



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

**GAZ ALTI ARK KAYNAĞI YÖNTEMİNDE PROSES
PARAMETRELERİNİN YAPIDAKİ ÇARPILMAYA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ramazan EROL

Yüksek Lisans

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Emre ESENER

BİLECİK, 2017

Ref.No: 10158431



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

**GAZ ALTI ARK KAYNAĞI YÖNTEMİNDE PROSES
PARAMETRELERİNİN YAPIDAKİ ÇARPILMAYA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Ramazan EROL

Yüksek Lisans

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Emre ESENER

BİLECİK, 2017



BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY

Graduate School of Science

Department of Mechanical and Manufacturing Engineering

**INVESTIGATE OF GAS ARC WELDING PROCESS
PARAMETERS TO STRUCTURE DISTORTION EFFECT**

Ramazan EROL

Master Thesis

Thesis Advisor

Assist. Prof. Dr. Emre ESENER

BILECIK, 2017



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
12.07.2017 tarih ve ...35... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından
27.07.2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan ...Koray... EROL'ın
"Göç Ağı Arkı Kırsal Yarıdağlık Pınar Akarını İnceleme"
".....Seydik...Koray...Felsefe...İnceleme....." başlıklı tez çalışması
Mebres...ve...Koray...Mebres...Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy
birliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI): Yrd. Doç. Dr. Feri ESENİR

ÜYE: Y. Doç. Dr. Osman H. Mete

ÜYE: Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan DEMİR

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
... tarih ve ... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımını, anlayışını, desteğini ve zamanını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Emre ESENER'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında kullanılan malzemelerin temini ve kaynaklı birleştirme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Granito Girarto Anonim Şirketi Makine Bakım ve İşletim Müdürü Sayın Hikmet KOÇAY'a, Makine İmalat ve Montaj Őefi Sayın Necati TURGUTOĐLU'na, Kalıp Hazırlama Atölyesi Őefi Sayın Mehmet KÜLHAN'a teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖZET

Bu çalışmada, St37/St37 ve Ck45/Ck45 kaynak çiftlerine gaz altı ark kaynağı yöntemiyle alın kaynağı ve köşe kaynağı ile birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda farklı proses parametreleri ile çalışılmıştır. Bu doğrultuda iki farklı malzeme, iki farklı kalınlık değeri ve iki farklı ilerleme hızı ile kaynak işlemi yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda St37 kaynak çiftlerindeki çarpılmanın Ck45 kaynak çiftindeki çarpılmadan fazla olduğu, artan malzeme kalınlığının çarpılmayı azalttığı ve artan ilerleme hızının ise çarpılmayı arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci adımında ise gerçekleştirilen proses nümerik olarak hesaplanmıştır. Bu adımda, her bir proses parametresi için kaynak işlemi bilgisayar ortamında simüle edilmiş ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak tahmin hassasiyeti incelenmiştir. Nümerik hesaplamalarda Simufact.Welding paket programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri sonuçları incelendiğinde tahmin değerlerinin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Gazaltı Ark Kaynağı; Çarpılma; Proses Parametreleri; Sonlu Elemanlar Analizi.

ABSTRACT

In this study, butt, and corner welding of St37/St37 and Ck45/Ck45 materials is performed using gas metal arc welding. Different process parameters are used in experimental studies by means of two different material, two different thicknesses, and two different welding velocities. As a result of experimental studies, decreasing distortion values are determined with increasing material thicknesses, and increasing distortion values are obtained with increasing welding velocities. At the second stage of the study, numerical calculation of the process is performed. In this stage, welding process is simulated at computer environment using experimental process parameters. Numerical calculations are performed using Simufact Welding software. Prediction results with finite element analysis are determined compatible with the experimental results.

Key Words

Gas Metal Arc Welding; Distortion; Process Parameters; Finite Element Analysis.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI	
TEŞEKKÜR	
ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER	III
SİMGELER VE KISALTMALAR	IV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Prosesi	1
1.1.1. Kaynağın sınıflandırılması	3
1.1.2. Kaynak pozisyonları.....	4
1.1.3. Kaynak hataları	5
1.2. Literatür Özeti	7
1.3. Tezin Amacı	13
2. GAZALTI ARK KAYNAĞI	15
2.1. Gazaltı Ark Kaynağı Tarihçesi.....	15
2.2. Gazaltı Ark Kaynağı Avantajları.....	15
2.3. Gazaltı Ark Kaynağı Dezavantajları	16
2.4. MIG/MAG Kaynağı ve Çalışma Prensibi	17
2.5. MIG/MAG Kaynak Ekipmanları	18
2.5.1. Kaynak torcu	19
2.5.2. Kaynak akım üretici.....	20
2.5.3. Tel sürme mekanizması.....	21
2.5.4. Torç bağlantı paketi.....	22
2.5.5. Elektronik kart.....	22
2.5.6. Gaz tüpü	23
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	25
3.2. Sonlu Elemanlar Analizi Kullanım Alanları	25
3.3. Sonlu Elemanlar Analizinde Temel Adımlar	26
3.4. Eleman Tipleri.....	27
3.5. Dairenin Alanının Sonlu Elemanlar Analizi ile Hesaplanması.....	29
3.6. Sonlu Elemanlar Analizinde Modelleme ve Çözüm Basamakları	31
4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ	32
4.2. Deneysel Çalışma.....	34
4.2.1. Alın kaynağı prosesi.....	34
4.2.2. Köşe kaynağı prosesi.....	38
4.3. Sonlu Elemanlar Analizleri	41
4.3.1. Alın kaynağı prosesi sonlu elemanlar analizi.....	44
4.3.2. Köşe kaynağı prosesi sonlu elemanlar analizi.....	50
5. SONUÇLAR	56
KAYNAKLAR	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$^{\circ}C$: Santigrat Derece
Lo	: Kopma Uzaması
S_i	: Üçgenin Alanı
S_N	: Dairenin Alanı
N	: Toplam Eleman Sayısı (Üçgenlerin Toplam Sayısı)
δ	: Köşe Kaynağı Distorsiyon Açısı
\emptyset	: Çap
$Z_{1,max}$: Z yönlü maksimum çarpılma, 1
$Z_{2,max}$: Z yönlü maksimum çarpılma, 2
z_1	: Y yönlü kaynak dolgu ölçüsü
z_2	: X yönlü kaynak dolgu ölçüsü

Kısaltmalar

ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
L	: Liquid (Sıvı)
S	: Solid (Katı)
DIN	: Deutsches Institut für Normung
MIG	: Metal Inert Gas
MAG	: Metal Actif Gas
TIG	: Tungsten Inert Gas
CO ₂	: Karbondioksit
HRC	: Rockwell Sertliği

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 4.1 St37 Kimyasal özellikleri.	33
Çizelge 4.2 St37 Mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 4.3 Ck45 Kimyasal özellikleri.	33
Çizelge 4.4 Ck45 Mekanik özellikleri (kalınlık ≤ 16 mm için).	33
Çizelge 4.5 DIN8555:MSG 3-GF 60-GPZ kimyasal özellikleri.	33
Çizelge 4.6 DIN855:MSG 3-GF 60-GPZ mekanik özellikleri.	33
Çizelge 4.7 Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizi için sabit alınan parametreler.	34
Çizelge 4.8 Alın kaynağı sonrası yapıdaki maksimum çarpılma miktarlarının karşılaştırılması.	38
Çizelge 4.9 Köşe kaynağı sonrası yapıdaki maksimum açısal çarpılma miktarlarının karşılaştırılması.	41
Çizelge 4.10 Sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen alın kaynağı prosesinde maksimum çarpılma miktarları.	44
Çizelge 4.11 Sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen köşe kaynağı prosesinde maksimum açısal çarpılma miktarları.	50
Çizelge 5.1 Alın kaynağı prosesinin deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması	58
Çizelge 5.2 Köşe kaynağı prosesinin deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Kaynak faz çevrimleri.....	3
Şekil 1.2 Kaynağın sınıflandırılması.	4
Şekil 1.3 Kaynak pozisyonları.	5
Şekil 2.1 MIG/MAG kaynağı için gerekli ekipmanlar.	18
Şekil 2.2 MIG/MAG kaynak donanımları.	19
Şekil 2.3 Hava soğutmalı kaynak torcu.	20
Şekil 2.4 Tel sürme mekanizması.	22
Şekil 2.5 Gazaltı ark kaynağı koruyucu gaz tüpü ve donanımları.	23
Şekil 2.6 Gazaltı ark kaynağında kaynak hata, neden ve öneriler.	24
Şekil 3.1 Sonlu elemanlar analizi uygulama örnekleri.	26
Şekil 3.2 Sonlu elemanlar analizinde temel adımları.	27
Şekil 3.3 Sonlu elemanlar modelinde eleman ve düğüm noktası.	28
Şekil 3.4 Sonlu elemanlar analizinde sıkça kullanılan eleman tipleri.	29
Şekil 3.5 Dairenin alanının sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması.....	30
Şekil 3.6 (a) Geometrik model (b) Ağ yapısı oluşturma işlemi (c) Sonlu elemanlar analizi.	31
Şekil 4.1 Alın kaynağı için puntalanmış numune örnekleri.....	35
Şekil 4.2 Panasonic TGA1900G2 kaynak robotu.	35
Şekil 4.3 Açık ölçer ve derinlik komparatörü ile ölçme işlemi.	36
Şekil 4.4 IRtec P2000 Mk2 sıcaklık ölçüm cihazı.	37
Şekil 4.5 Alın kaynağı sonrası örnek numuneler.	37
Şekil 4.6 Alın kaynağı işlemi için dikkate alınan çarpılma yüksekliklerinin şematik....	38
Şekil 4.7 Kaynak dolgu ölçülerinin şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.8 Köşe kaynağı işlemi için punta atılma işlemi gerçekleştirilmiş numuneler. ...	39
Şekil 4.9 Deneysel çalışmada köşe kaynak uygulama örnekleri.	40
Şekil 4.10 Köşe kaynağı işlemi için dikkate alınan çarpılma açılarının şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.11 Sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan katı model geometrileri.....	42
Şekil 4.12 Ağ yapısı örnekleri (a) alın kaynağı (b) köşe kaynağı	43
Şekil 4.13 Alın kaynağı sonlu elemanlar analizi sıcaklık dağılımı.....	45

Şekil 4.14 Alın kaynağı prosesi, St37-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	46
Şekil 4.15 Alın kaynağı prosesi, St37-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	46
Şekil 4.16 Alın kaynağı prosesi, St37-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	47
Şekil 4.17 Alın kaynağı prosesi, St37-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	47
Şekil 4.18 Alın kaynağı prosesi, Ck45-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	48
Şekil 4.19 Alın kaynağı prosesi, Ck45-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı	48
Şekil 4.20 Alın kaynağı prosesi, Ck45-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	49
Şekil 4.21 Alın kaynağı prosesi, Ck45-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	49
Şekil 4.22 Köşe kaynağı prosesi, sıcaklık dağılımı.	51
Şekil 4.23 Köşe kaynağı prosesi, St37-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	51
Şekil 4.24 Köşe kaynağı prosesi, St37-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	52
Şekil 4.25 Köşe kaynağı prosesi, St37-4mm-400mm/dk için von mises gerilme dağılımı.	52
Şekil 4.26 Köşe kaynağı prosesi, St37-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	53
Şekil 4.27 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	53
Şekil 4.28 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	54
Şekil 4.29 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	54

Şekil 4.30 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.	55
---	----

1. GİRİŞ

Kaynaklı birleştirme yöntemi, günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerindedir. Bu nedenle kaynaklı parçaların emniyeti ve güvenilirliği, birleştirmelerin kullanıldığı tüm yapının emniyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Kaynaklı birleştirme işlemi, özellikle ark kaynağı; plazma-metal etkileşimleri, metal-gaz-toz reaksiyonları, kaynak banyosu akışkan akışı, elektromanyetik hareket, faz dönüşümü, ısı transferi, kaynak çifti kimyası, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısı, artık gerilmeler, vb. gibi anlaşılması zor fiziksel, kimyasal ve mekanik reaksiyonların etkileşimini içeren karmaşık bir işlemdir (Wen, vd., 2001).

Kaynak işleminin sonlu elemanlar analizi, kaynak işlemi üzerine yapılan araştırmaların en kapsamlı olanlarından. Sonlu elemanlar analizi ile ilgili olarak çeşitli çalışmalar yapılmış ve kaynak işleminde karşılaşılan karmaşık durumlar açıklanmaya çalışılmıştır. Kaynaklı bir yapıdaki kaynak metali, kaynak yapılacak malzeme ve özellikle de kaynak emniyeti açısından büyük önem taşıyan ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) yapısal ve mekanik özellikleri incelenebilmiştir (Bos 2007). Bu özelliklerin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmış olup bu yöntemler; kullanılan kaynak yöntemi, kaynak çifti, kaynak çifti malzemesi, kaynak dolgu malzemesi, kaynak hızı, kaynak akımı vb. gibi birçok parametreye göre de farklılıklar göstermektedir (Yavuz, vd., 2005).

Bu konuyla ilgilenen araştırmacılar ve bilim adamları çalışmalarının büyük bir kısmını kaynağın fiziksel metalürjisi, kaynak metali, ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısı ve kaynak işleminin optimizasyonu konularına ayırmışlardır (Bos 2007; Duranton, vd., 2003). Son zamanlarda sonlu elemanlar analizi, kaynak işleminin analizi ve optimizasyonuna yardımcı bir araç olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle kaynak işlemi sırasında meydana gelen artık gerilmelerin, distorsiyonların ve sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde tercih edilmektedir.

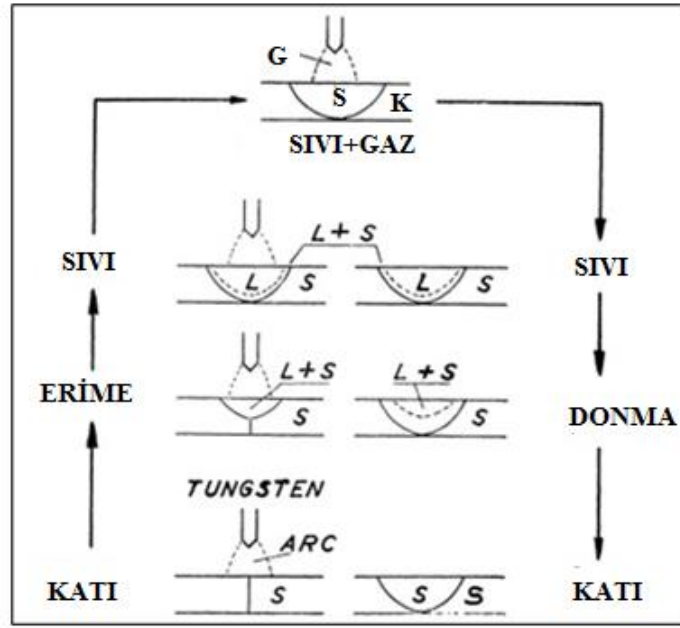
1.1. Kaynak Prosesi

Kaynak, birbiri ile aynı veya benzer alaşım malzemeleri veya erime sıcaklıkları birbirine yakın metalleri birleştirmede kullanılan bir yöntemdir. Metal kaynağı ise, iki aynı ya da farklı metalin ısı ve ya basınç ile elektrot kullanarak ya da

kullanmadan yapılan tahribatsız sökülemeyen birleştirme yöntemidir (Tülbentçi, 1990).

Kaynak sırasında, birleştirilecek parçaların birleşme yüzeylerindeki atomlar karşılıklı olarak birbirlerini çekme bölgelerine getirirler. Sıvı fazdaki bir malzemenin atomları arasında çok az çekim kuvveti varken katı fazda bu çekim kuvvetleri çok daha güçlüdür. Atomlar bu çekme kuvvetlerinin etkisiyle birbirlerine göre belirli bir uzaklıkta dengede bulunurlar ve bu sayede katı bir kütleyi oluştururlar. Kaynak işleminde, atomlar birbirlerine yaklaşır ve atomlar karşılıklı olarak birbirlerini çekmeye başlarlar. Bunun sonucunda kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleşmiş olur (Aydın, 2001).

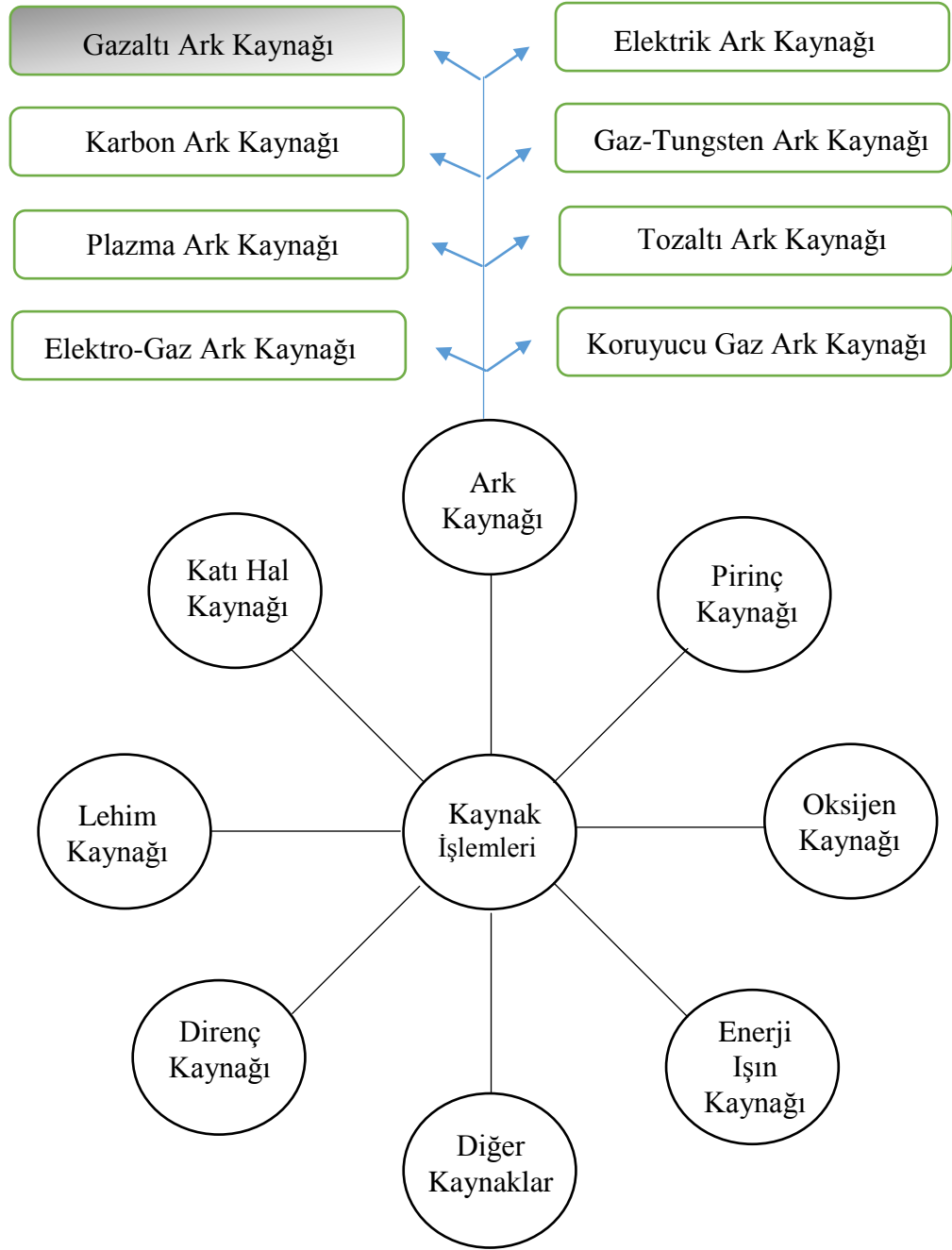
Bütün kaynak yöntemleri temel olarak bir döküm işlemine benzer. Kaynak metali, elektrik arkı veya gaz alevinin yüksek sıcaklığı karşısında erir ve daha önceden hazırlanmış olan kaynak ağzı içine dökülür. Bu arada kaynak ağzının kenar yüzeyleri de bir miktar erir ve dolayısı ile erimiş kaynak metali ve esas metal karışarak kaynak ağzı içinde katılaşır. Bu esnada, kaynatılan parçaların kaynak dikişine bitişik kısımlarında metalin erime sıcaklığından ortam sıcaklığına kadar çeşitli sıcaklık değerleri ortaya çıkar. Bunun sonucunda kaynak sırasında, malzemede istenmeyen ısıl çevrimler oluşur (Dikicioğlu, 2006). Bu katı-sıvı-gaz dönüşümleri sonucu kaynak bölgesinde, çeşitli ısıl çevrimler görülür. Bu ısıl çevrimlerden dolayı mekanik özellikleri ve içyapısı hem ana metalden ve hem de kaynak doldu metalinden farklı bölgeler meydana gelir. Bu farklı özelliklerdeki bölgelerde, tüm yapının zorlanması halinde gerilmelerde, distorsiyonlarda ve korozyona dayanımda ana metalden farklı davranışlar ve özellikler görülür (Dikicioğlu, 2006). Şekil 1.1'de kaynak faz çevrimleri özetlenmiştir.



Şekil 1.1 Kaynak faz çevrimleri (American Welding Society, 1968).

1.1.1. Kaynağın sınıflandırılması

Metal ve alaşımları birleştirmek için kullanılan kaynak işlemlerinin en büyük avantajlarından birisi farklı birleştirme uygulamaları için kolayca kullanılabilmeleri ve özelleştirilmiş yöntemleri barındırmasıdır. Kaynak işlemlerinin çeşitliliği, herhangi bir durum ve uygulama alanı karşısında en uygun yöntemin seçilmesine olanak sağlar. Farklı kaynak yöntemlerin sınıflandırılması için, anlamlı bir düzenleme olmazsa ister istemez bu kaynak yöntem çeşitliliği kafa karışıklığına neden olur. Sınıflandırma, kaynak yöntemlerinin arasındaki temel benzerlikleri ve önemli farkları göz önünde bulundurarak, mantıklı kategorilere ayrılmasında yardımcı olur. Böylece temel kategoriler arasında karşılaştırma yapılarak, belirli bir uygulama için seçilecek yöntemin avantajları ve dezavantajları hakkında bilgi sahibi olunabilir (Lienert, vd., 2001). Şekil 1.2’de American Welding Society tarafından geliştirilmiş temel bir sınıflandırma şeması verilmiştir.



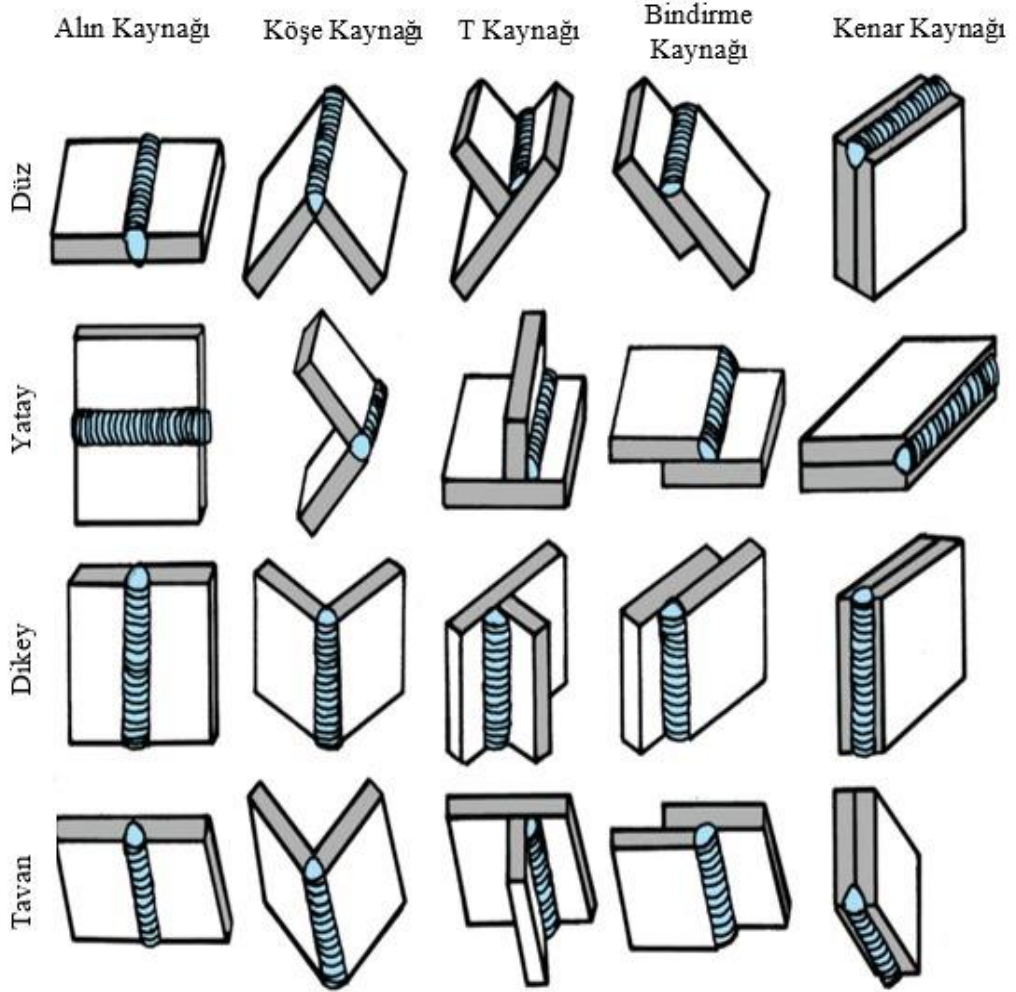
Şekil 1.2 Kaynağın sınıflandırılması (American Welding Society).

1.1.2. Kaynak pozisyonları

Kaynak pozisyonu denildiğinde kaynakçının kaynak işlemi sırasındaki pozisyonu anlaşılmaktadır. Ancak gerçek anlamda kaynak pozisyonu, kaynağın parça üzerindeki konumunu belirtir. Kaynak işleminde istenilen pozisyonda kaynaklı birleştirme yapmak her zaman mümkün olmayabilir. Kaynaklı birleştirmenin kullanım amacına ve yerine göre en uygun kaynak pozisyonunun seçilmesi gerekir. Düz,

yatay, dikey ve tavan pozisyonu olmak üzere 4 temel kaynak pozisyonu vardır. Bu pozisyonlar için, en uygun birleştirme tipleri Şekil 1.3'te verilmiştir.

Yapılan her sıra kaynağa kaynak dikişi denir. Kaynak dikişleri, kaynak ağzının şekline göre isimlendirilir. Örneğin V kaynak ağzı açılarak yapılmış kaynağa V kaynağı denir. Yapılan kaynaklar teknik resim üzerinde sembollerle gösterilir.



Şekil 1.3 Kaynak pozisyonları (<http://fsuweldprof.weebly.com/basics.html>).

1.1.3. Kaynak hataları

Bir kaynak dikişinin tamamen hatasız veya mevcut hataların en az olması istenir. Kaynak esnasında meydana gelen hatalar, hem kaynak dikişinin düzgün olmamasına neden olur hem de malzemenin mukavemetini düşürür.

Kaynak hataları genellikle; elektrot (kaynak teli), kaynağın akımı ve kaynağın hızının yanlış seçilmesi sonucu oluşur. Ayrıca kaynak ağzının iyi hazırlanmaması, uygun kaynak çeşidinin seçilmemesi, dış hava şartları ve kaynakçının acemiliği de

hataların meydana çıkmasına neden olur. Genel olarak iki çeşit hata mevcuttur. Birinci çeşit, göz veya büyüteçle kolayca görülebilen dış hatalardır. İkinci çeşit ise göz ile görülemeyen malzemenin içyapısındaki hatalardır (Komaç, 2014).

Başlıca kaynak hataları ve nedenleri;

1) Kaynak Sıçramaları:

- Ark üflemesi
- Yüksek akım
- Yüksek ark boyu
- Rutubetli, paslı, kırık veya çatlak elektrot kullanılması
- Yüzeyin temiz olmaması

2) Yetersiz Ergime ve ya Yetersiz Nüfuziyet:

- Yüksek ilerleme hızı
- Düşük akım
- Dar kaynak ağzı
- Büyük elektrot çapı

3) Gözenekli Yapı:

- Kısa ark boyu
- Hızlı soğutma işlemi
- Yüzeyin temizlenmemesi
- Rutubetli, paslı, kırık veya çatlak elektrot kullanılması
- Keskin kenarlı yüzey
- Sivri kesitli yüzey

4) Yanma Olukları:

- Yanlış elektrot hareketleri
- Yanlış elektrot seçimi
- Yüksek akım

5) Distorsiyonlar:

- Kaynak çiftinin yanlış sabitlenmesi
- Kaynak çiftinin yanlış puntalanması
- Yanlış kaynak ağzı açılması
- Yanlış kaynak dikişi yapılması
- İş parçasının çok sıkı bağlanması

- Çok pasolu kaynak yapılması

6) Boyuna Çatlaklar:

- Kaynak dikişinin kaynak çiftine uygun olmaması
- Yanlış kaynak ağız açılması
- Hatalı kaynak işlem sırası
- Kaynak elektrotunun, kaynak çifti ile uyumsuzluğu

• Kaynak elektrotunun çalışacak ortamdaki mukavemetlere uygun olmaması

- İş parçasının sıkı bağlanıp sabitlenmesi

7) Enine Çatlaklar:

- Kaynak elektrotunun, kaynak çifti ile uyumsuzluğu
- Kaynak elektrotunun çalışacak ortamdaki mukavemetlere uygun olmaması

- İş parçasının homojen şekilde ısınmaması

• Kaynak etkisi altındaki bölgelerin (ITAB) sıcakken hava ile aniden soğuması ve bunun sonucunda istenmeyen malzeme sertleşmelerinin oluşması

- Kaynak işlemine gerekenden az kaynak dikişi çekilmesi

1.2. Literatür Özeti

Kaynaklı birleştirme işlemi mekanik ve termal etkileşimler içeren karmaşık bir işlemdir. Bu nedenle kaynak işleminin tasarımında ve uygulama aşamasında olası hataların önüne geçmek için iyileştirmeler yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile araştırmacılar, kaynak işlemlerinde deneme-yanılma prosesini ve malzeme kayıplarını en aza indirmek, en kısa sürede en az maliyetle kaynak işlemini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır.

Hong, vd., (1998) tarafından yapılan çalışmada, çok pasolu kaynakta oluşan distorsiyonu ve artık gerilmeleri incelemek için farklı çalışmalar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırılıp yorumlanmıştır. Modeller iki boyutlu hazırlanmış ve eleman doğma, eleman ölme yöntemi kullanılarak malzeme yığılması modellenmiştir. Bu çalışma sonucunda kabul edilen paso profilinin çok pasolu analizlerde artık gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve özel olarak belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, detaylı olarak analiz edilen

ısı girişi modellerinin artık gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

Wu, vd., (2001) tarafından yapılan çalışmada, iki çelik plakanın alın kaynaklı birleşim işlemleri sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda, kaynak işlemi sırasında oluşan sıcaklık dağılımını elde etmek için lineer olmayan geçici bir termal analiz yapılmıştır. İkinci adımda ise termal analiz sonucunda elde edilen veriler kullanılarak gerilme analizi geliştirilmiştir. Gerilme analizi ve termal analiz, Ansys paket programı ile yapılmıştır. Kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgenin malzeme özelliklerine ilişkin bilgilerin yetersizliğinden, bu iki bölgenin termal ve mekanik özellikleri analizde esas metalin özellikleri ile aynı olduğu kabul edilmiştir. Yapılmış deney sonuçlarından ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilmiş artık gerilme ve distorsiyon sonuçları kıyaslanarak modelin geçerliliği ispatlanmıştır.

Duranton, vd., (2003) tarafından yapılan çalışmada, A316L östenitik paslanmaz çelikten yapılmış bir boruda çok pasolu bir kaynaklı birleştirme sonrası oluşan açılmalarda çarpılmalar incelenmiştir ve kaynaklı birleştirme işleminde yüksek sıcaklık farklarının olduğu tespit edilmiştir. Kaynak işlemi sonucunda oluşan çarpılmalar, uyarlanabilir eleman iyileştirme yöntemi kullanılarak bertaraf edilmiştir. Ayrıca uyarlanabilir eleman iyileştirme yöntemi ile zaman kayıpları en aza indirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, deneysel veriler ile model arasındaki farklılıkların en önemli nedeni olarak, deneylerde kullanılan plakaların imalatı sırasında oluşan artık gerilmelerin olduğu belirtilmiştir.

Yavuz, vd., (2005) tarafından yapılan çalışmada, tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilen parçalarda kaynak bölgesi, kaynak metali ve ısının tesiri altında kalan bölgenin mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Kaynaklı birleştirilen parçalarla yapılan çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, tozaltı kaynak yöntemi için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için Ansys paket programı kullanılmıştır. Analiz iki adımda yapılmıştır. Birinci adımda, kaynak işleminde oluşan ısı çevrimlerinden termal analiz yapılmıştır. İkinci adımda ise, termal analiz sonucunda elde edilen veriler mekanik analizde kullanılmıştır. Modelleme ile kaynak sonucunda, malzemenin mekanik özellikleri ve kaynaklı birleştirmenin optimum değerleri belirlenmiştir.

Tapıcı, (2006) tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel robotlar ile gazaltı ark kaynağı yapan bir imalat prosesinin tasarımı ve uygulama süreçleri detaylı olarak ele alınmıştır. Manuel kaynak prosesinde, çelik profil kaynak çiftinin iyi şekilde sabitlenmesini sağlayan bir fikstür tasarlanmıştır. Tasarlanan fikstür üzerinde optimum kaynak parametreleri seçilmiş ve endüstriyel kaynak robotuyla kaynak işlemi yapılmıştır. Yüksek ısı girdisi ile meydana gelen çarpımları engellemek için ters açı verilen fikstürde farklı hızlarda kaynaklı birleştirme işlemi yapılmış ve ısı girdisinin kaynak çarpımlarına etkisi incelenmiştir. Parçada oluşan çarpımların ısı artışı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Kaynaklı birleştirme yapılan kaynak çifti hassas şekilde ölçülmüş ve fikstür performansı doğrulanmıştır. Sonuç olarak, kaynak sonrası uygun geometrik toleranslar tespit edilmiş ve yaklaşımın doğruluğu kanıtlanmıştır.

Bos, (2007) tarafından yapılan çalışmada, literatür taramasında ulaşılan ve kaynak işleminde ısı girdisi, malzeme ve kalınlık ilişkisine atıfta bulunan formüller ve tablolardan; yine literatürde verilen ve pratik uygulamalarda kullanılması önerilen kaynak parametrelerinden yararlanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, 3mm, 6mm ve 10mm kalınlıklarında ve 150mm x 250mm ölçüsünde Fe37 ve AISI304 numuneleri kullanılmıştır. Kaynak dikişleri, numune yüzeylerine tek paso halinde çekilmiştir. Numuneler atmosfer ortamında soğumaya bırakılmıştır. Kaynak bölgeleri ışık metal mikroskobu ile incelenerek mikroyapıları belirlenmiş ve yine kaynak bölgelerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin ITAB genişlikleri kumpas ile, ITAB'ı oluşturan bölgelerinin genişlikleri ise mikroskop ile ölçülmüştür. Deneyler sonucunda, Fe37 malzemeleri için ITAB genişlikleri ve ITAB'ı oluşturan bölgelerin genişlikleri teorik hesaplamalara yakın çıktığı tespit edilmiştir. AISI304 malzemeler için ise, ITAB genişlikleri tespit edilememiştir.

Rui, vd., (2008) tarafından yapılan çalışmada, SUS304 ve SS400 (JIS) malzemelerinden oluşan iki plakanın alın ve köşe kaynakları sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Simülasyonda lineer olmayan malzeme özellikleri kullanılmış, malzeme yığılması için eleman doğma ve ölme tekniği kullanılmıştır. Farklı kalınlıklar için tekrarlanan analizlerden elde edilen veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak elde edilen analiz verilerinin başarılı olduğu ve kaynaklı imalat sonrası oluşacak distorsiyonları önceden belirlenebildiği sonucuna

varılmıştır. Ayrıca ince saclarda yapılan sonlu elemanlar analizinde, kalın saclara göre çok daha net ve kesin sonuçlar verdiği ve deneyler ile çok daha uyumlu olduğu ispatlanmıştır.

Özçatalbaş, (2008) tarafından yapılan çalışmada, kompleks kaynaklı konstrüksiyonların imalat sürecinde ve sonrasında oluşabilecek çarpılmaların belirlenmesi için yeni bir metot geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Kaynaklı birleştirme sürecinde çarpılma kuvvetlerinin ölçülmesi esasına dayanan bu yöntemin uygulanması ile kompleks kaynaklı yapıların kaynak sıralarının optimizasyonu yapılabilmektedir. Yöntem, rijit bir kafes hücre içerisine yerleştirilmiş konstrüksiyon modeline uygulanan kaynak sırasının meydana getirdiği çarpılma kuvvetlerin ölçülmesine dayanır. Üç boyutlu ölçülen kuvvetlerin yönleri ve şiddetlerine bağlı olarak çarpılma eğilimleri belirlenebilir. Uygulanacak her bir kaynak türü için en uygun sıranın belirlenmesi yöntemi ile distorsiyon ve kalıntı gerilme sorunlarına çözüm aranmıştır. Oluşturulan ölçme sistemi ile kaynaklı bir çelik sistemin kaynaklı birleştirme aşamasında ve dış ortamda soğuma sürecinde distorsiyonlar belirlenebilir. Ölçülen distorsiyonlara göre çelik sisteminde oluşabilecek problemler önceden belirlenebilir. Basit çarpılma teorileriyle belirlenemeyen kompleks kaynaklı birleştirmelere sahip bir konstrüksiyonun prototipinin veya belirli ölçekte küçültülmüş bir modelinin kaynak işlemler ile maruz kaldığı çarpılma kuvvetleri vs. tespit edilip konstrüksiyon için en uygun kaynak sıraları ve planları oluşturulabilir. Bu prototip ve ya belli ölçekte küçültme yöntemi ile elde edilen veriler, kaynaklı parçadaki çekme ve çarpılma etkilerinin belirlenmesi amacıyla, sonlu elemanlar analiziyle modellenip değerlendirilebilir veya benzer çalışmaların deneysel olarak ispatlanması amacıyla kullanılabilir.

Vural, (2009) tarafından yapılan çalışmada SUS304 (JIS) (ASTM 304) ve SS400 (JIS) (ASTM1018) kaynak çiftinin köşe ve alın kaynaklı birleşimleri ile meydana gelen çarpılma incelenmiştir. İki farklı plaka kalınlığı için 3 boyutlu analizler Ansys paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki analizin sırayla çözümlenmesinden oluşan çalışmada, birinci adımda ısı analiz ve ikinci adımda ise ısı analizden elde edilen verilerin kullanılması ile yapısal analiz işlemi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, malzemelerin mekanik ve ısı özelliklerinin çarpılmaya olan etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar grafiklere aktarılmıştır. Elde edilen

sonuçlarda özellikle kaynak dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin, oluşan çarpılmalar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca artan kaynak dikişi miktarı ile doğru orantılı olarak artan çarpılma miktarı tespit edilmiştir.

Özkırmaz, (2009) tarafından yapılan çalışmada, 8mm kalınlığında 200mm x 200mm ebatlarında St37 ve St52 çelik sac plakalar kullanılmıştır. Kaynak akımı 120 amper seçilerek rutil ve bazik elektrot kullanılarak bindirme pozisyonunda sac levhalar kaynak edilmiştir. X-ray yöntemi ile tespit edilen kaynak hatalarının ana malzemenin çekme mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Daha sonra çekme testi için 30mm x 20mm boyutlarında DIN standardına uygun çekme test numuneleri hazırlanmış ve çekme testleri yapılmıştır. X-ray yöntemi ile tespit edilen kaynak hatalarının ana malzemenin çekme mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Radyografik incelemeye göre, bazik elektrotla kaynatılmış parçalarda gözenekli yapı ve yanma oluşu gibi kaynak hataları tespit edilmiştir. Bu kaynak hatalarının standart değerler içerisinde olduğu görülmüştür. Rutil elektrotla kaynatılmış parçalarda gözenekli yapı, yanma olukları ve hava boşlukları gibi kaynak hataları mevcuttur. Tespit edilen bu kaynak hatalarının standart değerler dışında olduğu görülmüştür. Çekme deneyi test sonuçlarına göre bazik elektrot ile kaynaklı bağlantılarda kopma, ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) olurken rutil elektrotla yapılan kaynaklı bağlantılarda kopmanın kaynak bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Kaynak içerisinde bulunan gözenekli yapı, cüruf kalıntıları vs. gibi kaynağın mekanik özelliklerine etki eden faktörler rutil elektrot ile yapılan kaynakta diğerlerine oranla daha fazla olduğu ve bu yüzden mekanik özelliklerinde daha fazla bir düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Şen, (2009) tarafından yapılan çalışmada, aynı malzeme ve aynı ölçülerdeki saclar robotik kaynak sistemi kullanılarak 4mm/sn, 7mm/sn ve 10mm/sn hızlarında diğer tüm parametreler sabit olacak şekilde kaynaklı birleştirme işlemi yapılmıştır. Kaynak sırasında termokupul kullanılarak sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Kaynak işlemi sonrasında normal soğumaya bırakılan kaynak çiftleri oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve ısı girişine bağlı olarak oluşan kalıntı gerilmeler delik delme metodu kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi için MSC Marc Mentat 2007 paket programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile 3 boyutlu modelleme yapılan malzemenin üzerinden von Mises gerilim değerleri, maksimum sıcaklık ve ısınma hızı incelenmiştir. Sonuç olarak, düşük hızda yapılan kaynaklı birleştirme işleminde

termokupul ile yapılan ölçümde yüksek sıcaklık gradyenleri elde edilmiştir. Kalıntı gerilme ölçüm deneyinde ise, kaynak hızı arttıkça daha düşük gerinim değerleri ve kalıntı gerilme değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen değerler ile sonlu elemanlar analizinde elde edilen değerler kıyaslandığında sonuçların uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sonuçlara göre kaynak hızı arttıkça ısı girdisi azalmaktadır. Isı girdisi azaldıkça kalıntı gerilme de azalmaktadır.

Ersözlü, (2011) tarafından yapılan çalışmada, AISI316 östenitik paslanmaz çelik ile Ck45 alaşımsız asal çelik çiftinin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, “Visual Studio 2008 Express Edition” paket programı ile yapılmıştır. Üç boyutlu sıcaklık dağılım analizi, “cfdesign” programı ile yapılmıştır. Kaynak işlemi için, bilgisayar kontrollü sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesi kullanılmıştır. Sürtünme kaynak işlemi farklı 19 kaynak parametresi ile yapılmıştır. Kaynak işlemi sürecinde, kızıl ötesi sıcaklık ölçme cihazı ile sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, kaynaklı numunelerde boydaki kısalma oranı, Ck45 çeliğinde AISI 316 çeliğinden daha fazla olmuştur. Kaynak çiftlerinde, Ck45 çeliği tarafında oluşan ITAB bölgesi, AISI 316 çeliğinin ITAB bölgesinden fazla olduğu gözlenmiştir. Kaynak işleminde, 7 ile 12 saniye arasında maksimum sıcaklık 995-1082 °C aralığında ölçülmüştür. Kaynak yüzeyinde oluşan sıcaklık artışları, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi ile doğru orantılı olmuştur.

Yıldız, (2011) tarafından yapılan çalışmada, MAG kaynak yöntemi ile alın kaynaklı St37 çelik plakalarda gaz debisi, kaynak akımı ve plakalar arası boşluğun sıcaklık dağılımı ve çarpılma miktarları üzerine etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca kaynaklı numunelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini belirlemek için, çekme testi, sertlik ölçüm testi, mikroyapı ve kaynak nüfuziyet incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi için HyperMesh 10.0 programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında, sıcaklık ve çarpılma değerlerinin uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kaynak yapılacak parçalar arasında kaynak boşluğu yeterli kaynak nüfuziyetine izin verilecek şekilde alınmalıdır.

Yücesoy, (2014) tarafından yapılan çalışmada, plaka kalınlığının kaynaklı birleştirme sırasında oluşan distorsiyonlara ve korozyona dayanımı alın ve köşe

kaynağı için incelenmiştir. Malzeme çifti olarak, SAE 304L ve SAE 321 tipte östenitik çelikler seçilmiştir. Seçilen her iki tip çeliğin mekanik özellikleri ile korozyona dayanımları birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile yapılan analiz ideal koşullar altında gerçekleştirildiğinden ortam sıcaklığı, havanın rüzgarlı olması, soğuma süresi, kaynakçının ustalığı, kaynak pasoları arası bekleme süresi, elektrot değiştirme süresi vb. gibi değerlendirilmeler yapılamadığından distorsiyon daha düşük değerlerde olmuştur. Elektrik ark kaynağı yönteminin, deneysel çalışması ile sonlu elemanlar analiz çalışması karşılaştırıldığında oluşan distorsiyon farklılığı, gaz altı ark kaynağı (MIG) ile sonlu elemanlar analizi arasında olandan daha büyük olmuştur. Gaz altı ark kaynağında sürekli beslenen elektrotun kullanılmasından ve sıcaklık dağılımının işlem süresince daha dengeli olmasındandır.

Çelik, (2016) tarafından yapılan çalışmada, kaynaklı bağlantılarda oluşacak olan çatlakların neden olacağı hataların tasarımı, malzeme ve kaynak yöntemi iyileştirmeleri ile en aza indirilmesi amaçlanmıştır. İlk olarak transformatör kazanı üzerindeki kaynak yöntemleri incelenmiş ve kaynaklı bağlantılarda kullanılan malzemelerin ve kaynak bölgelerinin mekanik ve metalürjik özellikleri belirlenmiştir. Çekme ve eğme testleri ile analizlerde ihtiyaç duyulan Young Modülü değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda bir trafo kazanı için ısı girdisi, iç gerilme ve deformasyon analizlerinde kullanılacak malzeme parametreleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, yapısal analizlerde bulunan artık gerilme değerlerinin deneysel yöntemlerle yapılan ölçümlerle uyumlu sonuçlar verdiği ve bu aşamadan sonra yapılacak analizler için kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Bunun sonucunda, yapısı gereği artık gerilmelerin kazan ömründe çok önem taşıdığı hermetik tip transformatör kazanlarının termal ve yapısal analiz parametreleri sağlıklı bir şekilde elde edilmiştir. Bundan sonra daha büyük kapasiteli hermetik transformatörlerin bilinçli bir şekilde tasarımını mümkün kılacak analizler yapılabilecektir.

1.3. Tezin Amacı

Tez çalışması kapsamında gaz altı ark kaynağı işleminde proses parametrelerinin yapıdaki çarpılmaya etkilerinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Ck45 ve St37 çelik malzemedan üretilmiş

farklı kalınlıklardaki plakalar için üç boyutlu alın kaynağı ve köşe kaynağı işlemleri ele alınmıştır. Proses parametresi olarak malzeme kalınlığı ve kaynak ilerleme hızı incelenmiştir. Bu doğrultuda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve sonrasında deneysel çalışmaların sonlu elemanlar analizleri ile bilgisayar destekli tahminleri yapılmıştır.

2. GAZALTI ARK KAYNAĞI

Gazaltı ark kaynağı, kaynak bölgesini dış etkilerinden korumak amacıyla çeşitli gazlar kullanılarak gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Koruyucu gaz, kaynak arkını ve kaynak yerini korurken aynı zamanda kaynağın en az hata ile gerçekleşmesini sağlar. Kaynak işleminde kullanılan gaz ve elektrot cinsi, kaynağa adını verir. Gazaltı ark kaynağında, koruyucu gaz atmosferi altında ve sonsuz eriyen tel elektrot kullanılır. Elektrot çıplak bir tel olup, elektrot besleme mekanizması ile kaynak bölgesine kaynak torcu yardımıyla sabit bir hızla sevk edilir (Singh, 2012).

2.1. Gazaltı Ark Kaynağı Tarihçesi

Koruyucu gazla kaynak olarak da bilinen bu kaynak yöntemi ilk defa 1926 yılında "Alexander" usulü olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde kaynak bölgesi, metanol gazı ile korunmaktaydı. Yine 1926 yılında, kaynak bölgesinin hidrojen gazı ile korunduğu, "ark atom" ve 1928'de oksii-asetilen aleviyle korunan "Arcogen" yöntemleri geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda ise, koruyucu gaz olarak helyum ve argon gibi soygazlar, karbondioksit gibi aktif gazların kullanılması uygulama alanına girmiştir (Anık, 1991).

Gazaltı ark kaynağında arkın oluşumu için kullanılan elektrot malzemesi ve koruyucu gazın cinsine göre, aşağıdaki gibi sınıflandırmalar yapılabilir;

1. Erimeyen elektrotla yapılan gazaltı kaynağı:
 - a. Erimeyen iki elektrotla yapılan gazaltı kaynağı (Ark Atom Kaynağı)
 - b. Erimeyen bir elektrotla yapılan gazaltı kaynağı (TIG)
2. Eriyen elektrotla yapılan gazaltı kaynağı:
 - a. Çıplak elektrotla soygaz atmosferi altında yapılan gazaltı kaynağı (MIG)
 - b. Eriyen metal elektrot ile, karbondioksit atmosferi (aktif gaz) altında yapılan gazaltı kaynağı (MAG) (Anık, 1991).

2.2. Gazaltı Ark Kaynağı Avantajları

Gazaltı ark kaynağı yönteminin diğer kaynak yöntemlerine göre birçok avantajları olmasından dolayı günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlar:

- Endüstriyel metal ve alaşımların çoğunun kaynağında kullanılabilen ergiyen elektrotlu kaynak yöntemidir.
- Sonsuz tel elektrotu sahip olmasından dolayı, elektrik ark kaynağında karşılaşılan sınırlı uzunlukta elektrot sorunu ortadan kaldırılmıştır.
- Tüm eksenlerde kaynak işlemi yapılabilir. Toz altı ark kaynağında bu işlem sınırlıdır.
- Kaynak yapılan bölgeye metal yığılma hızı elektrik ark kaynağına göre oldukça yüksektir.
- Sonsuz elektrot beslemesi ve yüksek metal yığılma hızı nedeniyle, kaynak hızları elektrik ark kaynağına göre çok daha yüksektir.
- Sprey iletim kullanıldığından, elektrik ark kaynağına göre daha derin nüfuziyet elde edilir. Böylece dar açılmış ve iç köşe kaynak ağzlarına aynı mukavemeti sağlayacak şekilde kaynak yapmak mümkündür.
- Yoğun kaynak çapağı oluşmaması nedeniyle kaynak pasoları arası temizlik kısa sürer. Hatta temizlik yok denecek kadar azdır.

Bu avantajlar gazaltı ark kaynağını endüstriyel üretimler için, yüksek üretim hızlarına ve robotik kaynak uygulamalarına uygun hale getirmiştir.

2.3. Gazaltı Ark Kaynağı Dezavantajları

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi gazaltı ark kaynağının da dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar:

- Kaynak ekipmanları, elektrik ark kaynağına göre daha karmaşık, pahalı ve bir yerden başka bir yere taşınması daha zordur.
- Gazaltı ark kaynak torcu, elektrik ark kaynağı pensesinden daha büyüktür. Bundan dolayı kaynak metalinin koruyucu gazla etkin bir şekilde korunmasını sağlamak için torcun, kaynak ağzına 10-20mm arasında bir mesafeden tutulması gerekmektedir. Bu durum gaz altı ark kaynağını, ulaşılması güç olan yerlerde kullanılmasını zorlaştırmıştır.
- Kaynak arkı koruyucu gazı, dış hava akımlarından korunmalıdır. Bu nedenle, kaynak alanının etrafı hava akımına karşı koruma altına alınmadıkça, yöntemin açık alanlarda kullanılması tavsiye edilmez.

- Kaynak işlemi sırasında, diğer kaynak yöntemlerine göre etrafa yüksek şiddette ısı yaydığı için, bazı kaynakçılar bu yöntemi kullanmaktan çekinirler (Eryürek, 2007).

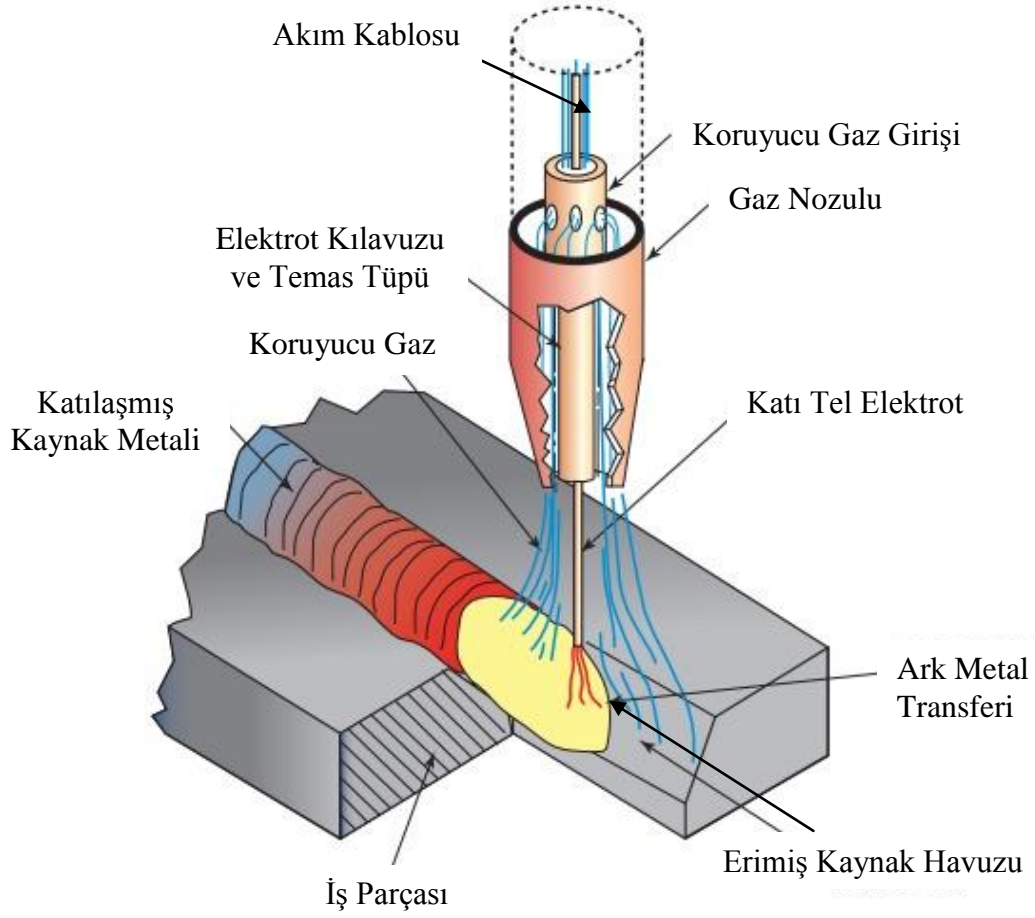
2.4. MIG/MAG Kaynağı ve Çalışma Prensibi

Gazaltı ark kaynağında kullanılan koruyucu gaz Argon, Helyum ve ya Ar+He karışımı gibi soygazlar ise yapılan kaynak işlemi ‘Metal Inert Gas’ (MIG) olarak adlandırılır. Kullanılan koruyucu gaz karbondioksit (CO₂) gibi aktif bir gaz içeriyorsa ‘Metal Active Gas’ (MAG) olarak isimlendirilir. MIG ve MAG kaynağının çalışma prensibi ve işlemde kullanılan ekipman aynıdır. Aralarındaki tek fark kullanılan koruyucu gazın farklı olmasıdır. Avrupa’da bu işlem MIG/MAG kaynağı ya da sadece MIG kaynağı olarak isimlendirilir. MIG/MAG kaynağının temel prensibi, metal bir elektrotun kaynak torcu ile beslenmesi ve kaynak arkında erimesidir. Metal elektrot, hem akımı taşır hem de kaynak dolgu malzemesi olarak kullanılır (Weman, vd., 2006).

MIG kaynağında doğru akım kullanılır ve elektrot, genellikle pozitif kutba bağlanır (ters kutuplama). Son dönemde geliştirilmiş AC MIG’de mevcuttur. Böylece, hem derin bir nüfuziyet, hem de oksit tabakasının parçalanması sağlanmış olur. MIG kaynağında yatay karakteristikli doğru akım kaynak makinaları kullanılır. Bu makinaların akım ayarı, ark gerilimi ayarlanarak yapılır. Kaynak esnasında, kaynak telinin sabit hızda sevk edilmesi, ark boyunun otomatik olarak sabit tutulmasını sağlar. MIG kaynağı bilinen dikiş kaynak pozisyonlarının hepsine uygundur. Tüm pozisyonlarda hem manuel, hem de otomatik olarak kaynak yapılabilir (Anık, 1993).

Kaynak dikişinin dolgu yüksekliği, genişliği ve nüfuziyeti aynı torç açısında; kaynak gerilimini, kaynak akım şiddetini ve kaynak hızını değiştirerek ayarlanabilir. Kaynak sırasında kaynak torcu, kaynak yönüne ters istikamette en fazla 30°’lik bir açıyla tutulur. Böylelikle kaynakçı, kaynak bölgesine ve elektrotun erime işlemine kolayca bakabilir. Eğer kaynak torç açısı 30°’den fazla olursa, kaynak nüfuziyeti azalır ve kaynak dikişi inceler. Aynı zamanda fazla eğim koruyucu gazın kaynak bölgesini koruma özelliğini düşürür ve kaynak dikişinde gözenekli yapı, kalıntı

gerilmelerin oluşmasına neden olur (Anık, 1993). Gazaltı ark kaynağı için ihtiyaç duyulan ekipmanlar şekil 2.1.'de gösterilmiştir.

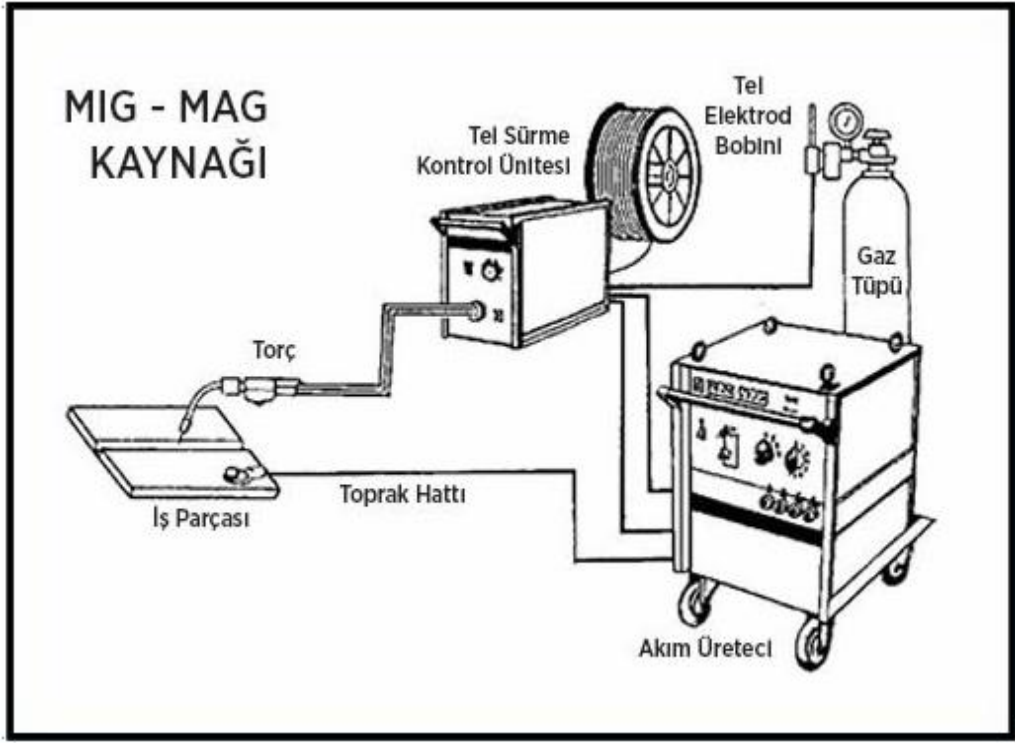


Şekil 2.1 MIG/MAG kaynağı için gerekli ekipmanlar (Jeffus 2012).

2.5. MIG/MAG Kaynak Ekipmanları

MIG /MAG kaynak ekipmanları aşağıdaki bölümlerden oluşur:

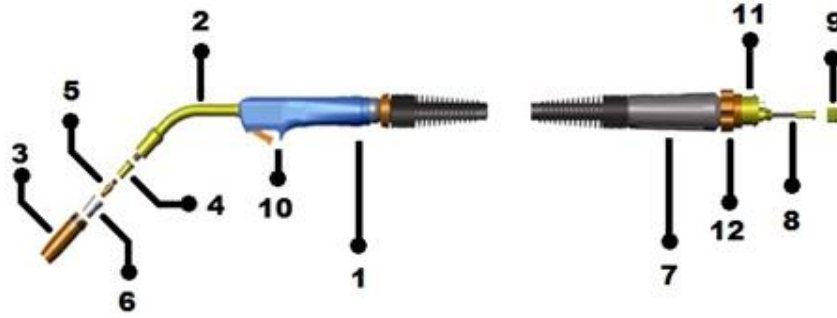
- Kaynak torcu.
- Kaynak akım üretici.
- Tel sürme mekanizması.
- Torç bağlantı paketi; tel elektrot, koruyucu gaz, kaynak akımı, suyla soğutma veya hava ile soğutma için giriş ve çıkış hortumlarını barındırır.
- Elektronik kart; kaynak akım geçişini, soğuma suyunun devreye girişini, gazın akışını ve telin hareketini sağlayan sistem.
- Gaz tüpü; basınç manometresi ve ölçü aleti monte edilmiş tüp. (Yıldız, 2001). MIG/MAG kaynak donanımları Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 MIG/MAG kaynak donanımları (borsenboru.com).

2.5.1. Kaynak torcu

MIG/MAG kaynağında kaynak torcu, kaynak ekipmanları içerisinde en önemlisidir. Kaynak torcu, elektrota akımın yüklenmesi ve ark bölgesine koruyucu gazın gönderilmesini sağlar. Zorlu çevre şartları için sağlam ve aynı zamanda dar çalışma alanlarında çalışmaya uygun hafif ve küçük bir kaynak torcu tasarlamak zor bir işlemdir. Arkın çok yakında bulunması nedeni ile özellikle yarı otomatik sistemlerde operatörün sıcaklıktan mümkün olduğu kadar az etkilenmesi için çeşitli şekil ve ebatlarda torçlar tasarlanıp geliştirilmiştir. Günümüzde en yaygın kullanılan torç, oksii-asetilen hamlacına benzer olan bükülmüş çeşididir. Torçlar, su soğutmalı ve hava soğutmalı olarak ikiye ayrılırlar. Yüksek akım istenen torçlarda su soğutmalı sistem kullanılır (Weman and Gunnar, 2006). Şekil 2.3'te hava soğutmalı kaynak torcu verilmiştir.



- | | |
|-----------------|---------------------------|
| 1. Kabza | 7. Dip Adaptör Muhafazası |
| 2. Boyun | 8. Spiral |
| 3. Nozul | 9. Spiral Tutucu Somun |
| 4. Meme Tutucu | 10. Tetik |
| 5. Kontak Meme | 11. Dip Adaptör |
| 6. Gaz Dağıtıcı | 12. Dip Adaptör Somunu |

Şekil 2.3 Hava soğutmalı kaynak torcu (<http://www.mesanark.com>).

2.5.2. Kaynak akım üreteci

Kaynak akım üniteleri, kaynak arkı oluşturmak için elektrik enerjisini elektrotta ve iş parçasına iletir. MIG/MAG kaynağında elektrotun pozitif kutba bağlı olduğu doğru akım kullanılır. Bu nedenle akım ünitelerinin pozitif ucu torca, negatif ucu ise iş parçasına bağlanır.

MIG/MAG kaynak yönteminde kullanılan akım üreteçleri yatay karakteristiktir; sabit gerilimli diye de adlandırılan bu kaynak akım üreteçlerinde, gerilimin sabit tutulması mümkün olmadığı gibi aynı istenmeyen sakıncalı bir durumdur. Böyle bir üreteçte elektrot iş parçasına temas ettiğinde gerilim düşecek ve akım şiddeti sonsuz yükselecektir ve bu da elektrot ucunda ani bir patlamaya ve şiddetli sıçramalara neden olur. Bu nedenle bu tür kaynak akım üreteçlerinde her 100 amper için en az 7 Volt ark gerilimi düşürülecek şekilde ayarlanır; bu değer üst düzey akım üreteçlerinde 2 ile 5 Volt arasındadır (Anık, 1991).

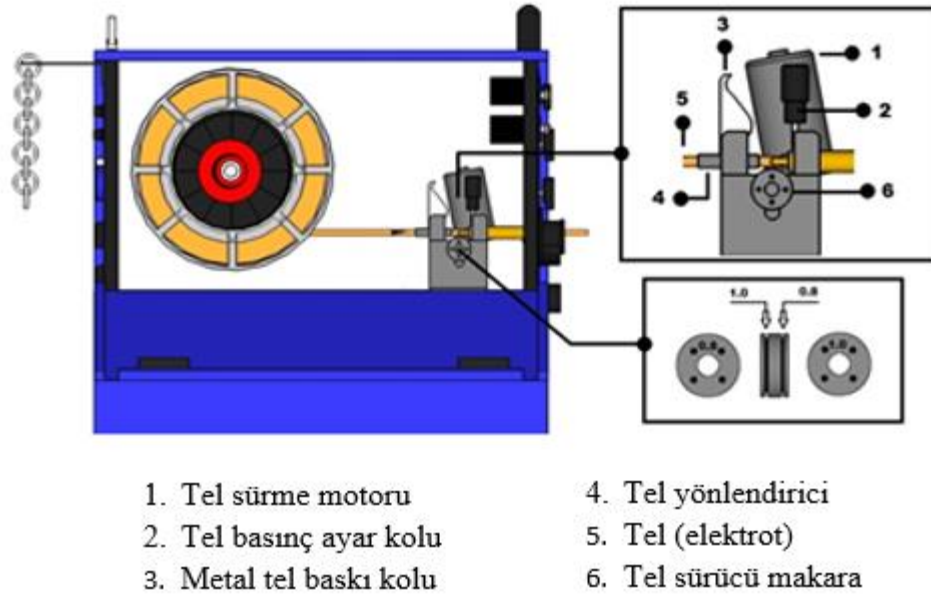
MIG/MAG kaynağı akım üreteçlerinde iç ayar diye isimlendirilen bölgede kaynak ark boyu ayarlanır. Kaynak makinelerinde; arkın gerilimi, tel ilerleme hızı ve akım şiddeti ayarları yapılır. Tel sürme mekanizmasındaki motorunun hızı, ayarlanan bir devirde olacağından tel ilerleme hızı sabittir.

Günümüzde ark boyu kontrol ve ayarı için tel sürme motoru olarak adım motorlu ve servomotorlu sistemler kullanılmaktadır. Bu motorlar sayesinde daha hassas kontrol ve ayar yapılabilmektedir. Makine üzerinden güç ayarı, makinenin gerilim ayarı değiştirilerek yapılır. Yatay karakteristikli makinelerde ark boyu değişimlerinde büyük akım değişimleri olur ve bu makinaların çalışması serttir. Ayrıca yatay karakteristikli kaynak makinelerinde, kaynakta meydana gelen çeşitli kısa devre durumlarında oluşacak kısa devre akımı, makine tarafından çok iyi sınırlanmaz, akım çok büyük değerlere çıkar. Bu da kaynak banyosunda patlamalara, elektrottan sıvı partiküllerin çevreye dağılmasına ve kaynak dikiş kalitesinin düşmesine neden olur. Bu nedenle kısa devre durumlarında akımın kaynak makinesi dışından bir önlemlle sınırlanması gerekir. Bu amaçla kaynak makinesine seri çekirdekli (büyük indüktanslı) bir bobin bağlanır. Bu bobin kısa devre durumlarında kaynak makinesinin akımını bir sınır değeriyle sınırlandırır. Bu kaynak makinesi ile kaynakta, elektrot teli ark (akım) taşıyıcısı olduğu için kaynağın iyi olması, kaynak işleminde ortaya çıkan arkın kaynak boyunca aynı kalmasına bağlıdır (Karadeniz, 2009).

2.5.3. Tel sürme mekanizması

Tel sürme mekanizması, teli makaradan çekip eriyen tel miktarını karşılayacak kadar önceden belirlenmiş bir hızla ark bölgesine ileten bir mekanizmadır. Çalışma sistemlerine göre çekme ve itme sistemleri olarak adlandırılırlar. Çekme ve itme işlemi, hız ayarı kademesiz bir mekanik tertibat veya gerilimi değiştirilerek hızı ayarlanan bir doğru akım motoru tarafından gerçekleştirilir (Anık, 1991).

Tel sürme mekanizması; elektrik motoru, tel makaralar, telin doğrultusunu ve basıncını ayarlayan ekipmanlardan meydana gelir. Elektrik motoru, doğru akımla çalışır ve teli kaynak torcuyla kaynak bölgesine sevk eder. Motorun hızını değiştirip ayarlayan bir kontrol sistemi mevcuttur. Şekil 2.2'de tel sürme mekanizması verilmiştir.



- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1. Tel sürme motoru | 4. Tel yönlendirici |
| 2. Tel basınç ayar kolu | 5. Tel (elektrot) |
| 3. Metal tel baskı kolu | 6. Tel sürücü makara |

Şekil 2.4 Tel sürme mekanizması (<http://www.mesanark.com>).

2.5.4. Torç bağlantı paketi

Torç bağlantı paketi; içinde tel elektrot kılavuzunu, akım kablosunu, koruyucu gaz hortumunu ve gerekli durumlarda soğutma suyu geliş ve dönüşü ile hava hortumlarından oluşan metal takviyeli spiral bir hortumdur. Bu kalın hortuma torç bağlantı paketi adı verilir. Kullanılan tel elektrotun malzemesine göre çeşitli türlerde kılavuzlar kullanılmaktadır. Kılavuz, tel sürme mekanizmasından akım memesine kadar tel elektrotun iletilmesini sağlar. Kullanılan kalın kılavuz hortumunun çapı, tel elektrot çapına uygun olarak seçilir (Tülbentçi, 1990).

2.5.5. Elektronik kart

Gerekli ayarlar yapıldıktan sonra kaynağa başlamak için yarı otomatik MIG/MAG kaynak makinelerinde torç üzerindeki düğmeye basmakla kaynak işlemi başlatılır. Bu esnada, önceden ayarlanmış olan debide koruyucu gaz akımı başlar, kısa bir süre sonra ark oluşur ve ark oluştuğundan kısa bir zaman sonra da tel sürme mekanizması devreye girer. Kaynak işleminin sonuna gelinip kaynak işlemi bitirildiğinde ise bu işlem sırasının tersi durum oluşur. MIG/MAG kaynak makinelerinde suyla soğutma için su geliş-dönüşü ve havayla soğutma için hava geliş-dönüşü de bu kumanda sistemi tarafından gerçekleştirilir (Tülbentçi, 1990).

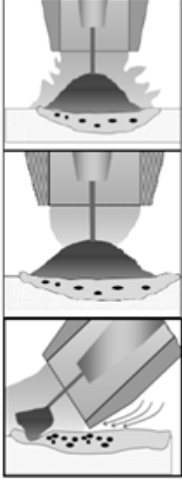
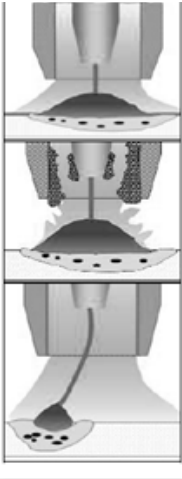
2.5.6. Gaz tüpü

MIG/MAG kaynak yöntemi için ihtiyaç duyulan koruyucu gaz, basınçli tüplerden sağlanır. Tp ağızlarına gaz basınç debi ayarı için regülatör monte edilir. Düzenek üzerinde tüpe yakın olan manometre tp basıncını, diğer manometre ise gaz debisini gösterir. Şekil 2.5'te gazaltı ark kaynağı gaz tüpü ve donanımları verilmiştir.



Şekil 2.5 Gazaltı ark kaynağı koruyucu gaz tüpü ve donanımları.

Gazaltı ark kaynağında meydana gelen kaynak hataları, nedenleri ve hataların giderilmesiyle ilgili öneriler şekil 2.6’da verilmiştir.

Kaynak Hataları	Görünüşü	Olası Nedenleri	Öneriler
Gözenek		<p>Tel çapına uygun olmayan gaz akışı veya fazla gaz akışı</p> <p>Koruyucu gazın az olması</p> <p>Torcun fazla eğik tutulması</p>	<p>Tele uygun gaz seçerek gaz akışını 10-15 litre/dk. ayarlayınız.</p> <p>Gaz akışını 10-15 litre/dk. ayarlayınız.</p> <p>Torcun açısını kontrol ediniz.</p> <p>Parçaları temizleyiniz.</p>
		<p>Parça üzerindeki kirli tabaka</p> <p>Gaz nozulunun çapak ile tıkanması veya kirlenmesi</p> <p>Serbest tel boyunun fazla olması</p>	<p>Gaz nozulunu kaynak spreyi ile temizleyiniz.</p> <p>Tel boyunu 8-15 mm ayarlayınız</p>

Şekil 2.6 Gazaltı ark kaynağında kaynak hata, neden ve öneriler (Komaç, 2014).

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi, günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözümlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir sayısal yöntemdir. Uçak gövdesi gibi karmaşık bir yapıda rijitliğin, ayırık birimlerdeki rijitliğin toplanması ile elde edilebileceği fikri ilk olarak 1956 yılında önerilmiştir (Turner, vd., 1956). Sonraki on yıl içinde, sonlu elemanlar yönteminin mühendislik problemlerinin çözümünde kullanışlı bir yöntem olduğunun anlaşılmasıyla birlikte gelişim süreci başlamıştır (Ciarlet, vd., 1990). Sonraki yıllarda ise sonlu elemanlar analizi uygulamasındaki ve bunun çözüm tekniklerindeki kısıtlamalar farklı yöntemlerle geliştirilmiştir (Eslami, 2014). Günümüzde, karşılaşılan problemlerin birçoğunda (uygulamalı bilimler, mühendislik alanları, sağlık bilimleri vb.) problemlere pratik çözümler getirmesinden dolayı en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi olmuştur. Yöntemin bu kadar yaygın bir şekilde kullanılmasının en önemli nedeni, herhangi bir bilgisayar ile programın giriş verilerini değiştirerek problemin çözümüne yakın sonuçlar elde edilebilmesidir.

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık bir problemi en basit haline dönüştürerek probleme çözüm bulmaktır. Bu nedenle kesin sonuç değil de yaklaşık sonuç elde edilir. Bu sonucun, iyileştirilmesi ile kesin sonuca daha da yaklaşılr. Bir problemin çözümünde, analitik yöntemler kullanılarak kesin sonuç elde edilemiyorsa kullanılabilir en iyi yöntem sonlu elemanlar yöntemi olacaktır (Arkan S.).

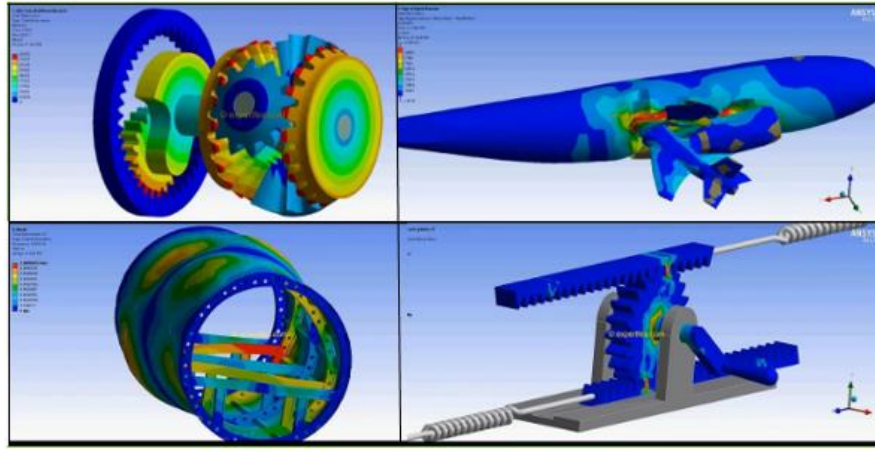
Sonlu elemanlar yönteminin temel birimi elemandır. Eleman belli bir fiziksel alanı, hacmi kapsayan ve eleman ağının köşe veya kenarlarını tanımlayan düğüm noktalarından oluşur. Düğüm noktası, çözülemeyen problemin bilinmeyenlerinin indirgendiği sonlu sayıda bilinmeyen sayısal olarak çözüldüğü fiziksel noktalardır (Fırat M.).

3.2. Sonlu Elemanlar Analizi Kullanım Alanları

Sonlu elemanlar analizi günümüz teknolojisinde pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntem, yapısal mekanik problemlerinin yanısıra, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılmaktadır. Yöntemin mühendislik problemlerinde yoğun uygulama alanı bulmasının en önemli nedeni mühendislik problemlerinin benzer

olmasıdır. Sonlu elemanlar analizinin kullanım alanlarından bazıları şunlardır. Şekil 3.1’de sonlu elemanlar analizi uygulama örnekleri verilmiştir.

- Makine/Uçak/İnşaat/Otomotiv Mühendislik Uygulamaları
- Yapısal Analizler (Statik, Dinamik, Lineer/Nonlineer)
- Termal, Akış Hesapları
- Elektromanyetik Hesaplamalar
- Biyomekanik Hesaplamalar
- Medikal Uygulamalar vb.



Şekil 3.1 Sonlu elemanlar analizi uygulama örnekleri (<http://expertfea.com>).

3.3. Sonlu Elemanlar Analizinde Temel Adımlar

Fiziksel problem (tasarım) aşamasında; sanal model tasarlanır, malzeme özellikleri girilir ve dış etkiler ile sınırlar belirlenir.

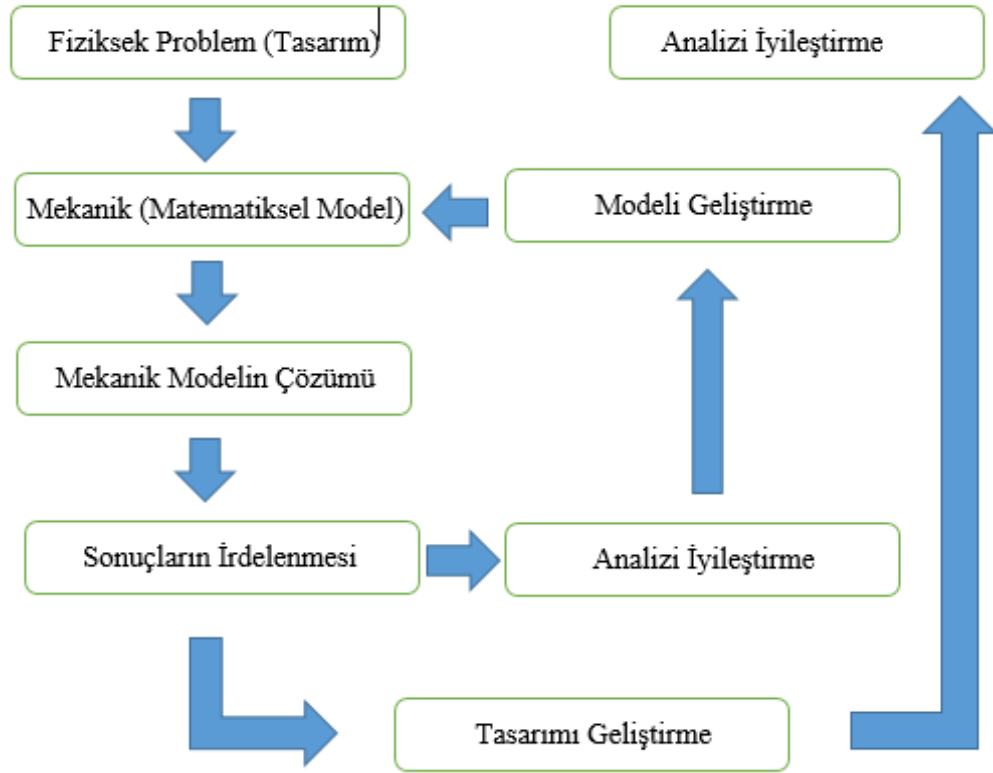
Mekanik (Matematiksel Model); tasarlanan fiziksel problemin sınır değerleri girilip sonlu eleman noktasına indirgenir.

Mekanik modelin çözümü; ortaya çıkan milyonlarca denklem mekanik modelin çözümüne uygun yöntemle çözülür.

Sonuçların irdelenmesi; çözümlenmelerle ortaya çıkan sonuçların animasyon ve grafiklerle incelenmesi.

Analizi iyileştirme; ilk olarak girilen parametrelerin değiştirilerek farklı sonuçların çıkarılması ve daha önce yapılan sonuçlarla karşılaştırılması ve en iyi sonucun bulunması şeklinde yorumlanır.

Modeli geliştirme; Analizi iyileştirme işlemi yapıldıktan sonra model öncekine göre daha da geliştirilip matematiksel modelleme adımına geri dönlür. Şekil 3.2’de sonlu elemanlar analizinde izlenen temel adımlar verilmiştir



Şekil 3.2 Sonlu elemanlar analizinde temel adımları (artunbotke.com).

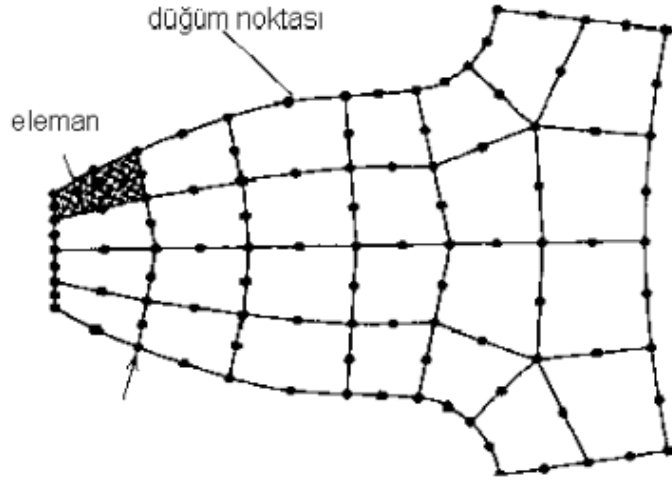
3.4. Eleman Tipleri

Tek Boyutlu Elemanlar: Tek boyutlu çizgisel elemanlardır. Bu gruba yay, kiriş, boru, profil vb. girer.


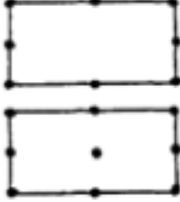


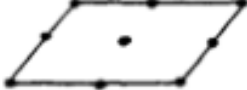
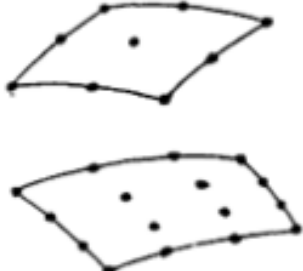
İki Boyutlu Elemanlar: Düzlem eleman diye adlandırılır. Bu gruba zar, levha, kabuk vb. girer. İki boyutlu problem çözümlerinde kullanılır. En temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm içerenleri de mevcuttur. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonuna göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini gerçeğe yakın olarak temsil ettiği için kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen eleman birleşmesiyle dörtgen eleman oluşur. Oluşan dörtgen eleman, problemin geometrisine uyumlu olduğu sürece kullanışlı bir elemandır. Elemanlar dört veya daha fazla düğüm sayısında da olabilir.

Dönel Elemanlar: Eksenel simetrik problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipidir. Bu elemanlar bir boyutlu veya iki boyutlu elemanların simetri eksenleri etrafında bir tam tur dönme hareketiyle oluşurlar. Üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözmek için kullanışlı bir eleman tipidir.

Üç Boyutlu Elemanlar: En temel elemanı üçgen piramit eleman tipidir. Bu elemandan başka dikdörtgenler prizması da vardır. Dikdörtgen prizması eleman tipi altı yüzeyle elemanlarda üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılırlar. Üç boyutlu yer değiştirme-gerilim elemanı olarak isimlendirilir. Şekil 3.3'te sonlu elemanlar modelinde elemanlar ve düğüm noktaları verilmiştir. Şekil 3.4'te sonlu elemanlar analizinde sıkça kullanılan eleman tipleri gösterilmiştir.



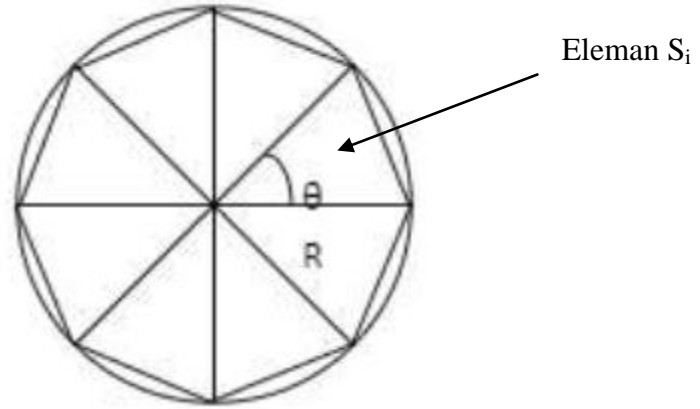
Şekil 3.3 Sonlu elemanlar modelinde eleman ve düğüm noktası (Bathe).

PROBLEM TİPİ	ELEMAN	
Kiriş Eleman	2 düğüm noktalı	
İki Boyutlu Eleman	8 veya 9 düğüm noktalı	
3 Boyutlu Eleman	20 düğüm noktalı	
3D Kiriş	3 veya 4 düğüm noktalı	
Düzlem	9 düğüm noktalı	
Kabuk Eleman	9 veya 16 düğüm noktalı	

Şekil 3.4 Sonlu elemanlar analizinde sıkça kullanılan eleman tipleri (Bathe).

3.5. Dairenin Alanının Sonlu Elemanlar Analizi ile Hesaplanması

Dairenin dışındaki ve içindeki çokgenlerin çevreleri, dairenin çevresinin üst sınırları ve alt sınırlarıdır. Çokgenin kenar sayısının artırılması ile, sonlu elemanlar yönteminde bulunacak sonuç gerçeğe daha da yakın olacaktır. Şekil 3.5'te dairenin alanının sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Dairenin alanının sonlu elemanlar yaklaşımı ile bulunması.

Üçgenin Alanı: $S_i = 1/2 R^2 \sin \theta_i$
 (Burada açı radyan cinsinden olmalıdır.)

$$\begin{aligned}
 \text{Dairenin Alanı: } S_N &= \\
 \sum_{i=1}^N S_i &= [1/2 R^2 \sin(2\frac{\pi}{N})N] \\
 &= \pi R^2 \sin N \\
 &= \pi R^2 \sin N
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

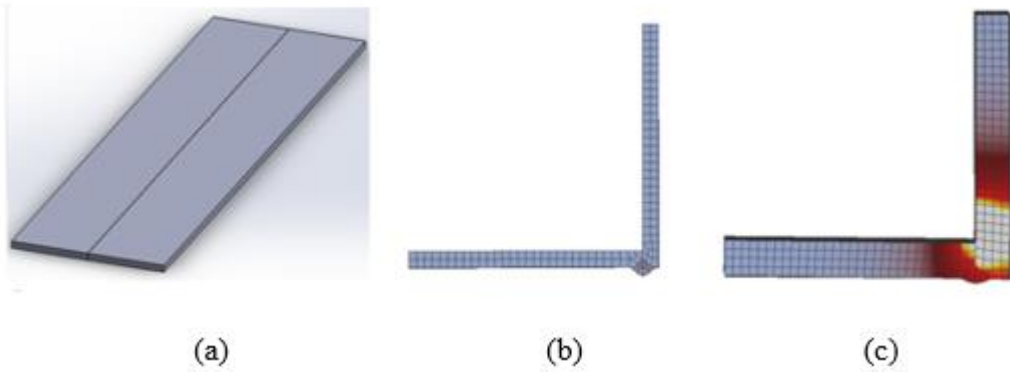
N: Toplam eleman sayısı (üçgenlerin sayısı)

Dairenin yaklaşık alan hesaplamasındaki mantık sonlu elemanlar yöntemi için de geçerlidir. Dairenin gerçek çizimi geometrik modeli temsil eder. Geometrik modelin şekline en yakın çizgilerle oluşturulmasına ağ yapısı oluşturma işlemi denir. Her bir çizgi elemanı temsil eder. Elementlerin köşelerindeki noktalara düğüm adı verilir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile parça modellenirken, model küçük parçalardan oluşan temel elemanlara yani ağ yapısına ayrılır. Her elemanın köşelerinde düğüm noktaları vardır. Hesaplamalar bu düğüm noktaları üzerinde gerçekleştirilir. Dolayısıyla fiziksel ortam önce elemanlara bölünür ve elemanların köşe noktaları ise fiziksel ortamı temsil eden noktalar uzayı olmuş olur. Elde edilen sonuçlar bu noktaların üzerinde yorumlanır.

3.6. Sonlu Elemanlar Analizinde Modelleme ve Çözüm Basamakları

Sonlu elemanlar yönteminde katı sıvı veya gaz gibi gerçek cisim veya bir sıralı dizi ile birbirine bağlanmış, sonlu eleman adı verilen alt bölümlerden oluşmuştur. Bu sonlu elemanlar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanların birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır. Sıralı dizi içerisindeki deplasman, gerilme, sıcaklık, basınç, hız vs. gibi değişkenlerin gerçekte nasıl değiştiği bilinemediğinden, bunların basit fonksiyonlar ile yaklaşık olarak ifade edilebildikleri varsayılmaktadır. Bu yaklaşık fonksiyonlar, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmektedir. Sistem için korunum denklemleri vs. gibi yeni denklemler yazıldığı zaman, bilinmeyenleri değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri olan ve ortak çözümleri gereken yeni denklemler ortaya çıkmaktadır. Genellikle matris denklemleri şeklinde olan bu denklemlerin çözülmesi ile de değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmektedir. Yaklaşık fonksiyonların, değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri cinsinden ifade edilmiş olmaları nedeni ile de, bu fonksiyonların eleman içerisindeki ve bütün sıralı dizi içerisindeki değerleri bulunur, ve istenilen sonuçlar elde edilmiş olur. Genel bir sıralı dizi probleminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü daima belirli basamaklardan oluşan bir yöntem ile elde edilmektedir. Şekil 3.6'da geometrik model, ağ yapısı oluşturma ve sonlu basamakları gösterilmiştir.



Şekil 3.6 (a) Geometrik model (b) Ağ yapısı oluşturma işlemi (c) Sonlu elemanlar analizi.

4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Kaynak parametreleri, kaynak işlemini ve elde edilen kaynak bağlantısının kalitesini belirleyen en önemli unsurlardır. Kaynak parametreleri, kaynaklanan metal veya alaşım ile kaynak metalinin türü ve kaynak ağız geometrisi göz önünde bulundurularak saptanır. Bu parametrelerin seçimi çalışma koşullarını kolaylaştırdığı gibi istenen özellik ve kalitede kaynaklı bağlantı elde edebilme olasılığını da artırır. Kaynak parametreleri, kaynak öncesi saptanan ve kaynak süresince değiştirilmesi mümkün olmayan parametreler, birinci derecede ayarlanabilir ve ikinci derecede ayarlanabilir parametreler olmak üzere üç ayrı grupta incelenebilir (Tülbentçi, 1990).

Kaynak öncesi saptanan parametreler; elektrotun çapı, elektrotun malzemesi, koruyucu gaz türü ve akım türüdür. Bu parametrelerin kaynak süresince değiştirilmesi mümkün değildir. Birinci derecede ayarlanabilir parametreler; kaynak akım şiddeti, ark boyu ve kaynak hızıdır. Bu parametreler kaynak süresince değiştirilebilir. İkinci derecede ayarlanabilir parametreler; torç açısı, elektrot serbestlik uzunluğu ve parçanın yatay düzlem ile olan eğimidir.

Tez çalışmasında proses parametrelerinin çarpılmaya etkisinin incelenmesi için iki farklı kaynak prosesi gerçekleştirilmiştir. Kaynak proseslerinde malzeme olarak Ck45 ve St37 çelikleri kullanılmıştır. St37 çelik malzemeler piyasada; inşaat sektöründe, düz yüzeyli malzemelerde, parlaklık istenilen durumlarda ve dikişli-dikişsiz borularda kullanılmaktadır. Tablo 4.1’de St37 malzemesinin kimyasal özellikleri ve Tablo 4.2 ‘de St37 malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir. Ck45 çelik malzemeleri ise kalıp imalatında, taşıt, makine, motor ve aparat yapımında, otomotiv, elektrik-elektronik, inşaat, asansör, savunma sanayi, gemi sanayi, tarım aletleri, yaylar, çanak ve pullar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Tablo 4.3’te Ck45 malzemesinin kimyasal özellikleri ve Tablo 4.4’te Ck45 malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda, kaynak dolgu metali olarak Ø1,2 mm çapındaki DIN8555: MSG 3-GF 60-GPZ gazaltı kaynak teli kullanılmıştır. Kullanılan kaynak teline ait kimyasal ve mekanik özellikler sırası ile Tablo 4.5’te ve Tablo 4.6’da verilmiştir.

Bu verilerin dışında deneyisel çalışmalarda ortak olarak kullanılan proses parametreleri ise Tablo 4.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 St37 kimyasal özellikleri (Simufact Welding).

Element	Al	C	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	Ti
Değeri	0.02	0.1	97.68	1.1	0.15	0.15	0.65	0.15

Çizelge 4.2 St37 mekanik özellikleri (Simufact Welding).

Malzeme (DIN) Eski	Malzeme (DIN) Yeni	SAE	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Kopma Uzaması (Mpa)
St 37-3	S235J2G3	A284Gr.D	340-470	235	26

Çizelge 4.3 Ck45 kimyasal özellikleri (Simufact Welding).

Element	C	Fe	Mn	Si	Pmax	Smax
Değeri	0,42-0,50	98.23	0,50-0,80	≤0,40	0,035	0,035

Çizelge 4.4 Ck45 mekanik özellikleri (kalınlık ≤16mm için) (Simufact Welding).

Malzeme (DIN)	SAE	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Kopma Uzaması (A) (Lo=5 D ₀)	Kesit Daralması (%)
Ck45	1045	700-850	500	14	35

Çizelge 4.5 DIN8555:MSG 3-GF 60-GPZ kimyasal özellikleri (Simufact Welding).

Element	C	P	Si	Mn	S	Mo	Cr	V	W
Değeri (%)	0,50	≤ 0. 020	1,30	1,30	≤ 0. 020	1.30	5,50	0,30	1,30

Çizelge 4.6 DIN855:MSG 3-GF 60-GPZ mekanik özellikleri (Simufact Welding).

Malzeme	Malzeme (DIN)	Koruyucu Gaz	Akış Oranı (l/min)	Sertlik (HRc)	Çap (mm)	Akım (A)	Voltaj (V)
MSG 3-GF 60-GPZ	8555	ArCO ₂	14-20	57-62	Ø1,2	50-320	12-35

Çizelge 4.7 Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizi için sabit alınan parametreler.

Kaynak Akımı (A)	Kaynak Voltajı (V)	Koruyucu Gaz (Ar+CO ₂)	Koruyucu Gaz Akışı (l/dk)	Elektrot ve Çapı (mm)	Malz.	Malz. Ölçüsü (mm)	Malz. Ölçüsü (mm)
130	28,4	Karışım	18	DIN855	Ck45	210*	210*
				5 Ø 1,2	St37	30*2	30*4

4.2. Deneysel Çalışma

Metal parçaların kaynak yolu ile birleştirilmelerinin gün geçtikçe daha da arttığı günümüzde, kaynağın kalitesi ve dayanımı için iyi nüfuziyete sahip olması gerekmekte ve kaynak hatalarının en az olması istenmektedir. Ayrıca endüstriyel firmaların zorlu piyasa şartlarında rekabet edebilmesi için kaynaklı birleştirme maliyetlerini sürekli olarak düşürmeleri gerekmektedir. Bu yönde mühendislik çalışmaları yapılarak bu çalışmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada amaç, minimum maliyet ve en az süre ile günümüz kalite şartlarının gerektirdiği kriterlere uyarak, optimum nüfuziyet ve kalite özelliklerine sahip kaynaklı birleştirme imalatlarını gerçekleştirebilmektir. Günümüz endüstrisinde taleplere en az sürede cevap verebilmek için, seri imalat şeklindeki kaynaklı birleştirme imalatlarında endüstriyel kaynak robotları kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada, kaynak robotu kullanılarak başlıca kaynak parametreleri ve kaynak parametreleri sonucu gerçekleştirilen kaynak çiftleri incelenmiştir.

4.2.1. Alın kaynağı prosesi

Tez çalışması kapsamında, St37/St37 ve Ck45/Ck45 kaynak çiftlerinde 210mm x 30mm x 2mm'lik ve 210mm x 30mm x 4mm'lik sac plakalardan oluşan iki sac plakaya 180°'lik açıyla alın kaynağı 400mm/dk ve 500mm/dk hızlarında kaynak işlemi, deneysel uygulama olarak kaynak robotuyla yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Alın kaynağı deneysel çalışması için yapılan çalışma adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- 1) 210mm x 30mm x 2mm ve 210mm x 30mm x 4mm olacak şekilde sac plakaların kesilip hazırlanması.
- 2) Uygun ölçülerde hazırlanan sac plakalara kaynak ağzı açılması.

3) Kaynak ağızı açılan parçalara alın kaynağı için parçaların iki uç kısmına ve ortasına punta atılması. Şekil 4.1’de deneysel çalışmalarda alın kaynağı için punta atılma işlemi gerçekleştirilmiş numuneler gösterilmiştir.



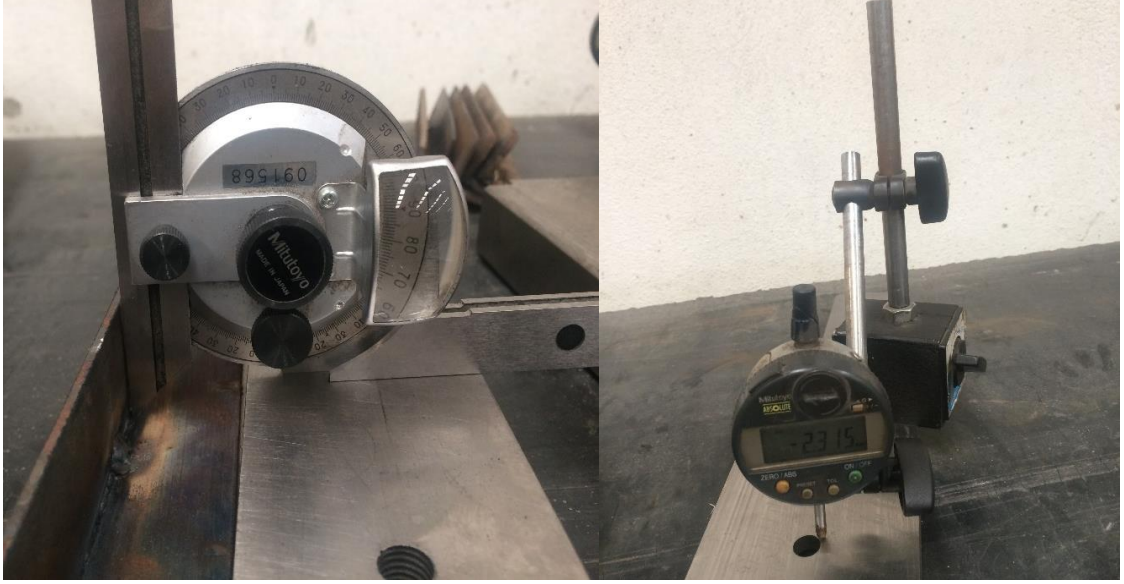
Şekil 4.1 Alın kaynağı için puntalanmış numune örnekleri.

4) Panasonic TGA1900G2 kaynak robotunda, kaynak işlemi yapılmıştır. Şekil 4.2’de Panasonic TGA1900G2 kaynak robotu gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Panasonic TGA1900G2 kaynak robotu.

5) Deneysel çalışmada meydana gelen çarpılmalar açıölçer ve derinlik komparatörü ile ölçülmüştür. Şekil 4.3'te deneysel çalışmalarda kullanılan ölçü aletleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Açı ölçer ve derinlik komparatörü ile ölçme işlemi.

6) Sıcaklık ölçümü, Eurotron firmasına ait IRtec P2000 Mk2 kızılötesi ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Şekil 4.4'te sıcaklık ölçüm cihazı verilmiştir.



Şekil 4.4 IRtec P2000 Mk2 sıcaklık ölçüm cihazı.

Alın kaynağı işleminin gerçekleştirildiği numune örnekleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında yapıdaki çarpılmaya proses parametrelerinin etkilerinin incelenebilmesi için her bir proses parametresi ile gerçekleştirilmiş deneysel sonuçlardan çarpılma miktarları belirlenmiştir. Her bir numune için kenar boyunca yapılan ölçümler sonucunda maksimum çarpılma yüksekliği değerleri belirlenmiş ve karşılaştırma kriteri olarak bu değer kullanılmıştır. Şekil 4.6'da alın kaynağı işlemi için dikkate alınan çarpılma yüksekliklerinin şematik gösterimi verilmiştir.

Tüm proses parametreleri için tespit edilen maksimum çarpılmaların dikkate alındığı sonuçların karşılaştırılması Tablo 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.5 Alın kaynağı sonrası örnek numuneler.



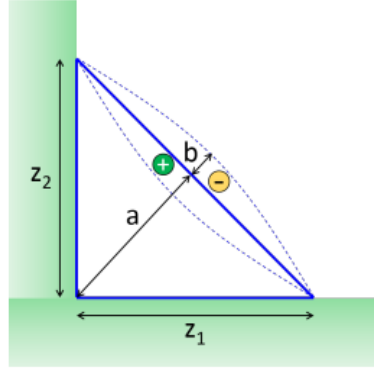
Şekil 4.6 Alın kaynağı işlemi için dikkate alınan çarpılma yüksekliklerinin şematik.

Çizelge 4.8 Alın kaynağı sonrası yapıdaki maksimum çarpılma miktarlarının karşılaştırılması.

Malzeme	Hız (mm/dk)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Z _{1,max} Distorsiyon (mm)	Z _{2,max} Distorsiyon (mm)
St37	400	2	1284	5,13	6,39
		4	1153	2,34	3,38
	500	2	1191	6,41	6,19
		4	1099	4,15	3,29
Ck45	400	2	1234	3,24	3,40
		4	1086	3,17	2,61
	500	2	1175	3,78	4,20
		4	1112	3,03	2,73

4.2.2. Köşe kaynağı prosesi

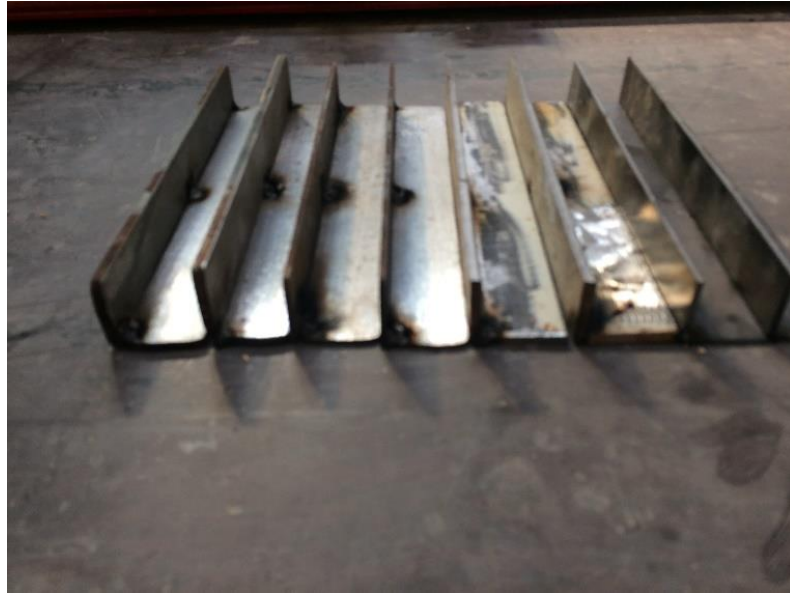
Tez çalışmasının bu adımında alın kaynağı ile aynı ölçü ve malzemelerdeki plakalar 90° açı ile köşe kaynağı işlemine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda kaynak dolgusu yaklaşık $z_1:2,5\text{mm}$, $z_2:2,5\text{mm}$ ve $b:-0,3\text{mm}$ olarak belirlenmiş ve kaynak uzunluğu, malzeme boyunca 210 mm olarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de kaynak dolgusuna ait şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 4.7 Kaynak dolgu ölçülerinin şematik gösterimi (Simufact Welding).

Köşe kaynağı işlemine ait deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen adımlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- 1) Sac malzemenin 210mm x 30mm x 2mm ve 210mm x 30mm x 4mm olacak şekilde sac plakalara kesilip hazırlanması.
- 2) Uygun ölçülerde hazırlanan sac plakalara kaynak ağzı açılması.
- 3) Kaynak ağzı açılan parçalara köşe kaynağı için parçaların iki uç kısmına ve ortasına punta atılması. Şekil 4.8’de punta atılmış örnek numuneler görülmektedir.



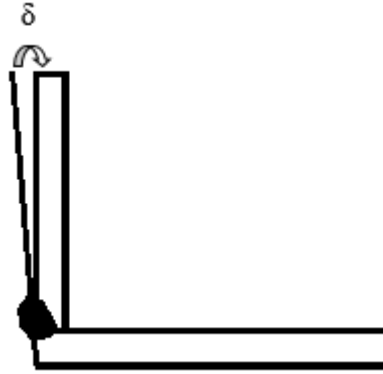
Şekil 4.8 Köşe kaynağı işlemi için punta atılma işlemi gerçekleştirilmiş numuneler.

- 4) Panasonic TGA1900G2 kaynak robotunda, kaynak işleminin yapılması.

Yapılan deneysel çalışmada meydana gelen çarpılmalar açıölçer ve derinlik komparatörü ile ölçülmüştür. 90° açıyla gazaltı ark kaynak yöntemi ile köşe kaynağı yapılan iki plaka oda sıcaklığında normal soğumaya bırakılmıştır. Yeterli soğumadan sonra açıölçer kullanılarak maksimum açısal distorsiyon tespit edilmiş ve karşılaştırma kriteri olarak bu değer kullanılmıştır. Köşe kaynağı sonrası elde edilen örnek numuneler Şekil 4.9’de, maksimum açısal distorsiyon ölçümünün şematiği Şekil 4.10’da, deneysel çalışmalar sonrasındaki maksimum açısal distorsiyonların karşılaştırması ise Tablo Y’de verilmiştir.



Şekil 4.9 Deneysel çalışmada köşe kaynak uygulama örnekleri.



Şekil 4.10 Köşe kaynağı işlemi için dikkate alınan çarpılma açılarının şematik gösterimi.

Çizelge 4.9 Köşe kaynağı sonrası yapıdaki maksimum açısal çarpılma miktarlarının karşılaştırılması.

Malzeme	Hız (mm/dk)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Maksimum Açısal Distorsiyon (°)
St37	400	2	1038	2,17
		4	1021	1,68
	500	2	994	3,24
		4	1003	2,33
Ck45	400	2	1017	1,80
		4	989	1,34
	500	2	1008	2,30
		4	997	1,94

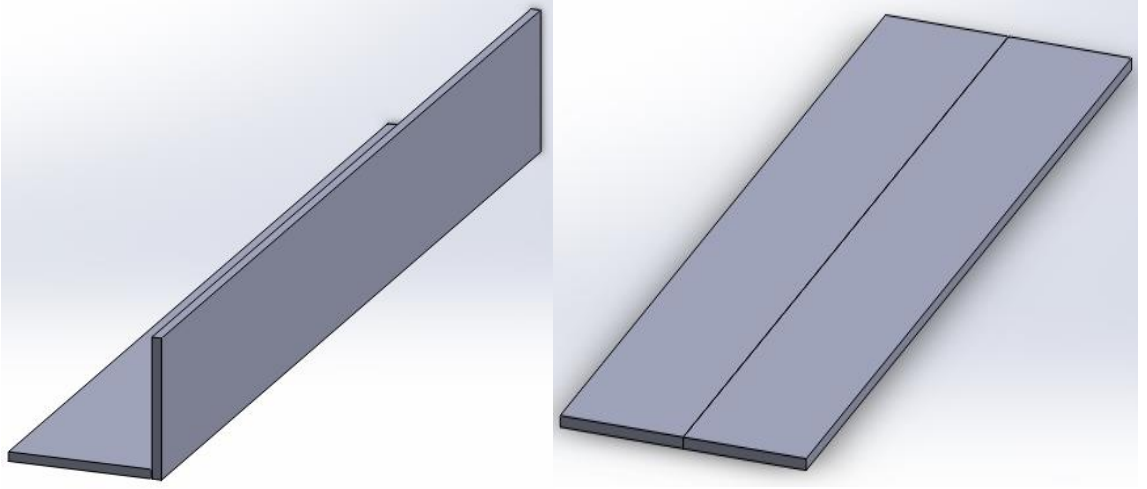
4.3. Sonlu Elemanlar Analizleri

Ekonomik ihtiyaçlar nedeni ile farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olan, farklı yapı çelikleri birbirleri ile kaynatılmaktadırlar. Farklı kimyasal ve mekanik özellikleri nedeni ile kaynak prosesinde, proses sonrası oluşacak olan çarpılma tip ve miktarı ile ilgili olarak önceden tahminde bulunmak daha da önemli hale gelmektedir. Sonlu Elemanlar Analizi ile kaynak işlemi öncesi deneme yanılma sürecini en aza indirilmiş olacak, atık malzeme miktarı azaltılmış ve en kısa sürede, en az maliyet ile kaynak işleminin yapılması sağlanmış olacaktır.

Kaynak prosesinin simülasyonu, yıllardır kaynak araştırmalarında önemli konulardan biri olmuştur. Simülasyon sonuçları, kaynak prosesindeki bazı kompleks durumların fiziksel esaslarını açıklamakta kullanılabileceği gibi aynı zamanda kaynak parametrelerinin optimizasyonu için temel olarak da kullanılabilir. Ancak, kaynak prosesinin simülasyonunu termal, mekanik ve metalürjik etkileşimler içerdiğinden zor bir süreçtir. Kaynak prosesinin simülasyonunun en önemli yönlerinden birinin metalürjik transformasyonların modele girilmesi olduğu birçok araştırmacı tarafından kabul edilmiştir.

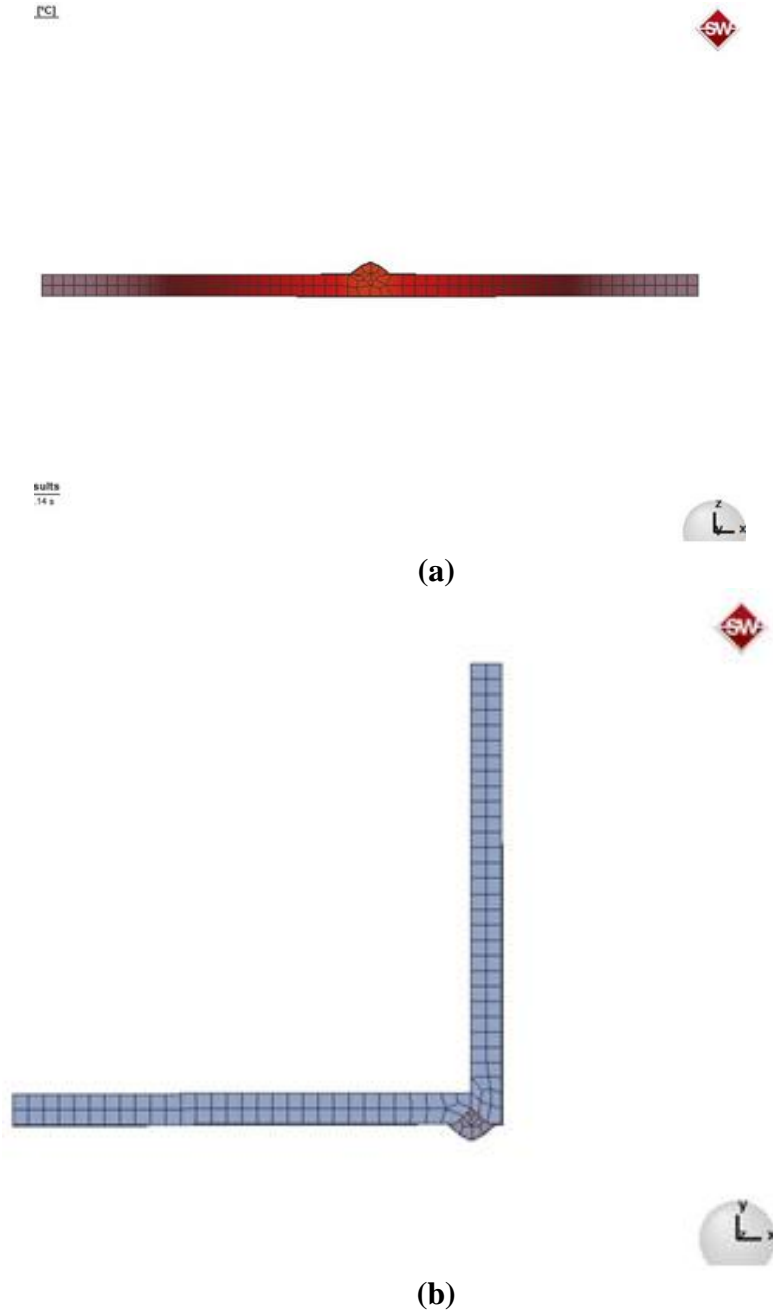
Tez çalışmasında, gazaltı kaynağının sonlu elemanlar analizi için, Simufact.Welding 5.0 paket programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi uygulamaları için gerçekleştirilen adımlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1) Solidworks paket programında model geometrilerinin oluşturulması. Şekil 4.11’de oluşturulan model geometrileri verilmiştir.



Şekil 4.11 Sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan katı model geometrileri.

2) Oluşturulan model geometrilerine MSC Apex programında sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması. Şekil 4.12’ de oluşturulan ağ yapısı örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.12 Ağ Yapısı örnekleri (a) Alın kaynağı (b) Köşe kaynağı

- 3) Malzemenin kaynak işlemi için, kaynak parametrelerinin Simufact. Welding 5.0 programına girilmesi,
- 4) Yapısal kaynak analizi için malzeme özelliklerinin Simufact. Welding 5.0 programına girilmesi.
- 5) Sonlu Elemanlar Analiz sonuçlarının yorumlanması olarak özetlenebilir.

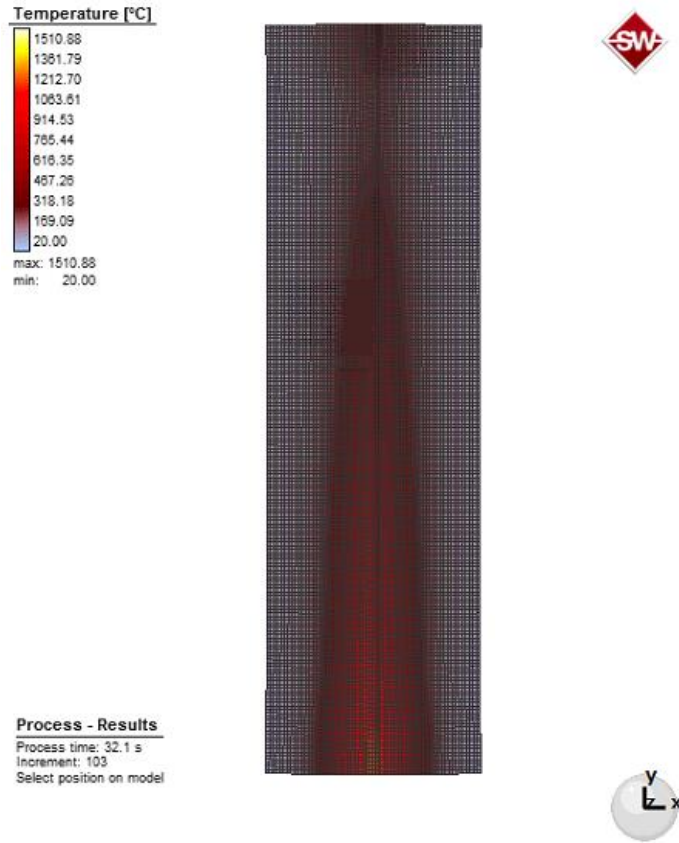
4.3.1. Alın kaynağı prosesi sonlu elemanlar analizi

St37/St37 ve Ck45/Ck45 kaynak çiftlerine 210mm x 30mm x 2mm'lik ve 210mm x 30mm x 4mm'lik iki sac plakaya 180°'lik açı ile alın kaynağı işlemi, 400mm/dk ve 500mm/dk hızlarında deneysel çalışmalara ait proses parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

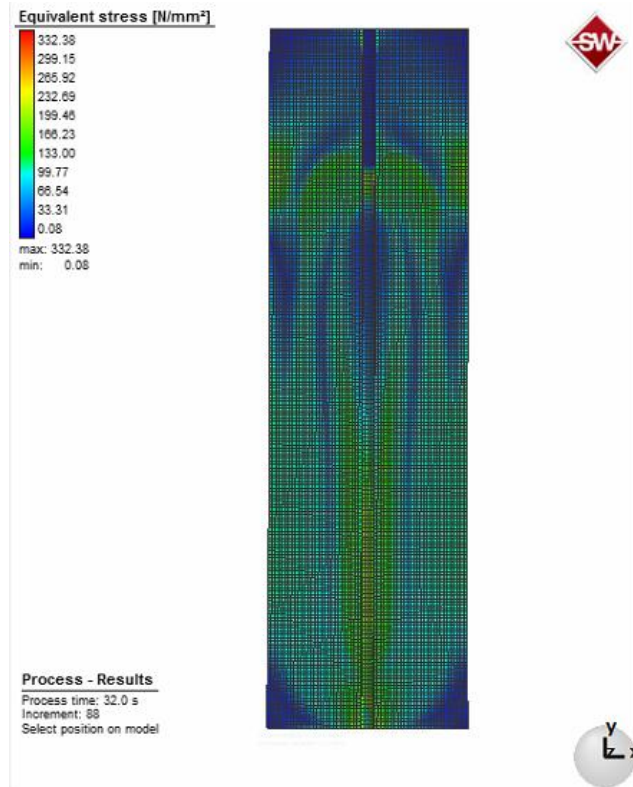
Bu kaynak çiftleri analizi için, Solidworks programında katı modelleme işlemi yapılmış, MSC Apex programında, analizde katı yapı modellemede kullanılan dört düğüm noktası içeren ağ yapısı oluşturma işlemi yapılmış ve eleman boyutu 1 mm olarak alınmıştır. Son işlem olarak Sonlu Elemanlar Analiz işlemi için Simufact.Welding 5.0 paket programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi için sonuçlar Şekil 4.13 - 4.21'de verilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri sonrasında tespit edilen maksimum çarpılma miktarları ise Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen alın kaynağı prosesinde maksimum çarpılma miktarları.

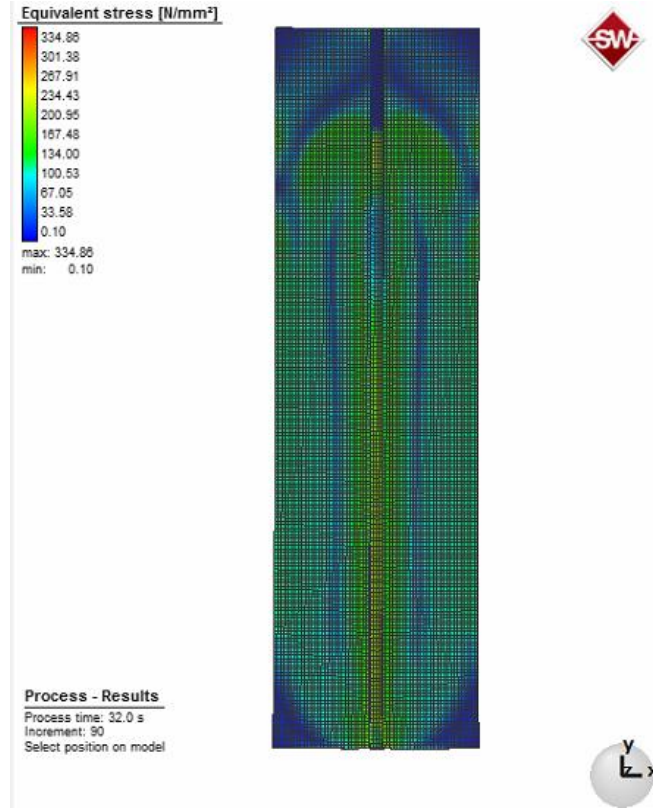
Malzeme	Hız (mm/dk)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Z ₁ Distorsiyon (mm)	Z ₂ Distorsiyon (mm)
St37	400	2	1284	4,41	4,32
		4	1153	3,09	2,28
	500	2	1191	4,15	3,82
		4	1099	4,07	4,28
Ck45	400	2	1234	3,17	5,18
		4	1086	3,24	3,14
	500	2	1175	4,39	4,11
		4	1112	1,28	1,82



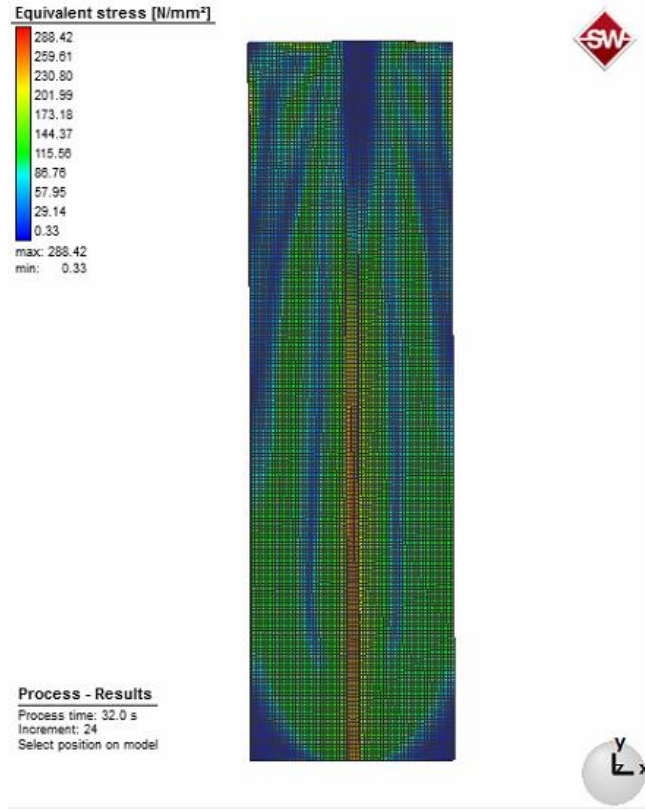
Şekil 4.13 Alın kaynağı sonlu elemanlar analizi sıcaklık dağılımı.



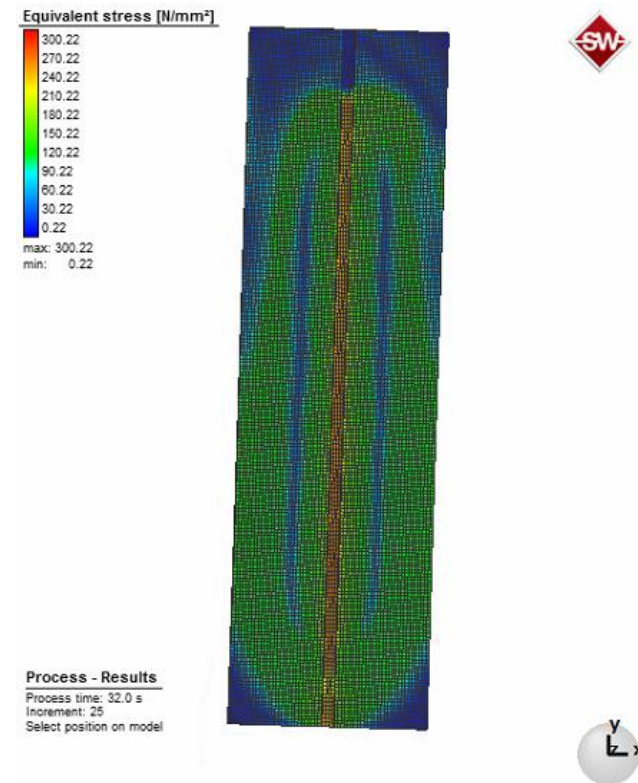
Şekil 4.14 Alın kaynağı prosesi, St37-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



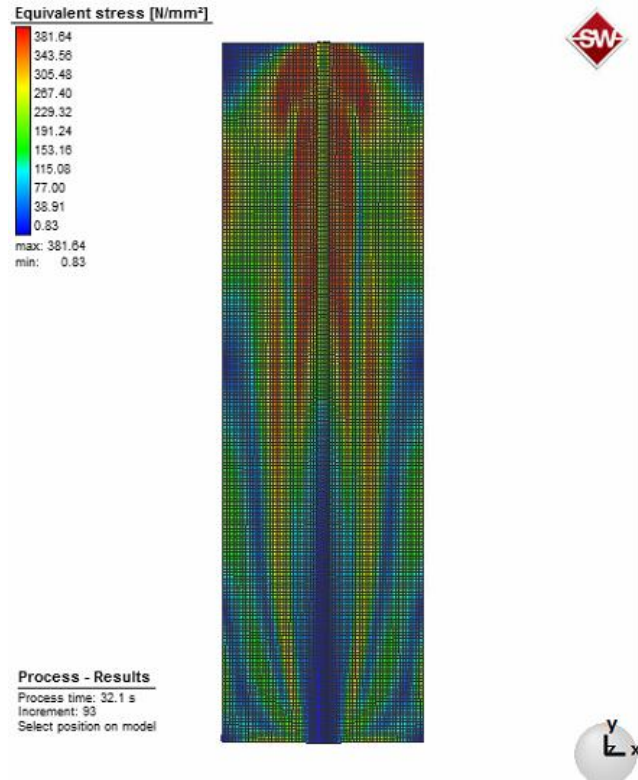
Şekil 4.15 Alın kaynağı prosesi, St37-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



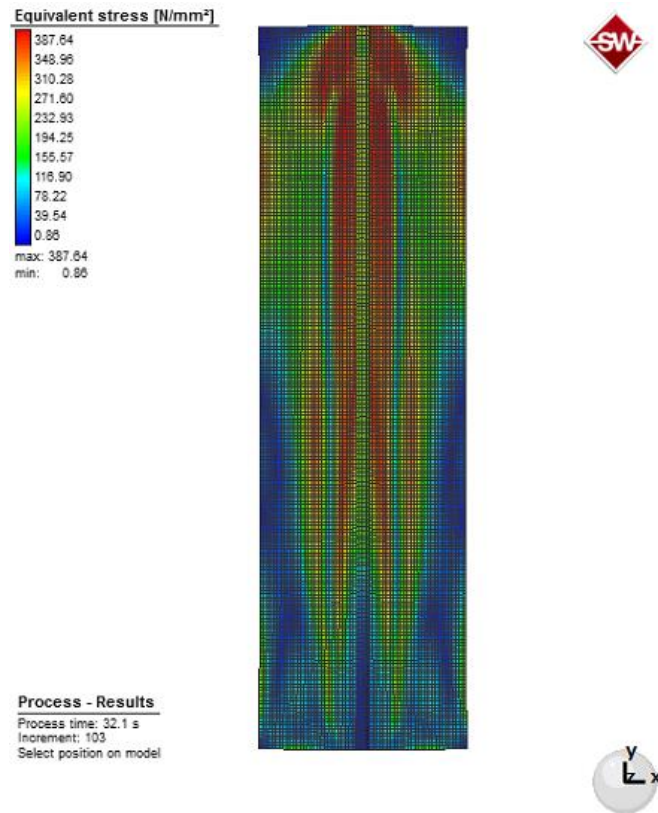
Şekil 4.16 Alın kaynağı prosesi, St37-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



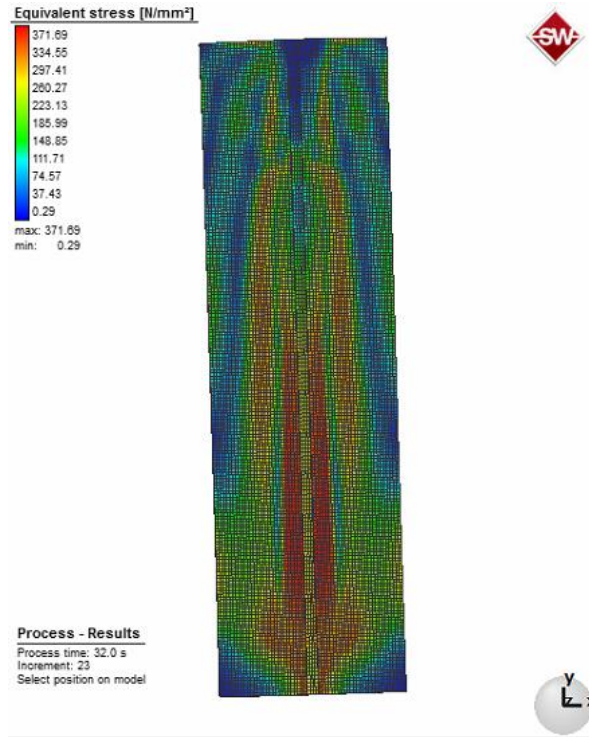
Şekil 4.17 Alın kaynağı prosesi, St37-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



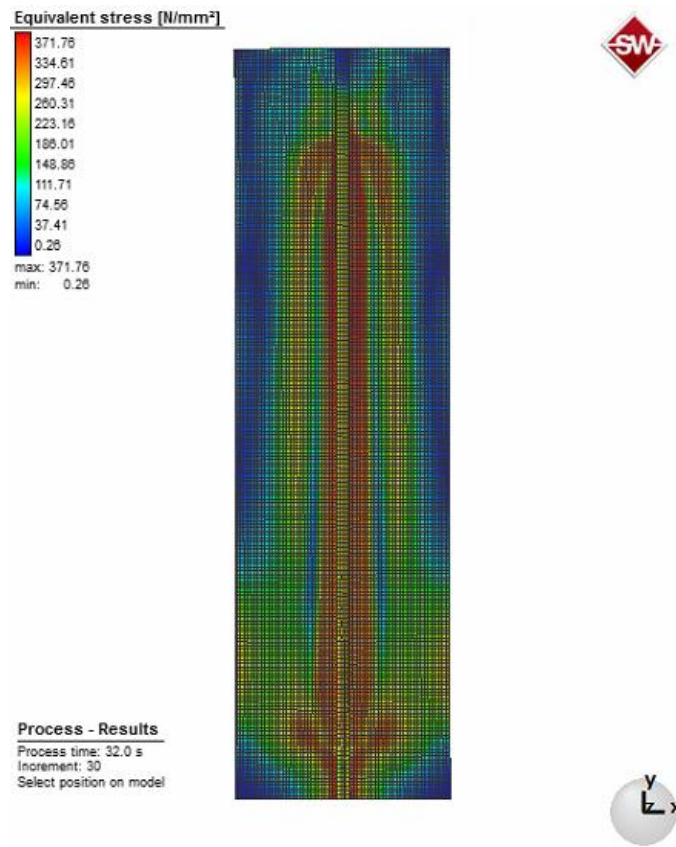
Şekil 4.18 Alın kaynağı prosesi, Ck45-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.19 Alın kaynağı prosesi, Ck45-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.20 Alın kaynağı prosesi, Ck45-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.21 Alın kaynağı prosesi, Ck45-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.

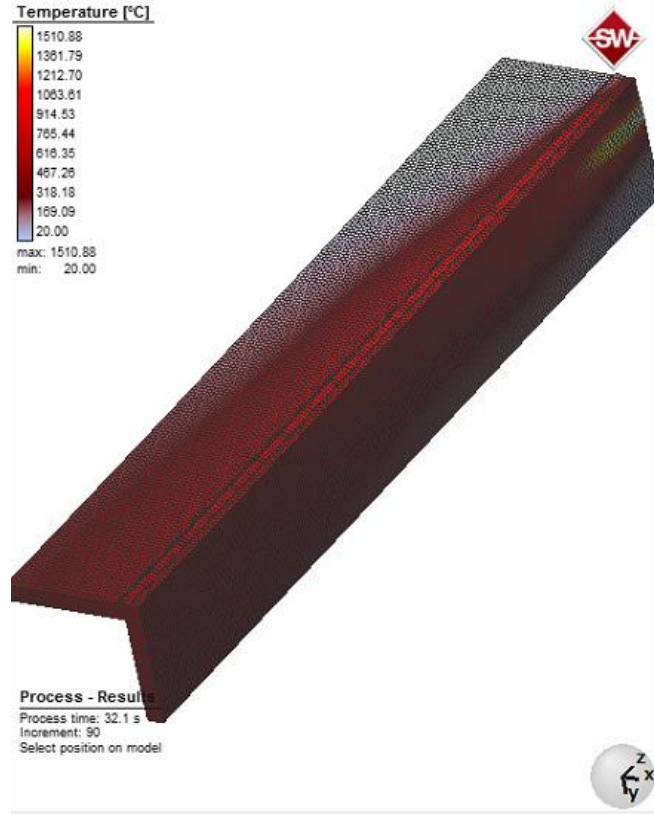
4.3.2. Köşe kaynağı prosesi sonlu elemanlar analizi

St37/St37 ve Ck45/Ck45 kaynak çiftlerinde 210mm x 30mm x 2mm'lik ve 210mm x 30mm x 4mm'lik iki sac plakaya 180°'lik açı ile köşe kaynağı işlemi, 400mm/dk ve 500mm/dk hızlarında uygulanmış ve sonlu elemanlar analizinde sonuçları analiz edilmiştir.

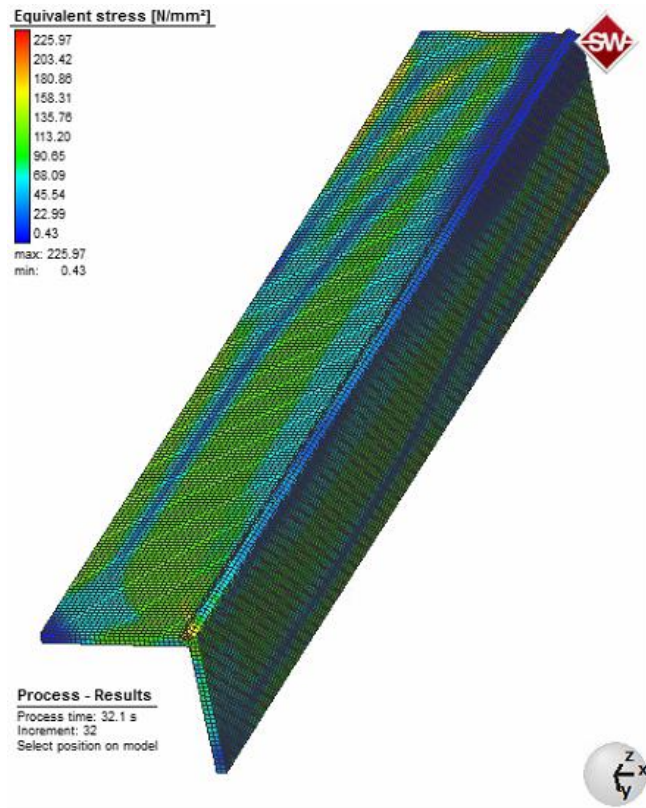
Bu kaynak çiftleri analizi için, Solidworks programında katı modelleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra MSC Apex programında mesh (eleman) boyutu 1 mm alınıp ağ yapısı oluşturulmuştur. Son işlem olarak sonlu elemanlar analizi için Simufact.Welding 5.0 paket programı kullanılmıştır. Şekil 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30'da St37/St37 ve Ck45/Ck45 kaynak çiftleri ile yapılan köşe deney sonuçları verilmiştir. Tablo 4.11'de sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen köşe kaynağı prosesinde maksimum açısal çarpılma miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Sonlu elemanlar analizleri sonrasında elde edilen köşe kaynağı prosesinde maksimum açısal çarpılma miktarları.

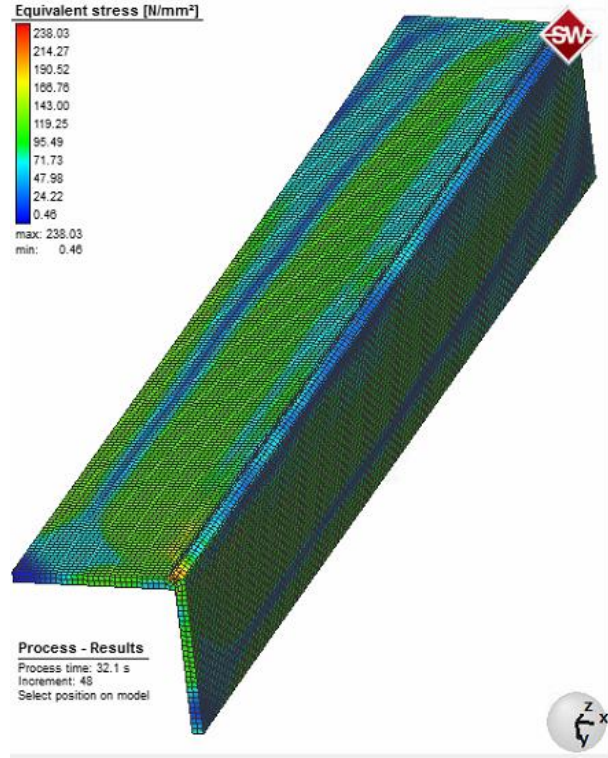
Malzeme	Hız (mm/dk)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Açısal Distorsiyon (°)
St37	400	2	1045	1,89 °
		4	1027	1,41 °
	500	2	1002	1,51 °
		4	1014	1,16 °
Ck45	400	2	1023	1,30 °
		4	997	0,82 °
	500	2	1011	1,00 °
		4	1008	0,44 °



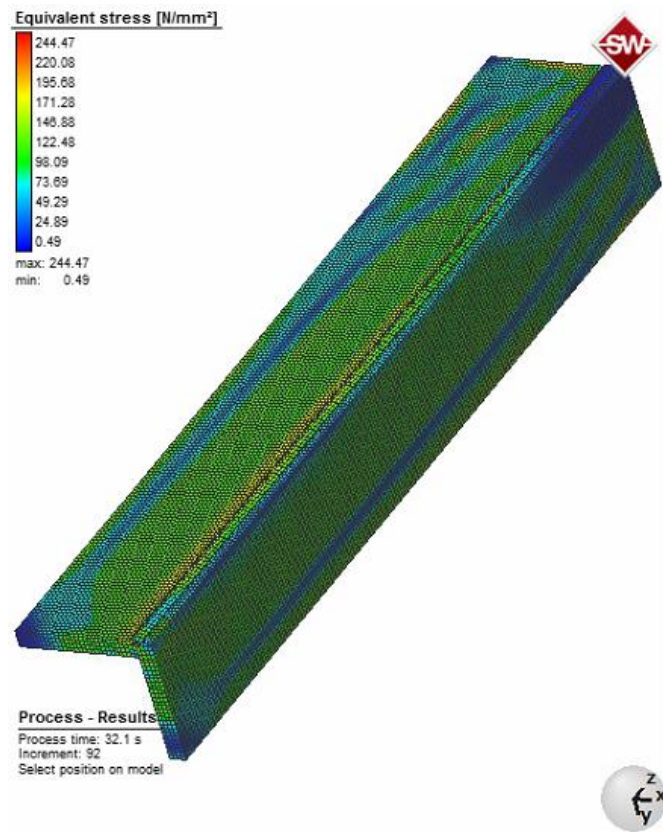
Şekil 4.22 Köşe kaynağı prosesi, sıcaklık dağılımı.



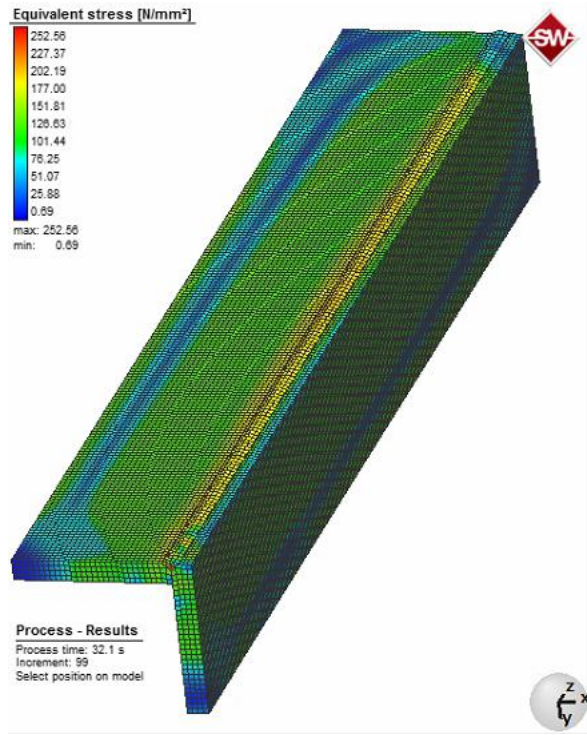
Şekil 4.23 Köşe kaynağı prosesi, St37-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



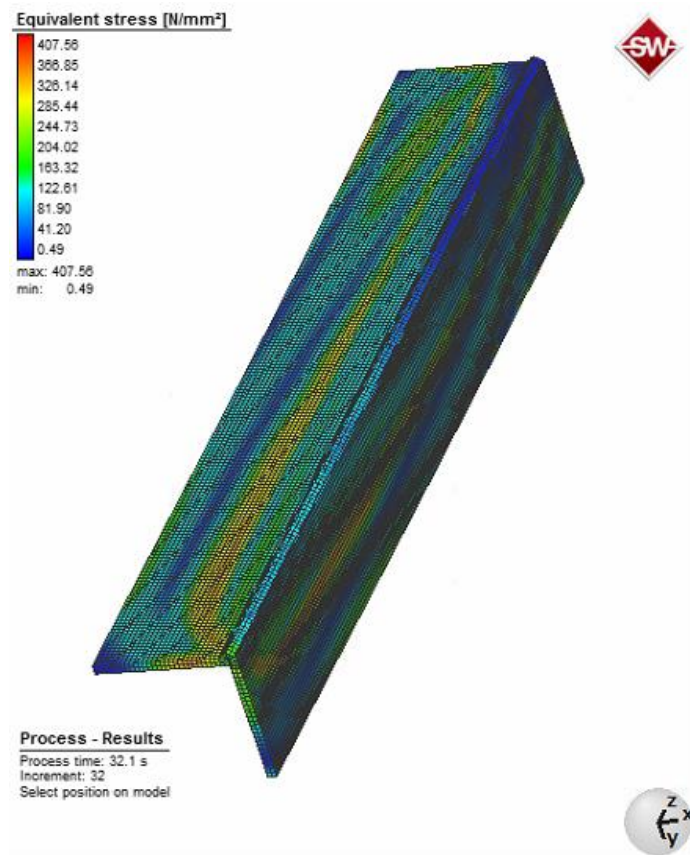
Şekil 4.24 Köşe kaynağı prosesi, St37-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



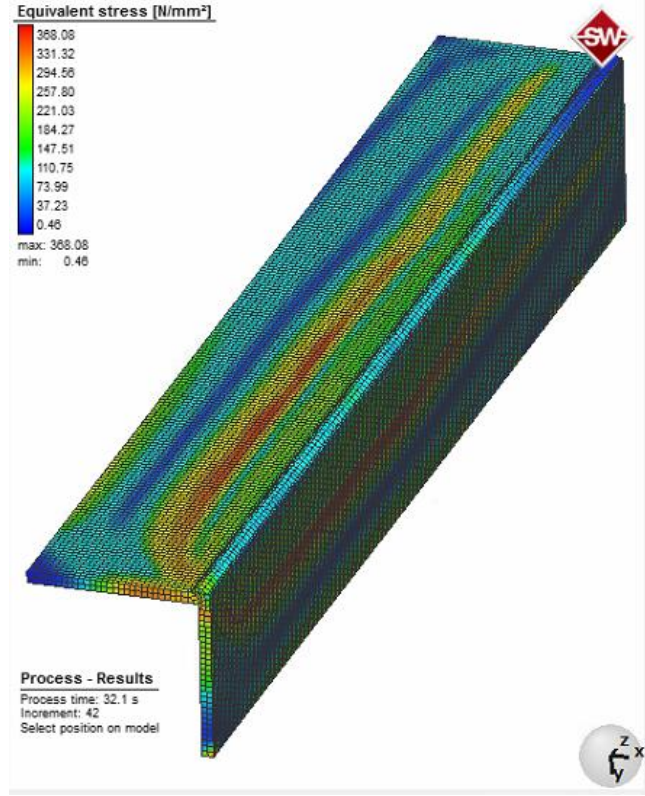
Şekil 4.25 Köşe kaynağı prosesi, St37-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



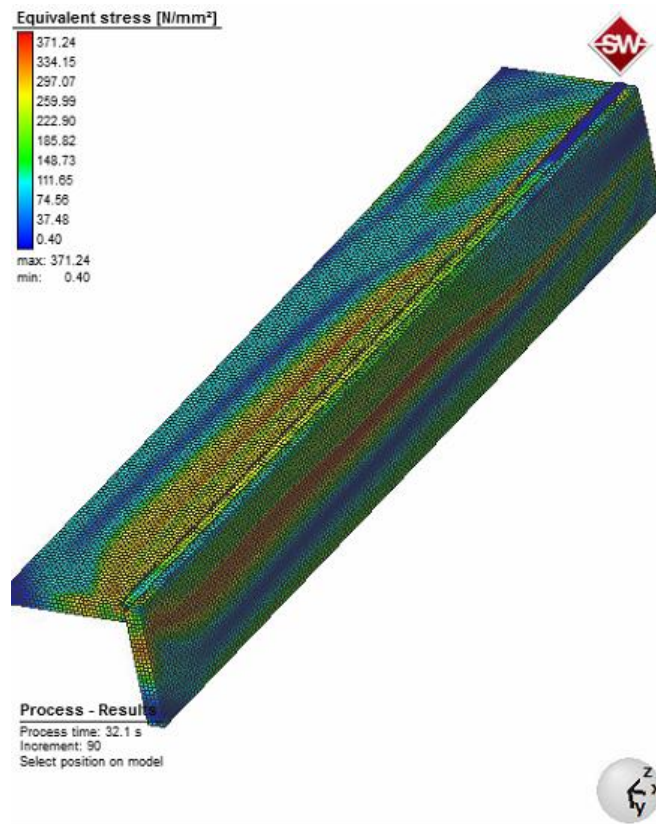
Şekil 4.26 Köşe kaynağı prosesi, St37-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



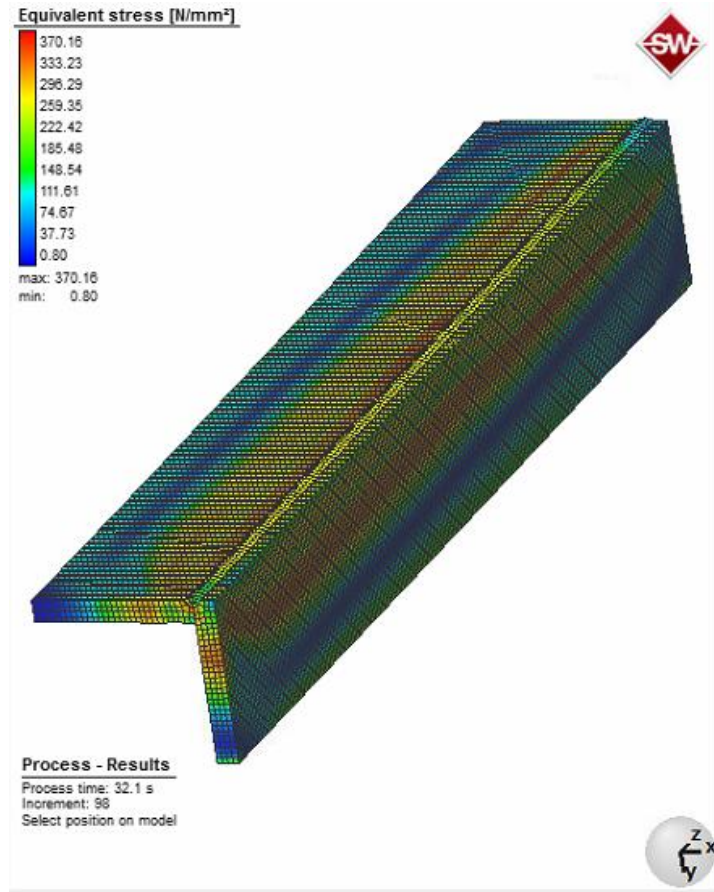
Şekil 4.27 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-2mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.28 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-2mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.29 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-4mm-400mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 4.30 Köşe kaynağı prosesi, Ck45-4mm-500mm/dk için von Mises gerilme dağılımı.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, köşe kaynaklı ve alın kaynaklı St37/St37 ve Ck45/Ck45 kaynak çiftlerine, 400mm/dk ve 500mm/dk hızlarında ve 2mm ile 4mm kalınlıklarında köşe ve alın kaynaklı imalat sonrası sıcaklıkları ve distorsiyon miktarları incelenmiştir. Kaynak yapılan malzemelerde distorsiyonun daha net görülebilmesi için numunelere bir aparat ile sabitleme yapılmamıştır. Kaynak işleminde akım 130 Amper ve Voltaj 28,4 Volt alınmıştır. Kaynak sonrası oluşan; dikiş yüksekliği, yanma olukları, sıçramalar ve dikiş kök sarkmasının yanı sıra dikiş genişliği, kökte oluşabilen yetersiz ergime bölgeleri görsel olarak detaylı incelenmiştir. Kaynak işlemlerinden sonra numuneler, hava ortamında soğumaya bırakılmıştır. Yapılan çalışmada kaynak robotu, akım şiddeti, elektrot ilerleme hızı, elektrot tel çapı ve voltaj sabit tutulmuştur.

Deneysel çalışma için yapılan ölçümlerde, St37 kaynak çiftinde oluşan distorsiyonun Ck45 kaynak çiftinde oluşan distorsiyondan daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Kaynak çifti malzeme kalınlığının, kaynak işlemi üzerine önemli etkileri olduğu hem sonlu elemanlar analizinde hem de deneysel çalışmaların sonuçlarından görülmektedir. Kalınlığın artması ile ortalama sıcaklık değerinin ve distorsiyonun miktarının düştüğü tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada, robotla kaynak uygulaması sonucunda normal şartlarda 2-3 dakikayı bulan kaynak işlem süresi 500mm/dk için 25,2 saniyeye ve 400mm/dk için 31,5 saniyeye düşmüştür ve üretim hızlarında kayda değer bir artış sağlanmıştır. Bunun yanı sıra kaynak başlangıç ve bitiş noktalarındaki birleşmenin kalitesi manuel kaynağa oranla çok daha yüksektir. Parça yanması, düzgün birleşmeme ve boşluk kalması ortadan kalkmış ayrıca kaynatılan iş parçası için ilave işçilikle düzeltilmesi operasyonlarına da gerek kalmamıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen ölçüm değerleri ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen değerler birbirine benzerlikler göstermektedir. Farklı parametrelere göre incelendiğinde her ikisinde de malzeme kalınlığı artışının çarpılmayı azalttığı, kaynak ilerleme hızı arttıkça sıcaklık değerlerinin düştüğü ve distorsiyon miktarlarının arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar irdelendiğinde malzemedeki kalınlık artışı kaynak nüfuziyetini de arttırdığından kaynak dikişi ince malzemelere göre daha kuvvetli olmaktadır. Ayrıca oluşan ısıl gerilmeler karşısındaki direnç de kalınlıkla doğru orantılı olarak arttığından çarpılma miktarı kalınlık artışı ile azalmıştır. Yine ilerleme

hızının artışı kaynak dolgusunu zayıflatmaktadır, paso sayıları aynı olduğunda yüksek hızlarda kaynak bölgesindeki malzemenin miktarının düşük olması çarpılmayı arttıran faktör olarak öne çıkmaktadır. Literatür karşılaştırılması yapıldığında benzer sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir (Oğuz, 1985; Durgutlu, 1999).

Ağ yapısı oluşturma işleminde eleman boyutu 1 mm değil de 0,5 mm olarak alındığı zaman, deneysel çalışma ile sonlu elemanlar analizi arasındaki karşılaştırmada çarpılmanın daha az olduğu tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde ele alınan kaynak çiftleri ile ilgili parametreler ve ortam koşulları ile ilgili girilen bilgiler gerçeği ne kadar yansıtırsa elde edilecek sonuçlar o kadar doğru olur.

Yapılan bu çalışma, kaynak parametrelerinin bilgisayar ortamında kolayca değiştirilmesine imkan sağladığı için kaynak mühendislerine zaman ve maliyet açısından kolaylık ve tasarruf sağlayacaktır. Kaynaklı birleştirme işlemi gerçekleştirilmeden önce sonlu elemanlar analizi kullanılarak tasarım aşamasında, malzemede oluşan distorsiyonların en az düzeyde olması sağlanabilmektedir.

Daha sonraki çalışmalarda, ele alınan parametrelerin kullanılan parça üzerindeki statik dayanımı ve yorulma etkisi incelenip malzeme üzerinde çentik darbe testleri ve tokluk ölçümleri yapılabilir. Deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçları genel olarak oldukça uyumludur.

Çizelge 5.1 Alın kaynağı prosesinin deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarının karşılaştırılması.

				Deneysel Çalışmalar		Sonlu Elemanlar Analizi	
Malz	Hız (mm/dk)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Z _{1,max} Çarpılma (mm)	Z _{2,max} Çarpılma (mm)	Z _{1,max} Çarpılma (mm)	Z _{2,max} Çarpılma (mm)
St37	400	2	1284	5,13	6,39	4,41	4,32
		4	1153	2,34	3,38	3,09	2,28
	500	2	1191	6,41	6,19	4,15	3,82
		4	1099	4,15	3,29	4,07	4,28
Ck45	400	2	1234	3,24	3,40	3,17	5,18
		4	1086	3,17	2,61	3,24	3,14
	500	2	1175	3,78	4,20	4,39	4,11
		4	1112	3,03	2,73	1,28	1,82

Çizelge 5.2 Köşe kaynağı prosesinin deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

			Deneysel Çalışmalar	Sonlu Elemanlar Analizi
Malzeme	Hız (mm/dk)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Maksimum Açısal Çarpılma (°)	Maksimum Açısal Çarpılma (°)
St37	400	2	2,17	1,89 °
		4	1,68	1,41 °
	500	2	3,24	1,51 °
		4	2,33	1,16 °
Ck45	400	2	1,80	1,30 °
		4	1,34	0,82 °
	500	2	2,30	1,00 °
		4	1,94	0,44 °

KAYNAKLAR

- Turner, M., Clough, R.W., Martin, H.C., and ToPp, L.J., "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures", *Jr. Aeronaut. ScL* 23 (9): 805-823(1956).
- American Welding Society, 'Welding Handbook Part 1: *Fundamentals of Welding*',77 (1968).
- Oğuz, B., "Karbonlu ve Alaşımli Çeliklerin Kaynağı", *Oerlikon Yayınları*, (1985).
- Ciarlet, P.G., and Lions, J.L., "Handbook of Numerical Analysis: Finite Element Methods (Part 1)", Volume 2,' *Elsevier Science, 1st edition*, 7 (1990).
- Tülbençi K., "MIG-MAG Eriyen Elektrot İle Gazaltı Kaynağı", *Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü* (1990).
- Anık, S., "Yöntemler ve Donanımlar", *Gedik Holding Yayınları*, (1991).
- Tülbençi, K., "Gazaltı Kaynağı MIG-MAG Kaynağı", *Kaynak Tekniği Anonim Şirketi Yayınları*., Gedik Eğitim Vakfı (1993).
- Anık,S., Anık, E., Vural, M. "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı", Cilt II, *Birsen Yayınevi*, İstanbul (1993).
- J. K. Hong, C. L. Tsai, P. Dong., "Assesment of Numerical Procedures for Residual Stres Analaysis of Multipass Welds", *Welding Journal*, 372 - 382 (1998).
- Durgutlu, A., Gülenç, B., Tülbençi, K., "The Effect of Welding Speed on the Microstructure and Penetration in Arc Welding", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 23(4):251-260(1999).
- Wen, S.W., Hilton P., and Farrugia, D.J.C, "Finite Element Modelling of a Submerged Arc Welding Process", *Journal of Materials Processing Technology*, 119: 203-209 (2001).
- Aydın, S, "Kaynak Formunun Gerilme Dağılımına Etkisinin İncelenmesi", (*Yüksek Lisans Tezi*), *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas (2001).
- Wu, A., Syngellakis, S., ve Mellor. B.G., "Finite Element Analysis of Residual Stresses in a Butt Weld", *The Post Graduate Conference in Engineering Materials Proceedings*, University of Southampton, (2001).
- P. Duranton, J. Deveaux, V. Robin, P. Gilles, J. M. Bergehau., "3-D Modelling of a 316L Stainless Steel Pipe", *Advances in Materials and Processing Technologies*, (2003).
- Yavuz N., Özcan R., Polat F.G., "Tozaltı Kaynak Bağlantısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal ve Mekanik Analizi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10(2):(2005).

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Dikicioğlu, A., “Kaynaklı İmalat ve Tasarım Ders Notları”,(2006).
- Weman C., and Linden G., “MIG Welding Guide”, *CRC Press*, ABD (2006).
- Tapıcı, U.Ç., “Robotla Kaynak Uygulaması İçin Fikstür Tasarımı ve Kaynak Distorsiyonların Analizi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Konstrüksiyon Anabilim Dalı*, (2006).
- Eryürek, B., “Gazaltı Ark Kaynağı Kitabı”, *Kaynak Tekniği Anonim Şirketi Yayınları*, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Malzeme ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı (2007).
- Bos, E., “Ark Esaslı Kaynak Yöntemleriyle Kaynak İşleminde Isı Tüketimi ile Malzeme/Kalınlık İlişkisinin İncelenmesi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, (2007).
- Rui, W., Sherif, R., Hisashi, S, Hidekazu., M, Zhang., “Numerical and Experimental Investigations on Welding Deformation”, *Transactions of JWRI*, 37-1 (2008).
- Özçatalbaş, Y., “Kaynaklı Birleştirmeli Konstrüksiyonların Çarpılma Eğilimlerinin Belirlenmesi İçin Deneysel Bir Yaklaşım”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1):52-28 (2008).
- Karadeniz, S., “Amperden İnvertere Kaynak Makinaları,” *Gedik Eğitim Vakfı Yayınları* GEV Yayın No:5 . (2009).
- Vural, U., “Kaynaklı İmalat Sonrası Oluşan Distorsiyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi”, (Yüksek Lisans Tezi), *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).
- Özkırmaz, E., “Kaynaklı Bağlantıların Tahribatsız Muayene Yöntemiyle Optimum Kaynak Değerlerinin Belirlenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).
- Şen, S., “Ark Kaynak İşlemi Sonucu Oluşan Kalıntı Gerilmelerin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Simülasyonu ile İncelenmesi”, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mektronik Anabilim Dalı, (2009).
- Aksoy, H.N., “Alışılmış ve İnverter Tipi MIG/MAG Kaynak Makinaları ile Yapılan Kaynak Dikişlerinin Çeşitli Yönleri ile Karşılaştırılması”, (Yüksek Lisans Tezi), *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı, İzmir (2010).
- Yıldız, A., “Kaynaklı Parçaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” (Yüksek Lisans Tezi), *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa (2011)

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Lienert, T.J., Babu S.S., Siewert T.A., Acof V. L., “Welding Fundamentals and Processes”, *ASM International Handbook Committie*, 21-22-23 (2011)
- Ersözlü, İ., “AISI 316 ve CK 45 Çeliğinin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesi, Kaynak İşleminin Simülasyonu ve Isı Analizi”, (*Doktora Tezi*) *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2011).
- Singh, R., “Applied Welding Engineering: Processes Codes and Standards”, *Elsevier Birleşik Krallık*, 1.Baskı, 153 (2012).
- Jeffus, J., “Welding Principles and Applications”, *Delmar Cengage Learning Newyork ABD* 7.Baskı, 256 (2012)
- Komaç E., “Genel Elektrik Ark Kaynakçılığı, Örtülü Elektrot Kaynağı Yöntemi, Gazaltı Ark Kaynağı Yöntemi”, TIG Kaynağı Yöntemi, *Kaynak Tekniği Anonim Şirketi Yayınları*., Gedik Eğitim Vakfı (2014).
- Yücesoy H. Y., “Kaynaklı Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Oluşan Distorsiyonların Sayısal ve Deneysel Analizi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2014).
- Eslami R.Z., “Finite Element Methods in Mechanics”, *Springer International Publishing Switzerland*, 3 (2014)
- Çelik N., “Kaynak Artık Gerilmelerinin Testler ve Analizlerle Belirlenerek Hermetik Transformatör Kazanı Simülasyon Parametrelerinin Belirlenmesi”, *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016).
- Kaynak Makinaları Genel Bilgileri, <http://www.mesanark.com/mig-mag-kayna-makinalari-hakkinda-teknik-bilgi.asp> (Ziyaret Edilme Tarihi 20.06.2017).
- FSU Weld Prof, <http://fsuweldprof.weebly.com/basics.html>, (Ziyaret Edilme Tarihi 21.06.2017).
- Doğru Kaynak Yöntemleri, <https://borsenboru.com/?page=p§ion=dogru-kaynak-yontemi>, (Ziyaret Edilme Tarihi 21.06.2017).
- The Newest Solved FEA, <http://expertfea.com/solvedFEA.html> (Ziyaret Edilme Tarihi 06.07.2017).
- Arkan, S., “Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları”, CAD/CAM Merkezi Uzmanı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ders Notları, <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/10944.pdf> (Ziyaret Edilme Tarihi 01.07.2017).
- Bathe, K.J., ‘Finite Element Procedures For Solids and Structures-Linear Analysis, *Massachusetts Institue of Technology*, , Ders Notları.

Fırat, M., “Sonlu Elemanlar Yöntemi Temel Kavramlar Ders Notları”,
https://docs.google.com/document/d/1UJ9aFeYt3J87mY_mOY2HS46RDdO5VRxxwSyCkuEvRI4/edit?hl=tr (Ziyaret Edilme Tarihi 02.07.2017).

Simufact.Welding Material/Library

Simufact.Welding Material/Tutorial

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ramazan EROL
Doğum Yeri ve Tarihi : Dargeçit, 03.05.1989

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine ve İmalat
Mühendisliği, 2012

İş Deneyimi

Stajlar : Atölye Stajı-Arslan Alüminyum, İşletme Stajı-Sançim

Çimento

Projeler : "SiAlON-TiN Kompozitlerinde %5, 10, 15, 20, 25
Oranlarında TiN İlavesi ile Optimum Mikroyapı, Mekanik, Isıl ve Kimyasal Özellikler
Üzerine Etkisi" (TUBİTAK 2209 Bursu).

Çalıştığı Kurumlar : ECM Metal, Egesan Makine, Granito Granito A.Ş

İletişim

Adres : Bahçelievler Mah. 19 Mayıs Caddesi No:40/1 Kapı No:9
Tel : 0554 722 3963
E-Posta Adresi : erol.ramazan@hotmail.com

Akademik Çalışmaları

Uluslararası Bildiri: O.Demir, R.Erol, E. Akman and N. Calis Acikbas,
“Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of SiAlON Ceramics with
TiN Additive”, 7th International Symposium on Nitrides, Book of Abstracts, 3-6 June,
Saint Malo, France, (2012).

Ulusal Makale: R. Erol, E. Esener, ‘Gaz Altı Ark Kaynağı İşleminde Proses
ParametrelerininYapıdaki Çarpılmaya Etkisinin İncelenmesi’, Bilecik Şeyh Edebali
Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt:4, Sayı:1, syf:30-35, (2017).

Tarih:...../...../.....