



**DÜŞÜK KARBONLU SAÇLARIN GAZ ALTI KAYNAĞINDA
TERMAL ÇARPILMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

İsmail Berk AKBULUT

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sait Özmen ERUSLU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK KARBONLU SAÇLARIN GAZ ALTI KAYNAĞINDA
TERMAL ÇARPILMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İSMAİL BERK AKBULUT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sait Özmen ERUSLU
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

TEKİRDAĞ-2021

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK KARBONLU SAÇLARIN GAZ ALTI KAYNAĞINDA TERMAL ÇARPILMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İsmail Berk AKBULUT

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Öğr. Üyesi. Sait Özmen ERUSLU

İkinci Danışman: Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

Bu çalışmada düşük karbonlu çelik plakaların kaynak ısı girdisi altında termomekanik analizi deneysel ve numerik olarak incelenmiştir. Plakalarda kaynak ısı girdisi akım ve kaynak hızı kontrolü sağlanan bir Tungsten İnert Gaz (TIG) kaynak düzeniyle sağlanmıştır. Termal çökme sonuçları üç boyutlu koordinat ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Numerik analiz sonlu elemanlar analizi programı Ansys kullanılarak termal ve mekanik analiz kısımlarını içeren üç boyutlu bir modelle gerçekleştirilmiştir. Numerik analizde gauss ısı akısı yaklaşımı kullanılarak deneysel olarak hesaplanan ısı girdisi etkileri incelenmiştir. Isı girdisi altında saç metalin mekanik özelliklerinin değişimi çekme testi, mikrosertlik ölçümleri ve mikroyapı ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Çekme numunelerinde ana metalden kopma gerçekleşmiştir. Kaynak amper değerine ve kaynak hızına bağlı olarak numune mukavemetleri ve yüzde uzamalarında düşüş gerçekleşmiştir. Kaynak ısı tesirindeki kısımların mikrosertlik değerleri ana metalden yüksek çıkmıştır. Düşük kaynak hızlarında numunede ısı tesiri altındaki bölgede Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ölçümlerinde tane büyümesi gözlenmiştir. Numerik analiz çökme sonuçlarıyla deneysel çökme testi sonuçları arasında iyi bir uyum gözlenmiştir. Numerik analizde kaynak bölgesinde akma sınırında çekme artık gerilmeleri belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Termomekanik analiz, TIG kaynağı, Sonlu elemanlar analizi, Termal çökme, Gauss ısı akısı, Artık gerilme

ABSTRACT

MSc. Thesis

INVESTIGATION OF THERMAL DISTORTION EFFECTS IN GAS METAL ARC WELDING OF LOW CARBON STEEL SHEETS

İsmail Berk AKBULUT

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Sait Özmen ERUSLU

Second Supervisor: Assist. Prof. İbrahim Savaş DALMIŞ

In this study, thermomechanical analysis of low carbon sheet steels under weld heat input were investigated by experiments and numerical simulations. The weld heat input variation at plates were provided by Gas Tungsten Ark (GTA) welding process controlling welding speed and current. Thermal deflection results were determined by three dimensional coordinate measuring device. The numerical analysis was carried out using the finite element program Ansys with three dimensional model containing thermal and mechanical analysis parts. The weld heat input effects in experiments were investigated using the gauss heat flux approach in numerical analysis. The change of mechanical properties of sheet metal under heat input was investigated by tensile tests, microhardness and microstructure measurements. In the tensile specimens the fracture was occurred from the base metal. The tensile strength and ductility was decreased depending on the weld amperage and weld speed. The microhardness values of welded and heat affected zones were higher than the base metal. The grain growth was observed at the SEM (Scanning Electron Microscope) measurements of Heat affected zone for lower welding speeds. The good agreement was observed between the numerical analysis and experimental deflection results. In the numerical analysis, the tensile residual stresses are determined at the yield limit at the welding zone.

Keywords: Thermo Mechanical Analysis, GTA Welding, Finite Element Analysis Thermal Deflection, Gauss Heat Flux, Residual Stress.

2021, 68 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	v
ŞEKİL DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
1. GİRİŞ.....	11
2. LİTERATÜR VE KAYNAKLA İLGİLİ BİLGİLER.....	12
2.1. Gaz Tungsten Ark Kaynağı Prosesi.....	12
2.2. Kaynak İşleminde Artık Gerilmeler	13
2.3. Sıcaklık Değişimi ve Gerilmeler Arası İlişki.....	15
2.4. Artık Gerilimleri Kontrol Edilmesi	16
2.5. Soğuma Hızı	17
2.6. Kaynak Parametreleri	17
2.7. Termal Simülasyon Ve Isı Kaynağı.....	18
2.7.1. Gauss Isı Kaynağı.....	18
2.8. Sonlu Elemanlar Modeli	20
2.9. Kaynak Özetleri	21
3. MATERYAL VE METOT.....	24
3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	24
3.2. GTA Kaynak Düzenegi ve Deneysel Çalışma.....	24
3.3. Numune Şekil Değişimi Ölçüm İşlemi.....	27
3.4. Mikroyapı İncelemeleri ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi için Numunelerin Hazırlanması ve İncelenmesi	28
3.4.1. Tane Çapı Ölçümü.....	31
3.5. Mikrosertlik Ölçümleri	31
3.6. Kaynak Etkin Alanı Ölçümü	32
3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termomekanik Analizi	32
3.7.1. Mesh Yapısı.....	33
3.7.2. Malzeme Özellikleri	34
3.7.3. Termal Analiz	35

4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	42
4.1. Çekme Testi Sonuçları.....	44
4.2. Mikrosertlik Sonuçları	46
4.2. Tane Çapı Ölçümleri.....	48
4.3. Mikroskobik İnceleme	50
4.4. Termal Analizde Gauss Isı Akısı Modeli ve Mesh Analizi Sonuçları.....	51
4.5. Nüfuziyet Derinliği İncelemesi.....	52
4.6. Termomekanik Analiz Gerilme Sonuçları.....	57
4.7. Kaynaklı Numunelerdeki Deney ve Nümerik Analiz Çarpılma Sonuçlarının Karşılaştırılması	59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	64
EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1. St37-2(EN10025-2:2019) çeliğinin kimyasal birleşimi	24
Çizelge 3.2. Kaynak Parametreleri	27
Çizelge 3.3. Sıcaklığa bağlı St37-2 çeliğin ısı malzeme özelliklerinin değişimi	34
Çizelge 3.4. Sıcaklığa bağlı St37-2 mekanik malzeme özelliklerinin değişimi[19]	35
Çizelge 3.5. Hareket eden ısı akısı parametreleri	36
Çizelge 4.1. Kaynak işlem parametreleri.....	42
Çizelge 4.2. Akım değerlerine bağlı çekme testi sonuçları	45
Çizelge 4.3. Ampere ve hıza bağlı deneysel ve nümerik nüfuziyet sonuçları.....	57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Gaz tungsten ark metodu prosesi	12
Şekil 2.2. Kaynak torç pozisyonları [5].....	13
Şekil 2.3. Kaynak prosesinde sıcaklık dağılımı (a)A,B,C parçaların konumları (b) A,B,C zamana bağlı sıcaklık değişimi.[6]	14
Şekil 2.4. Kaynakta çarpılma türleri [7]	15
Şekil 2.5. Kaynakta artık gerilimin enine dağılımı.....	16
Şekil 2.6. Kaynak prosesinde meydana gelen soğuma hızları[11]	17
Şekil 2.7. Gauss ısı kaynağı modeli [16]	19
Şekil 2.8. Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli [15]	20
Şekil 3.1. Lincoln Invertec® V205-T AC/DC' TIG kaynak makinesi	25
Şekil 3.2. Kaynak makinesi robotu.....	25
Şekil 3.3. Deneysel numunenin sabitlemesi	26
Şekil 3.4. Kaynak ısı tesiri altında numune (300 x 200 x 3 mm)	26
Şekil 3.5. İntegra CMM cihazı	27
Şekil 3.6. Test numuneleri ölçüm noktaları.....	28
Şekil 3.7. Karakterizasyon numunelerinin pozisyonları. A Çekme Numunesi, B Mikrosertlik Numunesi, C SEM Numunesi	28
Şekil 3.8.Uygun A Çekme numunesi ,B Mikrosertlik numunesi ,C SEM numunesi.....	29
Şekil 3.9. Bulupol zımpara ve parlatma makinesi	29
Şekil 3.10. Optika B-500MET optik mikroskop	30
Şekil 3.11. TESCAN VEGA3 cihazı.....	30
Şekil 3.12. MICROBUL 1000-DN Micro Vickers sertlik ölçme cihazı	31
Şekil 3.13. Mikrosertlik alınan numunenin pozisyonları	32
Şekil 3.14. Kaynak numunesinin yatay görünümü.....	32
Şekil 3.15. Kaynak simülasyonu sistemi şeması	33
Şekil 3.16. Kaynak numunesinin mesh yapısı.	33
Şekil 3.17. Numunedeki Konveksiyon uygulanan yüzeyler.....	35
Şekil 3.18. Numunedeki yayılım oranı (radyasyon) yüzeyleri.....	36
Şekil 3.19. Numunedeki kaynak noktası başlangıç noktası.....	36
Şekil 3.20. Hareket eden ısı akısının gösterimi.	37

Şekil 3.21. Bir düzlemdeki Gauss dağılımı	37
Şekil 3.22. Gauss dağılımının 3 boyutlu grafiği.....	38
Şekil 3.23. Kaynak ısı tesiri etkisi alanın yanal ölçüsü.	39
Şekil 3.24. A ölçüsünün simulasyondaki görünümü	40
Şekil 3.25. Numunenin sınır koşulları	41
Şekil 3.26. Numunenin çökme hesaplamalarında kullanılan doğrultusu	41
Şekil3.27.Numunenin artık gerilmeden oluşan çökme sonuç örneği.....	41
Şekil 4.1. 200 mm/dk kaynak hızında çökme değerleri	43
Şekil 4.2. 300 mm/dk Kaynak hızında çökme değerleri	43
Şekil 4.3. St37-2 sac çekme testinde elde edilen yük-uzama eğrisi	44
Şekil 4.4.Çekme numunesi sonucu.....	44
Şekil 4.5. Kaynaklı numunenin çekme numunesi sonucu	44
Şekil 4.6. Kaynak hızı, amperaj, akma mukavemeti değişimi	46
Şekil 4.7. Mikrosertlik ölçümü görüntüsü	47
Şekil 4.8. 200 mm/dk kaynak hızında Hv1 Sertlik Ölçüm Değerleri.....	47
Şekil 4.9. 300 mm/dk kaynak hızında Hv1 Sertlik Ölçüm Değerleri.....	47
Şekil 4.10. Tane Yapısı SEM Görüntüleri (a)Numune 1 100 A 300 mm/dk ITAB Bölgesi (b) Numune 2 100 A, 200 mm/dk ITAB Bölgesi.....	48
Şekil 4.11. Kaynak işlemi uygulanmamış numune tane görüntüsü (10x).....	48
Şekil 4.12. Tane Çapı Ölçümü(a) 100 A 300 mm/dk ITAB Bölgesi (b) 100 A, 200 mm/dk ITAB Bölgesi.....	49
Şekil 4.13. Ortalama tane çapı akma mukavemeti ilişkisi.....	49
Şekil 4.14. Numune 100 A 300 mm/dk (10x) optik görüntü.....	50
Şekil 4.15. Numune optik görünüm (a)140 A 300 mm/dk (5x) (b) 140 A 300 mm/dk (10x).....	50
Şekil 4.16. Numune optik görünüm (a) 140 A 200 mm/dk (10x) (b) 140 A 200 mm/dk (5x).....	51
Şekil 4.17. 5 mm mesh boyutu için Isı akısı etkinlik alanının 140 A için değişimi.....	51
Şekil 4.18. 2 mm mesh boyutu için ısı akısı etkinlik alanının 140 A için değişimi	51
Şekil 4.19. Ağ yapısı mesh boyutuna bağlı sıcaklık değişimi	52
Şekil 4.20. Deneysel 100 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	53
Şekil 4.21. Nümerik 100 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	53
Şekil 4.22. Deneysel 100 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	53
Şekil 4.23. Nümerik 100 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	54

Şekil 4.24. Deneysel 125 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	54
Şekil 4.25. Nümerik 125 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	54
Şekil 4.26. Deneysel 125 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	55
Şekil 4.27. Nümerik 125 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	55
Şekil 4.28. Deneysel 140 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	55
Şekil 4.29. Nümerik 140 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	56
Şekil 4.30. Nümerik 140 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	56
Şekil 4.31. Deneysel 140 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği	56
Şekil 4.32. Deneysel Nümerik nüfuziyet ölçüm şekli	57
Şekil 4.33. Artık gerilme 125 A 200 mm/dk sonucu	58
Şekil 4.34. Von Mises 125 A / 200 mm/dk gerilme sonucu	58
Şekil 4.35. Tanımlanan orta eksen doğrultusu boyunca çökme değerinin değişimi	59
Şekil 4.36. 100 A 300 mm/dk çarpılma kıyaslaması	59
Şekil 4.37. 100 A 200 mm/dk çarpılma kıyaslaması	60
Şekil 4.38. 125 A 300 mm/dk çarpılma kıyaslaması	60
Şekil 4.39. 125 A 200 mm/dk çarpılma kıyaslaması	60
Şekil 4.40. 140 A 300 mm/dk çarpılma kıyaslaması	61
Şekil 4.41. 140 A 200 mm/dk çarpılma kıyaslaması	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Amper
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü - American Iron and Steel Institute
Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Cm	: Santimetre
Dk	: Dakika
GTA	: Gaz Tungsten Ark
HV	: Vickers Sertliği - Hardness Vickers
L	: Litre
M	: Metre
Mg	: Miligram
Mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
Ni	: Nikel
ITAB	: Isı Tesiri Altı Bölgesi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu - Scanning Electron Microscopy
SiC	: Silisyum karbür
TIG	: Tungsten Inert Gaz
V	: Volt
W	:Güç

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında düşük karbonlu saçların gaz altı kaynak ısısı altında termomekanik özelliklerin incelenmesi araştırılmıştır.

Çalışma sürecimde her zaman destek veren, bilgi birikimini aktaran ve yol gösteren danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Sait Özmen ERUSLU, Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ'a, Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ'a, tezimin değerlendirilmesine katkı sağlayan değerli jüri üyesi hocalarıma, Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim elemanı Kenan CAN ve BSH çalışanı arkadaşlarım başta Piero FAVARETTİ, Burak DANIŞMAN, Erdem SEVGEN, Hasan TAVİL ve tüm ekip arkadaşlarıma en içten dileklerle teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmeme vesile olan aileme şükranlarımı sunarım.

Haziran, 2021

İSMAİL BERK AKBULUT
Makine Mühendisi

1. GİRİŞ

Kaynak, imalat endüstrisinde kullanılan önemli bir birleştirme işlemidir. Otomotiv, Havacılık ve gemi yapımı gibi endüstrilerde kaynaklı birleştirme verimliliği, ekonomisi ve güvenilirliği nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kaynak, nihai kaynaklı geometride önemli bozulmalara neden olabilir, boyutsal kararlılık kaybı, yeniden işleme ve üretim gecikmelerine neden olur [1]. Sanayi endüstrisi, günümüzde ince kesitli, yüksek mukavemetli montaj gövde yapısının ağırlığını azaltmak için sac plakalar kullanılmaktadır. Kaynak yapılan ince bileşenler, ısıya maruz kaldığında bozulmaya karşı savunmasızdır. Yıllar boyunca kaynak teknolojisindeki muazzam gelişmeye rağmen, kaynak indüklenen bozulma parça üretimi için önemli engellerden biridir. Kaynaklı yapılardaki çarpılma, kaynak işlemi büyük ölçüde tasarım parametrelerinden etkilenmektedir.

Kaynak değişkenlerinin doğru kontrolü boyutsal kararlılık ve üretim bazlı problemleri ortadan kaldıracaktır [2]. Bununla birlikte, kaynak çok değişkenli olduğu için bağımlı süreçtir, bunların en uygun setini elde etmek genellikle zor veya imkansızdır geleneksel deneme yanılma temelli deneysel yöntemlerle faktörler Bu nedenle, endüstriyel kaynak işlemleri bugün en uygun set belirlemek için sağlam bir süreç tasarım aracı gerektirir yapılarda kaynak kaynaklı bozulmanın azaltılması için proses kontrol parametreleri gerekmektedir.

Son yıllarda, bilgisayarların performansında hızlı bir şekilde ilerlemesiyle bilgisayarlar aracılığıyla gerçek kaynak işlemini simülasyon yapmak mümkündür. Verimli ve iyi kurulmuş bilgisayar destekli mühendislik (CAE) araçları birçok karmaşık kaynak prosesini iyi bir doğrulukla tahmin edebilmektedir. Bu bağlamda, kaynak simülasyon araçlarının entegrasyonu ve modellemesi mümkündür.

Bu tezin en önemli amacı, ANSYS yazılımını kullanarak bir kaynak işleminin modellenmesi bilgisini genişletmektir. Kaynak analizinde üç ana alan göz önünde bulundurulmalıdır. Termal ve mekanik malzeme özellikleri olarak malzeme simülasyonu, proses simülasyonu (ısı girişi ve ısı kaynağı parametreleri) ve yapısal simülasyon (sıcaklık dağılımı ve artık stres) dikkate alınır.

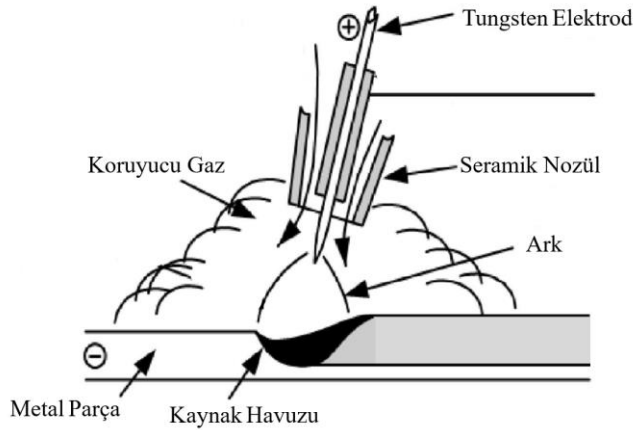
Bu tez çalışması sırasında sıcaklık bağımlılığı, termal ve mekanik malzeme özellikleri, kaynak parametreleri, ısı kaynağı parametreleri, bileşen geometrisi gibi kaynak analizinin etkili parametreleri incelenecektir. Ek olarak, sıcaklık dağılımının kaynak artık gerilmeleri üzerinde

açık bir etkisi vardır. Kullanılan ısı akısı türü, malzemenin mukavemetini de değiştirir ve buda parçanın sertliğine etki edebilir. Termomekanik analizi kullanılarak kaynak kalıntı gerilmelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR VE KAYNAKLA İLGİLİ BİLGİLER

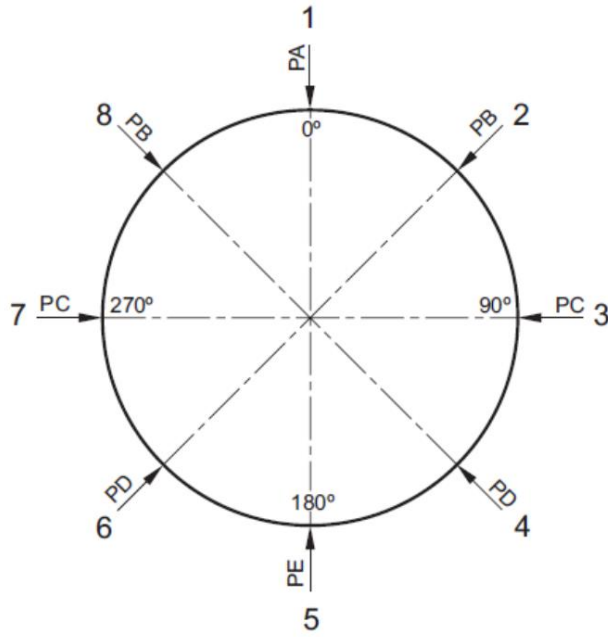
2.1. Gaz Tungsten Ark Kaynağı Prosesi

Tungsten İnert Gaz (TIG) işlemi olarak da bilinen Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW) işlemi, yaygın olarak kullanılan bir kaynak işlemidir. Elektrot olarak tüketilmeyen tungsten çubuklu bir kaynak torcuna sahiptir. Gaz tungsten ark kaynağı sistemi, kaynak havuzunu ve tungsten elektrotu korumak için inert bir atmosfer oluşturan eş eksenli bir gaz koruyucusuna sahiptir. Gaz korucusu argon veya helyum kullanılmaktadır. Ark, yüksek akımla (genellikle 100 A ile 350 A arasında) ve düşük voltajla (yaklaşık 15V ile 25 V arasında) ve ana malzemenin yüzeyini ısıtır ve sıvılaştırmaktadır. Akım genellikle güç kaynağı tarafından kontrol edilir. Voltaj, elektrot ve koruyucu gaz arasındaki mesafesi ile kontrol edilmektedir. Sağlam bir kaynak dikişi için torc, ayarlanmış bir hareket hızı ile temel malzemeye göre hareket etmektedir. Bu sistem ilave malzeme olmadan da çalışabilmektedir, Gaz tungsten ark metodu şekildeki gibidir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Gaz tungsten ark metodu prosesi

EN ISO 6947:2011 Standardında [3]'te açıklandığı gibi çeşitli çalışma pozisyonlarında kaynak yapmak mümkündür fakat yerçekimi ile ilgili farklı sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Parçaya ısı verme işlemi için EN ISO 6947:2011 standardına göre PA çalışma konumu seçilmiştir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.2. Kaynak torç pozisyonları [5]

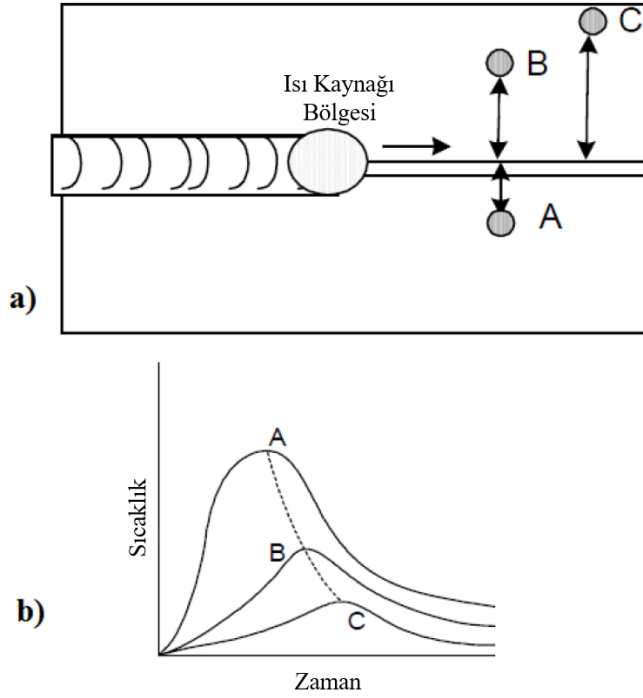
Kaynak metalini biriktirmek için genellikle ek metal tel ark içine beslenir. Kirlilikler kaynak işlemini bozabileceğinden ve kaynak dikişinde kusurlara neden olabileceğinden tel kuru ve kirden arındırılmış olmalıdır. Tel genellikle arkın ön tarafından (önden) ana malzemenin erime havuzuna beslenmektedir. Arkın en fazla ısıyı aldığı için telin önden beslenmesi en yaygın olanıdır [4].

GTAW güç kaynaklarının dalga biçimi, doğru akımda (DC) veya alternatif akımda (AC) olabilmektedir. Darbeli akım genellikle değiştirilmiş bir doğru akımdır. GTAW sisteminde esas olarak argon (Ar), helyum (He) veya Ar ve He karışımları gibi soy gazlar kullanılmaktadır. Oksijen (O_2), hidrojen (H_2) ve karbon dioksit (CO_2) gibi aktif gazlar Ar veya He'ye karıştırılabilir. Aktif gazlar düşük oranlarda (%1'in altında) kullanılır ve daha yüksek karışımlarda tungsten elektrotunu tahrip etmektedir [5].

2.2. Kaynak İşleminde Artık Gerilmeler

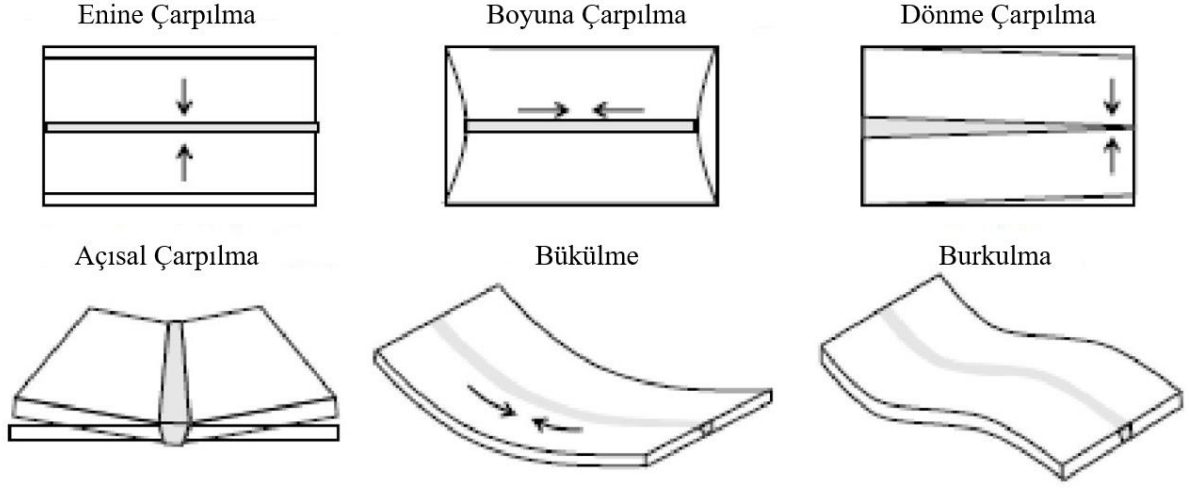
Artık gerilimler çoğunlukla, maksimum sıcaklığa ulaşmak için ısıtmadan ve daha sonra kaynak sırasında soğutmadan oluşan diferansiyel termal döngü nedeniyle gelişmektedir. Genel olarak, artık gerilmelerin büyüklüğü ve türü, soğutma veya ısıtma gibi kaynakların aşamasına bağlı olarak sürekli olarak değişmektedir. Ana metalin ısıtılması, termal genleşme nedeniyle numunenin erimesine yol açar ve çevreleyen metalin düşük sıcaklığı ile sınırlıdır. Sıcaklık zirveye ulaştığında, önceden ısıtılmış metalin yumuşamasının neden olduğu artık basma

gerilimi hızla ve önemli ölçüde azalır ve yüzeye kadar azalarak sıfıra ulaşmaktadır. Bununla birlikte, soğutma işlemi sırasında çekme artık gerilmelerinin büyüklüğü artarken metal oda sıcaklığına ulaşana kadar büzülme davranışı gözlenmektedir.[6] Parçanın sıcaklık dağılımı şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Kaynak prosesinde sıcaklık dağılımı (a)A,B,C parçalarının konumları (b) A,B,C zamana bağlı sıcaklık değişimi.[6]

Masubuchi [7], kaynak bozulmasını şekilde gösterildiği gibi altı tipe ayırmıştır. Enine büzülme, kaynak hattının enine yönünde parça büzülmesini ve uzunlamasına büzülme ifade edilmiş, kaynak hattına paralel olarak gerçekleşmiştir. Dönme distorsiyonunda, kaynak torcu ilerledikçe parçalar açılmaya başlar. Açısal bozulma, alın ve fileto kaynaklarındaki plakaların açısındaki değişiklik olarak tanımlanır. Uzunlamasına bükme, kaynak hattına paralel eksene göre bükülmedir. Burkulma distorsiyonu, kaynak hattı boyunca elastik kararsızlık olarak tanımlanır. Bu çalışmada açısal çarpılma ve bükülme gözlenmiştir. Kaynakta çarpılma türleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

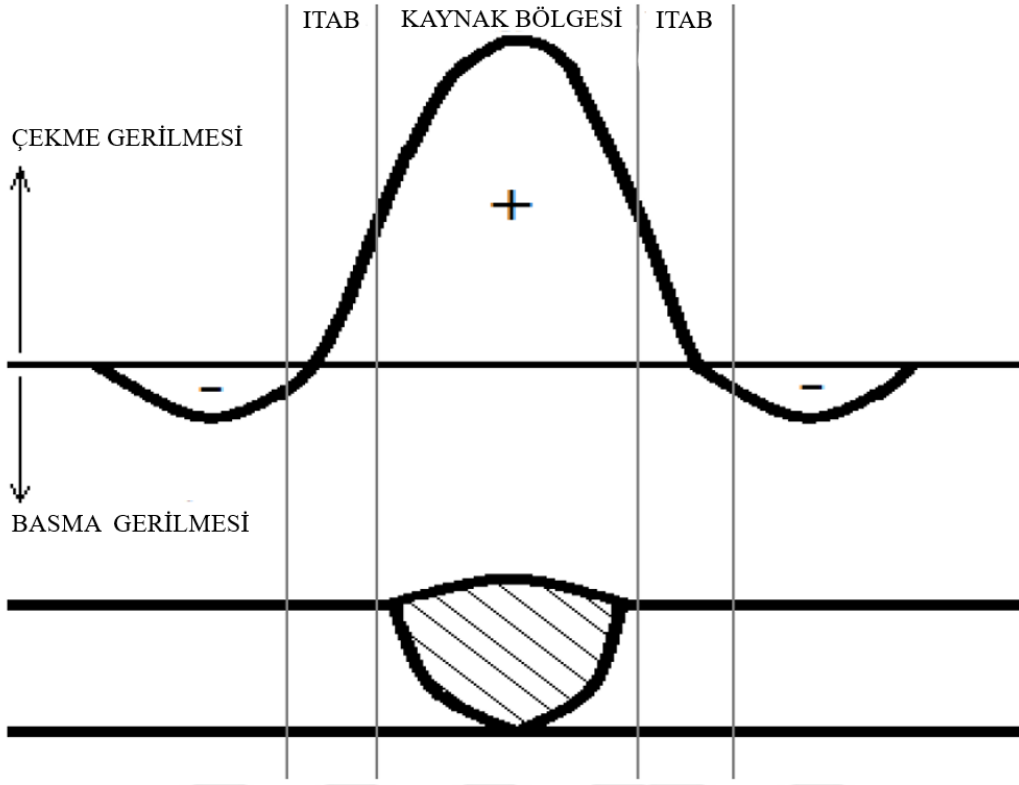


Şekil 2.4. Kaynakta çarpılma türleri [7]

Artık gerilmelerin gelişimine katkıda bulunan iki temel değişiklik vardır. Mikroskobik hacimsel değişiklikler, büzülme , genişleme veya üst ve alt kaynak yüzeyleri arasındaki değişen soğuma hızlarından kaynaklanır. Ayrıca, esas olarak östenitten martenzite dönüşen metal dönüşümü nedeniyle soğutma sırasında mikroskobik hacimsel değişikliklere neden olmaktadır [8].

2.3. Sıcaklık Değişimi ve Gerilmeler Arası İlişki

Kaynağa yakın bölgede sıcaklığın artışı ve ani soğuma sırasında, artık gerilmelerin gelişimi üzerinde büyük etkisi vardır. Sıcaklık, test edilen malzemenin hacimsel değişimine ve gücüne etki etmektedir. Bu sürecin başlangıcında, ısı kaynağı tam noktaya yaklaşırken sıcaklık yükselmektedir. Malzemenin akma dayanımı sıcaklıkla ters orantılıdır ve bu nedenle aynı zamanda ısıl genişleme ile mukavemet azalmaktadır. Ayrıca, artan sıcaklık, basma artık gerilmesinin artmasına neden olur. Isı kaynağı neredeyse ilgilenilen noktaya geldiğinde, basınç gerilimi hemen azalarak ve ihmal edilebilir seviyeye gelmektedir. Son olarak, ana metalin ısı kaynağı ile noktayı geçerken sıcaklığı giderek azalır, bu da ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) büzülmesine neden olmaktadır [9]. En büyük çekme artık gerilme oluşumlarının kaynak metali bölgesi boyunca meydana gelmektedir. Kaynakta artık gerilmelerin dağılımını Şekil 2.5'te göstermektedir.



Şekil 2.5. Kaynakta artık gerilimin enine dağılımı

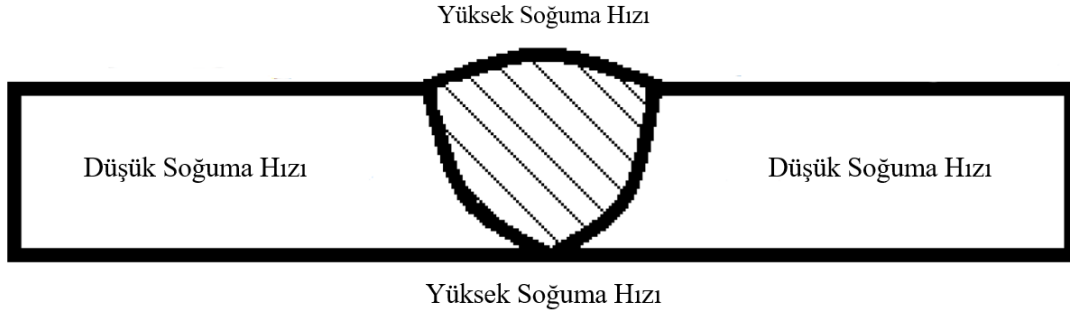
2.4. Artık Gerilimleri Kontrol Edilmesi

Kaynak uygulamaları, mekanik ve termal yöntemlerle kaynak dikişlerinin artık gerilmelerinin giderilmesini gerektirmektedir. Artık gerilim gevşemesi, gerilim anını azaltarak plastik akışı kolaylaştırmak için koşulları iyileştirerek kilitli gerilimi serbest bırakmaya dayanır.

Artan sıcaklıkla metallerin akma mukavemetinin ve sertliğinin azalmasını ifade eder ve bu da, artık gerilimleri hafifletmeye izin veren kilitli gerilmenin serbest bırakılmasını kolaylaştırır. Bu nedenle, kaynak dikişinin ısıl işleminin sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, artık gerilmelerde o kadar büyük azalma olacaktır [9].

2.5. Soğuma Hızı

Kaynak sırasında kaynak bağlantısının üst ve alt yüzeyleri nispeten yüksek soğuma hızına maruz kalmaktadır. (Şekil 2.6) Genel olarak, bu farklılıklar kaynaklı plaka boyunca termal genişlemeye ve büzülmeye neden olarak basma (yüzeyde) ve çekme (kaynağın orta kısmında) artık gerilmelerinin azalmasına neden olmaktadır [10].



Şekil 2.6. Kaynak prosesinde meydana gelen soğuma hızları[11]

2.6. Kaynak Parametreleri

Isı girdisi sıcaklık dağılımını etkilemektedir, ancak artık gerilim üzerinde doğrusal bir etkisi yoktur. Bileşenlere düşük ısı girdisi uygulandığında kaynak merkez çizgisinin yakınında basınç artık gerilmesi oluşur [12]. Daha yüksek ısı girdisi uygulandığında çekme artık gerilmesi oluşacaktır. Daha kaliteli ve faydalı artık gerilim elde etmek için, kaynakçının kaynağa başlamadan önce dikkat etmesi gereken bazı önemli parametreler şunlardır:

- Malzeme özellikleri
- Torç Çapı ve Mesafesi
- Akım Şiddeti
- Gerilim
- Kaynak Hızı ve Verimi

2.7. Termal Simülasyon Ve Isı Kaynağı

Kaynak işlemi sırasında süreksiz sıcaklık dağılımını araştırmak için termal analiz gerekmektedir. Zamanın bir fonksiyonundaki sıcaklık dağılımını ile uzaysal koordinatlar (x, y, z) arasındaki bağımlılık, aşağıda belirtilen doğrusal olmayan ısı transferi denklemi kullanılarak tanımlanmaktadır:

$$cp \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

c - ısı kapasitesi ($J/kg \text{ } ^\circ C$), ρ - yoğunluk (kg / m^3), T - sıcaklık ($^\circ C$), t - zaman (s), Q - dahili ısı üretim hızı (W / m^3), k - izotropik malzemenin ısı iletkenliği ($Wm \text{ } ^\circ C$).

Kaynak işlemi sırasında dikişe toplam ısı akışı q (W / mm^2) olarak modellenir ve aşağıdaki denklemle açıklanmıştır:

$$q = \frac{\eta UI}{A} \quad (2)$$

η - ark verimliliği, çoğunlukla % 70, U-voltaj (V), I - akım (A), Yüzey Alanı (A)

(1) Numaralı denklem, ısı kapasitesi, termal iletkenlik ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerinin termal analiz üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Isı kapasitesi ve termal iletkenlik, yoğunluğa kıyasla sıcaklığa daha fazla bağlıdır [13]. Bununla birlikte, termal iletkenliğin düşürülmesiyle daha fazla miktarda ısı birikebilir ve numunenin malzemeye ısı iletmesi daha fazla zaman alacaktır [14].

Radyasyon ısı kayıpları dışında, konveksiyon nedeniyle oluşan ısı kaybı sonuç üzerinde önemli bir etkisi olmadığı bilinmektedir. Newton yasasına göre sabit film katsayılı konveksiyondan kaynaklanan ısı kaybı aşağıdaki denklemde ifade edilir.

$$qc = -h(Ts - TT) \quad (3)$$

Ts - Yüzey sıcaklığı ($^\circ C$), TT - Oda sıcaklığı ($^\circ C$), h - Isı transfer katsayısı ($Wm^2 \text{ } ^\circ C$).

2.7.1. Gauss Isı Kaynağı

Gauss ısı kaynağı, radyal olarak simetrik normal dağılıma sahip bir yüzey ısı akısı olarak modellenmiştir ve ısı akısı şu şekilde tanımlanmıştır:

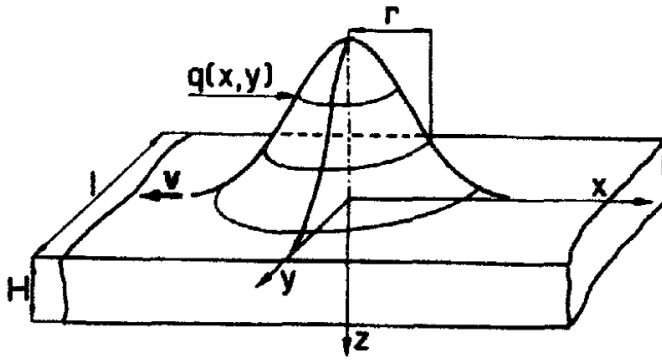
$$q_s(r) = q_0 e^{-\frac{3r^2}{R^2}} \quad (4)$$

$$q_0 = \frac{3}{\pi R^2} Q \quad (5)$$

$$Q = \eta UI \quad (6)$$

η - ark verimliliği, çoğunlukla% 70, U - voltaj (V), I - akım (A)

R, ısı kaynağının merkezinden olan mesafedir; q_0 , ısı girdisinin büyüklüğü ve dağılımı ile belirlenen kaynak havuzundaki maksimum ısı akısı; R, kaynak havuzunun boyutunu ve şeklini belirleyen ve ayarlayan radyal parametredir [16]. Bu modelin taslağı Şekil 2.7'de gösterilmiştir:



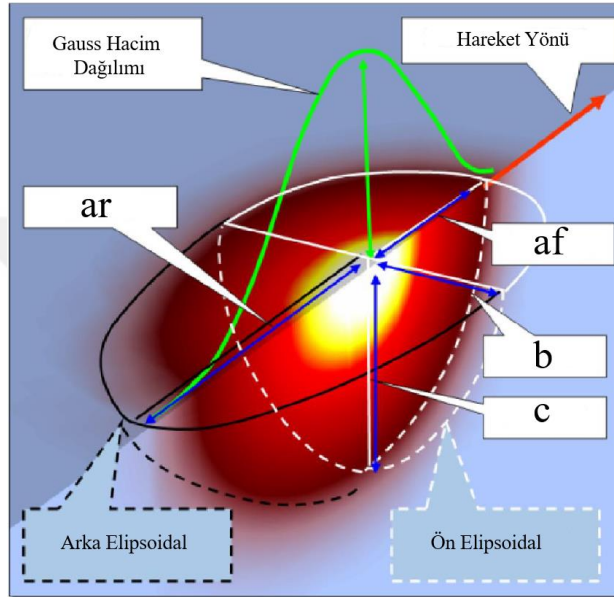
Şekil 2.7. Gauss ısı kaynağı modeli [16]

Gauss ısı kaynağı kaynak ark penetrasyon etkisini hesaba katmadığı için Goldak, Comlekci ve Bibby tarafından Çift Elipsoidal Güç Yoğunluğu Fonksiyonu olan daha gelişmiş ve anlamlı bir ısı kaynağı modeli türetilmiştir [15]. Isıyı erimiş bölgenin hacmi boyunca dağıtmaktadır. Bu model şekili bir çift elipsoid olarak tanımlanır, kaynağın ön yarısı bir elipsoid kaynağın kadranıdır ve arka yarısı ikinci bir elipsoid kaynağın çeyreğidir. Kaynak yolu boyunca güç yoğunluğu dağılımının Gauss olduğu varsayılır ve ısı kaynağına sabitlenmiş ve onunla birlikte hareket eden hareketli bir koordinatın verilmesi uygundur. Isı kaynağı üzerindeki hareketli referans çerçevesi, iş parçasına sabitlenen koordinatla ilgilidir.

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+v+(\tau-t)]^2}{c^2}} \quad (7)$$

x, y, z – koordinat sistemi; t - zamanlar; Q – ısı giriş hızı (W); a, b, c –elipsoidal boyut parametreleri (m); v – torç hızı (m/s); τ – zaman faktörü. Boyutsal parametreler aşağıda Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Goldak çift elipsoidal modeli, ark gücünü çift elipsoidin merkezinden radyal bir mesafeden bir Gauss fonksiyonu olarak dağıtır [17]. Kaynak havuzu şeklinin altı parametre eşleşen altı parametre ile tanımlanır.



Şekil 2.8. Goldak çift elipsoidal ısı kaynağı modeli [15]

Parametrelerden ar , af , kaynak havuzunun arka ve ön yarısının uzunluğuna karşılık gelmektedir. Parametre b , kaynak yüzünün yarısına eşittir ve c , kaynağın derinliğine eşittir.

Goldak çift elips modeli yaygın olarak kullanılır ve kaynak havuzu boyutlarıyla ilişkisi vardır. Diğer yandan modelin kaynak gücü ve kaynak hızı gibi kaynak parametreleri ile ilişkisi yoktur. Bununla birlikte, ısı kaynağı modelinin doğruluğunu artırmak için çalışmalar devam etmektedir. Goldak tarafından icat edilen yöntem, artık gerilme ve bozulma hesaplamalarında endüstriyel kullanım için en hızlı işlem süresine sahiptir [17].

2.8. Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli, mühendislikte çok kullanılan bir sayısal analiz yöntemidir. Sonlu elemanlar metodu fiziksel yorumundaki temel kavram, incelenen modelin sonlu elemanlar olarak adlandırılan basit geometride ayırık bileşenlere bölünmesidir. Sonlu bir sayı

açısından, her bir elemanın tepkisi serbestlik dereceleri şeklinde ifade edilebilir. Her biri, bir dizi düğüm noktasında bilinmeyen bir fonksiyon değeri veya fonksiyonları olarak karakterize edilir.

Kaynak modellenmesinde sıcaklık dağılımının değerlendirilmesi önemlidir. Sıcaklık alanı belirlendikten sonra mekanik analiz gerçekleştirilmek suretiyle çarpılma ve artık gerilme analizi etkileri belirlenir. Kaynak sırasında ısı girişi, yazılımda, gövde boyunca ısı akısı içeren eşdeğer ısı girişi ile modellenabilir. Kaynak simülasyonunun yakınsaması, yüksek sıcaklıklarda malzeme davranışı nedeniyle de genellikle zordur. Ayrıca, kaynak simülasyonu, kaynaklar ve ısıdan etkilenen bölge boyunca yeterli örgü yoğunluğuna sahip kaliteli örgü gerektirir. Bu, sonlu elemanlarda kullanılan mesh (ağ) üretiminde hem zaman hem de uzmanlık gerektirir ve genellikle modelde çok sayıda serbestlik derecesi kullanılır.

2.9. Kaynak Özetleri

Bai-Qiao Chen ve ark [18], Yaptığı çalışmada çelik plakalar için tek geçişli gaz tungsten ark kaynağının hem termal hem de plakaların artık gerilme ve deformasyon etkisini içeren yapısal etkileri incelemiştir. Numerik simülasyon için hareketli ısı kaynağının matematiksel bir modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak termal ve deformasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Konveksiyon katsayısının maksimum sıcaklık üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur, ancak soğutma aşamasında sıcaklık dağılımının kritik olduğu tespit edilmiştir.

Attarha ve Sattari [19], yaptıkları çalışmada tek geçişli GTA alın kaynak prosesi ile üretilen alın kaynak eklemelerinin ısı tesiri bölgesindeki kaynak sıcaklığı dağılımları k tipi termokupl eklenerek ölçülmüştür, St 37 Plakadaki sıcaklık dağılımları görmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada termokuplpların alın kaynak bölgesine çok yakın yapılandırıldığı ve soğuma eğrileri hassas bir şekilde gösterilmiştir.

Fuerschbach ve ark [20], 304 paslanmaz çeliğinin TIG kaynağında metal buharlaşmasının büyüklüğü ve kaynak havuzunun ölçüsel büyüklüğü araştırılmıştır. Deneysel sonuçları karşılaştırmak için üç boyutlu model kullanılmıştır. Buharlaşmanın, sıcaklığın çok yüksek olduğu lazer ışını altında küçük bir bölgede yoğunlaştığını göstermiştir.

Zhenkun ve ark [21], Bu çalışmada, Lazer kaynak 6061 alüminyum-lityum alaşımı parçaların artık gerilim dağılımı, kontur metodu ile ve sonlu elemanlar simülasyonu

kombinasyonu ile ölçülmüştür, artık gerilimin serbest kalmasından oluşan kaynatılmış parçaların kesme yüzeylerinin kontur deformasyonu 5 eksenli ölçüm cihazı tarafından ölçülmüştür. Deneysel ve nümerik sonuçlar benzer olduğu tespit edilmiştir.

Chen ve Soares [22], Sertleştirilmiş SM400A çelik plakaların metal inert gaz T-eklem plaka parçalarının ampere bağlı ve hıza göre sıcaklık dağılımı ve artık gerilme değişimi sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Malzeme modeli basitleştirilmiş ve kaynaklı çelik yapıların sonlu elemanlar analizinde verimli bir şekilde kullanılacak hale getirmişlerdir. Artık gerilmeler malzemenin akma sınırını geçmemiştir. Plakanın boyutu kaynak parametreleri yapısal tepkiler üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Korkmaz ve Meran [23] Mikro alaşımlı sıcak haddelenmiş ferritik XPF800 çeliğinin gaz tungsten ark kaynak kabiliyetini incelenmiştir. Isı girdisinden etkilenen kaynak geometrisi profili, mekanik özellikleri ve mikroyapı incelenmiştir. Kaynaklı eklem mikrosertliğine bakılmıştır. Kaynak bölgesinde tane yapıları daha büyük hale gelmiştir. Mikrosertlik sonucunda en yüksek sertlik kaynak bölgesi ve en düşük ısı tesiri altı bölgesi bulunmuştur. Optimum parametreler akım, kaynak hızı ve ısı girişi için 140 A 100 mm/dak olarak bulunmuştur.

Kumar ve Sinha [24], St37 karbon çeliğinin lazer kaynağı etkisinde mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. İnce taneler ısı tesiri altı bölgesinde bulunmuştur ve kaynak bölgesinde büyük taneler bulunduğundan, kaynaklı eklemde yeniden kristalleşmenin etkisi fark edilmiştir. Kaynaklı çekme numunesi ana metalden kopmuştur. Mikrosertlik sonuçları ana metalde 114 HV1, ısı tesiri altındaki bölgede, 165 HV1 ark bölgesinin mikrosertliği 192 HV1 çıkmıştır.

Singh ve ark [25], AISI 3041 çeliğini 'in gaz tungsten ark kaynağının sayısal ve deneysel sonuçları araştırması ile değişen ısı girdisi parametresiyle ile nüfuziyet derinliğini elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Gauss ısı akısı dağılımına sahip çift elipsoidal bir ısı kaynağı göz önüne alınarak GTA kaynak işlemini simüle etmek için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Termal geçişler ve penetrasyon derinliği açısından hesaplanan sonuçlar ölçülen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Deng [26], Düşük karbonlu ve orta karbonlu çeliklerde katı hal faz dönüşümünün kaynak kalıntı gerilimi ve distorsiyonu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Termomekanik 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, düşük karbonlu çelikteki son artık gerilimin ve kaynak bozulmasının katı hal faz dönüşümünden etkilenmediğini

görülmüştür. Orta karbonlu çelik için, nihai artık gerilmeler ve kaynak distorsiyonu martenzitik dönüşümden önemli ölçüde etkilenmiş görünmektedir. Düşük karbonda faz dönüşümünün ihmal edilmesi çelik kaynak yapısı sayısal modeli basit hale getirmiştir ve hesaplama süresini kısaltmıştır.

Bradac [27], Sonlu elemanlar yöntemi tabanı üzerinde çalışan kaynak alanındaki sayısal simülasyonlar, kaynak işleminin tasarımı ve optimizasyonu, deformasyonların ve bozulmaların tahmini ve kaynak metali için kullanılan 3 boyutlu gauss ısı akısı modeli ile çift elipsoidal modeli karşılatırmıştır. Termal etkilerinin dağılımlarını incelemiştir.



3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada St37-2 (EN10025-2:2019) çeliğinden hazırlanan test parçalarının yüzeyi Gaz tungsten ark(GTA) yöntemiyle kaynak ısı tesirinde bırakılmıştır. Elde edilen test numunelerinin çarpılma bölgeleri koordinat ölçüm makinesi (CMM) ile ölçülerek incelenmiştir. Numunelerin SEM ve Optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Mikrosertlik ve çekme ile birlikte mekanik testleri tamamlanmıştır.

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Laboratuvar testleri için günümüz sanayisinde en yaygın kullanım alanına sahip malzemelerden biri olan St37 çeliği kullanılmıştır. St37-2 (EN10025-2:2019) çeliğinin kimyasal birleşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. St37-2(EN10025-2:2019) çeliğinin kimyasal birleşimi

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti	Nb	N	Fe
0,081	0,027	0,26	0,025	0,015	0,140	0,150	0,022	0,001	0,49	0,023	0,001	0,001	0,007	Kalan

3.2. GTA Kaynak Düzenegi ve Deneysel Çalışma

Bu çalışma için St37-2 test parçalarının merkezine ısı girdisi uygulamasında Lincoln Invertec® su soğutmalı V205-T AC/DC’ TIG kaynak makinesi ve kaynak robotu kullanılmıştır (Şekil 3.1-Şekil 3.2). Elektrot olarak %1,5 lantan alaşımlı tungsten elektrot kullanılmıştır. [28](Ön denemelerde kaynak hızı 200 mm/dk ve 300 mm/dk, akım değerleri ise 100 A, 125 A ve 140 A olarak seçilmiştir. Test parçaları (300mm x 200mm x 3 mm) sac şeklinde düz levha olup 4 köşeden 30x30mm kare levhalar ile sabitlenmiştir (Şekil 3.3). Isı girdisine maruz bırakılan numune Şekil 3.4’te gösterilmiştir. Kaynak parametreleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Lincoln Invertec® V205-T AC/DC' TIG kaynak makinesi



Şekil 3.2. Kaynak makinesi robotu



Şekil 3.3. Deneysel numunenin sabitlenmesi



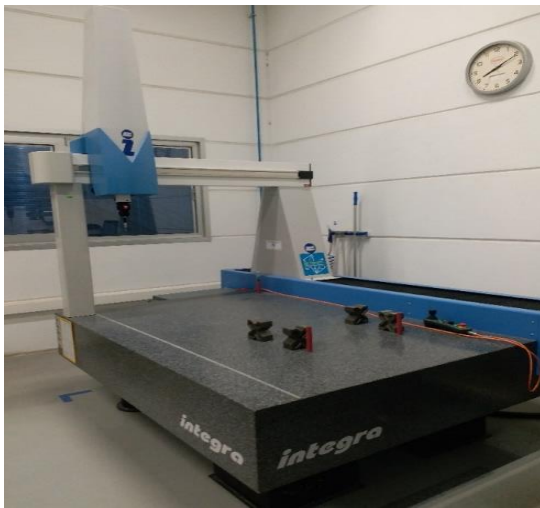
Şekil 3.4. Kaynak ısı tesiri altında numune (300 x 200 x 3 mm)

Çizelge 3.2. Kaynak Parametreleri

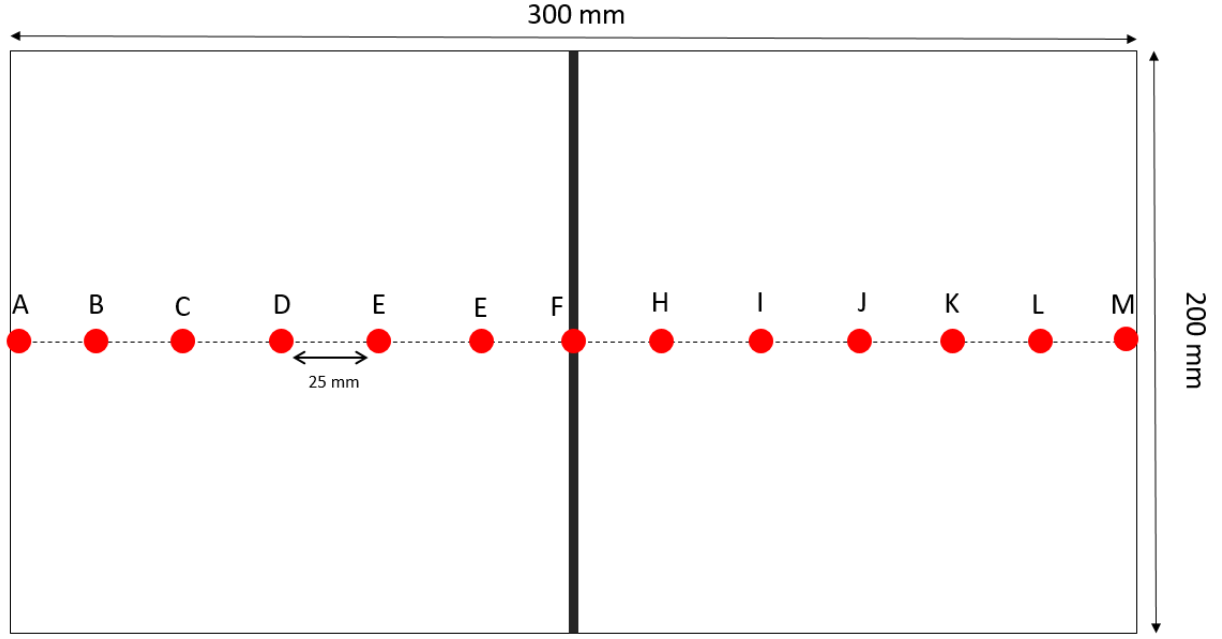
Parametreler	Değer	Birim
%1,5 Lantan alaşımli tungsten elektrot çapı	2,4	mm
Akım	100-125-140	A
Gerilim	14-15-15.6	V
Koruyu Gaz akış Hızı	14	l/dk
Elektrodun işlem bölgesinden uzaklığı	2	mm
Elektrod uç açısı	180	°
İşlem hızı	200-300	mm/dk

3.3. Numune Şekil Değişimi Ölçüm İşlemi

Kaynak makinesiyle ısı girdisine maruz bırakılan test numunelerinde meydana gelen şekil değişimlerinin saptanabilmesi numunelerde görsel kontrol yapılarak tek bir çarpılma türüne rastlandığı görüldü. Bunun için Integra marka koordinat ölçüm makinesi (Coordinate Measuring Machine) (CMM) (Şekil 3.5) kullanılmıştır. Numuneler kontrol edilerek 13 farklı noktadan işaretlenmiş ve bu noktalardan harf kodlaması yapılmıştır. Kodlama işlemi tamamlanan test numuneleri CMM cihazında belirlenen noktalardan ölçülerek şekil değişimleri saptanmıştır (Şekil 3.6).



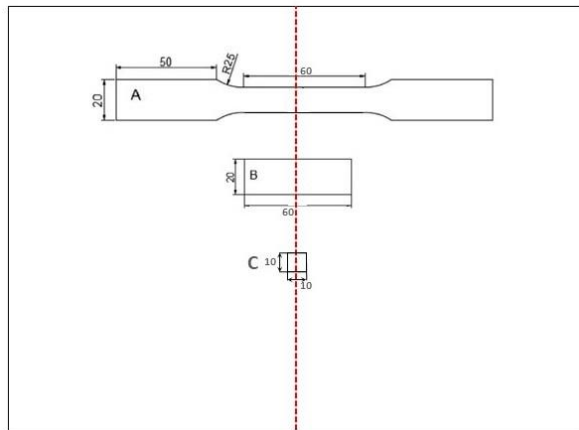
Şekil 3.5. İntegra CMM cihazı



Şekil 3.6. Test numuneleri ölçüm noktaları

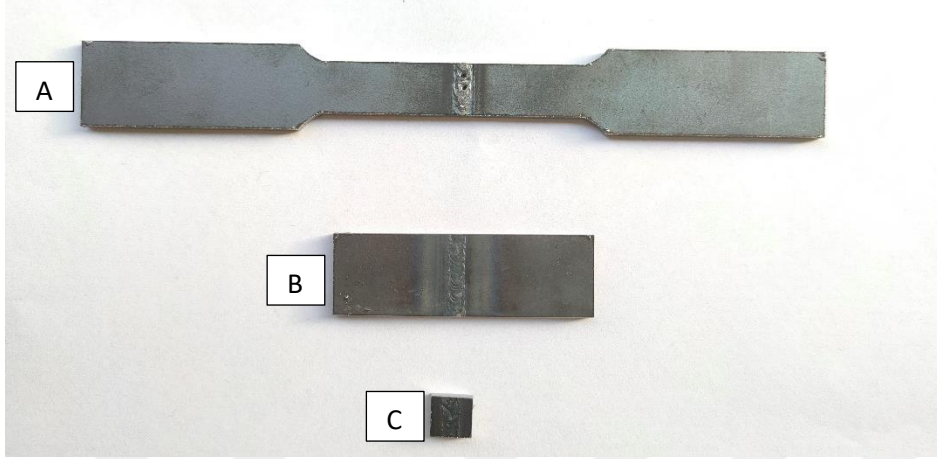
3.4. Mikroyapı İncelemeleri ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi için Numunelerin Hazırlanması ve İncelenmesi

Karakterizasyon ve çekme testi için hazırlanan numuneler (TS EN ISO 6892) kaynak noktası merkezde olacak şekilde lazer kesimde kesilmiştir. SEM numunesi ölçüleri kullanılacak olan mikroskop haznesine uygun olarak 10 x 10 mm ölçülerinde kesilmiştir. Kaynak bölgesi şekildeki kırmızı kesikli çizgidir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Karakterizasyon numunelerinin pozisyonları. A Çekme Numunesi, B Mikrosertlik Numunesi, C SEM Numunesi

GTA yöntemi ile kaynak yapılan numuneler lazer kesimden sonra ısı girdisi bölgesinin numune merkezlerinde kalıp kalmadığı ölçülerek kontrol edilmiş ve uygun numuneler test işlemlerine tabi tutulmuştur (Şekil3.8).



Şekil 3.8.Uygun A Çekme numunesi ,B Mikrosertlik numunesi ,C SEM numunesi

Numuneler üzerlerindeki lazer kesim izlerinin giderilmesi için Bulupol zımpara ve parlatma makinesi (Şekil 3.9) kullanılmıştır. Daha sonra sırasıyla 320, 600, 800 ve 1000 mesh'lik SiC zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve 3 mikrometrelilik elmas pasta kullanılarak numuneler parlatılmıştır. Parlatılan numuneler su ile yıkanmış ve hava ile kurutulmuştur.



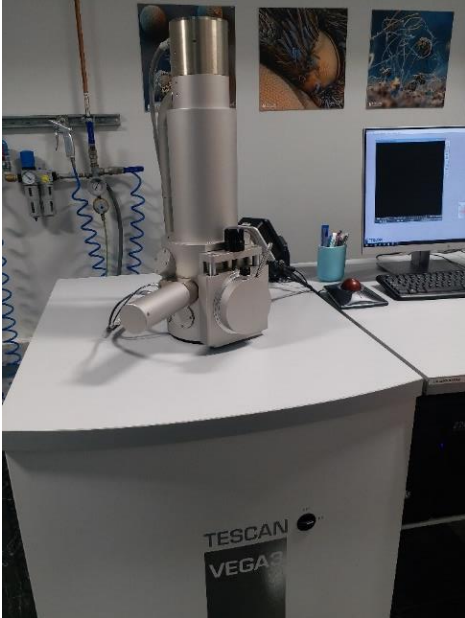
Şekil 3.9. Bulupol zımpara ve parlatma makinesi

Optik mikroskoptan görüntü alınabilmesi için numuneler 5 ml FeCl₃, 15 ml HCl ve 50 ml saf su ile hazırlanan çözelti ile 20-30 saniye arasında dağlanmışır. Son olarak numuneler sıcak hava ile kurutulmuş ve böylece standart metalografik numune hazırlama işlemleri tamamlanmıştır. Optik incelemeler Optika B-500MET marka optik mikroskop ile yapılmıştır. Her bir numuneye 5x, 10x, görüntüleri alınmış tane ve faz yapısı incelenmiştir.(Sekil 3.10)



Şekil 3.10. Optika B-500MET optik mikroskop

SEM - EDS analizleri ve mikroyapı TESCAN VEGA3 marka cihaz (Şekil 3.11) ile 2000x ölçeğinde incelenmiştir. SEM analizlerine göre numuneler üzerinden tane çapı ölçümleri alınarak aşağıda verilen denklem kullanılarak ITAB bölgesi, tane çapı, akma mukavemeti arasında ilişki ortaya konulmuştur.



Şekil 3.11. TESCAN VEGA3 cihazı

3.4.1. Tane Çapı Ölçümü

Tane büyüklüğünün mukavemete etkisi hesaplanmıştır. Bu çalışmada Hall-Patch eşitliği kullanılmıştır. SEM görüntülerinden yararlanılarak tane boyutlarının ölçüleri alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır.

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (8)$$

Burada σ_T akma mukavemeti, σ_0 dislokasyon hareketini başlatmak için gerekli gerilim, k pekleşme üssü (malzemeye bağlı sabit), d ise tane boyutudur.

3.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Test numunelerinin mikrosertliği MICROBUL 1000-DN Micro Vickers sertlik ölçme cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.12). Kaynak bölgesinden üst yüzeyinden 0,9 mm aralıklar ile 1000 gf yük altında 10 saniye beklenerek 10 farklı bölgeden parçanın sertliğine bakılmıştır. Mikrosertlik alınan noktalar kırmızı ile gösterilmiştir (Şekil 3.13).



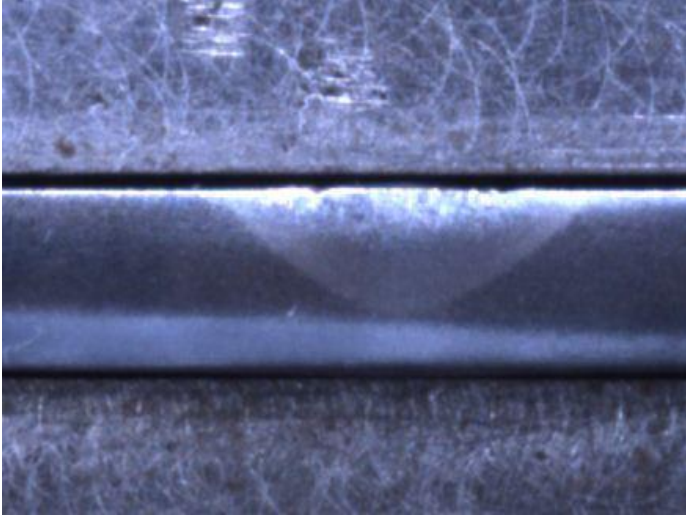
Şekil 3.12. MICROBUL 1000-DN Micro Vickers sertlik ölçme cihazı



Şekil 3.13. Mikrosertlik alınan numunenin pozisyonları

3.6. Kaynak Etkin Alanı Ölçümü

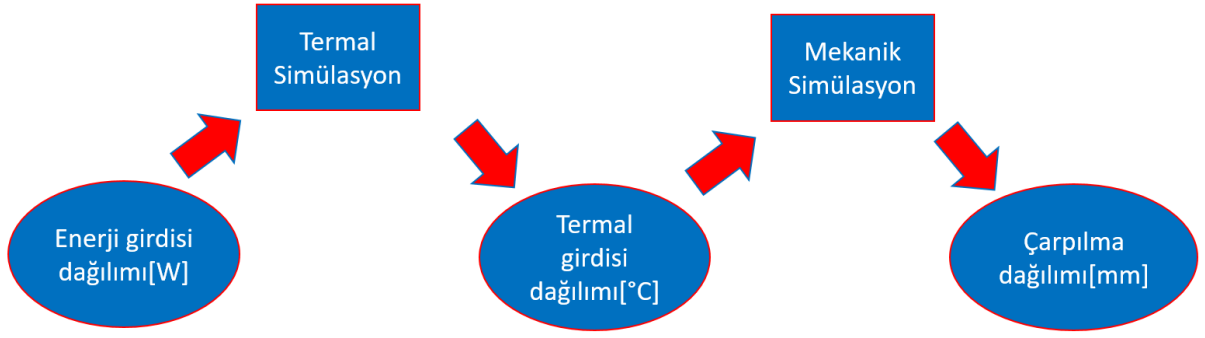
Sertlik numunelerinin uygulanan ısı girdisi sonucu oluşan ergime bölgesi ile bu bölgeye sınır ısı tesiri altındaki bölgenin sac kalınlığı boyunca etkinliğini görebilmek için Şekil 3.14’de sunulan nüfüzüyet kesit görüntüleri alınarak, elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar modeliyle elde ettiğimiz nüfüzüyet sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.14. Kaynak numunesinin yatay görünümü

3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termomekanik Analizi

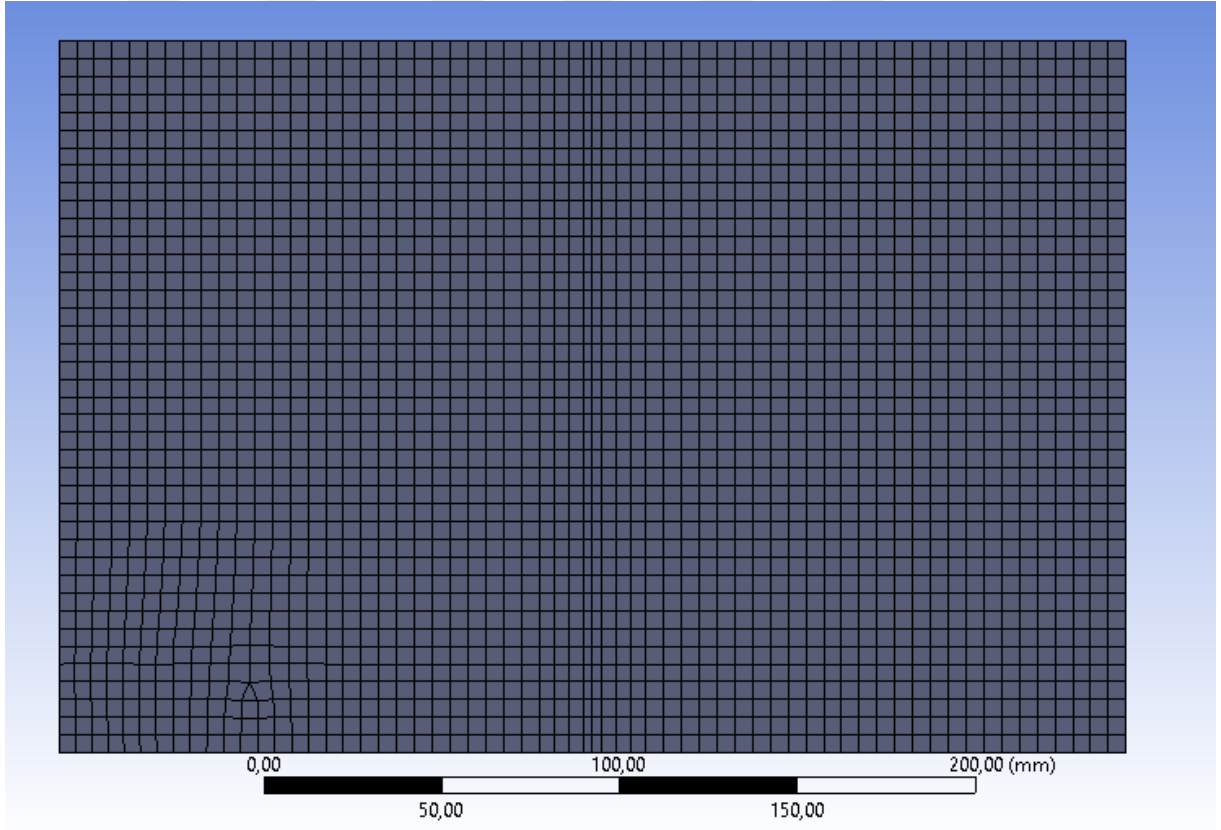
Kaynak işlemi sırasında sıcaklık dağılımını araştırmak için sonlu elemanlar analiz programı ANSYS kullanılarak analizler yapılmıştır. Sonlu Elemanlar modelinde 3 boyutlu bir model kullanılmıştır. Analiz iki bölümden oluşan etkileşimli bir analiz olup termal analiz ve statik mekanik analiz kısımlarını içermektedir. Termal analizde kaynak parametrelerine göre sınır koşulları ve değişken parametreler belirlenmiştir. Çalışmada termal analiz sonucunda elde edilen sıcaklık değişimleri, mekanik analizin termal yük girdisi olarak kullanılarak termal çarpılma ve artık gerilme sonuçları elde edilmiştir. Kaynak simülasyonu sistemin şeması aşağıdaki şekildeki gibi çalışmaktadır (Şekil3.15).



Şekil 3.15. Kaynak simülasyonu sistemi şeması

3.7.1. Mesh Yapısı

Kaynak parçasının mesh yapısı kare mesh olarak belirlenmiş. Kaynak merkezine yakın bölgelerde mesh boyutu küçültülmüş ve Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Kaynak numunesin mesh yapısı.

3.7.2. Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada St37-2 çeliği kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan malzeme değerleri sıcaklığa bağlı değişmektedir Çeliğin erime sıcaklığı 1535 °C kaynama sıcaklığı ise 3000 °C dir. Literatürden yararlanılarak malzemenin sıcaklığa bağlı yoğunluk, özgül ısı, iletkenlik değeri Çizelge 3.3’de verilmiştir [19].

Çizelge 3.3. Sıcaklığa bağlı St37-2 çeliğin ısı malzeme özelliklerinin değişimi

Sıcaklık(°C)	Yoğunluk(kg/m ³)	Özgül Isı(J/kg °C)	Isıl İletkenlik(J/m °C s)	Termal Genleşme Katsayısı(1/°C)
0	7950	444	45.9	1.2x10 ⁻⁰⁵
100	7880	472	45.9	1.2x10 ⁻⁰⁵
200	7830	503	43.4	1.3x10 ⁻⁰⁵
300	7790	537	41.4	1.3x10 ⁻⁰⁵
400	7750	579	38.9	1.4x10 ⁻⁰⁵
600	7660	692	33.6	1.45x10 ⁻⁰⁵
800	7560	837	28.7	1.48x10 ⁻⁰⁵
1200	7370	860	28.6	1.48x10 ⁻⁰⁵
1300	7320	863	29.5	1.5x10 ⁻⁰⁵
1500	7320	868	29.5	1.5x10 ⁻⁰⁵

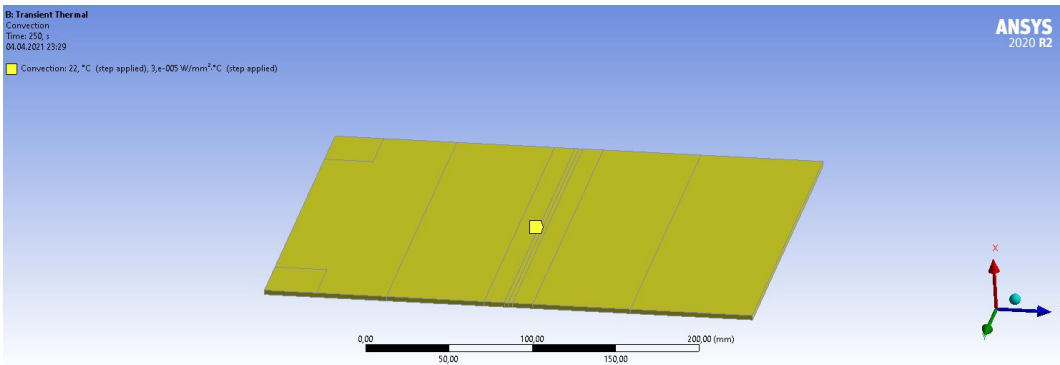
Analizde çarpılma etkilerinin daha doğru bir şekilde belirlenebilmesi için Bilinear izotropik sertleşme malzeme modeli kullanılarak elasto plastik davranış ve yüksek deformasyon etkileri dikkate alınmıştır. Modelde sıcaklığa bağlı bilinear izotropik sertleşme malzeme özellikleri St37-2 malzeme için literatürden yararlanarak belirlenmiş, deneysel çekme deneyi sonuçlarında elde edilen sonuçlarla revize edilmiştir (Çizelge 3.4) [19] .

Çizelge 3.4. Sıcaklığa bağlı St37-2 mekanik malzeme özelliklerinin değişimi[19]

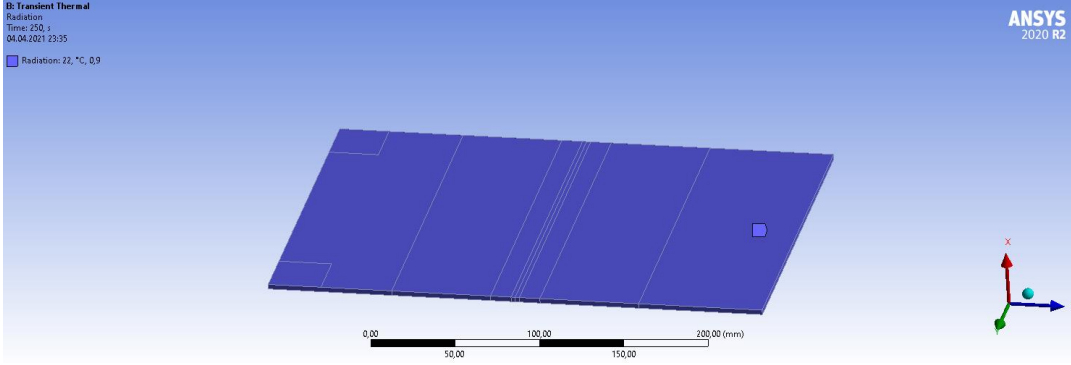
Sıcaklık(°C)	Young Modülü(Mpa)	Poisson Oranı	Akma Değeri(MPa)	Tanjant Modülü(MPa)
22	180000	0.3	348.85	656
150	170000	0.3	260	656
400	162000	0.3	220	656
600	135000	0.35	132	656
800	100000	0.4	40	656
1100	25000	0.45	30	656
1500	25000	0.45	18	656

3.7.3. Termal Analiz

Kaynak işlemi sırasında sıcaklık dağılımını araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi programı ANSYS kullanılarak zamana bağlı termal analiz yapılmıştır. Kaynak prosesi analiz süresi, kaynak hızı ve soğutma süreside düşünülerek 250 saniye olarak belirlenmiştir. Literatür araştırması sonucunda termal sınır koşulları belirlenmiş, St 37 malzeme için oda koşullarında konveksiyon katsayı değeri 30 W/m^2 (Şekil 3.17) ve yayılım oranı (radyasyon) 0.9 olarak parçanın tüm yüzeyine uygulanmıştır (Şekil 3.18) [18].

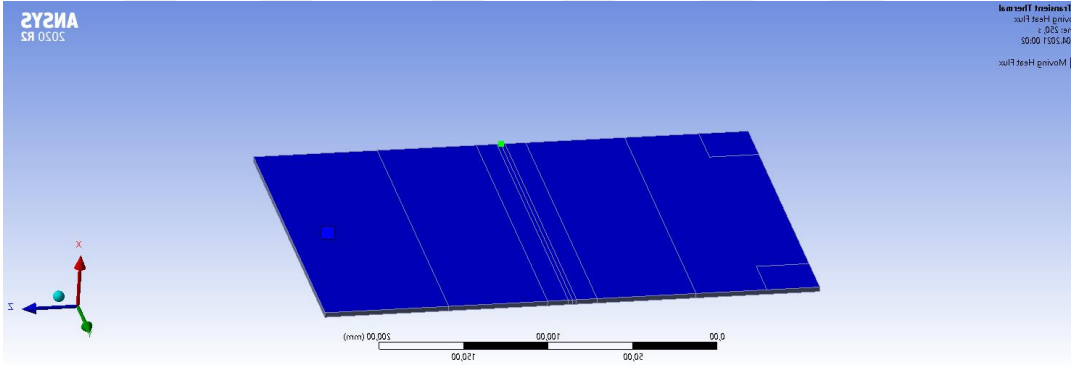


Şekil 3.17. Numunedeki Konveksiyon uygulanan yüzeyler



Şekil 3.18. Numunedeki yayılım oranı (radyasyon) yüzeyleri

Kaynak işleminin modellenmesinde hareket eden ısı akısı yöntemi kullanılmıştır. Bu sistemde kaynak başlangıç noktası yeşil noktayla tanımlanmış, gideceği yol ve kaynağın etki edeceği yüzey mavi olarak belirlenmiştir (Şekil 3.19).



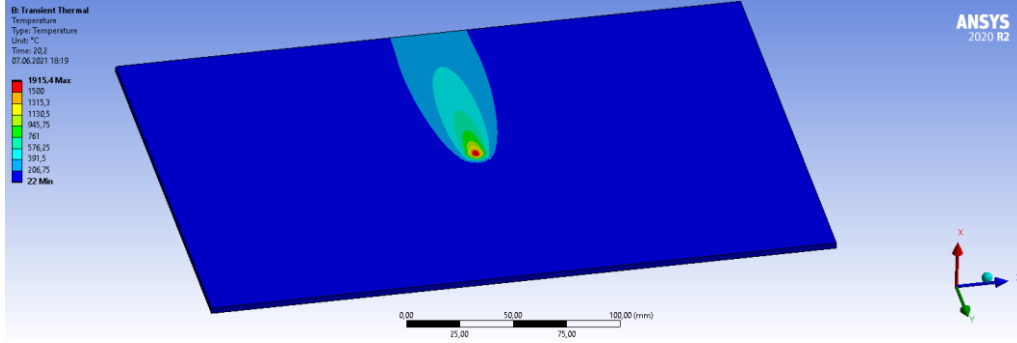
Şekil 3.19. Numunedeki kaynak noktası başlangıç noktası.

Hareketli ısı akısı formülü için ihtiyacımız olan hız, ısı akısı değeri, kaynak işleminin süresi, ısı akısının yarıçapı ve kaynak hızı değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.5. Hareket eden ısı akısı parametreleri

Kaynak Hızı	3.33-5 (mm/s)
Akım Işın Yarıçapı	2.8 (mm)
Kaynak Güç yoğunluğu	39.96-46.36-55.63 (W/mm ²)
Kaynak Süresi	40-60 (s)
Erime Sıcaklığı	1500 (C)

Bu sınır koşullarına bağlı olarak elde edilen termal sıcaklık gösterimi örneği Şekil 3.20’de gösterilmektedir.



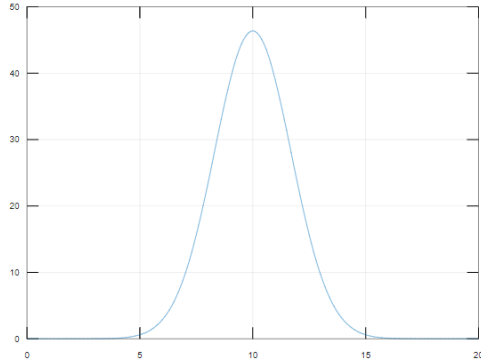
Şekil 3.20. Hareket eden ısı akısının gösterimi.

3.7.3.1. Hareket Eden Isı akısı Yöntemi

Bir ısı akışı dağılımı, uzayın fonksiyonu (x, y) ve zaman ile tanımlanır. Boyutsal olarak bu miktar, birim alan başına bir güçtür. Her kaynak teknolojisi, bir veya daha fazla matematiksel fonksiyonla yaklaşılabilen belirli bir güç dağılımına sahiptir. Şekil olarak parabolik artan ve merkezde bir tepe noktası ve mesafe ile katlanarak azalan değerler ile karakterize edilen Gauss dağılımı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

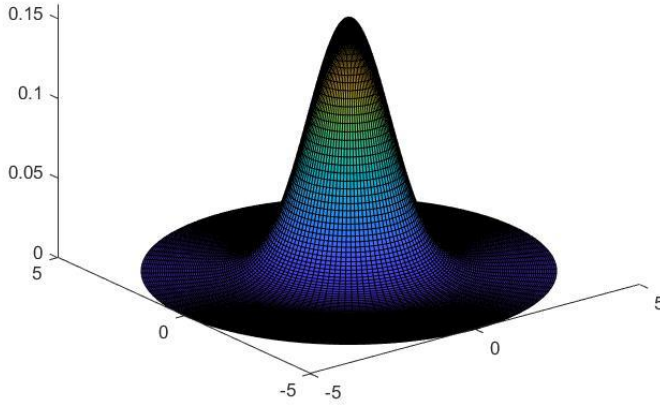
Bir düzlemdeki Gauss dağılımı aşağıdaki genel formüle sahiptir:

$$f_{G_yüzey} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$



Şekil 3.21. Bir düzlemdeki Gauss dağılımı

Şekil 3.21 grafiğinde gauss dağılımının tepe noktası kaynak güç yoğunluğunu belirtmektedir. X eksenindeki 10 koordinatı kaynak pozisyonunu göstermektedir ve hız ile doğru orantılıdır. Işın akım yarıçapı kaynak ışınımından etkilenen yüzey alanını ifade etmektedir. Bu, ışının yarıçapının 2 standart sapmaya eşit olduğu anlamına gelir. Bu mesafede güç, zirvenin % 13,5'idir. 3 boyutlu uzayda Gauss işlevi bu genel biçimi alır, Gauss dağılımının 3 boyutlu grafiği Şekil 3.22'de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Gauss dağılımının 3 boyutlu grafiği

Eğerki $x=r_y$ ve $\mu=0$ ise aşağıdaki formüle dönüşmüştür.

3 boyutlu düzlemdeki zamana bağlı Gauss dağılımı aşağıdaki genel formüle sahiptir:

$$f_{G_{Hacim}}(x, y, t) = \frac{\eta P}{2\pi r^2} e^{-\left(\frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2r^2}\right)} \quad (10)$$

Bu formülde x_0 ve y_0 lazer ışını merkezinin hareketli konumu, t zamanın işlevi, η verimi, P kaynak ışın gücü, r yarıçapı ifade etmektedir. Analizlerde; kalibrasyon işlemi sırasında deneysel olarak değerlendirilen genel verim 0.7 alınmıştır.

Bu çalışmaya göre EK1'deki kod çıktısı toplam gücü ifade etmektedir. Deneysel kaynak gücü ile eşitlenmeye çalışılmıştır.

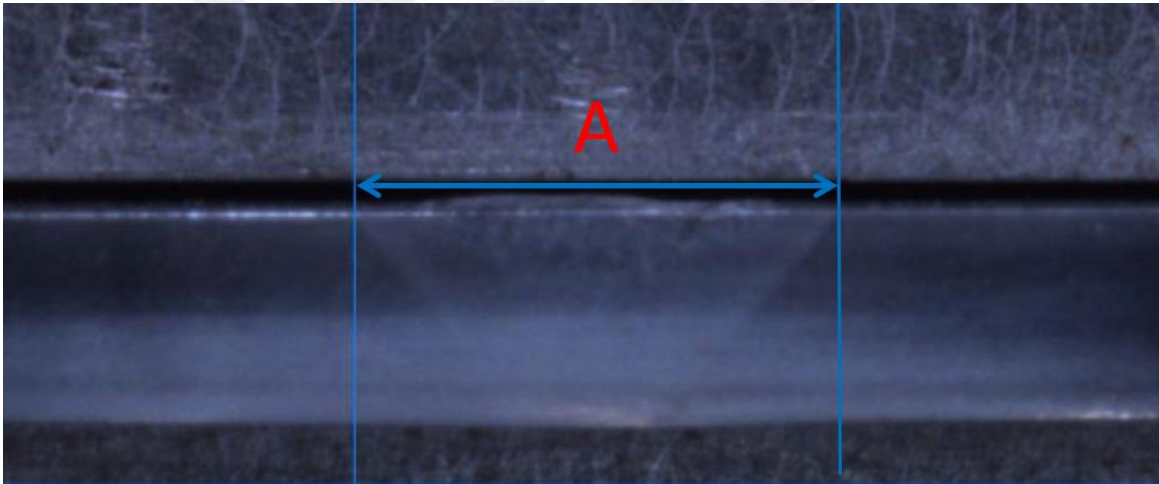
3.7.3.2. Birim Alana Düşen Güç Şiddeti ve Alan Hesabı.

Kaynak işlemi sırasında dikişe toplam ısı girdisi alansal ısı akışı q (W / mm^2) olarak ifade edilmektedir. Kaynak alanı sabit olarak ışın yarıçapına göre sabit olarak alındı ve aşağıdaki denklemle açıklanmaktadır.

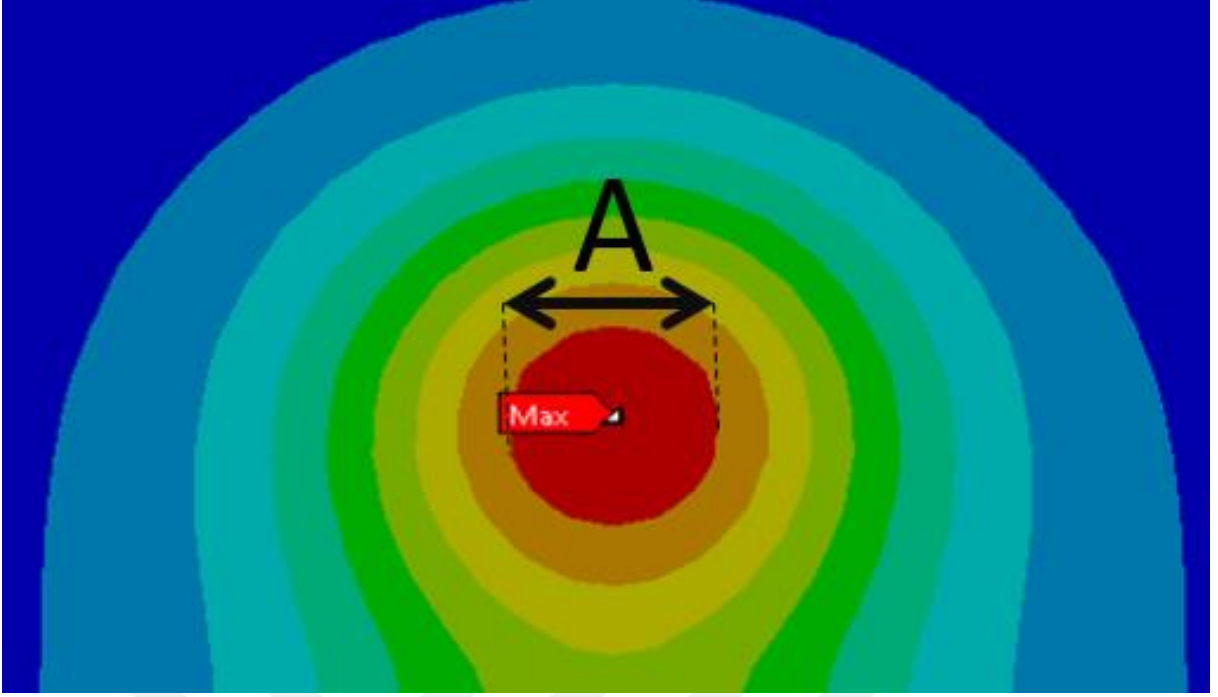
$$q = \frac{\eta UI}{A} \quad (11)$$

η - ark verimliliği, çoğunlukla % 70, U - voltaj (V), I - akım (A), A ısı etki eden alan (mm^2)

Kaynak etki eden ısı akısı alanı dairesel olarak alınmıştır (Şekil 3.23). A ölçüsünün çapına bakılarak simülasyondaki ergimiş alanın yanal uzunluğu eşitlenmiştir. Simülasyondaki kırmızı bölge $1500^\circ C$ üstü sıcaklığı göstermektedir (Şekil 3.24).



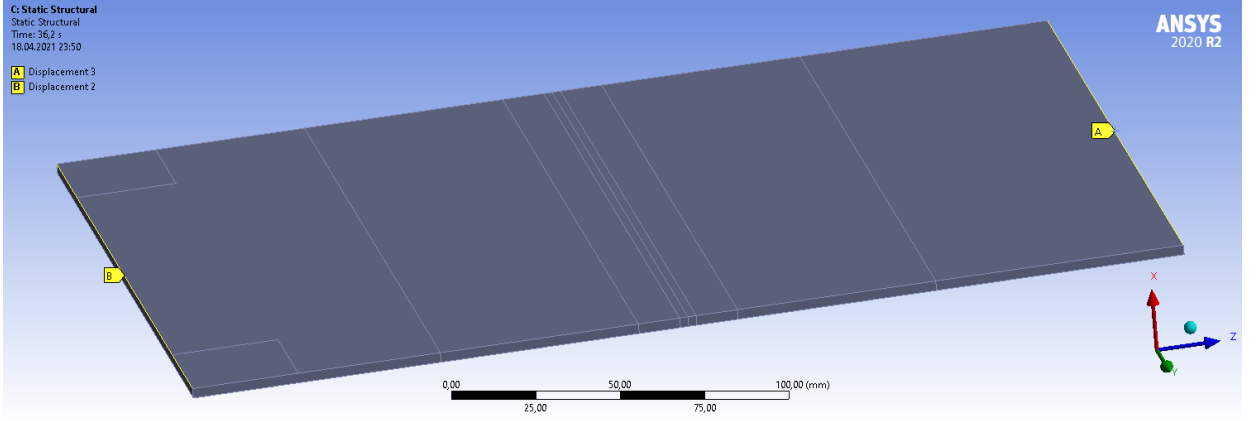
Şekil 3.23. Kaynak ısı tesiri etkisi alanın yanal ölçüsü.



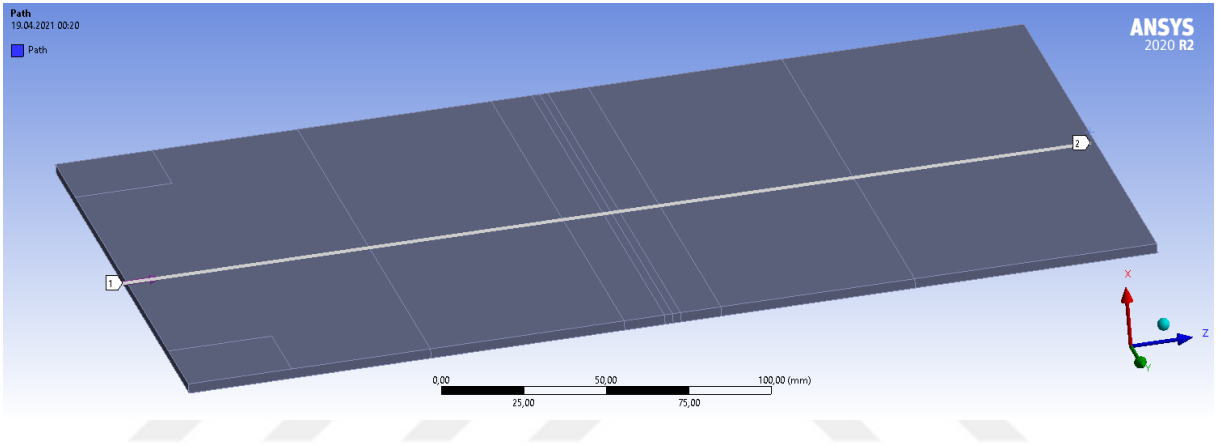
Şekil 3.24. A ölçüsünün simulasyondaki görünümü

3.7.3 Mekanik Analiz

Termal analiz sonucunda elde edilen sıcaklık değişimleri, mekanik analizin termal yük girdisi olarak kullanılarak mekanik analiz kısmına geçiş yapılmıştır. Modelde yüksek deformasyon etkileri ve Bilinear izotropik serleşme malzeme modeli aktive edilerek kaynak bölgesindeki çarpılma değerleri ve gerilmelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sınır koşulları olarak parçanın bir kenarı üst notlarından (x,y,z) doğrultularında hareketi kısıtlayacak şekilde, diğer kenar deney koşulları dikkate alınarak (y,z) doğrultusunda kısıtlanmıştır. Böylece deney koşulları dikkate alınarak plakanın x yönünde şekil değiştirmesine izin edilerek basit destekli sınır koşulları tanımlanmıştır (Şekil 3.25). Plaka 'z' doğrultusu boyunca kaynak bölgesini içerecek şekilde 'x' doğrultusundaki dikey çökme değerlerini ölçmek için analizde orta hat boyunca şekilde gösterilen doğrultu tanımlanmıştır (Şekil 3.26).

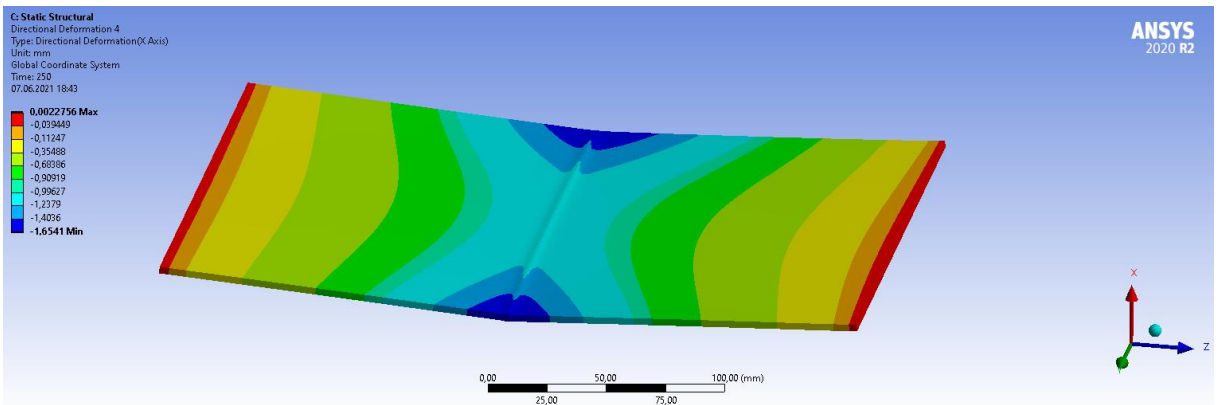


Şekil 3.25. Numunenin sınır koşulları



Şekil 3.26. Numunenin çökme hesaplamalarında kullanılan doğrultusu

Bu sınır koşullarına bağlı olarak elde edilen statik çökme sonuç örneği aşağıda gösterilmektedir (Şekil 3.27).



Şekil3.27.Numunenin artık gerilmeden oluşan çökme sonuç örneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

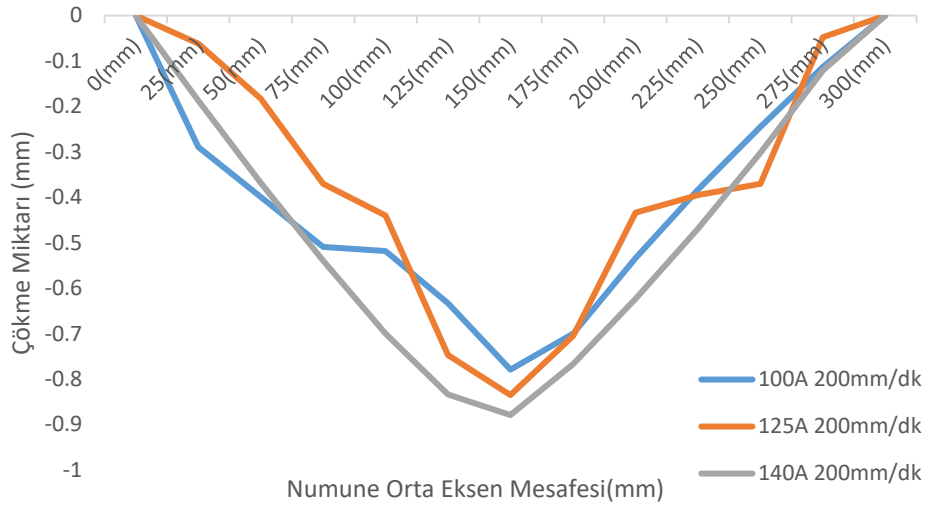
4.1 Kaynak Isı Girdisi Ölçüm Sonuçları

Kaynak işlem parametrelerinin belirlenmesi için 6 farklı numunenin hıza ve enerji ısı girdisine bağlı ısı akısı değişimi verilmiştir. Hazırlanan numunelerin torc mesafesi sabit alınmış, hıza bağlı kaynak bölgesindeki kaynak güç değişimleri incelenmiş, değişimler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

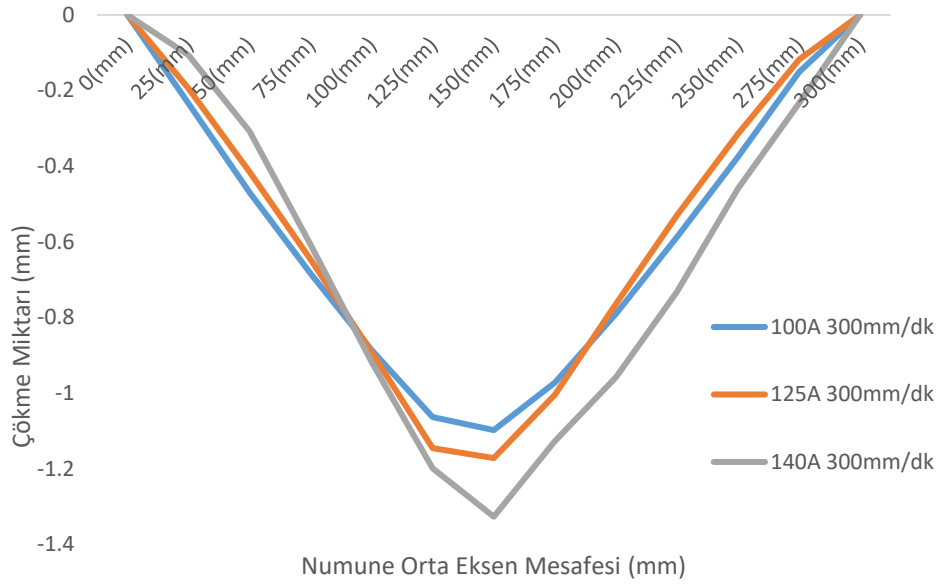
Çizelge 4.1. Kaynak işlem parametreleri

Numuneler	Akım(A)	Voltaj(V)	Makine kaynak hızı(mm/dk)	Torc Mesafesi(mm)	Kaynak verimi	Toplam Güç(W)
1	100	14	300	2	0.7	980
2	100	14	200	2	0.7	980
3	125	15	300	2	0.7	1312
4	125	15	200	2	0.7	1312
5	140	15.6	300	2	0.7	1534
6	140	15.6	200	2	0.7	1534

Test parçalarında meydana gelen çarpılmalar koordinat ölçüm makinesi (CMM) ile ölçülerek bulunmuştur. Ölçüm sonucunda oluşan parçaların çökme değerleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulmuştur. Parçaların çökme değerleri 200 mm/dk ve 300 mm/dk hızlarında akıma bağlı olarak değişmekte olduğu tespit edilmiştir. 300 mm/dk daha erken kaynak operasyonu bittiği için soğuma prosesi daha etkili olmuş çarpılma değeri artmıştır. CMM ile yapılan koordinat ölçüm noktalarındaki çökme sonuçları aşağıdaki ilgili şekillerde görülmektedir.



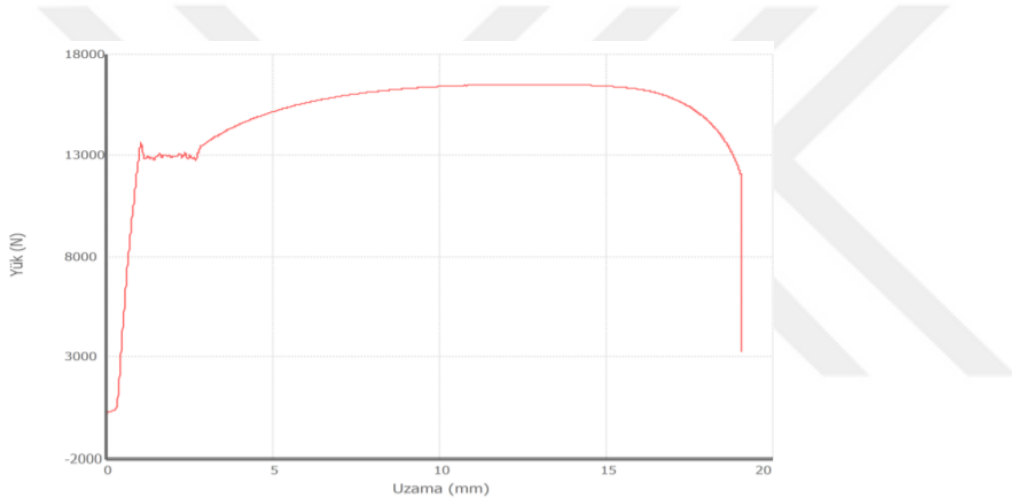
Şekil 4.1. 200 mm/dk kaynak hızında çökme değerleri



Şekil 4.2. 300 mm/dk Kaynak hızında çökme değerleri

4.1. Çekme Testi Sonuçları

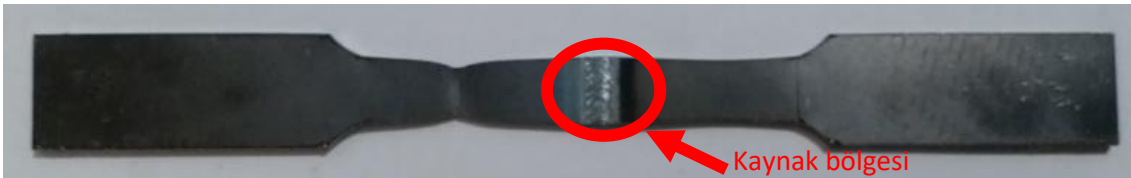
Kaynak işlemi uygulanmış ve uygulanmamış plakalardan 5'er adet çekme numunesi alınarak MTS çekme cihazı kullanılarak çekme testi uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinin ortalamaları alınmıştır. Şekil 4.3'de çekme testinden elde edilmiş yük uzama eğrisi verilmiştir. Kaynaksız numunelerde elde edilmiş ortalama çekme dayanımı 443.4 N/mm^2 , akma dayanımı 348.85 N/mm^2 ve uzama %30.25 dur (Şekil 4.3). Numunelerin hepsi oda sıcaklığında test edilmiş kaynaksız numuneler orta noktasından kırılmıştır (Şekil 4.4). Kaynaklı numunelerde parça ısı etkileyen bölgeden uzak bir bölgede kırılmıştır. Isı tesiri altındaki bölge kırılma veya çatlama gözlenmemiştir ve Şekil 4.5'deki gibi bütün numuneler aynı bölgeden kırılmıştır.



Şekil 4.3. St37-2 sac çekme testinde elde edilen yük-uzama eğrisi



Şekil 4.4.Çekme numunesi sonucu



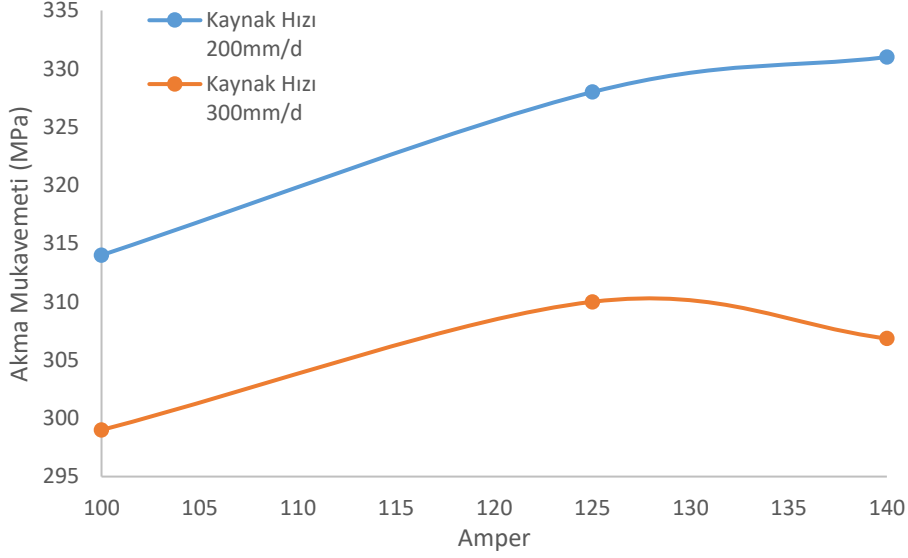
Şekil 4.5. Kaynaklı numunenin çekme numunesi sonucu

Kaynak ısı tesiri altında tüm numunelerde mukavemet ve yüzde uzamada düşüşler gözlenmiştir. Parçaların akım değerlerine bağlı ortalama çekme testi sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelgede en alt kısımda kaynak yapılmamış saçların mekanik özellikleri verilmiştir.

Bu sonuçlara göre 200 mm/dk hız ile kaynak yapılan numunelerin çekme, akma dayanımları daha yüksek çıkmıştır. 300 mm/dk hız ile kaynak yapılan numunelerin kopma uzaması daha yüksek çıkmıştır. Kaynak hızına ve akım miktarına bağlı parçaların sünekliğinin değiştiği görülmüştür (Şekil 4.6).

Çizelge 4.2. Akım değerlerine bağlı çekme testi sonuçları

Numuneler	Akım(A)	Voltaj(V)	Kaynak hızı(mm/dk)	Çekme Dayanımı(R _m) (N/mm ²)	Akma Dayanımı(R _e) (N/mm ²)	%Kopma Uzaması
1	100	14	300	401	299	24.61
2	100	14	200	396	314	23.60
3	125	15	300	401	310	24.85
4	125	15	200	419	328	23.94
5	140	15.6	300	404	307	25,60
6	140	15.6	200	419	331	22.35
Yatay	*	*	*	442	344	30.20
Dikey	*	*	*	441	351	30.65



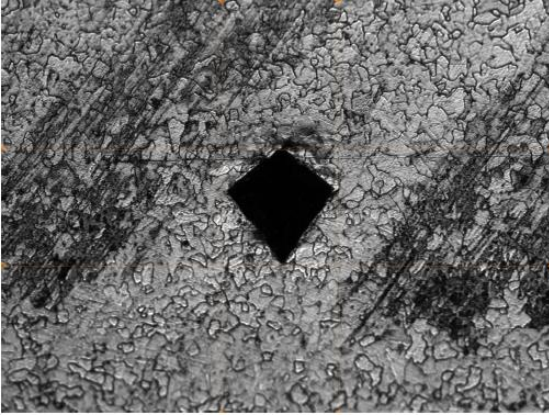
Şekil 4.6. Kaynak hızı, amperaj, akma mukavemeti değişimi

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.6 bakıldığında kaynak amperajı arttıkça numune mukavemetlerinin arttığı kaynak hızı düştükçe mukavemetin arttığı yüzde uzamanın azaldığı görülmüştür.

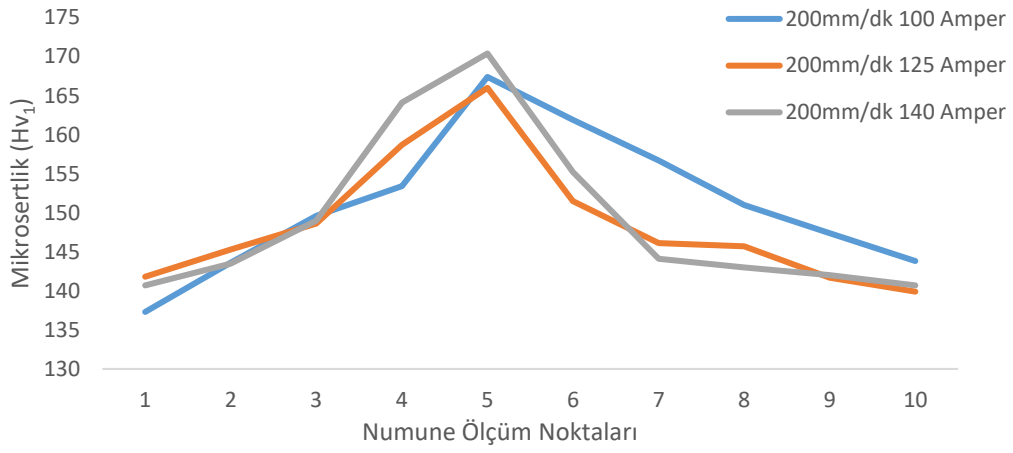
4.2 Mikrosertlik Sonuçları

Sertlik numuneleri parlatma ve zımpara işleminden sonra dağlanmış ve sertlik cihazında on ayrı noktadan HV₁ vickers sertliklerine bakılmıştır (Şekil 4.7). Hıza ve akıma bağlı HV₁ vickers sertlik değerleri sonuçları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir. Sertlik sonuçları incelendiğinde en yüksek sertlik 185 HV₁, 300 mm/dk, 100A akım değerleri için kaynak bölgesinde elde edilmiştir.

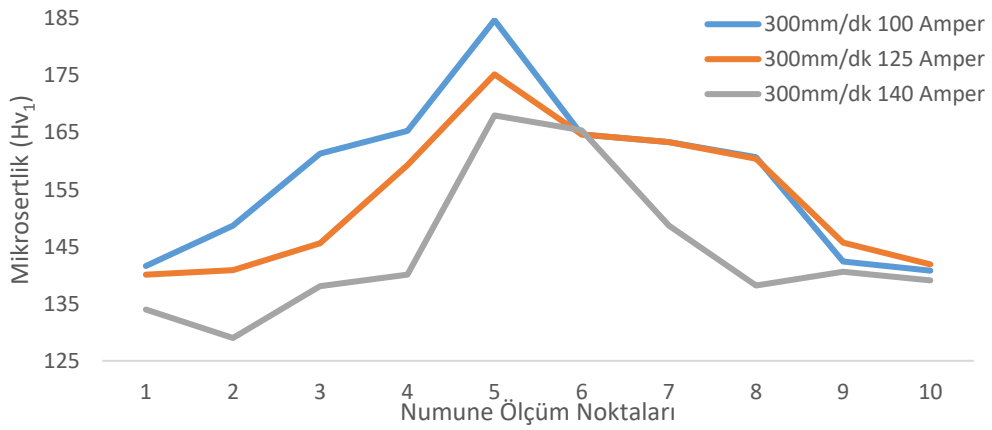
Kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgelerin tümü sertlik değeri 135 HV₁ değerinden yüksek çıkmıştır. Bu mikrosertlik sonuçları çekme numunelerimizin ısı verilen bölgelerden neden kopmadığını göstermektedir. Isı etkisi dışındaki bölgede sertlik düşük çıkmıştır. St32-2 ana metalin ortalama sertliği 135 HV₁ ölçülmüştür.



Şekil 4.7. Mikrosertlik ölçümü görüntüsü

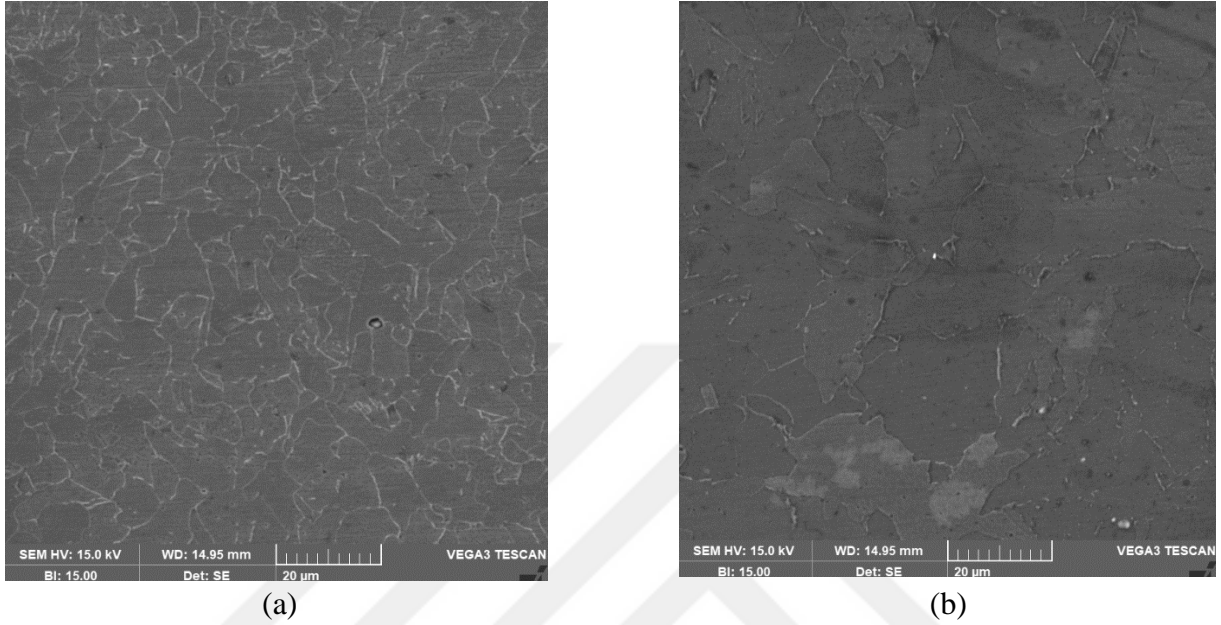


Şekil 4.8. 200 mm/dk kaynak hızında Hv1 Sertlik Ölçüm Değerleri



Şekil 4.9. 300 mm/dk kaynak hızında Hv1 Sertlik Ölçüm Değerleri

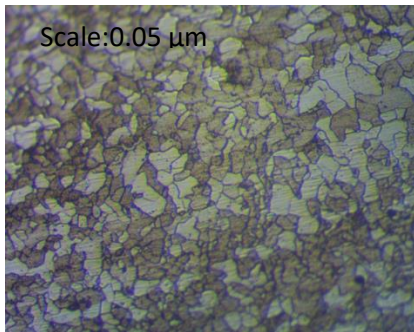
200 mm/dk ve 300 mm/dk kaynak hızlarında incelenen numunelerin sertlikleri karşılaştırıldıklarında 200 mm/dk kaynak hızlarında kaynak ve Itab bölgesinde aşağıdaki şekillerde gösterilen tane büyümesi sebebiyle sertlik düşüşleri yaşanmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Tane Yapısı SEM Görüntüleri (a)Numune 1 100 A 300 mm/dk ITAB Bölgesi (b) Numune 2 100 A, 200 mm/dk ITAB Bölgesi

4.2. Tane Çapı Ölçümleri

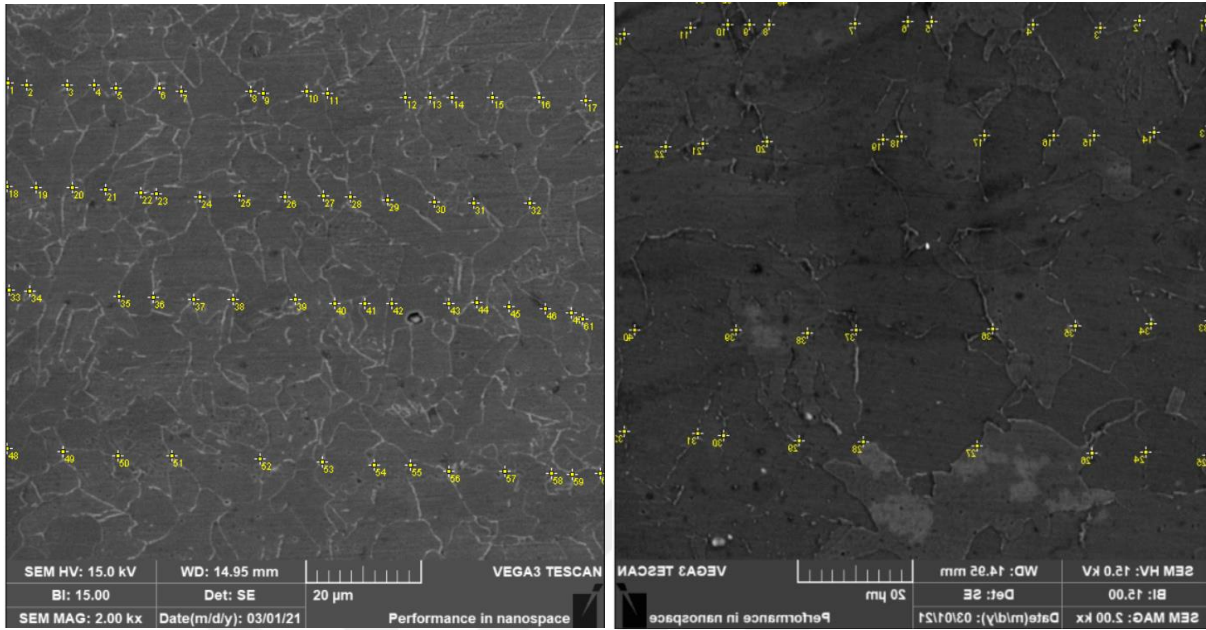
Kaynak işlemi uygulanmamış yukarıda optik görüntüsü verilen numunede ortalama tane çapı 12 mikron ölçülmüştür. Kaynak işlemi tane görüntüsü Şekil 4.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Kaynak işlemi uygulanmamış numune tane görüntüsü (10x)

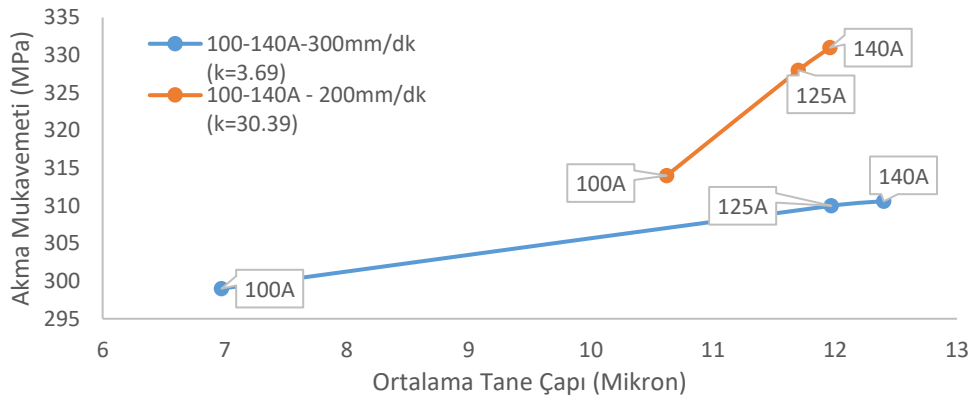
Tane ölçümlerinde SEM ölçümlerinden ve Imagej programından yararlanılmıştır. Ortalama tane ölçümlerine ve çekme testlerinden elde edilen akma mukavemeti sonuçlarına

göre tane çapı mukavemet ilişkisi Hall-Petch denklemleri yardımıyla ortaya konulmuştur. Aşağıdaki resimlerde ortalama tane çapı ölçümleri gösterilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Tane Çapı Ölçümü (a) 100 A 300 mm/dk ITAB Bölgesi (b) 100 A, 200 mm/dk ITAB Bölgesi

Çekme sonuçları ve numune tane çapı ölçümlerinden yararlanılarak aşağıda grafikte belirtilen Hall-Petch katsayısı elde edilmiştir (Şekil 4.13).



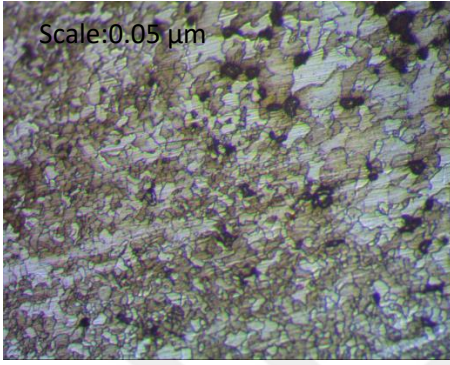
Şekil 4.13. Ortalama tane çapı akma mukavemeti ilişkisi

Şekillerden görüldüğü gibi amperaj ve kaynak hızı mukavemet artışında önemli bir etkiye sahiptir. Kaynak amperajı arttıkça tüm numunelerde akma mukavemetinde ve tane

aplarında görece bir artış gözlenmekte, bu artış 200mm/dk kaynak hızı için daha yüksek bir oranda gerçekleşmektedir.

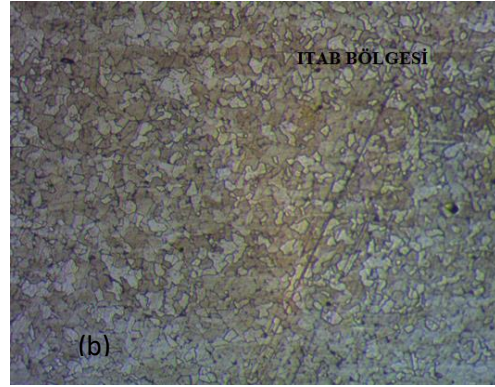
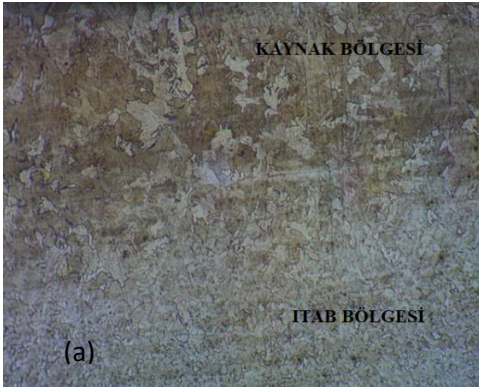
4.3. Mikroskobik İnceleme

Kaynak ve ITAB bölgesinde ısı tesirinde yönlenmiş tane yapısı gözlenmiş, mikro çatlaklara rastlanmamıştır (şekil 4.14).

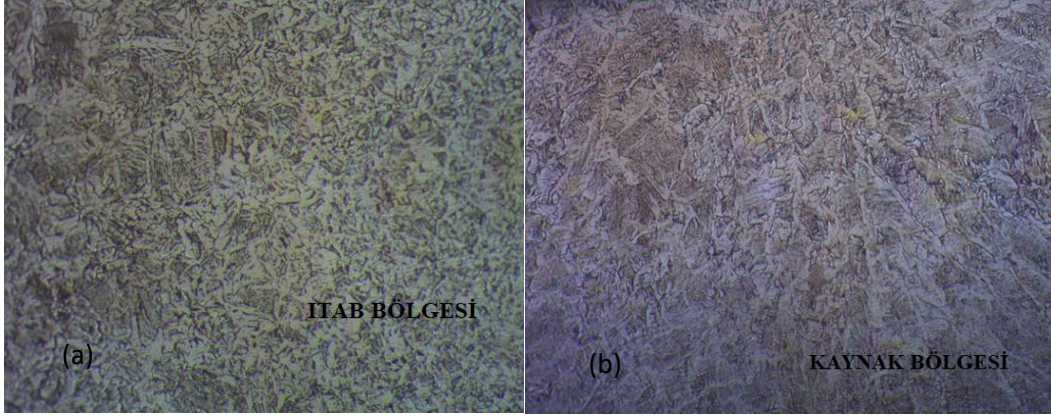


şekil 4.14. Numune 100 A 300 mm/dk (10x) optik görüntü

Kaynak bölgesinde ampere bağlı olarak aşağıda şekillerde gösterilen okelmiş yapılar da artış gözlenmiştir. Bu yapılar 200 mm/dk kaynak hızında daha fazla oluşmuştur. Bu yapıların kaynak mukavemetini arttırdığı sünekliği düşürdüğü düşünülmektedir (şekil 4.15), (şekil 4.16).



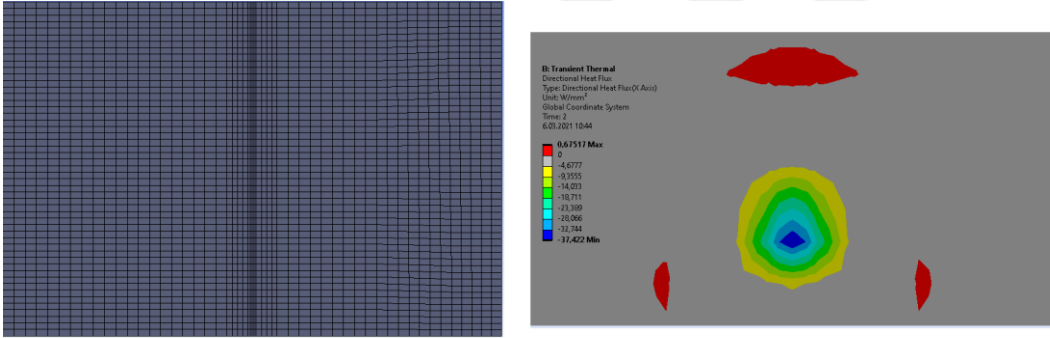
şekil 4.15. Numune optik görünüm (a)140 A 300 mm/dk (5x) (b) 140 A 300 mm/dk (10x)



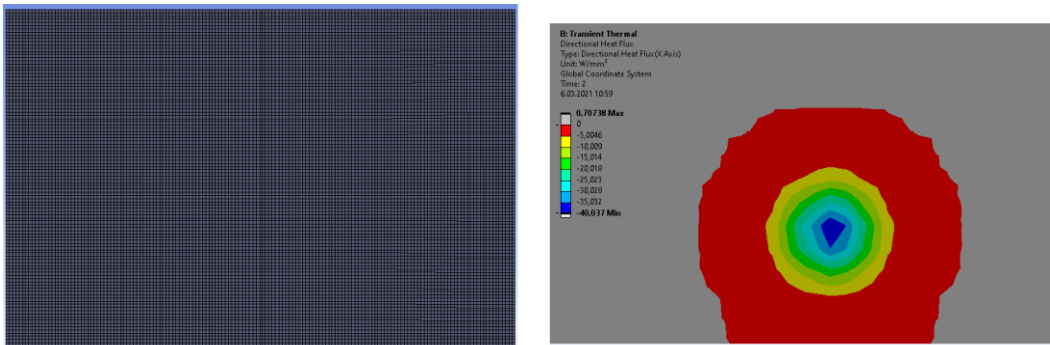
Şekil 4.16. Numune optik görünüm (a) 140 A 200 mm/dk (10x) (b) 140 A 200 mm/dk (5x)

4.4. Termal Analizde Gauss Isı Akısı Modeli ve Mesh Analizi Sonuçları

Çalışmanın bu kısmında öncelikle sonlu elemanlar ağının optimizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla mesh boyutu artışına bağlı olarak termal analizde en önemli parametreler olan ısı akısının etkinlik alanının değişimleri incelenmiştir (Şekil 4.17), (Şekil 4.18).

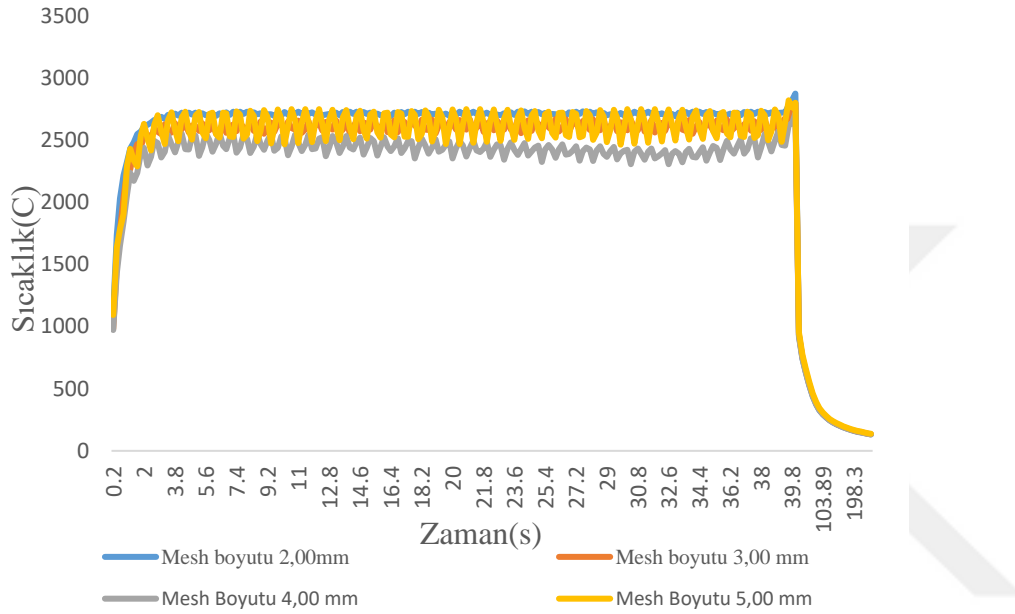


Şekil 4.17. 5 mm mesh boyutu için Isı akısı etkinlik alanının 140 A için değişimi



Şekil 4.18. 2 mm mesh boyutu için ısı akısı etkinlik alanının 140 A için değişimi

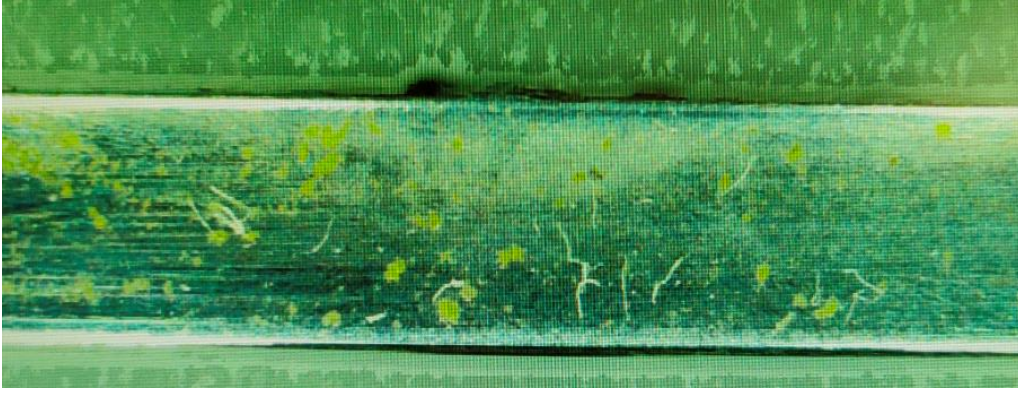
Şekillerden de görüldüğü gibi ısı akısı etkinlik alanı mesh boyutu arttıkça artmakta hassasiyet arttıkça giriş ısı akısı değeri 39.6 W/m^2 değerine yaklaşmaktadır. Aşağıda termal analiz sırasında mesh boyutuna bağlı olarak elde edilen sıcaklık değişimleri verilmiştir. Kaynak sırasında mesh boyutuna bağlı sıcaklık değişimleri incelendiğinde sapma oranının %3-12 arasında değiştiği gözlenmiştir. Isı akısı sonuçları, sıcaklık değişim sonuçları ve analiz çözümü süresi dikkate alınarak mesh boyutu 3mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.19).



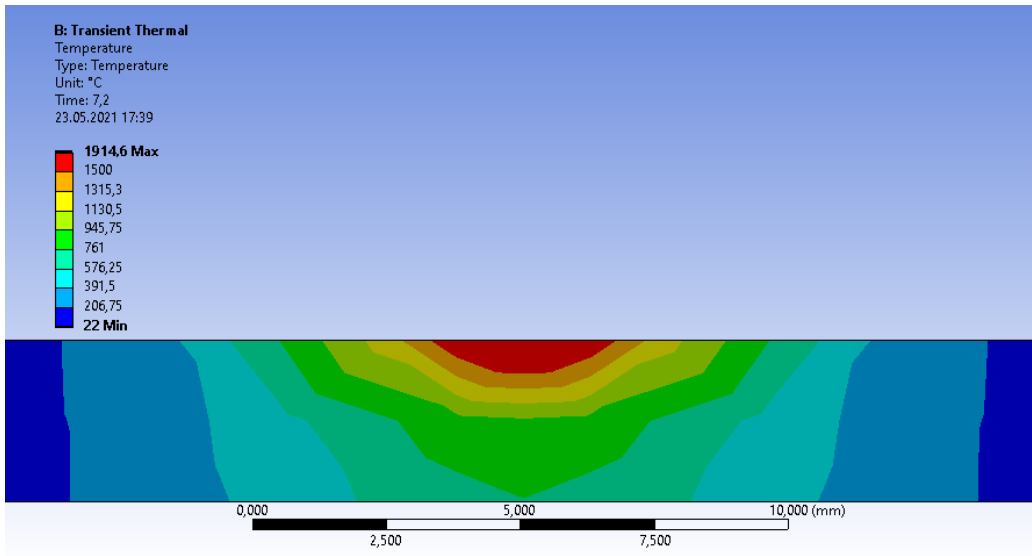
Şekil 4.19. Ağ yapısı mesh boyutuna bağlı sıcaklık değişimi

4.5. Nüfuziyet Derinliği İncelemesi

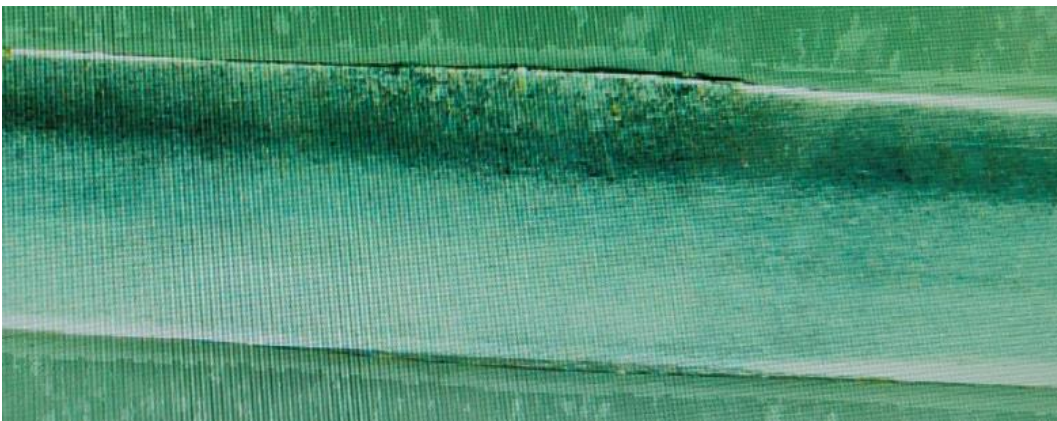
Çalışmanın bu kısmında deneysel elde edilen mikroskop numularının nüfuziyet ergiyen kaynak bölgesi derinliği yatay ve dikey ölçüsü belirlenmiştir. Sınır koşulları tanımlanmış sonlu elemanlar modelinde termal analiz sonucunda $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ üstü ergiyen bölge kırmızı olarak belirtilen bölgenin yatay ve dikey ölçüleri alınmıştır. Akım gücü ve kaynak hızına bağlı olarak belirlenmiş elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 4.20-4.31).



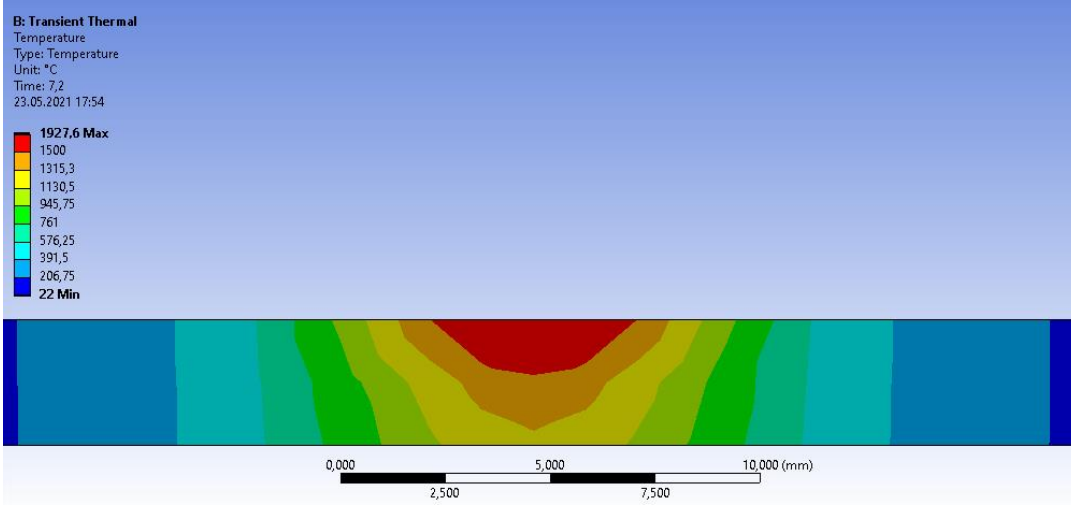
Şekil 4.20. Deneysel 100 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



Şekil 4.21. Nümerik 100 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



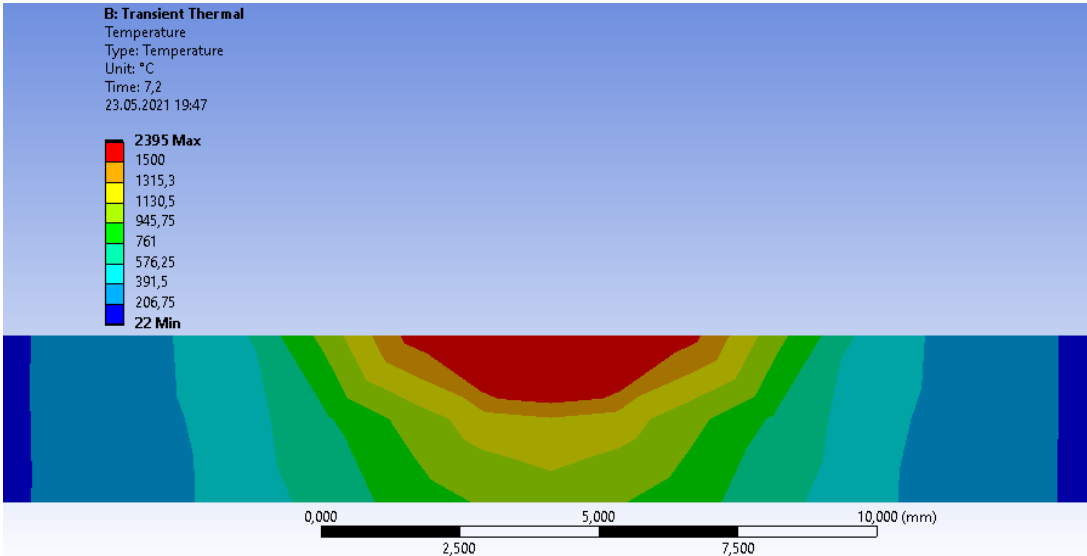
Şekil 4.22. Deneysel 100 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



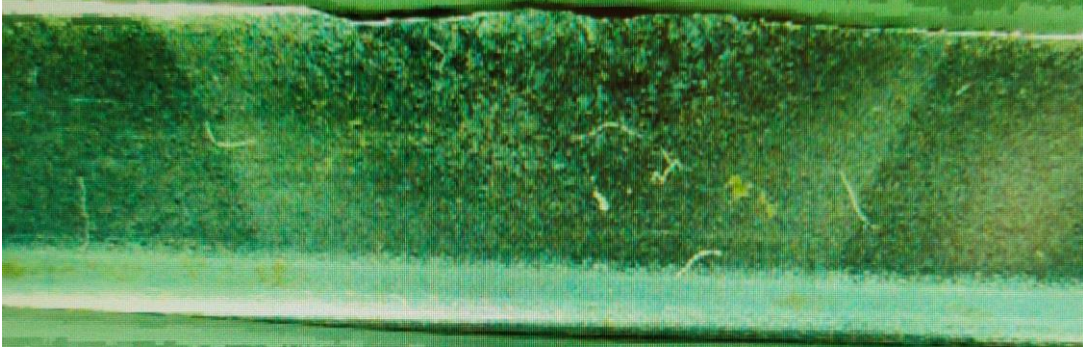
Şekil 4.23. Nümerik 100 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



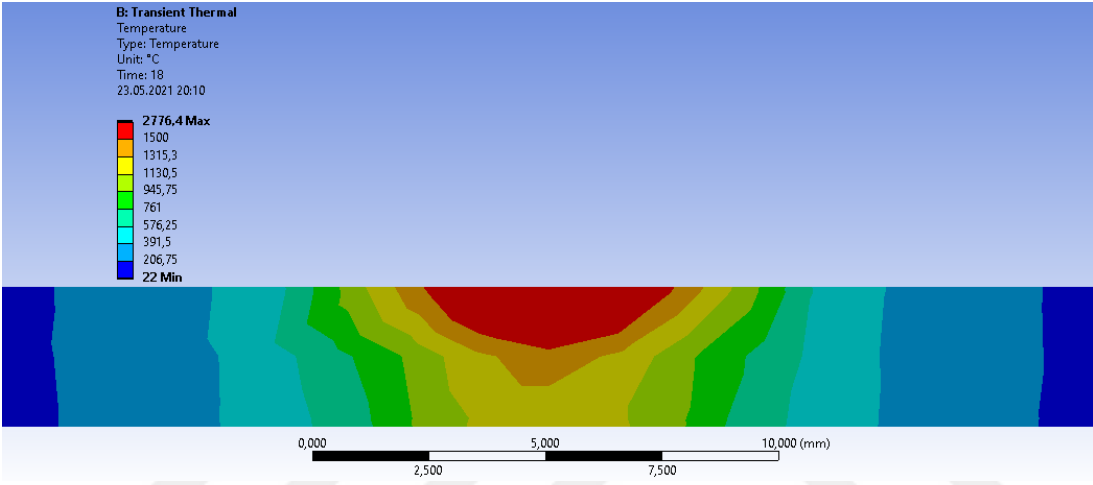
Şekil 4.24. Deneysel 125 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



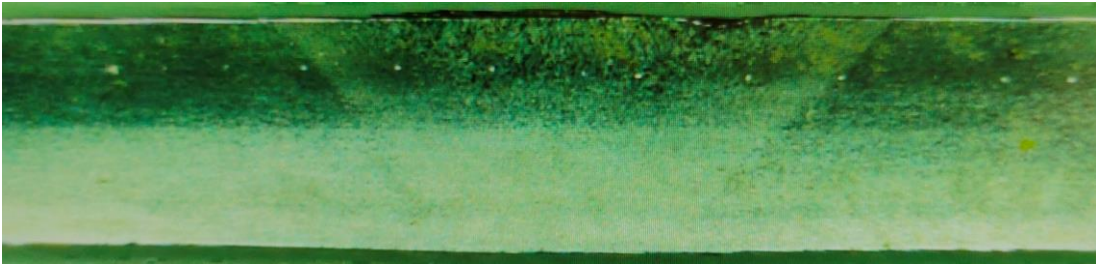
Şekil 4.25. Nümerik 125 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



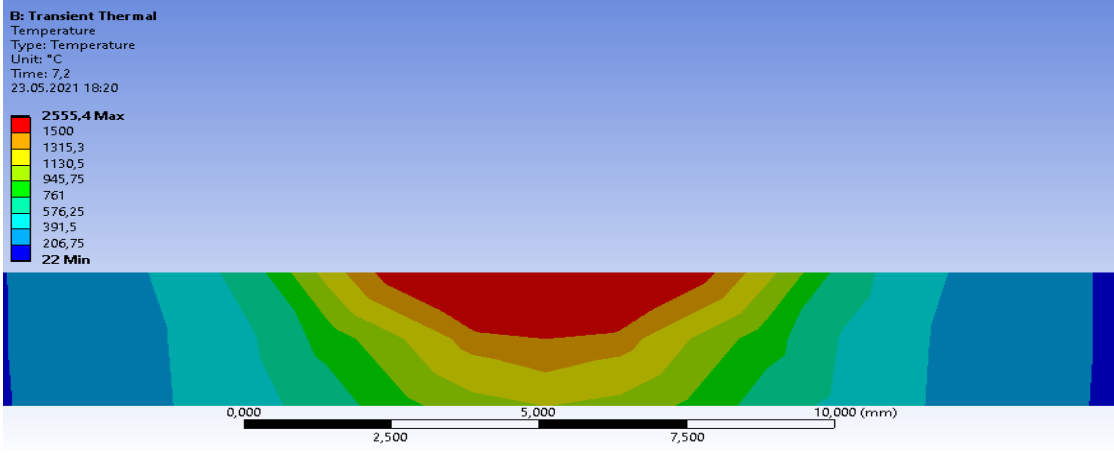
Şekil 4.26. Deneysel 125 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



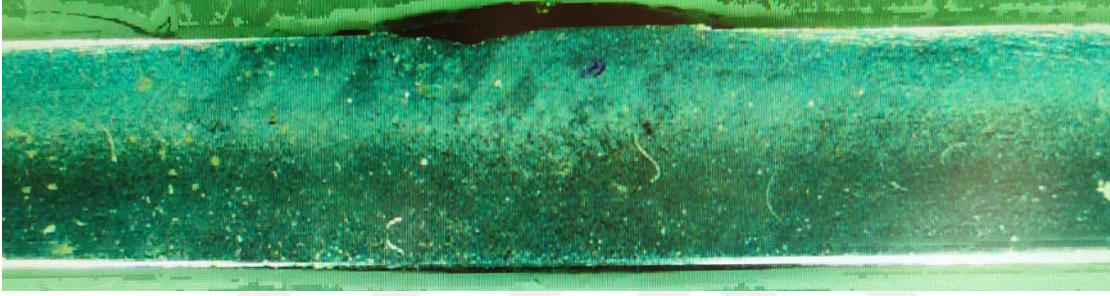
Şekil 4.27. Nümerik 125 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



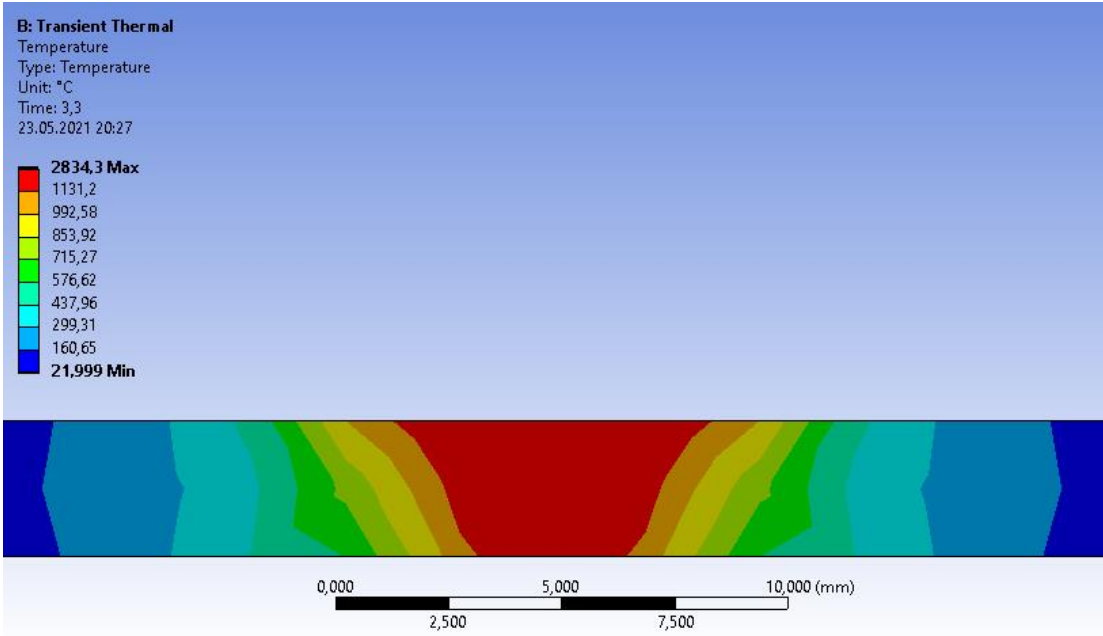
Şekil 4.28. Deneysel 140 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



Şekil 4.29. Nümerik 140 A 300 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği

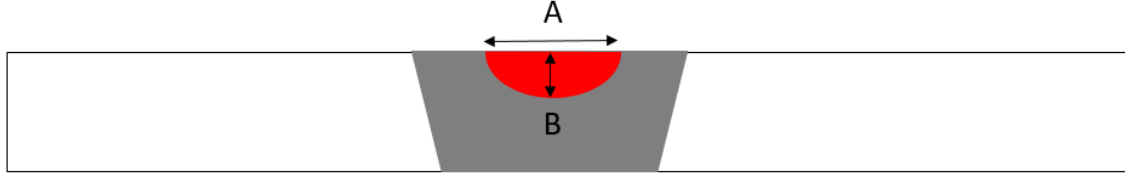


Şekil 4.30. Nümerik 140 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği



Şekil 4.31. Deneysel 140 A 200 mm/dk için termal analiz nüfuziyet derinliği

Şekillerden görüldüğü gibi kaynak amper seviyesini arttıkça nüfuziyet artmakta, kaynak hızı düşüktüçe kaynak nüfuziyet bölgesi genişlemektedir. Analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir (Çizelge 4.3), (Şekil 4.32).



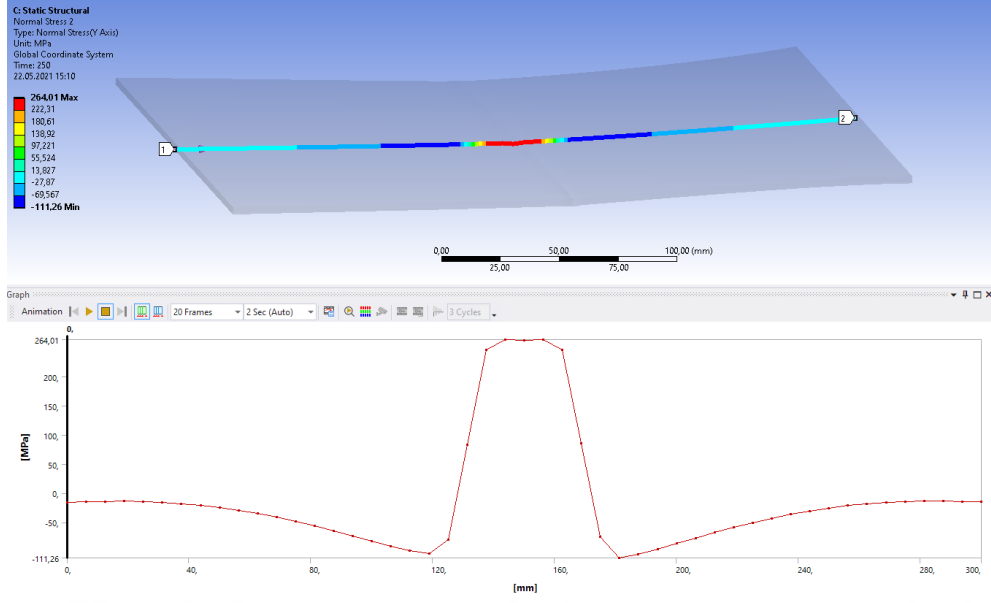
Şekil 4.32. Deneysel Nümerik nüfuziyet ölçüm şekli

Çizelge 4.3. Ampere ve hıza bağlı deneysel ve nümerik nüfuziyet sonuçları

Numuneler	Amper (A)	Kaynak Hızı mm/dk	Deneysel A ölçüsü(mm)	Simülasyon A ölçüsü (mm)	Deneysel B ölçüsü (mm)	Simülasyon B ölçüsü (mm)
1	100	300	4.8	4.1	1	0.8
2	100	200	5.3	4.8	2.4	1.3
3	125	300	5.4	5	1.9	1.1
4	125	200	6.5	5.6	2.3	1.4
5	140	300	6.7	5.6	2.6	1.5
6	140	200	7.8	7.1	3	3

4.6. Termomekanik Analiz Gerilme Sonuçları

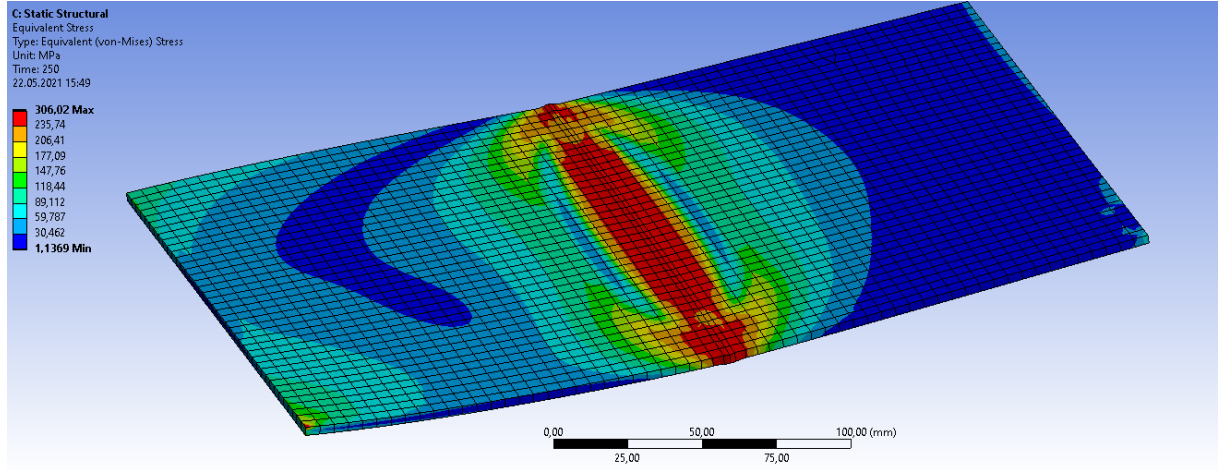
Termal analizi tamamlanmış olan numunelerin etkileşimli analiz yaklaşımı kullanılarak mekanik analizine geçilmiş bölüm 3.7’de tanımlanmış olan sınır koşulları için analiz gerçekleştirilmiştir. Mekanik analiz sonucunda kaynak bölgesindeki artık gerilmeler Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Artık gerilme 125 A 200 mm/dk sonucu

Kaynak bölgesinde çekme gerilmeleri akma sınırında olup basma gerilmeleri daha az çıkmıştır. Çelik yapılarda çekme artık gerilmelerinin yüksek olması istenmez, mukavemete ters yönde etkisi olduğu bilinmektedir.

Aşağıda kaynak bölgesinde proses süresi sonunda elde edilen Von Mises gerilmeleri gösterilmektedir (Şekil 4.34).

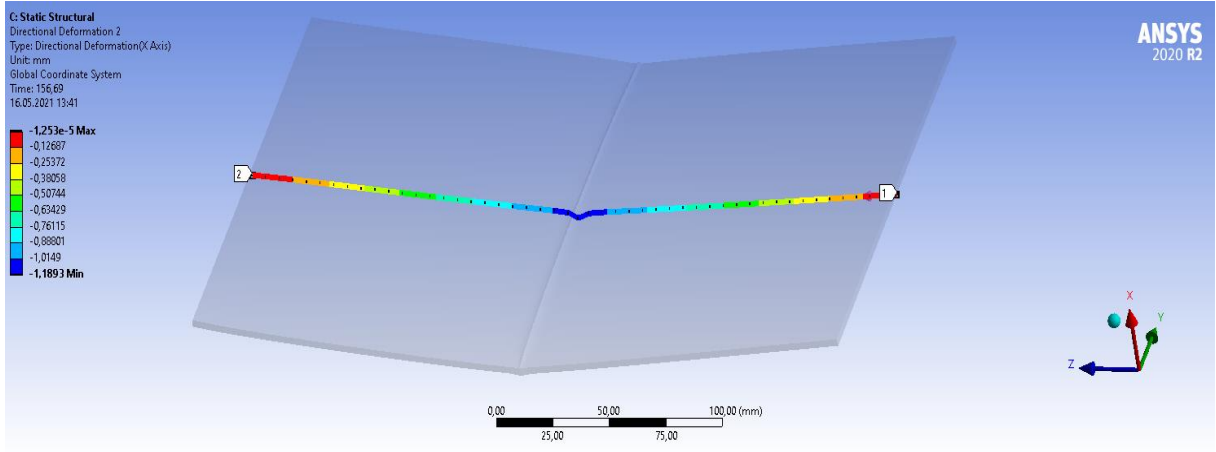


Şekil 4.34. Von Mises 125 A / 200 mm/dk gerilme sonucu

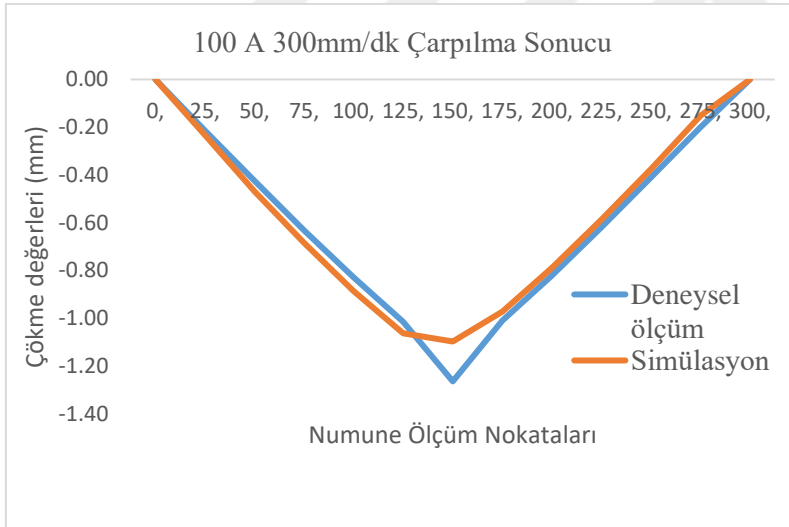
Von Mises gerilme sonuçları incelendiğinde kaynak ısısı altında akma mukavemeti değerlerinin yakalandığı görülmektedir.

4.7. Kaynaklı Numunelerdeki Deney ve Nümerik Analiz Çarpılma Sonuçlarının Karşılaştırılması

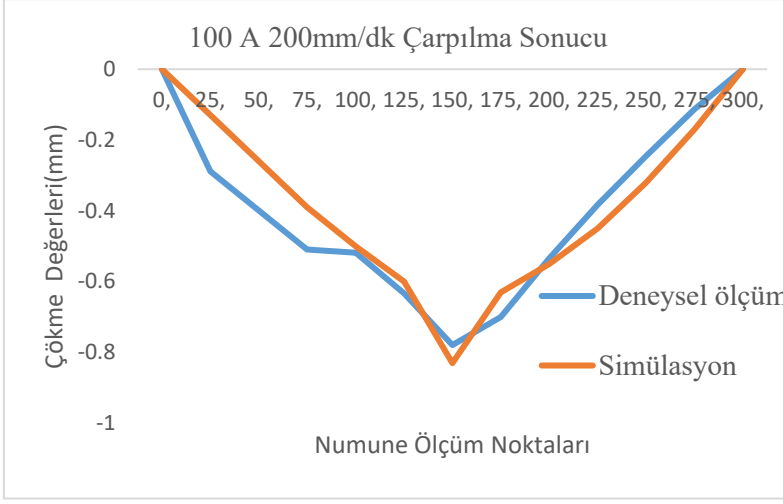
Analiz sonuçlarına göre orta eksende tanımlanan doğrultu boyunca çökme şeklindeki gibi sonuçları alınmıştır (Şekil 4.35-41).



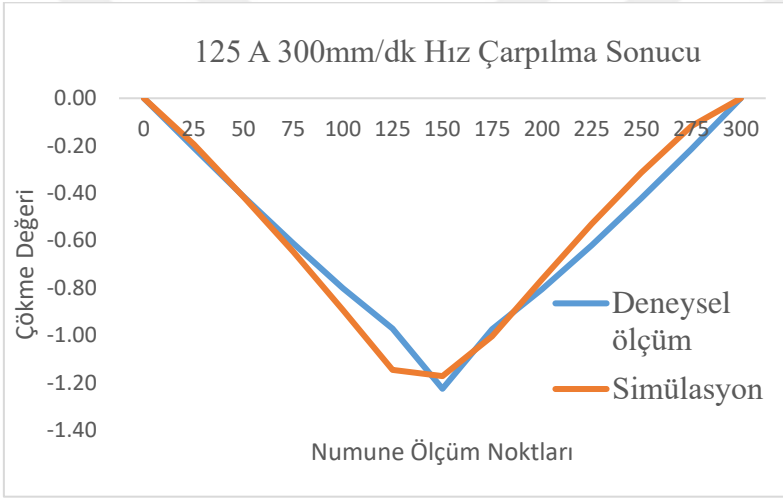
Şekil 4.35. Tanımlanan orta eksen doğrultusu boyunca çökme değerinin değişimi



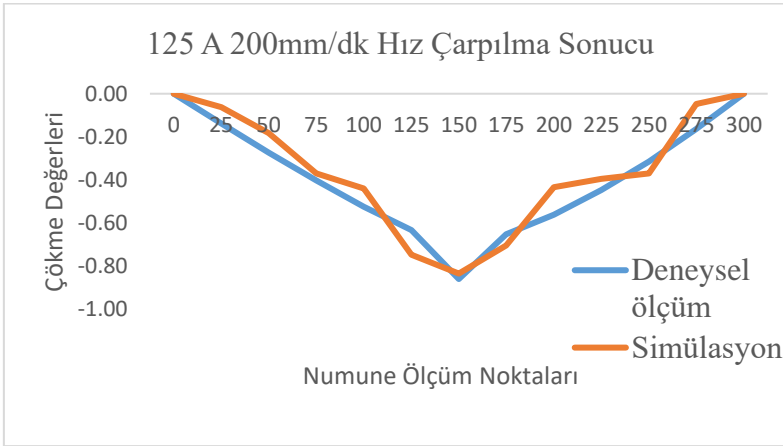
Şekil 4.36. 100 A 300 mm/dk çarpılma kıyaslaması



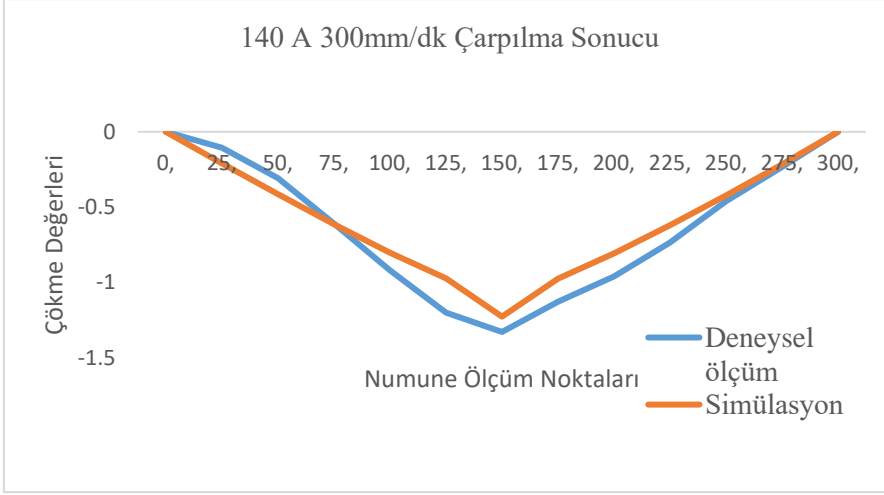
Şekil 4.37. 100 A 200 mm/dk çarpılma kıyaslaması



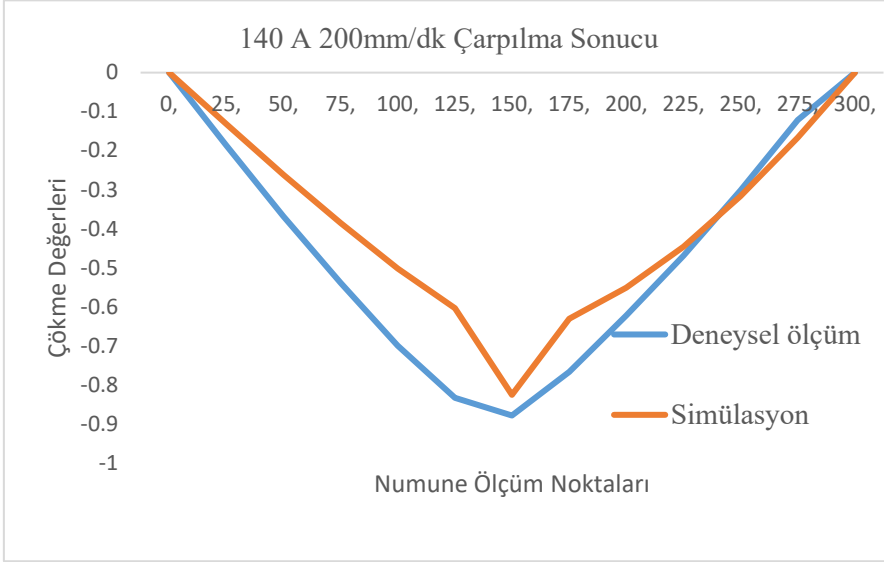
Şekil 4.38. 125 A 300 mm/dk çarpılma kıyaslaması



Şekil 4.39. 125 A 200 mm/dk çarpılma kıyaslaması



Şekil 4.40. 140 A 300 mm/dk çarpılma kıyaslaması



Şekil 4.41. 140 A 200 mm/dk çarpılma kıyaslaması

Şekillerde görüldüğü gibi amperaj arttıkça çökme değeri artmakta, kaynak hızı düştükçe süneklığe bağlı olarak şekil değiştirme azalmaktadır. Çökmenin maksimum değeri kaynak bölgesinde elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada St32-2 saçların TIG kaynak ısısı altında termomekanik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma deneysel ve numerik analiz olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Deneysel analizde gaz oranı, amper değeri ve kaynak hızının kontrol edildiği bir robotik sistem kullanılarak St32 saçların üzerine kaynak ısı girdisi yapılmıştır. Numerik analiz termal ve mekanik analiz olmak üzere iki kısımdan oluşmakta olup, termal analiz sonuçları mekanik analizde termal yük girdisi olarak kullanılmıştır. Termal analizde ısı akısı tanımlanırken Gauss ısı akısı yaklaşımı kullanılarak kaynak parametrelerinin deneysel ısı etkinliği belirlenmiştir.

Kaynak ısı tesirinde malzeme mekanik özelliklerindeki değişim çekme testi, mikrosertlik ölçümü ve mikroyapı incelemeleriyle değerlendirilmiştir.

Kaynak amper değeri yükseldikçe kaynak ısı akısı sebebiyle kaynak bölgesindeki çökme değerleri artmaktadır. Kaynak hızı düşükçe kaynak ısısı etkisindeki kaynak banyosu genişlemekte, numune daha yavaş hızda soğumakta ve çökmeyi azaltmaktadır. Bu sonuçlar deneysel ve numerik analizler kullanılarak tespit edilmiştir.

Numerik analizde kullanılan sonlu elemanlar modellemesinde ağı oluşturan mesh boyutu optimizasyonu gerçekleştirilerek ısı akısı ve sıcaklık etkin bölgesi artırılmıştır. Bu yaklaşımla deneysel sonuçlara yakınsak değerler elde edilmiştir.

Kaynak ısı tesiri altındaki numunelerden alınmış çekme testi sonuçları incelendiğinde kaynak etkisinden dolayı tüm numunelerde saç mukavemetlerinde ve yüzde uzama değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

Kaynak hızı düşükçe kaynak bölgesinde mikroyapıda görülen çökelmiş yapılardan dolayı mukavemet görece olarak bir miktar artmakta yüzde uzama düşmektedir. Kaynaklı numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen yüzde uzama değerleriyle kaynaklanmış saçların deneysel olarak elde edilen çökme sonuçları arasında uyum gözlenmiştir.

Mikrosertlik ölçümlerinde kaynak bölgesindeki en yüksek sertlik değerleri 185 Hv1 değerinde 300mm/d, 100 A kaynak parametrelerinde elde edilmiştir. Ana metal sertlik değerleri 135 Hv1 olarak tespit edilmiştir.

Kaynak hızı ve amper değeri düştükçe sertlik bir miktar düşmekle birlikte, amper değeri arttıkça düşük kaynak hızlarında sertlik daha yüksek çıkmıştır.

Kaynak bölgesindeki sertliğin sebebinin yüksek kaynak hızlarında ince tane yapısı olduğu, düşük kaynak hızlarında artan amper değeriyle kaynak banyosunun genişlemesine bağlı olarak artan çökelmiş yapılar ve rekristalizasyon olduğu düşünülmektedir. Zira düşük kaynak hızlarında rekristalizasyon sonucunda iri tane boyutu gözlenmiş ampere bağlı tane boyutu arttıkça daha yüksek mukavemet ve sertlik artışı gözlenmiştir.

Tane çapı saç mukavemeti ilişkisi, ITAB bölgesi SEM görüntülerinden tane çapı ölçümü alınarak Hall-Petch eşitliğiyle ortaya konulmuştur. Bu kapsamda amper değeri arttıkça numune mukavemetlerinde ve tane çaplarında artış gözlenmektedir. Bu artış düşük kaynak hızlarında daha yüksek çıkmıştır. Bu mukavemet artışının düşük kaynak hızlarında kaynak bölgesinde ortaya çıkan çökelmiş yapılar ve rekristalizasyon olduğu düşünülmektedir.

Nümerik analiz sonucunda kaynak bölgesinde çekme ve basma artık gerilmelerinin olduğu gözlenmiştir. Çekme artık gerilmeleri saç akma mukavemeti değerlerine yakın değerlerde elde edilmiş olup, kullanım yerine göre ek bir yüklemeye birlikte akma sınırının aşılacağı düşünülmektedir. Kaynak bölgesindeki Von-Mises gerilme sonuçları bu sonucu desteklemektedir.

Sonuç olarak kaynak ısı tesiri altında düşük karbonlu saçlarda amper ve kaynak hızına bağlı olarak kalıcı deformasyon ve gerilme değerlerinin olduğu malzeme mekanik özelliklerinin ve tane yapısının bu parametrelerden etkilendiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Michaleris, P., *Minimization of Welding Distortion and Buckling*, Woodhead Publishing, 2011, pp. 3.
- [2] Tsai, C. L., Park, S. C. and Cheng, W. T., "Welding Distortion of This-Plate Panel Structure," *Welding Research Supplement*, ,pp. 156-164,1999.
- [3] "Welding and allied processes — Welding positions (BS EN ISO 6947:2011)," London, Milton Keynes, 2011.
- [4] S. Zheng, K. Min, and P. Dayou, "Twin Wire Gas Tungsten Arc Cladding," Singapore, 1999.
- [5] J. Mackerle, J., "Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering Finite element analysis and simulation of welding - an addendum : a bibliography (1996-2001) addendum : a bibliography (1996 – 2001)," 2002.
- [6] Sindo K., Willey J., "Welding metallurgy", 2nd edition, USA, 2003.
- [7] Masubhichi, Koichi, *Analysis of welded structures* , Pergamon Press, 1980.
- [8] Kula E., Weiss V., "Residual Stress and Stress Relaxation", New York, 1981.
- [9] Parmar R.S., "Welding engineering & technology, Khanna Publisher", 2nd edition, New Delhi, 2002.
- [10] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components," *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 572–588, doi: 10.1016/j.matdes.2011.08.022,2012.
- [11] Fu D., Zhou C., Can L., Guan W. A. N. G., Li L., "Effect of welding sequence on residual stress in thin-walled octagonal pipe-plate structure", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* , 24(3): pp. 657-664,2014.
- [12] Paradowska A.M., Price J.W.H., "The effect of the heat input on residual stress distribution of steel welds measured by newton diffraction", *Journal of Achievement in Material and Manufacturing Engineering*, pp.1-2, 2006.
- [13] Kiyoshima S., Deng D., Ogawa K., Yanagida N., Saito K., "Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint", pp.987-995, *Comput Mater Sci* 2009.

- [14] Goldak J., Chakravarti A., Bibby M., "A new finite element model for welding heat sources.", pp.299–305, Metall Trans B 1984.
- [15] Simufact.welding 3.1 manual ,<https://www.simufact.com/gui-simufact-welding.html> , 2012.
- [16] Younan, M. Y., Will, A. S., & Fanous, F. Z. 3D finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques. ASME Pressure Vessel and Piping Conference, (pp. 165-172). Canada,2002.
- [17] Vakili-Tahami F., Sorkhabi A. H. D., "Finite Element Analysis of Thickness Effect on the Residual Stress in Butt-Welded 2.25Cr1Mo Steel Plate," Journal of Applied Sciences, vol. 9, 7, pp. 1331-1337, 2009.
- [18] B. Q. Chen, M. Hashemzadeh, and C. Guedes Soares, "Numerical and experimental studies on temperature and distortion patterns in butt-welded plates," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 72, no. 5–8, pp. 1121–1131, doi: 10.1007/s00170-014-5740-8, 2014.
- [19] Attarha MJ, Sattari-Far I Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation. J Mater Process Technol 211(4):688–694 , 2011.
- [20] P. Fuerschbach, J. Norris, X. He, and T. DebRoy, "Understanding Metal Vaporization from Laser Welding," no. September, p. 70, 2003, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/71305074.pdf>.
- [21] Z. Lei et al., "Finite-element inverse analysis of residual stress for laser welding based on a contour method," Opt. Laser Technol., vol. 129, no. April, p. 106289, 2020, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106289,2020.
- [22] B. Q. Chen and C. Guedes Soares, "Experimental and numerical investigation on welding simulation of long stiffened steel plate specimen," Mar. Struct., vol. 75, no. May 2020, p. 102824, doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102824,2021.
- [23] E. Korkmaz and C. Meran, "Mechanical properties and microstructure characterization of GTAW of micro-alloyed hot rolled ferritic XPF800 steel," Eng. Sci. Technol. an Int. J., vol. 24, no. 2, pp. 503–513, doi: 10.1016/j.jestch.2020.04.006,2021.

- [24] P. Kumar, R. Kumar, A. Arif, and M. Veerababu, "Investigation of numerical modelling of TIG welding of austenitic stainless steel (304L)," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, no. xxxx, pp. 1636–1640, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.544, 2020,.
- [25] P. Kumar and A. N. Sinha, "Microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welding of st37 carbon steel," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 133, pp. 733–739, , doi: 10.1016/j.procs.2018.07.125,2018.
- [26] D.Deng, "FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 2, pp. 359–366, doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.052,2009.
- [27] J. Bradáč, "Calibration of heat source model in numerical simulations of fusion welding," *Mach. Technol. Mater.*, no. 11, pp. 9–12, 2013.
- [28] K.Can, "GTA yöntemi ile Kültivatör uç demirinin FeCrC ,FeTi ve Ni Tozları ile yüzey modifikasyonu ," Yüksek Lisans Tezi ,Makine Mühendisliği Bölümü, Namık Kemal Üniversitesi,Tekirdağ,Türkiye ,2020.

EKLER

close all

clear all

clc

p=10; % Işının pozisyonu [mm] (Hız*zaman)

I=35.63; % Işının etki eden şiddeti [W/mm2] Ansys

R=2.8; % Işın yarı çapı [mm] Ansys

% Güç akışı

z=[0:0.1:20];

f=I*exp(-(z-p).^2/R^2);

plot(z,f)

grid

iR=I*exp(-(p-R)-p).^2/R^2)

fprintf('Toplam Isı akısı[W/mm2]')

% Toplam fonksiyonun intergrali = toplam güç power

[y,z] = meshgrid(-20:0.1:20);

f=I*exp(-((y-p).^2+z.^2)/R^2); %Gaussian Fonksiyonu

figure(2)

surf(y,z,f)

f=@(y,z) I*exp(-((y-p).^2+z.^2)/R^2);

i=integral2(f,-inf,inf,-inf,inf)

fprintf('Toplam Güç [W]')

