

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**RAMOR 500 ÇELİĞİNİN TOZALTI KAYNAĞIYLA
BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANSYS PAKET PROGRAMIYLA
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Semih TAŞKAYA
(151140101)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ana Bilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri
Programı
Bilim Dalı: Malzeme

Danışman: Doç. Dr. Ali Kaya GÜR

ARALIK-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAMOR 500 ÇELİĞİNİN TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİ VE
ANSYS PAKET PROGRAMIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih TAŞKAYA

(151140101)

Ana Bilm Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri Programı

Bilim Dalı: Malzeme

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali Kaya GÜR

ARALIK-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAMOR 500 ÇELİĞİNİN TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİ
VE ANSYS PAKET PROGRAMIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih TAŞKAYA

(151140101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21.11.2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 11.12.2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ali Kaya GÜR (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Tülay YILDIZ (F.Ü.)

Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK (B.Ü.)

ARALIK-2017

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmamın hazırlanmasında her konuda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ali Kaya GÜR' e ve bu seviyeye gelmemde emeği geçen tüm hocalarıma sonsuz teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Her konuda değerli bilgi ve tecrübelerini örnek aldığım, çalışmalarında her zaman yanımda olan her türlü desteğini, ilgisini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli Hocam ve canım ablam Araş. Gör. Dr. Nida KATI' ya sonsuz çok teşekkür ederim, saygı ve sevgilerimi sunarım, iyi ki varsınız.

Değerli bilgi ve yardımlarıyla her zaman destek veren Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Sermin OZAN hocama ve Sayın Doç. Dr. Tülay YILDIZ hocama çok teşekkür ederim, ellerinizden öper, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Deney çalışmalarında her zaman her konuda yanımda olan, değerli bilgi ve tecrübeleriyle her zaman desteğini esirgemeyen değerli abilerim Geliştirme ve İnovasyon Uzmanı Necmettin YİĞİTTÜRK'e ve Feyzi Ataman BİLEN'e çok teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan desteğini hep hissettiğim arkadaşım Makina Müh. Mahmut TANSU'ya teşekkür ederim. Ayrıca yanımda olan desteklerini esirgemeyen yüksek lisans arkadaşlarım Gökhan Şerif GÜNER, Muhammet Hulusi CENGİZ ve Büşra ŞEKER'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarında malzeme teminini sağlayan, her zaman desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen değerli bilgileriyle yardımcı olan OERLİKON firmasına ve Satış Destek Bölüm Lideri Murat ALPASLAN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu tezin oluşturulmasına TEKF.16.24 nolu proje kapsamında desteklenen ve maddi imkânları sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) birimi ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Benim bugünlere gelmemi sağlayan her zaman her konuda yanımda olan, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen abim Öğretim Görevlisi Harita Yüksek Mühendisi Selim TAŞKAYA'ya, babam ve anneme çok teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Semih TAŞKAYA

ELAZIĞ-2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLOLAR LİSTESİ	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. ZIRH ÇELİKLERİ	6
2.1. DÖVME ZIRH ÇELİKLERİ	6
2.2. DÖKME ZIRH ÇELİKLERİ	7
2.3. ZIRH TEKNOLOJİSİ	9
2.4. ZIRH UYGULAMALARI	11
2.5. ZIRH ÇELİKLERİNİN ÖZELLİKLERİ	13
2.6. ZIRH ÇELİKLERİNİN FİZİKSEL METALURJİSİ	15
2.6.1. Zırh Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler	15
2.7. ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAK KABİLİYETİ	17
2.7.1. Bileşim.....	17
2.7.2. Kalınlık	18
2.7.3. Isıl İşlem Durumu	19
2.7.4. Sıcaklık	20
2.7.5. Safılık ve Homojenlik.....	21
2.7.6. Zırh Kaynağında Kullanılan Elektrodlar	21
2.7.7. Bazık Karakterli Örtülü Elektrodlar	21
2.7.8. Östenitik Elektrodlar.....	24
3. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ.....	26
3.1. TOZALTI KAYNAĞININ ÇALIŞMA PRENSİBİ	26

3.2.	TOZALTI KAYNAĞININ KULLANIM ALANLARI	28
3.3.	TOZALTI KAYNAĞI İLE KAYNAK EDİLEBİLEN METAL VE ALAŞIMLARI	28
3.4.	TOZALTI KAYNAĞI İLE KAYNAK EDİLEBİLEN METALLERİN KALINLIKLARI	28
3.5.	TOZALTI KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....	29
3.5.1.	Tozaltı Kaynağının Avantajları.....	29
3.5.2.	Yüksek Kaynak Gücü Ve Kaynak Hızı	30
3.5.3.	Derin Nüfuziyet	30
3.5.4.	Enerji Ekonomisi	30
3.5.5.	Elektrot Ekonomisi	31
3.5.6.	Yüksek Kaliteli Kaynak Dikişi	31
3.5.7.	Kaynak Dikişi Kalitesine Kaynakçının Bir Faktör Olarak Etkimemesi	32
3.5.8.	Yüksek Ark Kararlılığı	32
3.5.9.	Özel Koruyucu Donanımlara Gerek Duyulmaması	32
3.5.10.	Sürekli Kaynak Yapılabilmesi	32
3.5.11.	Birden Çok Tel ile Kaynak Yapılabilmesi	32
3.6.	TOZALTI KAYNAĞININ DEZAVANTAJLARI	32
3.7.	TOZALTI KAYNAĞINDA KULLANILAN YÖNTEMLER	33
3.8.	TOZALTI KAYNAĞINDA KULLANILAN KAYNAK TELLERİ VE TOZLARI	33
3.8.1.	Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri	33
3.8.2.	Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları	36
3.9.	TOZALTI KAYNAĞINDA DİKİŞ GEOMETRİSİ.....	37
3.10.	TOZALTI KAYNAĞINDA DİKİŞ GEOMETRİSİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER	39
3.10.1.	Akım Şiddetinin Etkisi	39
3.10.2.	Kaynak Geriliminin Etkisi	41
3.10.3.	Kaynak Hızının Etkisi	42
3.10.4.	Kaynak Ağız Açısının Etkisi.....	44
3.10.5.	Parçanın Bulunduğu Düzlemin Etkisi	44
3.10.6.	Akım Yoğunluğunun Etkisi	45
3.10.7.	Serbest Tel Boyunun Etkisi.....	46
3.10.8.	Kaynak Tozunun Tane Büyüklüğünün Etkisi	46
3.11.	TOZALTI ARK KAYNAĞINDA KAYNAK HATALARI.....	46
3.11.1.	Nüfuziyet Yetersizliği	47
3.11.2.	Yanma Olukları	47

3.11.3.	Gözenek Oluşumu	48
3.11.4.	Kalıntılar	48
3.11.5.	Çatlaklar	49
4.	ANSYS SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	50
4.1.	KAYNAKTA ISI TRANSFERİ	50
4.2.	KAYNAK İŞLEMİNDEKİ ISI TRANSFERİNİN ANALİTİK VE NÜMERİK ÇÖZÜMÜ.....	51
4.3.	ANALİTİK ÇÖZÜMLEME	52
4.4.	NÜMERİK METODLAR	53
4.5.	ANSYS’DE PROBLEM ÇÖZÜMÜ VE SİMÜLASYONU.....	54
4.5.1.	Ansyp Programının Yapısı	54
4.5.2.	Ansyp’de Geometrik Modelin Oluşturulması.....	55
4.6.	ELEMAN SEÇİMİ VE SONLU ELEMANLAR AĞININ OLUŞTURULMASI.....	57
4.7.	SOLID87 ELEMAN TİPİ	57
4.8.	SOLID187 ELEMAN TİPİ	58
5.	LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	59
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	71
6.1.	MALZEME VE METOT.....	71
6.2.	DENEYDE KULLANILAN MALZEMENİN ÖZELLİKLERİ	71
6.3.	KAYNAK TELİ VE KAYNAK TOZUNUN ÖZELLİKLERİ.....	72
6.4.	KARBON EŞDEĞERLİĞİNİN BELİRLENMESİ.....	74
6.5.	NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	74
6.6.	NUMUNELERİN TOZALTI KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ	76
6.7.	NUMUNELERİN RADYOGRAFİK MUAYENELERİ.....	80
6.8.	ÇEKME TESTİ NUMUNESİ VE MİKROYAPI NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI.....	82
6.9.	NUMUNE YÜZEYLERİNİN TAŞLAMA TEZGAHINDA DÜZLEŞTİRİLMESİ.....	84
6.10.	ÇEKME TESTİ	86
6.11.	MİKROYAPI İNCELEMELERİ	87
6.12.	MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	90
7.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	92
7.1.	KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN RADYOGRAFİK TESTLERİNİN İNCELENMESİ.....	92
7.2.	KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MİKROSERTLİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	96

7.3.	KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN ÇEKME DAYANIMLARININ İNCELENMESİ	98
7.4.	KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN DİKİŞ GEOMETRİLERİNİN İNCELENMESİ	108
7.4.1.	Kaynak Akım Şiddetinin ve Gerilimin Dikiş Geometrisine Etkisi	111
7.4.2.	Kaynak Hızının Dikiş Geometrisine Etkisi	113
		115
7.5.	KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERİN MİKROYAPILARININ İNCELENMESİ	115
8.	ANSYS PAKET PROGRAMINDA KAYNAKLI NUMUNELERİN	
	MODELLENMESİ, TERMAL VE MEKANİK ANALİZLERİN İNCELENMESİ	125
8.1.	KAYNAKLI MODELİN ANALİZ TÜRÜNÜN, ELEMENT TİPİNİN, MALZEME	
	ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE MODELİN 2 BOYUTLU OLARAK OLUŞTURULMASI .	127
8.2.	KAYNAKLI MODELİN 3 BOYUTLU HALE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ VE MALZEME	
	ÖZELLİKLERİNİN ANA MALZEME VE KAYNAK BÖLGESİNE TANITILMASI.....	129
8.3.	KAYNAKLI MODELİN MESHLENMESİ (AĞ YAPISININ OLUŞTURULMASI)	130
8.4.	KAYNAKLI NUMUNEYE ENERJİ GİRDİLERİNİN TANITILMASI	130
8.5.	KAYNAKLI MODELİN ANSYS 12.0 PROGRAMINDA ÇÖZÜMLENDİRİLMESİ (NODAL	
	SOLUTION).....	131
8.5.1.	250 A, 20 Volt Geriliminde Yapılan Kaynak İşlemine Ait Ansys Termal	
	Analiz Sonuçları ve Ana Malzeme Sıcaklık Grafikleri.....	131
8.5.2.	250 A, 25 Volt Geriliminde Yapılan Kaynak İşlemine Ait Ansys Termal	
	Analiz Sonuçları ve Ana Malzeme Sıcaklık Grafikleri.....	137
8.5.3.	250 A, 30 Volt Geriliminde Yapılan Kaynak İşlemine Ait Ansys Termal	
	Analiz Sonuçları ve Ana Malzeme Sıcaklık Grafikleri.....	143
8.5.4.	Modellerin Yapısal Mekanik Analiz Sonuçları	148
9.	GENEL SONUÇLAR	156
10.	ÖNERİLER.....	160
	REFERANSLAR	161
	ÖZGEÇMİŞ	175

ÖZET

RAMOR 500 ÇELİĞİNİN TOZALTI KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANSYS PAKET PROGRAMIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Ansys, mühendislik alanlarında kullanılan bir simülasyon yazılım programıdır. Bu program, modelleme aşamasından sonra kullanılır ve prototip üretilmeden önce, sanal yani program ortamında test imkanı verir. Kaynaklı yapının simülasyonu, kaynak işlemi üzerine yapılan incelemelerin en önemli konularından birisidir. Bu çalışmada; Ansys sonlu elemanlar metodu ile nümerik analiz ve matematiksel modeller kullanarak bilgisayarlar yardımıyla kaynaklı yapılarda karşılaşılan kompleks durumlar çözülmeye çalışılmıştır. Tozaltı kaynağı sonrasında numunelerin radyografik incelemesi, mekanik özellikleri ve mikroyapıları; çekme testi, optik mikroskopi ve SEM ile incelenmiş, kaynak bölgesinde Vickers sertlik skalası ile sertlik dağılımı belirlenmiştir. Numunelerin kaynak bölgesinde özellik gösteren yapılar için SEM-EDS-XRD analizleri yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi uygulanan numunelerinden kırık yüzeyleri SEM ile incelenerek kırılma tipi belirlenmiştir. Ansys paket programında kaynaklı birleştirmelerin modeli oluşturularak termal ve mekanik analizler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ramor 500, Ansys, Tozaltı Kaynağı, Termal ve Mekanik Analiz.

SUMMARY

JOINING OF RAMOR 500 STEEL BY SUBMERGED WELDING AND ITS EVALUATION USING THE ANSYS PACKAGED SOFTWARE

Ansys is a simulation software program used in the engineering fields. This program is used after the modeling phase and allows to test in the virtual, i.e. program, environment before the prototype is generated. Simulation of the welded structure is one of the most important subjects of the studies conducted on welding process. In this study, the complex situations encountered in the welded structures are tried to be solved with the help of computers by using Ansys finite elements method and numerical analysis and mathematical models. After the submerged welding; radiographic examination, mechanical properties and microstructures of the samples were investigated by using tensile test, optical microscopy, and SEM and the hardness distribution was determined in the weld metal by Vickers hardness scale. SEM-EDS-XRD analyses were carried out for the structures of the samples which showed characteristic in the weld metal. The fracture surfaces of the samples of the welded joints subjected to tensile test were investigated by using SEM and thus the fracture type was determined. Thermal and mechanical analyses were performed by generating the model of the welded joints in Ansys packaged software.

Keywords: Ramor 500, Ansys, Submerged Welding, Thermal and Mechanical Analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Bir tank üzerinde a) yan koruyucu panel ve b) mayına karşı taban sacı olarak zırh çeliği kullanımı.....	12
Şekil 2.2. Çelik ile zırhlandırılmış Fırtına obüsü	12
Şekil 2.3. Balistik koruma grupları	13
Şekil 2.4. Karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri	16
Şekil 3.1. Tozaltı ark kaynağının şema ve fotoğrafı	27
Şekil 3.2. Tozaltı kaynak yönteminin prensip şeması	27
Şekil 3.3. Tozaltı kaynak yönteminde telin yanma miktarı.....	30
Şekil 3.4. Tozaltı kaynak yönteminde dolgu miktarı	31
Şekil 3.5. Bir alın kaynağı dikişi	37
Şekil 3.6. İç ve dış dikiş formunun şematik gösterilişi	37
Şekil 3.7. Bir köşe kaynağı dikişi.....	38
Şekil 3.8. Tozaltı kaynak yönteminde akımın dikiş geometrisi üzerindeki etkisi.....	40
Şekil 3.9. Dikişin formu üzerinde akım şiddetinin etkisi	40
Şekil 3.10. Tozaltı kaynak yönteminde gerilimin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi	41
Şekil 3.11. Tozaltı Ark geriliminin dikişin formu üzerine tesiri	42
Şekil 3.12. Tozaltı kaynak yönteminde hızın dikiş geometrisi üzerindeki etkisi.....	43
Şekil 3.13. Kaynak hızının dikişin formu üzerine tesiri	43
Şekil 3.14. Kaynak ağzı açısının dikişin formu üzerine tesiri	44
Şekil 3.15. Parçanın bulunduğu düzlemdeki eğimin, dikişin formu üzerine etkisi.....	45
Şekil 3.16. Kaynak düzleminin kaynak dikişi ve nüfuziyet üzerine etkileri.....	45
Şekil 3.17. Tel çapının dikişin formu üzerine tesiri.....	46
Şekil 3.18. Nüfuziyet azlığının şematik ve radyografik görüntüsü.....	47
Şekil 3.19. Yanma olukların şematik ve radyografik görüntüsü.....	48
Şekil 3.20. Kalıntıların kaynak dikişinde şematik ve radyografik görüntüsü	48
Şekil 3.21. Kaynak dikişinde sıcak çatlama örneği.....	49
Şekil 3.22. Radyografik muayene yöntemiyle çatlağın görünüşü.....	49
Şekil 4.1. Kaynakta ısı transfer mekanizmaları.....	50
Şekil 4.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile ısı transferi problemlerinin çözümünün akış şeması	51

Şekil 4.3. Isı Kaynağından çeşitli mesafelerdeki soğuma eğrileri.....	52
Şekil 4.4. Termal analiz akış diyagramı ve örnek gösterimleri	56
Şekil 4.5. SOLID87 eleman tipinin tetregonal geometrik görünümü.....	57
Şekil 4.6. SOLID187 eleman tipinin tetregonal geometrik görünümü.....	58
Şekil 6.1. SI-307 ilave kaynak teli ve SF-104 alümina bazık kaynak tozu.....	73
Şekil 6.2. Deneyde kullanılan 3 mm kalınlığında Ramor 500 zırh çeliği	75
Şekil 6.3. Tel erezyon kesme makinası	75
Şekil 6.4. Ramor 500 zırh çeliği malzemesinin tel erezyon makinasında belirlenen ölçülerde kesilmesi	75
Şekil 6.5. Kaynak işlemi öncesi puntalama ile malzeme çiftlerini sabitleme	77
Şekil 6.6. Tozaltı kaynak uygulamasının şematik resmi	77
Şekil 6.7. ZD5-1000B / MZ-1250BF güç kaynağı ve kaynak traktör model serili tozaltı kaynak makinası ve kontrol panelleri.....	77
Şekil 6.8. Kaynak torcunun malzemeye mesafesinin ölçümü.....	78
Şekil 6.9. Ramor 500 malzeme çiftlerinin tozaltı kaynağı sırasındaki resimleri	78
Şekil 6.10. Tozaltı kaynağında birleştirilen numunelerin makro resimleri.....	79
Şekil 6.11. Kaynaklı numunelerin ön ve arka dikiş makro resimleri.....	80
Şekil 6.12. Kontrol paneli, güç kaynağı ve ısıtım cihazı.....	81
Şekil 6.13. Röntgen çekimi için hazırlanan numuneler	81
Şekil 6.14. Işık cihazında filmlerin incelenmesi ve elektronik çıktıdan radyografik raporun alınması.....	82
Şekil 6.15. Tel erezyon tezgâhı	82
Şekil 6.16. Tel erezyon tezgâhında çekme numunesi kesim işlemi ve sonrasında çıkan çekme numunesi	83
Şekil 6.17. Tel erezyonda kesilen çekme numunesi, çekme test numunesi ölçüleri ve makro fotoğrafı	84
Şekil 6.18. Taşlama tezgâhı.....	85
Şekil 6.19. Çekme numunelerinin bor sıvı soğutmalı taşlama makinası ile yüzey düzleştirme işlemleri.....	85
Şekil 6.20. Bor sıvı soğutmalı taşlama makinası ile yüzey düzleştirme işlemi öncesi ve sonrası makro resimler.....	85
Şekil 6.21. Hassas Kesme cihazında kaynaklı numunelerden mikroyapı çıkartılması	86
Şekil 6.22. Çekme test numunesi ölçüleri	87

Şekil 6.23. Çekme Test Cihazı	87
Şekil 6.24. Sıcak bakalite alma cihazı, bakalit numunesi ve optik mikroskop	88
Şekil 6.25. Numuneleri soğuk bakalite alma işlemleri.....	88
Şekil 6.26. Mikroyapı numunesi ve ölçüleri	89
Şekil 6.27. Zımparalama cihazı, parlatma (çuhalama) işlemi	89
Şekil 6.28. SEM cihazı ve XRD cihazı	90
Şekil 6.29. Mikrosertlik numunesi ölçüleri	91
Şekil 6.30. Mikrosertlik numunesinden yatay ve dikey eksenenden sertlik alınan noktalar ..	91
Şekil 6.31. Kullanılan mikrosertlik cihazı.....	91
Şekil 6.32. Mikrosertlik testi örnekleri.....	91
Şekil 7.1. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik görüntüleri	95
Şekil 7.2. Kaynaklı numunelerin yatay ekseninden alınan mikrosertlik ölçümlerinin grafiği	96
Şekil 7.3. Numunelerin kaynak bölgesinin dikey ekseninden alınan mikrosertlik ölçümlerinin grafiği	97
Şekil 7.4. Çekme testi öncesi ve çekme testi sonrası numunelerin makro resimleri.....	99
Şekil 7.5. N1 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	100
Şekil 7.6. N2 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	100
Şekil 7.7. N3 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	101
Şekil 7.8. N4 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	101
Şekil 7.9. N5 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	101
Şekil 7.10. N6 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	102
Şekil 7.11. N7 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	102
Şekil 7.12. N8 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	102
Şekil 7.13. N9 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi.....	103
Şekil 7.14. Fe/Cr/C/Ni elementlerinin üçlü faz diyagramı kombinizasyonları.....	105
Şekil 7.15. Fe/Mn faz diyagramı	105
Şekil 7.16. N1-N2-N3 nolu numuneye ait gerilim-gerinim grafiği.....	107
Şekil 7.17. N4-N5-N6 nolu numuneye ait gerilim-gerinim grafiği.....	107
Şekil 7.18. N7-N8-N9 nolu numuneye ait gerilim-gerinim grafiği.....	107
Çekme grafiklerinin genel bir özetinin numunelerdeki çekme, kopma ve % gerinim kıyaslanmalarının daha anlaşılır olması için Şekil 7.19 ve 7.20’de grafiksel analizlerde gösterilmiştir.	107

Şekil 7.19. Numunelerin max. çekme ve kopma gerilimlerinin grafiksel gösterimi.....	108
Şekil 7.20. Numunelerin % gerinim değerlerinin grafiksel gösterimi	108
Şekil 7.21. Kaynaklı numunelerin dikiş formlarının tespiti için kumpas ile ölçüm.....	110
Şekil 7.22. Tozaltı kaynak yönteminde akım şiddetinin ve gerilimin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi.....	112
Şekil 7.23. 250 A/20 cm/dk - 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinin kaynak dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N1-N4-N7).....	112
Şekil 7.24. 250 A/25 cm/dk - 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinin kaynak dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N2-N5-N8).....	113
.....	113
Şekil 7.25. 250 A/30 cm/dk - 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinin kaynak dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N3-N6-N9).....	113
Şekil 7.26. Tozaltı kaynak yönteminde kaynak hızının dikiş geometrisi üzerindeki etkisi	114
Şekil 7.27. 250 A/20 volt - 20, 25 ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızlarının dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N1-N2-N3).....	114
Şekil 7.28. 250 A/25 volt - 20, 25 ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızlarının dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N4-N5-N6).....	115
Şekil 7.29. 250 A/30 volt - 20, 25 ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızlarının dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N7-N8-N9).....	115
Şekil 7.30. Ramor 500 çelik çiftlerinin optik görüntü bölgelerinin şematik gösterimi..	116
Şekil 7.31. Kaynaklı numunelerin %2 Nital çözeltisi ile dağlanmış makro görüntüleri... ..	117
Şekil 7.32. Ramor 500 kaynaklı numunenin bölgelerinin ifade edilmesi	117
Şekil 7.33. Ramor 500 çelik çifti N1 nolu kaynaklı numuneye ait optik resimler	118
Şekil 7.34. Ramor 500 çelik çifti N1 nolu kaynaklı numuneye ait SEM görüntüleri	120
Şekil 7.35. N1 nolu numunenin kaynak bölgesinin EDS bölgesel analizi-1.....	121
Şekil 7.36. N1 nolu numunenin kaynak bölgesinin EDS bölgesel analizi-2.....	121
Şekil 7.37. N1 nolu numunenin kaynak geçiş bölgesinin EDS noktasal analizi.....	122
Şekil 7.38. N1 nolu numunenin kaynak bölgesinin EDS noktasal analizi.....	122
Şekil 7.39. N1 nolu numunenin ITAB bölgesinin EDS bölgesel analizi	123
Şekil 7.40. N1 nolu numunenin ITAB bölgesinin EDS noktasal analizi	123
Şekil 7.41. N1 nolu numunenin Ramor 500 bölgesinin EDS bölgesel analizi.....	124

Şekil 8.1. Ansys 12.0 paket programında kaynaklı modelin 2 boyutlu çizimi a) Modelin analiz türü b) Modelin element tipi c) Modele malzeme özelliklerinin veri girişleri d) Modelin keypoint (noktasal) olarak oluşturulması e) Modelin keypointlerinin line (çizgilerle) birleştirilmesi f) Modelde Ramor 500 ana malzemeye alan oluşturma g) Modelde diğer Ramor 500 ana malzemeye alan oluşturma h) Modelde ilave kaynak teline alan oluşturma	127
Şekil 8.2. Ansys 12.0 paket programında kaynaklı modelin 3 boyuta dönüşümü a) Modelin 3 boyuta dönüşüm ölçüleri b) 3 boyutlu kaynak modeli c) Kaynak bölgesine malzeme özelliklerinin tanımlanması d) Ramor 500 ana malzemeye malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	129
Şekil 8.3. Modele meshleme işlemi ile ağ yapısı oluşturma	130
Şekil 8.4. Modele enerji verilerinin tanımlanması a)-a') Ramor 500 ana malzemeye termal iletkenlik katsayısının ve oda sıcaklığının tanımlanması b)-b') Kaynak bölgesine ısı akısının tanımlanması	130
Şekil 8.5. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (2-6 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	132
Şekil 8.6. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (8-12 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	133
Şekil 8.7. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (14-18 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	134
Şekil 8.8. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (20-50 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	135
Şekil 8.9. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (300-1500sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	136
Şekil 8.10. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (2-6 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	138
Şekil 8.11. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (12-18 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	139
Şekil 8.12. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (21-27 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	140
Şekil 8.13. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (30-60 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	141

Şekil 8.14. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (300-1500 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	142
Şekil 8.15. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (4-8 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	143
Şekil 8.16. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (12-20 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	144
Şekil 8.17. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (24-32 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	145
Şekil 8.18. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (36-43 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	146
Şekil 8.19. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (70-1500 sn.) sıcaklık grafikleri ve ANSYS programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri	147
Şekil 8.20. Kaynak bölgesinden alınan mesafeye bağlı ansys gerilim grafikleri (a, a ^I - 20 volt / b, b ^I -25 volt / c, c ^I -30 volt), (a,b,c=Kaynak sırası, a ^I , b ^I , c ^I = Kaynak sonrası).....	150
Şekil 8.21. Kaynak gerilim dağılım simülasyon analizleri (A, A ^I - 20 volt / B, B ^I -25 volt / C, C ^I -30 volt) , (A,B,C=Kaynak sırası, A ^I , B ^I , C ^I = Kaynak sonrası)	152
Şekil 8.22. Sıcaklığın neden olduğu kaynak distorsyonları (çarpılmalar) , deformasyon şekil değişimleri ansys analizleri (A, A ^I - 20 volt / B, B ^I -25 volt / C, C ^I -30 volt), (A,B,C=Kaynak sırası, A ^I , B ^I , C ^I =Kaynak sonrası).....	153
Şekil 8.23. Kaynak bölgesinin ansys'de ısı dağılımının genel simülasyon bileşke vektörel analizi	155

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Dövmə zırh çeliği için kimyasal bileşim örnekleri.....	7
Tablo 2.2. Dökme zırh çeliği bileşim örnekleri	8
Tablo 2.3. *7.62 ve **14.5 mm zırh delici mermilere karşı zırh çelikleri	9
Tablo 2.4. *7.62 ve **14.5 mm AP mermilerine karşı zırh malzemelerinin özellikleri	11
Tablo 2.5. Zırh çeliklerinde imalat işlemleri doğrultusunda istenen özellikler	14
Tablo 2.6. Zırh çeliklerinin kıyaslanması, sac kalınlığı; 25.4 mm	15
Tablo 2.7. Kaynak dikişi bileşimi	24
Tablo 2.8. Elektrod büyüklükleri ve kaynak pozisyonuna göre gerilim ve akım şiddeti değerleri.....	25
Tablo 3.1. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynak edilebilen parça kalınlıkları.....	29
Tablo 3.2. Tozaltı kaynak tellerindeki manganez miktarı	34
Tablo 3.3. Tel içerisine katılan alaşım elamanlarının kaynağa kazandırdığı özellikler	34
Tablo 3.4. DIN 668'e göre kaynak tellerinin toleransları	34
Tablo 3.5. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri	35
Tablo 3.6. Tozaltı kaynak parametrelerinin kaynak dikişi kalitesine etkisi	38
Tablo 6.1. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal bileşimi.....	72
Tablo 6.2. Ramor 500 zırh çeliğinin mekanik özellikleri	72
Tablo 6.3. Ramor 500 zırh çeliğinin fiziksel özellikleri	72
Tablo 6.4. Deneyde kullanılan ilave kaynak telin kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, termal iletkenliği.....	73
Tablo 6.5. Deneyde kullanılan kaynak tozunun kimyasal bileşimi	73
Tablo 6.6. Tozaltı kaynağında kaynak parametreleri.....	76
Tablo 6.7. Tozaltı kaynak makinasının teknik özellikleri.	76
Tablo 6.8. Metalografik incelemede kullanılan dağlayıcılar ve dağlama süreleri.....	89
Tablo 7.1. Radyografik muayene parametreleri	93
Tablo 7.2. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesinde görülen hatalar ve tanımlar	94
Tablo 7.3. Çekme Testi yapılan numunelerin max. çekme, kopma gerilme ve % uzama değerleri.....	106
Tablo 7.4. Kaynak dikiş geometrisi ölçüm değerleri.....	111
Tablo 8.1. N2 numunesinin malzeme model keypoint (koordinat) ölçüleri	128

SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ

ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
SEM	: Scanning Electron Microscope
EDS	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
XRD	: X Işınları Difraksiyonu
ANSYS	: Analysis System
RHA	: Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği
SAW	: Submerged Arc Welding
ZMA	: Zırhlı Muharebe Aracı
KSK	: Kihara, Suzuki ve Kanatani formülü
AWS	: American Welding Society
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
AB	: Alümina Bazık

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanlık kendini korumaya ihtiyaç duymuştur. Bunun için çeşitli silahlar geliştirmiştir. İnsanların silahlanmasına karşın, yine insanlar kendini korumaya çalışmıştır. Kendini korumak için kalkan ve zırhlar geliştirilmiştir. Savaşmak için sert cisimler kullanan insanlar, yine sert cisimleri korunmak için kullanmıştır. Barut ve ateşli silahların kullanımı ile savaşlar ve silahlar yepyeni boyutlar kazanmıştır. Silahların menzilleri ve hasar güçleri artarken boyutları ve ağırlıkları küçülmüştür. Buna paralel olarak bina, araç ve özellikle personel zırhında yüksek dayanım ve düşük yoğunluk ihtiyacı kaçınılmaz olmuştur [1]. Buradan da anlaşılabacağı üzere zırh teknolojisindeki gelişmeler, silah teknolojilerindeki gelişmelerle paralellik göstermekte olup bilhassa son yıllarda malzeme teknolojilerindeki ilerleme ve simülasyon programlarındaki gelişmeler ile önemli derecede yol kat etmiştir [2].

Kullanım amacı olarak bir zırh çeliğinin patlayıcı ve deliciye karşı dirençli olması gerekir. Bu özelliği karşılayabilmesi için mukavemet ve sertlik değerlerinin yüksek olması istenir. HV 600 değerinin üzerindeki sertlik değerleri çeliğe kırılmalık özelliği kazandıracağından, zırh çeliği üzerine gelen darbelerle karşı kırılmalık davranış gösterecektir. Zırh çeliklerinde kimya kompozisyonu, su verme, temperleme ve östenitleştirme gibi ısı işlemleri çok büyük önem arz etmektedir [3].

Ramor zırh çelikleri, herhangi bir patlamadan ve silahla saldırıdan korunmak için üretilmiştir. Buna ek olarak, Ramor çeliklerinin sertliği ve sağlamlığı nedeniyle mükemmel balistik özellikleri vardır. Ramor çeliklerinin, Ramor 400, Ramor 450, Ramor 500, Ramor 550 gibi tipleri vardır. Bu numaralar HBW sertlik değerlerini göstermektedir. Ramor 400 ve Ramor 450, patlamaya dayanan basınca karşı üretilir. Öte yandan, Ramor 500 ve Ramor 550 yüksek hız darbeleri için üretilmektedir.

Ramor 500 zırh çelikleri yüksek hız darbelerine karşı üretilir. Ayrıca araç aydınlatması için otomotiv endüstrisinde kullanılır. Örneğin, beton bir karıştırıcıda yerleşik donanım, yapısal çelikten daha ince plaka ile Ramor 500 çelik kullanılarak üretilebilir. Böylece daha dinamik verimlilik ve yakıt tasarrufu sağlar [4].

American Welding Society (AWS) tozaltı ark kaynağını şöyle tanımlar. “Tozaltı kaynak yöntemi, iş parçası ile metal tel elektrot / elektrotlar arasında, bir ark / arklar oluşturarak bunların ısıtılmasını sağlayan ve bu suretle birleşmelerini temin eden bir ark kaynağı prosesidir. Ark ve erimiş metal tanecikli yapıya sahip bir toz örtüsü ile korunur. Basınç kullanılmaz. Dolgu metali, elektrot / elektrotlar ile toz ve metal taneciklerinden elde edilir” [5].

Kaynak maliyetini düşürmek, işin yapım süresini kısaltmak ve kaynakçı faktörünün dikişin kalitesine olan etkisini azaltmak için, kaynak prosesinde otomasyona gidilmiştir. Buradaki amaç, elektrot telini mekanik bir tertibat yardımı ile otomatik olarak sürekli ilerletip, ark bölgesine çok yakın bir yerden de akım vererek telin yüklenebileceği akım şiddetini artırmak ve böylece erime gücünü yükseltmektir.

Tozaltı kaynak yöntemi, 1933 yılında ABD’de geliştirilmiş ve 1937 yılından sonra da Avrupa’da uygulama alanına girmiştir. 2. Dünya Savaşı sırasında özellikle Almanya’da geniş çapta uygulanmıştır. Almanya’da LINDE tarafından Gektro-Linde-Rapid-Verfahren diye geliştirilen kaynak yöntemine kısaca Ellira- Verfahren adı verilmiştir.

Yüksek erime gücüne ve kaynak hızına sahip olmakla birlikte çeşitli türden çeliklerin kaynağı için de çok uygun olan bu yöntem kazan, profil, gemi ve basınçlı kap üretimi ile dolgu kaynağı işlemlerinde yoğun bir biçimde kullanılmaktadır [6].

Bilgisayar tabanlı matematik simülasyonu modelleri, kaynak mühendisleri için gerekli takımları arttıracak deneysel masraflara ihtiyaç duymaksızın sonuçları tahmin edebilir. Bu modellerin geliştirilmesi, Roscnthal tarafından analitik çözümlemelerle 1940’larda başlamış, ancak 1980’lerde güçlü bilgisayar hamlesiyle hız kazanmıştır [7]. Goldak çalışmasında, kaynak mühendislerinin kaynak havuzu hakkındaki bilgilerini basit bir yolla göstermek istemiş, ancak bu çalışma basit bir problemten daha uzun ve günümüzdeki birçok metoddan deneysel verilerin regresyon analizinden daha güvenilir olmuştur [8]. Bununla birlikte geliştirilen nümerik modeller yöntemlerin anlaşılabilirliği, geliştirilmesi, kontrolü ve verimliliğinde bir artış sağlamıştır.

Kaynaktaki matematiksel modelleme, bir eşitlik kurarak kaynak işlemini tanımlamaktır. Matematiksel modellemeler, işlem parametreleri ile kaynaklama sonrasındaki metalürjik özellikleri ve yapılar arasındaki ilişkiyi gösterebilir. Kaynaktaki işlem parametrelerini ve optimum kaynak şartlarını tanımlamaya yardımcı olabilir. Bazı modellerin doğruluğu, yapıdaki gerilim analiz modellerini ve ısı transferini tanımlamak için kullanılan verilerin doğruluğuna bağlıdır. Nümerik modelleme ile yapılan sonuçların geçerli olması ve verilerin mukayesesi için deneysel verilerle birleştirilmesi gerekir. Kaynak işleminde gerilme dağılımı ve geçiş sıcaklık dağılımı birbirine bağlıdır. Kaynak işlemindeki plastik deformasyon nedeni ile üretilen ısı, kaynak arkından oluşan ısı ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir seviyededir [9]. Modellemelerde ideal kaynak şartlarının oluşturulması, kaynatılacak plaka içinde ısı iletimi için analitik çözümlemelerle termal dönüşümlerin hesaplanmasındaki ilk girişimlerde yarı sonsuz olarak ve ısı kaynağı çizginin basit bir noktası tarafından temsil edilir olarak varsayılır. Çözüm için varsayımlardaki bu sınırlamaların hemen, hemen hepsi analitik çözümlemelerin doğruluğunda ve ısı iletim denklemlerinin çözümünde doğrudan nümerik metotlar kullanmayı zorlaştırır. Doğrusal olmayan, sıcaklık ve difüzyon modellemede bağımsız olarak kullanılabilir ve faz değişimindeki gizli ısı ayrılabilir. Günümüzde nümerik modellemelerde genellikle ark kaynağının karmaşık bir ısı kaynağı temsili ile geçici ısı rejimi olarak kaynak yöntemlerinde göz önüne alınan çözüm yöntemi sonlu elemanlar metodudur. Bu yaklaşım tek bir enerji-denge eşitliği için bir çözümün zorluğunu azaltır. Arkın nümerik olarak temsili ısı akışının nasıl olacağı hakkında oluşum ve ilave olarak kaynak havuzunun son şekline etki eden hem kaynak havuzundaki kütle akışı hem de ergiyik metal içindeki ısı yayılımı akışı modellemede dikkate alınmak zorundadır. Son yıllarda kaynak esnasında oluşan ergime bölgesinin ve ısı transferinin etkilediği bölgedeki makro ve mikroyapının analizi konusunda çalışmalar yapılmakla beraber özellikle üç boyutlu çalışmalar konusunda çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Fakat bunun yanında kaynak esnasındaki mikroyapının modellenmesi [10], karakteristiği, kaynak havuzundan alaşımların buharlaşması [11]-[12], kaynak metalindeki çözülme gazları [13]-[14] konusunda literatürde çalışmalar bulunmaktadır.

Kaynak esnasında oluşan termal dalgalanmalar ve kaynak geometrisinin tahmini için kaynak havuzundaki ergime bölgesinin ve ısı transferinin detaylı olarak anlaşılması gerekmektedir. Son yıllarda, kaynak havuzundan iletilen ısı transferinin önemi vurgulanmaktadır. Matematiksel modellemede ısı iletimi için önemli olan faktörler ise yüzey geriliminin değişimi, elektromanyetik ve sınır kuvvetleridir. Birçok araştırmada kaynak havuzundaki ergime bölgesinin yapısı düzgün varsayılır. Fakat deneysel incelemeler ve teorik hesaplamalarda belirtildiği gibi kaynak havuzu ergime bölgesinde düzgün olmaktan çok, düzensiz bir oluşum söz konusudur [15]. Başlangıçta bazı araştırmacılar hareketli akışın iki boyutlu olduğunu göz önüne alarak kaynak havuzundaki ergime bölgesi ve ısı transferini modellemeye çalışmışlardır [16]-[17]. Bu çalışmalar, kaynak havuzunun ilerleme hızı ve sıcaklık tahmininin hesaplanmasında hareketin etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir. Kaynak havuzundaki hareketin modellenmesi çalışmaları 2 boyutlu olarak başlamıştır [16]-[17]. Bu hesaplamalar kaynak havuzundaki ergime bölgesi ve ısı transferinin tamamının tanımlanmasını sağlayamacağı düşünülmüştür. Ayrıca termal ve 3 boyutlu sıcaklık alanları mikroyapının gelişiminin gerçek hesaplamalarına ihtiyaç vardır. Kaynakta 3 boyutlu bir ısı türbülansı, termal akış modeli, mikroyapı gelişimi, kaynak havuzunda ısı akış ve ısı transferinin gerçek simülasyonunu başarmak için gereklidir. Kaynak esnasında hem ITAB'da hem de ısı akış bölgesinde çeşitli katı hal geçişi oluşmaktadır. Bu geçişler çoğunlukla termal alana ve malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Kaynak esnasında oluşan katı hal fazları dört grupta incelenebilir [18]. 1- difüzyon içeren faz değişimleri, 2- yer değişimsiz geçiş içeren faz değişimleri, 3- düzensiz birbirine bağlı ve 4- kabaca ve çözünerek yeniden dağılmış, tane büyümesi gibi katı hal işlemleri. Bu geçişler aynı zamanda oluşur ve kaynak işlemi esnasında termal dalgalanmanın karmaşıklığı sebebiyle her biri aktiftir. Kaynak mikroyapısının modellenme kabiliyeti, termal dalgalanma, faz değişimleri hesaplamaları ve faz geçiş teorisinin tam anlaşılabilmesine dayanır. Son yıllarda kullanılan programlar hem ergime bölgesi hem de ITAB da kaynak mikroyapısının tahminini yapabilmektedir.

Bazı faz geçiş modellemeleri çeliklerin kaynağında ITAB ve ergime bölgesinde mikroyapı tahmini için önemli oranda yol göstermektedir [19]–[25]. Ancak kaynaklamanın çeşitli bölgelerinde oluşan termal alanlar faz geçiş modellemeleri için gereklidir.

ITAB daki tane büyüme olayı bu bölgedeki hızlı termal dalgalanma ve adım sıcaklık değişimleri sebebiyle karmaşıktır. Hareketli olan ergime bölgesi çizgisinin yakını kaba taneli yapıdan oluşmakta ve malzemedeki sıcaklık değişimleri tane yapısını etkilediğinden göz önünde bulundurulmalıdır. Bu olay, tane büyümesi için yapılan klasik analitik eşitlikler tarafından simüle edilemeyebilir [26]. Sürekli sıcaklık ya da ortalama termal dalgalanma tek bir tane olarak farz edilir. Son yıllardaki bazı çalışmalarda ITAB daki tane büyümesi için Monte Carlo (MC) tekniği uygulanmıştır [27]–[30]. Bu tekniğin avantajı sadece tane büyümesinin kinetiğini değil aynı zamanda tane topolojisi hakkında da bilgi sağlamasıdır.

Bu çalışmada, piyasada zırh çeliği olarak kullanılan ve silahlı kuvvetlerde temel muharabe aracı olarak kullanılan araçlarda sıklıkla kullanılan Ramor 500 eliğinin farklı tozaltı kaynak parametrelerinde birleştirmektir. Birleştirmeler sonrasında arakesitte oluşan yapıların metalografik değerlendirilmesi yapılmış ve mekanik testlerle kaynak kalitesi tespit edilmiştir. Deneysel alışmalar sonunda; seçilen kaynak modeli ve elik malzeme için en uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesinde Ansys paket programının sanal ortamdaki test imknlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

2. ZIRH ÇELİKLERİ

Zırh çelikleri, genel olarak az alaşımlı, yüksek mukavemetli yapı çelikleridir. İmâl usulüne göre iki çeşit zırh çeliği vardır: dövme zırh çeliği ve dökme zırh çeliği [3].

2.1. Dövme Zırh Çelikleri

Dövme zırh çelikleri üç sınıfa ayrılmaktadır:

1.sınıf zırh çelikleri : Bunlar, mermi nüfuziyetine karşı maksimum direnci sağlamak amacıyla ısıtılma tabii tutulmuş dövme zırh çelikleridir.

2.sınıf zırh çelikleri : Bunlar, darbeye karşı maksimum direnci sağlayıcı ısıtılma tabii tutulmuş dövme zırh çelikleridir. Bu çelikler anti-tank mayınları, el bombaları ve patladığında şok yaratan diğer mermilere karşı direnç sağlar.

3.sınıf zırh çelikleri : Bunlar, genel anlamda, mermilere karşı direnç sağlayabilmek için sertlik ve çentik darbe değerleri iyileştirilmiş dövme zırh çelikleridir. Bu sınıf zırh çelikleri, savaş araçlarında kullanılmaz. Mermi deneylerinde ve onların kabul testlerinde kullanılır.

Dövme zırh çeliklerinin yapısı homojendir. İstenilen balistik mukavemeti sağlayabilecek çeşitli kimyasal bileşimde zırh çeliği olabilirse de, çok kullanılmakta olan iki bileşim Tablo 2.1 'de verilmiştir. İstenilen sertlik değerini elde edebilmek için uygun sıcaklıkta temperleme yapılır. Östenitleşme için sıcaklık hiçbir zaman 925 °C'yi aşmamalıdır. Su verme işleminden ve temperlemeden sonra çelik sıcaklığı hiçbir nedenle 315 °C' yi geçmemelidir [3].

Tablo 2.1. Dövme zırh çeliği için kimyasal bileşim örnekleri [31].

Element	Bileşim I	Bileşim II
Karbon	0,23 - 0,30	0,30 (1)
Manganez	0,85 - 1,00	1,40
Fosfor	Max. 0,03	max. 0,025 (2)
Kükürt	Max. 0,04	max. 0,025(2)
Silisyum	0,20 - 0,30	0,30
Nikel	0,90 - 1,10	0,50
Krom	0,75 - 0,90	1,50
Molibden	0,30 - 0,35	0,30
Vanadyum	-	0,15
Bakır	0,07 - 0,16	-

Tablo 2.1'deki karbon miktarı 50 mm kalınlığındaki levhalar içindir. 50 mm ile 100 mm kalınlığındaki levhalarda 0,33 ve 100 mm'den kalın levhalar için en çok 0,35 olabilir. Fosfor ve kükürt miktarı, mümkün mertebe düşük olmalı ve toplamı 0,04' ten fazla olmamalıdır.

2.2. Dökme Zırh Çelikleri

Dökme zırh çelikleri, iki sınıfa ayrılmaktadır.

1.sınıf dökme zırh çelikleri : Mermi nüfuziyetine karşı maksimum direnç sağlayacak şekilde ısıtılma işlemine tabi tutulmuş zırh çelikleridir. Bunlardan, zırh delici mermilere karşı mukavemet istenir.

2.sınıf dökme zırh çelikleri : Darbeye karşı maksimum direnç sağlayacak şekilde ısıtılma işlemine tabi tutulmuş zırh çelikleridir. Bunlardan, anti tank mayınları, el bombaları ve diğer patlayıcı mermilerin şok tesirlerine karşı mukavemet istenir [3].

Tablo 2.2. Dökme zırh çeliği bileşim örnekleri [32].

Element	Bileşim I		Bileşim II ortalama
	min.	max.	
Karbon	0,21	0,31	0,30
Manganez	1,30	1,80	1,50
Silisyum	0,25	0,75	0,50
Fosfor	-	0,05	(1)
Kükürt	-	0,05	(1)
Krom	0,20	0,70	(2)
Nikel	-	-	0,70
Molibden	0,25	0,45	0,20
Vanadyum	-	-	0,10
Bakır	-	-	0,50

Tablo 2.2.'ye göre fosfor ve kükürt mümkün mertebe düşük olmalı ve hiç bir zaman toplamaları 0,070' i aşmamalıdır. Krom miktarı 0,70 ve daha fazla olabilir.

Gelişmekte olan ülkeler savunma sanayisine yönelik araştırma geliştirme faaliyetlerini her geçen gün arttırmaktadır. Buna paralel olarak bu çalışmalar için ayrılan mali kaynaktan artmaktadır. Teknolojik gelişmeler, gelişmiş ateşli silahların modernleşmesini hızlandırmakta ve buna ek olarak koruyucu malzemelerin üretilebilirliğini artırmaktadır [33].

Tablo 2.3'de askeri ve sivil platformlarda modern silahların oluşturduğu tehditlere karşı kullanılan balistik koruma malzemeleri verilmiştir [34]. Koruyucu malzeme seçimi ateşli silahlardan çıkan merminin, penetratörün ya da ateşli parçacığın türü, geometrisi ve penetrasyon kinetiğine göre yapılır. Belirtilen malzemeler arasında homojen olarak haddelenmiş zırh çelikleri (RHA, Rolled Homogeneous Armor) askeri platformlarda çok çeşitli, personel ve mühimmat taşıyan araçlarda koruyucu malzeme olarak kullanılmalıdır [35].

Tablo 2.3. *7.62 ve **14.5 mm zırh delici mermilere karşı zırh çelikleri [35].

Zırh Malzemeleri	
Çelik* -RHA (HB 380) -Yüksek sertlik (HB 550) -İlk defa sertleştirilmiş (HB 440-600)	Cam Takviyeli* -E cam -S cam
Alüminyum -5083 alaşımı -7039 alaşımı -2519 alaşımı	Seramik* -Alüminyum oksit -Alüminyum oksit + Al -Bor karbür -Bor karbür + Al -Titanyum diborür
Kompozit** (seramik yüzeyli çok katmanlı) - Al + RHA - Çelik + RHA - E cam + RHA	

2.3. Zırh Teknolojisi

Bir ana savunma hattının en önemli unsuru ‘zırh’ korumasıdır. En mükemmel zırh malzemesi sertlik değeri çok yüksek ve kırılabilirliği az malzemelerdir. Zırhlı tasarımlarda, yenilikçi, her uygulamada ‘modüler’ kullanım ön plana çıkmaktadır. Buna paralel olarak da seramik içeren kompozit zırhların giderek yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Kullanılan malzemelerin yanısıra zırh teknolojilerinin ana unsurları aşağıda verilmiştir. Tüm bu unsurlar ve zırh malzemesinin bir bütünlük içerisinde ele alınması zırh teknolojileri için büyük önem taşımaktadır.

- Dökümantasyon ve kapsamlı bilgi
- Modelleme, benzetim unsurları ve tasarım
- Test unsurları ve sonuçları
- Entegrasyon ve atışlı denemeler.

Önceden de belirtildiği gibi bir savunma platformunun en önemli unsuru ‘zırh’ korumasıdır. Savunma platformu çeşitli yüzeyleri (motorun, gövde altının, mürettebatın, gövde geri bölmesi, cephe ve kulenin) korunması amacı ile her tür kinetik enerjili/kimyasal enerjili ve diğer mühimmatlara karşı en yüksek koruma sağlanması büyük önem taşımaktadır. İyi bir zırh malzemesinin sertliği yüksek ve kırılabilirliği düşük olmalıdır. Bununla birlikte ağırlıkta en önemli etkenlerden birisidir. Sürekli artan farklı tehditlerden dolayı zırh koruması özellikle araçlarda % 15-20’lik ilave ağırlık gerektirmiştir. Örnek olarak; M1 Abrams tankları 54 tondan 64 ton ağırlığa çıkmıştır. Ağırlığın bu artı yönde artması araçların manevra kabiliyetlerini zayıflatmakta, sevkیاتlarını zorlaştırmaktadır. Bundan dolayı zırh malzemeleri üzerindeki çalışmalarda, hafifletme üzerine yapılan çalışmalar özel bir önem taşımaktadır. Gelişmiş zırh malzemeleri dört ana bölüme ayrılırlar:

- (a) İleri metalik zırhlar,
- (b) İleri seramik kompozit zırhlar,
- (c) Polimer kompozit zırhlar,
- (d) Fabrikler (bez)

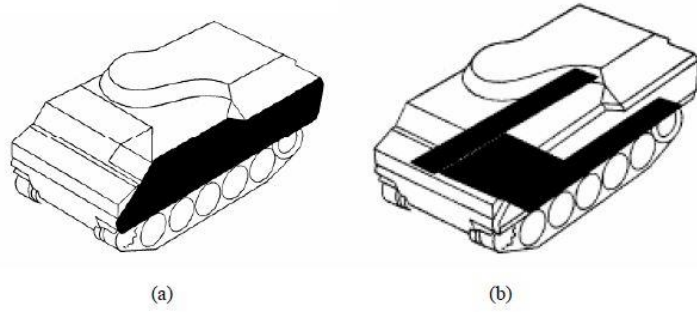
Zırhlı tasarımlarda modüler kullanıma uygun olan seramik içeren kompozit zırhlar popüler konumdadır. Zırh çeliği olarak bilinen Cr, Mn, Ni, Mo içeren düşük alaşımlı ve kompleks termomekanik işlemlerden sonra özel ısıtım işlemi görmüş çeliklerin (MIL-A-12560-Rolled Homogeneous Armor, RHA, haddelenmiş homojen zırh çeliği) yanı sıra zırh malzemeleri çok çeşitli kapsamlarda incelenebilirler. Tablo 2.4’de *7.62 ve **14.5 mm mermilere karşı çeşitli zırh malzemelerin yoğunluk ve kütle verim değerleri gösterilmiştir [36].

Tablo 2.4. *7.62 ve **14.5 mm AP mermilerine karşı zırh malzemelerinin özellikleri [36].

Zırh Malzemesi	Yoğunluk, (g/cm ³)	Alansal yoğunluk, (kg/m ²)	Kütle Verimi, (Em)
Çelik *			
- RHA (Sertlik 380 BHN)	7.86	114	1.00
- Yüksek sertlik (550 BHN)	7.88	98	1.16
- İki defa sertleştirilmiş (440-600 BHN)	7.88	64	1.78
Alüminyum			
- 5083 alaşım	2.70	128	1.0-1.2
- 7039 alaşım	2.78	106	1.08
- 2519 alaşım	2.80	100	1.14
Cam Takviyeli *			
- E cam	2.08	115	0.74
- S cam	2.05	93	1.23
Seramik *			
- Alümina	3.56	-	-
- Alümina + Al	3.20	42	2.75
- Bor karbür	2.45	-	-
- Bor karbür + Al	2.56	35	3.26
- Titanyum diborür	4.45	-	-
Kompozit** (seramik, katmanlı)			
- Al + RHA	-	137	2.63
- Çelik + RHA	-	131	2.75
- E cam + RHA	-	125	2.88

2.4. Zırh Uygulamaları

Haddelenmiş zırh çeliklerinin uygulama alanları: tank, obüs ve zırhlı muharebe araçlarıdır. Bu çelikler mermi, parçacık, anti tank mayınları ve tahrip amaçlı el bombalarına karşı korunma oluşturmaktadır. Kara savaşlarında en önemli muharebe aracı olan tankların sağlamlık özelliğinin sürdürülmesine yönelik olarak, zırh ile kaplanmasındaki temel hedef, aracın ve mürettebatın tehditlere karşı olumsuz etkilerden korunmasının sağlanmasıdır. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, zırh çeliği tank üzerinde yan panel (Şekil 2.1. a) ve mayına karşı taban sacı (Şekil 2.1. b) olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Bir tank üzerinde a) yan koruyucu panel ve b) mayına karşı taban sacı olarak zırh çeliği kullanımı [37].

Kundağa motorlu obüsleri zırh çeliklerinin kullanıldığı bir başka askeri araçtır. Türk Silahlı Kuvvetlerinin bünyesinde bulunan Fırtına Obüslerinde kule veya gövde oluşturacak biçimde kaynaklı olarak zırh çeliği uygulaması söz konusudur. Şekil 2.2’de zırh ile korunmuş bir Fırtına Obüsü görülmektedir.

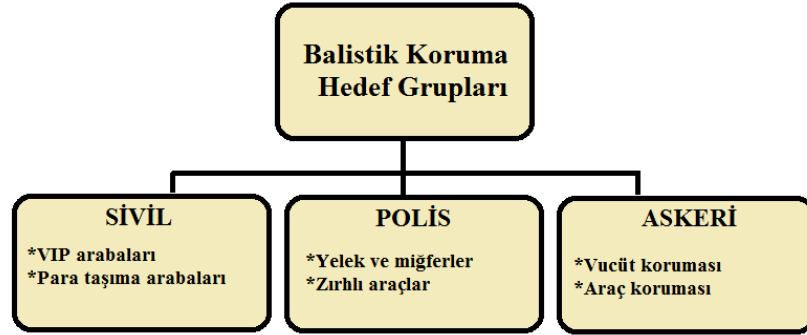
Zırh çeliklerinin kullanıldığı araçlara örnek olarak zırhlı muharebe aracı (ZMA), zırhlı taktik aracı, personel taşıyıcılar, Tow aracı, zırhlı havan aracı, istihkam manga aracı ve komuta kontrol aracı verilebilir [37].



Şekil 2.2. Çelik ile zırhlandırılmış Fırtına obüsü [37].

Koruma amaçlı zırh malzemeleri, sivil ve savunma sanayii amaçlı birçok kara, hava, deniz ve uzay aracında kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Günümüzde sivil ve askeri platformda en yüksek tehtidi ateşli silahlardan çıkan, kinetik enerjili mermiler oluşturmaktadır. Bu silahlardan çıkan mermiler geometrik, mekanik ve kinematik özellikleri açısından çeşitlilikler göstermektedir. Bütün bunların yanı sıra tank gibi savunma ve saldırı araçları için tasarlanan, hasar türü kinetik enerjili mermilerinden çok farklı olan mermilerde göz

önünde bulundurulmalıdır. Merminin hedefte patlamasıyla başlayan nüfuziyetin fiziki davranışı, saldırı ve savunma aracına bağlı özellikler kombinasyonuna bağlı, değişkenlik gösterir [38].



Bahsi geçen mermilere karşı zırh malzemesi olarak alüminyum malzemeler ve alaşımları, çelik, seramik, cam ve elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılır [39]-[40]. Günümüzde özellikle askeri alanda kullanılan tank ve benzeri savunma ve saldırı amaçlı olarak en yaygın kullanılan çelik, zırh malzemesidir. Çelik kullanılmasının başlıca nedeni çeliklerde yüksek dayanım özellikleri görülmesi, yeterli tokluk, yüksek kaynak kabiliyeti gibi malzeme özellikleri ve diğer zırh malzemelerine göre daha düşük olan üretim maliyetleridir.

2.5. Zırh Çeliklerinin Özellikleri

Koruma amaçlı kullanılan araçların kaplanmasında uygulanan zırh çeliklerinin aşağıda verilen özelliklerde olması istenir [41]. Mermi ve patlayıcı darbelerine karşı yüksek dayanım, imalatı kolaylık, uzun süreli kullanım istenir. Balistik darbeye dayanım, yüksek tokluk ile sağlanmaktadır. Zırh çeliklerinin darbe tokluğu özelliğinin iyi olması istenir [42]. Zırh çeliklerinin araca kaplanmasında üretim zorluklarını en alt düzeye indirmek için, gerekli metalurjik özellikler sağlanması gerekir. Tablo 2.5’de değişik üretim basamakları için metalurjik koşullar verilmiştir [41]. Mukavemet ve sertlik koşulları orta karbonlu çeliklerin tercihiyle sağlanır. Yapılan tercihte C, iyi kaynak edilebilirlik için sınırlandırılmıştır. Son işlem olarak uygulanan sertleştirme ve temperleme işlemiyle mukavemet ve tokluk dengelenmiş olur.

Zırh uygulamalarının yapıldığı ağır ve hafif taşıtların değişik ve çetin arazilerdeki hareketlerinden, mermi mukavemetlerine karşı kaynak bölgelerinin yorulma direncinin yüksek olması gereklidir. Gerilmeli krozyon sorunu sert zırh çeliklerinde (> 500 HB) ortaya çıkabilir. Gerinimli bölgeler korozyif bir ortamla karşılaştığında korozyon oluşumu artar. Zırh çeliğinde yapılan çalışmalar sonucu 500-600 HB sertliğe erişilmiştir. Yükselen mukavemete ve sertliğe eşdeğer olarak toklukta azalmalar görülmeye başlanmıştır. Azalan tokluğu yükseltmek amacıyla ikinci metalurjik işlemler uygulanarak kükürt ve fosfor düşük seviyelere indirilmiştir [43]-[44]. Termomekanik işleme ve hammadde kontrolü yöntemlerinin uygulanması ile üretimde mekanik özellikler iyileştirilmiştir [43]-[45].

Tablo 2.5. Zırh çeliklerinde imalat işlemleri doğrultusunda istenen özellikler [41].

	İmalat İşlemleri			
	Isıl kesme	Kaynak	Talaşlı İşlem	Şekillendirme
Gerekli Metalurjik Özellikler	-Düşük karbon eşdeğeri -Sınırlı segregasyon -Çok düşük hidrojen miktarı -Düşük kalıntı gerilmesi	-Düşük karbon eşdeğeri -Düşük hidrojen miktarı -Düşük kalıntı gerilmeleri	-Yüksek olmayan sertik	-Yüksek süneklik

Tablo 2.6’da bazı zırh çeliklerinin balistik performansları ile mekanik özellikleri verilmiştir [33]. Tabloda verilen zırh çelikleri temperlenmiş ve su verilmiş düşük alaşımlı çeliklerdir. Sınıf I tipi çelikler çoğu araç uygulamalarında kullanılan standart zırh çelikleridir. Sınıf II tipi çelikler Sınıf I’e benzer bir kimyasal kompozisyona sahiptirler. Ancak nufuziyetten çok şok darbelerinin etkili olduğu işlemler için daha yüksek seviyede temperlenir. Yüksek sertliğe sahip çelikler genellikle ağırlık azaltma ve nufuziyet direncinin önemli olduğu durumlarda kullanılır. Karmaşık şekle sahip parçalarda ise döküm malzemeler kullanılır. Düşük sertlikli(standart) zırh çeliği ile karşılaştırmalarda yüksek sertliğe sahip zırh çeliklerinin balistik performansı % 20 daha yüksek çıkarken, döküm malzemenin ise % 13 daha düşüktür [38].

Tablo 2.6. Zırh çeliklerinin kıyaslanması, sac kalınlığı; 25.4 mm [33].

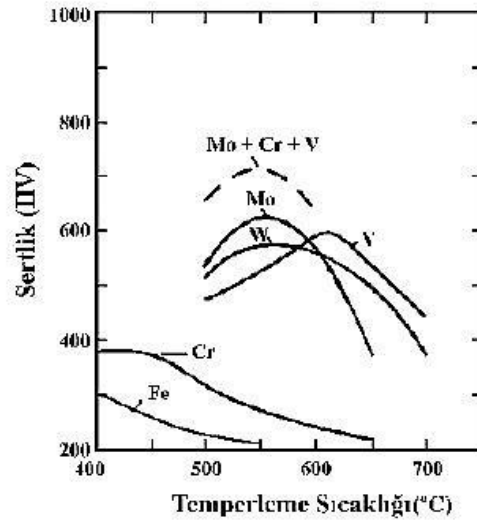
Zırh çeliği türü	Sertlik (HRC)	Tokluk	Balistik Performans	Alaşım Kimyası	Karbon Eşdeğeri
Sınıf I (MIL-A-12560)	34-40	21,6	1,00	Mn-Mo-B	0,64
Sınıf II (MIL-A-12560)	29-34	28	Şok direnç	Mn-Mo-B	0,64
Yüksek Sertlikte Plaka (MIL-A-46100)	50-53	13,5	1,20	Cr-Ni-Mo	0,85
Döküm (MIL-A-113596)	32-38	16,3	0,87	Cr-Ni-Mo	0,78

2.6. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjisi

2.6.1. Zırh Çeliklerine Uygulanan Isıl İşlemler

Zırh çelikleri martenzitik karakterde olduklarından tokluk kombinasyonu ve optimum mukavemet, özellikleri su verme, östenitleme sonrasında uygulanan temper işlemi ile elde ederler. Düşük C'lu çelikleri temperlemede su verme sonrasında martenzit içinde oluşan C, demir ile bir araya gelerek sementit (Fe_3C) çökmesine yol açar ve böylece martenzitin ferrite dönüşmesiyle sertlik değeri düşer. Fakat çelik kompozisyonunda bulunan karbür yapıcı elementler C ile yüksek temperleme ısılarında bir araya gelerek değişik tipte karbür (MC , M_2C , M_7C_3 vs.) çökeltilerine sebep olurlar. Bu çökelti sonucunda yükselen sertliğe ikincil sertlik denir. Karmaşık oluşan çökelti sertleşmesi ile sertlik artışı olur [46].

Mo, Cr ve V içeren çeliklerde yüksek temperleme sıcaklıklarında oluşan kararlı karbürler matrislerinin başlangıç sertliğini daha da arttırabilmektedir. Şekil 2.4'deki diyagram incelendiğinde zırh çeliklerine katılan elementlerden neden öncelikli olarak krom ve molibdenin tercih edildiği açık olarak görülmektedir.



Şekil 2.4. Karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri [46].

Sertleştirme işleminde, zırh çeliklerine 900-950°C sıcaklıklarda uygulanan östenitleştirme ile matriksin karbon ve karbür oluşturu elementlerle doyumu sağlanır ve su verilmiş olur. Oluşan lata tip martenzit, standart bileşimde 600 °C’de temperlenir. Direk sertleşme süresinde ikincil sertlik östenitin, karbon-alaşım elementleriyle doyum seviyesine bağlı bir değerdir. Martenzitik matriksin tipide biraz diğer alaşım elementleri ile çözünen karbon miktarı ile belirlenir. Zırh çeliğinin matriksi su verme sonrası % 0,2-0,3 karbon içeriğine sahiptir ve yüksek oranda dislokasyon bulunduran lata tipi martenzitten oluşur [47]. Zırh çeliğinin darbe direncini ve mermilere karşı davranışını belirleyen temperleme mekanizmasının açıklanması için öncelikle dengeden uzak olarak çökelen ve çok ince olan ikincil sertlik çökeltilerinin tipi, şekli, boyutu, dağılımı ve miktarının bilinmesi gereklidir. Yüksek sıcaklıkta yumuşamaya ve ikincil sertliğe sebep olan reaksiyonların kimyalarının belirlenmesi için çökelti karakteristigi, matriks ve çökelti kompozisyonları 550-650°C’lik sıcaklıklar arasında bilinmelidir. Geçirimli elektron mikroskopisi (TEM) ile çökelti boyutu, şekli ve dağılımı belirlenir. Karbürlerin yeterince kabalaşmasıyla karbür bileşimleri enerji dağılım spektrometresi ataçmanlı taramalı geçirimli elektron mikroskobu (STEM/EDS) ile belirlenebilir.

Fakat maksimum sertlik, ikincil sertlik noktasında bu cihazlar yeterli olmamaktadır. Kompozisyonel saptamalar günümüz teknolojisinde kullanılmakta olan mikro analiz yöntemlerinin içinde, ayırma gücü en yüksek olan atom prob alan iyon mikroskobu (APFIM) ile gerçekleştirilir [48]–[50].

İkincil sertlik görünen tipik martenzitik çelikten değişik görüntüleme ve analitik kompozisyon belirleme örnekleri bu bölümde verilmiştir. Örnek olarak verilen yüksek hız çeliğine su verme esnasında matriks C miktarı % 0.6 seviyelerindedir, bu sebeple basit yaklaşımları sunabilmek için kıyaslama amacı ile kullanılabilir. Lata tip bir martenzit matriste ikincil sertlik çökeltileri lata sınırlarında ve dislokasyonlarda oluşur. İkincil sertlik 540-560°C’lik sıcaklıklarda elde edilir ve 1-2 nm çapında, 5-10 nm boyutlarında çubuk şeklinde yarı kohelent çökelen M_2C tip karbürle 3-5 nm çaplarında ve 1-2 nm kalınlıklarında disk olarak yine yarı kohelent çökelen MC tip karbür ile elde edilir. Karbür stokiometrilерinde C miktarlarının düşük çıktığı görülür. Hacim temperleme sonrasında % 3 - 3.5 oranında ikincil sertlik karbürleri çökeltme esnasında matris iç kısmı yüksek oranda C ve karbür oluşturuсu elementler katı ergiyik içinde bulunurlar. Görüldüğü gibi varolan doğrusal ilişki sebebiyle, kullanılmakta olan zırh çeliklerindeki potansiyel rahatça belirlenir [49]–[50].

2.7. Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyeti

2.7.1. Bileşim

Savaş araçlarının yapımında kullanılan zırh çelikleri esas itibarıyla düşük alaşımlı, yüksek mukavemetli çelik sınıfına girmektedir. Ayrıca çeliğin, döküm veya haddeleme usulü ile elde edilmesine-bağılı olarak da bileşim farklı olmaktadır. Karbon eşdeğeri açısından irdeleyebilmek için Milletlerarası Kaynak Enstitüsü Kaynak Kabiliyeti Komisyonu'nun, karbon eşdeğeri formülünü kullanacak olursak [51].

$$C_{es} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mn + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.7)$$

Dövme zırh çeliğinin karbon eşdeğeri (bileşim II için) :

$$C_{eş} = 0,30 + \frac{1,40}{6} + \frac{1,50 + 0,30 + 0,15}{5} + \frac{0,50 + 0}{15}$$
$$C_{eş} = 0,95 \quad (2.8)$$

Dökme zırh çeliğinin karbon eşdeğeri (bileşim II için) :

$$C_{eş} = 0,30 + \frac{1,50}{6} + \frac{0,70 + 0,20 + 0,10}{5} + \frac{0,70 + 0,50}{15}$$
$$C_{eş} = 0,83 \quad (2.9)$$

Denklem 2.7-2.9'a göre, zırh çeliğinin karbon eşdeğeri oldukça büyük çıkmaktadır. Buradan da, bileşimden dolayı sertleşme ve çatlamaya eğiliminin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, zırh çeliğinin kaynağı esnasında 200 ile 350 °C'lık bir öntav uygulamasına gerek duyulmaktadır [3].

2.7.2. Kalınlık

Zırh çelikleri, kullanma gayeleri nedeniyle, alışılmış olan kesit kalınlıklarından daha kalın olarak imal edilmektedir. Meselâ bir tankta en ince kesit 25 mm, en kalın kesit ise 200 mm'nin üzerindedir. Bu bakımdan, kaynak kabiliyeti açısından kalınlık faktörü de önem kazanmaktadır. Kalınlığın kaynak kabiliyetine etkisini Daniel Seferian'm formülüne göre belirleyebiliriz. Daniel Seferian'a göre karbon eşdeğeri [52].

$$360C_{eş} = 360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo \quad (2.10)$$

Çalışmamıza esas konu olan kaynak bölgesinde dökme zırh çeliği kaynak edildiğinden bundan sonraki hesaplamalarda (örnek olarak) Tablo 2.2 'deki Bileşim II esas alınacaktır.

$$360C_{eş} = 360 \times 0,30 + 40(1,50 + 0,70) + 20 \times 0,70 + 28 \times 0,20$$
$$C_{eş} = 0,60 \quad (2.11)$$

$$C'_{eş} = C_{eş}(1 + 0,005d)$$

Gene çalışmamıza esas alman kaynak bölgesi gözönüne alınırsa, cidar kalınlığı olarak, 50 mm almak uygun olacaktır. Böylece;

$$C'_{eş} = 0,60(1 + 0,005 \times 50)$$
$$C'_{eş} = 0,75 \quad (2.12)$$

olarak hesaplanır.

Daniel Seferian'a göre öntav sıcaklığı;

$$\begin{aligned} T_{\text{öntav}} &= 350\sqrt{C'_{\text{eş}} - 0,25} \\ T_{\text{öntav}} &= 350\sqrt{0,7 - 0,25} \\ T_{\text{öntav}} &= 248^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (2.13)$$

olarak hesaplanır. Buna göre, zırh çeliğini kaynak öncesinde, yaklaşık 250°C sıcaklıkta bir ön tava tabi tutmak ve kaynak süresince bunu devam ettirmek gerekmektedir [3].

2.7.3. Isıl İşlem Durumu

Zırh çelikleri, kullanıldıkları savaş araçlarında aranılan mekanik özellikleri gerçekleştirmek amacıyla, çeşitli ısıtım işlemlere tabi tutulmaktadır. Genel olarak iki tür ısıtım işlemi uygulanmaktadır:

1. *Homojen zırh çelikleri*; Bu çelikler kinetik .enerjili olmayan mermilerin darbe etkisini karşılamak üzere komple ısıtım işleme tabi tutulurlar. Malzeme sertliği (50 mm'lik cidarda) 275 HV ile 320 HV arasında değişmektedir. Kullanılmakta olan bir tanktan kesilen bir zırh parçasında ölçüm yapılmış ve sertliğin 250 HV ile 300 HV arasında değiştiği görülmüştür.

2. *Homojen olmayan zırh çelikleri*; Bu çelikler, kinetik enerjili mermilerin delip geçme özelliğine karşı, yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Dış yüzeyleri sertleştirilmiş olduğundan, dış yüzeylerine kaynak uygulanması pek istenmez.

Zırh çeliklerinden beklenen balistik mukavemetten ötürü aşırı sertleşmenin yanı sıra, kaynak işlemi nedeniyle kaynak bölgesi sertliğinin azalmaması da istenir. Bunun için erime çizgisinden 16 mm uzaklıktaki malzeme sertliğinin, zırh çeliğinden istenilen sertliklere eşit olması gerekmektedir. Zırh çeliklerinin temperleme sıcaklığı 595 °C civarında olduğundan, ısıtım işleme tabi tutulmuş zırh çelikleri bu sıcaklığa yakın bir sıcaklığa maruz kalırsa, iç yapı değişikliği oluşabilir. Bu nedenle, zırh çeliğinin hiçbir surette 315 °C'den yüksek sıcaklığa ısıtılması istenmez. Ön-tav sıcaklığının ise 260 °C civarında olması tavsiye edilmektedir [53].

Zırh çeliğinin kaynak işleminden sonra sahip olacağı sertliği Kihara, Suzuki ve Kanatani'nin (KSK) formülünden hesaplayabiliriz [52].

KSK'ya göre karbon eşdeğeri;

$$C_{eş} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \quad (2.14)$$

$$C_{eş} = 0,30 + \frac{1,50}{6} + \frac{0,50}{24} + \frac{0,70}{15} + \frac{0,70}{5} + \frac{0,20}{4} + \frac{0,50}{13} + \frac{0,04}{2}$$

$$C_{eş} = 0,86$$

bulunur.

KSK'ya göre ITAB'da oluşan sertlik değeri ;

$$HV_{10max} = (666 \times \%C_{eş} + 40) \mp 40kp / mm^2$$

$$HV_{10max} = (666 \times 0,86 + 40) \mp 40$$

$$HV_{10max} = 613 \mp 40kp / mm^2$$

elde edilir.

(2.15)

Denklem 2.14-2.15'den görülmektedir ki soğuma hızını yavaşlatmak için bir önlem alınmadığı takdirde malzemenin sertliği ITAB'da 573 HV ile 653 HV arasında bir değere çıkabilecektir. Oysa Milletlerarası Kaynak Enstitüsü'nün Kaynak Kabiliyeti Komisyonu'na göre ITAB'da sertliğin 350 HV'yi geçmemesi tavsiye edilmektedir. Bu nedenle, ITAB'da martenzitik sert bir yapının oluşmamasını sağlamak için soğuma hızını yavaşlatıcı bir öntav uygulanması gerekmektedir [3].

2.7.4. Sıcaklık

Malzemenin kaynak esnasındaki sıcaklığı da önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle, kaynak yapılan ortamın düşük sıcaklıklarda olması istenmez. Uygulanacak kaynak usulü nedeniyle, öntav uygulanmasa bile, kaynak bölgesinin 35 °C ile 85 °C arasında bir ilk ısıtmaya tabi tutulması yararlı olmaktadır. Zaten, kaynağa başlarken zırh çeliğinin hiçbir durumda 15 °C'den aşağı sıcaklıkta olmasına müsaade edilmemektedir [53].

2.7.5. Saflık ve Homojenlik

Kaynak edilecek metalde bulunan cüruf gibi gayri safiyet maddeleri ile boşluklar, toplanmalar, gaz kabarcıkları gibi heterojenlik, kaynağın neticesi üzerine büyük etki yapar. Kaynak edilmekte olan tank gövdeleri 20 tona yakın ağırlıkta bir çelik döküm olduğundan, malzemenin tamamen homojen olması çok güçtür. Zaten, yapılan çalışmalarda, gerek çentik darbe numunelerinin hazırlanması esnasında ve gerekse kaynak ağızlarının hazırlanmasında çeşitli malzeme heterojenliklerine rastlanılmıştır. Bu durum çeşitli kaynak hatalarına sebep olduğu gibi, çentik darbe mukavemetini de düşürmektedir [3].

2.7.6. Zırh Kaynağında Kullanılan Elektrodlar

Zırh levhalarının kaynağında kullanılacak olan elektrodlar bileşimleri farklı da olsa, mutlaka bazik karakterde olmalıdır [54]. Bu nedenle, bazik örtülü elektrodlarla bunların kullanılışları hakkında kısa bilgi verilmesi yararlı olacaktır.

2.7.7. Bazik Karakterli Örtülü Elektrodlar

Bazik örtülü elektrodların örtülerinde, kaynak esnasında hidrojen oluşturacak maddeler olmadığından, kaynak banyosunun hidrojen absorbe etme ihtimali çok azdır. Bu nedenle, geçiş bölgesinde, istenmeyen ince dikiş altı çatlakları meydana gelmez. Fakat, elektrod örtüsünde bulunan sodyum veya potasyum silikatın içindeki nem de hidrojen oluşumuna yol açabilir. Bu maddelerin neme karşı hassasiyetlerinden dolayı, bazik elektrodlar, 400 °C ile 500 °C'lik kurutma işlemine tabi tutulurlar. Depolanma esnasında da nem kapma ihtimaline karşı, bu elektrodlar kuru yerlerde itina ile depolanmalı ve atelyede kullanım öncesinde 250 °C de 30 dakikalık kurutma işlemine tabi tutulmalıdır. Kurutma sıcaklığı, ve süresi için, elektrod firmasının başka bir önerisi varsa, o değerler uygulanmalıdır.

Bazik karakterli elektrodların cürufu, kahverengiden siyaha kadar değişir. Cürufun kalkması, diğer elektrodlara kıyasla daha güçtür. Özellikle, kök pasolarında bu konu önem kazanmaktadır.

Kaim cüruf tabakalarının temizlenmesi daha kolay olduğundan pasoları, rutil elektroda göre, daha yavaş çekmek yararlıdır. Bazik örtülü elektrodlar, genel olarak, doğru akımda pozitif kutuba bağlanarak (ters kutuplanma) kaynak edilir. Örtülerinde potasyum bileşikleri bulunan bazı tip bazik elektrodlar, alternatif akımda da kaynak edilebilir. Bazik örtülü elektrodlar ile yapılan kaynak dikişlerinin mekanik özellikleri çok iyidir. 0 °C nin altındaki sıcaklıklarda bile sünektirler. Aralık doldurma kabiliyetleri çok iyi olduğundan, bütün kaynak pozisyonlarında kullanılabilir.

Bazik örtülü elektrodlar ile kaynak yaparken akım şiddeti, mümkün merteye yüksek seçilmelidir (östenitik elektrodlar hariç). Yüksek akım şiddeti, elektrodun kolay tutuşmasını sağladığı gibi, kaynak banyosunun daha uzun süre sıvı halde kalmasını sağlar. Böylece, banyoda mevcut gazlar kolaylıkla çıkar ve dikişin gözeneksiz olması sağlanır. Bazik elektrodların örtüsü, diğer örtülere göre daha yüksek akım şiddetine dayanabilir özelliktedir. Zaten akım şiddeti seçimi, elektrodun iş parçasına yapışmayacağı düzeyde ve elektrod, kaynağa ara verilmeden sonuna kadar kullanıldığında kızarmayacak şekilde yüksek seçilmelidir. Fakat kaynak makinası üzerindeki amperetreler yeterli hassasiyette olmadığından ayrı bir amperetre ile akım şiddeti kontrol edilmelidir.

Bazik karakterli elektrodlarda elektrod tutuş açısı 85° ile 90° arasında olmalıdır. Aksi taktirde, kaynak banyosuna hidrojen gibi istenmeyen gazlar girebilir. Ayrıca, ark esnasında, örtüdeki kalsiyum karbonatın oluşturduğu karbondioksit atmosferinin, banyoyu iyi koruyabilmesi için ark boyunun kısa tutulması gerekmektedir. Bu değer, genellikle elektrod çapının yarısıdır. Ark boyunun daha kısa tutulması halinde ise, kaynak bölgesinde gereğinden fazla metal erimesi vuku bulur. Bazik örtülü elektrodların tutuşturması da önemlidir. Bunun için ark, daha önce bitmiş olan elektrodun kraterinde tutuşturulmamalıdır. Elektrod, kraterden 5-6 mm yanda veya ön tarafta tutuşturulduktan sonra, cürufu temizlenmiş olan kratere taşınır.

Tutuşturma, bir kibrit çakar gibi yapılmalı ve parçaya teğet olarak çekilip kaynak yerine götürülmelidir. Aksi taktirde, kaynak banyosu hava emerek gözenek oluşumuna neden olabilir.

Cürufun özelliğinden dolayı kaynak hızı, diğer tip elektrodla göre daha düşük (yaklaşık 2/3'ü) olmalıdır. Bunun sonucu olarak, kaynak dikişi daha geniş olur. Kaynak dikiş genişliğinin sınırlı olduğu yerlerde, gerekenden bir boy küçük çaptaki elektrodla kullanılmalıdır. Cürufun kaynak metalini örtmesi, mutlaka sağlanmalıdır. Puntalama işlemlerinde elektrod örtüsü zedelendiğinden, punta dikişlerinde, genellikle, gözenekler mevcuttur. Bu nedenle, bazik elektrodla kaynak yapılırken mümkün mertebe, puntalama yapılmamalıdır. Yapılan puntalar varsa, bunlar taşlanarak yok edilmelidir. Punta zorunluluğu varsa, puntalama için elektrod artıkları kullanılmamalıdır. Eğer çelik uygun ise, rutil elektrod ile puntalama yapılmalıdır.

Bazik örtülü elektrodla; yakarıda belirtilen özellikleri nedeniyle şu alanlarda kullanılırlar:

- Bileşimi bilinmeyen karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında,
- Farklı miktarda karbon ihtiva eden çeliklerin kaynakla birleştirilmelerinde,
- Çatlama ihtimalini azaltmak açısından kalın kesitli parçaların kaynağında,
- 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışan makina ve yapıların kaynağında
- Dinamik zorlamalara karşı yüksek dayanım beklenen kaynak dikişlerinde,
- Rijit konstrüksiyonların kaynağında.

Bazik elektrodlaın avantajlarına, rağmen bazı dezavantajları da vardır. Bunlar, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Örtünün yüksek sıcaklığa dayanıklı olmasını sağlamak amacıyla örtüye ilave edilmiş olan kalsiyum florür buharları tahriş edici ve sağlığa zararlıdır. Bu nedenle kapalı bölmelerde çalışırken, havalandırma için gerekli önlemler alınmalıdır.
2. Örtüde rutil gibi iyonlaştırıcı maddelerin az miktarda bulunması nedeniyle, arkın devam ettirilmesi güçtür. Bu nedenle, bu elektrodlaın yakılması özel tecrübe gerektirir.

Zırh levhalarının birleştirme kaynağında kullanılan östenitik elektrodla bazik örtülü olduğundan, bunların kullanılması esnasında, bu bölümde belirtilen hususların uygulanması gereklidir.

Ancak, östenitik elektrodun elektrik iletkenliği düşük olduğundan yüksek amperaj uygulanmaz, tersine, mümkün mertebe düşük akım şiddeti ile kaynak edilirler.

A.B.D. Askeri Standartlarına göre, ferritik bazik elektrodlar; zırh levhalarının kaynağında sadece dolgu işlemleri için kullanılır. A.B.D. uzmanlarınca zırh levhalarının birleştirme kaynağında ferritik elektrodların kullanılması tavsiye edilmemektedir [55].

2.7.8. Östenitik Elektrodlar

Kimyasal Bileşim: Kaynak telinin bileşiminde bulunan elementlerin miktarı (maksimum olarak) Tablo 2.7’de gösterilmiştir.

Tablo 2.7. Kaynak dikişi bileşimi [3].

Karbon, Manganez, Silisyum, Krom, Nikel		
Karbon	0,07 - 0,17	Nikel
Manganez	0,30 - 4,75	Molibden
Silisyum	max. 0,80	Kükürt
Krom	18,00 - 20,5	Fosfor
Örtü Tipi : Düşük hidrojenli bazik karakterlidir.		

İçerisindeki TiO_2 miktarı % 9'dan azdır. Bileşiminde toprak alkali elementler ve onların bileşikleri vardır. Bazik karakterli örtüler neme karşı hassastırlar. Bünyesinde % 0,2'den fazla nem bulunmamalıdır. Bu nedenle;

1. Sıcaklığı 55 °C ile 80 °C arasında,
2. Maksimum izafi nem miktarı % 50 olan bir ortamda muhafaza edilirse çevreden nem kapmazlar.

Eğer nem miktarı belirtilenden fazla olursa, kullanmadan önce, aşağıda belirtilen şekilde kurutulmalıdır:

1. Elektrodlar max. 65 °C'ye ısıtılmış olan bir fırına koyulur.
2. Fırında 150 °C'ye kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta 1 saat tutulur.

3. Bu kurutma işlemi nemlenmiş elektrodla uygulanır. Eğer elektroda su değmişse bu işlem uygulanmaz.

Uygulanacak enerji: Paslanmaz çeliklerin elektrik iletkenlikleri fena olduğundan, mümkün mertebe, düşük akım şiddeti ile yüklenirler. Elektrod büyüklükleri ve kaynak pozisyonuna göre gerilim ve akım şiddeti değerleri Tablo 2.8’de gösterilmiştir [3].

Tablo 2.8. Elektrod büyüklükleri ve kaynak pozisyonuna göre gerilim ve akım şiddeti değerleri [3].

Elektrod Çapı (mm)	Yatay ve Korniş	Dikey	Tavan
3,25	115 A , 25 V	85A,22V	105A , 25V
4	145 A , 24 V	115A,23V	135A ,24V
5	185 A , 24 V	-	-

Akım şiddetleri için + 10 A, gerilim için ise + 3 V toleransa müsaade edilir. Tablo 2.8’de görüldüğü gibi 5 mm’lik elektrodla dikey ve tavan pozisyonlarında kullanılmazlar. Esasen bazik karakterli olan bu elektrodla kullanılırken, bazik elektrodla için belirtilen kurallara uyulur. Bilindiği gibi, kaynak kabiliyetine etki eden faktörlerden biri de ilâve kaynak metalidir. Östenitik yapısı, akma sınırının yüksekliği ve düşük hidrojen içeriği ile bu elektrod, zırh çeliği kaynağına başarı ile uygulanmaktadır. Bu elektrodla oldukça sünek olup ayrıca östenitik yapılarından dolayı, soğuma esnasında sertleşmezler [3].

3. TOZALTI KAYNAK YÖNTEMİ

American Welding Society (AWS) tozaltı ark kaynağını şöyle tanımlar. “Tozaltı kaynak yöntemi, iş parçası ile metal tel elektrot / elektrotlar arasında, bir ark / arklar oluşturarak bunların ısıtılmasını sağlayan ve bu suretle birleşmelerini temin eden bir ark kaynağı prosesidir. Ark ve erimiş metal tanecikli yapıya sahip bir toz örtüsü ile korunur. Basınç kullanılmaz. Dolgu metali, elektrot / elektrotlar ile toz ve metal taneciklerinden elde edilir” [5].

Kaynak maliyetini düşürmek, işin yapım süresini kısaltmak ve kaynakçı faktörünün dikişin kalitesine olan etkisini azaltmak için, kaynak prosesinde otomasyona gidilmiştir. Buradaki amaç, elektrot telini mekanik bir tertibat yardımı ile otomatik olarak sürekli ilerletip, ark bölgesine çok yakın bir yerden de akım vererek telin yüklenebileceği akım şiddetini artırmak ve böylece erime gücünü yükseltmektir.

Bu amaçla tozaltı kaynak yöntemi, 1933 yılında ABD'de geliştirilmiş ve 1937 yılından sonra da Avrupa'da uygulama alanına girmiştir. 2. Dünya Savaşı sırasında özellikle Almanya'da geniş çapta uygulanmıştır. Almanya'da LINDE tarafından Gektro-Linde-Rapid-Verfahren diye geliştirilen kaynak yöntemine kısaca Ellira- Verfahren adı verilmiştir.

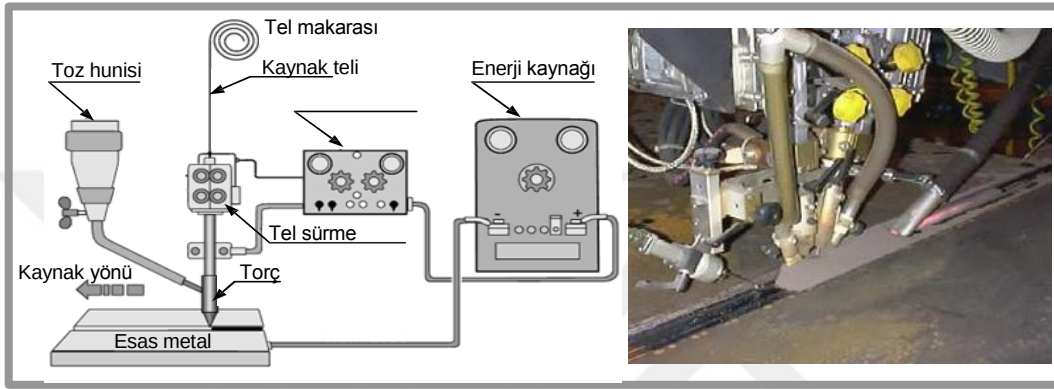
Yüksek erime gücüne ve kaynak hızına sahip olmakla birlikte çeşitli türden çeliklerin kaynağı için de çok uygun olan bu yöntem kazan, profil, gemi ve basınçlı kap üretimi ile dolgu kaynağı işlemlerinde yoğun bir biçimde kullanılmaktadır [6].

3.1. Tozaltı Kaynağının Çalışma Prensipleri

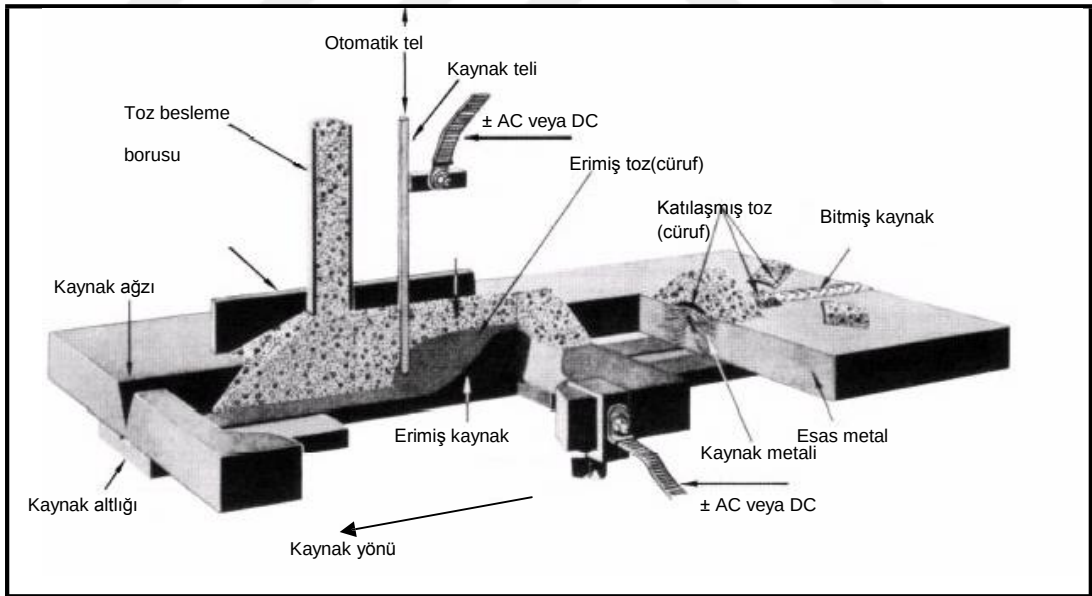
Bu kaynak yönteminde, bir bobinden sağılan kaynak teli bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir temas memesinden geçerek kaynak bölgesine gönderilir. Gerekli akımı temas memesinden alan tel ile iş parçası arasında ark oluşur ve ayrı bir kanaldan gelen silikat ve toprak alkali metalleri içeren özel bir toz, ark bölgesini havanın olumsuz etkilerinden korur. Kaynak teli ve iş parçası arasında oluşan arkın sıcaklığından tel ve esas metalin bir bölümü ergiyerek istenen birleşmeyi sağlar. Ark, bir toz örtüsü altında bulunduğundan çevreye ışıyım yapmaz ve bu şekilde ark enerjisinin

büyük bir bölümü (yaklaşık olarak % 68'i) doğrudan doğruya kaynak için tüketilmiş olur.

Arkın sıcaklığında bir miktar toz da eriyerek dikişi örten bir cüruf durumuna geçer ve bu cüruf henüz çok sıcak olan kaynak dikişini ve banyoyu atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, içerdiği dezoksidan ve alaşım elementleri yardımıyla kaynak banyosunun dezoksidasyonunu ve kaynak metalinin alaşımlanmasını gerçekleştirir [6]. Tozaltı kaynak yönteminin prensip şeması Şekil 3.1 ve 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Tozaltı ark kaynağının şema ve fotoğrafı [56].



Şekil 3.2. Tozaltı kaynak yönteminin prensip şeması [57].

3.2. Tozaltı Kaynağının Kullanım Alanları

Tozaltı kaynak yöntemi;

- ❖ Basıncılı kap, kazan ve tank yapımında,
- ❖ Ağır otomotiv sanayinde,
- ❖ Gemi inşaatında,
- ❖ Çelik konstrüksiyon sanayinde,
- ❖ Kaynaklı boru imalinde,
- ❖ Demiryolu inşasında,
- ❖ Kiriş, direk ve uzun kaynak gerektiren kolonların kaynağında,
- ❖ Aşınan makine parçalarının tamir ve dolgu işlerinde,
- ❖ Profil yapımında (I, H, T profilleri gibi) birleştirme kaynak yöntemi olarak kullanılmaktadır [58].

3.3. Tozaltı Kaynağı ile Kaynak Edilebilen Metal ve Alaşımları

Günümüz endüstrisinde tozaltı kaynak yönteminin birleştirme amacı ile uygulandığı metal ve alaşımları şunlardır:

- ✓ % 0.3'e kadar karbon içeren yalın karbonlu çelikler
- ✓ Az alaşımlı yüksek mukavemetli ve ince taneli yapı çelikleri
- ✓ Krom-Molibdenli çelikler (% 0.5-9 arasında Cr, % 0.5-1 arasında Mo)
- ✓ Paslanmaz çelikler
- ✓ Nikel esaslı alaşımlar

Gelişen teknoloji ve endüstrinin istemlerine bağlı olarak kullanılan diğer alaşımlar için de uygun kaynak teli ve toz üretimi sonucu kaynakla birleştirme olası görülmektedir. Bugün standartlara uygun olarak üretilen tozların yanı sıra, toz üreticileri bazı alaşımların kaynağı için de özel tozlar üretmektedirler [6].

3.4. Tozaltı Kaynağı ile Kaynak Edilebilen Metallerin Kalınlıkları

Tozaltı kaynak yönteminde, 1,6 mm'den 12 mm'ye kadar olan malzemeler herhangi bir kaynak ağzı açmayı gerektirmeden kaynak yapılabilir. Kaynak ağzı açarak tek

pasolu kaynak ile kalınlığı 6,4 mm ile 25 mm arasındaki malzemeler kaynak edilebilir. Çok pasolu teknik kullanıldığında ise pratik olarak bir maksimum limit yoktur. Tozaltı kaynağı ile kaynak edilebilen ana metal kalınlıkları Tablo 3.1’de verilmiştir [59].

Tablo 3.1. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynak edilebilen parça kalınlıkları [59].

Kalınlık	Inch, 005	,015	,062	,125	3/16	1/4	3/8	1/2	3/4	1	2	4	8
Yöntem	mm, 13	,4	1,6	3,2	4,8	6,4	10	12,7	19	25	51	102	203
Ağız açmadan tek pasolu													
Ağız açarak tek pasolu													
Çok pasolu													

3.5. Tozaltı Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

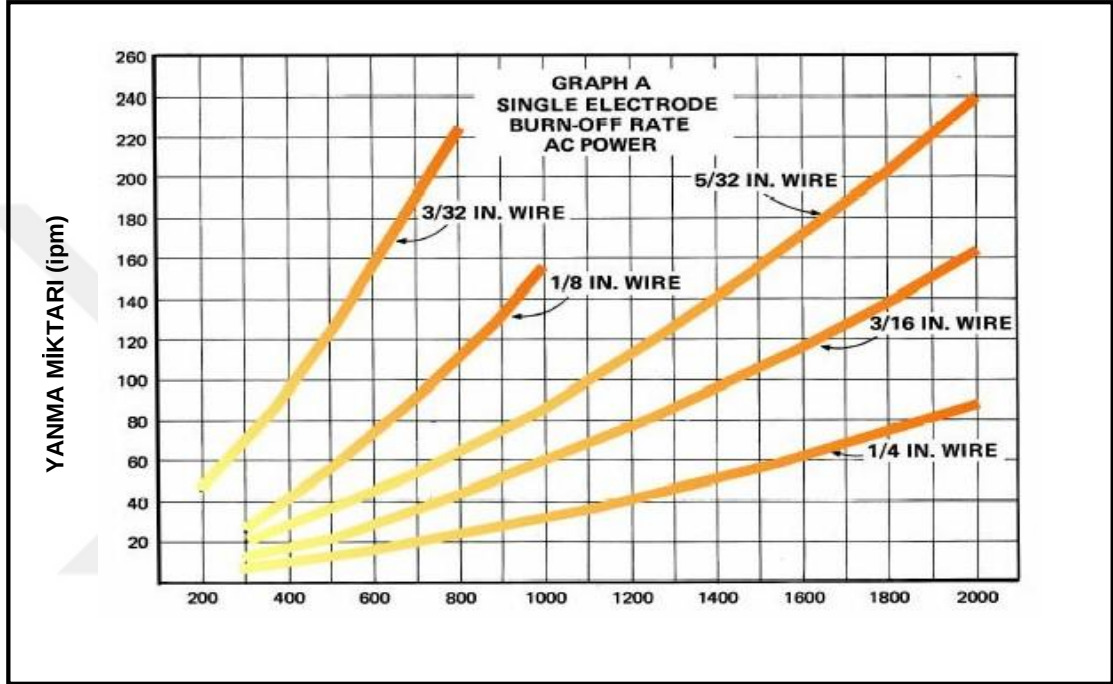
3.5.1. Tozaltı Kaynağının Avantajları

Tozaltı kaynağının avantajlarını bu başlıklar altında toplayabiliriz.

- Yüksek kaynak gücü ve kaynak hızı
- Derin nüfuziyet
- Enerji ekonomisi
- Elektrot ekonomisi
- Yüksek kaliteli kaynak dikişi
- Kaynak dikişi kalitesine kaynakçının bir faktör olarak etkimemesi
- Yüksek ark kararlılığı
- Özel koruyucu donanımlara gerek duyulmaması
- Sürekli kaynak yapılabilmesi
- Birden çok tel ile kaynak yapılabilmesi [60].

3.5.2. Yüksek Kaynak Gücü Ve Kaynak Hızı

Tozaltı kaynak yönteminde 200 ile 5000 Amper arasında akım şiddeti ve 6 ile 300 m/saat arasında kaynak hızları kullanılır [61]. Bu bakımdan, tozaltı kaynak yöntemi alışılmış kaynak yöntemleri ile karşılaştırılamayacak derecede yüksek bir ergime gücü ve kaynak hızına sahiptir. Tozaltı kaynağında tel çapı ve akım şiddetine bağlı olarak, telin yanma miktarı ve elde edilen dolgu miktarı Şekil 3.3 ve 3.4’de verilmiştir [60].



Şekil 3.3. Tozaltı kaynak yönteminde telin yanma miktarı [57].

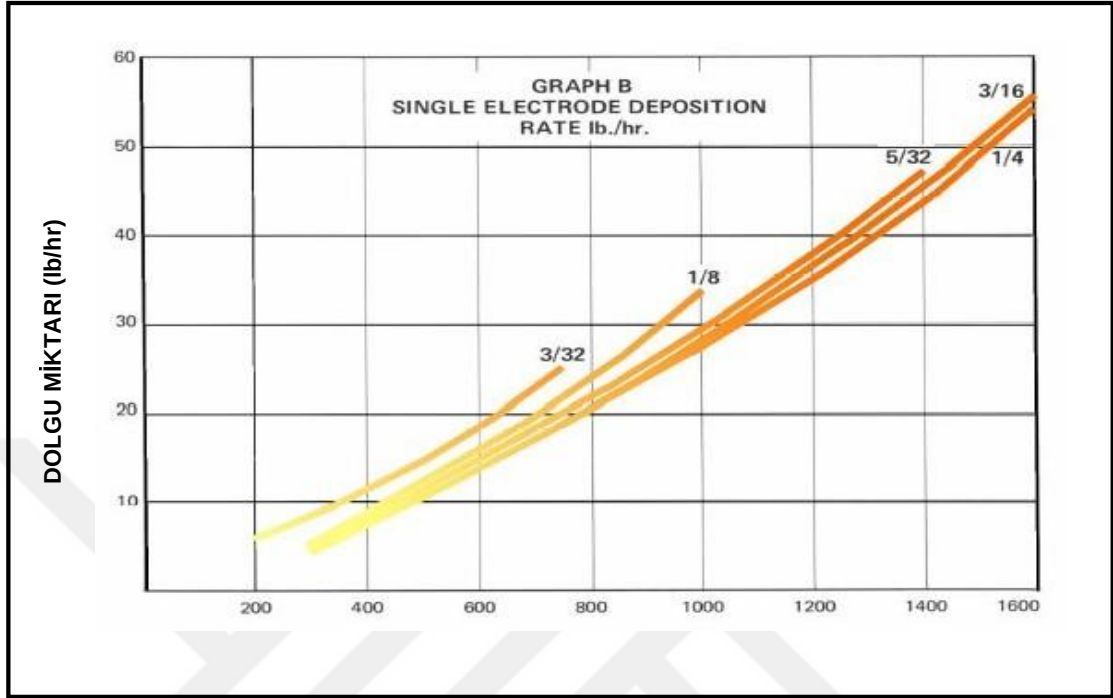
3.5.3. Derin Nüfuziyet

Kaynak akım şiddetinin yüksek olması nedeni ile bu yöntemde kaynak ağzı açmadan iki paso ile 18 mm ve kaynak ağzı açarak da iki paso ile 140 mm kalınlığındaki parçalar rahatlıkla kaynak edilebilmektedir [61].

3.5.4. Enerji Ekonomisi

Tozaltı kaynak yönteminde kaynak yerinin toz tarafından gayet iyi bir şekilde örtülmesi sebebiyle elektrik enerjisi kaybı çok azdır. Örtülü elektrot ile yapılan elektrik ark kaynağında elektrik enerjisinin % 25'i, tozaltı kaynağında ise % 68'i

doğrudan kaynak için kullanılmaktadır. Bu nedenle tozaltı kaynak yönteminde büyük bir enerji ekonomisi sağlanmaktadır [60].



Şekil 3.4. Tozaltı kaynak yönteminde dolgu miktarı [57].

3.5.5. Elektrot Ekonomisi

Tozaltı kaynak yönteminde ark, tozaltında yandığından sıçrama kaybı yoktur ve tel elektrot kullanıldığından elektrot kaybı da yoktur; ayrıca yüksek nüfuziyet dolayısı ile daha fazla esas metal ergidiğinden [kaynak metalinin 2/3'ünü esas metal, 1/3'ünü] ilave metal oluşturur, elektrot gereksinimi daha azdır [61].

3.5.6. Yüksek Kaliteli Kaynak Dikişi

Kaynak yerinin düzgün ve etkin bir biçimde cüruflla örtülmesi, yavaş soğumayı temin eder. Bu ise kaynak hatalarının meydana gelme imkânını azaltır [61]. Ayrıca sürekli tel elektrot kullanıldığından tüm dikiş boyunca bir başlama ve bir bitiş noktası vardır. Bu nedenle kaynağın başlangıç ve bitiş noktalarında daha çok rastlanan krater, çatlak gibi kaynak hatalarıyla son derece az karşılaşmaktadır [60].

3.5.7. Kaynak Dikişı Kalitesine Kaynakçının Bir Faktör Olarak Etkimemesi

Tozaltı kaynak yönteminde elektro-mekanik ayar ve kontrol sisteminin varlığı, kaynakçı faktörünü ortadan kaldırmaktadır [60].

3.5.8. Yüksek Ark Kararlılığı

Ark bölgesinde oluşan cüruf, arkın sürekliliğini çok iyi bir biçimde koruyabilmektedir. Bu durum özellikle yüksek akım şiddeti ve kaynak hızlarının kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır [60].

3.5.9. Özel Koruyucu Donanımlara Gerek Duyulmaması

Tozaltı kaynağında arkın toz altında olması nedeniyle, görünen ışınlar ve ultraviyole ışınlar etrafa yayılmaz. Bu yüzden gözleri korumak için özel maskeye ihtiyaç duyulmaz. Kaynak sırasında gaz ve toz oluşumu çok az olduğundan özel havalandırma sistemine de gereksinim duyulmaz. Kaynak kafası da, kaynak sırasında ısıdan çok etkilenmediğinden özel bir soğutma tertibatına gerek göstermeden sürekli olarak kullanılabilir [60].

3.5.10. Sürekli Kaynak Yapılabilmesi

Tozaltı kaynak torcunun özel raylar veya paletler üzerinde hareket eden bir tertibat üzerinde olması sayesinde, hızı istenilen değerde sabit tutulabildiğinden sürekli kaynak yapma imkânı vardır. Ayrıca çevresel kaynak ve helisel kaynak yapılması da mümkündür [60].

3.5.11. Birden Çok Tel ile Kaynak Yapılabilmesi

Tozaltı kaynak yönteminde; paralel, seri ve tandem yöntemiyle veya bant elektrot kullanarak birden çok tel kullanılabilir. Bu sayede kaynak hızını, transfer olan metal miktarını ve kaynak verimini yükseltmek mümkündür [60].

3.6. Tozaltı Kaynağının Dezavantajları

- Pahalı makine ve donanıma ihtiyaç duyulduğu için, ilk yatırım masrafları yüksektir.
- İnce saçların kaynağı için uygun bir yöntem değildir.

- Kısa boylu ve karışık şekilli dikişler için yarı otomatik tozaltı makineleri geliştirilmişse de, bunlar tozaltı kaynak yönteminin bütün üstünlüklerini bünyelerinde toplayamamaktadırlar. Karışık şekilli kaynak dikişine sahip çok sayıda yapılması gereken parçalar için özel geliştirilmiş makineler kullanılabilir.
- Tozaltı kaynak yöntemi ile yatay pozisyonda iyi sonuç alınabilmektedir. Dik ve korniş pozisyonu için özel tertibatlar geliştirilmiş olmakla beraber dik pozisyon için günümüzde daha çok elektro cüruf kaynağı tercih edilmektedir. Bu yöntem ile tavan pozisyonunda kaynak yapmanın olanağı yoktur [6].

3.7. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Yöntemler

Kullanımda büyük avantajlara sahip olması nedeniyle, tozaltı kaynağının kullanım yerlerine göre çeşitli özel tipleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler şunlardır:

- ✓ Tandem tozaltı kaynak yöntemi
- ✓ Paralel tozaltı kaynak yöntemi
- ✓ Seri tozaltı kaynak yöntemi
- ✓ Korniş usulü tozaltı kaynak yöntemi
- ✓ Bant elektrot ile tozaltı kaynak yöntemi [60].

3.8. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri ve Tozları

3.8.1. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Telleri

Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak telleri, standartlarda öngörülen bileşimde hazırlanmış ince çaplı çelik tellerden soğuk olarak çekilerek istenen çapa indirgenmiş tellerdir. Tellerin tamamen yuvarlak ve iyi kalibre edilmiş olmalarına ve ölçülerinin verilen toleranslar içinde bulunmalarına dikkat edilmelidir. Çeşitli kullanım yerleri için eski standart olan DIN 8557'ye ve yeni standart olan EN 756'ya göre 1,2 ila 12 mm çapları arasında teller üretmek olanağı var ise de, ISO bunları 1,2-1,6-2-2,5-3- 3,2-4-5-6-6,3-8 mm çaplarında sınıflandırmıştır. Günümüz endüstrisinde bu çaplardan 2,5 ile 6 mm arasındakiler en çok tercih edilenlerdir. Bu tellerin çap toleransları da DIN 668'e göre standartlaştırılmıştır.

Yalın karbonlu ve az alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılmak üzere geliştirilen tozaltı kaynak tellerinin yanı sıra, ısıya ve sürtünmeye dirençli çeliklerin, paslanmaz ve yüksek sıcaklığa dirençli çeliklerin, nikel ve nikel alaşımlarının tozaltı kaynağı için geliştirilmiş standart teller de üretilmektedir [60]. Tozaltı kaynağında kullanılan teller özellikle bileşimlerindeki manganez miktarına göre sınıflandırılır (Tablo 3.2) [62].

Tablo 3.2. Tozaltı kaynak tellerindeki manganez miktarı [63].

Düşük Manganezli Kaynak Telleri	% 0,30 – 0,60 Mn
Orta Manganezli Kaynak Telleri	% 0,90 – 1,25 Mn
Yüksek Manganezli Kaynak Telleri	% 1,75 – 2,25 Mn

Bu tellerin içerisine aynı zamanda karbon, silisyum, mangan, krom, nikel gibi alaşım elementleri de katılır. Bu elementlerin kaynak bölgesine kattığı etkiler Tablo 3.3’de gösterilmiştir [64]. Tablo 3.4’de ise tozaltı ark kaynak tellerinin bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Tel içerisine katılan alaşım elamanlarının kaynağa kazandırdığı özellikler [65].

Alaşım elemanı	Kaynağa kazandırdığı özellik
Karbon (C)	Sertliğini artırır, dayanımı yükseltir.
Silisyum (Si)	Deokside eder, işleme ve kaynak kabiliyetini artırır.
Manganez (Mn)	Sertlik, çekme ve çentik darbe dayanımını artırır (Uzama).
Molibden (Mo)	Sıcaklığa karşı dayanımını artırır.
Krom (Cr)	Sertliğini yükseltir ve sıcaklığa karşı dayanımını artırır.
Nikel (Ni)	Düşük sıcaklıklarda dayanımını artırır.

Tablo 3.4. DIN 668’e göre kaynak tellerinin toleransları [66].

Tel çapı (mm)	Çapta kabul edilen tolerans	Telin kesiti (mm ²)	1 m telin ağırlığı
1,2	0,05	1,13	8,9
1,6	0,05	2,01	15,8
2,0	0,06	3,14	24,7
2,3	0,06	4,90	38,4
3,0	0,06	7,07	55,5
4,0	0,075	12,6	98,6
5,9	0,075	19,6	154,0
6,0	0,075	28,3	222,0
7,0	0,09	38,5	302,2
8,0	0,09	50,3	394,9
9,0	0,09	63,6	499,2
10,0	0,09	78,5	616,2
12,0	0,11	113,1	887,8

Tozaltı kaynağında elektrod çapının kaynak karakteristikleri üzerinde etkileri vardır. Diğer bütün koşullar sabit tutulduğunda, elektrod çapının artırılması ile dolgu genişliği artar, nüfuziyet ve dolgu miktarı azalır. Bir kaynak teli seçiminde yalnız esas malzemenin kimyasal bileşimi değil kaynak tozunun metalurjik durumu da göz önüne alınmalıdır. Yani esas metalin bileşimine bağlı olarak çeşitli tel-toz kombinasyonları seçilerek istenilen bileşimde ve mekanik özellikte kaynak dikişleri elde edilebilir [62]. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri Tablo 3.5'de gösterilmektedir.

Tablo 3.5. EN 756'ya göre kaynak tellerinin kimyasal bileşimleri [67].

Tel türü	Alaşım elementinin miktarı							
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr
S1	0,05-	0,15	0,35-0,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2	0,07-	0,15	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S3	0,07-	0,15	>1,30-	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S4	0,07-	0,15	>1,75-	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S1Si	0,07-	0,15-0,40	0,35-0,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2Si	0,07-	0,15-0,40	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S2Si2	0,07-	0,15-0,60	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S3Si	0,07-	0,15-0,40	>1,30-	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S4Si	0,07-	0,15-0,40	>1,75-	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
S1Mo	0,07-	0,15-0,25	0,35-0,60	0,025	0,025	0,45-	0,15	0,15
S2Mo	0,07-	0,15-0,25	0,80-1,30	0,025	0,025	0,45-	0,15	0,15
S3Mo	0,07-	0,15-0,25	>1,30-	0,025	0,025	0,45-	0,15	0,15
S4Mo	0,07-	0,15-0,25	>1,75-	0,025	0,025	0,45-	0,15	0,15
S2Ni1	0,07-	0,15-0,25	0,80-1,30	0,025	0,025	0,15	0,80-1,20	0,15
S2Ni1.5	0,07-	0,15-0,25	0,80-1,30	0,20	0,20	0,15	>1,20-	0,15
S2Ni2	0,07-	0,15-0,25	0,80-1,30	0,20	0,20	0,15	>2,80-	0,15
S2Ni3	0,07-	0,15-0,25	0,80-1,30	0,20	0,20	0,15	1,20-1,80	0,15
S2Ni1Mo	0,07-	0,15-0,25	0,80-1,30	0,20	0,20	0,45-	1,20-1,80	0,20
S3Ni1.5	0,07-	0,15-0,25	>1,30-	0,20	0,20	0,15	>1,20-	0,20
S3Ni1Mo	0,07-	0,15-0,25	>1,30-	0,20	0,20	0,45-	1,20-1,80	0,20
S3Ni1.5M	0,07-	0,15-0,25	1,20-1,80	0,20	0,20	0,45-	>1,20-	0,20
S0	Üzerinde anlaşılan herhangi bir kimyasal bileşim							

3.8.2. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Kaynak Tozları

Tozaltı kaynak tekniğinde kullanılan kaynak tozları, örtülü elektrotlardaki örtünün görevini üstlenir ve ayrıca kaynak işlemine fiziksel ve metalürjik etkide bulunur. Fiziksel olarak oluşan cüruf, kaynak banyosunu havaya karşı korur, dikişe uygun bir biçim verir ve çabuk soğumasına engel olur. Metalürjik olaylara esas metal ile kaynak telinin de etkisi vardır. Esas metal, kaynak teli ve tozun bileşimi dikişin kimyasal bileşimine etki eden üç önemli faktördür.

Ülkemizde tozaltı kaynağında alaşımsız, az alaşımlı ve yüksek alaşımlı çelikler için kullanılan tozaltı kaynak tozları konusunda son yıllara kadar Alman Standardı DIN 32522 uygulanmakta iken Avrupa Topluluğu CEN komisyonu tarafından hazırlanan EN 760 yürürlüğe girmiştir.

İyi bir kaynak tozu şu özelliklere sahip olmalıdır:

- Kaynak işlemi sırasında arkın kararlılığını sağlamalıdır.
- Kaynak banyosunu ve esas metali havanın zararlı etkilerine karşı korumalıdır.
- İstenilen kimyasal bileşim ve mekanik özelliklere sahip bir kaynak dikişi vermelidir.
- Parçadan ısının dışa yayılmasını yavaşlatmalıdır.
- Kaynak sırasında katı, sıvı ve gaz fazları arasındaki tüm reaksiyonların (kaynak metali katılaşmaya kadar geçen kısa süre içerisinde) oluşmasını sağlamalıdır.
- Çeşitli kaynak hatalarının oluşmasına neden olabilecek organik maddeleri içermemelidir [60].

Tozaltı ark kaynağında kullanılan kaynak tozlarını üretim metotları ve özellikleri yönlerinden aşağıdaki gruplarda sınıflandırmak mümkündür [68].

- *Kaynağın amacına göre*

a-) Hızlı kaynak tozları b-) Derin nüfuziyet kaynak tozları c-) İnce sac kaynağı tozları d-) Aralık doldurma kabiliyetine sahip kaynak tozları

- *İmâl şekline göre*

a-) Erimiş kaynak tozları b-) Sinterlenmiş kaynak tozları c-) Aglomere kaynak tozları

- Kimyasal karakterine göre

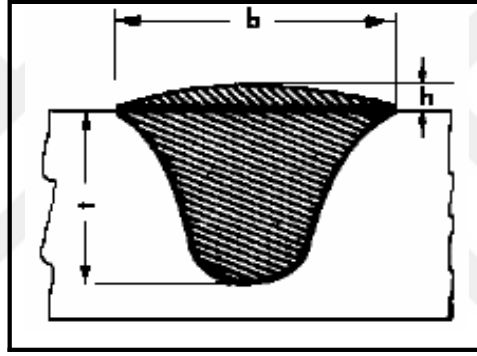
a-) Asit karakterli tozlar b-) Bazik karakterli tozlar c-) Nötr karakterli tozlar

- Manganez miktarına göre

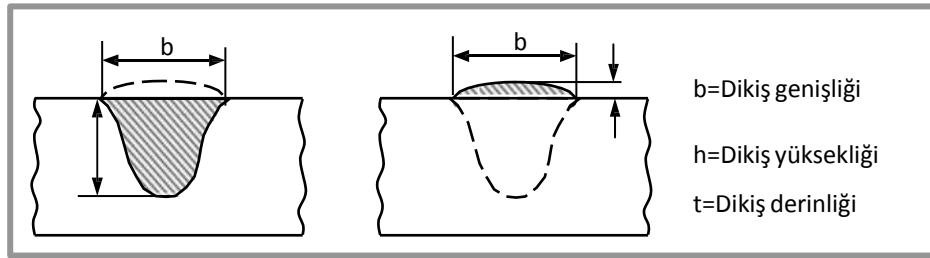
a-) Yüksek manganezli tozlar b-) Orta manganezli tozlar c-) Manganezsiz tozlar [69].

3.9. Tozaltı Kaynağında Dikiş Geometrisi

Tozaltı kaynak yönteminde bir alın birleştirmede oluşan dikişin geometrisi ve iç-dış dikiş formunun şematik gösterimleri Şekil 3.5 ve 3.6’da gösterilmiştir. Böyle bir alın kaynağı neticesinde oluşan dikiş, “dikiş yüksekliği”, “dikiş genişliği” ve “nüfuziyet” ile tanımlanır. Şekilden de görülebileceği gibi dikiş yüksekliği (h), dikiş genişliği (b) ve nüfuziyet ise (t) ile gösterilmiştir [60].



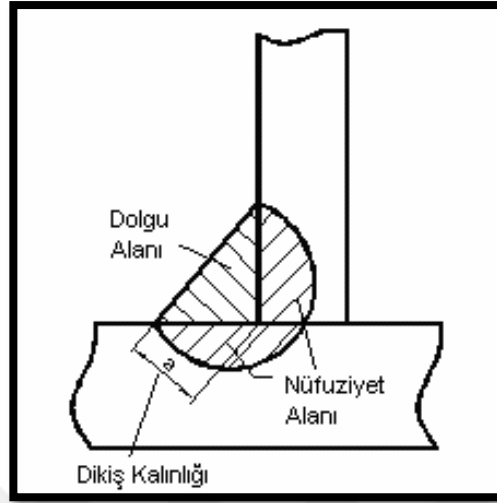
Şekil 3.5. Bir alın kaynağı dikişi [60].



Şekil 3.6. İç ve dış dikiş formunun şematik gösterilişi [56].

Tozaltı kaynak yönteminde bir köşe kaynağı sonucu ortaya çıkan dikişin geometrisi ise Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Bir köşe kaynağı neticesinde oluşan dikiş de, “dikiş kalınlığı” ve “nüfuziyet alanı” ile tanımlanır. Şekilde dikiş kalınlığı (a) ve nüfuziyet alanı gösterilmiştir. Tozaltı kaynak parametrelerinin kaynak dikişi kalitesine etkisi Tablo 3.6’da gösterilmiştir [64].



Şekil 3.7. Bir köşe kaynağı dikişi [60].

Tablo 3.6. Tozaltı kaynak parametrelerinin kaynak dikişi kalitesine etkisi [64].

Kaynak Parametreleri	Nüfuziyet	Dikişin eni	Dikişin yüksekliği
Akım şiddeti (A)	Fazla miktarda artar	Artar	Fazla miktarda artar
Ark gerilimi (V)	Azalı	Fazla miktarda artar	Azalı
Kaynak hızı (cm/dak)	Önce artar sonra sabitleşir, yüksek hızlarda sistematik	Fazla miktarda azalı	Belli bir hıza kadar azalı, sonra artar
Kaynak teli çapı (mm)	Fazla miktarda azalı	Fazla miktarda artar	Azalı
Parça eğimi aşağı doğru	Fazla miktarda azalı	Artar	Azalı
Parça eğimi yukarı doğru	Fazla miktarda artar	Azalı	Fazla miktarda artar
Kaynak telinin kaynak yönüne eğimi (°)	Fazla miktarda azalı	Artar	Azalı
Meme mesafesi (mm)	Az miktarda azalı	Artar	Azalı veya artar
Ağız açısı (°)	Değişmez	Artar	Azalı veya artar
Alın aralığı (mm)	Az miktarda azalı	Artar	Azalı veya artar
Tozun tane iriliği	Az miktarda azalı	Az miktarda artar	Az miktarda artar

3.10. Tozaltı Kaynağında Dikiş Geometrisine Etki Eden Faktörler

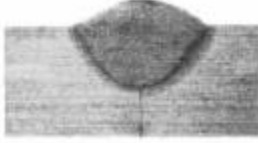
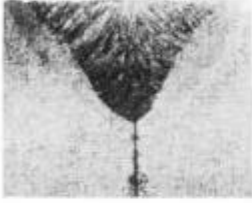
Tozaltı kaynağında dikişin geometrisine etki eden başlıca parametreler şunlardır:

- ❖ Akım şiddeti
- ❖ Akım yoğunluğu
- ❖ Ark gerilimi
- ❖ Kaynak hızı
- ❖ Kaynak ağız açısı
- ❖ Parçanın bulunduğu düzlemdeki meyli
- ❖ Kaynak tozunun tane büyüklüğü ve cinsi
- ❖ Serbest tel boyu

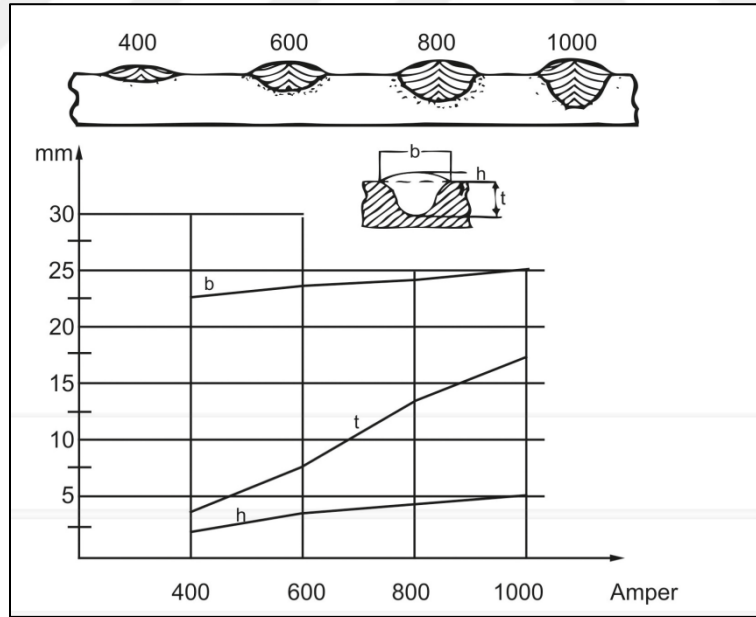
Bu parametrelerden etkisi en fazla olanlar sırasıyla akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak hızı, serbest tel boyu ile tozun cinsi ve tane büyüklüğüdür [6].

3.10.1. Akım Şiddetinin Etkisi

Akım şiddeti, ergiyen elektrot miktarını, nüfuziyet derinliğini ve ergiyen esas metal miktarını etkiler. Akım şiddetindeki artış ile nüfuziyet ve ergime miktarı artar. Şekil 3.8’de akım şiddetinin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir [60]. Dikişin formu üzerinde akım şiddetinin etkisi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Düşük	Uygun	Yüksek
		
350 Amper 29 Volt 30 ipm	500 Amper 29 Volt 30 ipm	650 Amper 29 Volt 30 ipm
Düşük	Uygun	Yüksek
		
350 Amper 40 Volt 12,5 ipm	500 Amper 40 Volt 12,5 ipm	650 Amper 40 Volt 12,5 ipm

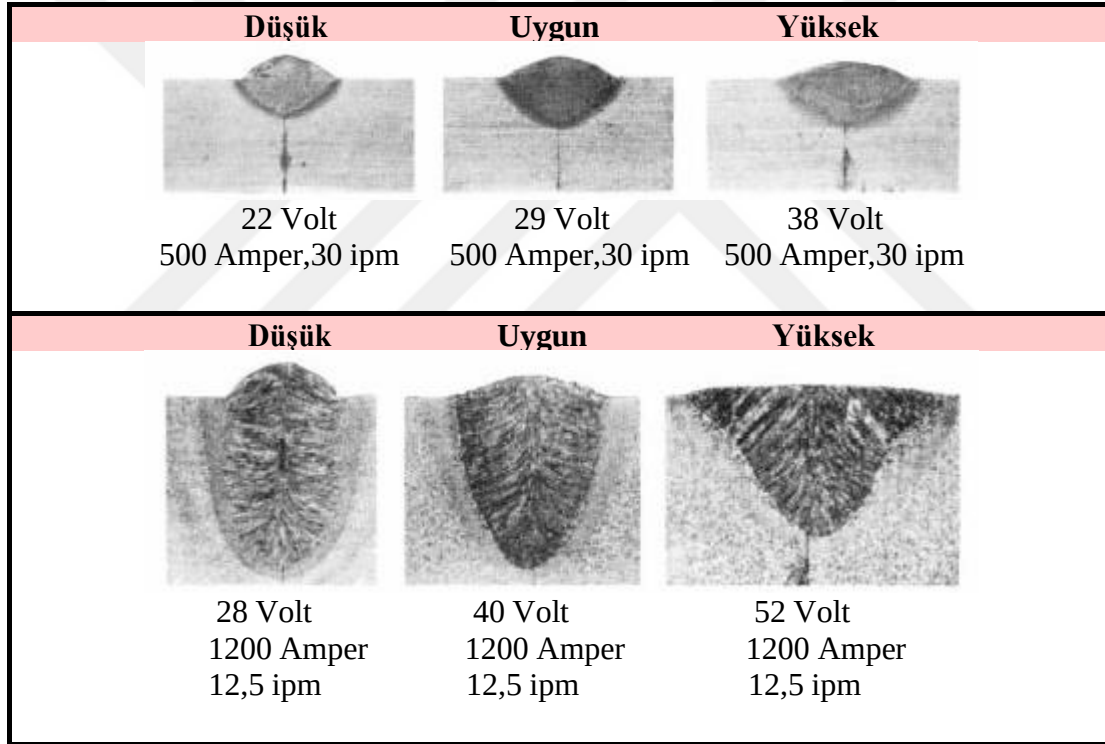
Şekil 3.8. Tozaltı kaynak yönteminde akımın dikiş geometrisi üzerindeki etkisi [57].



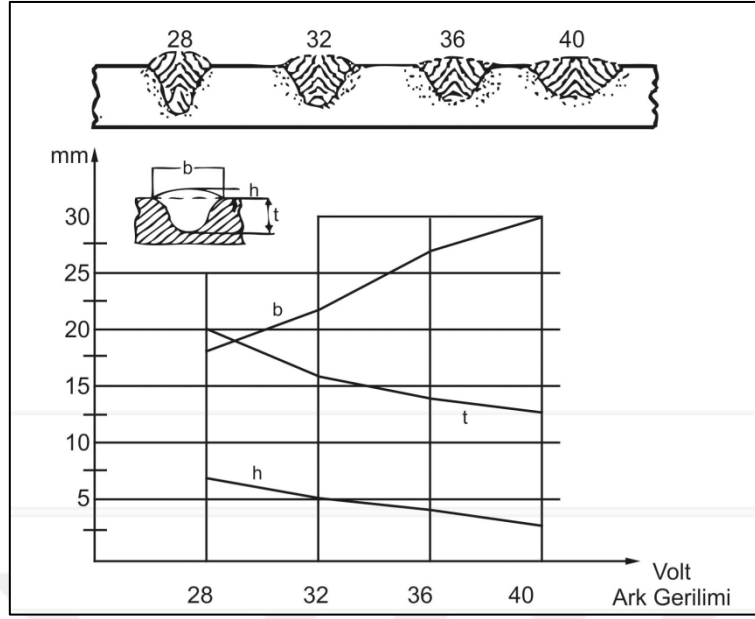
Şekil 3.9. Dikişin formu üzerinde akım şiddetinin etkisi [68].

3.10.2. Kaynak Geriliminin Etkisi

Kaynak gerilimi, dikiş kesitine ve kaynağın dış görünüşüne etki eder. Kaynak geriliminin artırılması; düz ve geniş bir dikişe, toz tüketiminin artmasına ve fazla miktarda tozun cüruf haline geçmesine sebep olur. Bu ise kaynak dikişinin kimyasal bileşimine etki eder. Gereğinden fazla gerilim; çatlakların fazlaca görüldüğü bir dikiş geometrisini oluşturur, cüruf temizleme zorluğu yaratır, çok pasolu kaynakta alaşım içeriğini artırır, konkav (iç bükey) bir yuvarlatma meydana getirir. Oldukça düşük bir gerilim kullanmak ise temizlemesi zor bir cüruf ile yüksek ve dar bir dikiş meydana getirir. Şekil 3.10’da tozaltı ark geriliminin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir [60]. Tozaltı ark geriliminin dikişin formu üzerine tesiri Şekil 3.11’de gösterilmiştir [64].



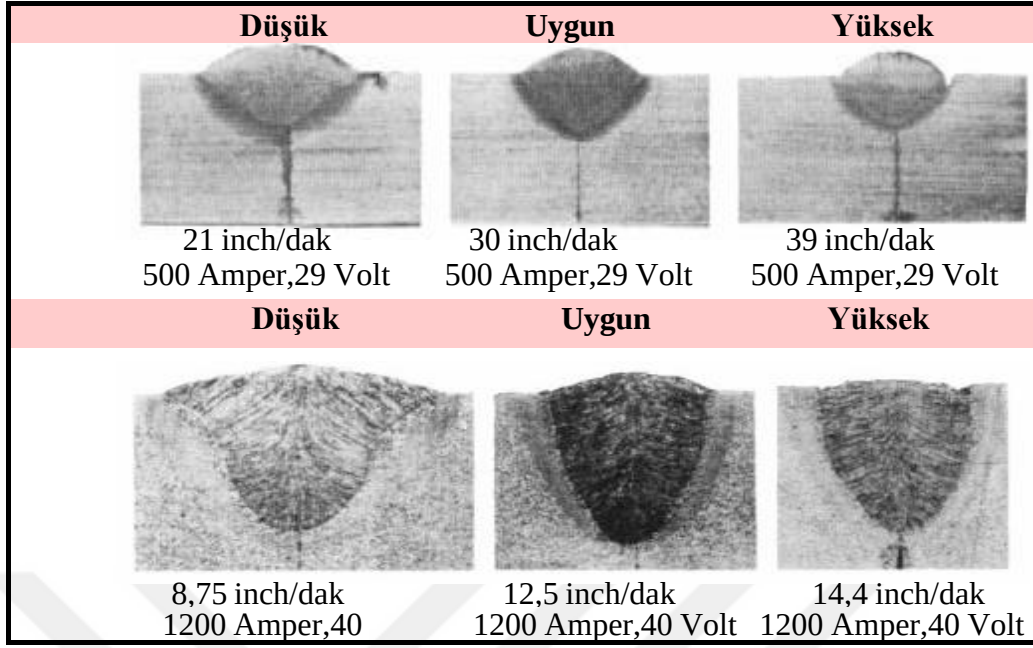
Şekil 3.10.Tozaltı kaynak yönteminde gerilimin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi [57].



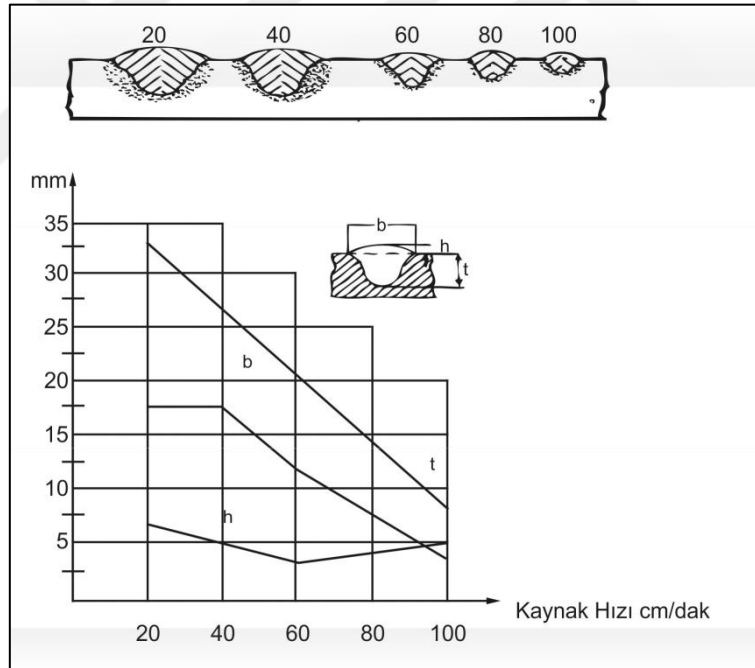
Şekil 3.11. Tozaltı Ark geriliminin dikişin formu üzerine tesiri [64].

3.10.3. Kaynak Hızının Etkisi

Düşük hızla yapılan kaynakta, ergiyen ilave metal miktarı artacağı için ergimiş banyonun miktarı büyür. Bu da kaba bir dikiş görünümü ve dikişe cüruf katma gibi problemler oluşturabilir. Kaynak hızının azalması, dikiş boyuna verilen ısı miktarını yükselteceğinden, “ısının tesiri altında kalan bölge” (ITAB) genişler ve normal kaynak hızlarında delinmemesi gereken parçalarda delinme tehlikesi ortaya çıkar. Ayrıca düşük kaynak hızlarında gözenek oluşması riski azalır. Çünkü gaz çıkartan materyallerin buhar haline gelip, ergimiş kaynak banyosundan çıkması için yeterli zamanları vardır. Bununla birlikte gereğinden yavaş kaynak hızlarında yapılan kaynakta ise çatlakların fazlaca görüldüğü dikiş geometrisi oluşur. Son olarak kaynak hızının düşmesi, kullanılan tozun sarfiyatına etki eden önemli parametrelerden birisi olup, ergiyen toz miktarını artırmaktadır. Diğer taraftan kaynak hızı yükseldikçe, nüfuziyet ile dikiş genişliğinin azaldığı görülür. Kaynak hızının artması, dikişlerin daha dikkatli kaynak edilmesini gerektirir. Gereğinden fazla kaynak hızı, ark üflemesini, gözenegi ve çatlağı artırır, dikişin şeklini bozar. Şekil 3.12’de kaynak hızının dikiş geometrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir [60]. Kaynak hızının dikişin formu üzerine tesiri Şekil 3.13’de gösterilmiştir [64].



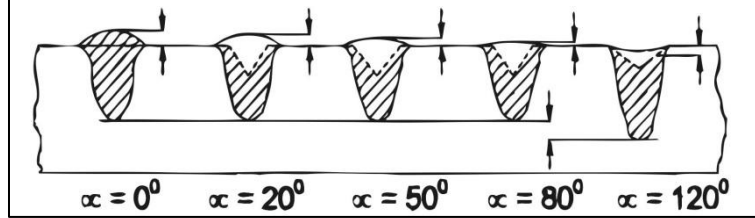
Şekil 3.12. Tozaltı kaynak yönteminde hızın dikiş geometrisi üzerindeki etkisi [57].



Şekil 3.13. Kaynak hızının dikişin formu üzerine tesiri [64].

3.10.4. Kaynak Ağız Açısının Etkisi

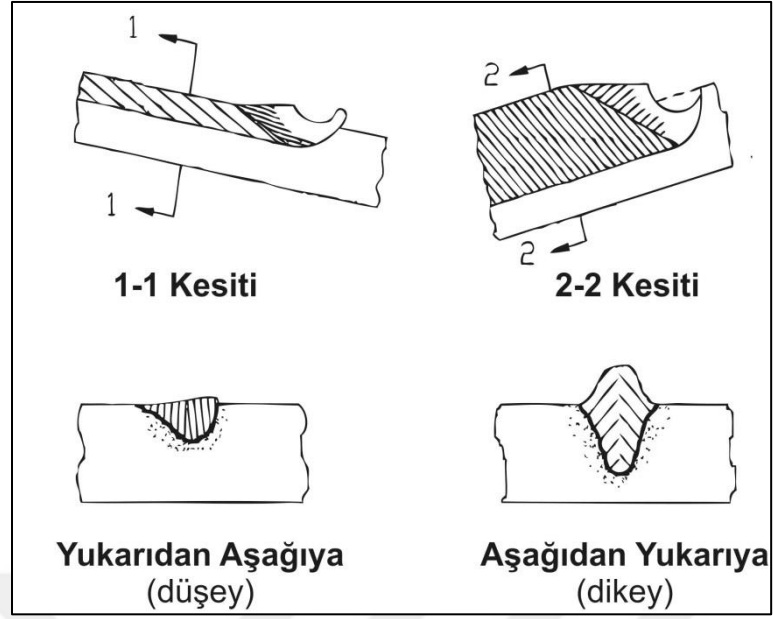
Kaynak ağız açısının artması yani iki parça arasındaki aralığın artması, dikişin nüfuziyetini artırır. Bununla birlikte dikişin yüksekliğinde azalma meydana gelir [60]. Kaynak ağız açısının dikişin formu üzerine tesiri Şekil 3.14’de gösterilmiştir [64].



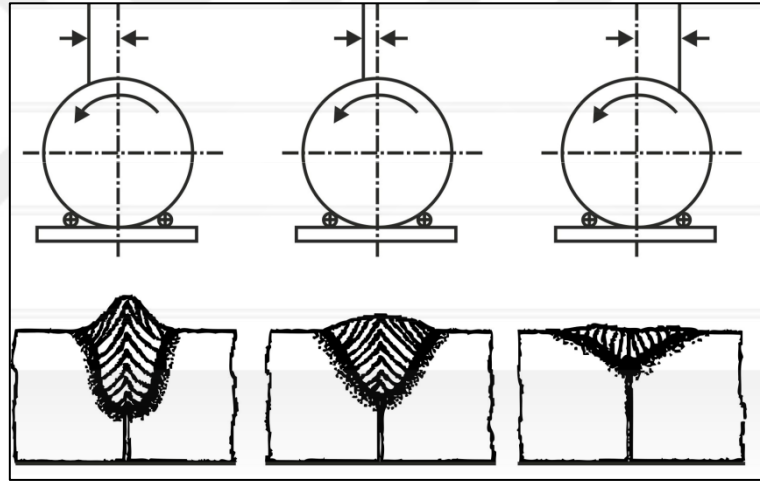
Şekil 3.14. Kaynak ağız açısının dikişin formu üzerine tesiri [64].

3.10.5. Parçanın Bulunduğu Düzlemin Etkisi

Tozaltı kaynağı esas olarak yatay pozisyonda yapılır. Burada parçanın durumu ve kaynak yönü dikiş geometrisine etki eder. Parçanın bulunduğu yatay düzlemdeki meyli 6° 'yi aşarsa kaynağın yönüne göre dikiş geometrisi de değişir. Örneğin 6° 'den daha büyük meyilli yüzeylerdeki yokuş aşağı yapılan kaynak işlemlerinde nüfuziyet gayet az ve dikiş geniştir. Yokuş yukarı yapılan kaynak işlemlerinde ise nüfuziyet ve dikiş yüksekliği çok fazladır [60]. Parçanın bulunduğu düzlemdeki eğimin, dikişin formu üzerine etkisi Şekil 3.15’de gösterilmiştir [64]. Silindirik parçaların kaynağında, kaynak telinin pozisyonunun dikey eksenin sağında veya solunda bulunması ve telin ucu ile dikey eksen arasındaki mesafenin fazlalığı veya azlığı dikişin formuna etkileyen önemli bir faktördür. Bu etkiler Şekil 3.15 ve 3.16’da görülmektedir. En uygun yer telin, parçanın dikey eksenine yakın ve kaynak yönüne göre yokuş yukarı kaynak yapacak tarafta bulunmasıdır [62].



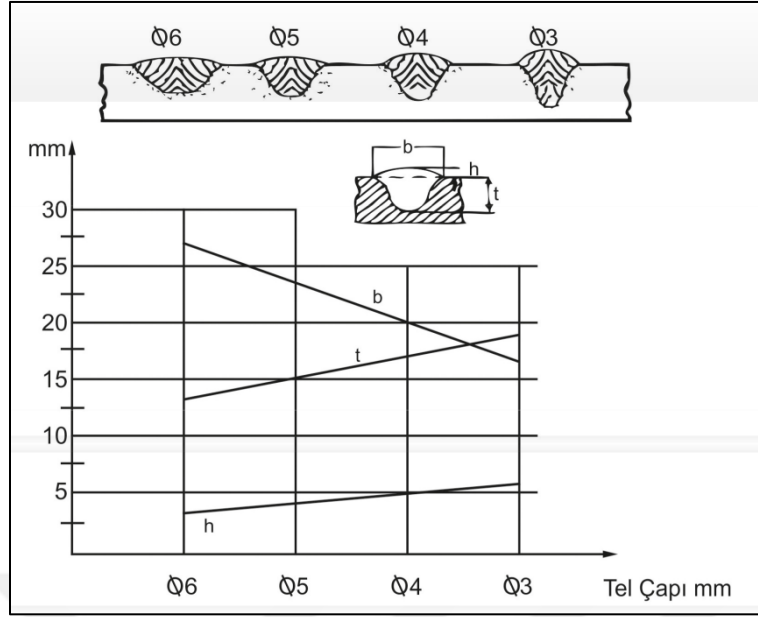
Şekil 3.15. Parçanın bulunduğu düzlemdeki eğimin, dikişin formu üzerine etkisi [64].



Şekil 3.16. Kaynak düzleminin kaynak dikişi ve nüfuziyet üzerine etkileri [62].

3.10.6. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğu ($I/F = \text{Amper} / \text{mm}^2$), akım şiddetinin tel kesitine oranıdır. Akım yoğunluğunun artması ile ergime gücü de fazlalaşacağından dikiş yüksekliğinde de bir artma görülür [70]. Kaynak teli çapının dikiş formu üzerindeki tesiri Şekil 3.17’de görülmektedir. Kaynak teli çapının artması, genellikle akım yoğunluğunun azalması demektir [68].



Şekil 3.17. Tel çapının dikişin formu üzerine tesiri [68].

3.10.7. Serbest Tel Boyunun Etkisi

Serbest tel boyu, kaynak memesinin parçaya olan mesafesi olarak ifade edilir. Pratikte meme ile parça arasındaki ortalama mesafe tel çapının 10 katı olarak alınır. Bu mesafenin büyümesiyle, nüfuziyetin azaldığı ve dikiş yüksekliğinin de arttığı görülmüştür [60].

3.10.8. Kaynak Tozunun Tane Büyüklüğünün Etkisi

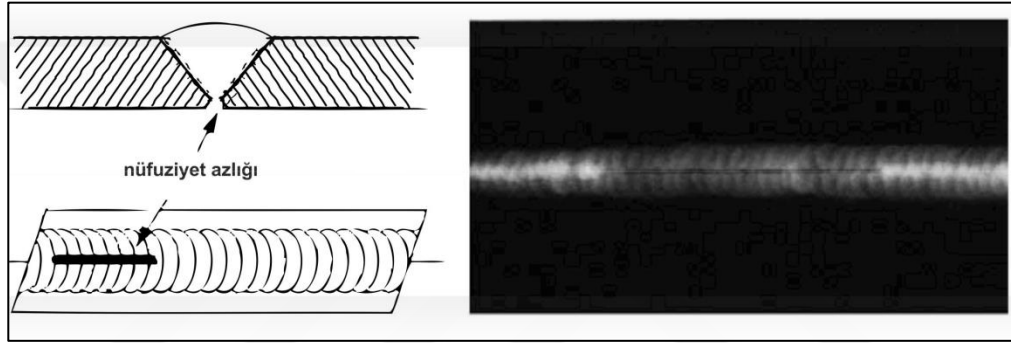
Tozun tane büyüklüğü arttıkça nüfuziyet ve dikiş yüksekliği az miktarda azalır. Bununla birlikte dikişin eninde bir miktar artma olur [60].

3.11. Tozaltı Ark Kaynağında Kaynak Hataları

Tüm kaynak yöntemlerinde olduğu gibi tozaltı ark kaynağında da kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi, uygun olmayan ek kaynak metali veya kaynak tozu kullanımı ve kaynak tekniğinin kötü uygulanması sonucunda istenmeyen bir dizi kaynak hatası ile karşılaşılması olasıdır. Tüm kaynak hataları, kaynak dikişinde bir zayıflama ve süreksizlik oluşturarak bağlantının kullanımı sırasında geri dönüşü olanaksız çatlak, kırılma ya da performans eksikliğine neden olabilir [67].

3.11.1. Nüfuziyet Yetersizliği

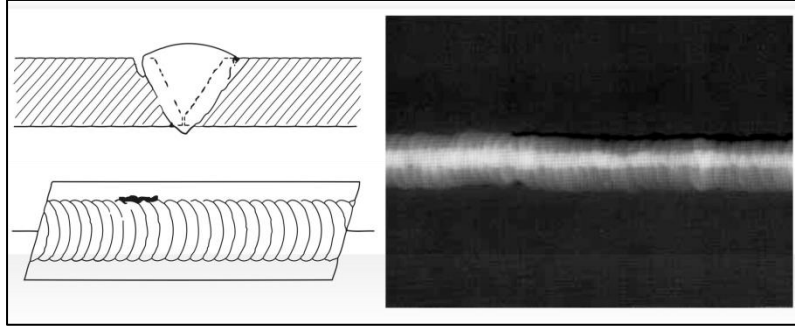
Kaynak sırasında kök pasonun tam nüfuz ettirilmemesi veya yine bu pasoda oluşan oyuk ve çentikler yetersiz nüfuziyet olarak adlandırılırlar (Şekil 3.18). Bu hatanın oluşum nedenleri; elektrot çapının uygun olmaması, akım şiddetinin uygun olmaması, kaynak ağzı açısının büyük olması, kök pasonun iyi çekilmemesi, kök açıklığının uygun olmaması, eksenel kaçıklığın büyük olması, kökteki ardışık pasolarda uygun başlangıcın yapılmaması, kök pasonun taşlanmamasıdır. Küt alın birleştirmelerde, tam olarak nüfuziyet elde etmek için birleştirmenin altı (yani diğer yüzü) spiral taş veya oksijen rendesiyle temizlenip bir paso kaynak ile doldurulmalıdır [71].



Şekil 3.18. Nüfuziyet azlığının şematik ve radyografik görüntüsü [64].

3.11.2. Yanma Olukları

Bu hata, kaynaktan sonra esas malzemede ve dikişin kenarındaki oyuk veya çentik şeklinde gözükür. Oluklar dikiş boyunca sürekli veya kesintili olarak devam eder. Bütün ark kaynak yöntemlerinde karşılaşılan yanma oluklarının esas nedenleri, kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi ve hatalı manipülasyonlardır. Yanma olukları kaynak dikiş kesitini zayıflattıklarından ve kertik etkisi yaptıklarından özellikle dinamik zorlamalara maruz bağlantılarda varlıkları arzu edilmez. Şekil 3.19’de yanma olukların şematik ve radyografik görüntüsü verilmiştir.



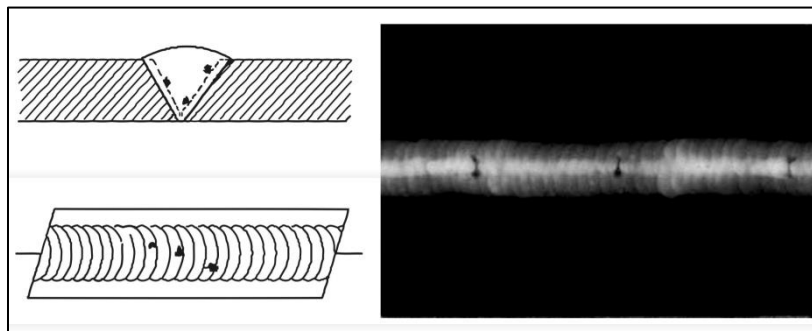
Şekil 3.19. Yanma olukların şematik ve radyografik görüntüsü [64].

3.11.3. Gözenek Oluşumu

Çok çeşitli nedenlerle oluşabilen gözenekler kaynak banyosunda sıkışıp kalan gazların oluşturduğu boşluklardır. Bunlar gaz kabarcığı denilen tek tek yuvarlak veya gaz kanalı olarak adlandırılan uzunlamasına boşluklar halinde dikiş içinde yer alırlar. Bir kaynak dikişinin içinde bulunan gözenekler, dikişin taşıyıcısı kesitinin azalmasına yol açtığından dolayı mukavemet değerlerini düşürür ve aynı zamanda yerel gerilme birikimlerine neden olur. Bu durumda bağlantının mekanik özelliklerinin kötüleşmesine yol açar [67].

3.11.4. Kalıntılar

Kaynak işlemi esnasında kaynak bölgesine geçen ve sonuçta kaynak bölgesinden uzaklaştırılamayan, kaynak bileşimi karakterinde olmayan kalıntıların neden olduğu hatalardır [71]. Şekil 3.20’de kalıntıların kaynak dikişinde şematik ve radyografik görüntüsü verilmiştir [64].



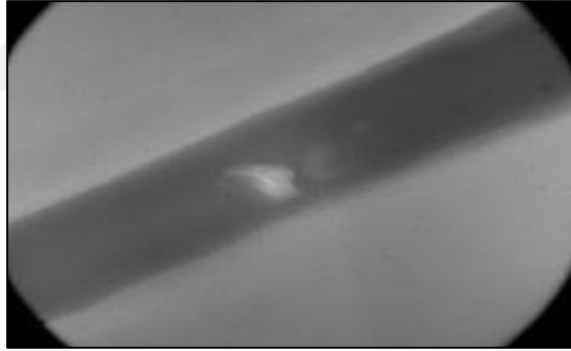
Şekil 3.20. Kalıntıların kaynak dikişinde şematik ve radyografik görüntüsü [64].

3.11.5. Çatlaklar

En tehlikeli kaynak hatasıdır. Eritme kaynağında; ana metalde, kaynak metalinde veya ısının tesiri altındaki bölgede ortaya çıkabilir ve dış zorlamaların türü ne olursa olsun çatlaklar sürekli olarak bağlantının mukavemet değerini düşürür; bu bakımdan, kaynak dikişinde çatlama hiçbir şekilde izin verilmez [56]-[60]-[64]-[67]-[68]-[72]-[73]. Şekil 3.21’de kaynak dikişinde sıcak çatlama örneği ve Şekil 3.22’de ise radyografik muayene yöntemiyle çatlakın görüntüsü verilmiştir [71].



Şekil 3.21. Kaynak dikişinde sıcak çatlama örneği [64].

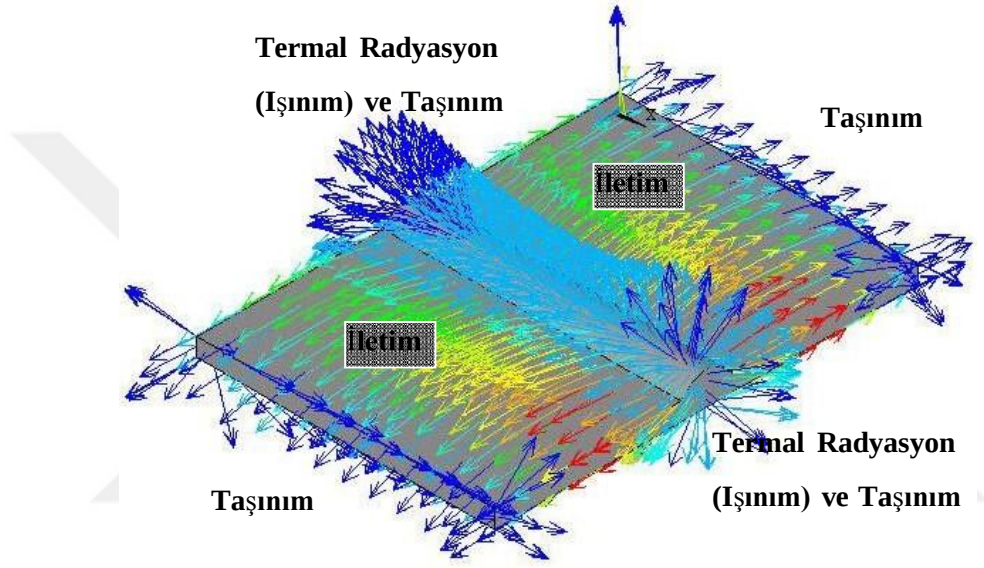


Şekil 3.22. Radyografik muayene yöntemiyle çatlakın görüntüsü [71].

4. ANSYS SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ

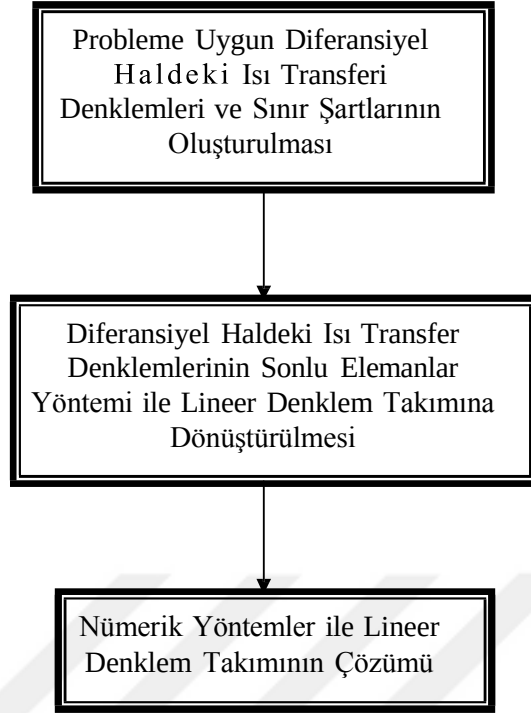
4.1. Kaynakta Isı Transferi

Kaynak işlemindeki ısı transferini gösteren termal olaylar Şekil 4.1' de gösterilmektedir. Kaynaktaki ısı akışı ergime için çok önemlidir. Kaynakta ısıнын önemli bir miktarı yüksek sıcaklık alanı yüzeyinden ve eriyik havuzu yüzeyinden radyasyonla çevreye yayılır. Aynı zamanda ergime için gerekli olan ısıнын büyük bir kısmı da iletim ve taşınım ile malzemeye yayılır [74].



Şekil 4.1. Kaynakta ısı transfer mekanizmaları [74].

Kaynak işleminde meydana gelen termal olayların nümerik çözümlenmesinde izlenecek yolu şematik olarak Şekil 4.2'de gösterilecek olursa;



Şekil 4.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile ısı transferi problemlerinin çözümünün akış şeması [74].

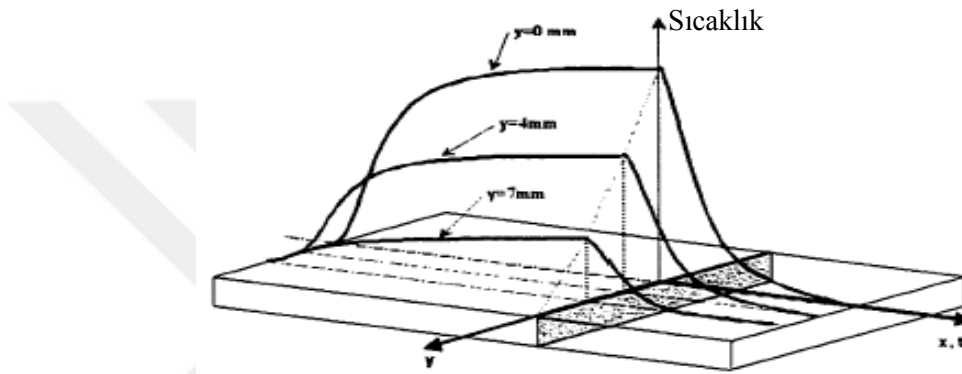
4.2. Kaynak İşlemindeki Isı Transferinin Analitik ve Nümerik Çözümü

Bazen problemi yeterince çözmek mümkündür. Bu analitik çözümdür ve iki kısımdan oluşur; özel kısım ve homojen kısım. Çözümlemenin homojen kısmı daima doğal davranış belirleyen sistem karakteristikleri içerir. Özel kısım çözümü ise tam tersine, moment, dış kuvvetler, ısı akış oranı, basınç farklılıkları, ısı girişi ve sıcaklık farklılıkları gibi bir sistemde karışıklığa neden olan parametreler içerir.

Mühendislik problemlerin çözümünde hem problemin karmaşıklığı hem de başlangıçtaki şartların ve yapının tanımlanmasındaki zorluklar nedeni ile kesin sonuç elde edilemeyebilir. Nümerik yaklaşımlar yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Tam tersine analitik çözüm sistem içinde herhangi bir noktada sistem davranışını çözmek için yavaştır [75].

4.3. Analitik Çözümleme

Kaynak işleminin analitik çözümü için kayaktaki olaylar tam ve doğru olarak analiz edilmelidir. Ergime kaynak işlemlerinin çoğunda iş parçası üzerinde ısı kaynağı hareketlidir. Eğer ısı kaynağının sürekli olarak bir çizgi üzerinde hareket ettiğini ve sürekli olarak bir yük uyguladığını varsayarsak, bu durum sürekli genişleyen bir ergiyik bölgesine neden olabileceği deneysel olarak rahatlıkla ispat edilebilir. Ayrıca, Ergime sıcaklığının altındaki tüm maksimum sıcaklık izotermal bölgeleri sabit bir genişliktedir.



Şekil 4.3. Isı Kaynağından çeşitli mesafelerdeki soğuma eğrileri [74].

Eğer sıcaklık ısı kaynağının bir noktasından gözlenirse, sürekli hareket eden sıcaklık noktası zamanla değişmeyecektir. Kaynak yönünde ergime noktasındaki sıcaklık da zirve, sıcaklığın olacaktır (Şekil 4.3). Ayrıca, eğer merkez çizgisinden farklı noktalar göz önüne alınırsa, sıcaklık ısı kaynağı altında 2000-2200 °C lık maksimum sıcaklıklara çok hızlı bir şekilde ulaşacaktır. Isı kaynağı sabit bir noktadan çapraz kesit düzlemine geçtiği zaman, sıcaklık düşmeye başlar ve uzun bir süre sonunda ana metale yaklaşır [76]–[78].

Rosenthal tarafından geliştirilen matematiksel model iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) problemler için kaynak parçalarındaki ısı dağılımı için çözüm sunar. Bu model daha sonra Nunes tarafından revize edilmiştir [79].

4.4. Nümerik Metodlar

Nümerik modellemeler için Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri ile çözüm yapan Monte Carlo, Particle Methods ve Continuum Physics gibi farklı bilgisayar programları vardır. Bunlardan Monte Carlo metodu deneysel olmayan yada çok az deneysel olan problemlerin hızlı çözömlenmesini sağlayabilen istatistiksel bir metoddur. Particle Metodu yapılarıdaki sonlu sayılardaki problemleri çözömlünü sağlayan yöntemdir. Continuum Physics metodu zaman ve mekana bağılı olarak sürekli değışen sıcaklık ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerine bağılı ve noktadan noktaya değışen kısmi farklı denklemler tarafından tanımlanan uygulamalar için kullanılan bir yöntemdir.

Sonlu farklar metodu simetrik problemlerin çözömlü için kullanışlı bir yöntemdir. Diğler taraftan sonlu elemanlar metodu sonlu farklar metodu ile çözömlü zor olan problemlerin çözömlünde uygulanılan bir yöntemdir. Bu yöntem simetrik olmayan yada çok az simetrik olan durumlar için kullanışlıdır.

Düğüm noktalarındaki enerjinin değıerlerinin fonksiyonu integral olarak değıerlendirildiğı kadar ifade edilir ve minimum enerji şartları i den i^{th} ye kadar bütün değıerlerin sıfır olduğı ile ilgili integralin kısmi farklılığıdır. Bu da düğüm noktalarının çözömlü için lineer denklemlerin kurulmasına yol açar.

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan işlemlerinde hatalı sonuçlara yol açan çeşitli hata kaynakları vardır. Bunlar:

- Fiziksel özellik ve sabit boyut gibi hatalı veri girişı,
- Uygunsuz element tiplerinin kullanımı,
- Şekil ve boyut gibi elemanlarının yanlış verilmesi
- Yükler ve sınır şartlarının yanlış uygulanması.

Bu yüzden sonlu elemanlar metodunun etkili kullanılması ana konuların anlaşılması ile ilgilidir. Bir mühendislik probleminde tipik bir sonlu elemanlar metodu genellikle bazı adımlara bağılıdır [80]-[81].

➤ Ön İşlemler:

- Sonlu elemanlarla ilgili tanımlamalar
- Element denklemlerinin formülasyonu
- İlgili verilerin denkleme yerleştirilmesi
- Sınır şartlarının uygulanması.

➤ Çözüm

Isı transfer problemleri için sınır sıcaklık değerleri gibi parametrelere bağlı hesaplama ve denklemlerin çözümü;

➤ İşlemlerden sonra:

Isı akışı, gerilimler gibi önemli bilgilerin elde edilmesi.

Günümüzde nümerik matematik problemlerinin çözümü için çeşitli paket programları vardır. Bu programların çoğu özel problem çözümlerine hitap eden ve çalışıldığı problem türünü çözebilen programlardır [74].

4.5. Ansys'de Problem Çözümü ve Simülasyonu

4.5.1. Ansys Programının Yapısı

Ansys paket programı ile statik, dinamik, lineer, non-lineer, termal ve manyetik gibi çok geniş spektrumlu modelleme ve analiz yapılabilmektedir. Program genel olarak ön işlemci, çözüm ve son işlemci olmak üzere üç kısımdan oluşur. Modelin oluşturulması ve sınır şartları ön işlemci kısmında oluşturulur. Çözüm kısmında; problemin çözümü gerçekleştirilir. Son işlemci kısmında ise elde edilen sonuçlar değerlendirilir.

Ansys gibi ticari amaç için hazırlanmış yazılımların en önemli özelliği; probleme yönelik özel eleman içeriyor olmasıdır. Böylece bu tür elemanlar kullanılarak yapılan modellemeler gerçek şartlara daha yakın olmakta ve daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Ansys sonlu elemanlar programında analizi yapılacak parça aşağıdaki işlem basamakları uygulanarak analizi yapılır;

- Bütün (düğüm noktaları ile) parçalara bölünür,

- Her elemanın fiziksel özelliklerine göre davranışları tanımlanır,
- Bütün, denklemlerin yaklaşım sistemlerine göre, elemanlar düğüm noktalarından birbiriyle bağlanır,

Oluşturulan denklem, bilinen değerlere bağlı olarak bilinmeyen değerler için çözülür, istenen özelliklerin simülasyonu yapılır (termal analiz, uzama, gerilme vs.) [74].

Bu çalışmada, termal analiz için Ansys 12.0 multiphysics modülü ve bu modül içerisinde var olan termal analiz kısmı kullanılmıştır.

4.5.2. Ansys’de Geometrik Modelin Oluşturulması

Model geometrisi oluşturmak için tek bir yol yoktur, yapıların boyut ve şekline bağlı oldukça çok model oluşturulabilir. Birinci adım, yapılacak analiz için katı modeli oluşturmaktır. Oluşturulan model için ya silindirik ve dörtgen gibi geometri yapısının ön tanımlaması yapılabilir ya da elementler ve nodlar manuel olarak tanımlanır. 2-B modeller alan (areas) olarak, 3-B modellerde hacim (volumes) olarak adlandırılır. Model boyutları global bir koordinat sistemine dayanır. Varsayım olarak global koordinat sistemi X, Y ve Z eksenlerinde kartezyendir. Eğer istenirse farklı koordinat sistemi de seçilebilir. Model çalışma ekranında istenen yönde döndürülebilir. Oluşturulan model Boolean operasyonu ile birleştirilir. Örneğin önceden çizilen bir alanla sonradan çizilen bir alanı program birbirinden bağımsız olarak düşünür ve doğru analiz yapamaz. Bunun için Boolean operasyonu yapmak gerekir. Şekil 4.4’de termal analiz akış diyagramı örnekleri ile birlikte gösterilmektedir [74].

Geometrik modelin
oluşturulması



Sonlu elemanlar ağıının
oluşturulması



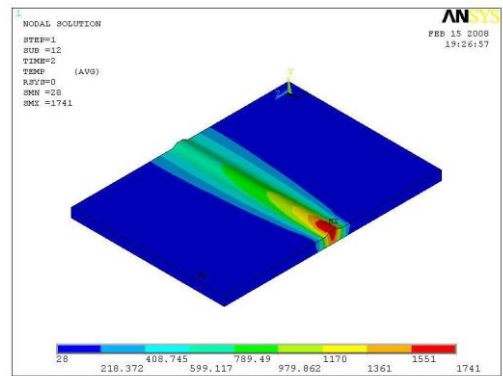
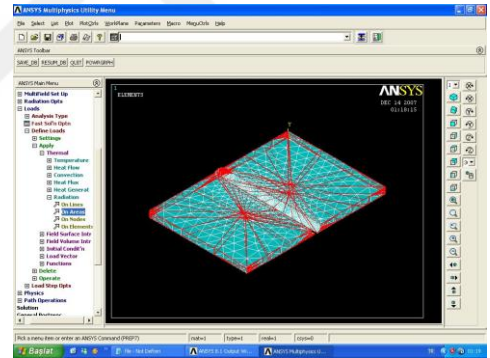
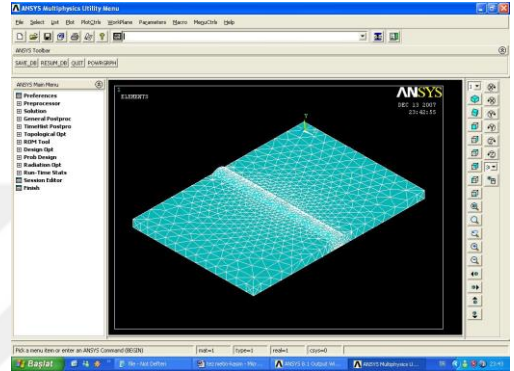
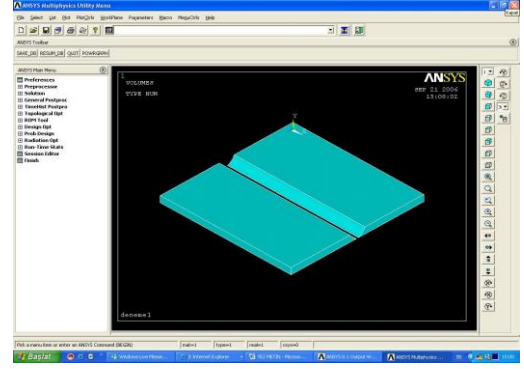
Malzeme özelliklerinin ve
sınır şartlarının
tanımlanması



Çözüm



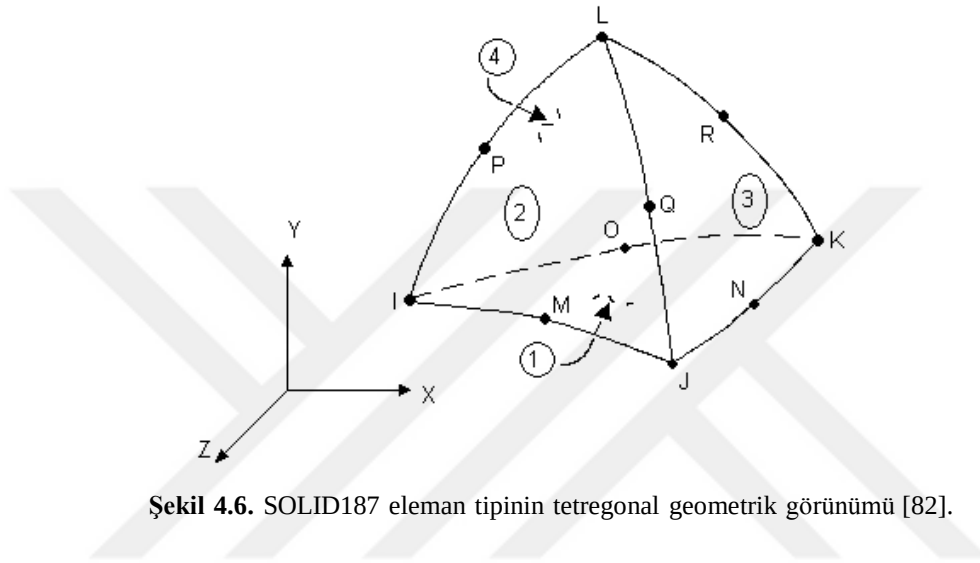
Sonuçların
değerlendirilmesi



Şekil 4.4. Termal analiz akış diyagramı ve örnek gösterimleri [74]

4.8. SOLID187 Eleman Tipi

Yapısal analiz modellemelerinde SOLID87'nin yapısal eşleniği olan SOLID187 eleman tipi kullanılmıştır. Şekil 4.6'da gösterilen SOLID187 10 tetregonal eleman tipi üzerinde 10 düğüm noktası bulunan eleman plastisite, hiperelastisite, viskoelastisite, viskoplastisite, gerilim, gerinim, başlangıç gerilimi tanımlama, sürünme ve eğilme uygulamalarında kullanılır [82].



Şekil 4.6. SOLID187 eleman tipinin tetregonal geometrik görünümü [82].

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kaynak işleminin sayısal veri analizi ve simülasyonu, kaynak işlemi üzerine yapılan incelemelerin en önemli konularından birisidir. Bu konuyla ilgili bilgisayar teknolojisinin de gelişmesi ile birlikte özellikle son yıllarda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, nümerik analiz ve matematiksel modeller kullanarak bilgisayarların da yardımıyla kaynak işleminde karşılaşılan karmaşık durumlar önceden açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmalarda kaynaklı bir yapıdaki kaynak metali, esas metal ve özellikle de kaynak emniyeti açısından büyük önem taşıyan ısının tesiri altında kalan bölgenin yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bilindiği gibi bu özellikler kaynak yöntemi, kaynak şartları, malzeme ve benzeri birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

Mocanita, M.A.,'nın karmaşık kaynaklı yapıların hesaplama mekanizmaları üzerine yapmış olduğu çalışmasında, kaynaklı yapılardaki ısı transferi, gerilim, gerinim ve mikroyapı değişimlerini üç boyutlu olarak modellemiştir. Bunun için CWM (Computational Weld Mechanics) metodunu kullanan Mocanita, deneysel ölçüm ile oldukça uygun sonuçlar almıştır [83].

Gua, H., alüminyum alaşımlarının kaynağını, hem deneysel olarak hem de üç boyutlu matematiksel olarak modellemiş, kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımının ve şeklinin mukayesesini yapmıştır. Gua çalışmasında, kaynağın son noktasında oluşan kraterin ve kaynağın mikroyapısını optik mikroskop ile incelemiş ve mikro sertliklerini ölçmüştür. Kaynakta oluşan krater yapısının kaynağın hızlı soğumasının bir sonucu olduğunu belirtmiştir [84].

Awang, M., çelik malzemelerde meydana gelen kalıntı gerilimleri incelemek amacıyla köşe birleştirmelerine farklı eğim şekillerinde, farklı ısı girdisi ile deneyler yapmış ve bu deneylerin sonlu elemanlar programı Ansys'de analizini yapmıştır. Awang işlem parametrelerinin kalıcı gerilimler üzerine etkisini incelemiştir [85].

Wen, S.W. ve arkadaşları, çok telli bir tozaltı kaynağı işlemi, genel amaçlı bir sonlu eleman paket programı olan ABAQUS'u kullanarak modellemişlerdir. Bu çalışmada, kısaca kaynak işlemi ve bunun kalın çeperli boru hattı imalatındaki

uygulaması açıklanmaktadır. Sonlu eleman tahminleri ile deneysel sonuçların karşılaştırmaları sunulmuştur. Kaynağın neden olduğu geometrik distorsiyonlar kalıcı gerilmeler ve uzamaların işlem optimizasyonu sayesinde en aza indirilebileceği gösterilmiştir [86].

Teng C .C , ve arkadaşları tarafından yapılmış çalışmada, Ansys sonlu eleman teknikleri kullanılarak çelik plakaların tek pasolu ark kaynağındaki kalıcı gerilmeler belirlenmiştir. Ayrıca kalıcı gerilmeler üzerine kaynak hızı, numune boyutu, dış mekanik kısıtlamalar ve ön ısıtmanın etkileri tartışılmıştır [87].

Gunaraj, N., ve arkadaşları tarafından yapılmış çalışmada, yapısal çelik boruların tozaltı kaynağında işlem değişkenlerinin ve ısı girdisinin etkilerini belirlemek amacıyla matematiksel modeller geliştirilmiştir [88].

Agelariidou, A., kaynakta termal ve katılma olaylarını incelemiştir. Bunun için plazma ve lazer kaynağında farklı kaynak parametrelerinin kaynakta katılma ve termal olaylara etkisini inceleyerek uygun değer parametreleri belirlemiştir. Deney parametreleri ve sonlu elemanlar analizi kaynak bölgesi mukayesesi sonucunda Plazma kaynağında, daha iyi sonuç alırken, lazer kaynağından iyi sonuçlar alamamıştır. Bunun sebebini ise deneylerde, lazer kaynağındaki gerçek güç yoğunluğu profilinin belli olmayışına bağlamıştır [89] .

Fanlin Zhu, gaz metal ark kaynağının kapsamlı dinamik modellenmesini çalışmış, kaynak telinden kaynak havuzuna geçiş olaylarını deneysel ve matematiksel olarak incelemiştir. Zhu çalışmasında, ısı geçişi, ark plazmasının hız dağılımı, damlanın formasyonu, kaynak havuzundaki akışkanın akışı, ısı transferi, kaynak havuzu, telin şeklini modellemiştir. Metal transferine kaynak akımının etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, matematiksel model ile deneysel veri sonuçlarının birbirini desteklediği görülmüştür [90].

Y.H. Wei ve arkadaşları, kaynak katılma çatlağının üç boyutlu nümerik simülasyonu için yaptıkları çalışmada, kaynak havuzunun hızlı katılmasında oluşan gerilmeleri sonlu elemanlar modellemesi ile üç boyutlu olarak modellemiştir. Kaynak

katılaşmasında etkili olan dinamik gerilim-gerinim yayılımları hesaplanmıştır. Sonuç olarak deneysel ölçümlerle, hesaplanan değerler hassas olarak mukayese edilmiş, kaynak parametrelerinin kalıcı gerilmeler üzerinde önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [91].

M.A. Wahab ve arkadaşları, gaz metal ark kaynağında kaynak havuz geometrisi ve sıcaklık tahminleri yapmak amacıyla kaynak sırasında kaynak bölgesi yakınlarındaki termal dönüşümleri hesaplamak için bilgisayarda yeni bir metod geliştirmişlerdir. Kaynaktaki termal dönüşümlerin soğuma oranı, kaynak havuz geometrisi ve kaynak nüfuziyetini etkilediği kaydedilmiştir. Bunun için iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirmişler, sonuçları mukayese edebilmek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu modelde ark ısı da modellenmiştir [92].

I.S. Kim ve A. Basu tarafından, yapılan gaz metal ark kaynağında kaynak metali akışının ısı transferinin modellenmesi isimli çalışmada, kaynak işlem parametrelerinin tahmini için matematiksel model geliştirilmiştir. 2 boyutlu olarak geliştirilen model gaz metal ark kaynağında kaynak havuzunda ısı ve kaynak metali akışını, kaynak damlası geometrisini tanımlama, sıcaklık profili ve hızı modellenmiştir. Deneysel olarak da incelenen çalışmada, ergiyen metal damlası kadar elektromanyetik kuvvetler ve yüzey gerilim kuvvetleri de kaynak havuz geometrisine etkili olduğu tespit edilen çalışmada matematiksel modelleme ile deneysel sonuçlar birbirini desteklemiştir [76].

I.O. Santos ve arkadaşlarının, paslanmaz çeliğin kaynakla birleştirilmesi konulu çalışmalarında, paslanmaz çeliğin nokta direnç kaynağı ile kaynaklanması deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Bu çalışma sonlu elemanlar modellenmesi SORPAS ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir [93].

J.R. Cho ve arkadaşları, kaynaktan sonraki kalıcı gerilmeler ve ısı işlemleri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. 32 ve 56 mm kalınlıklarındaki plakalara uygulanan kaynak işlemlerinde, en yüksek kalıcı gerilmenin 316 MPa ile 56 mm kalınlığındaki plakada olduğu ancak kaynak sonrası ısı işlemden sonra 39 MPa'a indiği tespit edilmiştir [94].

Alın kaynak birleştirmelerin kalıcı gerilmelerini deneysel ve nümerik olarak inceleyen Peng-Hsiang Chang ve Tso-Liang Teng, kaynak sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve hızlı soğumanın kalıcı gerilmeler ürettiğini belirtmişlerdir. Kaynak yüzeyinden kalıcı gerilmeleri X-ray yöntemi ile ölçmüşler ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçları birbirini doğrulamış fabrikasyon işlemlerinde de bu yöntemin kullanılabileceğini belirtmişlerdir [95].

Patlama kaynağında ara yüzey dalgalanma mekanizmasının deneysel ne nümerik modellenmesini çalışan A.A. Akbari Mousavi ve S.T.S. Al-Hassani, sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Pnömatik tabanca kullanılarak yapılan deney verileri dikkatlice incelenmiş, düz ve dalgalı ara yüzey ile püskürme olayı modellenmiştir. Dalga boyu ve fiřkıрма hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır [96].

Atapek Ş. yaptığı çalışmada, bor katkılı bir zırh çeliğinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmiş ve balistik performansını değerlendirmiştir. Isıl işlem koşullarına bağılı olarak, geliştirilen zırh çeliğinin sertlik, mukavemet, tokluk, aşınma gibi mekanik özelliklerinin ve korozyon direncinin dışında V50 balistik limiti ve yüksek çarpma hızlarındaki performansı araştırmıştır. Araştırmaları sonucunda zırh çeliklerinin alaşım tasarımı üzerine daha farklı çalışmalar yapılması gerektiği kanısına varmıştır. Hızlı su verme ile çeliklerde martenzitik/beynitik dönüşüm gözlemlenmiş olup, martenzit/beynit başlangıç sıcaklığının oda sıcaklığının çok üzerinde bir değer olduğunu görmüştür. Aşınma davranışlarını incelediğinde, yüksek sertlikteki zırh çeliklerinin düşük sertlikteki zırh çeliklerine göre daha düşük aşınma dayanımı gösterdiğini gözlemlenmiştir. Yapılan balistik testler sonucunda geliştirilen zırh çeliğinin daha yüksek V50 balistik limitlere sahip olduğunu gözlemlenmiştir [97].

Maweja ve Stumpf yaptığı çalışmada, hasar mekanizmalarını ve hem darbe bölgesinde hem de darbe bölgesine dik kesitte meydana gelen faz dönüşümlerini incelemek için çeşitli koşullardaki zırh çeliklerini 5,56 mm'lik zırh delici mermilerle balistik olarak incelemişlerdir. Zırh malzemesinin içyapısının balistik başarımı doğrudan etkilediğini belirlemişlerdir [98].

Atapek Ş., zırh çeliklerinin fiziksel ve metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve karakterizasyonu üzerine yaptığı çalışmada, Orta karbon ve alaşım elementi ile birlikte bor katkılı yeni tür bir alaşımlandırma dizaynının yapılması ve uygulanan çeşitli ısı işlemleriyle zırhın performansını belirleyecek olan optimum mekanik özelliklerin balistik karakteristiğe uygun bir aralık içinde elde edilmesi hedeflenmiştir. Değişen kompozisyon ve ısı işleme paralel olarak elde edilen mikroyapıların performansı belirleyen mekanik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, zırh çeliklerinin bor katkılı veri bir kompozisyondan yola çıkılarak sadece ısı işlemleriyle istenen mekanik özelliklerin sağlanabileceğini göstermiştir. Hedeflediği mekanik özellikleri değişen ısı işlemleri ile elde edebilmiştir [33].

Manganello ve Abbot yaptıkları çalışmada, çelik zırhların düşük hız darbe dayanımlarına çelik özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonunda, balistik başarımı en çok etkileyen özelliğin sertlik olduğunu ortaya koymuşlardır [99].

Zengin E. yaptığı çalışmada, Armour 500 zırh çeliğine elektrik ark kaynak yöntemi ve elektrodu ile dört farklı ön tav sıcaklığında kaynaklı birleştirme uygulamış ve birleştirme bölgesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda, kaynaklı birleştirilen numunelerin hepsinde akma ve çekme dayanımlarının artan ön tav sıcaklığıyla birlikte azaldığı, sünekliğin ise arttığı sonucuna varmıştır [100].

Soncu R., Yavuz N. ve Ertan R. yaptıkları çalışmada, tozaltı kaynak işleminin termal analizini Ansys paket programında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan malzeme St37 olup, tozaltı kaynak yöntemini korniş pozisyonunda uygulamışlardır. Sonuç olarak sıcaklıktan fazla etkilenen bölgelerde malzeme iç yapısında daha yüksek artık gerilmeler ve distorsiyonlar olacağı düşünülerek, bu bölgeleri bu çalışmayla önceden tespit etmişlerdir [101].

Yavuz N., Özcan R. ve Polat G.F., tozaltı kaynağı yöntemini kullanarak kaynak ile birleştirilmiş malzemenin kaynak metali, ısının tesiri altında kalan bölge ve esas metal bölgelerinin mekanik özelliklerini, düz çekme numuneleri kullanarak incelemek amacıyla deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çekme verilerinden elde edilen sonuçları kullanarak toz altı kaynağı işleminin Ansys paket programında sonlu eleman modelini

oluşturmuşlardır. Analiz 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci olarak kaynak işleminde meydana gelen ısı çevrimin etkisiyle termal analiz yapılmıştır. Termal analiz sonucunda elde edilen verileri mekanik analize veri olarak 2. aşamada kullanmışlardır. Modelleme ile kaynak işlemi sonrası malzemenin durumu önceden tahmin edilebildiği gibi kaynak parametrelerinin optimizasyonunu da sağlamışlardır [102].

Jiang W. ve arkadaşları, tarafından yapılan bir çalışmada, çift V geometrisinde, çok pasolu kaynak işleminin analizini yapmak için Ansys programında üç boyutlu ısı-mekanik sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Büyük deformasyonlar, malzeme kalıntıları, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri, ısı kaynağı gibi kaynakla bağlantılı lineer olmayan durumlar dikkate alınmıştır. Üç boyutlu, ısı - mekanik modele, kaynak dolgu metali eklenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, üç boyutlu sonlu eleman modeli için hiçbir geometrik basitleştirmeye ihtiyaç olmadığı ve artık gerilmeyi belirlemek için bu modelin karmaşık geometrilerde kaynak edilmiş parçalara uygulanabileceği görülmüştür [103].

Srivathsa ve Ramakrishnan birim alan-yoğunluk başına balistik darbe enerjisinin hesabını içeren bir model ortaya koymuş olup zırh plakalarının performansını tahmin etmek için balistik performans indeksini (BPI) tanımlamışlardır. BPI için değişkenler; çelik yoğunluğu, elastik modül, akma ve çekme mukavemeti, Poisson oranı, kesit azalması veya darbe boyunca uzama kesri ve çarpma hızıdır. BPI, gerinme enerjisinin elastik ve plastik bileşenlerinin yanında darbe sonrası hedef-çevre esaslı sistemin kinetik enerjisi gibi terimleri de içermektedir. BPI modelinde göz önüne alınan tüm parametreler, oda sıcaklığında düşük gerinme hızlarında ölçülebilmektedir [104].

Chia-Jung Hu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda modifiye edilmiş homojen haddelenmiş zırh çeliği (MRHA, Modified Rolled Homogenous Armor), AerMet 100 (Carpenter Tech. Co. tarafından üretilen ticari zırh çeliği), AISI 1045 ve 4130 çeliklerinin mikroyapı-balistik performansı arasındaki ilişkiler üzerine sonuçlar ortaya koyulmuştur [105].

Chandel ve arkadaşları tozaltı kaynağında akım şiddeti, elektrot polarizasyonu, elektrot çapı ve elektrot uzantısının; dikiş yüksekliği, dikiş genişliği ve nüfuziyet

üzerindeki etkisini teorik olarak tahmin eden bir yazılım geliştirmişlerdir. Hem tozaltı kaynağında hem de metal ark kaynağında kaynak dikiş geometrisini tahmin ettikleri bu yazılım, Yang ve arkadaşlarının kaynak dikiş geometrisini tahmin etmek için geliştirdikleri algoritmaya dayanır. Ancak bu model bead-on-plate için dikiş geometrisini tahmin etmede kullanılır. Giriş değişkenleri, akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak hızı, elektrot çapı, elektrot uzantısı ve elektrot polarizasyonudur [106].

Ping Li ve arkadaşları yapay sinir ağlarını kullanarak, tozaltı kaynak yöntemiyle yapılan bir alın kaynağında dikiş yüksekliği, dikiş genişliği, nüfuziyet, erime ve kep alanları ile akım şiddeti, ark gerilimi ve kaynak hızı arasındaki non-lineer ilişkiyi modellemişlerdir [107].

Gunaraj ve Murugan boruların tozaltı ark kaynağında dikiş geometrisini tahmin etmek için “*Response Surface*” methodunun bir uygulamasını geliştirmişlerdir. Çalışmalarında gerilim, tel besleme hızı, kaynak hızı ve torcun iş parçasına uzaklığı giriş değişkeni olarak; nüfuziyet, kep alanı ve dikiş genişliğini ise çıkış değişkenleri olarak göz önüne almışlardır [108].

Gunaraj ve Murugan “*Response Surface*” methodunu kullanarak boruların tozaltı kaynağında, proses değişkenlerinin ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında kontrol edilebilir proses değişkenlerinin ısı girişi ve ITAB üzerindeki etkisini, boruların tozaltı kaynağı için geliştirdikleri matematiksel modeli kullanarak hesaplamış ve analiz etmişlerdir [109].

Tusek, iki telle yapılan tozaltı kaynağında erime miktarını hesaplamak için birbirinden farklı dört matematiksel model geliştirmiştir. Tusek çalışmasında, geliştirdiği matematiksel modellerin, basit, kolay, uygulanabilir ve son derece doğru sonuçlar verdiğini pratikte de test ederek göstermiştir [110].

Wikle III ve arkadaşları tozaltı kaynağında nüfuziyet derinliğinin kontrolü için kızılötesi sensör tekniği kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda, kaynak proses parametrelerine ait geri beslemeli bir kontrol sistemi kullanarak, bu parametrelerin değişmesi durumunda kızılötesi sensör tekniği sayesinde nüfuziyet derinliğini sabit tutmayı amaçladılar [111].

Tarnag ve arkadaşları tozaltı ark kaynağında proses parametrelerini belirlemek için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Onların çalışması yeni bir yaklaşımı içeriyordu. Bu yeni yaklaşımın amacı, çok çeşitli kaynak kalitelerini de içerecek şekilde bir çözüme ulaşmaktır [112].

Murugan ve Gunaraj, boruların tozaltı kaynağında kaynak dikiş geometrisini tahmin ve kontrol etmeye çalışmışlardır. Onlar kaynak dikiş geometrisinin üç kritik ölçüsünü tahmin etmek için beş seviyeli faktöriyel teknikler kullanarak, boruların tozaltı kaynağında matematiksel modeller geliştirmişlerdir [113].

Kanjilal ve arkadaşları regresyon modelini kullanarak, kaynak parametrelerinin ve tozun, esas metalin mekanik özelliklerine ve kimyasal bileşimine birleşik etkisini incelediler. Giriş değişkenleri olarak akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak hızı, elektrot uzantısı ve polarizasyonu; çıkış değişkenleri olarak da kimyasal bileşim, eğilme dayanımı, uzama, çentik darbe dayanımı ve sertliği kullandılar [114].

Paniagua-Mercado ve arkadaşları çalışmalarında, toz altı ark kaynak yöntemi ile kaynaklanan AISI 1025 çeliğinin mikro yapı ve çekme özelliklerine toz (flux) kompozisyonunun etkileri araştırılmıştır. Üç farklı toz kompozisyonunu, düşük karbonlu elektrod ile kullanılmıştır. Çalışmada kaynak şartları sabit tutulmuştur. Çekme testleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Kaynakların mikro/makro yapı testleri optik ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) gözlemlenmiştir. Yüksek titanyum oksit içeren kaynakların tozlarında asiküler ferritin varlığı tespit edilmiştir. Yüzde uzama ve kesit daralmasının, inklüzyon hacim yüzdesinden etkilendiği belirtilmiştir. Çekme özellikleri ve mikro yapı bilgisayar programlarında tahmin edilen değerler ile karşılaştırılmıştır [115].

Shen ve arkadaşları, çalışmalarında, ASTM A709 kalite 50 çelik plakaları tozaltı ark kaynağı ile tek ve çift tel kullanarak kaynatmışlar ve ısı girdisinin dikiş geometrisine, yüzde seyreilmeye ve ergime verimliliğine etkileri araştırılmıştır. Seyrelmedeki seviye ve ergimedeki farklı verimlilikler hesaplanmış ve edinilen ölçümlere dayanarak ısı girişindeki varyasyon analiz edilmiştir. 800°C'den 500 °C'ye soğuma zamanı, kaynak dikişi karakteristiği ile ilgilidir. Dikiş takviyesi, dikiş genişliği, penetrasyon derinliği, ITAB boyutu, biriktirme alanı ve penetrasyon alanı ısı girişinin armasıyla artmıştır. Ancak

bununla beraber dikiş açısı azalmıştır. Başlangıçta elektrotta ergime verimliliği artarken daha sonra ısı girişi ile birlikte azalmıştır. Ancak bununla beraber plakanın ergime verimliliği ve yüzde seyrelme sadece hafifçe değişmiştir. Soğuma zamanı bütün dikiş (nugget) alanı, ısı transferi sınırları uzunluğu ve kaynak parametreleri ile çok iyi lineer (doğrusal) ilişki sergilemiştir. Sonuç olarak; ilave tel, dikiş genişliği, nüfuziyet biriktirme alanları ve ITAB boyutu artan ısı girişiyle beraber artmış, ancak temas açısı bununla beraber azalmıştır. Tekli telle gerçekleştirilen kaynakta elektrodun ergime verimliliği ısı girişi artışı ile beraber artmıştır. Ancak tekli tel ve tandem telli olan uygulamaların her ikisinde plaka ergime verimliliğinde büyük bir değişiklik görülmemiştir [116].

Moeinifar ve arkadaşları çalışmalarında, X80 mikro alaşımlı çeliğin, iri taneli ITAB'daki özelliklere termal dönüşümlerin etkisini araştırmışlardır. X80 çelik numuneler, termal simüle için en yüksek 1400 °C'ye kadar ısıtılmış ve farklı soğuma hızlarında soğutulmuştur. Dört telli tandem tozaltı kaynak yöntemi ve farklı ısı girdisi değerleri ile kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Beynitik, ferrit yapısı içerisinde ve birincil östenit tane sınırları boyunca tüm numunelerin ITAB'ındaki mikroyapıda martenzit /östenit bileşenler gözlemlenmiştir. ITAB'ta blok ve çita tipi martenzit/östenit morfolojisi gözlemlenmiştir. Farklı soğuma oranlarından dolayı ITAB'ta tane irileşen bölgede artan sertlik değerlerinin temel nedeninin M/Ö parçacıklarının bölündüğü alanların olduğu belirtilmiştir. Absorbe edilebilen enerjinin belirlenmesinde Charpy darbe deneyi -50 °C'de uygulanıp değerlendirilmiştir. Çap ve uzunluk gibi martenzit ve östenit bileşenlerin boyutları, ITAB'ın tane irileşen bölgesindeki charpy darbe özelliklerini etkileyen en önemli faktörler olduğu ve birincil östenit tane sınırları kesişiminde mikroçatlak çekirdeklenmesinin M/Ö parçacıklardan meydana gelebileceği rapor edilmiştir [117].

Babu ve Natarajan tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynatılan 5A516 Gr. 70 karbon çeliği kazanlarındaki korozyonun değerlendirilmesi, tartışılması ve önlenmesi amacıyla 0.1M-0.5M ve 1.0M konsantrasyonlarındaki dört farklı ısı girişine maruz kalan hidroklorik asit ortamında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda tozaltı ark kaynak yöntemi

kullanılmıştır. Çalışmada, 100 °C'nin altındaki ana metal, kaynak metali ve ısı tesiri altında kalan bölgeler seçilmiştir. Korozyon akımının ölçülmesinde Tafel ekstrapolasyon ve lineer polarizasyon direnci gibi elektrokimyasal polarizasyon teknikleri kullanılmıştır. Deneylerde, (thiourea + hexamine in 0.5 M HCl) her bir 100ppm (mg/L) konsantrasyonda çalışılmıştır. Mikro yapısal incelemelerde, yüzey karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu ve X-ray ışınları ile film oluşum derecesi ve doğası vurgulanmıştır. Oluşan korozyon oranının (kaynaklı bölgedeki ve ITAB'taki) ısı girdisi artmıştır [118].

Nowacki ve Rybicki yaptıkları çalışmalarında, dubleks UNSS31803 çeliğin tozaltı kaynaklı birleştirme kusurlarının cins ve miktarına, kaynak ısı girdisinin etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Kusurlar radyografik metot ile tespit edilmiştir. Radyogramlar, Polonya ve Avrupa standartları baz alınarak sınıflandırılmıştır. Birleştirmelerin mekanik özellikleri ve değerleri çekme deneyi ile belirlenmiştir. Kaynak ısı girdisi etkisinin mekanik özellikler üzerindeki analizi için 2.5–4.0 kJ/mm aralığında ısı girdisi kullanılmıştır. Kaynak kusurlarının oluşumu üzerinde kaynak ısı girdisi etkisinin analizi için; oluşan kaynak tabakası kalınlığı 10-32 mm olup, 2.5 kJ/mm ve 3 kJ/mm, iki kaynak ısı girdisi değeri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların gösterdiği üzere dubleks çeliklerin tozaltı kaynağı 2.5'ten 4.0 kJ/mm'ye olan ısı girdisinin mekanik özellikler üzerine negatif bir etkisi olmadığı belirtilmiştir. Deneyler göstermiştir ki; 3.0 kJ/mm'ye kadar ısı girdisi, birleştirmelerdeki kaynak kusurlarını (cürufur, plaka kalınlığı 10-23 mm için nüfuziyet eksikliği, çatlaklar ve tamamen azalan diğer kusurlar) azaltmaktadır. Geniş kaynak ısı girdisi kullanımı, daha kaliteli birleştirmelerin oluşmasını ve birleştirmelerin tamir maliyetlerini ve kontrollerini azaltıcı etki yapmaktadır [119].

Singh ve Pandey çalışmalarında, geri dönüşümle elde edilen cürufun, flux olarak toz altı ark kaynağında kullanımını araştırmışlardır. Toz altı ark kaynağı sırasında meydana gelen cürufun bir çeşit atık olarak toprak kirliliğine, bu atığın depolanması için ihtiyaç duyulan yer gibi geri dönüşümü olmayan biyolojik doğal problemlere yol açtığını, ayrıca camsı ve kırılgan bir malzeme olarak cürufun ne inşaat dolgu malzemesi olarak

nede diğer alanlarda kullanılamayacağını belirtmişlerdir. Çalışmada, geri dönüşümü olmayan kaynaklarında hızla tükenmesine paralel olarak mineral madenciliğinde fluxların üretimine gerek duyulduğuna değinilmiştir. Geri dönüşüm teknolojisindeki bu başarılı gelişme cürufun yeni flux olarak kullanılmasını, yukarıda belirtilen problemlerin çok ekonomik bir şekilde üstesinden gelinmesini sağlar. Yapılan çalışmada, cüruf uygun alaşım elementleri/deoksideler toplanıp işlenerek yenilenmiştir. Yenilenen, geri dönüştürülmüş cüruf EL-8 kaynak teli ile kullanılmıştır. Kaynak metali dolgusunda geri dönüştürülmüş cürufun özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, mekanik özellikler ve kimyasal kompozisyonun AWS (American Welding Society) gerekliliklerine göre memnun ve tatmin edici olduğunu rapor etmişlerdir [120].

Hua ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, toz altı kaynağının fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde optimal tasarım simpleks algoritması temelli çok bileşenli regresyon analizi yöntemi kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarını matematiksel eşitlikler oluşturarak modellemişlerdir. Sonuçlar $MgO-TiO_2-CaCO_3-Al_2O_3$ etkileşiminin yumuşama sıcaklığını artırdığını fakat CaF_2 and ZrO_2 bileşiminin yumuşama sıcaklığını düşürdüğünü göstermiştir [121].

Tusek ve Suban, çok telli toz altı kaynağında metal tozu katkılı kaplama kullanımına yönelik yaptıkları çalışmada, kaynak bölgesine metal tozu beslemenin üç farklı yolu açıklamış ve şematik olarak göstermişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçlarında, metal tozu kullanımının depozito (kalıntı) oranını yükselteceği ve kaynak ark verimini ve koruma akı tüketimini azaltacağı tespit edilmiştir [122].

Peng ve arkadaşları, çalışmalarında, yüksek tokluk dayanımına sahip tel ve aglomere toz kullanarak, boru hattı çeliğini, tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Tel ve kaynak metali arasında elementlerin çeşitleri ve mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerinde Mo, B ve Ti etkisini araştırdıkları çalışmanın sonuçları, kaynak metalinin sertliğinin 185 ve 214 Hv arasında iken baz alınan metal sertliğinin 195 Hv olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda, kaynaklı bağlantı dayanımının ana metalinkinden daha yüksek olduğu, daha iyi sünekliğe sahip olduğu ve $\sigma_{0.5}/\sigma_b$ oranının daha düşük olduğu tespit edilmiştir [123].

Kiran ve arkadaşları, işlem değişkenlerinin HSLA çeliklerinde, iki telli tandem tozaltı kaynağının, kaynak dikişi kalitesine etkilerini incelemişlerdir. İki telli tandem Tozaltı kaynak uygulaması ile, iki elektrod telin, öncünün DC güç kaynağına ve takip edenin ise darbeli AC güç kaynağına bağlanıp eş zamanlı biriktirme içermesinden oluşmaktadır. Kaynaklı dikişin profili (kesiti) ve mekanik özellikleri öncü tel, takip eden geçici akım teli ve kaynak hızını önemli derecede etkiler. Bu çalışmada, öncü tel akımı, takipçi darbeli tel akımı ve kaynak hızının kaynak dikişi boyutları ve mekanik özelliklerin tipik HSLA çeliğinin tek geçişli tandem tozaltı ark kaynağı üzerine etkileri, detaylı deneysel çalışmalarla sunulmuştur. Anlaşılmıştır ki, öncü tel akımı kaynak dikiş genişliği ve takviye ağırlığı takip eden darbeli tel akımına uyarlı iken, kaynak dikişi nüfuziyeti, bu durumdan öncelikle etkilenmemiştir. Takipçi darbeli akımın büyüklüğü ve kısa negatif darbe süresi, kaynak havuzu hacmini artırır, soğuma oranının ve kısıtlanmış (inhibited) asiküler ferrit gibi güçlü fazların oluşumuna, benzer zayıf mekanik özelliklerin azalmasına yol açar. Bunun aksine, kaynak hızındaki artış, ısı girdisini azaltır, böylece soğuma oranı ve kaynak dikişi mekanik özellikleri artar. Geliştirilen bir dizi ampirik bağıntılar ile, kaynak dikiş boyutları ve mekanik özellikleri, kaynak şartları gibi ampirik bağıntıların tahminleri ve ilgili ölçüm sonuçları birbirleri ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir [124].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Ramor 500 zırh çeliği çiftine Tozaltı Kaynak (SAW) Yöntemi ile sabit amperde, farklı kaynak hızlarında ve farklı gerilimlerde birleştirilme yapılmıştır.

Birleştirilen numunelerden tel erezyon tezgâhında çekme test numunesi ile mikroyapı ve mikrosertlik numunesi hazırlanmıştır. Daha sonra bu çelik çiftlerine aşağıdaki incelemeler yapılmıştır.

- Kaynaklı birleştirmelerin makroyapı karakterizasyonlarının incelenmesi,
- Kaynaklı birleştirmelerin mikroyapılarının (SEM, EDX, XRD) incelenmesi,
- Kaynaklı birleştirmelerin mikrosertliklerinin incelenmesi,
- Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesi,
- Kaynaklı birleştirmelerin çekme testi ve kırık yüzeylerinin (SEM, XRD) incelenmesi,
- Kaynaklı birleştirmelerin kaynak dikiş formu geometrilerinin incelenmesi,
- Kaynaklı birleştirmelerin ANSYS 12.0 paket programında modellenmesi ve termal-mekanik analizlerinin yapılması.

Bu çalışmada; Tozaltı Kaynak Yönteminin seçilmesinin nedeni; bu kaynak yönteminin imalat sanayisinde çok fazla kullanıyor olması, derin nüfuziyet kabiliyeti, enerji ve elektrot ekonomisi, yüksek ark kararlılığı ve yüksek kaliteli kaynak dikişi oluşturması ve uygulamalarda otomatik kontrol kumandalı tezgâhların kullanılması dolayısıyla elde edilen verilerin diğer gazaltı kaynak yöntemlerine göre daha güvenilir olmasıdır.

6.1. Malzeme ve Metot

6.2. Deneyde Kullanılan Malzemenin Özellikleri

Tozaltı kaynağı deneylerinde Tablo 6.1’de kimyasal analizleri, Tablo 6.2’de mekanik özellikleri ve Tablo 6.3’de fiziksel özellikleri verilmiş olan 3 mm kalınlığında Ramor 500 zırh çeliği malzemesi kullanılmıştır. Ramor 500 zırh çeliği malzemesi SSAB firmasının ülkemizdeki tedarikçi firmalarından temin edilmiştir.

Tablo 6.1. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal bileşimi [125].

Kimyasal Bileşim (% Oran)										
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
Ramor 500	0.32	0.70	1.50	0.015	0.005	1.00	2.00	0.70	0.005	Balans

Tablo 6.2. Ramor 500 zırh çeliğinin mekanik özellikleri [125].

Mekanik Özellikler					
Malzeme	Akma Değeri Rp 0,2 (Mpa)	Çekme Dayanımı Rm (Mpa)	Uzama %5	Sertlik (HB)	Darbe Gücü Charpy (V J)
Ramor 500	1450	1700	7	480-560	20

Tablo 6.3. Ramor 500 zırh çeliğinin fiziksel özellikleri [125].

Fiziksel Özellikler						
Malzeme	Termal Genleşme Katsayısı ($\alpha \cdot 10^{-6}$)	Termal İletkenlik (λ , W/m. °K)	Spesifik Direnç (Ω , n Ω M)	Elastik Modül (E, kN/mm ²)	Özgül Isı J/ kg.K	Yoğunluk gr/cm ³
Ramor 500	12	58	140-250	210000	455	7,7-7,85

6.3. Kaynak Teli ve Kaynak Tozunun Özellikleri

Deneyisel çalışmada, malzememize uygun Oerlikon firmasından temin edilen Cr-Ni-Mn esaslı (SI-307), 2.40 mm çapında östenitik esaslı çelik tel ve alümina bazık (AB) karakterli, aglomera esaslı (SF-104) kaynak tozu kullanılmıştır. Özellikle zırh çeliklerinin kaynağında üretici firmanın önerdiği östenitik esaslı kaynak teli tercih edilme sebebi, zırh çeliklerinin kimyasal bileşimlerinden dolayı, yüksek kaliteli derin nüfuziyet ve yüksek kaliteli kaynak dikişi sağlamaktır. Kullanılan ilave kaynak telinin kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri ve termal iletkenlik katsayısı Tablo 6.4’de, kaynak tozunun kimyasal bileşimi Tablo 6.5’de ve malzeme resimleri ise Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Deneyde kullanılan ilave kaynak telin kimyasal bileşimi, mekanik özellikleri, termal iletkenliği [126].

Kimyasal Bileşim (% Oran)													
Kaynak Teli	Tel Çapı (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	Fe
SI-307	2.40	0.066	0.4	6.85	0.011	0.003	19.32	8.52	0.06	0.07	0.01	0.01	Balans
Mekanik Özellikler							Termal Özellikler						
Kaynak Teli	Tel Çapı (mm)	Sertlik (HV)	Akma (Mpa)	Çekme (Mpa)	Uzama %	+20 °C	-60 °C	Termal İletkenlik (λ , W/m. °K)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Özgül Isı (J/kg.K)	Termal genleşme katsayısı (α 10 ⁻⁶)		
SI-307	2.40	197	441	609	40	100	62	16.3	7.85	502.41	17		

Tablo 6.5. Deneyde kullanılan kaynak tozunun kimyasal bileşimi [126].

Kimyasal Bileşim (% Oran)													
Kaynak Tozu	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	Fe	
SF-104	0.06	0.6	1.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Balans
	CaO+MnO+Al ₂ O ₃					Al ₂ O ₃	CaF ₂	Kaynak Şartları, Ebadı, Tane Boyutu					
	Min.	40				20	-	Ebad (mm)	Bazitisite (Kromlama)	Toz Tane Boyutu (µm)			
	Max.	-	-	-	-	-	22	Flux (Akı)	1.20	2-20			



Şekil 6.1. SI-307 ilave kaynak teli ve SF-104 alümina bazlı kaynak tozu

6.4. Karbon Eşdeğerliğinin Belirlenmesi

Karbon eşdeğeri, kaynaklı birleştirmelerin kalitesine etki eden en önemli parametrelerdendir. Kaynak sırasında çeliğin sertleşme eğilimini belirlemek amacıyla alaşım elementlerinin verdiği sertleşmeye eşdeğer sağlayacak C miktarını saptamak amacıyla karbon eşdeğeri (Ceş) belirlenmektedir. Bu çalışmada kullanılan Ramor 500 zırh çeliğinin, karbon eşdeğeri açısından irdeleyebilmek için Milletlerarası Kaynak Enstitüsü Kaynak Kabiliyeti Komisyonu'nun, karbon eşdeğeri formülünü kullanacak olursak [51], karbon eşdeğeri $Ceş = 1.043$ olarak tespit edilmiştir.

$$Ceş = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (6.4)$$

$$Ceş = 0,32 + (1.5/6) + (1 + 0.7)/5 + (2 + 0)/15$$

$$Ceş = 1.043$$

Denklem 6.4'e göre, zırh çeliğinin karbon eşdeğeri oldukça büyük çıkmaktadır. Buradan da, bileşimden dolayı sertleşme ve çatlamaya eğiliminin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, zırh çeliğinin kaynağı esnasında 200 ile 350 °C'lık bir öntav uygulamasına gerek duyulmaktadır [3]. Fakat malzemeye ön tav işlemi uygulanmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Çünkü üretici firma önerileri doğrultusunda zırh çeliği malzemelerine firma, kendi özel ısıtma işlemlerini uygulayarak malzemeyi stabil hale getirirler. Ramor 500 zırh çeliği homojen halde, içyapı düzensizlikleri olmadan firma üretimini sağlamaktadır. Ön tav yapılmasındaki amaç, malzemenin yapıdaki düzensizliklerini gidermek, stabil hale getirmektir. Etüv fırınlarında yapılan ısıtma işlemlerinde bu zırh çeliği gruplarında malzemenin stabil hali olumsuz etkilenmektedir ve sertlikler soğutma ortamlarına göre ana malzemenin sertliğine göre düşmektedir, dolayısıyla bunun tek sebebi üretici firmanın özel olarak yaptığı temperleme işlemleri sonrası özel soğutma işlemleridir.

6.5. Numunelerin Hazırlanması

Tozaltı kaynağı ile birleştirilecek 3 mm kalınlığındaki Ramor 500 zırh çeliği numuneleri 65x55 mm ölçülerinde, Manisa'da faaliyet göstermekte olan Truva Kalıp Tel Erezyon Firmasında kesilmiştir. Numunelerin kaynakla birleştirilecek yüzeyleri tel erezyon

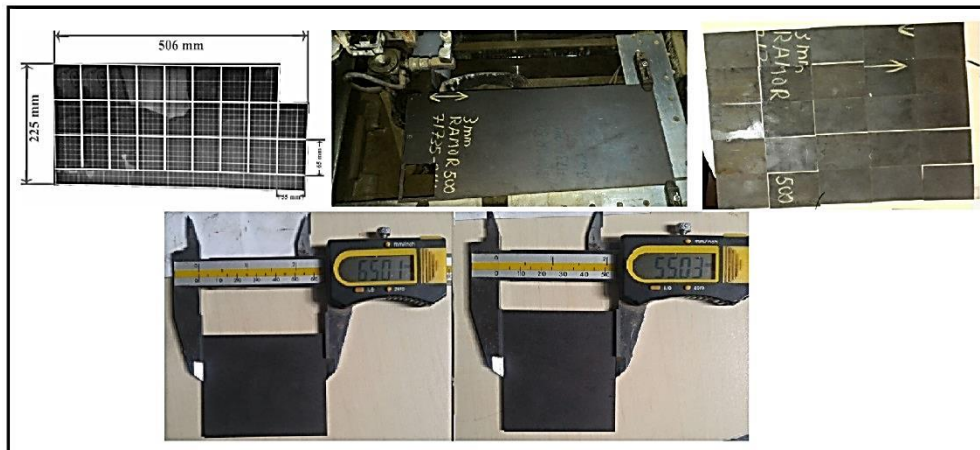
tezgâhında kesilmiş, yüzeyler dik ve düzgün olduğundan kaynaklı birleştirme öncesinde yüzey taşlama işlemi uygulanmasına gerek görülmemiştir. Malzemenin tel erezyon makinasında kesim işlemleri Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Deneyde kullanılan 3 mm kalınlığında Ramor 500 zırh çeliği



Şekil 6.3. Tel erezyon kesme makinası



Şekil 6.4. Ramor 500 zırh çeliği malzemesinin tel erezyon makinasında belirlenen ölçülerde kesilmesi

6.6. Numunelerin Tozaltı Kaynağı ile Birleştirilmesi

Tozaltı kaynak yöntemi ile numunelere yapılacak kaynaklı birleştirmeler için kaynak parametreleri, pilot çalışmalar ve literatür çalışmaları dikkate alınarak tespit edilmiş olup, deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve tozaltı kaynak makinasının teknik özellikleri Tablo 6.6 ve Tablo 6.7’de verilmiştir. Tozaltı kaynak işlemi öncesinde, Ramor 500 zırh çelik çifti elektrik ark kaynağı ile üst ve alt bölümlerinden, kaynak sırasında numunelerin kaymasını önlemek için, puntalama işlemi yapılmış ve malzeme çiftleri sabitlenmiştir (Şekil 6.5). Birleştirme işleminde akım gücü, nüfuziyetin tam sağlanmasından dolayı sabit tutulmuş, her bir numunenin gerilim ve tel ilerleme hızlarında parametreler değiştirilerek kaynak işlemi yapılmıştır.

Tablo 6.6. Tozaltı kaynağında kaynak parametreleri

Numune Adı	Kaynak Gücü (Amper)	Gerilim (Volt)	İlerleme Hızı (cm/dk)
N1	250	20	20
N2			25
N3			30
N4		25	20
N5			25
N6			30
N7		30	20
N8			25
N9			30

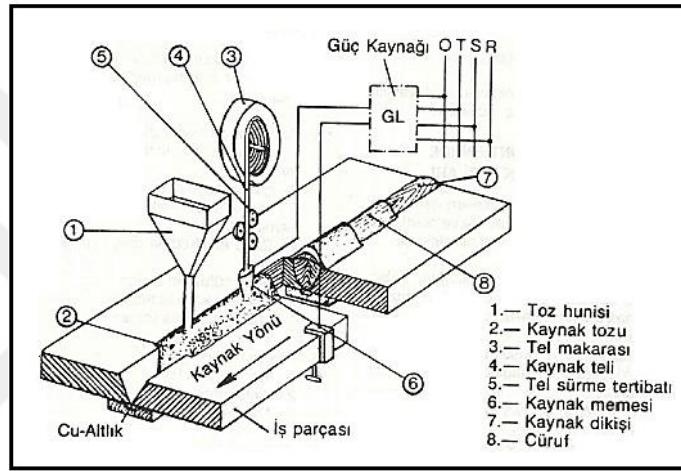
Tablo 6.7. Tozaltı kaynak makinasının teknik özellikleri [126].

Makine Model Adı	Tristör Kontrollü Dc Tozaltı Güç Kaynağı (ZD5-1000B)	Tozaltı Kaynak Traktörü (MZ-1250 BF)
Şebeke Gerilimi	380 V / 50 Hz	-
Açık Devre Gerilimi	71 V	-
Kaynak Akım Aralığı	20-1000 A	-
Çalışma Verimi	%100	-
Tel Çapı	-	2.00-3.20-4.00-4.80 mm
Ark Verme Şekli	-	Temas Sürtme
Kaynak Hızı	-	15-125 cm/ dk
Tel Sürme Hızı	-	34-340 cm / dk



Şekil 6.5. Kaynak işlemi öncesi puntalama ile malzeme çiftlerini sabitleme

Tozaltı kaynağının yapıldığı kaynak uygulamasının şematik resmi Şekil 6.6’da verilmiştir.



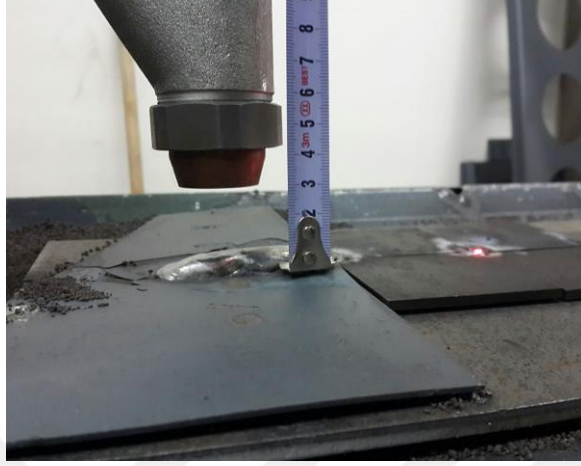
Şekil 6.6. Tozaltı kaynak uygulamasının şematik resmi [127].

Bu çalışmada, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü atelyesinde bulunan ZD5-1000B / MZ-1250BF güç kaynağı ve kaynak traktör model serili Tozaltı kaynak makinası kullanılmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. ZD5-1000B / MZ-1250BF güç kaynağı ve kaynak traktör model serili tozaltı kaynak makinası ve kontrol panelleri

Çalışmada, kaynak torcunun malzemeye mesafesi 3 cm olarak ideal bir değerde ayarlanmıştır (Şekil 6.8). Kaynak torcu ve numuneler daha önceden hazırlanmış kalıp hat üzerinde bütün numunelere aynı şekilde olacak değerlede ayarlanmıştır.

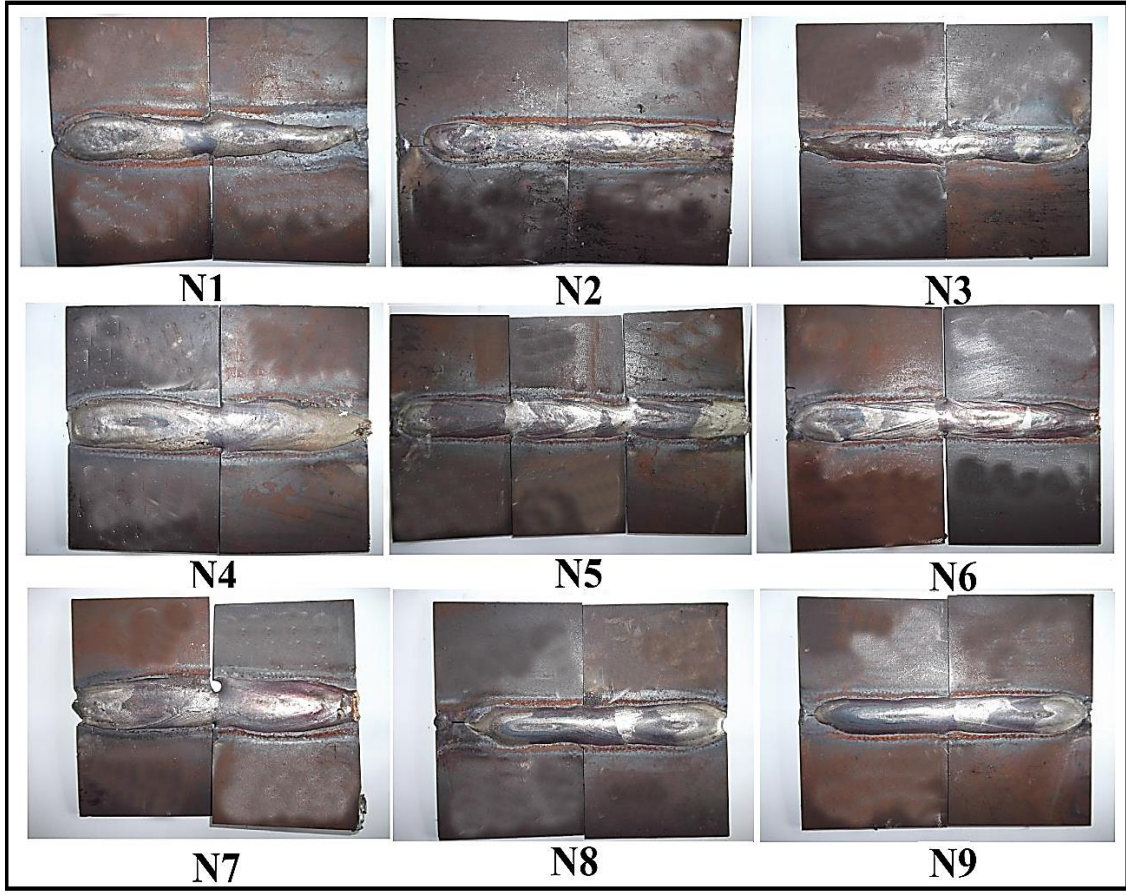


Şekil 6.8. Kaynak torcunun malzemeye mesafesinin ölçümü

Kaynak işlemi sırasında çekilen resimler Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Resimler kaynak esnasında ve sonrasında çekilmiştir. Kaynak dikişi morfolojik görüntüsü ve bazık karakteristikli kaynak tozundan elde edilmiş cüruf yapımız görülmektedir. Görüldüğü gibi curüflar kaynak dikişinden kırılmadan ve parçalanmadan kopmuştur. Resimlerden de anlaşılacağı gibi cürufklar dikişi tamamen kaplamıştır.



Şekil 6.9. Ramor 500 malzeme çiftlerinin tozaltı kaynağı sırasındaki resimleri



Şekil 6.10. Tozaltı kaynağında birleştirilen numunelerin makro resimleri

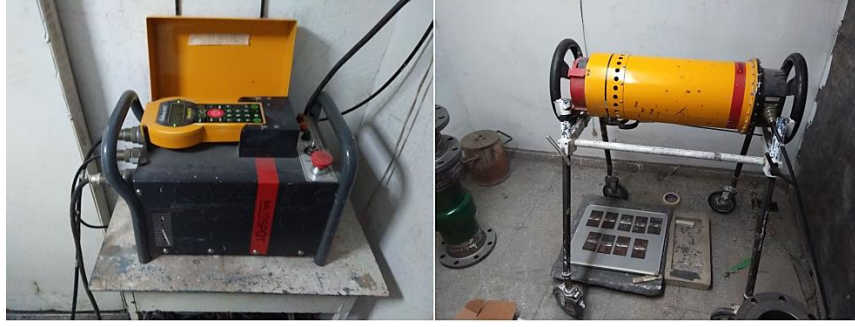
Aynı parametrelerden birden fazla sayıda Ramor 500 malzeme çifti birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerden en yüksek kaliteli tam nüfuziyet sağlayan kaynak dikişleri seçilerek (Şekil 6.10), diğer malzeme çiftlerinden spiral ile birbirinden ayırma işlemi uygulanmıştır. Şekil 6.11’de numunelerin kaynak ön ve arka dikiş makro resimleri gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Kaynaklı numunelerin ön ve arka dikiş makro resimleri

6.7. Numunelerin Radyografik Muayeneleri

Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynakları yapılan numunelere, kaynak dikişindeki iç hataların görülmesi için tahribatsız muayene yöntemlerinden olan radyografik muayene uygulanmıştır. Radyografik muayene için, İzmir’de faaliyet gösteren ERMA ENDÜSTRİYEL firmasında bulunan Şekil 6.12’de gösterilen BaltoSpot Röntgen cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.12. Kontrol paneli, güç kaynağı ve ısıtım cihazı

Yöntemde numuneler numaralandırılarak, içerisine film yerleştirilmiş kartuşlar üzerine dizilmiştir. Her numunenin üzerine kendi numarasını gösteren kurşun numaralar yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu kurşun numaralardan X ışınları geçemeyeceği için film üzerindeki yanma etkisi daha az olmakta ve numaralar numune üzerinde görülmektedir. Film kartuşları ve numuneler uygun bir biçimde yerleştirilerek ısıtlama işlemi yapılmıştır. Kurşun levhalar ile koruması güçlendirilmiş odalarda ısıtlama (röntgen çekme) işlemi yapılmıştır. Şekil 6.13’de Röntgen çekimi için hazırlanmış numuneler görülmektedir.



Şekil 6.13. Röntgen çekimi için hazırlanan numuneler

Isıtlama işlemi bittikten sonra filmlere gün ışığı göstermeden banyo odalarında filmler banyo edilmiştir.

Banyo edilen filmlerin PICO - VIEW P-35 marka ışık cihazında kontrolleri yapılmış ve raporu çıkarılmıştır. Şekil 6.14’de ışık cihazında yapılan inceleme şekli görülmektedir.



Şekil 6.14. Işık cihazında filmlerin incelenmesi ve elektronik çıktıdan radyografik raporun alınması

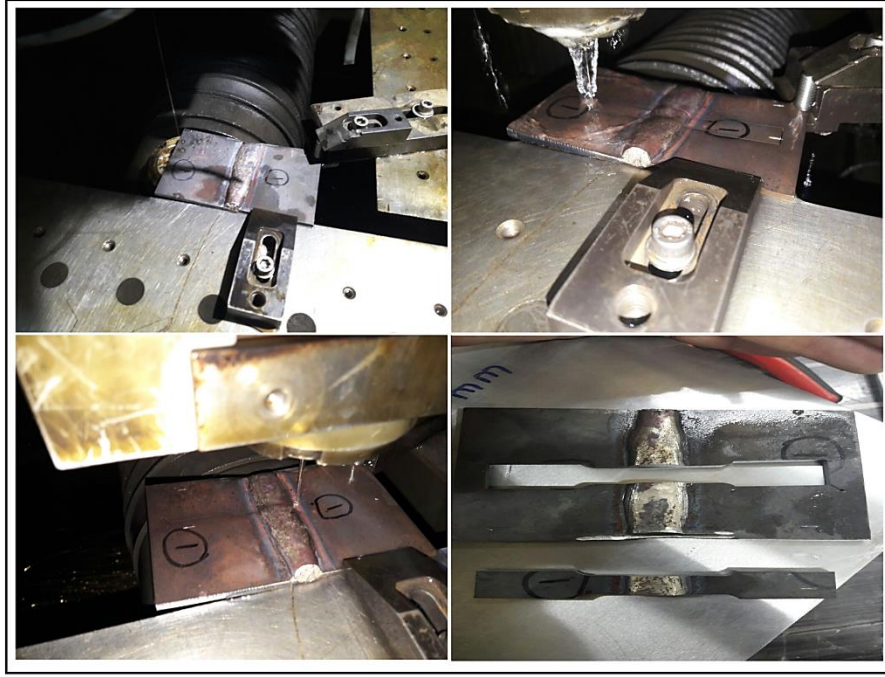
6.8. Çekme Testi Numunesi ve Mikroyapı Numunelerinin Hazırlanması

Kaynak yapılmış Ramor 500 çelik çifti üzerinden çekme test numunelerinin çıkarılması için çekme numuneleri kesiminde İstanbul Silivri’de faaliyet gösteren Truva Makine Kalıp ve Tel Erezyon firmasında bulunan AGIECHARMILLES CUT 200 SP marka telerezyon tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 6.15).

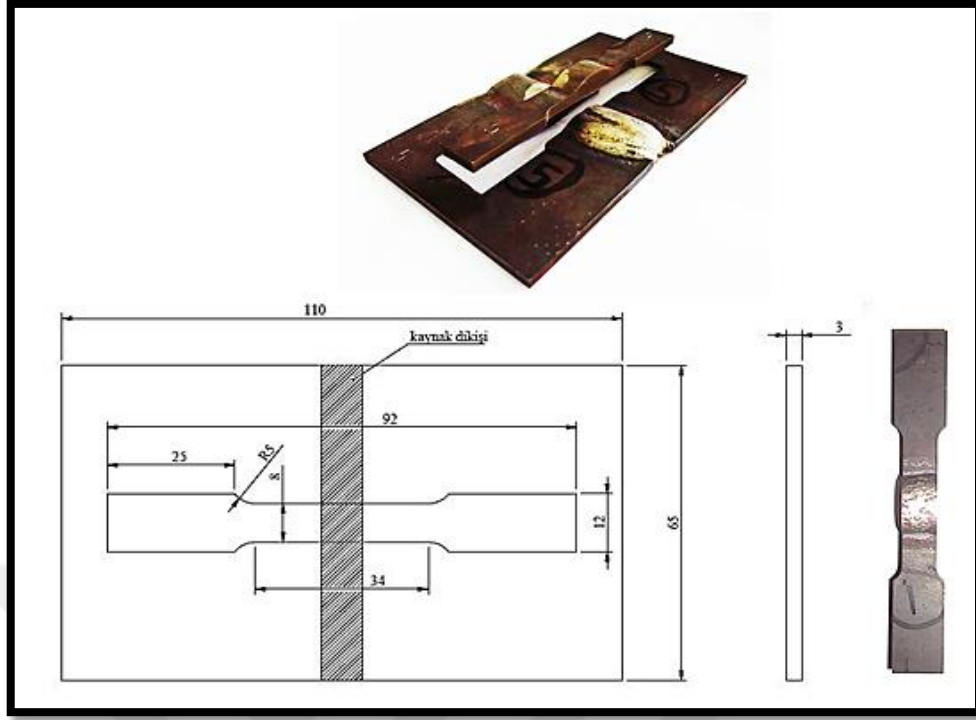


Şekil 6.15. Tel erezyon tezgâhı

Alüminyum bir kütük üzerine numunelere uygun ölçülerde boşluk açılmış, numuneler bu boşluğa yerleştirilerek sıkıca sabitlenmiş ve tezgâha bu alüminyum kütük yardımı ile bağlanarak kesme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.16’da kesim esnasında ve kesim sonrasındaki numuneler görülmektedir. Kesme işleminde her bir numuneden, 1 adet çekme numunesi ve arada çıkan parçalardan da Fırat Üniversitesi Prof.Dr Nuri ORHAN Metalografi Laboratuvarında Struers marka hassas kesme cihazında mikroyapı numuneleri alınmıştır. Şekil 6.17’de kesilen numunelerin ölçüleri gösterilmektedir.



Şekil 6.16. Tel erezyon tezgâhında çekme numunesi kesim işlemi ve sonrasında çıkan çekme numunesi



Şekil 6.17. Tel erezyonda kesilen çekme numunesi, çekme test numunesi ölçüleri ve makro fotoğrafı

6.9. Numune Yüzeylerinin Taşlama Tezgahında Düzleştirilmesi

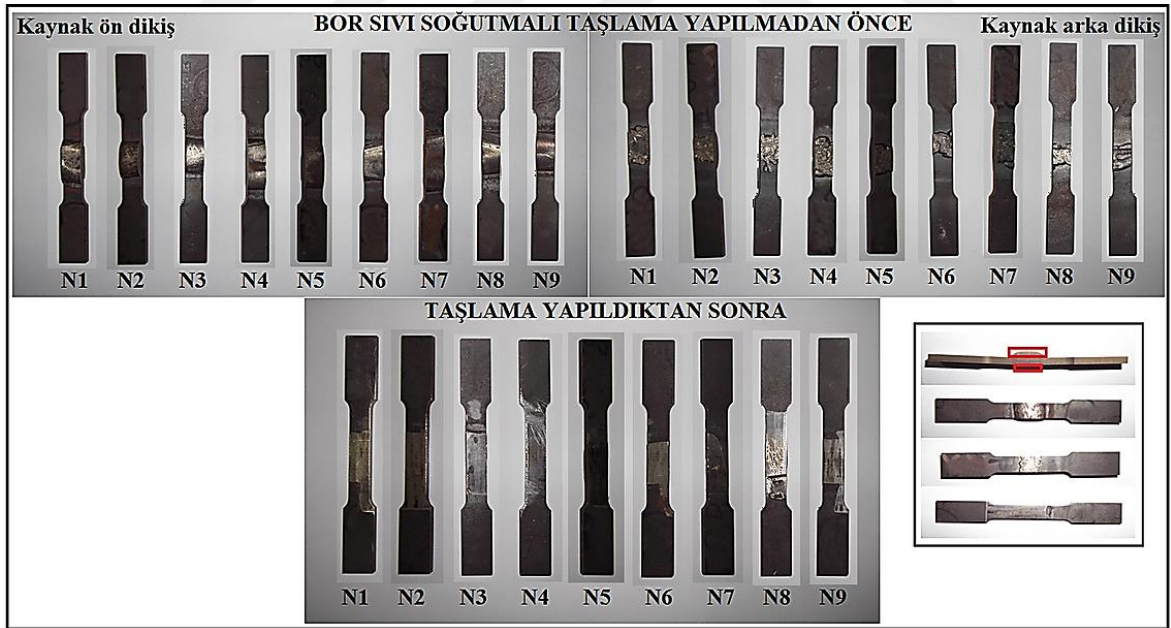
Çekme numunelerinin tel erezyon kesim işleminden sonra kaynak bölgesinin ön kaynak dikişi ve arka kaynak dikişi, çekme testinde çentik etkisinin oluşmasını engellemek ve daha iyi sonuçlar elde edebilmek için Elazığ Gazi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nin Metal Atölyesi'nde bor sıvı soğutmalı taşlama makinası ile yüzey düzleştirme işlemi yapılmıştır (Şekil 6.19). Yüzey düzleme işlemi öncesi ve sonrası makro resimler Şekil 6.20'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Taşlama tezgâhı



Şekil 6.19. Çekme numunelerinin bor sıvı soğutmalı taşlama makinası ile yüzey düzleştirme işlemleri



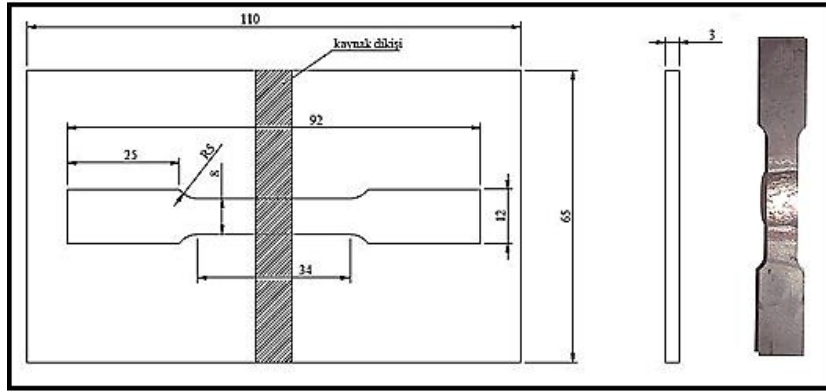
Şekil 6.20. Bor sıvı soğutmalı taşlama makinası ile yüzey düzleştirme işlemi öncesi ve sonrası makro resimler



Şekil 6.21. Hassas Kesme cihazında kaynaklı numunelerden mikroyapı çıkartılması

6.10. Çekme Testi

Malzemenin yük taşıma yeteneği ile yükleme sırasındaki şekil değiştirme davranışını (mekanik özelliklerini) belirlemek için çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan SHIMADZU AG-X marka 50 KN yük kapasitesine sahip çekme cihazında 1 mm/dk çekme hızında ve TSE 138 EN 10002-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde kullanılan kaynaklı numune ölçüleri ve çekme test çubuğu Şekil 6.22’de gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Çekme test numunesi ölçüleri



Şekil 6.23. Çekme Test Cihazı

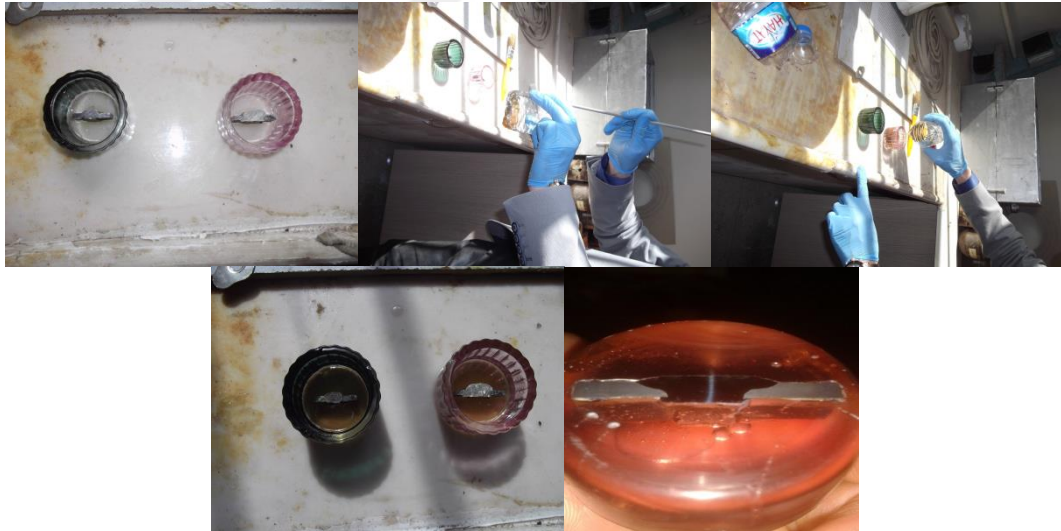
6.11. Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 6.21'deki Struers marka hassas kesme cihazında Şekil 6.26'daki ölçüler doğrultusunda kesilen mikroyapı numunelerine Fırat Üniversitesi Prof.Dr Nuri ORHAN Metalografi Laboratuvarında Nikon Eclipse MA200 marka optik mikroskop cihazında mikroyapı incelemesi yapılmıştır (Şekil 6.24). Kesilen numuneleri, yüzeylerini eşit bir şekilde bölgesel olarak zımparalamak için sıcak bakalit cihazında (Şekil 6.24) bakalite alınmıştır. Sıcak bakalit cihazının tablasına sığmayan kaynak numunelerinden bazılarına soğuk bakalit işlemi uygulanmıştır (Şekil 6.25). Soğuk bakalit için numunelere uygun cam mumu şeklinde kalıplar alınmıştır. Bakalit solüsyonunu hazırlamak için hızlandırıcı, epoksi

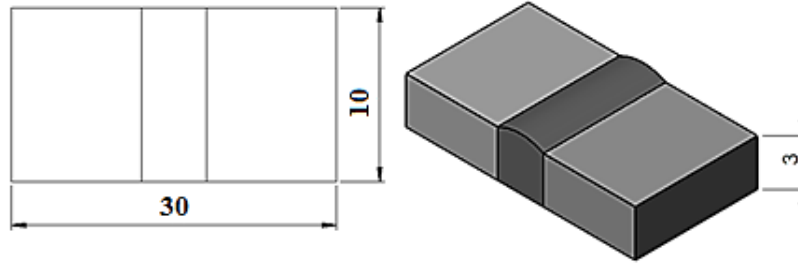
ve sertleştirici alınarak, üçte bir oranında epoksi ve hızlandırıcı karışımına 1 damla sertleştirici katılarak solüsyon katı kıvamına gelene kadar karıştırılmıştır. Numuneler cam mumu kalıplara konulmuş, numunelerin kalıptan kolay bir şekilde çıkmasını sağlamak için fırça ile kalıp altına ve kenarlarına motorin yağı sürülerek kayganlaşması sağlanmıştır. Kalıba konunan numune üzerine hazırlanan solüsyon dökülmüş. Dökülen solüsyon açık atmosferde 20-25 dk kadar bekletilmiştir. Bu süreden sonra katılaştıran solüsyon kalıptan çıkarılmış ve soğuk bakalite alma işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 6.24. Sıcak bakalite alma cihazı, bakalit numunesi ve optik mikroskop



Şekil 6.25. Numuneleri soğuk bakalite alma işlemleri



Şekil 6.26. Mikroyapı numunesi ve ölçüleri

Metalografik incelemeler için numunelerin yüzeyleri sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh'lik zımparalarda struers marka zımparalama cihazı ile temizlendikten sonra, numuneler önce 3 µm'lik sonra 1 µm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır (Şekil 6.27). Parlatılan numuneler kimyasal dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Ramor 500 zırh çeliği malzemesi Nital çözeltisiyle dağlanırken, kaynak havuzu Cr-Ni-Mn esaslı tam östenitik paslanmaz çelik esaslı ilave telin etkisinden dolayı Nital çözeltisine tepki vermemiştir. Dolayısıyla kaynak bölgesine kral suyu ile dağlama işlemi yapılmıştır. Metalografik çalışmada kullanılan dağlayıcı çözelti ve süreleri Tablo 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.27. Zımparalama cihazı, parlatma (çuhalama) işlemi

Tablo 6.8. Metalografik incelemede kullanılan dağlayıcılar ve dağlama süreleri

Dağlanacak Malzeme	Dağlayıcı adı ve bileşimi	Dağlama süresi
Ramor 500	Nital (%2 NHO_3 + %98 Etil alkol)	10 sn
Kaynak Bölgesi (İlave Tel)	Kral Suyu (3 birim HCl + 1 birim NHO_3)	48 sn

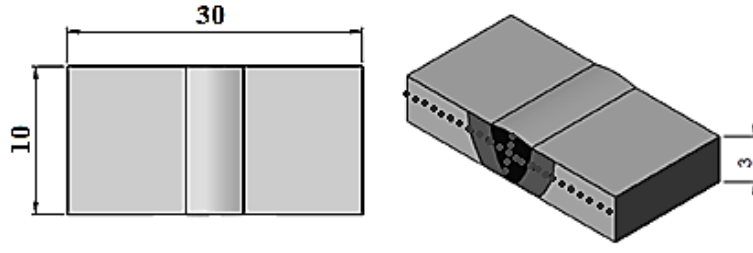
Kaynak, ITAB ve ana malzemeden olmak üzere farklı noktalardan 50x, 100x, 200x ve 500x kat büyütme ile mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Numuneler; SEM, EDS analizleriyle incelenmiş ve numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ve XRD cihazlarında (Şekil 6.28) analiz edilmiştir.



Şekil 6.28. SEM cihazı ve XRD cihazı

6.12. Mikrosertlik Ölçümleri

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş Ramor 500 çelik çiftin mikrosertlik için alınan numuneler Şekil 6.29’da görüldüğü ölçülerde kesilmiştir. Kesilen numunelerin gerekli yüzey hazırlıkları yapıldıktan sonra mikrosertlik ölçümleri Şekil 6.30’da belirtilen noktalardan, Metalografi Laboratuvarında bulunan ve Şekil 6.31’de gösterilen Durascan marka mikrosertlik cihazında yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri HV sertlik skalası ile (0,5 HV) 500 gr’lık yük altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri kaynak numuneleri üzerinde yatay eksenden belirlenen noktalardan kaynak dikişi, ITAB bölgelerinden ve ana malzemeden olmak üzere sağ ve sol malzeme çiftlerinden, her bir bölgeden 4 adet olmak üzere toplam 20 adet ölçüm alınmıştır. Ayrıca kaynak dikişinin dikey ekseninden nüfuziyet noktasına kadar 7 adet ölçüm alınarak kaynağın nüfuziyet derinliğine olan sertliği analiz edilmiştir. Alınan ölçümlerin mikrosertlik cihazı ekranındaki görünümü Şekil 6.32’de gösterilmiştir.



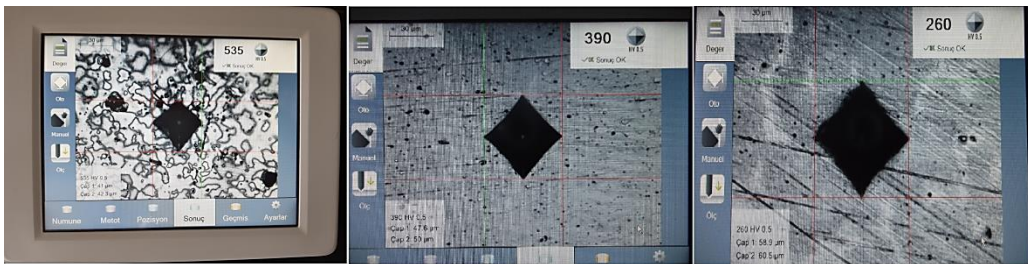
Şekil 6.29. Mikrosertlik numunesi ölçüleri



Şekil 6.30. Mikrosertlik numunesinden yatay ve dikey eksenden sertlik alınan noktalar



Şekil 6.31. Kullanılan mikrosertlik cihazı



Şekil 6.32. Mikrosertlik testi örnekleri

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik Testlerinin İncelenmesi

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin radyografik muayene parametreleri Tablo 7.1’de verilmiştir. Tabloda verilen parametreler ISO standartlarına göre belirlenmiş parametrelerdir. Radyografik muayene testinde malzemenin veya kaynak dikişinin içine bakılır. İç kısımda oluşan hatalar (nufuziyet noksanlığı, gözenek vs.) görülür. Yüzeyde oluşan hatalar (çatlak vs.) radyografik muayene testinde tespit edilemez. Radyografik muayenelerde nufuziyet noksanlığı, gözenek, mekanik kalıntı, birleşme noksanlığı gibi hatalar görülsede yapmış olduğumuz çalışma tek yüzeyden yapılan bir kaynak işlemi olduğu için bu tip hatalar tarafımızca göz ardı edilmiştir. Çünkü yapılan kaynak işleminde gerilim 20, 25, 30 volt ve tel ilerleme hızları 20, 25, 30 cm/dk şeklinde değişkenlik göstererek devam etmiştir. Böyle bir durumda radyografik inceleme sonucunda günümüz standartlarında test sonuçlarının olumsuz çıkmasına sebep olan bazı hataların olması normaldir.

Tablo 7.1. Radyografik muayene parametreleri

Test Standardı	EN ISO 17626-2-B
Değer Standardı	EN 10675-1 LEVEL 2
Test Oranı	%100
Işın Kaynağı	X-RAY
Penetremetre (Çözünürlük)	10 FE EN
Film Tipi	KODAK T200
Enerji	150 Kv- 2,4 mA
Kaynak Geometrisi	v
Film Fokus Mesafesi	800 mm
İzotop Odaklama Boyutu	2,5x2,5 mm
Lazer Odak Boyutu	50 µm
Lazer Yoğunluğu	Yüksek
Tarama Hızı	Sn'de 1115-4300 mm ²
Poz Süresi	1min. 10 sec
Muyene Kapsamı	Kaynak, ITAB
Banyo Metodu	Otomatik

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde amper sabit seçilmiş ve Ramor 500 çelik çiftleri farklı volt ve tel ilerleme hızlarında birleştirilmiştir. N1-N2-N3 nolu numuneler 20 volt, N4-N5-N6 nolu numuneler 25 volt, N7-N8-N9 nolu numuneler 30 volt gerilimlerinde, N1-N4-N7 nolu numuneler 20 cm/dk, N2-N5-N8 nolu numuneler 25 cm/dk, N3-N6-N9 nolu numuneler 30 cm/dk tel ilerleme hızlarında kaynak edilmiştir. Radyografik muayenede kaynak başlama ve bitiş noktalarındaki 10'ar mm'lik kısımlar muayene kapsamına alınmaz. Kaynak başlangıcında ve bitişinde oluşabilecek ark hataları ve önceden atılmış puntalardan dolayı bu bölgelerde varsa oluşan hatalar göz ardı edilir. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesinde oluşan hatalar ve hataların tanımları Tablo 7.2'de görülmektedir. Numunelerin röntgen resimleri ve kaynak hataları Şekil 7.1'de gösterilmiştir.

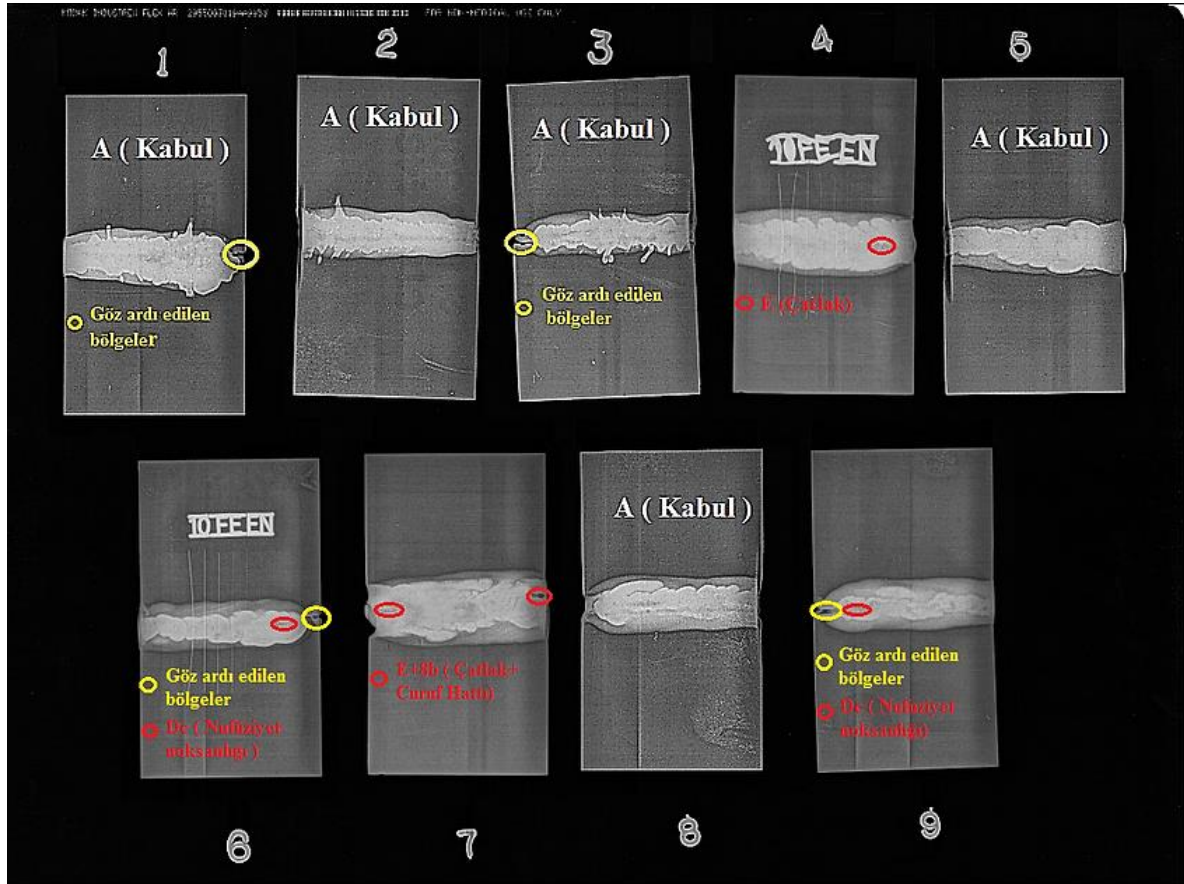
Tablo 7.2. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesinde görölen hatalar ve tanımlar

Hata Kodu	Hata Tanımı	Hata Kodu	Hata Tanımı
Aa/2011	Gözenek	E/100	Çatlak
Ab/2016	Gözenek Kanalı	Fa/504	Kökte Aşırı Nufuziyet
Ac/2014	Gözenek Zinciri	Fb/602	Kaynak Yüzeyi Kötü
Ad/2013	Gözenek Topluluğu	Fc/501	Yanma Oluğu
Ba/3012	Curuf Kalıntısı	Ff	Film Hatası
Bb/3011	Curuf Hattı	H/304	Metalik Kalıntı
C/401	Birleşme Noksanlığı	K/202	Çekme Boşluğu
Da/515	Kökte Konkavlık	A	Kabul
Db/4013	Tek Taraflı Kök Hatası	R	Tamir
Dc/402	Nufuziyet Noksanlığı	RS	Çekim Hatası

Yapılan kaynaklarda Şekil 7.1’de göröldüğü gibi, N4 numunesinde kaynağın bitiş bölgesinde çok küçük oranda E (çatlak), N7 numunesinde kaynak uç ve bitiş bölgesinde curuf hattı çizgisinde çok küçük bölgede çatlak tespiti E+8b (Çatlak+ Curuf Hattı), N6 ve N9 numunelerinde ise kaynağın başlangıç ve bitiş bölgelerinde çok küçük oranda Dc (nufuziyet noksanlığı) hataları gözlemlenmiştir. Kaynak dikiş metalinde çekme numunelerinin alındığı nüfuziyetin en iyi olduğu orta bölgelerde hiçbir kaynak hatası oluşmamıştır. N4 ve N6 numunelerinin radyografik muayenesinde 10 FE EN ifadesi yer almaktadır. Bu ifade penetremetrenin çözünürlüğü o derecede görünüm sağlıyor, yani numunede ışın o çözünürlüğü veriyor.

250 sabit amperde, 20 volt ve 20 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N1 numunesinde, 20 volt ve 25 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N2 numunesinde, 20 volt ve 30 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N3 numunesinde, 25 volt ve 25 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N5 numunesinde, 30 volt ve 25 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N8 numunesinde yapılan radyografik muayene sonucuna göre bu 5 kaynakta herhangi bir hata gözlemlenmemiştir ve uluslararası kaynak enstitüsünün yayınladığı ilkelere göre A (Kabul) raporu verilmiştir [128]–[130]. Diğer 4 numunede ise herhangi bir “red” raporu verilmemiştir, sadece kaynağın başlangıç ve bitiş bölgelerinde çok küçük çatlak ve nüfuziyet kaynak hataları tespit edilmiştir, bunların ise kaynaktan değil cürufun

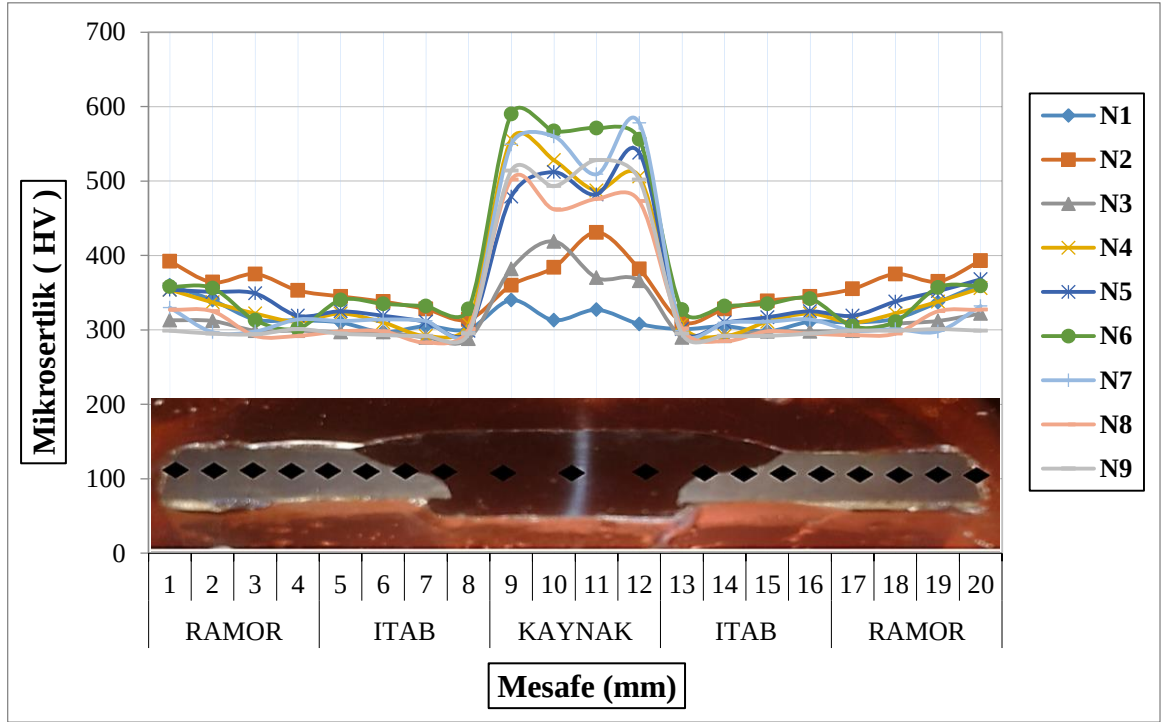
kaldırılması sırasında oluşması düşünülmektedir. Şekil 7.1’de bütün numunelerin radyografik görüntüleri görülmektedir. Gerilim değeri ve ilerleme arttıkça kaynak dikişi nufuziyeti olumsuz etkilenmektedir. Dolayısıyla özellikle ilerlemenin fazla olduğu numunelerde bu durum rahatlıkla ayırt edilebilmektedir. N9 numunesi 30 volt ve 30 cm/dk ilerleme hızı ile en yüksek değerlerdeki numunemiz, diğer parametrelerimize göre en olumsuz sonuçların olduğu numune olmuştur. Ama 20 volt gerilim değerindeki numunelerde ise bu durum söz konusu değil bütün ilerleme hızlarında yeterli nufuziyet sağlanmıştır. Bunun nedeni enerji yoğunluğunun dar bir alanda tutulabilmiş olmasıdır.



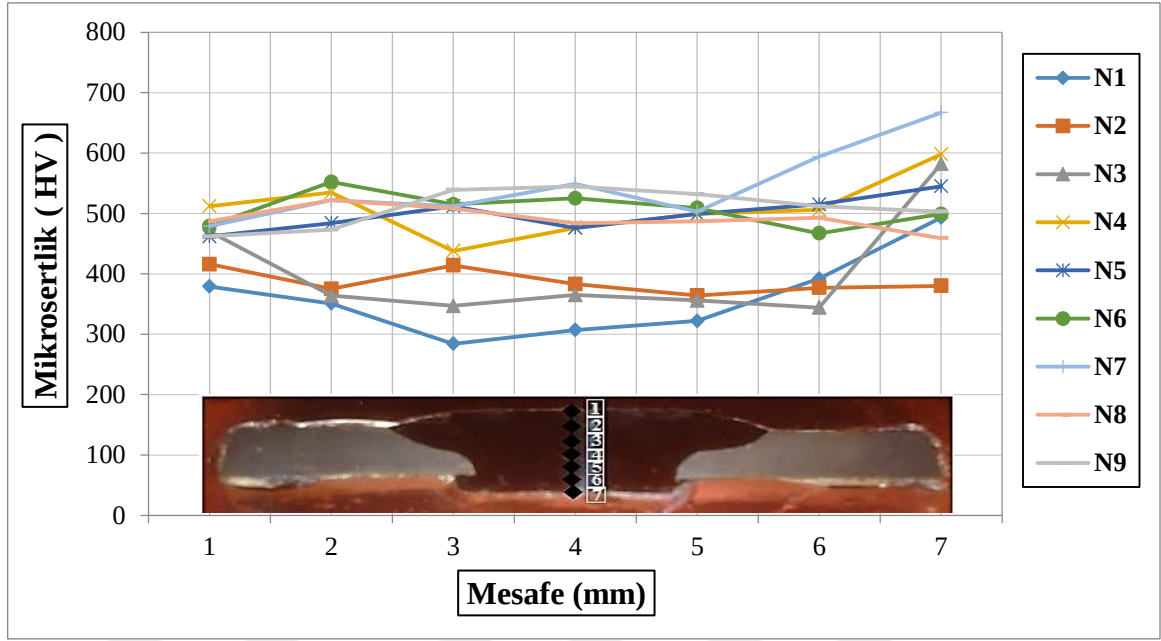
Şekil 7.1. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik görüntüleri

7.2. Kaynaklı Birleştirmelerin Mikrosertliklerinin İncelenmesi

Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de Ramor 500 çelik çiftinin 250 sabit amperde 20, 25, 30 volt gerilim değerlerinde ve 20, 25, 30 cm/dk tel ilerleme hızlarında birleştirilmiş numunelerden alınan yatay eksen ve kaynak bölgesinin dikey eksen mikrosertlik ölçüm değerleri verilmiştir.



Şekil 7.2. Kaynaklı numunelerin yatay ekseninden alınan mikrosertlik ölçümlerinin grafiği



Şekil 7.3. Numunelerin kaynak bölgesinin dikey ekseninden alınan mikrosertlik ölçümlerinin grafiği

Yapılan mikrosertlik ölçümleri sonuçlarının tamamında ölçüm sonuçları numunelerden elde ettiğimiz sertlik eğrilerine göre incelendiğinde; kaynak dikişlerinin sertliğinde ana malzemenin sertliğine göre artış gözlenmiştir.

Kaynak metalinde, Şekil 7.2'deki grafik incelendiğinde bütün numunelerde birbirine paralel sertlik değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Ancak Ramor 500 çelik çiftinin olduğu tarafta sertlikte azalma, ITAB'da daha fazla azalma ve sonra kaynak bölgesine doğru artma görülmüştür. Bu sertlik yükselmesinin sebebinin, kaynak havuzunun en yüksek sıcaklığa eriştiği anda ilave östenitik esaslı kaynak telinin Cr'nin, Ramor 500 içindeki C ile oluşturduğu sert bileşiklerin ya da ilave kaynak telindeki alaşım elementlerinin işlem sırasında oluşan ısıdan dolayı meydana gelen yeni sert fazların varlığından olduğu düşünülmektedir. Çünkü östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında bu durum Schaffler diyagramı esas alınarak yapılacak incelemelerde de martenzit oluşumu mikrosertlik değerlerinin yüksek çıkmasında önemli bir etken olarak göze çarpmaktadır [125]. Ramor 500 çelik çiftlerinin sertliğinin azalması kaynak dikişlerinin geniş olmasından dolayı ITAB bölgesinde geniş olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla ITAB'daki sertlik değerlerinin düşmüş olması, bir çeşit havada soğutulmuş ısıtılmış işlem

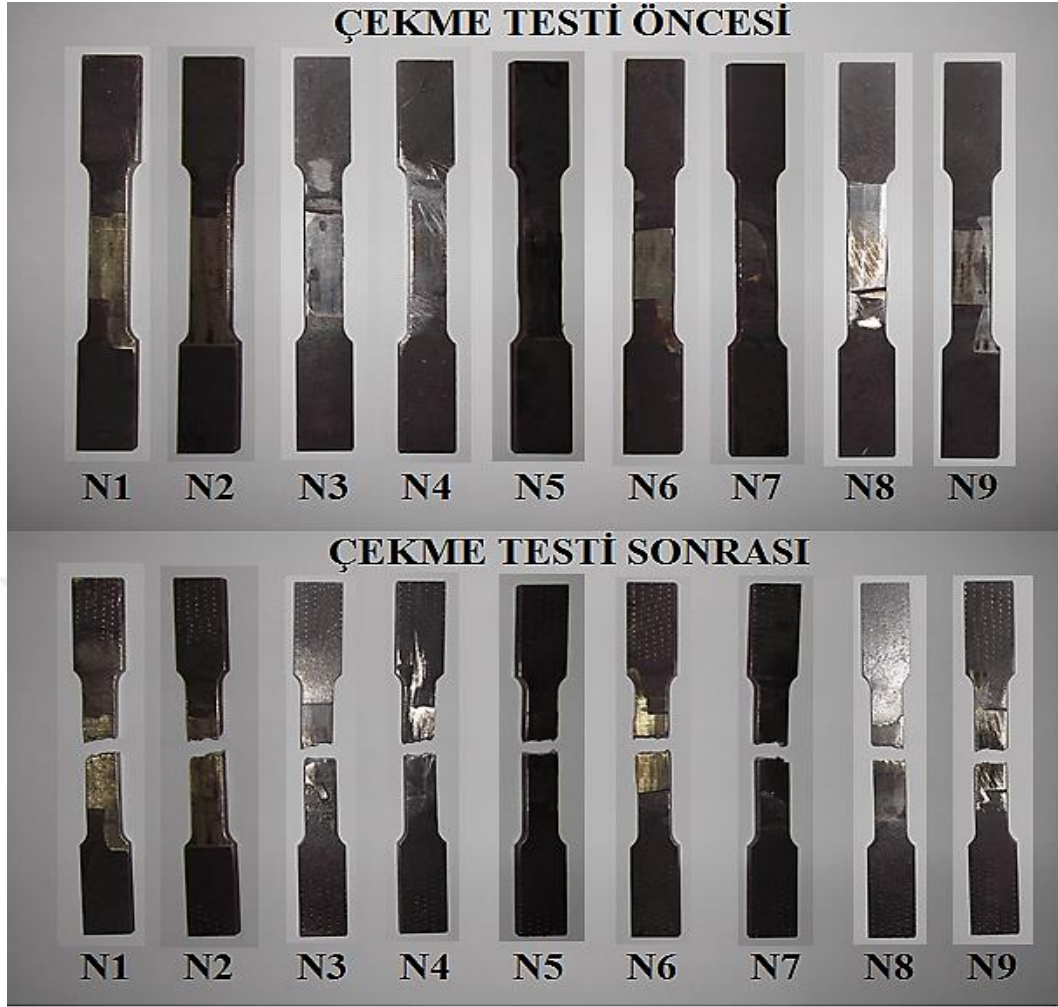
görmüş çeliklerin sertlik davranışını göstermektedir. Ayrıca kendisinin sahip olduğu martenzitik yapının yüksek ısı girdili kaynak sonrasında yavaş soğuma ile bu yapının bozulmasına bağlamaktayız. Ayrıca bu bölgede tane büyümesi de gerçekleşmiştir. Tozaltı kaynağının doğasında var olan yüksek enerji (ısı) girdisi kaynak dikişlerinin mikroyapısında oluşan karbürlerin daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak ve oluşacak fazların katılma esnasında homojen bir şekilde katılması sebebiyle mikrosertlik dağılımlarında homojen eğriler elde etmemizi sağlamaktadır. Bu sertlik grafikleri incelendiğinde; ITAB'daki sertliğin düşüşü malzemedeki ısı kaybı hızına bağlı olarak ısı tesiri altındaki bölgenin tane irileşmesine sebep olmakta ve malzemelerin içindeki elementlerden kaynaklanan konsantrasyon farklılığından her iki malzemeninde birbirine doğru elementsel olarak difüzyona uğradıkları düşünülmektedir. Buna ek olarak kaynak bölgesi kırık yüzeylerinden alınan SEM analizlerinde yapıların ve XRD analizinde bileşiklerin elde edildiği gözlenmiştir. Kaynaklı malzemelerin mikrosertlik testleri incelendiğinde genellikle kaynak dikişi bölgelerinde mikrosertliğin yükseldiği görülmüştür. Bu durumun kaynak dikişinde sert fazların oluşmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Kaynak bölgesinin yukarıdan nüfuziyet bölgesine kadar alınan mikrosertlik ölçümlerinde sertliklerin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kaynak içerisinde mikrosertlik değerlerinin yüksek çıkması; bu bölgede sertliği artırıcı ani soğuma sonucunda yoğun dentiritik yapının ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır.

7.3. Kaynaklı Birleştirmelerin Çekme Dayanımlarının İncelenmesi

Tozaltı kaynak yöntemiyle birleştirilmiş Ramor 500 çelik çiftinin kaynak dikişlerinin yük taşıma yeteneği ile yükleme sırasındaki şekil değiştirme davranışını belirlemek için çekme deneyi yapılmıştır. Çekme numuneleri kaynak dikişine dik doğrultuda kaynaklı numunelerden çıkarılmıştır.

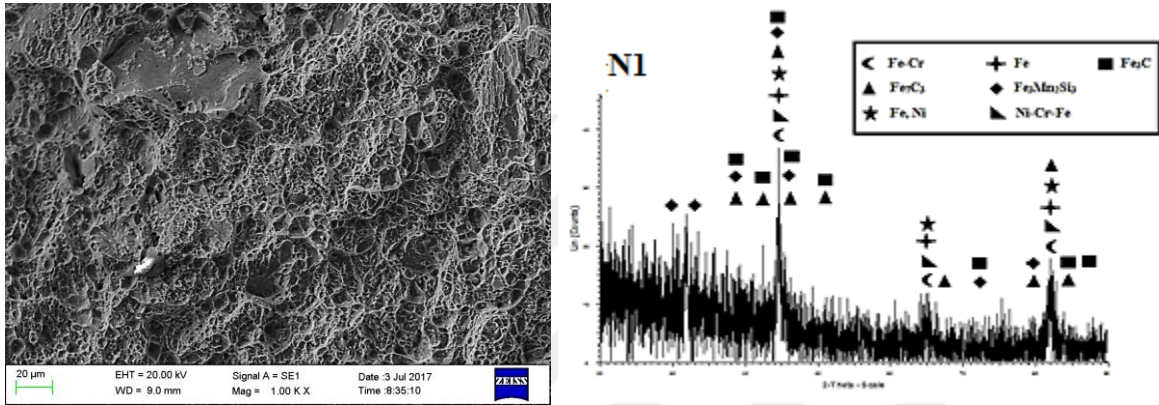
Şekil 7.4'de çekme testi öncesi ve çekme testi sonrası numunelerin resimleri verilmiştir.



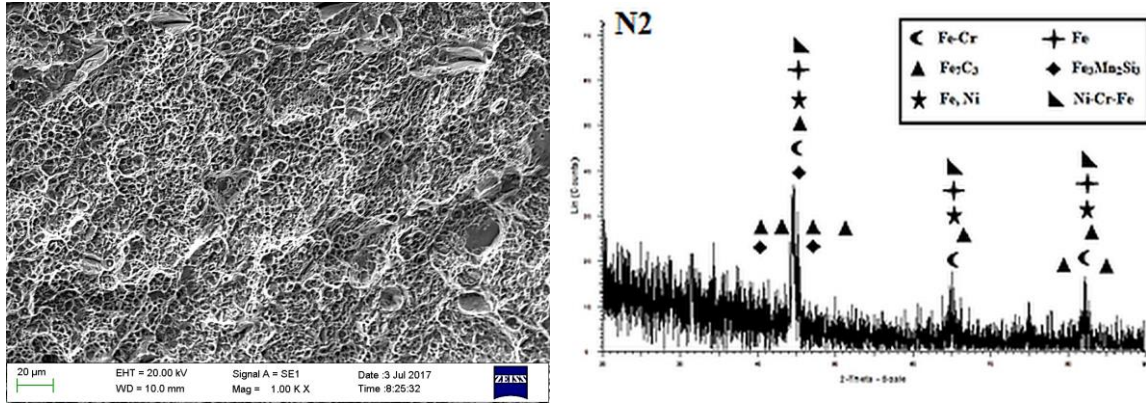
Şekil 7.4. Çekme testi öncesi ve çekme testi sonrası numunelerin makro resimleri

Tez çalışmamızda Ramor 500 çelik çiftine uygulanan çekme testi sonucunda kopan numunelerin şekilleri incelendiğinde boyun vermeden kırılma meydana gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu haliyle incelediğimizde çelik malzemenin boyun vermemiş olması her ne kadar gevrek malzemeymiş gibi görünsede, makro görüntüler incelendiğinde kopma yüzeylerinde koni-çanak yapılarını andıran görüntüler vardır. Ayrıca kopma yüzeyleri tam düz değil tırtırlı olacak şekilde kopmuştur. Yani mevcut haliyle de bu malzeme çiftlerinin sünek kırılma mekanizmasıyla koptuklarını söyleyebiliriz. Çünkü sünek kırılma yüksek orandaki plastik deformasyon sonrasında meydana gelir ve malzeme kırık yüzeyinde koni çanak şeklinde bir kırık yüzey oluşumu kendini gösterir. Ancak bizim yapmış olduğumuz çalışmalarda kaynaklı malzemelerin kök pasolarında bulunan yapısal düzensizlikler

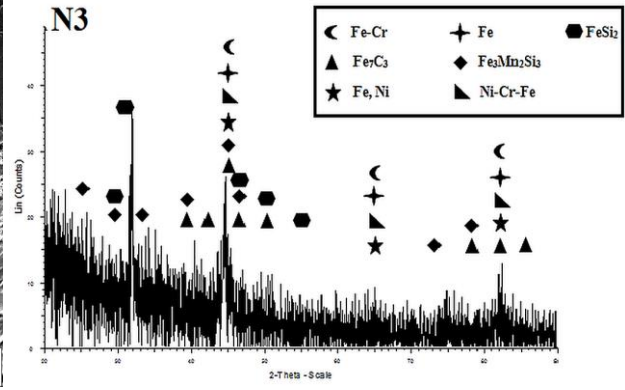
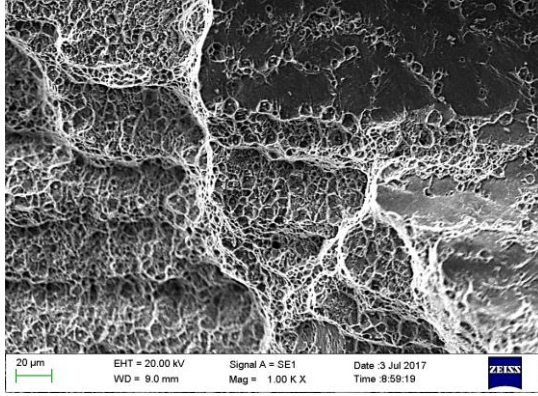
(boşluk, gözenek ve birleşmeyen kaynak ağzı) çentik etkisi yaparak malzeme kopma yüzeylerinde koni çanak oluşumuna fırsat vermemişlerdir. Sünek kırılmayı Ramor 500 çelik çiftlerinin kopma yüzeylerinden aldığımız Şekil 7.5-7.13’de görüldüğü gibi kırık yüzey SEM görüntülerinde de incelendiğinde görebiliriz. Kırık yüzey süngerimsi pürüzlü yapıda sünek kırılma mekanizmasına uygun şekilde bir yapıya sahiptir. Kırık yüzeyler sürekli uygulanan gerilme altında yapısal düzensizliklerin kaynak dikişi merkezine doğru ilerlemesi yani uygulanan kuvvete dik doğrultuda çatlağın ilerlemesi mekanizmasıyla kopar.



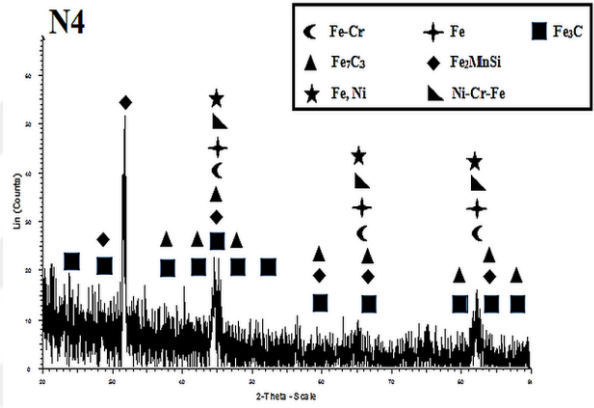
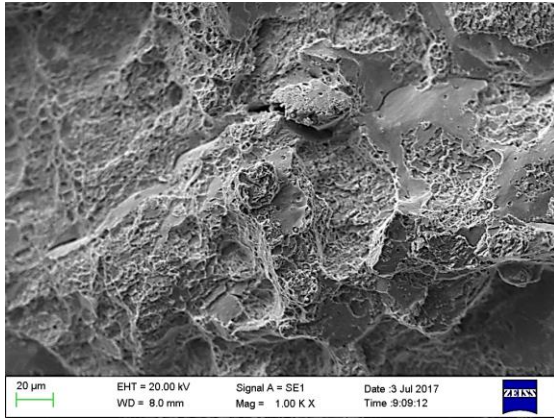
Şekil 7.5. N1 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



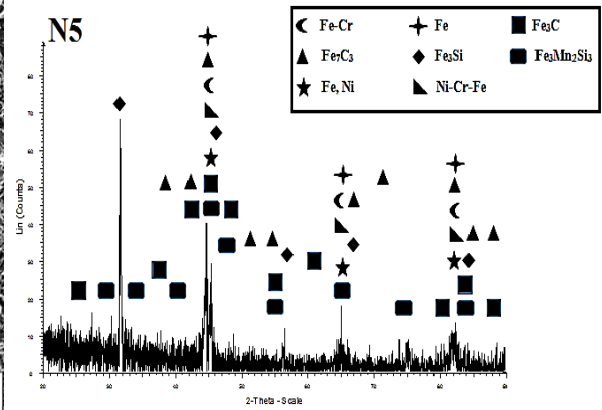
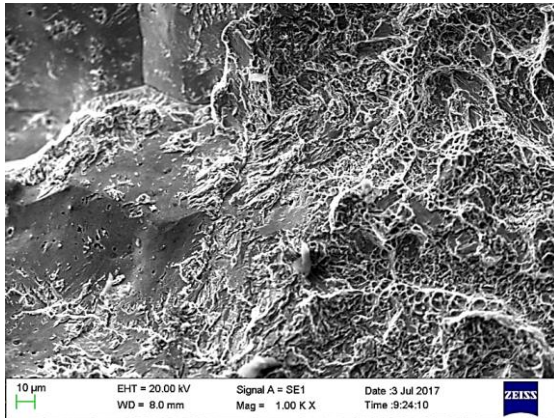
Şekil 7.6. N2 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



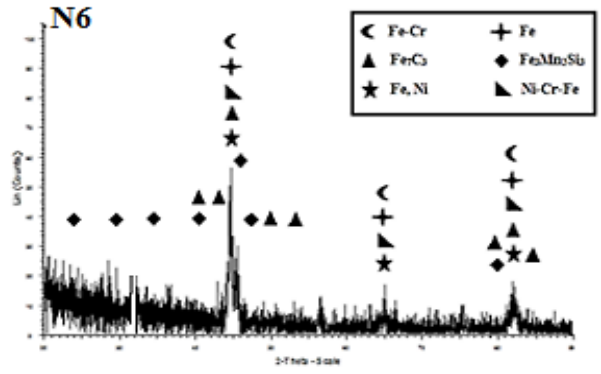
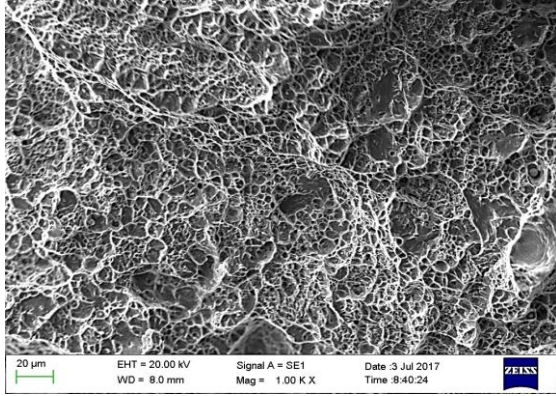
Şekil 7.7. N3 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



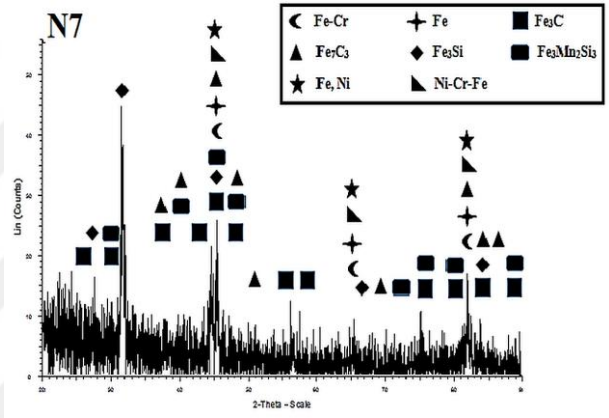
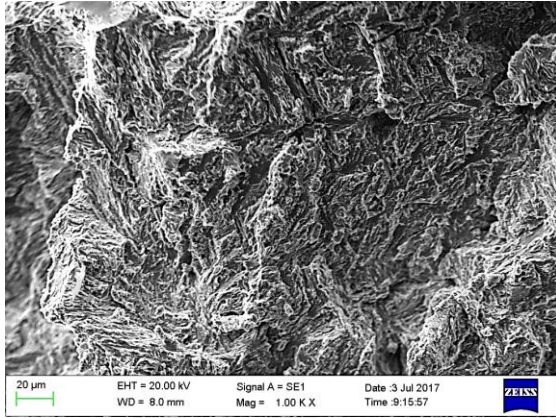
Şekil 7.8. N4 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



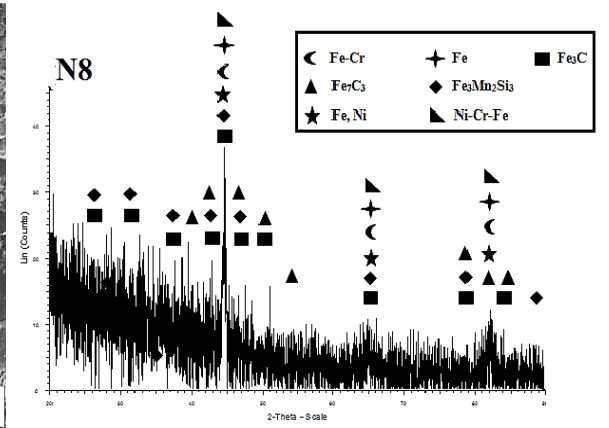
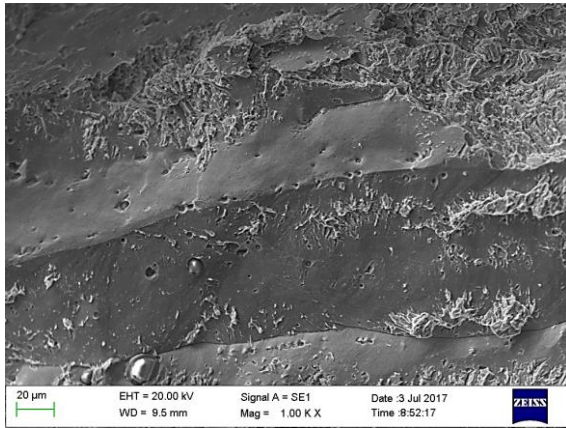
Şekil 7.9. N5 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



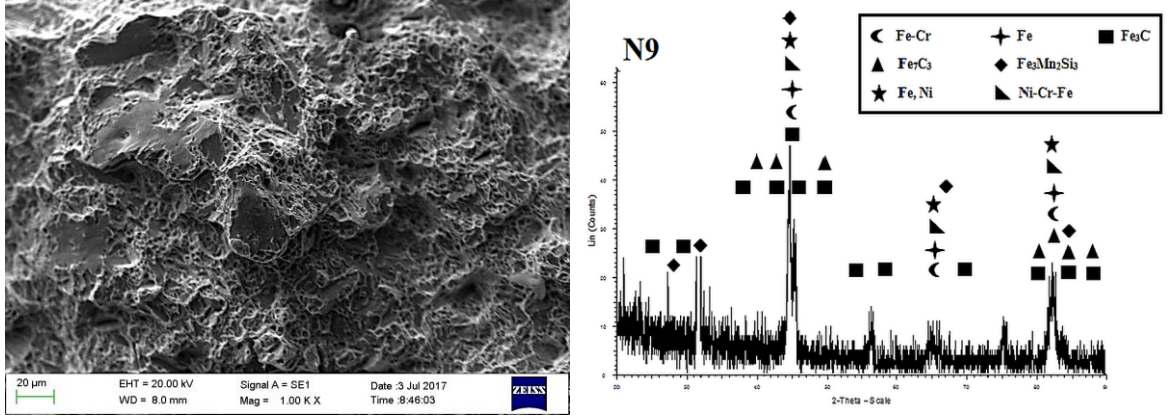
Şekil 7.10. N6 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



Şekil 7.11. N7 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



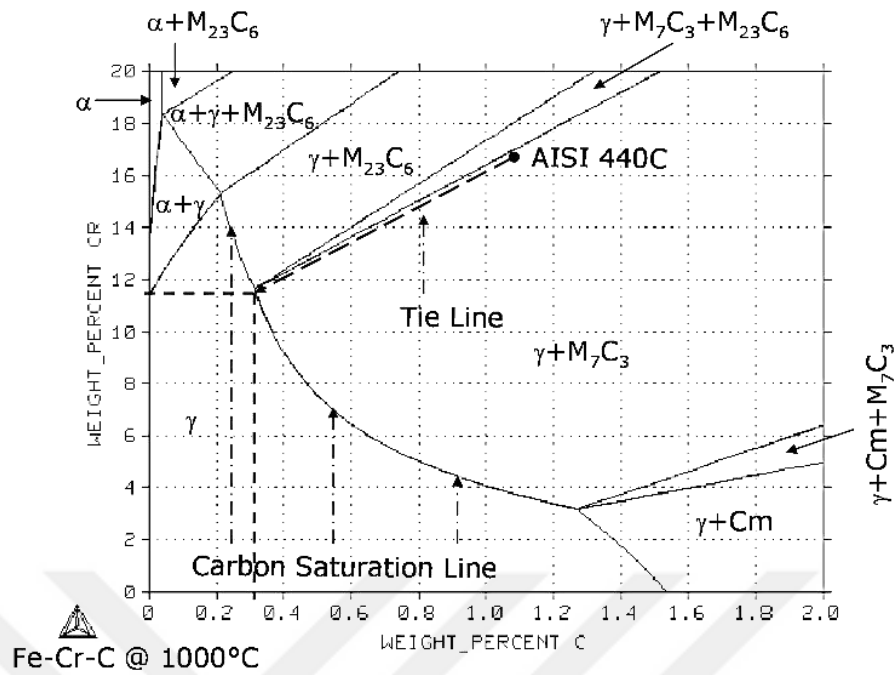
Şekil 7.12. N8 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi



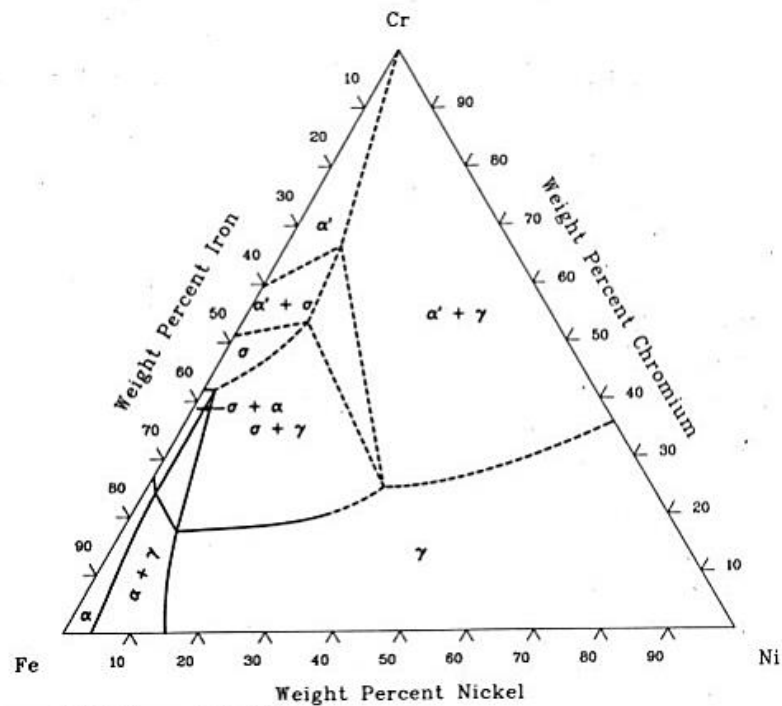
Şekil 7.13. N9 numunesinin kırık kopma yüzeyinin SEM ve XRD analizi

Yapılan çalışmada, kaynaklı bağlantıların kaynak dikişi üzerinde alınan XRD analiz sonuçlarında ikili yada üçlü denge diyagramlarıyla karşılaştırıldığında MC, M_xC_y gibi karbürler saptanmıştır (Şekil 7.14).

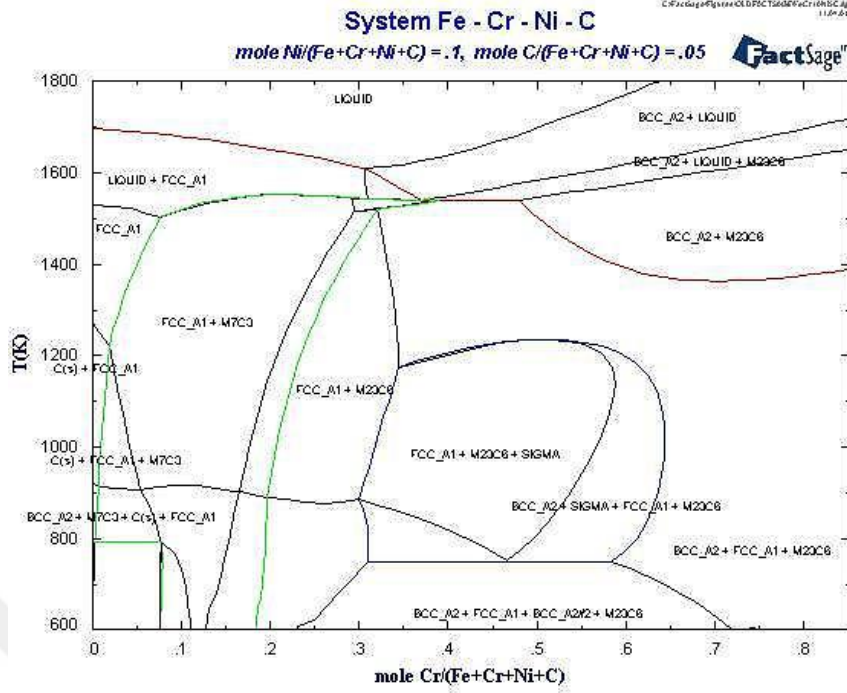
Kırık yüzeylerden XRD faz bileşikleri analizleri alınmıştır. Kaynak dikişi ara yüzeyinde oluşan fazları tespit etmek için XRD faz analizinin elementel oranına göre ikili veya üçlü denge diyagramlarından faydalanılmaktadır. Şekil 7.14'deki diyagramlarda da görüleceği gibi % element oranına göre rahatlıkla yapıda oluşan fazları tespit edebilmekteyiz. Ara faz veya metallerarası bileşik şeklinde görülebilen bu fazların, sertlik eğrilerinde kaynak bölgesindeki oranın yüksek çıkmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Ramor 500 çelik çiftinde bu durum farklılık göstermektedir. Çünkü bu malzemeler imalattan kaynaklanan martenzitik ana faz yapısının bozulmasından dolayı kaynak dikişindeki sertlik değerinin düşük görünmesine sebep olmuştur [125].



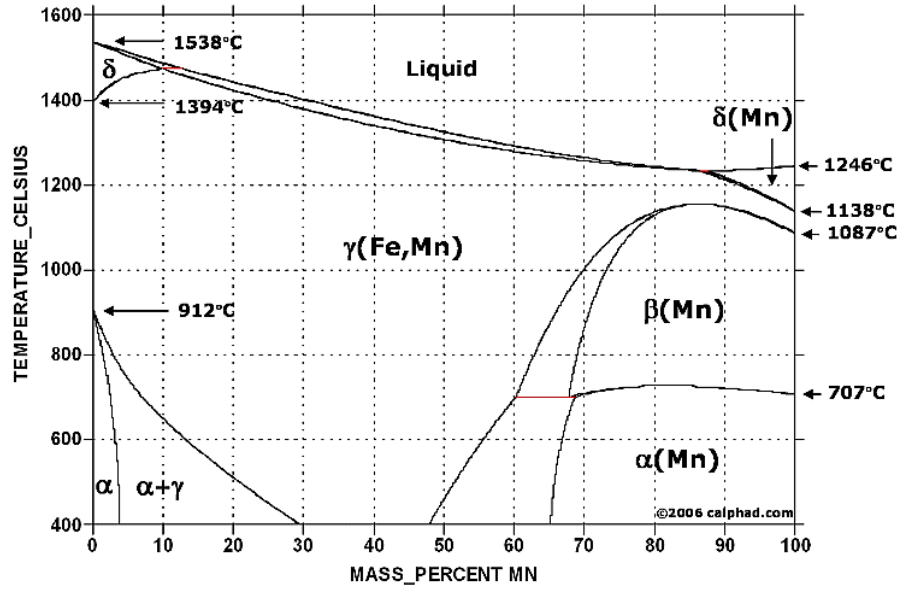
Cr-Fe-Ni isothermal section at 650 °C [88Ray]



Note: $\alpha = (\alpha_{Fe,Cr})$; $\gamma = (\gamma_{Fe,Ni})$



Şekil 7.14. Fe/Cr/C/Ni elementlerinin üçlü faz diyagramı kombinasyonları [125].



Şekil 7.15. Fe/Mn faz diyagramı [131].

Tüm kaynaklı numuneler kaynak yerinden kopmuştur. Tüm numunelerde nufuziyet tam olarak sağlandığından kaynak kök pasosunda birleşmeyen kaynak ağzı bölgeleri bulunmadığı için çekme işlemi yapıldığında numune boyun vermeden sünek kırılma

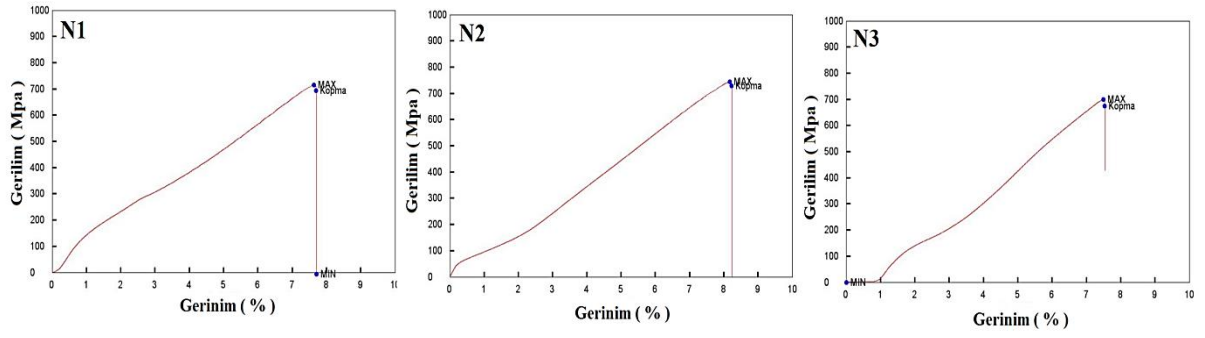
şeklinde kopma gerçekleşmiştir. Bunun nedeni kaynak dikişinin eriştiği mukavemet değerinin östenitik esaslı paslanmaz çelik telin mukavemet değerinden yüksek oluşundan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu çelik çiftlerinde tozaltı kaynağında, 250 A, 20-25-30 volt ve 20-25-30 cm/dk ilerleme hızlarında, Cr-Ni-Mn esaslı ilave östenitik esaslı çelik tel kullanılarak yüksek mukavemet sağlayan kaynak dikişi elde edilmiştir.

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında, krom karbür oluşumu; kaynaklı malzemelerde ITAB bölgesinde (430-870°C) arasında yapıdaki Cr tane sınırlarına doğru yerleşir ve bu bölgesel alanlarda (ITAB), Cr zayıflayacağı için korozyon dayanımı düşer [125].

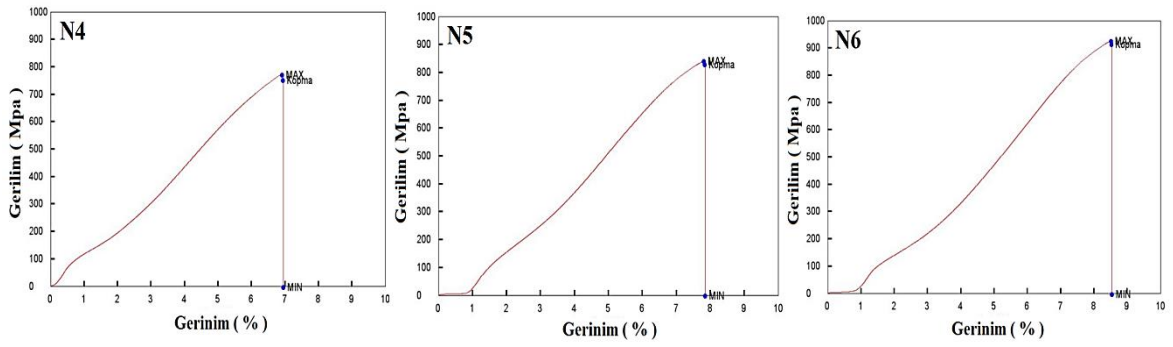
Tablo 7.3’de maksimum çekme, kopma gerilmeleri, % gerinim değerleri ve Şekil (7.16-7.18) arasında da çekme eğrileri grafikleri verilmiştir.

Tablo 7.3. Çekme Testi yapılan numunelerin max. çekme, kopma gerilme ve % uzama değerleri

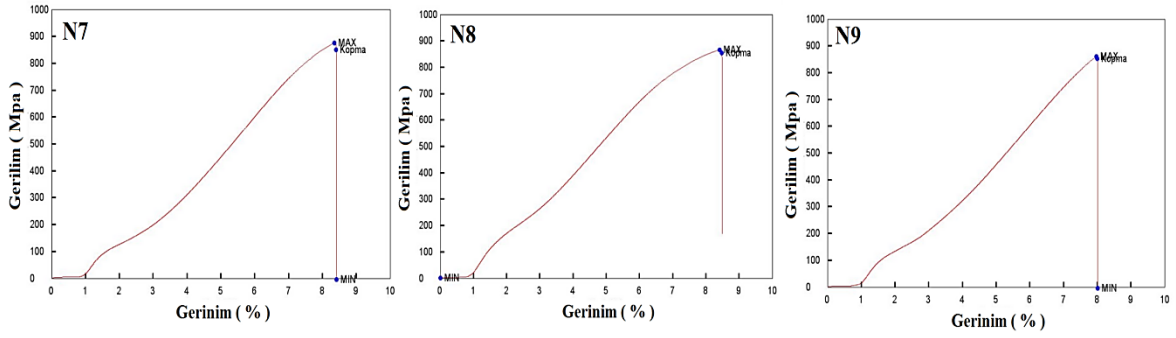
NUMUNE NO	Akım	Gerilim (Volt)	Tel İler. Hızı (cm/dk.)	Çekme İler. Hızı (mm/dk)	Max. Çekme Gerilimi (Mpa)	Kopma Gerilimi (Mpa)	Gerinim (%)
N1	250	20	20	1	713.910	694.135	7.63
N2			25		743.326	728.402	8.17
N3			30		699.382	674.771	7.49
N4		25	20		768.924	749.880	6.91
N5			25		838.278	826.011	7.81
N6			30		923.224	911.777	8.51
N7		30	20		876.200	849.165	8.36
N8			25		866.077	853.867	8.41
N9			30		860.445	852.286	7.98



Şekil 7.16. N1-N2-N3 nolu numuneye ait gerilim-gerinim grafiği

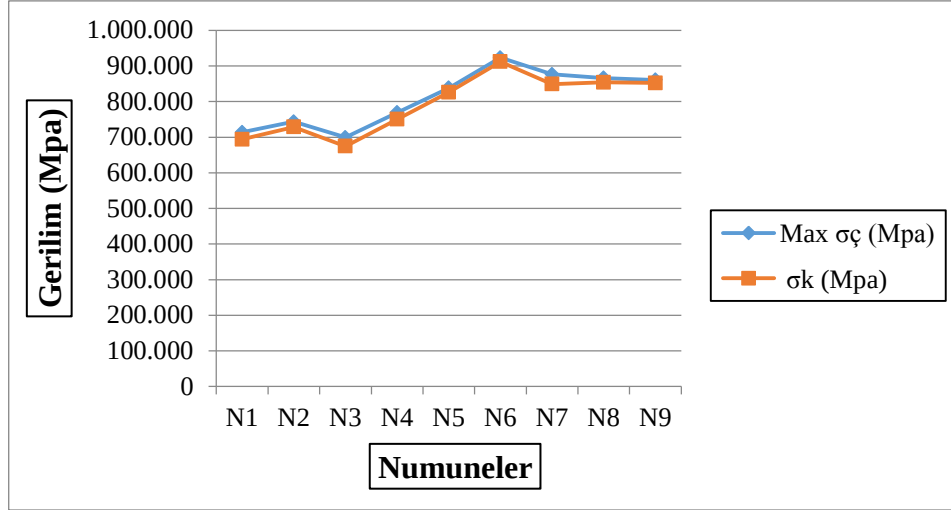


Şekil 7.17. N4-N5-N6 nolu numuneye ait gerilim-gerinim grafiği

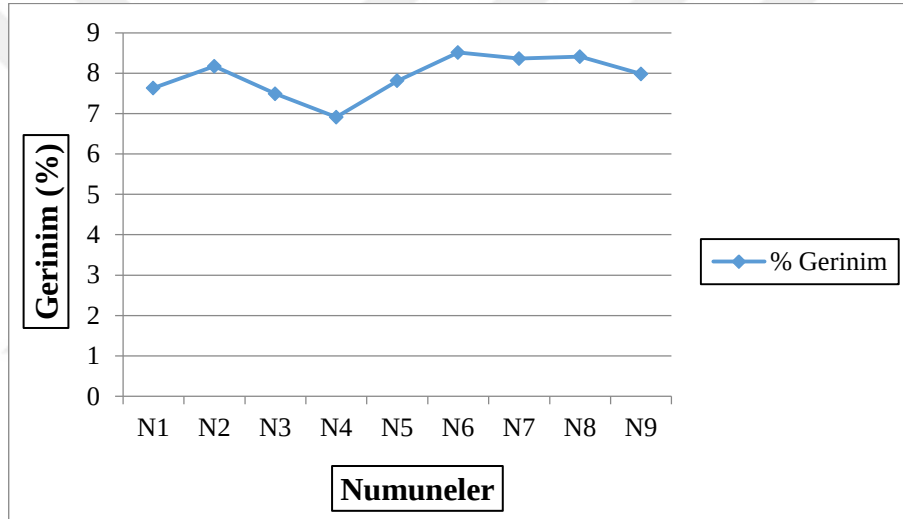


Şekil 7.18. N7-N8-N9 nolu numuneye ait gerilim-gerinim grafiği

Çekme grafiklerinin genel bir özetinin numunelerdeki çekme, kopma ve % gerinim kıyaslanmalarının daha anlaşılır olması için Şekil 7.19 ve 7.20’de grafiksel analizlerde gösterilmiştir.



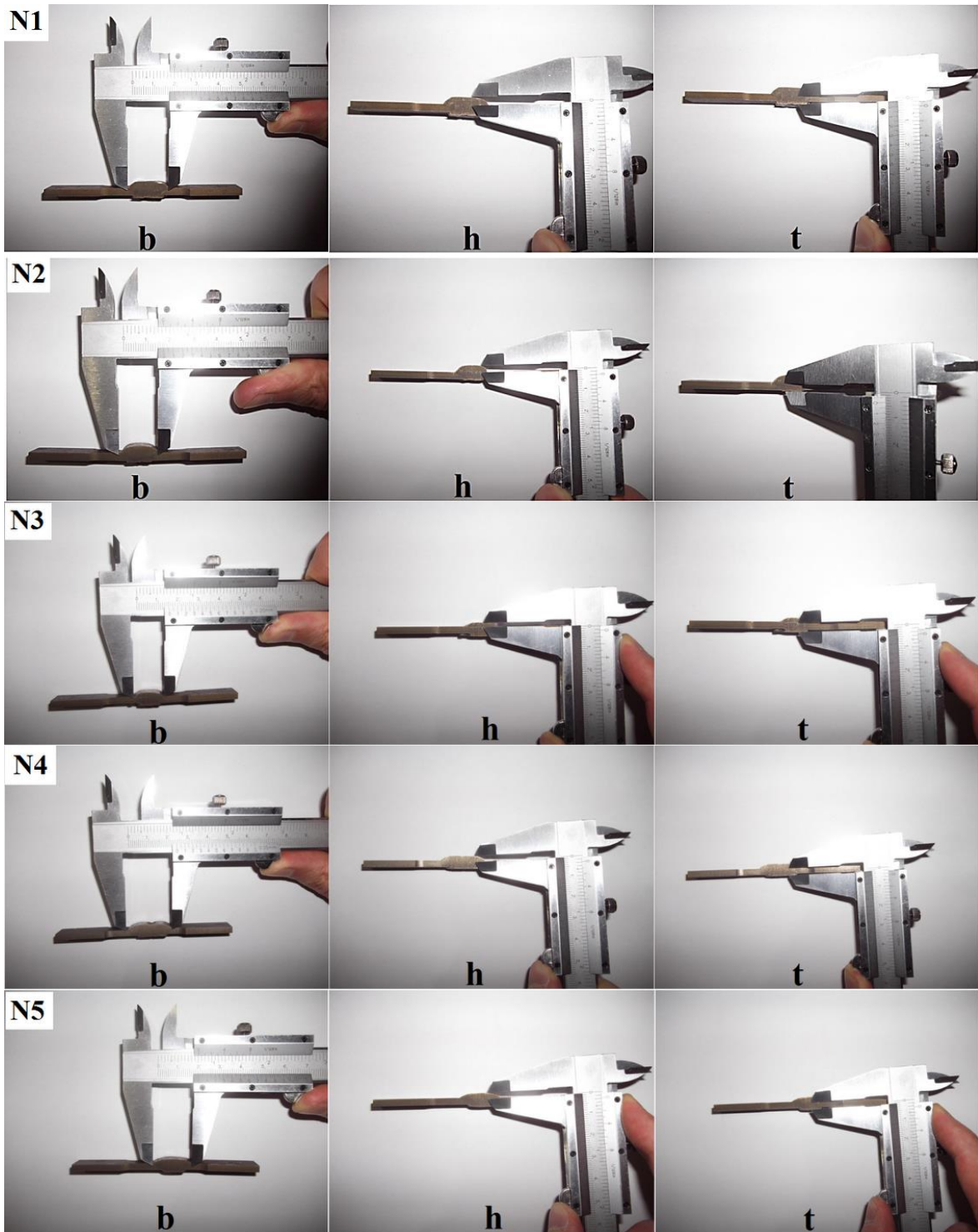
Şekil 7.19. Numunelerin max. çekme ve kopma gerilimlerinin grafiksel gösterimi

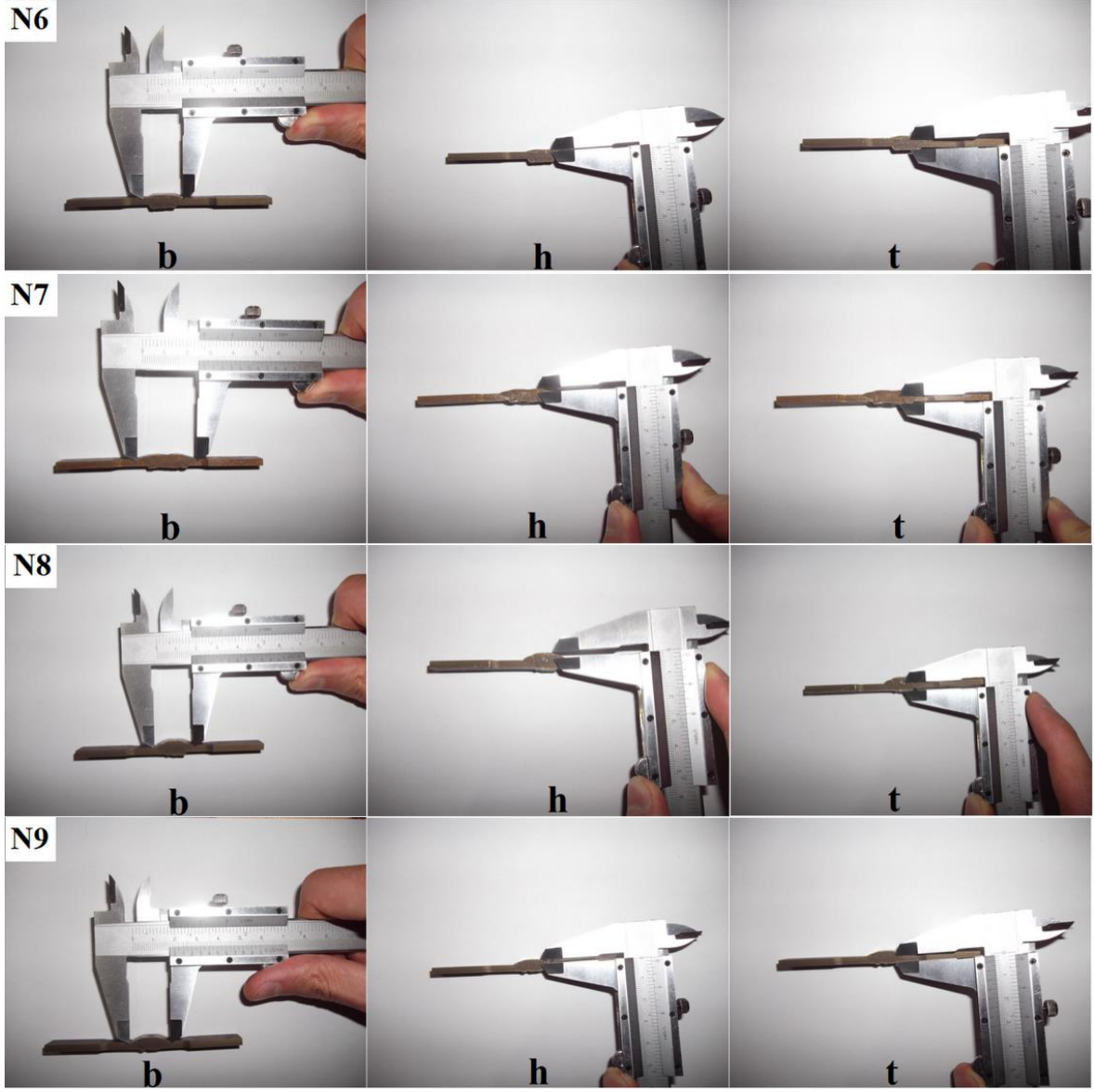


Şekil 7.20. Numunelerin % gerinim değerlerinin grafiksel gösterimi

7.4. Kaynaklı Birleştirmelerin Dikiş Geometrilerinin İncelenmesi

Kaynaklı numunelerin dikiş formlarının tespiti için kumpas ile ölçüm yapılır. Dikiş genişliği (b), dikiş yüksekliği (h), dikiş derinliği (t) ile ifade edilir. Şekil 7.21’de kaynaklı numunelerin kumpas ile dikiş formlarının ölçümü gösterilmiştir.





Şekil 7.21. Kaynaklı numunelerin dikiş formlarının tespiti için kumpas ile ölçüm

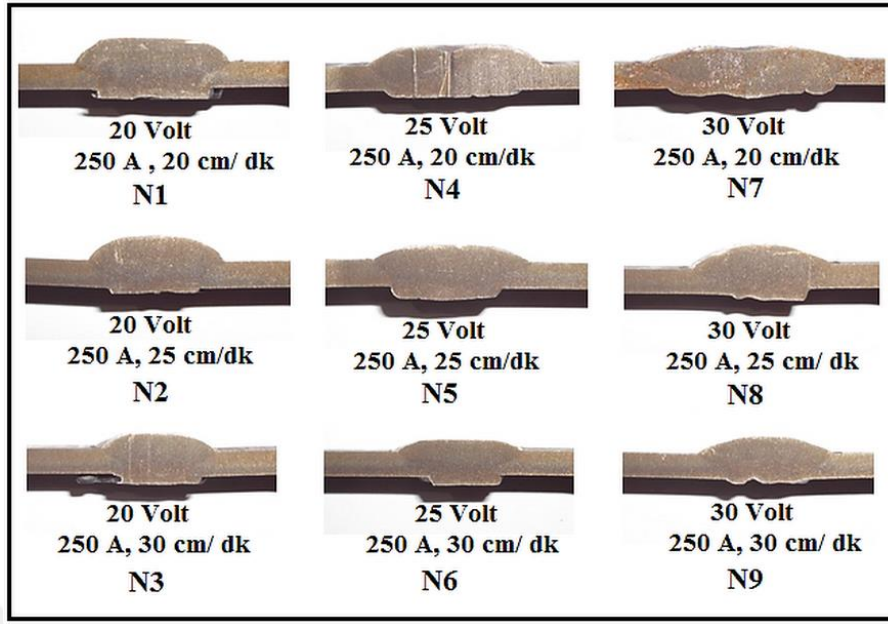
Tablo 7.4’de kaynak dikiş geometrisinin ölçüm değerleri verilmiştir

Tablo 7.4. Kaynak dikiş geometrisi ölçüm değerleri

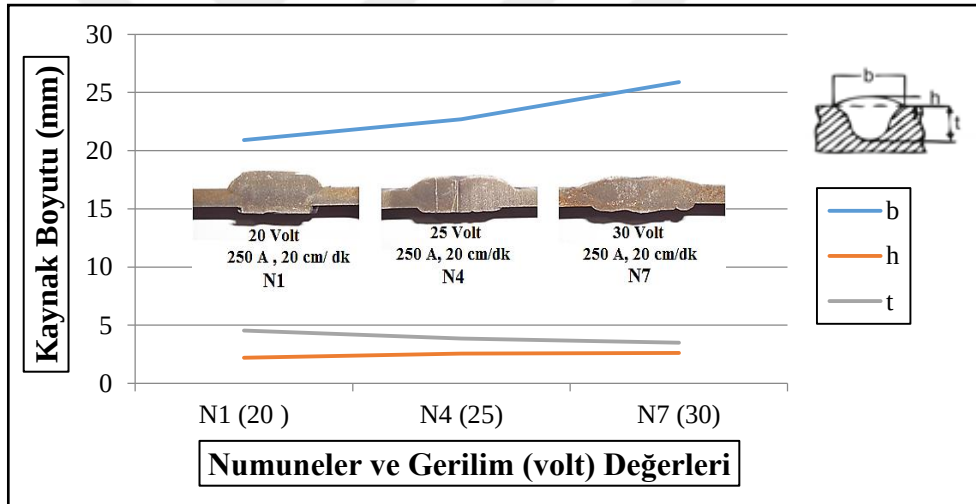
Kaynak Geometrisi Ölçüm Değerleri			
Numuneler	Dikiş Genişliği (b), (mm)	Dikiş Yüksekliği (h), (mm)	Dikiş Derinliği (t), (mm)
N1	20,9	2,2	4,55
N2	15,7	3,1	3,6
N3	15,1	2,2	4,2
N4	22,7	2,55	3,85
N5	20,25	2,6	3,95
N6	16,6	0,8	4,8
N7	25,9	2,6	3,5
N8	19,8	3,35	3,85
N9	17,6	2,7	3,4

7.4.1. Kaynak Akım Şiddetinin ve Gerilimin Dikiş Geometrisine Etkisi

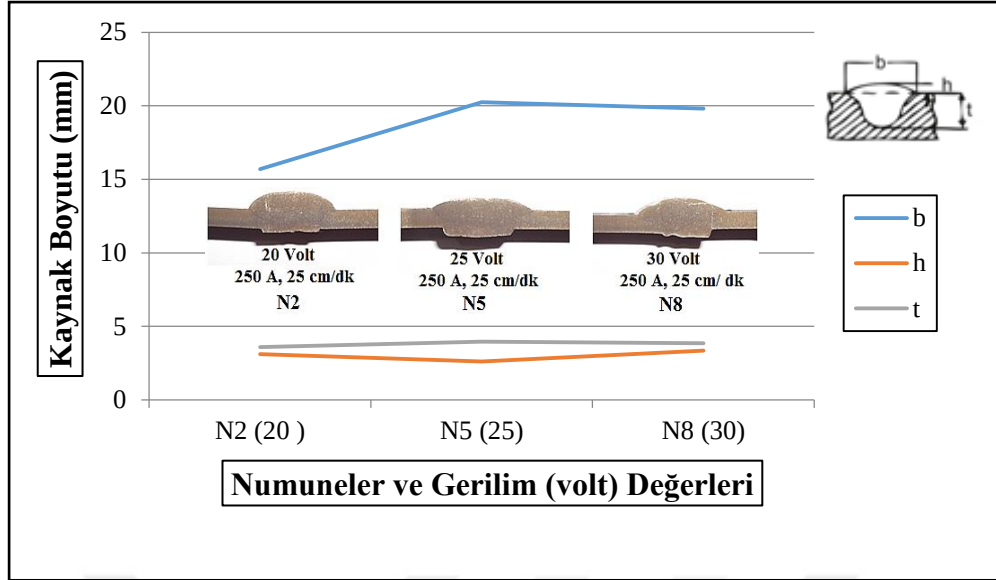
Tozaltı kaynak yönteminde kaynaklı numunelerin birleştirilmesinde 250 A’ de nüfuziyetin tam sağlanması nedeniyle sabit amper kullanılmıştır. Numunelerin değişken parametreleri gerilim ve ilerleme hızları olduğundan, sabit amperde gerilim değişiminin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi Şekil 7.22’de ve grafiksel analizleri Şekil (7.23-7.25)’de gösterilmiştir. Kaynak gerilimi arttıkça kaynak dikişide genişlemektedir [57]-[64].



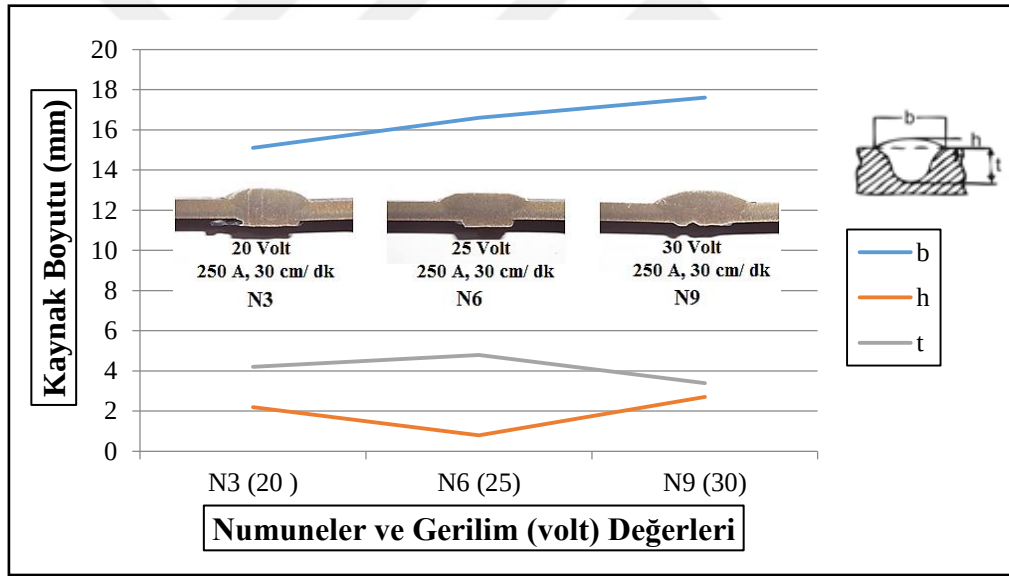
Şekil 7.22. Tozaltı kaynak yönteminde akım şiddetinin ve gerilimin dikiş geometrisi üzerindeki etkisi



Şekil 7.23. 250 A/20 cm/dk - 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinin kaynak dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N1-N4-N7)



Şekil 7.24. 250 A/25 cm/dk - 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinin kaynak dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N2-N5-N8)

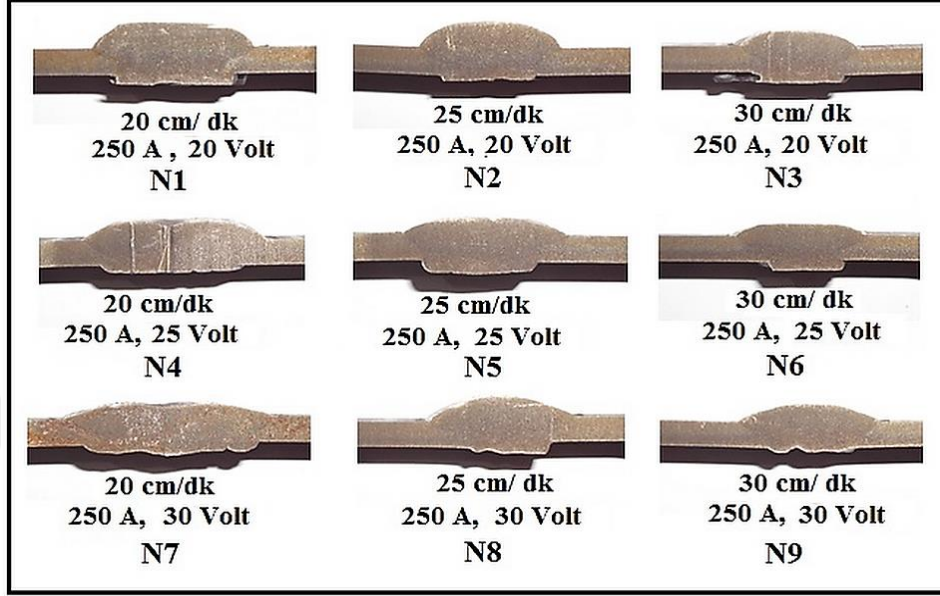


Şekil 7.25. 250 A/30 cm/dk - 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinin kaynak dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N3-N6-N9)

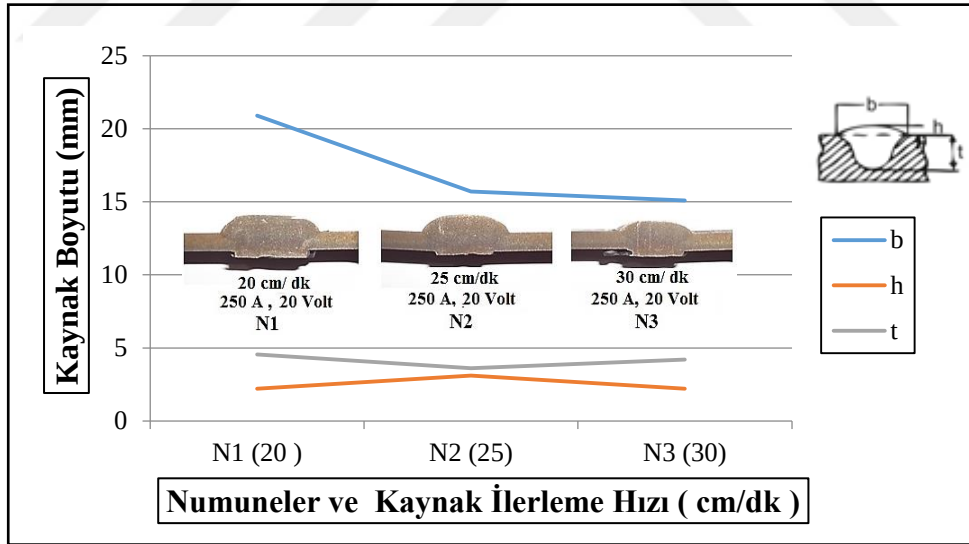
7.4.2. Kaynak Hızının Dikiş Geometrisine Etkisi

Tozaltı kaynak yönteminde kaynaklı numunelerin birleştirilmesinde 250 A 'de nüfuziyetin tam sağlanması nedeniyle sabit amper kullanılmıştır. Numunelerin değişken parametreleri gerilim ve ilerleme hızları olduğundan, sabit amperde kaynak ilerleme

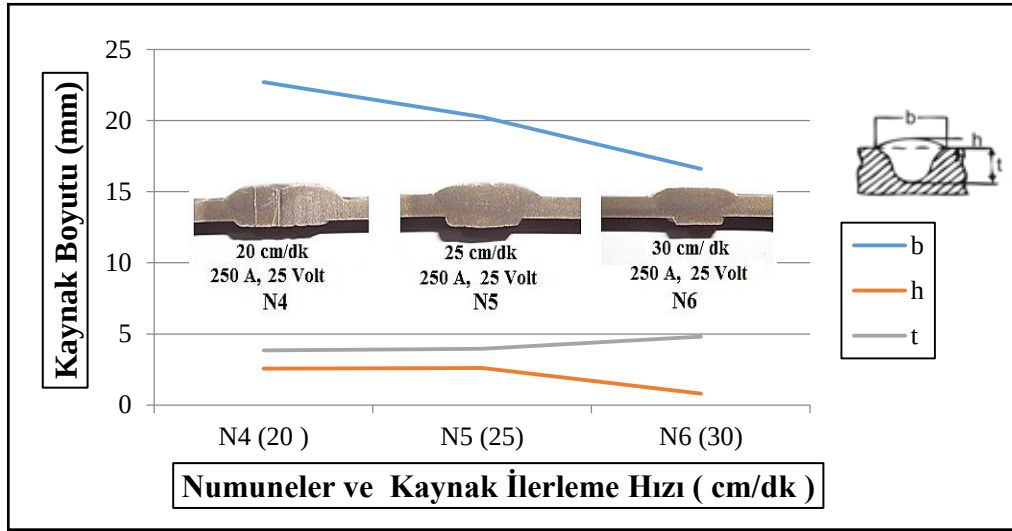
hızının değişiminin, dikiş geometrisi üzerindeki etkisi Şekil 7.26'da ve grafiksel analizleri Şekil (7.27-7.29)'da gösterilmiştir. Kaynak hızı arttıkça kaynak dikişide ters orantılı olarak azalmaktadır [57]-[64].



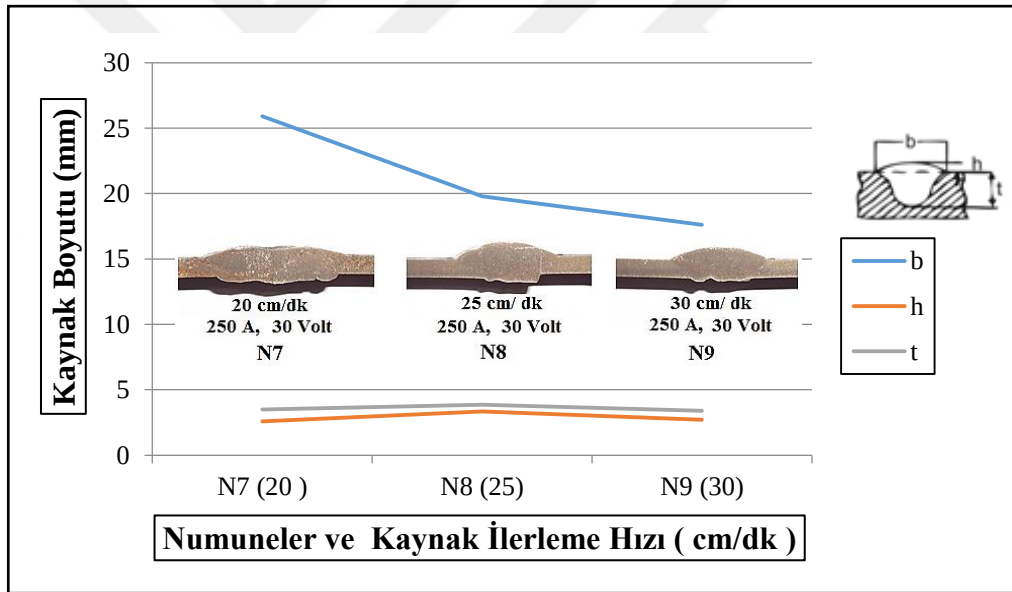
Şekil 7.26. Tozaltı kaynak yönteminde kaynak hızının dikiş geometrisi üzerindeki etkisi



Şekil 7.27. 250 A/20 volt - 20, 25 ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızlarının dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N1-N2-N3)



Şekil 7.28. 250 A/25 volt - 20, 25 ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızlarının dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N4-N5-N6)

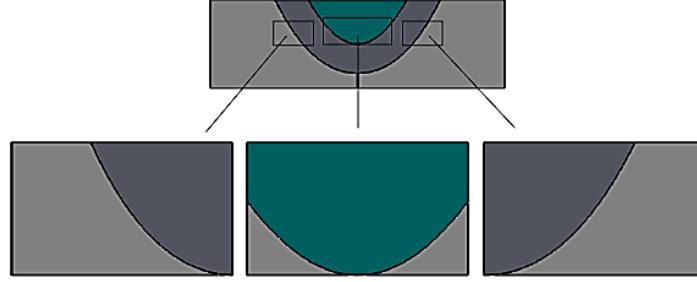


Şekil 7.29. 250 A/30 volt - 20, 25 ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızlarının dikiş formu üzerindeki etkisinin grafiksel analizi (N7-N8-N9)

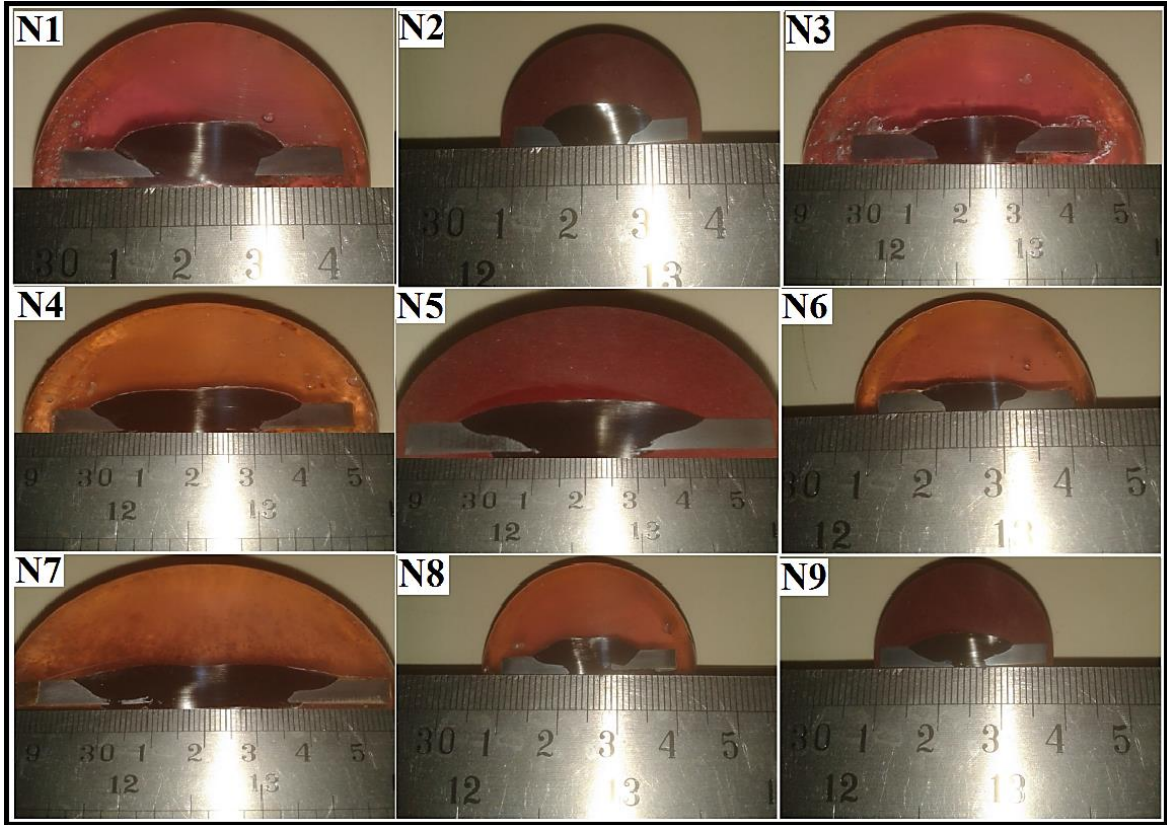
7.5. Kaynaklı Birleştirmelerin Mikroyapılarının İncelenmesi

Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen Ramor 500 çelik çiftinin optik görüntüleri verilmiştir. Ramor 500 çelik çiftinin optik görüntülerinin şematik şekli Şekil 7.30' da belirtildiği gibi kaynak dikişi, ITAB ve ana malzeme olarak verilmiştir. Kaynaklı

numunelerin makro resimleri Şekil 7.31’de gösterilmiştir. Kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi Cr-Ni-Mn esaslı östenitik paslanmaz ilave tel olduğu için %2 Nital çözeltisi dağlamamıştır. Kaynak bölgesinin dağlayıcısı farklı olduğundan bu bölge 48 sn sürede kral suyu ile dağlanmıştır. Ramor 500 çelik çiftleri %2 Nital çözeltisi 10 sn sürede dağlandığı zaman kaynak bölgesinin dikiş formu geometirisi tam olarak tespit edildiği için makro resimler Şekil 98’deki gibi alınmıştır.

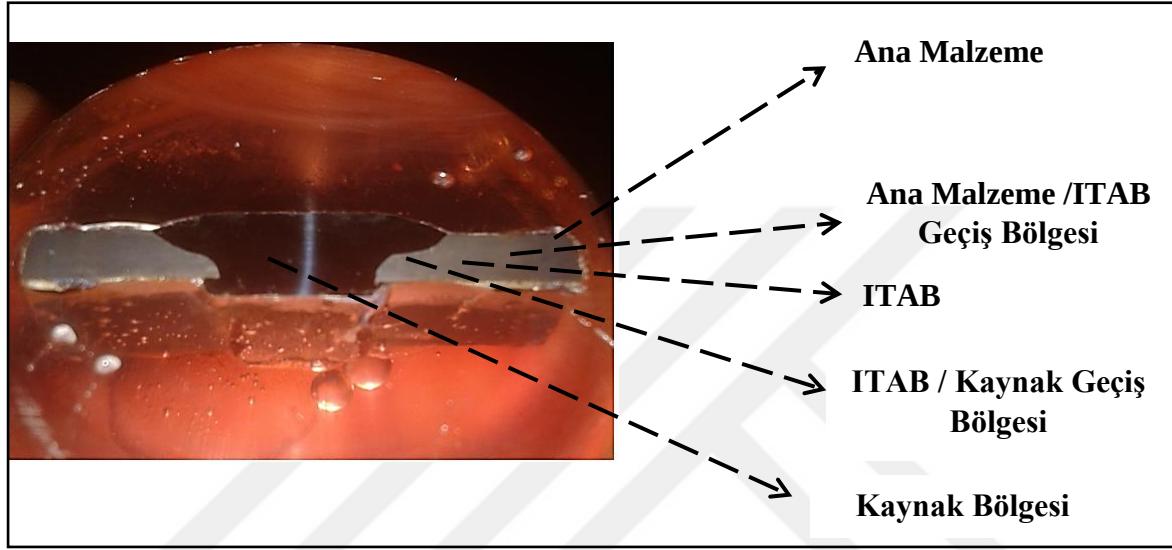


Şekil 7.30. Ramor 500 çelik çiftlerinin optik görüntü bölgelerinin şematik gösterimi



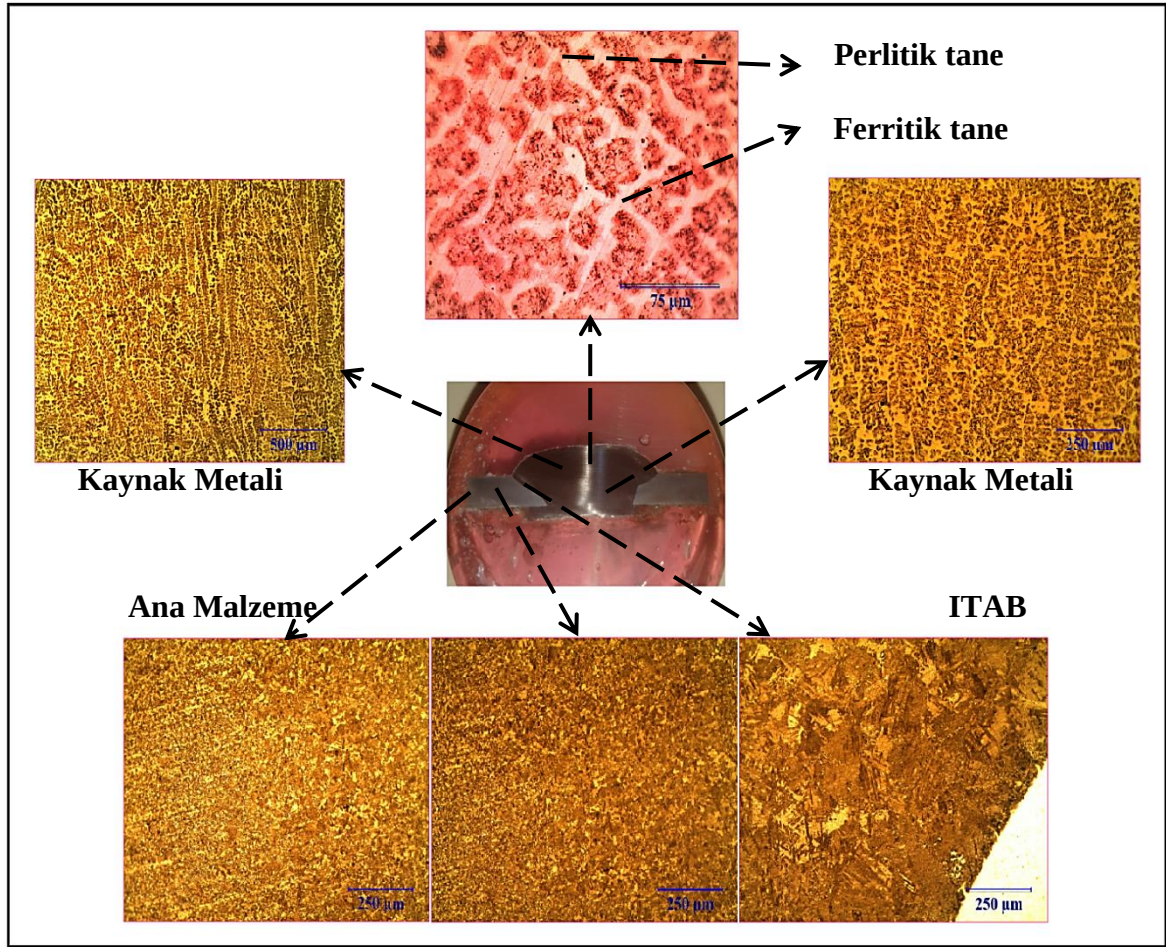
Şekil 7.31. Kaynaklı numunelerin %2 Nital çözeltisi ile dağlanmış makro görüntüleri

Şekil 7.31'deki resimler incelendiğinde kaynak dikişinin, birleştirilen Ramor 500 çelik çiftinin birleşme ara yüzeyinde olduğu görülmektedir. Sabit amper değerinde değişken parametre olarak artan volt ve kaynak ilerleme hızlarına paralel olarak kaynak dikiş genişliği, yüksekliği ve derinliği görülebilmektedir. 250 sabit amperde bütün numunelerde nüfuziyetin tam sağlandığı görülmektedir. Kaynak dikişi ve ITAB'da herhangi bir çatlakla rastlanmamıştır.



Şekil 7.32. Ramor 500 kaynaklı numunenin bölgelerinin ifade edilmesi

Şekil 7.32'de de görüldüğü gibi kaynak dikişinde nüfuziyet tam olarak sağlanmış bulunmaktadır. Resimde herhangi bir boşluk çatlak ya da gözenek olmayıp dikiş formu ideal kaynak dikişi formuna uygun yapı olarak oluşmuştur. Numunelerimizin kalınlığının fazla olmamasından dolayı I formu kaynak ağzı açılmadan yapılan bu birleştirmeler sonucu elde edilen Şekil 7.32 'deki yapı bu haliyle değerlendirilirse başarılı bir dikişten bahsedilebilir.

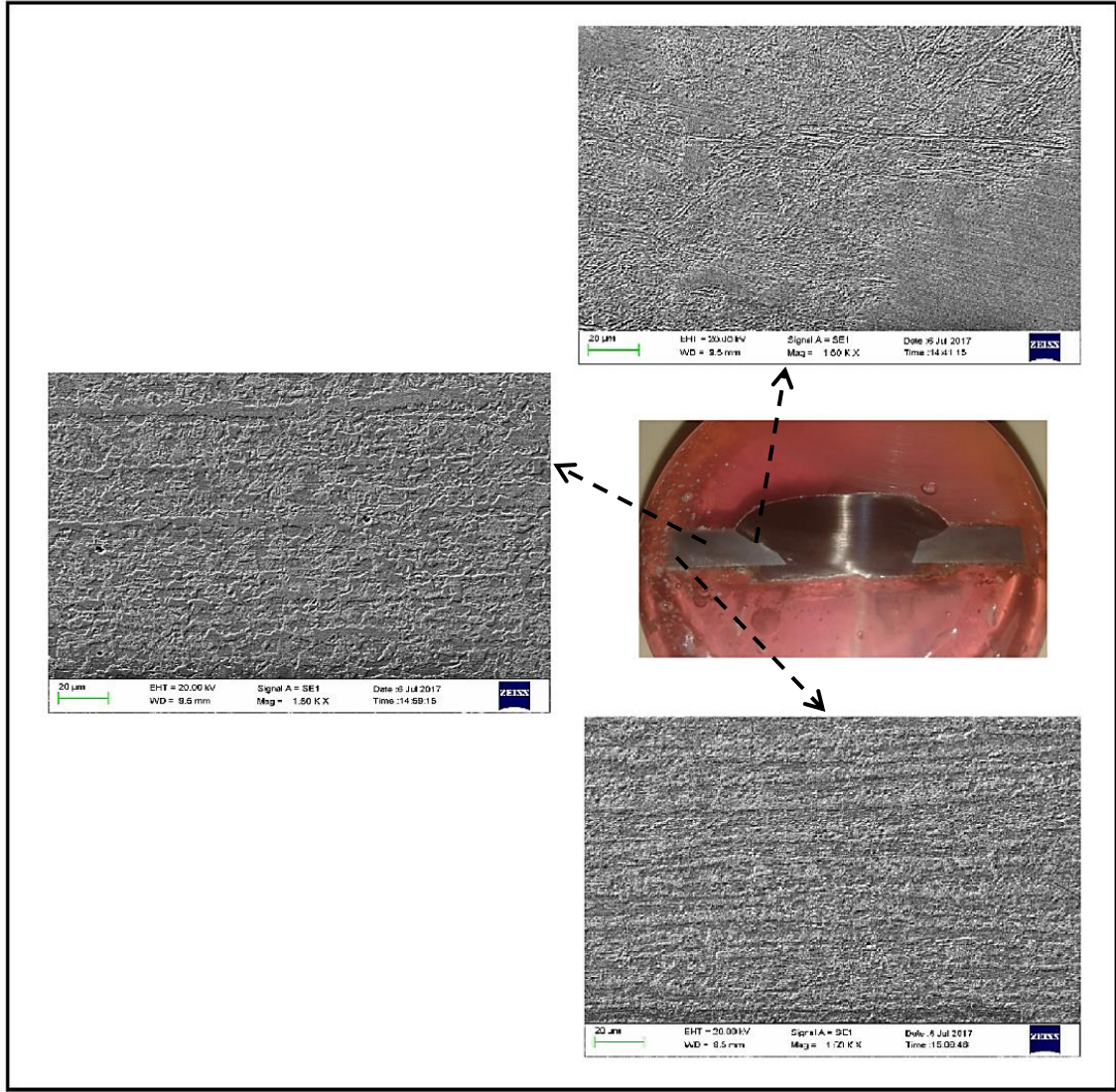


Şekil 7.33. Ramor 500 çelik çifti N1 nolu kaynaklı numuneye ait optik resimler

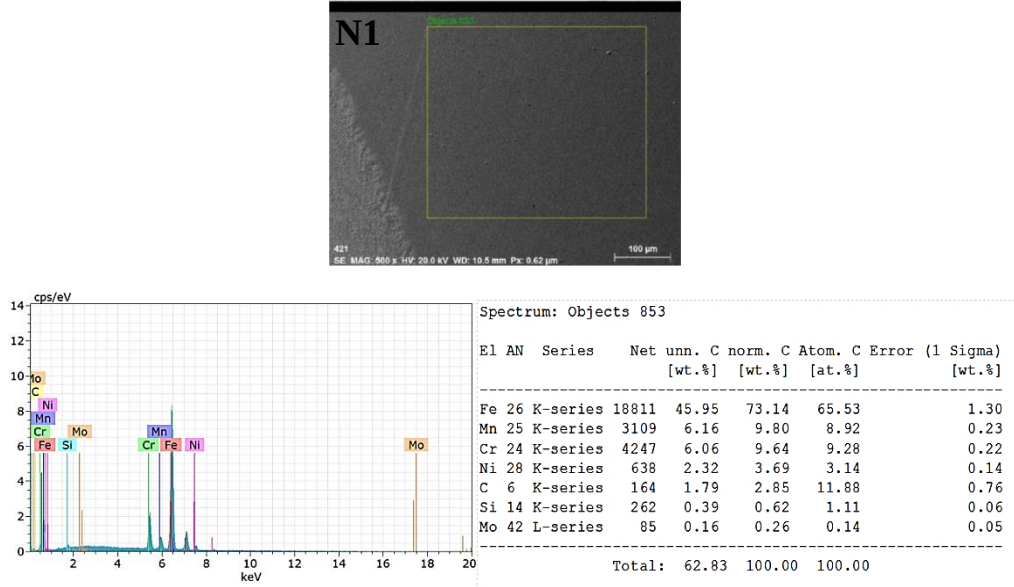
Tozaltı kaynağı yapılan Ramor 500 çelik çiftine farklı kaynak gücünde yapılan birleştirmelere metalografik açıdan bakıldığında kaynak dikişinin homojen bir görünüme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.33'deki optik resimler incelendiğinde kaynak dikişinden ana malzemeye doğru iri taneli yapıdan daha küçük taneli yapıya doğru değişen bir tane yapısı görülmektedir. Kaynak esnasında meydana gelen ısı dağılımının parça üzerinde kaynak dikişinden başlayarak ana malzemeye doğru farklılık göstermesi elbette ki o bölgelerdeki mikroyapı özelliklerini değiştirecektir. Daha çok ısı girdisi olan ve tavlama etkisi altında kalan noktalarda taneler daha iri olmuştur.

Kaynak işlemleri sonrasında oluşan birbirinden farklı mikroyapı özelliklerine sahip kaynak dikişi, ana metal özellikleri ile karşılaştırıldığında değişik mekanik özellikler gösterirler. Dolayısıyla kaynak yapılmış bir numuneden en iyi bir kaynak birleştirmesi isteniyorsa kaynak dikişi özelliklerinin ana metal özelliklerine benzer ya da yakın olması gerekir. Ancak ilave metal ya da elektrod kullanılarak yapılan birleştirme işlemlerinden sonra bunu arzulamak ve elde etmek oldukça güçtür. Bunun yanı sıra kaynak işlemindeki ısı girdisinin düşük tutulmasıyla ısı dağılımının kontrol edilmesi ve ITAB genişliğinde bu paralel de mümkün olduğunca dar olması sağlanabilir. Ancak bizim kullandığımız Ramor 500 çelik çiftleri ve kullandığımız kaynak makinesinin en düşük amper ayarının 250 A olmasından dolayı bu durum gözardı edilmiştir. Ancak değişken gerilim değerleri ve ilerleme hızları vasıtasıyla bu durum incelenmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu durum Ansys programı yardımıyla farklı süre ve ısı girdilerindeki değişimi de incelenmiştir.

Kaynak dikişi ve ITAB’da herhangi makro ya da mikro çatlğa rastlanmamıştır. Numunelerin kaynak dikişi ve ITAB’ından alınan yapılar incelendiğinde Ramor 500 malzemesinin sahip olduğu C oranından dolayı ve tozaltı kaynağının ulaştığı ani yüksek sıcaklık, hızlı soğuma ve katılaşması bu bölgelerde martenzitik yapıların mevcudiyetinin korunmasında esas teşkil etmiştir. Ancak Ramor 500’ün kendi öz mikroyapısı olan martenzitik yapı kısmende olsa kaynak dikişi ve ITAB alanında değişmektedir. Bu durum mikrosertlik değerinde düşük çıkmasına sebep olmuştur. Yüksek ısı girdisi sonucu oluşan C difüzyon hareketleri bunun en önemli etkenidir. Çünkü en yüksek ısı girdisi tozaltı ark kaynak merkezi yani kaynak dikişinin merkezinde olacağından difüzyon hareketleri bu noktalara doğru hareket eder. Diğer kaynaklı numunelerin optik resimleri de aynı grup Ramor 500 çelik çifti malzemesi olduğundan N1 nolu numune gibi aynı yapılar mevcuttur, dolayısıyla tez sayfa kirliliği oluşmasını engellemek için yer verilmesine ihtiyaç duyulmamıştır.

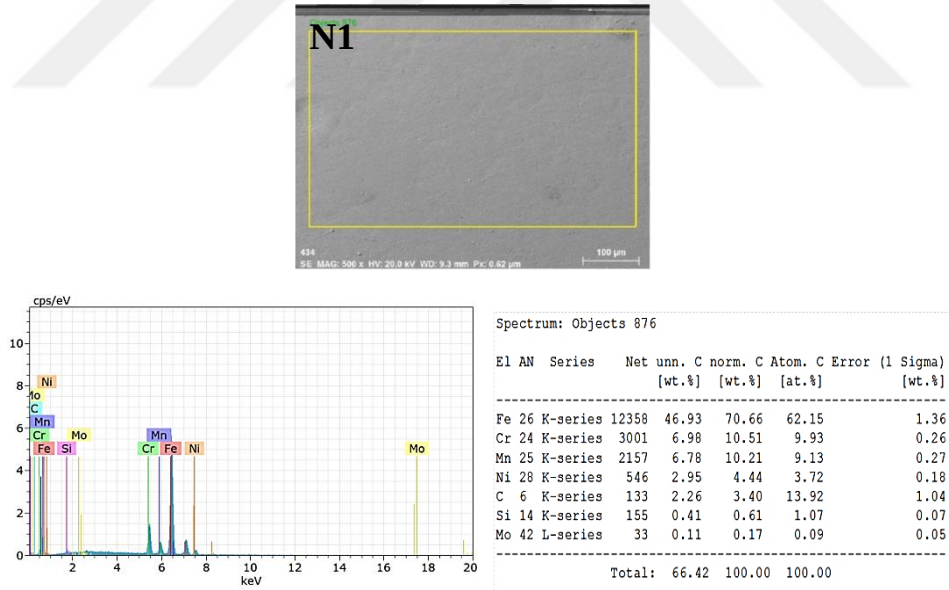


Şekil 7.34. Ramor 500 çelik çifti N1 nolu kaynaklı numuneye ait SEM görüntüleri



Şekil 7.35. N1 nolu numunenin kaynak bölgesinin EDS bölgesel analizi-1

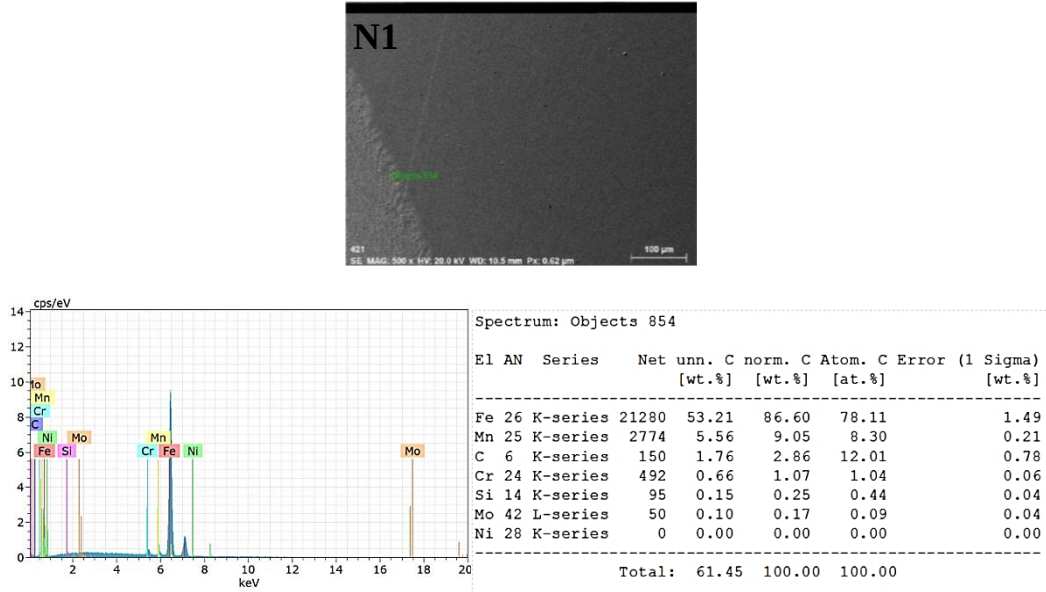
Şekil 7.35’de N1 numunesinin kaynak bölgesinden alınan EDS bölgesel analizi ve sonuçları verilmiştir. Kaynak bölgesinden alınan EDS analizinde % 2.85 C, % 0.62 Si, % 9.64 Cr, % 9.80 Mn, % 73.14 Fe, % 3.69 Ni, % 0.26 Mo oranları tespit edilmiştir.



Şekil 7.36. N1 nolu numunenin kaynak bölgesinin EDS bölgesel analizi-2

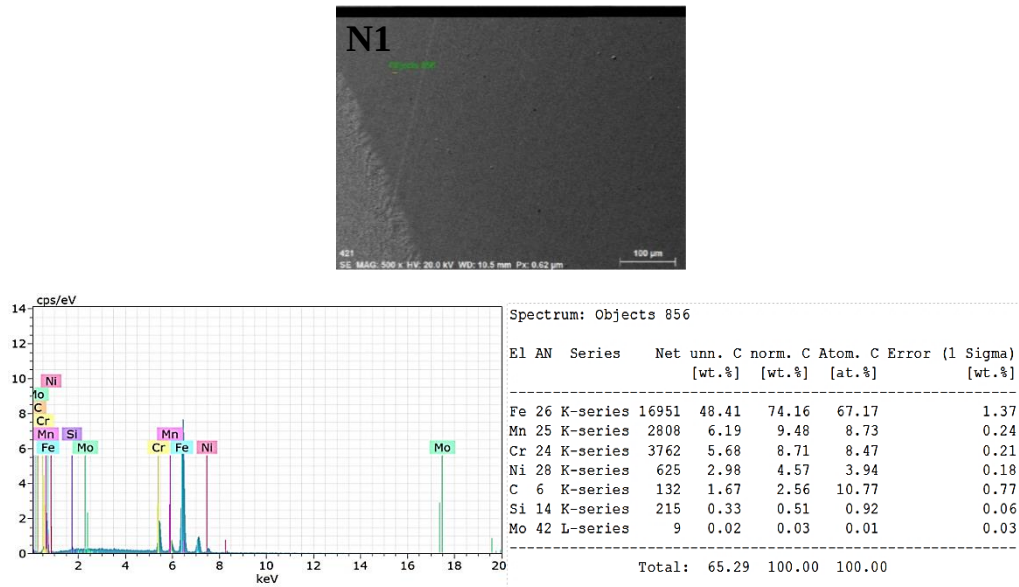
Şekil 7.36’da N2 numunesinin kaynak bölgesinden alınan EDS bölgesel analizi ve sonuçları verilmiştir. Kaynak bölgesinden alınan EDS bölgesel analizinde % 3.40 C, %

0.61 Si, % 10.51 Cr, % 4.44 Ni, % 10.21 Mn, % 70.66 Fe, % 0.17 Mo oranları tespit edilmiştir.



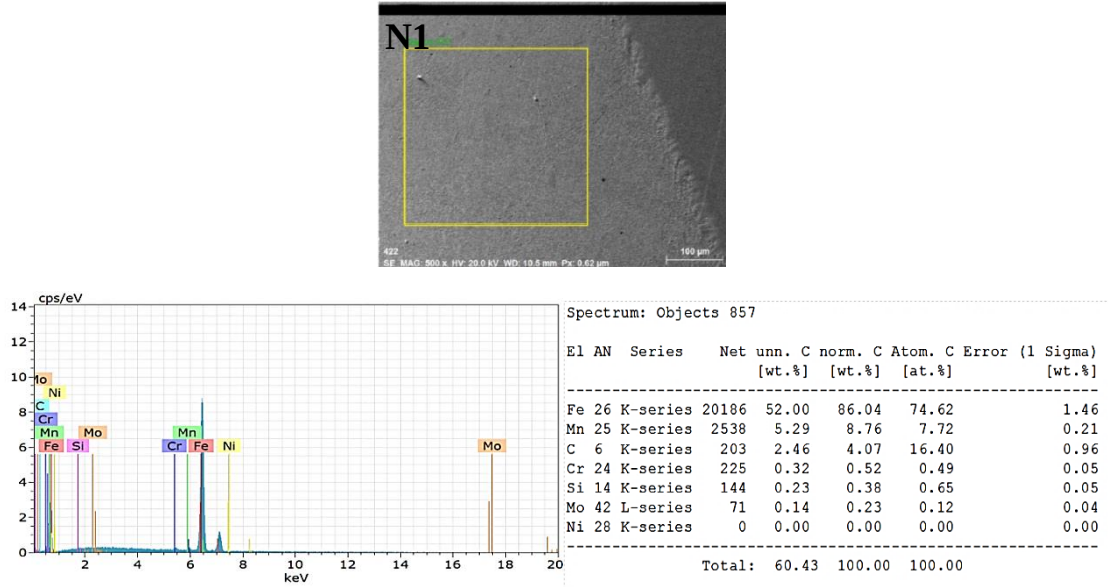
Şekil 7.37. N1 nolu numunenin kaynak geçiş bölgesinin EDS noktasal analizi

Şekil 7.37’de N1 numunesinin kaynak geçiş bölgesinden alınan EDS noktasal analizi ve sonuçları verilmiştir. Kaynak geçiş bölgesinden alınan EDS noktasal analizinde % 2.86 C, % 0.25 Si, % 1.07 Cr, % 9.05 Mn, % 86.60 Fe, % 0.17 Mo oranları tespit edilmiştir.



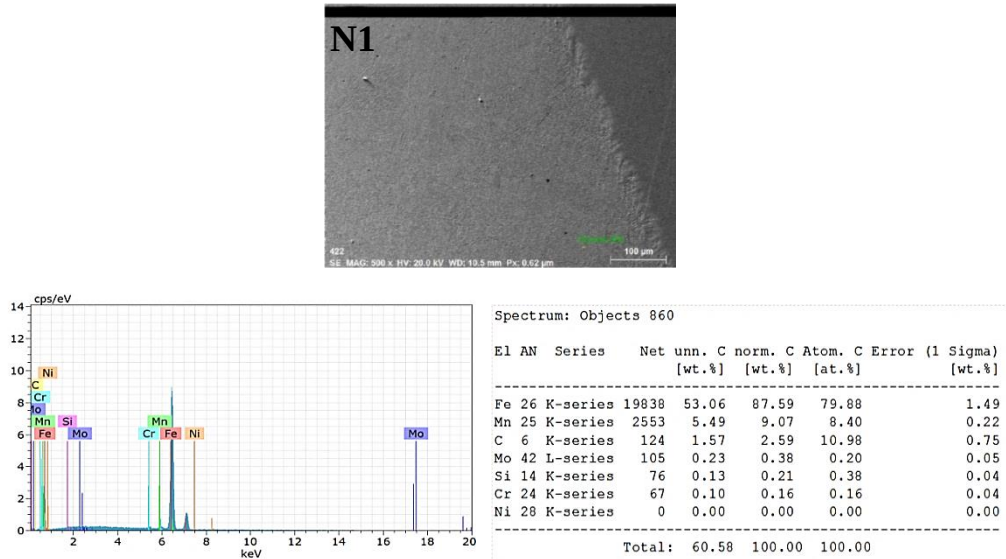
Şekil 7.38. N1 nolu numunenin kaynak bölgesinin EDS noktasal analizi

Şekil 7.38’de N1 numunesinin kaynak bölgesinden alınan EDS noktasal analizi ve sonuçları verilmiştir. Kaynak bölgesinden alınan EDS noktasal analizinde % 2.56 C, % 0.51 Si, % 8.71 Cr, % 4.57 Ni, % 9.48 Mn, % 74.16 Fe, % 0.03 Mo oranları tespit edilmiştir.



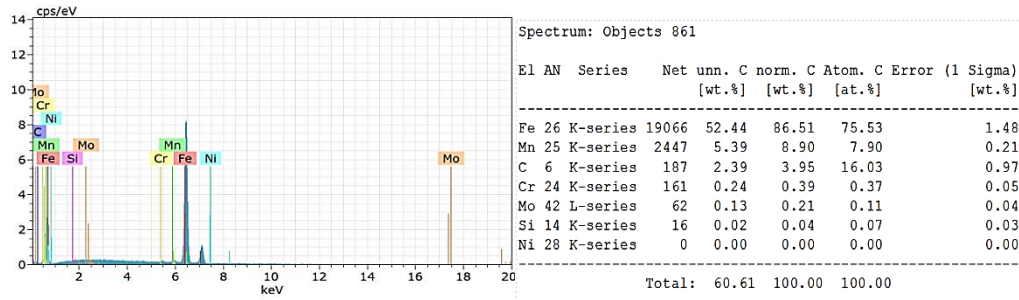
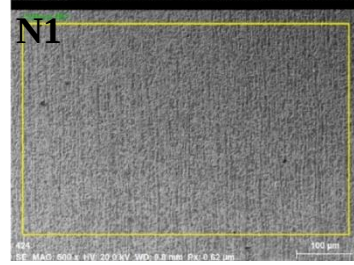
Şekil 7.39. N1 nolu numunenin ITAB bölgesinin EDS bölgesel analizi

Şekil 7.39’da N1 numunesinin ITAB bölgesinden alınan EDS bölgesel analizi ve sonuçları verilmiştir. ITAB bölgesinden alınan EDS bölgesel analizinde % 4.07 C, % 0.38 Si, % 0.52 Cr, % 8.76 Mn, % 86.04 Fe, % 0.23 Mo oranları tespit edilmiştir.



Şekil 7.40. N1 nolu numunenin ITAB bölgesinin EDS noktasal analizi

Şekil 7.40'da N1 numunesinin ITAB bölgesinden alınan EDS noktasal analizi ve sonuçları verilmiştir. ITAB bölgesinden alınan EDS noktasal analizinde % 2.59 C, % 0.21 Si, % 0.16 Cr, % 9.07 Mn, % 87.59 Fe, % 0.38 Mo oranları tespit edilmiştir.



Şekil 7.41. N1 nolu numunenin Ramor 500 bölgesinin EDS bölgesel analizi

Şekil 7.41'de N1 numunesinin Ramor 500 bölgesinden alınan EDS bölgesel analizi ve sonuçları verilmiştir. Ramor 500 bölgesinden alınan EDS bölgesel analizinde % 3.95 C, % 0.04 Si, % 0.39 Cr, % 8.90 Mn, % 86.51 Fe, % 0.21 Mo oranları tespit edilmiştir.

8. ANSYS PAKET PROGRAMINDA KAYNAKLI NUMUNELERİN MODELLENMESİ, TERMAL VE MEKANİK ANALİZLERİN İNCELENMESİ

Kaynaklı numunelerin modellenmesinde çözüm yöntemi olarak Sonlu Elemanlar yöntemiyle ANSYS 12.0 paket programı kullanılmıştır. Ansys 12.0 paket programında, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerle aynı ölçülerde katı model oluşturulmuş ve malzemenin sıcaklığa bağlı özgül ısı, termal genleşme katsayısı, yoğunluğu ve numunelerde mekanik yapısal şekil değişimleri yani distorsyonları incelemek için lineer izotropik malzeme özellikleri (Elastisite modülü ve poisson oranı) program sistemine girilmiştir. Modellerde, Ansys paket programında element tipi olarak “SOLID87” çözüm tipi kullanılmıştır. Bu element tipinin kullanılma sebebi, özellikle termal ısı transferi ve yapısal analizlerde malzeme özelliklerinin modelin ağ yapısıyla ısı alışverişinin çok iyi sağlanması ve doğru sonuçlar vermesidir. Çözüm yapılan bilgisayarın özellikleri ise; Intel Pentium(R) Dual-Core CPU, 2.00 GHz, 4.00 GB RAM dir.

Tozaltı kaynak yöntemi ile yapılan kaynak işlemi sürekli bir akışkanın kaynaklanacak yüzey üzerine hızlı bir şekilde adeta dökülmesi ve hızlı bir biçimde katılaşmasından oluşmaktadır. Süreklilik arz eden bu işlemde yüksek sıcaklıktaki ergime (yaklaşık 1650-1750 °C) ve katılaşma zamanı en önemli parametredir. Gerçek kaynak işlemlerinde ve 3 boyutlu modellemelerde kaynak merkezi en yüksek sıcaklığa sahip iken ısı kaynağının geçtiği bölgeler soğuma ve kaynağın henüz daha ulaşmadığı bölgeler ise ısınma evresindedir. Bu durum kaynatılacak malzemenin boyutu arttığında daha da önem arz etmekte, kaynak işlemi sona geldiğinde başlangıç noktası soğumuş olmaktadır.

Isı kaynağı bir taraftan ilerleyerek yeni eriyik alanları oluştururken arkasında bıraktığı kısım hızlı bir katılaşma ve soğuma eğilimindedir ve bu işlem çok kısa bir zaman diliminde gerçekleşmektedir. Dolayısı ile kaynak metalinin bir bütün olarak aynı anda ısındığını varsaymak modellemede bir hata oluşturacaktır. Bu nedenle bu çalışmada kaynak metali yaklaşık ergiyik hacmi kadar olduğu varsayılarak 65 mm’lik kaynak metali mesafesi 6.5 mm’şer uzunluğundaki 10 eşit alana bölünerek adım adım modellenmiştir.

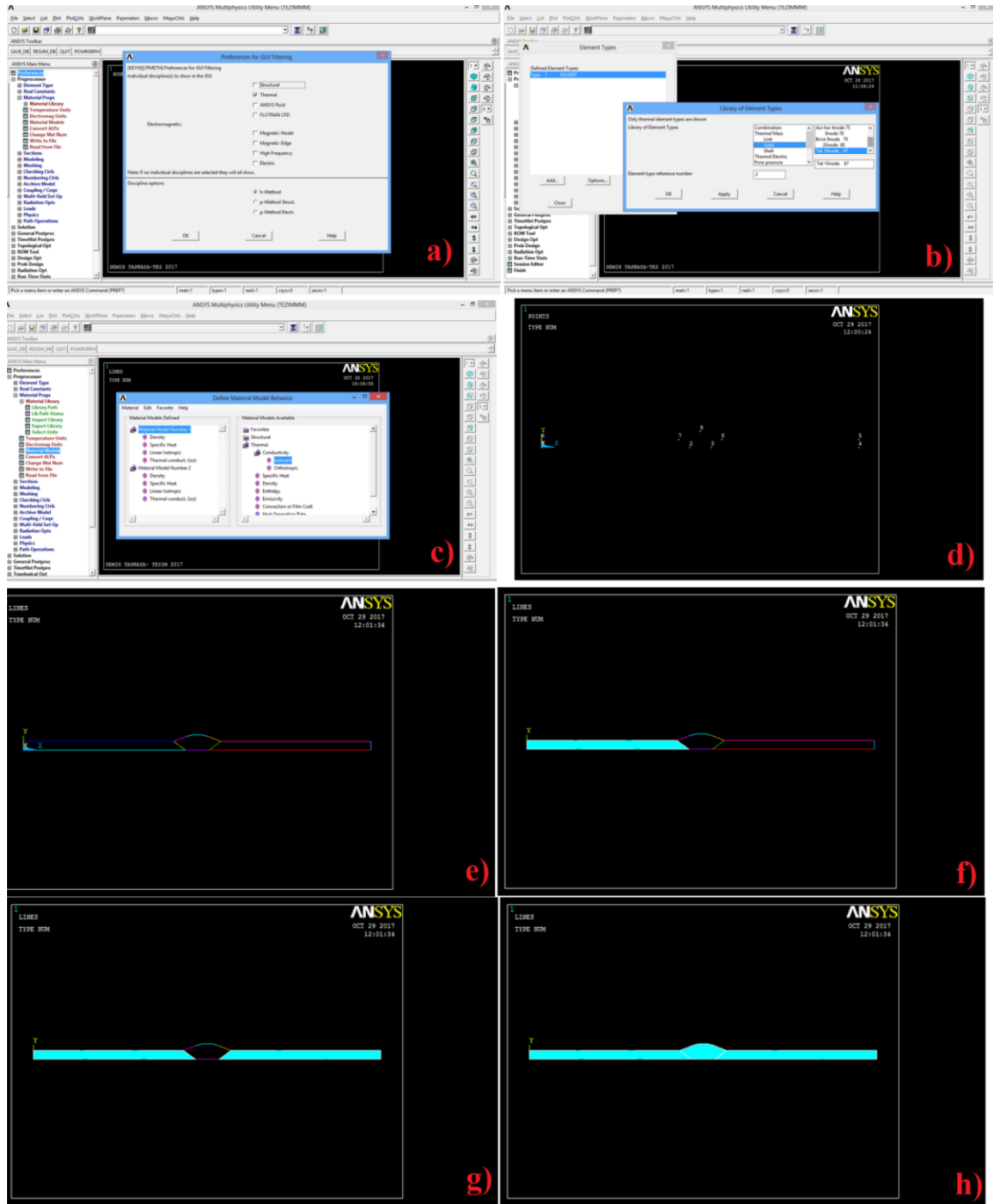
Kaynaklı numunelerde kullandığımız parametrelere bağlı olarak birleştirmeler, 250 sabit amperde; 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinde; 20, 25 ve 30 cm/dk tel ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Denklem 8.1'e göre, tozaltı kaynağında kullandığımız bu parametrelerin amper ve volt gerilimlerinden güç (Watt) değeri hesaplanır. Ansys paket programına termal analiz için ısı akısı (Q) değerinin girilmesi gereklidir, çünkü Ansys yazılımı bunu sıcaklığa dönüştürme işlemi yapar. Isı akısı amper ile volt çarpımının, kaynak alanına bölünmesiyle elde edilir.

$$Amper \bullet Volt = Güç(Watt) / KaynakAlanı(a \bullet b) = IsıAkısı(Watt / m^2) \quad (8.1)$$

Ansys paket programına tel ilerleme hızı tanımlanması yapılamadığından sadece 250 amper ve değişken parametre olarak 20, 25 ve 30 volt gerilim değerlerinden elde edilen 3 model ile soğuma hızlarına göre termal ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme yüzeyinde oluşan şekil değişimleri için mekanik yapı analizi değerlendirilmesi yapılmıştır.

Ansys 12.0 paket programı çalıştırıldıktan sonra Şekil 8.1'de görüldüğü gibi ilk adım olarak hangi tür analiz yapılacağı seçilir. Termal analiz yapılacağı için "Thermal" seçeneği seçilir. Sonra katı kaynak modelinin element tipi belirlenir (SOLID87). Diğer adım olarak model çizilmeye başlamadan önce sisteme data verilerinin yani malzeme özelliklerinin sisteme tanıtılması gerekir. Malzeme özellikleri Şekil 8.1 c'de görülen termal genleşme katsayısı, termal iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve mekanik yapı analizi için lineer izotropik (elastisite modülü ve poisson oranı) Ansys paket programının sistem kütüphanesine tanımlanır. Burada malzeme 1 ve malzeme 2 şeklinde tanımlama yapılır. Çünkü Ramor 500 malzemesi ve kaynak bölgesi ilave tel malzemesinin termal ve mekanik özellikleri farklı olduğundan ayrı sistem atamaları yapılır. Bu malzeme özelliklerine ait veriler Tablo 6.1, 6.2 ve 6.3'den alınmıştır.

8.1. Kaynaklı Modelin Analiz Türünün, Element Tipinin, Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Modelin 2 Boyutlu Olarak Oluşturulması



Şekil 8.1. Ansys 12.0 paket programında kaynaklı modelin 2 boyutlu çizimi a) Modelin analiz türü b) Modelin element tipi c) Modele malzeme özelliklerinin veri girişleri d) Modelin keypoint (noktasal) olarak oluşturulması e) Modelin keypointlerinin line (çizgilerle) birleştirilmesi f) Modelde Ramor 500 ana malzemeye alan oluşturma g) Modelde diğer Ramor 500 ana malzemeye alan oluşturma h) Modelde ilave kaynak teline alan oluşturma

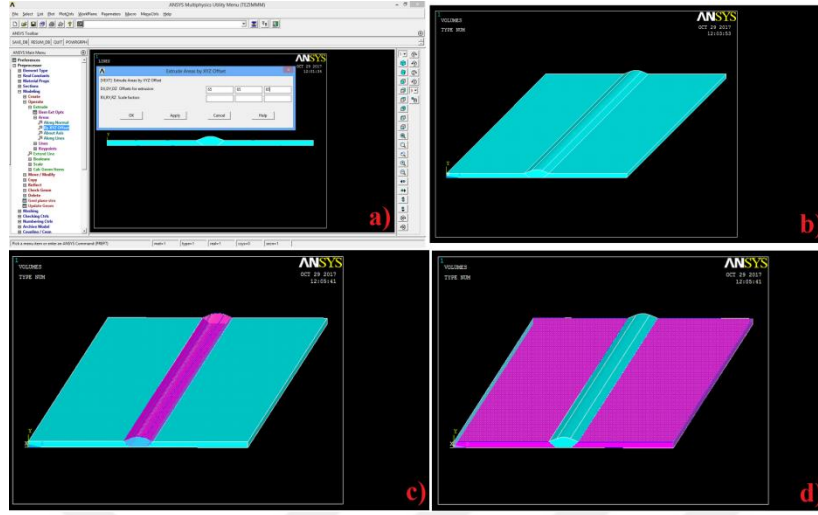
Malzeme özellikleri sisteme tanıtıldıktan sonra modelimiz Şekil 8.1 d’de görüldüğü gibi N2 numunesinin 250 sabit amper, 20 volt ve 25 cm/dk ilerleme hızında gerçekleşen Tablo 8.1’deki kaynak ölçüleri Ansys programına keypoint (noktasal) koordinat şeklinde girilerek model birleşme düğümleri 2 boyut olarak çizilir. Burada N1 numunesinin kaynak ölçüleri referans alınmıştır. Ansys simülasyon programında 20, 25 ve 30 volt gerilimlerinde 3 model üzerinden analiz yapılmıştır. Tel ilerleme hızları Ansys programına tanımlanamadığı için sadece kaynak alanı hesabı ve model çizim ölçülerinde kullanılmıştır ve hesap işlemlerinde 20, 25, 30 tel ilerleme hızlarından ortak olarak 25 cm/dk seçilmiştir. Burada amaç analiz sayısını azaltmak ve termal analizde kaynağın mesafeye bağlı olarak soğumasını simülasyon etmektir. Model önce 2 boyut olarak oluşturulduktan sonra 3 boyuta dönüşümü gerçekleştirilmiştir.

Tablo 8.1. N2 numunesinin malzeme model keypoint (koordinat) ölçüleri

Koordinatlar			
Düğüm (Node) Sayısı	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0	0	0
2	0	0	55
3	0	0	63
4	0	0	118
5	0	3	0
6	0	3	51
7	0	3	67
8	0	3	118
9	0	6.1	59

Keypoint değerleri Ansys programına girildikten sonra model line (çizgi) komutuyla birleştirilir. Birleştirilen malzeme bölgelerine Şekil 8.1 f, g ve h’da görüldüğü gibi Ramor 500 ana malzemeye ve kaynak bölgesine alan tanımlama işlemi yapılarak 2 boyut olarak model çizme işlemi tamamlanır. Şekil 8.2’de görüldüğü gibi modeldeki alanlar Ansys yazılımında “extrude” modülünden 65 mm malzeme ölçüsü şeklinde 3 boyuta dönüşümü sağlanır.

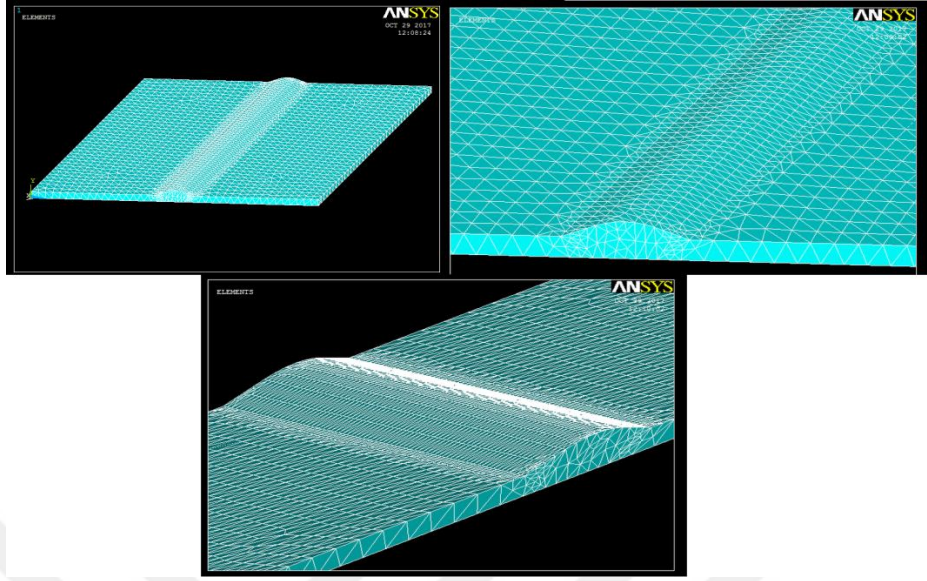
8.2. Kaynaklı Modelin 3 Boyutlu Hale Dönüştürülmesi ve Malzeme Özelliklerinin Ana Malzeme ve Kaynak Bölgesine Tanıtılması



Şekil 8.2. Ansys 12.0 paket programında kaynaklı modelin 3 boyuta dönüşümü a) Modelin 3 boyuta dönüşüm ölçüleri b) 3 boyutlu kaynak modeli c) Kaynak bölgesine malzeme özelliklerinin tanımlanması d) Ramor 500 ana malzemeye malzeme özelliklerinin tanımlanması

Malzeme özellikleri Ansys programına tanıtıldıktan sonra diğer adım kaynak modelini Şekil 8.3’deki gibi meshleme (elemanlarına bölme, ağ yapısı) işlemidir. Buradaki amaç malzeme özelliklerinin birbiri içinde sinirsel ağlar oluşturması ve model çözümü için malzeme özelliklerinin birbiri içinde ısı ve yapı alışverişi sağlamasıdır. Ana malzemenin ve kaynak bölgesinin malzeme özelliklerinin birbirleriyle nüfuziyetinin sağlanması için Ansys yazılımından “glue” modülü için malzeme özellikleri bütün modele dağıtılır.

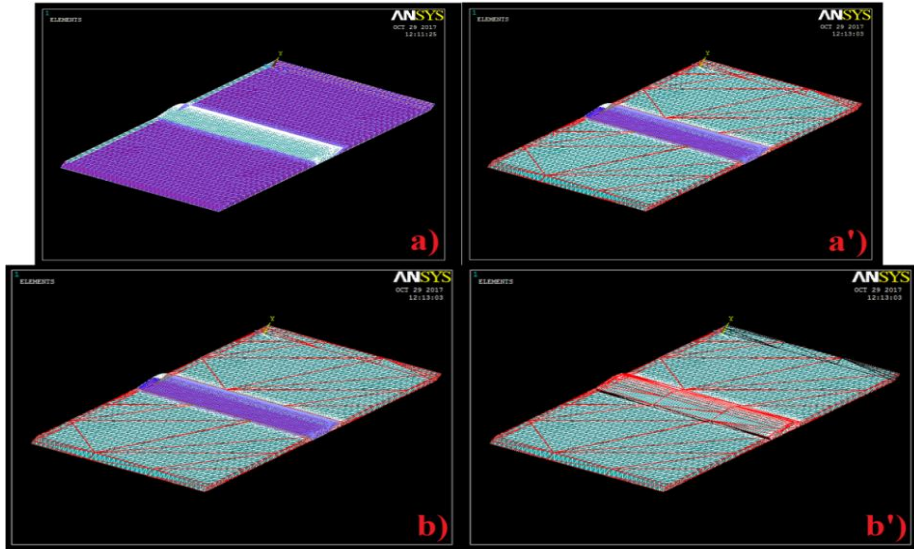
8.3. Kaynaklı Modelin Meshlenmesi (Ağ Yapısının Oluşturulması)



Şekil 8.3. Modele meshleme işlemi ile ağ yapısı oluşturma

Meshleme işleminden sonra Şekil 8.4’de görüldüğü gibi kaynaklı bölgeye ısı akısı (Q) ve ana malzemeye termal iletkenlik katsayısı ve oda sıcaklığı verileri tanımlanarak, model farklı soğuma oranlarına bağlı olarak termal analizi yapılır.

8.4. Kaynaklı Numuneye Enerji Girdilerinin Tanıtılması



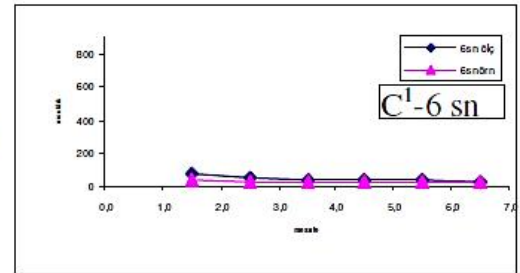
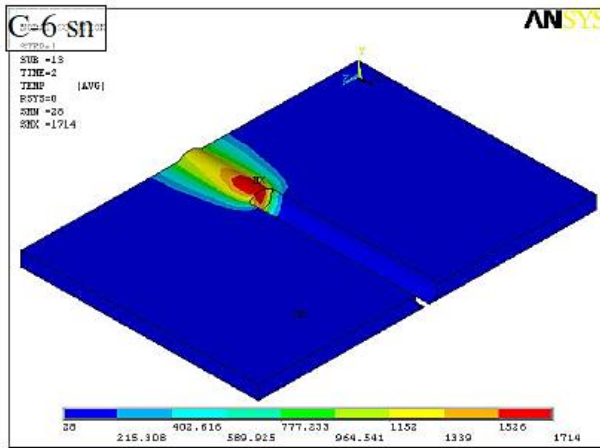
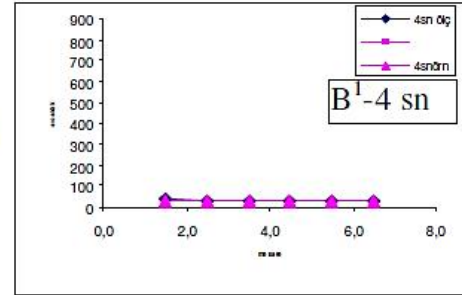
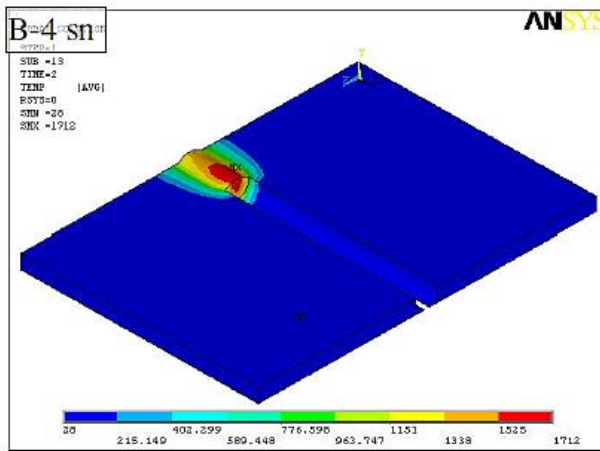
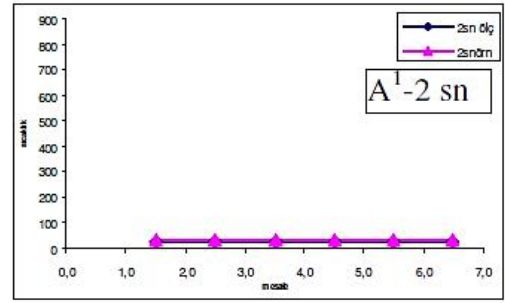
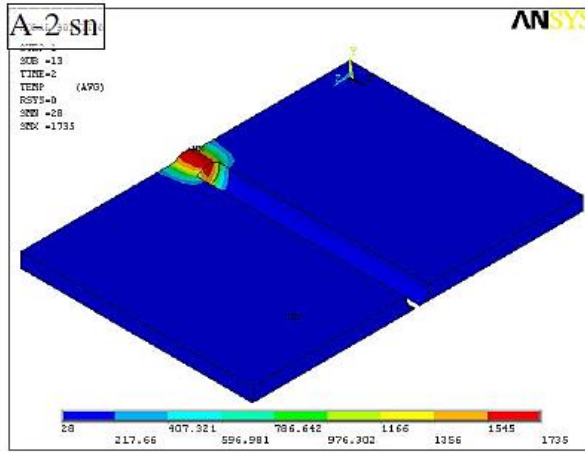
Şekil 8.4. Modele enerji verilerinin tanımlanması a)-a') Ramor 500 ana malzemeye termal iletkenlik katsayısının ve oda sıcaklığının tanımlanması b)-b') Kaynak bölgesine ısı akısının tanımlanması

8.5. Kaynaklı Modelin Ansys 12.0 Programında Çözümlemlendirilmesi (Nodal Solution)

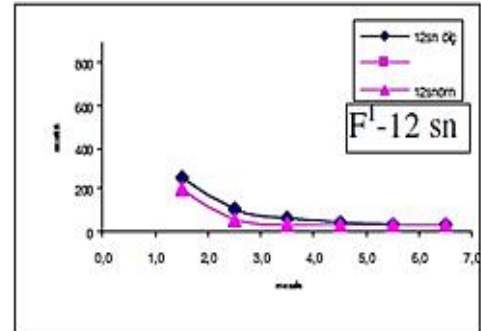
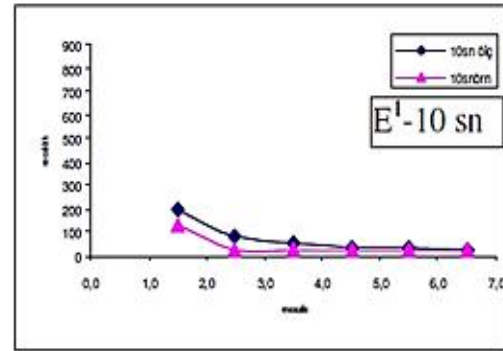
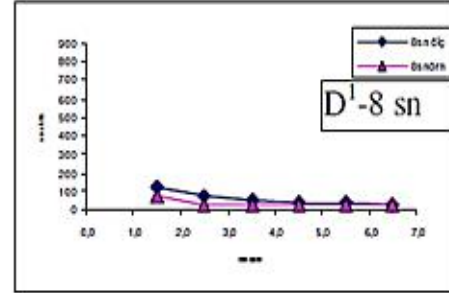
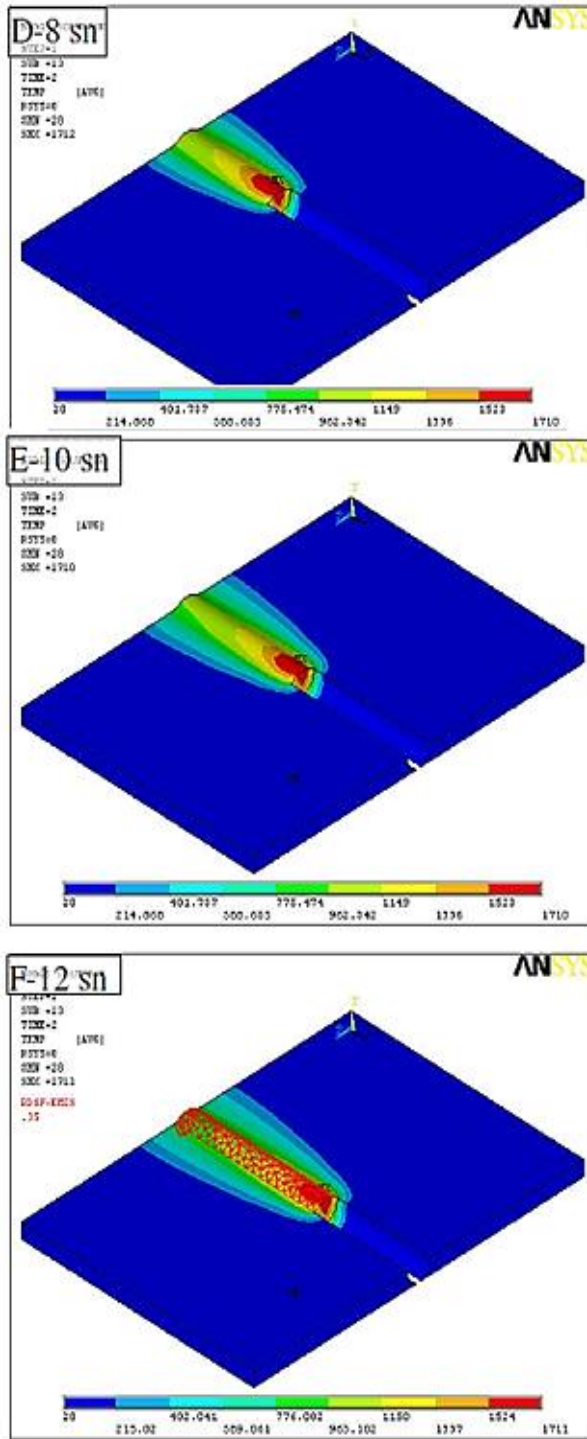
8.5.1. 250 A, 20 Volt Geriliminde Yapılan Kaynak İşlemine Ait Ansys Termal Analiz Sonuçları ve Ana Malzeme Sıcaklık Grafikleri

Model çözümlendikten sonra Şekil 8.5-8.9’da 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminde Ansys programında model simülasyon analizinde, Ramor 500 ana malzeme üzerinden ölçülen, kaynak işleminden 25 dk (1500 sn) sonraki zamana bağlı sıcaklık grafikleri adım adım incelenmiştir.

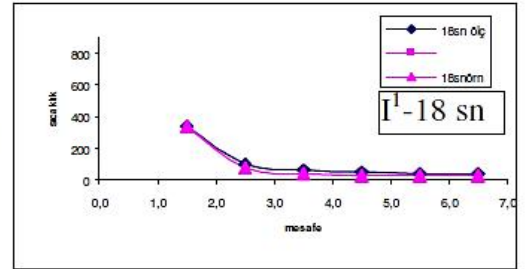
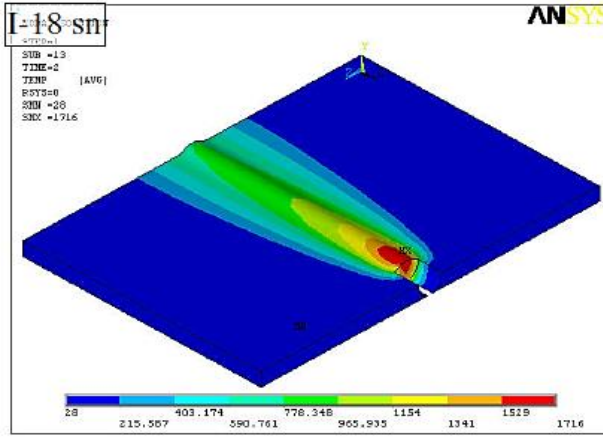
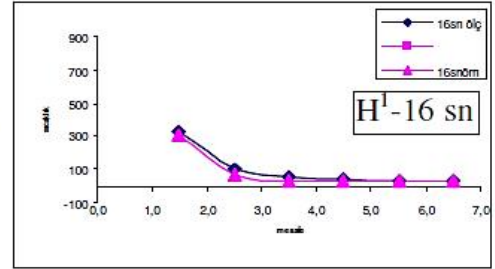
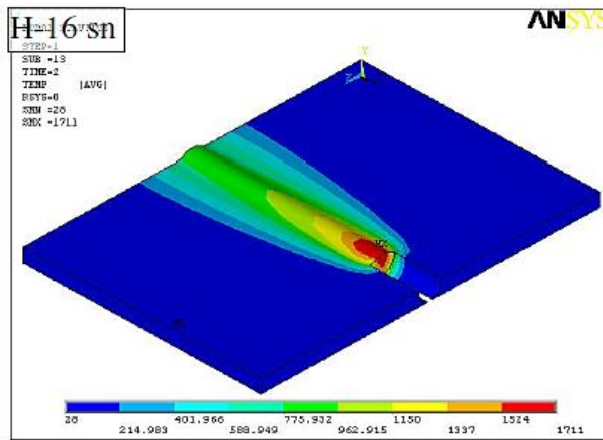
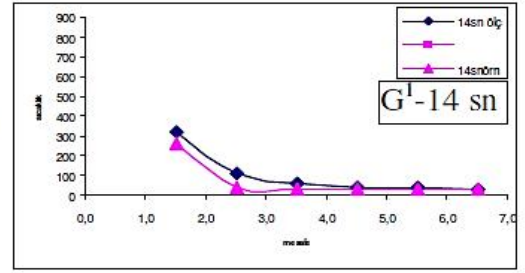
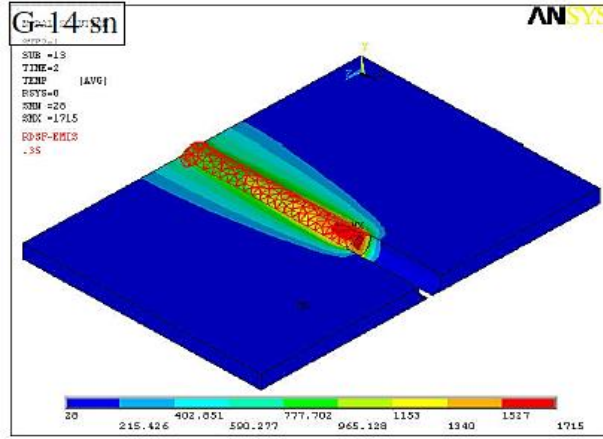




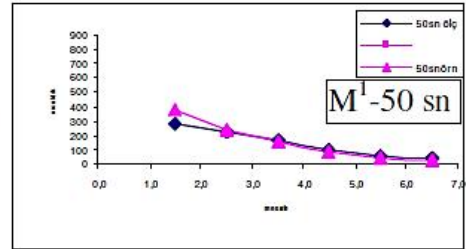
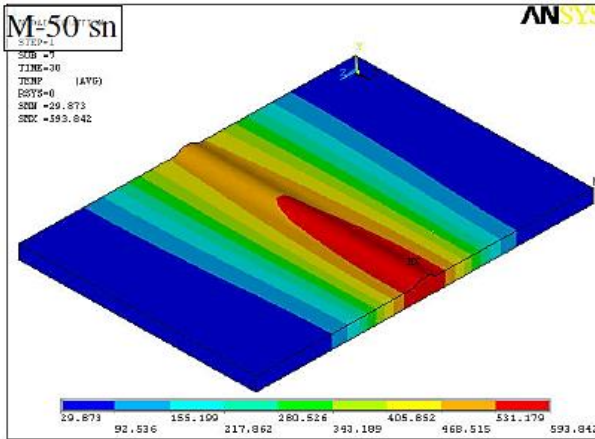
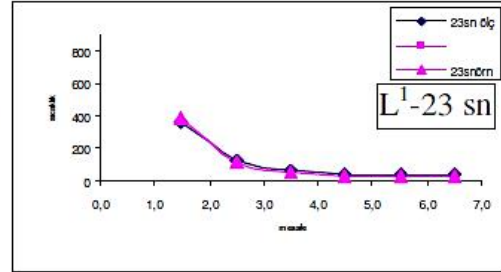
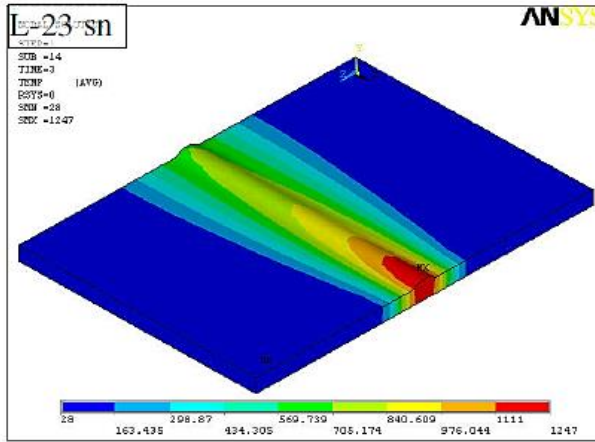
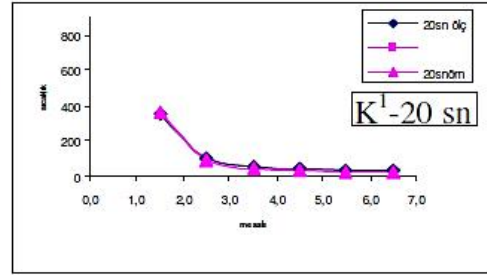
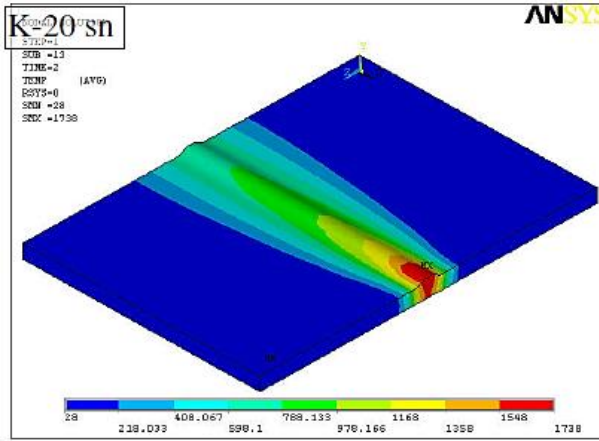
Şekil 8.5. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (2-6 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



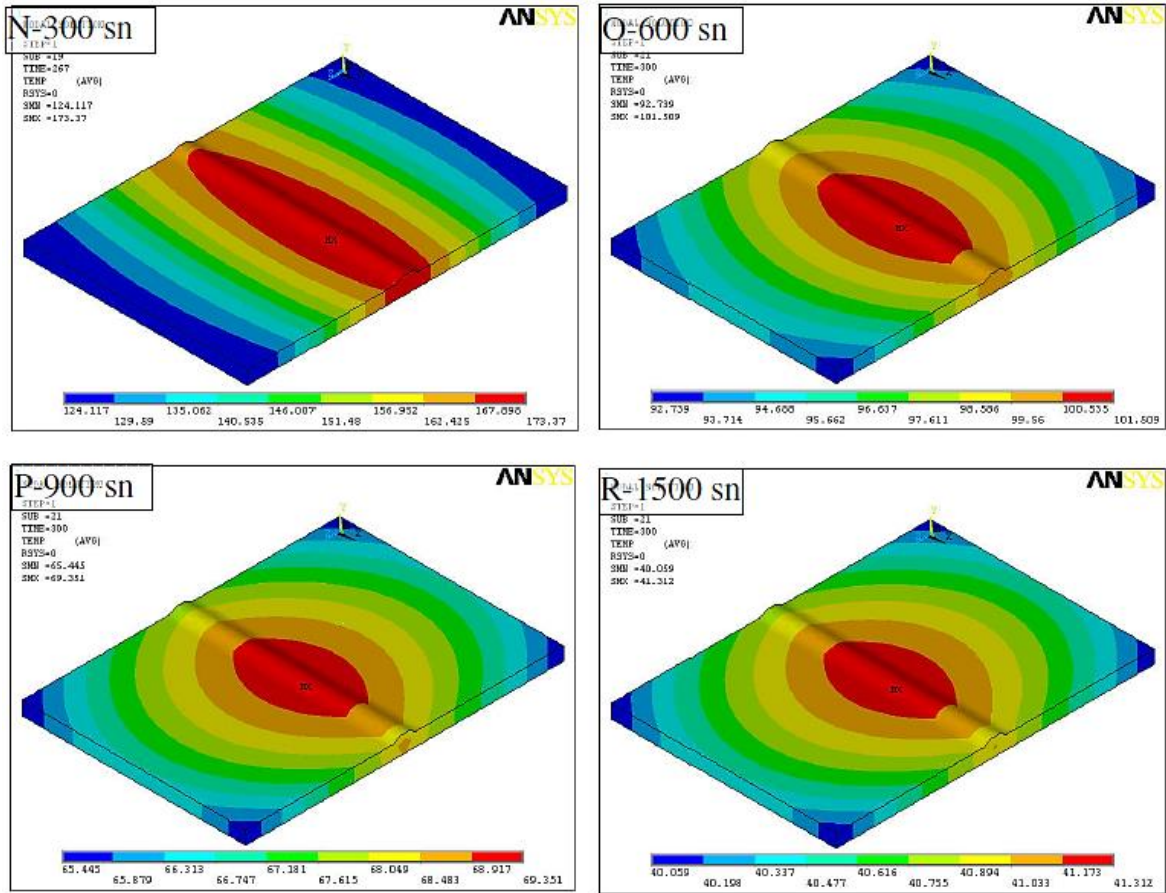
Şekil 8.6. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (8-12 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.7. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (14-18 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.8. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (20-50 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



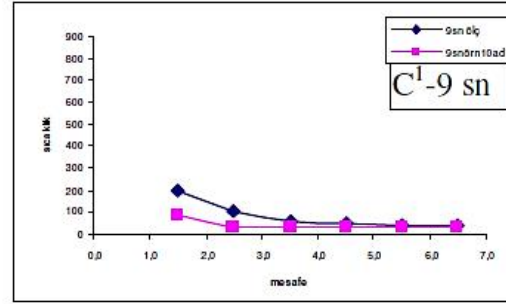
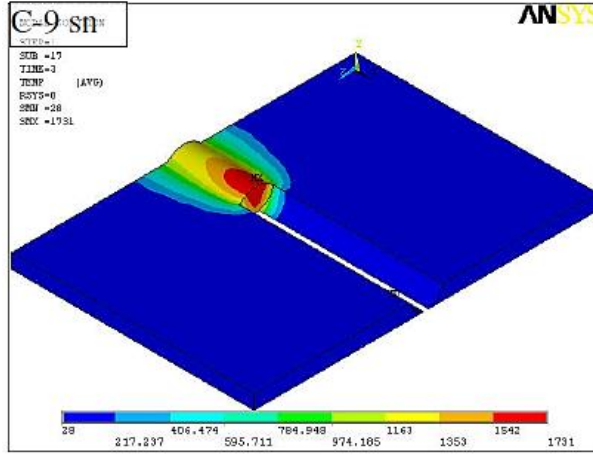
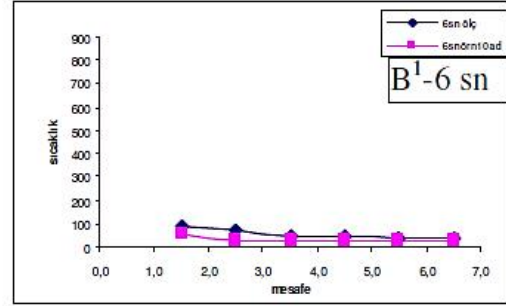
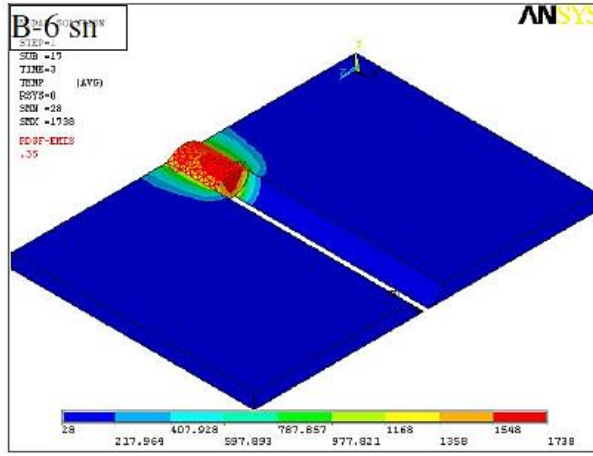
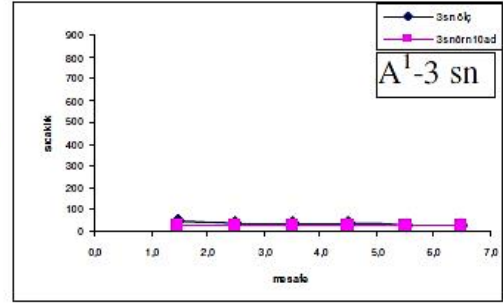
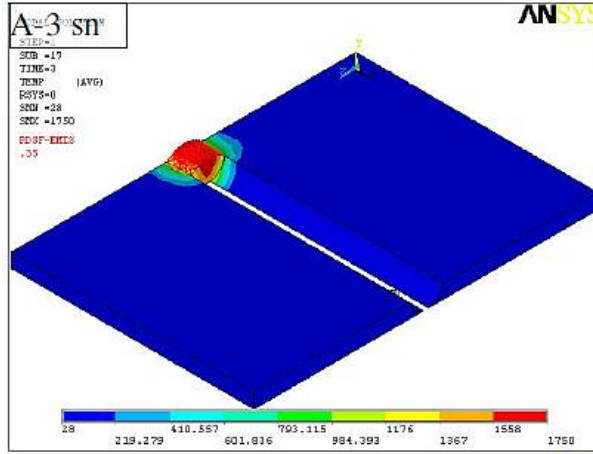
Şekil 8.9. 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (300-1500sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri

Şekil 8.5-8.9’da 250 A, 20 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin Ansys programında modellenmiş sıcaklık dağılım görüntüleri ile Ansys veri yazılımı kütüphane örnek ölçümlerden ve Ansys programından modelde elde edilen ana malzeme sıcaklık grafikleri verilmektedir. 118 mm uzunluğunda ve 65 mm genişliğindeki, iki parça seçilen parametreler dâhilinde 20 saniyelik zaman diliminde kaynaklanarak deneyler yapılmış, Ansys programında da deneysel çalışmalara eşdeğer olması için aynı ölçülerde geometrik model oluşturulmuş ve kaynak işlemi tamamlanmıştır. Kaynak metal başlangıç sıcaklığı deneysel olarak ölçülen ark sıcaklığı olan 3846 W/m^2 (1652°C) olarak tanımlanmıştır. Şekil 8.5-8.9’da kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar 2’şer saniye sürelerle örnekler alınmış (Şekil 8.5-8.9 a,b,c,d,e,f,g,h,i,k) ve kaynak zamanı tamamlandıktan sonra sıcaklık dağılımlarını görmek amacıyla belirli zaman dilimlerinde soğutulmuştur (Şekil 8.8-8.9

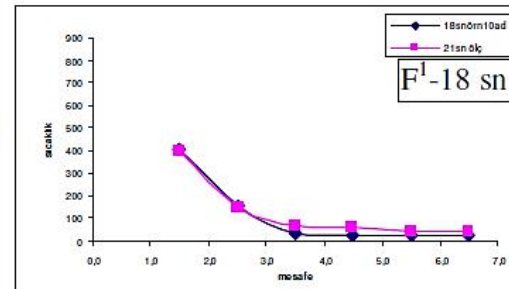
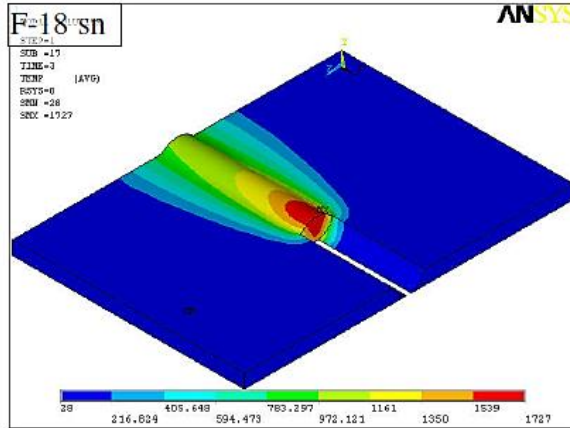
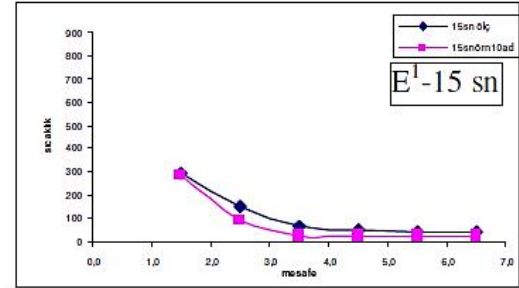
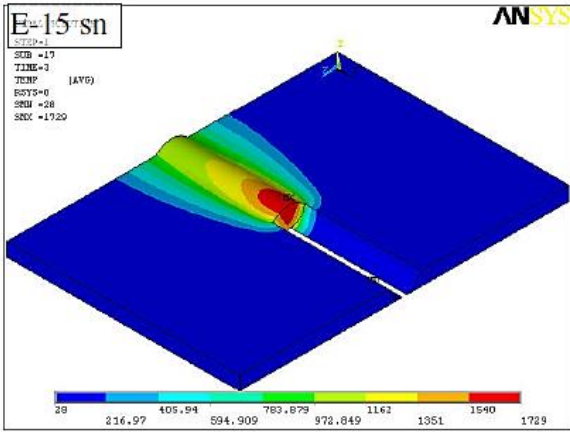
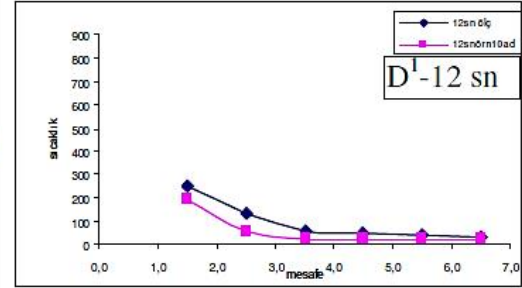
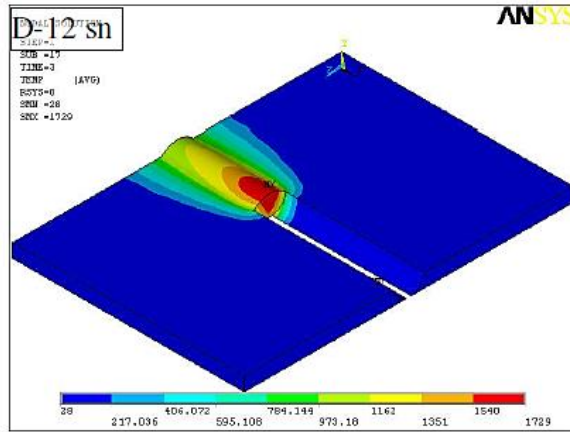
l,m,n,o,p,r). Görüntüler incelendiğinde, 1500 saniye sonunda malzemenin 40 °C'ye soğuduğu görülmüştür (Şekil 8.9 r). Kaynak başlatıldığından 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımları (Şekil 8.5 a ve a¹) ana malzemenin tamamına yakını halen daha oda sıcaklığında iken, 10 saniye sonra (Şekil 8.6 e ve e¹) kaynak metaline yakın kısımlarda sıcaklık artmakta, ısı kaynağının geçtiği kaynak metalini temsil eden bölgelerde ise sıcaklık azalmaktadır. 20 saniye sonunda kaynak işlemi tamamlandığında kaynak metalinden ana malzemeye olan ısı transferi artarak devam etmekte ve ana malzemenin sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Kaynaktan 30 saniye sonra (Şekil 8.8 m) kaynak metalini temsil eden bölgenin sıcaklığının hızla azaldığı, ana malzeme sıcaklığının ise artmaya devam ettiği görülmektedir. Kaynak tamamlandığında kaynak merkezine en uzak mesafeden ölçülen ana malzeme sıcaklığı 28-30 °C ile halen oda sıcaklığında iken, kaynaktan 300 saniye sonra aynı noktadaki sıcaklığın 124 °C'ye yükseldiği tespit edilmiştir (Şekil 8.9 n). Şekil 8.8 m¹'da verilen grafik incelendiğinde ise ana malzeme sıcaklık dağılımının önceki zamanlara göre daha doğrusal bir hal aldığı görülmektedir. Kaynak işlemi tamamlandıktan 600 saniye sonra (Şekil 8.9 o) malzemenin tamamında sıcaklığın eşit olduğu görülmüştür. Şekil 8.8-8.9'da verilen ana malzeme sıcaklık grafikleri incelendiğinde hem Ansys veri yazılım kütüphanesi ölçümlerinden alınan hem de ANSYS programından model yüzeyinden elde edilen sonuçlarda kaynak metali merkezinden 15 mm uzaklıktaki mesafenin en yüksek sıcaklığa (400 °C) ulaştığı görülmüştür. Seçilen bu parametreler dâhilinde yapılan kaynak işleminde kaynak hızının fazla olması, ısı girdisi miktarının az olmasına neden olmuştur. Ayrıca malzemenin ısı iletim katsayısının düşük olması da ısıdan etkilen bölgenin dar olmasına neden olmuştur.

8.5.2. 250 A, 25 Volt Geriliminde Yapılan Kaynak İşlemine Ait Ansys Termal Analiz Sonuçları ve Ana Malzeme Sıcaklık Grafikleri

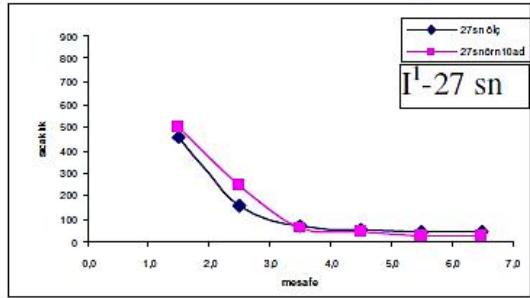
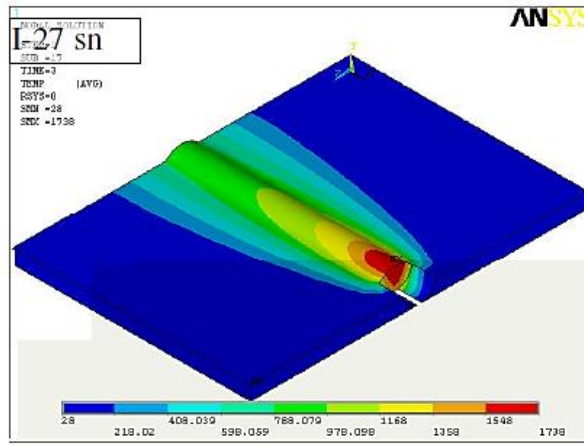
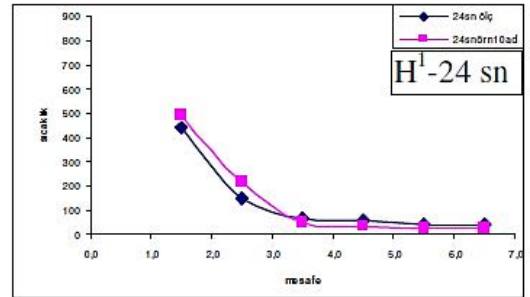
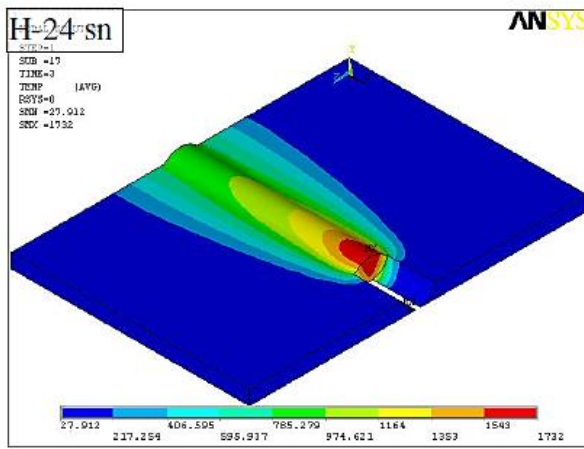
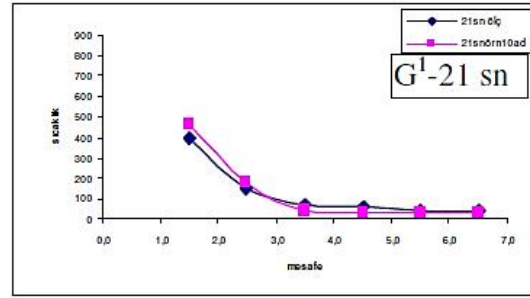
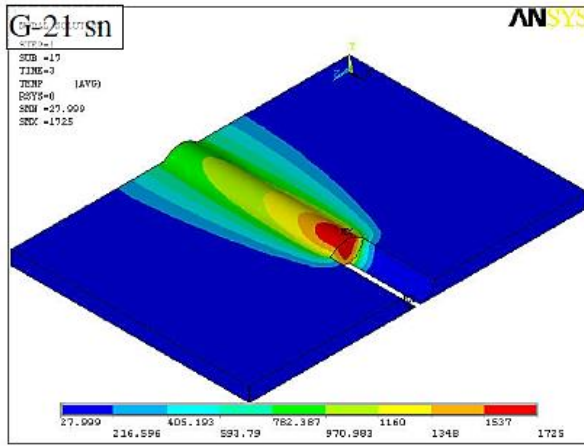
Şekil 8.10-8.14'de 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminde, Ansys programında model simülasyon analizinde, Ramor 500 ana malzeme üzerinden ölçülen, kaynak işleminden 25 dk (1500 sn) sonraki zamana bağlı sıcaklık grafikleri adım adım incelenmiştir.



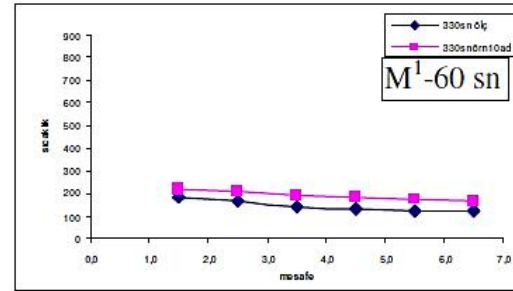
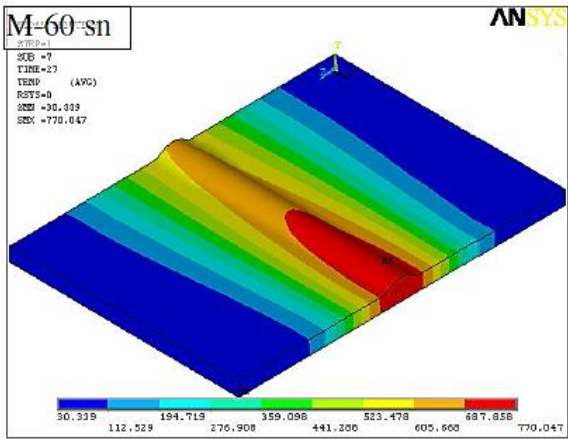
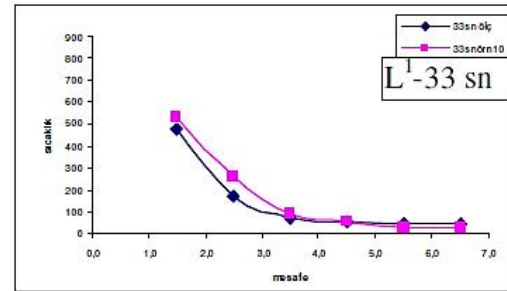
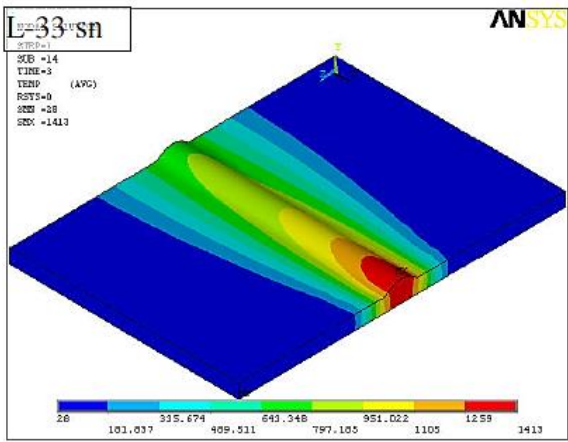
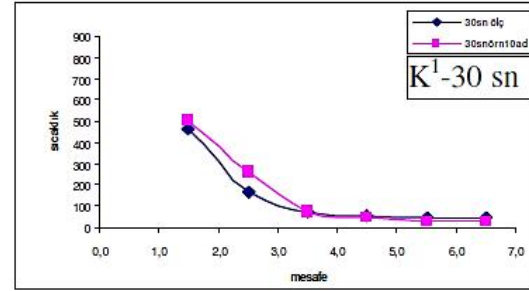
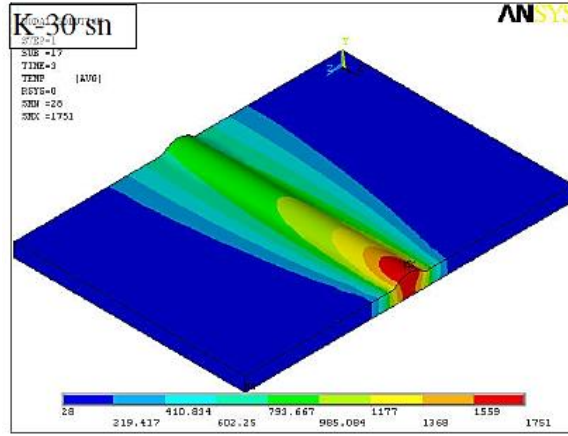
Şekil 8.10. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (2-6 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



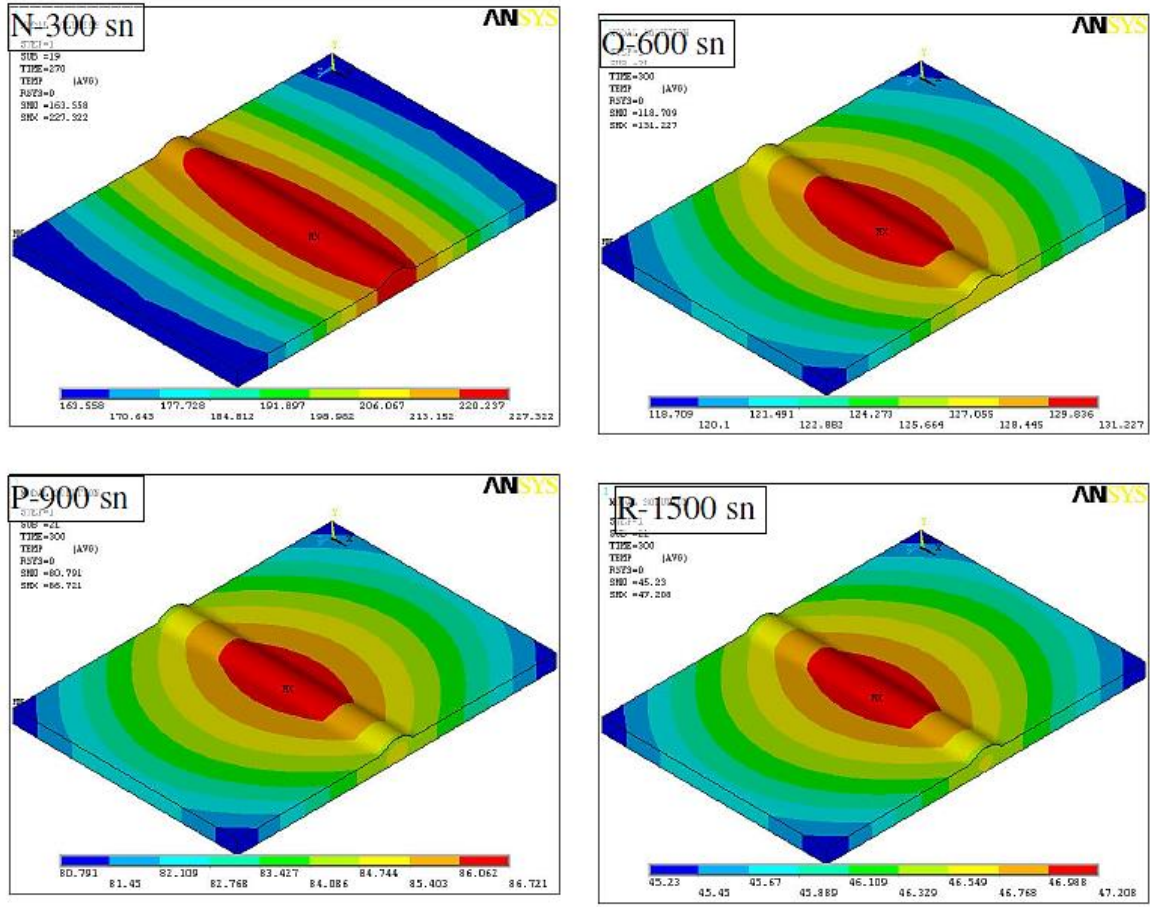
Şekil 8.11. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (12-18 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.12. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (21-27 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.13. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (30-60 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



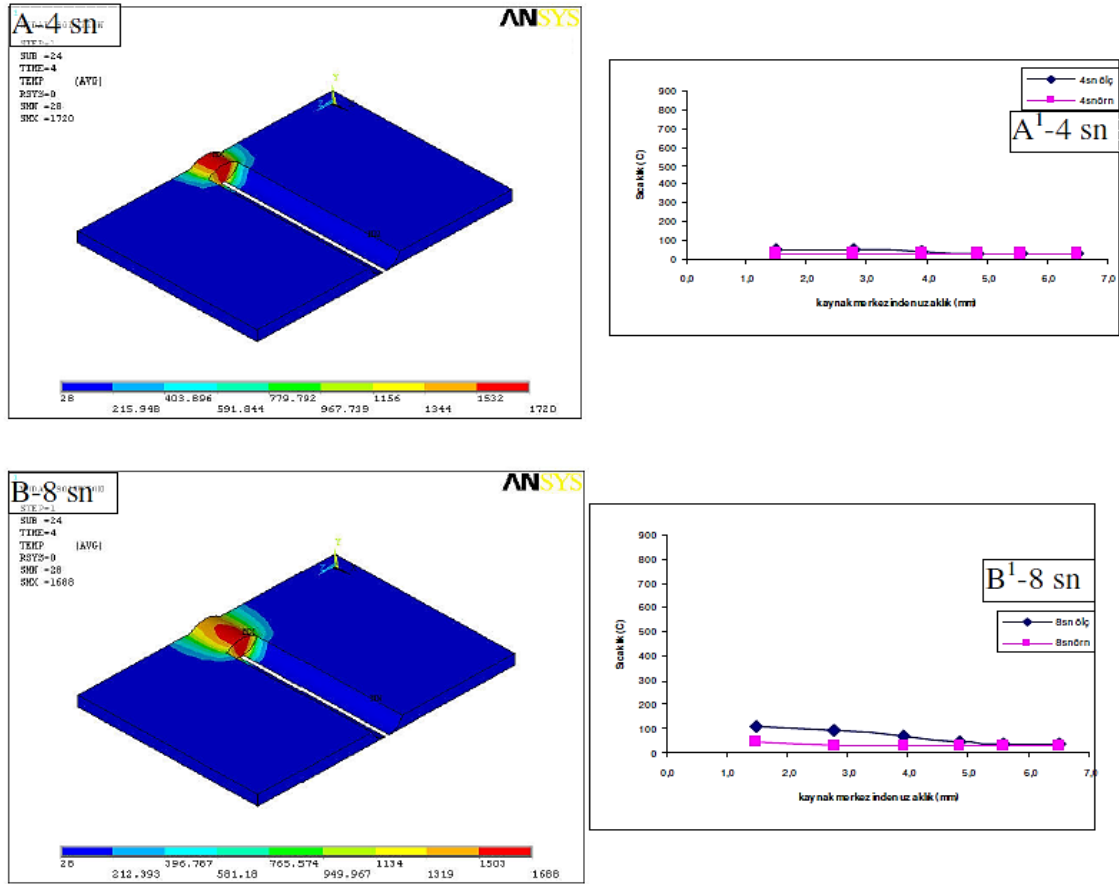
Şekil 8.14. 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (300-1500 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri

Şekil 8.10-8.14’de verilen Ansys model simülasyonu görüntüleri genel olarak incelendiğinde, Şekil 8.5-8.9’da verilen 250 A, 20 volt kaynak gerilimindeki Ansys simülasyon görüntülerine benzemektedir. Ancak 25 volt kaynak geriliminde yapılan bu işlemde kaynağın daha yavaş olmasından dolayı ısı girdisi daha fazla olmuştur. Isı girdisinin fazla olması malzemenin ısıdan etkilenen bölgesinin daha geniş olmasına sebep olmaktadır. Kaynak merkezinden 15 mm uzaklıktan alınan ana malzeme sıcaklık değerlerinde 20 volt kaynak geriliminde yapılan kaynakta en yüksek değer yaklaşık 400 °C olurken (Şekil 8.12 g¹-h¹), 25 volt kaynak geriliminde seçilen kaynak işlemlerinde bu değer yaklaşık 550 °C’ye çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 8.12-8.13 h¹, i¹, k¹). Kaynak işlemi tamamlandıktan 300 sn sonraki ana malzeme sıcaklıklarına baktığımızda Şekil 8.14 n’de kaynak metalinden en uzak mesafedeki ana malzeme sıcaklığı yaklaşık 125 °C iken,

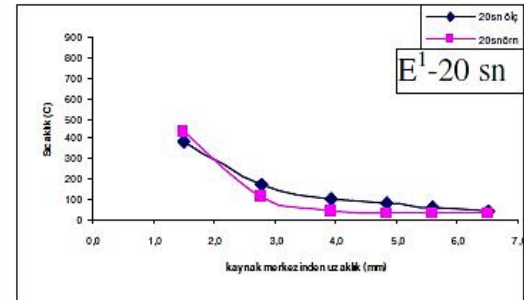
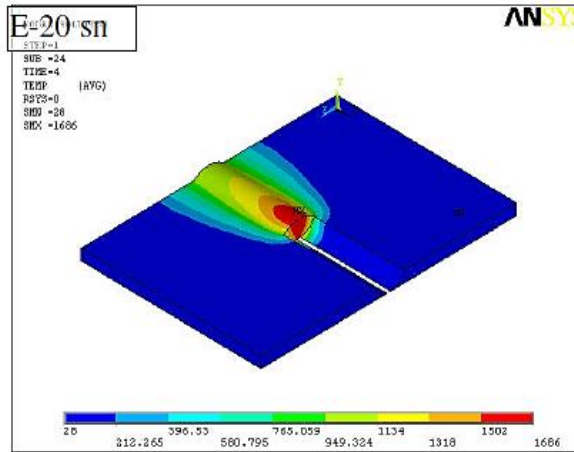
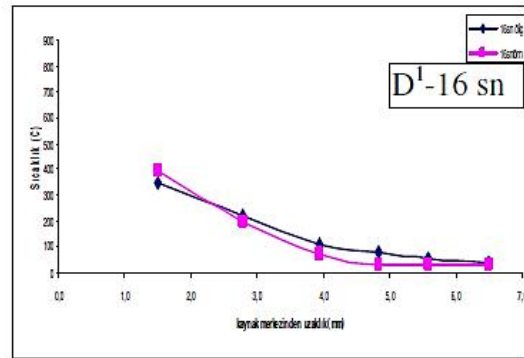
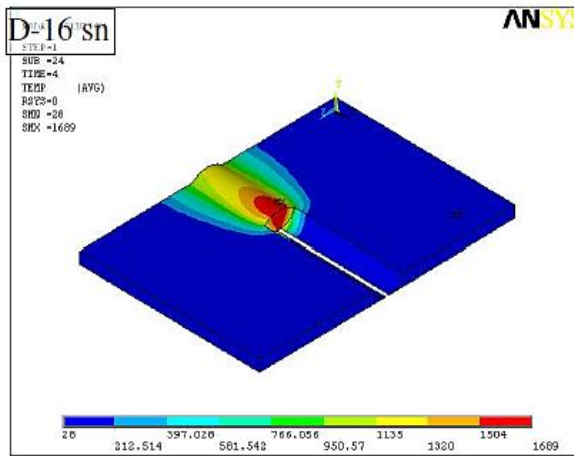
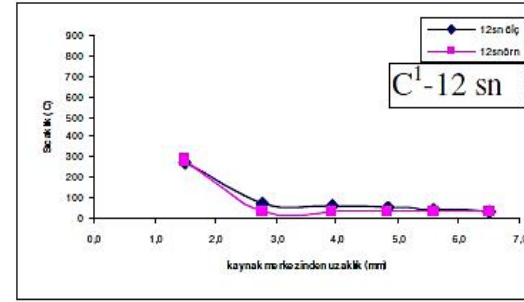
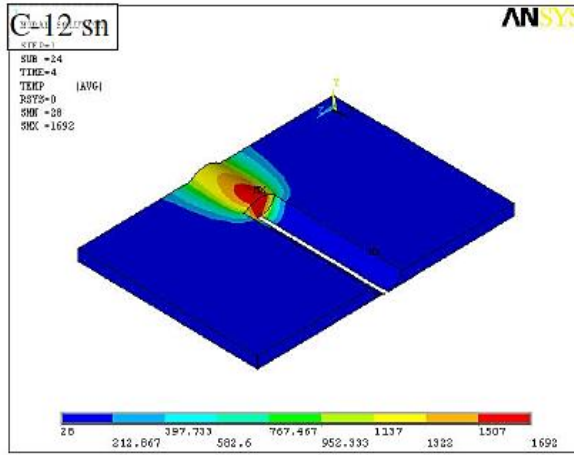
Şekil 8.13 m’de daha yavaş olarak kaynatılan malzemenin aynı noktadaki sıcaklığının 165 °C olduğu görülmektedir. Bu kaynak gerilimindeki sıcaklık değerleri bir önceki ile aynı olmamakla beraber oran olarak paralellik göstermektedir.

8.5.3. 250 A, 30 Volt Geriliminde Yapılan Kaynak İşlemine Ait Ansys Termal Analiz Sonuçları ve Ana Malzeme Sıcaklık Grafikleri

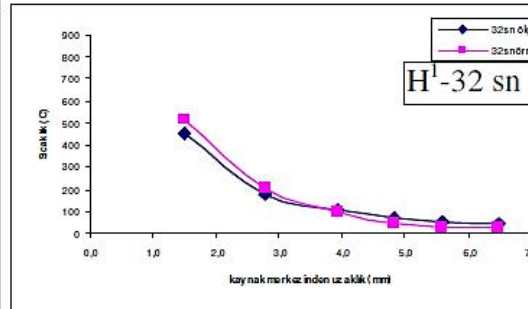
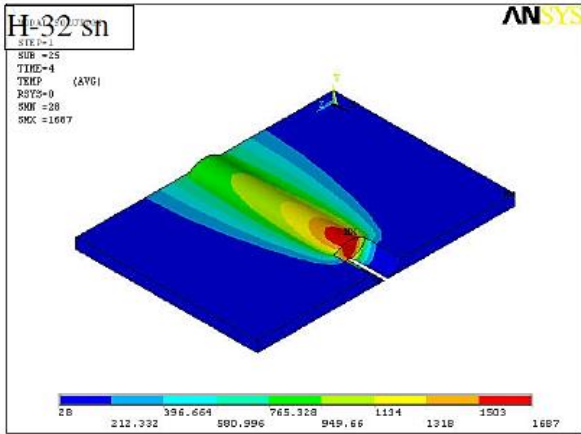
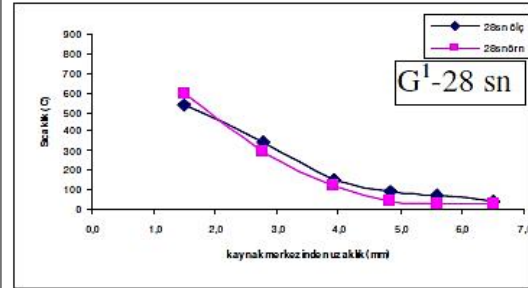
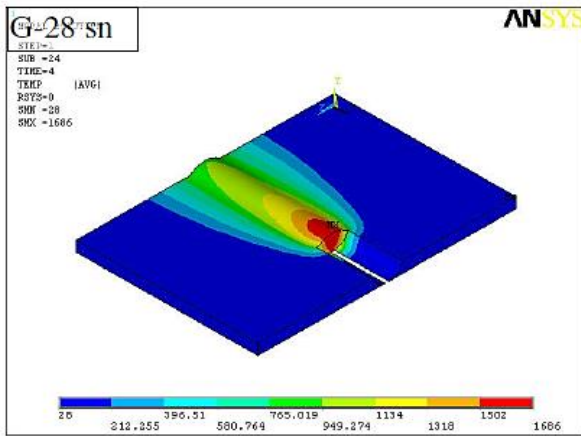
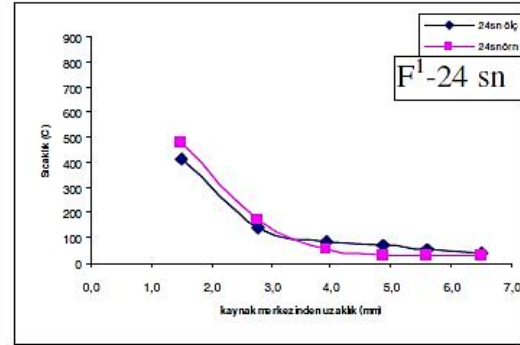
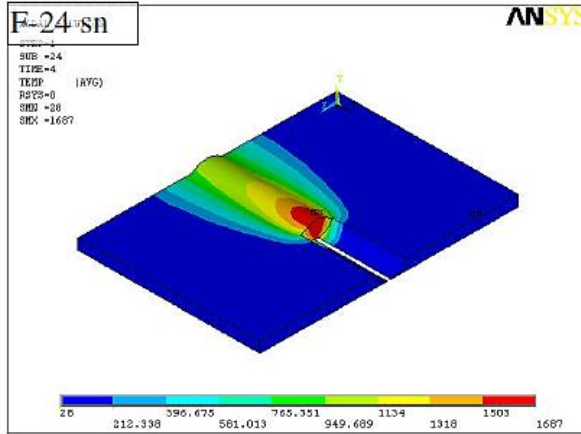
Şekil 8.15-8.19’de 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminde Ansys programında model simülasyon analizinde, Ramor 500 ana malzeme üzerinden ölçülen, kaynak işleminden 25 dk (1500 sn) sonraki zamana bağlı sıcaklık grafikleri adım adım incelenmiştir.



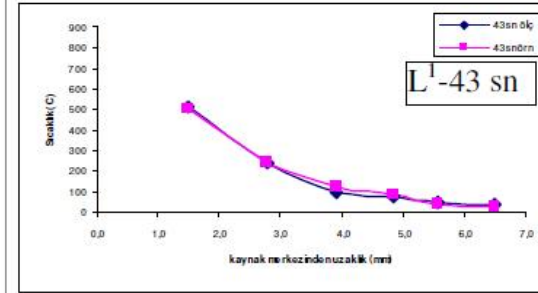
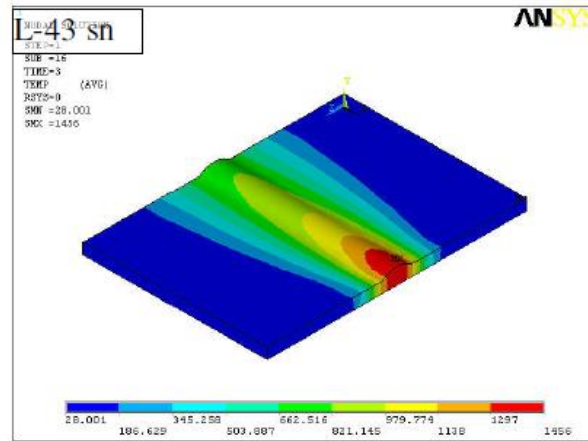
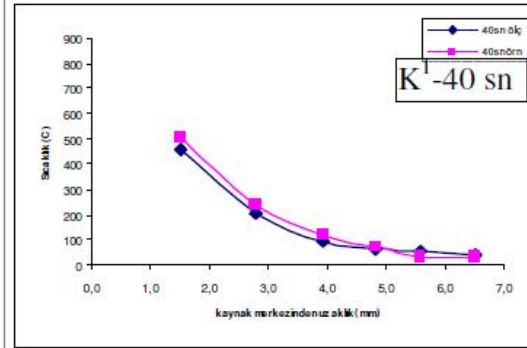
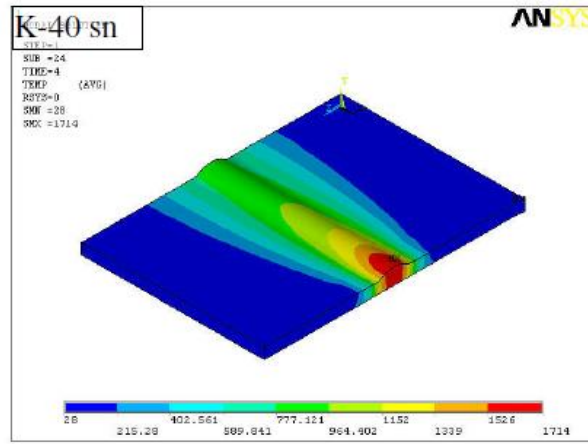
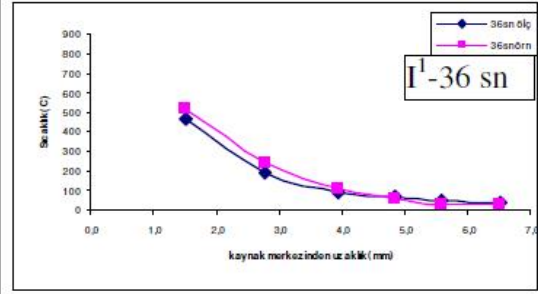
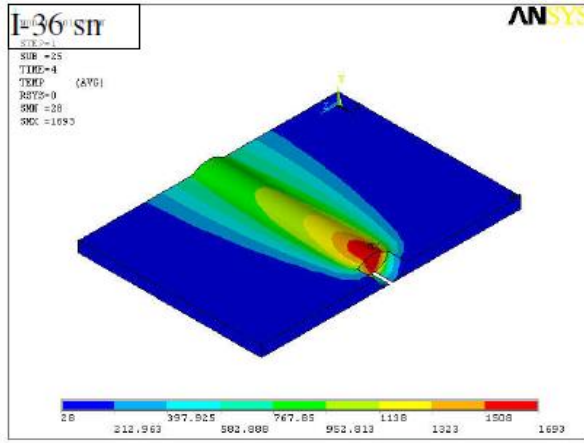
Şekil 8.15. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (4-8 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



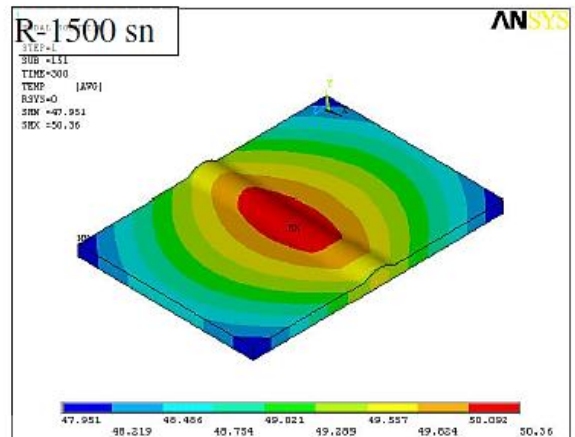
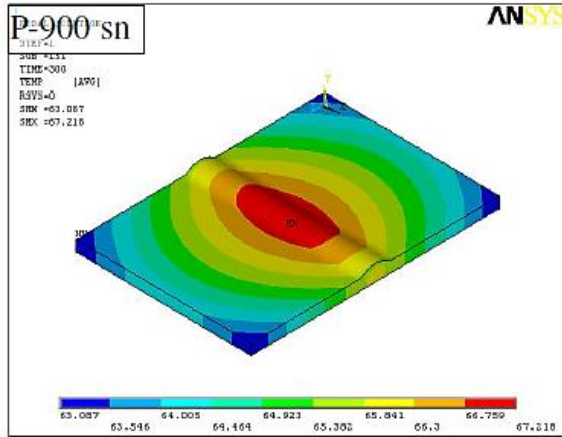
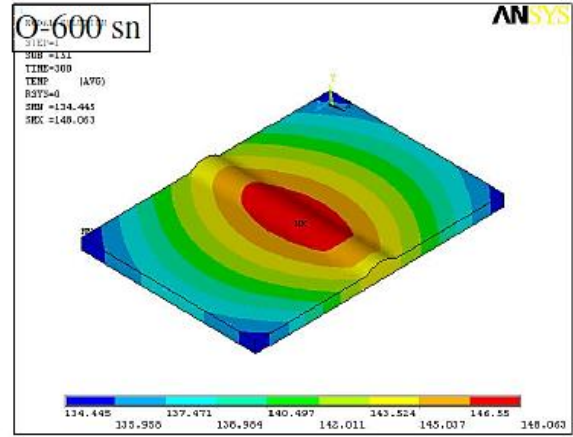
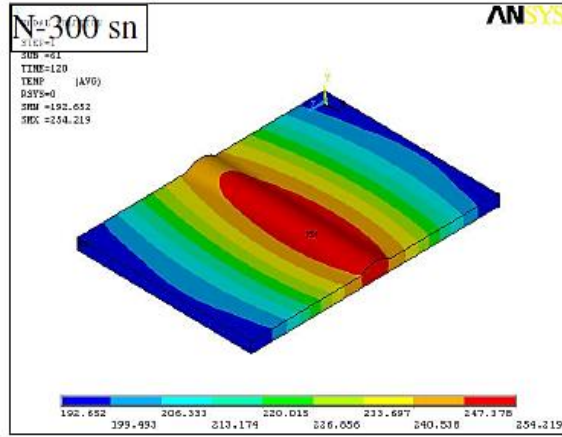
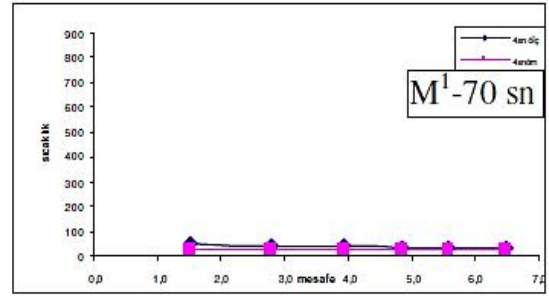
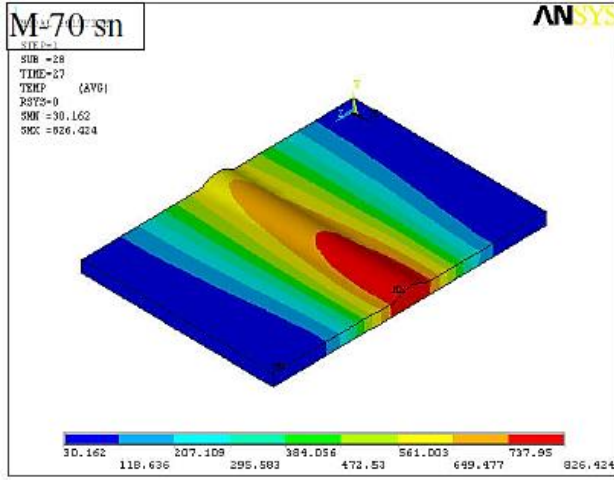
Şekil 8.16. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (12-20 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.17. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (24-32 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.18. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (36-43 sn.) sıcaklık grafikleri ve Ansys programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri



Şekil 8.19. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin (70-1500 sn.) sıcaklık grafikleri ve ANSYS programında oluşturulan kaynak simülasyon görüntüleri

Şekil 8.15-8.19'da verilen 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminin ısı hareketliliğinin, Şekil 8.5-8.9'daki 250 A, 20 volt gerilimi ve Şekil 8.10-8.14'deki 250 A, 25 volt geriliminde yapılan kaynak işlemlerine göre arttığı incelenmiştir. Şekil 8.17 h¹'daki grafik incelendiğinde kaynak merkezinden 15 mm mesafedeki sıcaklığın yaklaşık 630 °C olduğu görülmektedir. Isı girdisi, ısı dağılımını etkilediği gibi kaynak metali soğumasına da önemli oranda etki etmektedir. Bu bölümde elde edilen sıcaklık değerleri, mikroyapı sonuçlarını da desteklemekte ve ısı girdisinin fazla olduğu numunelerde kaynak metali tanelerinin irileştiği ve ITAB'ın genişlediğini doğrulamaktadır. Benzer şekilde sertlik değerlerinin azalması veya artması soğuma süresi ile orantılı olarak değişiklikler sergilemektedir.

Kaynak gerilimlerine bağlı olarak yapılan deneysel çalışmalara uygun olarak yapılan Ansys modelleme ve çözüm sonuçları mukayese edildiğinde; kaynak gerilimi arttırıldığında, ısı girdisinin arttığı dolayısıyla ısıdan etkilenen bölgenin de arttığı, hem deneysel makro ve mikroyapılarda, hem de Ansys çalışmalarında tespit edilmiştir. Uygulamalarda, birleştirilecek parçalarda kaynak işleminden dolayı meydana gelebilecek ısı hareketliliği Ansys programı ile önceden tespit etmek mümkündür. Isıl hareketliliği önceden tahmin edebilmek; konstrüksiyon uygulamalarındaki tasarımda konstrüktif açıdan muhtemel oluşabilecek hataların en aza indirilmesine, dolayısıyla hem maddi hem de zaman olarak avantajlar sağlayacaktır.

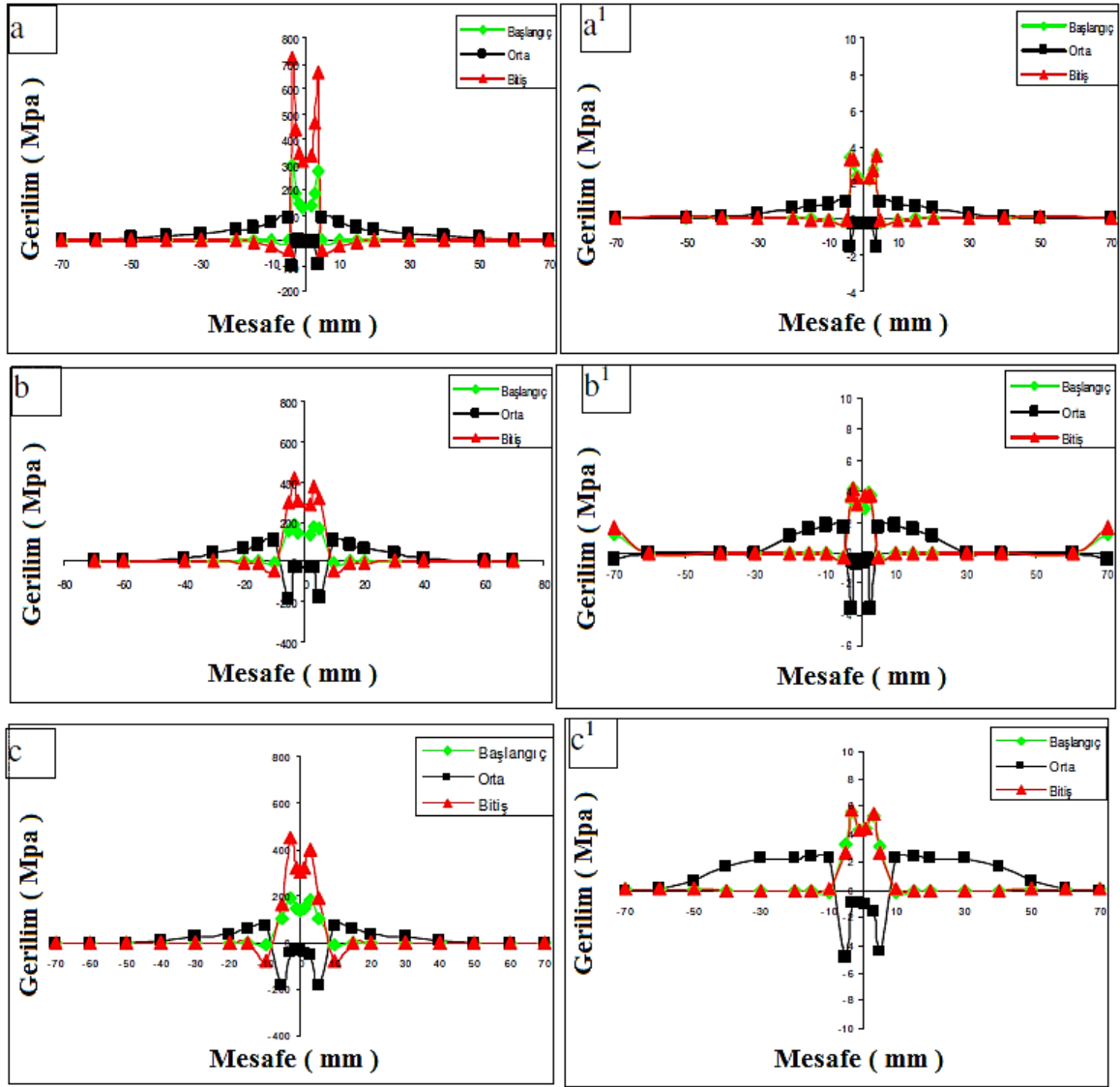
8.5.4. Modellerin Yapısal Mekanik Analiz Sonuçları

Tüm kaynaklı parçalar az ya da çok distorsiyona uğrarlar ve daima parça içerisinde kalıcı gerilmeler oluşur. Kaynak işleminden sonra kalan gerilmeler parçanın emniyetine önemli ölçüde etki eder. Sistemdeki çalışma gerilmeleri ile birleşen bu kalıcı gerilmeler, gevrek kırılma ve gerilmeli korozyona sebep olurlar. Parçada kalan kalıcı gerilmeler çeşitli gerilim giderme yöntemleri ile giderilebilir. Bu sebeplerden ötürü kaynak işlemi neticesinde oluşan kalıcı gerilmelerin önceden tahmininin yapılabilmesi ve kaynak konstrüksiyonun dizaynı önem kazanmaktadır.

Bilgisayar programları ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla kaynak işlemi neticesinde parçalarda oluşabilecek kalıcı gerilmeler önceden belirlenerek tasarımcılara büyük kolaylıklar sağlanır [132].

Termal analiz için seçilen SOLID 10 Node 87 elemanının yapısal analiz eşleniği SOLID187 kullanılarak ve modelin kesit yönü olan UY =0 deplasman uygulanarak yapılan yapısal analiz sonuçları bu bölümde incelenmiştir.

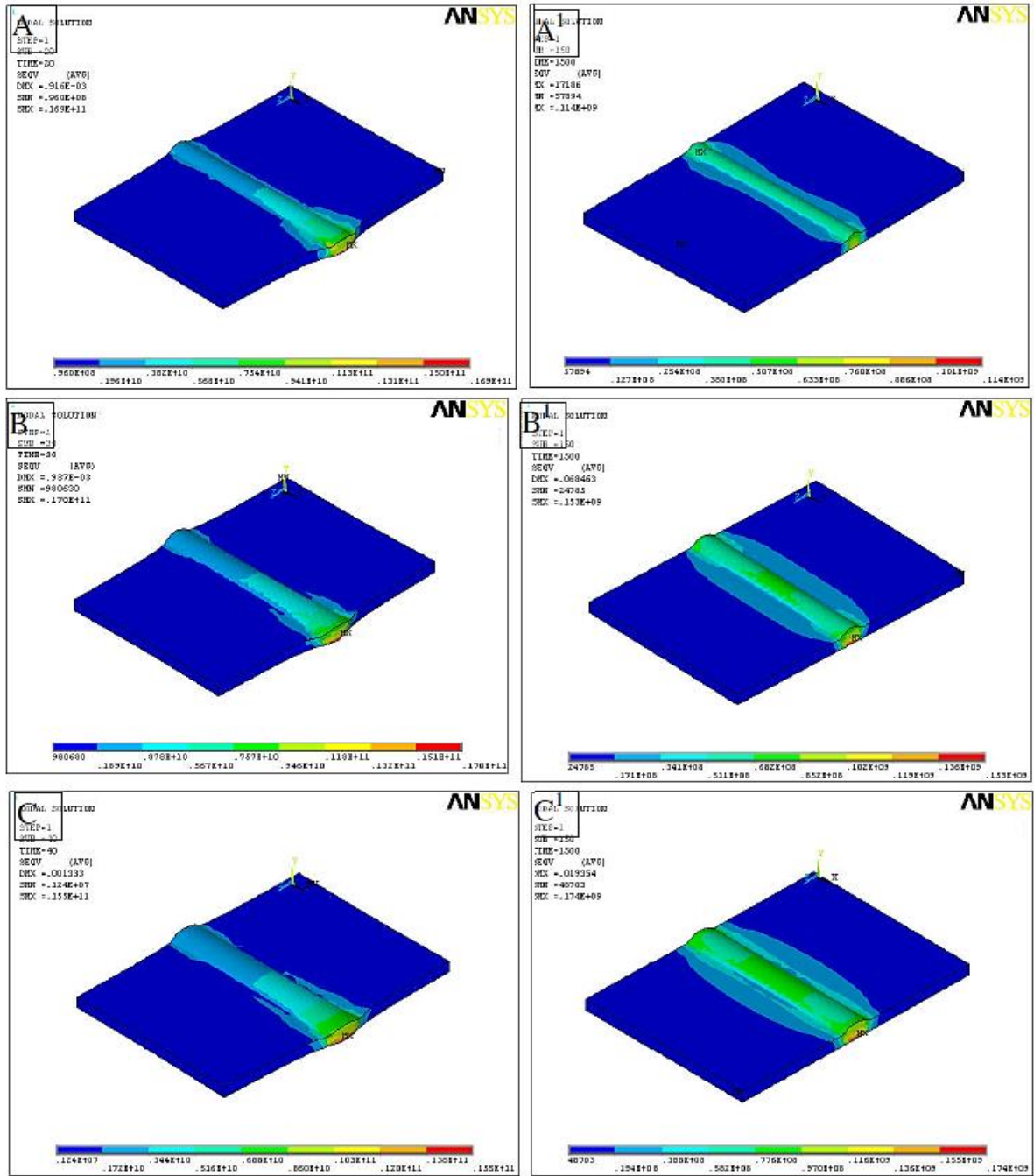
Von Mises Kriterine göre hesaplanan plastik gerilim dağılımında en fazla kaynak metali bölgesinde gerilim meydana geldiği görülmüştür. Yapılan analiz neticesinde, kaynak metali bölgesindeki en yüksek gerilimin ise kaynak metali ile ana metalin birleştiği noktada olduğu görülmüştür. Şekil 8.20’de kaynak metali dik eksenden ve kaynak başlangıç, orta ve bitiş noktalarından alınan gerilim değerleri grafikleri verilmektedir.



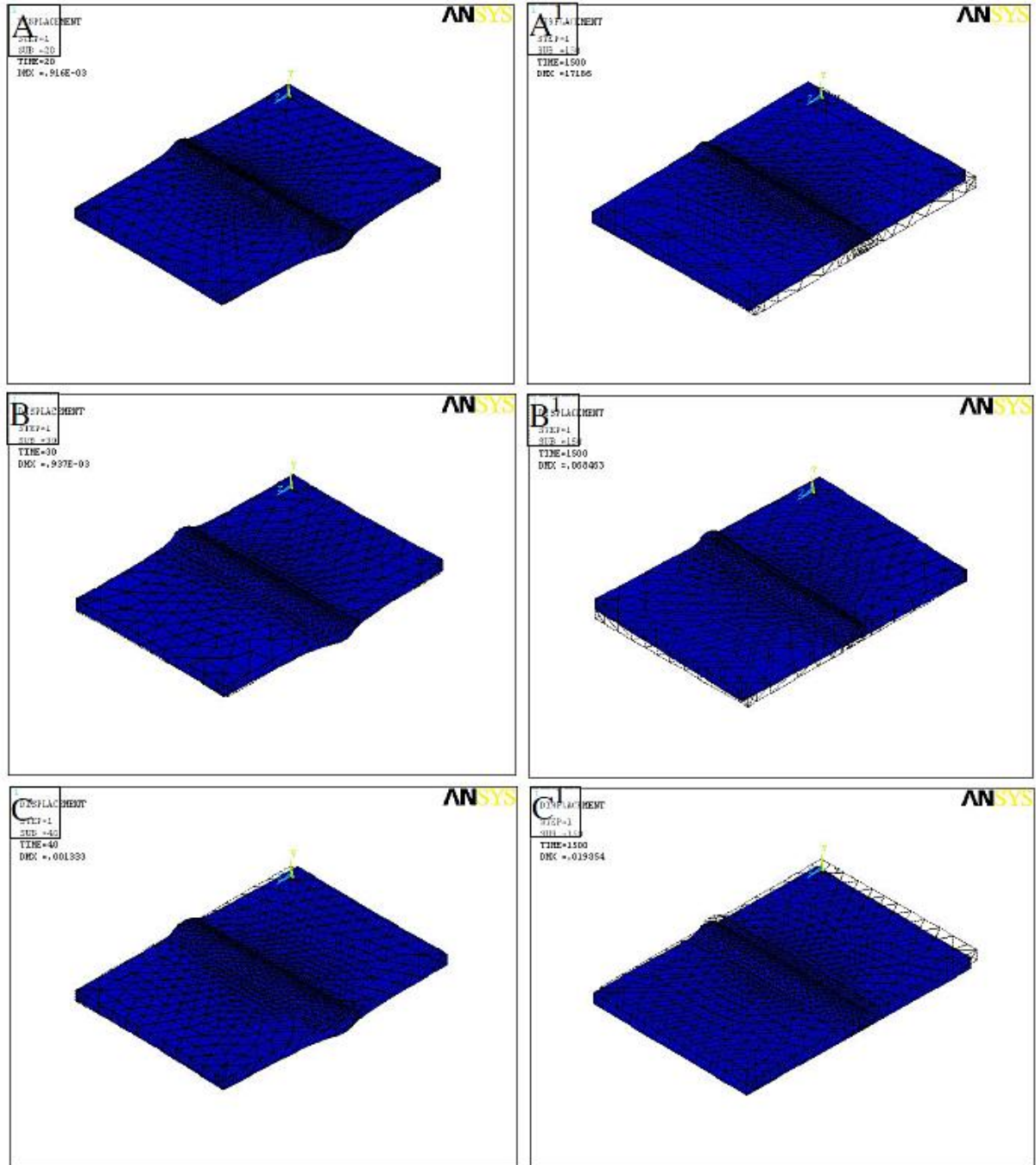
Şekil 8.20. Kaynak bölgesinden alınan mesafeye bağlı ansys gerilim grafikleri (a, a¹- 20 volt / b, b¹-25 volt / c, c¹-30 volt), (a,b,c=Kaynak sırası, a¹, b¹, c¹= Kaynak sonrası)

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde; gerilimin kaynak metalı bölgesinde yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Kaynak bittiği andaki grafiklerde (Şekil 8.20 a, b, c) elastik gerilmenin oldukça yüksek olduğu, özellikle soğumanın henüz daha gerçekleşmediği kaynak bitiş noktasından elastik gerilimin çok yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Grafikler, kaynak dikişine dik olarak malzeme yüzeyinden enine nodlardan (noktalardan) alınmıştır. Yeşil renk kaynağın başlangıç noktasını, kırmızı bitiş ve siyah renklerde orta noktayı temsil etmektedir. Başlangıç ve bitiş noktalarındaki kaynak

dikişlerinde çekme kuvveti oluşurken, soğuk olan ana malzeme ve kaynak metali arasında kalan kısımda ise basma kuvveti oluştuğu görülmektedir. Kaynaklı malzemenin orta noktası ise başlangıç ve bitiş noktalarından farklı olarak daha ziyade basma kuvveti oluşmuştur. Gerilimin en yüksek olduğu nokta ise kaynak metali ile ana metalin birleşim noktasında olmuş, kaynak metali merkezinde gerilim bu bölgeye göre daha düşük olmuştur. Oddy ve arkadaşlarının deneysel ve nümerik olarak yaptıkları çalışmada; tamir amaçlı bir plakada oluşan gerilimler için benzer grafikler elde etmişlerdir [133]. Kaynak merkezi bölgesinde ısı tesiri altında kalan bölge de başlangıç ve bitişten farklı olarak çekme olmuştur. Isı girdisi arttıkça kalıcı gerilmelerin arttığı bilinmektedir. Bununla birlikte ana malzemenin ısı absorbe etmesi de artmaktadır. 250 A, 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminde kalıcı gerilme (Şekil 8.20 c¹) , 20 volt geriliminde yapılan kaynak işlemindeki kalıcı gerilmeye (Şekil 8.20 a¹) oranla daha fazla olmuştur. Şekil 8.20 b ve c birlikte incelendiğinde; 25 ve 30 volt geriliminde yapılan kaynak işleminde, kaynak esnasında gerilimler yüksek olurken, Şekil 8.20 b¹ ve c¹ kaynak sonrasında malzemedeki kalıcı gerilimler daha fazla olmuştur. Şekil 8.21’de sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmüş modellerin Ansys programında gerilim dağılım simülasyonlar analizleri, Şekil 8.22’ de sıcaklığın neden olduğu deformasyon şekil değişimleri (kaynak distorsyonları), Şekil 8.23’de genel olarak modellerin ortak bileşke vektörel analizi incelenmiştir.



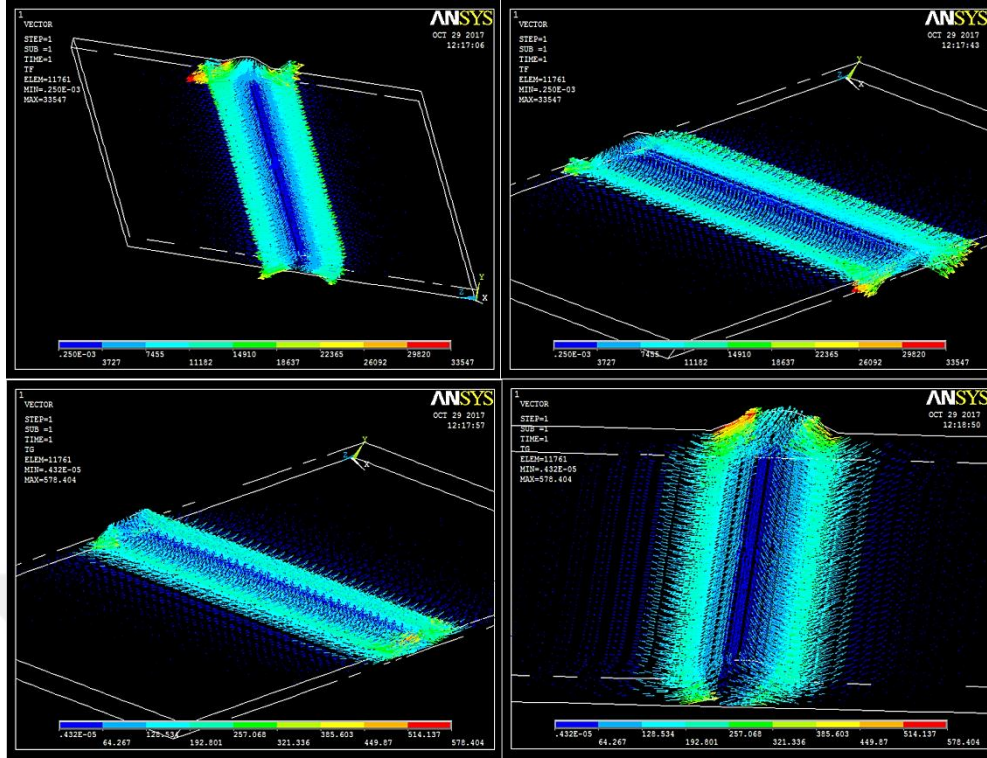
Şekil 8.21. Kaynak gerilim dağılım simülasyon analizleri (A, A^I- 20 volt / B, B^I-25 volt / C, C^I-30 volt),
(A,B,C=Kaynak sırası, A^I, B^I, C^I= Kaynak sonrası)



Şekil 8.22. Sıcaklığın neden olduğu kaynak distorsyonları (çarpılmalar) , deformasyon şekil değişimleri ansys analizleri (A, A¹- 20 volt / B, B¹-25 volt / C, C¹-30 volt), (A,B,C=Kaynak sırası, A¹, B¹, C¹=Kaynak sonrası)

Kaynak gerilim dağılımı görüntüleri incelendiğinde; kaynak işlemi esnasında elastik gerilimlerin oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 8.21 A, B, C). Kaynaktan sonra malzeme yaklaşık oda sıcaklığına soğutulduğunda elastik gerilimlerin yerini kalıcı gerilimlere bıraktığı görülmektedir (Şekil 8.21 A¹, B¹, C¹). Gerilim yoğunluğunun kaynak metalinde olmasının yanı sıra kaynağın başlangıç ve bitiş noktalarındaki kaynak metali alt bölgesinde özellikle de ana malzeme ile birleşim noktasında olduğu görülmektedir. Şekil 8.21 A¹'da verilen 20 volt geriliminde ve Şekil 8.21 C¹' da verilen 30 volt gerilimindeki sonuçlar birlikte incelendiğinde kaynak gerilimi daha düşük olduğunda, ısıdan etkilenen bölgenin de daha düşük olduğu dolayısıyla kalıcı gerilimlerinde daha düşük ve daha az bir alanda olduğu açıkça görülmektedir. Kaynak gerilimi yüksek olduğunda ısıdan etkilenen bölgenin daha fazla olduğu, kalıcı gerilimlerinde daha yüksek ve daha geniş bir alanda olduğu incelenmiştir.

Sıcaklığın neden olduğu kaynak distorsyonları (çarpılmalar), deformasyon şekil değişimleri incelendiğinde (Şekil 8.22) en fazla çarpılmanın en yüksek kaynak gerilimi olan 30 volt'ta (Şekil 8.22 C, C¹) yapılan kaynak işleminde olduğu açıkça görülmektedir. Analiz simülasyonları incelendiğinde en düşük kaynak gerilimi 20 volt'ta (Şekil 8.22 A, A¹) yapılan kaynak analizinde plastik şekil değişikliği bir yönde olurken, en yüksek kaynak gerilimi olan 30 volt'ta (Şekil 8.22 D, D¹) yapılan kaynak analizinde plastik şekil değişikliğinin ise tüm yönlerde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8.23. Kaynak bölgesinin ansys’de ısı dağılımının genel simülasyon bileşke vektörel analizi

Şekil 8.23’deki kaynak dikişinin vektörel bileşke analizinden görüldüğü gibi kaynak dikiş alanından ana malzemeye sıcaklık bileşenlerinin geçiş vektörleri açıkça görülmektedir. Vektör bileşkelerinin nüfuziyet alanına doğru geçişi simule edilerek bölgedeki vektörel dağılımlar incelenmiştir.

9. GENEL SONUÇLAR

Yapılan çalışmada Ramor 500 – Ramor 500 çelik çifti, sabit 250 A kaynak akımında, değişken kaynak gerilimlerinde (20, 25 ve 30 volt) ve değişken kaynak ilerleme hızlarında (20, 25 ve 30 cm/dk) tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin, birleşme bölgelerinin radyografik testleri yapılmış, mikroyapıları, mikrosertlikleri, kaynak dikiş formu geometriler, mekanik özellikleri ve Ansys programında termal-mekanik simülasyon analizleri incelenmiş olup, aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Sabit amper gücünde yapılan tozaltı kaynaklı bağlantıların birleşme kesitlerinden alınan mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, kaynak havuzuna bitişik her iki ITAB bölgesinde de çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir. Yüksek ısı girdisinin yapmış olduğu tavlama etkisiyle tane irileşmesinin olduğu ve bu tane irileşmelerinin artan kaynak gerilimi ve düşük kaynak hızında miktarının arttığı, daha sonra yapının hızlı soğuma etkisinde kalan kısmında ise küçük taneli homojen bölgeye dönüştüğü görülmektedir.
- Kaynaklı birleştirmelerin birleşme kesitinden alınan mikroyapı resimlerinin tamamında kaynak dikişi, dikişin hemen yanında kaynak geçiş bölgesi, ITAB, ITAB geçiş bölgesi ve ana malzeme olarak beş farklı bölgenin varlığı belirlenmiştir. Kaynak metalinde dentritik yapılar, ITAB bölgesinde ana malzemedeki martenzitik yapının ferrite dönüşmesiyle kaba taneler, ana malzemede ise ince taneli asiküler martenzit yapıları görülmüştür. Yapılan birleştirmelere nufuziyet yönünden bakıldığında, 250 A’de yapılan tüm birleştirmelerde tam nufuziyet sağlandığı görülmüştür.
- Yapılan birleştirmelere nufuziyet yönünden bakıldığında, 250 A’de yapılan tüm birleştirmelerde tam nufuziyet sağlandığı görülmüştür.
- Yapılan kaynaklarda N4 numunesinde kaynağın bitiş bölgesinde çok küçük oranda E (çatlak), N7 numunesinde kaynak uç ve bitiş bölgesinde curüf hattı çizgisinde çok küçük bölgede çatlak tespiti E+8b (Çatlak+ Curüf Hattı), N6 ve N9 numunelerinde ise kaynağın başlangıç ve bitiş bölgelerinde çok küçük oranda Dc (nufuziyet noksanlığı) hataları gözlemlenmiştir. Kaynak dikiş metalinde çekme numunelerinin alındığı nüfuziyetin en iyi olduğu orta bölgelerde hiçbir kaynak hatası oluşmamıştır. 250 sabit

amperde, 20 volt ve 20 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N1 numunesinde, 20 volt ve 25 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N2 numunesinde, 20 volt ve 30 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N3 numunesinde, 25 volt ve 25 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N5 numunesinde, 30 volt ve 25 cm/dk tel ilerleme hızında birleştirilen N8 numunesinde yapılan radyografik muayene sonucuna göre bu 5 kaynakta herhangi bir hata gözlemlenmemiştir ve uluslararası kaynak enstitüsünün yayınladığı ilkelere göre A (Kabul) raporu verilmiştir. Diğer 4 numunede ise herhangi bir “red” raporu verilmemiştir, sadece kaynağın başlangıç ve bitiş bölgelerinde çok küçük çatlak ve nüfuziyet kaynak hataları tespit edilmiştir, bunların ise kaynaktan değil cürufun kaldırılması sırasında oluşması düşünülmektedir. N9 numunesi 30 volt ve 30 cm/dk ilerleme hızı ile en yüksek değerlerdeki numunemiz, diğer parametrelerimize göre en olumsuz sonuçların olduğu numune olmuştur. Ama 20 volt gerilim değerindeki numunelerde ise bu durum söz konusu değil bütün ilerleme hızlarında yeterli nüfuziyet sağlanmıştır.

- Yapılan birleştirmeler çekme test sonuçlarına göre incelendiğinde, en yüksek çekme gerilmesi uygulanan numuneler içinde, 250 A, 25 volt kaynak geriliminde ve 30 cm/dk kaynak ilerleme hızında yapılan N6 nolu numuneden alınmıştır. Bu değer 923 Mpa çekme değeri ve % 8.51 mm boyca uzama değerinde analiz edilmiştir. Sem kırık yüzey ve grafik analizlerinden elde edilen sonuca göre numunelerde sünek kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Ramor 500 çelik çiftine uygulanan çekme testi sonucunda kopan numunelerin şekilleri incelendiğinde boyun vermeden kırılma meydana gözlemlenmiştir. Kopma yüzeyleri tam düz değil tırtırlı olacak şekilde kopmuştur. Kırık yüzey süngerimsi pürüzlü yapıda sünek kırılma mekanizmasına uygun şekilde bir yapıya sahiptir.
- Yapılan mikrosertlik ölçümleri sonuçlarının tamamında ölçüm sonuçları numunelerden elde ettiğimiz sertlik eğrilerine göre incelendiğinde; kaynak dikişlerinin sertliğinde ana malzemenin sertliğine göre artış gözlenmiştir. Kaynak metalinde, bütün numunelerde birbirine paralel sertlik değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Ancak Ramor 500 çelik çiftinin olduğu tarafta sertlikte azalma, ITAB’da daha fazla azalma ve sonra kaynak bölgesine doğru artma görülmüştür. Ramor 500 çelik çiftlerinin sertliğinin

azalması kaynak dikişlerinin geniş olmasından dolayı ITAB bölgesinde geniş olmasından kaynaklanmasındır. Kaynak bölgesi kırık yüzeylerinden alınan SEM analizlerinde yapıların ve XRD analizinde bileşiklerin elde edildiği gözlenmiştir. Kaynaklı malzemelerin mikrosertlik testleri incelendiğinde genellikle kaynak dikiş bölgelerinde mikrosertliğin yükseldiği görülmüştür. Bu durumun kaynak dikişinde sert fazların oluşmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Kaynak bölgesinin yukarıdan nüfuziyet bölgesine kadar alınan mikrosertlik ölçümlerinde sertliklerin arttığı gözlemlenmiştir.

- Kaynak dikiş geometrisi kumpas ölçüm grafik analizlerinde sabit amperde kaynak gerilimi arttıkça kaynak dikiş genişliğinin arttığı, kaynak yükseklik ve derinliğinin yaklaşık olarak birbirine paralel artış ve azalışlar gösterdiği incelenmiştir. Sabit amperde kaynak ilerleme hızı arttıkça gerilime göre ters orantılı olarak kaynak dikiş genişliğinde azalma, kaynak yükseklik ve derinliklerinde yine birbirine paralel artış ve azalış gösterdiği incelenmiştir.
- Ansys analiz sonuçlarında, sabit amperde 23 cm/dk ilerleme hızı referans ölçüm modellerinde soğumaya bağlı olarak yapılan termal analiz sıcaklık değerlerinde kaynak gerilimi arttıkça kaynak merkezinin ana malzemeye 15 mm mesafesinde ısı transferinin arttığı incelenmiştir. 20 voltta kaynak dikişinin ana malzemeye 15 mm mesafesinde sıcaklık 400 °C iken, 25 volt geriliminde aynı mesafede 550 °C , 30 volta geriliminde ise 630 °C sıcaklığı göstermektedir. Bu sıcaklık değerleri aynı şekilde farklı sürelerde değerlendirildiğinde mesafeye bağlı olarak kaynak gerilimi arttıkça yine aynı şekilde ısı transferinde arttığı ansys model simülasyon çalışmalarında incelenmiştir.
- Kaynak gerilimi arttığında, kaynak metali soğuma süresi artmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 20 volt kaynak geriliminde kaynak metali sıcaklığının 600 °C altına düşmesi yaklaşık 35 saniyede gerçekleşirken, 30 volt geriliminde kaynak metali sıcaklığının 600 °C altına düşmesi yaklaşık 120 saniyede gerçekleşmiştir.
- Sonlu elemanlar çözüm yönteminde geometrik modelin oluşturulması, sonlu eleman türünün uygun seçilmesi, sonlu elemanlar ağının doğru yapılması, başlangıç ve sınır şartlarının doğru tanımlanması modelin doğru çözülmesinde en önemli faktörlerdir.

- Kaynak işlemi neticesinde oluşan ısı dağılımı ve ısı dağılımının neden olduğu kalıcı gerilmelerin önceden tahmininin yapılabilmesi ve kaynak konstrüksiyonunun dizaynı önem kazanmaktadır. Bilgisayar programları ve sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla kaynak işlemi neticesinde parçalarda oluşabilecek kalıcı gerilmeler belirlenerek tasarımcılara büyük kolaylıklar sağlayacaktır.
- Kaynak işleminden sonra malzemelerde meydana gelen ısı dağılımlarının deneysel olarak belirlenmesi, çok uzun, zahmetli ve pahalı deney düzenekleri gerektirmektedir. Ancak analiz neticesinde elde edilen ısı çözüm sonuçları ile parçalardaki ısı dağılımının nasıl oluştuğunu tahmin etmek daha kolay ve ekonomiktir.
- Kaynak işlemi sonunda malzemedeki kalan kalıcı gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi ile rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Yapılan analizler sonucunda gerilim yoğunluğunun kaynak metalinde olmasının yanı sıra kaynağın başlangıç ve bitiş noktalarındaki kaynak metal alt bölgesinde, özellikle de ana malzeme ile birleşim noktasında olduğu görülmektedir.
- Kalıcı gerilmelerde başlangıç ve bitiş noktalarında çekme kuvveti oluşurken, kaynak merkezinin ana malzemedeki mesafesinde gerilim sonuçlarında basma kuvveti etkisi oluşturduğu gözlemlenmiştir. Kaynak başlangıcında sabit amper ve gerilime bağlı olarak elastik gerilmelerin arttığı incelenmiştir. Mekanik sonuçlarda plastik şekil değişimi 20 voltta bir yönde oluşurken, 25 ve 30 voltta bütün yönlerde olduğu incelenmiştir.
- Yapılan çalışmalar sonunda deneysel çalışmalar sonuçlarının ve sonlu elemanlar çözüm sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

10. ÖNERİLER

- Aynı deneyler farklı malzemeler üzerinde yapılabilir.
- Farklı kaynak yöntemleri ile deneyler yapılarak ANSYS’de modellenenebilir.
- Farklı özelliklerdeki malzemeler birbirleri ile birleştirilip modellenenebilir.
- Farklı kalınlıklardaki malzemeler benzer şekilde kaynak edilebilir ve modellenenebilir.
- Modeller üzerinde çekme testleri yapılabilir.
- Benzer deneyler farklı programlarda modellenerek sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Mikroyapı modellemesi üzerine programlar geliştirilerek çeşitli çalışmalar yapılabilir.
- Daha karmaşık yapılar üzerine kaynak ısısının etkisi görmek amacı ile deneysel çalışmalar ve modellemeleri yapılabilir.
- Yapılar üzerindeki kaynak sırasının yapıda meydana getireceği gerilimleri tahmin etmek için deneysel çalışmalar ve modellemeler yapılabilir.
- Kaynaklı birleştirmelerin mekanik testleri ve modelleme araştırmaları yapılabilir.

REFERANSLAR

- [1] **Demir, T.** 2008. Metal ve katmanlı zırh malzemelerin 7,62 mm'lik zırh delici meriler karşısında balistik başarımlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [2] **Çalık, M.** 2004. Zırh tasarımında kullanılan farklı geometriye sahip kompozit kabukların balistik özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.*
- [3] **Zengin, E.** 2010. Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [4] **Memiş, İ.** 2016. Impact Response Of Ramor 500 Armor Impact Response Of Ramor 500 Armor Steel Subjected To High Velocities, *Graduate School of Natural and Applied Science of Dokuz Eylül University In Partial Fullfilment of the Requirements for the Master of Science of Mechanical Engineering, Mechanic Program.*
- [5] **The Miller Electric MFG. CO.,** 1982. The Handbook Of SAW, Rev., vol. 11/85.
- [6] **Kaluç, E.** 2004. Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri, *Kaynak Teknolojisi El Kitabı. Cilt 1: Makine Mühendisleri Odası Kocaeli Şubesi, Yayın No: 975- 395- 739- 4.*
- [7] **Rosenthal, D.** 1941. Mathematical Theory of Heat Distributing During Welding and Casting, *Weldign Journal Research Supplement*, vol. 220–234.
- [8] **Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M., and Leung,** 1984. A new Finite Element Model for Welding Heat Sources, *Metallurgical Transactions*, vol. 15: 299-30.
- [9] **Davoud, S., M.,** 1984. A Comprehensive Study of Gas Metal Arc Welding Process; Finite Element Simulation and Experimental, *Master of Science Mechanical Engineering, Oklahoma State University, Oklahoma-U. S. A.,* vol. 100–124, **1.**
- [10] **Mundra, S. A., DebRoy, K., Babu, T., S., S. and David,** 1997. Weld Metal Microstructure Calculations from Fundamentals of Transport Phenomena in the Arc

Welding of Low Alloy Steels, *Welding Journal*, vol. 76(4): 163.

- [11] **Hong, T., Pitscheneder, T., W., and DebRoy**, 1998. Quantitative Modeling of Inclusion Growth in the Weld Pool by Considering their Motion and Temperature Gyration, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 3(1): 33-4.
- [12] **Khan, T., A., P. A., and DebRoy**, 1984. Alloying Element Vaporization and Weld Pool Temperature During Laser Welding of AISI 202 Stainless Steel, *Metallurgical Transactions*, vol. B, 15: 641.
- [13] **Mundra, T., Blackburn, K., M. J., and DebRoy**, 1997. Absorption and Transport of Hydrogen during GMA Welding of Mild Steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 2(4): 174-.
- [14] **Palmer, T., A., T., and DebRoy**, 1998. Enhanced Dissolution of Nitrogen during GTA Welding of Steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 3(4): 190-.
- [15] **M., W. J. P., denQuaden, G. and Vink**, 1990. Malinowski-Brodnicka, *Welding Journal*, vol. 69: 52.
- [16] **Choo,J., R. T. C. and Szekely**, 1994. The Possible Role of Turbulence in GTA Weld Pool Behavior, *Welding journal*, vol. 73: 25.
- [17] **Hong, A. B., K., Weckman, D. C. and Stong**, 1996. "Trends in Welding Research", ed. By Smartt, H. B., Johnson, J. A. and David, S. A., *ASTM International Materials Park OH*, vol. 399.
- [18] **David, S. S., A. S. and Babu**, 1977. "In Mathematical Modelling of Weld Phenomena 3" ed. by Cerjak, H. and Bhadeshia H. K. D. H., *Institute of Materials*, vol. 151.
- [19] **Bhadeshia H. K. D. H and Svensson, L. E.**1993. "In Mathematical Modelling of Weld Phenomena" ed. by Cerjak, H. and Easterling, K. E., *Institute of Materials*, vol. 109.
- [20] **Bhadeshia H. K. D. H.**, 1990. "In Recent Trends in Welding Science end

- Technology” ed. by David, S. A. and Vitek, J. M., *ASTM International, Materials Park OH*, vol. 189.
- [21] **B. Bhadeshia H. K. D. H., Svensson, L. E. and Gretoft**, 1985. A Model for the Development of Microstructure in Low - Alloy Steel(Fe-Mn-Si-C) Weld Deposits, *Acta Metallurgica*, vol. 33: 1271-1.
 - [22] **Ashby, K. E., M. F. and Easterling**, 1982. A First Report on Diagrams for Grain Growth in Welds, *Acta Metallurgica*, vol. 30: 1969-1.
 - [23] **Ion, J. C., Easterling, K. E. and Ashby, M. F**, 1984. A Second Report on Diagrams of Microstructure And Hardness for Heat-Affected Zones in Welds, *Acta Metallurgica*, vol. 32: 1949.
 - [24] **Watt, C., F., D., Coon, L., Bibby, Goldak, M., J., and Henwood**, 1988. An Algorithm for Modelling Microstructural Development in Weld Heat-Affected Zones (Part A) Reaction Kinetics, *Acta Metallurgica*, vol. 36(11): 30.
 - [25] **Coon, D. F., L. and Watt**, 1987. In Computer Modeling of Fabrication Processes and Constitutive Behaviour of Materials, ed.by To, J., *CANMET, Ottawa*, vol. 467–472.
 - [26] **D. Burke J. E. and Turnbull**, 1952. Recrystallization and Grain Growth, *Prog. Met. Phys.*, vol. 3: 220-225.
 - [27] **Gao, G., J. and Thompson**, 1996. Real Time-Temperature Models For Monte Carlo Simulations of Normal Grain Growth, *Acta Metallurgica*, vol. 44: 4565-4.
 - [28] **Gao, Y., Thompson, J., G. and Cao**, 1996. “Trends in Welding Research”, ed. by Smartt, H.B., Johnson, J.A. and David, S.A., *ASM International, Materials Park.OH*, vol. 199–204.
 - [29] **Radhakrishnan, T., B., and Zacharia**, 1995. Simulation of Curvature-Driven Grain Growth by using a Modified Monte Carlo Algorithm, *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 26A: 167-1.
 - [30] **Wilson, P., Martukannitz, A., R. P. and Howell**, 1998. ed. by Vitek, J. M., David,

- S. A., Johnson, J. A., Smart, H. B. and DebRoy, T., 5. *International Conference On Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA*, vol. 161.
- [31] **O. K. W. Maffet, H.**, 1978. Malzemelerin Yapı ve Özellikleri Cilt III – Mekanik Özellikler, *İ.T.Ü Kütüphanesi, İstanbul*, vol. 1119.
- [32] **MIL-A-11356E**, 1982. Military Specification, Armor Steel Cast, Homogeneous, Combat Vehicle Type, *Us Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown*, vol. 95–97.
- [33] **Atapek, Ş. H.** 2006. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit*.
- [34] **Karagöz, Ş., Atapek, Ş.H., Yılmaz, A.**, 2007. Su Verilmiş ve Temperlenmiş Çeliğin Alaşım ve Isıl İşlem Doğrultusunda Zırh Malzemesi Olarak Geliştirilmesi, *IV. Demir-Çelik Kongresi, Bildiriler Kitabı, 63-68, Karabük-Türkiye-1-3 Kasım*.
- [35] **Karagöz, Ş., Atapek, Ş.H., ve Yılmaz A.**, 2008. Zırh çeliklerinde perforasyon ve balistik korumanın anlaşılması açısından fragtografik etüd., *Metal Dünyası*, vol. 182, 102–1.
- [36] **Baykara, T.** 2005. Zırh Teknolojileri : Genel Bir Bakış Mart, *Zırh Teknolojileri Semineri, Milli Savunma Bakanlığı Ar-Ge & Teknoloji Daire Başkanlığı, Ankara*.
- [37] **Soykan, Y., Aslanoğlu, H. Ş., Karakaş ,Z.** 2005. Zırh Çeliklerinin Metalurjisi Erdemir Semineri.
- [38] **Karagöz, Ş., Yılmaz, A., Atapek, Ş.H.** 2006. Zırh Çelikleri ve Geliştirilmesi ODTÜ, Ankara-Türkiye, 29-30 Haziran, 3. *Savunma Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı*, vol. Cilt : I,.
- [39] **Gillespie, J. W.** 2001. Aluminum Foam Integral Armor: A New Dimension in Armor Design, *Composite Structures*, vol. 52 (3-4),.
- [40] **Naik, P., Shrirao, N. K.** 2004. Composite Structures Under Ballistic Impact, *Composite Structures*, vol. 66, 579–59.

- [41] **Sangoy, G., Meunier, L., Pont, Y.** 1988. Steels for Ballistic Protection, *Israel Journal of Technology*, vol. 24, 319–32.
- [42] **Gálvez, V. Cendón, F., García, D., Enfedaque, N., Sánchez-Gálvez, A.** 2009. Dynamic Fracture Toughness of a High Strength Armor Steel, *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, 2567–2.
- [43] **Ade, F.** 1991. Ballistic Qualification of Armor Steel Weldments, *Welding Journal*, vol. 70, 53–58.
- [44] **Jacobi, J., Batinmann, H., Gronsfeld, H. J.** 1988. New Method of Determining the Macrocleanness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel, *Stahl Eisen*, vol. 108 (20),.
- [45] **Matsubara, K., Osuka, H., Kozasu, T., Tsukada, I.** 1972. Optimization of Metallurgical Factors for Production of High Strength, High Toughness Steel Plate by Controlled Rolling, *Transactions ISIJ*, vol. 12, 435–44.
- [46] **Karagöz, Ş. H., Atapek, Ş.** 2008. Çökelti Sertleştirilmiş bir Sac Çeliğinde Mikroyapı-Kırılma Karakteristiği İlişkisi, *Deformasyon Sac İşleme*, vol. 11-12, 62-.
- [47] **Maweja, N. K., Stumpf, W., Van der Berg,** 2009. Characteristic of Martensite as a Function of the Ms Temperature in Low-Carbon Armour Steel Plates, *Materials Science and Engineering A*, vol. 519, 121–1.
- [48] **Gingell, K. J. A., B., A. D., Bhadeshia, H. K. D. H., Jones, D. G., Mawella,** 1997. Carbide Precipitation in Some Secondary Hardened Steels, *Mater Sci.*, vol. J. 32, 481.
- [49] **Karagöz, C. Fischmeister, Ş., F., H. Andren, H. O., Guang-Jun,** 1992. Microstructural Changes During Overtempering of High Speed Steels, *Metall. Trans.*, vol. A, 23, 163.
- [50] **Thomson, R. C.** 2000. Characterization of Carbides in Steels Using Atom Probe Field-Ion Microscopy, *Materials Characterization*, vol. 44 (1-2),.
- [51] IIW Milletlerarası Kaynak Enstitüsü, 1978. IX Nolu Komisyonu, *Kaynak Kabiliyeti*

Komisyonu”nun Önerisi, vol. 35–38.

- [52] **Anık, S.** 1981. Kaynak Tekniği, *İ.T.Ü Kütüphanesi, İstanbul*, vol. 3 **(1183)**,.
- [53] **MIL-STD-1185 (AT)**, 1979. Military Standart Welding,High Hardness Armor December, *Us Army Tank-Automotive Material Readines Command, Michigan 48090 31*, vol. 83–88.
- [54] **TB9-2330-224-50/1**, 1969. Procedures for repairar of combotolomeged hulls and Turrets 16 July, *Department of the Army Technical Bulletin*, vol. 155–165.
- [55] **Dedehayır, F.** 1985. Tanklarda Kullanılan Zırh Çeliklerinin Kaynak Kabiliyetinin Etüd, *Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*, vol. 52–56.
- [56] **Kahraman, N., G. B.**, 2009. Modern Kaynak Teknolojisi, *EPA-MAT Basım Yayın, Ankara*, vol. 30–38.
- [57] http://www.esabna.com/EUWeb/SA_handbook/585sa1_1.htm.
- [58] **Damkaş, R.** 2003. Tozaltı kaynağında kaynak ağzı açmadan ve kaynak ağzı açarak ulaşılabilecek nüfuziyet derinliğinin tespit edilmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*.
- [59] **Cary, H. B.** 2002. Modern Welding Tecnology, *Fifth Edition Columbus, Ohio*.
- [60] **Akkaş N.**, 2006. Tozaltı Köşe Kaynağında Yapay Zekâ Teknolojileri Kullanılarak Dikiş Geometrisinin Modellenmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği ,Yüksek Lisans Tezi, Ağustos*.
- [61] **Anık, M., Anık, S., Vural, S.**, 2000. 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, *Birsen Yayınevi, İstanbul*.
- [62] **Kayakök V.**, 2009. Tozaltı ve magc kaynak yöntemlerinde kaynak ağzı – nüfuziyet ilişkisinin incelenmesi ve ekonomik yönden kıyaslanması, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, vol. 17–56.
- [63] **Apay, S.** 2007. Tozaltı sert dolgu kaynağına bor tozu ilavesinin aşınma özellikleri üzerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,

Ankara, vol. 12–14.

- [64] **Özakın, N.** 2010. AH ve DH kalite gemi saclarının değişik kaynak yöntemleri ve kaynak pozisyonlarındaki mekanik özelliklerinin ve mikroyapılarının iredelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak*, vol. 55–78.
- [65] İnternet: Milli Eğitim Bakanlığı Megep, 2006. “Metal Teknolojisi Tozaltı Kaynağı,” http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/metal/moduller/tozalti_kaynagi.pdf.
- [66] **Işıklar, M.** 2009. Farklı boyutlardaki şaselerin kaynak aparatının tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta*, vol. 24–40.
- [67] **Ada, H.** 2006. Petrol ve doğalgaz boru hatları için üretilen boruların Tozaltı ve spiral kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, vol. 14–69.
- [68] **Kılınçer, S.** 1998. Düşük karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, vol. 12–22.
- [69] **Anık, S.** 1991. Kaynak Tekniği El Kitabı, *Gedik Eğitim Vakfı, İstanbul*, vol. 70–82.
- [70] **Çelik, A.** 1988. Tozaltı Kaynak Parametrelerinin Kaynak Dikişine Etkilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*.
- [71] **Candan, İ.** 2004. Çelik boruların MIG-MAG kaynağında kaynak pozisyonunun nüfuziyet mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, vol. 26–79.
- [72] **Erengin, A.** 2009. Ark esaslı kaynak yöntemleriyle yapılan uygulamalarda, kutuplama durumu ile ilave malzeme–ergime verimi ilişkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, vol. 16–37.

- [73] **Süzen, A.** 2009. Gemi saçlarının kaynak bağlantılarında kaynak parametrelerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya*, vol. 28–39.
- [74] **Fındık T.,** 2008. 304 Tipi Paslanmaz Çeliklerin Mig Kaynağındaki Isı Transferinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Ağustos*.
- [75] **Carslaw, J. C., H. S. and Jaeger,** 1959. Conduction of Heat in Solid, *Oxford University Press, USA; 2 edition*, vol. 15–75.
- [76] **Kim, A., S.,I., Basu,** 1998. A Mathematical Model Of Heat Transfer And Fluid Low İn The Gas Metal Arc Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77: 17–24.
- [77] **Adams, C. M.** 1958. Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, *Welding Journal Research Supplement*, vol. 210–215.
- [78] **CHristensen, K., N., Davies, V. And Gjermundsen,** 1985. Distribution of Temperatures in Arc Welding, *British Welding Journal*, vol. 54–75.
- [79] **Eagar, N. S., T. W. and Tsai,** 1983. Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources, *Welding Journal Research Supplement*, vol. 346–355.
- [80] **Grosh, E. A., R. J. and Trabant,** 1956. Arc Welding Temperature, *Welding Journal Research Supplement*, vol. 396–400.
- [81] **Lewis, K., W.,R., Morgan, K. and Thomas, H. R., Seetharamu,** 1996. The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis, *Chichester*, vol. 65–83.
- [82] **Li, S., Lin, Y., Chen,Z., Wang,G., Y., and Xi,** 2002. Study on moving GTA weld pool in an externally applied longitudinal magnetic field with experimental and finite element methods, *Institute Of Physics Publishing Modelling And Simulation In Materials Science And Engineering*, vol. 781–798.
- [83] **Mocanita, A., M.,** 2000. Computational Mechanics of Welding Complex Stuctures, *Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering, Master of*

Science, Canada, vol. 10-17, 38-.

- [84] **Guo, H.** 2004. Mathematical Modeling and Experimental Validation of Gas Metal Arc Welding of Aluminum Alloys, *Faculty of Graduate School of the University of Missouri, Doctor of Philosophy, United States*, vol. 4-6, 10-11.
- [85] **Awang, M.** 2002. The Effects of Process Parameters on Steel Welding Response in Curved Plates, *Collage of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, Master of Science, U. S. A.*, vol. 10-21, 80-.
- [86] **Wen, D. C. J., W, S., Hilton P. and Farrugia,** 2001. Finite element Modelling of a Submerged Arc Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119: 203-2.
- [87] **T. L. and Teng., L. C. C.** 1998. Effect of Welding Condition on Residual Stresses due to Butt Welds, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75: 857-8.
- [88] **Gunaraj, N., V. and Murugan,** 2002. Prediction of Heat –Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural steel Pipes, *Welding Journal Research*, vol. 94-102.
- [89] **Agelaridou, A.,** 2002. Thermal and Solidification Modeling of Welding: A Desing Tool Approach, *Mechanical Engineering of the Tufts University, Doctor of Philosophy, United States*, vol. 7-13, 50-8, pp. 150-152.
- [90] **Zhu, F.,** 2003. A Comprehensive Dynamic Model of The Gas Metal Arc Welding Process, *Faculty of Graduate School of the University of Missouri, Doctor of Philosophy, Unites States*, pp. 119-120.
- [91] **L. and YHWei, Z. J. D., B., Z. Dong, R. P.,** 2005. Three-Dimensional Numerical Simulation Of Weld Solidification Cracking, *Institute Of Physics Publishing Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, vol. 13: 437-45.
- [92] **Wahab, M. H., A., M., Painter, M. J., Davies,** 1998. The Prediction of The Temperature Distribution And Weld Pool Geometry In The Gas Metal Arc Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77: 233-23.

- [93] **Santos, P. A. F. M., O.,I., Zhang, W., Gonc, V.M., Alves, N. Bay,** 2004. Weld Bonding Of Stainless Steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44: 1431–1.
- [94] **Cho, C. J., R.,J., Lee, B.Y., Moon, Y.H., Van Tyne,** 2004. Investigation of Residual Stress and Post Weld Heat Treatment Of Multi-Pass Welds By Finite Element Method and Experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 155–156:
- [95] **Chang, T.-L., H., P., Teng,** 2004. Numerical and Experimental Investigations on The Residual Stresses of The Butt-Welded Joints, *Computational Materials Science*, vol. 29(4): 511.
- [96] **Akbari Mousavi, S. T. S., A.,A., Al-Hassani,** 2005. Numerical and Experimental Studies of The Mechanism of The Wavy Interface Formations in Explosive/İmpact Welding, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 53(11): 25.
- [97] **Atapek H.,** 2011. Bor katkılı bir zırh çeliğinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve balistik performansının değerlendirilmesi, *Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.*
- [98] **Maweja, W. S. K.** 2006. Fracture and Ballistic induced phase transformation in tempered martensitic low-carbon armour steels, *Materials Science and engineering A*, vol. 432, 158–1.
- [99] **Manganello J, A. K.** 1972. Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets., *J of Mater JMLSA*, vol. 17, 231–23.
- [100] **Zengin E.,** 2010. Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [101] **Y. N. ve E. R. Soncu R.,** 2010. Kornış Usulü Tozaltı Kaynağı İle Kaynak Edilen St37 Malzemesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal Analizi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 15, Sayı 1*, pp. 89–97.
- [102] **Ö. R. ve P. G. F. Yavuz N.,** 2005. Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar

yöntemi ile termal ve mekanik analizi, pp. 9–19.

- [103] **Jiang, T. W., Yahiaoui, K., Hall F., and Laoui**, 2005. Finite element simulation of multi-pass welding: full three-dimensional versus generalized plane strain or axisymmetric models, *J. Strain Analysis*, vol. s.587-597.
- [104] **Srivathsa, B., Ramakrishnan, N.**, 1999. Ballistic Performance Maps for Thick Metallic Armour, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 96 (1-3),.
- [105] **Hu ,J. S., Lee, C. J., Chen, P. Y.**, 2002. Ballistic Performance and Microstructure of Modified Rolled Homogenous Armor Steel, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 25 (1), 99.
- [106] **Chandel,F. L., Seow, R. S., H. P. And Cheong**, 1997. Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 72, 124–12.
- [107] **Ping Li, J., Fang, M. T. C. And Lucas**, 1997. Modelling of submerged arc weld beads using self-adaptive offset neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, 288–29.
- [108] **Gunaraj, N., V. And Murugan**, 1999. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 88, 266–27.
- [109] **Gunaraj, N., V. And Murugan**, 1999. Prediction and comparison of the area of the heat-affected zone for the bead-on-plate and bead-on-joint in submerged arc welding of pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 95, 246–26.
- [110] **Tusek, J.** 2000. Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 100, 250–2.
- [111] **Wikle Iii, B. A., Kottilingam, H. C., S., Zee, R. H. And Chin**, 2001. Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, 228–2.
- [112] **Tarng, C. H., Juang, Y. S., S. C. And Chang**, 2002. The use of grey-based

- Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, 1–6.
- [113] **Murugan, V., N. And Gunaraj**, 2005. Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 168, 478–4.
- [114] **Kanjilal, S., Pal, K. P., T.K. And Majumdar**, 2005. Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, 23–31.
- [115] **Mercado-paniagua, M., Lopez-Hirata, A., V. and Munoz**, 2005. Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169: 346-.
- [116] **Shena, S., Oguocha, S., I.N.A. and Yannacopoulos**, 2012. Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212: 286–2.
- [117] **Moeinifar, H. R., Kokabi, S., A.H. and Hosseini, Madaah** 2011. Role of tandem submerged arc welding thermal cycles on properties of the heat affected zone in X80 microalloyed pipe line steel, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211: 368-3.
- [118] **Kumaresh, S., B.S.P. and Natrajan**, 2008. Influence of heat input on high temperature weldment corrosion in submerged arc welded power plant carbon steel, *Materials and Design*, vol. 29: 1036-1.
- [119] **Nowacki, P., J. and Rybicki**, 2005. The influence of welding heat input on submerged arc welded duplex steel joints imperfections, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164–165: 1.
- [120] **Singh, S. K. and Pandey**, 2009. Recycling of slag to act as a flux in submerged arc welding, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53: 552-55.
- [121] **Hua,Z., Wei, S., Qiang ,C., L., Ge, S. and An**, 2006. Effect of submerged arc

- welding flux component on softening temperature, *Journal of Iron and Steel Research, Internation*, vol. 13: 65-68.
- [122] **Tusek, M., J. and Suban**, 2003. High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 133: 207-2.
- [123] **Peng, Z., Chen, Y., W. and Xu**, 2001. Study of high toughness ferrite wire for submerged arc welding of pipeline steel, *Materials and Design*, vol. 47: 67-73.
- [124] **Kiran, A., V., D., Basu, B. and De**, 2012. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212 (10):
- [125] **Yiğittürk, N.** 2016. Ramor Zırh Çeliği İle AISI 304 Paslanmaz Çelik Çiftlerinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D., Elazığ*.
- [126] <http://www.oerlikon.com.tr/>.
- [127] <http://www.metaluzmani.com/toz-alti-kaynak-yontemi/>.
- [128] **B., A.F. Yıldız, T., Gur, A. K.**, 2017. The Investigation of Welding Availability Of AISI304-Hardox 400 Steel Couples Welded By Plasma Transferred Arc Welding, *Ciência e Técnica Vitivinícola Journal*, vol. 32 (10), 1.
- [129] **T., M. And G., A. K., Calıgulu, U., Acık, M.**, 2016. Radiography Test of AISI 1010-Copper Alloys Welded by Friction Welding, *SYLWAN*, vol. 160 (4), 4.
- [130] **Y.,T. Gur, A.K., Yiğittürk, N.**, 2016. Examination Of Welding Characteristics Of AISI304-Ramor 500 Steel Couples Welded By Plasma Transferred Arc Welding, *SYLWAN*, vol. 160 (11),.
- [131] <http://www.calphad.com/iron-manganese.html>.
- [132] **ANSYS, Inc.**, 2005. Release 10.0 Documentation for ANSYS, U.S.A.
- [133] **Oddy, A. S., Mcdill, J. M. J., Root, J. H., Braid, J. E. M., and Marsiglio, F.**,

2001. Measurement, Variability and Prediction of residual Stresses in Weaved Repair Welds, *Matematical Medelling of Weld Phenomena*, vol. 5:529-548.



ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında Elazığ’ da doğdum. İlköğretim ve lise öğrenimimi Elazığ’ da tamamladım. 2010 yılında girdiğim Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden 2014 yılında Bölüm 2.’si olarak mezun oldum. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri Programı Ana Bilim Dalı’nda, Malzeme Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans Eğitimine başladım. 11-13 Ekim 2017’de Nevşehir 2nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC’17), 19-22 Ekim 2017’de Elazığ 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17) sempozyumlarına sözlü sunucu olarak katıldım. Orta seviyede İngilizce bilmekteyim. Uzman derecede bilgisayar kullanım bilgisine sahibim. Mesleki uzmanlık alanım; döküm, malzeme bilimleri, tozaltı kaynağı, zırh çelik teknolojisi, Ansys model simülasyon programı’dır. Bilgisayar İşletmenliği ve İstanbul Üniversitesi Satış ve Pazarlama Uzmanlığı sertifikam vardır.