
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YAKMA ALIN KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPI ÇELİKLERİNDE ITABIN ANSYS İLE ANALİZİ

Gazi Emre KOCAMANOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gazi Emre KOCAMANOĞLU

24 /05/2022

YAKMA ALIN KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPI ÇELİKLERİNDE ITABIN ANSYS İLE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gazi Emre KOCAMANOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2022

ÖZET

Kaynak, bugünlerde en sık olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden biridir. Bu sebeple kaynak yapılacak malzemelerin güvenliği, kaynaklı birleştirmelerin kullanıldığı bütün yapıların güvenliği için büyük önem arz etmektedir. Kaynak işlemi esnasında meydana gelen termal dönüşümlerin kontrolü kaliteli bir kaynağın kritiğidir. Mekanik özellikler açısından kesin olarak bilinemeyen bir bölge olan ITAB, sıcaklık girdisi, ısı türbülansından dolayı farklı özelliklere sahip olan kaynak bölgesinin modelleme ile mekanik ve termal özelliklerinin önceden tahmin edilebilmesi, birçok alanda kullanılan kaynaklı yapıların güvenliğinin sağlanabilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada; yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı kaynak edilmiş parçaların bilgisayar destekli analizlerinin ANSYS programı ile yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada kaynak işlemi için kaynak yöntemi olarak yakma alın kaynağı seçilmiştir. Kaynak işlemi için uygun boyutlara getirilen numunelere belirli aralıklarla delikler açılarak kaynak işlemi esnasında termokupl ve datalogger yardımıyla kaynak işlemi boyunca sıcaklık değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Aynı zamanda kaynak esnasında termal kamera kullanılarak kaynak bölgesinin ulaşabildiği maksimum sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Yakma alın kaynağı yöntemiyle birleştirilen deney parçalarının birleştirme bölgelerinde oluşan mikroyapısal değişiklikler, optik mikroskopta ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenebilmesi adına mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programında aynı deneysel şartlarda üç boyutlu modellemeler oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu işlem sonucunda ortaya çıkan bulgular karşılaştırılırmış ve sonuçların gerçek sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sebeple kaynaklı yapının özelliklerinin ve oluşabilecek sorunların önceden tahmin edilebilmesi için simülasyon programlarının önemi net bir şekilde anlaşılmıştır.

Bilim Kodu : 91511

Anahtar Kelimeler : Yakma alın kaynağı, Ansys, termal analiz, kaynak metalurjisi

Sayfa Adedi : 73

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Uğur ARABACI

ANSYS ANALYSIS of HAZ REGION of FLASH-BUTT WELDED in STRUCTURAL STEEL

(M. Sc. Thesis)

Gazi Emre KOCAMANOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2022

ABSTRACT

Welding is one of the most widely used joining methods today. Therefore, the safety of the welded parts is of great importance for the reliability of the entire structure in which welded joints are used. In addition, control of thermal conversions is critical for the weld quality It is very important to predict the mechanical and thermal properties of the weld zone, which has different properties due to heat input, heat turbulence, and to predict the mechanical and thermal properties of the welded area, which is a region whose mechanical properties are not clearly known, in terms of ensuring the safety of welded structures used in many areas. In this study; For the reasons mentioned above, it is aimed to make computer aided analysis of welded parts with ANSYS program. In this study, flash butt welding was chosen as the welding method for the process. Holes were drilled at regular intervals in the samples to place thermocouples, which were brought to the appropriate dimensions for the welding process. During the welding process, the changing temperature values were measured and recorded with the help of thermocouples and a datalogger. At the same time, the maximum temperature reached by the welding and HAZ region was measured by using a thermal camera during welding. The microstructural changes in the joining regions of the welded test pieces were examined under light microscope and scanning electron microscope (SEM). Microhardness measurements were taken to determine the mechanical properties. In the ANSYS program using the finite element method, three-dimensional models were created under the same experimental conditions and compared with the experimental results. The results obtained as a result of this process were compared and it was seen that the results were compatible with the actual results. For this reason, the importance of simulation programs has been clearly understood in order to predict the characteristics of the welded structure and the problems that may occur.

Science Code : 91511
Key Words : Flash butt welding, Ansys, thermal analysis, welding metallurgy
Page Number : 73
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Uğur ARABACI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımız boyunca kıymetli tecrübelerinden faydalandığım, değerli yardımları ve katkılarıyla beni yönlendiren sevgili hocam Dr.Öğr.Üyesi Uğur ARABACI' ya, karşılaştığım her problemde bana yardımcı olup yol gösteren çok değerli hocam Arş.Gör. Uğur ÖZDEMİR' e, Ansys çalışmalarında bilgi ve deneyimiyle çalışmamıza yardımcı olan Dr.Öğr.Üyesi Tayfun FINDIK' a, Maddi imkan ve teşviklerinden dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: FGA-2021-7011) teşekkür ederim. Metalografik çalışmalarım süresince bana büyük yardımları olan Öğr.Gör. Ömer ŞAHİN' e, deneysel çalışmaların yapılması adına imkân sağlayan Yapaş Zincir AŞ firmasına sonsuz teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. YAKMA ALIN KAYNAĞI 3

2.1. Yakma Alın Kaynağının Esasları ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar 4

2.2. Yakma Alın Kaynağının Uygulama Yöntemleri 5

2.2.1. Mobil yakma alın kaynağı 5

2.2.2. Fabrikada sabit alın kaynağı 5

2.3. Yakma Alın Kaynağının Uygulama Aşamaları 6

2.3.1. Hizalama 7

2.3.2. Yakma 7

2.3.3. Ön tavlama 8

2.3.4. Yanma 8

2.3.5. Şişirme 10

2.3.6. Soğutma 11

3. YAPI ÇELİKLERİ 13

3.1. Yapı Çelikleri 13

Sayfa

3.2. Yapı Çeliklerinin Üretimi ve Kaynaklanabilirliği 14

3.3. Yapı Çeliklerinin Sınıflandırılması 15

4. ANSYS 17

4.1. ANSYS Nedir 17

4.2. ANSYS Programının Yapısı 19

4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi 20

4.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Adımları 22

4.4.1. Ön işlem 22

4.4.2. Model geometrisinin oluşturulması 22

4.4.3. Modelin sonlu elemanlara ayrılması 23

4.4.4. Yüklerin uygulanması ve çözüm 24

4.4.5. Çözümlerin değerlendirilmesi 24

5. LİTERATÜR TARAMASI 25

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 29

6.1. Giriş 29

6.2. Deney Numunesi 29

6.3. Kaynaklanacak Malzemelerin Hazırlanması 30

6.4. Kaynak Testleri (Deneysel Çalışma) 31

6.4.1. Kaynak işlemi 31

6.4.2. Sıcaklık ölçümü 33

6.5. Metalografik Testler 37

6.5.1. Numune alma 37

6.5.2. Zımparalama 39

6.5.3. Parlatma 40

Sayfa

6.5.4. Dağlama 40
6.6. Mekanik Testler 41
6.6.1. Sertlik testi 42
6.7. SEM İncelemesi 44
6.8. ANSYS Çalışması 45
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 49
7.1. Dataloggerdan Elde Edilen Sıcaklık Grafikleri 49
7.2. Termal Kameradan Elde Edilen Görüntüler 53
7.3. Sertlik Değerleri 54
7.4. Mikroyapı Görüntüleri 57
7.5. SEM Görüntüleri 62
7.6. ANSYS Sonuçları 64
8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER 69
8.1. Sonuçlar 69
8.2. Öneriler 70
KAYNAKLAR 71
ÖZGEÇMİŞ 73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.1. S355JR numunesinin kimyasal bileşimi 30

Çizelge 6.2. Schlatter gaas80 marka kaynak makinesinin özellikleri 32

Çizelge 6.3. Kaynak işlemi için sabitlenen parametreler 32

Çizelge 7.1. Deney numunesine uygulanan sertlik testlerinin sonuçları..... 54

Çizelge 7.2. S355JR mekanik özellikleri..... 65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Yakma alın kaynağı prensibi..... 5

Şekil 4.1. Örnek katı model oluşturulması 23

Şekil 4.2. Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi 23

Şekil 4.3. Bir üçgen sonlu eleman ve düğüm noktaları..... 24

Şekil 6.1. Numuneye deliklerin açılmasının şematik gösterimi 24

Şekil 6.2. Numunelerin tutucuya bağlanma şekli 32

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.2. Yakma alın ray kaynağı aşamaları 6

Resim 2.3. Yakma alın kaynağında yanma işlemi 9

Resim 2.4. Yakma alın kaynağında bir diğer yanma işlemi 9

Resim 2.5. Yakma alın kaynağında şişirme işlemi 10

Resim 2.6. Yakma alın kaynağında soğuma işlemi 11

Resim 3.1. Yapı çeliklerinin bina yapımında kullanılması 13

Resim 3.2. Çelik konstrüksiyon yapının kaynağı 14

Resim 4.1. Ansys paket programı 18

Resim 4.2. Ansys paket programı ile yapılmış analiz örneği 18

Resim 4.3. Ansys mechanical modülü 19

Resim 6.1. Kimyasal analiz işlemi için kullanılan cihaz 30

Resim 6.2. Delme işlemi öncesi ham numune 30

Resim 6.3. Delme işlemine tabii tutulmuş numune 31

Resim 6.5. SCHLATTER GAAS80 Yakma alın kaynağı makinesi 33

Resim 6.6. Kullanılan Flir T4 Series marka termal kamera 34

Resim 6.7. Kullanılan Agilent 3497A marka datalogger 34

Resim 6.8. Kaynak işlemi öncesi termokupların yerleştirilmiş hali 35

Resim 6.9. Kaynak işlemi bittikten sonraki soğuma süreci 35

Resim 6.10. Soğuma işlemi sonrası numunenin son hali 36

Resim 6.11. ATM Brillant 250 otomatik numune kesme cihazı 37

Resim 6.12. Malzemenin ilk kesim işleminden sonraki hali 38

Resim 6.13. Malzemenin ikinci kesim işleminden sonraki hali 38

Resim 6.14. Bakalite alma işleminden sonra numunelerin son halleri 38

Resim **Sayfa**

Resim 6.15. ATM Saphir 330 zımparalama cihazı 39

Resim 6.16. ATM Saphir 330 parlatma cihazı 40

Resim 6.17. Dağlama işlemi sonucundaki deney numunesinin görüntüsü 41

Resim 6.18. Leica DM4000M metal mikroskobu..... 41

Resim 6.19. Sertlik testinin ekrandan okunması..... 44

Resim 6.20. Jeol JSM–6060 LV marka SEM mikroskobu..... 44

Resim 6.21. Modelin mesh görüntüsü..... 46

Resim 6.22. İşlem basamaklarının oluşturulması 46

Resim 6.23. Unsur ağacında işlem basamaklarının takip edilmesi..... 47

Resim 7.1. Termokupların deney malzemesi üzerindeki dizilimleri 49

Resim 7.2. T2, T3, T4, T5 ve T8 termokupllarının tekli grafikleri..... 49

Resim 7.3. Termokupl grafiklerinin birleştirilmiş hali..... 52

Resim 7.4. Termal kamera görüntüleri..... 53

Resim 7.5. Sertlik testinin yapıldığı 3 farklı bölgenin numune üzerinden gösterimi 54

Resim 7.6. Sertlik testi sonuçlarının birleştirilmiş grafiği..... 56

Resim 7.7. Numune üzerinden alınan 20x büyütmede görüntüleri..... 57

Resim 7.8. Numune üzerinden alınan 5x büyütme görüntüleri 58

Resim 7.9. Numune üzerinden alınan 10x büyütme görüntüleri 59

Resim 7.10. Numune üzerinden alınan 20x büyütme görüntüleri 59

Resim 7.11. Isı değişimi olmayan bölgenin 20x büyütmedeki görüntüsü..... 60

Resim 7.12. Isının tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) 20x büyütmedeki görüntüsü .. 60

Resim 7.13. Kaynak bölgesinin 20x büyütmedeki görüntüsü 61

Resim 7.14. Isı değişimine uğramamış bölgenin (esas metal) SEM görüntüleri..... 62

Resim 7.15. Kaynak bölgesinin SEM görüntüleri 63

Resim **Sayfa**

Resim 7.16. Modelin oluşturulması 64

Resim 7.17. Modelin oluşturulması ve yandan görünümü 64

Resim 7.18. Kaynak işlemi sonrası ısıl çözümleme 66

Resim 7.19. Kaynak işlemi sonrası ısıl çözümleme yandan görünüm 66

Resim 7.20. Isıl çözümleme sonrası elde edilen sıcaklık değerleri 67

Resim 7.21. Total deformasyon çözümlemesi 68

Resim 7.22. Total deformasyon çözümlemesi yandan görünüm 68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
hv	Vickers sertlik ölçümü
°C	Santigrat derece
cm	Santimetre
mm	Milimetre
mpa	Megapaskal
μm	Mikrometre
pa	Paskal
mm²	Milimetrekare
kg	Kilogram

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ANSYS	Swanson Analysis System
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi

1. GİRİŞ

Teknoloji her ne kadar ilerlese de günümüzde çelik yapıların imalat aşamaları, imalatçı firmalar ve gittikçe gelişen çelik sanayi için oldukça önemli olduğu bir gerçektir. Bu aşamaların başında ise kaynaklı birleştirmeler gelmektedir. Kaynaklı birleştirme deyince de akla ilk gelen ısı girişi olmalıdır.

Kaynak, bugünlerde en sık olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden biridir. Bu sebeple kaynak yapılacak malzemelerin güvenliği, kaynaklı birleştirmelerin kullanıldığı bütün yapıların güvenliği için büyük önem arz etmektedir.

Kaynak esnasında meydana gelen termal dönüşümler ITAB'ın geometrisi ve kaynak nüfuziyeti hakkında bilgiler verir. Bununla birlikte meydana gelen bu termal dönüşümlerin kontrol edilebilmesi kaliteli bir kaynağa olanak sağlar. Mekanik özellikleri net bir şekilde bilinemeyen bir bölge olan ITAB'ın, modelleme sayesinde mekanik özelliklerinin önceden tahmin edilebilmesi, bir hayli çok alanda kullanılan kaynaklı yapıların güvenliklerinin sağlanabilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada; yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı kaynak edilmiş parçaların bilgisayar destekli analizlerinin ANSYS programı ile yapılması amaçlanmıştır.

Yakma alın kaynağı günümüzde sık kullanılan bir kaynaklı birleştirme yöntemidir. Yakma alın kaynağı yönteminde aynı kesit ölçülerinde olan parçalar öncelikle hareket edebilen çenelere sıkıştırılır. Kaynak akımı hareketli çeneler üzerinden malzemeye iletilir. Malzemeler birbirine alın alına temas ettirilerek, yüksek yoğunluktaki akımın geçişi sağlanır. Parçalar birbirlerine alın alına birleştirilir. Alın bölgesi denilen kısmın yakın çevresinde kaynak işlemi esnasında ortaya çıkan yüksek ısıdan etkilenerek belli başlı değişimlere maruz kalan bir kısım meydana gelir. Bu bölge ısının meydana getirdiği tesir altında kalan, ana malzemeden daha farklı özelliklere sahip olabilen ITAB bölgesidir. Genellikle kaynaklı yapıda ITAB bölgesinin mekanik özellikleri çok etkilememesi adına dar olması istenir. Kaynak bölgesinin özellikle de kaynaklı yapının güvenliği için çok önemli olan ITAB'ın özelliklerinin görülebilmesi adına birleştirme yöntemi olarak yakma alın kaynağı seçilmiştir.

Yapı çelikleri bulunabilirliği ve kaynak kabiliyeti açısından önemlidir. Yapı çeliklerinin kaynak kabiliyeti oldukça iyidir. Bu amaçla kaynak işlemi numune olarak S355JR yapı çeliği seçilmiştir.

Günümüzde çoğu kaynak işleminde ısının tesiri altında kalan bölgede ve kaynak edilen malzemedeki ısı girdisinin kaynağın kalitesine etkileri söz konusu olmaktadır. Kaynak esnasında oluşan sıcaklık dağılımları kaynağın kullanılacağı yere göre önceden bilinmesi gerekebilir. Kaynaklı birleştirmelerdeki sıcaklık değişimine bağlı olarak oluşabilecek sorunlardan imalat aşamasına geçmeden önce haberdar olmak hem zaman hem maliyet hem de yapılan işin kalitesi yönünden oldukça önemlidir.

Bu amaçla kaynak edilen malzemelerin kaynak bölgeleri deneysel olarak incelenerek, buradan alınan sonuçlar ile ANSYS programında aynı şartlarda modellemesinin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. ANSYS, mühendislik alanı için sıkça tercih edilen bir analitik çözüm yazılım programıdır. Bu program, genellikle modelleme aşaması bittikten sonra kullanılır ve prototip üretimi yapılmadan önce sanal ortamda testlerin yapılmasına olanak sağlar. Kaynak yapılmış yapının simülasyonu, kaynak ile ilgili yapılan çalışmaların en önemli konularından biridir. Bu çalışmada, kaynaklı yapılarda sıcaklık dağılımının gerçekte ve sanal ortamda karşılaştırılması yapılmıştır.

2. YAKMA ALIN KAYNAĞI

Yakma alın kaynağı (Flash Butt Welding) metallerin elektrik akımına karşı gösterdikleri direnç yüzünden meydana gelen ısı ve uygulanan basıncında etkisiyle aynı ya da farklı cinste olan metallerin birbirlerine kaynaklanabilmesini sağlayabilen elektrik direnç kaynak yönteminin özel bir alanıdır. Meydana gelen ısı kaynak edilen kısımlarda oluşur. Uygulanmak istenen basınç ise hareketli ve tutucu çenelerle uygulanır. Yakma alın kaynağı yöntemi için gereken düşük gerilim ve yüksek akım şiddeti gerekmektedir. Gereken bu elektriksel güç kaynak transformatörlerinden alınır. Gereken basınç kuvveti ise mekanik veya hidrolik güç ünitesi vasıtasıyla sağlanabilir [1].

Yakma alın kaynağı yönteminde aynı kesit ölçülerinde olan parçalar öncelikle kaynak makinesinin çenelerine sıkıştırılır. Kaynak akımı makinenin çeneleri üzerinden kaynaklanması istenen malzemelere iletilir. Parçalar birbirine alın alına temas ettirilerek, yüksek yoğunluktaki akımın aradan geçişi sağlanır. Akımın geçişi esnasında birbirleriyle temas halinde olan parçaların pürüzlülük uçlarında, meydana gelen yüksek akım sebebiyle ergimeyle beraber buharlaşma da meydana gelir. Yakma işlemi başladıktan sonra metal buharı, ergimiş metal kıvılcımlarıyla beraber damlacıklar halinde dışarı atılır. Fırlamadan sonra bu temas noktalarında yeniden yeni krater ve çukurlar meydana getirirler. Bu kraterlerin uç noktaları yeniden birbirleri ile temasa geçer ve böylelikle temas noktası tüm alana yayılıncaya kadar devam eder. Bu sebeple malzemelerin uç kısımları ergime sıcaklığına kadar ulaşır. Meydana gelen bu metal buharı ayrıca koruyucu gaz atmosferi sağlayarak, havanın kaynak bölgesine nüfuz ederek oluşturabileceği olumsuz durumların önüne geçer [1].

Kaliteli bir yakma alın kaynağı ürünü elde edebilmek için kaynak, sıcaklık ve zaman parametreleri titizlikle ve olabildiğince hassasiyetle ayarlanmalıdır. Yakma alın kaynağı yüksek aşınma dayanımına sahiptir. Bu sebeple yüksek ray aşınma oranlarının olduğu yollardaki östenitik mangan çelik rayları için genelde yakma alın kaynağı tercih edilmektedir. 110 kg/mm² çekme dayanımına sahip, kromlu raylarda doğal soğutma ısı etkili bölgede (HAZ: Heat Affected Zone) yüksek miktarda martenzit oluşumu meydana gelir. Oluşan bu martenzitik bölgede sertlik artışı ve aynı zamanda rijitlik azalmasına sebep olur. Mikro yapıda meydana gelen gerilmeler, ısıl işlemler yapılarak giderilebilir [2].

2.1. Yakma Alın Kaynağının Esasları ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Yakma alın kaynağı kısaca iki malzemenin makinenin kavrama çeneleri üzerinden bir transformatör yardımıyla sağlanan elektrik akımının geçirilmesiyle birbirlerine kaynaklanması istenen parçaların ısıtılarak kaynaklandığı bir direnç kaynak yöntemidir. İki iş parçasının birleştirilmesi esnasında ikinci devre kapanır. Yakma alın kaynağı yönteminde elektrik ark sistemiyle rayların baş kısımları eritilerek iki ray başının birbirine alın alına birleştirilmesiyle yapıldığından başka ilave bir maddeye (elektrot, eritici madde, koruyucu gaz vb.) ihtiyaç duyulmamaktadır.

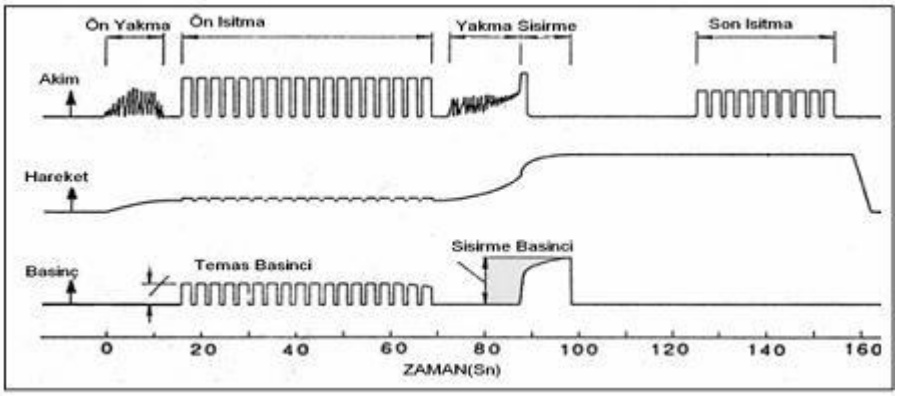
Akım, hareket ve basınç üçlüsünden oluşan yakma alın kaynağı yönteminin prensipleri Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Kaynak kalitesinin en yüksek seviyede olabilmesi için yakma işlemi esnasından krater oluşumundan kaçınılmalıdır. Bu nedenle temas yüzeyleri olabildiğince yumuşatılmalıdır. Kaynak dikişinde gözeneklerin meydana gelmemesi için, mikro boşlukların ve metalik olmayan bileşiklerin oluşumunu önlemek amacıyla şişirme esnasında yeterli hareketin olabilmesi için sıcaklık ergime sıcaklığında olmalıdır [2,4].

Şekil 2.1' de kaynak basıncında meydana gelen değişim zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Ray başlarıyla ısıtıcı yüzeyler arasında mutlak temasın gerçekleşebilmesi için raylar basınç altında ön ısıtma süresine kadar tutulur. Şişirme aşaması için rayların uçlarının tüm kesit alanı boyunca homojen olarak bir ön ısıtılmaya tabii tutulması oldukça önemlidir [3].

Ray başlarına yapılan ön ısıtmanın süresi bittikten sonra basınç ile beraber yakma ve şişirme işlemine geçilir. Gerekli süreyi daha az tutmak, erimiş plastik kısımın derinliğinin kaynağın gerçekleşebilmesi için gereken olandan daha kısa kalmasına sebep olabileceğinden dolayı bu durumdan kaçınılmalıdır. Gereken şişirme kuvvetinin ne kadar olduğu malzemelerin birleşim yüzeylerinin kesit alanına ve malzemenin sıcak akma noktasına bağlıdır [3].

Yakma ve şişirme işlemi bittikten sonra basınç düşürülmeye başlanır ve neredeyse sıfıra yaklaşacak şekilde sabit bir değere alınır. Bu süre şekil 2.1' de gösterilen grafikte de görüldüğü üzere başlangıç noktasından yaklaşık olarak 100 saniye sonrasında tekabül etmektedir. Bu sürenin mümkün olduğunca kısa tutulabilmesi oldukça önemlidir, çünkü ray ağızları bu süre içinde soğumaya çalışırlar ve hava ile doğrudan temas altında kalan

erimiş malzemenin oksitlenme ihtimali vardır. Oksitlenme durumları kaynağın kalitesinin olumsuz olarak etkiler. Bu durumun önüne geçebilmek adına ısıtıcının çekilmesi ve malzemelerin birbirlerine yapıştırılması mümkün olan en kısada gerçekleştirilmelidir [2,3].



Şekil 2.1. Yakma alın kaynağı prensibi [4].

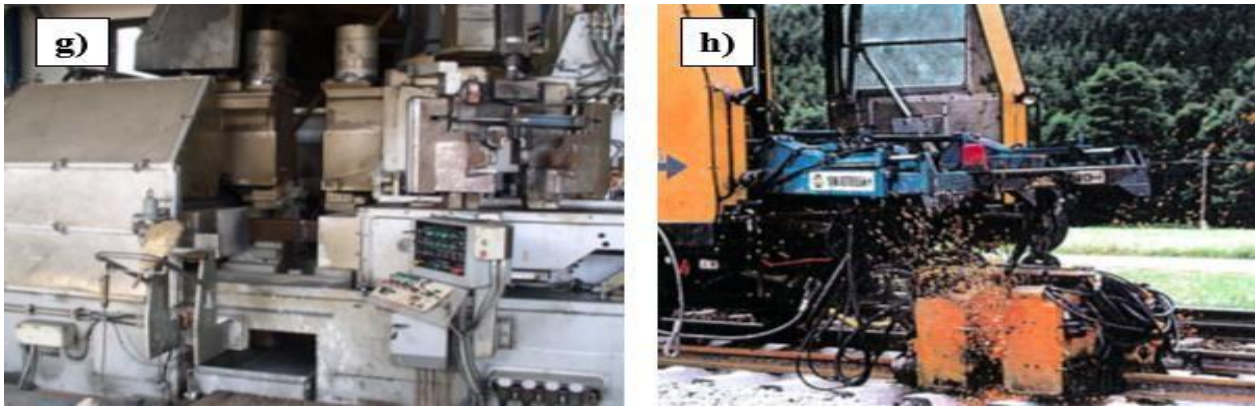
2.2. Yakma Alın Kaynağının Uygulama Yöntemleri

2.2.1. Mobil yakma alın kaynağı

Bu kaynak yönteminin en temel avantajı uzun kaynakları rayların elde edilebilmesidir. Rayların birbirine fabrika dışında kaynatılabilmesi zaman ve iş yükünden büyük ölçüde tasarruf sağlar.

2.2.2. Fabrikada sabit alın kaynağı

Fabrikada yakma alın kaynağı makineleri ile malzemeler belli uzunluklara kadar kaynatılır. Kaynaklanmış olan malzemeler eğer ray ise özel taşıma vagonları gönderilir. Eğer kullanım yerlerinde raylar daha uzun hale getirilmek isteniyorsa, mobil yakma alın kaynağı makinesinden destek alınabilir. Fabrikalarda kaynak yapılmasının en büyük avantajları zaman, hava şartları ve arazi şartlarının olumsuzlardan etkilenmemesidir. Ve elde edilen kaynak mutlak suretle daha kalitelidir. Tek olumsuz tarafı ise kullanım yerlerine gönderilirken yaşanan gecikmedir fakat bu durum diğer avantajların yanında göz ardı edilebilir [5].



Resim 2.2. Yakma alın ray kaynağı aşamaları (g)-fabrika (h)-mobil kaynak makineleri [6].

2.3. Yakma Alın Kaynağının Uygulama Aşamaları

Yakma alın kaynağı işlemi beş farklı aşamada yapılır. Bunlar:

1. Ön yakma
2. Ön ısıtma
3. Yakma
4. Basma (Şişirme)
5. Soğutma

Yukarıda sıralaması verilen işlemler yakma alın kaynağı yönteminin karakteridir ve her zaman gerekli olmaktadır. Bu işlemler genellikle bazı parametrelerin ayarlanmasıyla kontrol edilirler:

- Kullanılan transformatörün voltajı
- Çene uçlarının hareket hızı
- Malzemelerin uçlarına uygulanan kuvvet

Kaynak işlemi içindeki en önemli değişkenler bir kaynak diyagramı içinde zamana göre kaydedilebilir.

- İkinci devredeki akımın yoğunluğu (şiddeti)
- Besleme seyri
- Besleme kuvveti [7].

2.3.1. Hizalama

Rayların baş kısımları genellikle 4 farklı noktadan olacak şekilde hiza alınarak ayarlama yapılır. Ray yükseklik farkı değeri genellikle sıfır olarak istenir. Fakat maksimum 1,5 mm'ye kadar yükseklik farkı tolere edilebilmesi bir problem oluşturmamaktadır. Ray başlarının hizalanması genellikle otomatik yapılır.

Rayların uç kısımları, çenelere ortalı olacak şekilde yerleştirilir. Bu işlem esnasında hiçbir açıklık olmamasına dikkat edilmelidir. Aynı kesit alanına sahip raylarda ray mantarı bölgesinin birbirine bakan tekerlek temas köşeleri, ray ve tekerlerin sürtünme yüzeyi ve tabanların kenarlarında aynı seviyeye gelecek şekilde ayarlanır.

Kaynak makinesinin çeneleri mutlaka metalik bir fırça ile fırçalanmalıdır, bu sayede çeneler temiz tutulur ve temas direncinin homojen şekilde düşük olması sağlanır.

2.3.2. Yakma

Rayların iki ucu farklı noktalardan temas edecek şekilde yavaş yavaş birbirine yaklaştırılır ve temastan sonra zorlama yapılmadan durulur. Oluşan bu temas noktalarından akım gönderilir. Çıkıntılı malzemelerde malzeme bölgesel olarak buharlaşıp eriyebilecek sıcaklığa ulaşıncaya kadar yüksek akımla ısıtılır. Buharlaşma basıncının etkisi sayesinde ergimiş metal aralıklardan dışarıya doğru atılır. Dik köşeli yakmaya devam edildiğinden, uç kısımlar tüm kesit sahası boyunca temas sağlanana kadar, ray başlarının kesitlerinin birbirleri arasında teması sağlanır [2].

Makinenin her iki ucunda bulunan sıkıştırma çenelerinden ikisi ile bağımsız olarak ya da makinenin iki ucundaki sıkıştırma çenelerinden biriyle kombinasyon halinde gerçekleştirilir. Akımı taşıyan ve malzemeye ileten kavrama çeneleri kesinlikle çok iyi bir iletkenden yapılır ve genellikle kendinden su soğutmalıdır. Akın taşımayan sadece tutucu görevi gören çeneler ise genelde çelikten yapılırlar. Kavrama çenelerinin ray uçlarını mümkün olduğunca doğru hizada ve hassas olacak biçimde aynı eksende tutmalıdır. Çenelerin kavrama kuvveti şişirme esnasında herhangi bir kayma olmaması için şişirme kuvvetinden yaklaşık 2 kat büyük olmalıdır [7].

Akım iletme tipi homojen ısınma için önemlidir. Farklı kalınlıktaki rayların kaynaklanmasında bu durum oldukça önemlidir. Bu sebeple farklı kalınlıktaki rayların kaynatılmasında akım şiddeti doğru şekilde ayarlanmalıdır. Gerekirse çenelerin temas yüzeylerinin konumu buna göre tekrar ayarlanmalıdır [2].

2.3.3. Ön tavlama

Rayların iki ucu birden ön tavlama işlemi için birbirlerine temas ettirilir. İstenen güç transformatör ile sağlanır ve tüm kesit alanı boyunca temas bölgelerinde metalin gerekenden fazla atılmaması için besleme miktarı aşırı yüksek tutulur. Neredeyse tüm kaynak işlemlerinde olduğu gibi yakma alın kaynağı işleminde de düşük voltaj yüksek akım uygulanması gerekmektedir. Eğer düşük voltaj yerine yüksek voltaj kullanılır ise ray başlarında yoğun şekilde krater hasarı oluşabilir. Gereken kaynak parametreleri ayarlandıktan sonra ön tavlama işlemi genelde otomatik modda çalıştırılır. Transformatörden elde edilen yüksek akım vasıtasıyla temas noktaları ve temas noktalarına yakın bölgeler ısıtılır. İşlem esnasında belli bir süre sonra geri çekme işlemi uygulanır, bunun sebebi mevzi sahalarda herhangi bir oluşum olmamasını sağlamaktır. Bu nedenle belli bir temas süresi geçtikten sonra ray uçları geri çekilir ve kısa bir süre bekletildikten sonra tekrardan temas ettirilir. Bu işlem 10 ila 20 defa arası tekrarlanır [7].

2.3.4. Yanma

Ön ısıtma işlemi bittikten sonra metalin erimesi ve buharlaşması için yeterli enerji başta daha azdır. Bu nedenle transformatörden elde edilen enerji yanma işlemi için başta daha az verilir. Ön ısıtma işleminden geçen malzemelerin ön ısıtma sıcaklıklarının faydası birleşen yüzeylerde herhangi bir oksidasyon oluşumunun önüne geçmesidir. Bu durum koruyucu bir atmosfer oluşturarak malzemelerin tüm yüzey alanı boyunca homojen şekilde metal buharlaşmasını ve kıvılcımlanmanın yeterli miktarda daha kısa sürede oluşumunu sağlar [7].

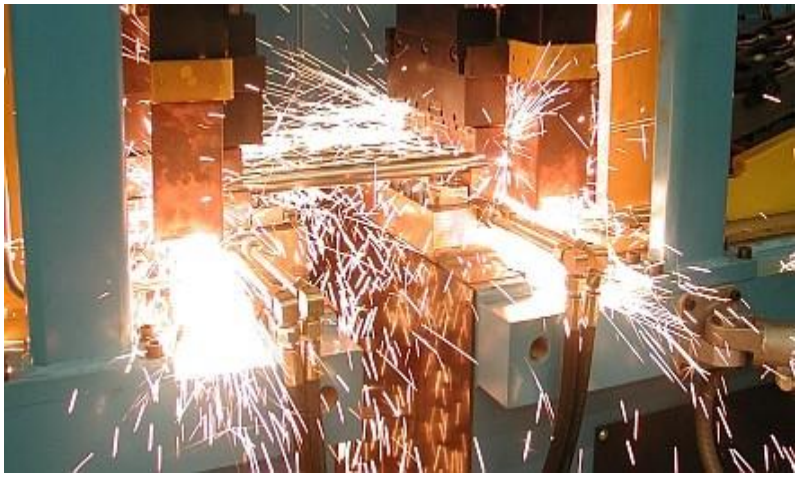
Yanma işleminde kıvılcımlanma esnasında akımın verildiği giriş kısımlarının temas noktalarında yavaş yavaş bir kıvılcımlanma miktarı oluşur. Temas noktalarından dağılan enerji uniform olarak ilerler ve metal buharlaşması ile oluşan koruma artık yetersiz gelmeye başlar. Bunun önüne geçebilmek için başta transformatörden elde edilen düşük

enerji yavaş yavaş artırılmaya başlanır yani besleme miktarı lineer şekilde artırılır. Bu sayede yetersiz gelen korumadan kaynaklı oluşabilecek durumların önüne geçilir ve işlem süresi kısaltılır. Bu sebeple besleme miktarının başta az ve yakma işleminin sonuna doğru artırılmasının avantajları net şekilde ispatlanmıştır. Yakma işlemi bittikten sonra sayısız küçük kraterler oluşur. Bu sebeple yakma işlemi bittikten sonra ivedilikle şişirme işlemine geçilmelidir [2].

Aşağıda ki resimlerde yanma işlemine ait örnek fotoğraflar gösterilmiştir.



Resim 2.3. Yakma alın kaynağında yanma işlemi



Resim 2.4. Yakma alın kaynağında bir diğer yanma işlemi

2.3.5. Şişirme

Rayların birleşme yüzeyleri yakma işlemiyle hazırlandıktan sonra, şişirme esnasında yüksek besleme hızıyla birbirlerine birleştirilir. Bu kuvvet yaklaşık olarak 100 mm/sn kadar yüksek bir kuvvettir. Şişirme işlemi başlayana kadar kaynak akımı kesilmemelidir. Kaynak akımının kesilmemesi sayesinde birleşme yüzeylerinde korunmanın devamı sağlanır. Birleşme temas yüzeyleri birbirine preslenmesi vasıtasıyla sıcaklık etkisiyle yumuşak olan metal aralık dışına sıkıştırılır ve ray uçları kendiliğinden plastik deformasyona uğrar. Plastik deformasyonun devamının sağlanabilmesi için şişirme kuvveti sürekli şekilde eşit miktarlarda artırılır.

Metalin yumuşak kısımlarının birleşme yüzeylerinde sıkıştırılabilmesi için bir minimum şişirme kuvveti lazımdır. Bu kuvvet genelde makine modeli ve şişirme öncesi yapılan yakma hareketine bağlı olarak değişmektedir. Eğer yakma esnasında temas yüzeyleri iyi korunmuş ise daha az bir şişirme kuvveti gerekir. Fakat düzensiz yakma hareketi olduğu durumlarda şişirme işlemi için gereken minimum kuvvet artar. Gereken minimum şişirme kuvveti birleşim yüzeylerindeki yumuşak metalin dışarı doğru bastırılması ve birleşim yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyona harcanır. Gereken şişirme kuvveti malzemelerin kesit alanının boyutuna ve kaynak edilecek parçaların sıcak akma noktasına göre hesaplanır. Örneğin daha düşük çekme dayanımına sahip malzemeler için gereken şişirme kuvveti daha az olabilir. Örneğin; en azından 880 N/mm^2 lik bir çekme dayanımına bağlı rayların kaynağı için gerekli şişirme basıncı 40 N/mm^2 dir. Eşit olarak bir şişirme işleminin sağlanabilmesi için iki ray başınında eşit olarak ısıtılması büyük önem arz etmektedir. Eşit miktarda ısıtma olmaz ise örneğin kesit alanın diğer parçası daha düşük sıcaklıkta ise bu kısım tüm kuvveti diğer kısma göre daha fazla emer ve yetersiz şişirme meydana gelir [3].



Resim 2.5. Örnek şişirme işlemi

2.3.6. Soğutma

Şişirme işlemi bittikten sonra malzemenin özelliklerine uygun olacak şekilde malzemeler soğumaya bırakılır. Genellikle haddelenmiş ray çeliklerinde şişirme işlemi bittikten hemen sonra durgun havada soğutma yeterli olmaktadır. Bu sayede kaynak dikişi ve ısıdan etkilenmeyen bölgede rayın yapısına uygun şartlarda bir mikroyapı elde edilir [2].

Soğuma işleminden bir müddet sonra doğrultma işlemi genelde 150 C'nin altında soğuk olarak yapılabilir. Eğer daha yüksek sıcaklıklarda doğrultma işlemi yapılır ise mantar ve tabanlarda kaynak eğilmesi meydana gelebilir. Bu sebeple muhakkak sıcaklığın düşmesi beklenmelidir. Raylar hidrolik silindirle teçhiz edilmiş bir pres ile bükülür ve kaynak bağlantısında yatar ve dikey olarak doğrultulur. Doğrultma işlemi öncesi işlem esnasında ve doğrultmadan sonra bağlantı noktaları cetvel yardımıyla kontrol edilmelidir. Doğrultma işleminde belli değerler tolere edilebilir. Doğrultma işlemi sonrasında bir metrelik mastar ile yapılan kontrollerde toleranslar yuvarlanma yüzeylerinin yüksekliği boyunca -0,2 ila +0,3 mm, buden temas köşesinin yatay sapması yönünde ise -0,3 ila +0 mm'dir [3].

Resim 2.6 'da soğuma işlemi gösterilmiştir.



Resim 2.6. Örnek soğuma işlemi [3].

3. YAPI ÇELİKLERİ

3.1. Yapı Çelikleri

Yapı çelikleri genellikle çekme dayanımlarına göre belli gruplara ayrılmıştır. Öncelikle çekme dayanımına göre karakterize edilen yapı çelikleri, akma sınırınında önemli olduğu çelik konstrüksiyon, köprü yapıları, basınçlı kaplar, taşıt imalatları, makine yapılarında kullanılır.

Yapı çelikleri genelde alaşımsız çelikler olarak bilinir. Mekanik özellikleri daha çok karbon oranına bağlı olarak değişmektedir. En başta azot ve fosfor elementleride yapı çeliklerinin özellikleri için önem arz etmektedir. Ayrıca üretim şekillerinden dolayı Mn, Si, Cu ve S elementleride yapı çelikleri için önemli elementlerdir [8].



Resim 3.1**.** Yapı çeliklerinin bina yapımında kullanılması

Ülke ekonomilerinin genel göstergesi olarak demir çelik talebi referans alınır. Bir ülkenin altyapısına harcadığı yatırım, konut yatırımları ve inşaat sektörünün gelişmişlik düzeyi ülkenin ekonomisiyle doğrudan bağlantılıdır. Tüm dünya geneli referans alınacak olursa üretilen çelikler arasında en ciddi pazar payına sahip olan çelikler yapı çelikleridir. Yapı çelikleri başka çelikler ile mukayese edildiğinde gerek fiyat gerek bulunabilirlik yüzdesi olarak çok daha avantajlı konumdadır. Genel çelik piyasasında bulunan ve kullanılan çeliklerin yaklaşık % 75 ini yapı çelikleri oluşturur.

3.2. Yapı Çeliklerinin Üretimi ve Kaynaklanabilirliği

Yapı çelikleri, genellikle inşaat sektöründe, alaşımsız ve normalize edilmiş düşük karbonlu haddelenmiş levhalar dahil olmak üzere oldukça büyük ve çeşitli bir kullanım alanına sahiptir. Yapı çelikleri genelde mikro alaşımlama veya tane boyutunun kontrolü ve tane boyutu yönlendirmesiyle akma ve çekme mukavemetleri değiştirilerek ve düşük sıcaklıkta tokluk özellikleriyle üretilirler ve bu şekilde kullanıma sunulurlar. Yapı çeliklerinin en önemli imalat yöntemleri soğuk ve sıcak deformasyon, kaynaklı birleştirme, talaşlı imalat yöntemidir. Bu yöntemler arasından en önemlisi şüphesiz ki kaynaklı birleştirme yöntemidir. Yapı çelikleri düşük karbon içerikleri sayesinde çok iyi kaynak özelliklerine sahiptir. Yani kaynaklanabilirlikleri çok iyidir [10].



Resim 3.2. Çelik konstrüksiyon yapının kaynağı

3.3. Yapı Çeliklerinin Sınıflandırılması

Yapı çelikleri kalitelerine göre sınıflandırılırlar. Yapı çeliklerinin sınıflandırılmasında bazı yeni düzenlemeler yapılmıştır ve isimleri değişmiştir.

• 1. Kalite grubuna yalnızca St 33 çeliği verilmektedir. Bu çelikte kimyasal analiz değerleri olmaz, üretim yöntemi ve döküm tarzı serbesttir. Bu kalitedeki çeliklerin ergitilmesi zordur.

• 2. Kalite grubundaki çelikler, en fazla %0,050 P ve %0,050 S içerirler. Bu çeliklerin kaynak kabiliyetleri iyidir ve genelde kaynaklı birleştirme içeren konstrüksiyonlarda tercih edilirler. Belli miktarlarda Si ve Mn' de içerirler. Bu kalite grubunda olan Fe 37 çeliği kaynar döküme uygundur. Ayrıca sakin döküm veya yarı sakin döküm yapılarakta dökülebilir. Bu kalite grubuna ait Fe 44, Fe 50, Fe 60 ve Fe 70 çelikleri kaynar döküme uygun değildir, mutlaka sakin ya da yarı sakin dökülmelidir.

• 3. Kalite grubundaki çelikler ince taneli yapısına bağlı olarak yaşlanmaya oldukça dayanıklıdır. Bu kalite grubundaki çelikler genellikle sakin döküm yöntemi ile üretilir. İçeriklerinde bulunan P ve S element miktarları yaklaşık olarak %0,040 ile sınırlıdır. Bu çelikler üretim aşamasında genellikle alüminyum ile deoksidasyon işlemiyle beraber üretilirler [11].

Genel yapı çeliklerinin talaşlı imalatında, genellikle normal tavlama işlemine tabii tutulmuş veya soğuk şekillendirme ile şekillendirilmiş malzemeler tercih edilir. Genel yapı çeliklerine ekstra bir tavlama işlemi uygulanmasına gerek yoktur. Genellikle normal tavlama ve yaklaşık 600- 650 °C sıcaklığında uygulanan gerilim giderme tavlaması bu çeliklerin sorunsuz kullanımı için yeterlidir. Bunun dışında bir ısın işlem uygulamasına gerek yoktur [11].

4. ANSYS

4.1. Ansys Nedir

ANSYS programı genellikle mühendislik içeren alanlarda kullanılan bir modelleme, simülasyon yazılım programıdır. Bu programın asıl kullanım amacı üretimi istenen malzemelerin modellemesi yapıldıktan sonra prototip üretimine gerek duyulmadan, öncelikle sanal ortamda test yapılmasına imkân sağlar. Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kaynaklı yapının simülasyonunun yapılabilmesi kaynak işlemi ile ilgili yapılan çalışmalarda güvenilirlik açısından çok önemlidir.

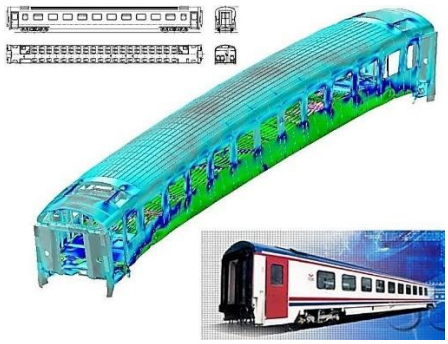
ANSYS programı simülasyon esnasında oluşabilecek problemleri çözebilmek amacıyla bilgisayar tabanlı sayısal metotlar kullanarak problem çözümü yapar. Bu programın çözüm alanları içerisinde: ısı transferi uygulamaları, stress analizi yapabilme, akışkanların akışı, malzemelerin dayanımı gibi birçok alanda çözüm yapabilme olanağı sağlar.

Bu programın özetle tanımı ürünlerin veya bazı sistemlerin üretim öncesi hem modellemesini sağlayarak hem de yapılacak işlemin simülasyonunu yaparak oluşabilecek hataların önceden tespitini sağlayabilen bir programdır. Örnek verecek olursak, yeni bir uçak tasarımı yapılmak istediğinde bunun için öncelikle verimlilik analizi yapılmalıdır. ANSYS' in Fluent modülü bu verimlilik analizini yapabilir. Bu modül sayesinde mühendisler gerçek ortam şartlarını sanal ortamda oluşturarak hem maliyet hem de iş yükünden tasarruf ederek yapabilirler.

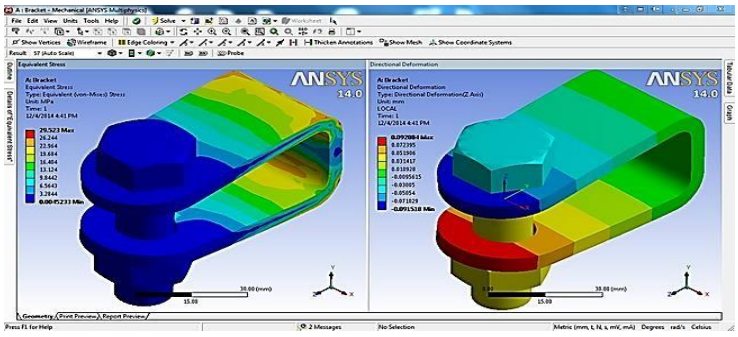
ANSYS programı günümüzde oldukça fazla yerde kullanılır. Örnek vermek gerekirse uçakların uçmasından arabaların ilerlemesine, roketlerin kalkışından dokunmatik cihazların kullanımına kadar geniş bir sektörde kullanılır.

Genel olarak tüm dünyada ANSYS programı oldukça sık kullanılır. Ülkemiz sınırları içerisinde de en çok kullanılan bilgisayar destekli mühendislik programlarının en başında ANSYS programı vardır. ANSYS programı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm yapmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin en büyük avantajı analizi zor olan karmaşık yapılarda, geometrilerdeki parçaların küçük ve çok sayıda bölgelere ayrılarak ayrı ayrı

analizleri yapılabilir. Daha sonra bu ayrı ayrı yapılan analizlerin sonuçları birleştirilerek tek bir analiz sonucu elde edilmiş olur. Bu sayede çok sağlıklı sonuçlar elde edebilmek mümkündür [12].



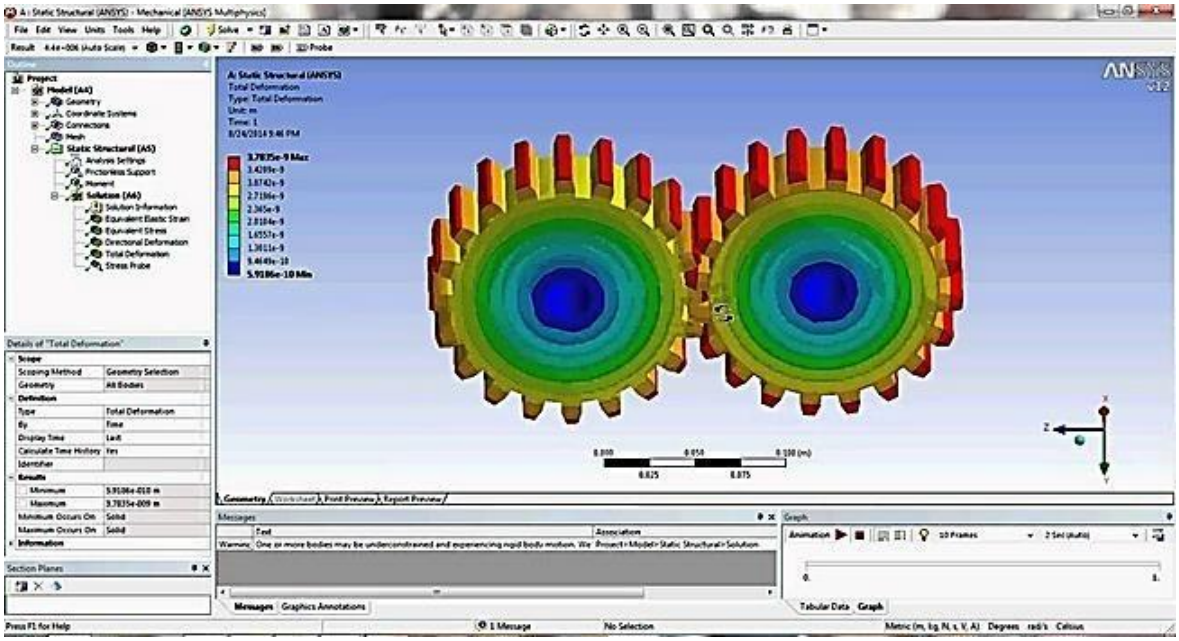
Resim 4.1. Ansys paket programı [13].



Resim 4.2. Ansys paket programı ile yapılmış analiz örneği [12].

ANSYS programı 1970 yılında yapılmış ve patenti alınmıştır. Bu yıldan beri sürekli olarak kendini geliştirmeyi amaç edinmiş bir programdır. Neredeyse 52 yıldır geliştirilmekte olan bu program günümüzde en çok kullanılan mühendislik simülasyon programlarının başında gelmektedir. 1970 yılından beri geliştirilmekte olan ANSYS programı pek çok temel mühendislik alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu program farklı mühendislik alanlarına hitap edebilmek için içerisinde oldukça farklı bileşenler içermektedir [12].

Geometri ve yapı olarak karmaşık olan parçaların analizleri ANSYS' in Mechanical modülü ile analiz edilebilir. Karmaşık yapıların çözümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak malzeme daha küçük parçalara bölünerek çözülür ve gerçek dünyadaki davranışlarının simülasyonu kolaylıkla yapılabilir. Bu sayede sağlıklı sonuçlar ortaya çıkar [12].



Resim 4.3. Ansys mechanical modülü [12].

ANSYS programı sayesinde malzemeler üzerinde statik analiz yapılabilir. Bunun yanı sıra burkulma analizleri de gerçekleştirebilir. ANSYS programı mekanik simülasyonda oldukça başarılıdır. Çok düşük tolerans değerlerinde bile oldukça etkili sonuçlar verir. Parçaya kuvvet uygulamanın bir sonucu olarak oluşabilecek şekil değişimleri ve gerilme dağılımları simülasyonları sonucu anlık ve net şekilde görüntülenebilir [12].

ANSYS programı hem dışarıdan geometri datalarını alabilir hem de içerisinde ki çizim imkanları ile geometri oluşturulabilmesine imkân sağlar. Örneğin Solidworks programında oluşturulan bir geometri ANSYS programına aktarılabilir ya da aynı geometri program içerisinde çizilebilir. Geometri elde edildikten sonra sonlu elemanlar yöntemiyle model meshlenebilir yani model çok sayıda küçük parçalara ayrılabilir. Meshleme işlemi de yapıldıktan sonra yükler ve sınır şartları tanımlanıp analiz gerçekleştirebilir ve sonuçlar sayısal ve grafiksel olmak üzere elde edilebilir [13].

4.2. ANSYS Programının Yapısı

ANSYS programının yapısı oldukça geniş bir alanda analiz yapabilme imkânı sağlayabilmektedir. Örneğin statik analiz, dinamik analiz, termal analiz, manyetik analiz gibi birçok geniş alanda simülasyon ve analiz yapılabilir. Bu program genel olarak ön işlem, çözüm ve son işlem olacak şekilde üç ana bölümden oluşmaktadır. Modelin

üretilmesi ön işlemci bölümünde yapılmaktadır. Çözüm kısmında ise problemin çözümü yapılmaktadır. Son işlemci bölümündeyse çözüm kısmından elde edilen sonuçlar grafikler ve veriler yardımıyla değerlendirilir [14].

ANSYS ticari amaçlar oluşturulmuş bir yazılım programıdır. Bu sebeple probleme yönelik özel elemanlar içerir. Bu sayede bu özel elemanlar kullanılarak yapılan modellemeler, simülasyonlar gerçek sınır şartlarına çok yakın olarak çok daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

ANSYS programında analizi yapılmak istenen parçalara genellikle aşağıdaki işlem basamakları kullanılarak analiz yapılır;

1. Malzeme daha küçük parçalara bölünür (meshlenir),
2. Tüm elemanlar kendi fiziksel özelliklerine uygun olacak şekilde program içerisine tanımlanır,
3. Küçük parçalar tek tek çözülerek daha sonra düğüm noktalarından birbirine bağlanır,
4. Elde edilen sonuçlar, bilinen değerlere bağlı olarak bilinmeyen değerler için çözülür, hangi analiz yapılmak isteniyorsa simülasyon gerçekleştirilir (termal analiz, uzama, gerilme vs.) [14].

4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu yöntem, mühendislik problemlerinin matematiksel çözümü için kullanılan sayısal çözüm metotlarından biridir. Bu metot mühendislerin karşılaştığı birçok karmaşık ve zor problemlerde kullanılmaktadır. Gerilme analizi, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, mekanik titreşimler, vb. gibi yerlerde kullanılır [15].

Sonlu elemanlar yönteminin temel kavramları sıcaklık, basınç gibi herhangi bir sürekli niceliğin küçük ve sürekli parçaların birleşmesi sonucuyla oluşan bir modele dönüştürülmesidir [14].

Bu teknik 1950’ li yıllarda bilgisayarın gelişmesiyle beraber ortaya çıkmıştır ve günümüzde sıkça kullanılmaktadır. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler beraberinde

yazılım gelişmelerini de getirmiştir. Buna bağlı olarak da mühendislik alanında meydana gelen gelişmelerle beraber sonlu elemanlar yöntemi de karmaşık problemlerin çözümü için güvenilir bulgular vererek gelişimini sürdürmüştür [15].

Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntem diferansiyel eşitlikte düzenlenen fiziksel problemlerin hepsini kapsar. Sonlu elemanlar yönteminin birçok avantajı vardır. Bu da onun birçok uygulamada kullanılmasına olanak sağlar. Bu avantajlardan bazıları şöyledir;

1. Farklı malzemelerin birleştirilmiş geometrilerinde malzeme özellikleri birbirlerinden farklıdır. Sonlu elemanlar yöntemiyle meshlenerek ayrılan bu malzemelere ayrı ayrı özellikler tanımlanabilir. Bu büyük bir kolaylık sağlamaktadır.
2. Parça geometrisi karmaşık ise örneğin sivri kenarlardan oluşuyorsa bu sivri kenarlar sonlu elemanlar yöntemiyle ayrılarak analizleri daha sağlıklı şekilde gerçekleştirilir.
3. Sonlu elemanlara ayrılan malzemede elemanların boyutları analizci tarafından düzenlenebilir. Bu sayede önemli değişiklikler olması beklenen bölgeler daha küçük sonlu elemanlara ayrılarak daha hassas işlemler gerçekleştirebilir. Aynı malzemede diğer bölgeler daha büyük sonlu elemanlara ayrılarak işlem hızı artırabilir. Sonlu eleman sayısının fazla olması işlem süresini uzatmaktadır.

Yukarıda sayılan kapasitelere sahip bir program yazılırsa sadece tek bir duruma değil birçok probleme uygulanabilecek bir yöntem geliştirilmiş olur [14].

Sonlu elemanlar yönteminin avantajlarının yanında en büyük dezavantajı ise bilgisayar ortamına olan ihtiyacıdır. Çok küçük problemlerde dahi bilgisayar ortamında tüm özelliklerin ve sınır şartlarının tek tek girilmesi gerekmektedir. Çok önemsiz bir durumda bile tüm işlemler sırasıyla tekrar edilerek birçok hesaplama yapılması gerekmektedir. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözüm yapan çok sayıda bilgisayar paket programları mevcuttur. Bunlardan bazıları; Ansys, Nastran, Ideas, Adams, Lucas, Flotran vs. ’dir [15].

4.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Adımları

Sonlu elemanlar yöntemiyle problem çözümünde belli bir sıra vardır. Bu sıra genellikle aşağıdaki gibidir;

4.4.1. Ön işlem

Ön işlem bölümünde parçanın ilk modelleme işlemi yapılır. Model yapılırken yapılan işlemlerse şöyledir:

1. Başlık Seçimi: Çalışma için konuyla alakalı başlık girilir.

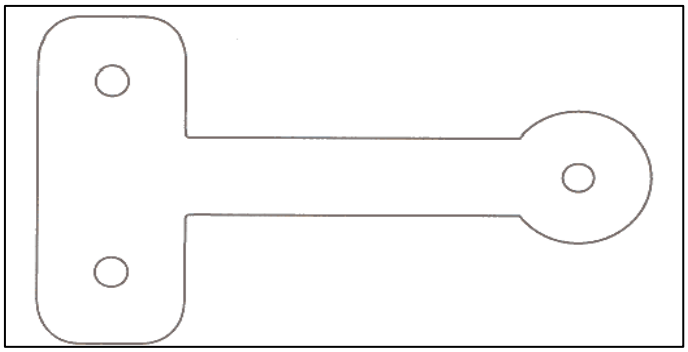
2. Eleman Tipinin Seçimi: Eğer parçanın boyutu iki boyutlu olarak ele alınabiliyorsa en basit olacak şekilde üçgen elemanlara bölünmelidir. Fakat parça kenarları doğrusal değilse bu eğriliklerin çözümü için daha küçük sonlu elemanlar kullanılmalıdır. Bazı problemlerde çözüm bölgesinin üç boyutlu olarak ele alınması gerekebilir. Bu durumda sonlu eleman tiplerinin de üç boyutlu olarak seçilmesi gerekir [15].

3. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi: Kurulan modelin malzemesine ait özellikler bu aşamada sisteme girilmelidir. ANSYS programı içerisinde oldukça fazla malzemenin özellikleri sistem tarafından girilmiştir, sadece seçim yaparak bu işlem bitirebilir. Fakat özel bir malzeme üzerinde çalışılıyorsa ona göre özellikler manuel olarak girilmelidir. Örnek malzeme özellikleri: Elastikiyet modülü, poisson oranı, akma-çekme dayanımı, ısın genleşme katsayısı gibi [15].

4.4.2. Model geometrisinin oluşturulması

Modelin geometrisi oluşturulurken iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlardan ilki programdaki hazır geometrilerin birbirleriyle kesiştirilerek, eklenerek, çıkarılarak vs. gibi bu tür işlemlerle modelin geometrisi elde edilebilir. Daha çok tercih edilen ikinci yöntemde ise çizgiler ve alanlar kullanılarak klasik yöntem ile geometri oluşturulabilir [15].

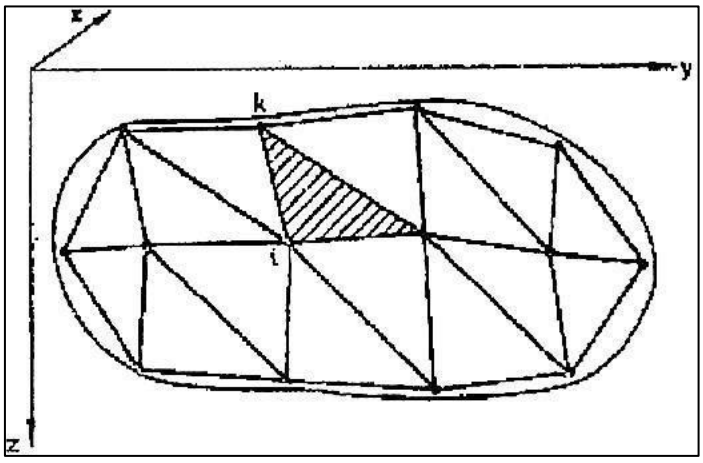
ANSYS programı bünyesinde çizim mümkünken ayrıca model başka bir programda çizilip uygun dönüştürücü formatlar kullanılarak program içerisine dahil edilebilir.



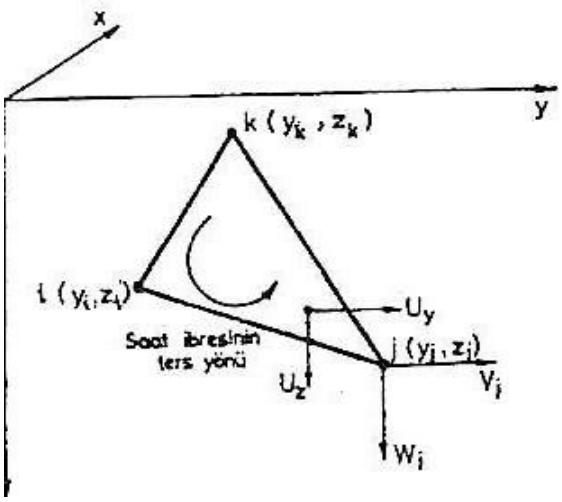
Şekil 4.1. Örnek katı model oluşturulması

4.4.3. Modelin sonlu elemanlara ayrılması

Sonlu eleman seçiminin doğru olarak yapılabilmesi çok önemlidir. Sınır şartları sonlu eleman seçiminde oldukça önemli rol oynar. Bu sebeple sonlu eleman seçimi yapacak kişinin programa hâkim olması gerekmektedir. ANSYS programı bünyesinde sonlu eleman paket programı kütüphanesi bulunmaktadır. Analizci bu kütüphaneden faydalanarak modelin geometrisine ve problemin tipine uyumlu olacak şekilde bir eleman seçimi yapabilir. Bu kütüphanede yaklaşık olarak 150 adet sonlu eleman seçimi bulunmaktadır. Elde edilen modelin çözümü için model sonlu elemanlara bölünür (meshlenir).



Şekil 4.2. Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi [18].



Şekil 4.3. Bir üçgen sonlu eleman ve düğüm noktaları [18].

Geometri olarak karmaşık olan parçalarda çözümün daha gerçekçi olabilmesi adına daha küçük elemanlara bölünerek sonlu elemanlar modeli oluşturulur. Hassas ve gerçekçi çözümlerin gerçekleştirilebilmesi için modelin küçük elemanlara bölünmesi oldukça önemlidir. Çünkü model ne kadar hassas olarak küçük elemanlara bölünürse elde edilen sonuçlar da gerçeğe bir o kadar yakın değerlerde elde edilir. Ancak fazla eleman sayısının bir dezavantajı olarak modeldeki bilinmeyen sayısı artar ve bu durum bilgisayarlarda daha fazla hesaplama yapılmasına neden olur dolayısıyla sonuca ulaşma süresi uzar. Genelde sonlu eleman oluşturulmasında ANSYS programı otomatik olarak sonlu eleman modelini oluşturur fakat modelin geometrisi karmaşık durumda ise ve bazı bölgelerde hassas çözümler olması isteniyorsa bu bölgeler üzerinde bazı düzeltmeler yapılarak modelleme işlemi tamamlanabilir [18].

4.4.4. Yüklerin uygulanması ve çözüm

Bu kısımda analiz tipine göre yükler uygulanır. Uygulanacak yükü kademelere ayırmak gerekiyorsa bu kademeler girilir ve sonrasında çözüm işlemi gerçekleştirilir [15].

4.4.5. Çözümlerin değerlendirilmesi

Bu kısımda elde edilen tüm veriler grafikler halinde incelenir ve kıyaslama yollarıyla sonuçlar değerlendirebilir [15].

5. LİTERATÜR TARAMASI

Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kaynaklı yapının sayısal analizi ve simülasyonunun yapılabilmesi çok önemli konulardan biridir. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber simülasyon ve yazılım programlarında da gelişmeler olmuştur. Özellikle sonlu elemanlar yönteminin de gelişimiyle beraber sayısal analiz ve matematiksel modeller kullanılarak bilgisayar yardımıyla kaynak işlemi esnasında ya da sonrasında karşılaşılabilecek karmaşık durumlar, problemler önceden tespit edilebilir hale gelmeye başlamıştır. Genel olarak bu alanda yapılan çalışmalarda kaynaklı bir yapıdaki kaynak metali, esas metal ve özellikle de kaynak emniyeti açısından büyük önem taşıyan ısının tesiri altında kalan bölgenin yani ITAB' ın yapısal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra artık gerilmeler, çekme ve çarpılmalar, distorsiyonlar, kalıcı açısal veya doğrusal şekil bozuklukları incelenmiştir. Bu incelenen özellikler yapılan kaynak şartları, kaynağın yöntemi, kullanılan malzeme, çevre faktörü gibi buna benzer birçok faktöre bağımlı olarak değişebilmektedir.

Vemanaboina, Akella ve Buddu, (2014) çalışmalarında yapısal bozulmayı ve artık gerilimleri simüle ederek azaltmak için işlem parametrelerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Sıcaklık dağılımı ve artık gerilmelerin tahmin edilebilmesi için yaptıkları araştırmada SS 304 paslanmaz çelik malzemesi üzerinde sabit bir ısı akısı uygulayarak FEM simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Isı akış modeli ısı kaynağı kullanılarak sabit ve düzgün şekilde uygulanmıştır. Sıcaklık dağılımı ve gerilme analizi, paslanmaz çelik SS 304 için sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini kullanarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak gerilmelerin tahmini ile ilgili deneysel uygulama için kullanılan sıcaklık parametreleri ile kaynak gerilimlerini tahmin etmenin mümkün olduğu görülmüştür [19].

Varghese ve diğerleri, (2012) düşük karbonlu çelik plakanın punta kaynağı sırasında termal gerilimini ve dağılımını tahmin edebilmek amacıyla ANSYS kullanılarak geliştirilmiş bir sonlu elemanlar modeli sunmuşlardır. Kaynak havuzu şeklinin gözlemlenebileceği bir deney, ANSYS kullanılarak öngörülen kaynak havuzu şekli ile karşılaştırılmıştır. Oluşan gerilimin levha kalınlığına etkisini de görmek için aynı parametrelerle 6, 8 ve 10 mm plakalar kullanılmıştır. Sonuç olarak, kaynak havuzunda gerilmenin maksimum olduğunu, kaynak dikişine dik yönde kaynak havuzundan

uzaklaştıkça gerilimin azalarak sıfıra yaklaştığı ve gerilmelerin 10 mm plaka için maksimum, 6 mm plaka için minimum olduğu tespit edilmiştir [20].

Zhou, Chen, Fan ve Rao, (2015) yaptıkları çalışmada 150 mm et kalınlığına sahip 2.25Cr-1Mo0.25V alaşım çeliğinden oluşan plakalarda kaynak işlemi sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri analiz edebilmek amacıyla ANSYS kullanmışlardır. U kaynak ağzı profiline sahip parçalar tek paso kaynak yapıldıktan sonra kaynak sıcaklığından dolayı meydana gelen gerilimin iç basınca maruz kalmış kaynak dikişinin sürünme davranışı üzerindeki etkisi, sürekli hasar mekaniği (CDM) teorisi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuç olarak kaynak ısısından dolayı oluşan artık gerilmeler dikkate alındığında maksimum sürünme hasarı artık gerilmeler dikkate alınmadığı durumdan %13 daha azdır. Kaynaklı birleştirmelerde oluşan artık gerilmenin, birleşimin sürünme tepkisinde çok önemli bir rol oynadığı ve sürünme hasarının hızlanmasına neden olması sonucuna ulaşılabilir [21].

Knoedel ve diğerleri, (2012) literatürde bulunan malzeme verilerinden faydalanarak kaynaklı imalat esnasında oluşan kalıntı gerilmelerin tespit edilebilmesi için bir hesaplama yöntemi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada akma gerilmesi 355 MPa olan 25 mm kalınlığındaki HT-36 çeliğinden oluşan plakaları X kaynak ağzı açılarak kaynaklanmıştır. Kaynaktan dolayı oluşan sıcaklık artışının sebep olduğu kalıntı gerilmeler ölçülmüş ve aynı numune sonlu elemanlar yazılımı ANSYS ’de modellenmiştir. Çalışmaların sonucunda elde edilen verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür [22].

Wu ve diğerleri, (2001) tarafından yapılan çalışmada, iki çelik malzemenin yakma alın kaynağı ile birleştirilmesi sonrası sonlu elemanlar ile analizi yapılmıştır. Analiz iki kısımda gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımda, kaynak işlemi esnasında oluşan sıcaklık dağılımını incelemek amacıyla termal analiz yapılmıştır. İkinci kısımda ise yapılan termal analizin sonucu doğrultusunda elde edilmiş olan veriler kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Gerilme analizi ve termal analiz, Ansys paket programı ile yapılmıştır. Kaynak metalinin ve ısıdan etkilenmiş olan bölgenin malzeme özelliklerinin bilgileri yetersiz olduğu için bu iki bölgenin termal ve mekanik özellikleri analiz esnasında esas metal özellikleri ile aynı girilmiştir. Yapılan deney sonuçları ve ANSYS program sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak gerilme ve distorsiyon sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduğu görülmüştür [23].

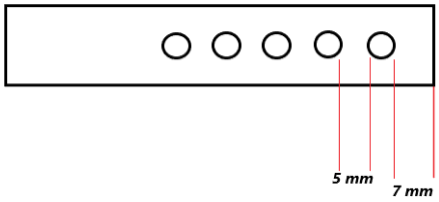
Yavuz ve diğerleri, (2005) tarafından yapılan çalışmada, kaynak yöntemi olarak tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak birleştirme sağlanmıştır. Daha sonra kaynak metali ve ısının tesiri altında kalan bölgenin mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra kaynaklı birleştirilen yapılara çekme testi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar bittikten sonra aynı deney şartları ANSYS paket programında sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz 2 aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamada kaynak işlemi sırasında oluşan sıcaklık dağılımları için termal analiz, ikinci aşamada ise mekanik analiz yapılmıştır. Bu yapılan simülasyon ile malzemenin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve elde edilen çekme testi değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu sayede kaynaklı birleştirmenin optimum sıcaklık değerleri belirlenebilmiştir [24].

Vural, (2009) tarafından yapılan çalışmada SUS304 (JIS) (ASTM 304) ve SS400 (JIS) (ASTM1018) kaynak çiftinin köşe ve alın kaynaklı birleşimleri ile meydana gelen çarpılma incelenmiştir. İki farklı malzeme için analiz yapılmıştır. Bu analizler ANSYS paket programında gerçekleştirilmiştir. İki analizin sırayla çözümlenmesinden oluşan çalışmada, birinci adımda ısıl analiz ve ikinci adımda ise ısıl analizden elde edilen verilerin kullanılması ile yapısal analiz işlemi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, malzemelerin mekanik ve ısıl özelliklerinin çarpılmaya olan etkileri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar grafiklere aktarılmıştır. Elde edilen sonuçlarda özellikle kaynak dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin, oluşan çarpılmalar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca artan kaynak dikişi miktarı ile doğru orantılı olarak artan çarpılma miktarı tespit edilmiştir [25].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş

Tüm deneysel çalışmalar üç aşamaya ayrılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada deneysel çalışmalar için kullanılacak malzemeler hazırlanarak deney düzeneğine uygun hale getirilmiştir. Bu aşamada numuneler üzerine delikler açılmıştır. Kaynaklanacak yüzeylerin temizliği yapılmıştır ve termokupların datalogger ile uyumlu çalışması hedeflenmiştir.



Şekil 6.1. Numuneye deliklerin açılmasının şematik gösterimi

İkinci aşamada ise, hazırlanan numuneler yakma alın kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak işlemi süresince sıcaklık ölçümleri deliklere bağlanmış termokupllar yardımı ile kayıt altına alınmıştır. Kayıt işlemi kaynağın başlangıcından, parçaların oda sıcaklığına soğumasına kadar devam etmiştir. Daha sonra kaynaklanmış malzemeler sertlik testi, mikroyapı analizleri ve SEM analizleri için hazırlanarak malzeme karakterizasyon işlemleri yapılmıştır.

Üçüncü aşamada ise termokupl bağlantıları altında yakma alın kayağı ile birleştirme işlemleri yapılmış numuneler, aynı kaynaklı birleştirme şartları altında ANSYS paket programı yardımı ile simülasyonu yapılmıştır. Deneysel çalışmadaki çevresel şartlar ve deneysel parametreler aynı tutularak ısı akışı karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir.

6.2. Deney Numunesi

Deneysel çalışmalar için Ø20x100 mm boyutlarında S355JR yapı çeliği malzemesi kullanılmıştır. Malzeme içeriğinin net olarak belirlenebilmesi adına spektrometre testine tabii tutulmuştur. Çizelge 6.1 de malzemeden elde edilen element içeriği bilgileri net

olarak görülmektedir. Spektrometre analizi için Bruker Q4 TASMAN marka spektrometre cihazı kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. S355JR numunesinin kimyasal bileşimi (% Ağırlıkça)

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Cu
Oranları (% Ağırlık)	0,24	0,16	1,30	0,045	0,0020	0,0038



Resim 6.1. Kimyasal analiz işlemi için kullanılan cihaz (Bruker Q4 Tasman)

6.3. Kaynaklanacak Malzemelerin Hazırlanması

Termokupl proplarının malzemelerin içine girebilmesi amacıyla ve de kaynak anında ve soğuma süresince ölçüm yapabilmesi için, Ø20x100 mm. ebatlarındaki malzemelere, kaynaklanacak yüzeyine yakın taraflarından başlamak üzere 5'er mm aralıklarla 2 mm. çapında ve 10 mm. derinliğinde delikler matkap kullanılarak delinmiştir.



Resim 6.2. Delme işlemi öncesi ham numune

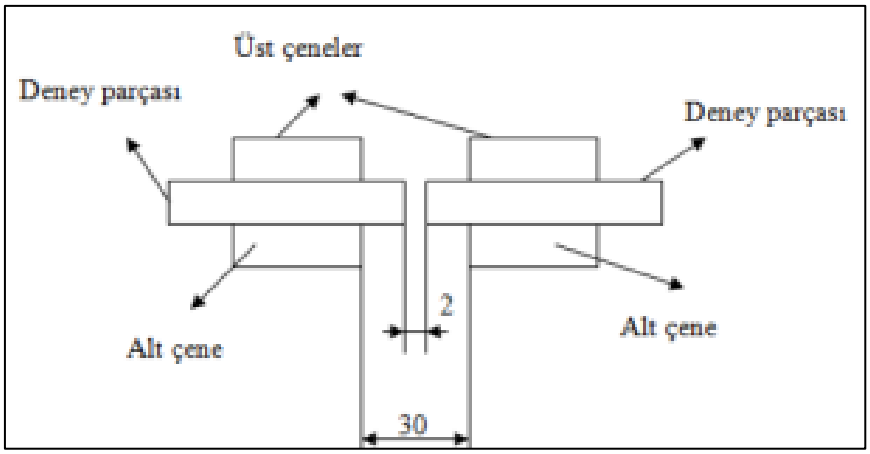


Resim 6.3. Delme işlemine tabii tutulmuş numune

6.4. Kaynak Testleri (Deneysel Çalışma)

6.4.1. Kaynak işlemi

Deneysel çalışmalara hazır hale getirilen malzemeler YAPAŞ Zincir A.Ş firmasında uygun parametrelerle yakma alın kaynağı işlemine tabi tutulmuştur, ısınma ve soğuma hareketleri malzemelerde açılmış olan deliklere yerleştirilen termokupllar ve termal kamera ile takip edilmiştir. Kaynak yapılacak olan parçaların çenelere olan uzaklık mesafesi, kaynak makinesi firmasınca verilen tablolara göre belirlenmiş olup çeneler arası mesafe 30 mm, kaynaklanacak olan parçaların alın yüzeyleri arasındaki mesafe ise 2 mm olarak hazırlanmıştır. Kullanılan Kaynak Makinesi SCHLATTER GAAS80 marka çene soğutmalı kaynak makinesidir.



Şekil 6.2. Numunelerin tutucuya bağlanma şekli

Şekil 6.2’ de görüldüğü üzere çeneler arası mesafenin 30 mm numuneler arası mesafenin 2 mm olduğu görülmektedir. Bu uzaklıklar kullanılan yakma alın kaynağı makinesinin silindirik malzemeler için kullandığı ölçü standartlarıdır.

Çizelge 6.2. Schlatter gaas80 marka kaynak makinesinin özellikleri

Makine adı	SCHLATTER GAAS80
Ön ısıtma, yakma ve yığma kademeleri	Otomatik
Yığma gücü (kN)	90
Kenetleme gücü (kN)	230
İlerleme mesafesi (mm)	30
Hidrolik basıncı (Bar)	5
Transformatör gücü (kVA)	56
Akım kademesi	3
Max sekonder akımı (V)	7,1
Nominal sekonder akımı (kA)	11,3

Çizelge 6.3. Kaynak işlemi için kullanılan parametreler

Ön ısıtma zamanı (sn)	3
Voltaj (V)	3
Ampermetre (A)	30
Vuruş Basıncı (Bar)	2
Yığma Basıncı (Bar)	3
Çene Sıkma Basıncı (Bar)	3
Yığma Akın Zamanı (sn)	2



Resim 6.5. SCHLATTER GAAS80 Yakma alın kaynağı makinesi

6.4.2. Sıcaklık ölçümü

Kaynak işlemine başlamadan önce malzeme makine haznesine uygun şekilde yerleştirildikten sonra önceden açılmış olan deliklere termokupl uçları yerleştirilmiştir. Kaynak esnasında ve kaynak gerçekleştikten sonra yani soğuma esnasında uygun datalogger ile sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. Bu işlem için Agilent 3497A marka datalogger kullanılmıştır.

Kaynak işlemi esnasında termokupllar ve datalogger ile sıcaklık ölçümü yapılırken eş zamanlı olarak termal kamera yardımıyla kaynak bölgesinin ulaştığı maksimum sıcaklığın tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Termal kamera olarak Flir T4 Series marka termal kamera cihazı kullanılmıştır. Kullanılan termal kamera ile kaynak esnasında video çekimi yapılmıştır.

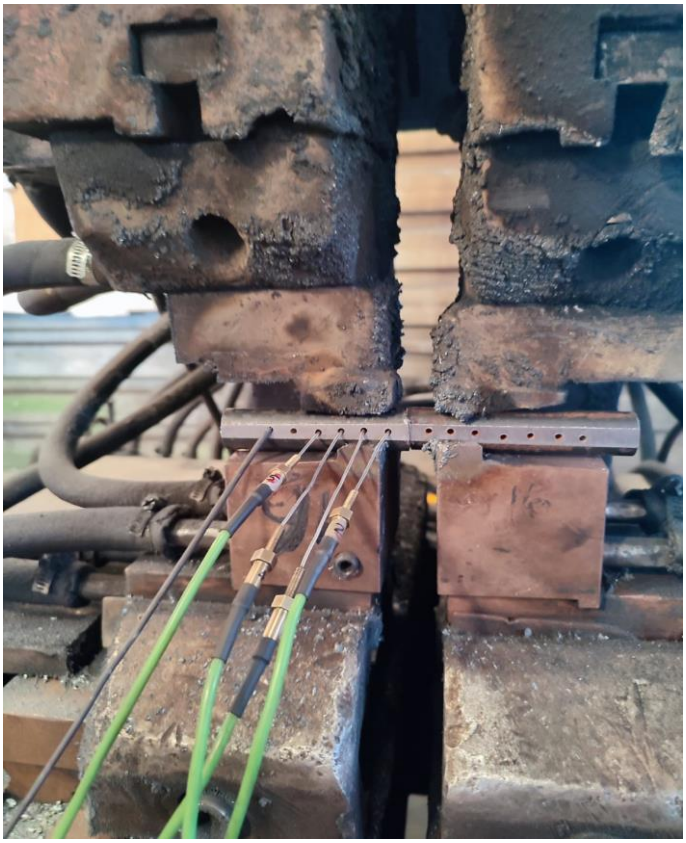


Resim 6.6. Kullanılan Flir T4 Series marka termal kamera

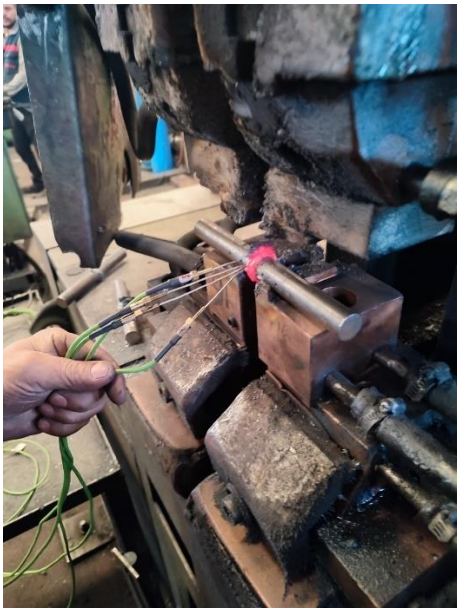


Resim 6.7. Kullanılan Agilent 3497A marka datalogger

Kaynak işleminden önce 5 adet termokupl önceden açılmış olan deliklere yerleştirilmiş ve bağlı oldukları datalogger çalıştırılarak sıcaklık verilerinin alınmıştır. Datalogger kaynak işlemi öncesi, esnasında ve sonrası olacak şekilde sıcaklık ölçümlerini her bir termokupl ucu için ayrı ayrı kaydetmiştir. Resim 6.8' de termokupların malzeme üzerindeki pozisyonları görülmektedir.



Resim 6.8. Kaynak işlemi öncesi termokupların yerleştirilmiş hali



Resim 6.9. Kaynak işlemi bittikten sonraki soğuma süreci

Kaynak işlemi yapıldıktan sonra kaynak makinesinin çeneleri kendinden soğutmalı olduğu için, sıcaklık normal hava şartlarındaki soğumaya göre daha hızlı olmuştur. Bu veriler datalogger aracılığıyla her saniyede bir veri olmak üzere kaydedilmiştir.

3 adet numune aynı deney şartlarında ve aynı işlemlere tabii tutularak datalogger ve termal kamera aracılığıyla sıcaklık tespitleri yapılmış ve kaydedilmiştir.



Resim 6.10. Soğuma işlemi sonrası numunenin son hali

Kullanılan datalogger ile kaynak esnasında ve soğuma sırasında, termokupllar aracılığıyla ölçülen tüm sıcaklık verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır ve elde edilen veriler, Origin Pro 8.5 programı ile birleştirilerek grafik haline getirilmiştir. Bu veriler daha sonra sonuçlar kısmında tartışılacaktır.

6.5. Metalografik Testler

Kalite kontrol, hasar tespiti gibi işlemler için malzemenin iç yapılarını incelemek gerekir. Metalografik muayene ile malzemenin üretim yöntemini, ısıl işlem görüp görmediğini, mikro yapısını, mikro yapı kusurları incelenebilir. Metalografi deneylerinde malzemelerin mikro yapılarına 4 aşamada ulaşılır;

- Numune alma
- Zımparalama
- Parlatma
- Dağlama

6.5.1. Numune alma

İncelenen numune, hakkında bilgi edinilmek istenen parçayı temsil eder nitelikte olmalıdır. Örneğin; hasar incelemesi yapılacaksa hasarın oluştuğu yerden ve hasara uğramamış bölgeden numune alınarak bölgeler karşılaştırılır. Genel amaçlı incelemelerde numunenin incelenecek parçanın tüm özelliklerini yansıtması göz önünde bulundurulmalıdır.

Yakma alın kaynağı ile kaynatılan malzemeden kaynak bölgesinin ve çevresinin kolayca incelenebilmesi amacıyla bu bölgeden numune alınması amaçlanmıştır. Bu amaçla abrasiv diskli kesme cihazı kullanılarak aşamalı şekilde kesim işlemi yapılarak malzeme kaynak bölgesinden numune almaya uygun hale getirilmiştir.

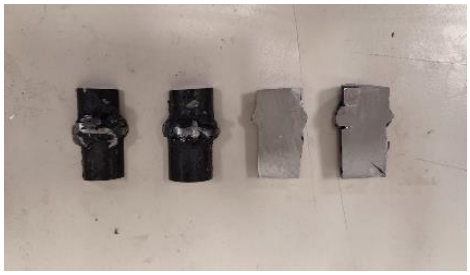


Resim 6.11. ATM Brillant 250 otomatik numune kesme cihazı



Resim 6.12. Malzemenin ilk kesim işleminden sonraki hali





Resim 6.13. Malzemenin ikinci kesim işleminden sonraki hali

Resim 6.13’ de görüldüğü üzere iki aşamada kesilen malzemeler kaynak bölgesi ve çevresi içerisinde olacak şekilde numune almaya hazır hale getirilmiştir.

Malzeme boyut olarak bakalit almaya uygun hale gelince, bakalite alma işlemi yapılarak zımparalama için hazır hale getirilmiştir.



Resim 6.14. Bakalite alma işleminden sonra numunelerin son halleri

6.5.2. Zımparalama

Mikroskobik inceleme yapılmak üzere kesilen bir numunenin yüzeyi pürüzlü ve çiziklidir. Mikroskopta görüntü alınabilmesi için son derece düzgün bir yüzeye ihtiyaç duyulur. İncelenmek istenen içyapının görülebilmesi için yüzeydeki deforme olmuş tabaka uzaklaştırılmalıdır.

Zımparalama işlemi kademeli olarak gerçekleştirilir her kademe bir öncekinden daha ince aşındırıcı kullanılarak devam ettirilir. Zımparalama işlemine başlamadan önce; numune eğer bakalite alınmışsa kenarları eğe veya kalın zımpara ile pah kırılmalıdır. Aksi halde zımpara kağıdını veya kumaşı yırtabilir.

Mikroskobik olarak daha iyi bir görüntü elde edebilmek için kullanılan zımpara kademeleri birbirine yakın tutulmalıdır. Zımparalama işlemi için ATM Saphir 330 zımparalama cihazı kullanılmıştır. Zımparalama işleminde 220#, 400#, 600#, 800#, 1200# zımpara sırası tercih edilmiştir. Numunenin zımparalanması sırasında malzemenin sıcaklıktan etkilenmemesi için soğutucu sıvı olarak su kullanılmıştır.



Resim 6.15. ATM Saphir 330 zımparalama cihazı

6.5.3. Parlatma

Numunenin mikroskopta incelenebilmesi için yüzeyinin parlak ve kusursuz (çiziklerden arınmış) olması gerekir. Bu nedenle zımparalama işlemi sonrasında parlatma işlemi yapılır.

Parlatma işlemi için ATM Saphir 330 parlatma cihazı kullanılmıştır. Parlatma işleminde kullanılan çuhalar 3µm ve 6 µm 'dur. Parlatma işlemi öncesinde çuhaların temizliği çok önemlidir. Bu nedenle çuhalar su ve sabun ile yıkanmış ardından parlatma cihazında en yüksek devirde döndürülerek içindeki su dışarı atılmıştır. Yağlayıcı yardımı ile yapılan bu işlem sonrasında numuneler dağlama işlemine hazırlanmış olur.



Resim 6.16. ATM Saphir 330 parlatma cihazı

6.5.4. Dağlama

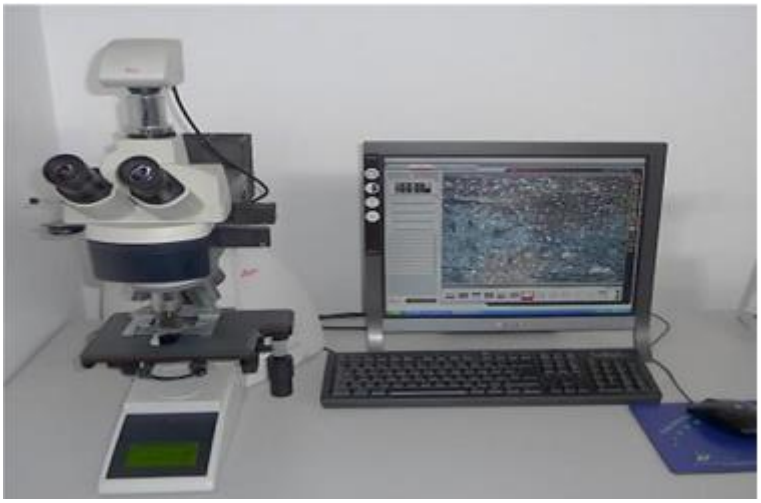
İç yapıda bulunan fazların ve tane sınırlarının mikroskopta görülebilmesi için dağlama işlemi gereklidir. Dağlayıcı sıvı numune yüzeyine uygulanınca fazlar arası veya tane içi ve taneler arası sınırlar aşınır bu aşınan sınırlar ışığı farklı yansıttığından mikro yapı görüntüleri elde edilir. Dağlama işlemi yapılırken en büyük etmenler dağlayıcı sıvı seçimi ve dağlama süresidir.

Dağlama için %5 Nital: 5ML HNO3, 100ml %95 lik etil alkol bileşimi kullanılarak 15-20 saniye aralığında daldırma işlemi yapılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bu işlemler sonucunda dağlanmış numuneler Leica DM4000M metal mikroskobu ile incelenerek 2.5X, 5X, 10X 20X ve 50X büyütmelerdeki mikro yapılarının fotoğrafları çekilmiştir.



Resim 6.17. Dağlama işlemi sonucundaki deney numunesinin görüntüsü



Resim 6.18. Leica DM4000M metal mikroskobu

6.6. Mekanik Testler

Mekanik testler, malzemenin mekanik özelliklerinin uygun standartlarda ve uygun çalışma koşullarında olup olmadığının tespiti için yapılan testlerdir. Malzemelerin muayenesinde tahribatlı ve tahribatsız olarak ikiye ayrılan yöntemlerde Çekme, basma, sertlik, darbe, sürünme, eğme, bükme, kırma gibi mekanik testler tahribatlı muayene yöntemleri kısmına dahil olmaktadır. Bu testler sayesinde malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı, tokluk, süneklik ve mukavemet gibi pek çok mekanik özellikleri belirlenebilir veya kontrol edilerek standartlarına uygun olup olmadığı ölçümlenebilir [26].

Her mekanik teste ve onun standartlarına uygun olarak hazırlanan test numuneleriyle uygun cihazları da kullanarak mekanik testlerini gerçekleştirmek mümkündür. Deneysel çalışmalar sırasında yakma alın kaynağıyla kaynatılan yapı çeliğinin kaynak bölgesi ve çevresinin mekanik özelliklerinin tespiti için mikroyapı incelemesinde kullanılan numune kullanılarak 3 farklı bölgeden en soldan sağa olmak üzere mikro sertlik testi uygulanacaktır. Bu sayede sıcaklık değişiminden etkilenme oranına göre sertlik değerleri kolayca yorumlanabilecektir.

6.6.1. Sertlik testi

Malzeme muayenesinde ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde sertlik dayanımı önemli bir kavramdır ve özellikle kaynak işlemi yapılmış veya ısıl işleme tabi tutulmuş pek çok metal esaslı malzemenin muayenesinde sıkça yapılan bir testtir. Tanım olarak malzemenin batmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Buradaki batma durumu kendisinden daha sert bir malzemeden üretilen bir batıcı uç ile belirli bir alana yük uygulanması ve buna bağlı olarak malzemenin sertlik dayanımının tespit edilmesi esasına dayanmaktadır.

Sertlik testlerinde elde edilen veriler sayesinde çelik gibi malzemelerde çekme dayanımıyla bir ilişki kurulabilirken hemen hemen çoğu malzemenin sertlik değerleri ile talaşlı işleme özellikleri arasında da ters bir oran bulunmaktadır. Diğer bir deyişle sertlik değeri yüksek olan bir malzemenin aşınmaya, çizilmeye genel olarak plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç de yüksektir. Test sırasında malzeme yüzeyine batırılan 3 tip batıcı uç bulunur. Bunlar koni, piramit veya bilye şeklinde olup test numunesinden daha yüksek sertlikte olması açısından genellikle elmas, sertleştirilmiş çelik veya tungsten karbürden üretilmiştir [26-27].

Her uç farklı bir sertlik test yönteminde kullanılmaktadır ve test yöntemleri Rockwell sertlik, Brinell sertlik, Vickers sertlik ve Knoop sertlik testleri olmak üzere 4 çeşittir. Ancak bu uygulamada mikro vickers sertlik yöntemi kullanılacaktır.

Vickers sertlik yöntemi

Genelde sert veya ısıl işlem görmüş (sinterleme vb.) malzemelerde olmak üzere tüm sertlik değerliğindeki malzemelerin sertlik ölçümleri vickers sertlik testinde yapılabilmektedir.

Uygulanacak malzemenin yapısına göre uygulanacak yük değişmekte olup batıcı uç elmas kare piramittir. Tepe açısı 136°'dir. Standartlara göre belirlenmiş test yükleri 0.1 kgf ile 30 kgf arasında değişmektedir. Daha ince kesitli veya daha yumuşak malzemelerde ise uygulanacak test yükü 0,1 kgf ile 5 kgf aralığındadır [27].

Batıcı uç çok hassas ve kırılmaya meyilli olduğu için yük, darbe uygulanmadan 5 saniyede maksimum değerine ulaşmalı ve test işlem süresi toplamda 10-15 saniye içinde tamamlanıp test sonucunu göstermelidir [27].

Vickers ölçüm yönteminde ölçülen veriler genellikle en geniş skalaya sahip ve en doğru sonuçları verir ve sertlik dönüşüm tablosundan bakılarak istenilen sertlik ölçüm türüne dönüştürülebilir.

Sertlik testinin yapılışı

Sertlik testinde öncelikle test yapılacak malzeme cinsi ve ona uygun test yöntemi parametreleri belirlenir. Uygun parametreler sağlandıktan sonra test numunesinin yüzeyi batıcı uca dik olacak şekilde tablaya yerleştirilir. Malzeme yüzeyinin pürüzsüz ve düzgün olduğundan emin olunmalıdır. Ardından sertlik testi işlemi yapılır. Emin olunması açısından işlem iz çapının minimum 3 katı kadar mesafe bırakılarak en az 3 ölçüm yapılır ve çıkan değerlerin ortalaması alınarak sertlik ölçüm değeri belirlenmiş olur.

Bu çalışmada sertlik ölçümleri için hazırlanan test numuneleri, mikro sertlik ölçüm cihazında 5 kgf yük altında mikroyapı incelemesinde kullanılan numune kullanılarak 3 farklı bölgeden en soldan en sağa olmak üzere HV cinsinden sertlik ölçümleri alınmıştır. Bu sayede sıcaklık değişiminden etkilenme oranına göre sertlik değerleri yorumlanarak sonuçlar kısmında tartışılacaktır.



Resim 6.19. Sertlik testinin ekrandan okunması

6.7. SEM İncelemesi

Deneysel çalışmalarda yakma alın kaynağı yöntemiyle birleştirilen parçalardan standartlara uygun olarak tüm kaynak bölgesini ve ana metali temsil eden numunelerden mikroyapı değişikliklerini incelemek amacıyla farklı büyütmelerde görüntü alabilen Jeol JSM–6060 LV marka Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) (Scanning Electron Microscope) kullanılmıştır.



Resim 6.20. Jeol JSM–6060 LV marka SEM mikroskobu

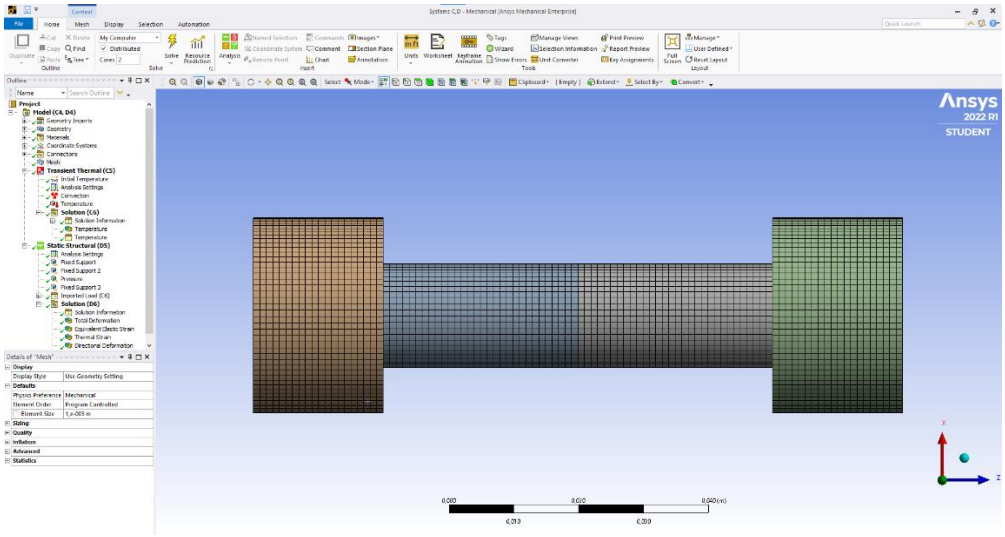
6.8. ANSYS Çalışması

Yakma alın kaynağının simülasyonu için Ansys Workbench 2022 R1 programı kullanılmıştır. Ø20x100 mm boyutlarındaki S355JR yapı çeliği malzemesi ilk olarak aynı ölçü boylarında olacak şekilde katı modellemesi yapılmıştır. Daha sonra yakma alın kaynağı makinesi çeneleride modellemeye eklenerek tasarım tamamlanmıştır.

Sağlıklı sonuçlar elde edilebilmesi için oluşturulan modelin malzeme özellikleri program tarafından bilinmelidir. Bunun için modele malzeme tayini yapılmıştır. Çözüm sınır şartları belirlenirken genel yapı çeliklerinin analizi için sınır şartları otomatik olarak program tarafından atanır. Eğer deneyde kullanılan malzemede aranılan farklı bir özellik var ise burada manuel olarak özellik değişimi yapılır. Örnek verecek olursak genel yapı çelikleri için program tarafından atanan Poisson oranı: 0,3'tür. Ancak istenildiği takdirde farklı bir değer girilebilir.

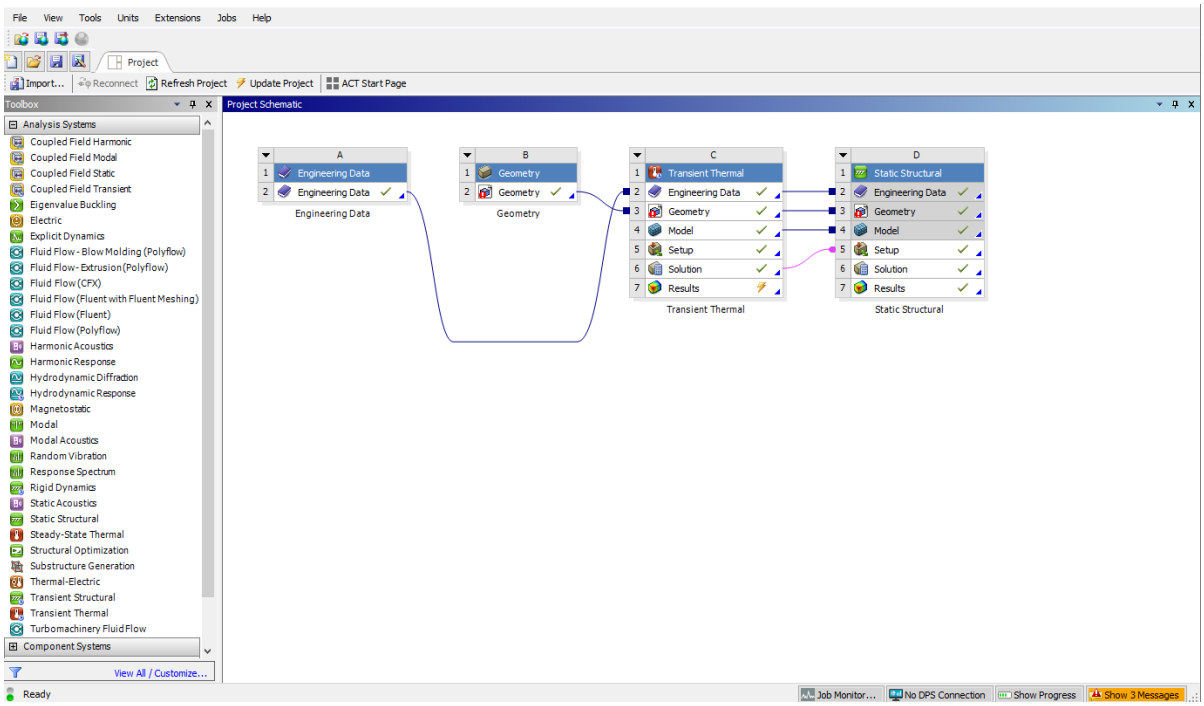
Konstrüksiyonu oluşturan bütün parçaların analiz sırasında nasıl davranacağının belirlenmesi gerekmektedir. Deney konstrüksiyonunu oluşturan parçaların artan sıcaklık etkisi altında nasıl davranacağı öğrenilmek istenildiği için bütün parçaların birbirleri ile temas ettiği noktalarda kaynaklanmış kabul edilir.

Konstrüksiyon sonlu elemanlara bölündükten sonra program analiz edeceği modeli tanımış olur. Bu kısımda mesh sayısı ve şekli program tarafından otomatik olarak seçilebilir olsa da yine kullanıcı tarafından manuel olarak değiştirilebilir. Deney konstrüksiyonunun sonlu elemanlara bölünmüş görüntüsü Resim 6.21' de verilmiştir. Mesh sayısı ne kadar fazla olursa elde edilecek veriler de o kadar hassas olacaktır. Ancak mesh sayısının fazla olması işlem süresini uzatmaktadır. Bu modelde en uygun mesh sayısı program tarafından otomatik yapılmıştır, manuel bir müdahalede bulunulmamıştır.



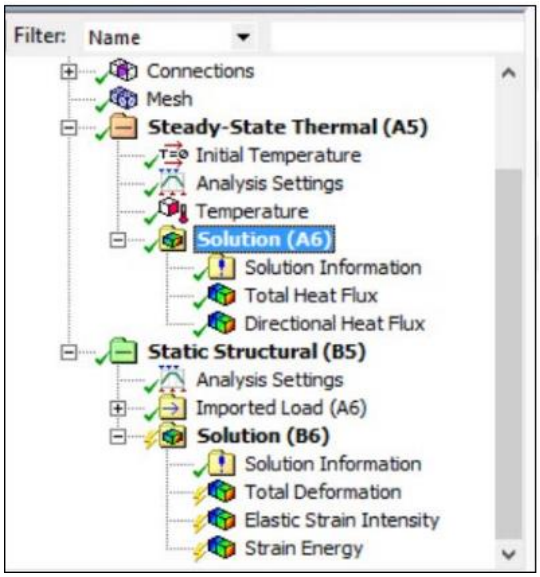
Resim 6.21. Modelin mesh görüntüsü

Mesh yapıldıktan sonra uygulanmak istenilen analiz seçenekleri ve sırasının belirlenmesi işlemi yapılmıştır. Bu aşamada konstrüksiyona hangi analizlerin uygulanacağı belirlenmiştir. Analiz seçenekleri ve sırasının belirlenmesinden sonra çözümleme işlemi yapılmıştır. Model üzerinde termal ısı dağılımı analizi yapılmıştır. Termal analize ilaveten toplam deformasyon ve gerilme analizi de yapılmıştır.



Resim 6.22. İşlem basamaklarının oluşturulması

Resim 6.22’ de görüldüğü üzere işlem basamakları oluşturulurken malzeme özellikleri girildikten sonra geometri kısmında tasarım yapılarak sonrasında analiz kısımlarına geçiş yapılmıştır.



Resim 6.23. Unsur ağacında işlem basamaklarının takip edilmesi

Resim 6.23’ den anlaşılacağı üzere öncelikle termal analiz gerçekleştirilmiştir. Burada ilk olarak toplam ısı akışı ve ısı akış yönleri çözümlemeden sonra görülmektedir. Ayrıca toplam deformasyon, elastik gerilme ve gerilme enerji analizi sonuçlarına da ulaşılmaktadır.

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Dataloggerdan Elde Edilen Sıcaklık Grafikleri

Termokupların deney malzemesi üzerine yerleştirilmiş halleri ve isimleri resim 7.1' de görülmektedir. Grafikler yorumlayabilmek adına önce termokupların isimleri ve kaynak bölgesine olan uzaklıkları bu resime bakarak incelenmelidir.



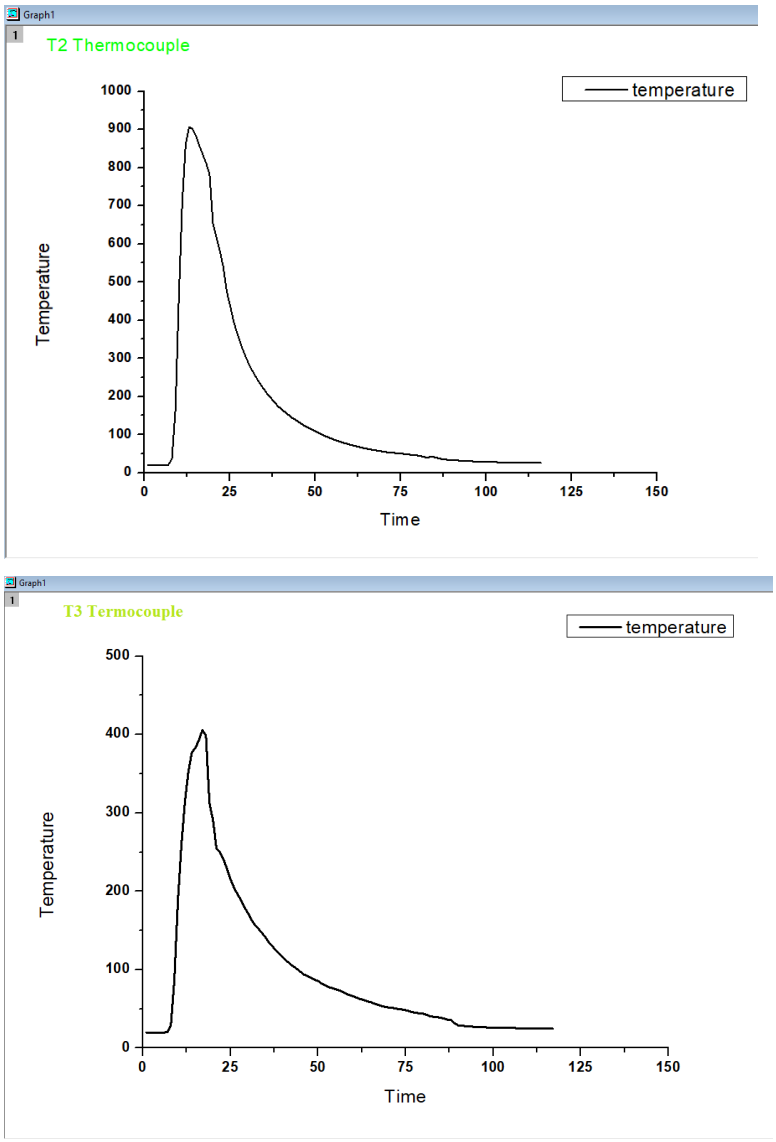
Resim 7.1. Termokupların deney malzemesi üzerindeki dizilimleri

Resim 7.1' de görüldüğü üzere kaynak yapılacak olan bölgeye yani alın bölgesine en yakın termokupl T2 ve en uzak olan termokupl T8 termokuplıdır. Grafiklerde bunlar göz önünde bulundurularak inceleme yapılmalıdır.

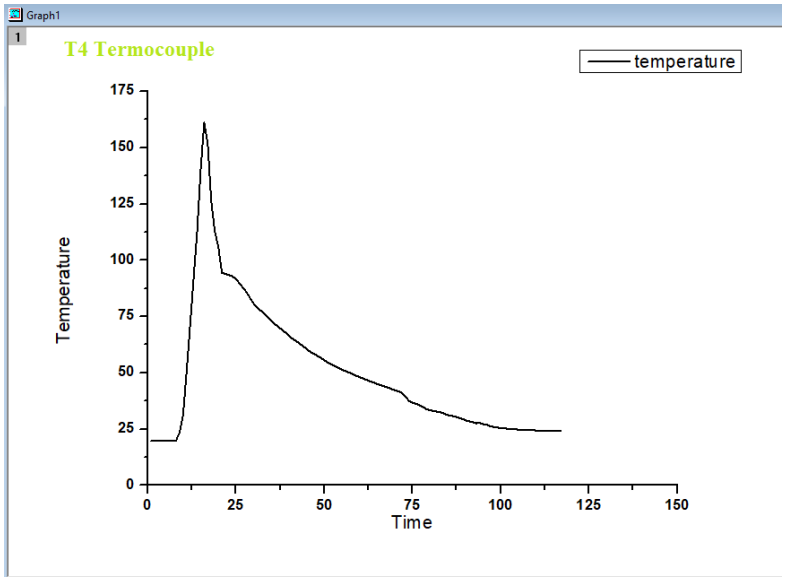
Kaynak bölgesine en yakın termokuplın ölçebileceği maksimum sıcaklığın daha yüksek olması beklenmektedir. Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça ölçülen maksimum sıcaklık değerleri doğal olarak daha azdır.

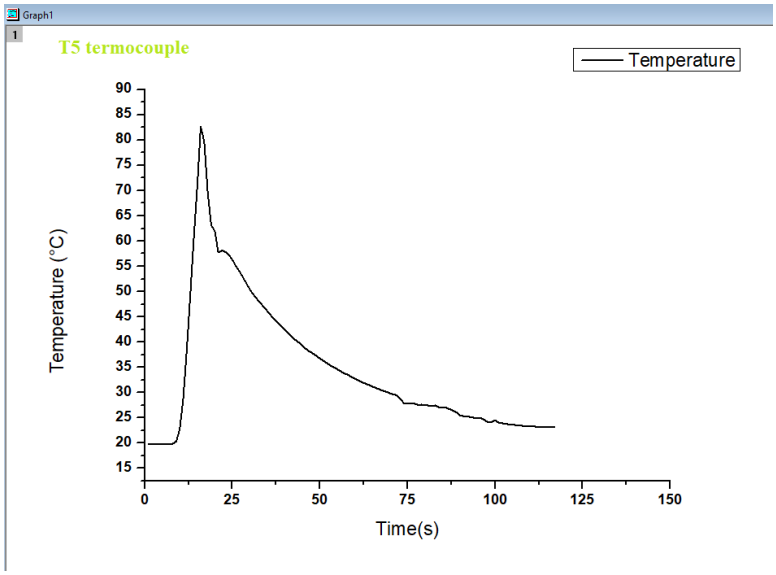
Sırasıyla her termokuplın tek başına elde edilen grafiği Resim 7.2' de gösterilmiştir. Daha sonra grafikler Origin Pro programında birleştirilerek genel olarak yorumlanması

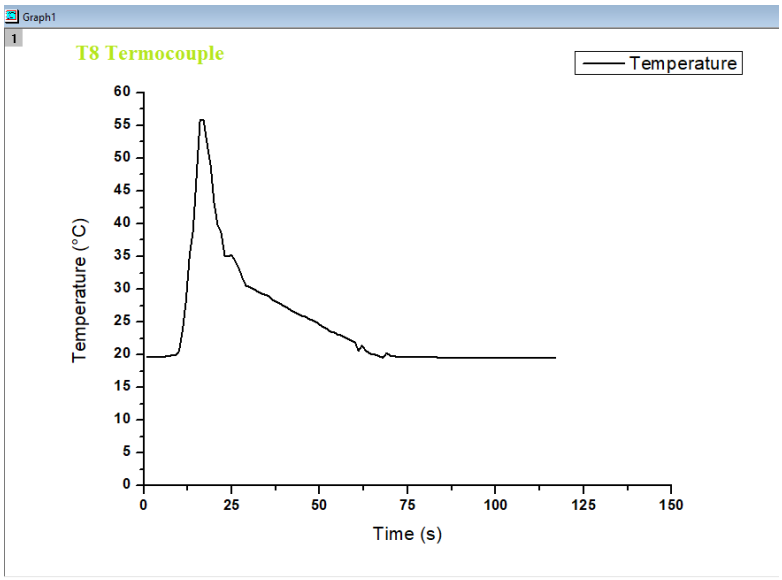
sağlanmıştır. Birleştirilen bu grafikler Resim 7.2' de gösterilmiştir. Bu sayede termokupların kaynak bölgesine olan uzaklıklarıyla ölçmüş olduğu maksimum sıcaklık ve soğuma süreleri kolayca yorumlanabilmektedir.



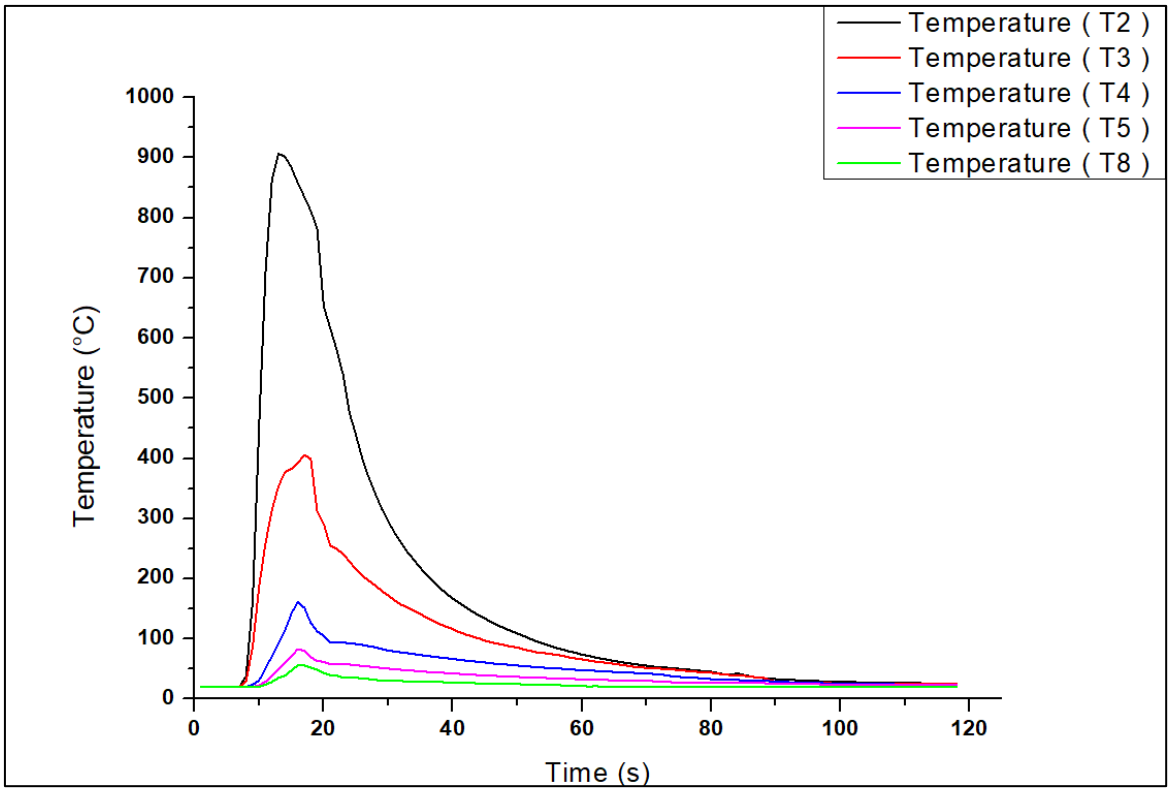
Resim 7.2. T2, T3, T4, T5 ve T8 termokupllarının tekli grafikleri







Resim 7.2. (devam) T2, T3, T4, T5 ve T8 termokupllarının tekli grafikleri

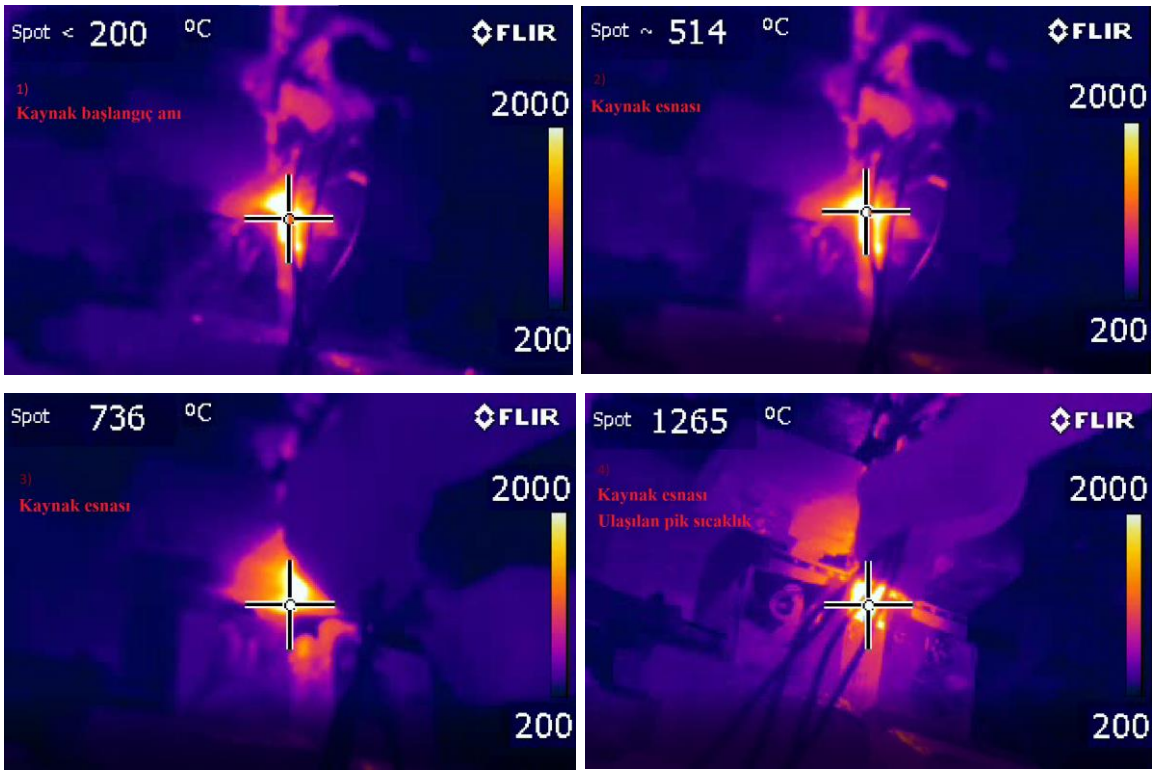


Resim 7.3. Termokupl grafiklerinin birleştirilmiş hali

Birleştirilmiş grafikte de görüldüğü üzere kaynak bölgesine en yakın olan T2 termokuplı en yüksek sıcaklık değerlerini ölçmüştür ve soğuması daha fazla zaman almıştır.

Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça ulaşılan pik sıcaklık değeri düşmüştür ve soğuma süresi kısalmıştır. Kaynak bölgesinden en uzak olan T8 Termokuplında ise sıcaklık değişimi çok az olmuştur. O bölgede herhangi bir dönüşüm olup olmadığının yorumlanması ise metalografik testler kısmında mikroyapı incelemesinde yapılmıştır.

7.2. Termal Kameradan Elde Edilen Görüntüler

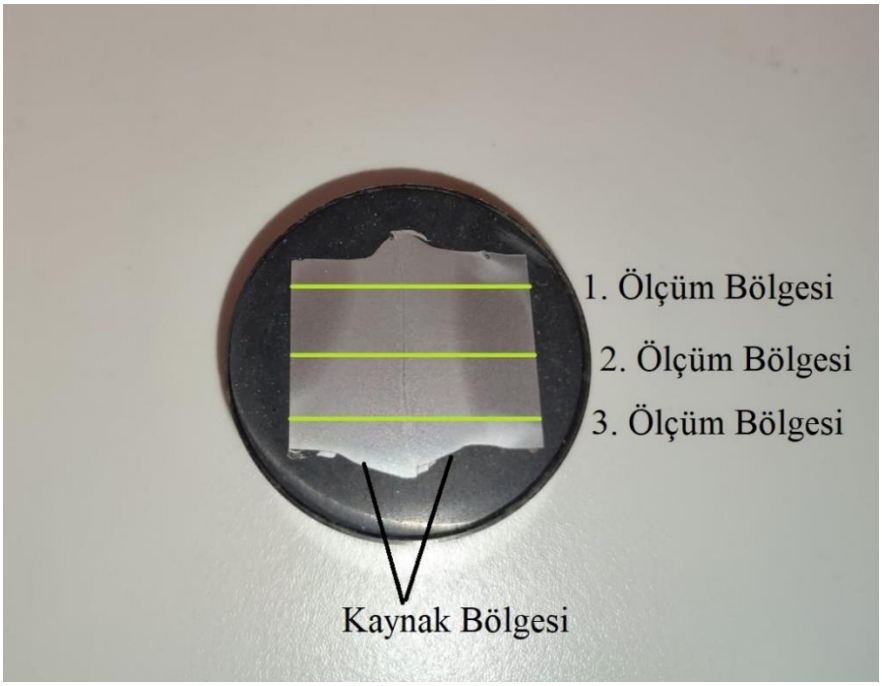


Resim 7.4. Termal kamera görüntüleri (Sıralı dizilim)

Bu videolardan alınan ekran görüntülerinden 4 adet görüntü Resim 7.4' de gösterilmiştir. Alınan ekran görüntüleri kaynak esnasında çekilen videodan sırası ile alınmıştır. 4. Ekran görüntüsünden anlaşıldığı üzere kaynak bölgesi maksimum sıcaklığının 1265 °C olduğu tespit edilmiştir. Ulaşılan bu pik sıcaklıktan sonra kaynak işlemi tamamlanarak soğuma süreci başlamıştır.

7.3. Sertlik Değerleri

Yapılan sertlik testi ölçümlerinin sonuçları HV cinsinden Çizelge 7.1' de verilmiştir. 3 farklı bölgeden olmak üzere kaynak bölgesi "0" (referans) kabul edilerek her iki taraftan ITAB ve ana malzemeye ilerleyecek şekilde ölçümler yapılmıştır.



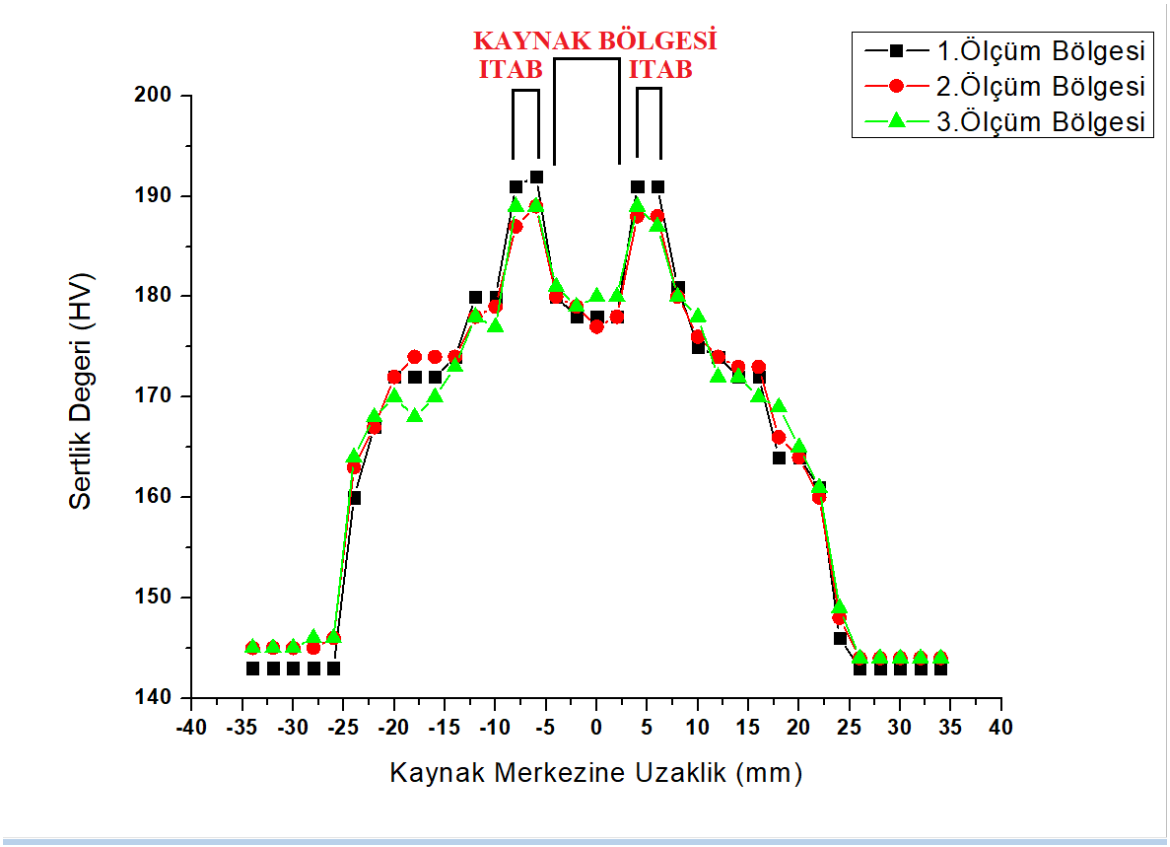
Resim 7.5. Sertlik testinin yapıldığı 3 farklı bölgenin numune üzerinden gösterimi

Çizelge 7.1. Deney numunesine uygulanan sertlik testlerinin sonuçları

ÖLÇÜM	1. BÖLGE	2. BÖLGE	3. BÖLGE
1	143	145	148
2	160	146	148
3	161	163	159
4	161	171	164
5	162	172	168
6	168	174	170
7	178	174	173

Çizelge 7.1. (devam) Deney numunesine uygulanan sertlik testlerinin sonuçları

8	180	178	175
9	180	179	177
10	191	187	189
11	192	189	189
12	198	195	197
13	180	180	181
14	180	179	181
15	180	177	178
16	178	178	178
17	191	188	187
18	181	180	180
19	175	176	178
20	174	174	172
21	172	173	172
22	172	173	170
23	164	166	169
24	164	164	165
25	161	160	161
26	146	148	149



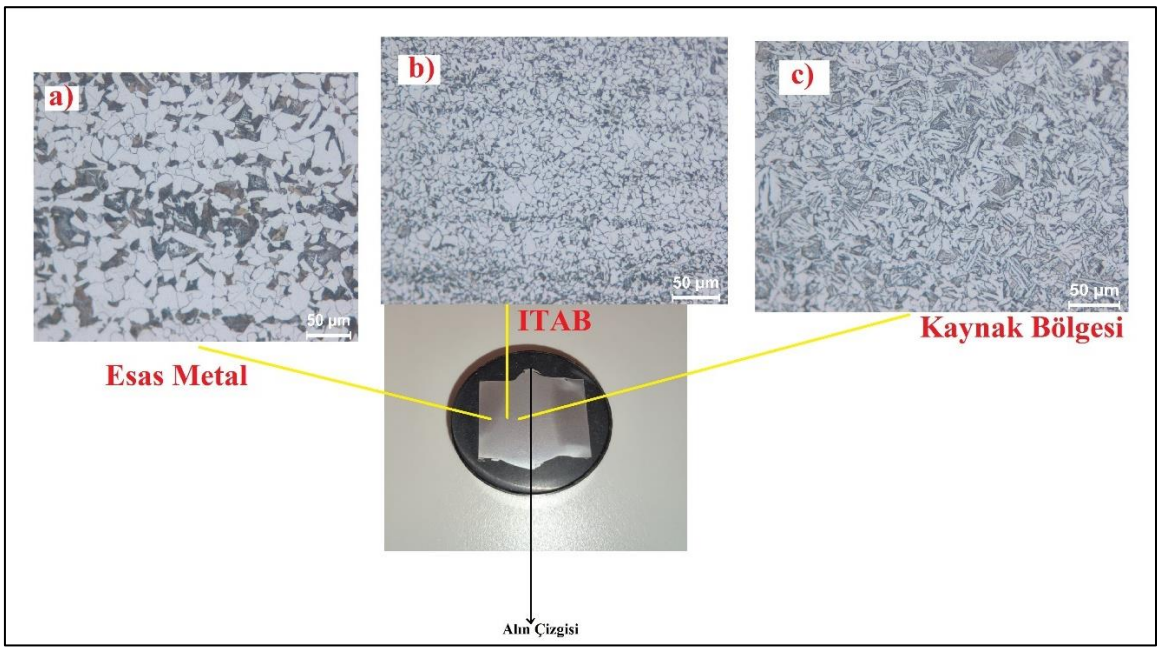
Resim 7.6. Sertlik testi sonuçlarının birleştirilmiş grafiği

Resim 7.6' da görüldüğü üzere sıcaklık etkisinden en az etkilenen bölge de yani numunenin en uç bölgelerinde sertlik değerleri düşük çıkmıştır. Bu bölgeler dönüşüme uğramamıştır yani malzemenin kendi sertlik değerleridir. Kaynak bölgesine yaklaştıkça hızlı ısınma ve soğumanın etkisiyle malzeme yapısı değişerek sertleşme durumu meydana gelmiştir. Kaynak bölgesinde meydana gelen ısı türbülansı ve tane irileşmesinden dolayı sertlik değeri ITAB bölgesine göre daha düşük fakat ana metale göre daha yüksek çıkmıştır. Kaynak bölgesine yakın olan kısımda yani ısı etkisi altında kalan bölgede (ITAB) sertlik değeri kaynak bölgesine ve kaynak metaline göre daha yüksek çıkmıştır.

Yapılan kaynak ve metalografi işlemlerinin sonucunda optik mikroskop altında numunelerden elde edilen mikro yapı görüntüleri ise aşağıda verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri ayrıca Resim 6.26' da numune üzerinden gösterilmeye çalışılmıştır.

7.4. Mikroyapı Görüntüleri

Yapılan kaynak ve metalografi işlemlerinin sonucunda optik mikroskop altında numunelerden elde edilen mikro yapı görüntüleri aşağıda verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinin alındığı bölgeler ayrıca Resim 7.7' de numune üzerinden gösterilmiştir.



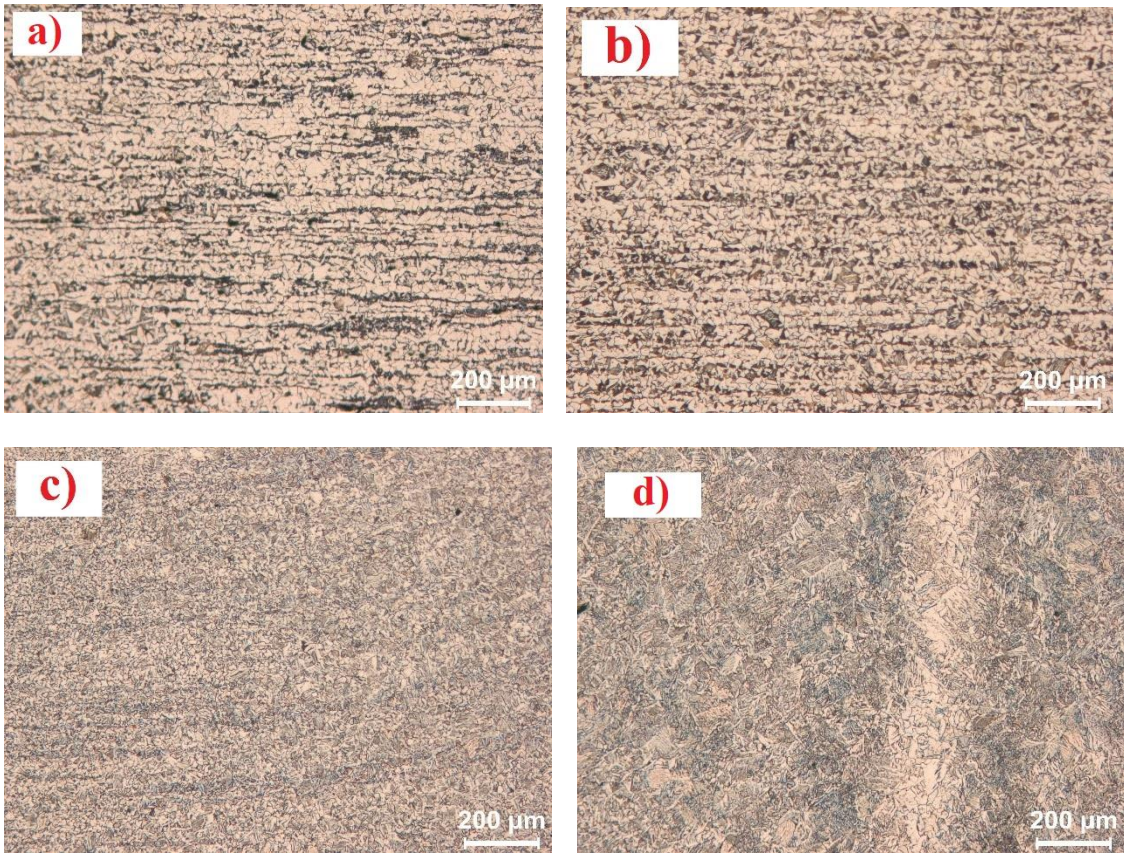
Resim 7.7. Numune üzerinden alınan 20x büyütmede görüntüleri a) Esas metal, b) ITAB, c) Kaynak bölgesi

Resim 6.26' da görüldüğü üzere a bölgesinde sıcaklık değişimi olmadığı için mikroyapı değişikliği olmamıştır. Yani herhangi bir dönüşüm meydana gelmemiştir.

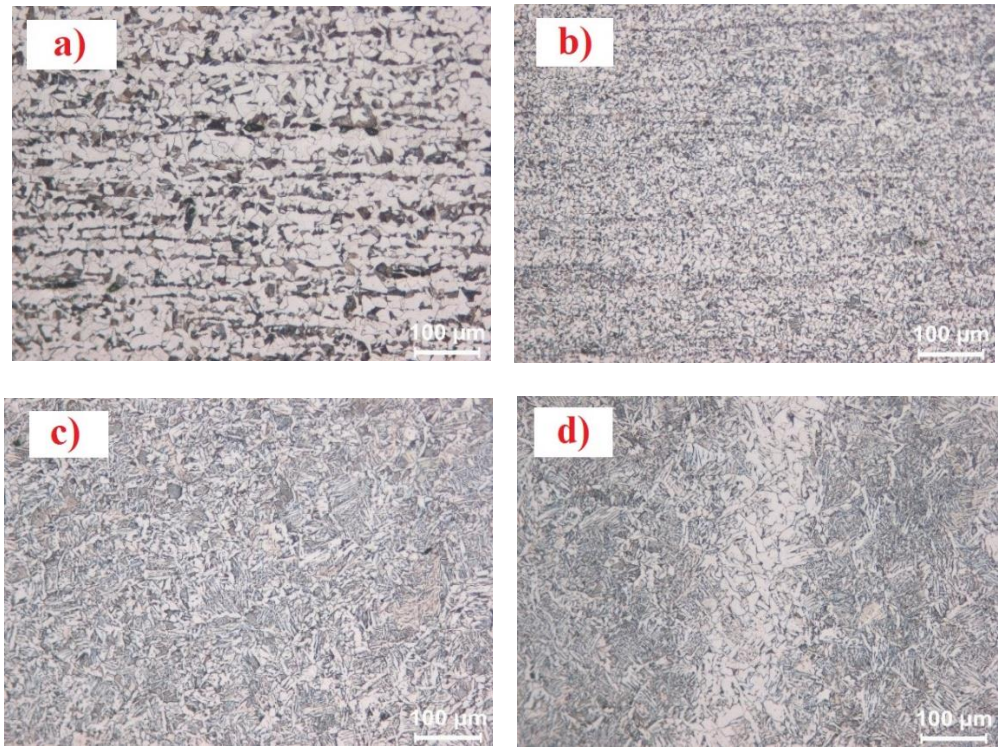
B bölgesinde kaynak bölgesine yakın ısıdan etkilenen bölge olan ITAB bölgesidir. Ana malzemeye göre perlit kolonilerinin küçüldüğü ve ferrit fazları arasında biraz daha homojen dağıldığı görülmektedir.

C bölgesi kaynak bölgesidir. Bu bölge incelendiğinde de tane yapısının ince ve uzun şekilli dendritik tanelerden oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu ince ve uzun şekilli taneler iğnemsi bir yapıya benzediği için asiküler ferrit yapı olarak ta değerlendirilebilir.

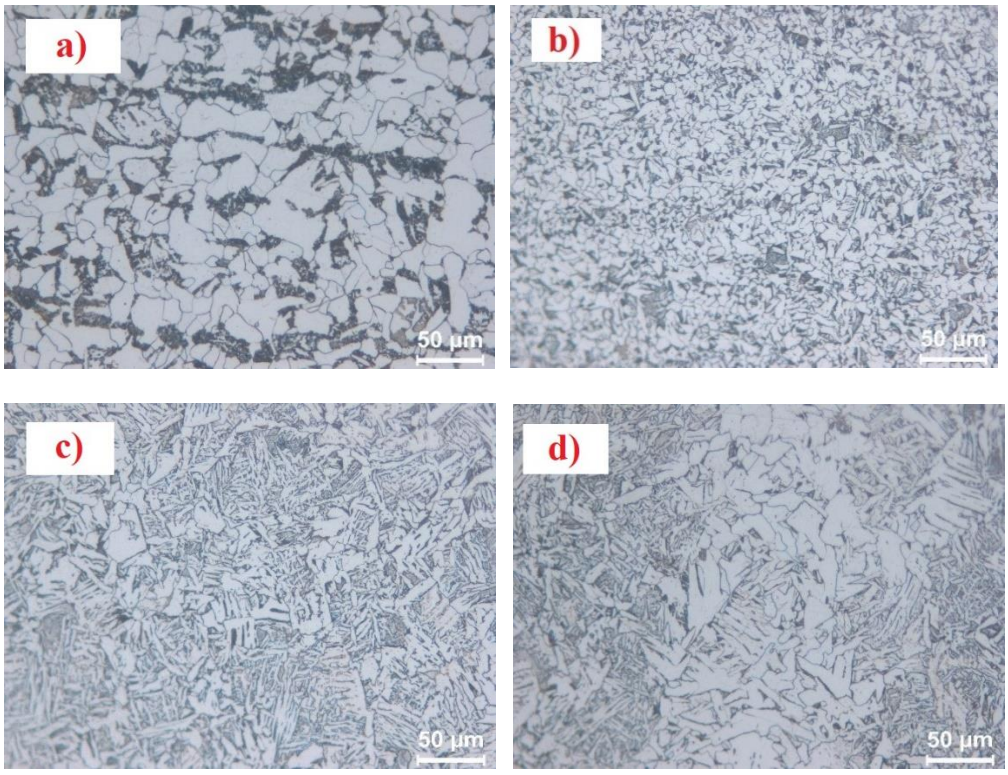
Yapılan kaynak ve metalografi işlemlerinin sonucunda optik mikroskop altında numunelerden elde edilen mikro yapıların genel görüntüleri ise aşağıda verilmiştir.



Resim 7.8. Numune üzerinden alınan 5x büyütme görüntüleri a) Esas Metal, b) ITAB c) Geçiş Bölgesi, d) Kaynak Bölgesi

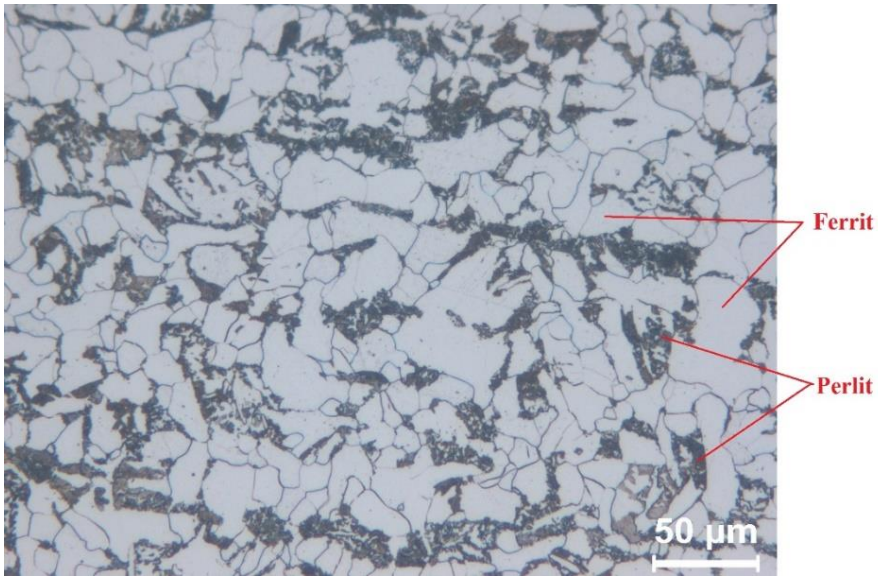


Resim 7.9. Numune üzerinden alınan 10x büyütme görüntüleri a) Esas Metal, b) ITAB c) İri Taneli Bölge, d) Kaynak Bölgesi



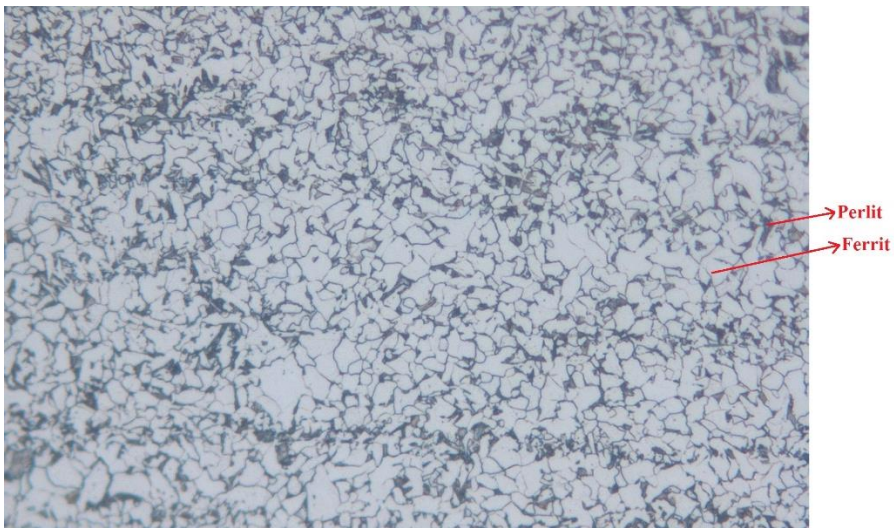
Resim 7.10. Numune üzerinden alınan 20x büyütme görüntüleri a) Esas Metal, b) ITAB c) Geçiş Bölgesi, d) Kaynak Bölgesi

Elde edilen mikroyapı analizlerinde oluşan yapıların daha detaylı görülebilmesi adına 20x büyütmede incelenerek, oluşan yapılar aşağıda gösterilmiştir.



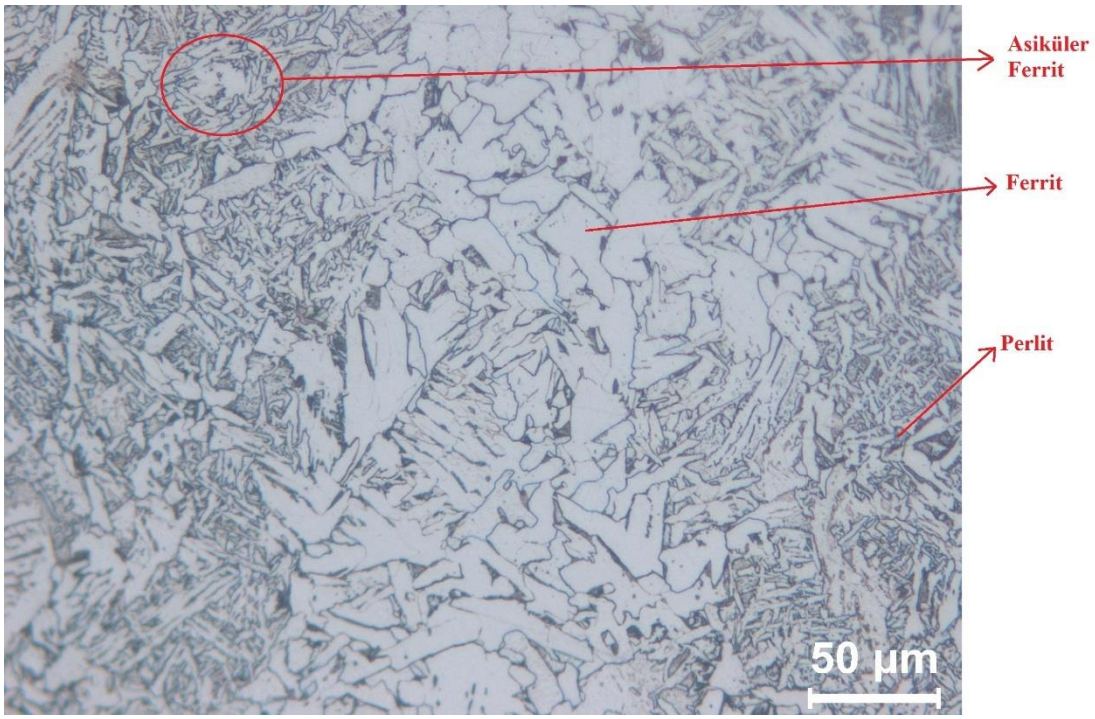
Resim 7.11. Isı değişimi olmayan bölgenin (esas metal) 20x büyütmedeki görüntüsü

Resim 7.11' de görüldüğü üzere kaynak bölgesinden en uzakta olan bölgede herhangi bir mikroyapı değişimi olmamıştır. Malzeme ana metalin mikroyapısı olan Ferrit ve Perlitik yapı karışımından oluşmaktadır.



Resim 7.12. Isının tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) 20x büyütmedeki görüntüsü

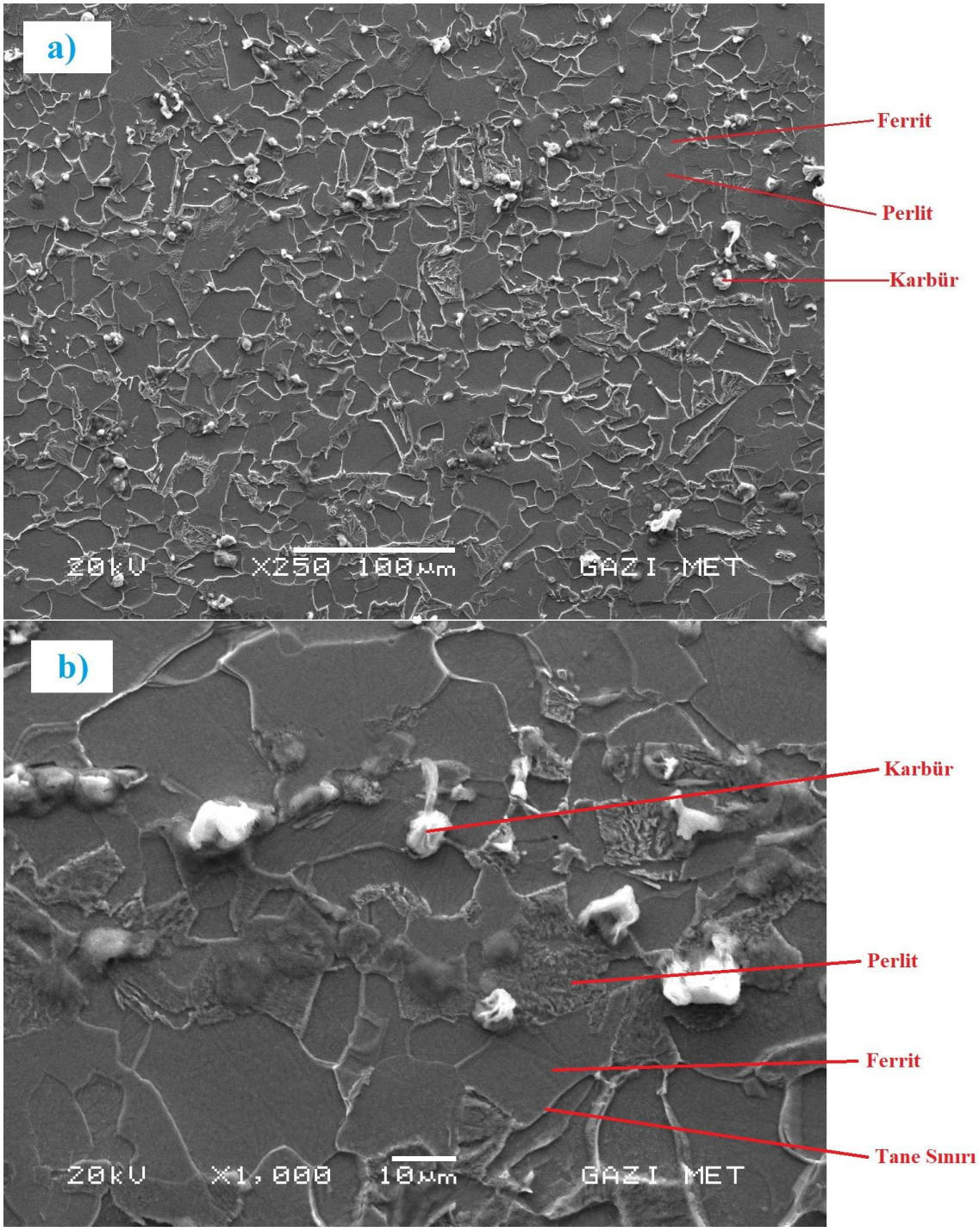
Resim 7.12’ de görüldüğü üzere kaynak bölgesinde oluşan yoğun ısıdan ve hızlı soğumadan dolayı iç yapı değişikliğine uğrayan bir bölge meydana gelmektedir. Bu bölgede ana malzemeye göre perlit kolonilerinin daha küçüldüğü ve ferrit fazları arasında ana metale göre biraz daha fazla homojen dağıldığı görülmektedir.



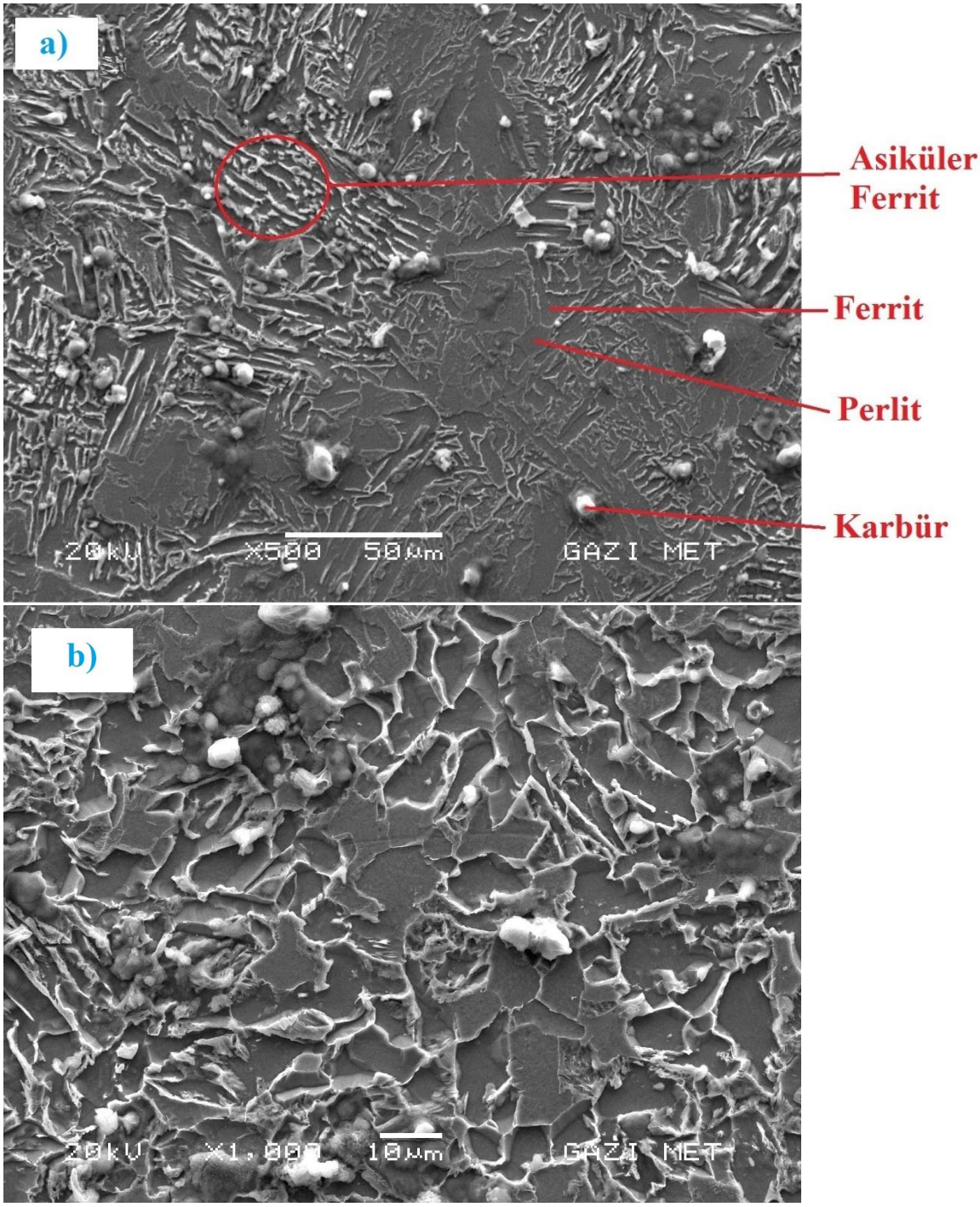
Resim 7.13. Kaynak bölgesinin 20x büyütmedeki görüntüsü

Resim 7.13’ de kaynak bölgesinin mikroyapısı incelendiğinde birleşme yüzeylerinde, yoğun ferritik yapı bulunurken, birleşme çizgisinin hemen yanında yer yer asiküler ferrit ve widmanstatten ferritten oluşan iri taneli bir yapı mevcuttur. Tane yapısının bu bölgelerde ince ve uzun şekilli dendritik tanelerden oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu ince ve uzun şekilli taneler iğnemsi bir yapıya benzediği için asiküler ferrit yapı olarak da değerlendirilebilir.

7.5. SEM Görüntüleri



Resim 7.14. Isı değişimine uğramamış bölgenin (esas metal) SEM görüntüleri a) 250x büyütme, b) 1000x büyütme

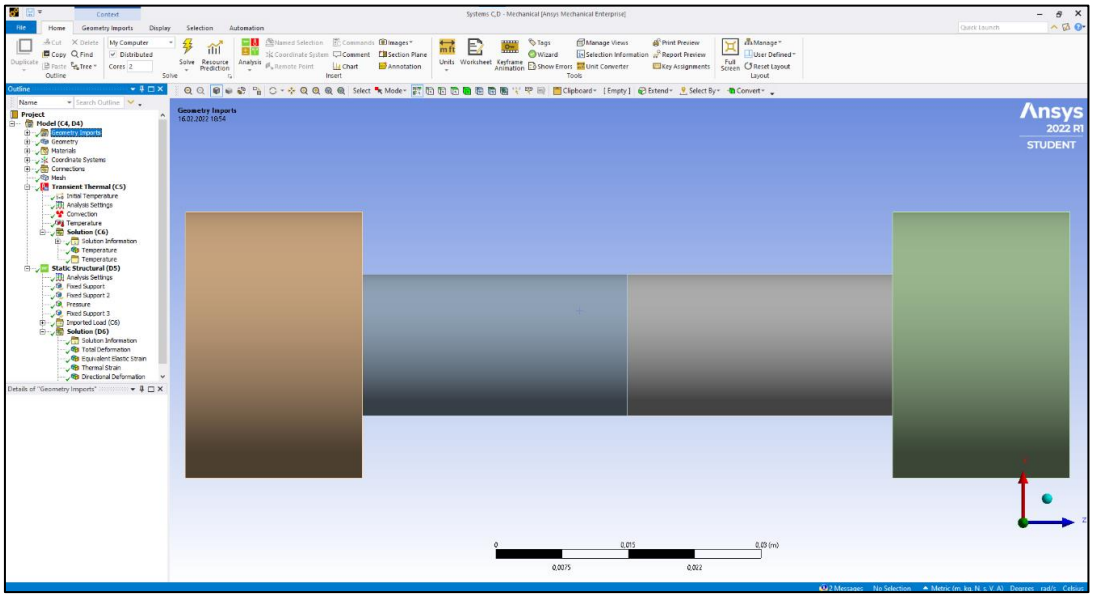


Resim 7.15. Kaynak bölgesinin SEM görüntüleri a) 500x büyütme, b)1000x büyütme

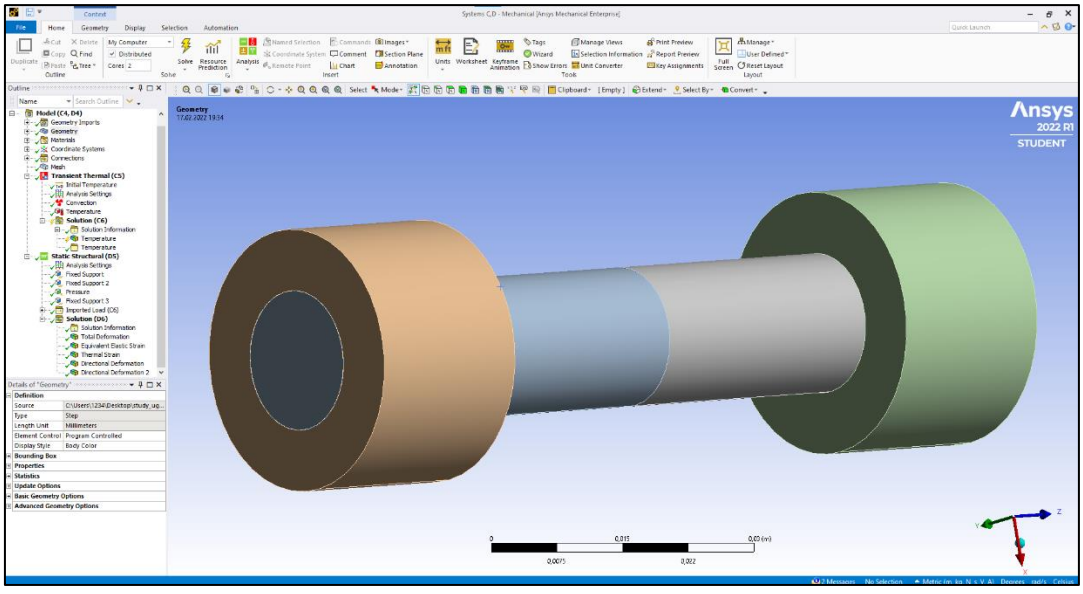
Bölüm 7.4' de incelenen mikroyapı görüntülerinin daha net görünümleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiştir. Kaynak bölgesindeki dendritik yapı bu görüntülerde net olarak görülmektedir.

7.6. ANSYS Sonuçları

Deneysel çalışmaları gerçekleştirilen numunelerin aynı işlem şartlarına uygun olarak ANSYS modeli birebir ölçülerde oluşturulmuştur. Modelin ANSYS'de çözümü kaynak sırası planına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi için gereken veriler deneysel çalışmalarda kullanılan verilerle birebir aynı tutularak yapılmıştır (Bkz Çizelge 6.3).



Resim 7.16. Modelin oluşturulması



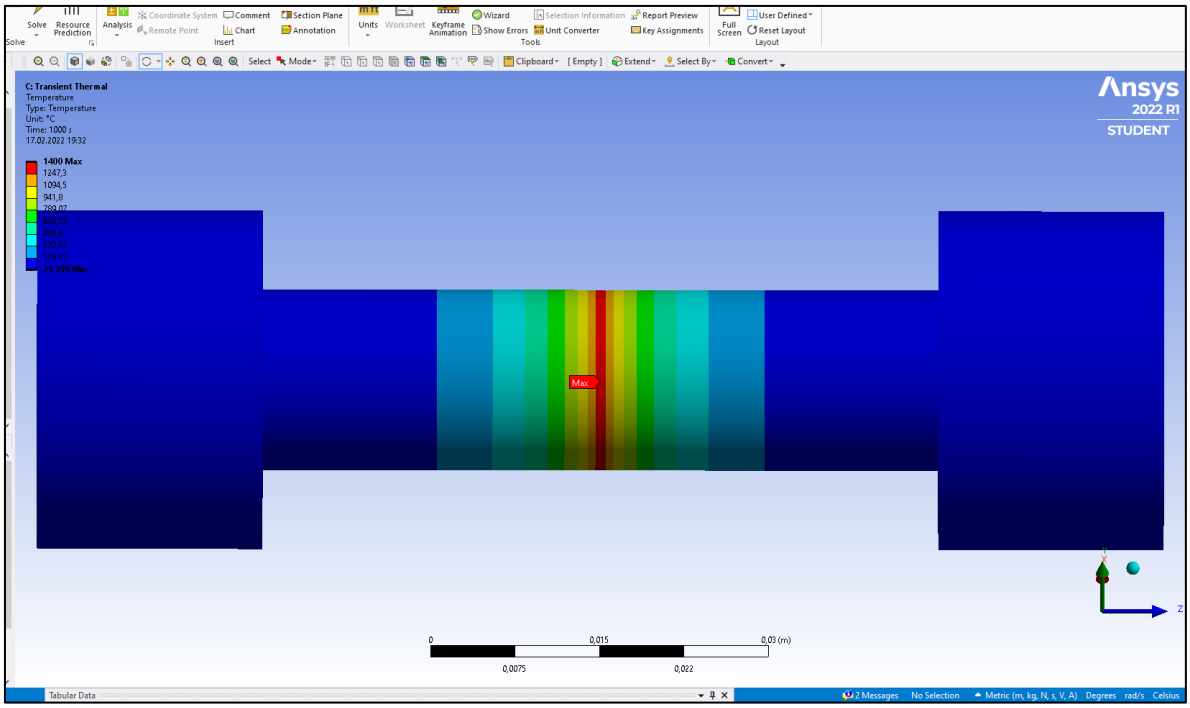
Resim 7.17. Modelin oluşturulması ve yandan görünümü

Resim 7.16 ve 7.17’ de görüldüğü üzere model oluşturulurken kaynak yapılmış numunelerin yanı sıra, yakma alın kaynağı makinesinin çene tutucularıda modellemeye dahil edilmiştir. Modelleme yapıldıktan sonra malzeme özellikleri programa atanmıştır. Ansys programı yapısında birçok malzeme için gereken özellikler program tarafından bilinmektedir. S355JR yapı çeliği malzemesi genel özellikleri de bunlardan biridir. Bu sebeple programa bu malzeme otomatik olarak tanımlanarak ekstra bir manuel müdahalede bulunulmamıştır. Çizelge 7.2’ de S355JR malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir.

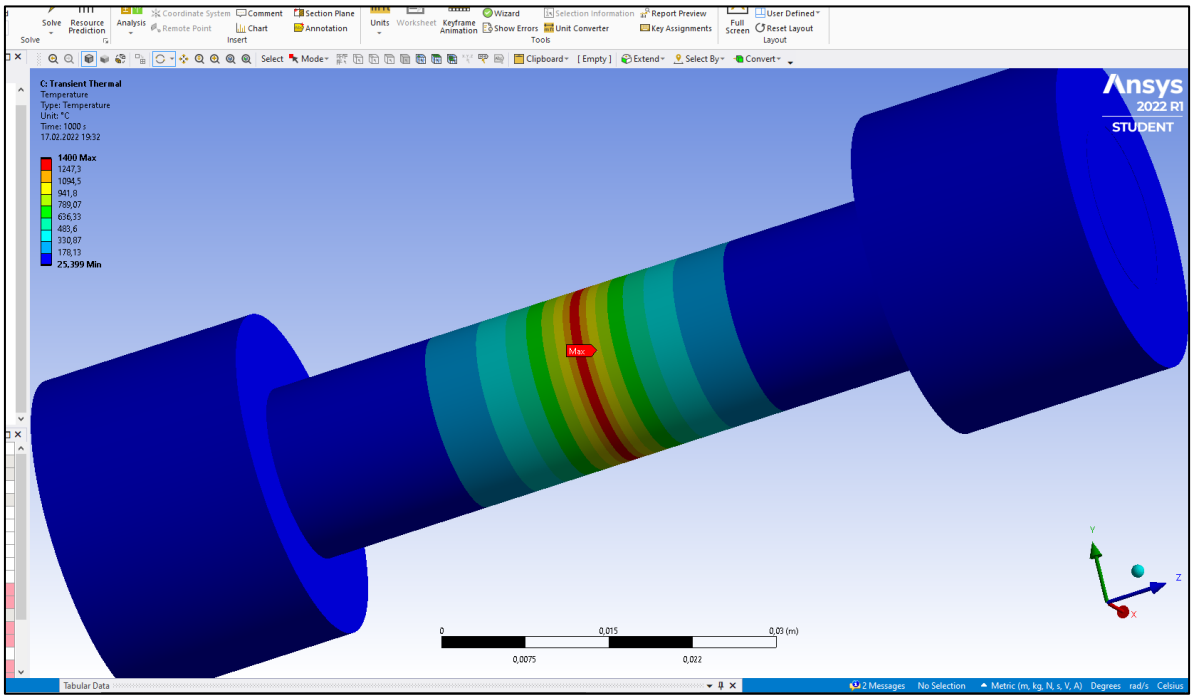
Çizelge 7.2. S355JR mekanik özellikleri

Özellikler	S355JR
Elastikiyet modülü (N/mm2)	2,10E + 20
Poisson oranı (N/A)	0.28
Yırtılma modülü (N/mm2)	7.9E + 010
Kütle yoğunluğu (kg/m3)	7,80E + 03
Gerilme mukavemeti (N/mm2)	4,50E + 08
Akma mukavemeti	2,75E + 08
Termal genleşme katsayısı (1/K)	1.1E + 005
Termal iletkenlik (W/(m.k))	1,40E + 01
Özgül ısı (J/(kg.K))	4,40E + 02

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra, deney esnasında kullanılan parametreler programa tanımlanmıştır (Bkz Çizelge 6.3). Gerekli tanımlamalar yapıldıktan sonra yakma alın kaynağı simülasyonu gerçekleştirilmiştir ve kaynak işlemi bittikten sonra termal analiz yapılmıştır.



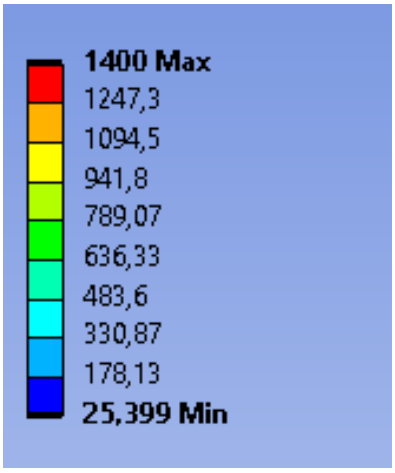
Resim 7.18. Kaynak işlemi sonrası ısıl çözümleme



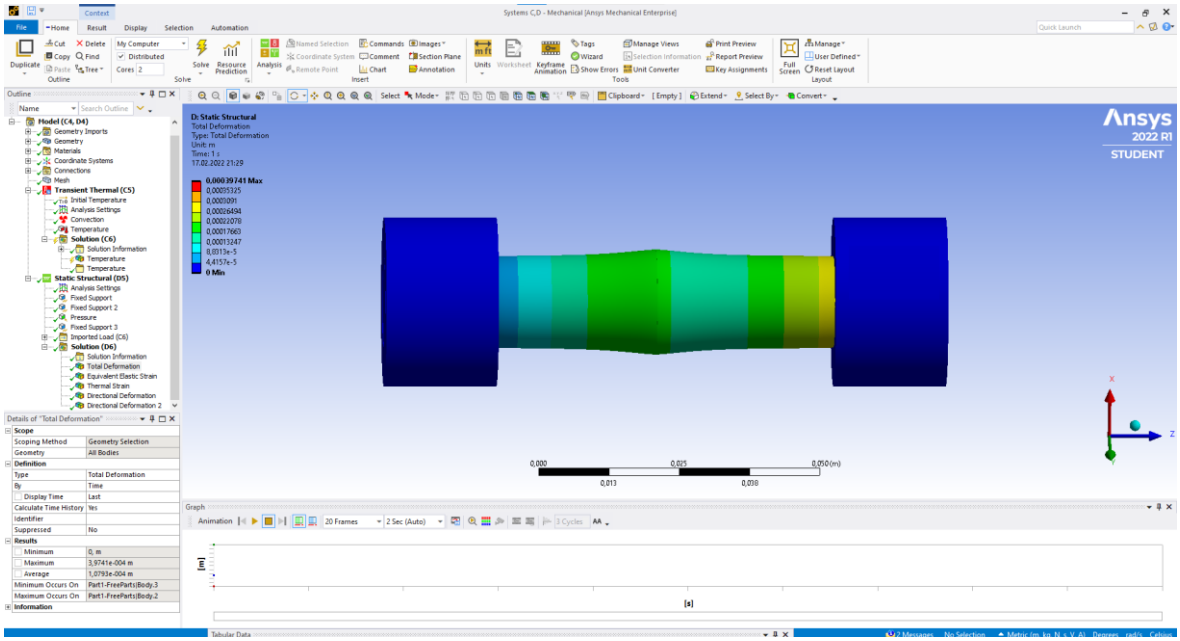
Resim 7.19. Kaynak işlemi sonrası ısıl çözümleme yandan görünüm

Resim 7.18’ de görüldüğü üzere ısıl çözümleme sonrası alın alına birleştirilen malzemelerin tam alın bölgesinde maksimum sıcaklığa ulaşılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında termal kamera ile görüntülenen maksimum sıcaklık 1265 °C dir. Ansys ile yapılan termal çözümleme sonrası ulaşılan maksimum sıcaklık 1400 °C olarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara yüzde doksan oranında yaklaşılmıştır. Termal kameranın tutuş açısındaki en ufak değişimler bile ölçülen sıcaklık değerlerinde oynamalara sebebiyet verebilir ve aradaki 135 °C tolere edilebilecek bir değerdir.

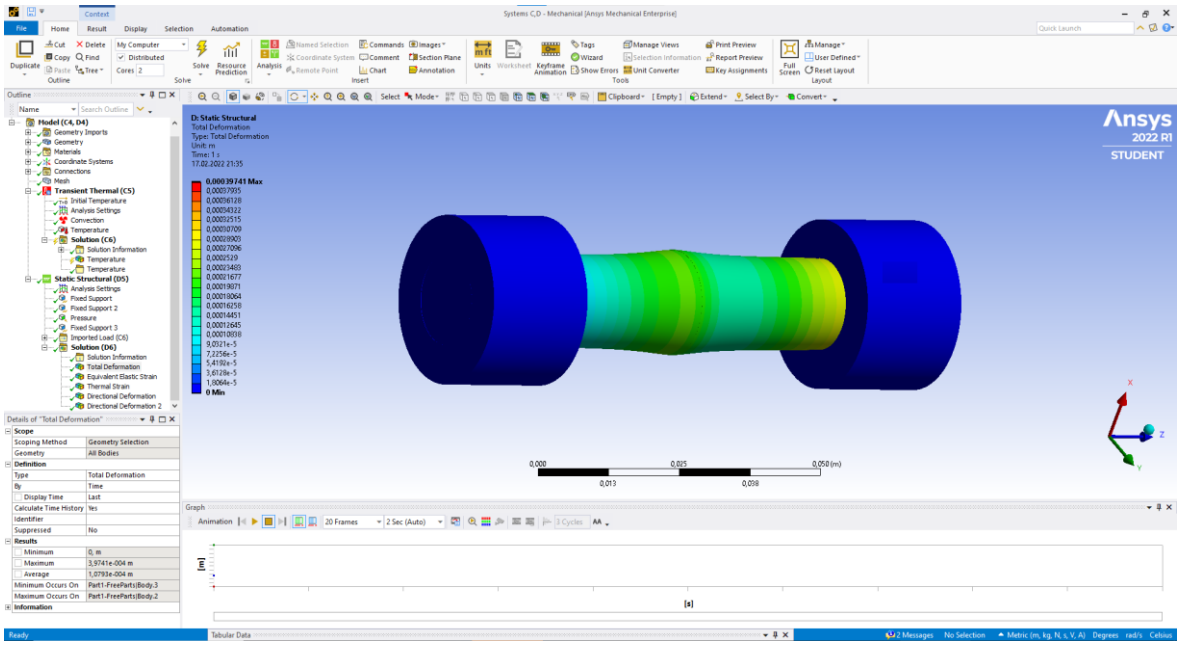
Isıl çözümleme sonrası deneysel çalışmalarda elde edilmiş olan, termokupllar yardımıyla ölçülen sıcaklık değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça ölçülen sıcaklık değerleri sırasıyla 1247 °C, 1094 °C, 941 °C, 789 °C, 636 °C, 483 °C, 330 °C, 178 °C dir.



Resim 7.20. Isıl çözümleme sonrası elde edilen sıcaklık değerleri



Resim 7.21. Total deformasyon çözümlemesi



Resim 7.22. Total deformasyon çözümlemesi yandan görünüm

Deneysel parametreler kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında ölçü değişimleri olduğu gözlenmiştir. Kaynak işlemi esnasında çenelerden birinin kuvvet uygulaması neticesinde alın bölgesinde bir miktar şişme ve boyutsal olarak küçülme meydana gelmektedir. Yapılan total deformasyon çözümlemesi sonrası bu ölçü kaybının toplam 3 mm olduğu görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

ITAB bölgesinde oluşan taneler ısı akış yönünün tersine olacak şekilde kaynak metali merkezine doğru yönlenmektedir.

Kaynak metalinde oluşan taneler farklı bir birleşim materyali kullanılmadığı için ana malzeme tanelerinin bir devamı şeklinde oluşmaktadır ve kaynak metali çok fazla gözenek, oksit vb. gibi olumsuzluk içermemektedir.

Malzemede meydana gelebilecek olan gözeneklilik gibi süreksizlerin yığma bölgelerine doğru ilerlediği ve işlem sonucunda uygun temizleme işlemlerinin yapılması halinde giderilebilecek şekilde olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynak bölgesine etki eden basınç, direnç ve soğuma şartlarına bağlı olarak oluşan etkiler sebebiyle herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamaktadır.

Kaynak merkezine ait bölge incelendiğinde birleşme yüzeyinde yoğun ferritik yapı bulunurken, birleşme çizgisinin hemen yanında asiküler ferrit ve widmanstatten ferritten oluşan iri taneli yapı mevcuttur. Geçiş bölgesinde yine bu yapılar varlığını korurken, daha homojen bir görünüme sahip olduğu görülmektedir.

Yapılan deneysel ve Ansys analiz sonuçlarından elde edilen veriler birbiri ile tamamen aynı olmamakla birlikte yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Birleştirilecek parçalarda kaynak işleminden dolayı meydana gelebilecek ısıl hareketliliği ANSYS programı ile önceden tespit etmek mümkün olabilmektedir. Isıl hareketliliği önceden tahmin edebilmek; konstrüksiyon uygulamalarındaki tasarımda muhtemel oluşabilecek hataların en aza indirilmesine ve dolayısıyla hem maddi hem de zaman olarak ciddi kazanımlar sağlayacaktır.

İmalata başlamadan önce yapılan tasarımın uygun programlarda modellenip ANSYS' de analizini yapmak üretici için oluşabilecek hataların önceden tespitini kolaylaştıracak ve alınacak önlemler hakkında fikir verecektir. Burada üreticinin yapacağı konstrüksiyonu iyi tasarlamış olması ve kullanacağı malzemelerin özelliklerini iyi bilmesi gerekmektedir. Çünkü analiz yapılırken eksik ya da yanlış değerler analizin doğru ve tam yapılmasına engel olacaktır. Kaynak işleminden dolayı konstrüksiyona giren ısının sebep olduğu kalıcı gerilmeleri ve distorsiyonları tespit etmek oldukça zor olduğundan bilgisayar programları kullanarak bu sorunları tespit etmek mümkündür. Isıl dağılım ve kalıntı gerilme gibi kaynak sırasında ve sonrasında meydana gelen olayların tespiti için pahalı deney düzenekleri gerekmektedir. Bu problemleri bilgisayar programlarıyla çözmek daha ekonomik olacaktır.

8.2. Öneriler

- Deneysel çalışma kısmında kaynak parametrelerini sabit tutarak kaynak sırası planı değiştirilmeden deney tamamlanmıştır. Bu çalışma farklı kaynak parametreleri kullanılarak karşılaştırma şeklinde bir çalışma yapılabilir.

- Bu çalışmada numuneler herhangi bir açı olmadan direkt olarak birleştirme yapılmıştır. Farklı açılarda birleştirme yapılarak daha sonra bu çalışmanın ANSYS üzerinde simülasyonu yapılarak karşılaştırma yapılabilir.

- Daha karmaşık yapılarda kaynak ısısının etkisini görmek için deneysel çalışma ve modellemeler yapılabilir.

- Kaynaklı birleştirmelerin eğme, kırma gibi mekanik testleri için modeller oluşturulup analizi yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Ervan, A. kişisel web sayfası. Web: https://www.elvanarslannet.wordpress.com, Erişim Tarihi: 15.05.2021.

2. Kökçe, Y. (2002). *Demiryolu Taşıt ve Raylarının Üretim ve Tamir-Bakımında Uygulanan Kaynak Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65-76.

3. Onay, M. (2011). *Demiryollarında Alüminotermit Kaynak ile Yakma Alın Kaynak Yöntemlerinin Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 54-57.

4. Esveld, C. (2001). Modern Railway Track, *MRT Productions*, 3(2), 41-50.

5. Sandal, O. (1988). *Farklı İki Takım Çeliğinin Elektrik Direnç Yakma Alın Kaynağında Ara Yüzeylerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 61-63.

6. Karabulut, T. (2019). *Aa505 Alüminyum Alaşımının Lazer ve Tıg Kaynak Yöntemi Kullanılarak Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 21-24.

7. Kuday, N. ve Ertürk, İ. (1997). *Raylarda Yakma Alın Kaynağı*, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi 1. Ulusal Kongresi, Ankara, 41-45.

8. Najafi, M., Mirzadeh, H., and Alibeyki, M. (2019). Improved mechanical properties of structural steel via developing bimodal grain size distribution and intercritical heat treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(9), 5409-5414.

9. Havuş, N. (2019). *Düşük Karbonlu St 37 Çeliğinin Sınırlandırılmış Yivli Presleme ile Mekanik Özelliklerinin iyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 57-59

10. Çalik, A. (2009). Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels. *International Journal of Physical Sciences*, 4(9), 514-518.

11. Kınıkoğlu, N. (2001). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, Mart Matbaacılık, 855-858.

12. İnternet: CADSAY web sayfası. Web: http://cadsay.com/ansys-nedir, Erişim Tarihi: 12.12.2021.

13. İnternet: Figes A.Ş. web sayfası. Web: http://www.figes.com.tr/ansys, Erişim Tarihi: 15. 12.2021.

14. Tayfun, F. **(**2008). *304 Tipi Paslanmaz Çeliklerin Mig Kaynağındaki Isı Transferinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 71-82.

15. Mehmet, A. **(**2002). *Kaynak Distorsiyonları ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 51-53.

16. Serkan, L. (2009). *Kaynak İşlemi Sırasında Isı Geçişinin Deneysel ve Teorik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 49-51.

17. Asım, Ö. **(**2006). *Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 45-48.

18. Serkan, B. **(**2004). *Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 51-52.

19. Vemanaboina, H., Akella, S. and Buddu, R.K. (2014). Welding process simulation model for temperature and residual stress analysis. *Science Direct,* 6, 1539-1546.

20. Varghese, J., Sumanth, M.R., and Suresh M.R. (2012). Numerical sumilation of residual stress in a spot welded low karbon steel plate. *SciVerse Science Direct,* 38, 2913-2921.

21. Zhou, Y., Chen, X.D., Fan, Z.C. and Rao, S.X. (2015). Finite Element Modelling of Welding Residual Stress and Its Influence on Creep Behavior of a 2.25 Cr-1Mo0.25V Steel Cylinder. *Science Direct,* 130, 552-559.

22. Knoedel, P., Gkatzogiannis, S. and Ummenhofer, T. (2017). Practical aspects of welding residual stress simulation. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 83-96.

23. Wu, A., Syngellakıs, S., and Mellor, B.G. (2001). *Finite Element Analysis of Residual Stresses in a Butt Weld*. The Post Graduate Conference in Engineering Materials Proceedings University of Southampton, İngiltere, 242-244.

24. Yavuz, N., Özcan, R. ve Polat, F.G. (2005). Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10(2), 17-18.*

25. Vural, U. (2009). *Kaynaklı İmalat Sonrası Oluşan Distorsiyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 52-57.

26. Savaşkan, T. (2018). *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*. (8.Baskı). İstanbul: Papatya Yayıncılık, 341-356,

27. Savaşkan, T. (2018). *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*. (8.Baskı). İstanbul: Papatya Yayıncılık, 281-287,



GAZİ GELECEKTİR...