



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPI ÇELİĞİNDEN T PROFİLİ İMALATINDA MAG  
KAYNAĞINDA DİSTORSİYONUN SONLU ELEMANLAR  
METODUYLA ANALİZİ**

**SEDA GENÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DR.ÖĞR. ÜYESİ SERKAN APAY**

**DÜZCE, 2021**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAPI ÇELİĞİNDEN T PROFİLİ İMALATINDA MAG**  
**KAYNAĞINDA DİSTORSİYONUN SONLU ELEMANLAR**  
**METODUYLA ANALİZİ**

Seda Genç tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Volkan ONAR

Pamukkale Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi:12/01/2021

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

12 Ocak 2021

Seda GENÇ



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmaların analizinde desteklerinden dolayı Netform Mühendislik firmasından Mert AYGEN'e ve numunelerin hazırlanmasında Yiğitler Çelik A.Ş'den İlhan YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

12 Ocak 2021

Seda GENÇ

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

|                                                                                   |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                | viii |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                              | x    |
| KISALTMALAR.....                                                                  | xi   |
| SİMGELER .....                                                                    | xii  |
| ÖZET .....                                                                        | xiii |
| ABSTRACT .....                                                                    | xiv  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                     | 1    |
| 2. ÇELİK ÖZELLİKLERİ .....                                                        | 3    |
| 2.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....                                            | 4    |
| 2.1.1. Kompozisyonlarına Göre Sınıflandırma.....                                  | 4    |
| 2.1.2. Üretim Metotlarına Göre Sınıflandırma.....                                 | 5    |
| 2.1.3. Kullanım Alanlarına Göre Çelikler.....                                     | 5    |
| 2.1.4. Kimyasal Bileşimlerine Göre Çelikler.....                                  | 5    |
| 2.1.5. Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine Göre Çelikler .....                     | 6    |
| 2.1.6. Mikroyapısal Durum ve Metalografik Yapılarına Göre Çelikler .....          | 6    |
| 2.1.7. Sertleşme Yöntemlerine Göre Çelikler .....                                 | 6    |
| 2.2. ALAŞIMSIZ YAPI ÇELİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....                           | 6    |
| 2.3. ALAŞIMSIZ ÇELİKTE ELEMENTLER.....                                            | 7    |
| 2.3.1. Karbon (C).....                                                            | 7    |
| 2.3.2. Silisyum (Si) .....                                                        | 8    |
| 2.3.3. Kükürt (S) .....                                                           | 9    |
| 2.3.4. Fosfor (P).....                                                            | 9    |
| 2.3.5. Mangan(Mn).....                                                            | 10   |
| 2.3.6. Oksijen (O).....                                                           | 10   |
| 2.3.7. Azot (N) .....                                                             | 10   |
| 2.3.8. Hidrojen .....                                                             | 10   |
| 2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİĞİN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ.....                    | 11   |
| 2.4.1. Yapı Değişiklikleri.....                                                   | 11   |
| 2.4.2. Alaşım Elementlerinin Çeliklerin Kaynaklanabilirliğine Olan Etkileri. .... | 11   |
| 2.5. DEMİR – SEMENTİT DENGİ DİYAGRAMINDAKİ FAZLAR .....                           | 12   |
| 2.5.1. Ferrit ( $\alpha$ ).....                                                   | 13   |
| 2.5.2. Perlit ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ).....                             | 13   |
| 2.5.3. Östenit ( $\gamma$ ).....                                                  | 14   |
| 2.5.4. Ledeburit.....                                                             | 14   |
| 2.5.5. Dönüşmüş Ledeburit.....                                                    | 15   |
| 2.6. ÇELİKLERİN SOĞUMASI SIRASINDA OLUŞAN İÇYAPILAR .....                         | 15   |
| 3. GAZALTI KAYNAĞI BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ .....                                      | 17   |
| 3.1. MIG/MAG KAYNAĞI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ .....                                    | 17   |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3.2. KORUYUCU GAZLAR.....                                       | 19 |
| 3.2.1. Argon Gazı .....                                         | 21 |
| 3.2.2. Helyum Gazı .....                                        | 22 |
| 3.2.3. Karbondioksit Gazı.....                                  | 22 |
| 3.2.4. Oksijen (O <sub>2</sub> ) .....                          | 23 |
| 3.2.5. Hidrojen (H <sub>2</sub> ) .....                         | 23 |
| 3.2.6. Azot (N <sub>2</sub> ).....                              | 23 |
| 3.2.7. Argon-Helyum-Karbondioksit veya Oksijen Karışımları..... | 24 |
| 3.2.8. Argon-Oksijen-Karbondioksit Karışımları .....            | 24 |
| 3.3. MIG-MAG YÖNTEMİNİN KARAKTERİSTİKLERİ .....                 | 24 |
| 3.3.1. Kaynak Akımı.....                                        | 24 |
| 3.3.2. Ark Gerilimi .....                                       | 24 |
| 3.3.3. Serbest Elektrot Boyu .....                              | 25 |
| 3.3.4. Kaynak Hızı .....                                        | 25 |
| 3.3.5. Koruyucu Gaz Akışı.....                                  | 25 |
| 3.3.6. Torç Hareketleri.....                                    | 25 |
| 3.3.7. Kaynak Ağızı .....                                       | 27 |
| 3.4. GAZALTI KAYNAĞININ AVANTAJLARI .....                       | 28 |
| 3.5. GAZALTI KAYNAĞININ DEZAVANTAJLARI .....                    | 29 |
| 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZ.....                       | 30 |
| 4.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN UYGULAMA ADIMLARI .....         | 34 |
| 4.1.1. Pre – Processing (Ön İşlemci) .....                      | 34 |
| 4.1.2. Solution (Çözüm).....                                    | 36 |
| 4.1.3. Post Processing ( Son İşlemci ) .....                    | 37 |
| 4.2. SONLU ELEMAN YÖNTEMİNDE ELEMENT TÜRLERİ.....               | 37 |
| 4.2.1. Tek Boyutlu Elementler.....                              | 37 |
| 4.2.2. İki Boyutlu Elementler .....                             | 38 |
| 4.2.3. Üç Boyutlu Elementler.....                               | 38 |
| 4.3. ISI TRANSFERİ ANALİZİ .....                                | 39 |
| 4.3.1. Isıl Analizler.....                                      | 39 |
| 4.4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN AVANTAJI.....                   | 41 |
| 4.5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN DEZAVANTAJLARI .....            | 42 |
| 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                                   | 43 |
| 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                    | 51 |
| 6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER .....                     | 51 |
| 6.2. DENEYLERDE KULLANILAN METOT .....                          | 52 |
| 6.2.1. Deneyin Yapılışı.....                                    | 52 |
| 6.2.1.1. Deney Parametreleri.....                               | 53 |
| 6.2.1.2. Isı Girdisi Hesaplamaları .....                        | 54 |
| 6.2.1.3. Metalografik İncelemeler.....                          | 54 |
| 6.2.2. Sayısal Çözüm.....                                       | 54 |
| 6.2.2.1. Ön işlem .....                                         | 55 |
| 6.2.2.2. Model Geometrisinin Oluşturulması .....                | 56 |
| 6.2.2.3. Modelin Elemanlara Bölünmesi .....                     | 56 |
| 6.2.2.4. Yüklerin Uygulanması ve Çözüm .....                    | 57 |
| 6.2.2.5. Çözümlerin Değerlendirilmesi (Son İşlem) .....         | 57 |

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                               | <b>58</b> |
| <b>7.1. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI .....</b>                  | <b>58</b> |
| <b>7.1.1. Kaynaklı Yapıların Mikroyapı İnceleme Sonuçları.....</b> | <b>58</b> |
| <b>7.2. SONLU ELEMENLAR ANALİZ SONUÇLARI.....</b>                  | <b>63</b> |
| <b>8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                | <b>70</b> |
| <b>9. KAYNAKLAR .....</b>                                          | <b>72</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                              | <b>78</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                             | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Şekil 2.1. Karbon elementi. ....                                                                            | 8                      |
| Şekil 2.2. Kükürt elementi. ....                                                                            | 9                      |
| Şekil 2.3. Fosfor elementi. ....                                                                            | 9                      |
| Şekil 2.4. Mangan elementi. ....                                                                            | 10                     |
| Şekil 2.5. Demir (Fe) - Sementit ( $Fe_3C$ ) denge diyagramı. ....                                          | 12                     |
| Şekil 2.6. Ferritin mikroskop altındaki görüntüsü. ....                                                     | 13                     |
| Şekil 2.7. Perlit(% 0.45 C) mikroskop altındaki görüntüsü. ....                                             | 14                     |
| Şekil 2.8. Östenitin mikroskop altındaki görüntüsü. ....                                                    | 14                     |
| Şekil 2.9. Fe- $Fe_3C$ denge diyagramı. ....                                                                | 15                     |
| Şekil 3.1. MIG/MAG kaynağı için gerekli ekipmanlar. ....                                                    | 18                     |
| Şekil 3.2. MIG/MAG kaynak donanımı. ....                                                                    | 19                     |
| Şekil 3.3. Nüfuziyet biçimi. ....                                                                           | 21                     |
| Şekil 3.4. $CO_2$ Koruması oluşan reaksiyonlar. ....                                                        | 23                     |
| Şekil 3.5. Argon, Oksijen ve Karbondioksit gazlarının kaynak dikişine etkisi. ....                          | 24                     |
| Şekil 3.6. MIG-MAG kaynağında dik pozisyonda torcun hareketleri. ....                                       | 26                     |
| Şekil 3.7. MIG-MAG kaynağında yatay pozisyonda torcun hareketleri. ....                                     | 26                     |
| Şekil 3.8. Kaynak ağzı seçimi. ....                                                                         | 28                     |
| Şekil 4.1. Kaynakta ısı transfer mekanizmaları. ....                                                        | 30                     |
| Şekil 4.2. Yapının elemanlara ayrılması. ....                                                               | 33                     |
| Şekil 4.3. Geometrik model, Sonlu eleman modeli ve sonuçların gösterildiği nodal sonuçlar. ....             | 34                     |
| Şekil 4.4. Proses simülasyon aşamaları. ....                                                                | 36                     |
| Şekil 4.5. Sayısal simülasyon, girdiler ve çıktılar şematik gösterimi. ....                                 | 36                     |
| Şekil 4.6. Tek boyutlu problem element tipi. ....                                                           | 37                     |
| Şekil 4.7. İki boyutlu problem element tipi. ....                                                           | 38                     |
| Şekil 4.8. Üç boyutlu problem element tipi. ....                                                            | 38                     |
| Şekil 6.1. T profillerin kaynatılması işlemi. ....                                                          | 53                     |
| Şekil 6.2. Sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan katı model geometrileri. ....                        | 56                     |
| Şekil 6.3. Ağ yapısı T profil kaynağı. ....                                                                 | 56                     |
| Şekil 7.1. Ana metalin mikroyapı görüntüsü. ....                                                            | 58                     |
| Şekil 7.2. 1 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 59                     |
| Şekil 7.3. 2 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 59                     |
| Şekil 7.4. 3 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 60                     |
| Şekil 7.5. 4 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 60                     |
| Şekil 7.6. 5 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 61                     |
| Şekil 7.7. 6 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 61                     |
| Şekil 7.8. 7 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 62                     |
| Şekil 7.9. 8 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                        | 62                     |
| Şekil 7.10. 9 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri. ....                                       | 63                     |
| Şekil 7.11. 1 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısız çarpılma. .... | 64                     |
| Şekil 7.12. 2 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısız çarpılma. .... | 65                     |
| Şekil 7.13. Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısız çarpılma. ....   | 65                     |



|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7.14. 4 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma..... | 66 |
| Şekil 7.15. 5 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma..... | 66 |
| Şekil 7.16. 6 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma..... | 67 |
| Şekil 7.17. 7 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma..... | 67 |
| Şekil 7.18. 8 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma..... | 68 |
| Şekil 7.19. 9 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma..... | 68 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

|                                                                              | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Çizelge 2.1. Alaşımsız çeliklerin sınır değerleri.....                       | 7                      |
| Çizelge 3.1. GMAW’de kullanılan farklı koruma gazları. ....                  | 20                     |
| Çizelge 6.1. S355J2+N Yapısal çelik kimyasal bileşim (% Ağırlık).....        | 52                     |
| Çizelge 6.2. S355J2+N Yapısal çelik mekanik özellikleri. ....                | 52                     |
| Çizelge 6.3. Deneylerde kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimleri. .... | 52                     |
| Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri. ....                | 53                     |
| Çizelge 7.1. Deney tasarımı ve çarpılma. ....                                | 64                     |



## KISALTMALAR

|      |                                |
|------|--------------------------------|
| DCEP | Doğru Akım Elektrot Pozitif    |
| FEA  | Sonlu Elemanlar Analizi        |
| GMAW | Gazaltı Kaynağı                |
| ITAB | Isı Tesiri Altında Kalan Bölge |
| MAG  | Metal Aktif Gaz                |
| MIG  | Metal İnert Gaz                |
| TIG  | Tungsten İnert Gaz             |



## SİMGELER

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| Al                | Alüminyum            |
| Ar                | Argon                |
| As                | Yüzeyin alanı        |
| C                 | Karbon               |
| Ca                | Kalsiyum             |
| CaO               | Kalsiyum oksit       |
| °C                | Santigrat            |
| Cr                | Krom                 |
| Co                | Kobalt               |
| Cu                | Bakır                |
| CO <sub>2</sub>   | Karbondiyoksit       |
| Fe                | Demir                |
| Fe <sub>3</sub> C | Östenit fazı         |
| H <sub>2</sub>    | Hidrojen             |
| He                | Helyum               |
| Mn                | Mangan               |
| Mo                | Molibden             |
| N/mm <sup>2</sup> | Newton milimetrekare |
| N <sub>2</sub>    | Azot                 |
| Nb                | Niobyum              |
| Ni                | Nikel                |
| NO <sub>2</sub>   | Azot dioksit         |
| O <sub>2</sub>    | Oksijen              |
| P                 | Fosfor               |
| Si                | Silisyum             |
| SiO <sub>2</sub>  | Silisyum oksit       |
| Ti                | Titanyum             |
| Ts                | Yüzey sıcaklığı      |
| T <sub>ü</sub>    | Geçiş sıcaklığı      |
| T <sub>∞</sub>    | Akışkanın sıcaklığı  |
| V                 | Vanadyum             |
| W                 | Tungsten             |
| α                 | Ferrit fazı          |
| γ                 | Östenit fazı         |

## ÖZET

### YAPI ÇELİĞİNDEN T PROFİLİ İMALATINDA MAG KAYNAĞINDA DİSTORSİYONUN SONLU ELEMANLAR METODUYLA ANALİZİ

Seda GENÇ

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY

Ocak 2021, 77 sayfa

Kaynak teknolojisinde ortaya çıkan gelişmeler, kaynaklı birleştirmenin sanayi sektöründe artarak yaygınlaşmasına neden olmuştur. Kaynaklı birleştirmelerde termal analizlerinin yapılarak modellenmesi ve davranışlarının belirlenmesi mühendislik tasarım sürecinde önemli bir aşamadır. Genel yapı ve yapılan imalat özellikleri hakkında fikir sahibi olabilmek, araştırmak ve geliştirmek için sonlu elemanlar yöntemi en uygun çözümdür. Çalışmada kullanılan malzeme S355J2+N olup, yüksek mukavemetli yapısal çeliktir. Genel olarak mühendislik ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. Otoyol köprüleri, kaldırma ekipmanları ve liman ekipmanları gibi birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. S355J2+N malzemesi ile kaynak işleminin kaynak bölgesine uyguladığı ısı çevrim, bu bölgenin içyapısını değiştirmekte ve mikroyapısını etkilemektedir. Bu sorunları önceden belirlemek önemlidir. Önceden belirleme deneyerek yanılma sürecini de kapsadığından yüksek maliyet ve uygulama zamanı gerektirir. Bu sebeple sonlu elemanlar yöntemi üreticilere fayda sağlamakta kaynak işlemi sırasında oluşabilecek problemlerin önüne geçmede ek önlemler alınmasını öngörebilmektedir. Bu çalışmada, günümüzde yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri olan gazaltı kaynak işleminin çelik yapı imalatında kullanılan T profilinin imalatında kullanılması ve termal analizlerin sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılarak simülasyonunu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, alaşımsız yapı çeliği olan S355J2+N malzemesinin özelliklerinden ve çeliklerin soğuma sırasındaki oluşan içyapılarından hakkında bilgi verilmiştir. Kullanılan gazaltı kaynak yöntemi ele alınarak avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle ısı transferi analizi tanıtılmış ve daha önce yapılan literatür çalışmaları incelenerek kaynaklı yapılardaki çarpılmaların analizi üzerine yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Proses parametrelerinin kaynak sonrası çarpılmaya etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde deneysel çalışma sonuçları ile sonlu elemanlar yönteminin sonuçlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Distorsiyon, MAG kaynağı, Sonlu elemanlar yöntemi, S355J2+N.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF DISTORSION IN MAG WELDING BY FINITE ELEMENT METHOD IN T PROFILE MANUFACTURING FROM STRUCTURAL STEEL**

Seda GENÇ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing  
Engineer

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Serkan APAY

January 2021, 77 pages

The developments in welding technology have caused the welded joining to become widespread in the industrial sector. Modelling and determining the behaviour of welded joints by making thermal analysis is an important step in the engineering design process. Finite element method is the most suitable solution to have an idea about the general structure and manufacturing properties. The material used in the study is S355J2+N and it is high strength structural steel. It is widely used in engineering and construction industries in general. It appears in many areas such as highway bridges, lifting equipment and port equipment. The thermal cycle applied by the welding process with the material S355J2+N changes the internal structure of this region and affects its microstructure. It is important to identify these problems in advance. It requires high cost and application time since it includes the process of error by trying to determine beforehand. For this reason, the finite element method provides benefits to the producers and it can foresee additional measures to prevent problems that may arise during the welding process. In this study, the use of the arc welding process, which is one of the joining methods widely used today, in the manufacture of the T profile used in steel structure manufacturing and the simulation of thermal analyzes using finite element analysis (FEA). In the study, information was given about the properties of S355J2+N material, unalloyed structural steel, and the internal structures of steels formed during cooling. The advantages and disadvantages of the gas welding method used are discussed. Heat transfer analysis by finite element method was introduced and previous literature studies were examined and studies on the analysis of multiplications in welded structures were discussed. Data obtained from Finite Element Analysis and experimental studies were compared. The effect of process parameters on a product after welding was studied. When the results were examined, it was determined that the results of the experimental study and the results of the finite element method were close to each other.

**Keywords:** Distortion, Finite element method, MAG welding, S355J2+N.

# 1. GİRİŞ

Kaynak işlemi, günümüzde imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden birisidir. Bu sebeple, kaynaklı parçaların emniyetinin sağlanması, birleştirmelerin kullanıldığı tüm yapının güvenilirliği açısından, kaynaklarda ve ana metallerde malzeme bileşimi ve sıcaklık değişimleri; malzeme özelliklerine, kalıntı gerilmelere, kaynaklı imalatlarda boyut ve şekil doğruluğu üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Isıl genleşmeler sonucunda kalıntı gerilmeler oluşabilir ve kaynak metalinde makro ve mikro yapıyı etkileyebilir. Bu sonuçlar kaynak kalitesini bozar ve kaynak çeliklerinin kullanıldığı yerlerde üretim ömrünü etkiler. Bu sebeplerden dolayı kaynak deformasyonunun tahmini ve kontrolü kritik öneme sahiptir.

Sanayileşmiş ülkelerde sık görülen yarı otomatik kaynak yöntemi olan gazaltı ark kaynağı son dönemlerde Türkiye endüstrisinde de hızla çoğalmaktadır. 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 [1].

Ergitmeli kaynak yöntemlerindeki çalışmalar kaynağın metalürjik özellikleri, ark ısısının etkisiyle gelişen kalıntı gerilmeler, ana metaldeki distorsiyon, fiziksel ve kaynak havuzunun korunma ve oluşma ile arkın davranışı gibi önemli yönlerini kapsar. Bu aktivitelerin tamamı kaynak yapısı ve kaynağın bütünlüğünü iyileştirmedeki amaçlardır. Mikro yapısal değişimler ve bir kaynak yapısındaki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerin oluşumu kaynak yöntemlerinde termal dönüşümlerin temelini oluşturur. Termal dönüşümler ITAB'ın geometrisi ve kaynak nüfuziyetindeki bilgileri sağlar. Bununla birlikte termal dönüşümlerin kontrolü kaliteli bir kaynağın kritiğidir [2].

Öte yandan, giderek artan teknolojiyle birlikte bilgisayar programlarının çoğu,

mühendislik ve matematik modellerde sıklıkla Sonlu Elemanlar Analizi kullanılır. Karmaşık geometriye sahip şekillerin parçalanarak daha basit geometri şekillerinin toplamıyla değiştirilmesidir. Karmaşık birçok mühendislik problemlerine yaklaşık çözümler sunmak için kullanılan nümerik analiz yazılımıdır.

Modelleme işleminde, simülasyon sonuçları ile deneysel olarak bulunan sonuçlar karşılaştırmaktadır. Açıkçası; prototip üretimine geçilmeden önce 3 boyutlu katı modellerin bilgisayar ortamında simülasyonu sağlanarak test edilmesine; uygulanan kaynak parametreleri, kaynak metodu, malzeme özellikleri, artık gerilmeler ve distorsiyonların dikkate alınmasıyla olası problemlere karşı geliştirme yapılarak faydalı bir yöntem olarak kullanılabilir [3]–[6].

Bu çalışmada; Gazaltı MAG kaynak yöntemiyle birleştirilen numunelerin sonlu elemanlar metoduyla ısı transferi analizleri yapılarak modellenmesi amaçlanmıştır. Bunun için gazaltı kaynak yöntemi ile yüksek mukavemetli yapısal çelik olan S355J2+N malzemesi T pozisyonunda kaynatılarak, ergiyik bölgesi ve ana malzeme sıcaklıkları değerleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. ITAB bölgesindeki sıcaklık dağılımı ve yapısal analizleri sonlu elemanlar yöntemine dayalı Simufact Welding programında 3 boyutlu ve deneysel şartlara uygun olarak yapılmıştır. Daha sonra deneysel sonuçlarla, programdan elde edilen değerler karşılaştırılarak tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur.



## 2. ÇELİK ÖZELLİKLERİ

Çelik, özelliklerinden dolayı dünyadaki en önemli mühendislik ve yapı malzemesidir. Demir elementi ile genellikle değişen oranlardaki karbon miktarının bileşiminden meydana gelmektedir. Çeliğin sınıflandırılmasında çelik alaşımındaki karbon miktarı önemli bir etkidir. Çelik alaşımındaki karbon miktarları çeliğin sınıflandırılmasında etkin rol oynar.

Çeliğin mekanik özellikleri tahribatlı muayene yöntemlerinden çekme deneyiyle belirlenir. Mekanik özelliklerine bakılacak çelikten numune alınır, çubuk şekline getirilen numune giderek artan çekme kuvvetine maruz kalır. Bu sırada artan kuvvetin etkisiyle numune boy olarak uzamaya, en kesiti ise giderek incelmeye başlar. Bu süreç numune kopana kadar devam eder. Çekme deneyi sürecinde numunenin boyundaki gerçekleşen değişim ve gerilme değeri ölçülür, grafiğe aktarılır. Çubuğa uygulanan kuvvet devam ettikçe şekil değiştirme devam eder, elastiklik sınırına ulaşmaya kadar şekil değiştirmeler elastiktir; elastik sınırında etki eden kuvvet kaldırılırsa çubuk eski şekline döner. Elastiklik sınırı aşıldıktan sonra çubukta deformeler başlar artık plastik şekil değişimleri meydana gelmeye başlamıştır. Elastik bölgenin dışında kuvvet artırılarak devam ederse numune akma sınırına ulaşır. Akma sınırı sabit gerilim altındaki numunede meydana gelen şekil değişimindeki artış olarak adlandırılır.

Gerilme değeri maksimum noktaya vardıktan sonra numune boyun verme sınırına ulaşır, artık numune kopma eğilimi göstermeye başlar, bu nedenle de mühendislik gerilmesinde azalma meydana gelir. Akma gerilimi ve numunedeki uzama miktarı numunenin mekanik özellikleri hakkında bilgi verir. Çeliğin üstün özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Çeliğin homojen ve izotop olması doğrultu boyunca mekanik özelliklerinde değişiklik göstermez.
- Elastiklik modülü çelikte diğer malzemelere göre daha yüksektir. Bu nedenle mukavemeti yüksek olan çelik yapıda kullanılan hacmi küçüktür. Bu çelik yapılar diğer malzemelere göre daha hafiftir.
- Çeliğin çekme dayanımı, burkulma olmadan basınç dayanımına eşittir. Sünek bir

malzemedir.

- Şekil değişimleri fazladır, plastik hesaba uygundur, doğal afetlerde zemine oturmaları için maksimum çözüm üretir.
- Çelik taşıyıcı malzemeler, çoğunlukta atölyelerde kolay hazırlanır.
- Şantiyede sadece montaj işleri yapılır. Bu nedenle imalat süresi kısadır, hava koşullarında bağımsızlık gösterir.
- Çelik yapılarda bağlantı ekipmanlarının ve takviye malzemelerinin değişimi kolaydır. Çelik yapılar sökülüp tekrardan montajda kullanılabilir.

Çeliğin olumsuz özellikleri aşağıdaki gibidir.

- Yanıcı bir malzeme değildir, iyi bir iletken olduğu için çok yüksek sıcaklıkta mukavemetinde hızlı bir şekilde düşüş meydana gelir.
- Çok yüksek sıcaklıklarda kullanılmaz hale gelir.
- Paslanmaya karşı dayanımı düşüktür devamlı bakım gerektirir.
- Kimyasallara karşı (Asit, baz, tuz vb.) dayanıksızdırlar.
- Isı iletkeni, ses ve elektrik iletkeni yüksek olduğundan yalıtım gerektirir.

Çeliğin tüm olumsuzluklara karşı alınacak önlemler çeliğin maliyetini artırır [7].

## 2.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Çelikler kullanım alanlarına veya yapısal özellikleri bakımından çeşitli şekilde sınıflara ayrılır. Bu sınıflandırmalar;

### 2.1.1. Kompozisyonlarına Göre Sınıflandırma

Alaşimsız çelikler;

- Düşük karbonlu ( $C < \% 0.25$ )
- Orta karbonlu ( $\% 0.25 < C < \% 0.55$ )
- Yüksek karbonlu ( $\% 0.55 < C$ )

Alaşımlı çelikler;

- Düşük alaşımlı (Alaşım elementi oranları toplamı  $< \% 5$ )
- Yüksek alaşımlı (Alaşım elementi oranları toplamı  $> \% 5$ )

İhtiva ettikleri (İçerdikleri) alaşım elementine göre;

- Manganlı çelikler

- Krom nikelli çelikler
- Paslanmaz çelikler

### **2.1.2. Üretim Metotlarına Göre Sınıflandırma**

Sıcak haddelenmiş çelikler

Soğuk haddelenmiş/Çekilmiş çelikler

Üretim esnasında kullanılan yöntemlere göre;

- Siemens-Martin çeliği
- Oksijen konverter çeliği
- Pota çeliği

Oksijen giderme yöntemine göre;

- Kaynar çelik
- Durgun çelik
- Yarı durgun çelik

### **2.1.3. Kullanım Alanlarına Göre Çelikler**

Metalürji sanayinde çelikler mutlaka belli bir amaçta kullanmak için üretilirler ve o amaca uygun işlerde kullanılırlar. Aşağıda bu amaca uygun belirli nitelikte olanlar verilmiştir.

- Yapı çeliklerinde kullanılacak çelikler
- Takım yapım işlerinde kullanılacak çelikler
- Soğuk ve sıcak işlerde kullanılacak çelikler
- Hızlı kesme işlerinde kullanılacak çelikler
- Yay yapımında kullanılacak çelikler
- Yüksek sıcaklığın bulunduğu ortamlarda kullanılacak çelikler
- Dış etkilere maruz yerlerde ve deniz ortamında kullanılacak çelikler [8].

### **2.1.4. Kimyasal Bileşimlerine Göre Çelikler**

- Sade karbonlu çelikler
- Katkılı çelikler [9].

### **2.1.5. Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine Göre Çelikler**

- Manyetik çelikler
- Isıya dayanıklı çelikler
- Korozyona dayanıklı çelikler
- Paslanmaz çelikler vb. [10].

### **2.1.6. Mikroyapısal Durum ve Metalografik Yapılarına Göre Çelikler**

- Ferritik çelikler
- Ferritik ve perlitik çelikler
- Perlitik çelikler
- Östenitik çelikler
- Martenzitik çelikler
- Ledeburitik çelikler
- Beynitik çelikler [8].

### **2.1.7. Sertleşme Yöntemlerine Göre Çelikler**

- Hava çelikleri
- Su çelikleri
- Yağ çelikleri [10].

## **2.2. ALAŞIMSIZ YAPI ÇELİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ**

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere alaşım elementi içeren çelikler alaşımsız çelik ismiyle nitelendirilmektedir. [11]. Düşük karbon içerikli ve alaşımsız yapı çelikleri, düşük, mikro alaşımlamaya uygun olması tane boyutu kontrolü ve akma çekme mukavemetleri sıcaklık ve tokluk özellikleriyle üretilir. Yüksek kaynaklanabilirlik özellikleri açısından ve imalat ve inşaat sektörlerinde geniş bir kullanım alanıyla tercih edilmektedir [12].

Çizelge 2.1. Alaşımsız çeliklerin sınır değerleri.

| Alaşım Elementi | Sınır Değeri(%) |
|-----------------|-----------------|
| Al              | 0,10            |
| Co              | 0,10            |
| Cr              | 0,30            |
| Cu              | 0,40            |
| Mn              | 1,65            |
| Mo              | 0,08            |
| Nb              | 0,06            |
| Ni              | 0,30            |
| Si              | 0,50            |
| Ti              | 0,05            |
| V               | 0,10            |
| W               | 0,10            |

## 2.3. ALAŞIMSIZ ÇELİKTE ELEMENTLER

Çelik malzeme günümüzde en yaygın kullanım alanına sahip demir-karbon alaşımıdır. Adından da anlaşılacağı gibi karbon, çeliğin özelliklerine etkisi en fazla bulunan elementtir. Alaşım elementleri düşük miktarlarda eklense bile çelik özelliklerini değiştirmek mümkündür.

### 2.3.1. Karbon (C)

Çelik için temel alaşım elementidir. Çelik içerisinde demir karbür ( $Fe_3C$ ) şeklinde bulunur. Çeliğin mekanik özelliğini etkileyen elementlerin başında gelmektedir. Çelik bünyesindeki karbon ağırlığının yüzdelik oranda artması çeliğin kaynak edilebilme ve talaşlı imalat özelliğini azaltır [13].



Şekil 2.1. Karbon elementi.

“Karbon Eşdeğeri” çeliğin metalürjik yönden istenilen özelliği sağlamasında büyük önem arz etmektedir. Karbon eşdeğeri ifadesinde, çeliğin bünyesindeki alaşım elementlerinin meydana getirdiği sertliğe eşdeğer sertliği sağlayan karbon miktarına Karbon Eşdeğeri denilir. IIW tarafından oluşturulan ve tüm dünyada en yaygın şekilde kullanılan karbon eşdeğeri formülü aşağıdaki gibidir:

$$Ce\check{s} = C + (Mn/6) + ((Cr + Mo + V)/5) + (Ni + Cu)/15 \quad (2.1)$$

$0,45 < Ce\check{s} =$  Ön tavlamaya gerek yok

$0,45 < Ce\check{s} < 0,60 = 100\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ön tavlama sıcaklığı

$Ce\check{s} > 0,60 = 200\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ön tavlama sıcaklığı

Sertlik ve dayanım karbon miktarının artmasıyla ciddi oranda artar. Yüksek karbon içeren çeliklerin ısıtım işlem uygulamalarında çatılma riski de fazlalaşır. [14].

### 2.3.2. Silisyum (Si)

Çeliğin üretim prosesinde ki oksijen üfleme aşamasına geçildiğinde Si yanarak  $SiO_2$  bileşiğı olarak cürufa geçer. Söz konusu reaksiyon ekzotermiktir ve çelik üretiminde sistem sıcaklığını arttırmada etkilidir.  $SiO_2$  cüruf sisteminde  $CaO$ ’nun ergime sıcaklığını düşürmede etkili olmakla birlikte çeliğin üretim şartlarındaki cürufun  $CaO/SiO_2$  olarak da tanımlandırılan baziklik oranının 2,5 – 1 aralığında tutulmasını da yardımcı olur. Oksijen giderme silisyum önemli bir elementidir. Oksijen giderme amacıyla kullanılan elementler temelde silisyum ve alüminyum olmakla beraber kalsiyum (Ca) ve titanyum (Ti) da bu grupta değerlendirilebilir. Silisyum ana oksijen giderici olarak yapı çeliklerinde ve uzun ürünlerde kullanılmaktadır [15].

### 2.3.3. Kükürt (S)

Kükürt, işlenmesi kolay kükürtlü çeliklerde kullanılsa da aslında tüm çeliklerin birleşiminde istenmeyen bir madde olup sınırlı sayıda bulunmalıdır. Eğer çelikte yüksek oranda kükürt bulunur ise kaynak çatlakları oluşabilir aynı zamanda kaynak banyosuna girdiği zaman gözenekli bir yapı oluşur ve sıcak çatlamlar görülebilir [16].



Şekil 2.2. Kükürt elementi.

### 2.3.4. Fosfor (P)

Çeliğe cevherden gelir. Çekme mukavemeti her % 0,1 P artışı ile 65 N/mm<sup>2</sup> artar. Bundan da derin çekme plakalarının üretiminde yararlanılır. Şekillendirilebilme yeteneği ve darbe mukavemeti düşer.  $P > \% 0,05$  durumunda çentik tokluğu değerindeki büyük düşüş nedeniyle soğuk kırılmalık tehlikesi doğar. Soğuk kırılmalık geçiş sıcaklığı  $T_u$  ile gösterilir. P' un a kristalleri içerisinde çözünmesi, düşük difüzyon hızından dolayı bir kırılmalık etkisi yaratır. Uzun katılaşma süreci P segregasyonları oluşmasını destekler. Yüksek P oranı sülfür ile birlikte kaynar dökülmüş çelikte segregasyon bölgelerinin oluşmasına sebep olur. Aynı şekilde P gaz kabarcığı segregasyonlarında da görülür. Yüksek P oranı özellikle Thomas çeliğinde (T) görülür (artık üretilmemektedir). Çelik içerisindeki P oranı mümkün olduğunca  $< \% 0,05$  olmalıdır [17].



Şekil 2.3. Fosfor elementi.

### 2.3.5. Mangan(Mn)

Çeliğin kaynak edilebilme özelliğine çok bir etkisi olmasa da dövülebilir hale gelmesini, sertleşmesini ve dayanımını sağlayan önemli bir faktördür. Yüksek manganlı çeliklerde tokluk ve yüksek aşınma direnci görülür [18].



Şekil 2.4. Mangan elementi.

### 2.3.6. Oksijen (O)

Çeliğe cevherden gelir. Çelik içerisinde bulunması istenilmez. Katı çelik içerisinde çözülmüş oksijen, çekme mukavemeti ve çentik darbe tokluğunu düşürür. Oksijen özellikle kaynak metal içindedir (bazik elektrotlarla oksijen oranı çok düşüktür). Oksijen üflenen çeliklerde oksijen girişi kuvvetlidir [17].

### 2.3.7. Azot (N)

Çeliğe cevherden gelir. Özellikle eski T çeliklerinde N oranı yüksektir. Özellikle düşük sıcaklıklarda soğuk şekillendirme ile beraber çok kuvvetli yaşlanma sertleşmesi meydana getirir (gevrek kırılmalık, çok düşük çentik tokluğu). N değeri çelik içerisinde eşit dağılım göstermek şartıyla  $< \% 0,01$  olmalıdır (bağ yapmamış haldeki miktarı). Azot çelik içerisinde bağlandığında zararsızdır [17].

### 2.3.8. Hidrojen

Çeliğe cevherden gelir. Çelik içerisinde bulunması istenilmez. Düşük sıcaklıklarda bile hidrojenin demir içerisindeki çözünürlüğü yüksektir. H atom çapının küçük olması sebebiyle diğer malzemelerin kristal yapısı içerisine kolayca sızar ve orada atom formunda kristal yapı arasındaki boşluklara yerleşerek karışık kristaller oluşturur (büyük difüzyon hızı). 200 - 300 °C' de 4 ile 16 saatlik tavlama ile hidrojen dışarı çıkabilir. Çelik içerisindeki hidrojen giderilmezse hidrojen kırılmalığına yol açar.



Hidrojen, çekme ve katlama deneylerinde şekil değiştirme kuvvetinin düşmesinden anlaşılabilir. Kaynak dikişi içerisindeki hidrojen, aynı zamanda şekillendirme özelliklerinin kötüleşmesine sebep olur [17].

## **2.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİĞİN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Çekme mukavemetinin, sertlik ve sertleşebilirlik gibi artması sonucunda şekillendirilebilirlik ve tokluğun azalması söz konusu olabilir. Kritik soğuma hızının düşmesinden dolayı daha iyi sertlik derinliği ve su verme, daha iyi sıcak ve durgun mukavemet, sıcağa dayanıklılık ve korozyona karşı güvenlik vb. Çelik içerisine eklenen alaşım elementleri genellikle farklı metaller olarak ayrılmayıp demir kristalleri içerisinde demir atomlarının yerlerini alırlar. Karışık kristaller oluştururlar ve diğerleriyle metaller arası bağ yaparlar [19].

Karışık kristaller

- Kafes arasına giren atomlarla oluşan karışık kristal (ara yer)
- Kafes atomlarının yerine geçerek oluşturulan karışık kristal (yer değiştiren)

Metaller arası bağlanma ise;

Karbür oluşturan: Cr, Mo, W, V, Mn, Ti, Nb.

Karbür oluşturmayan: Ni, Cu, Co

V, Nb ve Ti gibi mikro alaşım elementleri, küçük çökeltiler halinde karbür ve nitritler ( $\text{NO}_2$ ) oluşturarak mukavemet değerlerinin artmasına sebep olurlar [19].

### **2.4.1. Yapı Değişiklikleri**

Alaşım elementleri, östenit – perlit değişimini, perlit oluşumunu sağlayan atom göçünü yavaşlatacak şekilde etkilerler. Uzun soğutma sürelerinde de, hızlı soğutmada ortaya çıkan sonuçlar görülür, örneğin: yapı değişiklikleri, karbürlerin ince dağılımı gibi. Bundan dolayı alaşımlı çeliklerin aynı karbon oranına sahip alaşımsız çeliklerle karşılaştırılmaları durumunda daha yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları görülür [19].

### **2.4.2. Alaşım Elementlerinin Çeliklerin Kaynaklanabilirliğine Olan Etkileri**

Kaynak yeri ve hemen yanındaki ısıdan etkilenen bölge “pratik kaynak koşulları” altında kaynak sırasında yüksek sıcaklığa çıkarılıp daha sonra hızlı bir şekilde soğutulur. Bu olay sertleştirme ısıl işlemine benzerdir. Sertliğin derecesi çeliğin kimyasal



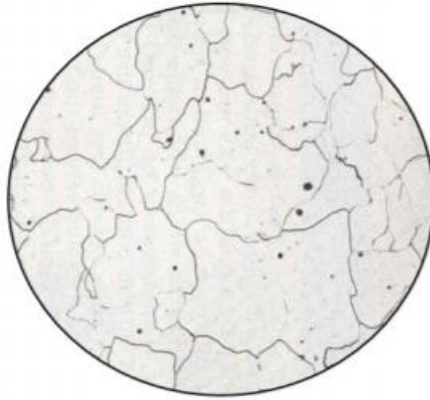
ötektoidüstü çelikler denir.

Demir-karbon denge diyagramının çelik bölgesindeki önemli olayları şöyle sıralayabiliriz:

- Sıcaklık yükselirse perlit hızla östenite dönüşür; ferrit ve östenitte birleşerek sadece östenit oluştururlar.
- Yapıdaki bütün sementitin eriyeceği minimum sıcaklık, bileşimdeki karbon miktarına göre değişir. (% 0-2 C) Karbon % 2'nin üzerinde ise her zaman biraz sementit erimemiş olarak kalacaktır.
- Çelik kritik sıcaklığın üzerinde görülürse minimum seviyede tane büyüklüğü oluşabilir.

#### 2.5.1. Ferrit ( $\alpha$ )

Demirde az miktarda karbonun erimesiyle sonucu oluşan katı eriyiğe ferrit olarak adlandırılır. Karbon bu eriyik içinde en fazla 723 °C'de % 0.025 kadar eriyebilir. Ancak sıcaklığın düşmesiyle azalır. Oda sıcaklığında ise bu oran % 0.005'tir. Ferrit karbonu çözemediği durumda karbon kristalin dışına gönderilerek sementit oluşur. Ferritten ayrılan sementite, tersiyer sementit denilir [21].



Şekil 2.6. Ferritin mikroskop altındaki görüntüsü.

#### 2.5.2. Perlit ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ )

A1 sıcaklığındaki karbon çözünürlük sınırı % 0.025, oda sıcaklığında % 0.005'dir. Perlit, ferrit ve sementit fazlarının karışımıdır. Çeliğin ötektoid sıcaklığından (723°C) soğutulması sonucu oluşur. Karbon oranları bu değeri aştığında perlit adı verilen bileşen

oluşur [21].

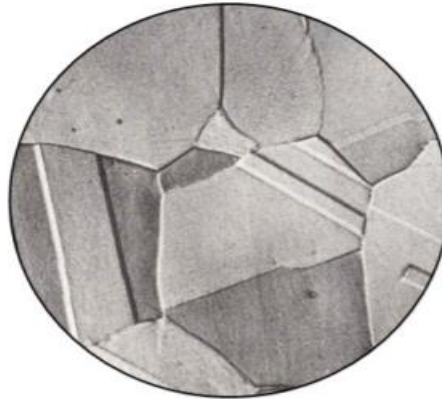
Perlit'in mikroskop altındaki tipik görüntüsü Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Perlit(% 0.45 C) mikroskop altındaki görüntüsü.

### 2.5.3. Östenit ( $\gamma$ )

Karbonun  $\gamma$  demiri içinde erimesi sonucu ostenit oluşur. Karbon bu eriyik içinde ötektik sıcaklık olan 1147 °C'de en fazla % 2.06 oranında eriyebilir. Çeliğin sıcak şekillendirme ve ısıtma işlemlerinin pek çoğu östenit fazında yapılır. Östenit fazından, soğuma hızına bağlı olarak çok değişik mikroyapılar meydana gelir. Östenitin mikroskop altındaki görüntüsü Şekil 2.8'de verilmiştir. Kristalin dışına atılan karbon sementit oluşturur. Östenitten oluşan bu sementite, ikinci sementit (sekonder sementit) denilir [21].



Şekil 2.8. Östenitin mikroskop altındaki görüntüsü.

### 2.5.4. Ledeburit

Demir karbon denge diyagramındaki östenit ve primer sementit fazlarının mekanik karışımı olan ötektik alaşıma (1147 °C, % 4.3 C) ledeburit denilir. Sementit sıvıda

ayrıştığı zaman primer sementit olarak adlandırılır.

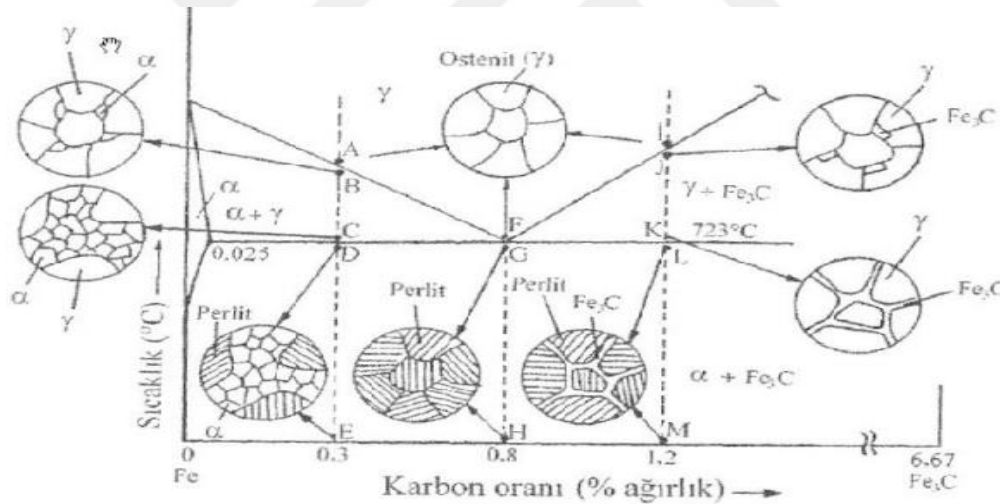
Östenitteki karbon oranı, sıcaklık düştükçe ES eğrisi boyunca azalır. Östenitin içinde ötektoit oran olan % 0,8 C kalınca, perlit olarak dönüşür. Bundan dolayı 723 °C'nin altındaki ledeburite dönüşmüş ledeburit denilir [21].

### 2.5.5. Dönüşmüş Ledeburit

Ledeburit içindeki östenitin karbon oranı, sıcaklık düşüşüyle azalır. Östenit içerisindeki karbon oranı % 0,8 C olunca, perlit olarak dönüşür ve 723 °C'nin altında görülen ledeburite, dönüşmüş ledeburit denir [22].

## 2.6. ÇELİKLERİN SOĞUMASI SIRASINDA OLUŞAN İÇYAPILAR

Şekil 2.9'da Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ile bazı çeliklerin östenit fazından yavaş soğuması sırasında oluşan içyapılar görülmektedir [23].



Şekil 2.9. Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramı.

- A noktasında % 0.3 C oranına sahip östenit (γ) tanelerinden oluşur.
- B noktasında karbon atomları yayılarak uzaklaşır ve karbon oranı düşük olan ferrit (α) taneleri oluşur.
- C noktasında ferrit taneleri çoğalır ve yapıdaki östenit fazının karbon oranı artarak % 0.8 değerine ulaşır.
- D noktasında, östenit taneleri perlite dönüşür.
- E noktasına kadar soğutulan çelikte önemli bir faz dönüşümü olmadığından,

içyapı değişmez D noktasındaki gibi olur.

- F noktasında, % 0.8 C içeren östenit tanelerinden oluşur.
- G noktasında, perlitik yapıya dönüşür.
- H noktasındaki yapı G noktasındaki yapı ile aynı kalır.
- İ noktasında, östenit tanelerinden oluşur.
- J noktasında, karbon atomlarının tane sınırlarına yayılır ve sementit çökelmeye başlar.
- K noktasında, soğuma sırasında sürekli artan sementit bütün tane sınırlarını kaplar ve ayrıca östenit içinde çözünen karbon oranı da sürekli azalarak bu noktada % 0,8 değerine düşer.
- L noktasında ise, geriye kalan östenit fazı perlitik yapıya dönüşür.
- M noktasında, L noktasındaki yapının aynısı olur [24].

### **3. GAZALTI KAYNAĞI BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ**

Kaynaklı birleştirmeler günümüzde uçak yapıları, taşıt araçları, endüstriyel tesisler, mimari yapılar, demiryolu köprüleri, boru hatları ve basınçlı kaplar gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılır. MIG-MAG yarı otomatik kaynak yöntemi son dönemlerde, popüler hale gelmekte ülkemizde kullanımı hızla artmaktadır.

Yaklaşık 1880'lerden önce demirci kaynağı sadece malzemeleri metalürjik olarak birleştiren tek metottu. Bu tip operasyonlarda, birleştirilecek metaller ergime olmaksızın ısıtılıp birleştirilirdi. Demirci kaynağının aslı tam olarak bilinmemektedir. Ark ve nokta kaynağı 1880'lerden sonra geliştirildi ve endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Literatür araştırmalarında 1801' de Sir Humphrey Davy elektrik arkını keşfettiği belirtilmektedir. Wilde, elektrik arkından metalleri birleştiren ilk insan olarak bilinir. Wilde 1860'larda iki demir parçayı birlikte ergitip birleştirerek ilk elektrik kaynağı patentini almıştır [25].

Genellikle MIG kaynağı olarak adlandırılan Gaz Metal Ark Kaynağı, sıcaklığın bir eriyen metal elektrod ve metal parçası arasında oluşan ark tarafından sağlanan ark kaynak yöntemidir. Yöntem koruyucu gazın davranımına göre iki ayrı isimle anılmaktadır. Asal gazla yapılan korumada MIG (Metal İnert Gaz), Aktif Gazla Yapılan Korumada MAG (Metal Aktif Gaz) denilmektedir. Kaynak bölgesine sürekli olarak beslenen bir çıplak tel elektrod dolgu metali olarak tüketilmektedir. Elektrod, kaynak havuzu, ark ve ana metale komsu olan bölge kaynak bölgesine sürekli olarak beslenen bir akıcı gazla atmosferin zararlı etkilerinden korunmaktadır. Gaz koruması tam koruma sağlamalıdır. Çünkü çok küçük bir boşlukta bile hava kaynak metalini kirletebilmektedir [26].

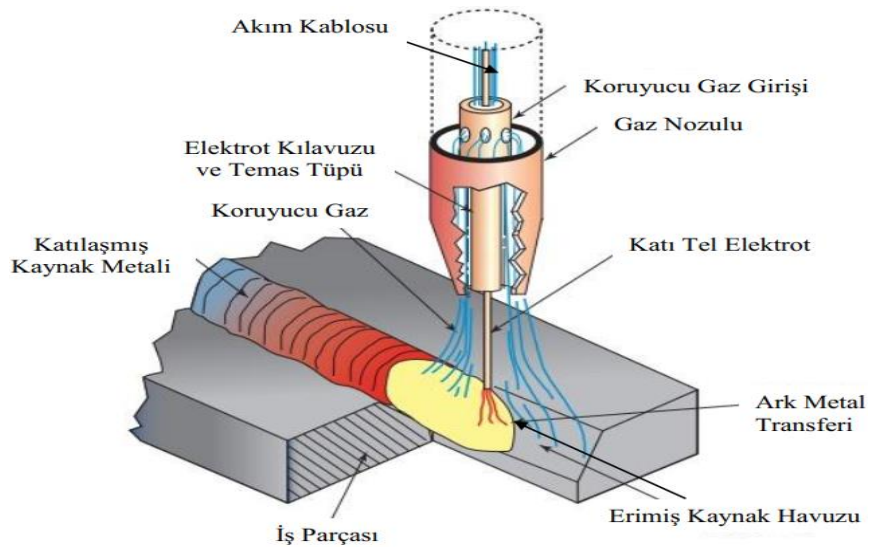
#### **3.1. MIG/MAG KAYNAĞI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ**

Gazaltı ark kaynağında kullanılan koruyucu gaz Argon, Helyum ve ya Ar+He karışımı gibi soygazlar ise yapılan kaynak işlemi Metal İnert Gaz (MIG) olarak adlandırılır. Kullanılan koruyucu gaz karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gibi aktif bir gaz içeriyorsa Metal Aktif Gaz (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 [27].

MIG kaynağında doğru akım kaynak makineleri kullanılır ve çoğunlukla pozitif kutba bağlanır. Kaynak makinelerin akım ayarı ark gerilimin ayarlanması ile sağlanır. Kaynak sırasında, kaynak telinin sabit hızda aktarımı, ark boyunun sabit tutulmasını sağlamaktadır. Dikiş kaynak pozisyonlarının tümü için uygun olan MIG kaynağı hem otomatik hem de manuel olarak kaynak yapmayı mümkün kılar.

Kaynak dikişinin; genişliği, dolgu yüksekliği ve nüfuziyeti aynı torç açısında; akımı, gerilimi, hızı değiştirerek ayarlanabilir. Kaynak esnasında kaynak torcu, kaynak yönüne zıt yönde maksimum 30°’lik bir açıyla tutulur. Böylelikle kaynakçı, kaynak bölgesine ve elektrotun erime işlemine kolayca bakabilir. Eğer kaynak torç açısı 30° ‘den fazla olursa, kaynak nüfuziyetin azalır ve kaynak dikişi inceler. Aynı zamanda fazla eğim koruyucu gazın kaynak bölgesini koruma özelliğini düşürür ve kaynak dikişinde gözenekli yapı, kalıntı 18 gerilmelerin oluşmasına neden olur [28]. Gazaltı ark kaynağı için kullanılan ekipmanlar şekil 3.1.’de ve kullanılan kaynak donanımı şekil 3.2. ‘de gösterilmiştir[29]- [30].



Şekil 3.1. MIG/MAG kaynağı için gerekli ekipmanlar.





Kaynak grubu 4 ana gruba ayrılabilir;

- Koruyucu gazı ve güç ünitesinden gelen akımı ark bölgesine taşıma görevini sağlayan aynı zamanda ortama elektrod sağlayan, donanım, torç ve kablo grubudur. Kaynak torcunun tetiğine basıldığı anda, metal parçasına güç, gaz ve elektrot iletilerek ark oluşmaktadır [31].

Gazaltı kaynağı (GMAW)'nda kullanılan koruyucu gazların ilk amacı kaynak banyosunu ve ısı tesiri altında kalan bölgeyi (ITAB) oksitleyicilerden ve havanın menfi tesirinden korumaktır. Ergimiş haldeki hemen hemen tüm metaller havadaki azot ve oksijeni kendi bünyelerinde absorbe etmeye çalışırlar. Emilen azot ve oksijen molekülleri ergimiş metal içerisinde çözünerek, katılaşılan kaynak metalindeki elementlerle birleşerek yeni bileşikler oluşturur. Bu olay kaynak metalinin kimyasal ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler ve çeşitli kaynak hatalarının oluşmasına sebep olur. Koruyucu gazlar burada örtülü elektrot görevini görmektedir. Koruyucu

gazlar bu temel görevlerinin dışında kaynak işlemi ve kaynak dikişine de önemli etkileri vardır. Bunları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Arkın karakteristiği
- Metal transferin şekli
- Nüfuziyet ve kaynak dikişinin profili
- Kaynak hızı
- Yanma oluğu oluşma eğilimi
- Temizleme etkisi
- Kaynak metalinin mekanik özellikleri

İlk yıllarda sadece inert gazlar (argon – helyum) koruyucu gaz olarak kullanılırken şimdi karbondioksit gazı da büyük oranda koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır. Ayrıca oksijen ve karbondioksit gazı sık sık inert gazlarla karıştırılarak kullanılmaktadır. GMAW’de kullanılan karışım gazların ve inert gazların kimyasal davranışları ve uygulama alanları Çizelge 3.1’de gösterilmektedir [32].

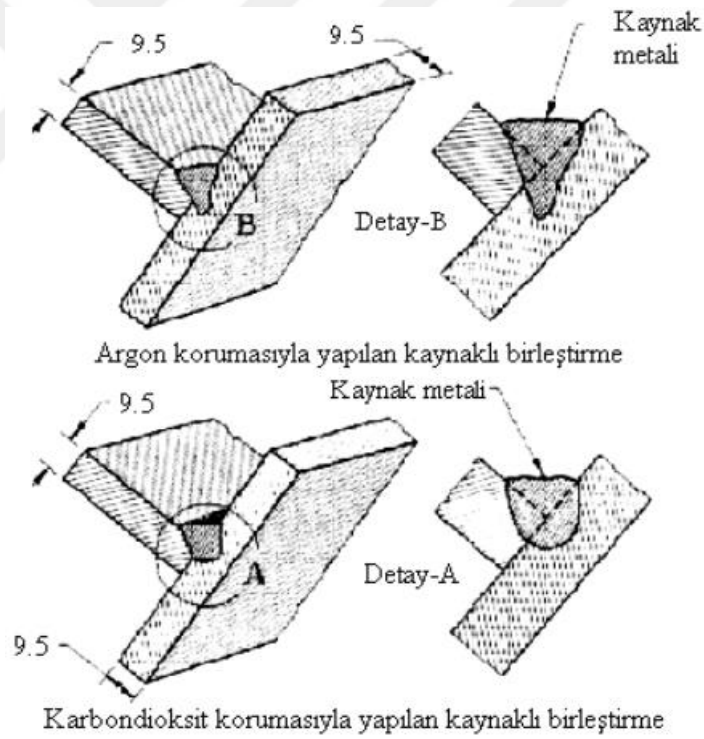
Çizelge 3.1. GMAW’de kullanılan farklı koruma gazları.

| Gaz Türü                   | Gazın Bileşimi %                    | Kullanım Yeri                                   |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Argon                      | -                                   | Demir dışı metaller                             |
| Helyum                     | -                                   | Alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları        |
| Karbondioksit              | -                                   | Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler       |
| Argon-helyum               | 20-50 Ar-50-80 He                   | Alüminyum, magnezyum, bakır ve nikel alaşımları |
| Argon-oksijen              | 1-2 O <sub>2</sub>                  | Paslanmaz çelikler                              |
|                            | 3-5 O <sub>2</sub>                  | Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler       |
| Argon-karbondioksit        | 20-50 CO <sub>2</sub>               | Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler       |
| Helyum-argon-karbondioksit | 90 He -7 ½ Ar-2 1/2 CO <sub>2</sub> | Paslanmaz çelikler                              |
|                            | 60-70-He-25-35-Ar-5CO <sub>2</sub>  | Düşük alaşımlı çelikler                         |
| Nitrojen                   | -                                   | Bakır alaşımları                                |

### 3.2.1. Argon Gazı

Kaynakta kullanılan argon % 99.995 saflıktadır. Argon mono atomik (her molekülü bir atom), inert ve sıvı metalde çözünmeyen bir gazdır. Argon havadan % 38 daha ağırdır ve buda düz pozisyonda ve yatay dolgu pozisyonlarında avantaj sağlar. Saf argon neredeyse tüm metallerde koruyucu gaz olarak kullanılabilir, fakat çeliklerin kaynağında pek tercih edilmez. Bunun nedeni argon gazının maliyetleri yükseltmesi olarak verilebilir. Çeliklerin kaynağı için argon esaslı karışım gazlar tercih edilmektedir [26].

Sade karbonlu çeliklerin DCEP (Doğru Akım Elektrot Pozitif) ile argon kullanılarak yapılan kaynağında, kaynak kenarları boyunca yanma olukları oluşmaktadır. Argon korumasıyla elde edilen kaynak biçimi ve nüfuziyet şekli helyum ve karbondioksit korumasıyla elde edilenden farklıdır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Nüfuziyet biçimi.

Kaynaklar aynı şartlar altında düz pozisyonda karbondioksit ve argon koruması altında elde edilmiştir [26].

Argon helyumdan daha düşük iyonizasyon potansiyeline sahiptir buda düşük ark gerilimiyle sonuçlanır. Belirli amperaj değerinde argondan elde edilen ısı değeri,

helyumda elde edilenden daha düşüktür. Buda ince parçaların kaynağında argonu tercih sebebi yapmaktadır. Argon helyumdan 10 kat daha ağır bir gazdır ve bu da kaynak bölgesini korumak için daha az argon kullanımını gerektirir. Argon helyumdan daha ucuz ve daha verimlidir. Bu durum helyuma nazaran argonun geniş kullanımını kısmen açıklamaktadır.

### **3.2.2. Helyum Gazı**

Helyum, doğal gazdan ayrışmasıyla elde edilen inert ve havadan hafif bir gazdır. Bu nedenle yeterli korumayı sağlaması açısından yüksek gaz üfleme oranları kullanılmalıdır. Alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları ile birlikte kullanılır. Helyum havanın üstünde yüzerek başarılı bir koruma sağladığından genellikle tavan kaynağında tercih edilmekte argon ise aşağı doğru akma eğiliminde olduğunda tercih edilmemektedir.

Helyum gazıyla globüler metal transferi ve yüksek akım seviyelerinde sprej transferde elde edildiğinden argon gazına göre daha zayıf kaynak dikişi görüntüsü ve daha fazla bir sıçrantı ortaya çıkabilir. Fakat argona göre daha fazla nüfuziyet ve daha geniş kaynak dikişleri sağlamaktadır [26].

### **3.2.3. Karbondioksit Gazı**

Çoğu reaktif gazlar koruma için tek başına kullanılamaz. Karbondioksitin üstün ayrıcalıkları şunlardır; karbondioksit hem tek başına hem de bir karışım gaz bileşeni olarak kullanılmaktadır ve karışım olarak kullanımıyla düzenli ark geçişi ve metal transferi sağlar [26].

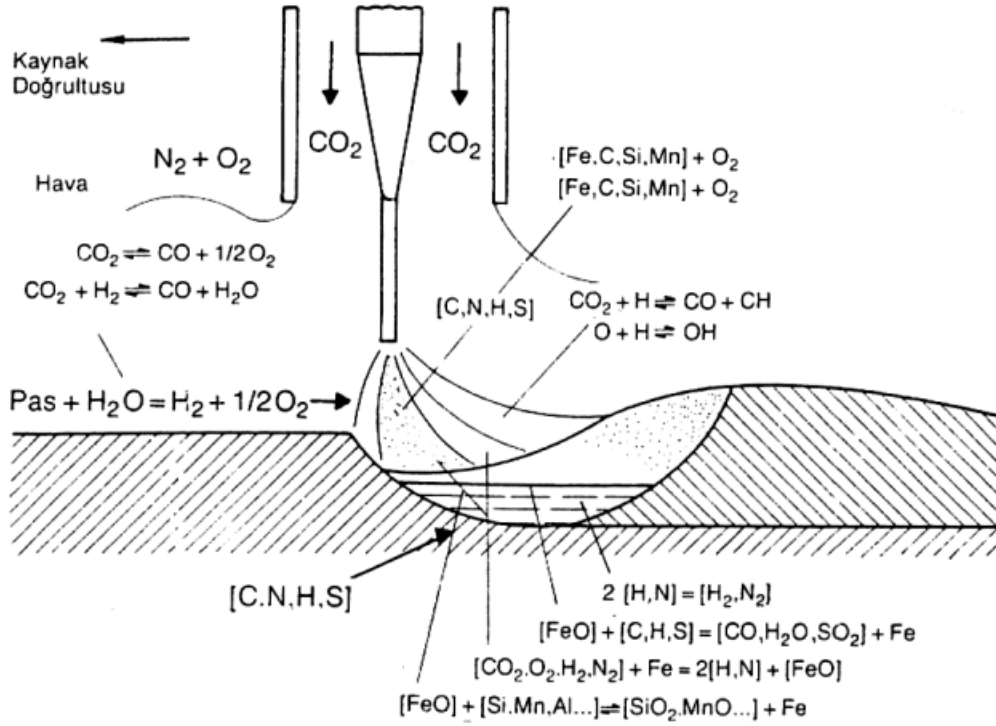
Karbondioksit yaygın bir şekilde çeliklerin kaynağında kısa devre metal transferiyle kullanılmaktadır. Karbondioksitin bulunduğu bir koruyucu gaz bileşimiyle doğru bir sprej ark elde edilemez. Birçok uygulamada karbondioksit ile korunan kaynaklar argon korumalı kaynaklara göre daha az pahalıdır [26].

Karbondioksit, ark sıcaklığında karbonmonoksit ve oksijene ayrışır. Buda aşağı yukarı, % 8-10 oksijenli inert gaz kullanımıyla elde edilen oksitleyici etkiye sağlar.

Bu oksitleyici etkiye rağmen, globüler metal transferiyle dezoksidan elektrot teli kullanılarak yapılan kaynaklarda karbondioksit koruyucu gazı ile porozitesiz güvenilir kaynak dikişleri elde edilebilir. Şekil 3.4'de CO<sub>2</sub> koruması altında oluşan reaksiyonlar

görülmektedir [26].

Karbondiyoksit korumasının başlıca dezavantajı oldukça sert ark ve ürettiği aşırı sıçrantıdır. Kaynak sıçrantısı kısa, üniform ark uzunluğu sağlanarak azaltılabilir [26]-[33].



Şekil 3.4. CO<sub>2</sub> Koruması oluşan reaksiyonlar.

### 3.2.4. Oksijen (O<sub>2</sub>)

Yanıcı olmayan tüm yanma durumları içinde bulunması gereken kokusuz, renksiz ve yakıcı bir gazdır. 0 °C de ve 760 mm/Hg basınçta özgül ağırlığı 1,42 kg/m<sup>3</sup>'dür. Atmosfer basınçta - 183 °C'de buharlaşır ve özgül ağırlığı 1,131 kg/dm<sup>3</sup>'dir [34].

### 3.2.5. Hidrojen (H<sub>2</sub>)

Hidrojen gazının, koruyucu gazlara katılmasıyla, kaynatılacak metal parçası yüzeyinde oksitlenmenin oluşmasını engeller ve kaynak banyosunun mekanik özellikleri üzerinde iyileştirmeler yapar [34].

### 3.2.6. Azot (N<sub>2</sub>)

Helyum gazı ile benzer özellik göstermesiyle helyumun bulunmadığı ülkelerde kullanılmaktadır. Arkın gerilimini ve akımın şiddetini artırıcı, yüzey gerilimini düşürücü

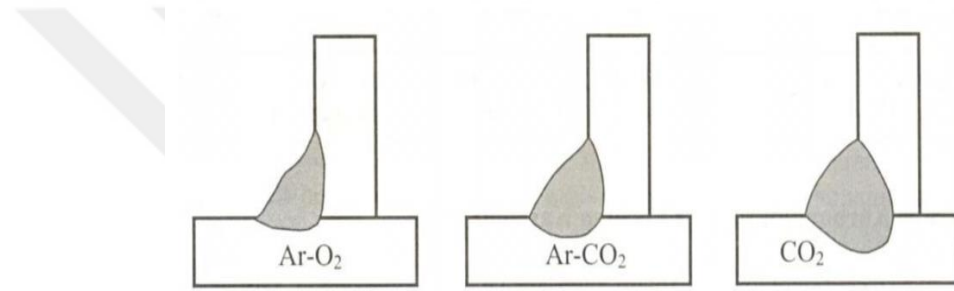
etkiye sahiptir. Kaynak havuzu üzerinde istenmeyen atık yapı oluşur [34].

### 3.2.7. Argon-Helyum-Karbondioksit veya Oksijen Karışımları

Bu karışım düşük alaşımlı çeliklerin kaynaklarında tercih edilir. Mekanik özellikleri ve geniş yığma oranında çalışabilmesi bakımından üstünlük sağlar [34].

### 3.2.8. Argon-Oksijen-Karbondioksit Karışımları

Argona eklenen % 3-5 oranında oksijen ve % 20 ye kadar karbondioksit, metal sektöründe yaygın olarak kullanılır. Bu gazlar, optimum koruma ve spreyci ark, kısa devre ve darbeli ark geçişi için uygun ark karakteristiği sağlar [34].



Şekil 3.5. Argon, Oksijen ve Karbondioksit gazlarının kaynak dikişine etkisi.

## 3.3. MIG-MAG YÖNTEMİNİN KARAKTERİSTİKLERİ

### 3.3.1. Kaynak Akımı

Kaynak akımı, nüfuziyetini doğrudan etkileyen değişkendir. Aynı elektrodun farklı çaplarda akım seviyesi incelendiğinde küçük çaplı elektrotta daha derin nüfuziyet görülür. Belirlenen bir elektrot çapı ve kaynak parametresini sabit tutup akımı arttırdığımız durumda, elektrot yığma hızı ve nüfuziyet artar. Akımı azalttığımız durumda ise çok büyük damla transferi ve aşırı sıçramaya neden olur [35].

### 3.3.2. Ark Gerilimi

Ark gerilimi ve ark boyu, birbiriyle alakalı kavramlardır. Kaynak makinesi üzerinden okunan ark gerilimi, kaynak devresindeki gerilim düşüşlerinin toplamıdır. Bu değer, kaynak kablodaki, serbest elektrot boyundaki, arktaki, parçadaki ve parça dönüş akım kablolarındaki düşüşlerin toplamıdır. Bu nedenle ark gerilimi, ancak diğer devre elemanları (ve bunların sıcaklıkları da) sabit kaldığında makinede okunan değerlerle

orantılıdır. Özlü tel elektrotla oluşturulan kaynak dikişinin görünümü, sağlamlığı ve özellikleri ark geriliminden etkilenebilir. Ark gerilimlerinin çok yüksek olması fazla sıçrama ve düzensiz yapıdaki kaynak dikişlerine neden olur [35].

### **3.3.3. Serbest Elektrot Boyu**

Serbest elektrot boyunun artışı, elektrotun direnç ısısının artmasına neden olur. Bu ısı, elektrota bir ön tavlama uygular ve ark içindeki gerilim düşümünü azaltır. Aynı zamanda kaynak akımı düşürülmüş olur. Bu düşüş, esas metalin erimesi için gerekli ısıyı da azaltır. Sonuçta oluşan kaynak metalini dar ve sığdır. Özlü telle ark kaynağında serbest elektrot boyunun uzun olması durumunda, kararsız bir arka ve fazla sıçramaya, kısa olması durumunda ise ark boyunun daha uzun olmasına etki eder. Gaz akısını bozacak tarzda, gaz memesinin içinde sıçramaya, kaynak metalinin gözenekli olmasına ve aşırı oksitlenmeye sebep olabilir. Özlü tel ile kaynaklarda serbest elektrot boyu 19 mm ile 38 mm arasında olmalıdır [36].

### **3.3.4. Kaynak Hızı**

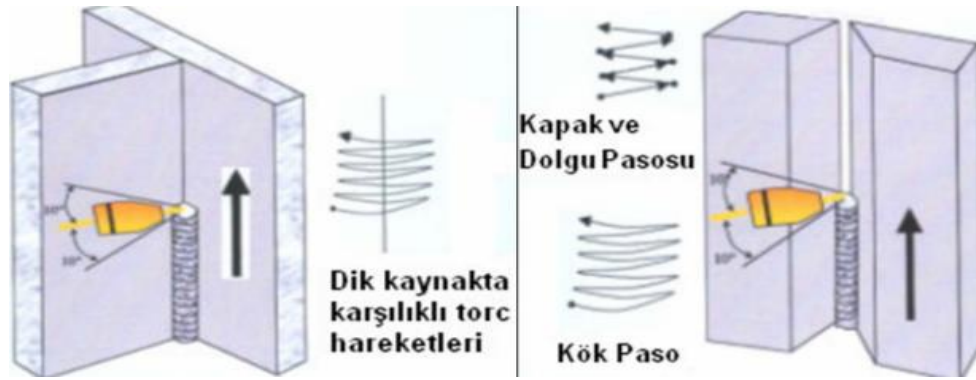
Kaynak hızı, arkın kaynak birleştirmesi boyunca hareketidir. Kaynak hızı nüfuziyetini ve dikiş formunu belirler Diğer faktörler sabit tutulduğunda, düşük kaynak hızında daha fazla nüfuziyet sağlanır. Eğer düşük kaynak hızında kaynak akımı artırılırsa kaynak metalini aşırı ısınır dikiş kalitesinin bozulmasına neden olur [36].

### **3.3.5. Koruyucu Gaz Akışı**

Koruyucu gaz akış miktarı, gaz memesi çapına ve kaynak işleminin yapıldığı bölgedeki hava akışına bağlıdır. Gaz akışı yetersiz geldiği durumda gözenek oluşması ve oksitlenme görülür. Gaz akışının fazla olduğu durumda türbülansa neden olup kaynak kalitesi ise gaz akışının yetersiz olduğu durum ile aynı görülür [36].

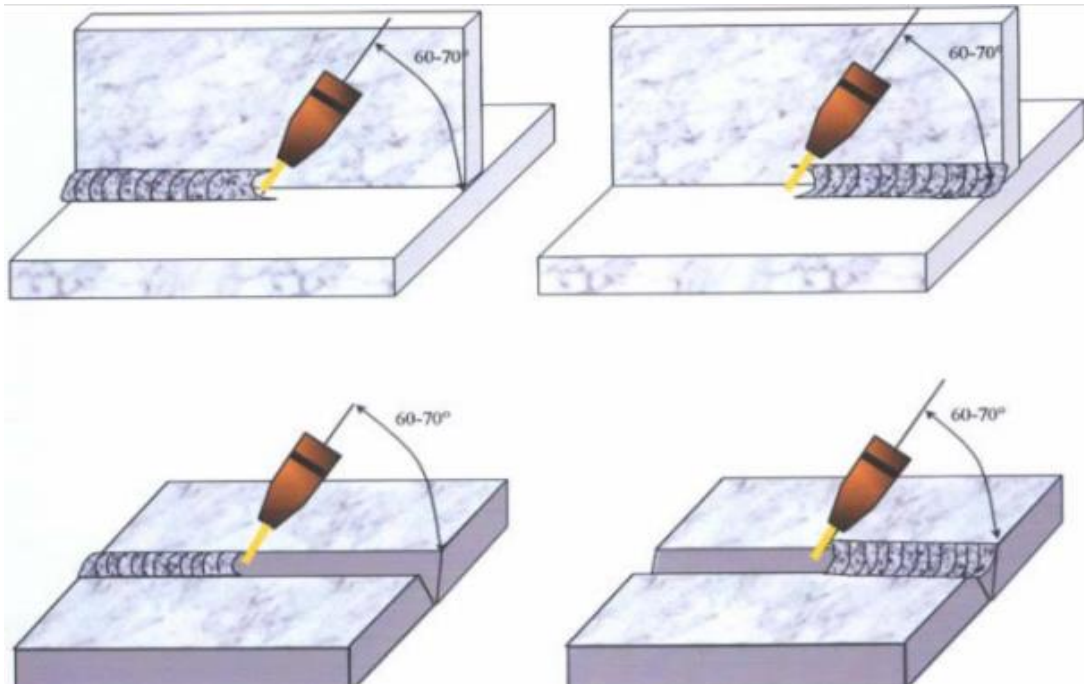
### **3.3.6. Torç Hareketleri**

Dik pozisyondaki kaynak birleştirme işleminin aşağıdan yukarıya gerçekleştirme durumuna göre uygun torç hareketleri Şekil 3.6’da verilmiştir. Alın birleştirme yapılırken dik pozisyonda torcun hareketi hafif zig zaglı ve ileri geri şeklindedir. Hafif ay şeklindeki torç hareketi çok pasolu kaynaklarda uygulanır [37].



Şekil 3.6. MIG-MAG kaynağında dik pozisyonda torcun hareketleri.

Sürüklenme açısının alacağı uygun değerler; kullanılan özlü telle kaynak yöntemine, esas metalin kalınlığına ve kaynak pozisyonuna bağlıdır. Sürüklenme açısı önemli parametredir. Oldukça küçük (2 ile 150 aralığında) tutulmalıdır. Açının büyük olması durumunda gaz koruması görevini yerine getiremez. Eğer sürüklenme açısı çok büyürse gaz korunmasının etkisi kaybolur. Yatay pozisyonda iç köşe kaynağı yapılırken hafif geri adım yöntemi uygulanarak kaynak banyosunun dik yönde ve kaynak yönünde akma eğiliminin önüne geçilir. MIG-MAG kaynak yönteminde istenilen kalitede, yatay pozisyonda kaynak yapılabilmesi için gereken doğru torç hareketleri Şekil 3.7’de verilmektedir [37].



Şekil 3.7. MIG-MAG kaynağında yatay pozisyonda torcun hareketleri.



### 3.3.7. Kaynak Ağzı

Ark kaynağını basit bir şekilde tanımlayacak olursak önce ergitme devamında katılaştırma sürecidir. Bu süreçteki en önemli etkenlerden biri kaynatılacak malzemelerin kaynağın daha derin nüfuziyetleri etki edebilmesinde büyük bir payı olan kaynak ağzıdır [38].

Kaynak ağzının iyi bir şekilde hazırlanması kaynağın nüfuziyeti için çok önemli bir etkidir. Kaynak ağzının kenarlarını kusursuz bir şekilde hazırlanmış olması kaynak çok daha kolay bir şekilde yapılabilir. Kaynak ağzı için harcanan zamanı, kaynak yaparken ki harcanan zaman ve iyi bir kaynak nüfuziyeti ile telafi edilir. Bunu sağlayabilmek için aşağıda açıklanan maddelere uymak gerekmektedir [39].

Kaynak ağzının hazırlanmasından önce dikkat edilmesi gereken ön hazırlık maddeleri aşağıda bulunmaktadır;

Kaynağın pozisyonu ve kaynatılacak malzemenin arka tarafına erişilebilmesi, kaynak pozisyonuna göre kaynak ağzının derinliği ve tipi değişecektir. Şekil 3.11’de kaynak ağzı seçim tablosu verilmiştir. Kaynatılacak malzemenin kalınlığına bağlı olarak, kaynak nüfuziyetinin yeterince derinlere işleyebilmesi için kaynak ağzının tipi değişebilir. Tek taraflı kaynak yapılacaksa kaynaklı ağzı “V” tipinde, iki tarafına da kaynak yapılacaksa “X” tipinde kaynak ağzı açılmalıdır.

Kaynatılacak malzemenin kalınlığı, birleştirmenin çeşidi ve kaynak ağızlarının tipini etkileyen en önemli faktör malzeme kalınlığıdır. Örnek verecek olursak, kaynak mukavemeti, sızdırmazlığı gibi durumlar kaynağın paso miktarına etki eder.

Kaynak yapılacak elektrodun nüfuziyet derecesi, kaynağın ağzının şekli ve derinliğini belirlemektedir. Örneğin elektrot nüfuziyeti az olan bir elektrotla kaynak yapılırken kaynatılacak malzemenin iki tarafına kaynak ağzı açılması gerekirken, elektrot nüfuziyeti yüksek olan elektrotla kaynak yapılırsa hiç kaynak ağzı açmadan bile kaynak yapılabilir.

Kaynak işlemi yapıldıktan sonra oluşacak şekil değiştirmelerin önleme imkanının olması, kaynak yapılırken kaynak yapılan malzemelere ısı verilmesi neticesinde kaynak çekmesi denilen malzemelerde şekil değişikliği gerçekleşmektedir. Bunu önlemek için iki tarafında kaynak yapılması ya da kaynak yapılan yerin tersi yönünde kaynak yapılan malzemeye destek parçalar kaynatılarak kaynağın çekmesinden dolayı oluşacak şekil

bozuklukları engellenebilir.

Kaynatılacak malzemenin türü önemli faktördür. Çabuk şekil değiştiren metalin hadde mamulü, dökme demir ve çeliklerde kaynak bölgesine yakın olan kabukların kaldırılması gerekmektedir [39].

Kaynak edilecek parçanın et kalınlığı, kaynak edilecek malzemenin et kalınlığı ve türü, kaynak yöntemi ve kaynak pozisyonuna göre kaynak ağzı değişmektedir. Şekil 3. 8'de kaynak ağzı seçme tablosundan bu değişken parametrelere göre uygun bir kaynak ağzı seçilebilir [38].

| MALZEME<br>KALINLIĞI<br>(mm) | ÖRTÜLÜ ELEKTROD ARK KAYNAĞI YÖNTEMİNDE |                     |                                             |                      |                    |                    | MIG - MAG KAYNAK YÖNTEMİNDE |                      |
|------------------------------|----------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
|                              | TEK TARAFTAN KAYNAK                    |                     |                                             | ÇİFT TARAFTAN KAYNAK |                    |                    |                             |                      |
|                              | ALTLIK KULLANARAK<br>BİRLEŞTİRME       | ALIN<br>BİRLEŞTİRME | "V"<br>BİRLEŞTİRME                          | ALIN<br>BİRLEŞTİRME  | "X"<br>BİRLEŞTİRME | "T"<br>BİRLEŞTİRME |                             |                      |
| 0,5                          |                                        | 0 mm KÖK ARALIĞI    |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 1                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 2                            | 0 mm KÖK ARALIĞI                       | 1,5 mm KÖK ARALIĞI  |                                             |                      |                    |                    | 0 mm KÖK ARALIĞI            |                      |
| 3                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 4                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    | 2 - 3 mm KÖK ARALIĞI        |                      |
| 5                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 6                            |                                        |                     | 2 - 3 mm KÖK ARALIĞI ve 2 mm KÖK YÜKSEKLİĞİ | 2 - 4 mm KÖK ARALIĞI |                    |                    |                             |                      |
| 7                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 8                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 9                            |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             |                      |
| 10                           |                                        |                     |                                             |                      |                    |                    |                             | 1 - 3 mm KÖK ARALIĞI |

Şekil 3.8. Kaynak ağzı seçimi.

### 3.4. GAZALTI KAYNAĞININ AVANTAJLARI

Gazaltı kaynak yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Gazaltı kaynağı hızlı bir kaynak metodudur. Çünkü kaynak bölgesini sürekli besleyen bir tel elektroda sahiptir. Kaynak sırasında cüruf oluşmadığı için

sürekli temizlemek zorunda kalmayız böylece daha kalite bir kaynaklar elde ederiz. Düşük çaplı elektrotlar kullanıldığından yüksek akım yoğunluğuna ve metal yığılma hızına sahiptir.

- Gaz altı kaynağı ile elde edilen kaynak metali düşük hidrojen miktarına sahiptir, bu özellikle sertleşme özelliğine sahip çeliklerde önemlidir.
- Gaz altı kaynağında derin nüfuziyet sağlanabildiği için bazen küçük köşe kaynakları yapmaya izin verir ve örtülü elektrod ark kaynağına göre daha düzgün bir kök penetrasyonu sağlar.
- İnce malzemeler çoğunlukla Tungsten Inert Gaz (TIG) kaynak yöntemi ile ilave metal kullanarak veya kullanmadan birleştirilse de, gaz altı kaynağı ince malzemelerin kaynağına örtülü elektrod ark kaynağından daha iyi sonuç verir.
- Hem yarı otomatik hem de tam otomatik kaynak sistemlerinde kullanıma çok uygundur [40].

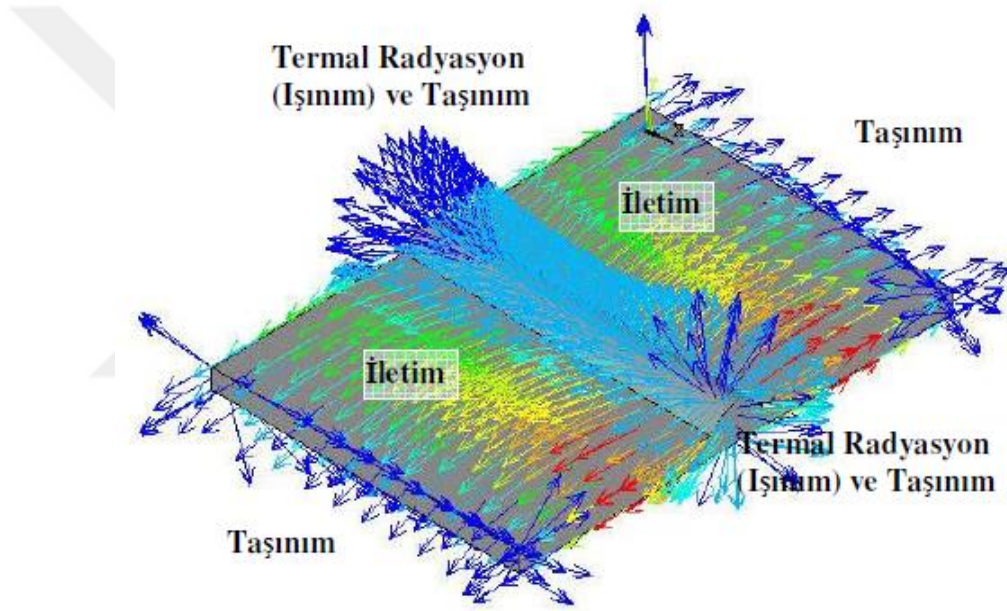
### 3.5. GAZALTI KAYNAĞININ DEZAVANTAJLARI

Gazaltı kaynağının avantajları göz önüne alındığında sıklıkla tercih edilmesinin yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar;

- Gazaltı kaynak ekipmanları, örtülü elektrod ark kaynağı ekipmanlarına göre daha karmaşık, daha pahalı ve taşınması daha zordur.
- Gazaltı kaynak torcu iş parçasına yakın olmak zorunda olduğu için örtülü elektrod ark kaynağı gibi ulaşılması zor, dar alanlarda kaynak yapmak kolay değildir.
- Sertleşme özelliği olan çeliklerde gazaltı kaynağı ile yapılan kaynak birleştirmeleri çatlamaya daha eğilimlidir çünkü örtülü elektrod kaynağındaki gibi kaynak metalinin soğumasını yavaşlatan cüruf tabakası bulunmaz.
- Gazaltı kaynağı hava akımlarına karşı ek bir koruma gerektirir [41].

#### 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZ

Kaynak işlemindeki ısı transferini gösteren termal olaylar Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Kaynaktaki ısı akısı ergime için çok önemlidir. Kaynakta ısının önemli bir miktarı yüksek sıcaklık alanı yüzeyinden ve eriyik havuzu yüzeyinden radyasyonla çevreye yayılır. Aynı zamanda ergime için gerekli olan ısının büyük bir kısmı da iletim ve taşınım ile malzemeye yayılır [2].



Şekil 4.1. Kaynaktaki ısı transfer mekanizmaları.

Isı, üç farklı şekilde transfer edilebilir: iletim, taşınım ve ışıyım. İletim birbirine komşu olan parçacıklar arasındaki etkileşim sonucunda, daha enerjik olanlardan az olanlara doğru ısısının transferidir. Bu transfer şekli “Fourier Isı İletim Yasası” ile aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$Q_{iletim} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

Burada, k malzemenin ısı iletkenliği, A ısı transfer yönüne dik olan alan (m<sup>2</sup>), dT/dx ise sıcaklık değişimdir. Negatif işaret ısının geçiş yönüyle ilgilidir. L kalınlığına sahip düzlemsel bir tabakadan gerçekleşen iletim (hızı) aşağıda verildiği gibidir:

$$Q_{iletim} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (4.2)$$

Burada,  $\Delta T$  tabakanın iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıdır.

Taşınım, katı yüzey ile ona komşu olan akışkan içindeki akımlar vasıtasıyla gerçekleşen ısı transferi şeklidir. Taşınım, içinde hem iletimden hem de akışkan hareketinden gelen bileşik etkileri içerir. Akışkan içindeki sıcaklık farklarından ve bu farkın yoğunluk üzerinde oluşturdu etkilerden ortaya çıkabilmektedir. Taşınım ile ısı transferi hızı;

$$Q_{taşınım} = h A_s (T_s - T_\infty) (W) \quad (4.3)$$

$h$  : Isı taşınım katsayısı, birimi [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$   $W/(m^2 K)$ ]

$A_s$  : Yüzeyin alanı, birimi [ $m^2$ ]

$T_s$  : Yüzey sıcaklığı, birimi [ $^\circ C$ ]

$T_\infty$  : Akışkanın sıcaklığı, birimi [ $^\circ C$ ]

Işınım maddedeki yüklü parçacıkların ısı hareketiyle meydana gelen değişimler sonucunda enerjinin elektromanyetik dalgalar halinde yayılmasıdır.  $T_s$  mutlak sıcaklığına sahip bir yüzeyin yayabileceği maksimum ışıınım miktarı;

$$Q = \sigma A_s T_s^4 (W) \quad (4.4)$$

Burada Stefan-Boltzmann sabitidir,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2 K^2)]$ .

Eğer  $\epsilon$  yayma katsayısına (-) ve  $A_s$  alanına ( $m^2$ ) sahip  $T_s$  sıcaklığında (K) bir yüzey çok daha büyük (veya siyah)  $T_{surr}$  sıcaklığına (K) sahip bir yüzey tarafından tamamıyla sarılmışsa ve aralarında ışıınımı engellemeyen bir gaz (hava gibi) varsa bu iki yüzey arasındaki net ışıınım transferi aşağıda verildiği gibidir:

$$Q_{ışıınım} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) (W) \quad (4.5)$$

Bu durumda küçük yüzeyi saran yüzeyin yayma katsayısının ve alanının net ısı transferine etkisi yoktur.

Bir yüzeyin ne kadar ışıınım yuttuğunu  $Q_{yutulan} = \alpha Q_{gelen}$  denklemi belirler. Burada  $Q_{gelen}$  yüzeye gelen ışıınım miktarı ve  $\alpha$  yüzeyin yutma katsayısıdır [42].

Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ilk olarak 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından kompleks sınır şartlarına, (Sıcaklık-Yük-Sabitlenme) sahip gerçek mühendislik problemlerinin çözülmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanları

mühendislik problemlerinin matematiksel olarak modellenmesi olarak tanımlanabilir.

Gerçekte fiziksel problemlerin çok karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayı teorik çözümler yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine nümerik çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Nümerik çözümlerde genel yaklaşım problemi çok küçük(Sonsuz sayıda) parçalara ayırma prensibi benimsenmektedir [43].

Gerçek bir parça tasarımında parçayı oluşturan geometri genel olarak tek bir matematiksel ifade ile anlatılamayacak kadar karmaşıktır. Malzeme yapısı kimi durumlarda izotop olarak kabul edilse bile aslı itibariyle tüm yapılar anizotropik bir yapıda bulunmaktadırlar. Yapı içerisinde süreksizlikler çeşitli kesitlerdeki duvar kalınlıklarının farklılıkları yapı geometrisinin bu şekilde olması klasik mukavemet metotlarını güvenilir kılmamaktadır [44].

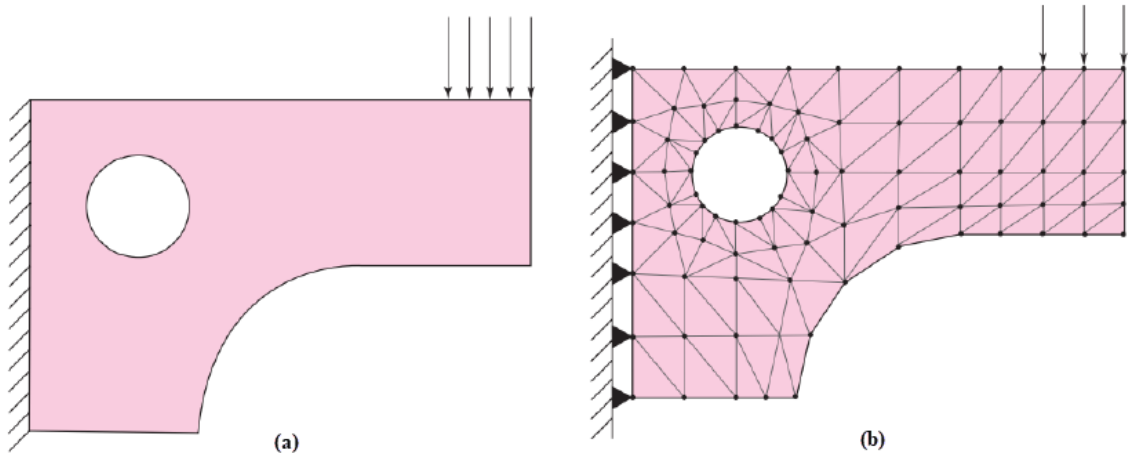
Özellikle bilgisayar alanındaki gelişmelere bağlı olarak önemi ve uygulama alanı genişleyen sonlu elemanlar analizi, yöntemi karmaşık parçaları çözülmesi daha kolay olan küçük parçalara bölerek çözmek ve çözümleri birleştirmek olarak özetlenebilir. Esas itibariyle yapılarda seçilen kuvvetler ve buna karşılık gelen deplasmanlar ve kuvvetler arasında bağıntılar kurularak lineer cebir denklem takımlarının oluşturulması ve çözülmesi esastır.

Sonlu elemanlar metodunun kullanılması 1960'lı yıllara hatta daha öncelere dayanmakla birlikte özellikle yüksek hızlı ve yüksek bellekli sayısal bilgisayarların gelişmesiyle yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntem olmuştur [44].

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli yapının olduğu bölgeyi ayrıştıran sayısal bir teknik olduğundan hatalar kaçınılmazdır. Bu hatalar:

- Hesaplama hataları: Bunlar bilgisayardaki ondalıklı hesaplamalardan ve sayısal integrasyon şemalarındaki formülasyonlardan kaynaklanan yuvarlatma hatalarıdır. Mesleğe yönelik sonlu eleman kodlarının çoğu bu hataları azaltmaya yoğunlaştığı için analiz yapan kişi genellikle ayrıştırma hatalarıyla ilgilenir.
- Ayrıştırma hataları: Gerçek bir yapının şekli ve yer değiştirme dağılımı sürekli değişir. Elemanların kendisinde bulunan matematiksel sınırlandırmalar nedeniyle geometri ve yer değiştirme dağılımının eşleştirilmesinde; yapının modelini oluşturmak için sonlu sayıda elemanların kullanılmasıyla hatalar ortaya çıkar.

Ayrıştırma hatalarına örnek olarak şekil 4.2.a’da gösterilen sabit kalınlıkta ince bir plaka ele alınmış olsun. Şekil 4.2.b’de üç düğümlü düzlemsel gerilme tek yönlü üçgen elemanların kullanıldığı yapıya ilişkin bir sonlu eleman modeli gösterilmiştir. Bu eleman tipi iki temel problemi oluşturan bir kusura sahiptir. Eleman şekil değiştirme sonrasında da doğrusal kalan düzgün kenarlara sahiptir. Üçgen elemanın yüzeyindeki gerilme boyunca oluşan zorlanmalar sabittir. Yuvarlatılmış kenarların modellenmesinde karşılaşılan ilk problem şekilseldir. Uygun biçimde modelleneneceği düşünülen delik yüzeyler gibi eğriliği büyük olan yüzeylerin modelleri de çok başarılı değildir. Çok daha büyük olan ikinci problem ise gerçek yapının farklı kısımlarındaki zorlanmanın sadece yaklaşık bir değerine ulaşmasıdır. Bu yüzden bu model tarafından tahmin edilen sonuçlar son derece yetersiz olacaktır. Sonuçlar eleman sayısını önemli ölçüde artırarak (ağ yoğunluğunu artırarak) iyileştirilebilir. Bir başka çözümde sekiz düğümlü dörtgen eleman gibi uygulamaya daha uygun daha iyi bir eleman kullanmak iyileştirilmiş sonuçlar sağlayacaktır [45]- [47].



Şekil 4.2. Yapının elemanlara ayrılması.

Sonlu Elemanlar yönteminde mesh işlemi; modelin daha küçük parçalardan oluşan temel elemanlara ayrılmasıdır. Elemanların köşelerinde oluşan düğüm noktaları üzerinde hesaplama yapılır [46].



Şekil 4.3. Geometrik model, Sonlu eleman modeli ve sonuçların gösterildiği nodal sonuçlar.

#### 4.1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN UYGULAMA ADIMLARI

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan birbirinden farklı paket programlar kullanılmasına rağmen bu yöntemin temel uygulama adımları hepsinde aynıdır. Bu adımlar en genel haliyle üç aşamada gerçekleştirilir. Bunlar Pre-processing (ön işlemci), Solution (çözüm) ve Post-processing (son işlemci) aşamalarıdır [47].

##### 4.1.1. Pre – Processing (Ön İşlemci)

Bu adım problemin geometrik modelinin (çizgiler, alanlar ve hacimlerden oluşan model) ve yapının sonlu eleman modeli ağ örgüsünün (mesh yapısı) kurularak analize hazır hale getirilmesi için yapılan işlemlerin bütünüdür. Ve bu aşamada takip edilen işlem adımları şu şekilde açıklanır [47].

Modelleme: Öncelikle problemin geometrik yapısı oluşturulur. Bu geometrik yapı analiz programının içerisinde oluşturulabileceği gibi bilgisayar destekli katı model programları tarafından oluşturulup uygun formatlarda analiz programı içerisine alınabilir.

Eleman Seçimi: Uygun eleman seçimi için ilk etapta sonlu elemanlar yöntemi hakkında belli bir teorik bilgiye ihtiyaç vardır. Eleman seçimi, yapılan analiz türüne ve yapının geometrik şekline göre yapılır. Eleman kullanımı problemin çözümü üzerinde doğrudan etkilidir.

Malzeme özelliklerinin belirlenmesi: Belirli bir yük altında analizi yapılan yapının davranışı, malzemesinin belirli değerlerine bağlıdır. Bu değerler malzeme özellikleri altında elastisite modülü, poisson oranı, kayma modülü, ısı genleşme katsayısı ve



benzeri gibi değerlerdir.

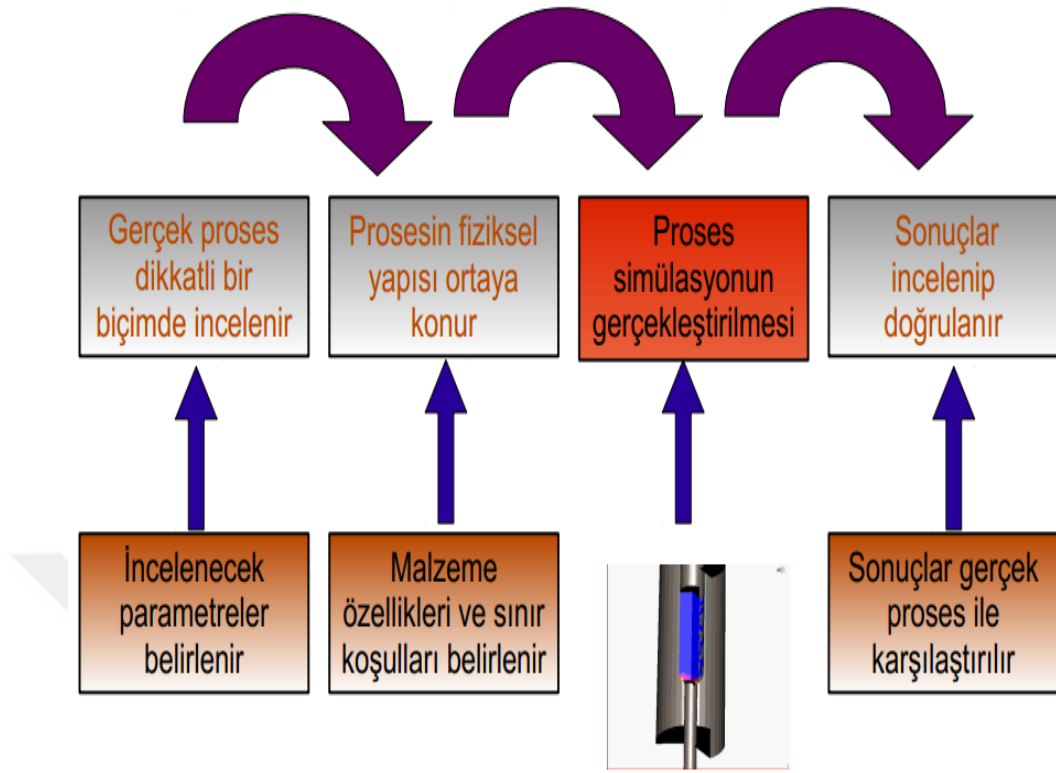
Sonlu eleman modeli ağ örgüsü oluşturma (Meshing): Bu adım geometrik yapının önceden davranışı belirlenmiş belli sayıda elemana bölünmesidir. Bu adım içerisinde elemanın boyutları geometriye bağlı olarak paket program tarafından otomatik veya boyutların kullanıcı tarafından tanımlanmasıyla belirlenir.

Yüklerin ve sınır koşullarının belirlenmesi: Bu adım genel olarak problemin tanımına uygun şekilde, yapıya verilen yüklerin ve sınır şartlarının (serbestlik derecelerinin belirlenmesi) uygulanmasıdır.

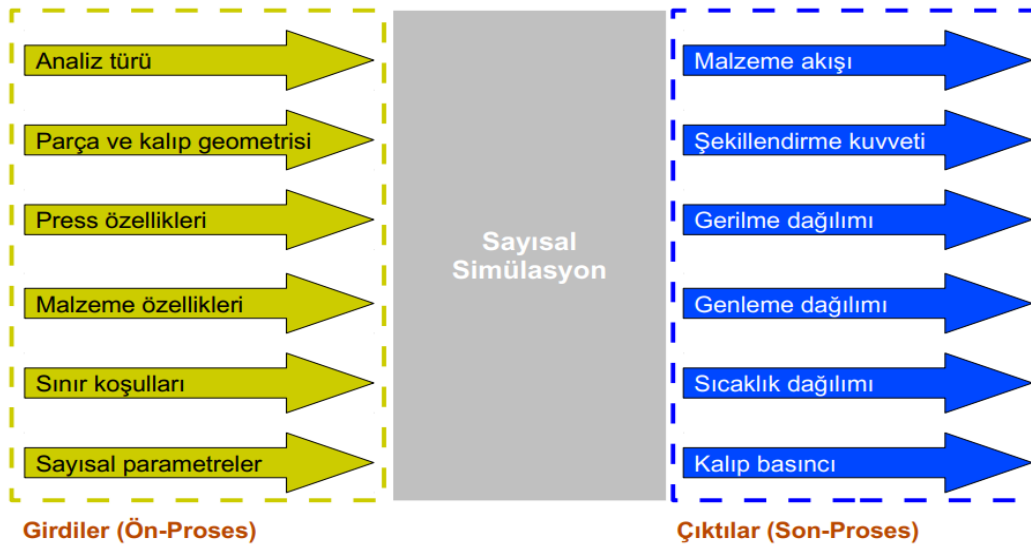
Sonlu elemanlar metodunun uygulama alanları;

- Makine/Uak/İnşaat/Otomotiv Mühendislikleri Uygulamaları,
- Yapısal Analizler (Statik, Dinamik, Lineer/Nonlinear),
- Gemi İnşaatı Sektörü,
- Termal, Akış Hesapları,
- Nükleer Enerji,
- Hidrolikte,
- Elektromanyetik Hesaplamalar,
- Biyomekanik Hesaplamalar,
- Medikal Uygulamalar

Sonlu eleman yönteminin doğruluğunu mukayese amacıyla deneysel ve analitik çözümlerde elde edebilmelidir. Birçok problem için yaklaşık çözümler, literatürde çizelgeler halinde sunulmuştur [48]. Sonlu elemanlar metodu ile analiz için şekil 4.4’de bir proses simülasyon aşamaları sunulmakta ve şekil 4.5’de Sayısal simülasyon, girdiler ve çıktılar şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.4. Proses simülasyon aşamaları.



Şekil 4.5. Sayısal simülasyon, girdiler ve çıktılar şematik gösterimi.

#### 4.1.2. Solution (Çözüm)

Çözüm işlemi kabaca, yükleri ve sınır koşulları belli olan modelin sonlu sayıda oluşturulan elemanları arası kurulan denklemlerin çözülmesi ve sonuçların ortaya

çıkartılmasıdır. Genel olarak kullanılan paket programlarda sonlu elemanlar çözücüsü 3 kısımdan oluşur. Bunlar ön çözücü, matematik motoru ve son çözücüdür.

Ön çözücü modeli okuyarak matematiksel şekilde formülize edilmesini sağlar. Aynı zamanda ön işlem aşamasındaki tüm parametreleri kontrol eder. Ön tanımlamalarda eksiklik durumunda matematik motoru devreye girmez. Modelin doğru olması sonucunda, çözücü devreye girerek eleman rijitlik matrisini oluşturur ve matematik motorunu çalıştırır. Böylelikle tüm düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler veya sıcaklık bulunur [47].

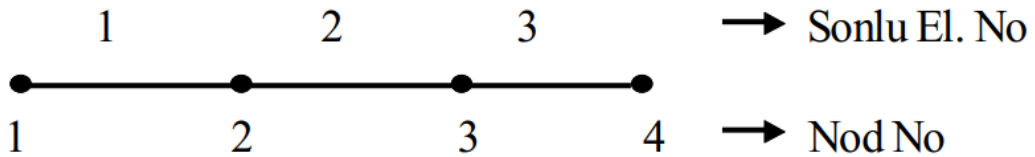
#### 4.1.3. Post Processing ( Son İşlemci )

Son işlemcide çözümlene sonunda incelenen büyüklüğün düğüm noktalarındaki değerlerinden hareketle ikincil değerler hesaplanır. Örneğin, düğüm noktalarında yer değiştirme değerlerinden genlemeler, genlemelerden gerilmeler hesaplanır. Bu sonuçlar düğüm noktası veya eleman bazında tablolar halinde listelenebildiği gibi, renkli grafiklerle görselleştirilebilir [47]-[49].

### 4.2. SONLU ELEMAN YÖNTEMİNDE ELEMENT TÜRLERİ

Modellemenin şekline göre eleman tipleri çeşitli olabilir. Sonlu eleman modeli tek boyutlu (çizgi şeklinde modelleme), iki boyutlu (düzlem şeklinde modelleme) ve üç boyutlu (katı model) olabilir [46].

#### 4.2.1. Tek Boyutlu Elementler

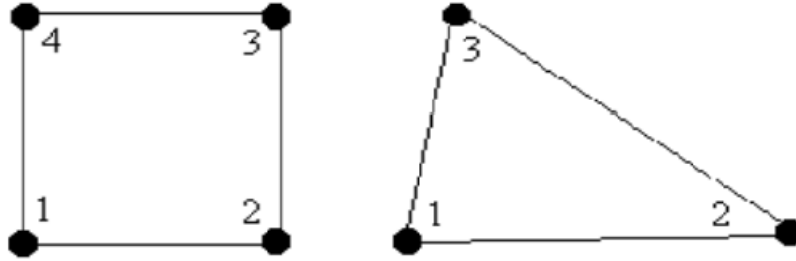


Şekil 4.6. Tek boyutlu problem element tipi.

Tek boyutlu elementler çizgisel ya da eğrisel elementlerden oluşmaktadır. Bir çizgisel elementi tanımlamak için minimum iki düğüme ihtiyaç vardır. Modelin hassasiyeti arttırmak amacıyla elementlerin düğüm noktalarında node (düğüm) noktaları tanımlanır.

Tek boyutlu analizlerde tek boyutlu elementler kullanılır. Diğer bir ifade ile çelik konstrüksiyon bir kafes sisteminin FEA modelinin oluşturulmasında tek boyutlu elementler kullanılır [43]-[49].

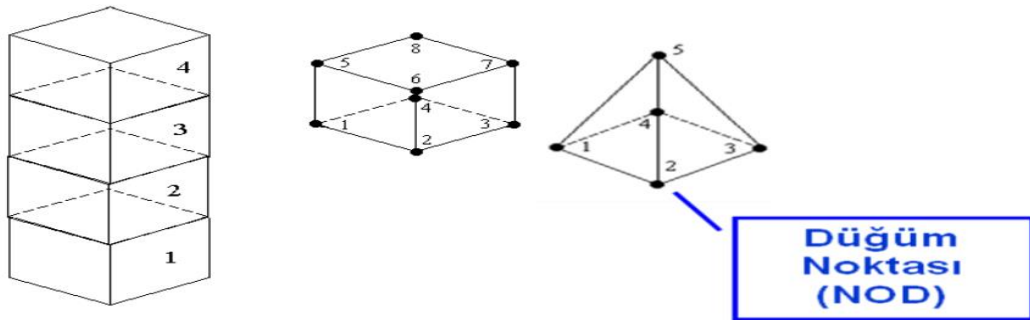
#### 4.2.2. İki Boyutlu Elementler



Şekil 4.7. İki boyutlu problem element tipi.

İki boyutlu yüzey modellerin meshlenmesinde iki boyutlu elementler kullanılmaktadır. İki boyutlu elementi tanımlamak amacıyla en az dört düğüm noktasına ihtiyaç vardır [43].

#### 4.2.3. Üç Boyutlu Elementler



Şekil 4.8. Üç boyutlu problem element tipi.

Özellikle hacimlerin sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında üç boyutlu elementler kullanılmaktadır.

Bir parçanın analizi yapılırken doğru sonucu elde etmek için en uygun bir şekilde sonlu elemanlara bölünmelidir. Sonlu elemanlara bölme işleminde ortamın boyutuna ve parçanın geometrisine uygun eleman şekli seçilmelidir. Problemin durumuna göre Sonlu elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilirler. Çoğunlukla, sonlu elemanın sınırları

düzgün olarak seçilir ama eğri sınırlı elemanların karşımıza çıktığı durumlarda olabilir [43].

### 4.3. ISI TRANSFERİ ANALİZİ

Kaynak işlemi sırasında termal alanı belirlemek için, ısı iletimi ve termal analizler olmak üzere iki farklı analiz gereklidir. Her iki analizi de etkileyen en önemli faktörler ısı girişi hızı, ısı kaynağının hareket hızı ve taban malzemesinin kalınlığıdır.

#### 4.3.1. Isıl Analizler

Isı akışının denge ilişkisinin denklemi;

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x}, \frac{\partial R_y}{\partial y}, \frac{\partial R_z}{\partial z} + Q(x,y,z,t)\right) = \rho C \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} \quad (4.9)$$

$R_x, R_y, R_z$  birim alandaki ısı akış oranları,

$T(x,y,z,t)$  geçerli olan sıcaklık,

$Q(x,y,z,t)$  iç ısı üretim oranı,

$\rho$  yoğunluk,

$C$  özgül ısı,

$t$  ise süreyi ifade etmektedir [50].

Model daha sonra Fourier ısı akış denklemini de dikkate alarak tamamlanır.

$$R_x = -k_x \frac{dT}{dx} \quad (4.10)$$

$$R_y = -k_y \frac{dT}{dy} \quad (4.11)$$

$$R_z = -k_z \frac{dT}{dz} \quad (4.12)$$

$k_x, k_y, k_z, x, y$  ve  $z$  eksenlerindeki ısı iletkenlikleri ifade etmekte aynı zamanda  $\rho, C$  parametrelerinde ısı iletiminin fonksiyonudur. Bu denklemleri (4.6) denkleminde işleme alırsak; [50]

$$\frac{d}{dx} \left( k_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( k_y \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( k_z \frac{dT}{dz} \right) + Q = \rho C \frac{dT}{dt} \quad (4.13)$$

(4.10) denklemi ısı iletimini katı cisme çevrildiği diferansiyel denklemdir. Başlangıç ve sınır şartlarının kabulleri ile de genel çözüm sağlanabilir.

Başlangıç şartları;

$$T(x,y,z,0) = T_0(x,y,z) \quad (4.14)$$

Sınır şartları;

$$\left( k_x \frac{dT}{dx} N_x + k_y \frac{dT}{dy} N_y + k_z \frac{dT}{dz} N_z \right) + q_s + h_c (T_\infty - T) + h_r (T - T_r) = 0 \quad (4.15)$$

$N_x, N_y, N_z$ , sınıra normali çizilen harici kosinüs,

$H_c$ , konveksiyon ile ısı transferi katsayısı,

$H_r$ , radyasyon ile ısı transferi katsayısı,

$q_s$ , sınır ısı akışı,

$T_\infty$ , çevre sıcaklığı,

$T_r$ , radyasyon ısı kaynağı sıcaklığını tanımlamaktadır [50].

Radyasyon ısı transferi katsayısı da şu şekilde ifade edilir;

$$h_r = \sigma \varepsilon F (T^2 + T_r^2) (T + T_r) \quad (4.13)$$

$\sigma$ , Stefan-Boltzmann sabiti,

$\varepsilon$ , etkin yayılım,

$F$ , konfigürasyon faktörü

iki zaman aralı öteleme yöntemi ile geçici sıcaklık hesabı;

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \quad (4.14)$$

Sıcaklığa bağlı malzeme katsayısını denklemi [32].

$$g = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\Delta t}^t g[T(\tau)] d\tau \quad (4.15)$$

Mekanik Model Analizi

Mekanik model, denge denklemi ve yapı denklemi olmak üzere 2 çeşittir.

Denge denklemleri

$$\sigma_{ij} + p b_i = 0 \quad (4.16)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (4.17)$$

$\sigma_{ij}$ , gerilme,

$b_i$ , kütle kuvvetini simgeler.

Yapı Denklemleri ( ısıl elasto - plastik malzemeler )

Isıl elasto – plastik malzeme modeli, Von Mises elastikiyet kriteri ile izotropik uzama sabitleştirme kuralına dayanır [50].

Gerilme – uzama ilişkileri;

$$[d\sigma] = [D^{ep}] [d\varepsilon] - [C^{th}] dT \quad (4.18)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (4.19)$$

$[D^e]$ , elastik rijitlik matrisi,

$[D^p]$ , plastik rijitlik matrisi,

$[C^{th}]$ , termal rijitlik matrisi,

$[d\sigma]$ , gerilme artışı,

$[d\varepsilon]$ , uzama artışı,

$dT$ , sıcaklık artışını ifade etmektedir.

Termal elasto-plastik analiz, non-lineer bir problem olduğundan dolayı, burada çoğalan hesaplama yöntemi kullanılır ve artan gerilimi Newton-Raphson metodu ile sağlayabiliriz [50].

#### 4.4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN AVANTAJI

Genel amaçlı kullanılan birçok sayısal yöntem olmasına rağmen sonlu elemanlar yönteminin tercih edilmesinin birçok sebebi vardır. Sonlu elemanlar yöntemini diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurları şöyle sıralayabiliriz;

- Sonlu elemanlar yöntemi diğer yöntemlere göre daha esnek ve kullanışlıdır ve hassas çözümler sunabilir.
- Sonlu elemanlar yöntemi değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir ek bir zorluk göstermez. Noktadan noktaya farklı özellik gösteren, non-lineer, anizotropik, zamana bağlı, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınabilir.
- Sonlu elemanlar yönteminde sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla

ele alınabilir.

- Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel olarak geliştirilebilir ve pek çok problemi çözebilmek için aynı model kullanılabilir.
- Yöntemin hem fiziksel anlamı hem de matematiksel temeli mevcuttur.
- Karmaşık geometrilere rahatlıkla uygulanabilir. (Analizler, parça büyüklüğü ve bilgisayar imkânlarıyla sınırlıdır.)
- Uygulama için herhangi bir tecrübeye ihtiyaç yoktur. Fakat daha önceden elde edilen bilgiler işleme aktarılabilir, test ve deney sonuçları kullanılabilir.
- Simülasyon ile parça imalatında ortaya çıkabilecek muhtemel hatalar en aza indirilmiş olur.
- Üretilmek istenen parçaya göre optimizasyon stratejisi geliştirilebilir. Elde edilen analiz sonuçları tasarım aşamasında parçaya uygulanabilir.

#### **4.5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN DEZAVANTAJLARI**

Günümüz şartlarında sonlu elemanlar yöntemi, bazı karmaşık olayların uygulanmasında zorluklar yaşamaktadır. Örneğin; temas problemleri, çatlama, kırılma davranışı, yumuşayan doğrusal olmayan malzeme davranışı örnek olarak verilebilir.

Sonlu elemanlar yöntemi ancak malzeme parametreleri iyi tanımlanmışsa gerçekçi sonuçlar verir. Bu yöntemin uygulanması genellikle büyük bilgisayar belleğine ve zaman gereksinim duyar. Yapılan çözümleme işleminde doğru sonuç elde edebilmek için sürekli ortamın çok sayıda elemana bölünmesi ve çok sayıda ki giriş bilgileri hatasız olmalıdır. Bu bölümdeki bir hata doğru sonuca ulaşmamızı engeller. Diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi, sonlu elemanlar yönteminde alınan sonuçlar dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır [51].



## 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tüm kaynak işlemlerinde birleştirme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Malzemenin ısıl tepkisi; bazen artık gerilme, çarpılma ve içyapıdaki değişikliklerinden dolayı malzemenin mekanik özelliklerinin değişimi gibi yapısal problemlere sebep olmakta ve birçok olumsuzluğu beraberinde getirmektedir. Bu sebeple kaynak işleminin gerek tasarımında, gerek uygulama aşamasında olası hataların önüne geçmek için iyileştirmeler yapılmıştır. Önceki zamanlar sonlu elemanlar yönteminin güvenilirliği test edilmiş ve gerçek sonuçlarla sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan yaklaşık sonuçların karşılaştırılmasına gidilmiştir.

1984 yılında Goldak yaptığı çalışmada, kaynak mühendislerinin kaynak bölgesi hakkındaki bilgilerini basit bir yöntemle göstermek istemiş, ancak bu çalışma basit bir problemten daha uzun ve günümüzdeki birçok yöntem ve deneysel verilerin regresyon analizinden daha güvenilir sonuçlar vermiştir [52].

Tülbentçi; Kaluç; aktif gaz altında ergiyen elektrod ile kaynak, teknolojinin gelişmesiyle birlikte önemli adımlar atılmış. Geçtiğimiz yıllarda gazaltı kaynağı yapılırken koruyucu gaz karışımların yapılan araştırmalar ve incelemeler sonucunda, alaşımsız ve yüksek alaşımlı çeliklerin kaynağı sırasında bu tür koruyucu gazların mekanik özelliklerini arttırdığı, sıçramaların azaldığı, kaynak dikiş profilinin düzeldiği ve nüfuziyetin arttığı saptanmıştır [37]- [53].

Brown ve Sonng; kaynak bölgesi ile yapısı arasındaki etkileşim neticesinde sıcaklık farklılıkları, genleşme ve çekme farklılıkları görülmektedir. Böylelikle önemli etki olan çarpılmaya yol açabilmektedir. En çok karşılaştığımız durumlarda oluşan gerilmeye ve çarpılmaya yapının katkısı önem arz etmektedir ve bu durum sadece kaynak bölgesinin simülasyonu ile belirlenenden çok daha farklıdır. Bazı çarpılma modelleri, özellikle boyuna gerilmeler sebebiyle oluşan burkulma (buckling), kaynak doğrultusuna dik düzlem içindeki iki boyutlu modeller yoluyla tanımlanamaz. Bununla birlikte kompleks yapıların termo-mekanik kaynak simülasyonlarını yapmak için üç boyutlu bir modelin oluşturulması kullanışsız ve analitik çözümü engelleyicidir [54].

Momahhad S. Davoud; MIG/MAG kaynak işlemi yapılma aşamasında oluşan zamanla endeksli ısı dağılımı ve soğuma sırasında oluşan mikroyapı, mekanik özellikler ve kalıcı gerilmeler üzerine yapmış olduğu çalışmasında, ABAQUS sonlu elemanlar programı ile 2 ve 3 boyutlu olarak tahminler yapmış ve deneysel verilerle mukayese etmiştir. Bu çalışma sonlu elemanlar modeli, gizli ısı, malzeme özelliklerine bağlı sıcaklık dağılımı, iletim ve ışıınım sınır şartlarını içermiştir. Deneysel veriler ve sonlu elemanlar modellenmesi birbirleriyle örtüşmüştür [55].

Fındık; yaptığı çalışmada sonlu elemanlar çözüm yönteminde her aşama önemlidir ve bir sonraki sonucu beraberinde getirmektedir. İlk olarak geometrik model oluşturulur. Yapıya uygun eleman seçilir. Meshlemenin doğru yapılması, başlangıç sınır şartlarının doğru belirlenmesi modelin doğru sonuç vermesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıklamıştır. Paslanmaz çeliklerde Metal İnert Gaz (MIG) kaynağı sırasında oluşan ısı etkileri incelemek için, Sonlu elemanlar metodunu kullanarak ANSYS programında deneysel şartlara uygun 3 boyutlu modellemeler yapılmış ve deneysel sonuçlarla mukayese edilmiştir. Deneysel ve ANSYS sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbiri ile oldukça benzer olduğu görülmüştür [2].

Kaynak metalinin yapısı, malzemenin kimyasal bileşimi ve soğuma esnasındaki dönüşümün bir sonucudur. Az alaşımlı, düşük karbonlu, çelik malzemelerin kaynak metali ana yapısı ferrittir ve "östenit-ferrit faz dönüşümü sıcaklığına bağlı olarak bir, çok ferrit morfolojisi oluşabilir [56]–[58]. Orta karbonlu, çelik malzemelerin kaynak metali, hızlı soğuma sonucunda, çoğunlukla kolonsal martenzitik bir yapı oluşturur. Kaynak metalinde oluşan kolonların uzunluğu boyunca olan yönlenme, kaynak havuzundan ısı akışının yönüne işaret eder [59].

Michaleris ve Sun; ısı germe tekniği sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen ısı analiz sonuçlarını doğrulamak amacıyla termokupl ölçümleri deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış. Analiz sonucunda meydana gelmesi düşünülen kalıntı gerilmeler delik delme yöntemi ile ölçülmesi sağlanmıştır [60].

Michaleris ve DeBicari; kaynak işlemi ile oluşan distorsiyonlar sayısal analiz yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı kaynak metotları ve prosedürler incelendiğinde kaynakta oluşan çarpılmaları minimum seviyeye indirmek amaçlanmıştır. Analiz ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, sonlu elemanlar yöntemi doğrulanmıştır [61].

T bağlantılar, çelik konstrüksiyonlu yapılarda en çok karşılaşılan bağlantı yöntemidir. Aynı zamanda boru bağlantılı veya boru plaka bağlantılı kaynaklı birleştirmelerde ara sıra T bağlantı şeklinde modellenerek gerilme analizi kolaylaştırılır [62]. Sonlu elemanlar analiz programlarının gelişmesi ile birlikte, kaynaklı bağlantılarda oluşan bölgesel gerilmeler ile yorulma dayanımının tespitine yönelik çalışmalar da belli artış gözlenmiştir [63]–[69].

Bajpei, Chelladurai ve Ansari, AA5052 ve AA6061 alüminyum esaslı plakaların kaynaklı birleştirilmesinde sıcaklık dağılımı, enine-boyuna artık gerilmeleri ve distorsiyonları belirlemek için gazaltı kaynağı kullanarak deneysel bir araştırma yapmışlardır. Sonuçlar sonlu elemanlar temelli analiz programı ANSYS kullanılarak sayısal verilerle doğrulanmıştır. İletim, konveksiyon ve radyasyona bağlı ısı yayılımı göz önünde bulundurulmuştur. Deneysel çalışmalarda artık gerilme ve distorsiyonları ölçmek için X ışını kırınımı yönteminden yararlanılmıştır. Sonuç olarak; deneysel ve sayısal verilerin uyumlu olduğu görülmüştür. AA6061 plakasının AA5052 plakasına göre daha yüksek enine ve boyuna artık gerilmelere ve daha az çekmeye sahip olduğu görülmüştür [70].

Meo ve Vignjevic; kaynağı yapılmış alüminyumlu plakaların kaynak işlemi süresince oluşan parçadaki sıcaklık dağılımları, çarpılmalar ve artık gerilme bölgelerinin önceden tahmin etmek hedeflenmiştir. Sonuçta değerlerin birbirine uygunluğu gösterilmiştir [71].

Wu ve ark.'nın çalışmasında, alın kaynak metodu kullanılarak birleştirilen iki çelik plakanın sonlu elemanlar analizi alın kaynaklı birleştirilmesi metoduyla analizi yapılmıştır. FE analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, termal analiz işlemi uygulanarak plakadaki kaynak prosesi boyunca sıcaklık dağılımını elde edilir. Gerilme analizi, termal analizden ortaya çıkan sıcaklıklar ile geliştirildi. ANSYS Sonlu elemanlar yöntemi ile Termal ve gerilme analizleri uygulanmıştır. Yayımlanmış deneylerden ve sonlu elemanlar analizi oluşturulan kalıntı gerilme ve çarpılmaların sonuçları bu çalışmadakiler karşılaştırılarak modelin doğruluğu kanıtlanmıştır [72].

Özçatalbaş tarafından yapılan çalışmada, kompleks kaynaklı yapıların imalatı yapılırken kaynak işlemi sürecinde ve sonrasında ortaya çıkabilecek çarpılmaların belirlenmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve uygulamaya geçilmiştir. kaynaklı birleştirme prosesinde oluşan distorsiyonların ölçülmesi ve bu metodun uygulanması ile kompleks

kaynaklı yapıların kaynak sıralarının optimizasyonu yapılabilir. Bu metod ile kaynağı yapılan konstrüksiyon yapının meydana getirdiği çarpılma kuvvetlerin ölçülmesine dayanır. Yapının çarpılma eğilimleri Üç boyutlu ölçülen kuvvetlerin yönleri ve şiddetlerine bağlı olarak 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 işlemleri ile maruz kaldığı çarpılma kuvvetleri vs. tespit edilip konstrüksiyon için en uygun kaynak sıraları ve planları oluşturulabilir. Bu prototip 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 [73].

Bedir, Batıgün ve Gür'ün yapmış oldukları çalışmada gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak köşe kaynağı ile birleştirilen S235 yapı çeliği plakalarına uygulanan sabitleme sistemi ile yapıda ortaya çıkan deformasyon üzerindeki etkisi incelenmiş ve deformasyonun önceden tayin edilebilirliği incelenmiştir. Sabitleme sistemi ile hangi yüzeye ne kadar etki ettiği anlaşılmaya çalışılmış ve farklı sabitleme sistemleri ile S235 yapı çeliğinde meydana gelecek olan deformasyon, “Weld Planner” yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar ortamında hesaplanmış, elde edilen sonuçlar gerçek deformasyon değerleriyle karşılaştırılarak doğrulanmaya çalışılmıştır [74].

Altınkök, St-37 kalitedeki malzeme üzeri 3 farklı (TIG, MAG ve Tozaltı) çeşit kaynak yöntemi ile birleştirme işlemi uygulayarak malzemelerin ısı özellikleri ve sıcaklığa göre değişimleri ve kaynaklı numunelerin makro yapılarını deneysel olarak incelemiştir. Bilgisayar ortamında sayısal olarak modellenmesi sonlu elemanlar metoduyla gerçekleştirilip ısı gerilmeleri ve termal analiz hesaplamaları yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ve sayısal modelleme sonuçları karşılaştırıldığında birbiri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [75].

Yıldız bu çalışmada, MAG kaynak yöntemi kullanılarak alümin kaynağı ile birleştirilen

ST-37 çelik plakaların deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerle, Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılan analizden elde edilen verilerin mukayesesi yapılmıştır. Parçalar arası mesafe, gaz debisi ve akım değerleri için farklı kaynak parametreleri seçilerek kaynatılan parçalarda sıcaklık dağılımı ve çarpılma miktarı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde, ele alınan sistem ile ilgili parametreler ve ortam koşulları ile ilgili girilen bilgiler gerçeği ne kadar yansıtırsa elde edilecek sonuçlar o kadar doğru olur. Yapılan bu çalışmada elde ettiğimiz sıcaklık dağılımı ve deplasman miktarları ile deneysel çalışmada edinilen veriler birbirine yakın olduğu, genel bir değerlendirme yapıldığında ortam şartlarının, modellemenin ve ölçüm hatalarının en aza indirilmesi ile çok daha iyi sonuçlar alınabildiği ortaya koyulmuştur [76].

Savaş, sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle alın kaynağı yapılmış AA 2024-T3 alaşımlarının ısı transferi ve CFD analizi yardımıyla modellenmesi üzerine çalışılmıştır. Isı transferi ve CFD kısmı aynı zamanda çözülmektedir. Literatürde yapılan mevcut deneylerden faydalanılarak sıcaklık dağılımı doğrulanmıştır. Yapılan testler sonucunda Deneysel ve model sıcaklık değerleri arasındaki ortalama hata değeri yüzde 5'i geçmediği görülmüştür. Tüm plakadaki sıcaklık dağılımı sadece bir kaynak koşulu için, metal akış sahaları ise değişik kaynak koşulları için gösterilmiştir. Kaynaklı imalat yapan firmalar, meydana gelen ısı miktarını, sıcaklık dağılımını ve takım etrafındaki metal akışını maliyetli deneyler yapmadan önceden tahmin edebilirliği sonucuna varılmıştır [77].

Erol ve Esener; Malzeme kalınlığı arttıkça çarpılma azalır. İlerleme hızı arttıkça çarpılmanın azaldığı gözlemlenmiştir. İkinci adımında ise gerçekleştirilen proses nümerik olarak hesaplanarak her bir proses parametresi için kaynak işlemi bilgisayar ortamında simüle edilmiş ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak tahmin hassasiyeti incelenmiştir. Analizde kalınlık ve ilerleme hızı dikkate alınarak iki farklı parametre kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalarda Simufact Welding programı kullanılmış ve tahmin değerlerinin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir [78].

Darendeliler tarafından yapılan çalışmada; Metal levha çekme işlemlerinin sayısal yöntemlerle çözümü, sanayide zaman, işgücü ve malzeme kaybına neden olan birden fazla kalıp üretiminin en aza indirilmesi sayısal yöntemlerin en etkin ve yaygın olanı sonlu elemanlar yöntemiyle sağlanmaktadır. Bu yöntemle malzemenin şekil değişimini

ve buna bağı olarak kalınlık değişimini saptamak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, eksene göre simetrik parçaların çekme işlemi sırasındaki şekil değişimi üç boyutlu bir sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu grlmştir. Sonuçlar arasındaki farklılığın sebebi sürtünme koşullarının tam olarak modellenememesinden kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir [79].

Topal yaptığı çalışmada; alın kaynağı ile birleştirilen düşük karbonlu elik levhaların Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak analizini gerçekleştirmesidir. Düşük karbonlu elik iş parçaları kaynatılırken çok sık çarpılmalar görülür. Bu arpılmaların önüne geçmek için önceden tahmin etmek gerekir. Kaynak sırasında karşımıza çıkan bu farklılıkları görebilmek için MSC Marc paket programı ile analiz gerçekleştirilmiş, benzetim ve deney üzerinden sıcaklık ve distorsiyon ölçümleri yapılmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışmalar karşılaştırıldığında, sonuçların yakın olduğu sonucuna varılmıştır [80].

Benli, Kaynağı yapılmış parçalarda artık gerilme ve çarpılmalar meydana gelir. En önemlisi bunları önceden tahmin ederek üretime büyük avantajlar sağlarız. Sonuca varmak için yapılması gereken en önemli adım deneysel çalışmalardır. Fakat kaynak ısı tesiri altında kalmış olan malzemelerin karmaşık davranışına yol açan sebepleri incelemeye ve birleşik etkilerini birbirinden ayırmaya yeterli olmamaktadır. Kaynak işlemi yapılmış malzemeler Sonlu elemanlar yöntemiyle modellenirken, kurallar çerçevesinde gerçekleşir. Bu çalışmada, alın kaynağı metodu ile kaynatılan numunelerin artık gerilmeleri hem sayısal analiz hem deneysel çalışmalarla doğruluğu kanıtlanmıştır [50].

Vatansever ve Esener, sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin sac metal şekillendirme simülasyon süresi ve hassasiyetine etkisinin tespit edilmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda doğrusal olmayan sac metal şekillendirme simülasyonlarında geniş bir çerçeveden analiz edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde süreyi etkileyen en çarpıcı parametrenin sonlu elemanlar modelinin simetri durumu olduğu gözlemlenmiştir. İncelemeler gerçekleştikten sonra süreyi minimum seviyeye getiren parametre ile hassasiyetten ödün vermeden zamandan %90 oranında tasarruf sağlanmıştır. Hesaplama parametrelerinin simülasyon süresine görünür şekilde etki vardır. Bu nedenle doğru parametrelerle çalışılması simülasyon hassasiyetinden

ödün vermeden simülasyon süresinin verimli bir şekilde azaltılmasına imkan sağlamaktadır [81].

Şen tarafından yapılan çalışmada, aynı kalitedeki ve aynı boyutlardaki iş parçaları kaynak robotu ile farklı hızlarda diğer parametreler sabit kalacak şekilde, termokupullar ile sıcaklık ölçümü yapılarak birleştirilmiştir. Delik delme metodu kullanılarak parçadaki kalıntı gerilmeler incelenmiştir. Tasarlanan 3 boyutlu katı modelin SEM analizi ile Von Mises gerilim değerleri, maksimum sıcaklık ve ısınma hızı incelenmiştir. Deneyler sonucunda termokupullarla elde edilen sıcaklık değerleri oldukça yüksektir. Farklı hız parametreleri kullanılarak yapılan birleştirme işleminde hız arttıkça daha düşük kalıntı gerilme elde edildiği görülür. Deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların uyumlu olduğu ve kaynak hızı arttıkça ısı girdisinin azaldığı dolayısıyla kalıntı gerilimlerin azaldığı sonucuna varılmıştır [82].

Teng ve Lin, Tek pasolu ark kaynak yöntemi ile kaynatılan çelik plakaların ANSYS sonlu eleman yöntemi ile artık gerilmeler belirlenmiştir. Aynı zamanda plakalarda görülen artık gerilmeler üzerine kaynak arkının iş parçası boyunca hareketi, iş parçasının boyutu, dış mekanik kısıtlamalar ve belirlenen süre ve sıcaklıkta ön ısıtma işleminin etkileri tartışılmıştır [83].

Karaoğlu ve Karaoğlu tarafından yapılan çalışmada T-bağlantıların kaynak eşiğindeki gerilme yığılma faktörleri sonlu elemanlar yöntemiyle, çekme ve eğilme yükleri altında incelenmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarından elde edilen verilere göre, T-bağlantılı kaynaklı yapılarda eşik radüsünün arttığı durumda gerilme yığılma faktörünün etkin bir şekilde azalmasını sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür [84].

Wu, Syngellakis ve Mellor tarafından yapılan çalışmada, alın altına birleştirilen iş parçalarında, kaynak işlemi sırasında oluşan artık gerilmelerin simülasyonu elde edilmiştir. Deneyler ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve modelin doğruluğuna karar kılınmıştır. Modellemenin daha basit hale gelebilmesi için radyasyon ve faz dönüşümleri dikkate alınmamış ve çalışma süresi minimum seviyeye getirilmiştir [50].

Fricke, Keim ve Schmidt, oluşan artık gerilmelerin sayısal çözümlerle modellenmesi ve analizi tartışılmıştır. Olası gerilmelerin büyük çapta zararları doğurabileceği vurgulanmıştır. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağı sırasında oluşan artık gerilmeler

hesaplanarak deneysel çalışmalarla sayısal analiz çalışmaların doğruluğu kanıtlanmıştır [85].

elik ve Bayramoğlu, kaynak işlemi sırasında malzemeye ısı geçişi olur ve malzemenin ısıl tepkisi artık gerilme, distorsiyon ve içyapıdaki değişikliklerden dolayı mekanik problemleri ortaya çıkarmaktadır. Distorsiyonlar, kaynaklı parçalarda boyutsal farklılıklara sebep olur. Bu sebeple kaynak işleminden sonra boyutsal farklılıkları gidermek için düzeltme işlemleri yapılır. Kaynak uygulanmadan önce mekanik problemlere yol açan nedenleri önceden tahmin etmek büyük avantaj sağlar. Bu alışmada, SYSWELD sonlu eleman paket programı ile modellenerek oluşabilecek çarpılmaları ve artık gerilmeleri önceden tahmin etmek ve aynı zamanda kaynak parametrelerinin en uygun şekle sokmayı sağlamaktır. Sonuçlar incelendiğinde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [86].





## **6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER**

Alaşımsız yapı çelikler makineleri imalatı, genel konstrüksiyon levhaları, muhtelif makine parçası imalatı, kara ve demiryolu araçları imalatı için genel yapı çelikleri uygulamalarında kullanılan, yüksek kaynaklanabilirlik özellikleri bakımından tercih sebebidir.

Kaynak esnasında T profilinde kaynatılan numunelerin sıcaklık ölçümleri lazer infrared termometreyle yapılarak ve birleştirilen numunelerin ısı dağılımı ve termal analizlerin tespiti için SİMUFACT WELDİNG paket programı kullanılarak simülasyon uygulaması yapılmıştır. Bu çalışmada; Gazaltı ark kaynak yöntemiyle T profilinde birleştirilen iş parçalarının, deneysel çalışmalar ile elde edilen verilerin bilgisayar ortamında gerçekleşen sonlu elemanlar analiz programı ile termal analiz hesaplamalarının gerçekleştirilerek modellenmesi ve sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla kaynak işlemi uygulanan bölgede sıcaklığın etkisiyle metalin özelliklerini etkilediği yani ITAB bölgesinin mukavemet özelliklerinin tespiti için MAG kaynak yöntemi seçilmiştir. Bu çalışmada, S355J2+N yapısal çeliklerin koruyucu gaz altında, T profilinde kaynak işlemi sonrasındaki meydana gelen açısız distorsiyonların incelenmesi, Düzce Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü'nün deney laboratuvarı' da gerçekleştirilmiştir.

Kaynak ile birleştirilen iş parçalarının kaynak bölgesinin deneysel çalışmaları incelenerek, kaynak parametreleri verileri kullanılarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece, modelleme ve deneysel sonuçlardan elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneyde kimyasal özellikleri Çizelge 6.1'de ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. S355J2+N Yapısal çelik kimyasal bileşim (% Ağırlık).

| Malzeme  | C    | Mn   | P     | Ni   | Al    | S     | Si   | Fe    |
|----------|------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| S355J2+N | 0,17 | 1,34 | 0,011 | 0,05 | 0,028 | 0,009 | 0,02 | Kalan |

Çizelge 6.2. S355J2+N Yapısal çelik mekanik özellikleri.

| Çekme Mukavemeti<br>(MPa) | Akma Mukavemeti<br>(MPa) | Sertlik(HB) | Uzama<br>(MPa) |
|---------------------------|--------------------------|-------------|----------------|
| 555                       | 430                      | 189         | 26             |

Yapısal çeliklerin mekanik özellikleri açısından akma/çekme mukavemeti, sertlik ve uzama değerleri, malzemenin davranışı açısından büyük önem arz etmektedir.

Deneyisel çalışmalarda kullanılmak üzere rutil özlü kaynak teli seçilmiştir. Kullanılan tele ait kimyasal bileşimleri (Ağırlıkça %) Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Deneylerde kullanılan kaynak telinin kimyasal bileşimleri.

| Kaynak Teli                        | C    | Si   | Mn   | P     | S     |
|------------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Rutil Özlü Kaynak Teli (E71 T-1C7) | 0,06 | 0,50 | 1,30 | 0,015 | 0,015 |

## 6.2. DENEYLERDE KULLANILAN METOT

### 6.2.1. Deneyin Yapılışı

Alaşımsız çeliklerde en yaygın olarak MAG (Metal Aktif Gaz) ark kaynağı kullanılmaktadır. Sürekli tel ile gazaltı kaynağında, gerekli olan ısı enerjisi malzeme ile sürekli tel arasında oluşturulan elektrik arkıyla ortaya çıkar. Kaynak torcu, kaynak bölgesine ilave teli besler, aynı zamanda koruyucu gazı da kaynak bölgesine göndererek kaynak bölgesinin ve kaynak banyosunun havanın kötü etkisinden korunmasını sağlar.

Kaynak Makinesi, sürekli tükenen tel elektrot ile ana malzeme arasında elektrik arkını oluşturmak, telin ve koruyucu gazın devamlı bir şekilde kaynak bölgesine gönderilmesini sağlamaktır. MAG güç kaynaklarında kaynak voltajı, kaynak akımı v kaynak hızı olmak üzere 3 parametre ayarımız vardır.

Kaynak işlemi EN 287–1 standardına göre sertifikalandırılmış olan Düzce Yiğitler Çelik A.Ş’den İlhan YİĞİT tarafından gerçekleştirilmiştir. Askaynak Master MIG 350 model

gazaltı kaynak makinesi kullanılmıştır. Numuneler, T profili şeklinde kaynatılmadan önce üzerindeki şekil bozuklukları giderilmiştir. Kaynak öncesinde numuneler birbirlerine puntalanmış ve T profil geometrisi oluşturulmuştur. Kaynak öncesi oluşturulan T profilleri Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. T profillerin kaynatılması işlemi.

#### 6.2.1.1. Deney Parametreleri

Puntalama işlemi yapıldıktan sonra, T profillerin kaynatılarak birleştirme işlemine geçilmiştir. Kaynatma işlemi Gazaltı kaynak yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Açısal çarpılma, distorsiyon oluşumunu görebilmek adına profiller farklı akımlarda, farklı voltajda ve farklı kaynak hızlarında kaynatılmışlardır. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri Çizelge 6.4’ de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan kaynak parametreleri.

| Kaynak Yöntemi | Akım Değeri (Amper) | Voltaj Değeri (V) | Kaynak Hızı (mm/sn) |
|----------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| Gazaltı kaynak | 270 - 255 - 200     | 34 – 32 - 30      | 9,18 - 7,7 - 6,5    |

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 [36].

#### 6.2.1.2. Isı Girdisi Hesaplamaları

Kaynak işlemiyle birleştirilen parçaların başarısını etkileyen bir diğer faktör kaynakta ısı girdisidir. Yüksek ısı girdisiyle; kaynak metalinde çatlak, delik oluşumu, daha fazla çarpılma ve şekil değişimi meydana gelir. Düşük ısı girdisiyle; nüfuziyet azlığı ve yetersiz erime, daha az çarpılma ve şekil değişimi görülür.

Kaynaklı birleştirilen numunelerin ısı girdisi hesaplamaları denklem 6.1’ deki formül kullanılarak yapılmıştır. (Gazaltı kaynak yönteminde kullanılan ark verimi 0,8’dir.)

$$Q = \frac{V \times I \times \eta \times 60}{S} \quad (6.1)$$

Q: Kaynak ısı girdisi (Joule/mm)

V: Kaynak gerilimi (Volt)

I: Kaynak akımı (Amper)

S: Kaynak hızı (mm/dakika)

$\eta$ : ark verimi (sabit katsayı)

#### 6.2.1.3. Metalografik İncelemeler

Metalografik incelemeler ve Optik incelemeler için farklı parametrelerde kaynakla birleştirilen numunelerden metalografik inceleme için kaynağın orta bölgelerinden birer örnek alınmıştır. Numunelerin mikro yapılarını inceleme amacıyla her numunenin en düzgün yüzeyi zımparalama makinesi ile 400, 800, 1200 kumluk zımpara kâğıtlarıyla yaklaşık 20 dakika boyunca zımparalanıp 6 mikronluk parlatma diski ile 10 dakika parlatılarak pürüzleri alınmıştır. Parlatılan numuneler laboratuvarında hazırlanan 10 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml asetik asit, 15 ml HCl, ve 2 damla gliserinden oluşan dağlayıcı ile dağlanarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Optik incelemeler, Düzce Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Bölümü’nde, çeşitli kaynak araştırmaları yapmak üzere kurulan deney laboratuvarında bulunan Lieca DFC 320 dijital kamera bağlantılı DM 4000M optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır.

#### 6.2.2. Sayısal Çözüm

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 [78].

Sayısal çözüm için, deney sonuçlarından alınan veriler sınır şartları olarak kabul edilerek, çözüm yöntemi olarak Sonlu Elemanlar kullanan SİMUFACT WELDİNG programı kullanılmıştır. Programda, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerle aynı ölçülerde katı model oluşturulmuş ve malzemenin sıcaklığa bağlı ısı kapasitesi, termal iletim katsayısı, gizli ısı ve yoğunluğu malzeme özelliği olarak girilmiştir. Bölüm 5’de anlatılan SOLID 87 tip sonlu eleman sistemi ile düğüm noktalarına bölünen modele kızıl ötesi yöntemi ile ölçülen sıcaklık değerleri sıcaklık zaman tablosu olarak girilmiş ve ölçüm alınan bölgelerin düğüm noktalarına sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

Sonlu elemanlar metodu ile bir problemin çözümünde belli bir sıra takip edilir. Bu sıra genel olarak aşağıdaki gibidir;

#### 6.2.2.1. Ön işlem

Bu bölümde problemin modeli kurulur. Model kurulurken yapılan işlemler ise genel olarak şöyledir:

Başlık Verme:

Burada konuyla ilgili başlık verilmektedir.

Eleman Tipinin Seçimi:

İki boyutlu bir şekil, en basit olarak üçgen elemanlara bölünebilir.

Eğer ele alınan cismin kenarları doğrusal değilse, bu eğrilik küçük elemanlar kullanılarak belli bir yaklaşıkla ifade edilebilir. Ortaya çıkabilecek bazı sorunlarda çözüm bölgesinin üç boyutlu olarak ele alınması gerekebilecek durumlar olabilir. Bu durumda sonlu eleman tiplerinin de üç boyutlu olarak seçilmesi gerekir [87].

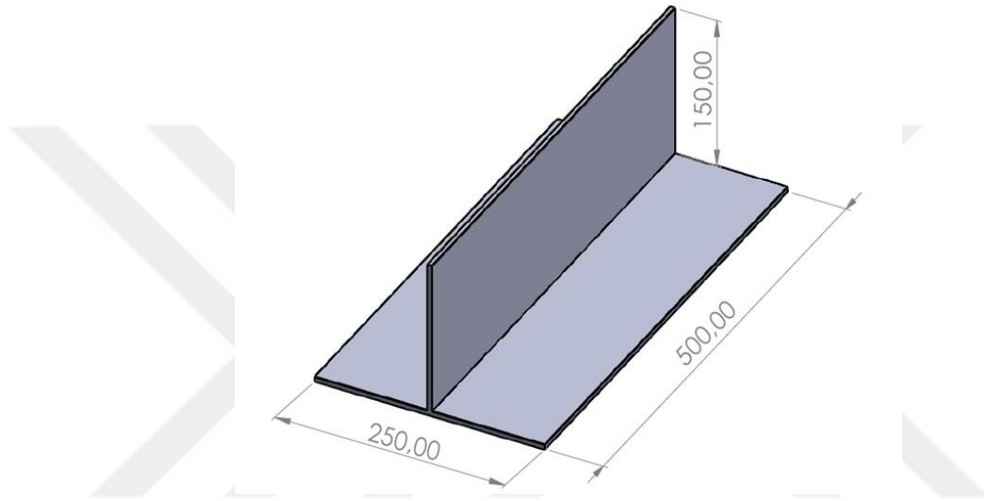
Malzeme Özelliklerinin Girilmesi:

Kurulan modelin malzemesine ait bazı özellikler girilir. Elastiklik modülü, poisson oranı, akma dayanımı, ısı genleşme katsayısı gibi [87].

#### 6.2.2.2. Model Geometrisinin Oluşturulması

Model geometrisi iki şekilde oluşturulmaktadır. Birincisi, programda hazır bulunan geometrilerin birbirleri ile kesiştirilmesi, eklenmesi, çıkarılması gibi işlemlerle oluşturma; ikincisi ise çizgilerin ve alanların kullanıldığı klasik yöntemlerle geometri oluşturmadır [87].

Solidworks paket programında model geometrilerinin oluşturulması şekil 6.2.’de oluşturulan model geometrileri verilmiştir.

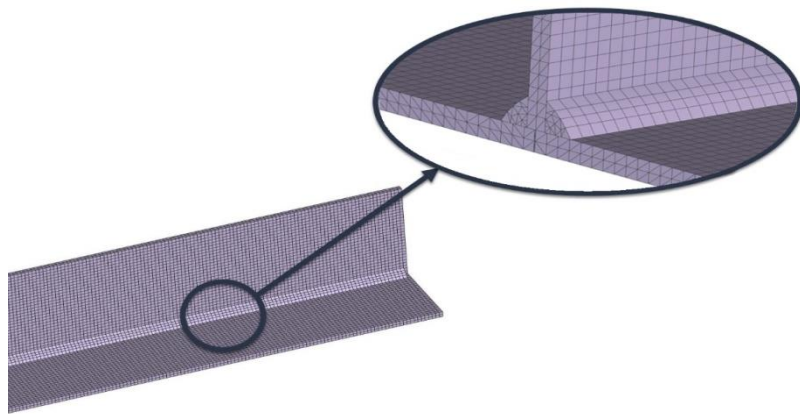


şekil 6.2. Sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan katı model geometrileri.

#### 6.2.2.3. Modelin Elemanlara Bölünmesi

Oluşturulan model, çözüm için gerekli olan sonlu elemanlara bölünür [87].

Modelin sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulması. şekil 6.3’ de oluşturulan ağ yapısı örnekleri verilmiştir.



şekil 6.3. Ağ yapısı T profil kaynağı.

#### 6.2.2.4. *Yüklerin Uygulanması ve Çözüm*

Bu bölümde, analiz tipleri ve opsiyonlar tanımlanır, somada yükler uygulanır. Eğer yükü basamaklamak gerekliyse bu basamaklar girilir ve son olarak da çözüm gerçekleştirilir [87].

#### 6.2.2.5. *Çözümlerin Değerlendirilmesi (Son İşlem)*

Bu bölümde, elde edilen ve veri tabanında toplanan çözümler okutulur ve okutulan sonuçlar, görüntüler veya listeler halinde çıktı olarak alınır [87].

Günümüzde birçok kaynak uygulamasında ısıнын tesiri altındaki bölgenin ve kaynak edilen malzemedeki ısı enerjisi girdisinin kaynak kalitesine etkileri söz konusu olmaktadır. Kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesi üzerindeki sıcaklık dağılımları kaynağın yapılmasına bağlı olarak ihtiyaçlar doğrultusunda belirlenmesi gerekebilmektedir. Bu sebeple bir önceki bölümde yapılan deneysel kaynak uygulamaları ile ilgili olarak bir malzeme üzerindeki kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık dağılımları sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar üzerinde analiz edilmektedir. Sonlu eleman analizi için SIMUFACT WELDING programından yararlanılmıştır.



## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 7.1. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI

#### 7.1.1. Kaynaklı Yapıların Mikroyapı İnceleme Sonuçları

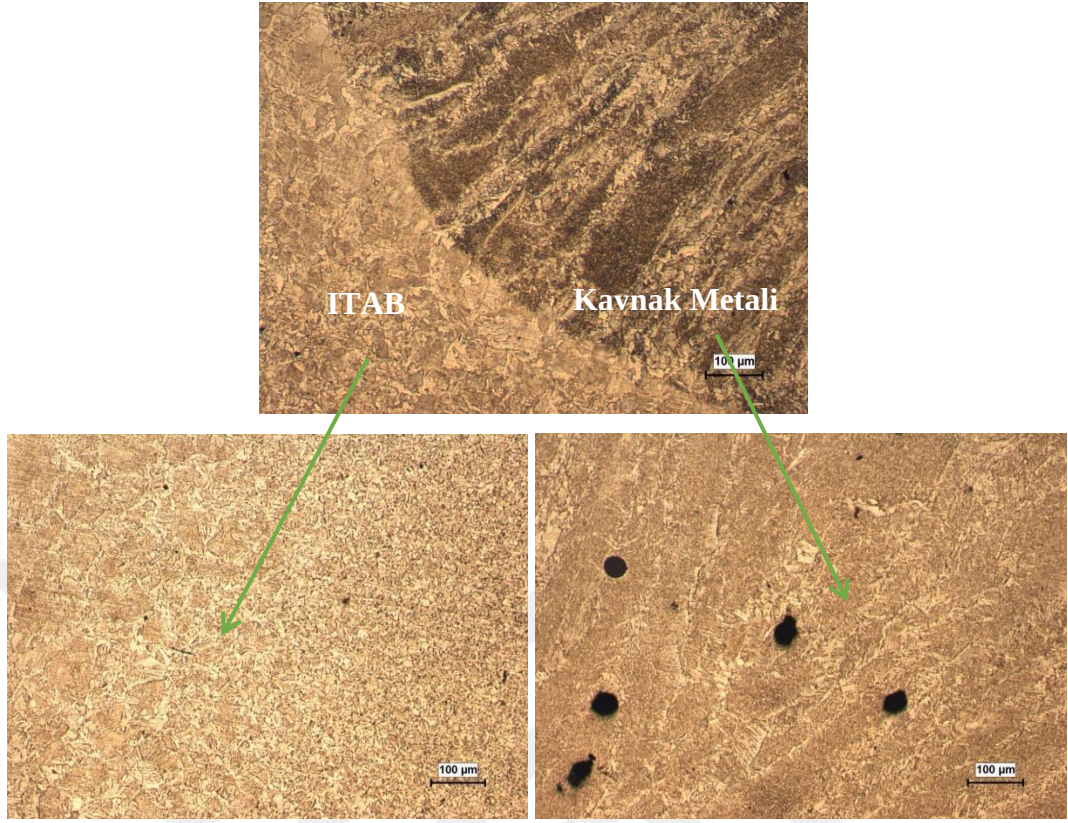
Gazaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin, birleşme yerinde meydana gelen yapısal değişiklikler, bu numunelerden alınan mikroyapı görüntüleri analiz edilerek değerlendirildi. Belirlenen kaynak akımı ve kaynak hız parametreleri kullanılarak mikroyapı incelemeleri yapılan numunelerin literatüre uygun olarak üç farklı bölge tespit edilmiştir. Uygulanan kaynak işlemlerinden sonra bu bölgeler; ana metal, kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgelerin (ITAP) mikroyapılarını göstermektedir. Bu üç bölgeden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.2 - 7.10'da gösterilmiştir.



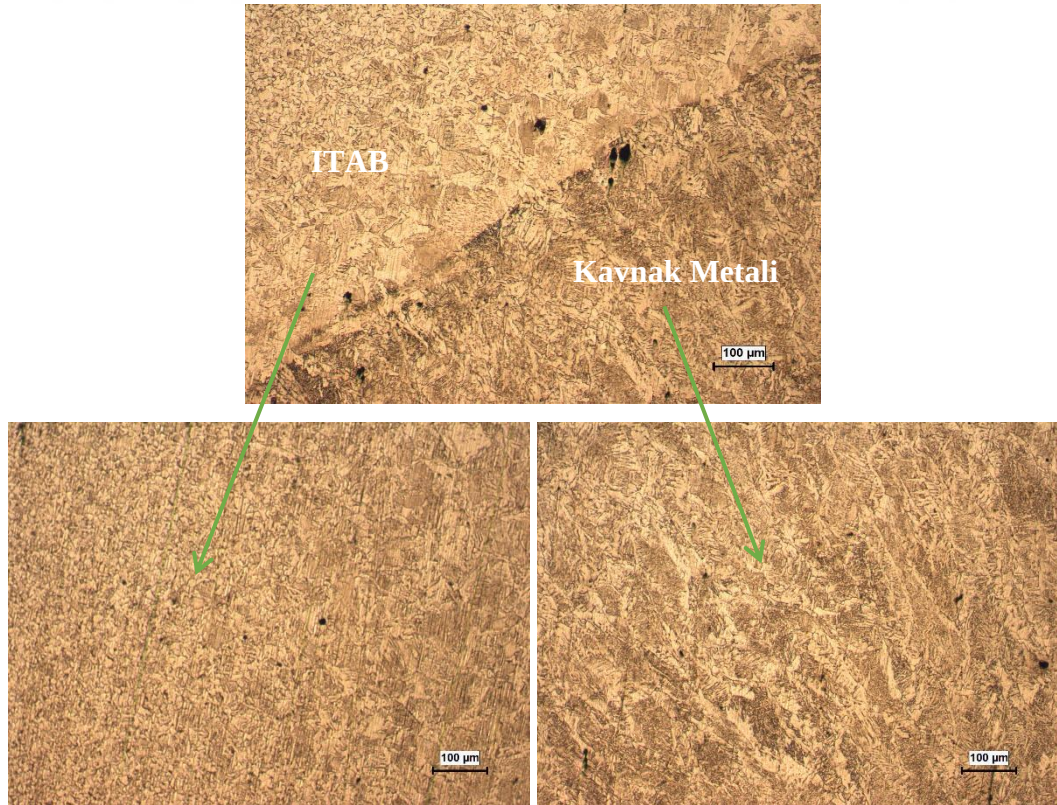
Şekil 7.1. Ana metalin mikroyapı görüntüsü.

Ana metalin mikroyapı görüntüsünde gösterildiği gibi ortalama 10 mikron civarında olan tane boyutu homojen şekilde dağılmıştır. Şekil 7.1 incelendiğinde beyaz alanlar da “ferrit”, siyah alanlar ise ince yapılı perlit yapıların varlığı görülmektedir. Karbon miktarının düşük olmasından kaynaklı istenmeyen martenizit yapıların varlığına rastlanmamıştır. Kaynak sırasında oluşan ısı girdisi iri ve ince taneli yapı gözlemlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde benzer sonuçlar elde edilmiştir.



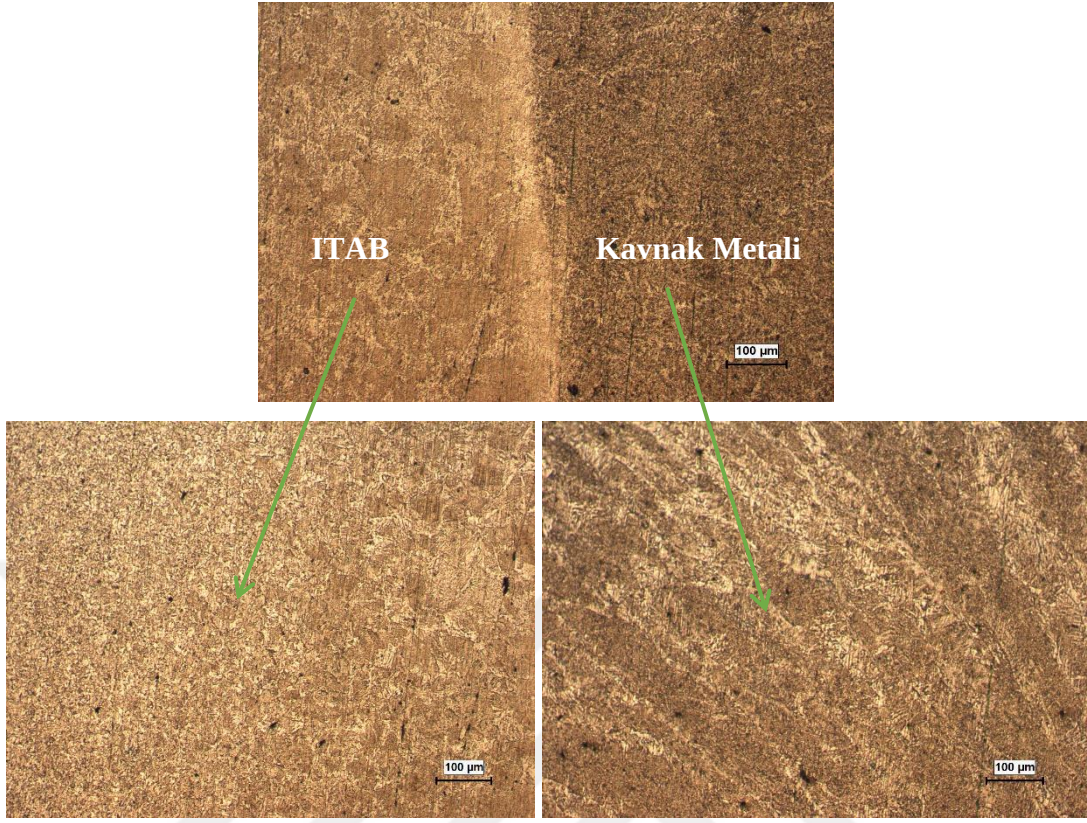


Şekil 7.2. 1 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.

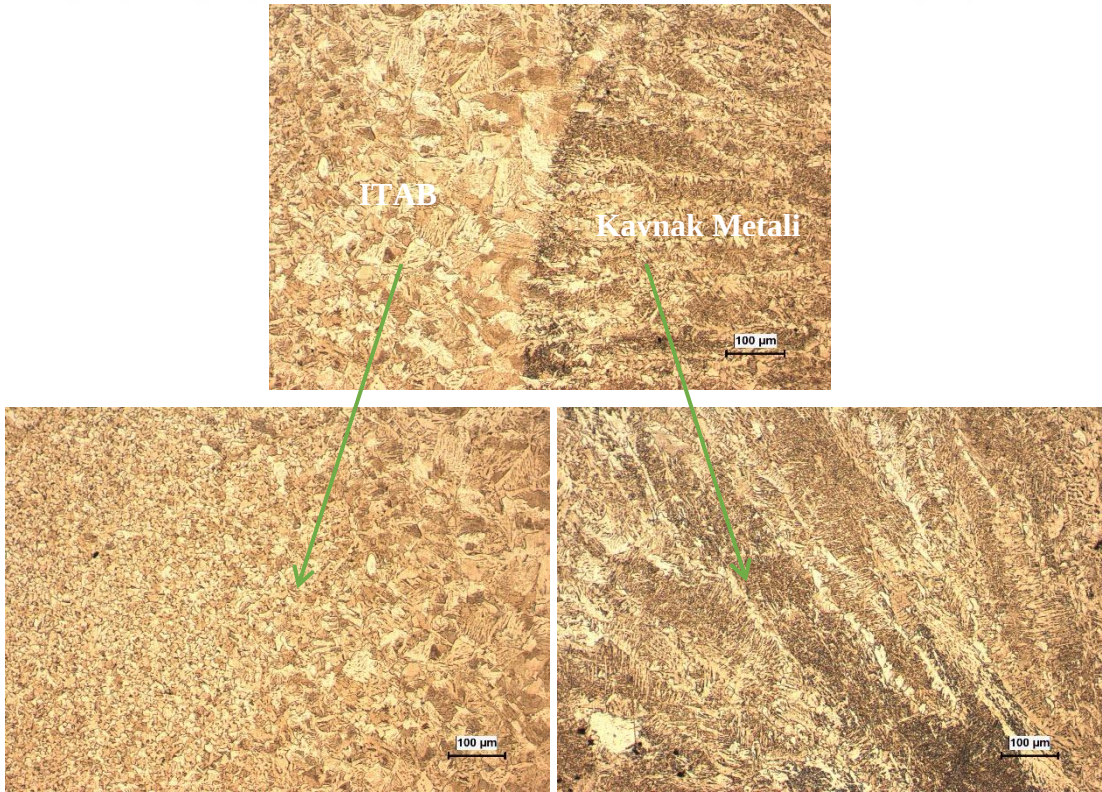


Şekil 7.3. 2 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.



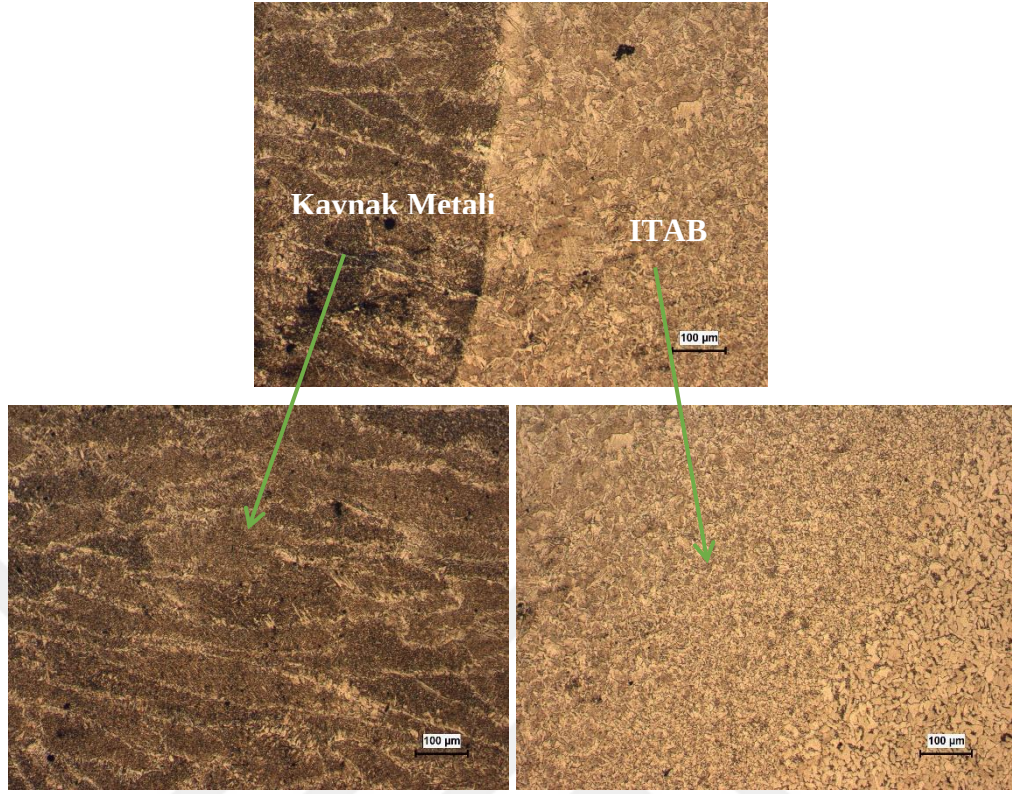


Şekil 7.4. 3 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.

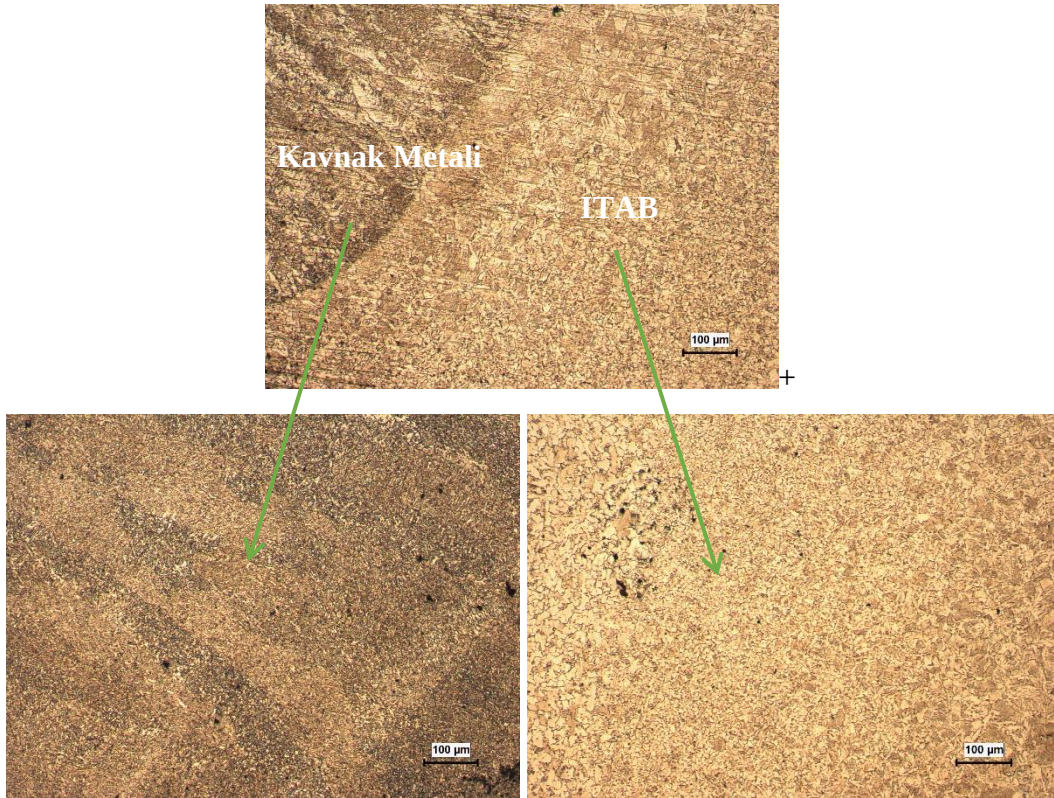


Şekil 7.5. 4 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.



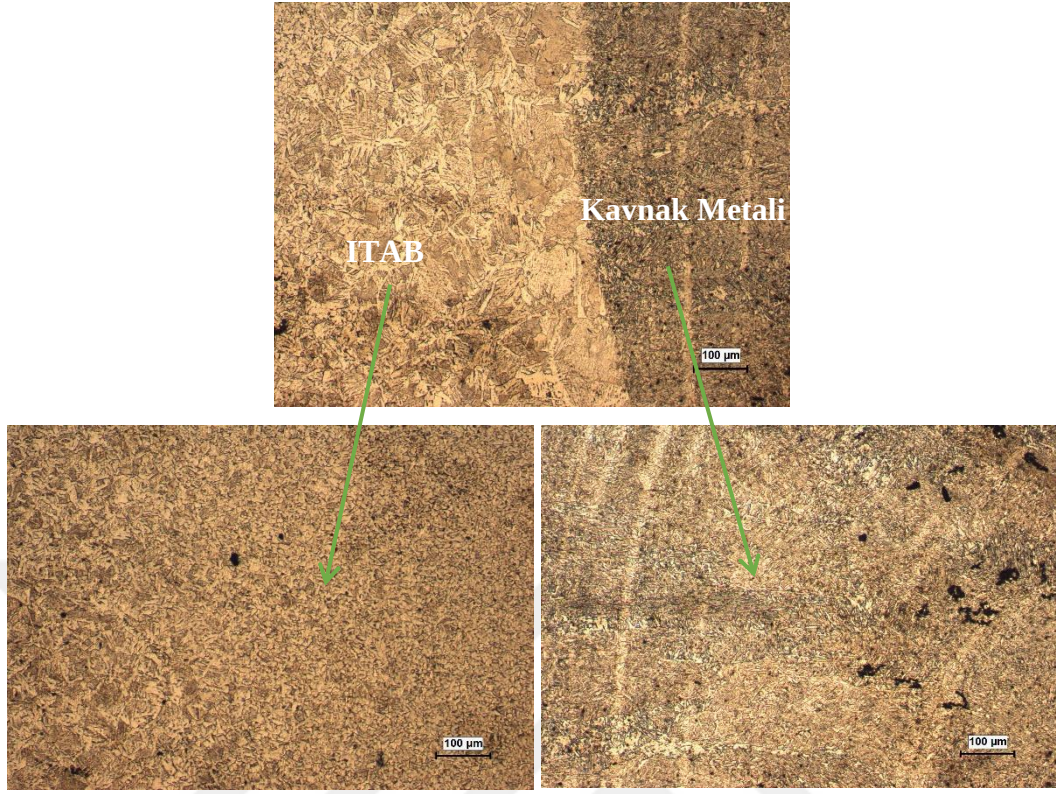


Şekil 7.6. 5 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.

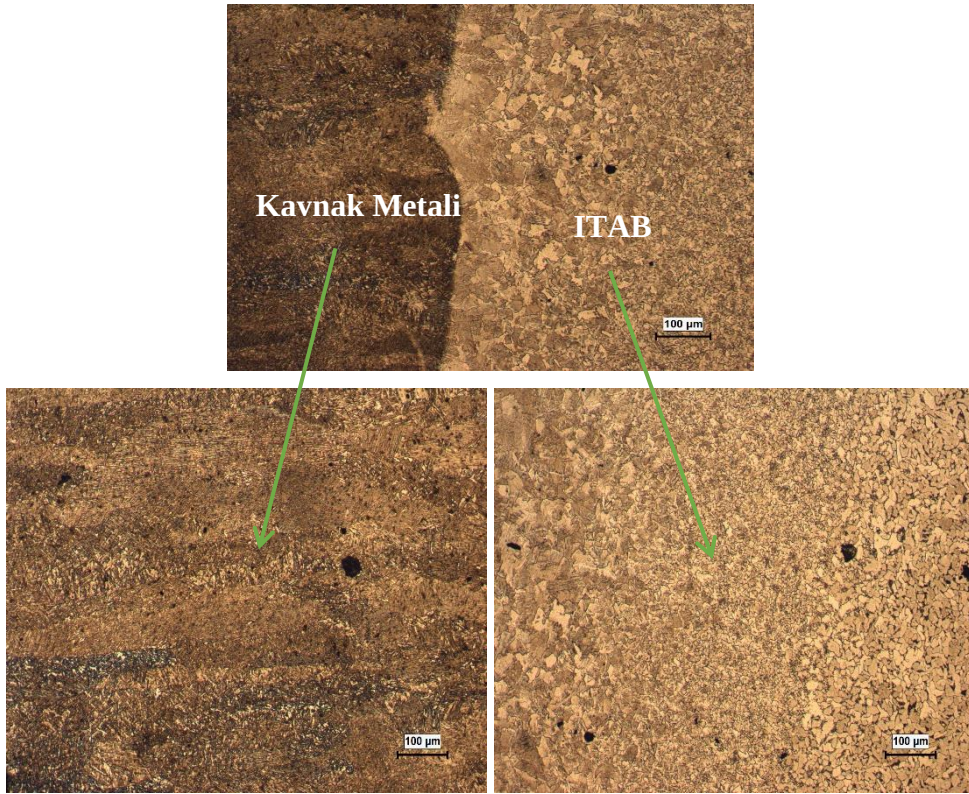


Şekil 7.7. 6 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.



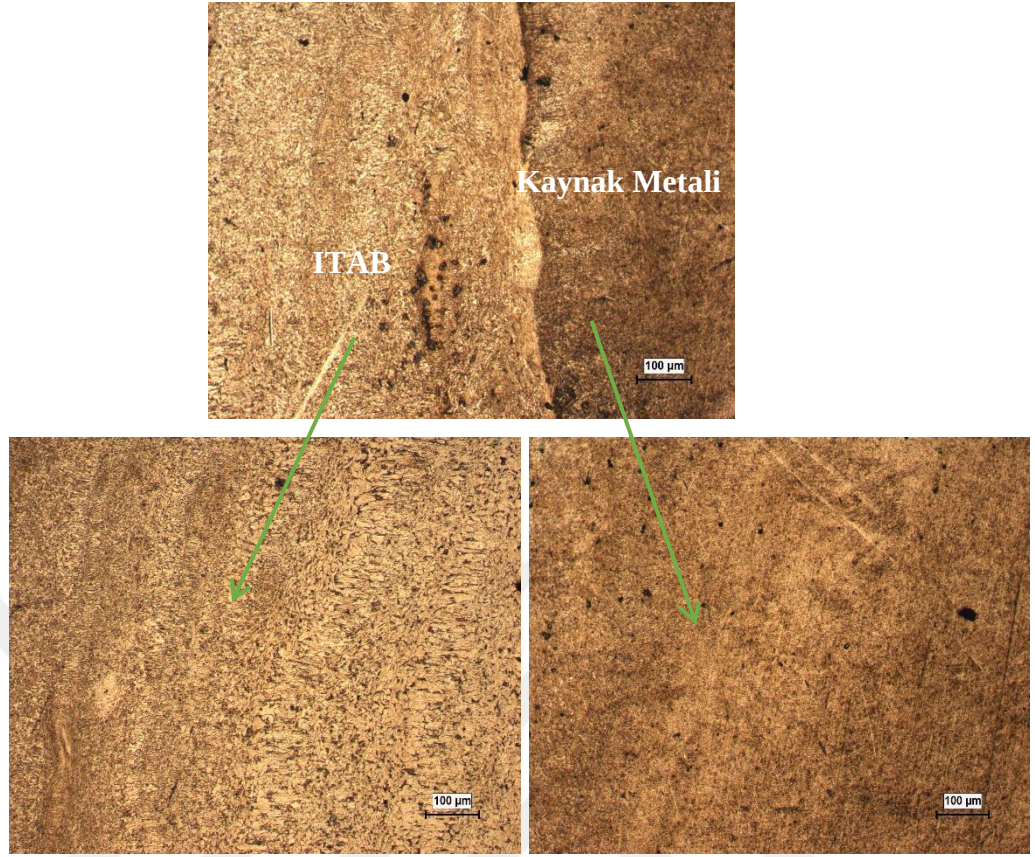


Şekil 7.8. 7 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.



Şekil 7.9. 8 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.





Şekil 7.10. 9 Numaralı S355J2+N çeliğinin mikroyapı görüntüleri.

Literatürde incelemeleri sonucunda kaynak hızının düşük olduğu durumlarda kaynak metali mikroyapısının kaba, yüksek hızlarda ise kaynak metali mikroyapısının daha ince tanelerden meydana geldiği tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada benzer mikroyapılar elde edilmiştir. Ayrıca bazı kaynak bölgelerinde porozite oluşumu varlığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak kaynak esnasında meydana gelen gaz kesilmesi ve kaynak bölgesinde yeterince temizlik yapılmaması verilebilir.

## 7.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARI

S355J2+N çelikten gazaltı kaynak yöntemleri ile T profili üretiminde, gerçekleştirilen açısal distorsiyon deneyleri sonucunda elde edilen çarpılma değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deney tasarımı ve çarpılma.

| Numune No | Tel Tipi | Gerilim (V) | Akım (A) | Kaynak Hızı (mm/sn) | Isı Girdisi (J/mm) | Gerçek Distorsiyon Miktarı (mm) | Simülasyon Distorsiyon Miktarı (mm) |
|-----------|----------|-------------|----------|---------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1         | SG2      | 34          | 270      | 9,18                | 800,00             | 2,51                            | 2,66                                |
| 2         | SG2      | 34          | 270      | 7,7                 | 953,77             | 2,87                            | 2,92                                |
| 3         | SG2      | 34          | 270      | 6,5                 | 1.129,85           | 2,93                            | 2,98                                |
| 4         | SG2      | 32          | 255      | 9,18                | 711,11             | 2,42                            | 2,4                                 |
| 5         | SG2      | 32          | 255      | 7,7                 | 847,79             | 2,59                            | 2,56                                |
| 6         | SG2      | 32          | 255      | 6,5                 | 1004,31            | 2,72                            | 2,79                                |
| 7         | SG2      | 30          | 200      | 9,18                | 522,88             | 2,36                            | 2,33                                |
| 8         | SG2      | 30          | 200      | 7,7                 | 623,38             | 2,48                            | 2,45                                |
| 9         | SG2      | 30          | 200      | 6,5                 | 738,46             | 2,54                            | 2,51                                |



Şekil 7.11. 1 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma.

1 numaralı numunenin 270 amperde, 9,18 mm/sn kaynak hızında ve 34 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,51 mm kadar açısal çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,66 mm kadar açısal çarpılma olduğu görülmüştür.



Şekil 7.12. 2 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısıl çarpılma.

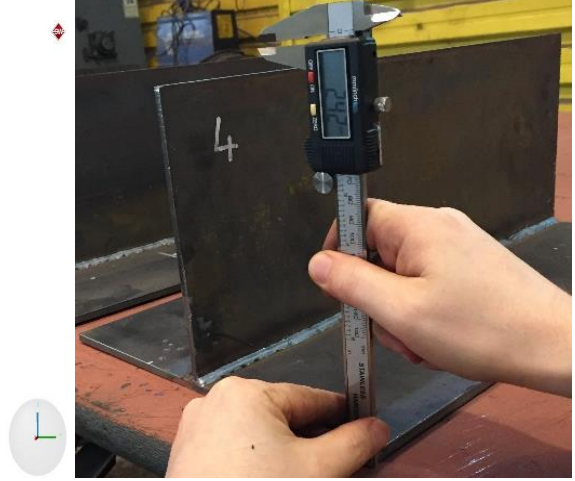
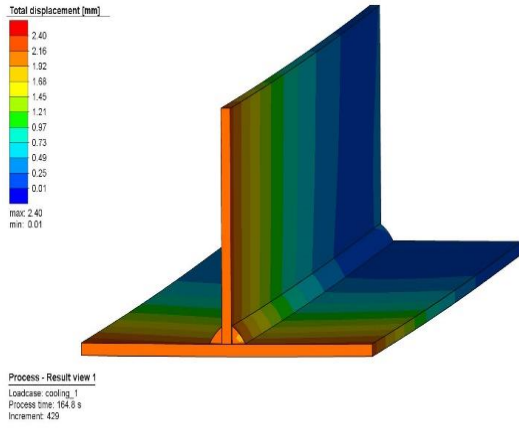
2 numaralı numunenin 270 amperde, 7,7 mm/sn kaynak hızında ve 34 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,87 mm kadar açısıl çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,92 mm kadar açısıl çarpılma olduğu görülmüştür.



Şekil 7.13. Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısıl çarpılma.

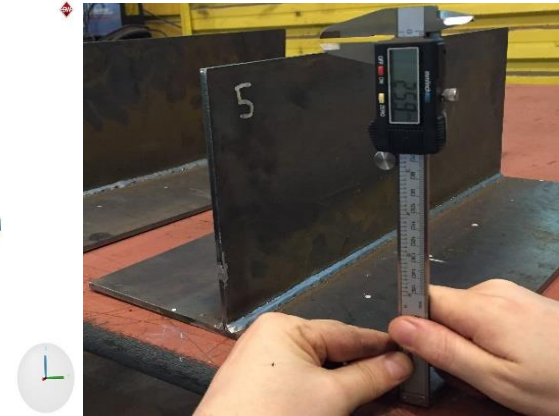
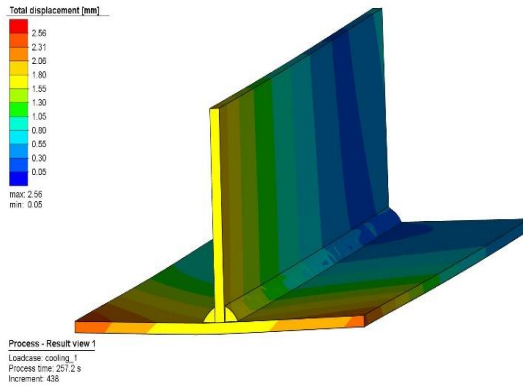
3 numaralı numunenin 270 amperde, 6,5 mm/sn kaynak hızında ve 34 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,93 mm kadar açısıl çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,98 mm kadar açısıl çarpılma olduğu görülmüştür.





Şekil 7.14. 4 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma.

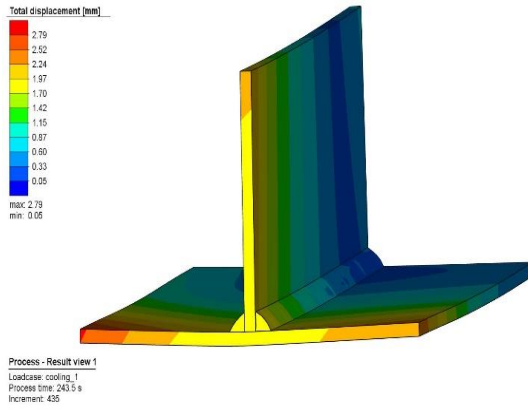
4 numaralı numunenin 255 amperde, 9,18 mm/sn kaynak hızında ve 32 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,42 mm kadar açısal çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,40 mm kadar açısal çarpılma olduğu görülmüştür.



Şekil 7.15. 5 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma.

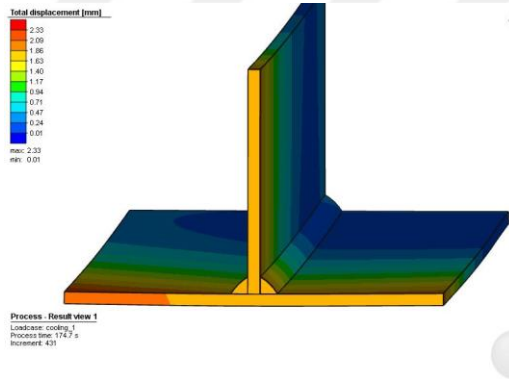
5 numaralı numunenin 255 amperde, 7,7 mm/sn kaynak hızında ve 32 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,59 mm kadar açısal çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,56 mm kadar açısal çarpılma olduğu görülmüştür.





Şekil 7.16. 6 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma.

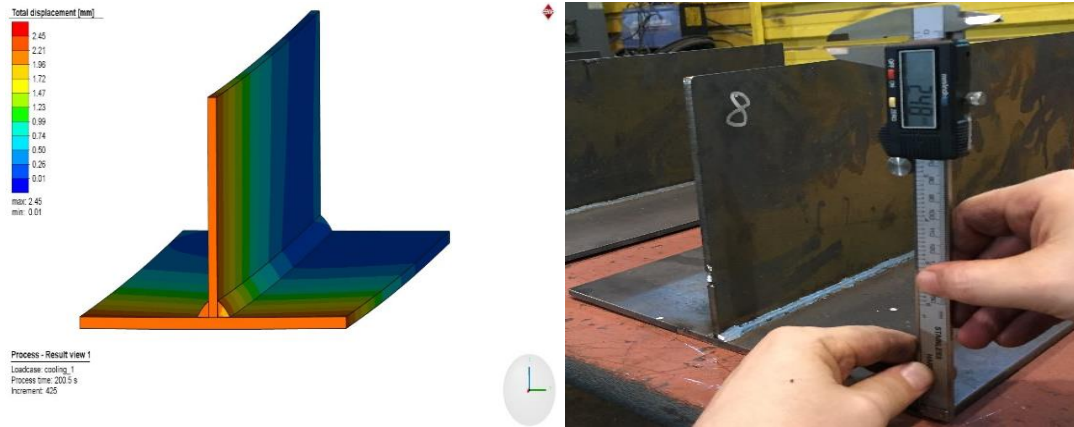
6 numaralı numunenin 255 amperde, 6,5 mm/sn kaynak hızında ve 32 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,72 mm kadar açısal çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,79 mm kadar açısal çarpılma olduğu görülmüştür.



Şekil 7.17. 7 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısal çarpılma.

7 numaralı numunenin 200 amperde, 9,18 mm/sn kaynak hızında ve 30V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,36 mm kadar açısal çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,33 mm kadar açısal çarpılma olduğu görülmüştür. Şen, tarafından yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçlar elde edilmiş; kaynak hızı arttıkça ısı

girdisinin azaldığı dolayısıyla kalıntı gerilimlerin azaldığı sonucuna varılmıştır [82].



Şekil 7.18. 8 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısıl çarpılma.

8 numaralı numunenin 200 amperde, 7,7 mm/sn kaynak hızında ve 30 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,48 mm kadar açısıl çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık olarak 2,45 mm kadar açısıl çarpılma olduğu görülmüştür.



Şekil 7.19. 9 Dikey plaka ve kaynak tarafındaki yatay plakanın kaynak sonrası görülen açısıl çarpılma.

9 numaralı numunenin 200 amperde, 6,5 mm/sn kaynak hızında ve 30 V gerilim değerinde yapılan kaynak işlemi sonucunda parçada çarpılma olduğu tespit edilmiştir. Dijital kumpas ile yapılan distorsiyon miktarı ölçümleri sonucunda 2,54 mm kadar açısıl çarpılma olduğu, Sonlu elemanlar yönteminde yapılan analizde ise yaklaşık

olarak 2,51 mm kadar açılmal çarpılma olduğu görülmüştür.

Şekil 7.11-7.19’da malzemede kaynaklı birleştirme sırasında oluşlan ısı girdisi ile meydana gelen çarpılma durumunun yazılım ile simüle edilmiş hali birlikte verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yapılan simülasyon ile gerçek kaynatılan numunenin benzer oranda distorsiyona uğradığı görülmektedir. Bu durum yapılan simülasyon çalışmasının da geçerliliğini doğrulamaktadır.

Meo, Vignjevic, Erol ve Esener tarafından yapılan çalışmalarda, “Sonlu eleman metodu kullanılarak kaynak prosesinin nümerik bir analizi gerçekleştirilmiştir. Nümerik analiz sonuçları deneysel testlerle karşılaştırılmış ve sonuçta elde edilen değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir” [13-14]. Literatürlere incelendiğinde elde edilen sonuçlarla bizim çalışmamız benzerlik göstermektedir.

Durgutlu ve arkadaşları, kaynak hızının nüfuziyete ve mikroyapıya etkisi araştırılmış. Deney alışmaları sonucunda, kaynak hızının optimum değerden daha az veya daha fazla olması durumlarında nüfuziyetin azaldığı tespit edilmiştir.

Momahhad S. Davoud, elik ve Bayramoğlu, Karaoğlu ve Karaoğlu, yapmış oldukları Sonlu elemanlar programı ile 2 ve 3 boyutlu olarak çalışmalar yapılarak ve deneysel verilerle mukayese edilmiştir. Elde edilen verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır [59].

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kaynak işlemi sırasında kaynak bölgesinde oluşan ısı çevrim, artık gerilmeler ve distorsiyon bölgenin içyapısını değiştirmekte mekanik ve metalürjik problemlere yol açmaktadır. Kaynaktan sonra oluşan distorsiyonlar malzemenin kalitesini etki ederek düzgün çalışmasını engeller ve malzemelerin emniyetini önemli ölçüde etkiler. Bu bakımdan dolayı kaynak işlemi sırasında oluşan artık gerilmeler gerilim giderme yöntemiyle giderilebilir. Fakat bu işlemlerin deneysel olarak ortaya çıkması çok uzun zaman alabilir ve maliyetlidir. Bu sebeplerden dolayı proje aşamasında malzemede oluşabilecek artık gerilmeleri önceden tahminin yapılması ve bunları engelleyecek tasarımın yapılması büyük önem kazanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, Gazaltı kaynak yöntemiyle T pozisyonunda kaynatılarak birleştirilen numunelerin kaynak prosesi sonrasında sonlu elemanlar analizi ile proses tahmini gerçekleştirilmiş ve proses parametrelerinin kaynak sonrası çarpılmaya etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Sonuçlar incelendiğinde deneysel çalışma sonuçları ile sonlu elemanlar yönteminin sonuçlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.
- S355J2+N malzemenin ana metal mikro yapı görüntüleri incelendiğinde karbon miktarının düşük olması nedeniyle martenzitik yapıların varlığına rastlanmamıştır. Kaynak sırasında oluşan ısı girdisiyle ısıdan etkilenen bölgelerde iri ve ince taneli yapı gözlemlenmiştir.
- Kaynak bölgesine ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kaynak hızı arttıkça nüfuziyetin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Deneylerde kullanılan 9,18 mm/sn, 7,7 mm/sn ve 6,5 olmak üzere üç farklı kaynak hız parametreleri kullanılmıştır. Kaynak hızının artmasıyla ısı girdisi azalır. 9,18 mm/sn kaynak hızı, 200 Amper ve 30 Volt ile kaynatılan parçalarda düşük ısı girdisi sebebiyle daha az çarpıldığı gözlemlenmiştir.
- Isı girdisinin en yüksek olduğu (1.129 J/mm), 3 Nolu numunede gerçek çarpılma

değeri 2.93 mm olarak ölçülmüştür. Simüle edilen değeri ise 2,98 mm olarak tespit edilmiştir. En düşük ısı girdisi 522 J/mm ile 7 nolu numunede ölçülmüştür. Bu numunede gerçek çarpılma değeri 2.36 mm olarak ölçülmüştür. Simüle edilen değeri ise 2,33 mm olarak tespit edilmiştir.

- T kaynak yöntemiyle kaynatılan numunelerin kullanılan farklı parametreler ile birlikte farklı çarpılma değerlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda ve sonlu elemanlar analiz yönteminde, 270 amper ve 6,5 mm/sn ile birleştirilen numunelerde en yüksek çarpılma değeri görülmüştür.
- Kaynaklı imalat işlemlerinde özellikle yapı imalatı için kullanılan çelik yapılarıdaki bu farklılıklar tolere edilebilecek kadar küçük bir fark olarak kabul edilebilir sonucuna varılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle kaynak uygulanan parçalarda ortaya çıkan artık gerilmeler bilgisayar ortamında önceden belirlenerek hem tasarımcıya büyük kolaylık ve tasarruf sağlamakta hem de karmaşık problemler aynı şartlarda çözülmektedir. Böylelikle yapılan analizler sonucunda kaynaklı parçalarda ortaya çıkabilecek distorsiyonların en az düzeyde olması sağlanabilmekte ve ona göre önlemler alınarak dizayn yapılabilmektedir. Bu bilgiler ışığında daha emniyetli ve daha az maliyetle tasarruf sağlanmış olur.

## 9. KAYNAKLAR

- [1] R. Singh, *Applied Welding Engineering : Processes, Codes, And Standards*, 3. Baskı, USA: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [2] T. Fındık, “304 Tipi paslanmaz çeliklerin mig kaynağındaki ısı transferinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi,” Doktora tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [3] S. W. Wen, P. Hilton, ve D. C. J. Farrugia “Finite element modelling of a submerged arc welding process,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 119, sayı 3, ss. 203–209, 2001.
- [4] V. Gunaraj ve N. Murugan “Prediction of heat-affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 2, sayı 1, ss. 94–98, 2002.
- [5] G. B. Jang, H. K. Kim, ve S. S. Kang, “The effects of root opening on mechanical properties, deformation and residual stress of weldment,” *Journal of Materials Processing Technology*, c.12, sayı 1, ss. 80–89, 2001.
- [6] X. K. Zhu ve Y. J., “Chao Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation,” *Materials Science*, c.80, sayı 11, ss. 967–976, 2002.
- [7] U. Demirtaş, “S355J2+N malzemelerin elektrocuruf kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklerinin incelenmesi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, sayı 1, ss. 940-950, 2020.
- [8] Anonim, (2017, 4 Kasım). *Çeliklerin sınıflandırılması*. [Online]. Erişim: <https://www.makinaegitimi.com/celikle-rin-siniflandirilmasi/>.
- [9] S. Anık, “Gazatı ark kaynağı,” *Kaynak tekniği el kitabı*, 3. baskı, İstanbul, Türkiye: Ergör Yayıncılık, 1981.
- [10] Makine Bölümü, (2016, 20 Eylül). [Online]. Erişim: <http://muhserv.atauni.edu.tr/makine/akgun/Docs/malzeme/6celikler%20sınıflandirma%20ve%20standartlr.pdf>.
- [11] *Çelik tiplerinin tarifi ve sınıflandırılması*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 10020, 2003.
- [12] C. Batıgün, R. Gürbüz, ve K. Yurtışık, “Alaşımsız düşük karbonlu çeliklerde gerinim-yaşlandırmanın darbe tokluğuna etkileri,” TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Türkiye, Rap. 158, 2011.
- [13] Anonim, (2019, 1 Haziran). [Online]. Erişim: <https://malzemebilimi.net/celik-dikissiz-cekme-borular.html>.
- [14] M. Vural, F. Piroğlu, Ö.B. Çağlayan, ve E. Uzginer, “Çeliklerinin kaynaklanabilirliği,” TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri, Türkiye, Rap. 426, 2003.
- [15] B. H. Aslan, “Demir çelik üretimindeki gelişmeler ve bir entegre tesis modernizasyon örneği,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimler Enstitüsü, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2008.
- [16] Anonim, (2018,13 Kasım). [Online]. Erişim: <https://www.kukurt.gen.tr/>.

- [17] E. Kökdemir “Alaşımsız yapı çeliği levhalarında kaynak dikişlerinin ultrasonik muayenesi,” Yüksek lisans tezi, Metalurji Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul,Türkiye, 2007.
- [18] Anonim, (2016, 4 Eylül). *Demirçelik mamülleri*. [Online]. Erişim: <http://web.karabuk.edu.tr/mysr/demircelik/celikler.html>.
- [19] K. İçin. (2003, 4 Nisan). *Çeliklerin sınıflandırılması*. [Online]. Erişim: <file:///C:/Users/Levent%20KAHRAMAN/Desktop/Çeliklerin%20Sınıflandırılması.pdf>.
- [20] Anonim, (2017,10 Kasım). [Online]. Erişim: <http://malzemebilimi.net/peritektik-donusum-peritektik-faz-diyagrami.html>.
- [21] H. Yazıcı. (2010, 5 Mayıs). *Yapı malzemesi*. [Online]. Erişim: <http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/yapimali/malzeme-ı-d10-metaller-1.pdf>.
- [22] A. Ç. Can, *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*, 2. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsan Yayınevi, 2010.
- [23] H. Kır, “Sert krom kaplanan silindirik numunelerde kaplama parametrelerinin etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2017.
- [24] S. Öztürk, Faz diyagramları, Ders Notları, Trabzon, 2013.
- [25] J. F. Lincoln, “Principle of Industrial Welding,” The Lincoln Electric Company, USA, 1978.
- [26] E. F. Nippes, *Metals Handbook Ninth Edition*, 9. baskı, Aurora, USA: B A S M International, 1983.
- [27] C. Weman ve G. Linden, *Mig Welding Guide*, 1. baskı, USA: Woodhead Publishing, 2006, böl. 5, ss. 291-303.
- [28] S. Anık, M. Anık ve M. Vural, *1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı*, İstanbul,Türkiye: Birsan Yayınevi, 1993.
- [29] J. Jeffus, *Welding Principles And Applications*, 5. baskı, Washington, USA: Delmar Cengage Learning, 2012.
- [30] Anonim, (2021, 7 Şubat). *Kaynak yöntemleri*. [Online]. Erişim: <https://slideplayer.biz.tr/slide/10274468/>.
- [31] Anonim, (2009, 7 Ekim). *Gazaltı ark kaynağı*. [Online]. Erişim: [http://www.askaynak.com.tr/contents/34/20110704114231\\_gazalti-ark-kaynagi.pdf](http://www.askaynak.com.tr/contents/34/20110704114231_gazalti-ark-kaynagi.pdf).
- [32] H.E. Boyer ve T. L. Gall, *Metals Handbook*, Ohio, USA: American society for metals,1985.
- [33] K. Tülbentçi, “Mig-Mag eriyen elektrod ile gazaltı kaynağı,” Gedik Eğitim Vakfı, Türkiye, Rap. 12, 1990.
- [34] B. Gülenç ve N. Kahraman, *Modern Kaynak Teknolojisi*, 3. baskı, Türkiye: Epamat Basım Yayın, 2016, böl. 4, ss. 100–134.
- [35] M. Anık ve S. Vural, “Gazaltı ark kaynağı,” Gedik Eğitim Vakfı, Türkiye, Rap. 3, 1997.

- [36] K. Tülbentçi, “Mig-Mag ergiyen elektrod ile gazaltı kaynağı” Gedik Eğitim Vakfı, Türkiye, Rap. 3, 1990.
- [37] A. Işıık, “Mig/Mag metodu ile kaynak yapılan yapı eliğı (st37-2) levhaların eğıme yorulması gerilmesine çeşitli aktif gazlarının etkisi, ” *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğıtim Fakültesi Dergisi*, sayı 15, ss. 45-57, 2004.
- [38] E. Koma, “Teknik Eğıtim El Kitabı” Kaynak Tekniğı Sanayi ve Ticaret Anonim şirketi, Türkiye, 2014.
- [39] B. Oğuz, *Ark Kaynağı El Kitabı*, 2. baskı, İstanbul, Türkiye: Oerlikon Yayıncılık, 1989.
- [40] Anonim, (2010, 5 Kasım). [Online]. Erişim: <https://personel.omu.edu.tr/files/1298/files/B%C3%B6l%C3%BCm%20-Kaynakl%C4%B1-%20Birle%C5%9Fimler.pdf>.
- [41] Anonim, (2016, 23 Mart). [Online]. Erişim: [http://www.askaynak.com.tr/content/34/20110918150308\\_](http://www.askaynak.com.tr/content/34/20110918150308_).
- [42] M. Erkek, ve H. Günerhan, MK371 ısı transferi dersi-özeti bilgiler, *Ders Notları*, İzmir, 2006.
- [43] İ. Ovalı ve C. Esen, *Ansys workbench*, 1. baskı. İstanbul, Türkiye: Kodlab Yayıncılık, 2018, bl. 2, ss. 20-30.
- [44] Anonim, (2018, 10 Nisan). [Online]. Erişim: [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/9e3a4760062fa98\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/9e3a4760062fa98_ek.pdf)
- [45] E. Ala, “ngerilmeli tel halatların deneysel ve teorik analizi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliğı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [46] İ. ayıroğlu. (2019, 14 Eylül). *Bilgisayar destekli tasarım ve analiz*. [Online]. Erişim: <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/-BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-1-hafta.pdf>.
- [47] G. Kayımoğlu, “Sonlu elemanlar metodu ile evolvent düz dişli çarkların diş kökü gerilmelerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliğı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [48] W.C Young, *Roark's Formulas for Stress and Strain*. New York, USA: McGraw-Hill Inc. 97, 1989.
- [49] E. Asmussen ve A. Peutzfeldt, “Class ı and class ıı restorations of resin composite,” *Dental Materials*, c. 24, sayı 5, ss. 600-605, 2008.
- [50] S. Benli, “Kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmelerin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliğı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2004.
- [51] M. Ural, ve E. Kaluç, “Paslanmaz eliklerin Tıg yöntemi ile kaynağı,” *Makine ve Metal Dergisi*, ss.12–20, 1996.
- [52] J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby, “A new finite element model for welding heat sources metallurgical transactions,” *Materials Sciences and Applicationsss*, c. 5, sayı 8, ss.299–305, 1984.



- [53] E. Kaluç, “Ergitme esaslı kaynak yöntemleri,” *Kaynak teknolojisi el kitabı*, 1. baskı. Ankara, Türkiye: Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, 2004.
- [54] S. Brown ve H. Song, “Finite element simulation of welding of large structures,” *Journal of Materials Processing Technology*, ss. 441-451, 1992.
- [55] M. S. Davoud., “A comprehensive study of gas metal arc welding process: finite element simulations and experiments,” Ph.D. dissertation, Mechanical Engineer, University of South Carolina, South Carolina, Columbia, 1999.
- [56] K. Easterling, Introduction to the physical metallurgy of welding, *Materials Science*, 2. Baskı, London, England: Butterworth-Heinemann, 1992, ss. 1-282.
- [57] J. G. Garland, “Weld pool solidification control,” *Supplement to The Welding Journal*, ss. 121–127, 1974.
- [58] D.C. Hill ve D.E. Passoja, “Understanding the role of inclusions and microstructure in ductile fracture,” *Supplement to The Welding Journal*, ss. 481–485, 1974.
- [59] G.N. Heintze ve R. Pherson, “Solidification control of submerged arc welds in steels by inoculation with Ti,” *Welding Research Supplement*, ss. 72–82, 1986.
- [60] P. Michaleris ve X. Sun, “Finite element analysis of thermal tensioning mitigating weld buckling distortion,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, ss. 451–457, 1997.
- [61] A. Debicari ve M. Panagiotis, “Prediction of welding distortion,” *Welding Research Supplement*, ss.172-181, 1997.
- [62] D. O. Olowokere ve D.I. Nwosu, “Evaluation of stress intensity factors for steel tubular T-joints using line spring and shell elements,” *Engineering Failure Analysis*, c. 2, sayı 1, ss. 31-44, 1995.
- [63] P. Lazzarin ve R. Tovo, “Relationship between local and structural stress in the evaluation of the weld toe stress distribution,” *International Journal of Fatigue*, c. 21, sayı 10, ss. 1063–1078, 1999.
- [64] F. Labesse ve N. Recho, “Geometric stress level at the weld toe and associated local effects,” *Welding World*, c. 43, sayı 1, ss.23-32, 1999.
- [65] W.D. Dover, R.F. Kare, A.K. Hellier ve F.P. Brennan, “Parametric equations for t-butt weld toe stress intensity factor,” *International Journal of Fatigue*, c. 21, sayı 10, ss. 1051–1062, 1999.
- [66] F.P. Brennan, P. Peleties ve A.K. Hellier, “Predicting weld toe stress concentration factors for t and skewed t-joint plate connections,” *International Journal of Fatigue*, c. 22, sayı 7, ss. 573–584, 2000.
- [67] B. Atzori ve G. Meneghetti, “Fatigue strength of fillet welded structural steels: finite elements, strain gauges and reality,” *International Journal of Fatigue*, c. 23, sayı 8, ss. 713–721, 2001.
- [68] S.T. Lie, C.K. Lee ve S.M. Wong, “Modelling and mesh generation of weld profile in tubular y-joints,” *Journal of Constructional Steel Research*, c. 57, sayı 5, ss. 547–567, 2001.
- [69] A.M. Wingerde, J.A. Packer ve J. Wardenier, “Simplified SCF formulae and

- graphs for chs and rhs k- and kk-connections,” *Journal of Constructional Steel Research*, c. 57, sayı 3, ss. 221–252, 2001.
- [70] H. Chelladurai, M. Z. Ansari ve T.Bajpei, “Experimental investigation and numerical analyses of residual stresses and distortions in GMA welding of thin dissimilar AA5052-AA6061 plates,” *Journal of Constructional Steel*, c. 25, ss. 340–350, 2017.
- [71] M. Meo ve R. Vignjevic, *Welding simulation using FEA*. Malaysia: The World, Engineering Congress&Exhibition, 1999.
- [72] B.G. Mellor, A. Wu ve S. Syngellakis, “Finite element analysis of residual stresses in a butt weld,” M.S. thesis, Computational Engineering, University of Southampton, Southampton, England, 2001.
- [73] Y. Özçatalbaş, “Kaynaklı birleştirmeli konstrüksiyonların çarpılma eğilimlerinin belirlenmesi için deneysel bir yaklaşım,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c.23, sayı 1, ss. 139-145, 2008.
- [74] E. Bedir, C. Batıgün, ve C. H. Gür, “S235 çeliğinin mag köşe kaynağında farklı sabitleme noktalarına bağlı gelişen çarpılma eğilimlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilmesi,” *Kaynak Kongresi IX. Ulus. Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, Ankara, Türkiye, ss. 191-207.
- [75] N. Altınoğlu, “MAG-TIG tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal analizi,” *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, c.7, sayı 2, ss. 536-544 2017.
- [76] A. Yıldız, “Kaynaklı parçaların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2011.
- [77] A. Savaş, “Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş Aa 2024-T3 alüminyum plakaların ısı ve akış analizi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [78] R. Erol, ve E. Esener, “Gaz altı ark kaynağı yönteminde proses parametrelerinin yapıdaki çarpılmaya etkisinin incelenmesi,” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 4, sayı 1, ss. 2458-7575, 2017.
- [79] H. Darendiler, “Eksenel simetrik levha çekme işlemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi,” *Makine İmalat ve Tasarım Dergisi*, c. 2, sayı 5, ss. 217-224, 1995.
- [80] Ö. Topal, “Standart çeliklerde gazaltı kaynaklı birleştirmenin sonlu elemanlar yöntemi ile termomekanik analizi,” Yüksek lisans tezi, Mekatronik Mühendisliği, Fen Bilimler Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [81] H. Vatansever, ve E. Esener, “Sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin sac metal şekillendirme simülasyon süresi ve hassasiyetine etkisinin tespiti,” *European Journal of Science and Technology*, c. 2, sayı 16, ss 92-108, 2019.
- [82] S. Şen, “Ark kaynak işlemi sonucu oluşan kalıntı gerilmelerin deneysel ve sonlu elemanlar simülasyonu ile incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Mekatronik Mühendisliği, Fen Bilimler Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.

- [83] T.L. Teng, ve C.C.Lin, “Effect of welding condition on residual stresses due to butt welds,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, c. 81, sayı 5, ss. 857–864, 1998.
- [84] S. Karaoğlu, ve Ç. Öz, “T-bağlantılarda kaynak eşiğindeki gerilme yığılması faktörünün sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi,” *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 1, sayı 4, ss. 104-110, 2002.
- [85] J. Fricke, S. Keim, ve E. Schmidt, “Numerical weld modeling a method for calculating weld-induced residual stresses,” *Nuclear Engineering and Design*, c. 82, sayı 11, ss. 139–150, 2000.
- [86] M. Bayramoğlu, ve B. Çelik, “T- bağlantılı kaynaklarda çarpılma analizi,” *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 24, sayı 1-2, ss. 1019-1011, 2009.
- [87] M. Altan, “Kaynak distorsiyonları ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2002.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Seda GENÇ  
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.10.1993 - Zonguldak/Merkez  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : sedagenc61@gmail.com

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan        | Okul/Üniversite     | Mezuniyet Yılı |
|-----------|-------------|---------------------|----------------|
| Y. Lisans | İmalat Müh. | Düzce Üniversitesi  | 2021           |
| Lisans    | Makine Müh. | Hitit Üniversitesi  | 2016           |
| Lise      |             | Yayla Teknik Lisesi | 2011           |

## YAYINLAR

S. Genç ve S. Apay, “Yapı çeliğinden T profili imalatında Mag kaynağında ısı transferinin sonlu elemanlar metoduyla analizi”, *International OECD Studies Conference on Engineering, Technology & Robotics*, Ankara, Türkiye, 2020, ss. 19-21.