, hangi proses girdilerinin proses çıktıları üzerinde etkili parametreler olup olmadığı bilgisine ulaşılamayabilir. Böyle bir durumla karşılaşmamak için, deney tasarımını yapmadan önce, proses iyice tanınmalı ve gerekirse deneme testleri yapılmalıdır. Etkisiz proses girdileri bulduktan sonra, bu girdiler modelden çıkartılır ve matematiksel model, prosesin doğasını en iyi ifade eden final halini bulur. Matematiksel model son halini aldıktan sonra, modelden elde edilen çıktı değeriyle gerçek değer arasındaki farkı bulmak ve matematiksel modeli ispatlamak gerekir. Bunun için doğrulama testleri yapılır. Matematiksel modelin önerdiği optimum girdi değerlerinin uygulandığı gerçek deneyler yapılır ve proses çıktısının gerçek değeri, modelden gelen değerle karşılaştırılır.

3.6.1. Varyans analiz yöntemi (ANOVA)

Rastgele veriler, kendi ortalamaları etrafında gezinen bir varyasyona sahiptirler. Varyasyon, rastgele verilen herhangi bir girdi noktasıyla, X_i , verinin ortalaması, μ , arasındaki farkın veri adetinin, n , bir eksiğine bölünmesi şeklinde ifade edilir. Varyansın kare kökü ise “standart sapma” olarak adlandırılır ve Denklem (3.2)’teki gibi tanımlanır:

$$\text{Var}(x) = \sigma_x = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - \mu)^2 \quad (3.2)$$

ANOVA, bir deneyde bulunan varyasyonun analizidir. Deneyin toplam varyasyonunun, deneyi oluşturan bileşenlerin kendi varyasyonları ve bu bileşenlerin ölçümlerinden kaynaklanan hata payından gelen toplam varyasyondan, daha büyük olmaması gerektiği hipotezine dayanır. ANOVA, istatistiksel deneyler sayesinde, farklı deneysel koşulları arasında belirgin farklılıklar var olup olmadığını istatistiksel olarak hesaplar [71]. ANOVA, kullanılacak olan proses girdi değişkeni adetine bağlı olarak farklı çeşitlerde olabilir. Tek yönlü ANOVA, sadece bir girdi değişkeni değiştiği zaman prosesin ne kadar değiştiğini ölçer. Benzer şekilde, iki yönlü ANOVA da iki girdi değişkenli bir deneyin deney çıktısı üzerindeki etkilerini inceler. İki den fazla girdi değişkeni kullanıldığı zaman N yönlü ANOVA adını alır.

ANOVA testi, ampirik matematiksel modelin doğrulanmasını sağlar ve prosesin toplam varyasyonunun prosesi oluşturan bileşenlerine bölüştürülmesini sağlar.

Tipik bir ANOVA analizi, girdilerle, örnekleme varyansının serbestlik derecesi (DF), kareler toplamı (SS), hataların karelerinin ortalaması (MS), F oranı ve olasılık değeri (P değeri) arasındaki ilişkiyi verir.

Kareler toplamı, farklı kaynaklardan ötürü veride oluşan varyasyonun ya da verilerin ortalamadan uzaklığının karelerinin toplamı şeklinde ifade edilir, ya da bir diğer ifadeyle, bir veri grubundaki toplam varyasyondur. Serbestlik derecesi, hesaplanan her bir kareler toplamı değeri için, elde edilen bilginin ne oranda yanlış olmadığını ya da bir diğer deyişle ne oranda bağımsız olduğunu ifade eder. Kareler toplamı, veride farklı kaynaklardan meydana gelen değişkenliği ölçerken, hataların karelerinin ortalaması, grup içi ve gruplar arası değişkenliğin tahminini verir. Hataların karelerinin ortalaması, ortalamadan sapmaların, serbestlik derecesine bölünmesi ile elde edilir. F oranı, varyans analizinde gruplar arası varyansın, grup içi varyansa bölünmesi ile elde edilen değerdir ve modeli oluşturan proses girdilerinin ve bu girdilerin birirleriyle etkileşimlerinin, çıktı üzerindeki etkinliğini belirler [65, 66]. Olasılık değeri, “probability (P)” kelimesinden gelmektedir ve istatistik olarak yapılan kabullere göre 0 ile 1 arasında değişir. Eğer % 95 oranı (bir sonuçtan emin olma oranı) bizim için emniyetli ise P değeri 0,05’dir. % 97 için bu değer 0,03’dür. Hipotez testi, P değerine dayanır.

Hipotez testi şu şekilde ifade edilir:

1. H_0 hipotezi: Eşitlik hipotezidir. Ortalamaların eşit olduğu varsayılır.
2. H_a hipotezi: Alternatif hipotezdir. Ortalamaların eşit olmadığı varsayılır.

Eşitlik hipotezinin reddedilebilmesi ya da reddedilememesi, ANOVA analizi sonucunda elde edilecek P değerlerine bakılarak anlaşılır [63, 65, 70,].

Eğer veri grupları arasında ortalamalar eşit ise, yani, girdi üzerinde yapılan değişiklikler, prosesin çıktısını etkilemiyorsa, bu girdi bu proses üzerinde etkisizdir ve istatistik olarak eşitlik hipotezi reddedilemez ve P değeri yüksek bir değer alır. Eğer, P değeri, seçilmiş olan kritere göre, 0,05’den küçük ise, eşitlik hipotezi

reddedilir. Bu da, prosesin ilgili girdi değişkeninin, prosesin çıktısı üzerinde etkili bir parametre olduğunu gösterir [63, 65, 70].

ANOVA analizinin doğruluğu, ilk olarak korelasyon katsayısı, R^2 , incelenerek yapılır. Korelasyon katsayısı, deneysel veri ile regresyon modelinden gelen hesaplanmış veri arasındaki ikinci dereceden ilişkinin şiddetini belirler:

$$R^2 = \frac{SS \text{ Regresyon}}{SS \text{ Toplam}} \quad (3.3)$$

3.6.2. Yüzey cevap yöntemi (RSM)

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde görülmektedir ki, DoE kaynak parametreleri ile kaynak başarısı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için kullanılabilen bir yöntemdir [72-75]. Bu nedenle bu çalışmada da DoE yöntemleri kullanılarak önemli kaynak parametreleri ve birbirleriyle olan ilişkileri analiz edilecektir. Literatürde genellikle parametreler ile cevap değerleri arasında lineer bir ilişki kurulabilen “İki Seviyeli Tam Faktöryel” tipi deney tasarımları yapılmıştır. Oysa, RSM yöntemi DoE yöntemleri arasında en gelişmişlerindedir. Deney girdi değişkenleri beşten az olduğu zaman, RSM yöntemi çok güvenilir sonuçlar verir [72, 76]. Tablo 3.4’te, en çok kullanılan modelleme ve optimizasyon metodlarının karşılaştırması görülmektedir.

Tablo 3.4. En çok kullanılan modelleme/optimizasyon metodlarının karşılaştırılması [72]

Karşılaştırma Kriteri	Metod				
	ANN	GA	RSM	Taguchi	Faktöryel Deney Tasarımları
Hesaplama zamanı	Uzun	Çok uzun	Kısa	Orta	Kısa
Model oluşturabilme	Evet ^a	Hayır	Evet	Hayır	Evet ^b
Optimizasyon kabiliyeti	Model üzerinden	Direk	Model üzerinden	Direk	Model üzerinden
Anlaşılabilirlik	Orta	Zor	Kolay	Normal	Kolay
Optimizasyon doğruluk seviyesi	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek	Normal	Çok yüksek

^aGirdiler arasında etkileşim yok

^bGirdiler arasında etkileşim var

RSM yöntemi bir prosesdeki proses çıktısı ile kontrol edilebilir proses girdi parametreleri arasında matematiksel bir ilişki kurar. Genellikle bir prosesin proses çıktısının birden fazla proses girdisiyle potansiyel olarak etkileşim içinde olduğu durumlarda kullanılır.

RSM yönteminin temelini oluşturan ikinci dereceden cevap yüzeyi aşağıdaki denklem ile hesap edilmektedir:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} X_i X_j \quad (3.4)$$

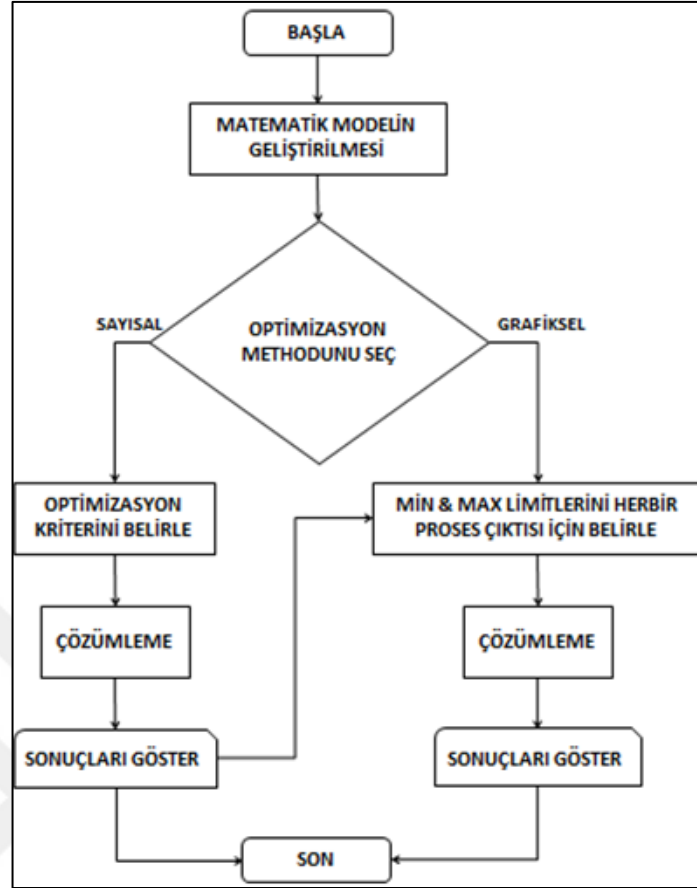
Burada, n girdi sayısı, b_0 , b_i , ve b_{ij} sabit, lineer ve ikinci dereceden terimlerin katsayılarıdır. X_i ise girdi değişkenleridir. Ampirik cevap modelini kurabilmek için, toplanacak veri, DoE metoduyla toplanmalıdır, daha sonra tekil veya çoğul istatistik regresyon teknikleri uygulanır.

Bu çalışmada, RSM yöntemlerinden merkezi kompozit deney tasarım yöntemi kullanılacaktır. Merkezi kompozit deney tasarımları, ikinci dereceden RSM modellerinin kurulmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. İkinci dereceden yüzey cevap modelleri, genellikle proses optimizasyonu yapmak için kullanılır [76].

3.7. Parametrik Optimizasyon

Bu çalışmada, her bir girdi değişkenini, hedeflenen proses çıktısını elde edebilmek amacıyla seçebilmek için, sayısal ve grafik optimizasyon yöntemlerinden faydalanılmıştır. Nümerik optimizasyon yöntemi olarak, “istenirlik” fonksiyonu kullanılmıştır. İstenirlik fonksiyonu, çoklu optimizasyon problemleri için kullanılan yöntemlerden biridir. Kullanılmış olan optimizasyon yönteminin akış şeması, Şekil 3.15’de görülmektedir.

Grafik optimizasyon yönteminde, her bir proses çıktısı için tatmin edici çözümleri gösteren bölgeler, üstüste gelecek şekilde örtülü kontür grafiğinde çizdirilir. Örtülü kontür grafiğinde istenilen hedefe uygun olan bölgeler sarı ile gösterilirken, hedeften uzakta kalan bölgeler gri olarak gösterilir [73].



Şekil 3.15. Optimizasyon akış şeması [74]

3.7.1. İstenirlik fonksiyonu

İstenirlik fonksiyonu kullanılarak, istenirlik başarısı maksimize edilmiş bir veya daha fazla kombinasyonda proses girdi seviyeleri bulunabilir. Bunun için, her bir proses çıktısını, Y_i , tek bir istenirlik fonksiyonuna, d_i , dönüştürmek gerekir. Her bir istenirlik fonksiyonu değeri, d_i , şu aralıkta değişebilir:

$$0 \leq d_i \leq 1 \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'de eğer proses girdisi, Y_i , hedef değerdeyse, $d_i = 1$ olur. Eğer, proses çıktısı Y_i , kabul edilebilir sınırların dışındaysa, $d_i = 0$ olur. Çoklu optimizasyon problemleri için, tekil istenirlik fonksiyonları her bir proses çıktısı için hesaplanır ve proses girdileri prosesin bütün çıktılarının birleşik istenirlik fonksiyonunu maksimize etmek için optimize edilir. İstenirlik fonksiyonunu maksimize etmek için, tekil istenirlik fonksiyonlarının türevleri alınabilir olmadığı için, direk arama optimizasyon yönteminden faydalanılır [76]. Birleşik istenirlik fonksiyonunu

optimize etmek için, her bir tekil istenirlik fonksiyonunun geometrik ortalaması alınır ve birleşik istenirlik fonksiyonu hesaplanır:

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'te m, proses çıktı adetini gösterirken, tanım gereği $1 \geq D \geq 0$ arasında bir değer alabilir. Eğer, D değeri 1'e yakın ise, her bir tekil istenirlik fonksiyonunun, hedef değerine çok yakın olduğunu gösterir, bu da çoklu cevap sistemlerinde optimum sonuç olarak kabul edilir [76].



4. DENEYLER VE BULGULAR

4.1. Sürtünme Kaynağı Deneyleri ve Sonuçları

Literatürde sürtünme kaynağı ile yapılan optimizasyon çalışmaları incelendiğinde [43-54], çubuk/çubuk kaynaklı numuneler üzerinde çalışmalar yapıldığı görülür. MIAB kaynağıyla ilgili çalışmalar incelendiğinde ise [20, 23-28, 30, 56-58, 60], boru/boru tipi kaynaklı çalışmalara rastlanır. MIAB kaynağında bir borunun brakete kullanımına yönelik çalışmalar literatürde sınırlı kalmıştır ki, çalışmalardan bir tanesi bu tezin yazarının çalışmasıdır [21, 22, 15]. Sürtünme kaynağı ile ilgili ise bir borunun bir brakete kaynatılması ile ilgili yapılmış herhangi bir literatür çalışması yoktur. Oysa, çubuk/çubuk ya da boru/boru tipi birleştirmelerin pratikte kullanımı azdır. Sondaj sektörüne yönelik çalışmalarda, boru/boru tipi kullanımlar sınırlı ölçüde yer bulmaktadır. Oysa ki, özellikle otomotiv sektöründe boru/boru tipi birleştirme yöntemine rastlanmamaktadır. Otomotiv sektöründe sürtünme kaynağı ya da MIAB kaynağının kullanımı genellikle çelik bir borunun çelik malzemeden imal edilen dövme bir parçaya kaynatılması esnasında kullanılmaktadır. Bu parçalara örnek olarak, ağır ticari araçlarda kullanılan kardan milleri, viraj denge çubukları, çamurluk braketleri ve tüm araç tiplerinde kullanılan akslar, gösterilebilir. Bu yüzden çalışmanın bu boyutunda çalışmaların fayda alanı düşünülerek, boru/dövme tipi birleştirmeler üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmada sürtünme kaynağı proses parametreleri, endüstriyel ihtiyaç ve kullanım yaygınlığı düşünülerek, orta karbonlu çelik boru ve dövme braketler için optimize edilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında, sürtünme kaynağı ön çalışmaları ile proses tanınmış, daha sonra sürtünme kaynağı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında, MIAB kaynağı ön çalışma numuneleri incelenmiştir. Çalışmanın son kısmında ise, sürtünme kaynağı ile MIAB kaynağı optimum numuneleri karşılaştırılmıştır.

Optimizasyon prosesi öncesinde, sürtünme kaynağının mekanik özellikleri üzerinde etkili parametreler ve bu parametrelerin sınırlarını tespit edebilmek için, ilk olarak literatür çalışmalarından faydalanılmıştır [41, 44, 47].

Literatür çalışmalarının yanı sıra, deneme yanılma testleri yapılmış, ayrıca sahadaki daha önce yaşanmış tecrübelerden faydalanılmıştır.

4.1.1. Sürtünme kaynağı ön çalışma sonuçları

Sürtünme kaynağı prosesini tanımak için, çalışmaya ilk önce sürtünme kaynağıyla imal edilmiş mekanik bir parçanın incelenmesiyle başlanmıştır. Tablo 4.1’de bu çalışmada kullanılan parçaların malzeme özellikleri görülürken, mekanik özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir. Bu numunenin temin edildiği parça, otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır ve tasarımında çalışma ekibinden bazı ekip üyelerinin katkısı vardır.

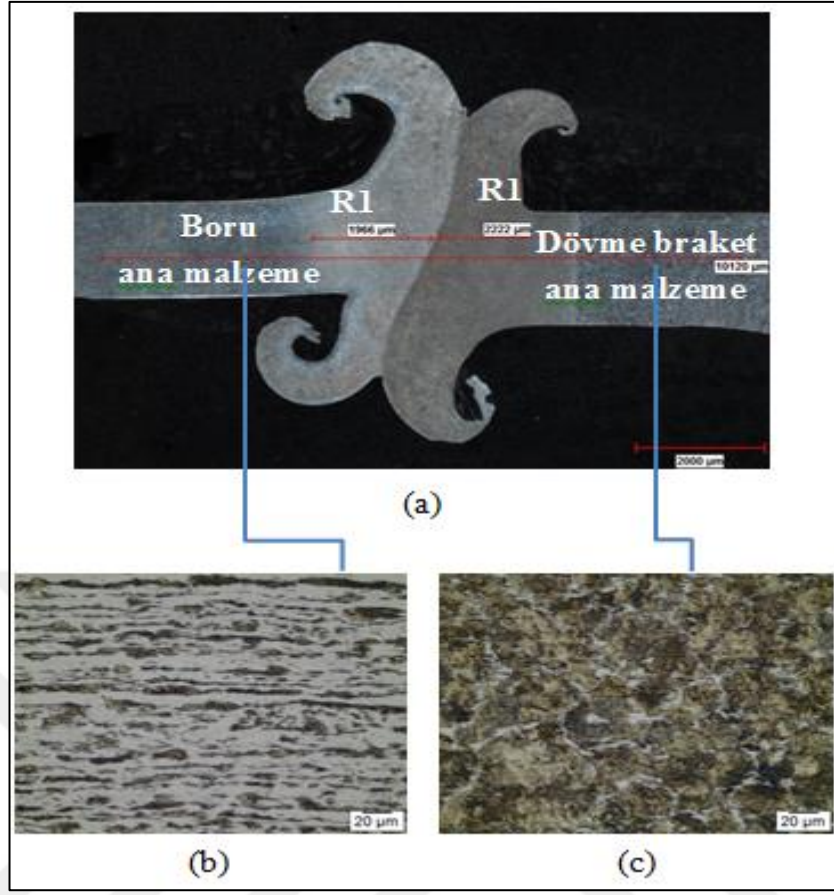
Tablo 4.1. EN 10305-2 (St 52-3) ve AISI 1141, kimyasal kompozisyonlar (ağırlık %)

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
AISI 1141	0,37-0,45	0,209	1,35-1,65	0,04	0,08-0,13	-	-	0,072
St 52-3	0,22	0,55	1,6	0,025	0,025	-	-	0,006

Tablo 4.2. AISI 1141 ve St 52-3, mekanik özellikler

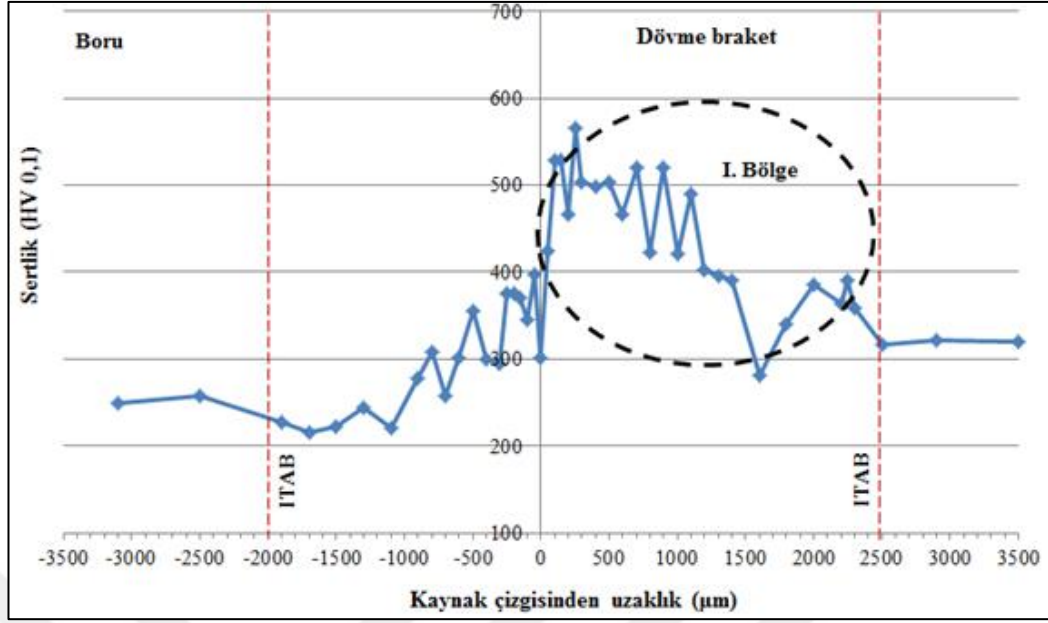
Malzeme	Akma Sınırı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Kopma Uzaması δ
AISI 1141	360	675	22
St 52-3	355	630	22

Sürtünme kaynağında oluşan kaynak dudağı ve kaynak kesitinin makro resmi Şekil 4.1’de görülmektedir. Boru ana malzemesi, soğuk çekme yöntemiyle imal edildiği için, çekme yönündeki bant oluşumları ve segregasyonlar Şekil 4.1b’de görülmektedir. Boru ana malzemesinde mikro-sertlik değerleri 250 HV 0,1 olarak ölçülmüştür ve ana malzeme mikroyapısının perlit olduğu söylenebilir. Şekil 4.1c’de dövme braketini ana malzemesi mikroyapı resmi görülmektedir. Tane sınırlarında ferrit ve bir miktar Widmanstätten yapı görülmektedir. Bu bölgede mikro-sertlik değerleri 320 HV 0,1 olarak ölçülmüştür ve yapının perlit olduğu söylenebilir (Şekil 4.2).



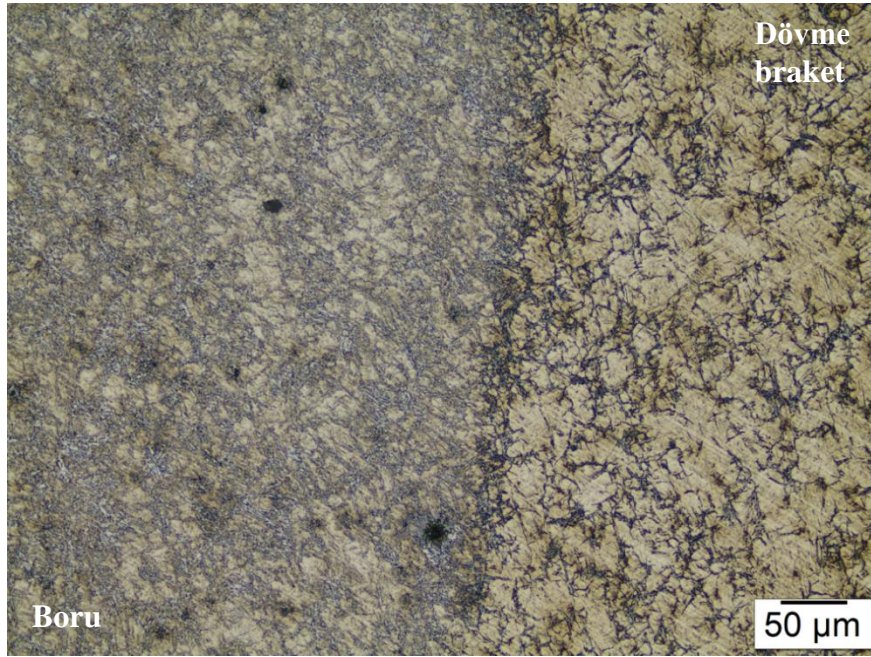
Şekil 4.1. Sürtünme kaynaklı numunenin ITAB bölgesi ve ana malzeme mikro resimleri a) kaynaklı bölge makro resim b) çelik boru ana malzeme (St 52-3) c) dövme braket ana malzeme (AISI 1141)

Şekil 4.1a'da görüldüğü üzere, sürtünme kaynağında ITAB iki bölgeden oluşmaktadır. Sürtünme kaynağında, kaynağın her iki yanını içeren toplam ITAB uzunluğu ~4.2 mm'dir ve bu iki bölge kaynak çizgisinin her iki tarafına eşit biçimde dağılmıştır. Bu bölge, birinci bölge (R1; ~2,1 mm) olarak adlandırılacaktır ve Şekil 4.2'de bulunan mikro-sertlik analizi grafiğinde de gözlemlenmiştir. Ön çalışma numunelerinde mikro-sertlik analizi her iki kaynak yönteminde de, prosesi çok iyi tanımak ve anlamak için 100 gr'lık Vickers yükü ile, ITAB bölgesinde çok sık aralıklarla (100 µm) yapılmıştır.



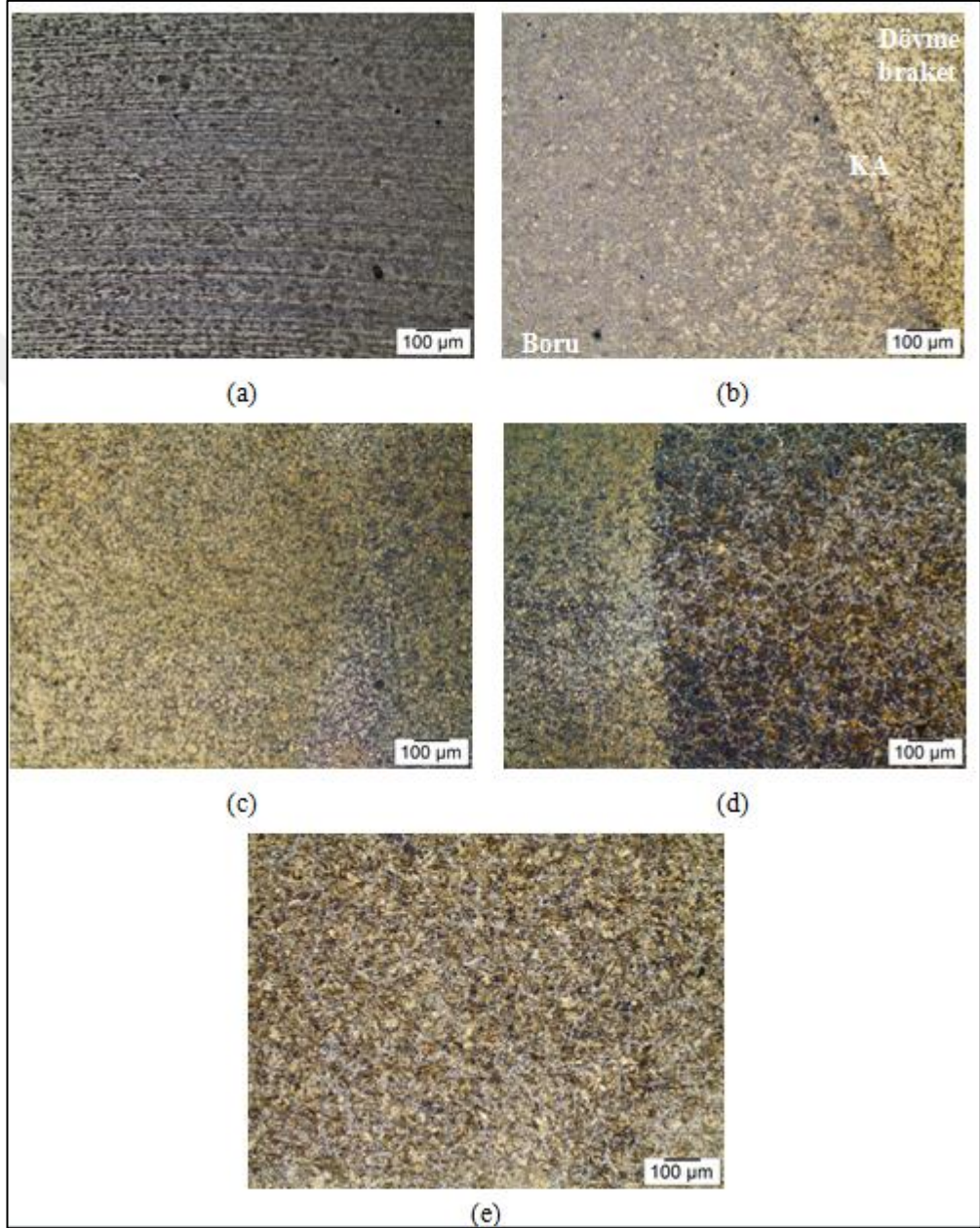
Şekil 4.2. Sürtünme kaynağı mikro-sertlik değerleri

Sürtünme kaynağı kaynak arayüzü Şekil 4.3'te görülmektedir. Kaynak arayüzünde keskin olmayan, yumuşak bir geçiş çizgisi oluşarak, iki parça arasında uniform bir kaynak bağı oluşmuştur. Kaynak çizgisinin dövme braket tarafında, beynit ve az oranda martenzit yapı bulunmaktadır. Boru tarafında ise, braket tarafına nazaran, daha küçük taneler görülmektedir.



Şekil 4.3. Sürtünme kaynağı arayüzü

Şekil 4.4'te, sürtünme kaynağı numunesinde farklı ITAB bölgeleri görülmektedir. Şekil 4.4a'da, boru tarafında, ITAB ile ana malzemenin geçiş bölgesi görülmektedir. ITAB'dan ana malzemeye doğru ilerledikçe, borunun soğuk çekme ile imal edilmiş olmasından dolayı, tipik ferrit ve perlit bant oluşumları görülmektedir.

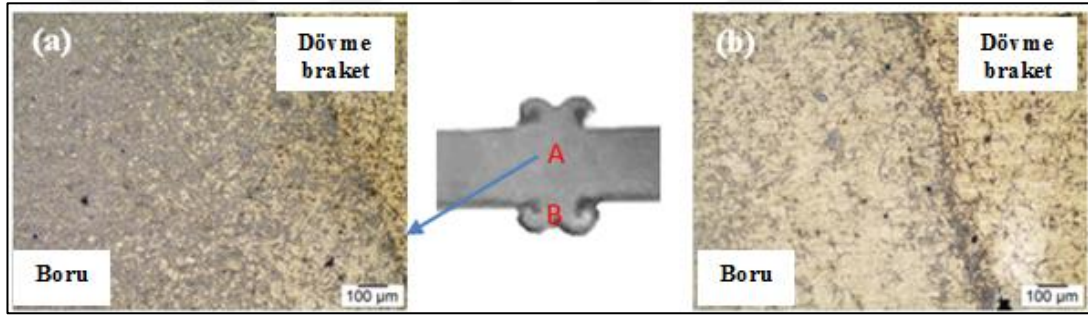


Şekil 4.4. Sürtünme kaynağı ITAB mikro resimleri a) ITAB ve ana malzeme arayüzü, boru tarafı b) ITAB, boru tarafı c) ITAB, dövme tarafı d) yeniden kristalleşme arayüzü, dövme tarafı e) yeniden kristalleşme bölgesi, dövme tarafı

Şekil 4.4b'de, kaynak çizgisinin boru tarafındaki mikroyapısı görülmektedir. Kaynak arayüzünde dekarbürize bir bölgeye rastlanmamaktadır. Boru tarafında, kaynak

çizgisine çok yakın bir bölgede, 380 HV 0,1 civarında mikro-sertlik değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.2). Boru tarafında, kaynak çizgisine en yakın bölgede, tane sınırı ferrit görülmektedir.

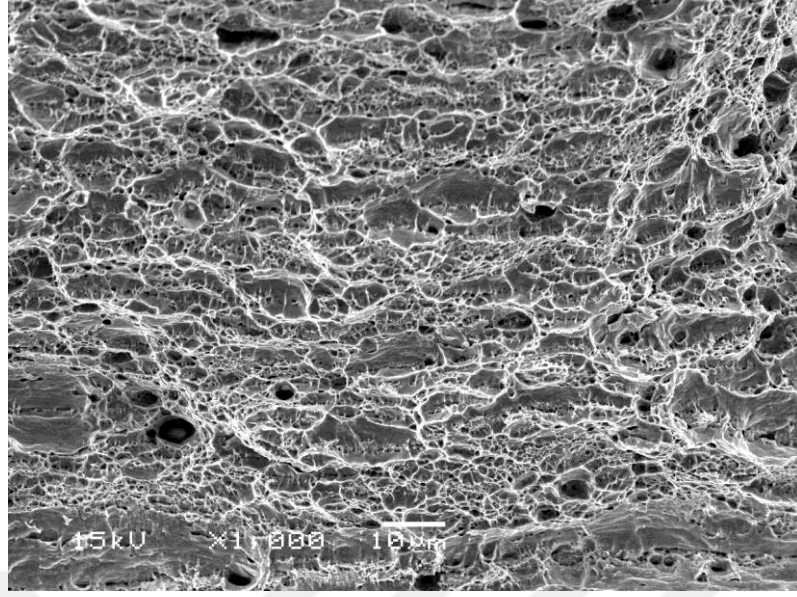
Şekil 4.4c’de, dövme braket tarafında, kaynak çizgisine yakın bölgede (resmin sol tarafı), tanelerde kabalaşma görülmektedir. Şekil 4.4d’de, dövme braket, ITAB’dan ana malzemeye doğru giderken oluşan geçiş bölgesi görülmektedir. ITAB’da oluşan yeniden kristalleşme sebebiyle, daha küçük taneli bir yapı oluşmakta ve mikro-sertlik değerleri de 570 HV 0,1 mertebelerine kadar çıkmaktadır. Mikro-sertlik değerleri, ITAB’dan ana malzemeye geçerken oluşan arayüzde, 320 HV 0,1 mertebelerine kadar düşmektedir ki bu da dövme braket ana malzemesinin sertlik değerine eşdeğerdir.



Şekil 4.5. Sürtünme kaynak çizgisi üzerinde farklı bölgelerin mikroyapısı a) A bölgesi b) B bölgesi

Sürtünme kaynağında kaynak çizgisi boyunca iki farklı mikroyapı bölgesi tespit edilmiştir (Şekil 4.5). Buna göre, kaynağın orta bölgesinden dudaklara doğru inildikçe, perlit miktarının belirgin bir biçimde azaldığı görülmektedir. Hızlı soğumadan kaynaklı bir miktar beynitik yapı görülse de, kaynak çizgisinden ortalara doğru gidildiğinde bu beynitik yapı yok olur (Şekil 4.5a-b).

Ön çalışma numunesinin çekme testi sonrasında kırılma yüzeyleri SEM analizi ile görüntülenmiştir. Şekil 4.6’da görüldüğü üzere, kırılma yüzeyi sünek kırılmayı işaret etmektedir.



Şekil 4.6. Sürtünme kaynağı kırılma yüzeyi SEM resmi

4.1.2. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: parametre ve sınır koşulları seçimi

Optimizasyon prosesi boyunca kullanılacak olan etkili parametreler şu şekilde seçilmiştir: sürtünme basıncı (P_1 (bar)), yığma basıncı (P_2 (bar)), sürtünme süresi (t_1 (sn)) ve yığma süresi (t_2 (sn)). Seçilen proses parametrelerinin sınırlarını belirlemek amacıyla, deneme yanılma testleriyle yapılmıştır. Yapılan deneme yanılma testlerinde, kaynak dudağı oluşumu, tamamlanmış kaynak gibi özelliklerin gözönünde bulundurulduğu, “iyi kaynak” tabir edilebilecek numuneleri içeren sınır koşulları belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmadaki amaç, optimizasyon metodolojisini ölçülebilir metrikler üzerine kurabilmektir.

Hiç kaynaklanmama durumları, kısmi kaynaklanma durumları ya da yanık kaynak tabir edilen durumları içeren sınır koşulları çalışmanın dışında tutulmuştur.

Yapılan bütün deneysel çalışma boyunca, yapılan deneme yanılma testlerine istinaden, dönme hızı 600 dev/dk’da sabit tutulmuştur. Sürtünme kaynağı optimizasyon çalışmalarında seçilen parametre ve sınır koşulları Tablo 4.3’te görülmektedir.

Tablo 4.3. Seçilen parametreler ve sınır koşulları

No	Faktör	Simge	Birim	Seviye		
				-1	0	+1
1	Sürtünme basıncı	P ₁	bar	-1	14	16
2	Dövme basıncı	P ₂	bar	12	40	50
3	Sürtünme süresi	t ₁	sn	30	4	5
4	Yığma süresi	t ₂	sn	3	2	2,5

4.1.3. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: parametre seviyelerinin kodlanması

Tablo 4.1’de görülen parametre sınırları, DoE yönteminde kullanmak üzere, Denklem (4.1)’de görüldüğü gibi kodlanmıştır. Burada, parametre sınırının yüksek değeri (+1) değerini alırken, düşük değeri ise (-1) değerini alır. Kodlanmış değişkenler şu şekilde hesaplanır:

$$X_1 = \frac{P_1 - P_{10}}{\Delta P_1 / 2}, \quad X_2 = \frac{P_2 - P_{20}}{\Delta P_2 / 2}, \quad X_3 = \frac{t_1 - t_{20}}{\Delta t_1 / 2}, \quad X_4 = \frac{t_2 - t_{20}}{\Delta t_2 / 2} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)’de görülen X₁, X₂, X₃ ve X₄, sırasıyla, proses girdi faktörleri olan sürtünme basıncı (P₁), yığma basıncı (P₂), sürtünme süresi (t₁) ve yığma süresi (t₂)’nin kodlanmış değerlerini ifade etmektedir. Denklem (4.1)’de görülen P₁₀, P₂₀, t₁₀ ve t₂₀ değerleri ise, bu faktörlerin ortalama değerleridir.

4.1.4. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: numunelerin kaynatılması

Prosesde varyasyona sebep olmamak için, kaynatılacak numunelerin tümü ardışık olarak kesilen borular ile ardışık sürede kaynatılmıştır. Boru formuna getirilmiş dövme braketlerin boyu, dövme boyut sınırlamasından ötürü, 60 mm uzunluğundadır. Dövme braketlere kaynatılacak olan borular, sürtünme kaynağı boru tutma aparatına rahatça kaynatılabilecek uzunlukta kesilmiştir. Boruların tümü soğutma sıvısı kullanılarak testere ile 60 cm uzunluğunda kesilmiştir. Kaynatılmış numuneler Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Kaynatılmış numuneler

4.1.5. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: RSM deneyleri

Çelik boru ve dövme braketlerden oluşan numuneleri kaynatmak için, dört faktöryelli, merkezi kompozit yüzey cevap yöntemi kullanılmıştır. Merkezi kompozit deney tasarımları, ikinci dereceden yüzey cevap yöntemlerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılırlar. Proses parametre optimizasyonlarında, ikinci dereceden cevap yüzeyleri, kullanılacak metodların başında gelir [76].

Mekanik özellikleri ana malzemeye yakın optimum sürtünme kaynaklı numuneler elde etmek amacıyla, sürtünme basıncı (P_1), yığma basıncı (P_2), sürtünme süresi (t_1) ve yığma süresi (t_2), friksiyon kaynağı proses girdi parametreleri (faktörler) olarak seçilirken, çekme dayanımı, % uzama ve petal testi çatlak uzunluğu proses çıktısı olarak belirlenmiştir. Yüzey cevap yöntemini uygulamak için, otuz adet deney belirlenmiştir. Deneylerin faktöryel kısmı, bütün parametreleri içeren iki seviyeli tam faktöryelli deney tasarımından oluşmaktayken, deney matrisine altı adet merkezi deney noktası ve sekiz adet de yıldız nokta eklenmiştir. Kurulan deney matrisi, Tablo 4.4'te görülen deney koşullarına göre yapılmıştır.

Tablo 4.4. Deney matrisi ve sonuçlar

		A									
Deney No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Faktör 1	X ₁	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Faktör 2	X ₂	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Faktör 3	X ₃	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
Faktör 4	X ₄	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
Proses Çıktısı	Petal çatlak	29	38	33	26	27	110	40	*	36	37
	Çekme dayanımı	611,5	607,7	583,0	589,1	605,4	591,0	596,0	593,7	610,5	625,2
	Uzama (%)	11,2	11,5	7,1	11,0	9,7	8,8	*	8,7	9,4	10,9
		B									
Deney No		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Faktör 1	X ₁	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0	0
Faktör 2	X ₂	1	1	-1	-1	1	1	0	0	-1	1
Faktör 3	X ₃	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	0
Faktör 4	X ₄	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Proses Çıktısı	Petal çatlak	26	34	18	100	23	90	30	*	14	23
	Çekme dayanımı	611,0	631,7	603,7	612,0	616,0	643,0	618,8	625,6	*	642,9
	Uzama (%)	*	13,6	10,1	9,1	10,0	13,8	7,5	9,7	14,7	14,6
		C									
Deney No		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Faktör 1	X ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Faktör 2	X ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Faktör 3	X ₃	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Faktör 4	X ₄	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
Proses Çıktısı	Petal çatlak uzunluğu	24	16	21	19	24	15	13	16	29	25
	Çekme dayanımı	624,5	618,5	596,3	*	*	626,0	626,0	626,0	626,0	630,5
	Uzama (%)	14,3	13,4	8,6	*	12,3	11,9	11,9	11,9	11,9	11,7

Tablo 4.4'te görülen her bir deney şartında kaynatılan numunelere çekme testi, petal testi, mikro-sertlik analizleri, mikroyapı analizleri, gerekli görülen numuneler için daha detaylı inceleme yapabilmek için, SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, optimizasyon prosesinde % uzamalar proses çıktılarında biri olarak kullanılmıştır. Yine literatürden farklı olarak, petal çatlak uzunluğu, çekme deneyini tamamlayıcı bir metod olarak ilk defa sürtünme kaynağı optimizasyon prosesinde kullanılmıştır. Yine literatürden farklı olarak, optimizasyon prosesinde, ana malzemeye en yakın mekanik özelliklerde kaynaklı numune elde etmek olarak hedeflenmiştir. Literatürde görüldüğü üzere, yapılan optimizasyon çalışmaları, ana malzemenin mekanik özellikleri gözönüne alındığında, optimum sürtünme kaynağı numunesi elde etmek için yetersiz kalmaktadır [43-45, 47-51, 54].

4.1.6. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: petal testi sonuçları

Tablo 4.4'te bulunan deney koşullarına uygun olarak hazırlanan kaynaklı numunelerden ilk set numuneye petal testi uygulanmıştır. Petal test numunelerini hazırlamak için Şekil 3.4b'de görülen aparat hazırlanmıştır.



Şekil 4.8. Petal testi uygulanmış deney numuneleri

Yapılan aparat yardımıyla, deney numuneleri üzerinde, kaynak dudağını açacak şekilde 16 adet eşit genişlikte kesik açılmıştır. Dilimlenmiş numuneler, elektrikli

malafa yardımıyla eğilmeye zorlanmıştır (Şekil 3.4d). Petal testi uygulanmış deney numunelerinin tamamı Şekil 4.8’de görülmektedir.

Petal testi yapılmış olan numuneler, görsel olarak incelenip, petaller üzerindeki çatlak bölgeleri tespit edilmiş ve kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Numuneler üzerinde oluşan petal çatlak uzunluğu sonuçları Tablo 4.4’te gösterilmiştir. Optimum bir numunede, çatlak boyunun tek bir petal boyundan küçük olması beklenir. Tablo 4.4’teki sonuçlar incelendiğinde petal çatlak uzunluklarının, farklı deney koşullarında 14 mm ile 110 mm arasında değiştiği görülmektedir. Bütün çatlaklar, dövme braket tarafında gerçekleşmiştir.

4.1.7. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: çekme testi sonuçları

Tablo 4.4’te görülen deney koşulları altında üretilen ikinci set numunenin tamamına çekme testleri uygulanmıştır. Bütün deneylerde ekstensometre kullanıldığı için, çekme dayanımlarının yanı sıra % uzamalar da ölçülmüş, sonuçlar Tablo 4.4’te gösterilmiştir. Çekme testi sonrası numuneler görsel olarak incelenmiş, kopmanın nereden gerçekleştiği belirlenmiştir. Bütün numunelerde kopma, dövme tarafında gerçekleşmiştir. Beklenildiği üzere, hiç bir numunede kopma kaynak çizgisi üzerinde olmamıştır. Kaynak çizgisinden gerçekleşecek olan kopma, “iyi kaynak” özelliği taşımayan numuneye işaret etmektedir.

Bütün kaynak numunelerinin hazırlanması esnasında, dönen parça dövme braket olarak seçilmiş iken, sabit parça da boru olarak seçilmiştir. Literatürde, tane incelmesinden dolayı, dönen parçadaki ITAB uzunluğunun aksenel yönde, dönmeyen parçaya nazaran daha fazla olduğu söylenmektedir. Bu da, eğer her iki parçanın dayanımları birbirine eşdeğer ise, dönen parçanın olduğu kaynak tarafında daha uzun ITAB bölgesi ve daha yüksek mikro-sertlik değerlerine sebep olur [43, 49]. Bu yüzden, Tablo 4.4’e göre imal edilen numunelerin çekme testlerinin hepsinde, kopma dönen taraf olan dövme brakette gerçekleşmiştir. ASTM E8’e göre Şekil 3.5’de görülen boyutlarda hazırlanan sürtünme kaynağı çekme testi numuneleri Şekil 4.9’de görülmektedir.



Şekil 4.9. Çekme testi numuneleri

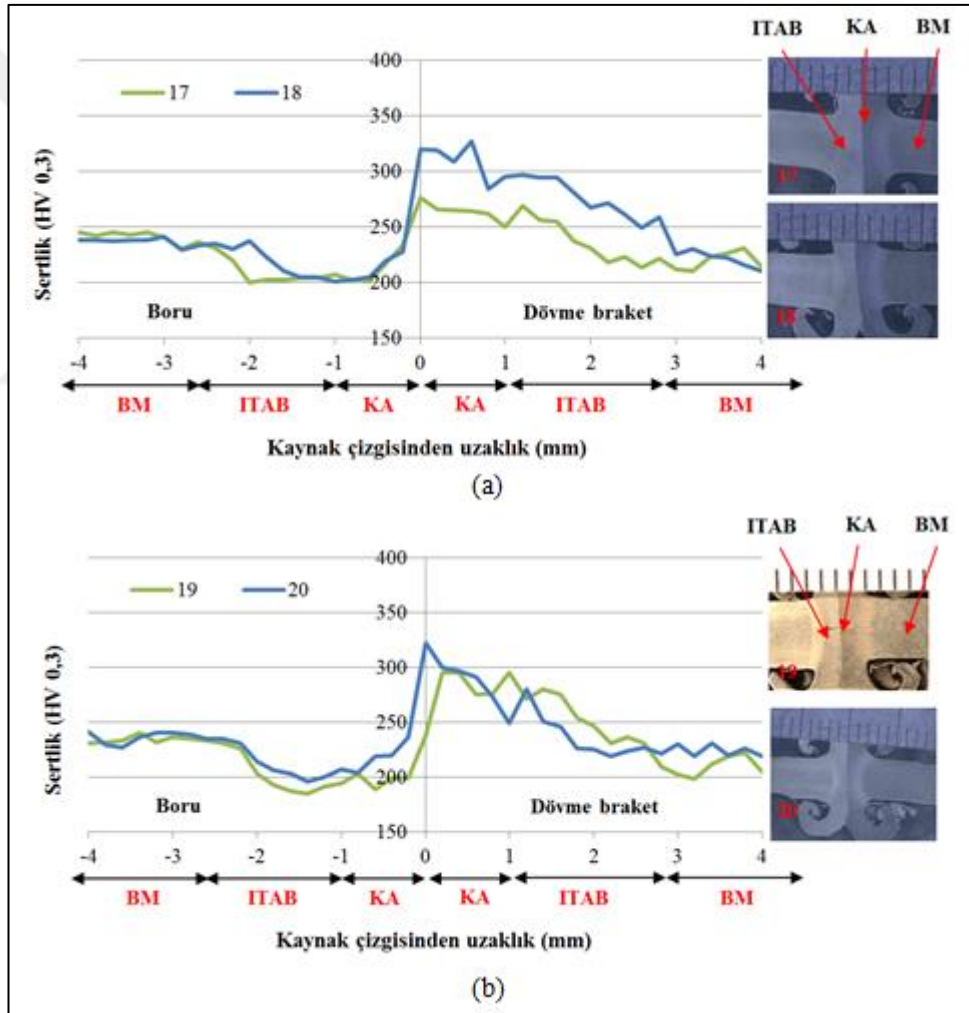
4.1.8. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: mikro-sertlik analizi sonuçları

Şekil 4.10'da, her bir kaynak proses parametresinin alt ve üst sınırlarında, yani yıldız noktalarında hazırlanan deney numunelerindeki mikro-sertlik analizleri yer almaktadır. Bu deney numuneleri, Tablo 4.4'te bulunan deneylerden 17-24 nolu deneylerdir. 17-24 nolu deneylerde bulunan her bir numunede, kaynak parametrelerinden bir tanesi sınır değerinde tutulup, diğer parametreler ortalama değerde tutulmuştur.

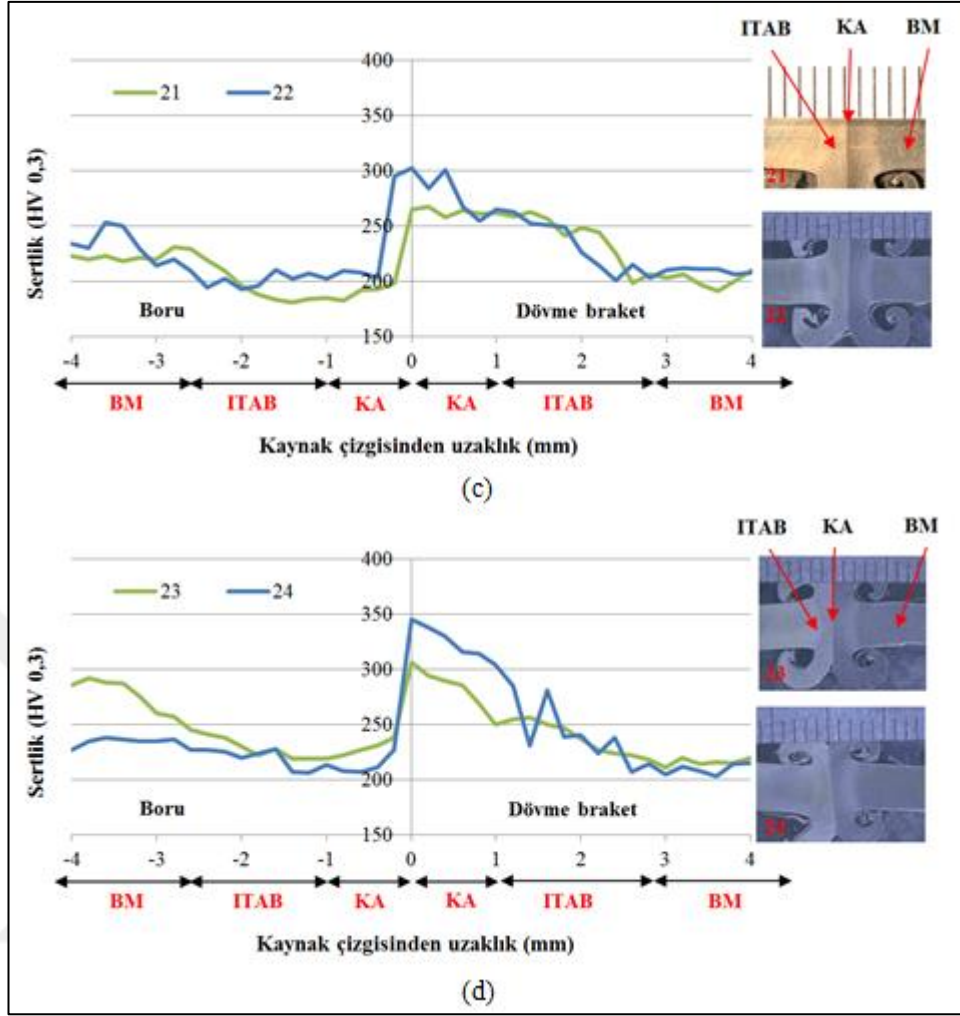
Şekil 4.10a, sürtünme basıncının minimum ve maksimum değeri aldığı durumda, kaynak bölgesindeki mikro-sertlik analizini gösterirken, Şekil 4.10b'de, yığma basıncının minimum ve maksimum değerlerini aldığı anda oluşan mikro-sertlik analizini göstermektedir. Şekil 4.10a'da görüldüğü üzere, diğer kaynak parametreleri ortalama değerlerinde sabit tutulurken, mikro-sertlik değerleri yükselen sürtünme basıncıyla beraber hafifçe yükselmektedir. Bu yükselmenin sebebi, sürtünme basıncının artmasıyla, kaynak arayüzünde ısı oluşumunun artmasıdır. Şekil 4.10b'de görüldüğü üzere, yükselen yığma basıncıyla beraber, kaynak arayüzünde bulunan

kaba tanelerin, kaynak arayüzünden kaynak dudığına doğru itilmesini takiben, kaynak arayüzünde ince taneli yapının kalmasından ötürü, mikro-sertlik değerleri hafifçe artmaktadır. Bu esnada, diğer kaynak parametreleri ortalama değerlerinde sabit tutulmuşlardır.

Şekil 4.10c'te, sürtünme basıncı ve yığıma basıncı ortalama değerlerinde sabit tutulurken, maksimum ve minimum sürtünme zamanının mikro-sertlik sonuçlarına etkisi görülmektedir. Buna göre, sürtünme süresinin maksimum ve minimum olduğu deney koşullarında mikro-sertlikler arasında fark vardır. Sürtünme süresi arttıkça, artan ısı girdisiyle birlikte, kaynak arayüzündeki mikro-sertlik değerleri artmaktadır.



Şekil 4.10. Farklı kaynak parametrelerinde mikro-sertlik dağılımları a) minimum (17) ve maksimum (18) sürtünme basıncı b) minimum (19) ve maksimum (20) yığıma basıncı



Şekil 4.10. (Devam) Farklı kaynak parametrelerinde mikro-sertlik dağılımları a) minimum (17) ve maksimum (18) sürtünme basıncı b) minimum (19) ve maksimum (20) yağma basıncı c) minimum (21) ve maksimum (22) sürtünme süresi d) minimum (23) ve maksimum (24) yağma süresi

Şekil 4.10d'de, yağma süresinin maksimum olduğu deney koşulunda (24 nolu deney numunesi), kaynak arayüzündeki mikro-sertlik değerleri artmaktadır. Çünkü, yağma süresi arttıkça, plastik deformasyon artarak, daha büyük kaynak dudakları oluşacaktır, kaynak arayüzünde daha az plastik şekil değiştirmiş malzeme geride kalacaktır ve bunun yerine kaynak arayüzü ve ITAB'da daha küçük taneli mikroyapı varolacaktır. Bu oluşum, literatürdeki çalışmalarla da desteklenmektedir [54].

Mikro-sertlik grafikleri incelendiğinde, kaynak arayüzünde, ana malzeme sertlik değerleriyle karşılaştırıldığında, ana malzemeye göre % 40'luk bir sertlik artışı görülürken, ITAB bölgesinde bu oran yaklaşık % 20 olmaktadır. Bu çalışmada bütün

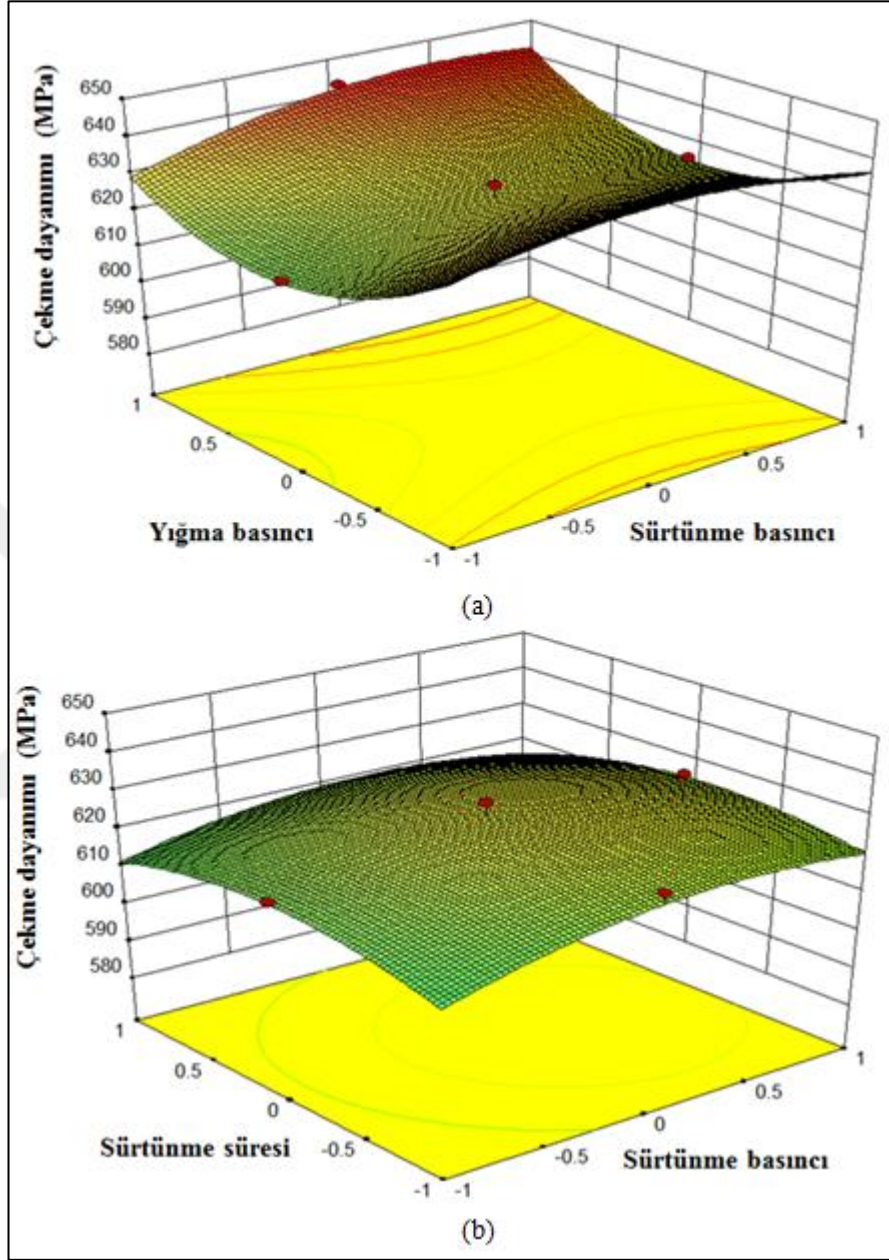
deneylerde dönen parça dövme braketidir, sabit parça borudur. Dönen parçadaki mikro-sertlik değerleri, sabit parçadan daha yüksek değerler almaktadır. Buna ek olarak, mikro-sertlik değerlerinin yüksek olduğu bölgenin uzunluğu, dönen parça tarafında daha fazla olmaktadır (Şekil 4.10a-d). Bu oluşum, literatürdeki çalışmalarla da desteklenmektedir [51].

4.1.9. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: RSM sonuçları

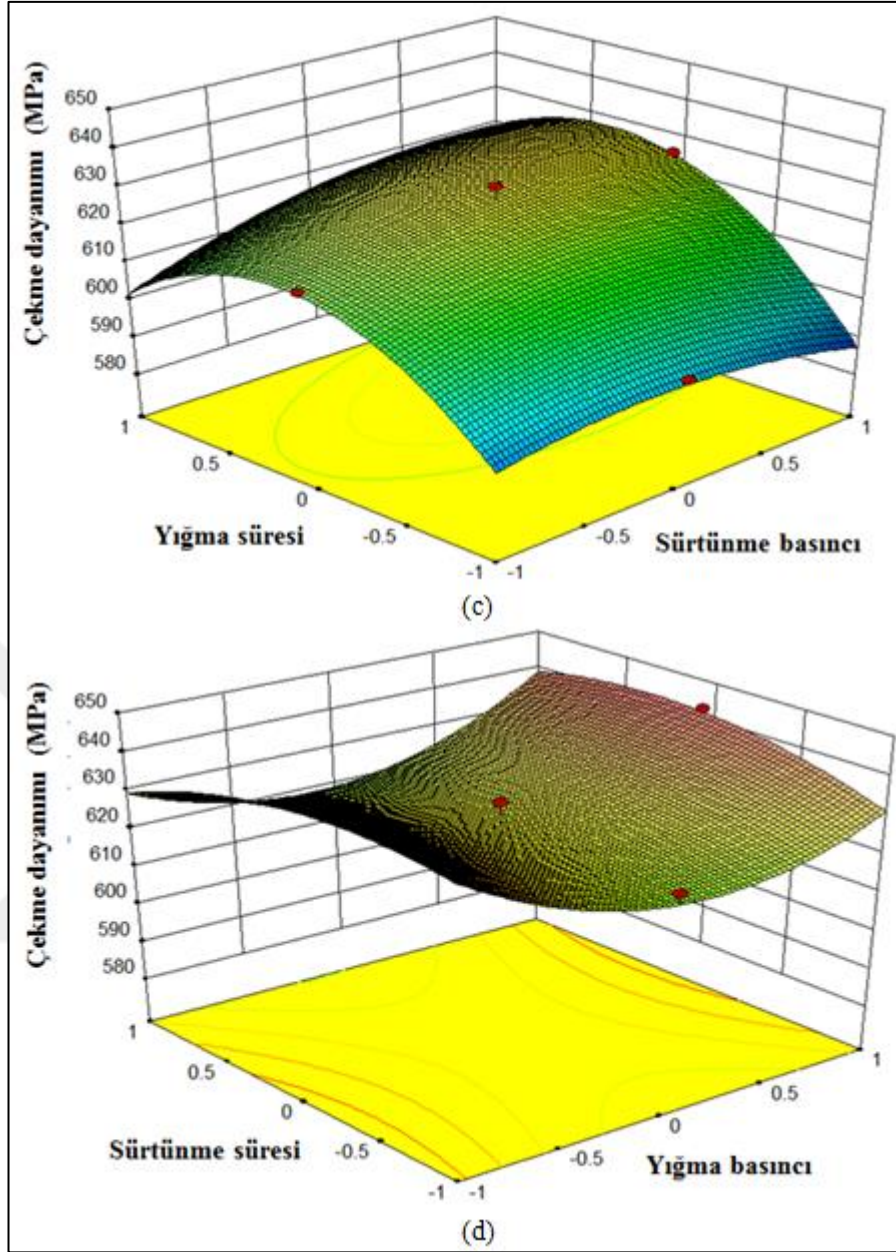
Çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluklarının, kaynak girdi parametreleri etkisindeki değişimlerini gösteren yüzey cevap ve kontür grafikleri Şekil 4.11-4.13 arasında görülmektedir. Şekil 4.11a'da, sürtünme süresi ve yığma süresi ortalama değerlerde sabit iken, yığma basıncı ve sürtünme basıncındaki değişimin çekme dayanımı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Yığma basıncı maksimumken, çekme dayanımı yükselen sürtünme basıncıyla birlikte 618 MPa'dan 644 MPa'a artmaktadır. Sürtünme basıncı sabit iken, çekme dayanımı yükselen yığma basıncı ile birlikte, 633 MPa'dan 644 MPa'a artmaktadır. Maksimum çekme dayanımı değeri, maksimum sürtünme basıncı ve yığma basıncı koşullarında gerçekleşmektedir ve 644 MPa'dır. Bu değer, ana malzemenin çekme dayanımı olan 620 MPa'dan yüksektir. Bu durumda, kaynak arayüzünde ısı girdisi sebebiyle tane küçülmesi meydana gelerek, çekme dayanımını yükseltmektedir [50]. Sürtünme basıncı yükseldikçe, ITAB bölgesi boyunca oluşan ısı girdisi, daha geniş bir alana etki etmeye başlar, bu da daha yüksek mikro-sertlik değerlerinin ölçülmesine ve ITAB boyunca, daha yüksek çekme dayanımı değerlerine ulaşılmasına sebep olmaktadır. Yığma basıncı yükseldikçe, kaynak arayüzünde bulunan kaba taneli yapı, kaynak dudaklarına doğru itirilir ve iki parça arasında yakın temas oluşur. Sürtünme basıncı ve yığma basıncının ortalama değerlerinde, Şekil 4.11a'nın en düşük çekme dayanım bölgesine ulaşılmış olur (672 MPa). Yüksek sürtünme basıncı uygulandığı zaman, numunede oluşan daha fazla ısı girdisi, daha fazla malzemenin yumuşamasına, bu da, daha yüksek çekme dayanımı değerlerine ulaşılmasına sebep olmaktadır.

Şekil 4.11b, yığma basıncı ve yığma süresi ortalama değerlerde iken, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı arasındaki etkileşimin çekme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Sürtünme süresinin optimum olduğu öyle bir bölge vardır ki, burada bu grafikteki maksimum çekme dayanımı olan 628 MPa değerine ulaşılmaktadır. Bu

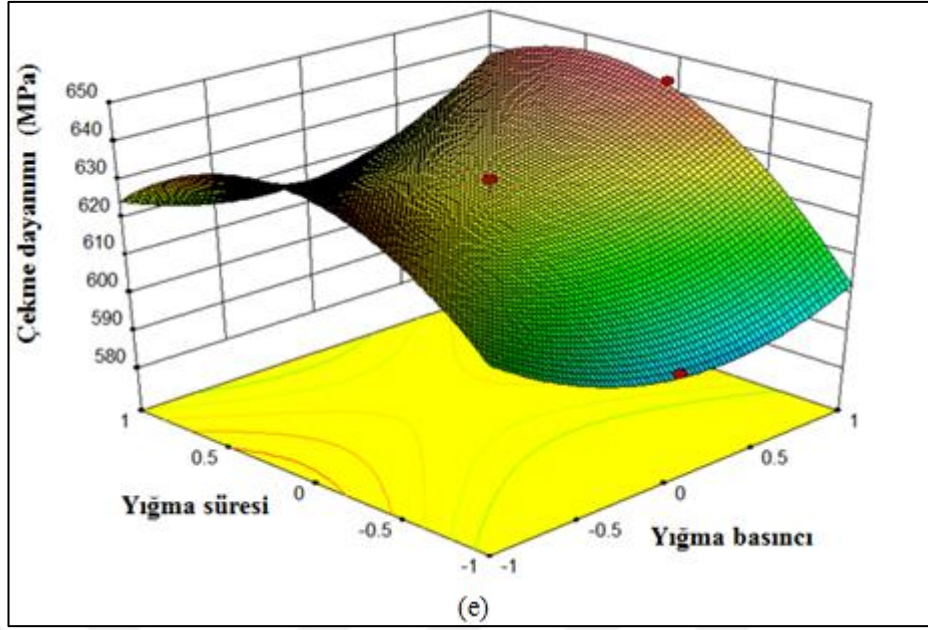
optimum deney koşulu da, kaynak arayüzünde mekanik ve termal oluşumların sağlandığı sürtünme zamanına karşılık gelmektedir [50].



Şekil 4.11. Çekme dayanımı için RSM ve kontür grafikleri a) yığma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığma basıncı



Şekil 4.11. (Devam) Çekme dayanımı için RSM ve kontür grafikleri a) yığıma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığıma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığıma basıncı



Şekil 4.11. (Devam) Çekme dayanımı için RSM ve kontür grafikleri a) yığma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığma basıncı

Şekil 4.11b'deki optimum sürtünme süresi, diğer kaynak parametreleri ortalama değerde olmak kaydıyla, deney sınırları içinde, ortalama sürtünme sürelerine ve yığma sürelerine tekabül etmektedir. Bu grafikte karşılaşılan maksimum çekme dayanımı, ana malzemenin çekme dayanımından daha yüksek bir değerde olsa bile, deney boyunca bu değerden daha yüksek çekme dayanımı değerlerine rastlanmıştır. Sürtünme süresinin maksimum ve sürtünme basıncının minimum olduğu durumda, çekme dayanımı hafifçe azalmaktadır. Çünkü, arayüzde oluşan ısı girdisi, boru eksenini boyunca daha uzak bölgelere transfer olamamakta, bununla beraber ITAB bölgesindeki mikro-sertlik değerleri de düşmektedir. Sürtünme süresi, uygun bir ısı girdisi yaratmaya yetecek kadar uzun olmaz ise, güçlü bir kaynak bağı oluşturmaya yetecek zaman olmayacaktır, böyle bir durumda minimum çekme dayanımı değerlerine ulaşılmaktadır (611 MPa). Sürtünme kaynağı, genel olarak, proses sürelerinin kısalığından ve küçük ITAB bölgesinden ötürü, soğuk şekil verme prosesi olarak tanımlanmaktadır. Sürtünme süresi ve sürtünme basıncının maksimum olduğu durumda, kaynaklı parçanın çekme dayanımı ana malzemenin çekme dayanımından düşük çıkmaktadır. Bu esnada ısı girdisi artmakta ve yavaş soğuma hızlarından ötürü, kaba tanelere rastlanmaktadır. Bu oluşum, prosesin soğuk şekil verme prosesi yerine,

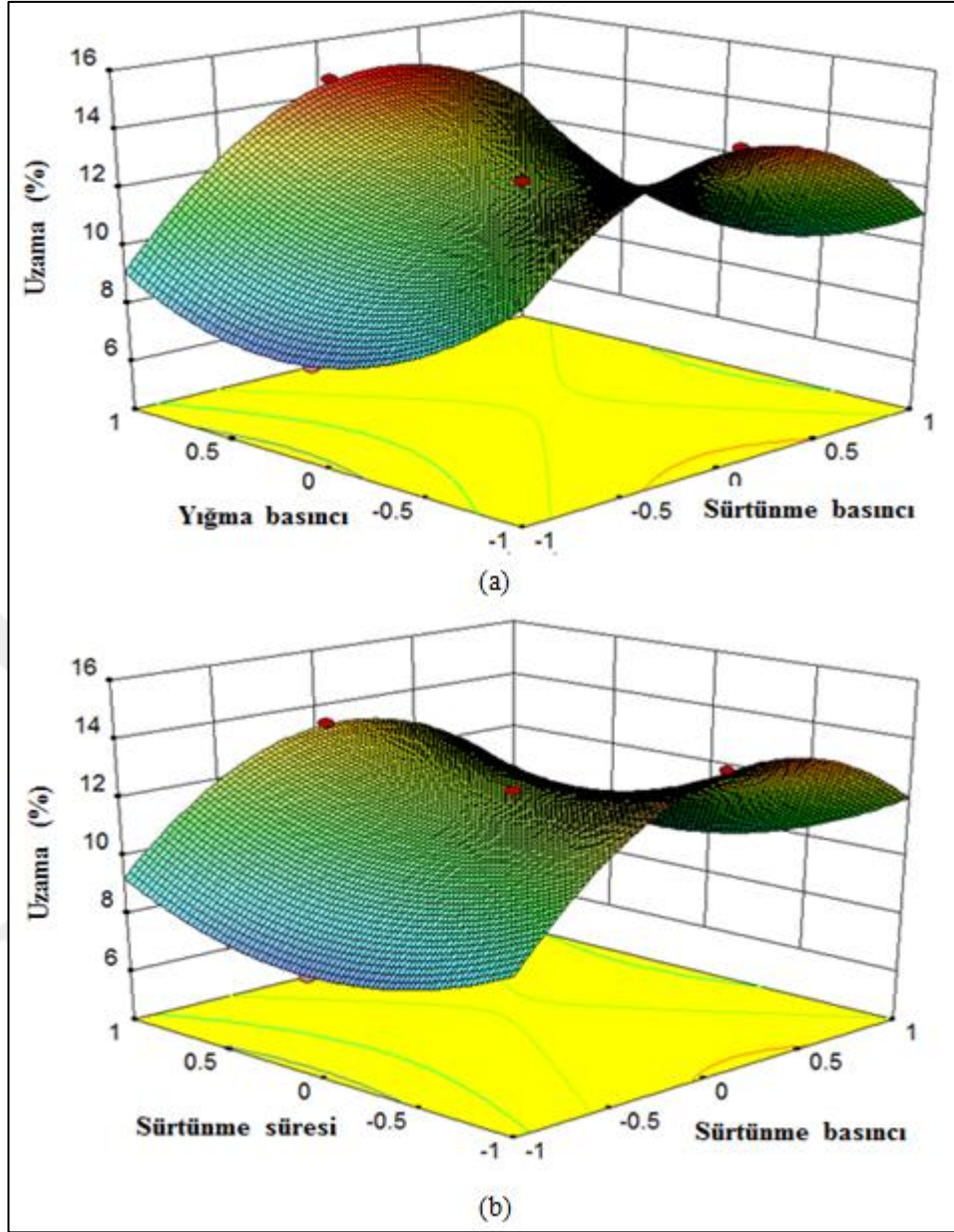
sıcak şekil verme prosesi olarak adlandırılmasına sebep olur, ki bu durum da uygun bir sürtünme kaynağı prosesinde istenilen bir durum değildir.

Şekil 4.11c'de, yığma süresi ve sürtünme basıncının çekme dayanımına etkileri görülmektedir. Maksimum sürtünme basıncı ve minimum yığma süresinde, ana malzemeden daha küçük bir çekme dayanımı değerine ulaşılmaktadır (587 MPa). Yığma süresi, ITAB ve kaynak arayüzündeki büyük taneleri kaynak dudacağına doğru itmeye yetecek uzunlukta olmaz ise, geride kaba taneli bir yapı kalır. Dahası, yetersiz yığma süresi ve yığma basıncı kaynak dudaklarının da küçük olmasına sebep olur, kırmızı renge ulaşmış yumuşamış metal, kaynak dudaklarına doğru itilemez ve kaynak arayüzünde kalır, bu da daha düşük çekme dayanımı ve mikro-sertlik değerlerine sebep olur. Bu durum Şekil 4.10d'deki mikro-sertlik grafiğinde de görülmektedir. Buna ek olarak, meydana gelen plastik deformasyon, kaynak esnasında yeteri kadar ısı girdisi oluşsa bile, sağlam bir kaynak bağı oluşturmak için, birbirine temas eden yüzeylerdeki malzemenin dışarı doğru süpürülmesine kafi gelmeyecektir.

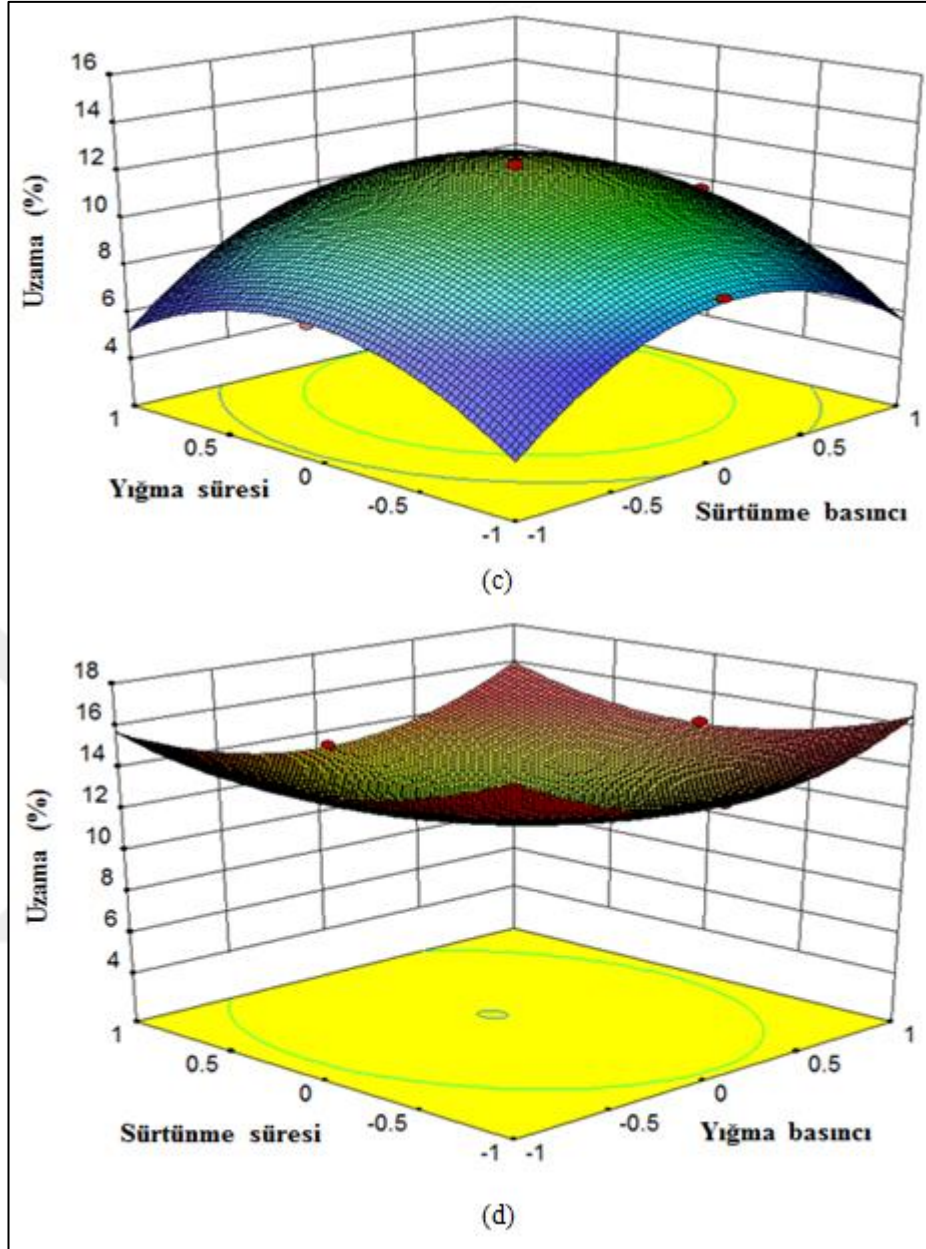
Çekme dayanımının sürtünme süresi ve yığma basıncının etkileri altındaki davranışını gösteren yüzey cevap ve kontür grafiği Şekil 4.11d'de görülmektedir. Yığma basıncı yüksek ve sürtünme süresi de ortadan yükseğe doğru değerlerde gezinirken, en yüksek çekme dayanımı olan 643 MPa değerine ulaşılmaktadır. Yığma basıncının yüksek olduğu durumlarda, eğer sürtünme süresi yeterli değil ise, uygun ısı girdisi oluşmayacak, dolayısıyla, kaynak dudaklarını oluşturabilecek plastik deformasyon oluşumuna ve parçaların birbirine çok yakın temasla kuvvetli kaynak bağı oluşumuna zemin hazırlanamayacaktır. Literatürdeki çalışmalar da incelendiğinde görülmektedir ki, arttırılmış sürtünme süresi ve yığma basıncı değerleri, uniform kaynak bölgesine sebep olmaktadır [49, 50]. Şekil 4.11e'de, çekme dayanımı 594 MPa ile 646 MPa arasındaki değerlerde değişmektedir. Yığma süresi optimum bir değerde iken, yığma basıncı da yeterince yüksek olursa, maksimum çekme dayanımı 646 MPa'a kadar yükselmektedir ki bu da yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen en yüksek çekme dayanım değeridir.

Şekil 4.12, sürtünme kaynağı parametreleri ile % uzama değerleri arasındaki ilişkileri göstermektedir. % uzama, yüksek sürtünme basıncıyla beraber artan ısı girdisi

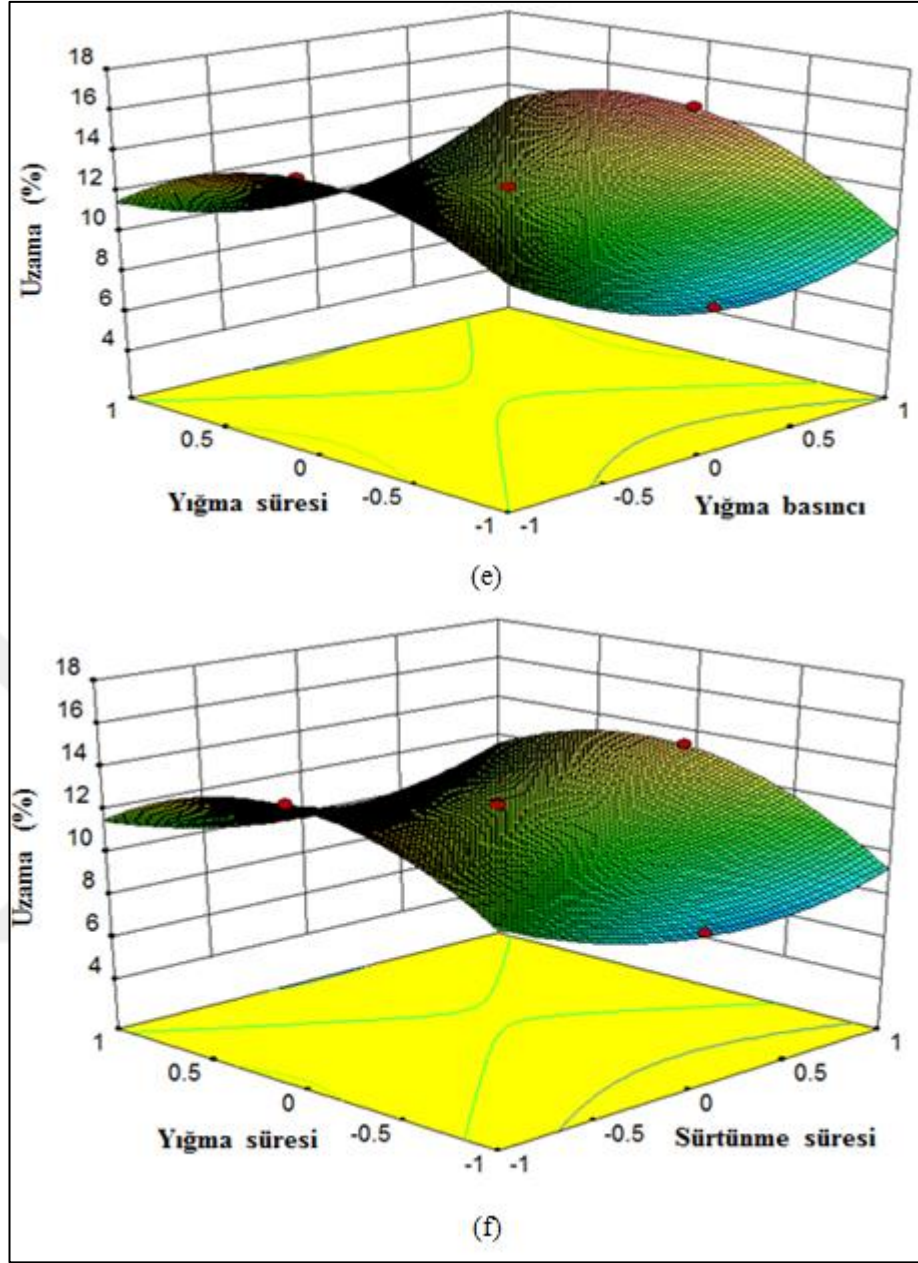
sebebiyle artmaktadır. Ancak, sürtünme basıncı için öyle optimum bir değer vardır ki, bu değerden sonra, % uzamalar artan ısı girdisiyle beraber düşmektedir. Bu oluşum Şekil 4.12a-b'de gösterilmiştir. Şekil 4.12d'de rastlanan yüksek uzama değerleri, sürtünme süresi ve yığılma basıncı yüksek değerlerdeyken meydana gelmektedir, bu da direk olarak ısı girdisi ve bu sebeple kaynak bölgesinde oluşan ince taneli mikroyapıdan kaynaklanır. % uzama, sünekliğin bir ölçüsüdür ve malzemenin yapısındaki tanelerin oryantasyonuna da bağlıdır. Isı tesiri altında olmayan ana malzemelerle yapılan çekme testlerinde, taneler çekme eksenine paralel eksene doğru yönelmektedir. Oysa sürtünme kaynağı esnasında, ana malzemedeki tanelerin oryantasyonu değişir. Yığılma basıncı uygulamasıyla birlikte oluşan plastik deformasyon esnasında, taneler kaynak dudağına doğru ilerlerken, yükleme eksenine dik bir pozisyon alırlar. Eğer, dik pozisyona gelmiş olan tanelere yeteri kadar plastik deformasyon uygulanmaz ise, kaynak arayüzünde adetçe fazla kaynak yükleme eksenine dik pozisyonda taneler mikroyapıda kalırlar. Yükleme eksenine dik pozisyondaki taneler de, kaynaklı parçada, ana malzemeyle karşılaştırıldığında daha düşük süneklik değerlerine sebep olmaktadır. Bu oluşum, literatürde de tanımlanmıştır [52]. Bütün deneylerde gözlemlenen en düşük % uzama değeri olan % 4 uzama değeri Şekil 4.12c'de görülmektedir ki bu değer de ana malzemenin % uzaması olan %14 değerinin çok altındadır. Bu değer minimum yığılma süresi ve minimum sürtünme basıncı uygulaması esnasında oluşmaktadır.



Şekil 4.12. % uzama için RSM ve kontür grafikleri a) yığma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığma basıncı e) yığma süresi ve yığma basıncı f) yığma süresi ve sürtünme süresi



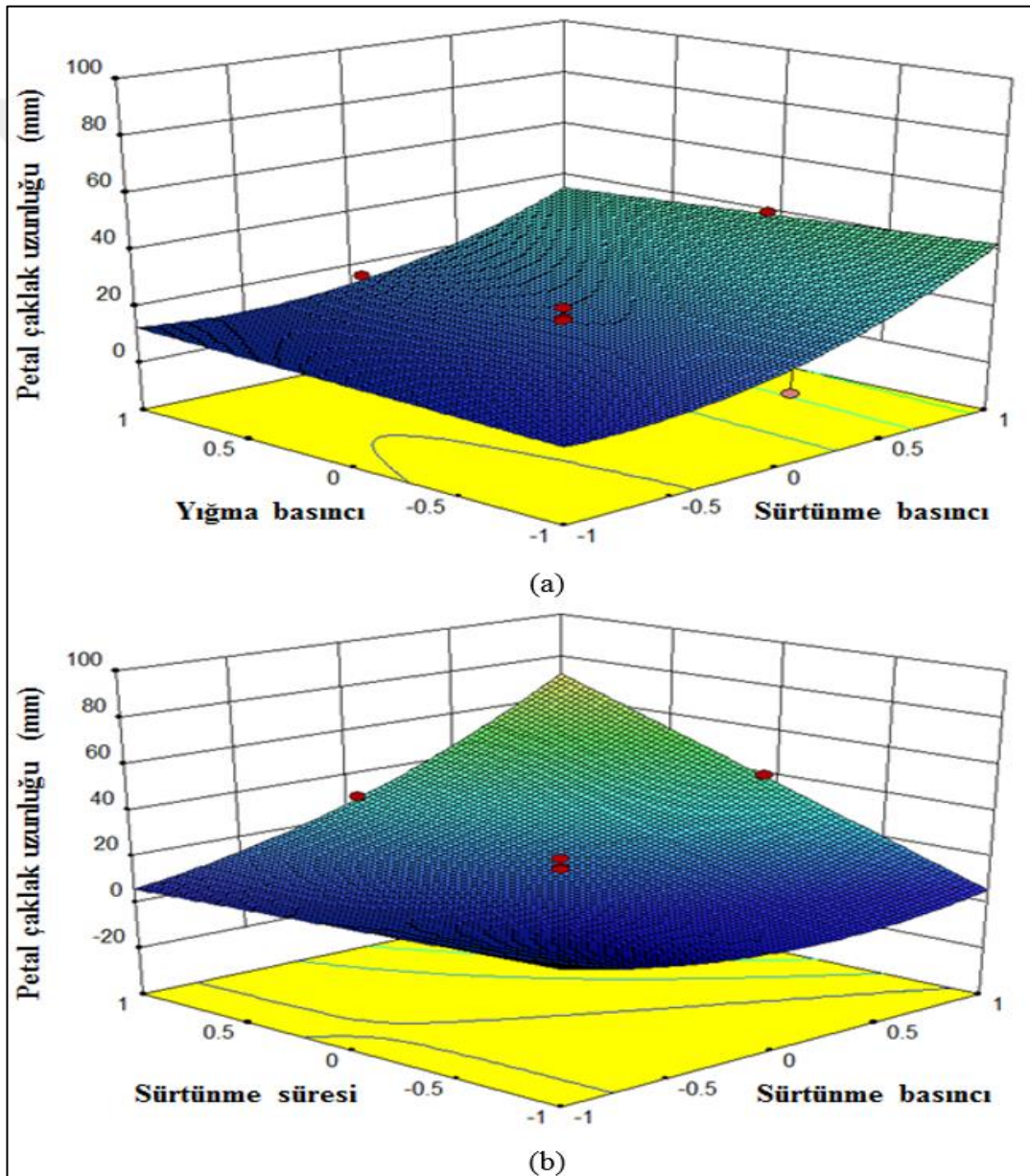
Şekil 4.12.(Devam) % uzama için RSM ve kontür grafikleri a) yığma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yığma basıncı e) yığma süresi ve yığma basıncı f) yığma süresi ve sürtünme süresi



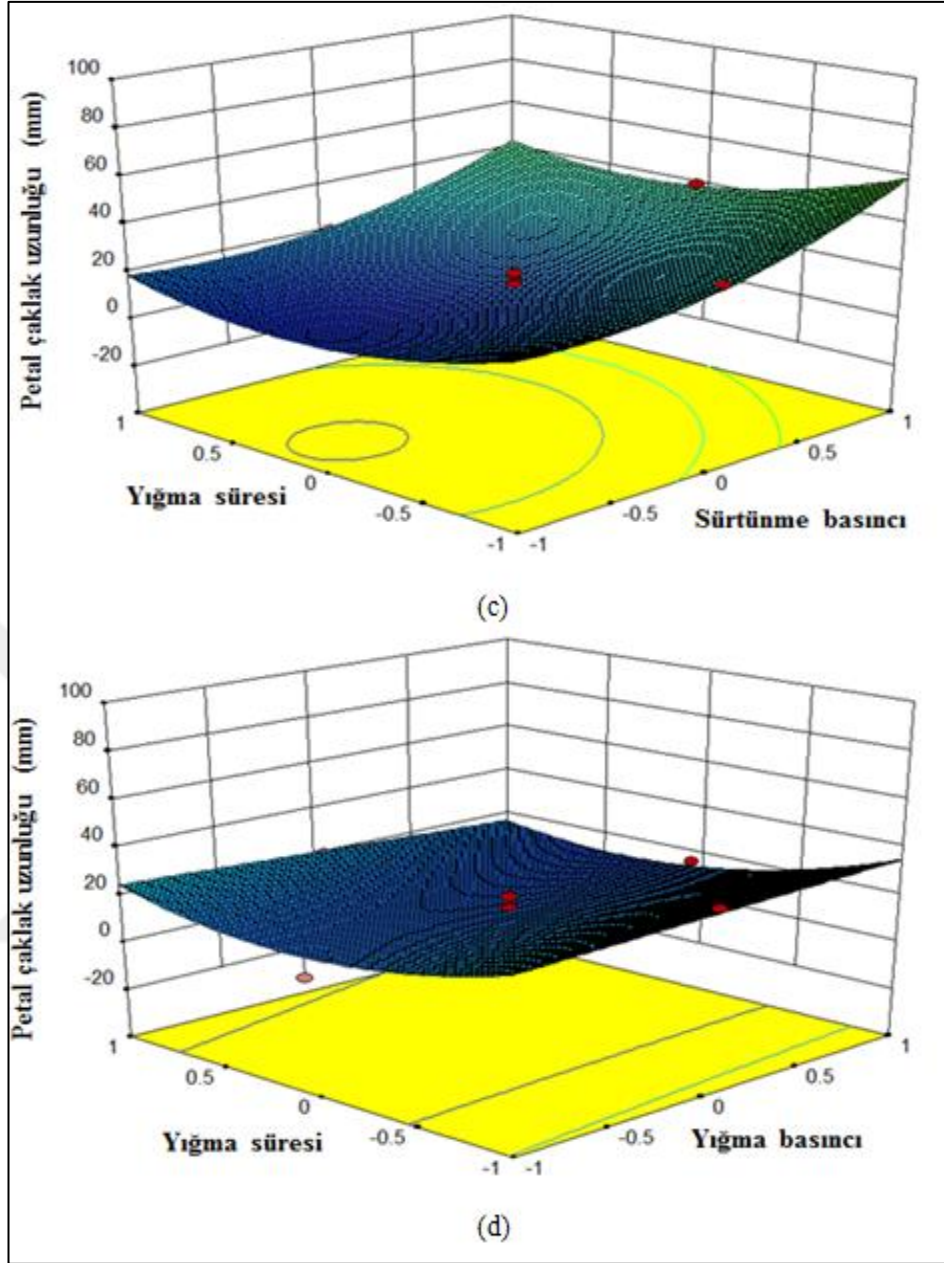
Şekil 4.12. (Devam) % zama için RSM ve kontür grafikleri a) yıgma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yıgma süresi ve sürtünme basıncı d) sürtünme süresi ve yıgma basıncı e) yıgma süresi ve yıgma basıncı f) yıgma süresi ve sürtünme süresi

Sürtünme kaynağı parametrelerinin, petal çatlak uzunluğuna etkileri Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Petal çatlak uzunluğu 14-110 mm arasında değerlerde değişmektedir. En küçük petal çatlağı Şekil 4.13a ve 4.13d'de görüldüğü üzere, diğer parametreler ortalama değerde sabit tutulmaktayken, yüksek yıgma basıncı ve yüksek yıgma süresi uygulanan deneylerde oluşmaktadır. Şekil 4.13a ve 4.13c'de, sürtünme basıncı minimum değerde iken minimum petal çatlağı oluşmaktadır. Şekil 4.13a ve 4.13d'de

görüldüğü üzere, yığma basıncının petal çatlak uzunluğu üzerinde majör bir etkisi yoktur. Petal çatlak uzunluğuna etki eden en büyük etkileşim, Şekil 4.13b'de görüldüğü üzere, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi arasında gerçekleşmektedir. Sürtünme süresi ve sürtünme basıncı yüksek değerlerdeyken, arayüzdeki mikrosertlik değerleri de artar ve daha uzun petal çatlağına sebep olurlar. Bu olay Şekil 4.13b ve Şekil 4.14'te açıkça görülmektedir. Sürtünme süresi ve basıncı en yüksek değerde iken, kaynak prosesinde oluşan ısı girdisi, malzemenin eğilme direncini belirgin bir şekilde azaltacak kadar çok olmaktadır.



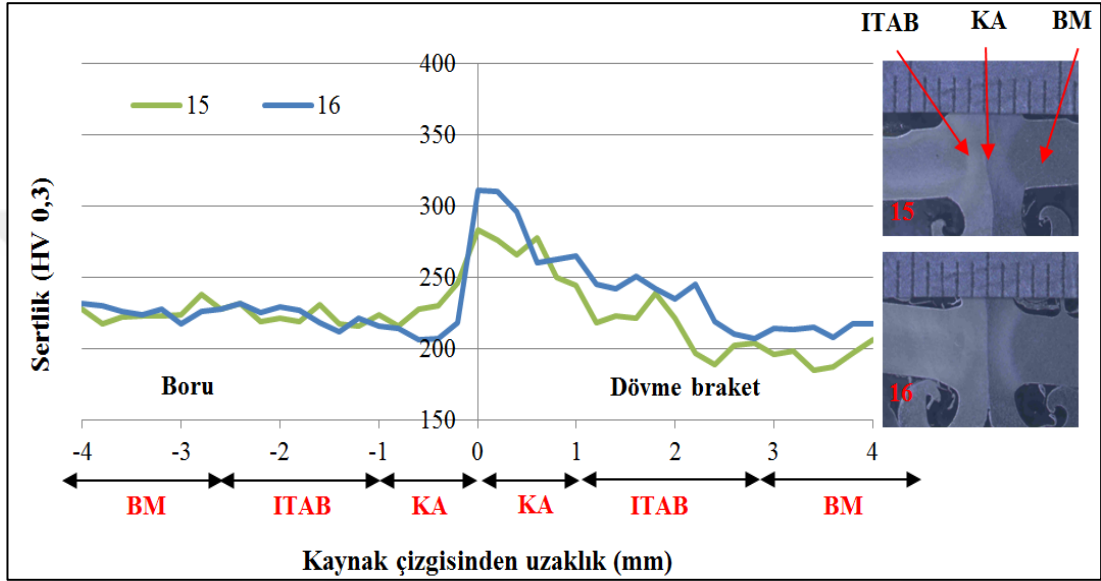
Şekil 4.13. Petal çatlak uzunluğu için RSM ve kontür grafikleri a) yığma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığma süresi ve sürtünme basıncı d) yığma süresi ve yığma basıncı



Şekil 4.13. (Devam) Petal çatlak uzunluğu için RSM ve kontür grafikleri a) yığma basıncı ve sürtünme basıncı b) sürtünme süresi ve sürtünme basıncı c) yığma süresi ve sürtünme basıncı d) yığma süresi ve yığma basıncı

Şekil 4.14'teki 16 numaralı deney numunesinin kaynak makro resimlerinden de görüldüğü üzere, daha fazla ısı girdisi ve daha fazla plastik deformasyon, daha büyük kaynak dudaklarına sebep olmaktadır. 16 numaralı deney numunesinde, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı maksimum değerdedir, ki bu da büyük dudak oluşumu ve yüksek ısı girdisi ve plastik deformasyona sebep olur. 15 nolu kaynak numunesinde ise, sürtünme süresi maksimum olsa bile, sürtünme basıncı minimumdur, bu da

kaynak prosesinde ısı girdisinin ve takip eden plastik deformasyon miktarının azalmasına ve dolayısıyla daha küçük kaynak dudağı oluşumuna sebep olmaktadır. Isı girdisi arttıkça, malzemenin eğilme direnci de düşecek, kaynaklı parça daha kırılgan hale gelecektir. Malzemede oluşan kırılganlık artışı ile beraber oluşan uzun petal çatlağı ve kaynak arayüzünde yüksek mikro-sertlik değerleri, Şekil 4.13b ve 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Sürtünme basıncının mikro-sertlik değerlerine etkisi (15: minimum sürtünme basıncı, maksimum sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi, 16: maksimum sürtünme basıncı, maksimum sürtünme süresi, yığma basıncı ve yığma süresi)

4.1.10. Sürtünme kaynağı optimizasyonu: ANOVA sonuçları

ANOVA metoduna göre, etkin olmayan parametrelerin geriye doğru elemesi yapıldıktan sonra, kaynak proses parametrelerinin çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluğu sonuçlarına göre istatistiksel anlamlılığı/etkinliği Tablo 4.5-4.7 arasında gösterilmiştir. P değeri 0,05'ten küçük ise, regresyon modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu söylenebilir. Bunu tersi olarak da P değerinin 0,05'ten büyük olduğu durumlarda, ilgili kaynak parametrelerinin, çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluğuna anlamlı etki yapan parametreler olmadığı görülür. Tablo 4.5-4.7 arasında görülen ANOVA tablolarında bulunan temel faktörler, ikinci dereceden terimler ve etkileşim terimleri, P değerleri 0,05'ten küçük olan terimlerden oluşmaktadır.

Tablo 4.5. Çekme dayanımı için ANOVA tablosu (geriye doğru eleme yapılmış durum)

Kaynak	SS	DF	MS	F değeri	P değeri	
Model	6583,49	13	506,42	86,33	<0,0001	Etkin
X ₁	221,2	1	221,2	37,71	<0,0001	
X ₂	0,39	1	0,39	0,066	0,8011	
X ₃	12,43	1	12,43	2,12	0,1692	
X ₄	1928,53	1	1928,53	328,75	<0,0001	
X ₁ X ₂	136,31	1	136,31	23,24	0,0003	
X ₁ X ₃	22,66	1	22,66	3,86	0,0711	
X ₁ X ₄	452,63	1	452,63	77,16	<0,0001	
X ₂ X ₃	367,68	1	367,68	62,68	<0,0001	
X ₂ X ₄	678,08	1	678,08	115,59	<0,0001	
X ₁ ²	74,84	1	74,84	12,76	0,0034	
X ₂ ²	295,27	1	295,27	50,33	<0,0001	
X ₃ ²	93,81	1	93,81	15,99	0,0015	
X ₄ ²	645,5	1	645,5	110,04	<0,0001	
Artık	76,26	13	5,87			
Uyumsuzluk	60,28	9	6,7	1,68	0,3257	Etkin değil
Gerçek hata	15,98	4	4			
Toplam	6659,75	26				

$R^2=0,9885$ adj $R^2=0,9771$ pred $R^2=0,937$ ve hassasiyet=32,947

Tablo 4.5'te, regresyon modelinde uyumsuzluk görülmemektedir, dolayısıyla, geriye dönük eleme yöntemiyle sadeleştirilen modelin uygun olduğu sonucu çıkarılabilir. ANOVA tablolarında bulunan F değeri, terimlerin birbirlerine göre etkinlik sırasını belirler. Tablo 4.5'teki en yüksek F değeri, deneyde değişken olarak kullanılan kaynak parametrelerinden yığma süresi parametresine aittir (328,75). Daha sonra yığma basıncı-yığma süresi etkileşimi gelmektedir (115,59). Bu durum, yığma süresinin kaynaklı parçanın çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre olduğunu, takip eden etkin parametrenin ise, yığma basıncı-yığma süresi etkileşimi olduğunu göstermektedir. Yüksek yığma basıncı uygulaması, kaynak arayüzündeki kaba tanelerin, kaynak arayüzünde oluşan plastik deformasyonla beraber kaynak dudagina

doğru itilmesini sağlayarak, yüksek çekme dayanımı değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu durumda, kaynak arayüzünde daha az miktarda yumuşamış malzeme geride kalarak, kaynağın tamamlanmasından hemen sonra oluşan hızlı atmosferik soğuma nedeniyle, daha ince taneli mikroyapının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sonuç ta, soğuk deformasyon prosesi olarak adlandırılan sürtünme kaynağında beklenen bir durumdur.

Tablo 4.6. % uzama için ANOVA tablosu (geriye doğru eleme yapılmış durum)

Kaynak	SS	DF	MS	F değerı	P değerı	
Model	117,61	14	8,4	111,76	<0,0001	Etkin
X ₁	12,48	1	12,48	165,99	<0,0001	
X ₂	0,097	1	0,097	1,29	0,2791	
X ₃	2,48	1	2,48	33,01	< 0,0001	
X ₄	5,6	1	5,6	74,45	< 0,0001	
X ₁ X ₂	10,5	1	10,5	139,69	< 0,0001	
X ₁ X ₃	1,6	1	1,6	21,33	0,0006	
X ₁ X ₄	0,57	1	0,57	7,58	0,0175	
X ₂ X ₃	0,58	1	0,58	7,75	0,0165	
X ₂ X ₄	9,33	1	9,33	124,18	< 0,0001	
X ₃ X ₄	2,75	1	2,75	36,58	< 0,0001	
X ₁ ²	28,28	1	28,28	376,28	< 0,0001	
X ₂ ²	15,34	1	15,34	204,06	< 0,0001	
X ₃ ²	7,25	1	7,25	96,43	< 0,0001	
X ₄ ²	12,47	1	12,47	165,87	< 0,0001	
Artık	0,9	12	0,075			
Uyumsuzluk	0,69	7	0,099	2,35	0,1824	Etkin değil
Gerçek hata	0,21	5	0,042			
Toplam	118,51	26				
R ² =0,9924 adj R ² =0,9835 pred R ² =0,9088 ve hassasiyet=37,702						

Benzer yaklaşımlar Tablo 4.6 ve Tablo 4.7 için de yapılabilir. Tablo 4.4, % uzama değerlerinin ANOVA tablosunu göstermekteyken, Tablo 4.7’de petal çatlak uzunluğu değerlerinin ANOVA tablosu grlmemtedir.

Tablo 4.6 değerlendirildiğinde, % uzama sonuçları için en yüksek F değerlerinin sürtünme basıncı (376,28), sürtünme süresi (204,06) ve yığıma süresi (165,87) parametrelerinden oluştuğu görülmektedir.

Tablo 4.7. Petal çatlak uzunluğu için ANOVA tablosu (geriye doğru eleme yapılmış durum)

Kaynak	SS	DF	MS	F değeri	P değeri	
Model	15246,56	10	1524,66	133,96	<0,0001	Etkin
X ₁	3016,9	1	3016,9	265,06	<0,0001	
X ₂	9,13	1	9,13	0,8	0,3837	
X ₃	3137,54	1	3137,54	275,66	<0,0001	
X ₄	552,98	1	552,98	48,58	<0,0001	
X ₁ X ₂	119,45	1	119,45	10,49	0,0051	
X ₁ X ₃	4910,73	1	4910,73	431,45	<0,0001	
X ₁ X ₄	65,81	1	65,81	5,78	0,0287	
X ₂ X ₄	152,21	1	152,21	13,37	0,0021	
X ₁ ²	270,27	1	270,27	23,75	0,0002	
X ₄ ²	378,5	1	378,5	33,25	<0,0001	
Artık	182,11	16	11,38			
Uyumsuzluk	154,78	11	14,07	2,57	0,1534	Etkin değil
Gerçek hata	27,33	5	5,47			
Toplam	15428,67	26				
R ² =0,9882 adj R ² =0,9808 pred R ² =0,9672 ve hassasiyet=36,725						

Petal çatlak uzunluğu sonuçları için Tablo 4.7 incelendiğinde ise, en yüksek F değerlerinin, sürtünme basıncı-sürtünme süresi etkileşimi (431,45), sürtünme süresi (275,66) ve sürtünme basıncı (265,06) parametreleri için oluştuğu görülmektedir. Etkin parametrelerin sürtünme kaynağı mekanizmaları üzerindeki etkileri Şekil 4.10-4.14 açıklamalarında anlatılmıştır.

Tablo 4.5, 4.6 ve 4.7'deki sonuçlardan faydalanılarak çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluğu değerleri için oluşturulan ikinci dereceden yüzey cevap modeli regresyon denklemleri aşağıdadır:

$$\text{Kopma dayanımı (Mpa)}=627,54+3,51P_1-0,15P_2-0,83t_1+10,91t_2+2,92P_1P_2-1,19P_1t_1+5,32P_1t_2+4,79P_2t_1+6,51P_2t_2-5,85P_1^2+14,46P_2^2-6,55t_1^2-21,38t_2^2 \quad (4.2)$$

$$\text{Uzama (\%)} = 12,02+0,94P_1-0,083P_2-0,44t_1+0,71t_2+0,93P_1P_2-0,38P_1t_1+0,23P_1t_2+0,23P_2t_1+0,93P_2t_2+0,47t_1t_2-3,48P_1^2+2,56P_2^2+1,76t_1^2-2,85t_2^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Petal çatlak uzunluğu (mm)} = 14,81+14,26P_1-0,75P_2+14,46t_1-5,86t_2-2,91P_1P_2+18,66P_1t_1-2,16P_1t_2-3,29P_2t_2+10,15P_1^2+12,30t_2^2 \quad (4.4)$$

Elde edilen matematiksel modellerin R^2 değerleri incelendiğinde, çekme dayanımı için % 98,85, % uzama için % 99,24 ve petal çatlak uzunluğu için % 98,82 olduğu görülmektedir. Bu değerler, oluşturulan RSM modellerinin, deney sınırları içerisinde uygulanacak başka verileri tahmin etmekte son derece başarılı olduğunu göstermektedir.

4.1.11. Sürtünme kaynağı optimizasyon: optimizasyon prosesi

“İyi kaynak” özelliğinde kaynaklı numune üretebilmek için, kaynaklı numunenin çekme dayanımı ve % uzama değerlerinin maksimum olup, petal çatlak uzunluğu değerinin de minimum olması gerekir. Çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluğu değerlerinin optimizasyon prosesi için alttaki formülasyon kurulmuştur:

Amaç fonksiyonu:

Maksimize et: kopma dayanımı ve % uzama

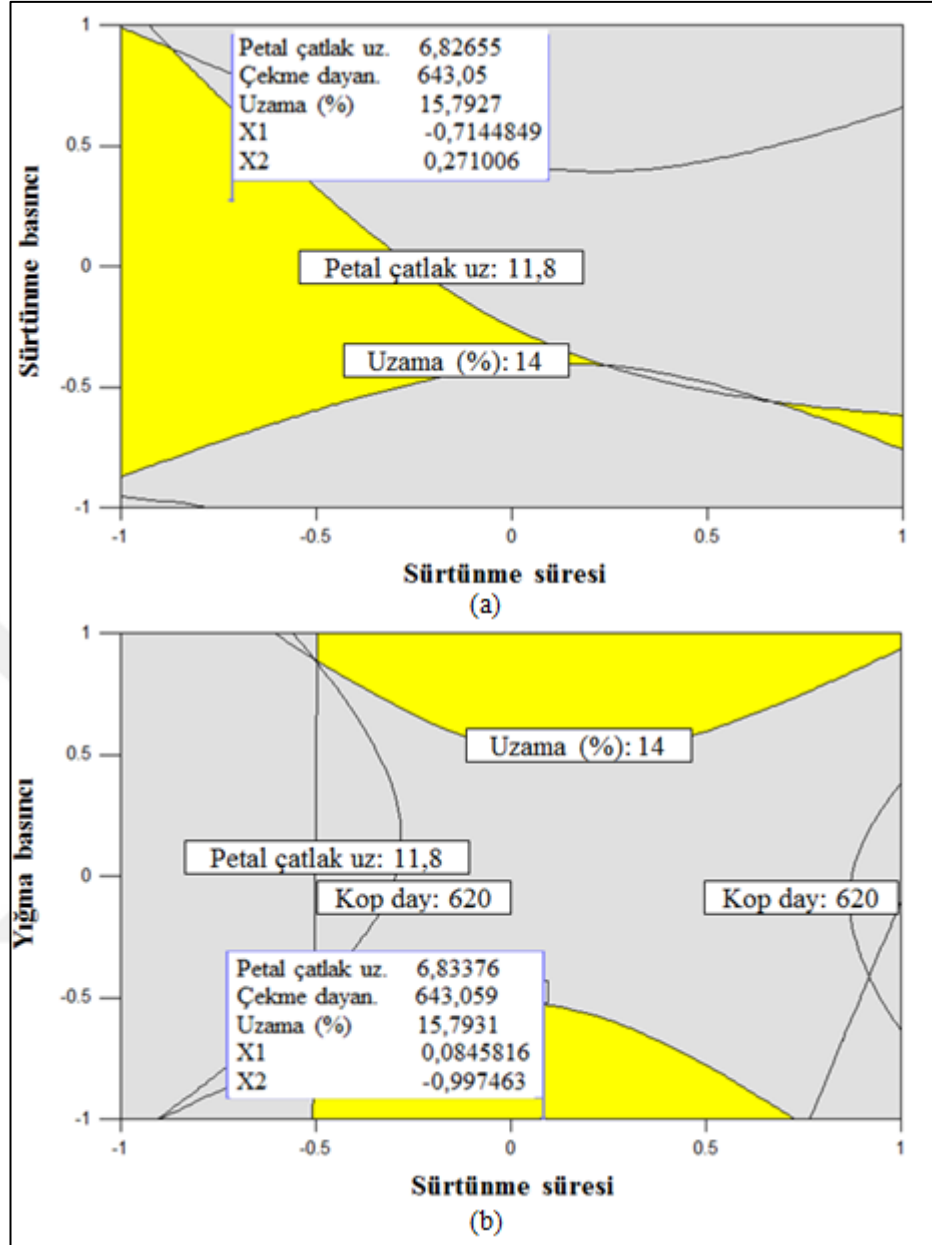
Minimize et: petal çatlak uzunluğu

Sürtünme basıncının sınırları: $12 \leq P_1 \leq 16$

Yığma basıncının sınırları: $30 \leq P_2 \leq 50$

Sürtünme süresinin sınırları: $3 \leq t_1 \leq 5$

Yığma süresinin sınırları: $1,5 \leq t_2 \leq 2,5$



Şekil 4.15. Optimum kaynak koşulları için örtülü kontür grafiği a) sürtünme süresi ve sürtünme basıncına göre optimum bölgeler b) yığma süresi ve yığma basıncına göre optimum bölgeler

Şekil 4. 15’de, optimum kaynak koşulları için örtülü kontür grafikleri görülmektedir. Çoklu optimizasyon kriterleri olarak, çekme dayanımı ve % uzamanın ana malzemeye ait değerlerden daha yüksek olması hedeflenirken (> 602 MPa ve $> \% 14$), petal çatlak uzunluğunun da, tek bir petalin uzunluğu olan 11,8 mm’den daha küçük olması hedeflenmiştir. Sarı bölgeler, çoklu optimizasyon kriterleri ile çakışan, optimum bölgeleri göstermektedir.

4.1.12. Sürtünme kaynağı optimizasyon: istenirlik fonksiyonu

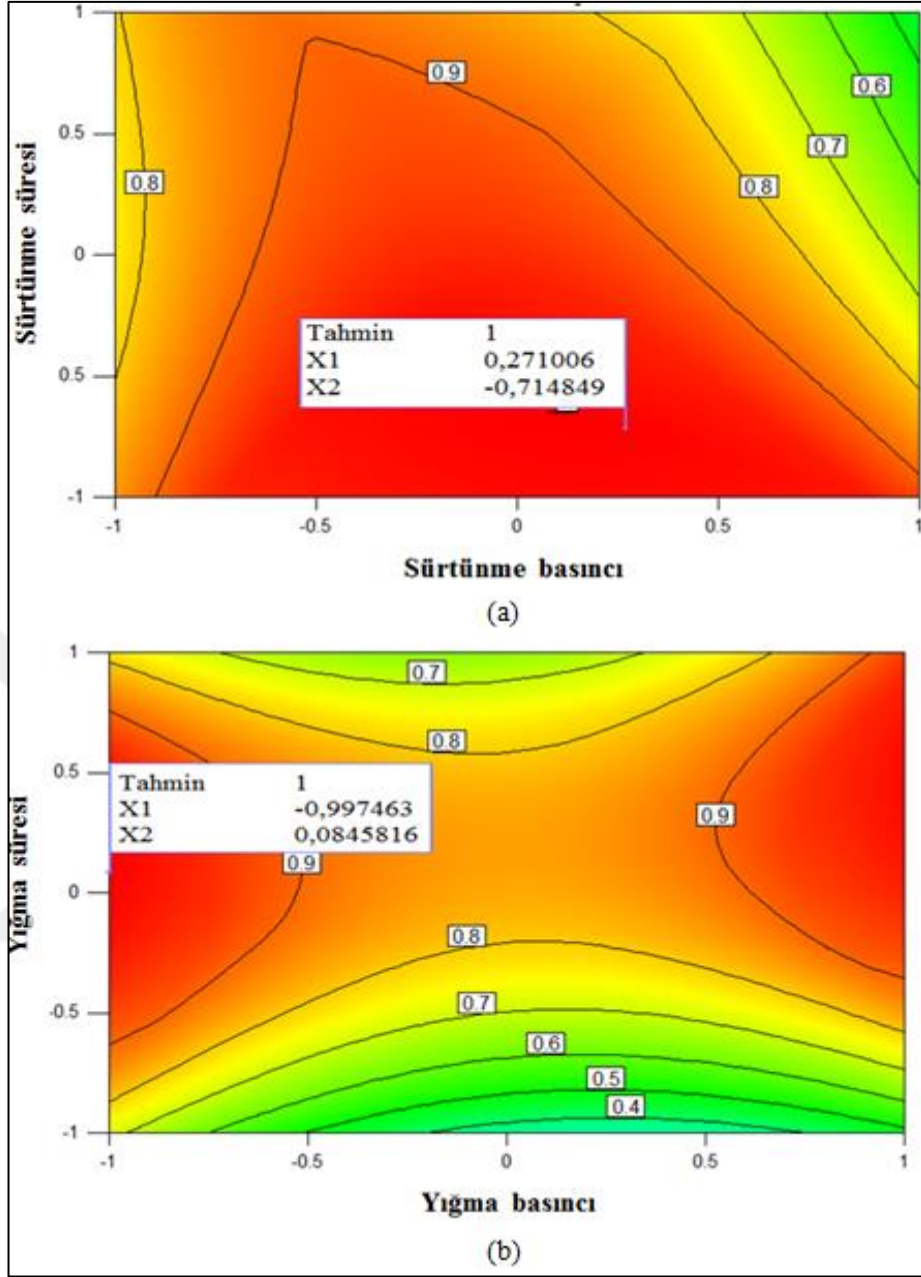
Optimizasyon kriteri ile örtüşen optimum deney koşulları Tablo 4.8’de gösterilmiştir. Optimizasyon hedefleri, deney sınırları içerisinde başarıyla sağlanmış ve Tablo 4.8’de görülen tüm deney koşulları için istenirlik fonksiyonu değeri “1” olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.8. Çekme dayanımının ve % uzamanın maksimum, petal çatlak uzunluğunun minimum olduğu optimum deney koşulları

No	P ₁	P ₂	t ₁	t ₂	Petal çatlak uzunluğu (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1	0,271	-0,997	-0,715	0,085	6,833	643,051	15,792
2	0,110	0,986	-0,421	0,353	6,739	642,999	15,166
3	0,343	0,987	-0,522	0,312	6,403	643,268	15,498
4	0,201	-0,998	-0,754	0,083	5,525	642,980	16,020
5	0,667	0,992	-0,674	0,616	6,210	642,978	15,085
6	-0,003	-0,991	-0,617	0,167	6,539	642,995	15,537
7	0,258	0,972	-0,474	0,363	6,703	643,084	15,294
8	0,232	0,986	-0,471	0,370	6,537	643,385	15,350

İstenirlik grafikleri Şekil 4.16’da görülmektedir. Kırmızı bölgeler istenirlik fonksiyonunun “1” değerini aldığı optimum deney koşullarının geçerli olduğu bölgeleri göstermektedir.

Şekil 4.16’daki bayraklar, Tablo 4.8’deki ilk satırdaki optimum koşulların istenirlik grafiğindeki yerini göstermektedir.



Şekil 4.16. Maksimum çekme dayanımı, maksimum % uzama ve minimum petal çatlağı hedefleri için istenirlik grafiği a) sürtünme basıncı ve sürtünme süresi b) yığma basıncı ve yığma süresi koşullarında

4.1.13. Sürtünme kaynağı optimizasyon: doğrulama testi

Optimum kaynak parametreleri RSM ve istenirlik fonksiyonu yöntemlerinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Optimum bölgeler ve örnek değerler Şekil 4.15 ve Tablo 4.8’de gösterilmektedir. Optimum kaynak parametrelerini doğrulamak için, gerçek deney numunesi ile elde edilmiş değerlerle karşılaştırmak amacıyla,

doğrulama deneyi yapmak gerekir. Bu amaçla, Tablo 4.8'in ilk satırında görülen ve matematiksel modelden gelen optimum deney koşulları ile aynı koşullarda gerçek numuneler imal edilmiştir. İmal edilen bu numuneler çekme testleri, petal testleri, mikro-sertlik ve mikroyapı analizleri için kullanılmıştır.

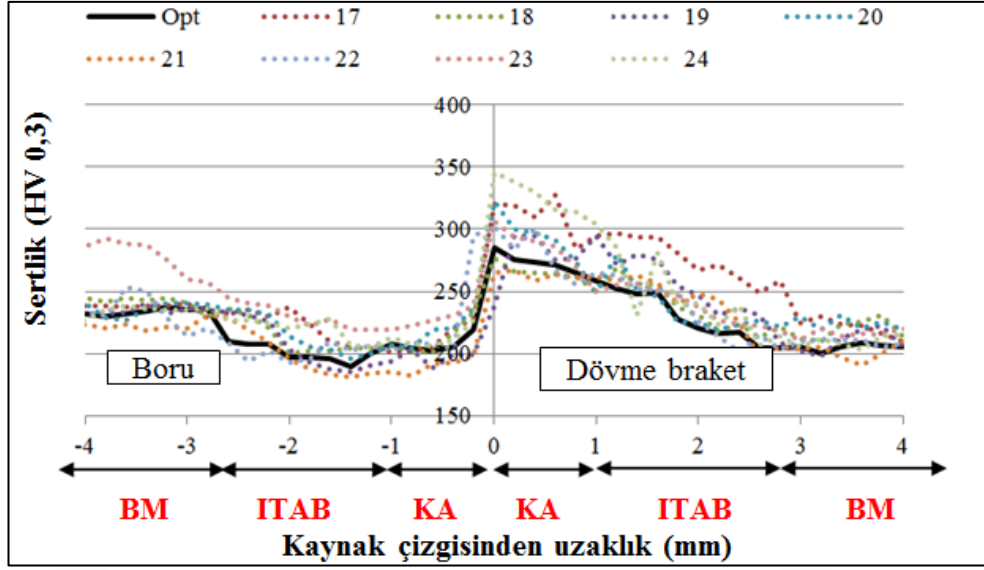
Çekme testi ve petal testi sonucunda gerçek numune ile elde edilen değerler ile RSM modelinden gelen değerler Tablo 4.9'da karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunlukları için hata miktarı sırasıyla % 1,06, % 13,37 ve % 2,44 olduğu görülmektedir.

Bu değerlere bakılarak, önerilen matematiksel modelin, orta karbonlu dövme/boru tipi sürtünme kaynaklı bağlantılarda, deney sınırları dahilinde, çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluğu hesaplamak için kullanılmasının uygun olduğu söylenebilir. Bu sonuçla beraber, literatürde ilk defa, ana malzemeye yakın çoklu optimizasyon şartları sağlanmış olur.

Tablo 4.9. Maksimum çekme dayanımı, maksimum % uzama ve minimum petal çatlak için model ve doğrulama deneyi karşılaştırması (kodlanmış ve kodlanmamış değerler ile gösterim)

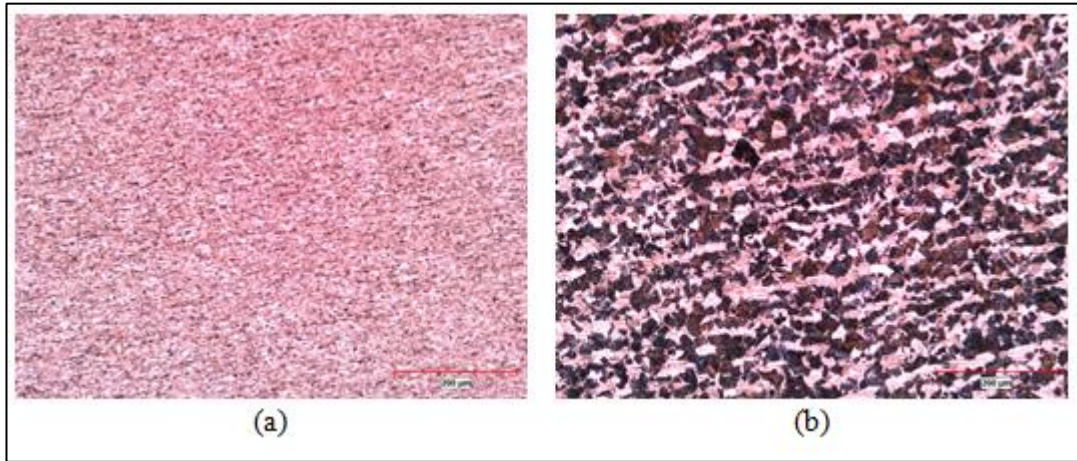
Kaynak	Kodlanma durumu	P ₁	P ₂	t ₁	t ₂	Petal çatlak uzunluğu (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
RSM	Kodlanmış	0,271	-0,997	-0,715	0,085	6,8	643,0	15,8
Deneysel	Kodlanmamış	14,543	30,03	3,285	2,0425	7,0	636,2	13,7

Optimum numunenin mikro-sertlik sonuçlarının diğer deney numuneleri ile karşılaştırması Şekil 4.17'de görülmektedir. Optimum numunenin mikro-sertlik eğrisi kesintisiz çizgi şeklinde gösterilirken, diğer deney koşullarında oluşan mikro-sertlik değerleri noktalı çizgi ile gösterilmiştir. Şekil 4.17'de görüldüğü üzere, optimum numunenin maksimum mikro-sertlik değerleri, diğer birçok numuneden daha düşüktür.



Şekil 4.17. Optimum numune ve diğer deney numunelerinin kaynak ekseninde boyunca mikro-sertlik değerleri

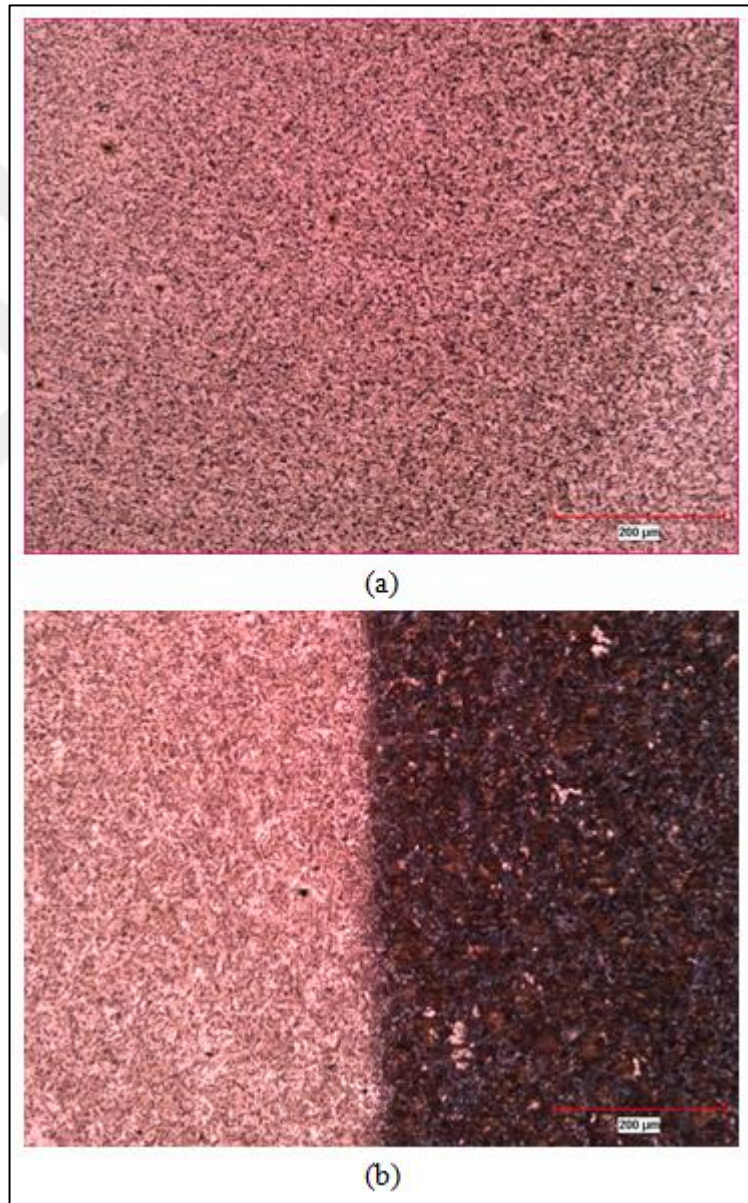
Optimum kaynaklı numunenin mikroyapı analizleri Şekil 4.18 ve 4.19'da görülmektedir. Şekil 4.18'de, ana malzemelerin mikroyapısı görülmektedir. Dövme ana malzemesinin mikro-sertlik değeri 240 HV civarında ölçüldüğü için, mikro yapının perlit egemen olduğu söylenebilir.



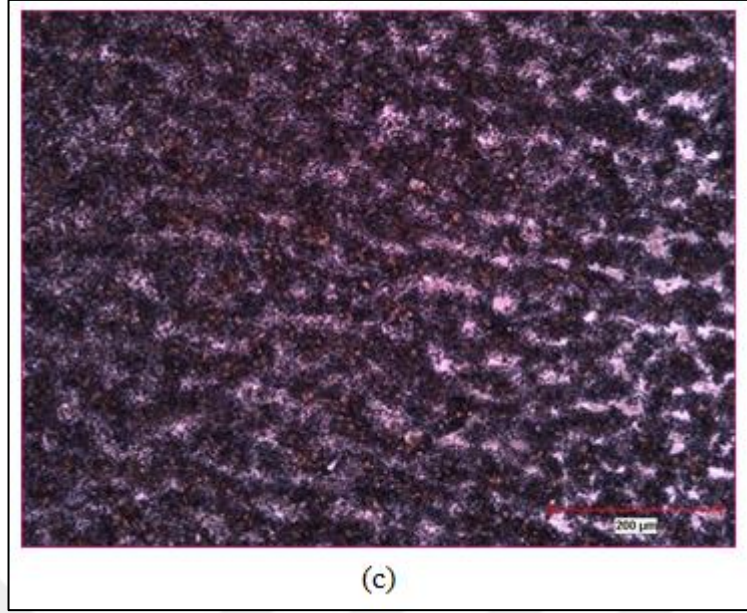
Şekil 4.18. Ana malzemelerin mikroyapıları a) boru b) dövme braket

Şekil 4.19'da optimum numunenin kaynak arayüzü ve ITAB bölgesindeki mikroyapı resimleri görülmektedir. Şekil 4.19b'de, kaynak çizgisindeki tane yapısı ve boru ile dövme braket arasındaki yumuşak geçiş bölgesi gösterilmektedir. Kaynak çizgisi keskin bir çizgi halinde değildir; sonuç olarak iki malzemenin uniform kaynak bağı oluşturduğu görülmektedir. Kaynak çizgisinin dövme braket tarafında, bir miktar

tane büyümesi gözlemlenmektedir. Dövme brakette kaynak çizgisinden ana malzemeye doğru gidildikçe, tane boyutlarının küçüldüğü görülmektedir. Dövme braketin Şekil 4.19c'de görülen ITAB bölgesinde, perlitte küreselleşme görülmektedir. Şekil 4.19b'da görülen kaynak çizgisinin boru tarafında ise, kaynak çizgisine yakın bölgede beynit mikroyapı oluşumu gözlemlenmektedir, bu oluşum da Şekil 4.17'de boru tarafında görülen daha yüksek mikro-sertlik değerlerini desteklemektedir.

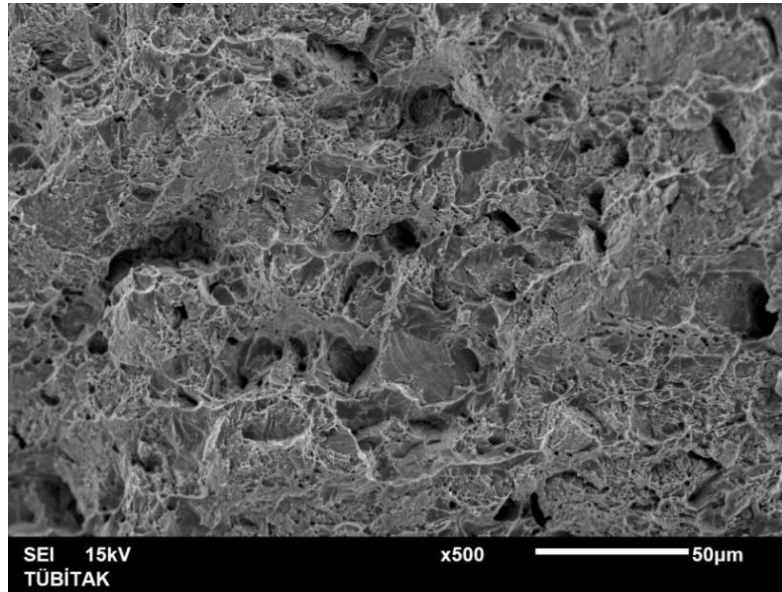


Şekil 4.19. Optimum kaynaklı numunenin mikroyapı resimleri a) boru tarafı ITAB bölgesi b) kaynak arayüzü c) dövme braket tarafı ITAB bölgesi



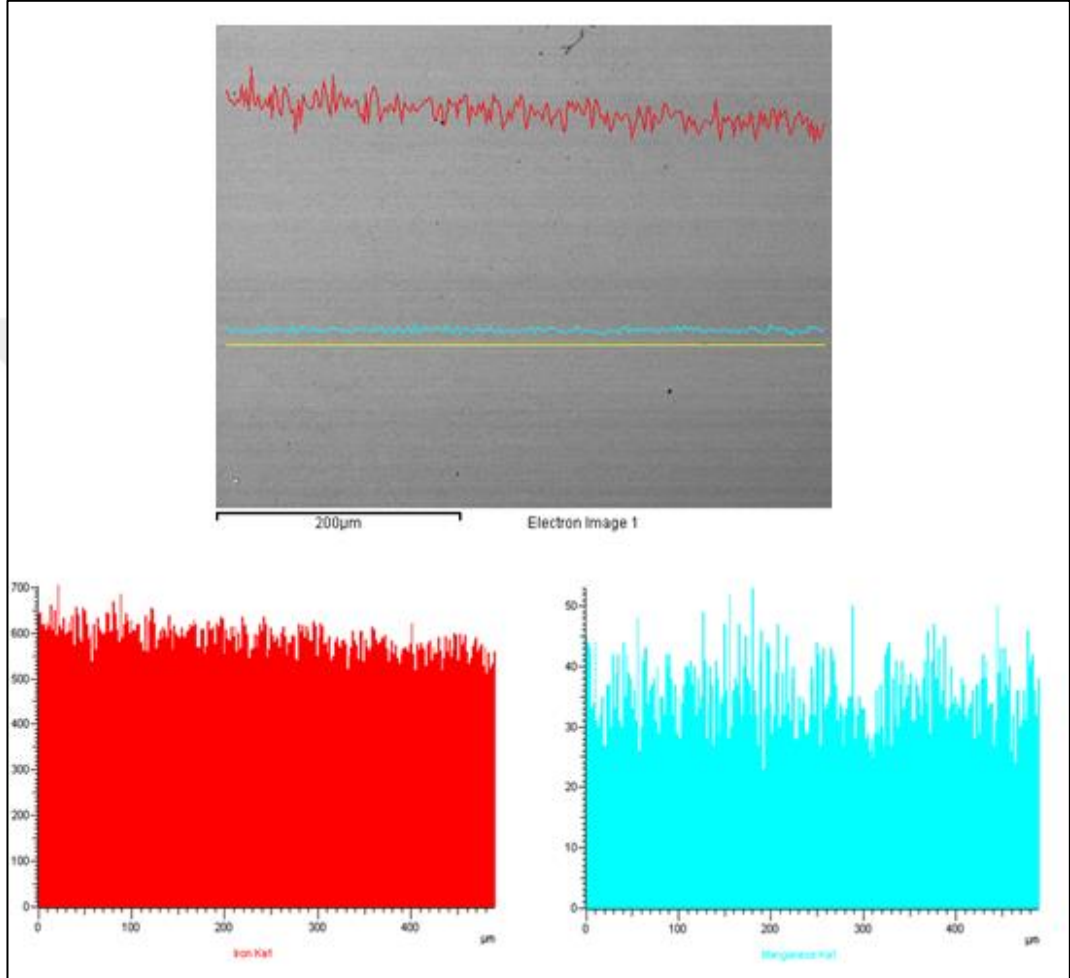
Şekil 4.19. (Devam) Optimum kaynaklı numunenin mikroyapı resimleri a) boru tarafı ITAB bölgesi b) kaynak arayüzü c) dövme braket tarafı ITAB bölgesi

Optimum numunelere çekme testi uygulandıktan sonra, kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. İlgili mikro resim Şekil 4.20’de görülmektedir. Şekil 4.20’deki mikro resimde majör oranda birçok mikro boşluk ve küresel çukurlar bulunmakta, bal köpüğü benzeri bir oluşum gözlemlenmektedir. Minör oranda gevrek kırılma bölgeleri görülse bile, kırılmanın sünek kırılma şeklinde gerçekleştiği söylenebilir.



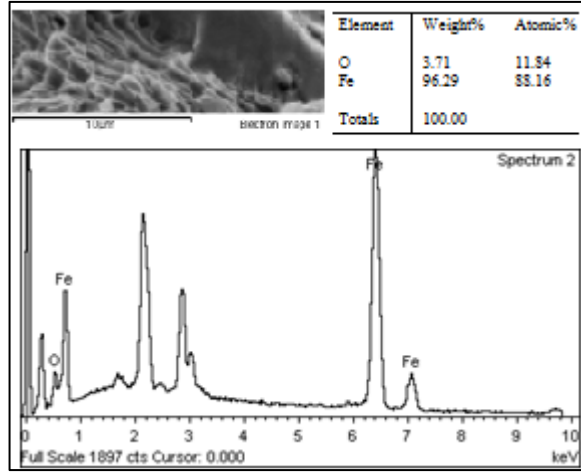
Şekil 4.20. Optimum numunenin kırılma yüzeyinin SEM ile çekilmiş mikroresmi

Şekil 4.21’de, optimum numunenin kaynak arayüzünde yapılan EDX analizi sonuçları görülmektedir. Kaynaklı numunede kullanılan ana malzemelerin ağırlıkça element %’si benzer malzemelerden seçildiği için, beklendiği üzere, hissedilir bir difüzyon gözlenmemektedir.



Şekil 4.21. Optimum numunenin kaynak arayüzü EDX analizi

Şekil 4.22’de, kırılma yüzeylerinin EDX spektrumu görülmektedir. Örnekleme yüzeyinde, % 96,29 oranında Fe görülmektedir ki bu değer de, Şekil 4.20’de görülen SEM mikroresmindeki sünek kırılmayı desteklemektedir. Kırılma, herhangi bir inklüzyondan başlayan gevrek kırılma şeklinde değil, ana malzemeden sünek kırılma şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.22. Optimum numunenin kırılma yüzeyindeki SEM mikroresmi ve ilgili EDX kimyasal spektrumu

Tüm mekanik ve mikro analizler sonucunda görülmektedir ki, optimum numunenin ortalama çekme dayanımı 636,9 MPa, ortalama % uzaması %13,68 ve petal çatlak uzunluğu 7 mm bulunmuştur. Çekme deneyi sonuçları ana malzemeye oldukça yakındır, petal çatlağı hedef değerde belirlenen sınırlar içerisindedir ve yapılan optimizasyon çalışması başarılı olmuş, optimum numune elde edilmiştir.

4.2. MIAB Kaynağı Deneyleri ve Sonuçları

4.2.1. MIAB kaynağı ön çalışma sonuçları

Tez çalışmasının başlangıç safhalarında yapmış olduğum bir yayında [21], MIAB kaynak yöntemi kullanarak EN 10083-2 C35R malzemedan üretilmiş dövme braketle, St 52-3 malzemedan imal edilmiş, 60 mm dış çapında 3 mm cidar kalınlığındaki boruları kaynatarak, kamyonlarda kullanılan arka çamurluk braketi imal edilmiştir.

MIAB kaynağıyla kaynatılan parçalar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş, frekans cevap analizi yöntemiyle Nastran'da titreşim analizleri yapılmış ve parçalar yapısal olarak optimize edilmiştir. Daha sonra, sonlu elemanlar modelinden elde edilen bilgiye göre dövme braket imal edilmiş, boru ve dövme braketin kaynağı, birçok numune kullanılarak yapılan deneme yanılma çalışması safhasıyla, gerçekleştirilmiştir.

Kaynatılan parçalar, sonlu elemanlar modelini korele etmek için, gerçek zamanlı sıkıştırılmış yol datasının koşturulduğu deneylerde test edilmiş ve parçalar doğrulanmıştır [21]. MIAB kaynak yöntemi araştırılmaya başlanırken, çalışmaya ilk önce bu parçanın mikro ve mekanik olarak incelenmesi ile başlanmıştır.

Tablo 4.10’da bu çalışmada kullanılan parçaların malzeme özellikleri görülmektedir, mekanik özellikler Tablo 4.11’de verilmiştir. Sürtünme kaynağı ön çalışmaları ile MIAB kaynağı ön çalışmalarında aynı boru malzemesi kullanılmıştır.

Tablo 4.10. EN 10305-2 (St 52-3) ve EN 10083-2 (C35R), kimyasal kompozisyonlar (ağırlık %)

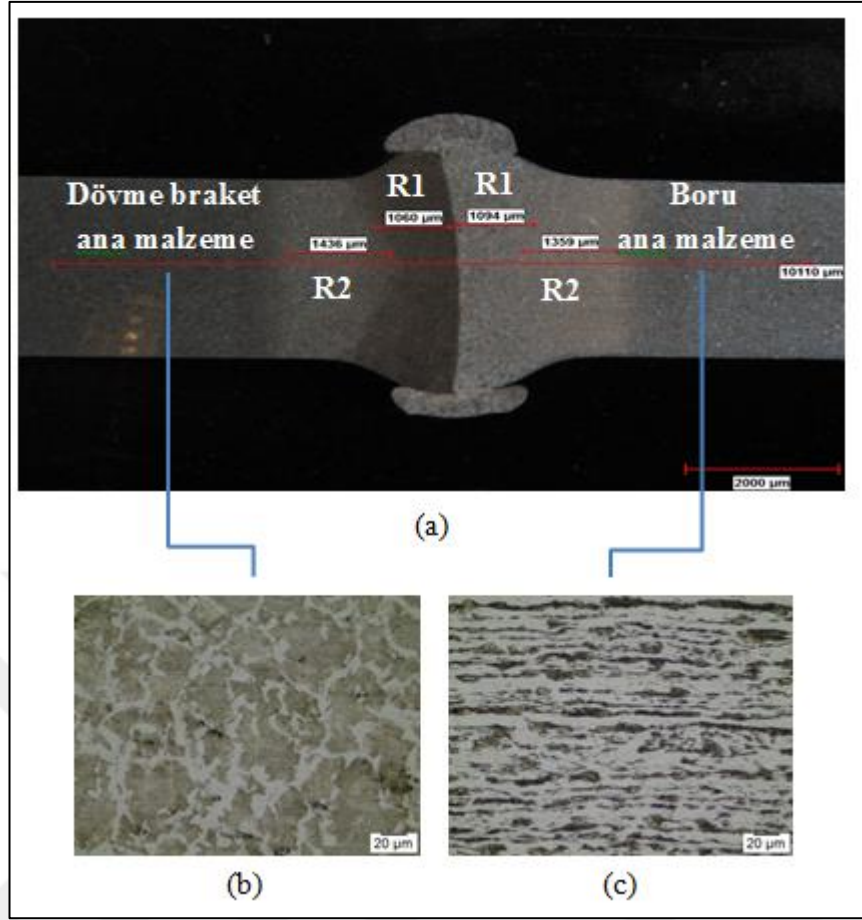
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
St 52-3	0,22	0,55	1,6	0,025	0,025	-	-	0,006
C35R	0,32-0,39	0,4	0,5-0,8	0,025	0,02	0,4	0,1	-

Tablo 4.11. St 52-3 ve C35R, mekanik özellikler

Malzeme	Akma Sınırı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Kopma Uzaması δ
St 52-3	355	630	22
C35R	380	650	20

MIAB kaynağında oluşan kaynak dudağı ve kaynak kesidinin makro resmi Şekil 4.23’te görülmektedir. MIAB kaynağında kaynak dudağı yuvarlak bir tepecik formunda oluşur. MIAB kaynağında dudak oluşumu yığma basıncıyla beraber artar. Kaynak denemeleri sırasında da bu oluşum gözlemlenmiştir.

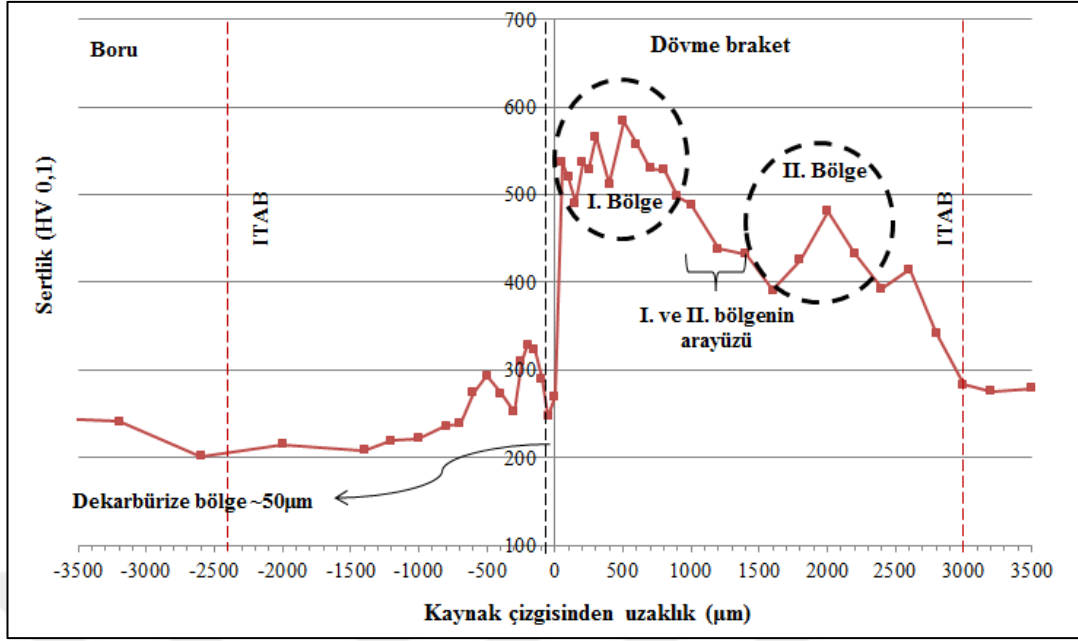
Şekil 4.23b ve 4.23c’de ana malzemelerin mikro resimleri görülmektedir. Şekil 4.23b’de görülen dövme braketin ana malzemesi ferrit ve perlit mikroyapıdan oluşmaktadır. Çok ince perlit yapısında, ince sementit lamelleri gözlemlenmektedir ki bu da malzemenin yüksek mikro-sertlik değerlerinde olmasını destekler.



Şekil 4.23. MIAB kaynaklı numunenin ITAB bölgesi ve ana malzeme mikro resimleri a) kaynaklı bölge makro resim b) dövme braket ana malzeme (C35R) c) çelik boru ana malzeme (St 52-3)

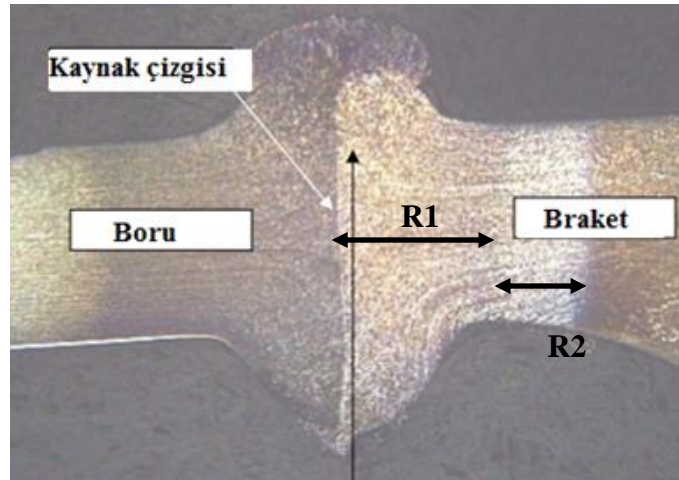
Dövme ana malzemesinde sertlik değeri Şekil 4.24'te görüldüğü üzere, 270 HV 0,1 olarak ölçülmüş ve bu değer de, perlit egemen mikroyapıyı desteklemektedir. Şekil 4.23c'de, borunun ana malzemesinin mikroyapısı görülmektedir. Boru, soğuk çekme yöntemiyle imal edildiği için, borunun çekme yönü boyunca uzayan bant oluşumları mevcuttur. Bu perlit bant yapıları, Şekil 4.24'te ölçülen mikro-sertlik değerleriyle desteklenmektedir (250 HV 0,1).

Şekil 4.23a'da görüldüğü üzere, MIAB kaynağında ITAB dört bölgeden oluşmaktadır. MIAB kaynağında, kaynağın her iki yanını içeren toplam ITAB uzunluğu ~4,8 mm'dir ve bu dört bölge kaynak çizgisinin her iki tarafına eşit biçimde dağılmıştır. Bu bölgeler kaynağın her iki yanında olmak üzere, birinci bölge ((R1; ~1,1 mm) ve ikinci bölge (R2; ~1,55 mm) olarak adlandırılacaktır. Bu bölgeler Şekil 4.24'de bulunan mikro-sertlik analizi grafiğinde de gözlemlenmiştir.



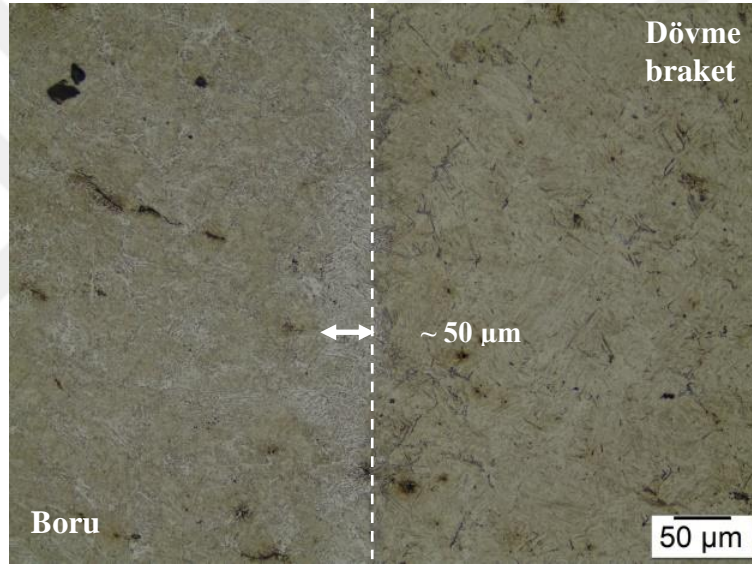
Şekil 4.24. MIAB kaynağı mikro-sertlik değerleri

Phillips yayınladığı doktora tezinde [15], MIAB kaynağıyla dövme bir braketle çelik bir boruyu kaynatmıştır. Phillips'in çalışmasında kaynak kesidi resimlerinin görüldüğü Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da, dövme braket tarafında oluşan iki farklı ITAB bölgesi açıkça görülmesine rağmen, tezinde buna yer vermemesi sebebiyle, çalışmada bu detayın farkedilmediği yorumu yapılabilir. MIAB kaynak yöntemiyle, sürtünme kaynağından farklı olarak iki farklı ITAB bölgesi oluşmaktadır. Şekil 2.25'in ilgili kısmı, iki farklı ITAB bölgesi daha net anlaşılacak şekilde, Şekil 4.25'e kopyalanmıştır.



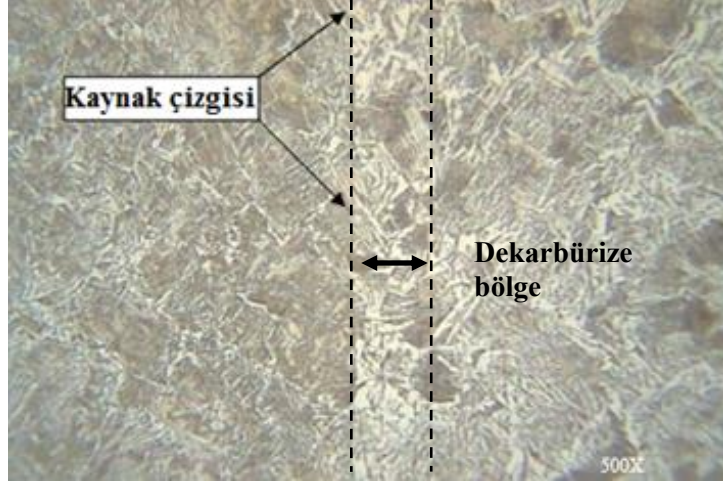
Şekil 4.25. Phillips'in çalışmasındaki MIAB kaynağı makro resmi [15]

Şekil 4.26'da MIAB kaynak arayüzü görülmektedir. MIAB kaynağında, hızlı soğumadan ötürü, ~50 µm uzunluğunda dekarbürize bir bölge gözlemlenmektedir. Bu bölgede, mikro-sertlik değerlerinde ani bir düşüş gerçekleşmekte ve mikro-sertlik değerleri kaynak çizgisinin hemen yanında 250 HV'ye düşmektedir. Dekarbürize bölge Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Dahası, kaynak arayüzüne yakın bir bölgede, dövme braket tarafında beynitik bir mikroyapı vardır. Bu yapı, mikro-sertlik değerlerinin kaynak çizgisi üzerinde aniden yükselerek, Şekil 4.24'te görüldüğü üzere, 490-537 HV civarına gelmesine sebep olur. Şekil 4.26'da boru tarafında, kaynak akış çizgileri görülmektedir. Bu çizgiler, boru iç cidarından dış cidarına doğru, kaynak dudakını oluşturacak şekilde oluşmaktadır.



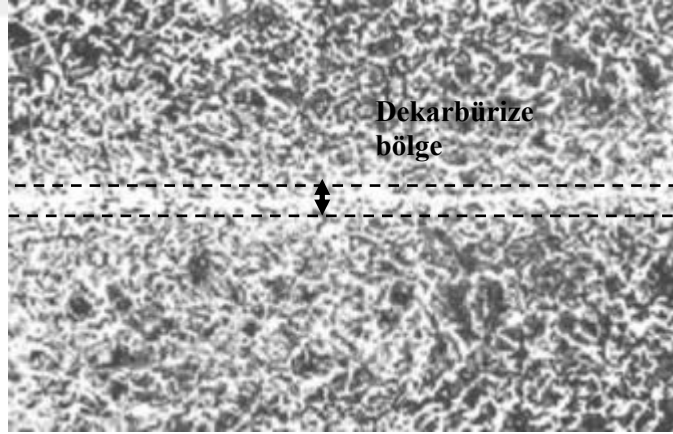
Şekil 4.26. MIAB kaynak arayüzü

Phillips'in doktora tezindeki çalışmasından alınan [15], Şekil 2.26'nın alt kısmında x500 büyütme ile gösterilen kaynak arayüzünde de, tıpkı bu tez çalışmasında olduğu gibi, kaynak çizgisinin dövme tarafında dekarbürize bir bölge görülmektedir. Fakat, bu oluşum Phillips tarafından gözardı edilmiştir. Şekil 2.26'nın ilgili kısmı, görülen dekarbürize bölgenin daha net anlaşılması açısından, Şekil 4.27'ye kopyalanmıştır.



Şekil 4.27. Phillips'in çalışmasındaki MIAB kaynak arayüzü [15]

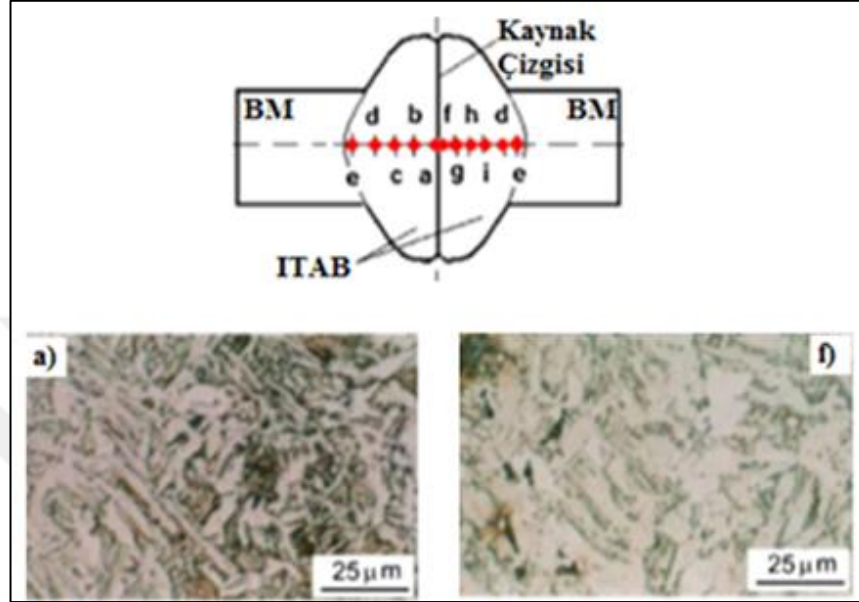
Kachinsky'nin çalışmasında Şekil 2.16'da gösterilmiş olan, kaynak çizgisinin bulunduğu bölgedeki yatayda beyaz bir çizgi halinde dekarbürize bölge, Kachinsky tarafından aşırı ısınma bölgesi olarak tanımlanmıştır, dekarbürizasyondan bahsedilmemiştir. Şekil 2.16'nın ilgili kısmı daha net anlaşılması açısından Şekil 4.28'e kopyalanmıştır.



Şekil 4.28. Kachinsky'nin çalışmasındaki MIAB kaynağı kaynak arayüzü (x100) [30]

Iordachescu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kaynak çizgisinin sol tarafındaki perlit yapısının (Şekil 2.21a), sağ tarafına nazaran (Şekil 2.21f), daha fazla miktarda karbon içerdiği belirtilmektedir ki bu da kaynak çizgisi bölgesinde karbon difüzyonunun gerçekleştiğini göstermiştir. Yani, kaynak çizgisinin sol tarafında dekarbürize bir bölge oluşmuştur. Bu oluşumu, yüksek pik sıcaklığa çıkılmasına bağlamışlardır. Çünkü, numunelerin hepsinde Şekil 2. 21a'da gözlemledikleri gibi,

Widmanstatten morfoloji içerisinde iğnesel bir ferrit morfolojisini gözlemlemiştir. Bu oluşumun da yüksek soğuma hızına işaret ettiğini belirtmişlerdir [26, 60]. Şekil 2.21'in ilgili kısımları (2.21a ve 2.21f) daha net anlaşılması için Şekil 4.29'a kopyalanmıştır.



Şekil 4.29. Iordachescu'nun çalışmasındaki MIAB kaynağı arayüzü (x100) [30]

Yapılan ön hazırlık çalışmalarında ve literatür çalışmalarında, MIAB kaynağında kaynak arayüzünde dekarbürize bölge olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, MIAB kaynağında oluşan hızlı soğuma olayıdır. MIAB kaynağında ısı kaynağı aniden kapanmaktadır; kaynatılan parçalar dövme fazına geçerken birbirine dokundukları ve parçalar arasındaki uzaklık sıfıra ulaştığı anda, kaynak prosesi tamamen sonlanmadan, ark yokolacaktır. MIAB kaynağında, arkın dönmesi esnasında yüksek sıcaklıklara çıkan kaynak arayüzünde, karbon atomları bir miktar yanmaya başlar, takiben gelişen hızlı soğuma fazında da, arayüzde bir miktar dekarbürizasyon görülmesi beklenmektedir. Eğer yeterince yüksek dövme kuvveti parçalara uygulanır ve dekarbürize bölge kaynak dudağına doğru itilip, arayüzde minimize edilirse, başarılı bir kaynak prosesi gerçekleştirilmiş olur.

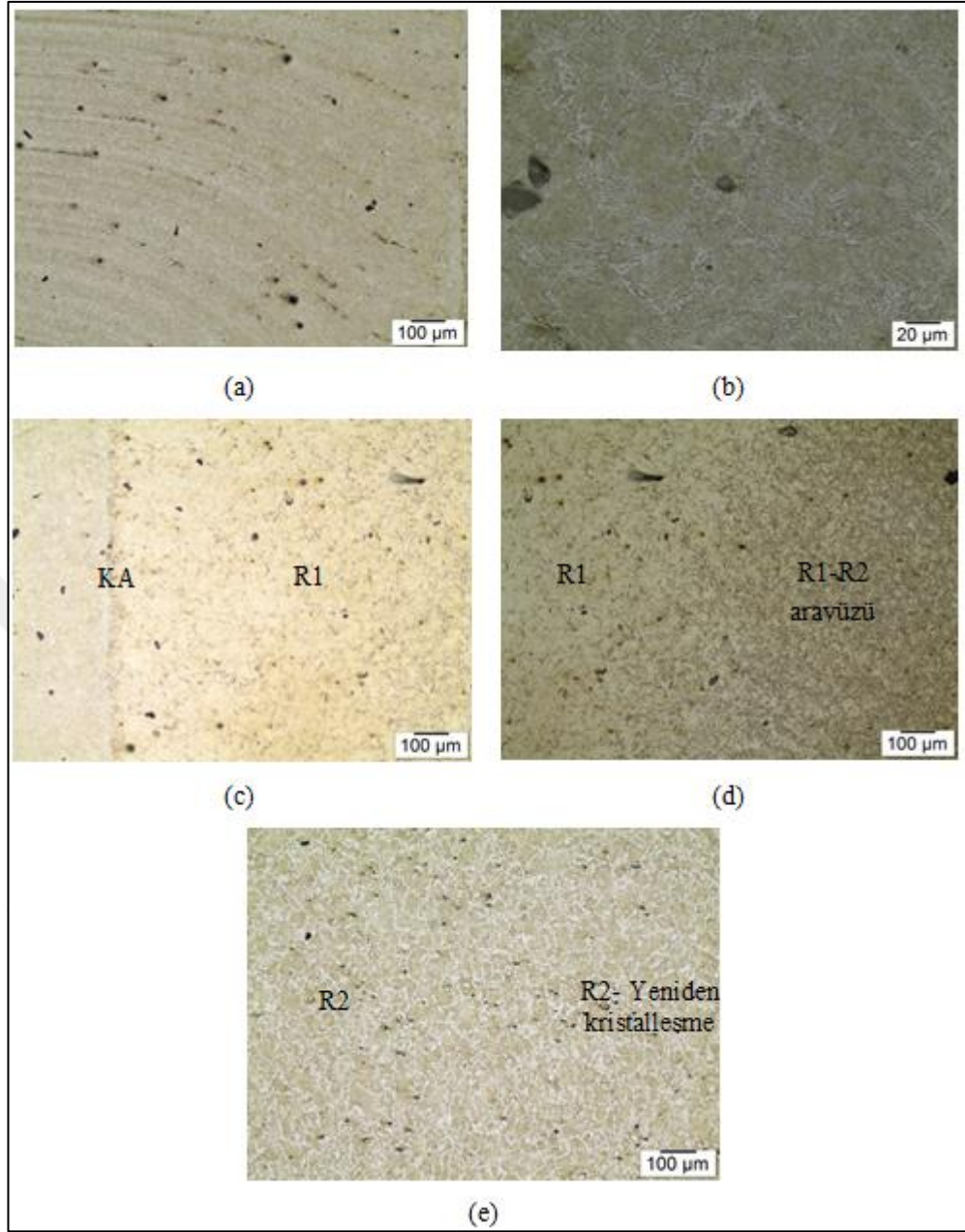
MIAB kaynağındaki kaynak arayüzünün etrafında oluşan dört farklı mikroyapı bölgesi (kaynak çizgisinin her iki tarafında R1 ve R2), Şekil 4.30'da görülmektedir. MIAB kaynağının yığılma fazı esnasında, boru malzemesinden kaynak dudağına

doğru oluşan plastik malzeme akışı Şekil 4.30a'da görülen deformatsiyon çizgilerine sebep olmaktadır. Şekil 4.30b'de, kaynak çizgisine çok yakın bir bölgedeki boru malzemesi görülmektedir. Burada, tane büyümesi ve perlit görülmektedir ki, Şekil 4.24'teki mikro-sertlik ölçümlerinden de görüldüğü üzere, 290-330 HV aralığında sertlik değerlerine rastlanmaktadır. Dövme braket tarafında, ITAB'da oluşan iki farklı mikro yapı bölgesi (R1 ve R2), net bir Şekilde ayırtedilebilmesine rağmen, boru tarafında bu oluşum kolayca görülememektedir. Boru tarafında kaynak çizgisinden boru ana malzemesine doğru gidildikçe, yumuşak bir geçişle birlikte, mikro-sertlik değerleri 330 HV'den 210 HV civarına düşer (Şekil 4.24).

Şekil 4.30c'de, dövme braketin R1 bölgesi görülmektedir. Bu bölge, beynit ve martenzit mikroyapıdan oluşmaktadır. MIAB kaynağında bobin ve kaynak akımı parçalar birbirine değer değmez ısı girdisini kestikleri için, hızlı soğumayı takiben, R1 bölgesinin hemen girişinde beynit yapı oluşur. Bu yapının varlığı, Şekil 4.24'de görülen 529 HV civarındaki mikro-sertlik değerleriyle de desteklenmektedir. Dahası, mikro-sertlik değerlerindeki 566 HV-584 HV arasındaki değerler de, Şekil 4.30c'de görülen bir miktar martenzitik oluşumu da desteklemektedir (Şekil 4.24).

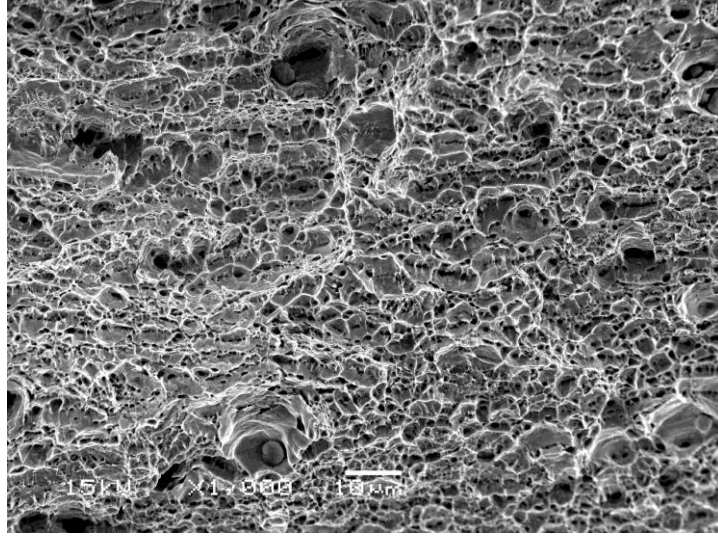
Dövme tarafında, R1 ve R2 bölgesinin arayüzü, Şekil 4.30d'de görülmektedir. Buradaki ara bölgenin ilgili mikro-sertlik değerleri de Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Şekil 4.30d'de, R1 bölgesindeki tanelerin, R2 bölgesindeki tanelere nazaran daha büyük olduğu görülmektedir. R2 bölgesinde oluşan yeniden kristalleşme, daha küçük tanelerin oluşmasına sebep olmuştur. Şekil 4.30d'de arayüzde görülen tane sınırı beynit oluşumu da Şekil 4.24'te, R1 ve R2 bölgelerinin arayüzünde llen 489 HV-438 HV aralığındaki mikro-sertlik değerleriyle desteklenmektedir.

R2 bölgesinden dövme braketin ana malzemesine doğru ilerledikçe, Şekil 4.30e'de görüldüğü üzere, yeniden kristalleşmiş taneler oluşur. Bu bölgede, mikro-sertlik değerleri 390 HV-480 HV arasında llmştir (Şekil 4.24). R2'nin ana malzemeye yakın çıkış bölgesinde, tane sınırı ferrit ve ince perlit mikroyapısı oluşumu vardır ki, bu da mikro-sertlik değerlerinin 270 HV civarına düşmesine sebep olur (Şekil 4.24).



Şekil 4.30. MIAB kaynağı ITAB mikro resimleri a) R1, boru tarafı b) R1, boru tarafı, kaynak arayüzüne yakın bölge c) R1, dövme tarafı d) R1 ve R2 arayüzü, dövme braket tarafı, e) R2, yeniden kristalleşme bölgesi, dövme tarafı

Ön çalışma numunesinin çekme testi sonucunda kırılma yüzeyleri SEM analizi ile görüntülenmiştir. Şekil 4.31’de görüldüğü üzere, kırılma yüzeyi sünek kırılmayı işaret etmektedir.



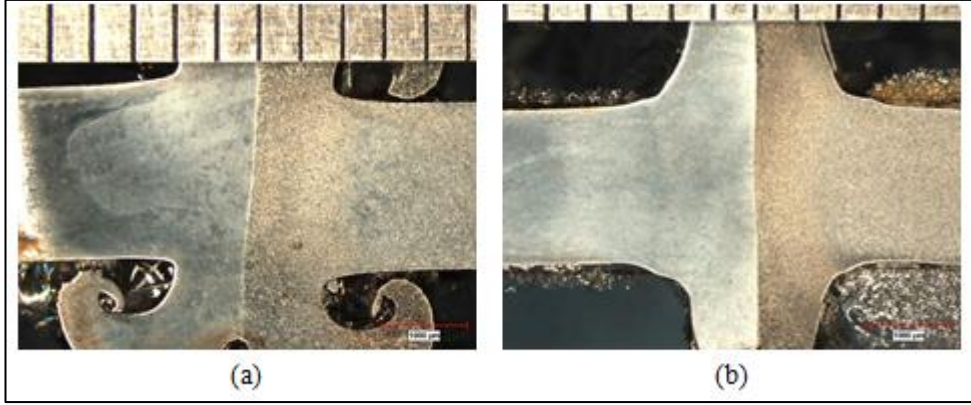
Şekil 4.31. MIAB kaynağı kırılma yüzeyi SEM resmi

4.3. Sürtünme ve MIAB Kaynağı Karşılaştırması

Sürtünme kaynağı optimizasyonu neticesinde elde edilen kaynaklı numune ile aynı malzemelerden deneme yanılma yoluyla üretilmiş, hafif ticari bir aracın MIAB kaynağı ile imal edilmiş arka aksı, makro, mikro ve mekanik özellikler bakımından karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Dudak oluşumu

Sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağının dudak oluşumları birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Karşılaştırmada kullanılan numunelerin kaynak kesit resimleri Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Sürtünme kaynağında kaynak dudağı, MIAB kaynağına göre daha büyüktür, diğer bir deyişle, sürtünme kaynağında yakma mesafesi ve malzeme firesi daha fazladır. Sürtünme kaynağında kaynak dudağı, sürtünme esnasında parçaların birbirine bastırmasıyla birlikte, radyal yönde dışarı doğru yönelmeye başlar, yığma basıncının uygulanmasıyla birlikte, dışarı doğru taşan dudaklar, aksel yönde birbirine zıt yönde açılmaya ve kıvrılmaya başlar (Şekil 4.32a). Böylece sürtünme kaynak dudağı oluşmuş olur. Her iki kaynak yönteminde de ITAB uzunluğu ~4 mm’dir. Bu değer, borunun et kalınlığı olan 4 mm ile eşdeğer bir değerdedir.



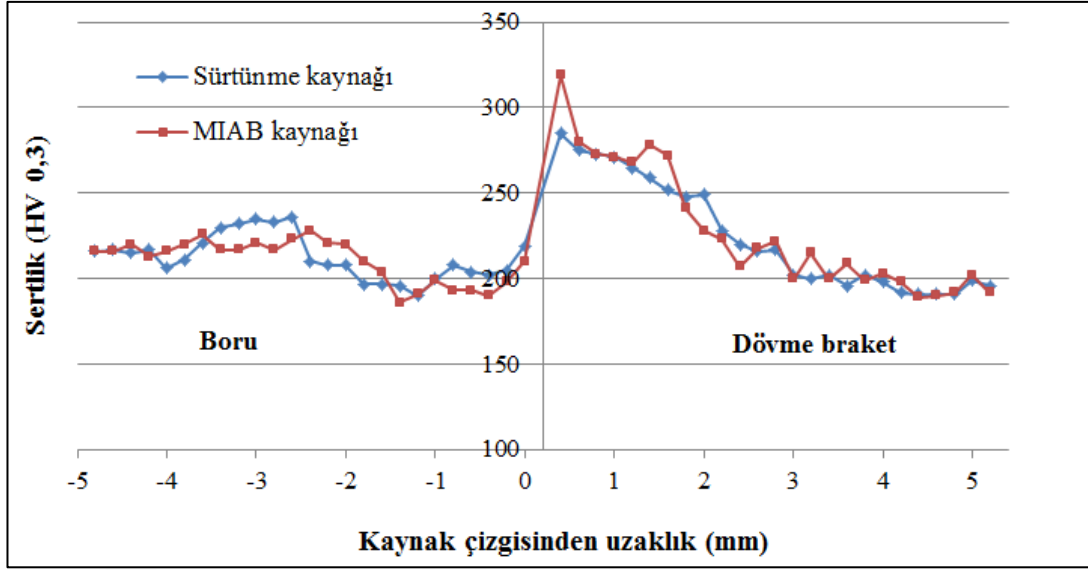
Şekil 4.32. Kaynak dudağı kesit resmi a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı

MIAB kaynağında dudak oluşumu, uygulanan yığma basıncıyla beraber, yuvarlak bir tepecik şeklinde olur, yakma mesafesi kısadır ve fire miktarı azdır. MIAB kaynağında, ark oluşumu borunun iç cidarında başladığı ve dış cidara doğru ilerlediği için, borunun iç cidarında ısı girdisi daha fazla olur. Bu yüzden, boru iç cidarında oluşan kaynak dudağı tepeciği daha büyüktür. Şekil 4.32b'deki kesit resminin alt tarafı boru dış cidarı, üst tarafı boru iç cidarını göstermektedir.

4.3.2. Mikro-sertlik

Optimum parametreler kullanılarak imal edilmiş sürtünme kaynağı numunesi ile MIAB kaynağı numunesinin mikro-sertlik grafiği Şekil 4.33'te gösterilmiştir. MIAB kaynağında ön çalışmalardan ve literatürden görüldüğü üzere, ITAB bölgesinde iki bölge oluşumu görülmektedir.

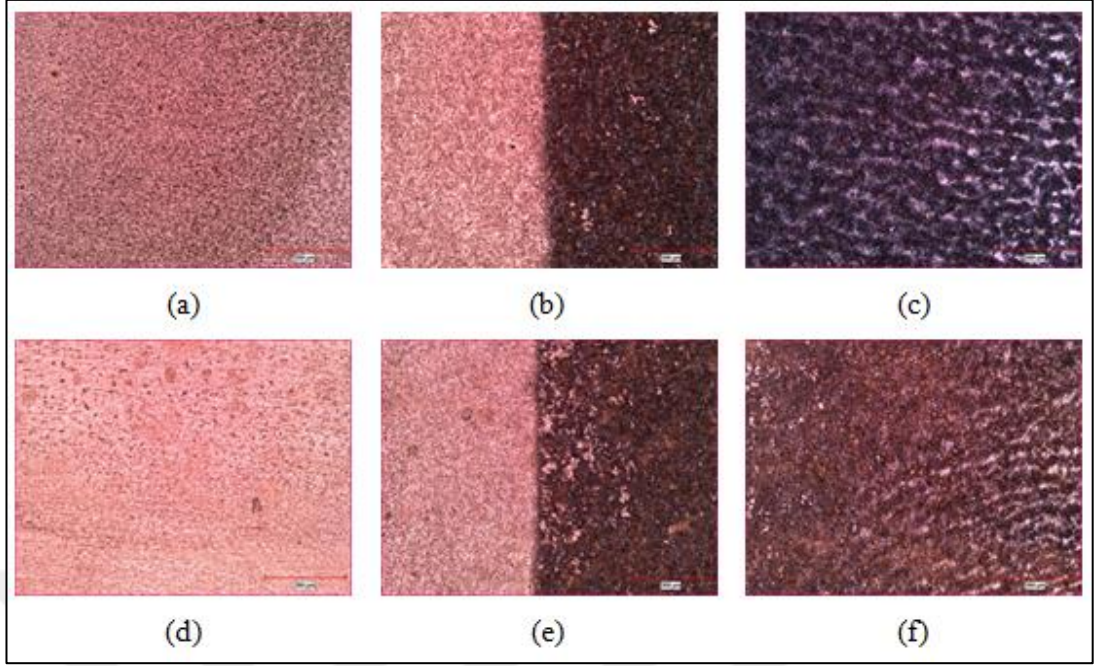
Sürtünme kaynağı kaynak arayüzünde, MIAB kaynağına nazaran daha düşük sertlik değerlerine rastlanılmaktadır. Sürtünme kaynağı dövme braket tarafında, kaynak çizgisinden başlayarak yumuşak bir düşüş ile ana malzeme değerlerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.33. Optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı mikro-sertlik karşılaştırması

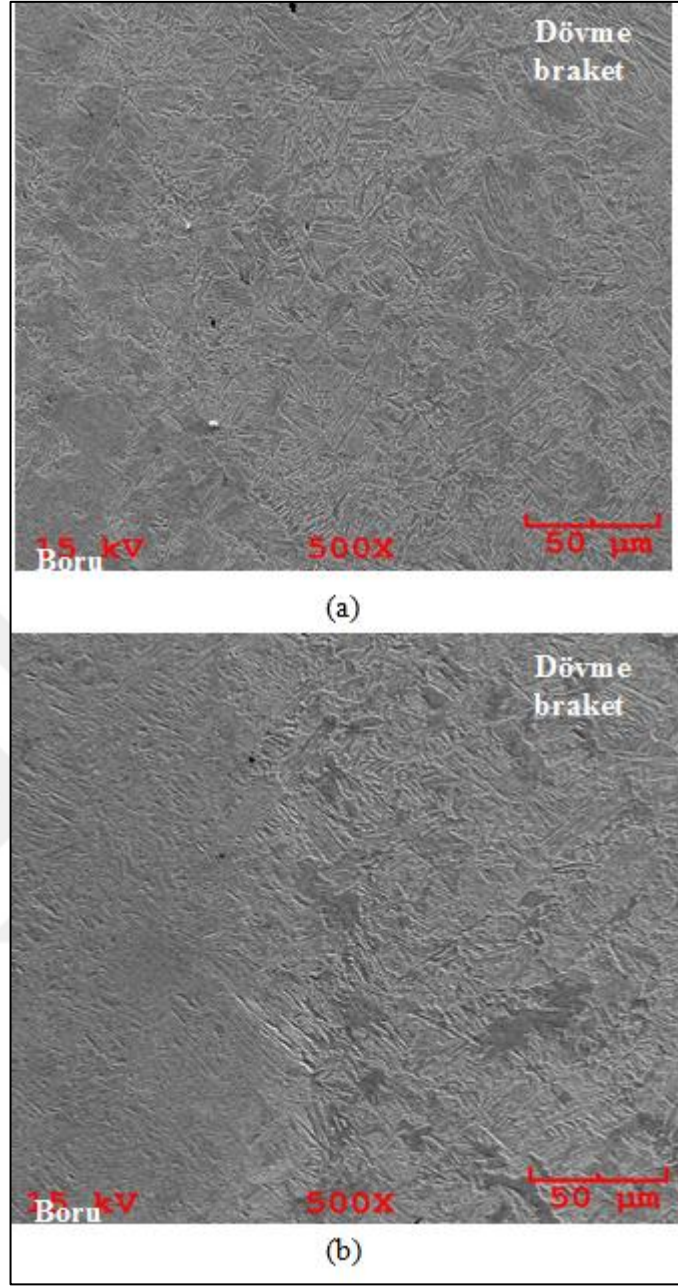
4.3.3. Mikroyapı

Şekil 4.34'te, optimum parametreler kullanılarak imal edilmiş sürtünme kaynağı numunesi ile MIAB kaynağı numunesinin kaynak arayüzü ve ITAB'da oluşan mikroyapıları görülmektedir. Optimum sürtünme kaynağındaki mikroyapılar Bölüm 4.1.13, Şekil 4.19'da etraflıca anlatılmıştır. MIAB kaynak numunesinde arayüzde, 10 μm 'den daha kısa uzunlukta dekarbürize bölgeye rastlanmaktadır (Şekil 4.34e). MIAB kaynağı numunesi, hafif ticari bir aracın arka aksında kullanılmakta olan bir parçadan temin edildiği için, dekarbürize bölgenin yapılan deneme yanılma çalışmalarıyla minimize edildiği görülmektedir. MIAB kaynak çizgisi, sürtünme kaynak çizgisine göre daha keskin, karışmamış bir çizgi özelliği gösterse de, yine de kabul edilebilir bir geçiş bölgesi görülmektedir. MIAB kaynağı dövme braket tarafındaki ITAB'de, malzemede plastik akış yönlendirmeleri görülmektedir. MIAB kaynak arayüzünde de tane büyümesi görülmektedir. Şekil 4.34f'de, MIAB kaynak arayüzü ile ITAB bölgesi arasında, dövme braket tarafında kalan bölge ve bu bölgedeki malzemede kaynak dudağına doğru oluşan plastik akış izleri görülmektedir.



Şekil 4.34. Optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı mikroyapı karşılaştırması
a) sürtünme kaynağı, boru ITAB b) sürtünme kaynağı kaynak arayüzü c) sürtünme kaynağı, dövme ITAB d) MIAB kaynağı, boru ITAB e) MIAB kaynağı kaynak arayüzü f) MIAB kaynağı, dövme tarafı kaynak arayüzü ve ITAB

Şekil 4.35'te, sürtünme ve MIAB kaynak arayüzünün SEM analizi görülmektedir. Her iki kaynak arayüzünde de, oksit, inklüzyon ya da boşluğa rastlanmamıştır.



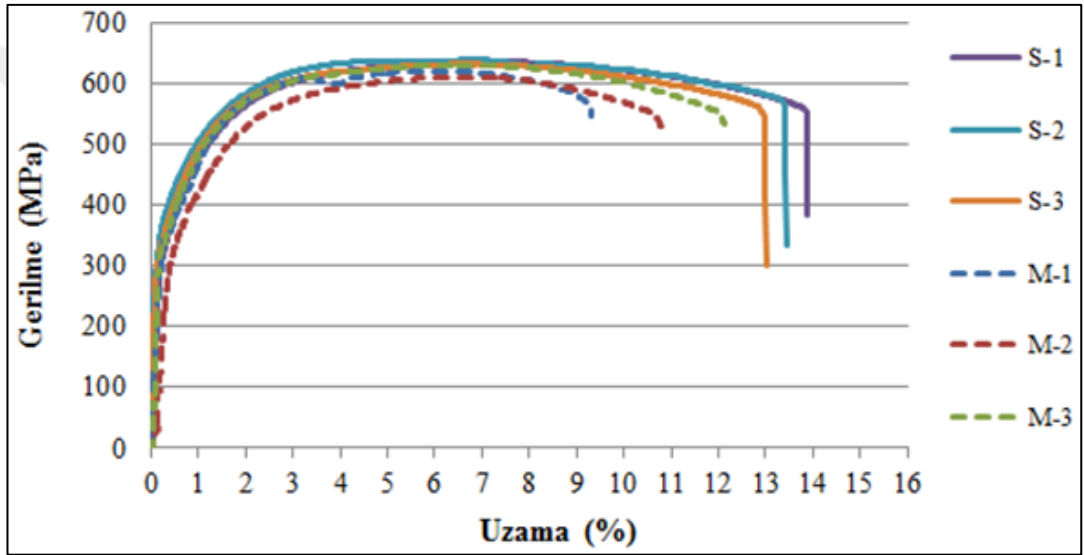
Şekil 4.35. Kaynak arayüzü SEM mikro resmi a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı

4.3.4. Mekanik Dayanım

4.3.4.1. Çekme testi

Numunelerden çer adet çekme testi numunesi çıkartılmış ve test edilmişlerdir. Şekil 4.36’da optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynak numunelerinin çekme testi grafiği görülmektedir. Çekme testi sonrasında, bütün parçalar gözle muayane edilmiştir. Optimum sürtünme kaynağı numunelerinde ve MIAB kaynak

numunelerinin hepsinde, kopma ITAB bölgesinin dışında, dövme braket ana malzemesinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.36'da görülen S-1, S-2 ve S-3, optimum sürtünme kaynaklı parçadan elde edilen sürtünme kaynağı numunelerini ifade ederken, M-1, M-2 ve M-3, MIAB kaynağı numunelerini ifade etmektedir. Sürtünme kaynağının ortalama çekme dayanımı 636,9 MPa iken, MIAB kaynağının 622,1 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama % uzamalara bakıldığında ise, sürtünme kaynağında % 13,6 iken, MIAB kaynağında % 10,8'dir (Şekil 4.36). Sonuçlardan görülmektedir ki, sürtünme kaynağı optimum numunesi, hafif ticari aracın arka aksından elde edilen MIAB numunesinden bir miktar daha iyi sonuçlar vermektedir.

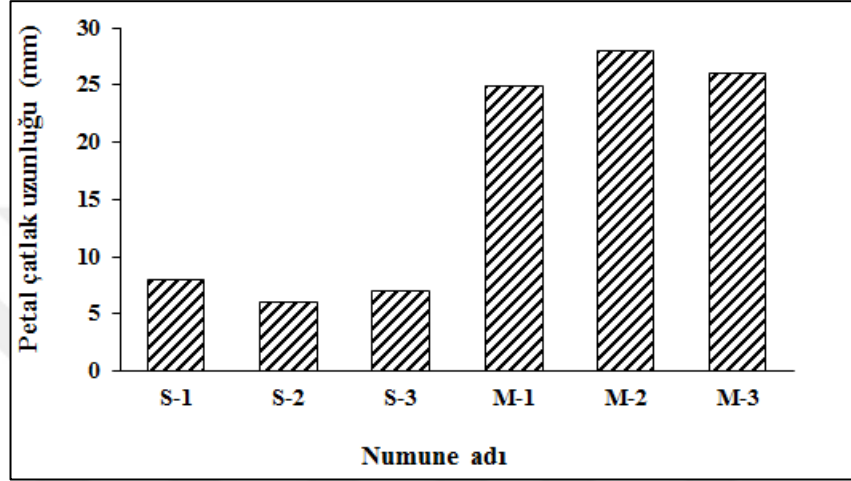


Şekil 4.36. Optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı çekme testi grafiği

4.3.4.2. Petal testi

Optimum parametreler kullanılarak imal edilmiş sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı numunelerine uygulanan petal testi sonuçları Şekil 4.37'de görülmektedir. Her iki kaynak tekniğinde de, yapılan deneme çalışmaları esnasında görülmüştür ki, daha yüksek ısı girdisi ve plastik deformasyon miktarı, daha büyük kaynak dudağına sebep olmaktadır. Sürtünme basıncı ve sürtünme süresi yüksek olduğunda, ısı girdisi ve plastik deformasyon da fazla olacaktır, dolayısıyla daha büyük kaynak dudağı oluşacaktır. MIAB kaynağında bu durum, dönen ark ve yığma basıncı yüksek olduğu zaman gerçekleşmektedir. Her iki kaynak yönteminde de, ısı girdisi arttıkça, malzemenin eğilme dayanımı düşecektir ve parçalar daha kırılgan hale gelecektir. Bu oluşum da en iyi şekilde petal testinde yakalanabilir. Şekil 4.37 incelendiğinde

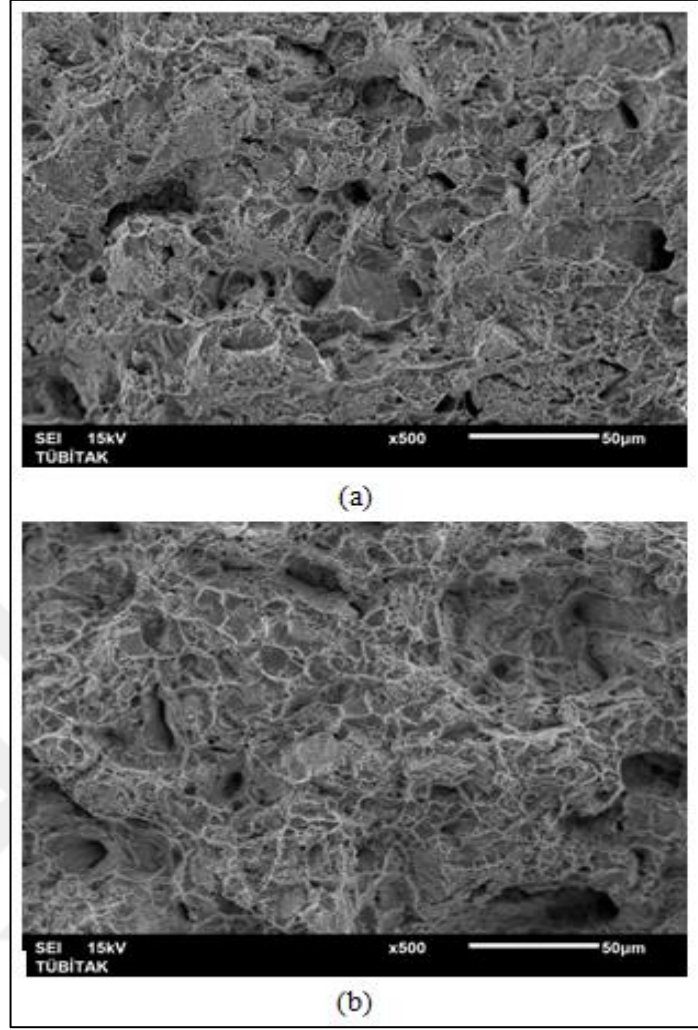
görülmektedir ki, optimum sürtünme kaynağında sadece tek bir petal üzerinde çatlak tespit edilirken, MIAB kaynağında yaklaşık 2 petal uzunluğunda çatlığa rastlanmıştır. MIAB kaynağı ile eş parçalarla imal edilmiş olan parçanın, önden çekişli hafif ticari bir aracın arka aksında çok uzun süredir problemsiz olarak kullanıldığı düşünülürse, optimum sürtünme kaynağının başarısı da ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.37. Optimum sürtünme ve MIAB kaynağı petal çatlak uzunluğu grafiği

4.3.5. Kırılma analizi

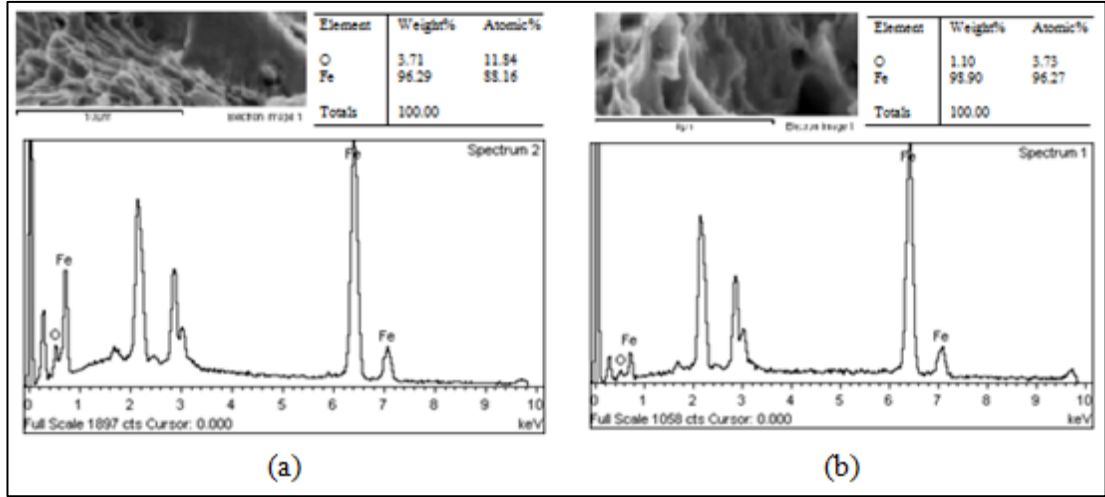
Şekil 4.38'de, optimum sürtünme kaynağı ve MIAB kaynak numunelerinin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM analizi görülmektedir. Her iki durumda da, bal köpüğü görünümü yakalanmıştır, küçük boşluklar ve küresel çukurluklar yüzey görünümünde baskındır. Her iki kaynak yönteminde oluşan çukurlukların derinlikleri benzer karakterdedir.



Şekil 4.38. Kırılma yüzeyi SEM mikro resimleri a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı

4.3.6. Kimyasal kompozisyon

Şekil 4.39’da her iki kaynağın EDX spektrumları göstermektedir ki, kırılma yüzeyi optimum sürtünme kaynağı numunesinde % 96,29 demir içerirken, MIAB kaynağında % 98,90 demir içermektedir. Şekil 4.39, her iki kaynak yönteminde kırılmanın herhangi bir inklüzyondan başlamadığını desteklemektedir. Sonuç olarak, optimum sürtünme kaynağında, ortalama 8 mm petal çatlak uzunluğu, 636,9 Mpa çekme dayanımı ve % 13,6 uzama elde edilmişken, MIAB kaynağında ortalama 622,1 Mpa çekme dayanımı ve % 10,8 uzama ve ortalama 25 mm petal çatlak uzunluğu elde edilmiştir.



Şekil 4.39. Kırılma yüzeyleri SEM mikro resmi ve ilgili EDX spektrumları a) sürtünme kaynağı b) MIAB kaynağı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, orta karbonlu çelik boru ve dövme braketten oluşan yapısal parçaların sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağının, makro, mikro ve mekanik karakterizasyonu yapılmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağı, kaynatılacak parçalar arasında oluşturulmak istenilen metalurjik bağın, malzemede ergime gerçekleşmeden yapıldığı katı hal kaynak yöntemlerine en iyi iki örnektir.
- Her iki yöntem de, otomotiv endüstrisinde orta karbonlu çelik bir borunun dövme ya da döküm bir brakete kaynatılması amacıyla sıklıkla kullanılır. Endüstride bu tip parçaların tasarımında deneme yanılma yöntemlerinden faydalanılarak imalat yapılır.
- Çelik bir borunun dövme bir brakete sürtünme kaynağıyla kaynatılması ve optimizasyonu üzerine literatürde bir çalışmaya rastlanmamıştır.
- Bu çalışmada orta karbonlu çelik boru ve braketten oluşan sürtünme kaynaklı bağlantılarda, parçanın dayanımına etki eden kaynak parametreleri, RSM yönteminden faydalanılarak ortaya konulmuştur. Deneyler boyunca dönme hızı 600 dev/dk'da sabit tutulmaktayken, sürtünme basıncı, yığma basıncı, sürtünme süresi ve yığma süresi proses değişkenleri olarak kabul edilmiştir. RSM yöntemi ile matematiksel bir model kurularak, sürtünme kaynağı parametreleri ile çekme dayanımı, % uzama ve petal çatlak uzunluğu arasındaki ilişkiler incelenmiştir.
- Prosese yeterli ısı girdisi sağlandığı müddetçe, sürtünme kaynaklı bağlantının çekme dayanımına etki eden en etkili proses parametreleri yığma zamanı ve yığma basıncı-yığma zamanı arasındaki etkileşimdir. Yüksek yığma basıncı ve yüksek yığma süresi uygulanması neticesinde, kaynak arayüzünde bulunan kaba taneli yapı, kaynak dudağına doğru itilir, kaynak arayüzünde daha az miktarda yumuşamış malzeme geride kalır, bu da kaynak bölgesinin daha ince taneli mikroyapıdan oluşmasını sağlar. Neticesinde, daha yüksek çekme dayanımı elde edilir.

- % uzama, sünekliliğin bir ölçüsüdür. Sürtünme basıncı, sürtünme süresi ve yığıma süresi, % uzama değerlerine etki eden en etkili parametrelerdir. Yüksek sürtünme basıncı ve yüksek sürtünme süresi uygulaması, yüksek ısı girdisinden ötürü, daha küçük taneli yapının oluşmasını sağlar. Uygun seçilmeyen yığıma süresi, kaynak dudaklarına doğru yetersiz plastik malzeme akışına sebep olur, böylece kaynak arayüzünde, eksenel yüke dik yönde yönelmiş taneler geride kalır, bu taneler kaynak dudaklarına doğru ittirilemezler. ITAB'da geride kalan, eksenel yüke paralel tanelerin tersine, kaynak arayüzünde tanelerin oryantasyonunun eksenel yüke dik yönde pozisyonlanmasından ötürü, % uzama değerleri düşer.
- Petal testi, sürtünme kaynağı ve MIAB kaynağının simültane olarak kalite kontrolünün analizi amacıyla sanayide yaygın olarak kullanılsa da, literatürde sürtünme kaynağı optimizasyon çıktısı olarak daha önce hiç kullanılmamıştır.
- Petal çatlak uzunluğu üzerinde etkili sürtünme kaynağı parametreleri olarak, sürtünme basıncı-sürtünme süresi etkileşimi, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi, diğer kaynak parametrelerinden daha etkilidir. Sürtünme basıncı ve sürtünme süresi maksimum olduğu zaman, ısı girdisi ve plastik deformasyon artmakta, neticesinde daha büyük kaynak dudağı oluşmakta, kaynak arayüzünde mikro-sertlik değerleri artmaktadır. Isı girdisi arttıkça, malzemenin eğilme dayanımı düşer ve kaynaklı parça daha kırılğan hale gelir, bunun sonucunda da daha uzun petal çatlak oluşur.
- İstenirlik fonksiyonu yöntemi kullanarak, RSM yönteminden elde edilen modele, çoklu optimizasyon uygulanmıştır. Çoklu optimizasyon prosesi neticesinde elde edilen optimum deney koşulu için gerçek parçalar üzerinde doğrulama numuneleri hazırlanmıştır. Doğrulama numuneleri, kurulan matematiksel modelin doğrulanması için gereklidir. Buna göre, hesaplanan değerler ile doğrulama numunelerinden ölçülen değerler arasında, çekme dayanımı için % 1,06, % uzama için % 13, 5 ve petal çatlak uzunluğu için % 2,44 hata miktarı vardır. Bu da, modelin ileriki çalışmalar için, benzer malzemeler ve deney sınırları içerisinde, kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan sürtünme kaynağı optimizasyon çalışmalarının birçoğunda doğrulama deneyleri mevcut olmadığı için, kurulan modelin doğruluğu hakkında birşey söylenemez.
- Literatürde, sürtünme kaynağı optimizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda, genellikle çekme dayanımı optimize edilmiştir, % uzamalar ile ilgili kıymetli bir çalışma yapılmamıştır. Çoğu optimizasyon literatür çalışmalarında, % uzamalar

ihmal edilmiş, birkaçında ise ana malzemenin % uzamasından % 95'e varan oranda, daha küçük değerler elde edilmiştir.

- Bu çalışmada yapılan optimizasyon neticesinde bulunan çekme dayanımı ve % uzamalar, ana malzemenin değerlerine oldukça yakındır. Optimizasyon neticesinde dayanımı ve tokluğu yüksek olan kaynaklı parçalar imal edilebilmiştir.
- Sürtünme kaynağında, ITAB uzunluğu kaynak makinesinde dönen tarafa bağlanan malzeme üzerinde daha fazladır ve bu bölgede daha yüksek mikro-sertlik değerleri görülmektedir. Bu yüzden, numunelere uygulanan çekme testinde, kopma her zaman, bu çalışmada dönen parça olan, dövme braketle gerçekleşmiştir.
- Literatür çalışmalarında, sürtünme kaynağı optimizasyonunda sıklıkla çekme testi sonuçlarından faydalanılmıştır. Oysa, petal testi çekme testine ilave olarak, kaynak kalitesini ölçme metodu olarak kullanılabilir.
- Petal testinin çekme testine göre en önemli avantajlarından biri, kaynak prosesi sırasında oluşabilecek minör aksenal kaçıklıkları tolere edebilme özelliğidir. Kaynatılan iki parça arasında kaynaklama esnasında oluşabilecek küçük aksenal kaçıklıklar yüzünden, çekme testi sonuçları, gerçekten farklı sonuçlara gidilmesine yol açabilir. Çünkü, aksenal kaçıklıktan ötürü, çekme gerilmelerine ek olarak, eğilme gerilmeleri de çekme testi esnasında parçaya etki edebilir, bu da kaynaklı numunede beklenenden daha farklı bir çekme dayanımı değerine sebep olabilir. Oysa, petal testinin uygulanış biçiminden ötürü, oluşabilecek minör aksenal kaçıklıkların bir etkisi yoktur.
- Optimum parametreler kullanılarak üretilen sürtünme kaynağı numunesi ile aynı malzemedan imal edilmiş ve MIAB kaynağıyla kaynatılmış önden çekişli hafif ticari bir aracın arka aksı, makro, mikroyapısal ve mekanik özellikler yönünden karşılaştırılmıştır.
- MIAB kaynağında, kaynak çizgisinin her iki tarafında olmak üzere, ITAB bölgesi iki bölgeden oluşmaktadır. Literatür incelemeleri ve farklı malzemelerle yapılan denemeler neticesinde, bu bölgelerin varlığı doğrulanmıştır. Literatürde ise, mikroyapı analizlerinde görülse bile, gözardı edilmiştir. Sürtünme kaynağında ise, kaynak çizgisinin her iki tarafında olmak üzere, ITAB bölgesi tek bölgeden oluşmaktadır. MIAB kaynağında oluşan iki farklı ITAB bölgesi, sertlik ölçümlerinde de tespit edilebilmektedir.

- MIAB kaynağının sertlik ölçümlerinde, iki farklı ITAB bölgesi oluşumundan kaynaklı daha dik inişli mikro-sertlik trendi görülmekteyken, sürtünme kaynağında kaynak arayüzünden ana malzemeye doğru gidildikçe, mikro-sertlik değerleri daha yumuşak bir eğimle düşer. Mikro-sertlik sonuçları incelendiğinde, optimum sürtünme kaynaklı numunenin kaynak arayüzünde ana malzemeye göre sertlik değerinin ~40% arttığı görülmektedir. Bu değer MIAB kaynağında bir miktar daha yüksektir.
- MIAB kaynağında, sürtünme kaynağına nazaran daha hızlı soğuma gerçekleşmektedir. MIAB kaynağında ısı kaynağı aniden kapanmaktadır; kaynatılan parçalar dövme fazına geçerken birbirine dokundukları anda, bir başka deyişle parçalar arasındaki uzaklık sıfıra ulaştığı anda, kaynak prosesi tamamen sonlanmadan, ark oluşumu son bulmaktadır. Sürtünme kaynağında ise, frenleme ve yığıma fazları içiçe geçtiği için, dönme hızı sıfıra ulaşana kadar ısı üretimi devam edecektir. Bu nedenle, sürtünme kaynağında, MIAB kaynağında gerçekleşen hızlı soğuma olayı gerçekleşmemektedir. MIAB kaynağında, arkın dönmesi esnasında yüksek sıcaklıklara çıkan kaynak arayüzünde (~1050° C), bir miktar karbon atomu yanmaya başlamaktadır. Takiben gelişen hızlı soğuma fazında da, arayüzde bir miktar dekarbürizasyon görülmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde kaynak çizgisinin dövme braket tarafında 10-50 µm uzunluğunda dekarbürize bir bölge tespit edilmiştir. Bu bölge, literatür çalışmalarında da görülmektedir.
- Her iki kaynak tekniğinde de, kaynak arayüzünde daha kaba taneli perlit ve bir miktar tane sınırı ferrit gözlemlenmiştir. Malzemelerin sertliğine bağlı olarak da bir miktar martenzit gözlemlenebilmektedir. ITAB bölgesi genellikle ince yapılı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. MIAB kaynağı arayüzünde, malzemenin çekme dayanımını etkilemeyecek oranda, bir miktar beynitik mikroyapıya da rastlanmıştır. Her iki kaynak yönteminde de kaynak bölgesinde olabildiğince ince taneli yapı elde edilmesi hedeflenmelidir.
- SEM ile yapılan kaynak arayüzü incelemesinde, her iki teknikte de oksit, inklüzyon ya da boşluk görülmemiştir.
- Yapılan çekme testleri neticesinde, optimum sürtünme kaynağının çekme dayanımı ve % uzama değerleri, MIAB kaynaklı numuneden bir miktar daha iyidir. Yapılan petal testleri neticesinde, sürtünme kaynaklı optimum numunenin petal çatlağı uzunluğu daha düşük çıkmıştır.

- Çekme testi sonrası kırılma yüzeyleri incelendiğinde, optimum sürtünme kaynağı numunesi ile MIAB kaynağı numunesinin, sünek kırılma davranışı gösterdikleri söylenebilir. Her iki durumda da, kırılma yüzeylerinde bal köpüğü görünümü yakalanmıştır, küçük boşluklar ve küresel çukurluklar yüzey görünümünde baskındır. Her iki kaynak yönteminde oluşan çukurlukların derinlikleri benzer karakterdedir.
- Kaynaklı parçanın dayanımı, doğru kaynak parametrelerinin seçimine bağlıdır. MIAB kaynağında, ark hızının iki parçanın karşılıklı birbirine bakan yüzeylerini yumuşatacak kadar hızlı, eritmeyecek kadar yavaş oluşturulması gereklidir. Ayrıca, takib eden yığma fazında, ısı kaynağının aniden kapatılması ve hızlı soğumaya istinaden, dekarbürize bölgenin kaynak dudağına doğru itilmesi için, uygun basınç değerinin seçilmesi gereklidir.
- MIAB kaynağı sürtünme kaynağına alternatif bir metod olarak başarıyla kullanılabilir. MIAB kaynağının karmaşık geometrili parçaların kaynatılmasında sürtünme kaynağına göre üstünlüğü vardır. Fakat, yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür ki, MIAB kaynak makinasının kullanım ve bakımı, çok fazla uzmanlık gerektirir, sürtünme kaynağı makinasını kullanmak ve bakımını yapmak ise, çok daha kolaydır. MIAB kaynak makinasındaki karmaşıklıktan ötürü, operatörün çok iyi eğitilmesi gerekir.

5.2. Önerilen Çalışmalar

5.2.1. Sürtünme kaynağı ile kaynatılmış alüminyum parçaların optimizasyonu

Otomobil ve kamyonların hemen hemen hepsi, fosil yakıtlar kullanmaktadır. Oysa fosil yakıtlar, yenilenebilir bir enerji kaynağı değildir. Fosil yakıtların ne zaman tükeneceği tartışılır olsa da, tükenmesi kaçınılmazdır. Bu yüzden, alternatif enerji kaynaklarını araştırmak gereklidir. Alternatif enerji kaynakları bulunana kadar, elimizde bulunan yenilenemeyen kaynakları, yani fosil yakıtları, daha verimli kullanmaktan başka bir çaremiz yoktur. Bu kaynakların verimli kullanımı sayesinde, daha iyi ve yeni enerji kaynakları bulunana kadar, yakıt ekonomisi yaparak, kullanım sürelerini uzatmayı başarabiliriz. Yüksek teknoloji güç aktarma sistemleri ve alternatif yakıtlar dışında yapılabilecek iyileştirmelerin başında, güvenlik ve çarpışma performanslarından ödün vermeden, otomobil parçalarını hafifleterek yakıt ekonomisine katkıda bulunmaktır.

Karbon salınımını azaltmak için, önümüzdeki dönemde otomotiv endüstrisinin çalışacağı en önemli iki konu, yakıt sarfiyatının azaltılması ve ağırlığın azaltılmasıdır. Bu nedenle alüminyum alaşımlı parçaların kullanımının daha da yaygınlaşacağı söylenebilir. Sonuç olarak, alüminyumdan yapılan parçaların sürtünme kaynağı ile kaynatılması, yakın gelecekte daha da ilgi çekecek bir konu haline gelecektir. Üstelik bu konuda literatürde yayınlı eser sayısı da çok kısıtlıdır.

5.2.2. MIAB kaynak yönteminin optimizasyonu

Bu tez çalışmasında sürtünme kaynağının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada, MIAB kaynak yöntemine, kaynak arayüzünde oluşan dekarbürize bölgenin minimize edilmesi için optimizasyon uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Anık S., *Kaynak Tekniği El Kitabı*, 1. Baskı, Gedik Eğitim Vakfı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, İstanbul, 1991.
- [2] Vural M., *Welding Processes and Technologies*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 44-45, 2014.
- [3] Moore D. F., *Manufacturing Processes*, 1st ed., Pergamon Press, Oxford, England, 267-271, 1975.
- [4] Ertuğ A., Sürtünme Kaynağı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 1997, **21**(241), 46-54.
- [5] Ateş H., Kurt A., Turker M., Sürtünme Kaynağı, *Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 22-24 Ekim 1999.
- [6] Dede A., Soy U., Aslanlar S., Sürtünme Kaynak Yöntemi, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2002, **6**(1), 1-10.
- [7] Tülbenççi K., Yılmaz M., Farklı Takım Çeliklerinin Katı Hal Kaynağı, *II. Kaynak Sempozyumu*, İstanbul, 13-15 Kasım 1989.
- [8] Kreye H., Melting Phenomena in Solid State Welding Processes, *Welding Journal*, 1977, **56**(5), 154-158.
- [9] Duffin F. D., Bahrani A.S., Frictional Behavior of Mild Steel in Friction Welding, *Wear*, 1973, **26**(1), 53-74.
- [10] Rao M., Hazlett T. H., A Study of the Mechanisms Involved in Friction Welding of Aluminum Alloys, *Welding Journal*, 1970, **49**(4), 181-188.
- [11] Gurgenli G., Onur M., Aydın H., Akata H. E., Laboratuvar Tipi Basınçlı Hava Beslemeli Sürtünme Kaynak Tesisatı Geliştirilmesi Üzerine Bir Çalışma, *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi (İAÜD)*, 2012, **4**(15), 51-60.
- [12] Francis A., Craine R. E., On a Model for Frictioning Stage in Friction Welding of Thin Tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1985, **28**(9), 1747-1755.
- [13] Healy J. J., McMullan D. J., Bahrani A. S., Analysis of Frictional Phenomena in Friction Welding of Mild Steel, *Wear*, 1976, **37**(2), 265-278.
- [14] Min K., Dissimilar Friction Welding of Titanium Alloys to Alloy 718, PhD Thesis, Ohio State University, Institute of Science, Columbus, 1993.

- [15] Phillips D., MIAB Welding of Chromium-plated Steel Tubular Components Utilizing Arc Voltage Monitoring Techniques, PhD Thesis, Ohio State University, Columbus, OH, USA, 2008.
- [16] Uzkut M., Unlu B. S., Yilmaz S. S., Akdag M., Friction Welding and its Applications in Today's World, *2nd International Symposium on Sustainable Development*, Sarajevo, Bosnia Herzegovina, 8-9 June 2010.
- [17] Batchelor A. W., Stachowiak G. W., Tribology in Materials Processing, *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, **48**(1-4), 503-515.
- [18] Sawai T., Ogawa K., Yamaguchi H., Ochi H., Yamamoto Y., Suga Y., Evaluation of Joint Strength of Friction Welded Carbon Steel by Heat Input, *Welding International*, 2002, **16**(6), 432-441.
- [19] Dunkerton S. B., Toughness Properties of Friction Welds in Steels, *Welding Journal*, 1986, **456**(4), 193-202.
- [20] Vendan A., Manoharan S., Buvanashakaran G., Nagamani C., Strength Assessment Using Destructive Testing on Magnetic Impelled Arc Butt Welded Alloy Steel Tubes and Subsequent Techno-economical Evaluation, *Journal of Manufacturing Process*, 2012, **14**(3), 328-335.
- [21] Balta B., Magnetically Impelled Arc Butt Welding Implementation on Truck Chassis Components, *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Detroit, USA, 9-13 June 2014.
- [22] Hiller F., Schmidt M., Breiksch J., Use of the Magnetarc Welding Process in the Production of Truck Cab Suspension Systems, *ThyssenKrupp Techforum*, 2003, **6**(1), 40-43.
- [23] Vendan A., Manoharan S., Nagamani C., MIAB Welding of Alloy Steel Tubes in Pressure Parts: Metallurgical Characterization and Non-destructive Testing, *Journal of Manufacturing Process*, 2012, **14**(1), 82-88.
- [24] Vendan A., Manoharan S., Buvanashakaran G., Nagamani C., Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Alloy Steel Tubes in Boilers-Establishment of Parameter Window, *Mechatronics*, 2011, **21**(1), 30-37.
- [25] Kachinsky V., MIAB Welding of Thick-walled Pipe Ends, The Tube and Pipe Journal, <http://www.thefabricator.com/article/tubepipeproduction/miab-welding-of-thick-walled-pipe-ends> (Ziyaret Tarihi: 26 Nisan 2016).
- [26] Iordachescu D., Iordachescu M., Georgescu B., Miranda R. M., Ruiz-Hervias J., Ocana J. L., Technological Windows for MIAB Welding of Tubes Featuring Original Longitudinal Magnetization System with Peripheral Solenoids, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(6-7), 951-960.
- [27] Vendan A., Manoharan S., Buvanashakaran G., Nagamani, C., Development of a MIAB Welding Module and Experimental analysis of Rotational

Behaviour of Arc-simulation of Electromagnetic Force Distribution During MIAB Welding of Steel Pipes Using Finite Element Analysis, *Int. Journal of Adv. Manuf. Technol*, 2009, **43**(11), 1144-1156.

- [28] Vendan A., Manoharan S., Buvanashakaran G., Nagamani C., Investigation of Weld Parameters in MIAB Welding Process by Developing a Module-validation Using Finite Element Analysis, *Journal of Manufacturing Engineering*, 2008, **4**(7), 24-29.
- [29] Norrish J., Cuiuri D. Hossain M., Modelling and Simulation of the Magnetically Impelled Arc Butt (MIAB) Process for Transmission Pipeline Applications, *International Pipeline Integrity Conference Australia: WITA*, Vienna, Australia, 17-18 February 2005.
- [30] Kachinsky V. S., Krivenko V. G., Ignatenko V. Y., Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Hollow and Solid Parts, *Welding in the World*, 2002, **46**(7/8), 49-56.
- [31] Xiancong H., Ruilin X., A Study of Magnetically Impelled Arc Butt Welding, *Transactions of the China Welding Institution*, 1985, **6**(3), 131-136.
- [32] Gültekin N., *Kaynak Tekniği*, 1. Baskı, Engin Ofset, İstanbul, 1991.
- [33] Şahin M., Akata H. E., Joining with Friction Welding of Plastically Deformed Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **142**(1), 239-246.
- [34] Şahin M., Akata H. E., An Experimental Study on Friction Welding of Medium Carbon and Austenitic Stainless Steel Components, *International Lubrication and Tribology*, 2004, **56**(2), 122-129.
- [35] Şahin M., Akata H. E., Gülmez T., Characterization of Mechanical Properties in AISI 1040 Parts Welded by Friction Welding, *Materials Characterization*, 2007, **58**(10), 1033-1038.
- [36] Şahin M., Evaluation of the Joint-interface Properties of Austenitic Stainless Steels (AISI 304) Joined by Friction Welding, *Materials and Design*, 2007, **28**(7), 2244-2250.
- [37] Şahin M., Characterization of Properties in Plastically Deformed Austenitic Stainless Steels Joined by Friction Welding, *Materials and Design*, 2009, **30**(1), 135-144.
- [38] Akata H. E., Şahin M., İpekçi M. T., An Investigation into Reutilizing of Waste Materials Using Friction Welding and Upset Manufacturing Methods, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2007, **59**(5), 230-235.
- [39] Handa A., Chawla V., Mechanical Characterization of Friction Welded AISI 304 Steels, *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 2013, **2**(10), 2818-2821.

- [40] Handa A., Chawla V., Mechanical Characterization of Friction Welded Dissimilar Steels at 1000 rpm, *Materials Engineering*, 2013, **20**(3), 102-111.
- [41] Sathiya P., Aravindan S., Noorul Haq A., Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, **29**(5/6), 505-511.
- [42] Hong M., Guoliang Q., Peihao G., Fei L., Banglong F., Xiangmeng M., Microstructure Characterization and Properties of Carbon Steel to Stainless Steel Dissimilar Metal Joint Made by Friction Welding, *Materials and Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.07.068.
- [43] Selvamani S. T., Palanikumar K., Optimizing the Friction Welding Parameters to Attain Maximum Tensile Strength in AISI 1035 Grade Carbon Steel Rods, *Measurement*, DOI: 10.1016/j.measurement.2014.03.008.
- [44] Paventhan R., Lakshminarayanan P. R., Balasubramanian V., Prediction of Friction Welding Parameters for Joining Aluminium Alloy and Stainless Steel, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60884-4.
- [45] Vairamani G., Kumar S. T., Malarvizhi S., Balasubramanian V., Application of Response Surface Methodology to Maximize Tensile Strength and Minimize Interface Hardness of Friction Welded Dissimilar Joints of Austenitic Stainless Steel and Copper Alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2013, **23**(8), 2250-2259.
- [46] Udayakumar T., Raja K., Afsal Husain T. M., Sathiya P., Prediction and Optimization of Friction Welding Parameters for Super Duplex Stainless Steel (UNS S32760) Joints, *Materials and Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.002.
- [47] Paventhan R., Lakshminarayanan P. R., Balasubramanian V., Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, **19**(1), 66-71.
- [48] Sathiya P., Aravindan S., Noorul Haq A., Paneerselvam K., Optimization of Friction Welding Parameters Using Evolutionary Computational Techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**(5), 2576-2584.
- [49] Anand K., Barik Kumar B., Tamilmannan K., Sathiya P., Artificial Neural Network Modeling Studies to Predict the Friction Welding Process Parameters of Incoloy 800H Joints, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, **18**(3), 394-407.
- [50] Ajith P. M., Barik Kumar B., Sathiya P., Aravindan S., Multiobjective Optimization of Friction Welding of UNS S32205 Duplex Stainless Steel, *Defence Technology*, 2015, **11**(2), 157-165.

- [51] Selvamani S. T., Palanikumar K., Umanath, K., Jayaperumal D., Analysis of Friction Welding Parameters on the Mechanical Metallurgical and Chemical Properties of AISI 1035 Steel Joints, *Materials and Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.056.
- [52] Mohammed Asif M., Kulkarni A. S., Sathiya P., Sunkrup Goel, The Impact of Heat Input on the Strength, Toughness, Micro-hardness, Microstructure and Corrosion Aspects of Friction Welded Duplex Stainless Steel Joints, *Journal of Manufacturing Process*, 2015, **18**(4), 92-106.
- [53] Prasanthi T. N., Sudha C., Ravikirana S. S., Kumar N. N., JanakiRam G. D., Friction Welding of Mild Steel and Titanium: Optimization of Process Parameters and Evolution of Interface Microstructure, *Materials and Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.141.
- [54] Ajith P. M., Afsal Husain T. M., Sathiya P., Aravindan S., Multi-objective Optimization of Continuous Drive Friction Welding Process Parameters using Response Surface Methodology with Intelligent Optimization Algorithm, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, **22**(10), 954-960.
- [55] Kuchuk S., Kachinsky V., Machine for Butt Welding of Pipes, 2010, U.S. Patent No. US2010/0230470 A1, *U.S. Patent and Trademark Office*.
- [56] Johnson K. I., Carter A. W., Dinsdale W. O., Threadgill P. L., Wright J. A., Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Mild Steel Tubing, *Welding Journal*, 1979, **4**(11), 17-27.
- [57] Taneko A., Arakida F., Takagi K., Analysis of Arc Rotation Velocity in Magnetically Impelled Arc Butt Welding, *Welding International*, 1987, **1**(3), 247-253.
- [58] Vendan S. A., Subba Reddy Mundla, Buvanashakaran, G., Feasibility of Magnetically Impelled Arc Butt (MIAB) Welding of High-Thickness Tubes for Pressure Parts, *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, **27**(5), 573-579.
- [59] Kim J. W., Choi D. H., A Study on Numerical Analysis of Magnetic Flux Density by a Solenoid for MIAB Welding, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2003, **217**(10), 1401-1407.
- [60] Iordachescu D., Georgescu B., Iordachescu M., Lopez R., Miranda R. M., García-Beltrán A., Characteristics of Miab Welding Process and Joints, *Welding in the World*, 2011, **55**(1), 25-31.
- [61] Kallee S., Nicholas D., Friction and Forge Welding Processes for the Automotive Industry, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/1999-01-3214.
- [62] American National Standards Institute, *Recommended Practices For Friction Welding*, 1st ed., American Welding Society, New York, 1989.

- [63] Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiments*, 5th ed., Wiley Series in Probability and Statistics, New York, 2001.
- [64] Osanna P. H., Durakbasa M. N., Quality in Industry, *Welding Research*, 2008, **87**(2), 178-186.
- [65] Sheehy P., *The Black Belt Memory Jogger*, 1st ed., GOAL/QPC and Six Sigma Academy, Methuen, 2002.
- [66] Minitab Statistical Software, 14th ed., Minitab Inc., Pennsylvania, 2005.
- [67] Montgomery D., *Introduction to Statistical Quality Control*, 5th ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2005.
- [68] Runger G. C., Montgomery D., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 3rd ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2002.
- [69] Cochran W. G., Cox G. M., *Experimental Designs*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1957.
- [70] Forrest W., Breyfogle III., *Implementing Six Sigma, Smarter Solutions Using Statistical Methods*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 2003.
- [71] <https://sites.google.com/site/docstatistics/manual/2-analysis-tools/2-1-analysis-of-variance-anova> (Ziyaret Tarihi: 26 Nisan 2016).
- [72] Benyounis K. Y., Olabi A. G., Optimization of Different Welding Processes Using Statistical and Numerical Approaches-A Reference Guide, *Advances in Engineering Software*, 2008, **39**(6), 483-496.
- [73] Reisgen U., Schleser M., Mokrov O., Ahmed E., Statistical Modeling of Laser Welding of DP/TRIP Steel Sheets, *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(1), 92-101
- [74] Benyounis K. Y., Olabi A. G., Hashmi M. S. J., Optimizing the Laser-welded Butt Joints of Medium Carbon Steel Using RSM, *Journal of Materials Processing Technology*, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.067.
- [75] Reisgen U., Schleser M., Mokrov O., Ahmed E., Optimization of Laser Welding of DP/TRIP Steel Sheets Using Statistical Approach, *Optics & Laser Technology*, DOI: 10.1016/j.optlastec.2011.06.028.
- [76] Myers R. H., Montgomery D. C., *Response Surface Methodology*, 2nd ed., Wiley Series in Probability and Statistics, New York, 2002.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Balta B.**, Arıcı A. A., Yılmaz M., Optimization of Process Parameters for Friction Weld Steel Tube to Forging Joints, *Materials and Design*, DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.072.
- [2] **Balta B.**, Sonmez F., Cengiz A. K., Speed Losses in V-ribbed Belt Drives, *Mechanism and Machine Theory*, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.016.
- [3] **Balta B.**, Sonmez F., Cengiz A. K., Experimental Identification of the Torque Losses in V-ribbed Belt Drives Using the Response Surface Method, *Proc. ImechE, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2015, **229**(8), 1070-1082.
- [4] **Balta B.**, Solak H. A., Erk O. Durakbasa N., A Response Surface Approach to Heavy Duty Truck Rear Underrun Protection Device Beam Optimisation, *International Journal of Vehicle Design* (Accepted).
- [5] **Balta B.**, Erk O. Solak H. A., Durakbasa N., Pareto Optimization of Heavy Duty Truck Rear Underrun Protection Design for Regulative Load Cases, *SAE Technical Paper*, DOI: 10.4271/2014-01-9027.
- [6] **Balta B.**, Magnetically Impelled Arc Butt Welding Implementation on Truck Chassis Components, *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Detroit, USA, 9-13 June 2014.
- [7] Erk O. Solak H. A., **Balta B.**, Durakbasa N., Heavy Duty Truck Rear Underrun Protection Design for Regulative Load Cases, *OTEKON' 14*, 7. *Otomotiv Kongresi*, Bursa, Türkiye, 26-27 Mayıs 2014.
- [8] **Balta B.**, Sonmez F., Cengiz A. K., Torque Loss Measurements on Poly V-Ribbed Belt Drive Systems, *ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Nantes, France, 2-4 July 2012.
- [9] **Balta B.**, On the Parametric Effects of the 5th Wheel Mounting Bracket Design Using DoE, *OTEKON' 12*, 6. *Otomotiv Kongresi*, Bursa, Türkiye, 4-5 Haziran 2012.
- [10] **Balta B.**, Sonmez F. O., Cengiz A. K., Gage Repeatability and Reproducibility Investigations of a Test Rig Using Anova/Xbar-R Method, *ASME, International Mechanical Engineering Conference*, Denver, USA, 11-17 Nov 2011.
- [11] **Balta B.**, Çınar A., Balta B., Fuel Tank Bracket & Strap Design Iterations Considering The Assembly Load Effects, *OTEKON' 10*, 5. *Otomotiv Kongresi*, Bursa, Türkiye, 7-8 Haziran 2010.

- [12] **Balta B.**, Çınar A., Tag Axle Lifting Mechanism Implementation on Cargo Trucks, *Simulia Abaqus Kullanıcılar Toplantısı*, İstanbul, Türkiye, 12-13 Kasım 2009.
- [13] **Balta B.**, Çay B., Bülbül R. Palacı U. İkinci Dingil Çamurluk Arka Braketi, 2015, TR 201110511 B, *Türk Patent Enstitüsü*.
- [14] **Balta B.**, Çay B., Bülbül R. Palacı U. İkinci Dingil Çamurluk Ön Braketi, 2015, TR 201110510 B, *Türk Patent Enstitüsü*.



ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında İstanbul'da doğdu. Makina Mühendisliği öğrenimini Yıldız Teknik Üniversitesi'nde 1998-2002 yılları arasında onur listesine girerek tamamladı. 2002 yılında Yüksek Lisans öğrenimine başladığı Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında Yüksek Makina Mühendisi diplomasını aldı. 2002-2007 yılları arasında Boğaziçi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2007 yılında Ford Otosan Motor ve Güç Aktarma Organları Bölümü'nde Ürün Geliştirme Mühendisi olarak işe başladı. 2008-2011 yılları arasında Ford Otosan Yapısal Dayanım ve Sonlu Elemanlar Analiz Ekibi'nde görev aldı. 2011-2013 yılları arasında Gövde Mühendisliği Bölümü'nde çalıştı. 2013 yılından günümüze Ford Otosan Şasi Mühendisliği Bölümü'nde Kıdemli Ürün Geliştirme Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir. 2009 yılında Uzman Kara Kuşak diplomasını aldı. Bu tarihten itibaren 88 adet projede Uzman Kara Kuşak olarak projeleri yönetti. Yürüttüğü 6 Sigma Kara Kuşak projeleri ile 2013, 2014 ve 2015 yıllarında Ford Otosan Üstün Başarı ödülü aldı. Ford Otosan'da 15'in üzerinde Yeşil Kuşak Sınıf Eğitimi verdi. 30'a yakın patent başvurusu yaparak, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 yılları arasında Ford Otosan Patent Başvuru ödüllerini aldı. Yaptığı patentlerden 2 tanesi patent tescil belgesi aldı, diğerleri halen tescil süreci içerisinde. 4 adet SCI kapsamında bulunan yayının ilk yazarıdır. 4 adet SCI dışı yayının ilk yazarıdır. 4 adet ulusal bildirisi bulunmaktadır. 1 adet SCI kapsamındaki dergiye gönderilmiş ve incelemede olan makalesi vardır. Ayrıca, Proc. ImechE, Part D: Journal of Automobile Engineering ve SAE dergilerinde hakemlik görevi yürütmektedir.