



**KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDEKİ ISIL DEFORMASYONLARIN SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İRDELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Salih ÖZDEL

Kütahya - 2022

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDEKİ ISIL
DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
İRDELENMESİ**

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Haluk GÜNEŞ

Hazırlayan:
Salih ÖZDEL

Kütahya – 2022

Kabul ve Onay

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından

Makine mühendisliği Anabilim dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabuledilmiştir.

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Dr. Öğr. Üyesi Haluk GÜNEŞ (Danışman)		
Prof. Dr. Ramazan KÖSE		
Prof. Dr. Fatih AKSOY		

Onay

İmza

Doç. Dr. Arif KOLAY

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Kaynaklı Birleştirmelerdeki Isıl Deformasyonların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İrdelenmesi.*” Adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

.../.../2022

İmza

Salih ÖZDEL

ÖZGEÇMİŞ

İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Nazilli'de tamamladı. Balıkesir üniversitesinde Makine mühendisliği eğitimi aldı. Kütahya Tekno Yapı Denetim şirketinde 1 yıl Kontrol elemanı olarak görev aldıktan sonra Askerlik görevini tamamladı. Eskişehir OSB bölgesinde bulunan Köklüce Makina bünyesinde 4 yıldır çalışmakta. Firma bünyesinde Yurt içi Kaynaklı imalat sorumlusu olarak görev almaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.



ÖZET

KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDEKİ ISIL DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İRDELENMESİ

ÖZDEL,Salih

Yüksek Lisans Tezi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Haluk GÜNEŞ

Haziran,2022,97 Sayfa

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler ile kaynaklı imalat sonrası oluşacak çarpılmaların, sıcaklık dağılımlarının ve artık gerilmelerinin tahmin edilmesi zaman ve maliyet açısından birçok kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada 3 farklı kaynak sıralamalarıyla kaynatılmış numunelerin sayısal modelleri oluşturulmuş ve Simufact Welding programında analize tabii tutulmuştur. Modellenen parça traktöre sonradan monte edilebilen bir ön yükleyicisine aittir. Modelin malzemesi S355j2+N'dir. Deneysel çalışmada her proses için üç adet numune kaynatılmıştır. Kaynak parametreleri Amper; 245A, Voltaj; 26.2V'dir. İlerleme hızı düzlemsel kaynak bölgelerinde; 5.7 mm/s dairesel kaynaklarda ise 8 mm/s'dir. Analizler, kaynaklı imalat süreci ve soğuma süresi olarak toplam 3000 saniye sürmüştür. Deney esnasında parçanın sıcaklığını ölçmek için 4 nokta belirlenmiştir. Bu 4 noktaya bağlanan ısı çiftleri sayesinde ölçülen sıcaklıklarla sıcaklık-zaman eğrileri oluşturulmuş ve analiz programından elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Yer değiştirme miktarlarının tespiti içinde numune parçalar kaynak öncesi ve kaynak sonrası olmak üzere 3 boyutlu ölçüm cihazında ölçülmüş olup aynı şekilde analiz programından gelen verilerle karşılaştırılmıştır. Analiz ve deney sonuçları incelendiğinde, ısınma eğrilerinin benzer olduğu, analizde iş parçasının ortam sıcaklığına daha hızlı ulaştığı ve en yüksek sıcaklıkların deneysel sonuçlarda daha düşük olduğu görülmüştür. Analizle elde edilen yer değiştirme miktarlarının deneysel çalışmayla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler:Çarpılma Analizi,Gazaltı Kaynağı, Makine Mühendisliği, Sıcaklık Dağılımı, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Taşıt Teknolojisi

ABSTRACT**INVESTIGATION OF THERMAL DEFORMATIONS IN WELDED JOINTS BY
FINITE ELEMENT METHOD****ÖZDEL, Salih****Master's Thesis Department of Mechanical Engineering****Thesis Supervisor: Asst. Prof. Dr. Haluk GÜNEŞ****June, 2022, 97 Pages**

Predicting the distortions, temperature distributions and residual stresses that will occur after welded manufacturing with the analysis made using the finite element method provides many conveniences in terms of time and cost. In this study, numerical models of the welded samples with 3 different weld sequences were created and analyzed in Simufact Welding program. The modeled part belongs to a front loader that can be retrofitted to the tractor. The material of the model is S355j2+N. In the experimental study, three samples were welded for each process. Welding parameters Amps; 245A, Voltage; It is 26.2V. The feed rate is in the planar weld zones; It is 8 mm/s for 5.7mm/s circular welds. The analysis took a total of 3000 seconds as welded manufacturing process and cooling time. During the experiment, 4 points were determined to measure the temperature of the part. Temperature-time curves were created with the temperatures measured by the thermocouples connected to these 4 points and compared with the data obtained from the analysis program. In order to determine the displacement amounts, the sample pieces were measured in a 3-dimensional measuring device before and after welding and compared with the data coming from the analysis program in the same way. When the analysis and experimental results were examined, it was seen that the heating curves were similar, the work piece reached the ambient temperature faster in the analysis and the maximum temperatures were lower in the experimental results. It was observed that the displacement amounts obtained by the analysis were in agreement with the experimental study.

Keywords: Distortion Analysis, Gas Metal Arc Welding, Mechanical Engineering, Temperature Distribution, Finite Element Method, Vehicle Technology

ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışmada gaz altı kaynaklı imalat yöntemiyle imal edilmiş iş parçasının sonuçlarını analiz sonuçlarıyla karşılaştırması ortaya sunulmuştur. Elde edilmiş sıcaklık ve 3 boyutlu ölçüm sonuçlarının analiz değerleriyle olan benzerlikleri ve farklılıklarına dikkat çekilmiştir.

Hazırlamış olduğum bu çalışmanın başından sonuna kadar bana maddi ve manevi destek olan sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Haluk GÜNEŞ'e, eşim Büşra ÖZDEL'e, oğlum Ömer'e, Köklüce Makina firmasına ve beni bu günlere getiren aileme teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
SİMGELER	xvi
KISALTMALAR	xvii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1.LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
--------------------------------------	----------

İKİNCİ BÖLÜM

KAYNAK YÖNTEMLERİ

2.1.KAYNAK YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ	13
2.1.1. Kaynağı Amacına Göre Gruplandırma	13
2.1.2. Kaynak Yöntemi Olarak Gruplandırma.....	13
2.1.3. Kaynak İşleminin Cinsine Göre Gruplandırma	13
2.1.4. Gaz Altı Ark Kaynak Yöntemleri	15
2.1.4.1. TIG Kaynağı	15
2.1.4.2. MIG/MAG Kaynağı.....	16
2.1.4.3. MIG/MAG Kaynak Makineleri	16
2.1.4.4. MAG Kaynak Yöntemlerinin Avantajları	19
2.1.4.5. MAG Kaynak Yöntemlerinin Dezavantajları	19
2.1.5. Kaynak Pozisyonları	20
2.1.6. Kaynak Ağızları	20
2.1.7. Kaynak Sembolleri	21
2.1.8. Endüstride Robotlaşma	22
2.1.9. Kaynak Robotları	22

İÇİNDEKİLER (devam)

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1.SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	26
--	-----------

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

KAYNAKTA ISI TRANSFERİ

4.1.KAYNAKTA ISI TRANSFERİ VE SAYISAL ÇÖZÜM.....	30
---	-----------

4.1.1. İletim İle Isı Transferi	30
4.1.2. Taşınım İle Isı Transferi	31
4.1.3. Işınım İle Isı Transferi	31
4.1.4. Kaynak Bölgesinin Isı Girdileri	32

BEŞİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METHOD

5.1.MATERYAL VE METHOD.....	35
------------------------------------	-----------

5.1.1. Malzeme.....	35
5.1.2. ANALİZ (SİMÜLASYON).....	38
5.1.3. MSC APEX İle Ağ Yapısı Oluşturma İşlemleri.....	39

5.2.DENEY.....	55
-----------------------	-----------

5.2.1. Deney Seti.....	55
5.2.2. Numunelerin Hazırlanması	55
5.2.3. Kaynak Robotu	56
5.2.4. Kaynak Makinesi	57
5.2.5. Sıcaklık Ölçüm Cihazı	58
5.2.6. Isıl Çift Sensörleri	59
5.2.7. Arduino	59
5.2.8. Proses 1	61
5.2.9. Proses 2	63
5.2.10. Proses 3	64
5.2.11. Üç Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	69

5.2.12.	Kaynak boğaz ölçümü	72
5.2.13.	Makro yapı analizi	72
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		76
KAYNAKÇA		78



TABLOLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5. 1: S355j2+N Çeliğinin Kimyasal Özellikleri	35
Tablo 5. 2: S355j2+N Çeliğinin Mekanik Özellikleri	35
Tablo 5. 3: GEKA Marka SG-2 Kaynak Telinin Kimyasal Özellikleri	37
Tablo 5. 4: GEKA Marka SG-2 Kaynak Telinin Mekanik Özellikleri	37
Tablo 5. 5: HB-205 Gazının Kimyasal Karışım Formülü	38
Tablo 5. 6: Dairesel Kaynaklar İçin Kaynak Parametreleri	46
Tablo 5. 7: Düzlemsel Kaynaklar İçin Kaynak Parametreleri.....	47
Tablo 5. 8: R 8 R2100-2 Arc HW Modelinin Teknik Özellikleri	57
Tablo 5. 9: TPS/İ 320 A Modelinin Teknik Özellikleri	58
Tablo 5. 10: Tipi Isıl Çiftlerin Teknik Özellikleri.....	59
Tablo 5. 11: Arduino Kartının Teknik Özellikleri.....	60
Tablo 5. 12: (1). Bölgeye Ait Makro Analiz Sonuçları.....	74
Tablo 5. 13: (2). Bölgeye Ait Makro Analiz Sonuçları.....	74
Tablo 5. 14: (3).Bölgeye Ait Makro Analiz Sonuçları.....	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2. 1: Eritme Kaynağının Gruplandırılması	14
Şekil 2. 2: Basınç Kaynağının Gruplandırılması	14
Şekil 2. 3: TIG Kaynağının şematik gösterimi	15
Şekil 2. 4: MAG Kaynağı Şeması	16
Şekil 2. 5: GEKAMAC Marka Konvansiyonel Kaynak Makinesi.....	17
Şekil 2. 6: Birleştirilmemiş Gaz Altı Kaynak Torcu	18
Şekil 2. 7: Kaynak Pozisyonları.....	20
Şekil 2. 8: Kaynak Ağız tipleri	20
Şekil 2. 9: Çepeçevre Kaynağın Gösterilmesi	21
Şekil 2. 10: Kaynak Sembolünün Kısımları (MEB, 2013).....	21
Şekil 2. 11: KUKA Ve PANASONİK Marka Kaynak Robotları.....	23
Şekil 3. 1: Eleman Tipleri.....	26
Şekil 4. 1: İş Parçasının Isı Transferi Mekanizmaları.....	30
Şekil 5. 1: Zamana Bağlı İzotermal Dönüşüm Eğrisinin Çizimi	36
Şekil 5. 2: S355 Çeliğine Ait CCT Grafiği.....	37
Şekil 5. 3: İş Parçasının Katı Model Görüntüsü	38
Şekil 5. 4: 294 Elemanlı Model	40
Şekil 5. 5: 23,763 Elemanlı Model	40
Şekil 5. 6: Yüzeylerin Hazırlanması.....	41
Şekil 5. 7: Katı Ağ Yapısını Oluşturulduğu Ekran	41
Şekil 5. 8: Ağ Yapısının Kalite Kontrolünün Yapıldığı Ekran.....	42
Şekil 5. 9: Yeni Proje Açılımı	43
Şekil 5. 10: Proses Ayarları	43
Şekil 5. 11: Geometrilerin Yüklenmesi	44

Şekil 5. 12: Malzemelerin Tanımlanması	44
Şekil 5. 13: Sabitleme Elemanlarının Tanımlanması	45
Şekil 5. 14: Kaynak Yollarının Seçildiği Ekranın Görüntüsü	46
Şekil 5. 15: Kaynak Parametrelerinin Belirlendiği Ekran	47
Şekil 5. 16: Goldak Isı Modeli.....	47
Şekil 5. 17: Robot Parametrelerinin Tanımlanması.....	49
Şekil 5. 18: Simülasyon Ayarları.....	49
Şekil 5. 19: Analizin Başlatılması	50
Şekil 5. 20: Ölçüm Alınacak Isıl Çift Konumları	50
Şekil 5. 21: Proses 1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrisi	51
Şekil 5. 22: Proses 2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrisi	52
Şekil 5. 23: Proses 3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrisi	52
Şekil 5. 24: Proses 1'e Ait Artık Gerilme Miktarları	53
Şekil 5. 25: Proses 2'ye Ait Artık Gerilme Miktarları.....	53
Şekil 5. 26: Proses 3'e Ait Artık Gerilme Miktarları	53
Şekil 5. 27: Proses 1'e Ait Yer Değiştirme Miktarları	54
Şekil 5. 28: Proses 2'ye Ait Yer Değiştirme Miktarları	54
Şekil 5. 29: Proses 3' Ait Yer Değiştirme Miktarları	55
Şekil 5. 30: Kaynatılmak Üzere Hazırlanmış Numuneler	55
Şekil 5. 31: Puntalı Numunelerin Ölçümü.....	56
Şekil 5. 32: Kaynak Robotunun Programlayan Operatör	56
Şekil 5. 33: Fronius TPS/İ 320 A Modeli	57
Şekil 5. 34: Isı Ölçüm Setinin Projesi.....	58
Şekil 5. 35: Örnek Bir Arduino Kartı	59
Şekil 5. 36: Sıcaklık Ölüm Cihazının İş Parçasına Bağlanması	61
Şekil 5. 37: Proses 1'e Ait Kaynak Sıralaması	61

Şekil 5. 38: Numune 1-1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	62
Şekil 5. 39: Numune 1-2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	62
Şekil 5. 40: Numune 1-3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	62
Şekil 5. 41: Proses 2' Ait Kaynak Sıralaması.....	63
Şekil 5. 42: Numune 2-1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	63
Şekil 5. 43: Numune 2-2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	64
Şekil 5. 44: Numune 2-3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	64
Şekil 5. 45: Proses 3'e Ait Kaynak Sıralaması.....	65
Şekil 5. 46: Numune 3-1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	65
Şekil 5. 47: Numune 3-2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	65
Şekil 5. 48: Numune 3-3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri.....	66
Şekil 5. 49: Proses 1'in Zamana Bağlı Sıcaklık Ölçümlerinin Karşılaştırılması.....	67
Şekil 5. 50: Proses 2'in Zamana Bağlı Sıcaklık Ölçümlerinin Karşılaştırılması.....	68
Şekil 5. 51: Proses 3'in Zamana Bağlı Sıcaklık Ölçümlerinin Karşılaştırılması.....	68
Şekil 5. 52: 3 Boyutlu Ölçüm Yapan Uzman Operatör.....	69
Şekil 5. 53: Numune 1-1'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	69
Şekil 5. 54: Numune 1-2'ye Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	70
Şekil 5. 55: Numune 1-3'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	70
Şekil 5. 56: Numune 2-1'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	70
Şekil 5. 57: Numune 2-2'ye Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	70
Şekil 5. 58: Numune 2-3'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	71
Şekil 5. 59: Numune 3-1'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	71
Şekil 5. 60: Numune 3-2'ye Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	71
Şekil 5. 61: Numune 3-3'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları.....	71
Şekil 5. 62: Kaynak Kumpası İle Ölçüm.....	72
Şekil 5. 63: Makro Yapı Analizinde Bakılacak Değerler.....	72

Şekil 5. 64: Makro Yapı Analizi Yapılacak Bölgeler.....	73
Şekil 5. 65: (1) Numaralı Bölgeye Ait Kesitin Makro Görüntüsü.....	73
Şekil 5. 66: (2) Numaralı Bölgeye Ait Kesitin Makro Görüntüsü.....	74
Şekil 5. 67: (3) Numaralı Bölgeye Ait Kesitin Makro Görüntüsü.....	75



SİMGELER

mm Milimetre

mm² Milimetre kare

s Saniye

°C Celsius

L Litre

F Sıcaklık faktörü

σ Stefan-Boltzmann sabiti

K Kelvin

A Amper

V Voltaj

% Yüzde

a_r Arka uzunluk

a_f Ön uzunluk

N Newton

Hz Hertz

mV miniVolt

g Gram

KISALTMALAR

2B	2 Boyut
3B	3 Boyut
CAD	ComputerAided Design
CAE	ComputerAidedEngineering
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
ISO	International OrganizationforStandardization
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MAG	Metal Aktif Gaz
MEB	Milli Eğitim Bakanlığı
MIG	Metal Inert Gaz
TIG	Tungsten Inert Gaz
YSA	Yapay Sinir Ağları

GİRİŞ

Kaynakla birleştirme yöntemi endüstride sıklıkla kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Kaynaklı imalat yöntemleri arasından gaz altı ark kaynağı yöntemi ise kolaykullanılabilirliği, hızlı olması cüruf temizli olmaması ve otomasyona kolay uygulanabilmesi gibi avantajları sebebiyle sıkça tercih edilir. Gaz altı ergitme kaynağı metodunda, kaynak ve ana metalin ergimesi için yoğun ısı girdileri oluşur. Isı girdisinin yoğun olduğu bölgeden ana metale doğru bir ısı akışı olur. Parçanın ısınma hızı soğuma hızından yüksektir. Bu sebeple kaynak sürecince ısı dağılımı homojen değildir. Kaynak havuzu ve etrafındaki ana metal bölgesi soğurken ana metalin geri kalan kısmına gerilim uygulanır. Bu gerilmeler iş parçası üzerinde deformasyona sebebiyet verir.

Kaynaklı parçalarda oluşan gerilimlerin ve deformasyonların imalat sonrası düzeltilmesi veya en aza indirilmesi gerekmektedir. Gerilim giderme tavlama, master işçilikleri gibi kaynak işlemi sonrası yapılacak her iş fazla işçilik ve maliyettir. İş parçası üzerinde oluşan artık gerilme, çarpılma gibi durumların, proses değişiklikleriyle azaltmak veya yok etmek mümkündür. Ön gerilme vermek, geri adım yöntemi, ideal kalıp tasarımı, karşılıklı kaynak dikişleri gibi yöntemler kullanılabilir. İdeal kaynak sıralamasının uygulanması da bu yöntemlerinden biridir. İdeal kaynak sıralamasıyla ısınmanın daha homojen olması ve parçada oluşacak gerilmelerin azaltılması sağlanabilir.

İş parçasında kullanılacak kaynak tüm sıralaması seçeneklerini demek zaman ve maliyet açısından neredeyse imkânsızdır. Sonlu elemanlar yöntemiyle proses analizi çalışmaları yapılarak ideal kaynak sıralaması tespit edilebilir. Bu zaman ve maliyet bakımından daha uygundur. Analiz sonucunda çarpılmalar öngörülebilir, sıcaklık dağılımları, ısı girdileri izlenebilir ve mekanik testler kullanılmadan iş parçasının üzerindeki gerilmeler tespit edilebilir. Ayrıca kalıp tasarımında kullanılacak sabitleme elemanlarının konumları belirlenebilir.

Mag/Mig eritme kaynağındaki üzerinde yapılan çalışmalar kaynağında malzeme özellikleri, artık gerilmeler, iş parçasındaki çarpılmalar ve kaynak havuzunun oluşumu gibi konuları inceler. Bu çalışmalardaki amaçlar kaynak yapısı ve kaynak kalitesini iyileştirmeyi hedefler. Termal dönüşümler mikro yapının, artık gerilmelerin ve çarpılmaların temelini oluşturur. ITAB bölgesinin kontrolü kaliteli bir kaynağın yapı

taşıdır ve ısı etkisi altında kalan alanın bölgenin yapısını termal dalgalanmalar belirler. (Fındık, 2008)



Bu çalışmada amaç MAG kaynak yöntemiyle birleştirilecek S355J2+N çelik kalitesindeki parçaların farklı kaynak sıralamalarındaki çarpılmalarını, sıcaklık dağılımlarını ve artık gerilmelerini deneysel ve sayısal olarak modelleyerek karşılaştırmaktır. Ayrıca doğru sınırı şartlarının tanımlanmasıyla daha kolay bir şekilde iş parçasının kaynak işlemi sırasında ve sonrasında alacağı değişimleri ön görebilmektir. 3 farklı proses tanımlanarak Simufac Welding programında analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda sıcaklık, gerilme, yer değiştirme özelliklerine bakılmıştır. Bu 3 farklı farklı prosese ait üçer adet numune kaynak robot ile kaynatılarak kaynak prosesleri sırasında 4 farklı ölçüm noktasından sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Sıcaklık verileri grafiğe dönüştürülerek karşılaştırılmıştır. İşlem sonucundan parçalar 3 boyutlu ölçüm cihazında ölçülerek değerlendirilmiştir. Analiz ve deney işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlar bir biriyle karşılaştırılarak önerilerde bulunulmuştur.



BİRİNCİ BÖLÜM
LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yavuz, vd.,(2005) Yapmış oldukları bir çalışmada st52-e kalitesindeki alaşımsız yapı çeliklerinin kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde kaynak havuzunun yakınında oluşan mekanik özelliklerinin tam olarak bilinmeyen ITAB bölgesinin mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak önceden belirlenmesi amaçlanmıştır. FEM programlarından Ansys paket programı tercih edilmiştir. Kaynak yöntemleri arasında geniş ITAB bölgesine sahip olan toz altı kaynak yöntem olarak belirlenmiştir. Kaynak esnasında ESAB LAW 1000 DC otomatik tozaltı kaynak makinesi kullanılmıştır. Kaynatılan iş parçasından kaynak dikişine paralel yönde çekme deneyi numuneleri çıkartılmıştır. Çalışma sonucunda iş parçasının termal ve mekanik analiz sonuçları elde edilmiştir.

Soncu, vd.,(2010) yaptığı çalışmada st-37 malzemenin toz altı kaynak yöntemiyle kaynatılan iş parçasının üzerinde oluşacak deneysel olarak elde edilmesi zor olan ısı dağılımlarının sonlu elemanlar yöntemiyle matematiksel olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Yöntem olarak yaygın olarak kullanılan toz altı kaynak yöntemi kullanılmıştır. Bilgisayar destekli ortamda oluşturulan sac levhalar Ansys sonlu elemanlar programında termal analize tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda artık gerilmelerin en çok ısı değişikliğinin en fazla olan bölgelerde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada en çok ısı değişiminin olduğu bölge ısı tesiri altında kalan bölge olduğu bulunmuştur.

Kaya(2010) yaptığı çalışmada kaynatılan st-37 kalitedeki çelik malzemenin deneysel orak sonuçlarıyla nümerik sonuçlarının tutarlılığını karşılaştırmıştır. İş parçası MAG, TIG ve toz altı kaynak yöntemleriyle birleştirilmiş ve mikroskop altında mikro yapıları incelenmiştir. Parçaların deneysel olarak incelenerek elde edilen sonuçlardan malzemenin mekanik özellikleri, kaynak parametreleri gibi veriler kullanılarak bilgisayar destekli ortamda modelleme gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodunun uygulanması için ABAQUS yazılımı seçilmiştir. Çözülen matematiksel modelin analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçların tutarlı olduğu gözlenmiştir.

Fındık(2008), yaptığı çalışmada 304 tip östenitik paslanmaz çeliklerin mig kaynak yöntemiyle 10,15,20 ve 30cm/dk. olarak farklı ilerleme hızlarında birleştirilmesi yapılmıştır. Kaynak işlemindeki ısı transferlerini deneysel ve sonlu yöntemler analizi ile incelemiştir. Çalışmada kaynak bölgesindeki makro ve mikro yapıyı önceden tahmin

etmek amaçlanmıştır. ITAB bölgesindeki sıcaklık dağılımları ve yapısal özellikler deneysel olarak elde edilen değerler ANSYS analiz programında kullanılarak sonuçlar yakınsanmıştır. Isı girdisinin, ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin, kaynak metalinin sertliğinin, soğuma hızlarının kaynak ilerleme hızlarıyla ilgili olduğu ve deneysel-teorik karşılaştırmasının uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Akkaş(2006), yaptığı çalışmada sac kalınlığı ile lineer ilişkisi olmayan dikiş kalınlığı ve nüfuziyet alanı için otomatik kaynak parametresi oluşturan bir çözüm üretmek istemiştir. St52-3 kalitesindeki saçları ön ısıtma olmaksızın toz altı kaynak yöntemiyle 'T' formunda köşe kaynağı ile birleştirilmiştir deneysel sonuçları ANFİS ve YSA yazılımlarından aldığı sonuçlarla karşılaştırmıştır. ANFİS çıktılarının deneysel verilere daha yakın olduğu gözlenmiştir. İstenilen kaynak geometri kesitlerini elde edebilmek için uygun parametreleri verebilen bir model geliştirilmiştir.

Tsirkas, vd.,(2003) Yaptıkları çalışmada, endüstriyel üretimde giderek daha fazla kullanılan lazer kaynağı yöntemini deneysel ve matematiksel model olarak incelemişlerdir. İş parçası olarak AH36 çeliği seçilmiştir. Sırasıyla 2000W,1450W ve 3000W güçleri 300,100 ve 200 mm/dk ilerleme hızları üç örnek grubu üzerinde uygulanmıştır. İş parçası uygun ağ yapısı yöntemleriyle SYSWELD programında çözülmüştür. Kaynak başlangıcında çarpılmanın kaynak havuzu tarafında olduğu ama kaynak işlemi tamamlandığında kaynak hattı boyunca doğrusal olduğu gözlemiştir. Deneysel ve matematiksel modelin uyumlu olduğu gözemenmiş olup SYSWELD yazılımında ölçülen deneysel ısı girdisinin, yerçekiminin ve sabitleme özelliklerinin girilmesi daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Wu, vd.,(2001) Füzyon kaynağıyla kaynatılmış alın kaynaklı bir iş parçasının sonlu eleman yöntemiyle çözülmüş simülasyonunu sunmaktadırlar. Tek paso olarak modellenen 3 boyutlu kaynak sürecini analiz etmek için 2 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi analizi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar çözümü için ANSYS kullanılırken ısı dağılımlarını elde etmek için geçici termal analize başvurmuşlardır. Mekanik özellikleri tam olarak bilinmeyen ITAB ve kaynak metali için iş parçasıyla aynı özelliklerde olduğu var sayılmıştır. Analiz sonuçlarının yaptıkları deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ispat etmişlerdir.

Karaoğlu S. ve Karaoğlu Ç., (2002) T-bağlantıların kaynak eşiğindeki gerilme yığılma faktörleri sonlu elemanlar yöntemiyle, çekme ve eğilme yükleri altında

incelenmiştir. 45 derece kaynak açısının kullandığı çalışmada, T bağlantıların kaynak eşiğindeki gerilme dağılımları, iki boyutlu düzlem gerilme sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmiştir. Tüm analizlerde ANSYS paket programı kullanılmıştır-bağlantıların kaynak eşiğindeki gerilme yığılma faktörlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle, çekme ve eğilme yükleri altında incelendiği bu çalışmada, kaynak eşik radyüsünün artırılması ve/veya bağlantı boyutunun küçültülmesi ile gerilme yığılma faktörünün etkin bir şekilde azaltılabileceği görülmüştür.

Wen, vd., (2001)Çok telli bir tozaltı ark kaynağı işlemini, genel amaçlı bir sonlu eleman paketi ABAQUS kullanılarak modellemiştir.2Bve 3B modelleri oluşturulan kalın cidarlı boru kaynağı imalatı analiz edilmektedir. Kaynak öncesi işlemlerden oluşan artık gerilmelerin hesaba katılarak ve katılmayarak elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Kaynak işlemi sonucu oluşan çarpılmaların proses iyileştirilmeleriyle azaltılabileceği tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle gelecekteki süreçleri iyileştirebileceği gözlenmiştir.

Gunaraj ve Murugan, (2002)yüksek kalite elde etmek için kritik olan, öngörülebilir ve tekrarlanabilir bir kaynak dikişi sağlayacak koşullar seçilmesi gerekliliği üzerine, proses değişkenlerinin ve ısı girdilerinin etkilerini incelemek üzere matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada renkli metalografi tekniği ve tepki yüzeyi metodolojisi de kullanılmıştır. Isı girdisi ve tel besleme hızının ITAB üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür, ancak kaynak hızının tüm ITAB özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Voltajdaki artış tanecik büyümesine yol açtığı, azami ITAB genişliğinin kaynak ilerleme ve tel sürme hızının en düşük olduğu örnekte olduğu görülmüştür.

Anca, vd., (2011) Ergitme kaynağının sonlu elemanlar yöntemiyle analizini yapmışlardır. Mekanik analizden bağımsız olan termal problem nedeniyle her adımda mekanik analizden önce termal analiz yapılmıştır. Christensen ve arkadaşlarının yapmış olduğu deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Song, vd.,(2003)Kaynaklı bağlantıların çeşitli malzeme parametrelerindeki değişikliklere karşı termomekanik tepkilerinin hassasiyetini değerlendirmek için bir çalışma yapmışlardır. Hızdan bağımsız, küçük deformasyonlu, sıcaklığa bağlı malzeme

özelliklerine sahip termo-elasto-plastik malzeme modeli benimsenmiştir. Paslanmaz çelik olan AL-6XN'nın köşe kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir.

Dal veFabbro, (2016) Lazer kaynak simülasyonu için yapıları incelemede Tam bir simülasyon, tek bir modelle hesaplanamayacak kadar büyük olduğundan, literatür, termo-mekanik simülasyonlar ve çoklu fiziksel simülasyonlar olmak üzere iki tür modelden oluşturmuşlardır ve çelik veya paslanmaz çelik için iki modelleme metodolojisi göstermişlerdir.

Yaptıkları araştırmadaJoshi, vd.,(2013) Goldak'ın çift elipsoidal ısı kaynağı modelinin geometrik parametrelerinin değerlendirilmesi için deney ve analizler yapmışlardır. Kaynak simülasyonu için bir FEA aracı olarak yaygın olarak bulunan ticari yazılım Sysweld'i seçmişlerdir. Deneysel çalışmayı 200x100x12 mm³ ölçülerindeki AS 3678-250 çeliğinde gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçların makro görüntüleri incelenerek doğrulama gerçekleştirildi.

Piekarska ve Kubiak, (2013) lazer kaynağı ve lazer-ark kaynağında deneysel olarak belirlenmesi neredeyse imkânsız olan termal etkenlerin belirlenmesi ve imalatta kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için matematiksel modelleme ve sayısal analiz üzerine çalışmışlardır. Lazer-ark kaynağının lazer kaynağına göre ilerleme hızının iki katına çıkarılmasına izin verdiği lazer-ark kaynağının uzun iş parçalarında daha iyi olduğu, soğuma hızları sebebiyle ITAB bölgesinde lazer-ark kaynağında lazer kaynağındaki olumsuz etkilerin azaldığı görülmüştür. Oluşturulan matematiksel modelle deneysel sonuçlar uyum göstermiştir.

Nezamdest, vd., (2016) Yaptığı bu çalışma APIX65 boru hattı çeliğinin toz altı ark kaynağında termal dağılımı tahmin etmek için Goldak modelinin uygulanmasındaki bilgisayar yöntemlerini anlamak ve geliştirmek için sayısal ve deneysel bir araştırma hakkında bilgi vermektedir. Mikro yapı ve mekanik özellikler kontrol altına alınmak istenmektedir. Yapılan analizler 2B ve 3B olarak ABAQUS programında yapılmıştır. Analizlerin artık gerilmeleri öngörmede etkili ir şekilde kullanılabileceği ve 2B analizin 3B analize göre zaman ve maliyet açısından daha avantajlı olduğu görüldü. Deneysel sonuçların analizle uyum içerisinde olduğu görüldü.

Yadaiah ve BagTig , (2012) kaynağı ile deneysel olarak kaynamış oldukları iş parçasını 3B sonlu elemanlar modelini hazırlayarak Gizli erime ve katılma ısısı ile birlikte sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri sayısal simülasyona dâhil

etmişlerdir. Birleştirilmiş termo-mekanik model geliştirilmiş ve farklı ısı kaynağı model parametrelerinde kaynaklı plakanın termal ve mekanik davranışı incelenmiştir. Çiftelipsoidalınarka ve ön uzunluk oranının kaynak havuzu boyutları üzerindeki etkisi önemli olduğu, arka/ön uzunluk oranı arttıkça kaynak havuzu boyutlarının azaldığı ve arka/ve ön uzunluk oranının uygun değerinin deneysel olarak alınan sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bonakdar, vd.,(2017) Inconel-713LC düşük basınçlı gaz türbini kanatlarını elektron ışını kaynağı ile birleştirmişlerdir. ABAQUS yazılımı kullanılarak füzyon bölgesindeki ve ITAB bölgesindeki termal ve kalıntı gerilmeleri ön görmek ve çarpılmaları tahmin etmek için doğru bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Gaussian ile konik bir ısı kaynağının kullanımı doğrusal dağılımlı içi boş bir küre ile lineer dağılım kabul edildi. Model ile deneysel sonuçlar doğrulandı. Kaynak gücü ve kaynak hızı dâhil olmak üzere EBW parametrelerinin sıcaklık, artık gerilmeler ve kaynaklı yapısı sistematik olarak incelenmiştir.

Fachinotti, vd.,(2012) Şekillendirilmiş metal biriktirme (SMD), kaynak makinesi kullanılarak Ti-6Al-4V alaşımından bir dizi duvar yapmışlardır ve her durumda katman biriktirme sırasındaki ısı transferi problemi analiz etmişlerdir. Numuneler, çok çeşitli proses parametreleri (katman sayısı, katman yüksekliği, tel besleme hızı, hareket hızı, ısı girdisi vb.) ve duvar boyutları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu biriktirme işleminin termal analizi için bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Model, doğruluk ve verimlilik nedenleriyle 2Bdur. Oluşturulan sayısal model gerçeğe yakın bir kaynak ön görmüştür.

Nart ve Çelik, (2013) yaptıkları araştırmada, kaynak havuzunun doğru şeklini yakalamak için modellemede bazı modifikasyonlar ile çift elipsoid model kullanılarak yeni bir pratik yaklaşım önermişlerdir.. ABAQUS yazılımını kullanarak sonlu eleman yöntemiyle sıcaklık dağılımları ve artık gerilmeler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Füzyon bölgesindeki iletkenlik sayısı termal hareketin tahminini iyileştirdiği, ağ yapısı boyutları küçüldükçe sonuçların deneysel daha çok yaklaştığı görülmüş analiz deneysel sonuçlara yaklaşması tatmin edicidir.

Pu, vd.,(2017) yaptıkları çalışmada, kaynak işleminden sonra oluşan artık gerilmeleri ve çarpılmalarını araştırmak için yüksek dayanımlı Q345 çeliğine uygulanan çok pasolu alın kaynağında hareket eden ısı kaynağına sahip model, anlık ısı kaynağı

olarak adlandırılan model ve daha yoğun bir ağ yapısına sahip diğer bir modelle üç farklı modelleme üzerine çalışmışlardır. Kaynak metali ve iş parçasının mekanik özellikleri, özellikle akma gerilmesi farklılıkları dikkate alınmıştır. Artık gerilmeleri ve deformasyonu miktarlarını görmek için delik delme ve üç koordinatlı ölçüm sistemi kullanılmıştır. Hareket eden ısı kaynağı modelinin deneysel sonuçları daha iyi tahmin edebileceği, anlık ısı kaynağı modelinin yalnızca artık gerilmeler için makul sonuç görülebileceği, deformasyonla için başarısız olduğu, daha yoğun ağ yapısına sahip modelin kalın iş parçalarında artık gerilmeleri potansiyel olarak tahmin edebileceği görülmüştür.

Knoedel, vd., (2017) kaynak simülasyonunun pratik yanlarını inceledikleri bu araştırmada, son yıllarda artan sonlu elemanlar yöntemiyle kaynak sürecindeki artık gerilmelerin hesaplanmasında basit ama etkili mühendislik yaklaşımını irdelemişlerdir. Sonlu eleman analizi için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. HT-36 çeliği ve S355J2 ile tek paso kaynak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.

Yadav, vd., (2017) Düşük karbonlu çeliklerde toz altı kaynak deneyleri yapmışlardır. ITAB bölgesini deformasyonları ve kaynak dikişini incelemişlerdir. Isı kaynağı modellenerek akışkan akışını ve ısı transferini hesaplamak için analiz yapılmıştır. Üç boyutlu oval ısı kaynağının modeli deneysel kaynak geometrisinden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar oval ısı kaynağı modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Yaptıkları bu çalışmada numuneler üzerindeki mikro yapısal incelemeler, ısıdan etkilenen bölgede belirgin tane büyümesi ve füzyon bölgesinde ince ve eş eksenli taneler olduğunu ortaya koymaktadır.

Podder, vd., (2014) yaptığı çalışmada 6-16 mm arasında düşük karbonlu çeliklerin toz altı kaynağında çift elipsoidal ısı kaynağı modeli ele alınmıştır. Ark verimi, 0.9 olarak kabul edilmiştir. Kaynak esnasında 1200 A sabit güç uygulanmış iş parçası bakır kaplı 4mm çapında elektrot kullanılarak kanatılmıştır. 6, 8, 10, 12 ve 16 mm kalınlığındaki parçalar kullanılmıştır. Üst ve alt yüzeydeki sıcaklık ısı çiftleri ile ölçülmüştür. İki adet ısı çifti yerleştirildi. Plakanın üst ve alt kısmında ve kaynak dikişinden 25 mm uzağında konumlandırılmıştır. Deneyler yoluyla ve kaynak havuzlarının ilgili parametreleri ölçülerek regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Model ve analiz uyumlu sonuçlar vermiştir.

Benli, (2004) yapmış olduğu tez çalışmasında kaynaklı imalat esnasında oluşan artık gerilmeleri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Sonlu elemanlar analizi için ANSYS paket programı seçilmiştir. İş parçası St 37-2 olarak katı model olarak tasarlanıp ağ yapısı oluşturulmuştur. Kaynak metalinin başlangıç sıcaklığı 1723K, esas metalinki ise 300K olarak kabul edilmiştir. Yapısal analiz sonucunda, kaynak işlemi neticesinde sistemde kalan artık gerilmeler gözlemlenmiştir.

Erol, (2017) yaptığı çalışmada, St37/St37 ve Ck45/Ck45kaynakçiftlerine gaz altı ark kaynağı yöntemiyle alın kaynağıve köşe kaynağıile birleştirme işlemigerçekleştirilmiştir. Farklı kalınlık değerleri farklı ilerleme hızları ve farklı malzeme çiftleri deneysel çalışmalarla irdelenmiştir Ck45 çiftinin St37 çiftine göre daha az çarpıldığı, malzeme kalınlığının çarpılmayı azalttığı ve ilerleme hızının çarpılmayı arttırdığı gözlemiştir. Her prosesparametresi için yeniden analiz yapılmıştır. Analiz işlemleri Simufact Welding paket programıyla yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Zhang, vd.,(2018) Çok sıkı toleranslara sahip olan Çin Füzyon Mühendisliği Test Reaktörü (CFETR) vakum kabının (VV) kaynaklı imalatını incelemiştirlerdir. ABAQUS paket programında oluşturdukları 1/32 ölçekli modeli analiz altına almışlardır. Analizde üç farklı TIG kaynağı dikişi taklit edilmiştir. Ana kaynak gerilmesinin kaynak bölgesinde meydana geldiğini ve azami bozulmanın, iç kısım ve alt kısım arasındaki kaynak bağlantılarının yakınında kabukta meydana geldiğini göstermiştir. .sonlu elemanlar modeli 90.280 eleman ve 135.988 düğüm içermiştir. İç segment, üstsegment ve alt segment kabuğun içine dik olarak bozulurken, merkez segmenti (PS3) kabuğun dışına dik olarak bozulmuştur. Optimize edilmiş bir kaynak dizisi elde edilmiş ve 1/32 VV maketinin pratik montaj işlemine uygulanabilmiştir.

Altan, (2002) tezi için yapmış olduğu çalışmada, kaynaklı parçada oluşan çarpılmaları kaynak kalınlığı ve kaynak ağızı açılarıyla 25 farklı durumda incelemiştir. Açılan ağız açılarını sırasıyla şu şekilde vermiştir; 50°,55°,60°,65°,70°. Sac kalınlıkları ise 10mm, 20mm, 30mm,40mm, 50mm seçilmiştir. Oluşan durumları ANSYS paket yazılımında analiz edip EXCEL ile grafiğe dökmüştür. Model ANSYS üzerinde tasarlanıp iş parçası için AH 36 çeliği seçilmiştir. Ağ yapısı oluşturulan modelin zamana bağlı ısı dağılımını göstermiştir. İncelen sonuçlara göre en düşük açısılçarpılma 10mm sac kalınlığı ve 55° kaynak ağızında iken en yüksek açısılçarpılmanın, 30mm sac kalınlığı 70° kaynak ağızında olduğu görülmüştür.

Davoud ve Deng, (2003) yaptıkları çalışmada 2B ve 3B sonlu elemanlar yöntemi analizini birbiriyle ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlarda 600A kapasiteli gaz altı kaynak makinesi kullanılmıştır. İş parçası levhaları A-36 çeliğinde seçilmiştir. Sıcaklık dağılımının ölçümü için ısı çiftleri levhanın 2mm altına yerleştirilmiştir. İş parçasının kalıba ısı transferini azaltmak için iş parçasının altına seramik bilyeler yerleştirilmiştir. 2B ve 3B simülasyonları yapmak için ABAQUS paket programı kullanılmıştır. 2B model 3B modelin kesiti şeklindedir. 3B ağ, 15408 düğümlü 11604 elemana ve 2B ağ, 138 düğümlü 120 elemana sahiptir. Isıtma aşamasında 2B ve 3B sonuçlar ısıtma aşamasında birbirine yakındır. 3B model 2B modele kıyasla deneysel sonuçlara daha yakın olduğu görülmüştür.

Minh ve Phu,(2014)yapmış oldukları bir çalışmada kaynak yapılan malzemelerin üzerindeki deformasyonları simülasyon ve deneysel olarak incelemişlerdir. Birleştirilmiş bir eklem geometrisinin yapısını termo elastik-plastik yaklaşımına dayalı Simufact kaynak yazılımı kullanılarak modellemişler ve simülasyonlarını yapmışlardır. Simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak için dijital gaz metal ark kaynağı kullanarak üç farklı kaynak dizisi ile deneyler yapmışlar ve bunların deformasyon miktarlarını ortaya koymuşlardır. Birinci kaynak dizisi soldan sağa, ikincisi dıştan içe ve üçüncü dizi ise içten dışa doğru yapılmıştır. Bu deneylerde düşük karbonlu çelik olan AISI 1005 ana metal olarak seçilmiştir. Sonuçlara incelendiğinde, termo elastik-plastik 3B FEM analizinin deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği ve “içten dışa” kaynak dizisinin “dıştan içe” ile karşılaştırıldığında daha az bozulmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca üç işlemde deformasyon profilleri aynıdır. Ancak deformasyon değerleri önemli ölçüde değişmektedir. En büyük deformasyon 1. işlemde ortaya çıkmaktadır. 2. ve 3. işlemlerde ise önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.



İKİNCİ BÖLÜM
KAYNAK YÖNTEMLERİ

2.1. KAYNAK YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Kaynak işlemi uygulanacağı materyalin cinsiyle anılır. Bunlar metal kaynağı ve plastik kaynağıdır. Metal kaynağı, metalik malzemelerin birleştirilmesi yöntemidir. Bu yöntem ısı veya basınç altında uygulanabilir veya ısı ve basınç aynı anda kullanılabilir. Metalik malzemenin birleşimi ilave metal kullanılarak veya kullanmadan gerçekleşebilir. İş parçasının birleşimi esnasında ana metalin ergime sıcaklığına eşit veya yakın ilave bir metal kullanılıyorsa buna “ilave metal” denir.

Plastik kaynağı iste aynı veya farklı tür termoplastik malzemenin birleşiminde kullanılan yöntemin adıdır. Bu çalışmada metal malzemenin kaynağı işleneceği için metal kaynağı üzerinde durulacaktır. Kaynak yöntemleri farklı başlıklar altında gruplanır.

2.1.1. Kaynağı Amacına Göre Gruplandırma

Kaynak amacına göre birleştirme kaynağı ve doldurma kaynağı olmak üzere 2 gruba ayrılır. Birleştirme kaynağı iki veya daha fazla metali bir bütün haline getirmek için yapılan kaynak işlemidir. Doldurma kaynağı ise iki veya daha fazla metali bir bütün haline getirmek için yapılan kaynak işlemidir

2.1.2. Kaynak Yöntemi Olarak Gruplandırma

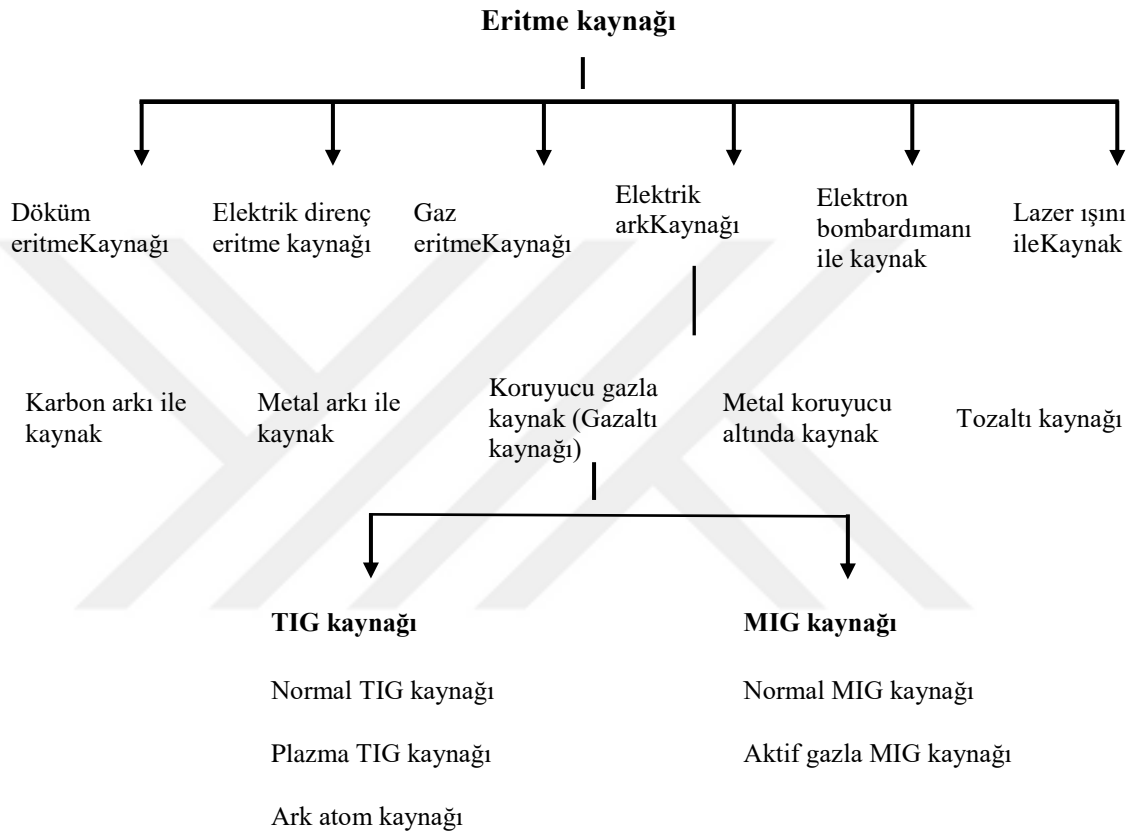
Kaynak yöntemi olarak 4 ana grupta sınıflandırma yapılabilir. Bunlardan birincisi el kaynağıdır ve kaynak işlemi kaynakçı tarafından el ile yönetilir. İkincisi yarı mekanize kaynaktır. Bu yöntemde kaynak işlemi el yerine operatör tarafından kısmen mekanize edilmiş bir sistem ile gerçekleşir. Üçüncüsü tam mekanize kaynaktır. Burada kaynak işlemi el yerine operatör tarafından tamamen mekanize edilmiş bir sistem ile gerçekleşir. Son olarak otomatik kaynaktır ve burada kaynak işlemi, iş parçası değişimi vb. işlemler tamamen otomatik olarak gerçekleşir (Anık, 1991).

2.1.3. Kaynak İşleminin Cinsine Göre Gruplandırma

Kaynak, uygulanan işlemin cinsine göre Şekil2.1 ve Şekil2.2’de gösterildiği şekilde 2 ana grupta sınıflandırma yapılabilir. Bunlardan birinci eritme kaynağıdır. Eritme kaynağı, kısaca iş parçasını veya iş parçası ilave metal ikilisini kısmi olarak ısıtarak ergime sıcaklığına çıkarılması, birleştirilmesi ve soğutulması işlemidir. İkincisi ise basınç kaynağıdır. Basınç kaynağı da, genel olarak birleştirme esnasında bir ilave metal kullanmadan, basınç altındaki iş parçasını ısıtarak birleştirmektir. Görüldüğü gibi

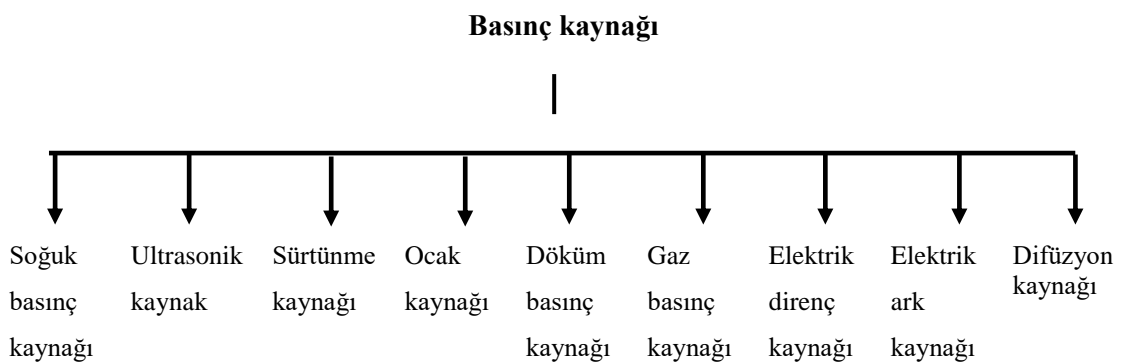
ısı iki yöntemde de etkin bir parametredir. Gaz altı kaynak yöntemleri her metalde uygulanabilmesi, endüstride sıkça kullanımı, otomasyona kolay adapte edilebilmesi, seri imalata uygunluğu gibi avantajları sebebiyle, bu araştırmada deneysel olarak gaz altı kaynak makinesi kullanımı uygun görülmüştür. Bu sebeple çalışmamızda özellikle gaz altı kaynak yöntemlerinden bahsedilecektir.

Şekil 2. 1: Eritme Kaynağının Gruplandırılması



Kaynak:(Anık, 1991, s. 12-18)

Şekil 2. 2: Basınç Kaynağının Gruplandırılması



Kaynak:(Anık, 1991, s. 12-18)

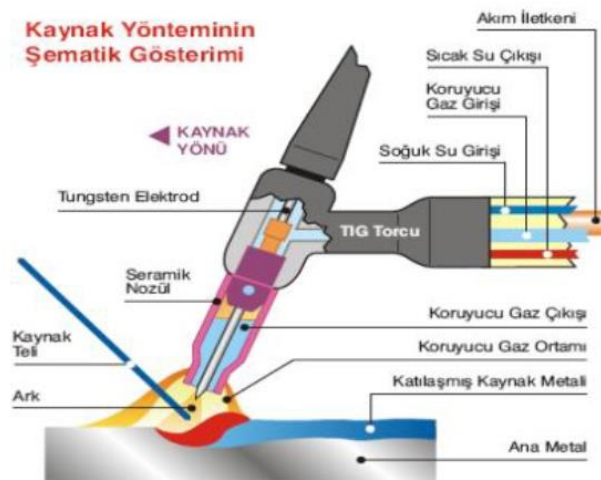
2.1.4. Gaz Altı Ark Kaynak Yöntemleri

Gazaltı ark kaynağı yöntemi kaynak havuzunun havanın içindeki oksijen ve azottan uzak tutmak için ergiyen kaynak metali ile hava arasındaki teması kesen özel gaz tertibatlarına sahip kaynak makinalarıyla yapılan kaynak yöntemidir. Kullanılan gazın cinsi ve kaynak telinin özelliği kaynağa özel isimlerini tanımlar (mig, mag, tig) gibi. Elektrot örtülü değil çıplaktır. Kaynak teli farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olabilir. Kullanılan gazlar ise soy gazlar, aktif gazlar ve bunların karışımı karışım gazlar olabilir. (Anık, 1991)

2.1.4.1. TIG Kaynağı

Amerika Birleşik devletlerinde ilk geliştirildiğinde magnezyum gibi hafif metal alaşımların kaynağında helyum gazı altında kullanılmıştır. İkinci dünya savaşında kullanılan savaş uçakların yapılarında kullanılan alüminyum ve magnezyum alaşımlarında ihtiyaca bağlı olarak daha gelişmiş sistemlere evrilmiştir. İsmi 'T'ungsten 'I'nert ' G'as kelimelerin baş harfinden almıştır Amerikan resmi kaynak derneği GTAW olarak isimlendirmiştir. TIG kaynağı Tungsten elektrot ile ark oluşturarak iş parçasının kaynak ile birleştirilmesini sağlar. TIG kaynağı ilave elektrotla yapılabildiği gibi ana metali kullanarak da birleştirme işlemini gerçekleştirebilir. (Anık, 1991, s. 85) Örnek TIG kaynağı şeması şekil2.3'de gösterildiği gibidir.

Şekil 2. 3:TIG Kaynağının şematik gösterimi

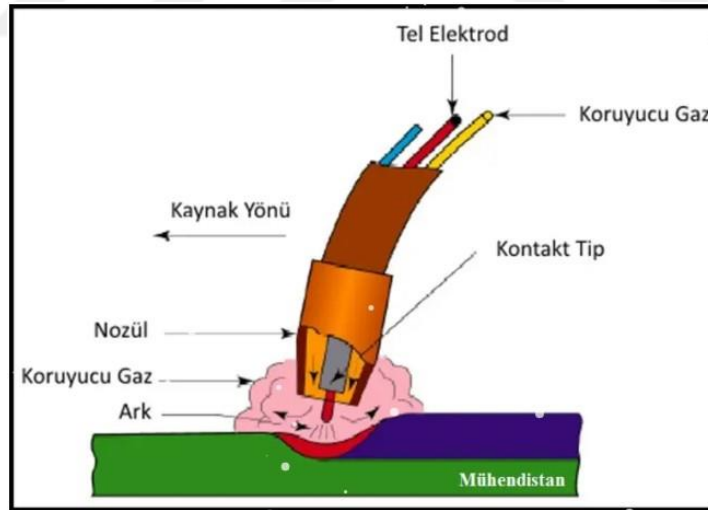


Kaynak: (Baylan, 2015)

2.1.4.2. MIG/MAG Kaynağı

Gazaltı kaynak yöntemlerinden MIG/MAG yöntemi sınırlı bir ergime alanında ark ile oluşturulan ısı sayesinde ilave metali ve iş parçasının ısıtılması, eritilmesi ve katılaştırma adımlarını içeren birleştirme yöntemidir. Kaynak havuzu ergiyen ilave metalle dolar. Kaynak işlemi sırasında ergime bölesini havanın oksijeni ve azotunun olumsuz etkilerinden korumak için koruyucu gaz kullanılır. Korucu gazın soy gaz olması kaynağı isminin MIG, Koruyucu gazın aktif gaz olması kaynağa MAG ismini verir. MIG kaynağı ile Alüminyum, bakır ve paslanmaz çelik gibi kayak işlemi zor olan metallerin kaynağı da gerçekleştirilebilir. MAG kaynağı karbondioksit gazı altında eriyen elektrotla yapılır. Kaynak havuzunun etrafında oluşan kaynak sıçrantılarının azalması ve kaynak dikişinin görselinin iyileştirmesi için Argon içerikli karışım gazlar kullanılır. Oksijen ilgisi yüksek Alüminyum gibi metallerin kaynağı bu yöntemle yapılamaz. MAG kaynağında kullanılan makine tertibatı MIG kaynağı ile tamamen aynıdır. (Anık, 1991) MAG kaynağının şeması şekil 2.4’de gösterilmiştir.

Şekil 2. 4:MAG Kaynağı Şeması



Kaynak:(Yılmaz, 2019)

2.1.4.3. MIG/MAG Kaynak Makineleri

Manuel kaynak yöntemlerinde kullanılan konvansiyonel tip kaynak makinelerinin bir örneği Şekil2.5’de gösterilmiştir. Kaynak makineleri güç ünitesi, soğutma ünitesi, tel sürme tertibatı, gaz tüpü, şase kablosu ve kaynak torcundan oluşur.

Şekil 2. 5:GEKAMAC Marka Konvansiyonel Kaynak Makinesi



Güç Ünitesi

Üzerinde voltaj ayarlama düğmelerini de bulunduran içirişinde gerilim seviyelerini ayarlamaya yarayan bobinlerin bulunduğu kısımdır. Üzerindeki isteğe bağlı olarak bulunan dijital göstergeler sayesinde yapılan kaynağın amper ve voltajı görülebilir. Elektrik bağlantıları, şase hattının bağlantısı güç ünitesine yapılır.

Soğutma Ünitesi

Kaynak esnasında oluşan ısı kaynak torcuna zarar verir. Oluşan ısının sistemden bir şekilde uzaklaştırılması gereklidir. Kaynak yoğunluğunun az olduğu işlemler esnasında soğuma doğal yöntemlerle gerçekleşir. Bu tip torclara hava soğutmalı torc denir. Hava soğutmasının yeterli olmadığı işlemlerde su soğutmalı torc kullanılır. Sistemde gezinen suyu devir daim yapması için kaynak makinalarında soğutma ünitesi bulunur.

Tel Sürme Tertibatı

Tel sürme tertibatında 0.8 mm, 1mm, 1.2mm gibi çaplardaki kaynak teli motor tahriki vasıtasıyla uygun çaplardaki makaralarla düz bir şekilde hortum paketinin spiralinin içinde geçerek kaynak bölgesine iletilmesini sağlar. Tel sürme tertibatına MAG kaynak için özel üretilmiş makara veya varil teller bağlanabilir.

Gaz Tüpü

MAG kaynak makinelerinde aktif gazın depolanma şekli; tüp, kaset veya tank şeklinde olabilir.

Gaz Düzenleyici

Kaynak işlemi esnasında kullanılan gazın debisi düzenleyici üzerinden ayarlanır. Gazın debisi kullanılan tel çapının 10 katı kadar olmalıdır.  rnek olarak: 1mm çapındaki tel için 10 L/dk şeklinde olmalıdır.

şase Kablosu

Kaynak akımın tamamlanması için i parçasına veya tezg ha bağlanan donanımdır.

Kaynak Torcu

şekil 2.6'de içyapısı gösterilen kaynak torcu esas kaynak yapmaya yarayan donanımdır. Kullanım alanına göre isteğe bağlı özellikler taşır (su soğutması, torc uzunluğu vb.) torc gaz dağıtıcısı, kontak meme, meme hamili, nozzle gibi sarf tüketimi olan malzemelerden oluşur.

şekil 2. 6:Birleştirilmemiş Gaz Altı Kaynak Torcu



Gaz Dağıtıcı

Koruyucu gazın iş parçasıyla ergiyen tel arasında homojen olarak dağılmasını sağlar.

Kontak Meme

Kaynak telini içerisinden düzgün bir şekilde ilettilmesine yarayan bakır alaşımlı malzemedir. Zirkonyum alaşımlı olanları yüksek ısılara daha dayanıklı olduğu için ömürleri daha yüksektir.

Meme Hamili

Kontak meme tutmaya yarayan bakır alaşımlı torc donanımıdır.

Nozzle

Gaz dağıtıcıdan çıkan gazı iş parçası üzerine odaklar. Kontak meme ile nozzle arası 'bt5' gibi kaynak spreleriyle kaynak sıçrantılarından uzak temiz bir halde olması sağlanmalıdır.

2.1.4.4. MAG Kaynak Yöntemlerinin Avantajları

Mag kaynağının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Örtülü elektro ark kaynağına göre daha hızlıdır.
- Kaynak işlemi sonrası cüruf temizliği gerektirmez
- Kaynak havuzunda cüruf kalıntısı olmadığından daha kaliteli kaynak dikişi elde edilir.
- Düşük çaplı elektrotlar sayesinde düşük akımlarda bile yüksek kaynak metali yığma hızına sahiptir.
- Kaynak metali düşük hidrojen miktarına sahiptir sertleşme kabiliyeti yüksek çeliklerde avantaj oluşturur.
- Derin nüfuziyet sağlanır.
- İnce iş parçalarında örtülü elektrot ark kaynağına göre daha iyi sonuç verir.
- Otomatik kaynak sistemlerine dâhil edilmesi kolaydır.

2.1.4.5. MAG Kaynak Yöntemlerinin Dezavantajları

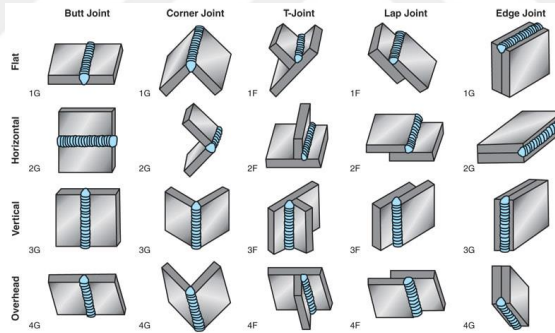
Mag kaynağının dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İlk satın alma maliyeti örtülü elektrotla göre daha yüksektir.
- Taşınabilirliği azdır.
- Sertleşme kabiliyeti yüksek çeliklerde soğuma hızının yüksek olması sebebiyle kaynak bölgesi çatlamaya meyillidir.
- Koruyucu gaz hava akımı olan iş alanlarında koruyuculuğu yitirdiği için ekstra önemler gerektirir. Açık alanlarda kaynak yapmaya uygun değildir.

2.1.5. Kaynak Pozisyonları

Kaynakçıların kaynak işinin doğası gereği farklı pozisyonlarda kaynak yapmaları gerekir. Amerikan Kaynak Derneği harf ve sayı birleşimleriyle yapılan konumları isimlendirir. Alın kaynağı için 'G' harfi köşe kaynağı için 'F' harfi kullanılır. Şekil 2.7'de gösterilen Düz, yatay, dikey ve tavan kaynağı çeşitleri şöyledir.

Şekil 2. 7: Kaynak Pozisyonları.



Kaynak:(Dey, t.y.)

2.1.6. Kaynak Ağzıları

Kaynak işlemi aslında bir döküm işlemidir. Ergimiş halde olan kaynak telinin bir havuzun içine akması gerekmektedir. Bu havuza kaynak ağzı denilmektedir. Kaynak işlemi gerçekleştirilecek iş parçasının kalınlığı arttıkça kaynak bölgesinde nüfuziyet problemleri oluşur. Bu sebeple farklı tip kaynak ağzlarına ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.8'de (Dey, t.y.) üretimde kullanılan kaynak ağzı modelleri verilmiştir.

Şekil 2. 8: Kaynak Ağzı tipleri

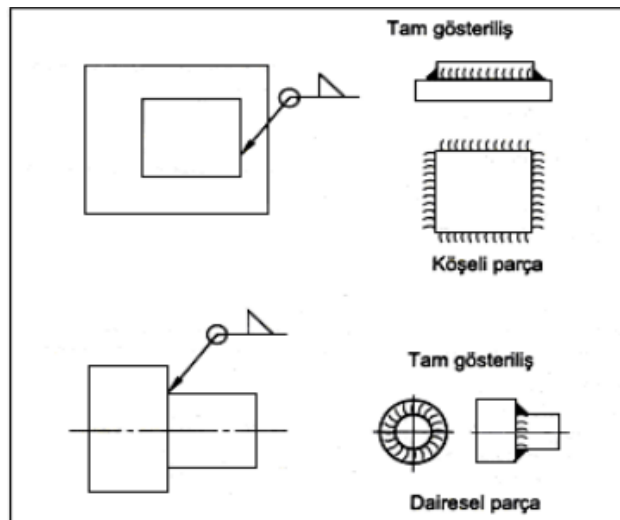
KAYNAK AĞZI ÖLÇÜLERİ				
Sac kalınlığı mm	Kaynak Ağzı	Elektrot Çapı mm	Akım Şiddeti Amper	Ark gerilimi Volt
0,75 - 1	Küt Alın Dikliği 0 mm	1	18 - 28	20
1 - 1,5		1,5 - 2	28 - 45	20 - 22
1,5 - 2	Küt Alın Dikliği 0,5-3 mm	2 - 2,5	38 - 63	22 - 25
2 - 2,5		2 - 2,5	50 - 80	23 - 26
3 - 4				
6 - 10	V - Dikliği 58° 0-3 mm	3,25 - 6	120 - 300	26 - 35
10 - 20	X - Dikliği 68° 0-3 mm	5 - 8	240 - 450	30 - 40

Kaynak:(Dey, t.y.)

2.1.7. Kaynak Sembolleri

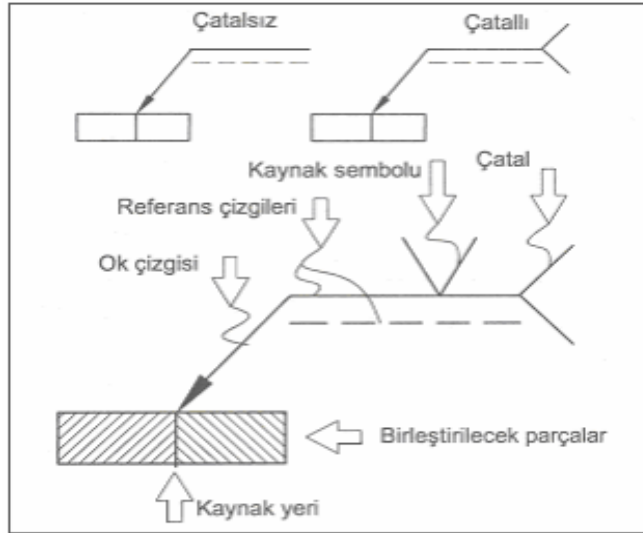
Kaynaklarda kullanılacak olan birtakım çizim elemanları örneğin Ok çizgisi sembol veya yazı için çizgi genişlikleri TS 88- 20 ISO 128-20 ve TS 10841 EN ISO 3098-2 standartlarına uygun olmalıdır. Bu standartlar dünyaca kabul görmüş standartlardır (MEB, 2013). Üretime verilecek teknik resimler kaynaklı birleştirmeleri içinden bütün detayları içerecek şekilde olmalıdır. Şekil 2.9'da çepçevre kaynağının teknik resim üzerinde gösterilmesi verilmiştir. Şekil 3.10'de ise kaynak sembolünün kısımları verilmiştir.

Şekil 2. 9:Çepçevre Kaynağın Gösterilmesi



Kaynak:(Milli Eğitim Bakanlığı, 2013)

Şekil 2. 10:Kaynak Sembolünün Kısımları



Kaynak:(Milli Eğitim Bakanlığı, 2013)

2.1.8. Endüstride Robotlaşma

Uluslararası standart teşkilatına göre endüstriyel robotların tanımı şu şekildedir:"Endüstriyel uygulamalarda kullanılan, üç veya daha fazla programlanabilir eksenli olan, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir, çok amaçlı, uzayda sabitlenmiş veya hareketli manipülatördür." (ISO, 2012). Gelişen dünyada otomasyon teknolojilerinin yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Robot kollar da endüstrinin otomasyonunda önemli bir yer almıştır. Robot kollar endüstride taşıma, kaynak, boya, montaj gibi alanlarda kullanılır. Robotların kullanımı üretimde kalite, standartlaşma, hız gibi avantajlar getirmiştir.

2.1.9. Kaynak Robotları

Kaynak endüstrisinde kullanılan robot sistemlerinin, toplan robot âleminin %25'ini oluşturduğu düşünülmektedir. Sanayide kalifiye eleman kıtlığı, verimlilik, kalite gibi etkenler üreticileri otomasyon sistemlerine itmiştir. Kalifiye ustaya bağlı kaynak işçiliklerinde meslek hastalıkları, yorgunluğa bağlı hatalar, verim kaybı gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Kaynak robotlarının kullanımıyla kalifiye olmayan elamanlarla yükleme boşaltma işlemi yaptırılarak, daha iyi sonuçlar alınmaktadır. Ne yazık ki robot kaynak prosesinin manuel kaynak prosesine göre hız avantajı yüksek değildir. Bunun sebebi Kaynak işleminin çok karmaşık bir süreç olup nüfuzüyet, kalınlık gibi parametrelerinin olmasıdır. Gaz altı kaynak yöntemleriyle birlikte çalışan kaynak robotları, kaynak manipülatörü olarak adlandırılmaktadır. Çeşitleri şöyledir;

- Kartezyen manipülatör

- Silindirik manipölatör
- Küresel manipölatör
- Mafsallı manipölatör
- Scara manipölatör
- Paralel manipölatör(Tapıcı, 2006, s. 21-28)

Kaynak robotlarına imalatlar esnasında uygun pozisyonu elde etmek için uygun konumlandırıcılar montaj edilir. Bu konumlandırıcılar el terminali vasıtasıyla kodlanarak uygun zamanda uygun açığı alarak ideal pozisyonu alır. Kullanılan konumlandırıcı çeşitleri;

- Tek eksen konumlandırıcılar
- 2 eksenli konumlandırıcılar
- H tipi konumlandırıcılar(Kuka, 2022)

Şeklinde guruplara ayrılarak yapılacak işe uygun şekilde imal edilirler.KUKA ve PANASONİC firmasına ait kaynak robotlarının H tipikonumlandırıcılarla çalışması resim 2.11’de gösterilmiştir.

Şekil 2. 11:KUKA Ve PANASONİK Marka Kaynak Robotları







ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

3.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ilk olarak 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından karışık sınır şartlarına, (sıcaklık-yük-sabitleme) sahip, gerçek mühendislik problemlerinin çözümlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır(Ovalı & Esen, 2018). Günümüzde ise sonlu elemanlar yöntemi birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Çok küçük parçalara ayırma metoduna dayanan sonlu elemanlar yönteminde teorik olarak çözümlenmesi zor olan fiziksel problemleri yakınsayarak çözümlenebilmektedir. Model, parçanın geometrisine ve büyüklüğüne uygun olarak seçilen elemanlara bölünür. Uygun elemanlara bölünmüş haline matematiksel model denilmektedir. Bu bölme işleminde ağ(mesh) yapısına ihtiyaç duyulur. Elemanların birbirlerine temas ettikleri noktaya düğüm noktası denir. Düğüm noktalarının belirli bir uzaydaki x,y,z eksenlerine göre koordinatları saptanır. Ayrıca malzeme özellikleri (poisson oranı ve elastisitemodülü) programa tanıtılır. İş parçasına uygulanan kuvvetler ve sınırların belirlenmesiyle oluşan durumlar için oluşturulan matrisler bilgisayar tarafından çözülür. (Güler & Şen, 2015)

Şekil 3. 1: Eleman Tipleri



Kaynak: (Güler & Şen, 2015)

Eleman tipleri tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu elemanlar olarak üç grupta incelenir. En az iki düğüm noktası ile tanımlanan tek boyutlu elemanlar kafes sistemi gibi analizlerin çözümünde kullanılır. Modelin çözüm hassasiyetinin artması için iki düğüm noktası arasında daha fazla düğüm noktaları konulması gerekir. İki boyutlu elementler için en az 3 düğüm noktasına ihtiyaç vardır. Bu tip elemanlar 2boyutlu modellerin çözümünde kullanılmaktadır. Üç boyutlu elementler özellikle hacimlerin sonlu elemanlar analizinde kullanılmaktadır. Üç farklı eleman tipleri şekil 3.1'de görülmektedir.(Ovalı & Esen, 2018)

Sonlu elemanlar yönteminde çözümlenecek olan problemin doğru tanımlanması çok önemlidir. Bir sonlu elemanlar yöntemi analizinde şu adımlar takip edilmelidir.

- Uygulanacak analizin türünün belirlenmesi
- Analizi yapılacak parçanın modellenmesi
- Ağ yapısının oluşturulması
- Ağ özelliklerinin tanımlanması
- Matris formülleri ve denklemlerin hazırlanması
- Düğüm noktalarındaki değişkenlerin hesaplanması
- Sonuçların çözümlenmesi ve incelenmesi

Piyasada yaygın olarak ANSYS, ABAQUS, ALGOR, NASTRAN, SAP2000 gibi paket yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak;

- Gerilme analizleri
- Termal analizler
- Dinamik analizler
- Titreşim analizleri
- Burkulma analizleri
- Deformasyon analizleri

Sonlu elemanlar yönteminin amacı tasarlanan ürün servis şartlarında hasara uğrayacak mı? Sorusuna cevap bulmaktır. Sonlu elemanlar analizlerinde analiz yapılan parçaların hasara uğrayıp uğramadıkları bakılır(Ovalı & Esen, 2018).

Simufact Welding Simülasyon Programı

Simufact welding Kaynaklı imalat proseslerini sonlu elemanlar mantığı ile analiz eden bir yazılımdır. MSC grup altındaki Hexagon bünyesinde yer almaktadır. SW yazılımının ara yüzünde kaynaklı imalat süreçleri modellenebilir ve analiz edilebilir. SW yazılımda analizi yapılabilen kaynak işlemleri şöyle sıralanabilir.

- Ark kaynağı
- Lazer kaynağı
- Elektron Işın kaynağı
- Sert lehimleme
- Direnç punta kaynağı(**Simufact Welding, 2022**)

Ayrıca gerilim giderme ve mekanik test analizleri de yapılabilmektedir.
Program içerisinde,

- Ergime / nüfuziyet bölgesi
- Kaynak sırasında parça üzerindeki sıcaklık dağılımı / ısıdan etkilenen bölgeler
- Çarpılma / distorsiyon miktarı
- Kaynak sırasında ve sonrasında parça üzerindeki gerilme dağılımı
- Faz dağılımı (çelik malzemeler)
- Kaynak sonrasındaki mekanik özellikler incelenebilmektedir.

(Simufact Welding, 2022)



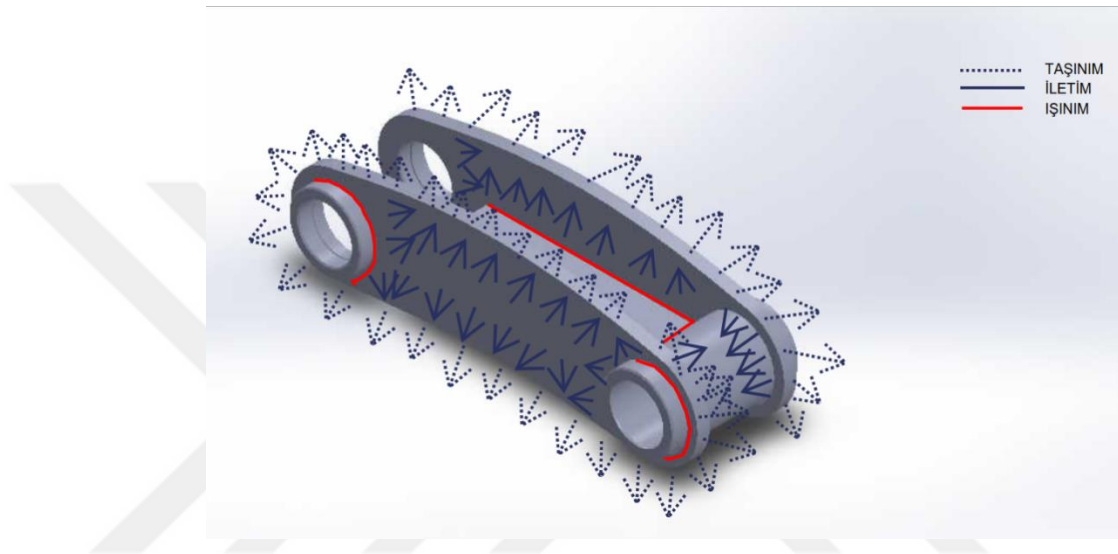


DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
KAYNAKTA ISI TRANSFERİ

4.1. KAYNAKTA ISI TRANSFERİ VE SAYISAL ÇÖZÜM

Kaynak işlemi sırasında iş parçasına ısı girdisi olur. İş parçasının sıcaklığı öncelikle yükselir ve ısı girdisi durduğu zaman çevre sistemiyle eşit sıcaklığa kadar soğur bu süre içerisinde ısı transferi gerçekleşir. İş bu parçada ısı transferi üç yolla da gerçekleşir. Bunlar şekil 4.1'de hareket yönleri oklarla gösterilen. Işınım, taşınım ve iletimdir. İş parçası üzerinde ısı akışı sembolik olarak gösterilmiştir

Şekil 4. 1: İş Parçasının Isı Transferi Mekanizmaları



4.1.1. İletim İle Isı Transferi

İletim, etkileşim içindeki komşu parçacıkların daha yüksek enerjili olandan daha az enerjili olana enerji aktarımıdır. İletim katı, sıvı veya gazlarda yer alabilir. Gazlarda ve sıvılarda iletim, moleküllerin rastgele hareketleri sırasında çarpışmaları ve difüzyonundan kaynaklanır. Katılarda ise, bir kafes içindeki moleküllerin titreşimleri ile serbest elektronlar tarafından enerji taşınımının birleşiminden kaynaklanır.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

\dot{Q}_{cond} : iletimle ısı transferi miktarı (W)

A: Alan(m^2)

k: Termal iletkenlik katsayısı ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)

dT: Sıcaklık farkı(K)

dx: Kalınlık (m)(Çengel & Ghajar, 2017, s. 17-18)

4.1.2. Taşınım İle Isı Transferi

Taşınım ile ısı transferi katı yüzeylerden sıvı veya gaz arasındaki enerji aktarımını olayına denir. Doğal ısı taşınım olayı sıcaklık farklılıkları sonucu oluşur. Eğer ısı fan, pompa, rüzgâr gibi cebri yollarla cisimden uzaklaştırılırsa zorlanmış taşınım denir. Newton'un soğuma kanununa göre; sıvı yada gaz ile temas eden katıdan ısı akışı hem yüzey sıcaklıkları " T_s " hem de iletimle ısı transferinin bir katsayısı vasıtasıyla eriyiğin hacim sıcaklığı " T_∞ " farklılığı ile orantılıdır:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (4.2)$$

\dot{Q}_{conv} : Taşınım ile ısı transferi miktarı (W)

h : Isı transferi katsayısı ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)

A_s : Yüzey alanı (m^2)

T_s : Yüzey sıcaklığı, (K)

T_∞ : Ortam sıcaklığı (K)

(Çengel & Ghajar, 2017, s. 25-26)

4.1.3. Işınım İle Isı Transferi

Yapılarda karşılıklı ısı değişimi durumu söz konusudur. Çünkü ısıya maruz kalan parçalar Elektromanyetik dalgalar yayarlar. Bir parçada birim anda oluşan Radyasyonla oluşan ısı, Stefan-Boltzmann'a göre kara cisim ışımasını:

$$\dot{Q}_{emit} = \sigma A_s T_s^4 \quad (4.3)$$

Kara cisim en yüksek hızla ışıyan cisme denir " ε " değeri $0 \leq \varepsilon \leq 1$ olmak üzere kara cisme ne kadar yakın olduğunun göstergesidir.

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (4.4)$$

Gelen ışımanın enerjisinin bir kısmı cisim tarafından soğrulur. " α " değeri $0 \leq \alpha \leq 1$ olmak üzere

$$\dot{Q}_{absorbed} = \alpha \dot{Q}_{incident} \quad 4.5$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad 4.6$$

$$\dot{Q}_{total} = h_{combined} A_s (T_s - T_{\infty}) \quad 4.6$$

\dot{Q}_{emit} : Yayılan ısı miktarı (W)

$\dot{Q}_{absorbed}$: Emilen ısı miktarı (W)

$\dot{Q}_{incident}$: Gelen ısı miktarı (W)

\dot{Q}_{rad} : Radyasyonla ısı transferi miktarı (W)

T_s : Yüzey sıcaklığı (K)

T_{Surr} : Çevreleyen yüzey sıcaklığı (K)

T_{∞} : Ortam sıcaklığı (K)

A_s : Yüzey alanı (m^2)

ϵ : Neşretme katsayısı (Emissivite)

σ (Stefan-Boltzmann sabiti): $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$

α : Soğurganlık oranı

$h_{combined}$: Kombine ısı transferi katsayısı ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)

Kara cisim için $\epsilon=1$, metalik yüzeyler için $\epsilon =0,2-0,32$, çeliklerde oksitli yüzeler için $=0,61$ 'dir. (Çengel & Ghajar, 2017, s. 27-29)

4.1.4. Kaynak Bölgesinin Isı Girdileri

Kaynak bölgesindeki ısı girdilerini aşağıdaki denklemlerle ifade edebiliriz. Kaynak makinesinin oluşturduğu ark gerilimi ve ark akımını miktarı ısı girdisinin miktarıyla doğru orantılı iken kaynak robotu veya kaynak operatörünün kaynak yapma hızıyla ters orantılıdır.

$$P = E \cdot I \quad (4.7)$$

$$Q = f \frac{E \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (4.8)$$

$$Q = f \frac{P \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (4.9)$$

Q = kaynak pasosunun birim uzunluğu başına düşen ısı miktarı (kJ/m)

P : Isı kaynağından alınan toplam enerji (*watt*)

E :Ark gerilimi (V)

I :Ark Akımı (A)

f : ısı iletim verimi (örtülü elektrotlarda yapılan ark kaynağında bu değer yaklaşık 0,8'dir.)

v : Kaynak hızı (m/dk)(Eryürek, 2007, s. 11)





BEŞİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METHOD

5.1. MATERYAL VE METHOD

Kaynaklı imalat süreçlerinde ısı girdisi ve buna bağlı olarak çarpılmalar önemli rol almaktadır. Çarpılmalar kaynak sonrası düzelme işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstride ek iş, ek maliyet demektir. İş parçasının kaynak süreçlerinde sıralama, akım, voltaj, ilerleme hızı ısı girdisini etkileyen parametrelerdir. Çalışmada hedeflenen kaynak sıralaması dışındaki parametreler sabit tutularak farklı kaynak sıralamalarının S355J2+N malzeme kalitesindeki iş parçası üzerindeki deneysel olarak elde edilen etkilerinin, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmasını incelemektir. Deneysel çalışmada parça üzerindeki ölçüm noktalarına konumlandırılmış 4 adet ısı çiftten alınan sıcaklık değerleri ve kaynak işlemi sonrası 3 boyutlu ölçüm cihazından alınan değerler ele alınmıştır. Simülasyonda aynı ölçüm noktalarındaki sıcaklık değerleri, toplam çarpılmalar ve simülasyon sunucundaki artık gerilme miktarları ele alınmıştır. Deney çalışması için 3 farklı proses belirlenmiş olup her prosese ait üçer adet numune çalışması yapılmıştır. Kaynak işlemleri standart olması adına kaynak robotu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir

5.1.1. Malzeme

Teknik resim şartnamesinde belirtilen s355j2+N çeliği kullanılmıştır. Kullanılan malzeme endüstride sıkça tercih edilen yapı çeliklerinden biridir. Simufact Welding verilerine göre S355j2+N çeliğine ait kimyasal özellikler Tablo 5.1'de verilmiştir. Analiz aşamasında kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ise tablo 5.2'de belirtilmiştir.

Tablo 5. 1: S355j2+N Çeliğinin Kimyasal Özellikleri

POTA ANALİZİ %	C	Si	Mn	P	S	Al
EN YÜKSEK	0,21	0,35	1,40	0,030	0,035	0,30
EN DÜŞÜK	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
DEĞER	0,17	0,02	1,16	0,017	0,011	0,05

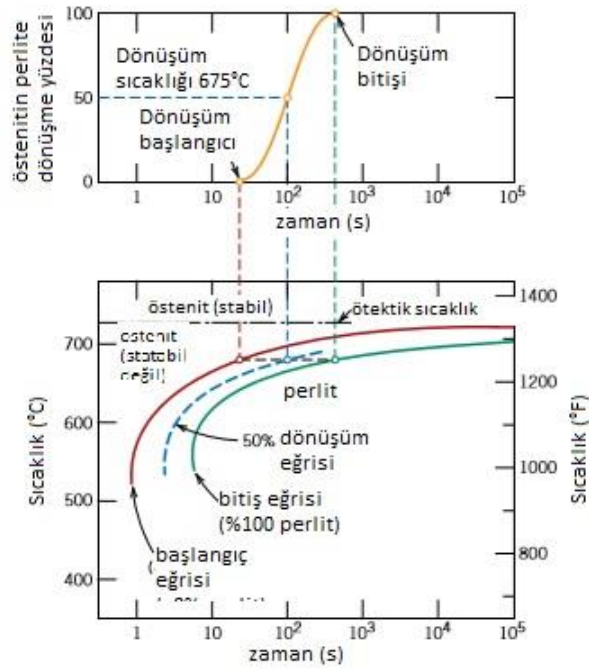
Tablo 5. 2: S355j2+N Çeliğinin Mekanik Özellikleri

Akma Mukavemeti N/Mm ²	Çekme Mukavemeti N/Mm ²	Uzama %	Çentik Darbe Dayanımı (ISO- V/-20°C)
--------------------------------------	---------------------------------------	------------	---

TTT Diyagramı

TTT (Time- Temperature- Transformation) izotermal soğuma eğrileri malzemenin belirli sıcaklıklarda sabit tutularak yapılan soğurma işlemi esnasında malzeme yapısının aldığı faz dönüşümlerini gösterir. Soğuma esnasında sıcaklığı kademeli olarak sabit tutmak tane yapılarının oluşmasına fırsat tanıyarak istenilen yapı türü elde edilmesi sağlanabilir. (William & David, 2015, s. 371)Ötektoid bileşimli bir Demir karbon alaşımının %100 östenitten %100 perlite dönüşümü Şekil 5.1'in üst kısmında verilmiştir. Bu dönüşümleri zamana bağlı olarak görmek daha uygun bir yoldur Ötektoid çeliğin zamana bağlı çizilmiş dönüşüm grafiği Şekil 5.1'in alt kısmında verilmiştir

Şekil 5. 1:Zamana Bağlı İzotermal Dönüşüm Eğrisinin Çizimi



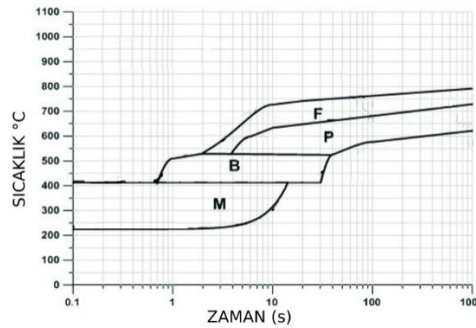
Kaynak: (William & David, 2015)

CCT Diyagramı

İzotermal bir dönüşümde alaşımın ötektoidin üzerindeki daha yüksek bir sıcaklıktan bir sıcaklığa hızla soğutulması ve bu sıcaklıkta muhafaza edilmesi gerektiğinden, izotermal ısı işlemler uygulanması pek pratik değildir. Çelikler için çoğu

ısıtılma işlemi, bir numunenin sürekli olarak oda sıcaklığına soğutulmasını içerir. Bir izotermal dönüşüm diyagramı yalnızca sabit sıcaklık koşulları için geçerlidir; bu diyagram, sıcaklık sürekli değiştiği için meydana gelen dönüşümler için değiştirilmelidir. CCT diyagramı (Continuous- Cooling- Transformation) sürekli soğuyan malzemede östenit fazından itibaren oluşacak faz değişimlerini gösterir. (William & David, 2015, s. 381) Kaynaklanmış ve dış ortama soğumaya bırakılmış iş parçası için sürekli soğuma eğrilerini takip etmek gerekir. Şekil 5.2’de (Piekarska, Kubiak, & Bokota, 2011, s. 415) S355 çeliğine ait CCT diyagramı verilmiştir.

Şekil 5. 2:S355 Çeliğine Ait CCT Grafiği



Kaynak:(Piekarska, Kubiak, & Bokota, 2011)

F: Ferrit P: Perlit B: Beynit M: Martenzit

Kaynak havuzundan itibaren ITAB bölgesi de dâhil olmak üzere soğuma hızı eğrileri grafik üzerine çizilerek oluşacak faz yapısı belirlenebilir. Özellikle ısı etkisi altında bölgedeki yüksek soğuma hızları kırılmalı olan martenzit yapının oluşmasına sebep olur. Bu kırılmalı yapı yük altındaki iş parçasının kırılmasına ve emniyetsiz olmasına neden olur. Bu yüzden malzemedeki soğumanın dengeli olması gerekmektedir.

Kaynak işlemleri sırasında Tablo 5.3’de kimyasal özellikleri Tablo 5.4’de mekanik özellikleri verilen GEKA marka SG-2 kaynak teli kullanılmıştır.

Tablo 5. 3: GEKA Marka SG-2 Kaynak Telinin Kimyasal Özellikleri

Element	C	Mn	Si
Değer	0,08	1,45	0,85

Tablo 5. 4: GEKA Marka SG-2 Kaynak Telinin Mekanik Özellikleri

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Çentik Darbe Dayanımı (ISO- V/-30°C)	Uzama (Lo=5do) (%)
En düşük. 420	500 - 640	En düşük. 47 J	En düşük. 22

Kaynak:Gedikkaynak, t.y

Kullanılan Kaynak Gazı Ve Özellikleri

Kaynak esnasında HABAŞ firmasının ticari olarak MAG kaynağı için üretmiş olduğu M14 standartlarında HB- 205 karşım gazı kullanılmıştır kullanılan gazın kimyasal formülü Tablo 5.5’de gösterildiği şekildedir;

Tablo 5. 5: HB-205 Gazının Kimyasal Karışım Formülü

Ar	CO ₂	O ₂
%95	%3	%2

Kaynak:(Habas, 2019)

5.1.2. ANALİZ (SİMÜLASYON)

Sonlu elemanlar yöntemiyle kaynaklı imalat analizi çözümlmek için yapılması gereken adımlarlar şunlardır;

- Model çizimi
- Ağ yapısı oluşturulmuş modelin hazırlanması
- Simülasyon programında analiz
- Sonuçların incelenmesi

Model Çizimi

Model tasarımı SolidWorks programında yapılmıştır. Analizi yapılacak iş parçası traktörlere montaj edilebilen bir ön yükleyici donanımına aittir. Parçanın görevi hidrolik pistonla iletilen hareketi ön eklentiye iletmektir. Şekil 5.3’de gösterilen Katı model tasarımı yapılan parça .step uzantısıyla kaydedilmiştir. Bir çok 3 boyutlu tasarım programında açılan .step uzantılı dosya MSC APEX programına da uyumludur.

Şekil 5. 3:İş Parçasının Katı Model Görüntüsü



5.1.3. MSC APEX İle Ağ Yapısı Oluşturma İşlemleri

MSC APEX programı HEXAGON bünyesi altında kolay kullanıma sahip sonlu elemanlar tabanlı CAE ve Simülasyon programıdır. MSC APEX CAE odaklı doğrudan modelleme ve ağ yapısı oluşturma tekniği ile çalışır. MSC APEX programının kabiliyetleri şöyle sıralanabilir;

- Catia, Solidworks, NX, Creo, Inventor, JT Parasolid, Step ve Iges formatlarında CAD veri transferi
- Nastranbdf, Parasolid, STL, Step, IGES çıktısı
- Geometri temizleme
- Doğrudan modelleme ve eleman ağı oluşturma
- Kenar/Köşe Tut-Çek Özelliği
- İleri Düzey ağ yapısı algoritmaları
- Otomatik kontak tanımlama
- Lineer, Modal, Burkulma ve Frekans Cevap Analizleri

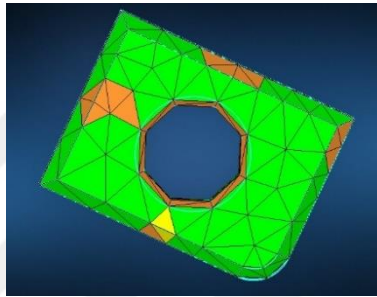
MSC APEX için kullanımı çok çeşit sektörlerle cevap verebilmektedir. Kullanım alanlarını şu şekilde örneklenebilir;

- Uzay ve Havacılık
- Otomotiv
- Savunma
- Makina Üreticileri
- Beyaz Eşya
- Kauçuk Endüstrisi

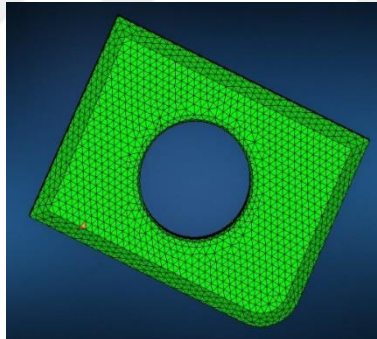
AğYapısı

Katı modellerin karmaşık yapıdaki delik, köşe ve pah gibi kısımların çözümlenmesi neredeyse imkânsızdır. Kısmi diferansiyel denklemlerinin çözümlenebilmesi için CAD verilerinin küçük hücrelere bölünmesi gerekmektedir. Katı model elaman ve noktalarla oluşturulan ağ yapısıyla temsil edilir. Elaman boyutu küçüldükçe temsilin gerçek modele uyumu artmaktadır. Şekil 5.4 ve şekil 5.5’de gösterilen farklı eleman sayılarındaki aynı CAD verisinin Ağ yapısı işlemi aşağıdaki görselde gösterilmiştir.

Şekil 5. 4:294 Elemanlı Model



Şekil 5. 5:23,763 Elemanlı Model



Şekil 5.4’de 294 eleman kullanılırken şekil 5.5’de 23,763 eleman kullanılmıştır. Ağ yapısını oluşturan eleman sayısı arttıkça MSC APEX mesh quality sekmesi altından kalite özelliklerine bakılarak ağ yapısı kalitesinin arttığı görülmüştür. Yeşil renkli elemanlar iyi seviyedeki elemanlarken sarı renkli elemanlar zayıf, turuncu renkli elemanlar kötü ve kırmızı renkli elemanlar geçersiz elemanlardır. Eleman sayısı arttıkça temsilin CAD verisine olan benzerliğinin yükseldiği görülmüştür.

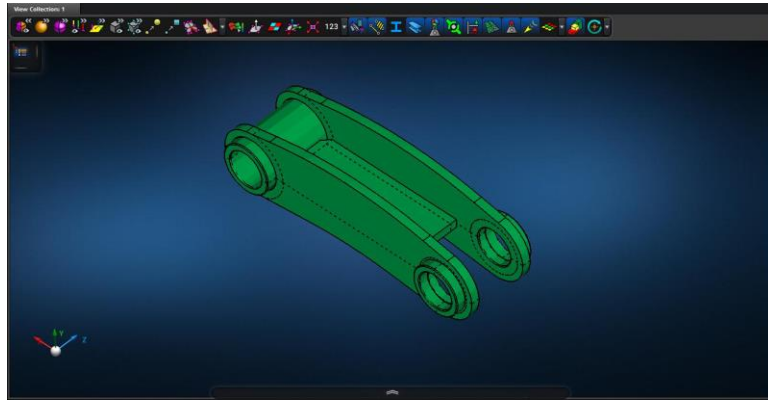
Deney esnasında kullanılacak iş parçası SolidWorks programında katı model halinde tasarlandıktan sonra, MSC APEX programında Ağ yapısı işlemi şu adımlarla ilerlemektedir.

- CAD dosyasını içeri aktarma
- Yüzey bölme işlemleri
- Katı ağ yapısı parametrelerinin tanımlanması
- Ağ yapısına bölme
- Eleman kalitesin bakılması
- .Bdf formatında detay parçaları dışarı çıkarma

Yüzeylerin Hazırlanması

İş parçasını oluşturan yüzeylerin karmaşıklığı katı modelin ağ yapısıyla bezenmesine engel olmaktadır ağ yapısı işlemi öncesi iş parçasının yüzeyleri uygun ağ yapısına uygun olarak bölünmüştür. Daireselbölgeler, yarıçaplar, pahlar, silindirik yapılar şekil 5.6'da gösterilen bölme aracı ile bölünmüştür.

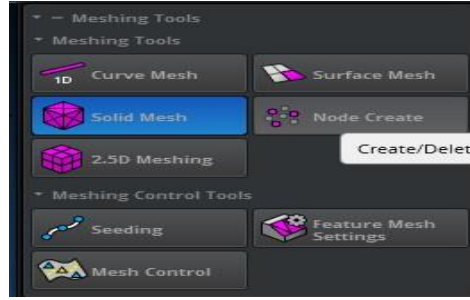
Şekil 5. 6:Yüzeylerin Hazırlanması



Katı Ağ Yapısı Oluşturma

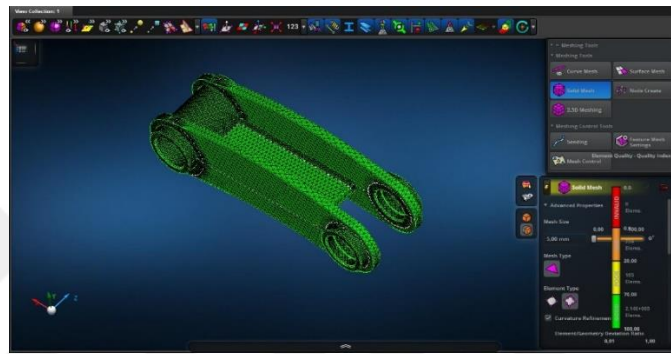
İş parçasının şekline uygun olarak şekil 5.7'de gösterilenKatı ağ yapısı aracı ile ağ yapısı işlemi gerçekleştirilmiştir. Eleman boyutu 5 mm olarak seçilmiştir

Şekil 5. 7:Katı Ağ Yapısını Oluşturulduğu Ekran



Örülü ağ yapısının MSC APEX üzerinde kalitesine bakılarak şekil 5.8'de görüldüğü şekilde uygun olduğu görülmüştür. Element sayısı 14676dır.

Şekil 5. 8:Ağ Yapısının Kalite Kontrolünün Yapıldığı Ekran



Simufact Welding Programında Simülasyon İşlemleri

SolidWorks programında çizilen CAD veri,ağ yapısı işlemlerinden sonra. bdf formatında analize hazırlanmıştır. Yüksek eleman hassasiyeti, Parametrelerin doğru tanımlanması, doğru sınır şartları, doğru bir analizin başlıca önemli noktalarıdır. Simufact Welding'de işlem adımları şu şekilde takip edilmektedir.

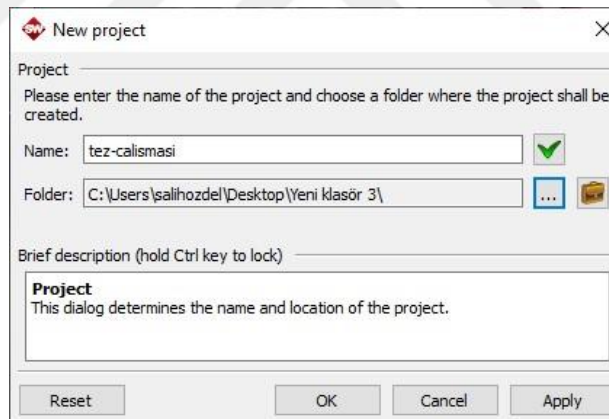
- Yeni projenin oluşturulması
- Proses tipi, ortam sıcaklığı, yerçekimi, kullanılacak detay malzeme, kitlekvb.kalıp elemanlarının tanımlanması
- Geometrilerin içeri alınması
- Materyalin tanımlanması
- Kalıp elemanlarının tanımlanması
- Kaynak yollarının tanımlanması
- Kaynak parametrelerinin belirlenmesi
- Kaynak şekillerinin oluşturulması
- Analiz tipinin belirlenmesi (termomekanik)
- Proses süresinin tayini

- Çözüm
- Sonuçları incelemesi

Proje Oluşturmak

Yeni proje oluşturmak için şekil 5.9’da gösterilen File menüsü altında New Project sekmesine seçilerek yeni oluşturulacak projenin isim ve kayıt yeri belirlenir.

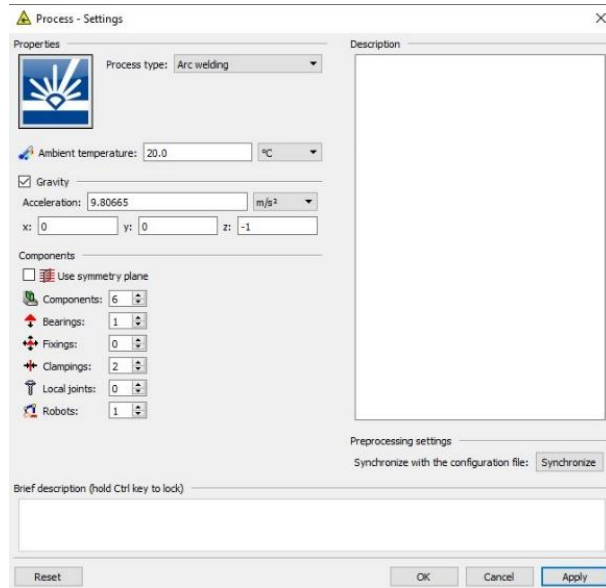
Şekil 5. 9:Yeni Proje Açılımı



Parametrelerin Tanımlanması

Yapılacak olan analizde şekil 5.10’da gözükten ekranda Proses tipi ark kaynağı, ortam sıcaklığı 20 °C, yer çekimi –Z yönünde 9.80665 m/s^2 olarak ayarlanmıştır. İş parçasının 6 adet detay malzemesi vardır. Kalıp için de 2 adet kitlek ve 1 adet yatak tanımlanmıştır.

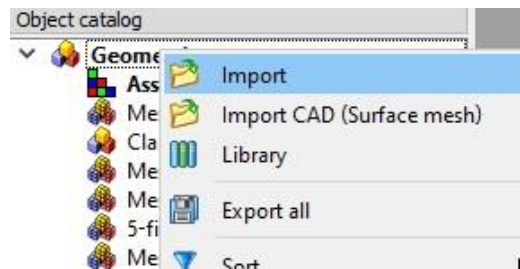
Şekil 5. 10:Proses Ayarları



Geometrilerin Yüklmesi

Şekil 5.11’de ki ekranda Object catalog altında geometri sekmesine sağ tıklanarak Import seçeneği tıklanır yüklenecek olan. bdf uzantılı dosyalar seçilir, seçim işlemi çoklu olarak yapılabilir.

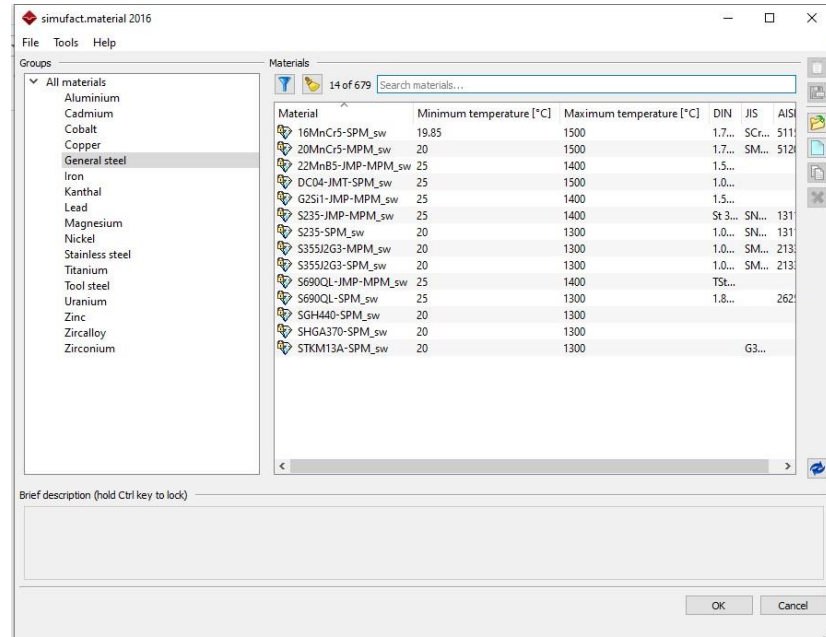
Şekil 5. 11:Geometrilerin Yüklmesi



Malzemelerin Tanımlanması

Object catalog altında şekil 5.12’de gösterilen ekrandamaterial –library sekmesine tıklanarak simufact-material kütüphanesi açılır buradan ilgili malzemeler kataloğa eklenir. İş parçası için S355J2G3 kaynak makinesinde kullanılacak ilave tel metali için G2Si1-JMP seçilmiştir.

Şekil 5. 12:Malzemelerin Tanımlanması

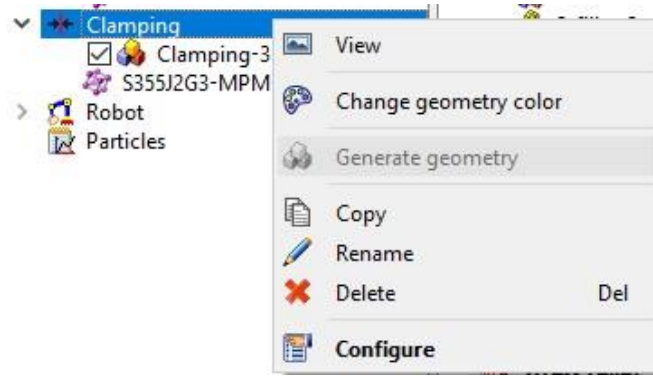


Teknik resim şartnamesinde belirtilen S355j2+N çeliği kullanılmıştır. Kullanılan malzeme endüstride sıkça tercih edilen çelikleridir. Simufact welding verilerine göre S355j2+N çeliğine ait kimyasal özellikler Tablo 6-3'de verilmiştir. Analiz aşamasında kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ise Tablo 6-4'de belirtilmiştir.

Sabitleme Elemanlarının Tanımlanması

Kaynak parçasının sabitleneceği sehpa SolidWorks programında tasarlanarak çalışmanın içine alınmıştır. İç parçasını sehpaye sabitlemek için kullanılacak kitlek şekil 5.13'de gösterilen proses ağacı altında Clamping menüsü altında Generate geometry sekmesine tıklanarak baskı uygulanacak yüzey, çap, konum gibi bilgiler girilir. Aynı menü altında Configure seçeneği ile sabitleme elemanının baskı süresi ve uygulanan kuvvet gibi bilgiler girilir.

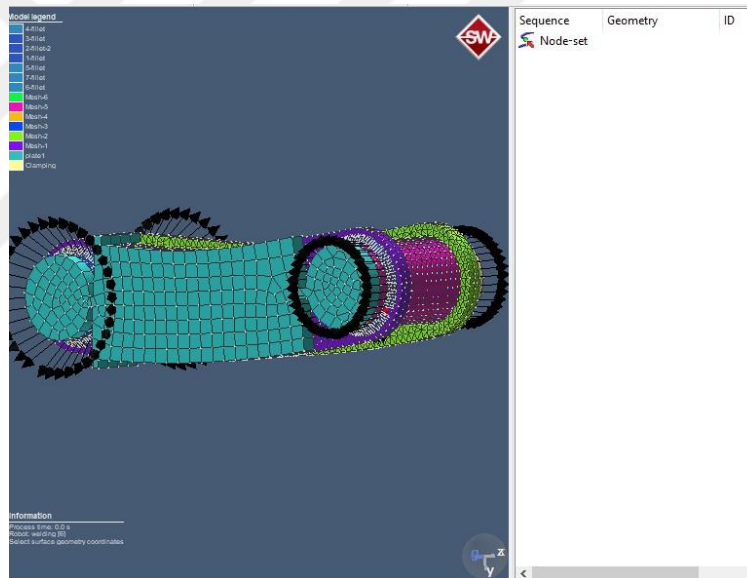
Şekil 5. 13:Sabitleme Elemanlarının Tanımlanması



Kaynak Yollarının Belirlenmesi

Kaynak yapılacak bölgelerin Node-set seçeneği ile tek tek seçilmesi gerekmektedir. Şekil 5.14’de Kaynak torcu bu noktaları takip ederek kaynak hattını oluşturur. Kayıt edilen noktalar Trajectories menüsünden kaynak hattına dönüştürülür.

Şekil 5. 14:Kaynak Yollarının Seçildiği Ekranın Görüntüsü



Kaynak Parametreleri

Yapılacak kaynak işlemi için kaynak parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Hız, akım ve voltaj iş parçasına giren ısıyı doğrudan etkiledi için yapılacak simülasyon işleminin doğruluğu girilen verilerin gerçekliği ile doğru orantılıdır. Object catalog altında welding-parameters – newheatsourcesparameter sekmesi tıklanarak şekil 5.15’de gösterilen kaynak parametreleri tanımlanır. İş parçasında 2 tip kaynak parametresi kullanılmıştır. Dairesel kaynaklar için ve düzlemsel kaynaklar için kaynak parametreleri Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5. 6: Dairesel Kaynaklar İçin Kaynak Parametreleri

İlerleme Hızı	Amper	Voltaj
8 mm/s	245 A	26,2 V

Tablo 5. 7: Düzlemsel Kaynaklar İçin Kaynak Parametreleri

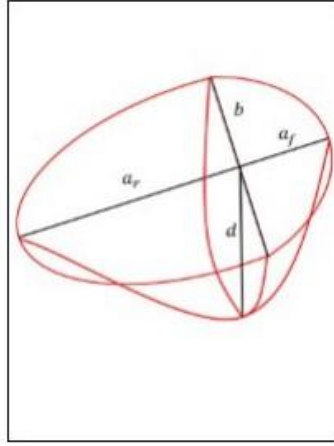
İlerleme Hızı	Amper	Voltaj
5.7 mm/s	245 A	26,2 V

Şekil 5. 15:Kaynak Parametrelerinin Belirlendiği Ekran

Goldak Eliptik Isı Kaynağının Tanımlanması

Kaynak bölgesindeki ısı girdisinin doğru olarak tanımlanması önemlidir. Simufact Werlding programı şekil 5.16'de gösterilen Goldak çift eliptik ısı kaynağı modelini kullanmaktadır. Goldak çalışmasında, kaynak mühendislerinin kaynak havuzu hakkındaki bilgilerini basit bir yolla göstermek istemiş, ancak bu çalışma basit bir problemden daha uzun ve günümüzdeki birçok metottan deneysel verilerin regresyon analizinden daha güvenilir olmuştur. Sonlu elemanlar yöntemiyle Kaynak işlemi esnasında oluşan ısı transferlerini hesaplamak için Goldak çift eliptik ısı kaynağı %5 hatayla deneysel sonuçlara en yakın modeldir (Goldak, Chakravarti, & Bibby, 1984)

Şekil 5. 16:Goldak Isı Modeli



Kaynak:(Simufact Welding, 2022)

Goldak ısı modelinin tanımlanabilmesi için gerekli olan değerler şunlardır:

Derinlik (d), genişlik (b), arka uzunluk(a_r) ve ön uzunluk (a_f)

Köşe kaynağında boğaz kalınlığı teknik resim üzerinde a harfiyle gösterilmektedir. Bununla birlikte;

$$d = a + 2.0 \dots 5.0 \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$b = a + 1 - 2 \text{ mm} \quad (6.2)$$

$$a_f = (a + 1.5 \text{ mm}) * 0.6 \quad (6.3)$$

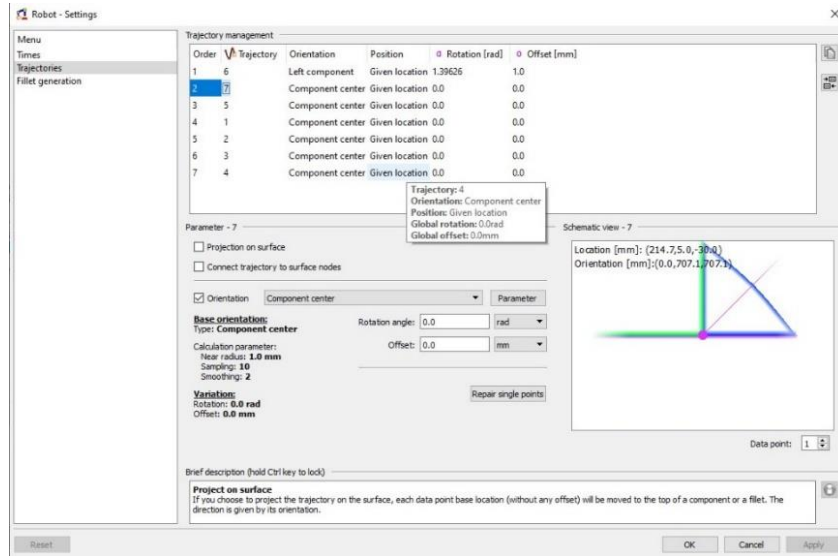
$$a_r = 2.2 * (a + 1.5 \text{ mm}) \quad (6.4)$$

Olarak tanımlanabilir.

Robot Parametreleri

Robot ayarları menüsü altında şekil 5.17’de verilen ekranda iş parçası üzerinde yolu belirlenen kaynak geometrilerinin boğaz kalınlığı, iç bükey- dış bükey ölçütü, kaynak hatlarındaki bekleme süreleri, kaynak sıralamaları, kaynak torcunun konumu gibi parametreler tanımlanır. Toplam kaynak işlemi süresi belirlenir. Bu süreye son soğuma dâhil değildir.

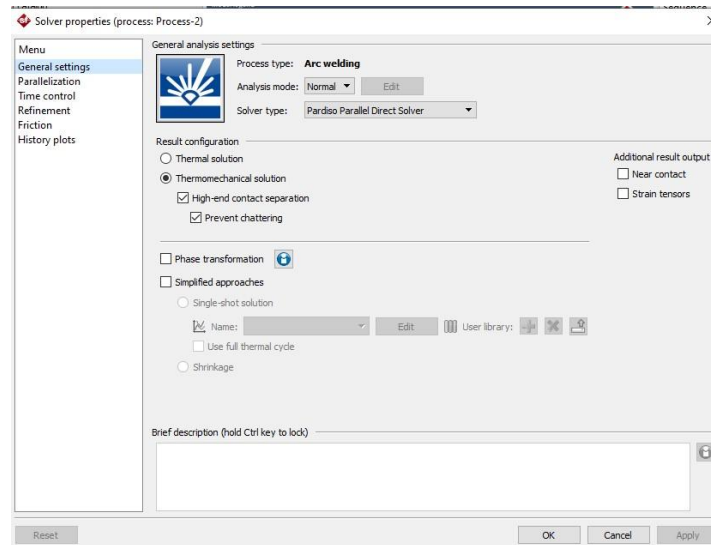
Şekil 5. 17:Robot Parametrelerinin Tanımlanması



Simülasyon Ayarları

Şekil 5.18'de verilen Proses ağacı altında solverproperties menüsü içinde genel ayarlarda analiz tipi termomekanik çözüm olarak belirlenir. Programın çözümü için paralizasyon kullanılır çözüm yapılacak bilgisayarın işlemci gücü ve çekirdek sayısı göz önünde bulunarak paralizasyon seçenekleri girilir. Aynı menü altında time contrololarak analizin toplam süresi belirlenir belirlenen süre kaynak işlemi ve soğuma işleminin tümünü içerir.

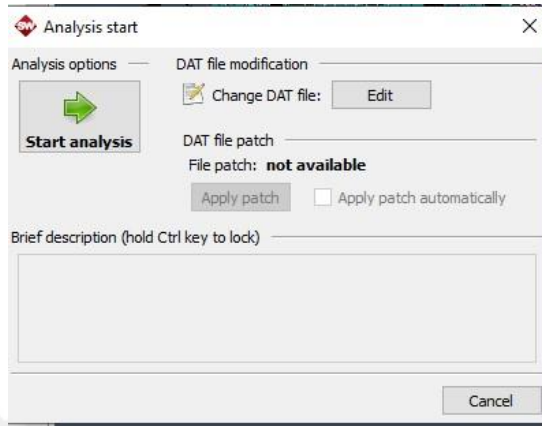
Şekil 5. 18:Simülasyon Ayarları



Analizin Başlatılması

Yapılan tüm ayarlamalar kontrol edildikten sonra alt barda yer alan şekil 6.17’de gösterilen Start analysis butonuna basılarak kaydetme ve analizi başlatma işlemi gerçekleştirilir. Çözüm için oluşturulan result klasöründe gerçekleşen analiz sonuçları eş zamanlı olarak kaydedilmektedir.

Şekil 5. 19:Analizin Başlatılması



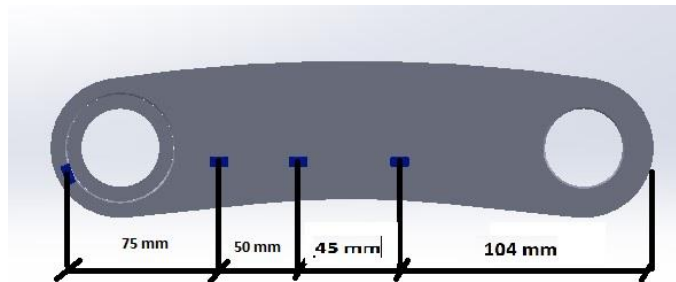
Sonuçların İncelenmesi

Simufact welding programında analizi yapılan numune parçalar kaynak ve soğuma olarak toplam 3000 saniye analiz uygulanmıştır. Parçanın 3000 saniye sonunda ortam sıcaklığına soğuyacağı ön görülerek bu süre seçilmiştir. İş parçalarının zamana bağlı sıcaklık eğrileri, yer değiştirmeleri ve artık gerilme miktarları kontrol edilmiştir.

Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri

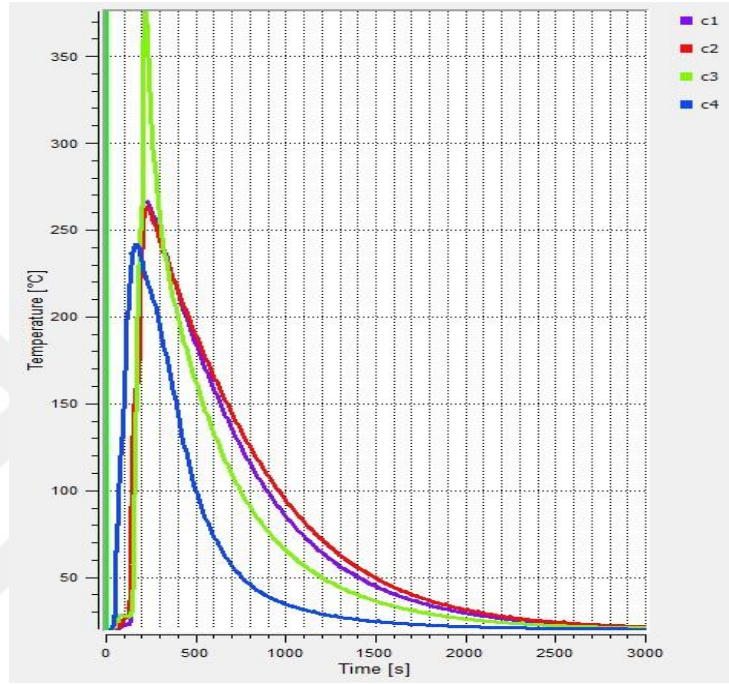
Zamana bağlı sıcaklık eğrileri oluşturulurken iş parçası üzerinde deney düzeneği ile aynı olacak şekilde ısı çift bağlantı noktaları Şekil 5.20’de verildiği gibi seçilmiştir. Proses 1,2 ve 3’ün kaynak sıralaması deney başlığı altında teknik resimlerle verilmiştir.

Şekil 5. 20:Ölçüm Alınacak Isıl Çift Konumları



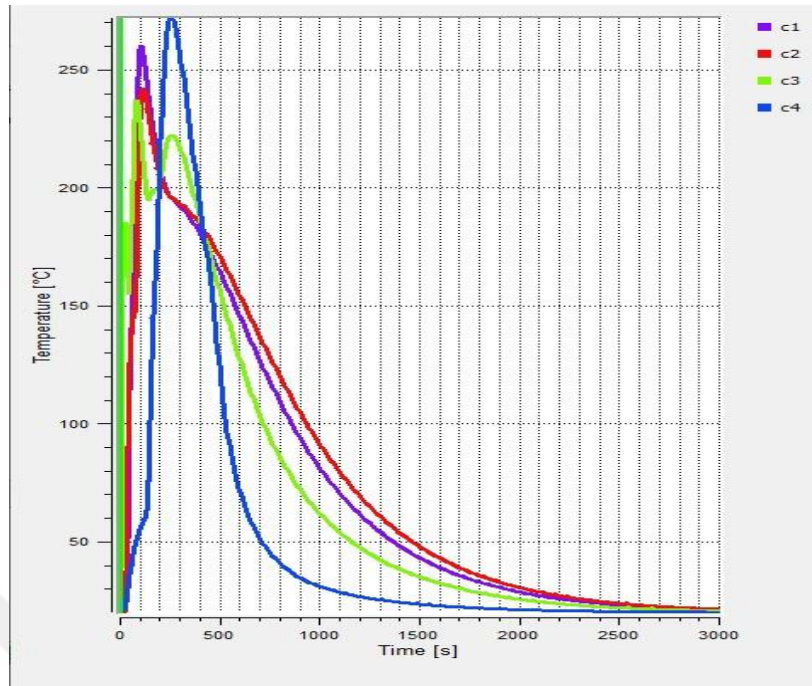
Şekil 5.21'deki grafik ekranında Proses 1 için alınan deney sonuçlarına göre sıcaklığın ilk olarak 4 numaralı ısı çiftinin olduğu noktada artmaya başladığı, en yüksek sıcaklığın 3 numaralı ısı çiftinin bağlandığı noktada ulaştığı görülmüştür. 3000 saniye süren analiz sonucunda tüm ölçüm noktalarında sıcaklığın ortam sıcaklığına eşitlendiği görülmüştür.

Şekil 5. 21: Proses 1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrisi



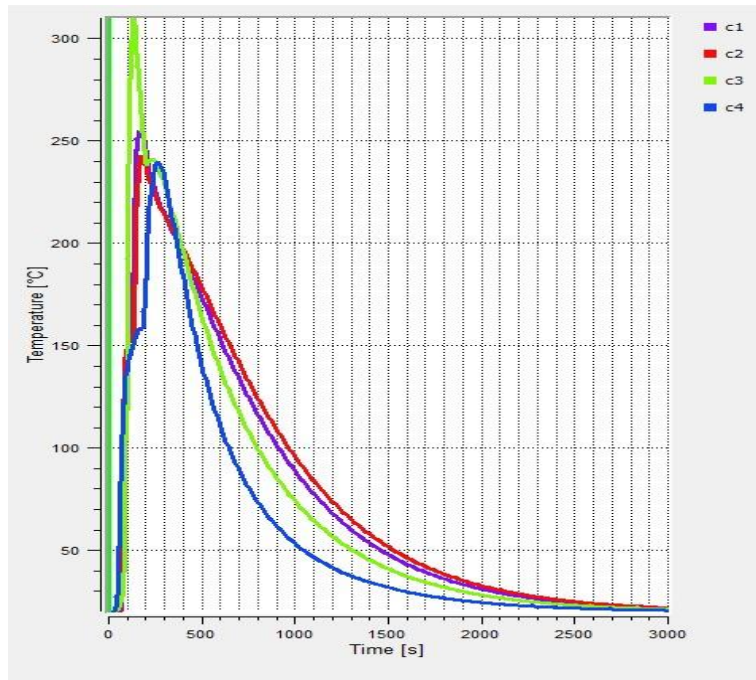
2 numaralı prosesin zamana bağlı sıcaklık eğrisi şekil 5.22'de gösterildiği gibidir. Isı ölçüm noktalarında proses 1'e göre daha yakın değerler ölçülen proses 2'de sıcaklığın yükseldiği ilk nokta 3 numaralı ölçüm noktasıdır. Sıcaklık değerinin en yüksek ölçüldüğü nokta 4 numaralı ısı çift bağlantı noktasıdır. Analiz sonuçta tüm ölçüm noktalarının oda sıcaklığına düştüğü gözlemlenmiştir. 3 numaralı ölçüm noktasının soğumaya başlamasından sonra tekrar ısı girdisiyle sıcaklığın yükselmeye başladığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5. 22:Proses 2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrisi



Proses 3 için zamana bağlı sıcaklık eğrileri Şekil 5.23'de gösterildiği gibidir. Zaman bağlı sıcaklık eğrisinin proses 1'e benzediği gözlemlenmiştir. 4 numaralı noktadan ısınmaya başlayan iş parçasının en sıcak ölçüm noktası 3 numaradır.

Şekil 5. 23:Proses 3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrisi

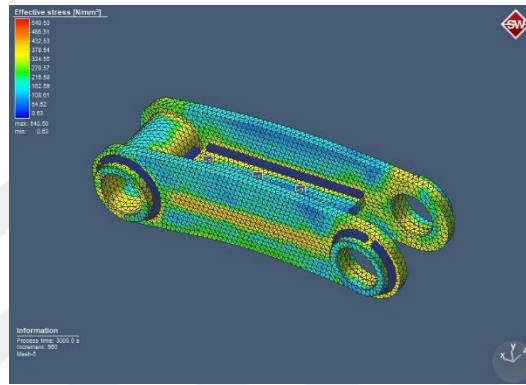


Artık Gerilmeler

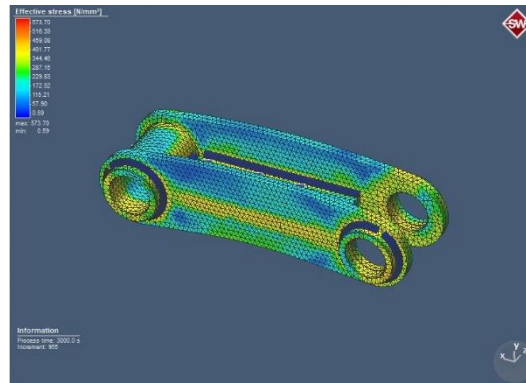
Gaz altı kaynak prosesleri tabiatları gereği iş parçalarına ısı girdileri oluşturur. Ergime sıcaklarına ulaşan kaynak havuzu soğuma esnasında esas metale gerilim uygular. Bu gerilimler kaynak işlemi başında düşükken soğudukça artan bir grafik çizer.

3000sn sonunda 1, 2 ve 3 numaralı proseste oluşan artık gerilmeler sırasıyla şekil 5.24, 5.25 ve 5.26'da verilmiştir. Oluşan en yüksek gerilim miktarları sırasıyla $540.50 N/mm^2$, $573.70 N/mm^2$ ve $545.33 N/mm^2$ 'dir.

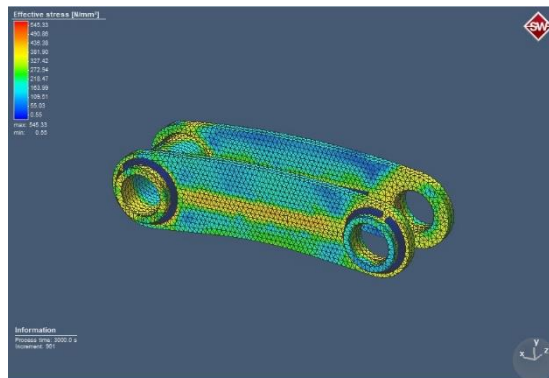
Şekil 5. 24:Proses 1'e Ait Artık Gerilme Miktarları



Şekil 5. 25:Proses 2'ye Ait Artık Gerilme Miktarları



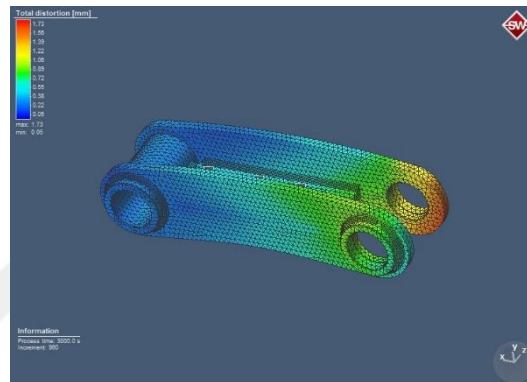
Şekil 5. 26:Proses 3'e Ait Artık Gerilme Miktarları



Yer Değiştirmeler

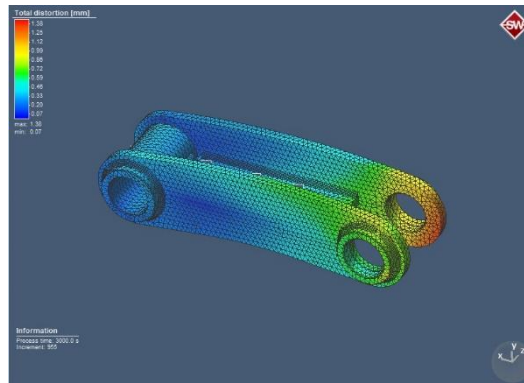
İş parçalarında ısı sebebiyle artık gerilmeler oluşur. Bu oluşan gerilmeler parçalarda çarpımalara sebep olur. Kaynak sıralamaları ve kaynak parametreleri çarpılma miktarlarını etkiler. Yapılan üç proseste farklı kaynak sıralamaları denenerek çarpılma miktarları gözlenmiştir. Proses 1 için en yüksek yer değiştirme Şekil 5.27’de gösterildiği gibi 1.73 mm’dir.

Şekil 5. 27:Proses 1’e Ait Yer Değiştirme Miktarları



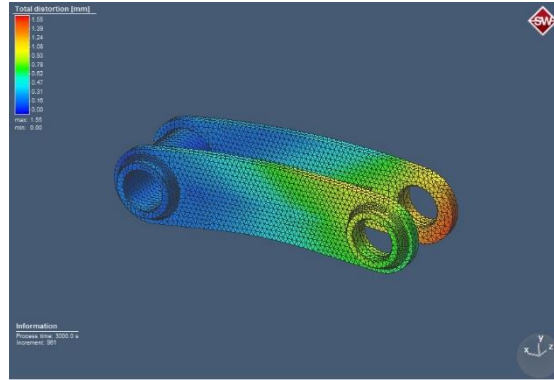
Proses 2’de kaynak işleminin sonrası en yüksek yer değiştirme miktarı Şekil 5.28’de ki ekran görüntüsünde verilen değere göre 1.38 mm’dir.

Şekil 5. 28:Proses 2’ye Ait Yer Değiştirme Miktarları



Şekil 5.29’da verildiği gibi Proses 3 için toplam yer değiştirme miktarı en yüksek 1.55 mm’dir.

Şekil 5. 29:Proses 3' Ait Yer Değişirme Miktarları



Yapılan analiz sonucunda en yüksek yer değışirmenin 1.733 mm ile 1 numaralıproseste olduğu, onu 1.55 ile 3 numaralı prosesin takip ettiği görölmüştür. Oluşturulan farklı kaynak sıralamaları ile elde edilen en düşük değer 1.38 mm ile 2 numaralı prosestir.

5.2. DENEY

5.2.1. Deney Seti

Deney için 9 adet numune, sıcaklık ölçüm cihazı, kaynak robotu ve konumlandırıcı kurgulanmıştır.

5.2.2. Numunelerin Hazırlanması

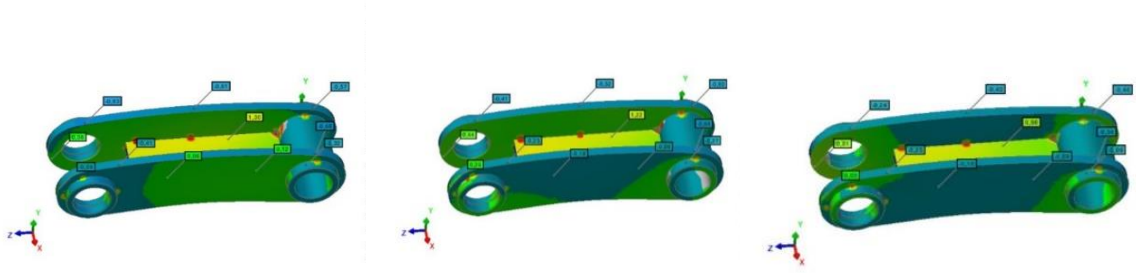
Numuneler standardı koruması için kaynak kalıbındanpuntalanarak çıkarılmıştır. Şekil5.30'dahazırlanmış numuneler gözükmetedir.

Şekil 5. 30:Kaynatılmak Üzere Hazırlanmış Numuneler



Kaynak işleme hazırlanan parçaların doğruluğu için 3 boyutlu tarama yapılmış ve parçaların doğruluğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.31'de ölçüm sonuçları gözükmetedir.

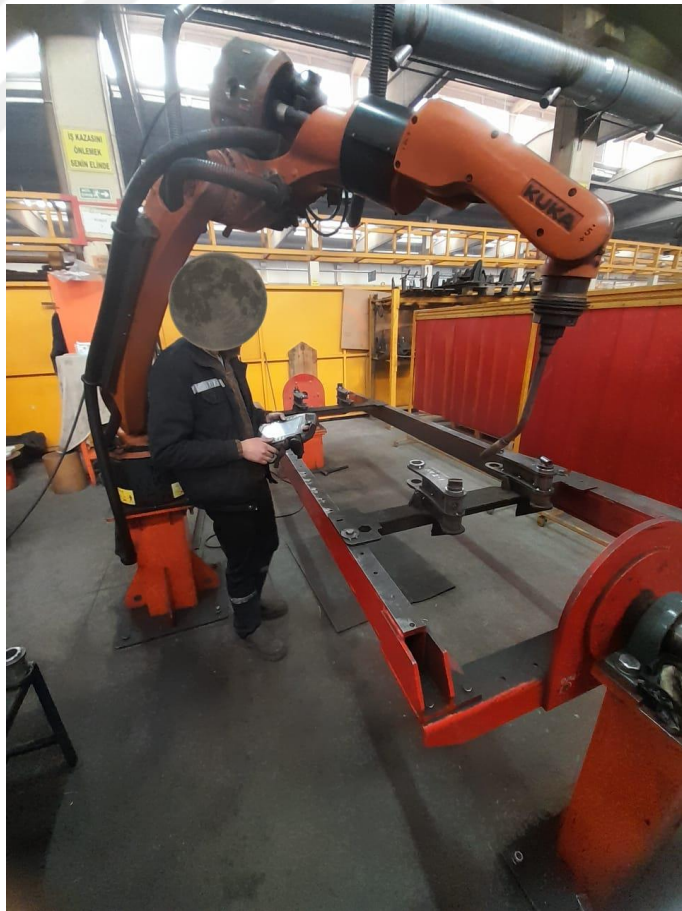
Şekil 5. 31:Puntalı Numunelerin Ölçümü



5.2.3. Kaynak Robotu

Kullanılan kaynak robotu şekil 5.32’de programlanırken ki görüntüsü verilen KUKA markasının KR 8 R2100-2 arc HW modelidir. Kaynak yolları operatör tarafında el terminali kullanılarak programlanır. KR 8 R2100-2 arcHW modelinin Teknik özellikleri tablo 5.8’de sıralanmıştır.

Şekil 5. 32:Kaynak Robotunun Programlayan Operatör



Tablo 5. 8: R 8 R2100-2 Arc HW Modelinin Teknik Özellikleri

Azami erişim mesafesi	2101 mm
Azami taşıma kapasitesi	9,3 kg
Nominal taşıma kapasitesi	8 kg
Nominal ilave yük döner tabla / bağlantı kolu / kol	0 kg / 0 kg / 10 kg
Konumu tekrarlama hassasiyeti (ISO 9283)	± 0,04 mm
Aks sayısı	6
Bağlantı konumu	Zemin; Tavan; Duvar; herhangi bir açı
Kurulum alanı	430,5 mm x 370 mm
Ağırlık	yakl. 260 kg

5.2.4. Kaynak Makinesi

Deneyde Gaz altı kaynak makinası olarak Şekil 5.33’de gösterilen KUKA robot ile birleşik şekilde çalışan Fronius markasına ait TPS/i 320 A modeli kullanılmıştır. Tablo 5.9’da TPS/i 320 A modeline ait teknik özellikler verilmiştir.

Şekil 5. 33:Fronius TPS/İ 320 A Modeli



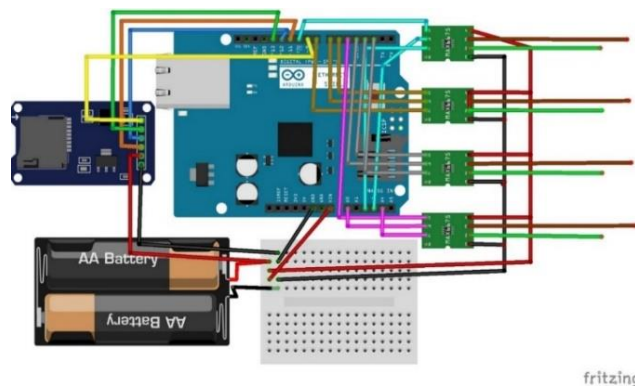
Tablo 5. 9: TPS/İ 320 A Modelinin Teknik Özellikleri

Azami kaynak akımı	320,0 A
Asgari kaynak akımı	3,0 A
Kaynak akımı / Devrede Kalma Oranı [10dak/40°C]	320A / 40%
Kaynak akımı / Devrede Kalma Oranı [10dak/40°C]	260A / 60%
Kaynak akımı / Devrede Kalma Oranı [10dak/40°C]	240A / 100%
Çalışma gerilimi alanı	14,2-30,0V
Boşta çalışma gerilimi	73,0 V
Şebeke frekansı	50-60Hz
Şebeke gerilimi [+/-%15]	3 x 400V
Şebeke sigortası	35A
Boyut / Genişlik	300,0 mm
Boyut / Uzunluk	706,0 mm
Ağırlık	33,7 kg
Koruma derecesi	IP23

5.2.5. Sıcaklık Ölçüm Cihazı

Sıcaklık ölçümleri için kullanılacak deney seti Arduino ve sensör teknolojisi kullanılarak tasarlanmıştır. Ölçüm için kullanılacak devre Fritzing uygulaması üzerinde modellenmiştir. Şekil 5.34’de verilen modelde 1 adet güç kaynağı, 1 adet Arduinouno, 1 adet micro SD kart modülü, 1 adet micro SD kart, 4 adet K tipi termocupl ve 4 adet Max6675 kullanılmıştır.

Şekil 5. 34: Isı Ölçüm Setinin Projesi



5.2.6. Isıl Çift Sensörleri

Sıcaklık ölçümü için endüstride sıkça kullanılan termokupl (ısıl çift) sensörleri kullanılmıştır ısıl çiftler iki farklı metalin özel yöntemlerle kaynaklanmasıyla ortaya çıkan basit sensörlerdir. Isıl çiftlerle -200°C 'den $+2320^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ölçüm yapılabilir. Sıcaklık ölçümü için K tipi ısıl çift kullanılmıştır ısıl çiftler mV cinsinden gerilim üretirler mikro işlemcilerin bu değerleri yorumlayabilmesi için gerilim yükseltici devre kullanılmalıdır. K tipi ısıl çiftlerle beraber Max6675 devre kullanılmıştır. Tablo 5.10'da K tipi ısıl çiftlerin özellikleri verilmektedir.

Tablo 5. 10: Tipi Isıl Çiftlerin Teknik Özellikleri

Kullanılan Metal Alaşım(ları)	Sıcaklık Aralığı	Mv Aralığı
NiCr-Ni	$-200, +1200^{\circ}\text{C}$	$-5.891, 54.807\text{ mV}$

Kaynak:(elimko.com.tr, 2020)

5.2.7. Arduino

Arduino, şekil 5.35'de verilen Atmel'in AVR serisi mikro denetleyicileri üzerine kurulmuş, ilk örnek oluşturma aşamasını kolaylaştıran, ek genişlemeler için bağlantı noktalarına ve bu bağlantı noktalarına takılabilen shield adı verilen eklentilere sahip bir platformdur (Arduino Uno Rev3, 2022). Tablo 5.11'de Arduino Uno kartının teknik özellikleri verilmiştir.

Şekil 5. 35:Örnek Bir Arduino Kartı



Kaynak: (Arduino Uno Rev3, 2022)

Tablo 5. 11: Arduino Kartının Teknik Özellikleri

Mikrodenetleyici	ATmega328
Çalışma Gerilimi	5V
Giriş Gerilimi	7-12V
Giriş gerilimi (limit)	6-20V
Dijital G/Ç Pinleri	14(6 tanesi PWM)
Analog Giriş Pinleri	6
Her G/Ç için Akım	50mA
3.3V Çıkış için Akım	30mA
Flash Hafıza	32KB(ATmega328)
SRAM	2KB(ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Saat Hızı	16MHz
Uzunluk	68.6mm
Genişlik	53.4mm
Ağırlık	25 g

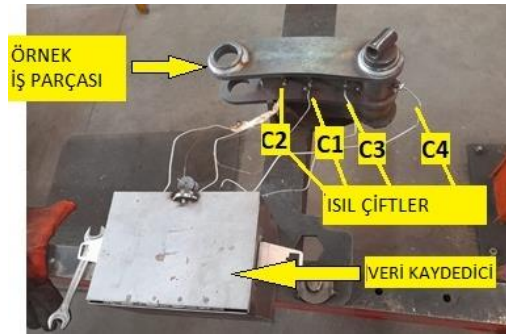
Kaynak: (Arduino Uno Rev3, 2022)

Arduino İDE ekranında yazılan c++ dilindeki kodların kısmi ekran görüntüsü şekil27de verilmiştir. İlk olarak ilgili kütüphaneler yazılıma eklenmiş ardından değişkenler tanımlanmıştır. Süre tanımlanması için 5000 ms belirlenmiştir. Kodlar döngüye sokularak tekrarlanmıştır.

Sıcaklık Ölçümleri

Hazırlanan devre iş parçası üzerine şekil 5.36'da gösterildiği üzere sıvı çiftsensörlerinin ucundaki dâhili M6 dişli civatayla bağlanmıştır. Parçanın anlık sıcaklıkları mikro denetleyici tarafından mikro SD karta yazılıp, veriler Excel tablolarında grafik halinde görselleştirilmiştir.

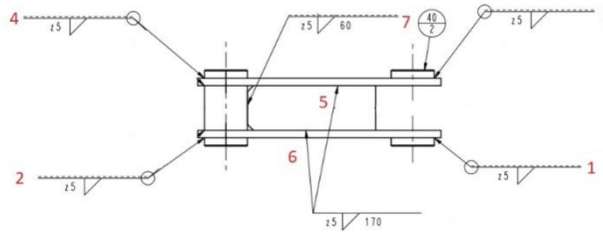
Şekil 5. 36:Sıcaklık Ölüm Cihazının İş Parçasına Bağlanması



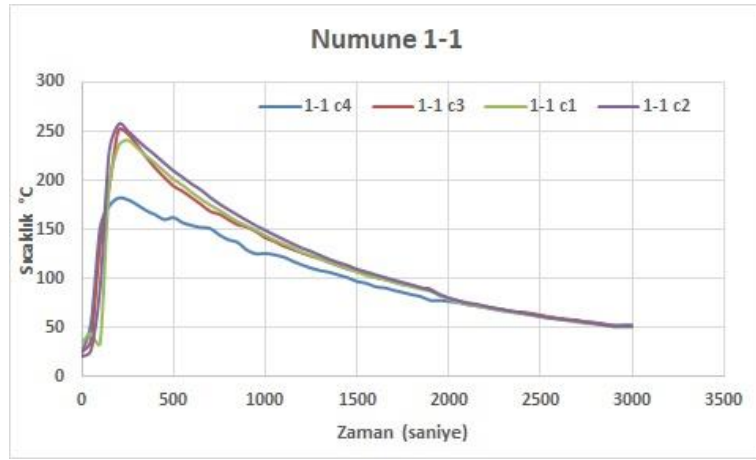
5.2.8. Proses 1

Proses 1'in Kaynak sıralaması şekil 5.37'de teknik resim üzerinde numaralarla verilmiştir. Kaynak sıralamasında kaynak hatlarını dışarıdan içeriye ilerleyecek şekilde planlanmıştır. Kaynak robotu konumlandırıcısı öncelikle 1ve 2 numaralı kaynak hatlarını kaynatacak şekilde pozisyon alır. Konumlandırıcının sonraki hareketi simetrideki 3 ve 4 numaralı kaynakları kaynatmaya uygun hale gelmesidir. Son olarak 5,6 ve 7 numaralı kaynakları kaynatılarak işlem sona erer. Deney seti üzerine kaydedilmiş veriler excel ortamında grafiğe dönüştürülerek sıcaklık zaman eğrileri oluşturulur. Ölçülen sıcaklıklara göre en yüksek sıcaklıkların 250°C - 255°C aralığında olduğu görülürken 3000 saniye sonunda iş parçasının oda sıcaklığının üzerinde 50°C dolaylarında olduğu gözlemlenmiştir. Numune 1-1, numune 1-2 ve numune 1-3'ün zamana bağlı sıcaklık eğrileri şekil 5.38, 5.39 ve 5.40'da verilmiştir.

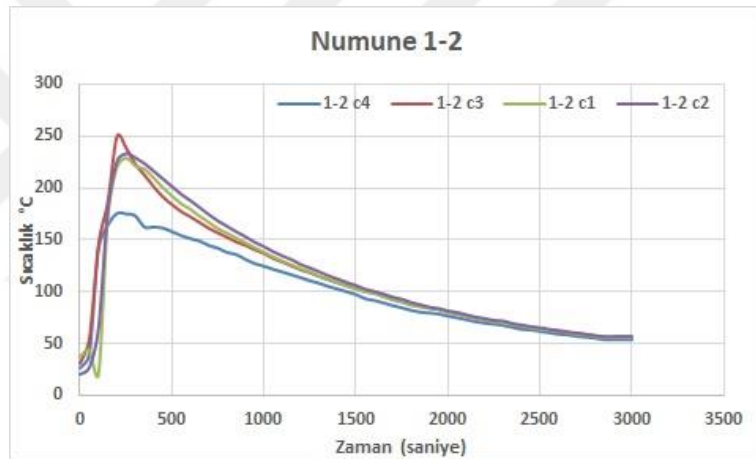
Şekil 5. 37:Proses 1'e Ait Kaynak Sıralaması



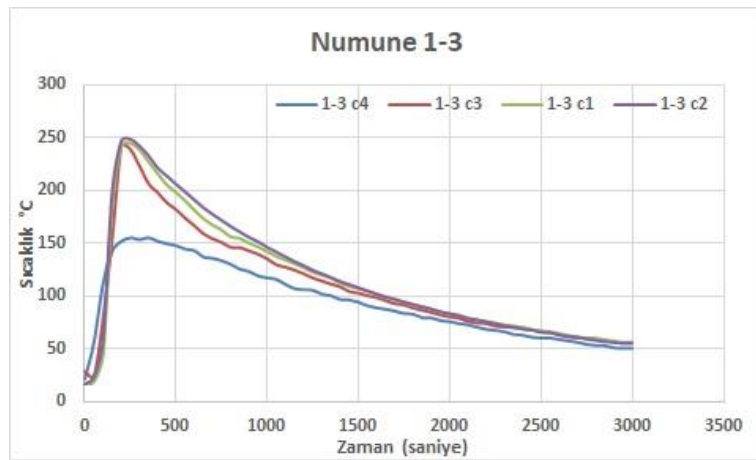
Şekil 5. 38:Numune 1-1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5. 39:Numune 1-2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5. 40:Numune 1-3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



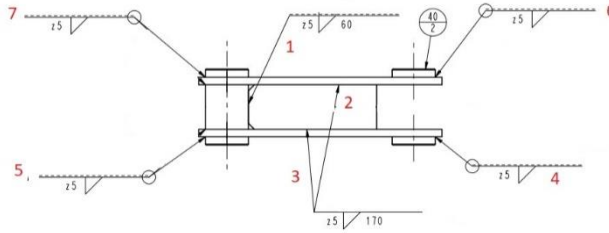
Proses 1 için kaynatılan 3 numune parçası için ölçüm noktalarında en yüksek sıcaklığın 1, 2 ve 3 numaralı noktalarda olduğu görülmüştür. Bu noktalardaki sıcaklıklar

~250°C dolaylarındadır. 4 numaralı ölçüm noktası ~150°C sıcaklıkla diğerlerinden ayrılmaktadır. 4 ölçüm noktası için de sıcaklık ölçüm sonunda ~50°C'dir.

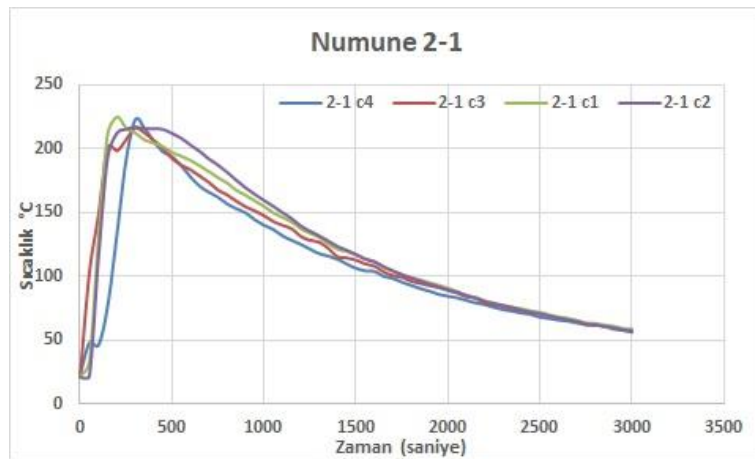
5.2.9. Proses 2

Proses 2'ye ait Kaynak sıralaması şekil 6.38'de teknik resim üzerinde numaralarla vermiştir. Proses 2 de kaynak sıralamasının içeriden dışarıya doğru ilerleyen bir kaynak işlemi hedeflenmiştir. Kaynak konumlandırıcısı öncelik olarak 1,2 ve 3 numaralı kaynaklar için pozisyon alırken, ardından 4 ve 5 numaralı kaynaklar için konumlandırıcı döndürülmüştür. 6 ve 7 numaralı kaynakları yapılarak proses 2 tamamlanmıştır. Proses 1 de olduğu gibi deney setinden alınan veriler excel ortamında grafiğe çevrilmiştir. Numune 2-1, numune 2-2 ve numune 2-3'ün zamana bağlı sıcaklık eğrileri şekil 5.41, 5.42 ve 5.43'de verilmiştir.

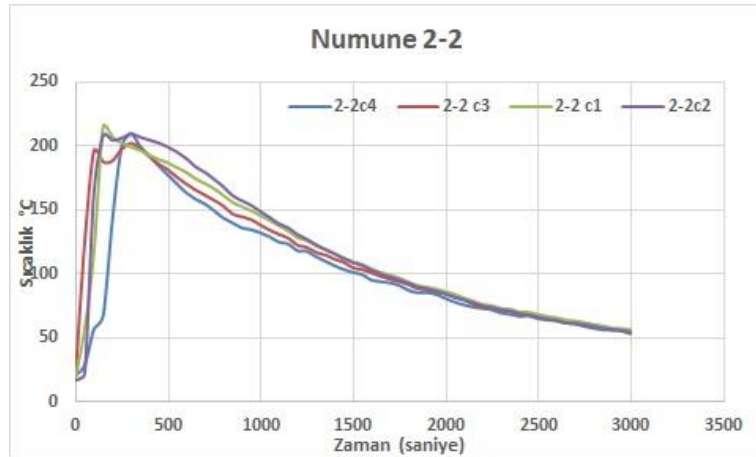
Şekil 5. 41:Proses 2' Ait Kaynak Sıralaması



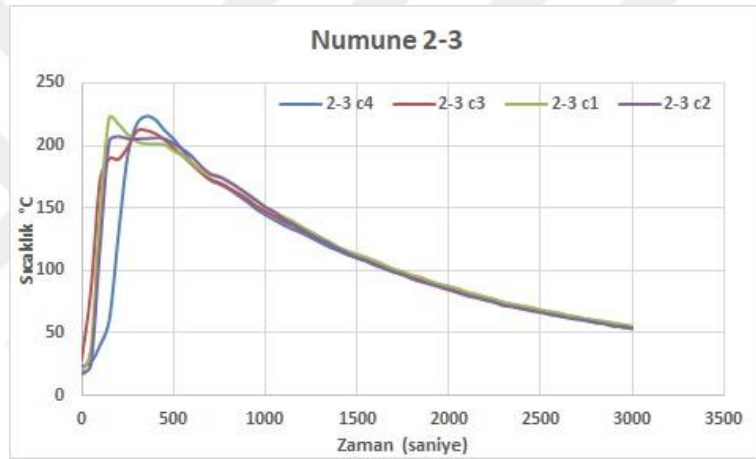
Şekil 5. 42:Numune 2-1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5. 43:Numune 2-2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5. 44:Numune 2-3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri

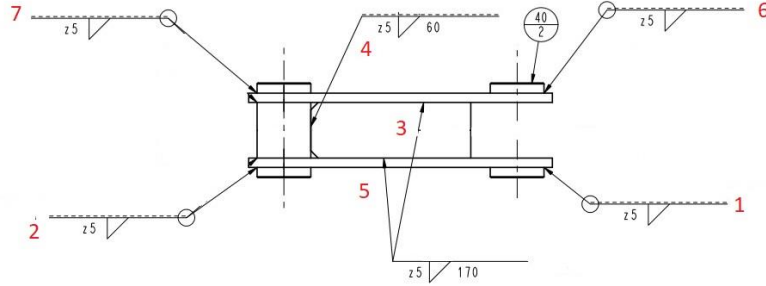


2 numaralı proseste kaynatılan her numune için ölçüm noktalarında azami sıcaklıklar dengeli ve birbirine yakındır. Sensörlerden alınan azami sıcaklık değeri ~220°C'dir. Ölçüm sonucunda sıcaklıklar ~50°C'dir

5.2.10. Proses 3

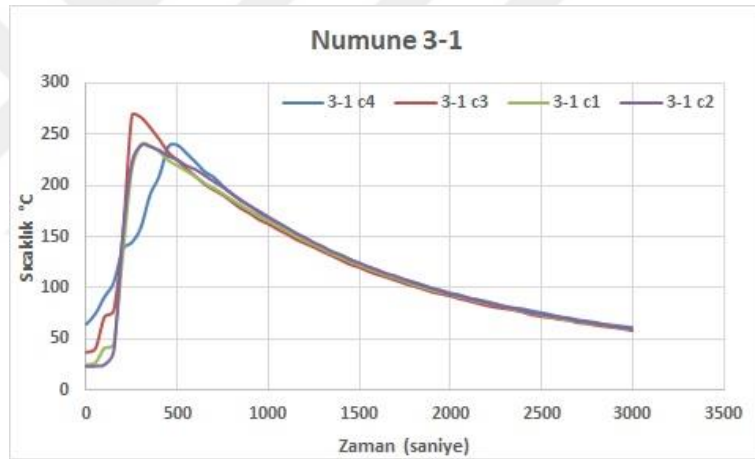
Proses 3'e ait kaynak sıralaması şekil 5.45.'de teknik resim üzerinde numaralarla vermiştir. proses 3 için kaynak sıralaması yatay olarak sağdan sola doğru ilerlemesi hedeflenmiştir. 1 ve 2 numaralı dairesel kaynakları tamamlayan robot iş parçasını yatay konuma getirerek düzlemsel olan 3,4 ve 5 numaralı kaynakları yapmıştır. 6 ve 7 numaralı dairesel kaynakları tamamlayarak iş parçasının kaynağı son bulmuştur. Deney seti üzerindeki sd kartındaki veriler Excel ortamında grafiğe çevrilmiştir.

Şekil 5. 45:Proses 3'e Ait Kaynak Sıralaması

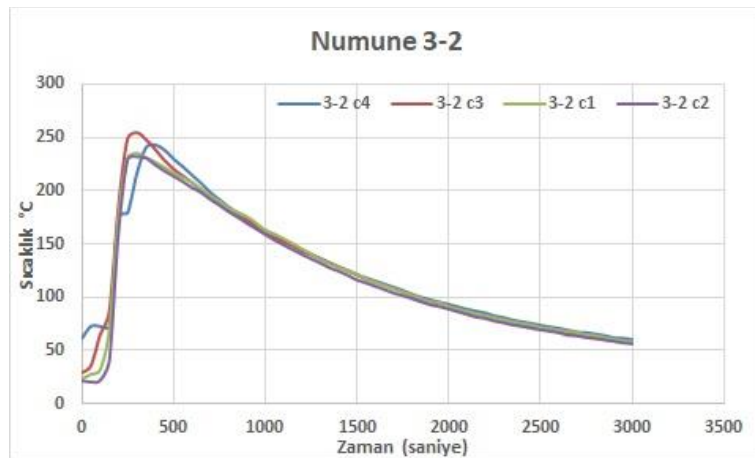


Numune 3-1, numune 3-2 ve numune 3-3'ün zamana bağlı sıcaklık eğrileri şekil 5.46, 5.47 ve 5.48'de verilmiştir.

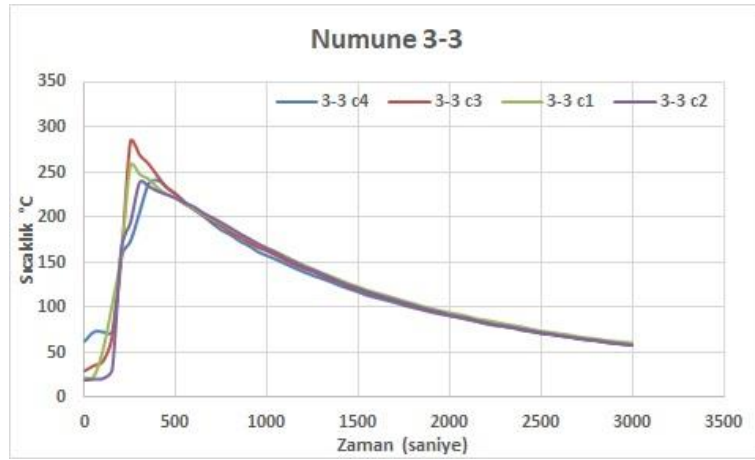
Şekil 5. 46:Numune 3-1'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5. 47:Numune 3-2'ye Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri



Şekil 5. 48:Numune 3-3'e Ait Zamana Bağlı Sıcaklık Eğrileri

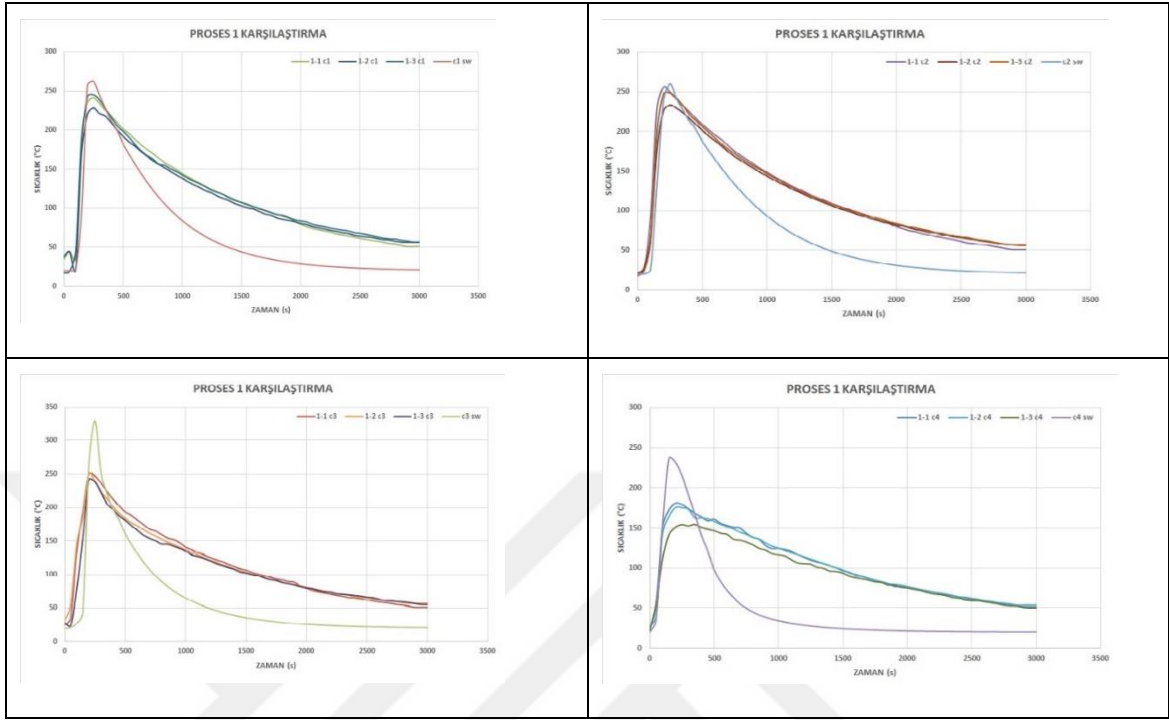


Proses 3'de ölçüm noktalarındaki sıcaklık eğrileri 2 numaralı procese benzemektedir.

Sıcaklık eğrilerinin karşılaştırılması

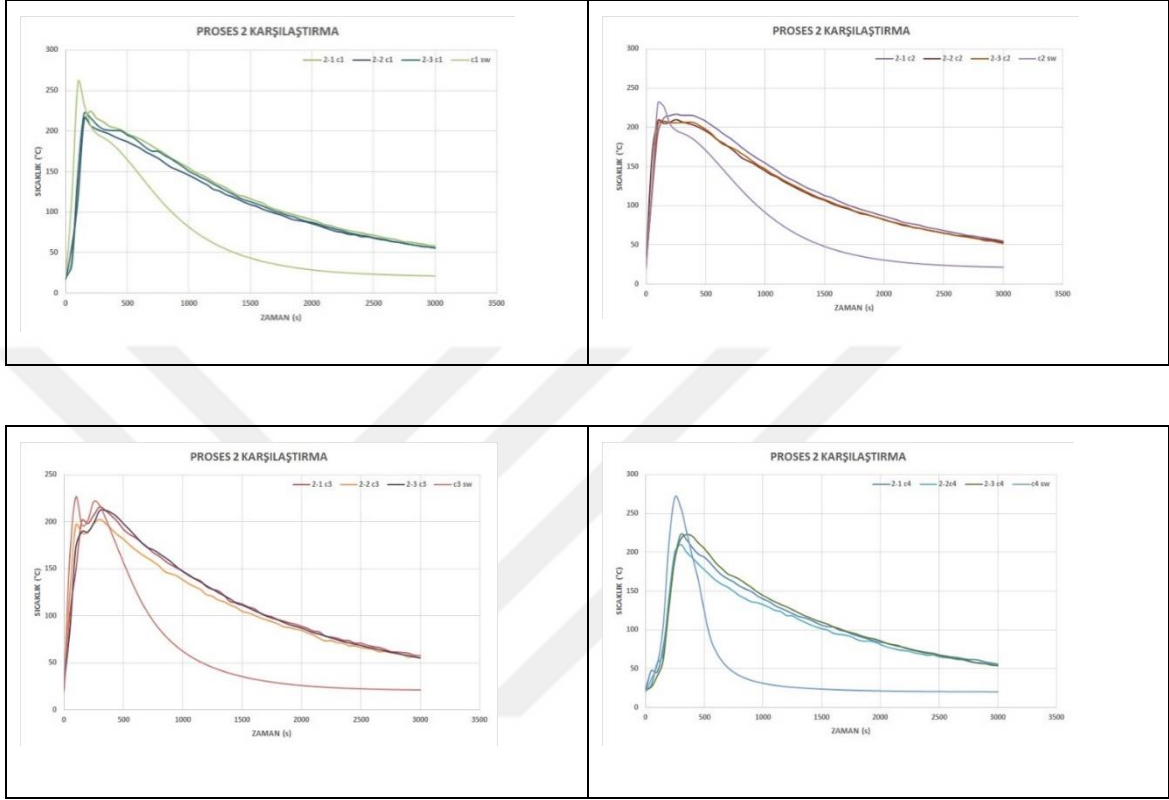
Şekil 5.49, 5.50 ve 5.51'de Deneysel olarak elde edilen sıcaklık değerleri ile analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık değerleri her ısıl çift için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar bize simülasyonun gerçekliği konusunda fikir vermektedir. Birinci proste Sıcaklık tırmanma eğimleri aynı eğri üzerinde olmasına karşı, soğuma eğrilerinde simülasyon sunucunda ölçüm noktalarının daha hızlı soğuduğu gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre; bazı ölçüm noktalarında, deney sonuçlarında okunan değerden daha yüksek sıcaklık değerleri görülmüştür. Deney sonunda 3 proses için de her ölçüm noktasında ölçülen sıcaklık değeri 50°C dolaylarında gözlemlenirken, analiz sonucunda analiz için belirlenen ortam sıcaklığı olan 20°C'ye düştüğü görülmüştür.

Şekil 5. 49:Proses 1'in Zamana Bağlı Sıcaklık Ölçümlerinin Karşılaştırılması



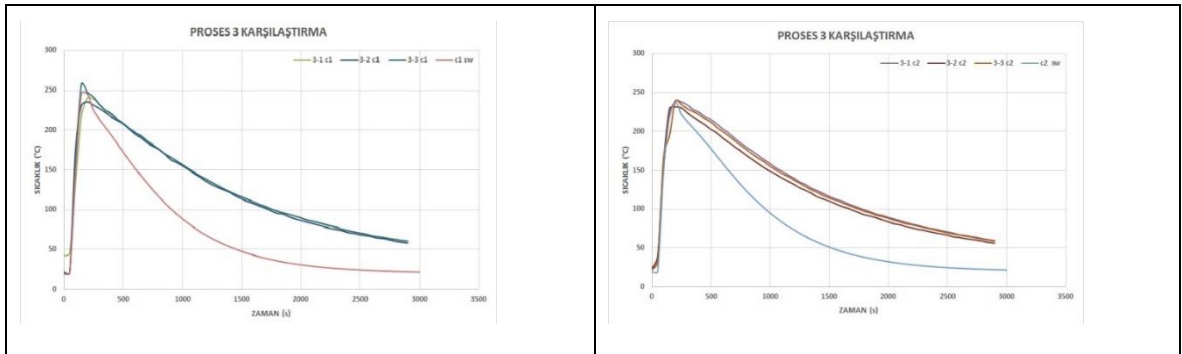
Proses 2 için simülasyon ve deneysel sıcaklık değerleri için proses 1'e benzer sonuçlar görülmektedir. Isınma eğimleri benzemekle beraber simülasyon değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. İşlem sonucunda ise ölçüm noktaları için alınan değerlerin analizde deneysel sonuçlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Simülasyona göre iş parçası daha çok ısınmakta ve daha hızlı soğumaktadır.

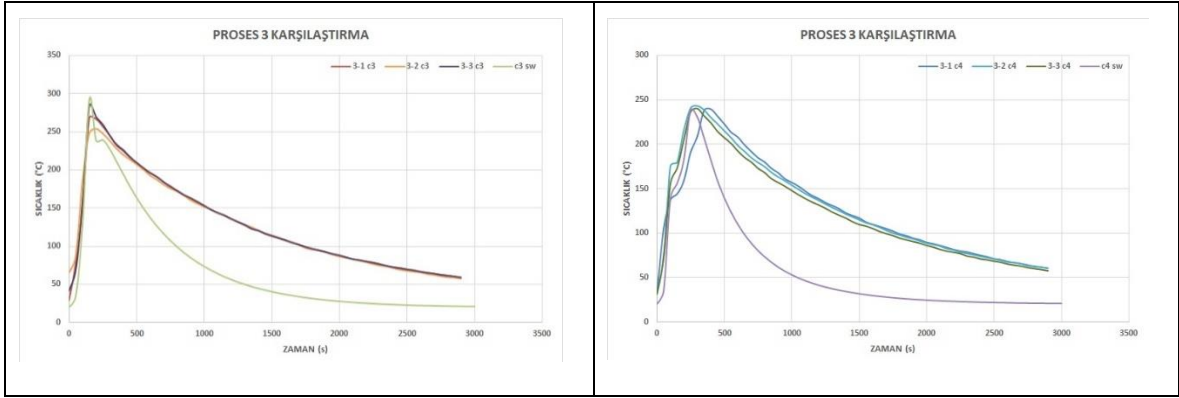
Şekil 5. 50:Proses 2'in Zamana Bağlı Sıcaklık Ölçümlerinin Karşılaştırılması



Proses 3 için deneysel ve ölçüm sonuçlarında elde edilen sıcaklık değerleri benzerdir. Proses 1 ve 2 için de geçerli olan soğuma eğimlerindeki farklılık bu proses içinde geçerlidir.

Şekil 5. 51:Proses 3'in Zamana Bağlı Sıcaklık Ölçümlerinin Karşılaştırılması





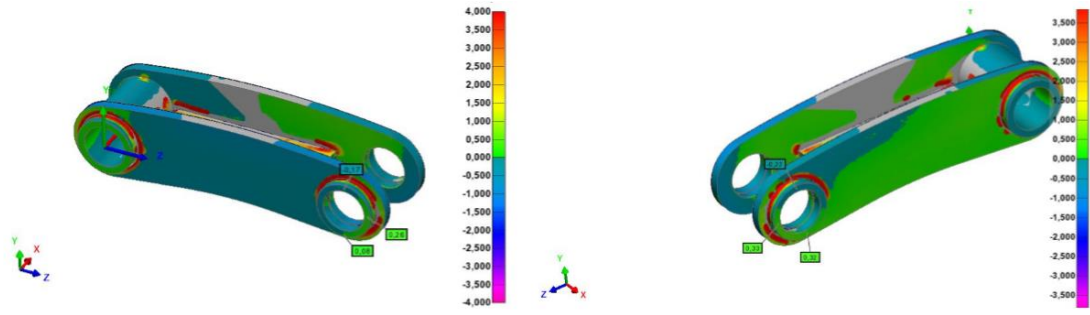
5.2.11. Üç Boyutlu Ölçüm Sonuçları

Lazer tarama sistemleri kalite standartları açısından sürekliliği sağlar. Katı model ve yüzeylerde 3 boyutlu görünümünün elde edilmesi lazer tarama cihazları kullanılarak daha kolay ve daha hassastır. Ölçü kontrolü, yüzey kalitesi ve tersine mühendislik gibi alanlarda sıkça kullanılırlar. Şekil 5.52’de Lazer başlık operatör tarafından iş parçalarının yüzeyinden geçirilerek 3 boyutlu modeller oluşturulmuştur. Tarama işlemleri Hexagon marka RA8 v1 model tarama cihazında yapılmış olup sonuçlar PolyWorks paket yazılımında irdelenmiştir. Şekil 5.53, 5.54, 5.55, 5.56, 5.57, 5.58, 5.59, 5.60 ve 5.61’de taranmış modeller gözükmemektedir.

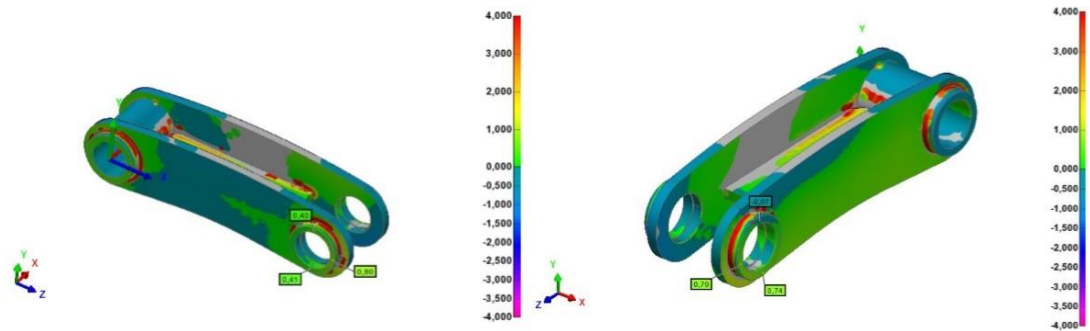
Şekil 5. 52:3 Boyutlu Ölçüm Yapan Uzman Operatör



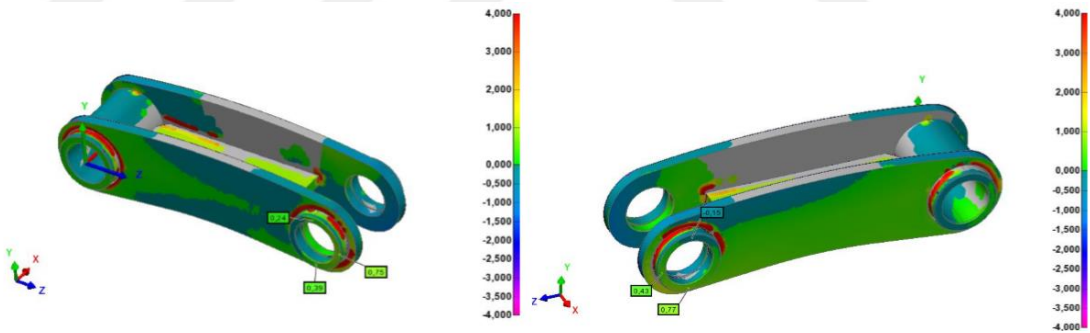
Şekil 5. 53:Numune 1-1’e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



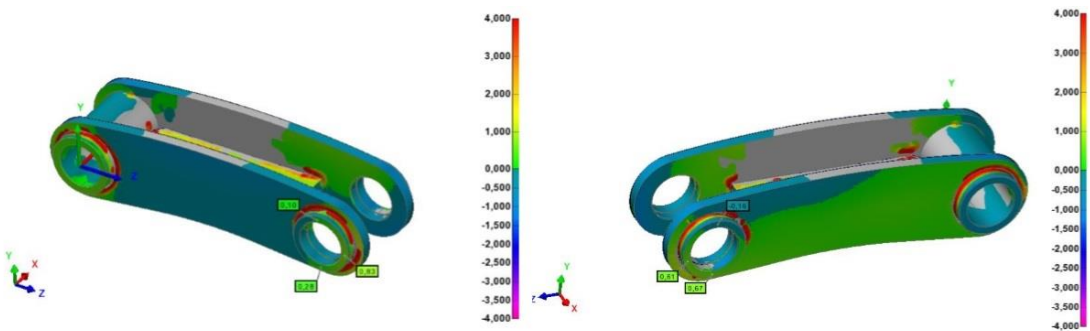
Şekil 5. 54:Numune 1-2'ye Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



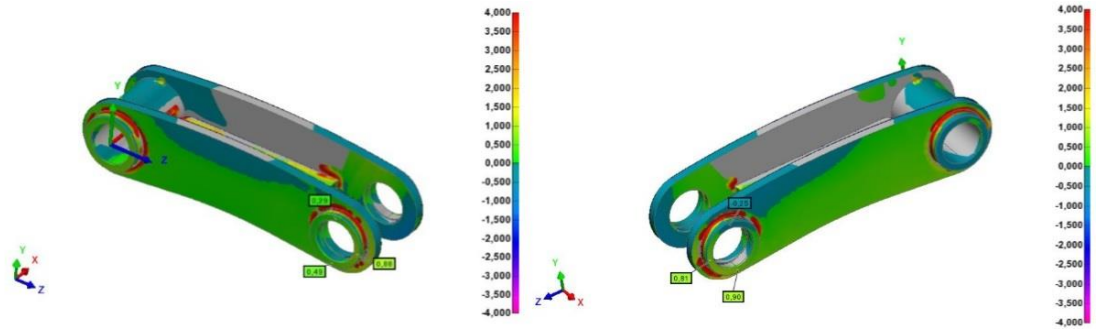
Şekil 5. 55:Numune 1-3'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



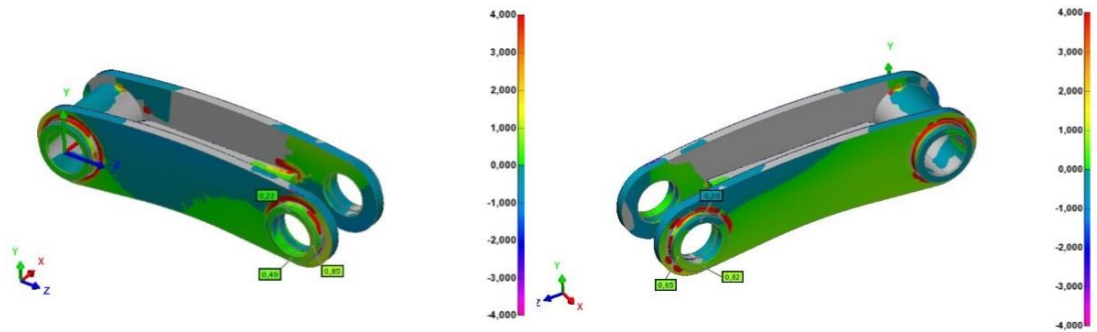
Şekil 5. 56:Numune 2-1'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



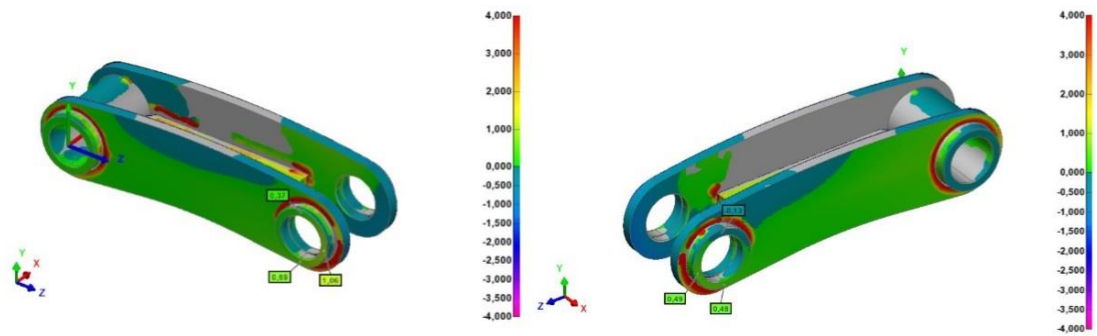
Şekil 5. 57:Numune 2-2'ye Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



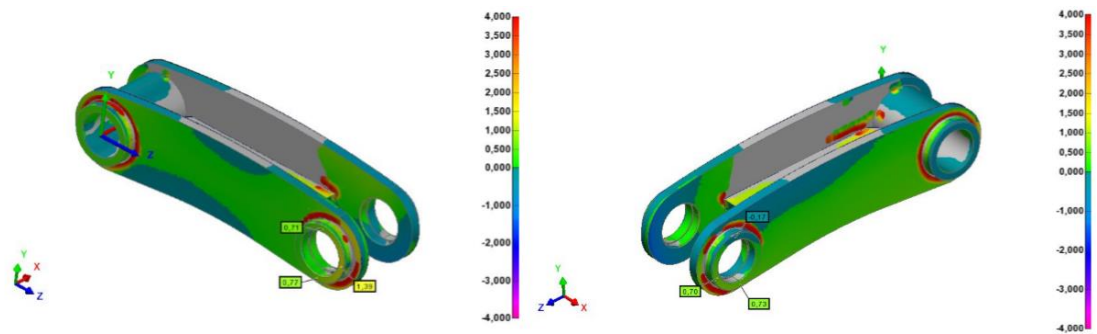
Şekil 5. 58:Numune 2-3'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



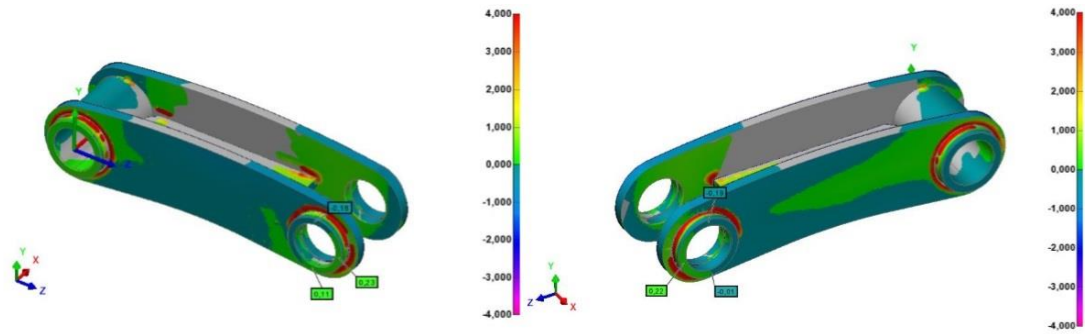
Şekil 5. 59:Numune 3-1'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



Şekil 5. 60:Numune 3-2'ye Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



Şekil 5. 61:Numune 3-3'e Ait 3 Boyutlu Ölçüm Sonuçları



5.2.12. Kaynak Boğaz Ölçümü

Şekil 5.62’de operatör tarafından kaynak kumpası ile kaynak kalınlığı ölçülmüş olan iş parçası görülmektedir. Ölçüm sonucunda değerin 5,2 mm olduğu görülmüştür.

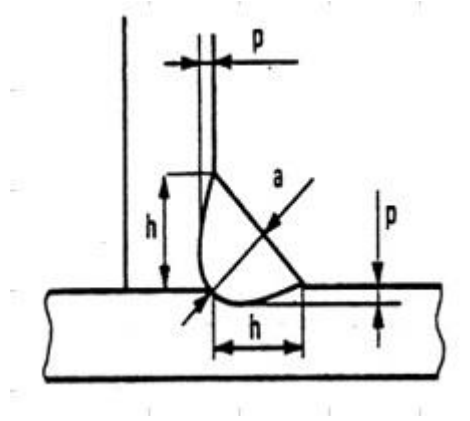
Şekil 5. 62:Kaynak Kumpası İle Ölçüm



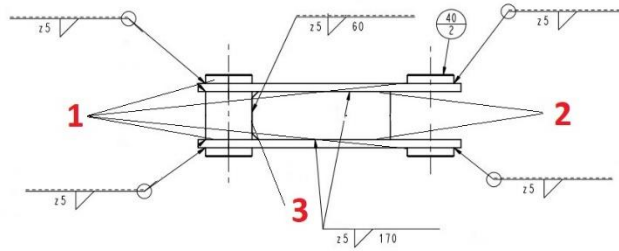
5.2.13. Makro Yapı Analizi

Makro yapı analizi iş parçasından kesit alınarak, metalografik olarak hazırlandıktan sonra asitle dağlanarak mikroskop altından en fazla 10x büyütülerek yapılır.(Biner, 2015) Makro yapı analizinde bakılacak değerler Şekil 5.63 de verilmiştir. Yapılacak analizler için voltaj, amper, ilerleme hızı ve sac kalınlığı gibi değerleri özdeş olan bölgeler için ortak noktalar seçilmiştir. Makro yapı analizinin yapılacağı bölgeler Şekil5.63’ün üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 5. 63:Makro Yapı Analizinde Bakılacak Değerler

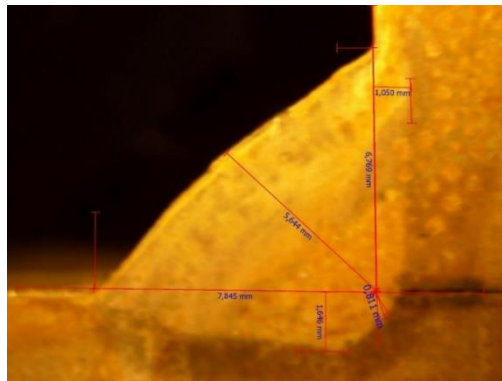


Şekil 5. 64: Makro Yapı Analizi Yapılacak Bölgeler



1 numaralı kaynak bölgesinden kesilerek elde edilen makro görüntü şekil 5.65'de verilmiştir. Kaynak boğaz kalınlığının 5.644 mm olduğu görülmüştür. Penetrasyon değeri 1. Parça için 1.645 mm 2 parça için 1.050'dir. Kök penetrasyonu 0.811 mm'dir. Diğer ölçüm değerleri tablo 5.12'de verilmiştir. Kaynak şartnameye uygundur.

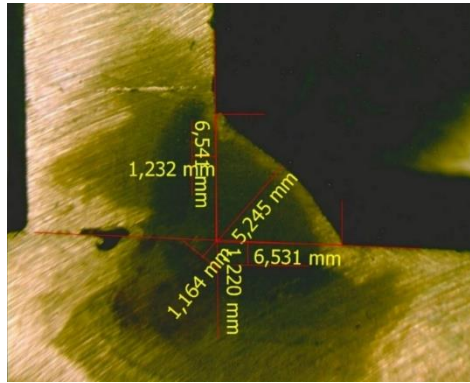
Şekil 5. 65:(1) Numaralı Bölgeye Ait Kesitin Makro Görüntüsü



Tablo 5. 12:(1). Bölgeye Ait Makro Analiz Sonuçları

KONTROL KRİTERLERİ	Nom. Değer	Ölçüm
Penetrasyon 1.parça (p)	0,7 mm	1,64 mm
Penetrasyon 2.parça (p)	0,7 mm	1,05 mm
Kaynak Yüksekliği (a)	3,55 mm	5,64 mm
Kaynak Dikişi Yük. 1.parça (h)	5 mm	6,76 mm
Kaynak Dikişi Yük. 2.parça (h)	5 mm	7,84 mm
Kökde Penetrasyon r	0,8 mm	0,81 mm

Şekil 5.66'da 2 numaralı kaynak bölgesinden alınmış zımparalama ve dağlama işlemleri sonrasında mikroskop altında incelenmiş iş kaynak bölgesi gözükmemektedir. Kaynak boğaz kalınlığı 5.245 mm okunurken penetrasyon değeri 1.parça için 1.232 mm 2.parça için 1.220'dir. Kök penetrasyonu 1.164 mm'dir. Diğer ölçüm değerleri tablo5.13'de verilmiştir. Kaynak şartnameye uygundur.

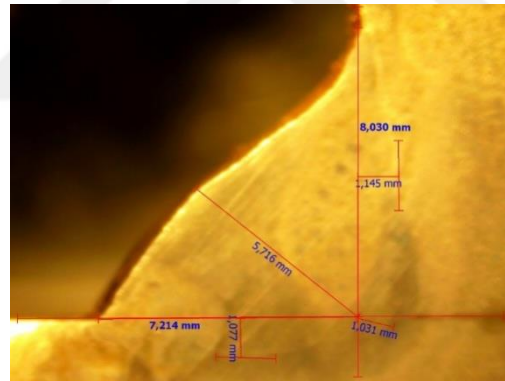
Şekil 5. 66:(2) Numaralı Bölgeye Ait Kesitin Makro Görüntüsü**Tablo 5. 13:(2). Bölgeye Ait Makro Analiz Sonuçları**

KONTROL KRİTERLERİ	Nom. Değer	Ölçüm
Penetrasyon 1.parça (p)	0,7 mm	1,23 mm
Penetrasyon 2.parça (p)	0,7 mm	1,22 mm

Kaynak Yüksekliği (a)	3,546 mm	5,24 mm
Kaynak Dikişi Yüksekliği 1.parça (h)	5 mm	6,54 mm
Kaynak Dikişi Yüksekliği 2.parça (h)	5 mm	6,53 mm
Kökde Penetrasyon r	1 mm	1,16 mm

3 numaralı kaynak bölgesinin mikroskop altında incelenmiş görüntüsü şekil 5.67'de verilmiştir. Kaynak boğaz kalınlığı 5.716 mm kaynak nüfuziyeti ise 1.parça için 1.145mm 2. Parça 1.145 mm'dir.Diğer ölçüm değerleri tablo5.14'de verilmiştir. Kaynak şartnameye uygundur.

Şekil 5. 67:(3) Numaralı Bölgeye Ait Kesitin Makro Görüntüsü



Tablo 5. 14:(3). Bölgeye Ait Makro Analiz Sonuçları

KONTROL KRİTERLERİ	Nom. değer	Ölçüm
Penetrasyon 1.parça (p)	0,7 mm	1,07 mm
Penetrasyon 2.parça (p)	0,7 mm	1,14 mm
Kaynak Yüksekliği (a)	3,546 mm	5,71 mm
Kaynak Dikişi Yüksekliği 1.parça (h)	5 mm	8,03 mm
Kaynak Dikişi Yüksekliği 2.parça (h)	5 mm	7,21 mm

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Yapılan analizler sonucunda yer değiştirme miktarlarına bakıldığında en yüksek değer 1 numaralı proseste olduğu ve bu değer 1.73 mm olduğu görülmüştür. 2 numaralı prosesin en yüksek değeri 1.38 mm'dir. 3 numaralı proseste ise 1.55 mm'lik bir yer değiştirme olmuştur. Ölçüm noktalarındaki en yüksek sıcaklıklar proses 1 için: C1 270 °C, C2 265 °C, C 380 °C ve C4 242°C'dir. Proses 2 için: C1 260 °C, C2 242 °C, C 238 °C ve C4 272°C'dir. Proses 3 için: C1 255 °C, C2 243 °C, C 310 °C ve C4 240°C'dir. Konstrüksiyonlarda kaynak işlemi sonucunda oluşan kalıcı gerilmeler sonlu elemanlar yöntemiyle analiz sonucunda öngörülebilir. Analiz sonunda 1, 2 ve 3 numaralı proseste oluşan en yüksek artık gerilme miktarları sırasıyla $540.50 N/mm^2$, $573.70 N/mm^2$ ve $545.33 N/mm^2$ 'dir. Artık gerilmelerin en yüksek olduğu noktaların kaynak başlangıç ve bitiş noktaları olduğu görülmüştür. Diğer artık gerilmeler ise ITAB bölgesindedir. Yapılan deneyler sonucunda proses 1 için elde edilen en yüksek yer değiştirme değerleri ise şöyledir: numune 1-1 0.33 mm, numune 1-2 0,80 mm numune 1-3 0,77'dir. Proses 2 de ise numune 2-1 de 0,83mm, numune 2-2 de 0,90 mm numune 2-3 de 0,85 mm'dir. Proses 3 e ait numunelerde ise numune 3-1 de 1,06 mm, 3-2 de 1,39 mm numune 3-3 de ise 0,23 mm'dir. Deneysel sıcaklık ölçüm sonuçlarına göre 1.

Proseste 1-1, 1-2, 1-3 numuneleri için en yüksek sıcaklıklar C1, C2 ve C3 noktalarında yaklaşık 250 °C C4 ölçüm noktasında ise yaklaşık 150 °C- 170 °C 'dir. 2. Proseste 4 ölçüm noktası için sıcaklık değerleri yaklaşık 220 °C'dir 3. Ve son proseste ise C3 noktası 260 °C'nin üzerine çıkarken C1, C2 ve C4 noktaları yaklaşık 245 °C'dir. Yapılan makro analizler sonucunda yapılan kaynakların uygun olduğu görülmüştür. Kaynaktaki sıcaklık dağılımları görülmesi deneysel olarak oluşturulması maliyetli ve zordur. Analiz ile sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi kolaylaşacaktır. Ancak grafiklerde görüldüğü üzere soğuma eğrilerinde analiz deneysel sonuçlar arasında farklılıklar görülmüştür.

Öneriler

Bu çalışmada Simufact Welding programı kullanılmıştır. Bu yapılan analizler ANSYS, ABAQUS gibi farklı programlarda yapılabilir. Kaynak sıralamaları bu çalışmada kullanılan sıralamalardan daha fazladır proses sayısı artırılarak çalışma derinleştirilebilir. Deneyler farklı malzemeler kaliteleri kullanılarak yapılabilir. Malzemenin kalınlığı çarpılmayı ve ısıl dağılımları etkileyeceği düşünülmektedir. Farklı kalınlıktaki malzemeler için deney seti oluşturulabilir. Kaynak sonrası kalan artık gerilmeler mukavemeti düşürmektedir. Kalan artık gerilmeleri deneysel olarak ispatlamak için kaynaklı parçalar mekanik testlere tabii tutulabilir. Farklı kaynak tipleri ile çalışmalar yapılabilir. K tipi ısıl çift sensörü kaynak havuzunu ölçümlemek için yeterli değildir. Sıcaklık ölçüm metodu değiştirilerek kaynak bölgesinin sıcaklığı değişimi gözlemlenebilir. Isıl çift sayısı ve türü değiştirilerek ölçüm noktaları çeşitlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- Akkaş, N. (2006). *Tozaltı köşe kaynağında yapay zeka teknolojileri kullanılarak dikiş geometrisinin modellenmesi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans tezi).
- Altan, M. (2002). *Kaynak Distorsiyonları Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi).
- Anca, A., Cardona, A., Risso, J., & Fachinotti, V. D. (2011). Finite element modeling of welding processes. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), 688-707.
- Anık, S. (1991). *Kaynak tekniği el kitabı: yöntemler ve donanımlar*. İstanbul: Gedik Holding.
- Arduino Uno Rev3. (2022, Haziran 10). arduino: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> 1
- Baylan, O. (2015, Nisan 30). *Tig Kaynağı Şematik Gösterimi ve Özet Bilgi*. metaluzmani: <https://www.metaluzmani.com/tig-kaynagi-sematik-gosterim-ve-ozet-bilgi/>

- Benli, S. (2004). *Kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmelerin incelenmesi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü(Yüksek Lisans Tezi).
- Biner, İ. (2015). *Kaynaklı Numunelerin Tahribatlı Testlerinin Güvenirliliği Ve Cihaz Kalibrasyonu*. Ankara: MMO Yayınları.
- Bonakdar, A., Moalvi-Zarandi, M., Chamanfar, A., Jahazi, M., Firozrai, A., & Morin, E. (2017). finite element modeling of the electron beam welding of Inconel713LC gas turbine blades. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 339-354.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2017). *Isı ve Kütle Transferi : Esaslar ve Uygulamalar* (1. b.). İstanbul: Palme Yayıncılık.
- Dal, M., & Fabbro, R. (2016). An overview of the state of art in laser welding simulation. *Optics & Laser Technology*, 78, 2-14.
- Davoud, M., & Deng, X. (2003). *A comparison between three-and twodimensional thermal finite element analysis of the gas metal arc welding process*. 123-130: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Dey, A. K. (t.y.). *Welding Positions | Pipe Welding Positions*. whatispiping: <https://whatispiping.com/welding-positions/>
- Erol, R. (2017). *Gaz altı ark kaynağı yönetiminde proses parametrelerinin yapıdaki çarpılmayan etkisinin incelenmesi*. Bilecik: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi(Yüksek Lisans Tezi).
- Eryürek, İ. B. (2007). *Çelikler İçin Örtülü Elektrot Seçimi*. İstanbul: Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş.
- Fachinotti, V. D., Cardona, A., Baufeld, B., & Van Der Biest, O. (tarih yok). Finiteelement modelling of heat transfer in shaped metal deposition and experimental validation. *Acta materialia*, 60(19), 6621-6630.
- Fındık, T. (2008). *304 tipi paslanmaz çeliklerin MIG kaynağındaki ısı transferinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi*. Ankara: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi).
- Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions B*, 15(2), 299-305.

- Gunaraj, V., & Murugan, N. (2002). Prediction of heat-affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes. *Welding Journal-New York*, 81(3), 45-s.
- Güler, M., & Şen, S. (2015). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Habas. (2019, Şubat 18). *Güvenlik Bilgi Formu*. Habas: <https://www.habas.com.tr/uploads/files/MSDS/GBF97%20HB%20Serisi%20Koruyucu%20Gaz%20Kar%C4%B1%20C5%9F%C4%B1mlar%C4%B1%20rev.1.pdf>
- Iso. (30 Eylül 2012). *ISO 8373:2012 Robots and robotic devices*. Vocabulary: ISO Standartı.
- joshi, S., Hildebrand, J., Aloraier, A. S., & Rabczuk, T. (2013). Characterization of material properties and heat source parameters in welding simulation of two overlapping beads on a substrate plate. *Computational Materials Science*, 69, 559-565.
- Karaoğlu, S., & Karaoğlu, Ç. (2002). T-Bağlantılarda Kaynak Eşiğindeki Gerilme Yiğilmesi Faktörünün Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 107-112.
- Kaya, F. (2010). *Ark kaynak yöntemiyle birleştirilen çelik malzemelerin nümerik olarak modellenmesi*. Sakarya: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. (Yüksek Lisans Tezi).
- Knoedel, P., Gkatzogiannis, S., & Ummenhofer, T. (2017). Practical aspects of welding residual stress simulation. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 83-96.
- Kuka. (2022, 06 01). *KUKA Pozisyonerler*. Kuka: <https://www.kuka.com/tr-tr/%c3%bcrc3%bcnler/robot-sistemleri/robot-periferisi/konu%20land%20c4%b1r%20c4%b1c%20c4%b1>
- Metaluzmani. (2015, Nisan 30). *TIG kaynağı şematik gösterimi ve özet bilgi*. Metaluzmani: <https://www.metaluzmani.com/tig-kaynagi-sematik-gosterim-ve-ozet-bilgi/>
- Milli Eğitim Bakanlığı. (2013). *Gemi Yapımında Kaynak Standartları*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.

- Minh, P. S., & Phu, T. V. (2014). Study on the structure deformation in the process of gas metal arc welding (GMAW). *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(4), 120-124.
- Muhendistan. (2019, Haziran 9). *Kaynak Tanımı, Tarihçesi ve Kaynağın Sınıflandırılması*. muhendistan: <https://muhendistan.com/kaynak-tanimi-tarihi-ve-kaynagin-siniflandirilmesi/>
- Nart, E., & Celik, Y. (2013). A practical approach for simulating submerged arc welding process using FE method. *Journal of constructional steel research*, 84, 62-71.
- Nezamdost, M. R., Esfahani, M. N., Hashemi, S. H., & Mirbozorgi, S. A. (2016). Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 615-624.
- Ovalı, İ., & Esen, C. (2018). *Ansys Workbench* (3. b.). İstanbul: İnkılap kitabevi.
- Piekarsa, W., & Kubiak, M. (2013). Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 2051-2062.
- Piekarska, W., Kubiak, M., & Bokota, A. (2011). Numerical Simulation Of Thermal Phenomena And Phase Transformations In Laser-Arc Hybrid Welded Joints. *Archives Of Metallurgy And Materials*(56), 415.
- Podder, D., Mandal, N. E., & Das, S. (2014). Heat source modeling and analysis of submerged arc welding. *Welding journal*, 93(5), 183-191.
- Pu, X., Zhang, C., Li, S., & Deng, D. (2017). . Simulating welding residual stress and deformation in a multi-pass butt-welded joint considering balance between computing time and prediction accuracy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), 2215-2226.
- Simufact Welding. (2022, mayıs 05). *Simufact Welding*. simufact: <https://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>
- Soncu, R., Yavuz, N., & Ertan, R. (2010). Korniş Usulü Tozaltı Kaynağı İle Kaynak Edilen St37 Malzemesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal Analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(1), 89-97.

- Song, J., Peters, J., Noor, A., & Michaleris, P. (2003). Sensitivity analysis of the thermomechanical response of welded joints. *International Journal of Solids and Structures*, 40(16), 4169-4180.
- Tapıcı, U. Ç. (2006). *Robotla Kaynak Uygulaması İçin Fikstür Tasarımı Ve Kaynak Distorsiyonlarının Analizi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi).
- Tsirkas, S., Papanikos, P., & Kermanidis, T. (2003). Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens. *Journal of materials processing technology*, 134(1), 59-69.
- Wen, S., Hhilton, P., & Farrugia, D. C. (2001). Finite element modelling of a submerged arc welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1-3), 203-209.
- William, D. C., & David, G. R. (2015). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* (8. b.). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Wu, A., Syngellakis, S., & Mellor, B. G. (2001). Finite element analysis of residual stresses in a butt weld. *The Post Graduate Conference in Engineering Materials Proceedings*. University of Southampton.
- Yadav, A., Ghosh, A., & Kumar, A. (2017). Experimental and numerical study of thermal field and weld bead characteristics in submerged arc welded plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 248, 262-274.
- Yaddiah, N., & Bag, S. (2012). Effect of heat source parameters in thermal and mechanical analysis of linear GTA welding process. *ISIJ international*, 52(11), 2069-2075.
- Yavuz, N., Özcan, R., & Polat, F. G. (2005). Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi. *Iudağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10, 9-19.
- Yılmaz, E. (2019, Nisan 10). *Kaynak Nedir? Çeşitleri Nelerdir?* muhendistan: <https://muhendistan.com/kaynak-nedir-cesitleri-nelerdir/>
- Zhang, J., Yu, L., Liu, Y., Ma, Z., Li, H., Liu, C., & Li, Z. (2018). Analysis of the effect of tungsten inert gas welding sequences on residual stress and distortion of CFETR vacuum vessel using finite element simulations. *Metals*, 8(11), 912.

