



**ÇELİK KONSTRÜKSİYONLARDA KAYNAK ISISINDAN DOLAYI
MEYDANA GELEN ÖLÇÜ HATALARININ DENEYSEL VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

Naim LAÇIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2017

Naim LAÇİN tarafından hazırlanan “ÇELİK KONSTRÜKSİYONLARDA KAYNAK ISISINDAN DOLAYI MEYDANA GELEN ÖLÇÜ HATALARININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metal Eğitimi Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Tayfun FINDIK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Kubilay KARACİF

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 12/05/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Naim LAÇİN

12/05/2017

ÇELİK KONSTRÜKSİYONLARDA KAYNAK İSİSİNDAN DOLAYI MEYDANA
GELEN ÖLÇÜ HATALARININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİYLE ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Naim LAÇIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2017

ÖZET

Çelik konstrüksiyonlar çoğu zaman kaynaklı imalat ile birleştirilmek zorundadır. Kaynak ısısı ise konstrüksiyonda şekil bozukluğuna ve ölçü hatalarına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, kaynaklı birleştirmelerle oluşturulmuş çelik konstrüksiyonlarda kaynak ısısından dolayı çekme ve çarpılmaların neden olduğu ölçü hatalarını önceden tahmin edebilmek adına deneysel ve bilgisayar modeli üzerinde mukayeseli bir araştırma yapılmıştır. Öncelikle basit bir çelik konstrüksiyon tasarımı yapılmış ve bu tasarımın kaynaklı imalatı gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı imalat işlemi sonucunda meydana gelen çekme ve çarpılmaların neden olduğu ölçü hataları tespit edilmiştir. Aynı konstrüksiyonun Solid programında katı modellemesi Parasolid(x.t.) ara yüzü kullanılarak ANSYS programına transfer edilmiştir. ANSYS’de gerekli olan statik analiz yapıldıktan sonra malzeme özellikleri ve sınır şartları belirlenmiş ve problem çözümü yapılmıştır. Problem çözümünden sonra ANSYS’de elde edilen veriler, kaynaklı imalat ile yapılan model üzerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç değerleri sonlu elemanlar tabanlı ANSYS programından elde edilen veriler ile gerçek model üzerinden alınan verilerin büyük oranda uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91511

Anahtar Kelimeler : Çelik Konstrüksiyonlar, Sonlu Elemanlar, Kaynak, Kalıntı Gerilmeler, Distorsiyon, Ölçü Hataları

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Tayfun FINDIK

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHODS OF
MEASURED MISTAKES IN THE WELDING HEAT REASONING THE WELDED
MANUFACTURING OF THE STEEL CONSTRUCTIONS

(M. Sc. Thesis)

Naim LAÇIN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2017

ABSTRACT

Steel constructions often have to be combined with welded manufacturing. Welding heat causes for deformation and measurement mistakes in the construction. In this study, a comparative study was conducted on the experimental and computer model in order to predict the measurement mistake caused by pulling and warping due to welding heat in welded jointed steel constructions. First, a simple steel construction design was made and the welded manufacture of this design was realized. As a result of the welded manufacturing process, measurement mistakes are detected which are caused by tensile and distortion. In the Solid program of the same construction, solid modeling was transferred to the ANSYS program using the Parasolid (x.) interface. After the static analysis required in ANSYS, material properties and boundary conditions were determined and problem solved. After the solution of the problem, the data obtained in ANSYS was compared with the data obtained from model made with welded manufacturing. The results obtained from the ANSYS program based on the finite element and the data obtained from the real model are in great agreement with each other.

Science Code : 91511
Key Words : Steel Constructions, Finite Element, Welding Residual Stresses, Distortion, Measurement Errors
Page Number : 89
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Tayfun FINDIK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca kıymetli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok değerli tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Tayfun FINDIK'a, kıymetli tecrübelerini esirgemeyen değerli hocalarım, Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ'e, Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU'ya, Yrd. Doç. Dr. Uğur ARABACI'ya, ANSYS programının kullanımı ve programla ilgili yaşadığım problemlerde yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Melih OKUR'a, imla kuralları ve biçim değerlendirme hususunda zamanını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hakan ADA'ya, tez modelinin oluşturulması aşamasında gereken masraf ve emeklerini esirgemeyen kıymetli arkadaşım Metin DEĞERLİ'ye, manevi desteğiyle her daim yanımda olan aileme ve birçok konuda desteğini aldığım sevgili dayım 'Bozok Üniversitesi İİB Fakültesi Maliye Bölümü' Yrd. Doç. Dr. Murat KOÇSOY'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3.KAYNAK YÖNTEMİ	11
4.KALINTI GERİLME VE DİSTORSİYONLAR	19
4.1. Kalıntı Gerilmeler	19
4.1.1. Kalıntı gerilmelerin oluşumuna etki eden faktörler	20
4.1.2. Kaynak gerilmeleri.....	23
4.1.3. Kaynaklı yapılarda oluşan kalıntı gerilmeler	26
4.1.4. Kalıntı gerilmelerin ölçülmesi.....	29
4.2. Distorsiyon	32
4.2.1. Kaynaklı birleştirmelerde distorsiyon oluşumuna etki eden faktörler	34
4.2.2. Distorsiyon tipleri	37
4.3. Distorsiyonlar ile Artık Gerilme Arasındaki İlişki.....	42
4.4. Büzülme ve Artık Gerilmelerin Engellenmesi İçin Yapılması Gerekenler	43

5. KALINTI GERİLME VE DİSTORSİYONLARIN SAYISAL ÇÖZÜMÜ	45
5.1. Isı Transfer Mekanizmaları	46
5.1.1. İletim ile ısı transferi denklemi	46
5.1.2. Taşınım ile ısı transferi denklemi.....	47
5.1.3. Işınım ile ısı transferi denklemi	47
5.1.4. Bir katı malzemedeki enerji üretimi.....	48
5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	48
5.3. ANSYS Programının Yapısı	50
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	53
6.1. Konstrüksiyon Tasarımı ve Deney Düzeneği	57
6.2. ANSYS’de Model Oluşturma ve Analiz.....	62
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	65
7.1. Çelik Kafes Kiriş Oluşumunda Distorsiyon Sonuçları ve Tartışma	65
7.2. Konstrüksiyonun ANSYS’de Analiz Sonuçları ve Tartışma	67
7.3. Sonuçların Değerlendirmesi.....	79
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
8.1. Sonuçlar.....	83
8.2. Öneriler	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kalıntı gerilimini ölçmede kullanılan yöntemler.....	31
Çizelge 4.2. Kaynaklı yapılarda kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan gerilme-gevşeme tekniklerinin uygulamaları, avantaj ve dezavantajları ...	32
Çizelge 6.1. Genel yapı çeliklerinin mekanik özellikleri.....	54
Çizelge 6.2. Genel yapı çeliklerinin kimyasal bileşimi	54
Çizelge 6.3. Kaynak makinesinin teknik özellikleri	56
Çizelge 6.4. Kaynak teli kimyasal kompozisyonu.....	57
Çizelge 6.5. Kaynak teli mekanik özellikleri.....	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. İlave kaynak metali kullanılarak yapılan ergitme kaynağı	12
Şekil 3.2. İlave metal kullanmadan yapılan ergitme kaynağı	12
Şekil 3.3. MIG-MAG kaynağının prensibi	13
Şekil 3.4. MIG-MAG kaynak donanımının blok şeması	14
Şekil 3.5. Kutuplamanın dikiş formuna ve kaynak özelliklerine etkisi	15
Şekil 3.6. Çeşitli koruyucu gazların dikiş formu ve nüfuziyete etkisi (Alın birleştirme)	16
Şekil 3.7. Çeşitli koruyucu gazların dikiş formu ve nüfuziyete etkisi (Köşe kaynağı) .	16
Şekil 4.1. Konstrüktif tedbirler ile rijiditenin artırılması	21
Şekil 4.2. Demin-Karbon denge diyagramı	22
Şekil 4.3. Sıcaklık dağılımına bağlı olarak boyuna gerilme dağılımı.....	23
Şekil 4.4. V alın birleştirmesinde boyuna ve enine gerilmeler	24
Şekil 4.5. İç köşe dikişlerinde kendini çekmeler sebebiyle meydana gelen gerilme dağılımı	25
Şekil 4.6. İç köşe dikişlerinde kendini çekme tesiri.....	25
Şekil 4.7. Çok pasolu alın kaynağında final kalıntı gerilme dağılımı.....	26
Şekil 4.8. Az karbonlu çeliklerin alın kaynağında kaynak metalinin kalınlık doğrultusunda kalıntı gerilmelerin dağılımı	27
Şekil 4.9. Çeşitli kaynaklı profillerdeki artık gerilmelerin dağılımları.....	28
Şekil 4.10. Borularda çevresel kaynak dikişindeki reaksiyon kuvvetleri	29
Şekil 4.11. Parçaların kaynak işlemlerinde oluşan durumları.....	33
Şekil 4.12. X kaynak ağzında enine büzülme	37
Şekil 4.13. X kaynak ağzında boyuna büzülme	38
Şekil 4.14. T birleşiminde büzülme	38
Şekil 4.15. T ve alın birleştirmelerde açısıl çarpılma.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. İnce levhalarda boyuna büzülme etkisinde oluşan buruşma.....	39
Şekil 4.17. I profilde kaynak eksenini doğrultusunda oluşan büzülme	39
Şekil 4.18. T profilde açısal çarpılma	40
Şekil 4.19. St 37 çeliğinden yapılmış iç köşe birleştirmelerinde açısal distorsiyonun kaynak dikiş yüksekliği ile değişimi.....	40
Şekil 4.20. Dikiş teşkil tarzının açısal distorsiyona tesiri	41
Şekil 4.21. Distorsiyon ve artık gerilme arasındaki ilişki.....	42
Şekil 4.22. İnce ve kalın levhalarda artık gerilmenin karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.23. Geri adım tekniği örnekleri.....	44
Şekil 5.1. Isı kaynağından çeşitli mesafelerdeki soğuma eğrileri.....	46
Şekil 6.1. Deney konstrüksiyonunun şematik gösterilişi	58
Şekil 6.2. MIG/MAG kaynak donanımının şematik olarak gösterilişi	58
Şekil 6.3. Kaynak sırası planı	61
Şekil 7.1. Konstrüksiyonun şematik gösterilişi	65
Şekil 7.2. Zaman-Sıcaklık dağılım eğrileri	80
Şekil 7.3. Zaman- Gerilim dağılım eğrileri.....	81

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Kaynak makinesi özellikleri	55
Resim 6.2. Deney konstrüksiyonunu oluşturma aşamaları	59
Resim 6.3. Deney düzeneğinin profillerle teraziye alınması	60
Resim 6.4. Deney düzeneğinin ölçü kontrolü	60
Resim 6.5. Köşeler arası mesafe ölçümü	61
Resim 6.6. Solidworks tasarım dosyasını Parasolid(.x_t) olarak kaydetme	62
Resim 6.7. Modelin mesh görüntüsü	63
Resim 6.8. Unsur ağacında işlem basamaklarının takip edilmesi.....	64
Resim 7.1. 1 numaralı kaynak dikişi için değişen ölçülerin belirlenmesi	66
Resim 7.2. 1 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	67
Resim 7.3. 2 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	68
Resim 7.4. 3 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	68
Resim 7.5. 4 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	69
Resim 7.6. 5 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	69
Resim 7.7. 6 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	69
Resim 7.8. 7 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	70
Resim 7.9. 8 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	70
Resim 7.10. 9 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	71
Resim 7.11. 10 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	71
Resim 7.12. 11 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	71
Resim 7.13. 12 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü	72
Resim 7.14. 1 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme	73
Resim 7.15. 2 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme	73

Resim	Sayfa
Resim 7.16. 3 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	74
Resim 7.17. 4 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	74
Resim 7.18. 5 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	74
Resim 7.19. 6 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	75
Resim 7.20. 7 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	75
Resim 7.21. 8 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	75
Resim 7.22. 9 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	76
Resim 7.23. 10 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	76
Resim 7.24. 11 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	76
Resim 7.25. 12 numaralı kaynak dikişı için ANSYS’de mekanik çözümleme	77
Resim 7.26. Toplam ısı akışı çözümü.....	77
Resim 7.27. Isı akış yönü.....	78
Resim 7.28. Toplam deformasyon miktarı	78
Resim 7.29. Elastik gerilme miktarı	79
Resim 7.30. Eşdeğer gerilme değeri	79
Resim 7.31. Sıcaklık girişi ile gerilim dağılımı	81
Resim 7.32. Çekme gerilmelerinin etkisi.....	82

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
2D	iki boyutlu
3D	üç boyutlu
MPa	mega pascal
C_{eş}	karbon eşdeğerliği
CO₂	karbondioksit
Fe₃C	sementit
γ	östenit
α	ferrit
K	kaynar döküm
S	sakin döküm
SS	yarı sakın döküm
U	sıcak haddelenmiş
N	normal tavlanmış
H	ısı girişi (J/s)
k	ısı iletim katsayısı(W/mK)
mm	milimetre
cm	santimetre
°C	santigrad derece
M_s	kendini çekme momenti
P_s	kaynağın kendini çekme kuvveti
e	kaynağın, ağırlık merkezine olan uzaklık
p	ısı kaynağından alınan toplam enerji
E	potansiyel
I	akım
q	ısı akısı(W/m ²)
t	zaman (s)

Simgeler**Açıklamalar**

T	sıcaklık (K)
T_∞	çevre sıcaklığı
σ_x	boyuna gerilmeler
σ_y	enine gerilmeler
σ_z	kalınlık doğrultusu gerilmeleri
v	kaynak hızı(m/s)
v	malzemenin hacmi (m ³)
ε	yayma oranı
η	ısı transfer etkisi azalması
σ	Stefan-Boltzmann sabiti (W/m ² K ⁴)
ρ	yoğunluk (g/cm ³)
qm	birim hacimde üretilen ısı (W/m ³)
η	ısı transfer etkisi azalması
Éü	ısı üretim oranı (W)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ANSYS	Swanson Analysis System
CAD	Computer Aided Desing
CAM	Computer Aided Manufacturing
CDM	Sürekli Hasar Mekaniği
DXF	Data Exchange Format
FEM	Finite Element Analysis
GTAW	Gaz Tungsten Ark Kaynağı
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
MAG	Metal Aktif Gaz
PWHT	Kaynak Sonrası Isıl İşlem
PLW	Darbeli Lazer Kaynağı
SAT	Standart ACIS Text
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SFY	Sonlu Farklar Yöntemi

Kısaltmalar**Açıklamalar****SPWAD**

Boru Kaynak Hizalama Cihazı

TIG

Tungten İnert Gaz



1. GİRİŞ

Teknoloji her ne kadar ilerlese de günümüzde çelik konstrüksiyonların 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. Isı girişi ise özellikle metal malzemelerde oluşturduğu yapısal değişiklikler üretim aşamalarında birtakım sorunlara neden olmaktadır ve bu sorunların başında da artık gerilmeler, çekme ve çarpılmalar, distorsiyonlar, kalıcı açısallık ve/veya doğrusal şekil bozuklukları gelmektedir. Bu bozukluklar da ölçü hatalarına neden olmaktadır.

Kaynaklı birleştirmelerdeki bu sorunlardan imalat aşamasına geçmeden önce haberdar olmak hem zaman hem maliyet hem de yapılan işin kalitesi yönünden oldukça önemlidir. Yapılacak olan konstrüksiyonun malzeme özellikleri, ısı değerleri gibi etkenleri göz önünde bulundurarak artık gerilmelerin, distorsiyonların, açısallık ya da doğrusal yönde oluşacak şekil bozukluklarının yön ve miktarlarını önceden bilmek ve üretim aşamalarını, oluşacağı bilinen bu sorunların göz önüne alınarak düzenlenmesi çok önemli bir avantaj sağlayacaktır.

Özellikle uçak ve uzay sanayi gibi teknolojinin hata kabul etmediği endüstrilerde oluşabilecek hataların önceden tespiti ve önleminin alınması yüksek maliyetli, olası can kaybı riski bulunan kazaların önüne geçilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu sebeplerden dolayı kaynaklı birleştirmelerde oluşan distorsiyonlar üzerinde durulması gereklidir.

Ark kaynağı; elektrik enerjisinin ısıya dönüştürülmesi ve bu ısının kaynaklanacak parçalara kontrollü bir şekilde verilmesi prensibine dayanan bir birleştirme yöntemidir. Yüksek ısı enerjisinin birleştirilecek parçalara nakledilmesi sonucu kaynak metali oluşturulur. Yalnız burada kaynak metali ile kaynak bölgesinin karıştırılmaması gereklidir. Kaynak esnasında her iki parçayada uygulanan ısı malzeme iletkenliği ile doğru orantılı bir şekilde hızla yayılmaya başlar. Böylece kaynak dikişinin ertafında bu ısıdan etkilenmiş olur. Isısında yüksek oluşu nedeniyle dikişe yakın bölgelerin sıcaklığı malzemelerin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkar ve mikro yapıda değişiklikler meydana getirir.

Kaynak dikişı etrafına yayılan bu ısıdan etkilenecek mikro yapıda değişimlerin oluştuğu bu bölge Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) olarak bilinir.

Ergitmeli kaynak yöntemlerindeki çalışmaların tamamı kaynak yapısını ve kaynak bütünlüğünü iyileştirmeyi hedefler. Bu hedefler; kaynağın metalurjik özellikleri, ark ısının etkisiyle oluşan kalıntı gerilmeler, ana metaldeki distorsiyon, kaynak havuzunun korunması ve oluşması ile arkın davranışı gibi önemli yönleri kapsar. Mikroyapısal değişimler ve bir kaynak yapısındaki distorsiyon kaynak yöntemlerinde termal dönüşümlerin temelini oluşturur. Termal dönüşümler ITAB'ın geometrisi ve kaynak nüfuziyetindeki bilgileri sağlar. Bununla birlikte termal dönüşümlerin kontrolü kaliteli bir kaynağın kritiğidir [1].

‘Kaynak mikroyapısının modellenme kabiliyeti, termal dalgalanma, faz değişimleri hesaplamaları ve faz geçiş teorisinin tam anlaşılabilmesine dayanır. Son yıllarda kullanılan programlar hem ergime bölgesi hem de ITAB'da kaynak mikroyapısının tahminini yapabilmektedir’ [1]. Ancak bu çalışmada mikroyapı gözardı edilmiştir ve kaynak sonrası oluşan kalıcı ölçü hataları incelenmiştir. Her ne kadar kaynak sırasında gerçekleşen ısı transferi mekanizmalarının sonuçları işlem sonunda görülebilse de işlemten önce birebir tahmin etmek zordur. Bu yüzden geliştirilen bilgisayar programları birebir sonuçları vermese de gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yönde yapılan araştırmalar sonucu Ansys programının birçok alanda kullanıldığı ve etkili sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı; kaynaklı konstrüksiyonların genel problemi olan kaynak işleminden sonra değişen ölçü hatalarının, genel yapı çelikleri için tasarlanan konstrüksiyonun Sonlu Elemanlar Yöntemi prensibi ile işlem yapabilen ANSYS programında termal analizinin gerçekleştirilip sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılmasıdır.

Deneysel çalışmalarda, kaynak ısısından dolayı oluşabilecek ölçü hatalarının miktarını önceden tahmin edebilmenin mümkün olup olmadığını görmek için genel yapı çeliği olan 40x40x2 mm ebatlarında kare profillerden konstrüksiyon tasarlanmıştır. Tasarlanan konstrüksiyon Solid Works programında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Konstrüksiyon gerekli düzenekler kurulduktan sonra kaynak işlemi için çelik sanayisinin birçok alanında

derin nufuziyet ve hızlı kaynak imkânı sunan gazaltı kaynak yöntemi olan Metal Aktif Gaz (MAG) kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Sıcaklık dağılımı ve yapısal analizleri ANSYS programında deney başlangıç şartlarına uygun olarak yapılmıştır. Daha sonra deneysel sonuçlarla, ANSYS programından elde edilen veriler karşılaştırılmış ve önerilerde bulunulmuştur.





2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaynak işleminin sayısal analizi ve simülasyonu, kaynak işlemi üzerine yapılan araştırmaların en önemli konularından birisidir. Bu konuyla ilgili bilgisayar teknolojisinin de gelişmesi ile birlikte özellikle son yıllarda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, nümerik analiz ve matematiksel modeller kullanarak bilgisayarların da yardımıyla kaynak işleminde karşılaşılan karmaşık durumlar önceden açıklanmaya çalışılmıştır. Çalışmalarda kaynaklı bir yapıdaki kaynak metali, esas metal ve özellikle de kaynak emniyeti açısından büyük önem taşıyan ısının tesiri altında kalan bölgenin yapısal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra artık gerilmeler, çekme ve çarpılmalar, distorsiyonlar, kalıcı açısallık ve/veya doğrusal şekil bozuklukları incelenmiştir. Bilindiği gibi bu özellikler kaynak yöntemi, kaynak şartları, malzeme ve benzeri birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

Knoedel ve diğerleri, literatürde bulunan malzeme verilerini kullanarak kaynaklı imalatla oluşan kalıntı gerilmeler 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 örtüştüğü görülmüştür [2].

Carmo ve diğerleri, kaynak işleminden dolayı oluşan kalıntı gerilmelerin sayısal olarak hesaplanmasında ANSYS yazılımını kullanarak 2D ve 3D (SOLID70) eleman tiplerine göre karşılaştırmalar yapmışlardır. Çalışmada elemanların stabilizasyon prosedürü de dahil olmak üzere, parabolik sıcaklık dağılımı kalınlığı boyunca 2D sonlu elemanın formülasyonu açıklanmaktadır. Yayınlanmış deneysel sonuçlara dayalı olarak, bir tungsten ark kaynağı (GTAW) kurulumunun sayısal formülasyonu oluşturulmuştur. Isı enerjisinin miktarı ve dağılımı, sıcaklığa bağlı termal özellikler, konveksiyon ile yüzey ısı kayıpları ve faz değişimi göz önüne alınmıştır. 2D model, 3D model ve deney verileri karşılaştırılmış ve olumlu sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir [3].

Huang ve diğerleri geliştirdiği boru kaynak hizalama cihazının (SPWAD) uygulanabilirliği konusunda yaptıkları çalışmada, kaynak öncesi yapılan puntalama işleminin kaynak

sırasındaki gerilmelere dayanıklılığını ve hidrolik bir sistemle boru içine yerleştirilen SPWAD'ın kabiliyetini karşılaştırmışlardır. ANSYS Workbench'te sonlu elemanlar analizi ile analiz edilen numunelerde sonuçlar SPWAD'ın aşırı zor koşullar altında bile kaynak gerilimlerine direnme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir. SPWAD ile özellikle de gemi boru hattı kaynaklarının verimliliği yaklaşık olarak 5 kat artacağı tahmin edilmektedir [4].

Zhou, Chen, Fan ve Rao, yaptıkları çalışmada 150 mm et kalınlığına sahip 2.25Cr-1Mo-0.25V alaşım çeliğinden oluşan plakalarda kaynak işlemi sonrası meydana gelen kalıntı gerilmeleri analiz etmek için ANSYS kullanmışlardır. U kaynak ağzı profiline sahip parçalar tek pasoda kaynak edildikten sonra kaynak sıcaklığından dolayı oluşan 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 olduğu sonucuna varılabilir [5].

Akbari, Sattari ve Far yaptıkları çalışmada, ferritik ve östenitik paslanmaz çelikler ile A106-B tipi alaşım çeliğini farklı boru bağlantılarında kaynak dikişlerindeki termomekanik davranışları ve artık gerilmeleri karşılaştırmak için sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanmışlardır. Deneysel olarak artık gerilmeleri ölçmek için delik delme yöntemi kullanılmıştır. Sonlu eleman yöntemi ile elde edilen sonuçlar çalışmanın doğruluğunu değerlendirmek için deneysel olarak ölçülen verilerle karşılaştırılmıştır. Kaynak sıcaklık artışı miktarının artık gerilmelerin dağılımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu ve kaynak sonrası artık gerilmelerin tahmininde FEM'in etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir [6].

Bajpei, Chelladurai ve Ansari, AA5052 ve AA6061 alüminyum esaslı plakaların kaynaklı birleştirilmesinde sıcaklık dağılımı, enine-boyuna artık gerilmeleri ve distorsiyonları belirlemek için gazaltı kaynağı kullanarak deneysel bir araştırma yapmışlardır. Sonuçlar sonlu elemanlar temelli analiz programı ANSYS kullanılarak sayısal verilerle doğrulanmıştır. İletim, konveksiyon ve radyasyona bağlı ısı yayılımı göz önünde

bulundurulmuştur. Deneysel çalışmalarda artık gerilme ve distorsiyonları ölçmek için X-ışını kırınımı yönteminden yararlanılmıştır. Sonuç olarak; deneysel ve sayısal verilerin uyumlu olduğu görülmüştür. AA6061 plakasının AA5052 plakasına göre daha yüksek enine ve boyuna artık gerilmelere ve daha az çekmeye sahip olduğu görülmüştür [7].

Yuquan ve diğerleri, darbeli lazer kaynağı (PLW) yöntemi kullanılarak birleştirilen Hastelloy C-276 alaşım çeliğinde oluşan kaynak sonrası artık gerilme dağılımını ve sıcaklık dağılımlarını incelemişlerdir. Darbeli lazer kaynağı (PLW) sırasında termal-mekanik davranışları görebilmek için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli (FEM) geliştirilmiştir. Deneyde sıcaklık dağılımları ve kalıntı gerilmeler FEM'i doğrulamak için ölçülmüştür. FEM'e dayanılarak, kaynakta sınırlama mesafesinin plastik gerilmeler, artık gerilmeler ve distorsiyonlar üzerine etkileri araştırılmıştır. Sınır mesafesi 20 mm'den 4 mm'ye düştüğünde, açısal distorsiyonun büyüklüğü ve enine yer değiştirmenin tepe değerinin azaldığı görülmüştür. Nispeten daha küçük bir tutma mesafesinin, açısal distorsiyonu ve enine yer değiştirmeyi azaltmak için yardımcı olacağı sonucuna ulaşılmıştır [8].

Krasovskyy ve diğerleri, yaptıkları bir araştırmada bir kaynak işleminin, kaynak sonrası ısıtılma işlemi (PWHT) ve çevrimsel bir yorulma yüklemesinin simülasyonuna dayanan çok pasolu kaynakların yorulma değerlendirmesini incelemişlerdir. Ticari yazılım Virtual Weld Shop'da kaynak işleminin ve PWHT'nin modellenmesi yapılmıştır. Kaynakla meydana gelen artık gerilmeler ve malzeme durumu daha sonra ANSYS'deki alt modelleme tekniği ile yorulma analizinde kullanılmıştır. Bu hesaplamalar ile kaynak ömrünün daha doğru bir şekilde tahmin edilmesi mümkündür. Kaynak esnasında oluşan sıcaklık dağılımı, X-ışınları tarafından ölçülen artık gerilmeler; simülasyon sonuçları ve çevrimsel yüklemeye sonraki kırılma davranışları ile karşılaştırılmıştır. Findley hasar ölçütü kriterine göre kritik düzlem yaklaşımı ile kaynakla oluşan kalıcı gerilmeleri de içeren yorulma analizi, PWHT'li ve olmayan örneklerin farklı bölgelerden kırıldığı görülmüş ve kaynak sonrası ısıtılma işlemi uygulanıp uygulanmama durumuna göre hasarın hangi bölgede oluşabileceğinin tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır [9].

Nam ve diğerleri, 304 tipi paslanmaz çeliklerin kaynak işlemi sırasında oluşan kalıntı gerilmelerin tane sınırı korozyonuna etkisini araştırmışlardır. Bunun için dört farklı deney

numunesi kaynaklanmıştır ve ANSYS’de deney parametreleri kullanılarak analizi yapılmıştır. Kaynak paso sayısının artırılmasının Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) analizi ile artık gerilmelerin değerini artıracak doğru olmuştur. Analiz sonuçlarına bağlı olarak, gerçek deneyde artık gerilmelerin oluşma süreleri kısalmıştır. Kaynak paso sayısının artırılmasıyla tane sınırı korozyonunun da daha kısa bir süre içinde oluştuğu görülmüştür. Artık gerilmelerin tane sınırı korozyonunun oluşumunda direkt faktör olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak kalıntı gerilme miktarındaki artışın tane sınırı korozyonunu tetiklediği görülmüştür [10].

Varghese ve diğerleri, düşük karbonlu çelik plakanın punta kaynağı sırasında termal gerilimini ve dağılımını tahmin etmek için 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 dikisine dik yönde kaynak havuzundan uzaklaştıkça gerilimin azalarak sıfıra yaklaştığı ve gerilmelerin 10 mm plaka için maksimum, 6 mm plaka için minimum olduğu tespit edilmiştir [11].

Vemanaboina, Akella ve Buddu, çalışmalarında yapısal bozulmayı ve artık gerilimleri simüle ederek azaltmak için işlem parametrelerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Sıcaklık dağılımı ve artık gerilmelerin tahmin edilebilmesi için yaptıkları çalışmada 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 [12].

Prasad ve diğerleri, yaptıkları çalışmada kaynak parametrelerinin boruların TIG kaynağında oluşan artık gerilmeler üzerine etkilerini ele almışlardır. Boruların TIG kaynağı sırasında oluşan artık gerilme dağılımını tahmin etmek için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Kaynak havuzunda ve çevresinde plastik deformasyonların ve eşit olmayan

termal dağılımına bağılı olarak, tüm kaynaklı yapılarda büyük miktarda artık gerilme ve deformasyonlar bulunmaktadır. Simüle edilen sonuçlar, literatürde bulunan deneysel sonuçlar kullanılarak doğrulanmıştır. Kaynak akımının ve boru kalınlığının farklı yerlerde kalan gerilme ve sıcaklık alanlarına etkileri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak boru yüzeylerindeki yüksek sıcaklık gradyanları, kaynak bölgesi içerisinde ve çevresinde plastik deformasyona neden olmuştur. Soğutma aşamasında, kaynak bölgesinde büzülme ve deformasyona bağılı olarak boru dış yüzeyi üzerinde yüksek basınç gerilmesi oluşmuştur ve iç yüzeyde artık gerilme oluşmuştur. Artık gerilme, kaynaktan sonra dış yüzeyden iç yüzeyine doğru değişir ve belirli bir noktada tamamen azalır. Kaynak akımı arttıkça artık gerilme dağılımı aralığının daha da genişlediği görülmüştür [13].





3. KAYNAK YÖNTEMİ

Demirin bulunması ardından sıcak ya da soğuk dövülüp süs eşyası, kap kacak, kılıç, at koşumları gibi birçok alanda kullanılmaya başlanması ve geçen yüzyıllardan sonra ihtiyaçların artmasıyla madenin işlenmesi konusunda çeşitliliğin atması birbirini takip eden teknoloji faaliyetleridir. Kaynak ise bu teknoloji zincirinin en önemli halkalarından biridir.

Kaynağın ilk örnekleri 19.yy ikinci yarısında ortaya çıkmıştır. Madeni ilk kullanan kültürlerden biri olmamıza rağmen kaynaklı birleştirme ve türevleri 1920'li yıllarda Avrupa'da dünya savaşları sırasında doğan ihtiyaçların zorunlu kıldığı çalışmaların sonucu olarak gelişmeye başlamıştır. Ülkemiz ise kaynak teknolojisi ile ilk defa 1920'li yılların başında tanışmıştır. O yıllarda birçok devlet kuruluşunun ve özel sektörün ihtiyacına cevap verebilmesi sayesinde kaynak ülkemizde hızla yayılmış ve günümüz endüstrisinin vazgeçilemez faaliyetlerinden biri haline gelmiştir.

Ülkemizde kaynak teknolojisinin canlı tarihi olarak nitelendirebileceğimiz ve günümüzün kaynaklı imalat konusunda en önemli otoritelerinden biri olan Selahattin ANIK, kaynağın ülkemizdeki tarihini şöyle özetlemiştir;

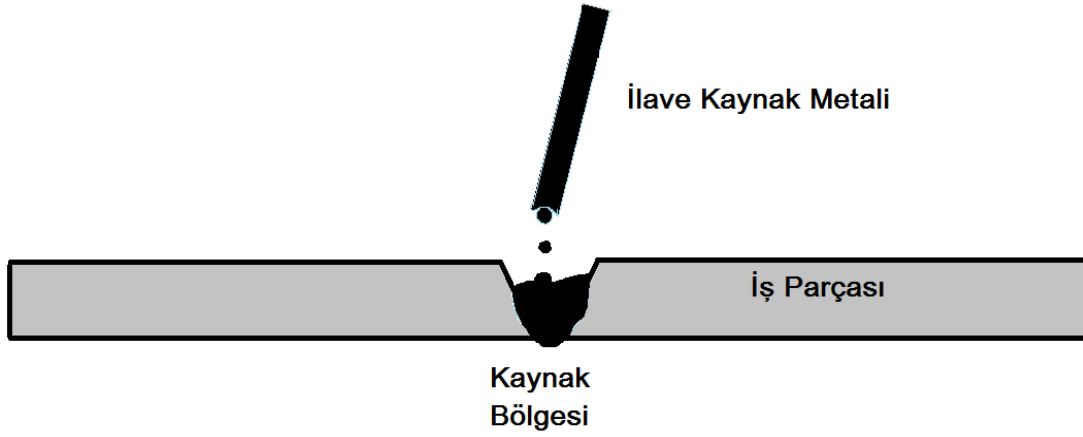
Türkiye'de kaynak ilk defa 1920 yılında İstinye ve Gölcük tersanelerinde başlamıştır. 1929'da Makina Kimya Endüstrisinde, 1930'da Sümerbank-Hereke Fabrikasında, 1931'de Karayolları Merkez Atölyesinde, 1933'de Eskişehir Hava İkmal Merkezinde ve 1934'de de Devlet Demir Yolları Eskişehir Fabrikasında kaynağın kullanıldığını görürüz. Türkiye'nin ilk kaynakçıları İbrahim Pekin ve çırağı Ziya Altınışik ustalardır. Bu iki zat, kaynakçılığı memleketimizde ilk uygulayanlardır [14].

Kaynak;

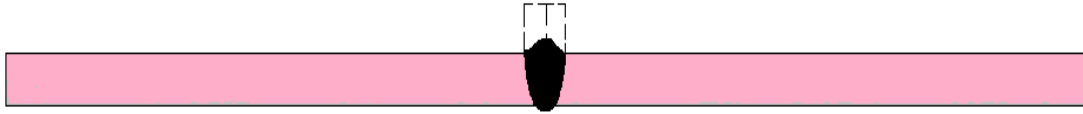
Malzemelerin ısı, basınç veya her ikisini de kullanarak, ilave bir malzeme kullanarak ya da kullanmadan sökülemeyecek şekilde birleştirilmesine *kaynak* denir. Eğer metallerin kaynağında ilave malzeme kullanılmışsa buna da *ilave metal* adı verilir [15].

Tanımdan da anlayacağımız üzere kaynak işlemini ilave metal kullanarak yaptığımız gibi ilave metal kullanmadan da gerçekleştirebiliriz. Ancak her iki yöntemde de ısı kaynağı

kaynak işleminin olmazsa olmazıdır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de ilave metal kullanılarak ve kullanılmadan yapılan kaynak teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İlave kaynak metali kullanılarak yapılan ergitme kaynağı



Şekil 3.2. İlave metal kullanmadan yapılan ergitme kaynağı

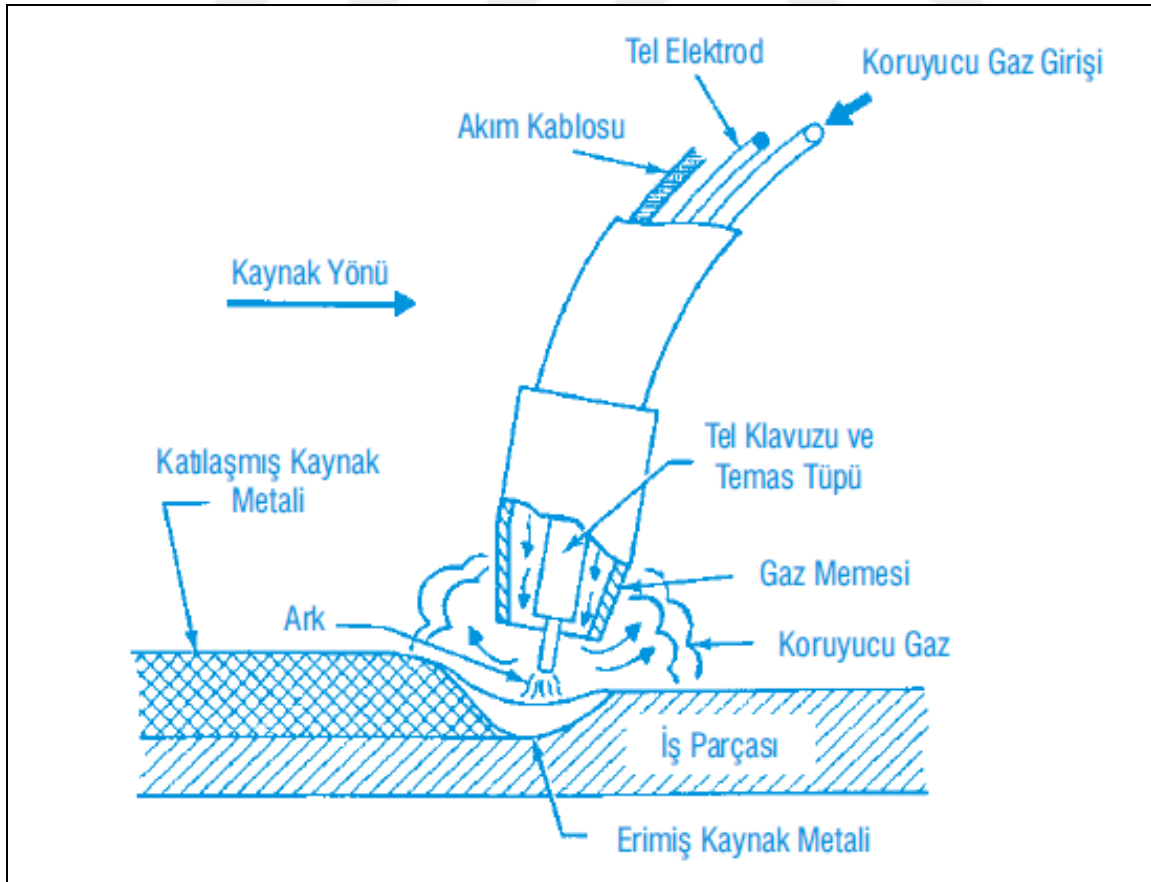
Şekil 3.2’den anlaşılacağı üzere iş parçalarının kaynaklanacak yüzeyleri dikış oluşturabilmesi için kıvrılmıştır ve bu da bize ilave metal kullanmadan kaynak imkânı sağlamaktadır. Bir diğer faydası ise kaynak bölgesi ile esas metal tamamen aynıdır. Yalnızca ısı girdisinden dolayı malzemede yapısal değişiklikler meydana gelmiştir. Bu değişiklikler ise tolere edilemez seviyede ise normalizasyon tavlama ile kabul edilebilir seviyeye getirilebilir.

Bu tekniğin dezavantajı sayılabilecek durumu ise kalın malzemelerin kaynak edilmesinde uygulanmasının çok zor olmasıdır. Çünkü kalın malzemelerin kaynak yüzeylerinin şekildeki gibi kıvrılması oldukça zordur ve ısı girdisinin daha yüksek olması gerekmektedir. Bu iki durum da kaynak bölgesinin yapısal değişikliklerinin kontrol edilemez hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden kalın parçaların kaynağında ilave metal ile uygun kaynak açzı açılarak kaynaklama işleminin seçimi daha isabetli olacaktır.

MIG-MAG Kaynağı;

MIG-MAG kaynağı metal parça ve elektrod telinin kaynak işlemi esnasında oluşturduğu kaynak arkını, koruyucu bir gaz ile atmosfer gazlarının olumsuz etkisinden koruması sağlanarak yapılır. Burada kaynak arkı koruyucu gaz sayesinde atmosfer gazlarından etkilenmez ve böylece sağlıklı bir kaynak işlemi yapılmış olunur.

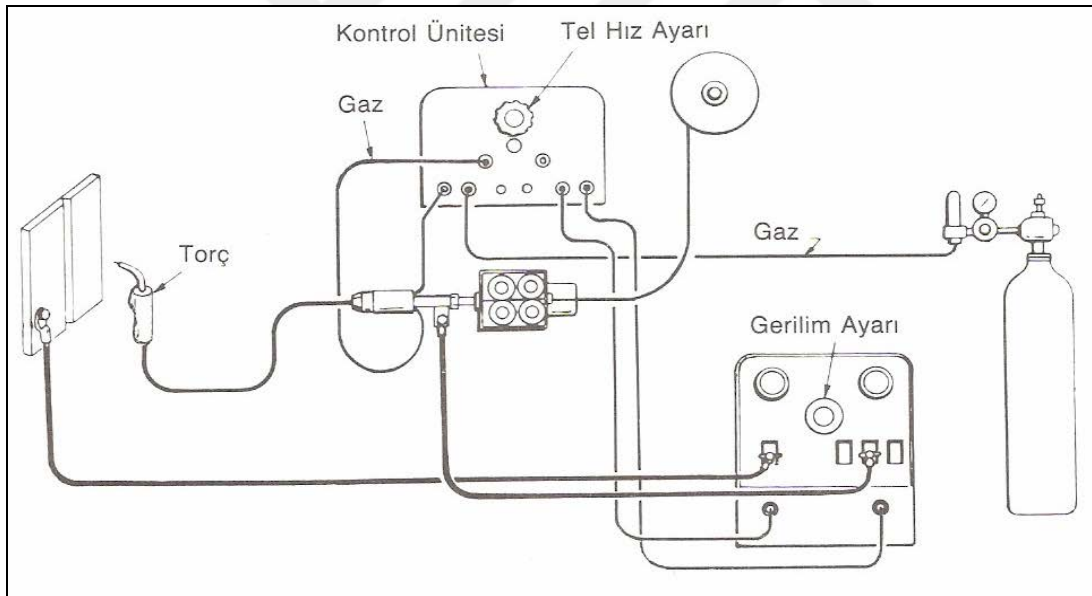
‘Kaynak için gerekli ısı, sürekli beslenen ve eriyen tel elektrod ile kaynak banyosu arasında oluşturulan ark yoluyla ve elektrodta geçen kaynak akımının elektrodta oluşturduğu direnç ısıtması yoluyla üretilir’ [16]. Çıplak ve özlü teller piyasada kullanım alanı bulmaktadır. Tel elektrod besleme tertibatı telin ayarlanabilir sabit hızlarda kaynak bölgesine sevkini sağlar. Kaynak dikişini koruyacak gaz ise makineye seri bağlı bir tüpten hortumlar vasıtasıyla kaynak torcuna kadar iletilir. Torç içinde bulunan meme vasıtasıyla kaynak işlemine başlandığı anda kaynak banyosu çepeçevre atmosferden korunmuş olur. Şekil 3.3’de MIG-MAG kaynağının prensibi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. MIG-MAG kaynağının prensibi [16]

Kaynak sırasında koruyucu gaz olarak kullanılan gazın türüne göre kaynak yönteminin isimleri değişmektedir. Eğer koruyucu gaz olarak CO₂ gibi aktif gaz kullanılıyorsa ismi, Metal Active Gas kelimelerinin baş harflerini alarak MAG olur. Eğer koruyucu gaz olarak asal gazlar kullanılıyorsa ismi, Metal Inert Gas kelimelerinin baş harfleri kullanılarak MIG adını alır [17].

MIG-MAG kaynak makinelerinin çalışma prensibinde ise gerilim ayarının yapıldığı bir ana makine bulunur ve bu makineye bağlı tel sürme mekanizması bulunur. Tel sürme mekanizmasına bağlı ve genellikle su soğutmalı sisteme sahip torcun ucuna gelen elektrod ile kaynak işlemi yapılır. Torcun üzerinde bulunan tetiğe basıldığında eş zamanlı olarak koruyucu gaz ve tel birlikte sağılır. Kaynak bölgesi sağılan bu gaz sayesinde korunur. Ayrıca elektrik ark kaynağında ki gibi elektrik devresinin tamamlanması için ana makineden gelen kutuplardan biride (şasi) iş parçasına bağlanır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. MIG-MAG kaynak donanımının blok şeması [15,17]

MIG-MAG kaynak donanımı

Bir MIG/MAG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

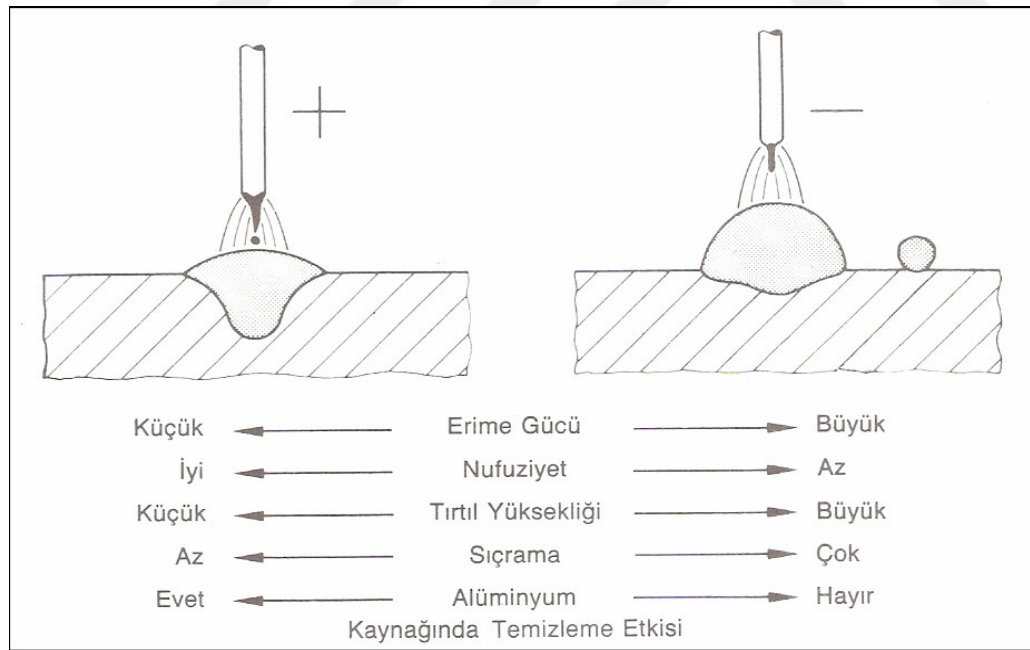
Kaynak torcu: Kaynak telinin ve gazın kaynak banyosuna intikalini sağlayan kısımdır.
Kedi: Elektrod besleme ünitesidir. Tel hızı ayarı bu kutu içersinden yapılır.

Hortum: Tel elektrod, soğutma suyu hortumları, gaz ve kaynak şalter kablolarının güvenli bir şekilde koruyan tel besleme ünitesi ile kaynak torcu arasındaki kablo ve hortum tertibatının tamamıdır.

Kaynak akım üretici: Kaynak akımının ayarlanabildiği, devreye elektriğin alınıp doğru akıma çevrildiği, şasinin de çıkış aldığı ana makinedir.

Koruyucu gaz tüpü: Basınç düşürme ventilinin ve barometrenin üzerinde bulunduğu kaynak için gerekli gazın sağlandığı tüptür.

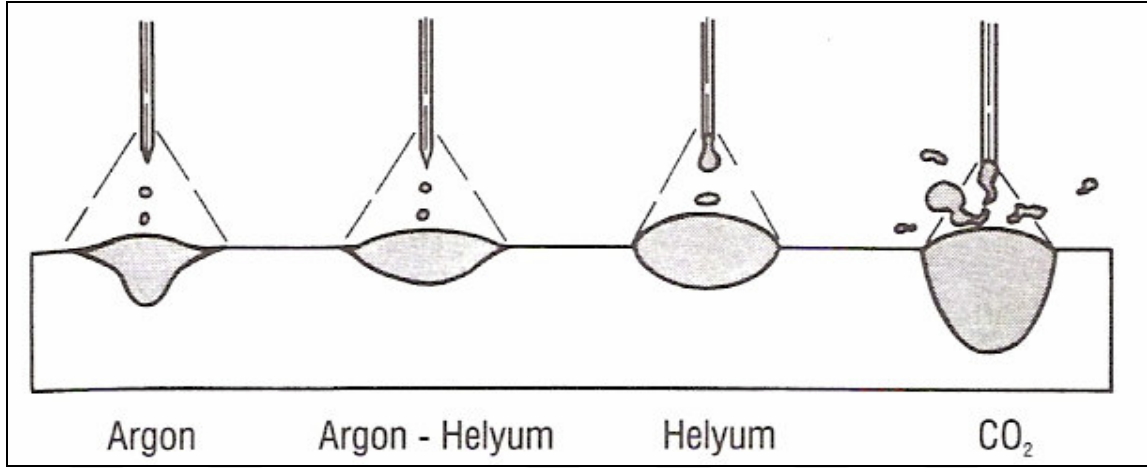
Bu kaynak tekniğinde de diğer kaynak tekniklerindeki gibi doğru akım kullanılması durumunda elektrod pozitif veya negatif kutupta bağlı olabilir. Özellikle alüminyum esaslı malzemelerin kaynağında banyo üzerinde bir oksit filmi oluşur ki bu filmin ergime derecesi alüminyumun ergime derecesinin neredeyse üç katıdır. Oluşan oksit tabakası alüminyum kaynağını engellemektedir. Elektrodun pozitif kutba bağlanması tabakanın parçalanmasına yardımcı olacaktır. Bu işlem derin nüfuziyet sağlanması için önemlidir. Şekil 3.5’de kutup değişimine göre nüfuziyet örneği verilmektedir.



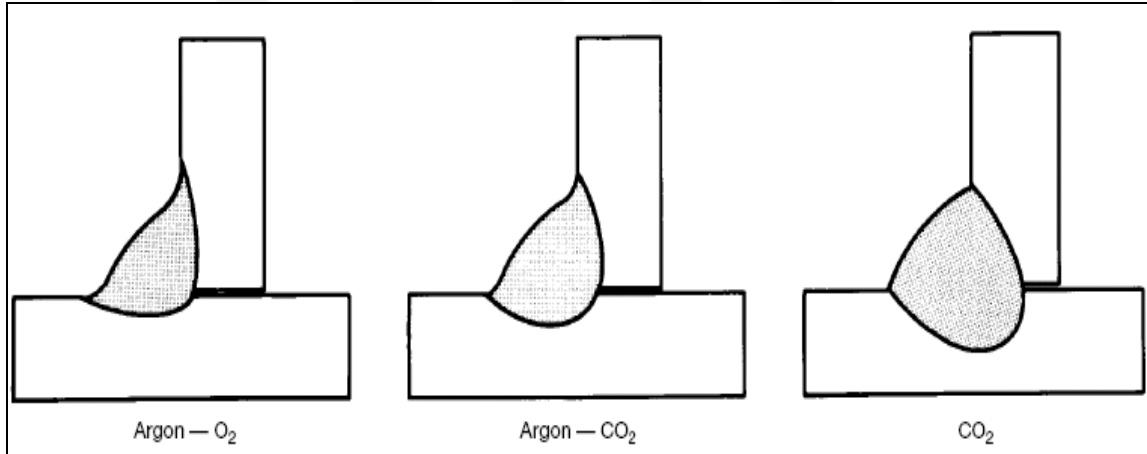
Şekil 3.5. Kutuplamanın dikiş formuna ve kaynak özelliklerine etkisi [17]

‘Koruyucu gazlarında kaynağın formu ve özelliklerinde etkileri mevcuttur. Argon ve Helyum gibi soygazlar daha çok demir dışı metallerin kaynağında kullanılırken CO₂ ise alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında yüksek oranda kullanılır’ [15].

Şekil 3. 6-7’de kullanılan gazın türüne göre dikiş geometrisi ve nüfuziyeti verilmektedir.



Şekil 3.6. Çeşitli koruyucu gazların dikiş formu ve nüfuziyete etkisi (Alın birleştirme) [15]



Şekil 3.7. Çeşitli koruyucu gazların dikiş formu ve nüfuziyete etkisi (Köşe kaynağı) [18]

MIG-MAG kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre daha hızlı bir kaynak yöntemidir. Kaynak bölgesine sürekli beslenen tel elektrod elektrik ark kaynağı ile karşılaştırıldığında zaman açısından oldukça tasarruf sağlamaktadır. Çünkü elektrik ark kaynağında tükenen elektrodu değiştirmek için kaynakçı her defasında kaynağı durdurmak zorunda kalmaktadır. Ayrıca elektrik ark kaynağında örtülü elektrodların kullanılması her kaynak pasosunda cüruf oluşturmaktadır. Cüruf temizliğinin sebep olduğu zaman kaybının yanı sıra koruyucu gaz kullanımında kaynak metalinde cüruf kalıntısı olmaması daha kaliteli bir kaynak metali sunmaktadır. Bu üstün özellikler düşünüldüğünden MIG-MAG kaynağı çalışmalarda sıkça kullanılmıştır.

‘MIG-MAG kaynağında derin nüfuziyet sağlanabildiği için bazen küçük köşe kaynakları yapmaya izin verir ve örtülü elektrod ark kaynağına göre daha düzgün bir kök penetrasyonu sağlar’ [15]. Bunun yanı sıra dezavantaj olarak MIG-MAG kaynak ekipmanları pahalı ve taşınması da zordur. Kaynak torcu ile iş parçası arasındaki mesafenin kısa olması gerektiği için her pozisyonda kaynak yapmak kolay değildir.

MIG-MAG kaynağı, hava akımının yoğun olduğu ortamlarda kaynak yapmaya uygun değildir. Çünkü gaz koruması hava akımlarının etkisiyle ark bölgesinden uzaklaşır ve kaynak metali korunmasız kalır. Ancak gerekli koruma ve hava akımlarına karşı önlemler alındığı takdirde kaynak işlemi mümkündür.

Genel olarak bakıldığında, kaynak metalindeki sıcaklık artışı, kullanılan yöntemlere göre farklılıklar göstermektedir. Akım şiddetinin artmasıyla kaynaklanan parçaların sıcaklığında artış görülmektedir. Bu da malzemenin gerek mikro yapısında gerekse gözle görülen yapısında distorsiyonlara sebep olmaktadır. Kaynak bölgesi sıcaklığı, kaynak esnasında oluşan akım ve gerilim ile doğru orantılı bir şekilde artış gösterirken, kaynak hızının artması ile kaynak bölgesi sıcaklık değeri arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır [19].



4. KALINTI GERİLME VE DİSTORSİYONLAR

Günümüz endüstriyel uygulamalarda birçok kaynaklı birleştirme yöntemi vardır ve özellikle metal malzemelerin kaynaklı birleştirmelerinde kullanılan yöntemlerin hemen hepsinde sıcaklık faktörü ayrıca dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Metal malzemelerin ısı girdisine bağlı olarak kaynaktan önce ve sonra ki yapısal değişimlere uğraması kaçınılmaz bir durumdur ve bazen kontrol altına alınamadığı durumlarda imalatçıların üretimlerinin sağlıklı olması açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. Sıcaklıkla doğrudan alakalı yapısal şekil bozukluklarına neden olan problemlerin başında da artık gerilmeler ve distorsiyonlar gelmektedir.

Malzemeye verilen ısının sebep olduğu genleşme ve soğuma sırasında ortaya çıkan büzülme bir doğa kanunudur. Hiçbir şekilde genleşme ve büzülmenin yok edilmesi sağlanamaz. Ancak malzemenin yapısının iyi bilinmesi, imalat yöntemlerinin iyi bilinmesi ve hatasız uygulanması, genleşme ve büzülmenin oluşturduğu kuvvet yönü, açısı ve boyutu gibi parametrelerin önceden tahmin edilebilmesi çekme çarpılmalardan dolayı oluşabilecek hataları en aza indirme fırsatı verecektir.

Bir kaynaklı yapıda distorsiyon, kaynak esnasında ısınma ve soğumanın gerçekleştiği anda kaynak metali ile ITAB'ın üniform olmayan genleşme ve büzülmesi sonucu ortaya çıkar. Kaynak metali yığılma miktarına ve özgül ısı girdisine bağlı olarak değişiklik gösterir. Kaynak ağzı açısı ve genişliği, yapının rijitlik derecesi, malzemenin elastik modülü, ısı iletkenliği, ergime sıcaklığı, akma sınırı, gibi faktörler distorsiyonun boyut ve derecesini belirler. Yine de tam olarak hatasız bir tahmin yapmak mümkün değildir. Distorsiyonların önceden tahmini zor olsa da sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ortaya çıktığı bilinmektedir. Isı enerjisinin kontrolünün çok zor olduğu bilinirse, kaynak bölgesinde oluşacak içyapının, distorsiyonların boyut ve miktarının belirlenmesinin de zor olacağı sonucuna varılabilir.

4.1. Kalıntı Gerilmeler

Çekme veya basma gerilmesi şeklinde oluşum gösteren kalıntı gerilmeler üniform olmayan plastik deformasyona veya sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelir.

Bir konstrüksiyonda sadece elastik şekil değişimine müsaade edilir. Çünkü plastik şekil değişimleri konstrüksiyonun amacına hizmet etmesini engelleyecektir. Konstrüksiyona uygulanan bir dış kuvvet, konstrüksiyonu oluşturan elemanlarda bir iç gerilme oluşturur. İç gerilmeler de elastik şekil değişimine neden olur. Dış kuvvet kaldırılınca iç gerilmeler ve elastik şekil değişimleri yok olur. Bir konstrüksiyona uygulanan bütün dış kuvvetler kaldırılrsa bile mevcut elemanlarda kalan gerilmelere ‘kalıntı gerilme’ denir [20].

Yukarıda da bahsi geçen tüm dış kuvvetlerin kaldırılmasıyla malzemelerde kalan ve malzemenin akma sınırının altında bir kuvvet barındıran gizil gerilmeler kalıntı gerilme olarak adlandırılmaktadır. Genelde ısıtma işlem aşamalarında da oldukça fazla karşımıza çıkan bu gerilme türüne bir örnek de yarı mamül hadde çelikleridir. Uzun sac plakaların üretim aşaması düşünüldüğünde ısı girdisiyle haddeleme işlemine tabi tutulan ham çelik yanal kuvvetlerin etkisiyle plastik deformasyona uğramaktadır. Sonrasında hadde merdanelerinin arasından ilerleyen malzeme merdanelerden kurtulunca üzerindeki kuvvet kalkar ve sonuç olarak malzemenin içinde akma sınırının altında bir iç kuvvet kalır. Bu kuvvet malzemede gözle görülür bir şekil değişikliği yapamadığı için kalıntı gerilme olarak isimlendirilir.

4.1.1. Kalıntı gerilmelerin oluşumuna etki eden faktörler

‘Kaynaklı parçalarda meydana gelen gerilmeler ve çarpılmaların sebepleri; ısıtma gerilmeleri, konstrüksiyonun rijitliği ve malzemenin metalürjik özellikleri adları altında toplanabilir’ [21,22].

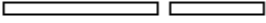
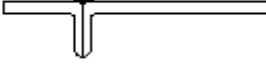
Isıtma gerilmeleri

Parçaların kaynak sırasında ısıtılmaları, çeşitli gerilmeler oluşturacağına değinilmişti. Bu gerilmeler; ısı miktarı, kaynak hızı, ısı iletim katsayısı, parçanın büyüklüğü ve kaynak öncesi açılmış kaynak ağzı genişliği, kaynak ortam sıcaklığı ile kaynak bölgesi sıcaklığının arasındaki farkın büyüklüğü gibi birçok nedene bağlıdır.

Konstrüksiyonun rijitliği

Rijitlik; malzemenin eğilme veya bükülmeye karşı koyduğu dirençtir. Bir malzeme ne kadar rijit olursa kaynak sonrası çarpılma ve distorsiyona karşı o kadar dayanıklıdır denilebilir. Bunun yanında kaynaklanacak malzemenin kalınlığının artması da rijitliğinin artması demektir ve oluşacak distorsiyon miktarının azalmasını sağlayacaktır. Ancak malzeme kalınlığının artması kaynak kalınlığının artması anlamına gelir. Bu yüzden kaynak ağız açma işlemi veya kaynak tasarımı en az ısı girdisi kabul edecek şekilde planlanmalıdır.

Yukarıdaki açıklamanın kaynak tasarımı ile doğrudan ilgili olduğu da söylenebilir. Rijitliği yüksek tasarımların da kaynak edilirken burkulma mukavemetleri yüksek olacaktır. Şekil 4.1’de konstrüktif tedbirler ile rijitliğin artırılabilceği görülür.

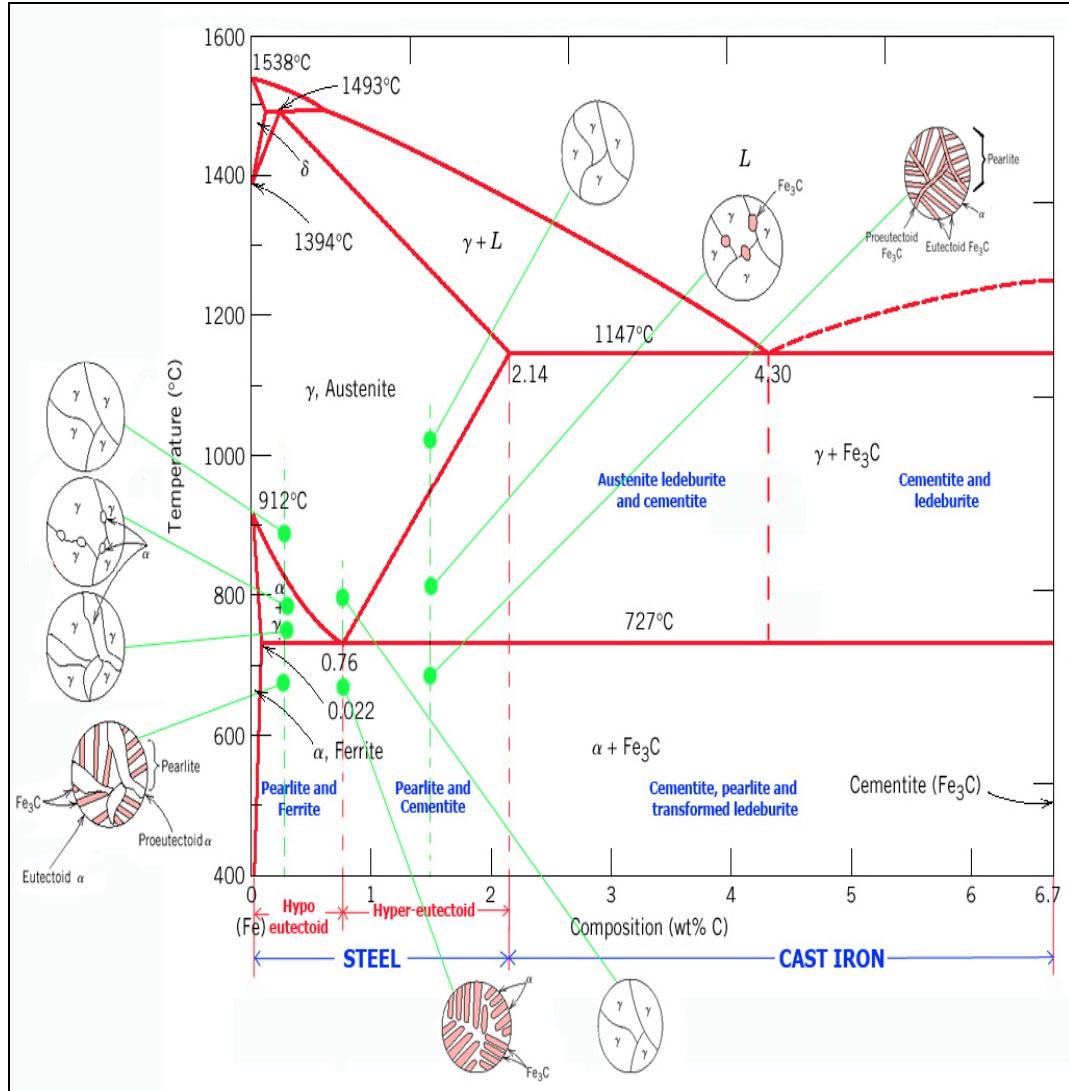
  	Sacların Burkulma mukavemeti σ [Kp/cm ²]	
	3 mm	4 mm
	6.7	123
$\leq$	53.6	984
	1840	3200

Şekil 4.1. Konstrüktif tedbirler ile rijiditenin artırılması [22]

Malzemenin metalurjik özellikleri

Çelikler ısıtılması ve soğutulması esnasında içyapı değişiklikleri oluşturan bir malzemedir. Tabiki bu içyapılar soğumanın zamana göre değişimiyle alakalıdır. Örneğin *martenzit* yapılı bir çelik ele alınsın. Orta karbonlu çeliğin östenit bölgesine kadar ısıtılıp çok hızlı bir şekilde soğutulması (yağda veya suda) sonucu oluşan yapı çeliğin en kırılgan halidir. Oysa aynı çeliğin kontrollü bir şekilde yavaş yavaş soğutulması perlit yapılı bir malzeme oluşturacaktır. Bu yapı ise martenzitten daha sünektir. Bu durum kaynak esnasında içyapının çarpılma ve distorsiyon oluşumu ile ilgili tahminde bulunulmasını sağlar.

Şekil 4.2’de görülen Demir-Karbon denge diyagramında 727 °C yapısında en fazla % 0.02 karbon bulundurabilen ferrit yapısının, yapısında % 0,8 karbon bulunduran perlit’e göre şekil değiştirmesi daha kolay olacaktır. Çünkü karbon miktarındaki artışın çeliklerin mukavemetini ve sertliğini artırdığı, sünekliliği azalttığı bilinen bir gerçektir. Buradan da anlaşılacağı üzere malzemenin metalürjik özellikleri kalıntı gerilmeler için önemli bir etkidir. Çünkü çeliğin yapısındaki karbon miktarı arttıkça şekil değiştirme zorlaşırken (özellikle ısı girdisiyle yapılan imalatlarda) içyapıda oluşacak kalıntı gerilme miktarı ve şiddeti artacaktır. Buna en iyi örneklerden biri de yukarıdaki açıklamada belirtildiği üzere mantenzittir.



Şekil 4.2. Demir-Karbon denge diyagramı [23]

4.1.2. Kaynak gerilmeleri

Kalıntı gerilmeler deyince endüstride en çok karşılaşılan gerilme sebeplerinden kaynak işlemine değinmek bu çalışmanın da konusu olduğu için isabetli olacaktır. Zira bu çalışmada da kaynaklı bir konstrüksiyonun kaynak işlemi sonucu ısı girdisinin oluşturduğu distorsiyonlar incelenmiştir. Kaynak işleminden dolayı oluşan gerilmelerin de enine, boyuna ve kendini çekme gerilmeleri (açısal) olarak üç türde olduğu bilinmektedir.

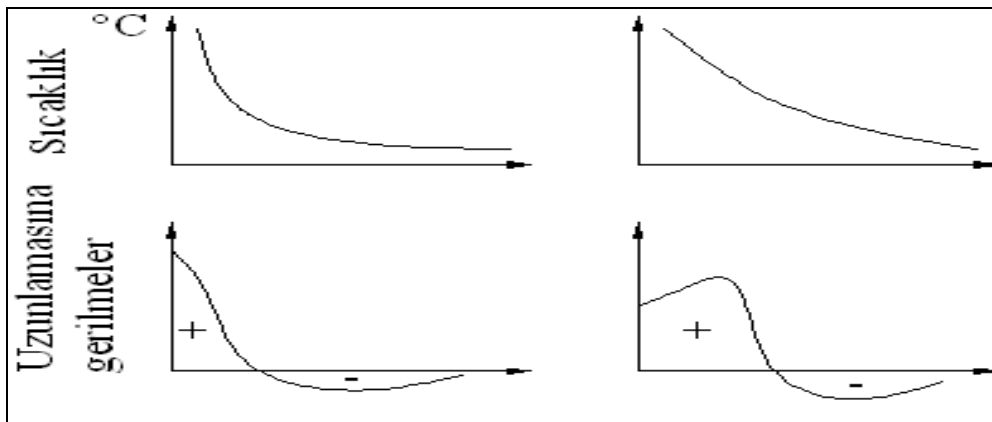
Bir kaynaklı konstrüksiyonun imalatı esnasında iki tip kalıntı gerilme oluşur;

- Serbest hareketli imalatlarda oluşan kalıntı gerilmeler.
- Tespit edilmiş iş parçalarının kaynaklanmasıyla oluşan karşı yönde kuvvet oluşturan kalıntı gerilmeler.

Bunların dışında ise kalıntı gerilmenin yönü esas alındığında üç tür kalıntı gerilme oluşmaktadır;

Boyuna gerilmeler

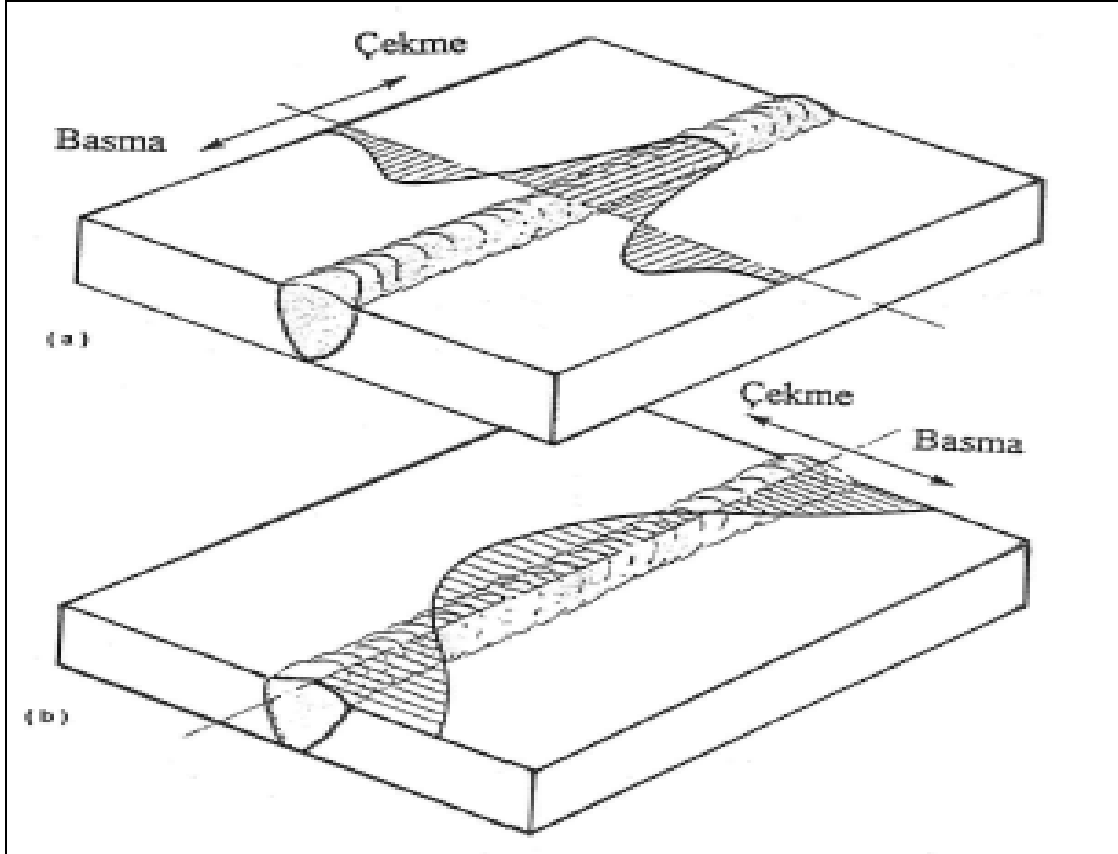
‘Kaynak esnasında kaynak eksenine boyunca parçaların farklı sıcaklıklarda olmaları, boyuna gerilmelerin teşekkülüne sebep olur. Sıcaklık dağılımındaki değişmeye bağlı olarak, gerilme dağılımındaki değişme Şekil 4.3’de görülmektedir’ [22].



Şekil 4.3. Sıcaklık dağılımına bağlı olarak boyuna gerilme dağılımı [22]

Enine gerilmeler

‘Şekil 4.4’de görüldüğü gibi; kaynak esnasında parçaların kaynak eksenine dik yöndeki hareketlerinin tahdit edilmesiyle, enine gerilmeler meydana gelir. Enine gerilmeler aynı zamanda boyuna kendini çekmelerin hasıl ettiği enine gerilmelerle birleşirler’ [22].

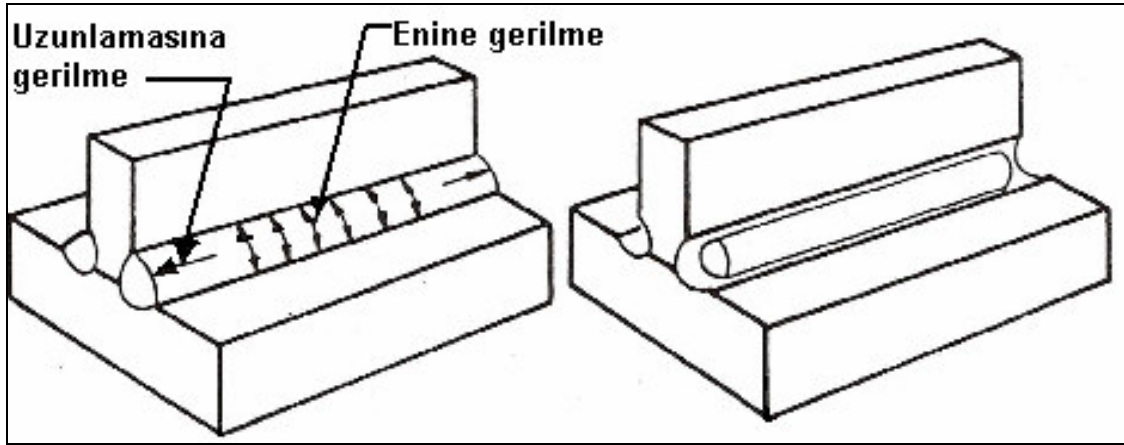


Şekil 4.4. V alın birleştirmesinde boyuna ve enine gerilmeler [22]

İç köşe dikişlerinde kendini çekme gerilmeleri

Kaynaktan dolayı malzeme içine hapsolmuş artık gerilme kuvvetinin malzemenin akma dayanımı mukavemetinden daha az olmasıdır.

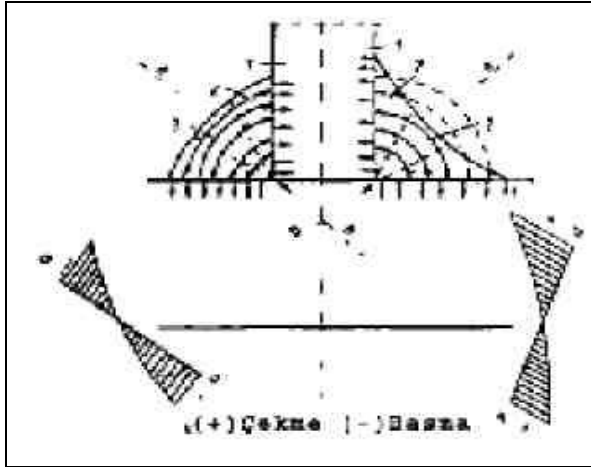
‘İç köşe dikişlerinde kendini çekmeler sebebiyle meydana gelen gerilme dağılımı, Şekil 4.5’de görüldüğü gibidir. Isınan bölgedeki genişleme ve kendini çekme, boylamasına ve enlemesine yönlere kuvvetli biçimde tahdit edilir. Böylece; büyük kısmı dikişte toplanan üç eksenli bir gerilme hali meydana gelir’ [22].



Şekil 4.5. İç köşe dikişlerinde kendini çekmeler sebebiyle meydana gelen gerilme dağılımı [3]

Kendini çekme momenti

Esasen malzemelerin kaynaklanması sırasında simetrik olmayan ısı girdisinin yol açtığı problem olarak ortaya çıkmaktadır. Kaynak dikişlerinin birbirine simetrik olmaması sebebiyle ağırlık merkezinin dışında bir kendini çekme kuvveti oluşur ve bu da kaynak bölgesinde artık gerilmelere hatta ince parçalarda şekil bozukluklarına yol açar.



Şekil 4.6. İç köşe dikişlerinde kendini çekme tesiri [22]

Şekil 4.6'da profilin düz levhaya çift taraflı köşe kaynağı görülmektedir. Anlaşılacağı üzere her iki tarafta farklı farklı malzeme yığılması yapılmış ve farklı ısı girdisi sağlanmıştır. Şekildeki gibi sol tarafa dış bükey sağ tarafa iç bükey köşe kaynağı yapılmıştır. Bu farklı ısı girdisi ve malzeme yığılması nedeniyle kalıntı gerilmeler

oluşacaktır ve malzemenin akma mukavemeti değerinin üzerine çıktığında profil sola doğru eğim gösterecektir. Burada kalıntı gerilmelerin birnevi moment etkisi oluşturduğu görülür. ‘...bilhassa kaynaklar simetrik olmayan konstrüksiyonlarda, bu momentler çarpılmalara sebep olurlar. Kendini çekme momenti şu formülle hesaplanır:

$$M_s = P_s \cdot e$$

P_s : Kaynağın kendini çekme kuvveti

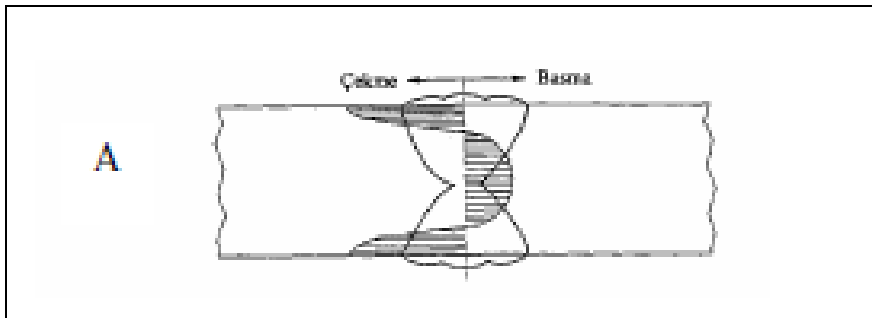
e : Kaynağın, ağırlık merkezine olan uzaklık’ [22].

4.1.3. Kaynaklı yapılarda oluşan kalıntı gerilmeler

Kaynak işleminde ısı girdisi nasıl kaynağın olmazsa olmazı ise, ısının da malzeme üzerinde etkilerinden kalıntı gerilme de olmazsa olmazlardandır. Bu sebeptendir ki her kaynak türünde kalıntı gerilme oluşacaktır. Bunları da inceleyen araştırmacılardan elde edilen bilgileri aşağıdaki gibi paylaşabiliriz.

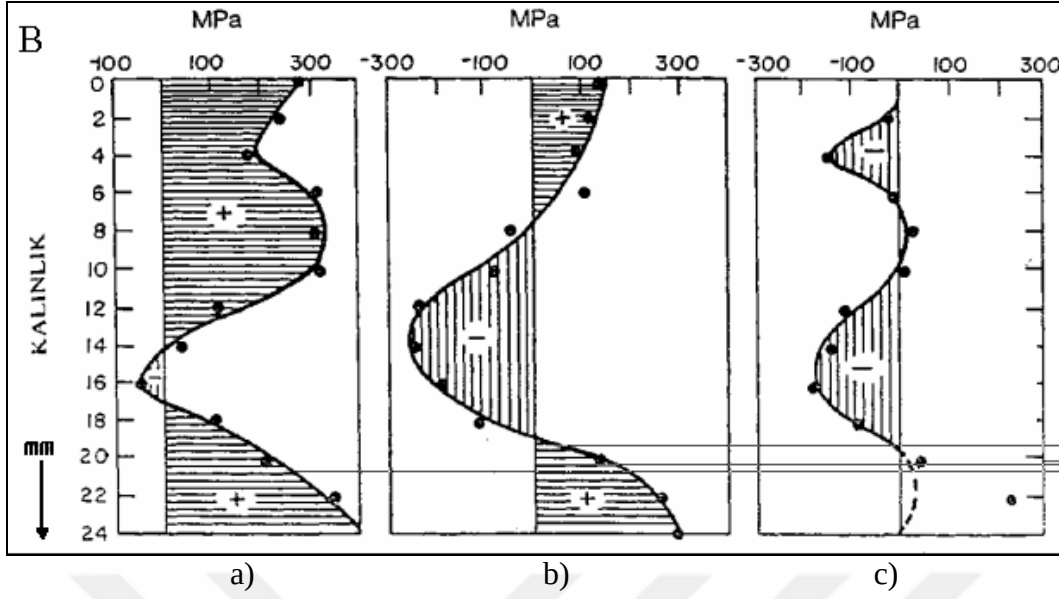
Kaynaklı alın birleştirmelerde artık gerilme dağılımı

‘Şekil 4.7’de çok pasoda yapılmış bir alın birleştirme kaynağında artık gerilme enine ve boyuna eksenlerdeki dağılımı gösterilmiştir. Alın kaynağında parçaların kalınlığı arttıkça kalınlık doğrultusundaki gerilmeler önem kazanır ve kalınlık 25 mm’yi geçerse oluşan gerilmeler daha belirgin hale gelir’ [24].



Şekil 4.7. Çok pasolu alın kaynağında final kalıntı gerilme dağılımı [15,25]

Yine Şekil 4.8’ de düşük karbonlu çeliklere ait alın birleştirme kaynağında kalınlık doğrultusunda kalıntı gerilme dağılımları verilmiştir.



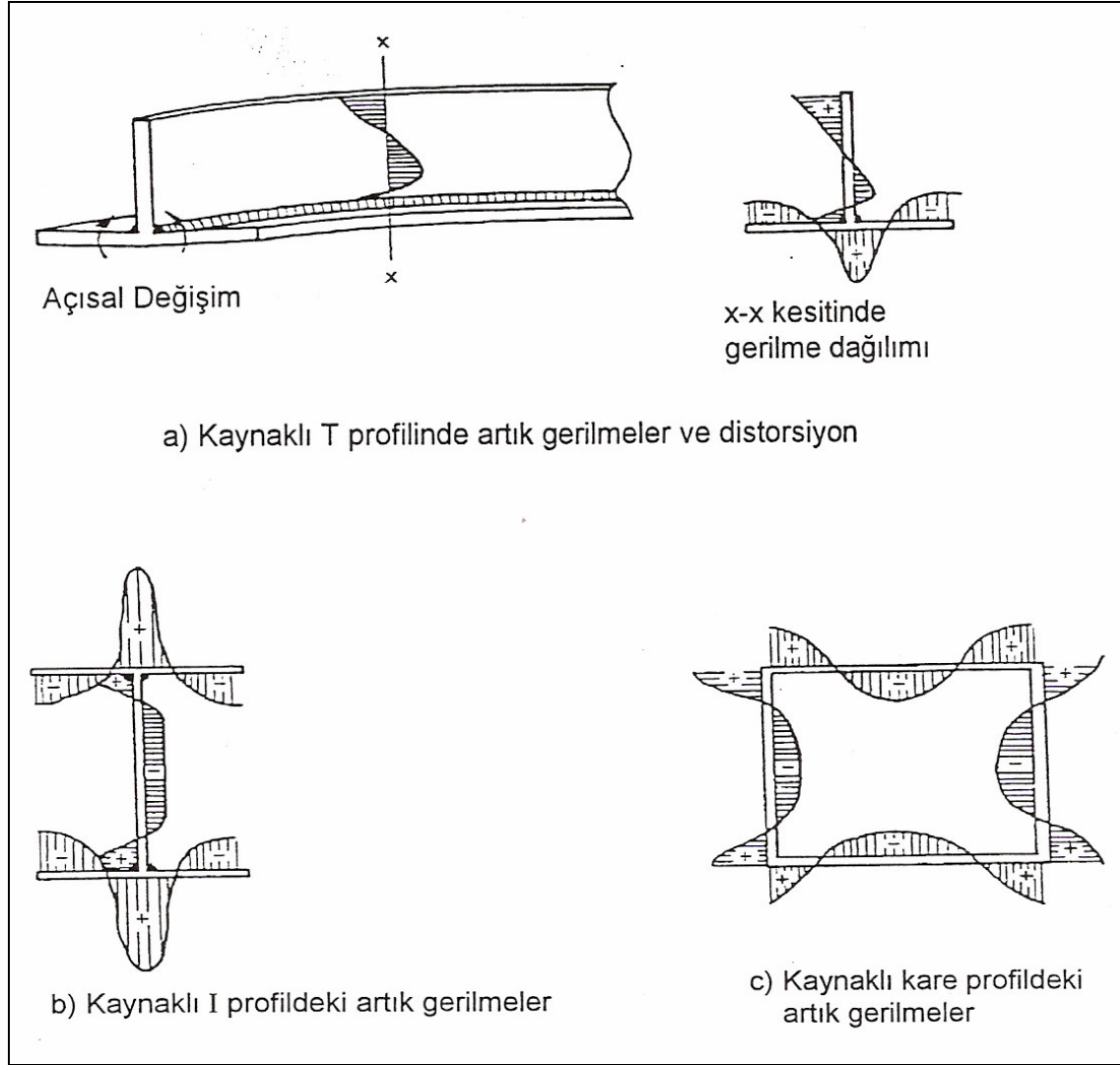
Şekil 4.8. Az karbonlu çeliklerin alın kaynağında kaynak metalinin kalınlık doğrultusunda kalıntı gerilmelerin dağılımı [15,26] (a) x σ boylamasına gerilmeleri, (b) y σ enine gerilmeleri, (c) z σ kalınlık doğrultusu gerilmeleri

İç köşe kaynağında artık gerilme dağılımı

İç köşe dikişi sırasında ana metalin yüzeyinde ince bir ergiyik tabaka bulunmaktadır. Ana metalde ergime oluştuğunda parçanın boyuna ve enine genişmesi engellenir. Dikişin soğuması esnasında büzülmeye karşı aynı engelleme kuvveti ortaya çıkar. Sabitlenmiş çift taraflı bir iç köşe kaynağı, birinci dikişin enine yönde uyguladığı etki altındadır. Böylece çoğunluğu dikiş üzerinde toplanan üç eksenli bir gerilme meydana gelir. Bu gerilmenin bütün dikiş kesitinde çekme kuvveti oluşturan hacimsel bir gerilme hali meydana getirdiği tahmin edilmektedir [27].

Şekil 4.9. a, b, c’de sırasıyla; T profilde artık gerilmeler ve distorsiyon, I profilde ve kare profilde artık gerilmeler görülmektedir. İncelendiğinde; Şekil 4.9.a’da T iç köşe dikişinde kaynak metalinin büzülmeye çalışması ve buna karşı koyan konstrüksiyon elemanlarının rijitliği sonucunda meydana gelen kalıntı gerilme dağılımı ve distorsiyon görülmektedir.

‘Kaynak dikişinin etrafında çekme gerilmeleri oluştuğu görülür. Kaynaklı yapının flanaj kesiminin kaynak dikişinin uzağında basma gerilmeleri oluşur. Kaburgada ise kalıntı gerilme dağılımı daha yoğun olmaktadır. Kaynak dikişinin boyuna büzülmesi sonucu olarak kaburganın üst kısmında çekme gerilmeleri oluştuğu görülür.’ [24].



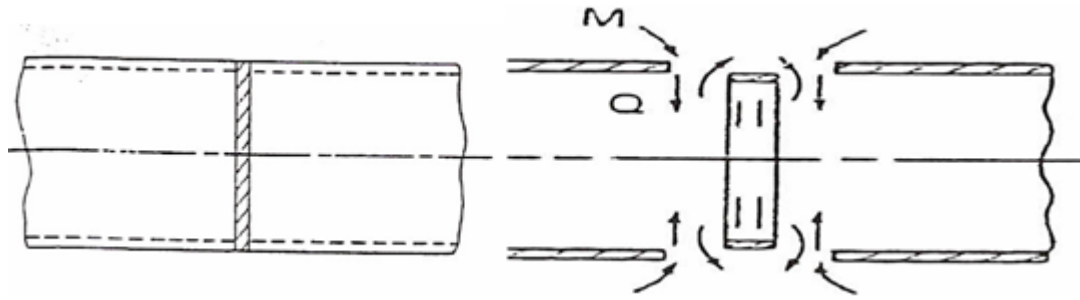
Şekil 4.9. Çeşitli kaynaklı profillerdeki artık gerilmelerin dağılımları [15]. a) Kaynaklı T profilde artık gerilmeler ve distorsiyon, b) Kaynaklı I profilde artık gerilmeler, c) Kaynaklı kare profilde artık gerilmeler

Kaynaklı borularda artık gerilme dağılımı

Borularda kaynaktan sonra oluşan artık gerilme diğer konstrüksiyon elemanlarında oluşan artık gerilmelerden daha farklıdır. Bir örnek verilirse; boruların uç uca eklenmesiyle oluşan kaynak dikişinde açısall distorsiyon oluşur. Bu distorsiyonlar da kaynak dikişinde bir kayma kuvveti oluşturur. Bunun yanında bir de eğilme momenti meydana gelir. Şekil 4.10'da borulardaki çevresel kaynak işlemi sırasındaki reaksiyon kuvvetleri şematik olarak verilmiştir. Burada M eğilme momentini Q ise kesme kuvvetlerini temsil etmektedir.

Boruların kaynağında meydana gelen artık gerilme dağılımına etki eden faktörler:

- a- Borunun et kalınlığı
- b- Borunun çapı
- c- Kaynak ağzı şekli
- d- Kaynak sırası planı



Şekil 4.10. Borularda çevresel kaynak dikişindeki reaksiyon kuvvetleri [15]

4.1.4. Kalıntı gerilmelerin ölçülmesi

Kalıntı gerilme ölçüm metodlarını üç grupta toplamak mümkündür. Genel olarak tahribatlı ve tahribatsız olarak ölçülebilen kalıntı gerilmeler farklı fiziksel özellik sergileyen malzemelerde ultrases ve manyetik özelliklerinden yararlanılarak da ölçülebilir.

Birinci grup, bileşenlerden kesit almayı ya da bileşenlerin yüzeyinden talaş kaldırılmasıyla ölçülebilen tahribatlı ya da yarı tahribatlı yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler, önceden var olan gerilmelerin etkilediği gerilimin ortaya çıkarılması esasına dayanan ölçümlerden faydalanmaktadır. En sık kullanılan yöntem ise delik delme yöntemidir. Bu yöntem ile birkaç milimetre derinliklerdeki kalıcı gerilmeler tespit edilebilir [24].

İkinci grupta X-ışınları difraksiyon teknikleri bulunur. Bu yöntemde malzemelerin kafes parametreleri ölçülür. Elastik şekil değişimine uğramamış malzemenin kafes parametreleri belirlenir. Daha sonra işlem görmüş malzemelerin elastik şekil değişimleri hesaplanır. Bu yöntemlerin uygulanması sırasında iş parçasında kesme veya delme yapılmadığı için herhangi bir tahribat oluşmaz. X-ışınları difraksiyon yöntemi ile yüzeyden 0,003 mm'ye

kadar olan derinliklerde kalıntı gerilmeler tespit edilebilir. Talaşlı imlat ile elde edilmiş iş parçalarının yüzeylerinde bulunan kalıntı gerilmeler ve dişli çarkların ısıtılmasından dolayı dişlerinde oluşan kalıntı gerilmeler X-ışınları difraksiyon yöntemi ile ölçülür. Çok hassas sonuçlar vermemesi ve ölçüm işlemlerinin uzun sürmesi bu tekniğin dezavantajları olarak bilinir [15].

Üçüncü grupta diğer yöntemlerden farklı olarak kalıntı gerilme ve gerilmesiz durumlarda farklı fiziksel özellikler gösteren malzemelerde ölçüm yapılabilen tahribatsız yöntemlerdir. Manyetik ve ultrases dalgaları ile kalıntı gerilmeleri ölçme prensibine dayalı yöntemler bu gruba dâhildir. Hangi yöntemin seçileceği kalıntı gerilmenin ne amaçla ölçüleceğine bağlı olarak değişmektedir. [24].

Kalıntı gerilmelerin ölçümleri için geliştirilen birçok yöntemden yukarıda bahsedilmiştir. Bunlardan bazıları da Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kalıntı gerilimini ölçmede kullanılan yöntemler [15,24]

Elektrikli ve Mekanik birim uzama rozeti kullanan gerilme-gevşeme yöntemleri	Sadece levhalara uygulanan yöntemler	-Elektrikli birim uzama rozeti kullanan kısımlara bölme yöntemi -Gunnert yöntemi -Mathar-Soete delik delme yöntemi -Stablin ardarda frezeleme yöntemi
	Sadece silindir ve borulara uygulanan yöntemler	-Heyn-Bauer ardarda talaş kaldırma yöntemi -Mesnager-Sachs oyma tekniği
	Üç boyutlu parçalara uygulanan yöntemler	-Gunnert delme tekniği -Rosenthal-Norton kısımlara bölme tekniği
Birim uzama rozeti kullanmayan gerilme-gevşeme yöntemleri		-Grid sistem bölümlendirme tekniği -Gevrek kaplama-Delme tekniği -Fotoelastik kaplama-Delme tekniği
X ışınları difraksiyon yöntemleri		-X ışınları film yöntemi -X ışınları difraktometre tekniği
Gerilme hassasiyetinden faydalanan yöntemler	Ultrasonik yöntemler	-Polarize ultrasonik dalga tekniği -Ultrasonik inceleme tekniği
		-Sertlik tekniği
Çatlama teknikleri		-Hidrojen teşvikli çatlama yöntemi -Gerilmeli korozyon çatlama yöntemi

Kaynaklı birleştirmelerin kalıntı gerilmelerinin ölçümü için kullanılan tekniklerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 4.2.'de verilmiştir. İlk iki yöntem levhalar için, üçüncü ve dördüncü yöntemler de üç boyutlu cisimlere uygulanan kalıntı gerilme ölçüm metodudur. Beşinci yöntemde ise fotoelastik kaplama yöntemi kullanılır ve diğer yöntemlerde kullanılan birim uzama rozetlerinden yararlanılmaz.

Çizelge 4.2. Kaynaklı yapılarda kalıntı gerilme ölçümünde kullanılan gerilme-gevşeme tekniklerinin uygulamaları, avantaj ve dezavantajları [15,24]

TEKNİK	UYGULAMA	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Elektrikli birikim uzama rozeti ile levha için kullanılan kısımlar bölme yöntemi	Her pozisyonda ve her mekanda uygulanabilir.	Prensipleri basit, ölçüm hassasiyeti yüksek, güvenilir bir yöntemdir.	Tahribatlı yöntemlerden biridir. İş parçasından ayrılan kısımlardaki ortalama gerilmeyi ölçtüğü için lokal gerilme ölçümünde uygun değildir.
Mathar-Soete Delik delme yöntemi	Her mekanda ölçüm yapılabilir. Ölçülecek yüzey dikey, tavan yada korniş pozisyonda olmalıdır.	Basit bir yöntemdir. İş parçasına çok az zarar verir.	Delme sırasında deliğin dış yüzüne zarar verilirse sonuçlar yanlış çıkar. Delem işlemine büyük dikkat gösterilmelidir.
Gunnert Delme Tekniği	Her mekanda ölçüm yapılabilir. Parça yüzeyi korniş pozisyonda ve dayanıklı olmalıdır.	Yarı tahribatlı basit bir yöntemdir. Test edilen parçalardaki hasar kolayca giderilebilir.	Levha mutlaka dayanıklı olaraksabitlenmelidir. Kalifiye personel deneyi gerçekleştirmelidir.
Rosenthal-Norton kısımlara bölme tekniği	Laboratuarda uygulanır.	Ölçümler dikkatle yapılırsa çok hassas sonuçlar ele edilir.	Uzun süreli zor ve tamamen tahribatlı bir yöntemdir.
Fotoelastik Kaplama-Delme Tekniği	Esasen laboratuvar tekniği ancak belirli şartlar altında atölyede kullanılır.	Lokal gerilmeler ölçülebilir. Parçaya çok az hasar verir.	Delinen deliğin kenarında oluşabilen plastik şekil değişimlerine karşı hassastır.

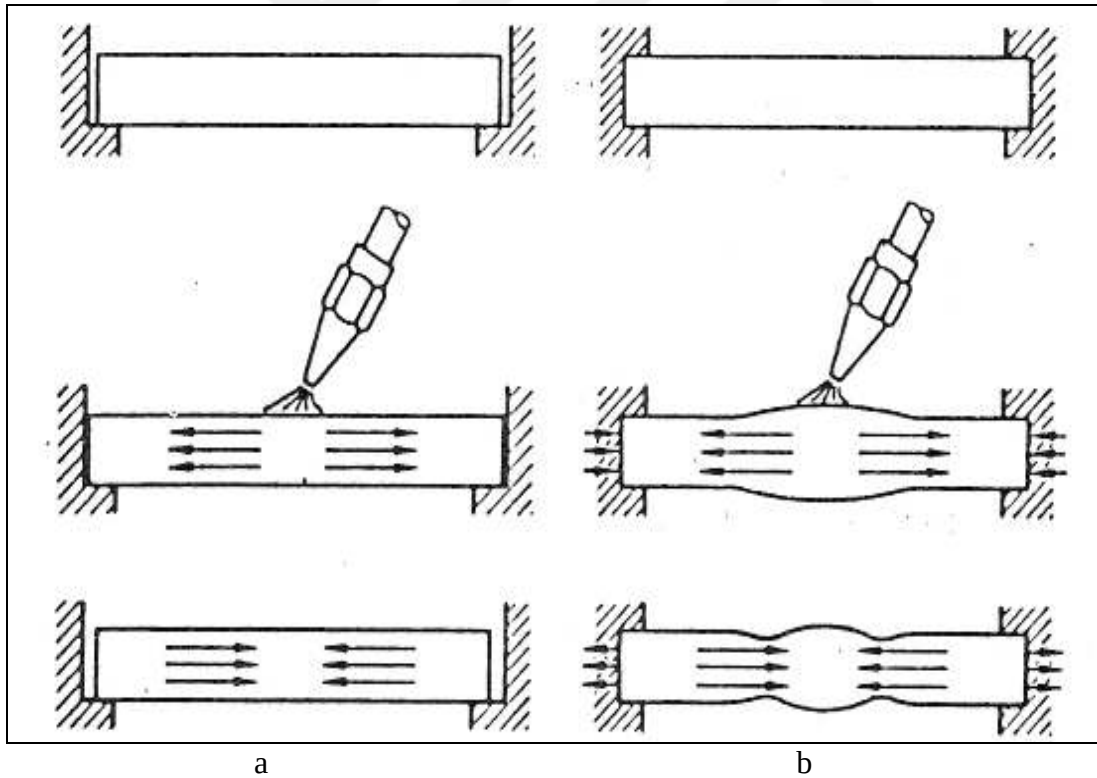
4.2. Distorsiyon

Malzemelerin kaynaklanması sırasında aşırı sıcaklık artışının ardından soğuyup eski halini almaya çalışması, en az enerji harcadığı konuma dönmesi kaçınılmazdır. Bu ısınma ve soğumalar sonucu malzemenin yapısında bazı kalıcı iç gerilmelerin olduğuna daha önce değinilmişti. Bu kalıcı iç gerilmelerin de yönleri ve doğrultuları birbirleriyle kesiştiklerinde malzemelerin akma değerlerinin üzerinde bir kuvvetle burulmalara, eğilmelere, çarpılmalara yol açmaktadır. Kaynaktan dolayı genişleyen ve daha sonra soğuma etkisiyle

büzülme eğiliminde olan malzemelerde oluşan iç kuvvetlerin sebep olduğu kalıcı şekil bozukluklarına *distorsiyon* denir.

Uzunluğu diğer boyutlarına göre çok daha fazla olan bir çubuk ısıtılır ve ilk sıcaklığına kadar soğutulursa düzgün bir serbest uzama ve kendini çekme oluşur. Bu durumda uzama ve kendini çekme miktarları eşittir. Çünkü sıcaklık dağılımı homojendir ve bu fiziksel kural sadece hacim bakımından serbest hareket edebilen ve düzenli ısıtılıp soğutulan parçalar için geçerlidir. Ancak böyle bir ideal durum kaynak sırasında söz konusu değildir, heterojen ısı dağılımları kendini çekme ve büzülme problemleri olarak ortaya çıkar [20,28].

Kaynak sırasında ortaya çıkan kendini çekmenin engellenmesi sonucu oluşan gerilmeler distorsiyonlara neden olur (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Parçaların kaynak işlemlerinde oluşan durumları [14] a) Uzaması sınırlandırılmış, b) Uzaması sabitlemiş

Şekil 4.11 incelendiğinde kaynak esnasında ısı girdisinden dolayı ana malzemedeki distorsiyonun ısınma ve soğuma ile oluştuğu kanıtlanmış bir gerçektir. Şekil 4.11.a'da

uzaması sınırlandırılmış metal kütüğe ısı girdisi sağlanmakta ve bu ısı girdisi metalin hacim artışına sebep olunmaktadır. Bu hacim artışı uzaması sınırlandırılan metal parçanın mesnetin yan yüzeylerinde basma gerilmeleri kuvvetine sebep olacaktır. Soğumaya bırakıldığında da metal parçanın başlangıçtaki formuna döndüğü görülmektedir.

Şekil 4.11.b’de ise iki mesnet arasına sabitlenmiş metal parçaya ısı girdisi sağlandığında parçanın uzaması mümkün olmadığı için ve hacimdeki artışın kaçınılmaz oluşundan metal parça şişmeye başlayacaktır. Metal parçanın kesit alanındaki bu artış yine mesnet yan yüzeyine basma gerilmeleri olarak etki etmektedir. Metal parça soğutulmaya başladığında ise kuvvetler yön değiştirecek, büzülmenin etkisiyle çekme kuvvetleri oluşacaktır. Bu defa soğuma sırasında birim şekil değişimi homojen olmayacaktır. Mesnetin her iki ucundan metal parçanın sabitlendiği unutulmamalıdır. Kesit alanın fazla olduğu merkez bölgesinin akma dayanımının buna paralel yüksek olmasından dolayı şekilde görülen zatif bölgelerden kesitte daralma (boyun verme) oluşacaktır. Soğuma esnasında oluşan çekme gerilmelerinin neden olduğu kesit daralması malzemenin temel özelliklerine göre kopma ile sonuçlanabilir.

Eğer bu deney martenzit yapıları çelikler gibi gevrek malzemeler üzerinde gerçekleştirilirse boyun verme safhası gözlemlenmeyecektir. Bunun yerine kırılma olayı gerçekleşecektir.

4.2.1. Kaynaklı birleştirmelerde distorsiyon oluşumuna etki eden faktörler

Kaynaklı parçaların birleştirilmesinde distorsiyona sebep olan pek çok etkenin olduğu bilinmektedir. Bu etkileri ise malzemenin özelliklerinden kaynaklanan ve kaynak ortamından kaynaklanan etkiler olarak iki başlık altında inceleyebiliriz.

Malzemenin özelliklerinden kaynaklanan etkiler

Malzemelerin bileşimi, metalürjik özellikleri, ısı iletkenlik özellikleri, ısı genleşme katsayıları, akma ve çekme mukavemetleri, elastik modülleri gibi pek çok etken distorsiyon oluşumunda önemli rol oynar. Bu etkilerden kısaca söz edecek olursak;

Malzemenin metalurjik özellikleri;

Kaynak işleminden dolayı sıcaklığı artan malzemelerin soğuması ile beraber içyapılarında değişiklikler meydana gelir. Örneğin; dövme çeliklerin kaynağında kaynak bölgesinin yeniden kristalleşme sıcaklığına ulaşan bölümlerinde tane yapıları çeliğin dövülmeden önceki halini alır ve bu mikroyapı değişimi kırılganlığı artırır.

Isıl genleşme katsayısı;

‘Isıl genleşme katsayısı, bir metalin ısıtıldığında uğradığı genleşme ya da soğuduğunda meydana gelen büzülmenin bir ölçüsüdür’ [20,29]. Malzemelerin sıcaklığının 1°C artmasıyla malzeme ölçüsündeki değişimi ifade eder. Isıl genleşme katsayısının yüksek olması malzemenin sıcaklık karşısındaki duyarlılığının bir ölçüsüdür. Yani ısı genleşme katsayısı yüksek olan malzemeler ısıtıldıklarında daha fazla genleşecek soğuduğunda da daha fazla büzülecek anlamına gelir.

Isıl iletkenlik katsayısı;

‘Bir malzeme içinde ısı akış kolaylığının bir ölçüsüdür. Isıl iletkenlik katsayısı küçüldükçe kaynak yerine uygulanan ısı enerjisinin yayılma hızı da azalır’ [29]. Düşük karbonlu çelikler ve alüminyum plakaları karşılaştırarak örneklersek; alüminyum ısıl iletkenliği daha yüksek olması nedeniyle kaynak ısısı plakaya hızlı bir şekilde yayılacaktır. Bunun sonucu kaynak bölgesi ile ana malzeme arasındaki sıcaklık farkı çeliklere göre daha az olacağından çarpılma ve distorsiyon oluşumu da en aza inecektir.

Akma mukavemeti;

‘Malzemenin akma mukavemeti yükseldikçe, kaynak konstrüksiyonunu şekil değiştirmeye ve çarpılmaya yönelik iç gerilmelerin şiddeti artar. Akma sınırı düşük malzemelerde, malzeme akarak bu iç gerilmelerin şiddetinin azalmasını sağladığından çarpılma olasılığı da zayıflar’ [20,29].

Elastik modülü;

‘Elastiklik modülü, malzemenin eğilme ve burkulma kuvvetlerine karşı koyabilmesinin bir ölçüsüdür. Bir malzeme ne kadar rijit ise distorsiyonlara karşı koyma kabiliyeti o kadar yüksektir denebilir’ [20,29].

Kaynak ortamından kaynaklanan etkiler

Kaynak ortamından kaynaklanan distorsiyon etkileri malzemenin özelliklerinden ziyade malzemenin nasıl kullanıldığı, malzemeye hangi işlemin nasıl yapıldığı ile ilgilidir. Konstrüksiyonun rijitliği, kaynak hızı, kaynak bölgesinin erime ve soğuma hızları gibi özellikler bu bölümde sıralanabilir.

Konstrüksiyonun rijitlik derecesi;

Kaynak sonucu oluşan çekme ve basma kuvvetlerinin konstrüksiyonlarda bazı şekil bozukluklarına neden olduğu bilinmektedir. Tezimizin amacı da bu bozuklukların önceden tahmin edilebilmesidir. Konstrüksiyonların da rijitlik derecesi bu şekil bozukluklarını doğrudan etkiler. Rijitlik derecesi yüksek bir konstrüksiyonda kalıntı gerilmelerin varlığı kaçınılmaz olsa da yüksek rijitlik bu kalıntı gerilme kuvvetlerinin distorsiyon oluşturmaya izin vermez. Konstrüksiyonun tasarımı ve kullanılan malzeme de rijitlik konusunda önem arzeder. Örneğin; ince sac levhaların rijitliği aynı et kalınlığına sahip kutu profil ya da dairesel kesitli profillerden daha düşüktür. Tasarımlarımızı yaparken bu bu bilgiler bize daha sağlıklı konstrüksiyonlar oluşturmamızı sağlayacaktır.

Kaynak hızı;

Kaynak banyosunun kaynak çizgisinde ilerleme hızına *kaynak hızı* denir. Kaynak hızı artırıldığında kaynak ısısından dolayı kaynaklanan metal parçalara iletilen ısı miktarıda azalacağı için distorsiyon ve artık gerilmeler de azalacaktır. Ancak kaynak hızının artırılmasının nufuziyeti olumsuz etkileyeceği göz önünde bulundurulmalı ve her iki durum içinde uygun parametreler seçilmelidir.

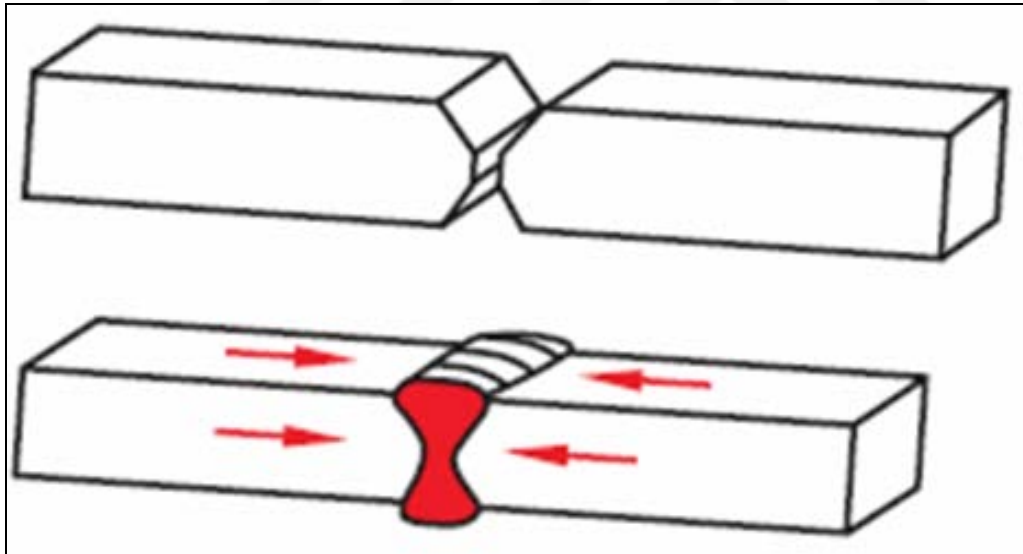
Kaynak metalinin ergime derecesi;

Kaynak bölgesi ile kaynak metalinin arasında oluşan sıcaklık farkı distorsiyonun bir diğer belirleyici etkenidir. Kaynak bölgesinin sıcaklığını ana malzemenin ergime derecesi belirler. Kaynak metalinin ergime derecesi ne kadar yüksekse çekme ve çarpılmalar o derece fazla olacaktır.

4.2.2. Distorsiyon tipleri

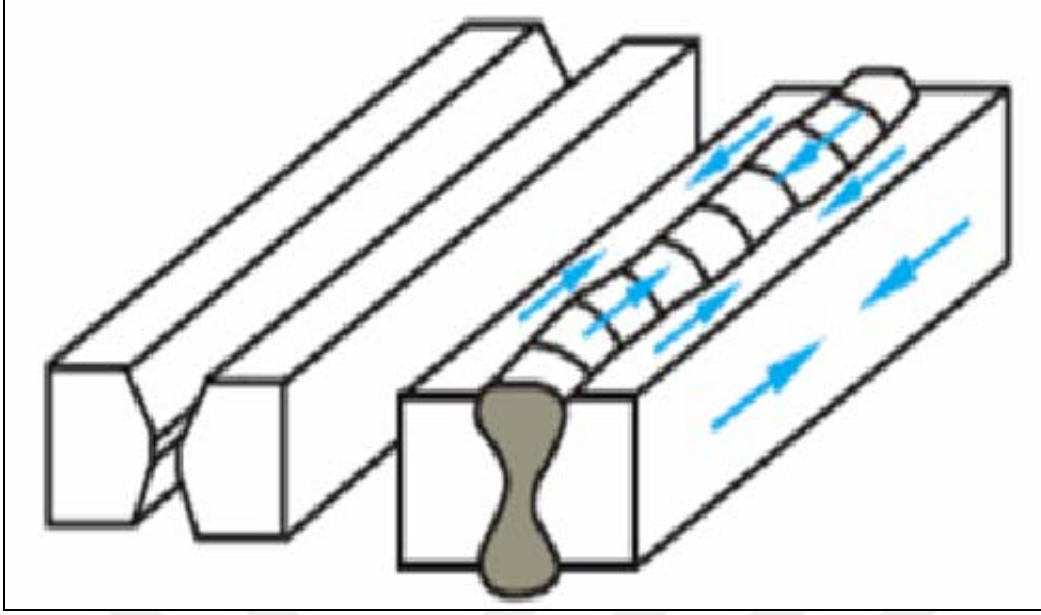
Kaynaklı imalatın çok geniş bir alanda hizmet vermesi elbetteki farklı tip konstrüksiyonların zorunluluğuna sebep olmuştur. Konstrüksiyonların ve kaynak yöntemlerinin çeşitliliği elbette problemlerin çeşitliliğini de beraberinde getirmiştir. Kaynak ağız şekilleri ve paso sayısı örnek gösterilebilir.

Şekil 4.12’de X kaynak ağız hazırlığına sahip bir levhada oluşan enine büzülme görülmektedir.



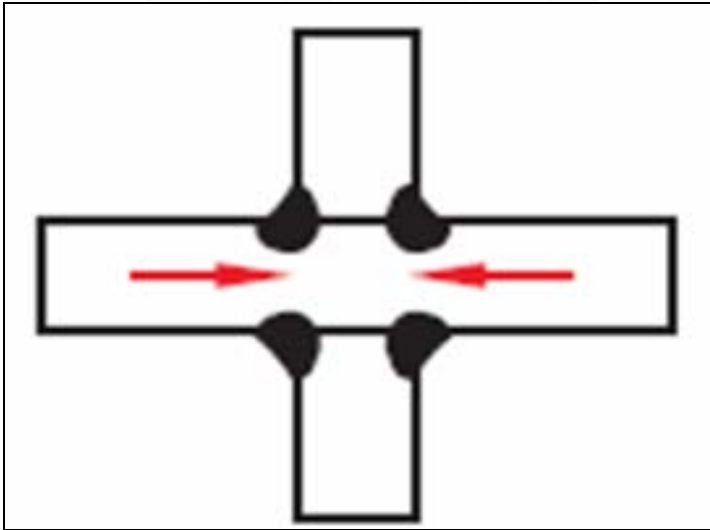
Şekil 4.12. X kaynak ağzında enine büzülme [30]

Şekil 4.13’de ise boyuna bir dikişte çekme gerilmeleri sonucunda oluşan boyuna büzülmeler görülmektedir.



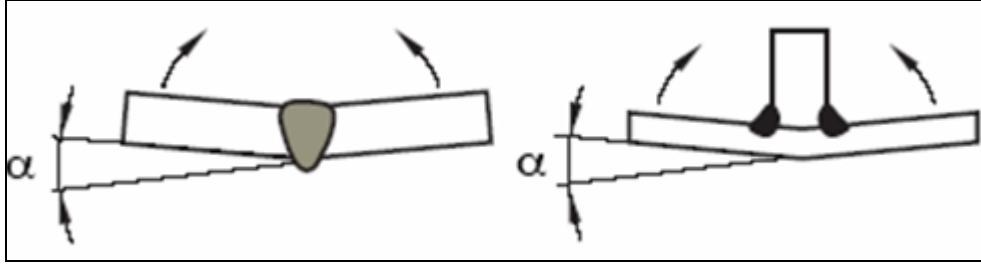
Şekil 4.13. X kaynak ağzında boyuna büzülme [30]

Şekil 4.14’de 4 adet köşe kaynağı ile birleştirilmiş olan T birleşimindeki büzülme yönü gösterilmektedir.



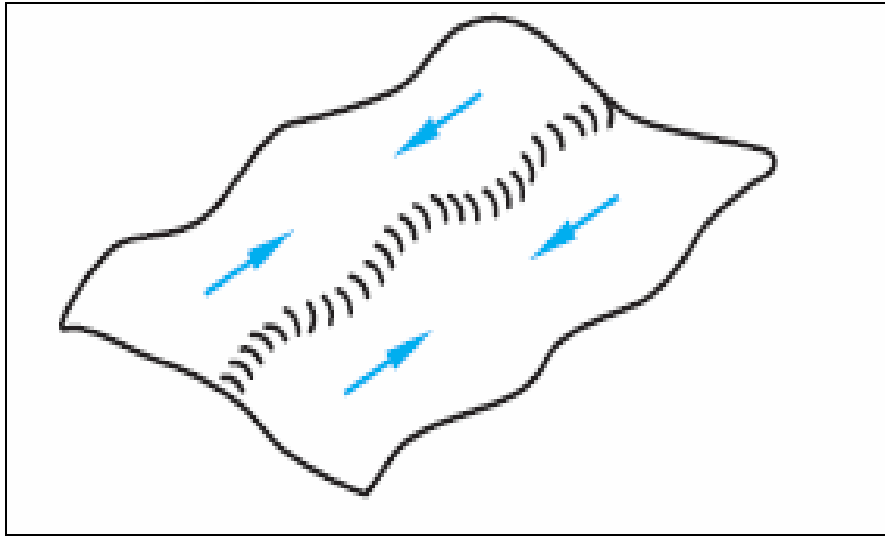
Şekil 4.14. T birleşiminde büzülme [30]

Şekil 4.15’de V kaynak ağzına sahip bir alın kaynağında ve tek yönlü bir T birleşiminde oluşan açısız distorsiyon görülmektedir.



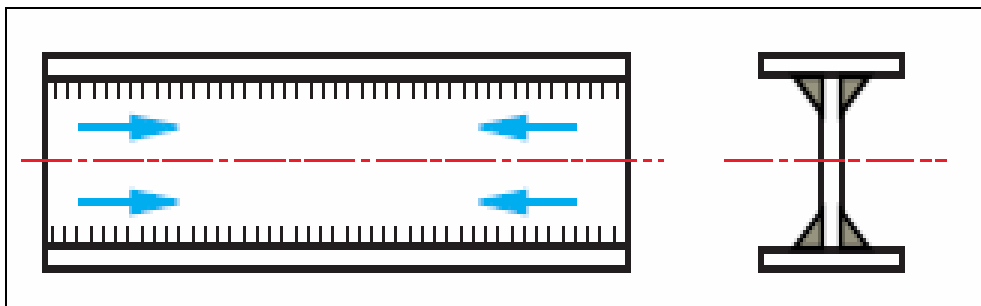
Şekil 4.15. T ve aln birleştirmelerde açısıl çarpılma [30]

Şekil 4.16'da ince bir levhada, boyuna dikişin yarattığı artık gerilmeler nedeniyle oluşan buruşma görülmektedir.



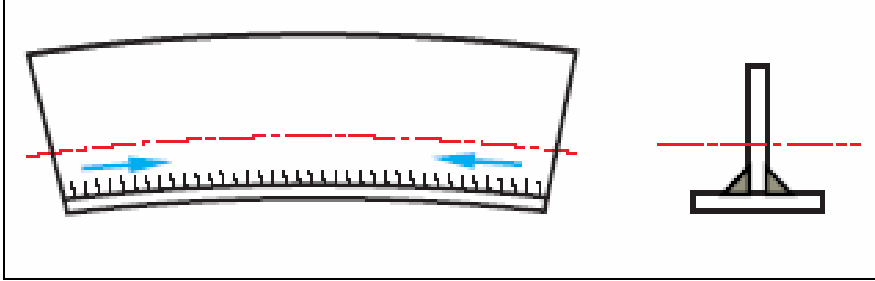
Şekil 4.16. İnce levhalarda boyuna büzülme etkisinde oluşan buruşma [30]

Şekil 4.17'de köşe kaynakları ile imal edilmiş bir I profilde oluşan aksel daralma görülüyor.



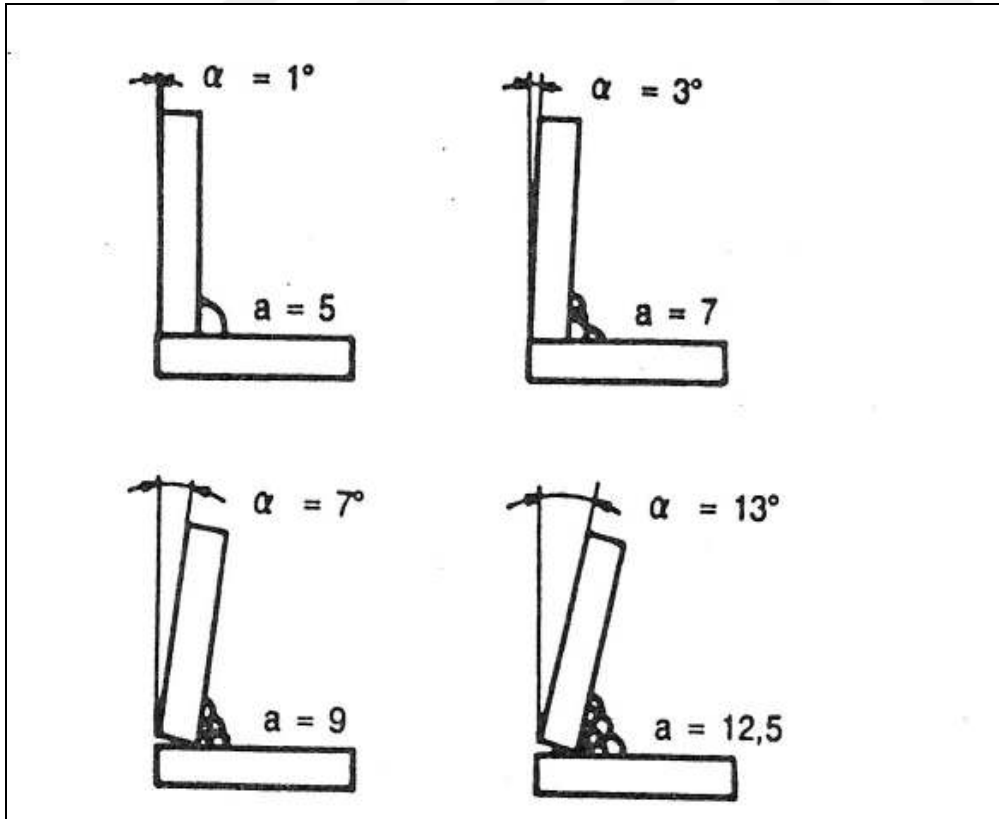
Şekil 4.17. I profilde kaynak eksenine doğrultusunda oluşan büzülme [30]

Şekil 4.18’de köşe kaynağı kullanılarak imal edilmiş olan bir T profilde oluşan açısız distorsiyon görülmektedir.



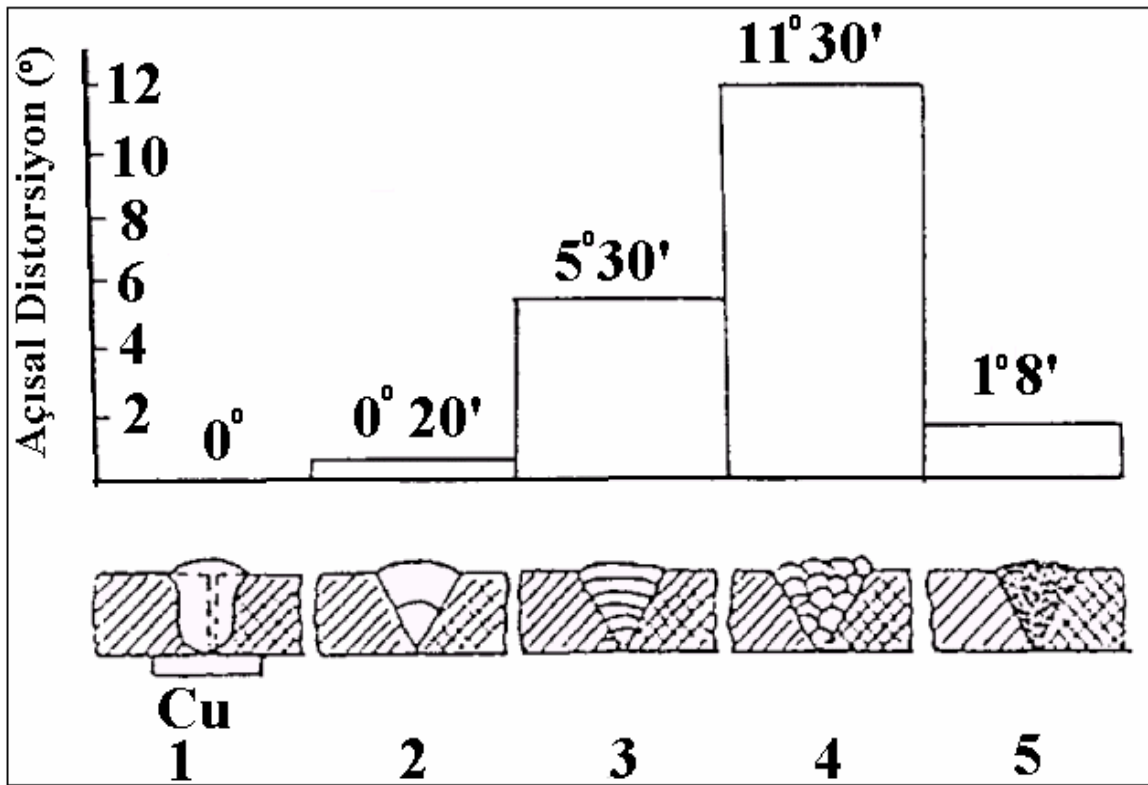
Şekil 4.18. T profilde açısız çarpılma [30]

Köşe kaynakları boyuna ve enine gerilmelerin her ikisini de içerir. Köşe kaynaklarında birleştirmenin düşey parçası kaynak yapılan tarafa doğru çekilecektir. Bu da yatayla dar açı oluşturacak şekilde gerçekleşecektir. Şekil 4.19’da köşe kaynağının yüksekliği ile distorsiyon açısı arasında doğrudan bir ilişki olduğu gösterilmektedir.



Şekil 4.19. St 37 çeliğinden yapılmış iç köşe birleştirmelerinde açısız distorsiyonun kaynak dikiş yüksekliği ile değişimi [14,20]

Kaynak ağzının genişliği de bir yerde distorsiyona etki etmektedir. Çünkü kaynak bölgesine yığılan metal miktarı arttıkça ısı girdisi de artmış olacaktır. Isı girdisinin artmasının da doğal sonucu distorsiyon kaçınılmazdır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus daha önce belirttiğimiz gibi nasıl ki metal miktarı ile ısı girdisi doğru orantılı bir ilişki içinde ise kaynak ağzı genişliği de aynı şekilde doğru orantılı çalışmaktadır. Kaynak ağız genişliği daha fazla metal yığılmasına daha fazla metal yığılması da daha fazla ısı girdisine sebebiyet vermektedir. Şekil 4.20’de kaynak ağız genişliği ve paso teşkil tarzının açısal distorsiyona etkisini görebiliriz.

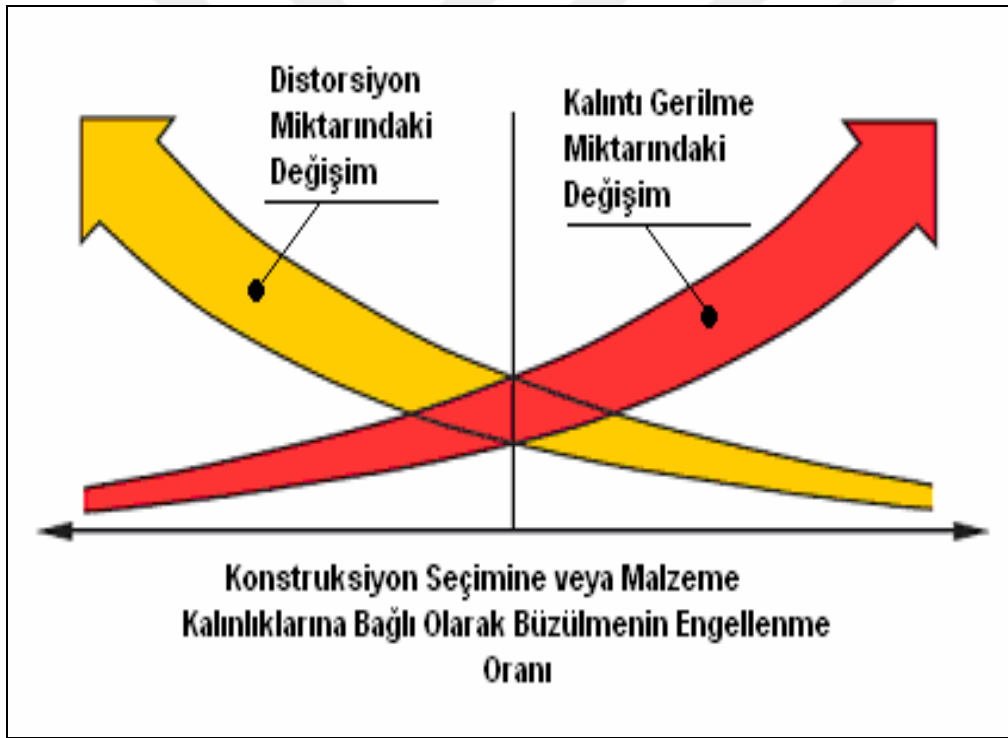


Şekil 4.20. Dikiş teşkil tarzının açısal distorsiyona tesiri [15] 1. Tek Pasolu Tozaltı Kaynağı, 2. Elektrik ark kaynağı ile üçgen tarzı doldurma, 3. Elektrik ark kaynağı ile tabakalar halinde kaynak, 4. Elektrik ark kaynağı ile küçük pasolarla kaynak, 5. Tek pasolu oksis-asetilen kaynağı

Sonuç olarak kaynak ağzı teşkil tarzı, kaynak ağzı genişliği, dikiş yüksekliği gibi etmenlerin distorsiyonu doğrudan etkilediği söylenebilir. Bu etmenlerin artan nicelik göstermesi ısı girdisinin artması demektir ki bu da distorsiyon oluşumunun artışı anlamına gelir.

4.3. Distorsiyon ile Artık Gerilme Arasındaki İlişki

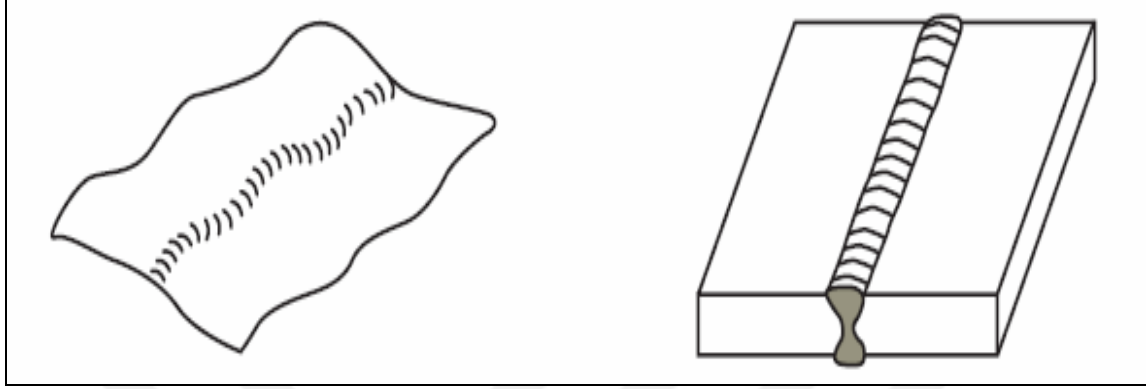
Kaynak sırasında oluşan artık gerilmeler ve distorsiyonlar arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Kaynaklı birleştirmelerle oluşturulan konstrüksiyonun rijitliği arttıkça, kaynak sonrası meydana gelen distorsiyonlar azalır ve bunların yerini artık gerilmeler alır. Daha önce bahsedildiği üzere rijitlik kaynaklanacak malzemenin özelliği ve ölçüleriyle alakalı bir niceliktir. Malzemenin kalınlığının artması birim akma kuvvetini değiştirmese de toplam kesit alanının artışından toplamdaki akma kuvveti sınırında artış olacaktır. Bu artış distorsiyon kuvvetlerine karşı koyup şekil değişimini engelleyecektir. Ancak şekil değişimi için yetersiz olan bu kuvvetler kaynak sonrası artık gerilme olarak konstrüksiyonda var olacaktır. Bu durum Şekil 4.21’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Distorsiyon ve artık gerilme arasındaki ilişki [1]

Yatay eksen konstrüksiyonun rijitliğini ifade eder. Bu eksenle sağa doğru gidildikçe rijitlik artar ve distorsiyon miktarında (sarı çizgi) azalma olduğu görülür. Buna karşılık kalıntı gerilme (kırmızı çizgi) miktarında artış olur. Aynı eksenle sola doğru gidildiğinde ise rijitlikle beraber kalıntı gerilme miktarının da azaldığı gözlenir. Ancak distorsiyon miktarının ise arttığını görebiliriz. Bunu örnekleyecek olursak; Şekil 4.22’de kaynak

sıcaklığının ince levhada buruşmaya varabilecek büyüklükte deformasyonlar oluşturduğu görülmektedir. Buna karşın kalın malzemede distorsiyon oluşmadığı ancak bünyesinde yüksek derecede artık gerilmeler bulunduğunu bilinmektedir.



Şekil 4.22. İnce ve kalın levhalarda artık gerilmenin karşılaştırılması [30]

4.4. Büzülme ve Artık Gerilmelerin Engellenmesi İçin Yapılması Gerekenler

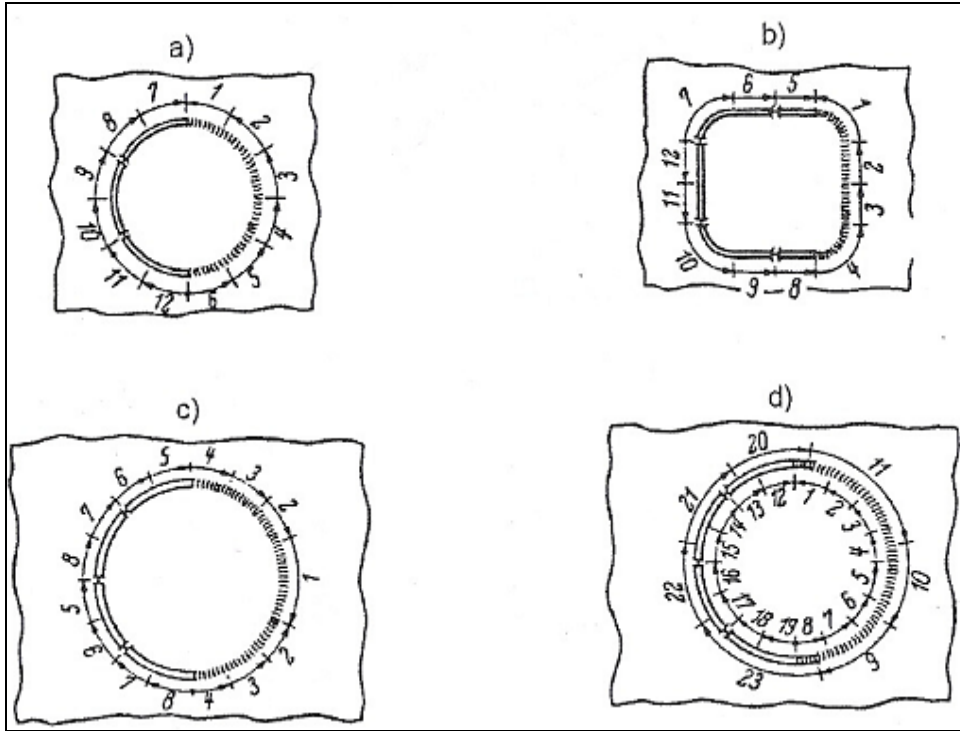
Distorsiyon ve artık gerilmelerin engellenmesi için gerek tasarımda gerekse imalat aşamasında bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir.

Daha önce de bahsedildiği üzere kaynak kalınlığını belirlerken sağlanması gereken mukavemetten daha fazlası tercih edilmemelidir. Kaynak kalınlığının fazla olması daha fazla ısı girdisi ve daha fazla malzeme sarfiyatı anlamına gelir. Bu dikişi atan kaynakçının da daha fazla emek harcaması demektir. Kaynaklanacak plakaların kalın olması yine ısı girdisinin yüksekliğini ifade eder. Bunun içinde kalın plakalara kaynak ağzı seçimi önemlidir. Örneğin X kaynak ağzı kalın plakaların kaynağında distorsiyon oluşumunu engellediği bilinir. Isı girdisi plakanın her iki tarafından uygulandığı için oluşan kuvvetler birbirini dengeler.

Mekanik özellikler de dikkate alındığı takdirde *metod* kaynağı uygun konstrüksiyonlarda kullanılmalıdır. Böylece dayanımın ikinci planda olduğu bölgelerde gereksiz kaynak dikişi uzunluğundan kaçınılmış olunur. Bu da yine gereksiz ısı girdisi ve distorsiyondan konstrüksiyonu koruyacaktır.

Kaynak paso sayısına daha önce de değindiğimiz üzere paso sayısındaki artışın distorsiyon miktarındaki artış ile doğru orantılı olduğunu biliyoruz. Paso sayısının azaltılması imalat sırasında azaltılması alınacak önlemler arasındadır.

‘Kaynak esnasında geri adım tekniği kullanılırsa distorsiyon miktarı azalır. Şekil 4.23’de verilen geri adım tekniği örneklerinde uygulama metodu farklı kalınlıklarda ve paso sayılarındaki örnek dikişler için gösterilmektedir’ [29].



Şekil 4.23. Geri adım tekniği örnekleri [29]

Kaynak öncesinde oluşacak deformasyonun tahmin edilebilmesi distorsiyonlar için önlem alma açısından işlemleri kolaylaştıracaktır. Örneğin bir profilin köşe kaynağında kaynak işlemi tek tarafatan gerçekleştirildiğinde açılal distorsiyon oluşacağı bilinir. Bu kendini çekme olayının kaynak dikişinin oluşturulacağı tarafa doğru hareket edeceği de bilinir. O halde kaynaktan önce oluşacak distorsiyonun açısı kadar ters yönde açı verilerek kaynağa başlandığında kaynak işlemi bitince imalatın istenen ölçülerde tamamlandığı görülecektir.

5. KALINTI GERİLME VE DİSTORSİYONLARIN SAYISAL ÇÖZÜMÜ

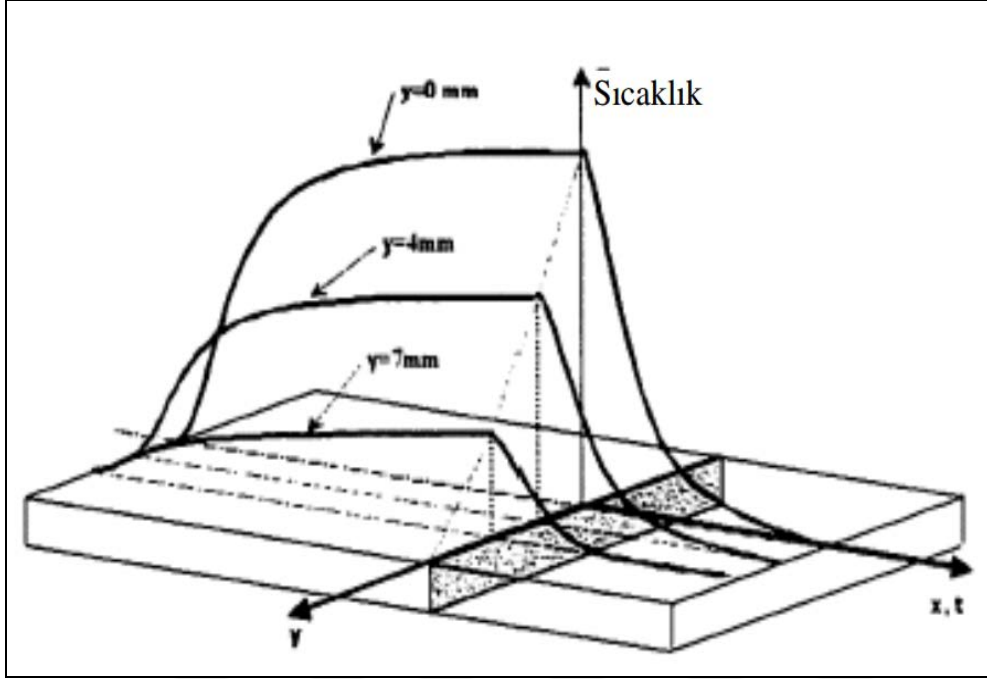
Mühendislik uygulamalarının problem çözümlerinde gerek problemlerin karmaşıklığı gerekse malzeme davranışlarının işlem sırasındaki sürekli değişkenlik göstermesi nedeni ile tam ve doğru sonuçlar elde edilemeyebilir. Problemlerin bir kısmında daima doğrusal davranışlar söz konusu iken çözüm basittir. Ancak doğrusal olmayan ısı akışı, değişken basınç, moment, sürekli ısı girişi ve sıcaklık farklılıkları gibi etkenler problem çözümünü zorlaştıracaktır. Bu problemler için tek bir çözüm yöntemi yeterli olmayabilir.

Problem çözümünde kesin sonuç için nümerik ve analitik sistem yaklaşımları geliştirilmiştir. Nümerik modellemeler için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve Sonlu Farklar Yöntemi (SFY) ile çözüm yapan bilgisayar programları mevcuttur. SEY ile çözüm yapan programlarda problemin simetrisi önemli değilken SFY ile çözüm doğru sonuçlar için simetrik problemlerde tercih edilir.

Kaynak işleminde meydana gelen termal olayların nümerik çözümlenmesinde izlenecek yol ifade edilecek olursa;

- 1- Probleme uygun ısı transferi denklemlerinin oluşturulması ve sınır şartlarının belirlenmesi,
- 2- Isı transferi denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile lineer denklem takımına dönüştürülmesi,
- 3- Nümerik yöntemler ile bu denklemlerin çözülmesi.

Analitik çözümlemede ise kaynak işlemi sırasında meydana gelen olayların tam ve doğru olarak analiz edilmesi gerekir. Ergitmeli kaynak işlemlerinin neredeyse tamamında ısı kaynağı hareketlidir. Isı kaynağının kaynak yolu üzerinde doğrusal hareket ettiği varsayılırsa sürekli genişleyen bir kaynak havuzu elde edilecektir. Buna karşın ergime sıcaklığına ulaşamamış bölgelerde sürekli ısı akışı olacaktır ve hacimsel değişim de gözlenmeyecektir.



Şekil 5.1. Isı kaynağından çeşitli mesafelerdeki soğuma eğrileri [1]

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere kaynak işlemi sırasında ergime noktasındaki sıcaklık zirve sıcaklığıdır. Zirve sıcaklığı kaynak işlemi süresi boyunca ısı kaynağını takip edecektir. Isı kaynağının birim zamanda yer değiştirmesi ile beraber zirve noktası sıcaklığı çapraz eğriyi takip ederek soğumaya başlayacaktır ve zamanla ana malzeme sıcaklığına düşecektir.

5.1. Isı Transferi Mekanizmaları

Kaynak işlemindeki ısı transferi mekanizmaları iletim, taşınım ve ışıınım olarak üç farklı şekildedir. Kaynaktaki ısı akışı ergime için çok önemlidir. Kaynakta ısının yaklaşık % 15’i ışıınım yoluyla atmosfere aktarılırken ergime için gerekli olan ısının büyük bir kısmı da (yaklaşık %30’u) iletim ve taşınım ile malzemeye yayılır.

5.1.1. İletim ile ısı transferi denklemi

Bir maddenin (katı, sıvı, gaz) yüksek enerjili atomları ile enerjisi daha düşük atomları arasındaki etkileşim sonucu barındırdıkları enerjinin aktarılması olayına *iletim* denir. Kaynak esnasında da sıcaklığın merkezi olan kaynak dikişinden sıcaklığın az olduğu ana metale doğru bir ısı akışı olur. Bu da iletim yoluyla ısı enerjisinin aktarımıdır.

‘Katı malzeme boyunca iletimle ısı transferi Fourier denklemi ile ifade edilir’ [31].

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5.1)$$

Bu denklem göre ısı akısı q (W/m^2) ile malzeme yüzeyine yayılırken sıcaklık dT/dx (K/m) ters yönde hareket eder. Burada ısı iletim katsayısı k ($W/m \cdot K$) dir. Termal iletim katsayısı (k) malzemenin kimyasal kompozisyonuna, sıcaklığına ve mikroyapı durumuna bağlıdır. Eksi işareti ise ısı iletiminin malzemedeki sıcaklığın azaldığı yöne olduğunu ifadesidir. Burada A ; alan, T ; sıcaklık ve x ; büyüklük parametresidir. Sonuç olarak Denklem 5.1. birim zamanda birim alandan iletim yoluyla geçen ısıнын formülüdür.

5.1.2. Taşınım ile ısı transferi denklemi

Taşınım ile ısı geçişi, bir akışkan içinde, iletimin ve kitle hareketlerinin birleşik etkileri ile oluşan enerji aktarımı olarak bilinir. Burada aktarılan enerji akışkanın iç ısı enerjisidir. Doğal ısı iletim olayı sıcaklık farklılıkları sonucu oluşur. Taşınım ile ısı iletimi için kullanılan genel denklem;

$$q = h(T_y - T_\infty) \quad (5.2)$$

şeklinde dir. ‘Bu ifade *Newton’un soğutma yasası* olarak bilinir’ [31].

Burada; taşınım ile ısı akısı q (W/m^2), ısı taşınım katsayısı h ($W/m^2 \cdot K$), yüzey ve ortam sıcaklıkları arasındaki fark $(T_y - T_\infty)$ ’ dir.

5.1.3. Işınım ile ısı transferi denklemi

‘Isıl ışı nım, sonlu sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı enerjidir’ [31]. Yapılarda karşılıklı ısı değişim durumu söz konusudur. Çünkü yapılar elektromanyetik dalgalar yayarlar. Bir yapıda birim zamanda ve birim alanda radyasyonla oluşan ısı;

$$q^1 = \epsilon \sigma A T^4 \quad (5.3)$$

şeklindedir ve bu ifade *Stefan-Boltzmann yasası* olarak bilinir.

Burada; T (K): sıcaklık, σ Stefan-Boltzmann sabitidir ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). ϵ yayma oranı olarak adlandırılır. Bir yüzeyin siyah cisme kıyasla ne kadar etkin enerji yaydığının bir özelliğidir. Kaynaklanan veya ısıtım gerçekleştiği yüzeyin nasıl işlenmiş olduğuna bağlı olarak $0 \leq \epsilon \leq 1$ aralığında değerler alır [31].

$$q = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (5.4)$$

Kaynakta ısı girişi;

$$H = \eta \frac{P}{v} \quad (5.5)$$

$$P = EI \quad (5.6)$$

$$H = \eta \frac{EI}{v} \quad (5.7)$$

Burada; H; net ısı girişi (Joule/mm), η ; ısı transfer etkisi azalması, P; ısı kaynağından alınan toplam enerji (watt), E; voltaj, I; Amper, v: kaynak hızı (mm/sn).

5.1.4. Bir katı malzemedeki enerji üretimi

Katı malzemelerde, kimyasal, nükleer ya da elektrik enerjisi gibi enerjiler termal enerjiye dönüştüğünde ısı üretimi olacaktır. Isı üretim oranı için aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\dot{E}_u = q''' V \quad (5.8)$$

Burada; q''' = birim hacimde üretilen ısı (W/m^3), V= malzemenin hacmi (m^3).

5.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Karmaşık mühendislik problemleri beraberinde karmaşık çözümleri getirmiştir. Bu karmaşanın basite indirgenerek çözülmesi zaman ve emek tasarrufu için zorunludur.

Problemin basitleştirilerek çözülmesini sağlayan yöntemler üzerinde çalışmalara literatürde oldukça sık rastlanmaktadır. Bu yöntemlerden biri de *Sonlu Elemanlar Yöntemidir*.

1950’li yıllarda kullanılmaya başlanan Sonlu Elemanlar Yöntemi ilk olarak uçak gövdelerinin gerilme analizinde daha sonraki on yıl içinde de uygulamalı bilim ve mühendislik problemlerinin çözümünde uygulanmıştır. 1980’li yıllara gelindiğinde nümerik kontrollü programlarında geliştirilmesiyle bilgisayar ortamında bu yöntemin kullanılması daha basit hale gelmiştir. Böylece sonuçların güvenilirliği ve zamanın kullanımında verim artmıştır. Bu gelişim de başta havacılık endüstrisi, akışkanlar mekaniği, nükleer mühendislik, termal analizler gibi pek çok alanda uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Mühendislik uygulamalarında birçok problem diferansiyel denklemler ile tanımlanır. Bu denklemlerin hatasız çözümü problemle ilgili bir sonuç verecektir. Ancak problemin bazı nedenlerden dolayı karmaşık olması problemin sonucunun geç elde edilmesine ve ya elde edilen sonuçların güvenilirliğinin düşük olmasına neden olabilir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), karmaşık bir problemin basite indirgenerek çözümlenmesi mantığını esas alır. Bu metotta çözüm bölgesi çok sayıda küçük parçalara ayrılır. Bu parçalara sonlu eleman adı verilir ve birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanır. Bu elemanların her birinin problemin niteliğine göre fiziksel davranışları hesaplanır (Örneğin; sıcaklık dağılımı, gerilme gibi). Daha sonra bütün elemanlar düğüm noktalarından birbirine bağlanır ve yaklaşık bir sistem denklemi oluşturulur. Bu denklem sistemin bilinmeyen değerleri için çözülür. Sistemde ne kadar çok sonlu eleman ve düğüm noktası var ise elde edeceğimiz sonuç gerçeğe o kadar yakın olacaktır.

Sonlu elemanlar yönteminin işlem basamakları;

- a) İlk aşama çözüm bölgesinin sonlu elemanlara bölünmesidir. Bu aşamada geometri sonlu elemanlara bölünür ve bu elemanlar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanır.
- b) İnterpolasyon fonksiyonlarını seçilir ve bu fonksiyonlar eleman boyunca alan parametrelerinin interpolasyonunda kullanılır. İnterpolasyon fonksiyonları olarak genelde polinomlar kullanılır ve elemene atanmış düğüm sayısı kadar polinoma derece verilir.

- c) Eleman özelliklerini bulmak: Sonlu elemanlar için matris denklemi bilinmeyen fonksiyonun düğüm değerleri diğer fonksiyonlara bağlanacak şekilde oluşturulmalıdır. Bunun için *varyasyonel yaklaşım* ve *Galerkin metodu* gibi farklı yaklaşımlar kullanılabilir [1].
- d) Eleman denklemlerini birleştirmek: Çözüm bölgesinin tamamını temsil eden genel bir denklem oluşturmak için elde edilen tüm eşitlikler bir araya getirilir. Başka bir deyişle, parça parça elde edilen elemanların ait bütün eşitlikler birleştirilmelidir. Çözümünden önce sınır şartları tanımlanmalıdır.
- e) Genel denklem sistemini çözmek: Sonlu eleman genel denklem sistemi tipik olarak sparse, simetrik ve pozitif tanımlıdır. Çözüm için direkt ve iteratif yöntemler kullanılabilir. Dikkate alınan fonksiyonun düğümsel değerleri çözümün sonucu olarak oluşturulmaktadır [1].
- f) Ek sonuçları hesaplamak: Çoğu zaman ek parametrelerin de hesaplanması gerekebilir. Örneğin toplam deformasyon ile birlikte, termal problemlerdeki toplam ısı akışı da genel denklem sisteminin çözümünden sonra elde edilmektedir.

5.3. ANSYS Programının Yapısı

‘ANSYS programı 1970’li yıllardan beri Amerika’daki Swanson Analysis System şirketi tarafından geliştirilen bir sonlu elemanlar analiz sistemidir. Bu yazılım sayesinde, yapılması çok zor işlemler kolayca ve kısa sürede gerçekleştirilerek çözümün görselleştirilmesi ile de sonuçların daha anlaşılır olması sağlanmaktadır’ [32].

ANSYS paket programı ile statik, dinamik, lineer, non-lineer, termal ve manyetik gibi çok bileşenli modelleme ve analiz yapılabilir. Program genel olarak ön işlemci, çözüm ve son işlemci olmak üzere üç kısımdan oluşur. Modelin oluşturulması ve sınır şartları ön işlemci kısmında oluşturulur. Çözüm kısmında; problemin çözümü gerçekleştirilir. Son işlemci kısmında ise elde edilen sonuçlar değerlendirilir. ANSYS gibi ticari amaç için hazırlanmış paket programların en önemli özelliği; probleme yönelik özel elemanlar içeriyor olmasıdır. Böylece bu tür elemanlar kullanılarak yapılan modellemeler gerçek şartlara daha yakın olmakta ve daha gerçekçi sonuçlar vermektedir [32].

ANSYS sonlu elemanlar programında analizi yapılacak parça aşağıdaki işlem basamakları uygulanarak analizi yapılır.

Modelin oluşturulması

Çözümlenecek problem geometrisi analizin gerçekleştirileceği program içerisinde ya da başka bir CAD yazılımında oluşturulabilir. Model farklı bir CAD yazılımında oluşturulmuşsa, DXF, IGES, SAT gibi dönüştürücü formatlar ile paket programa transfer edilebilir. Bu tez çalışmasında problem geometrisi Solid Works programında modellenmiştir ve Parasolid(.x_t) uzantısı olarak kaydedilmiştir.

Sonlu eleman seçimi

Sonlu eleman seçimi için kullanıcının yeterince bilgi sahibi olması şarttır. Çözülmesi gereken problemin model geometrisi, analizin tipi (statik, dinamik, termal analiz gibi) ve sınır şartları kullanılacak eleman tipinin seçiminde önemlidir. Kullanılan programın kütüphanesinden problem geometrisine uygun eleman tipi belirlenerek seçim yapılır.

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Analiz edilecek konstrüksiyonun karışık olması yük ve sınır şartları altında davranışların tahminini zorlaştırır. Bu nedenle sistem davranışları bilinen daha küçük sonlu elemanlara bölünür. Bu olay ANSYS’de *mesh* yapma olarak isimlendirilir. Mesh sayısı ne kadar çok olursa elde edilecek sonuçlarda o kadar gerçeğe yakın olacaktır. Ancak bu işlem bilgisayar ortamında yapıldığı için mesh sayısının fazla olması işlem süresini uzatacaktır.

Malzeme ve eleman sabitlerinin belirlenmesi

Kullanılan malzemenin yoğunluğu, ısı iletim katsayısı, elastik modülü gibi özellikleri yapılacak analizin tipine göre malzeme seçimi yapıldıktan sonra sistem tarafından otomatik atanır. Ancak bu özellikler kullanıcı tarafından bir değişkene bağlı ya da sabit olarak belirlenebilir.

Yük ve sınır koşullarının belirlenmesi

Model üzerine gelen statik ve dinamik yüklerin belirlenmesi için ilk olarak bu analizler yapılır. Programın doğru sonuçlara ulaşabilmesi için problem geometrisinin bağlantı türleri doğru bir şekilde tanımlanmalıdır.

Çözüm

Analizin son aşamasıdır. Sonlu elemanlar modelinin denklemleri matrislerle çözülür. Çözüm aşamasında doğru sonuçlara ulaşılması için sonlu eleman türünün doğru seçildiğinden emin olunmalıdır. Ayrıca başlangıç ve sınır şartlarının da doğru tanımlanması çözümün doğru sonuçlarının elde edilmesi için şarttır.

Sonuçların değerlendirilmesi

Çözümünden sonra ulaşılan analiz sonuçlarının liste formatında ya da grafikler şeklinde sonuçların mukayeseli olarak ekrana aktarılmasıdır.

Bu çalışmada, termal analiz için ANSYS R16.2 multiphysics modülü ve bu modül içerisinde var olan termal analiz kısmı kullanılmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada çelik konstrüksiyonlarda kaynaklı imalat sonrası meydana gelen distorsiyonları belirlemek amacı ile deneysel ve sayısal analiz yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için 1000x500x500 mm boyutlarında çelik konstrüksiyon tasarlanmıştır. Konstrüksiyon malzemesi olarak 40x40x2 mm ebatlarında genel yapı çeliği kullanılmıştır. Sayısal analizler ise sonlu elemanlar tabanlı ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir.

Genel yapı çelikleri; genellikle alaşımsız çelik olarak tanımlandıklarından mekanik özellikler büyük ölçüde karbon miktarına bağlıdır. Fakat başta azot ve fosfor olmak üzere, çeliğin üretim yöntemlerinden kaynaklanan ve hammaddesinde bulunan mangan, silisyum, bakır ve kükürt elementleri de mekanik özellikler üzerinde oldukça etkilidir. Fosfor ve azotun dayanımı arttırmasına karşın sünekliği düşürmesi nedeniyle genel yapı çeliklerinde bu elementlerin oranları düşük tutulmaya çalışılır. Genel yapı çelikleri esasta düşük veya orta karbonlu çelik grubunda olup Mn ve Si gibi karbon eşdeğerlik elementlerine ve P ve S gibi katışkı elementlerine sahiptir. Alaşım elementlerinin miktarı çeliğin kalite grubunu belirler. Çeliklerin sınıflandırılması ise çekme dayanımları ve akma sınırı değerleri göz önünde bulundurularak yapılır [33].

Genel yapı çelikleri; köprü ve taşıt yapımı, basınçlı kap imalatı ve gemi yapımında kullanılırlar. Genel olarak haddelenmiş halde bulunurlar. Bu malzemelerin haddeleme sıcaklığının kontrol edilebilmesi, oldukça iyi dayanım özelliklerine ulaşabilmelerini sağlamaktadır.

Kaynak işleminin kalitesi açısından kullanılan malzeme ve elektrodun mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanında kimyasal bileşimi de önem arz eder. Bu yüzden genel yapı çelikleri ile ilgili mekanik özellikler Çizelge 6.1’de, kimyasal özellikler ise Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Genel yapı çeliklerinin mekanik özellikleri [33]

İşlem	Karbon Oranı (%)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)
Yumuşatma Tavlı	0,01	124	283	47	90
	0,20	148	407	37	115
	0,40	303	517	30	145
	0,60	338	667	23	190
	0,80	359	793	15	220
	1,00	359	745	22	195
	1,20	352	703	24	200
	1,40	345	683	19	215
Normalizasyon Tavlı	0,01	179	310	45	90
	0,20	310	441	35	120
	0,40	352	586	27	165
	0,60	414	752	19	220
	0,80	483	924	13	260
	1,00	690	1048	7	295
	1,20	690	1055	3	315
	1,40	662	1021	1	300

Çizelge 6.2. Genel yapı çeliklerinin kimyasal bileşimi [33]

DIN	Deoksidasyon Şekli	Isıl İşlem	Kimyasal Bileşim (max % ağırlık)				
			C(ort)	P	S	N	Al
St 33	-	U,N	-	-	-	-	-
St 37-2	-	U,N	0,20	0,05	0,05	0,07	-
Ust 37-2	K	U,N	0,20	0,05	0,05	0,07	-
RSt 37-2	S	U,N	0,20	0,05	0,05	0,07	-
St 37-3	SS	U,N	0,20	0,04	0,04	-	0,02
St 44-2	S	U,N	0,23	0,05	0,05	0,07	-
St 44-3	SS	U,N	0,23	0,04	0,04	-	0,02
St 52-3	SS	U,N	0,22	0,04	0,04	-	0,02
St 50-2	S	U,N	0,30	0,05	0,05	0,07	-
St 60-2	S	U,N	0,40	0,05	0,05	0,07	-
St 70-2	S	U,N	0,50	0,05	0,05	0,07	-
K: Kaynar Döküm			S: Sakin Döküm		SS: Yarı Sakin Döküm		
U: Sıcak Haddelenmiş			N: Normal Tavlanmış				

Deneysel diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğu için MAG kaynak yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin sağladığı en önemli avantaj hızlı kaynak yapabilme kabiliyetidir. Bu sayede hızlı bir şekilde artan sıcaklığın yine hızlı soğumasına bağlı olarak oluşan distorsiyonlar daha net görülebilir.

Kaynak makinesi

Magmaweld kaynak makinesinin modeli RS 250 MK'dır. Bu model çelik ve paslanmaz çeliklerin kaynağında tercih edilir. Dört makaralı tel sürme sistemi ile yumuşak ve özlü telleri de deforme etmeden sürekli kaynak yapma imkânı sunar. Ayrıca fan soğutması sıcaklık artışına karşı korunak sağlar. Üzerinde 22V/10A priz ise CO₂ gaz ısıtıcısı için mevcuttur. Resim 6.1'de kaynak makinesinin özelliklerinin bulunduğu görüntü verilmektedir.

MAGMA MEKATRONİK MAKİNE SAN. VE TİC. A.Ş.		EN 60974-1			
Organize Sanayi Bölgesi S.Kısımlı Marmara-TÜRKİYE		EN 60974-10			
RS 250 MK		CE			
3~		Seri No : 1307658			
57 A / 16,8V - 250 A / 26,5 V					
	----	X	40 %	60 %	100 %
	U ₀ V	I ₂	250 A	204 A	158 A
	19,7 - 51	U ₂	26,5 V	24,2 V	21,9 V

Resim 6.1. Kaynak makinesi özellikleri

Magmaweld kaynak makinesinin teknik özellikleri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Kaynak makinesinin teknik özellikleri [34]

RS 250 MK	Teknik Özellikler
Şebeke Gerilimi (3 Faz)	350 V / 50 Hz
Şebekeden çekilen güç	7,4 Kva (% 60)
Şebekeden çekilen akım	10,7 A (%60)
Tavsiye edilen şebeke sigortası	3x16 A
Kaynak akım ayar sahası	40-250 ADC
Anma kaynak akımı	250 ADC (% 60)
Açık devre gerilimi	19,7-51 VDC
Gerilim ayarı kademe sayısı	3x7
Tek çapı	0,60-1,00 mm
Boyutlar	890 x 510 x 950 mm
Ağırlık	105 kg
Koruma sınıfı	IP 21
Tel sürme makarası ebatı	0,80-1.00 mm
Tel sürme hızı	1-24 m/dk
Tetikleme kontrolü	2/4

Koruyucu gaz (CO₂)

Bilindiği üzere metallerin çoğu oksijenle tepkimeye girerek oksit oluşturmaya meyillidirler. Özellikle de yüksek sıcaklıkların reaksiyon hızını artırdığı düşünüldüğünde kaynak işleminde koruyucu ilave gaz veya örtü kullanılması oluşacak oksiti önlemek için zorunludur.

Saf karbondioksit düşük alaşımlı genel yapı çeliklerinin kaynağında sıkça tercih edilen koruyucu gaz türüdür. Özellikle derin nüfuziyet sağlaması, daha yüksek hızlarda kaynak işlemi ve diğer karışım gazlarına nazaran daha düşük maliyetli olması tercih sebepleri arasındadır.

Kaynak teli

Deneyde 1.0 mm çapında AS SG2 kaynak teli kullanılmıştır. Özellikle alaşımsız çeliklerin kaynağında kullanılan yüzeyi bakır kaplı gazaltı kaynak telidir. Deneyde kullanılan telin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Kaynak teli kimyasal kompozisyonu [35]

Element	C	Si	Mn
% Bileşim Oranı	0.08	0.85	1.50

Çizelge 6.5. Kaynak teli mekanik özellikleri [35]

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Darbe Dayanımı (ISO-W-30 °C)	Uzama (L=5d X%)
min 440	540-680	60j	30

Sayısal çözümde ise, deney sonuçlarından alınan veriler ve deneyde kullanılan malzeme özellikleri sınır şartları olarak kabul edilmiştir. Çözüm yöntemi olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi esaslarına göre işlem yapan ANSYS 16.2 programı kullanılmıştır. ANSYS 16.2 programında, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerle aynı ölçülerde katı model oluşturulmuş ve malzemenin sıcaklığa bağlı ısı kapasitesi, termal iletim katsayısı ve yoğunluğu malzeme özelliği olarak girilmiştir. Çözümün gerçekleştirildiği bilgisayarın özellikleri ise;

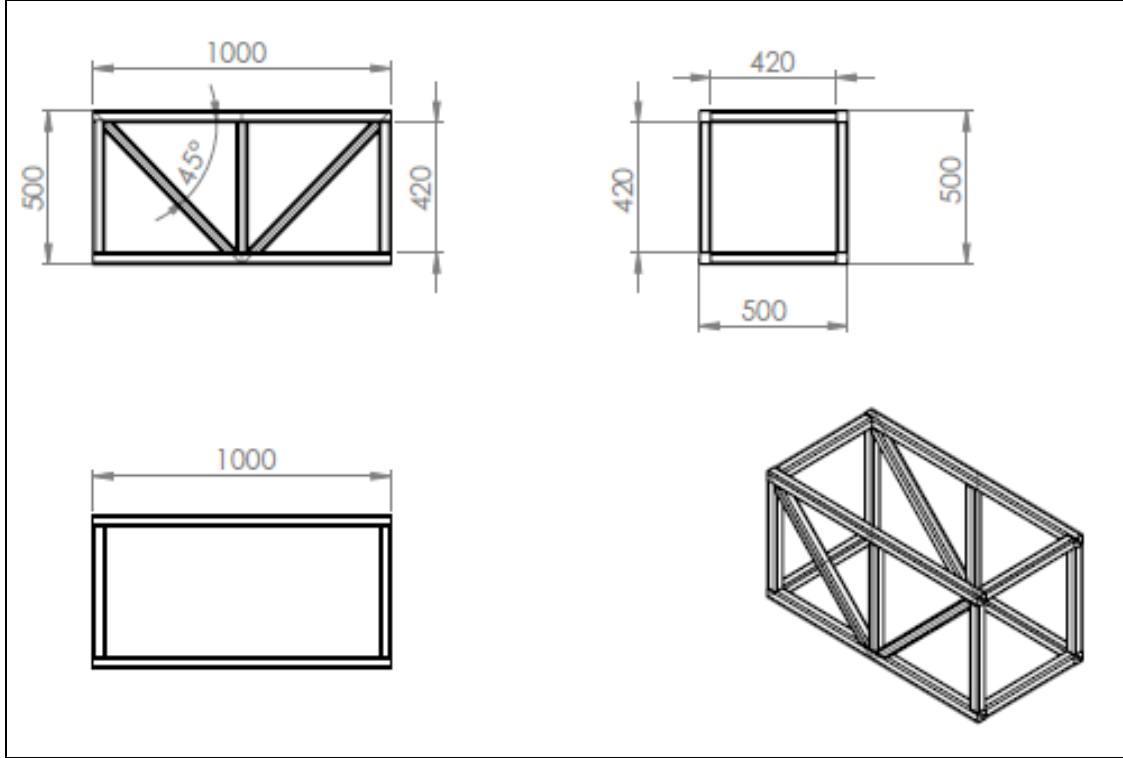
İşlemci: Intel (R) Core (TM) i3-4010U CPU @ 1.70GHz

Yüklü bellek (RAM): 4 GB

Sistem türü: 64 bit İşletim sistemi, x64 tabanlı işlemcidir.

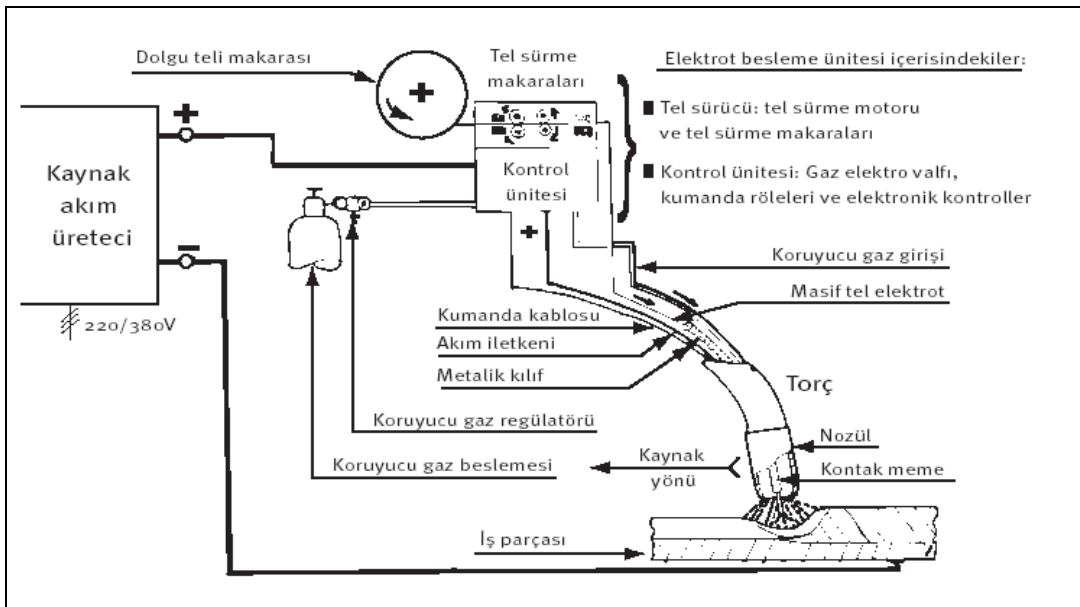
6.1. Konstrüksiyon Tasarımı ve Deney Düzeneği

40x40x2 mm ölçülerinde kare profillerden oluşturulan konstrüksiyon şematik olarak Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deney konstrüksiyonunun şematik gösterilişi

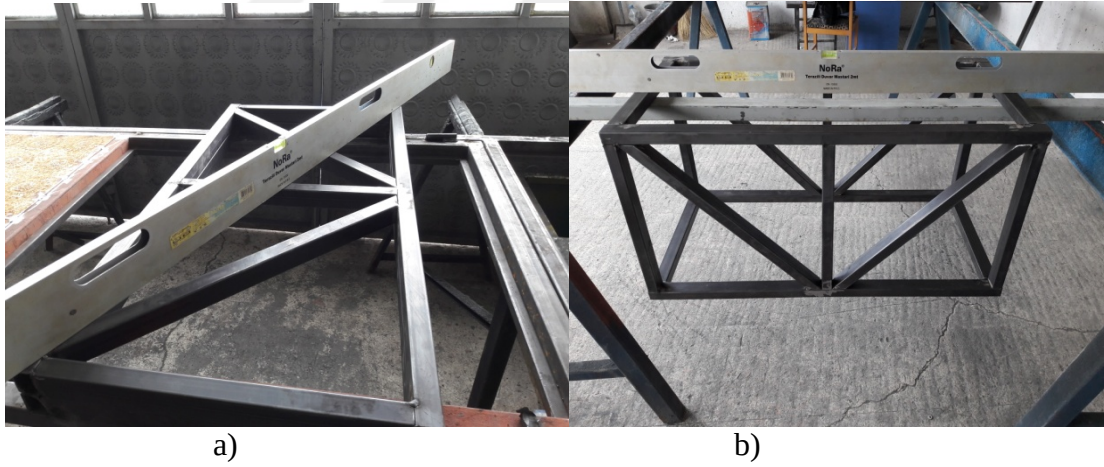
Kaynaklı birleştirmeler için Şekil 6.2.'de şematik olarak gösterilen MAG kaynak yöntemi kullanılmıştır. Koruyucu ortam olarak CO₂ gazı kullanılmıştır. Kaynak işlemleri Magmaweld MAG kaynak makinesi ile manuel olarak yapılmıştır.



Şekil 6.2. MIG/MAG kaynak donanımının şematik olarak gösterilişi [1]

Konstrüksiyon modeli; kaynaklı birleştirmelerde oluşan sıcaklık farklarının malzemelerde meydana getirdiği distorsiyonu belirlemek amacı ile verilen şematik modele uygun olarak 40x40x2 mm ebatlarındaki genel yapı çeliğinden oluşturulmuştur (Bkz. şekil 6.1).

Öncelikle model ölçülerine uygun olarak hazırlanan malzemelerin kaynak işlemi için yüzey temizlikleri yapılmıştır. Daha sonra puntalama işlemi ile birbirlerine sabitlenmiş ve konstrüksiyon iskeleti oluşturulmuştur. İskelet oluşturulurken en uygun ve az sayıda puntalama yapılmıştır. Bütün köşelerin kaynak öncesi 90° olmasına dikkat edilmiş ve gerekli ölçümler yapılarak hatalar düzeltilmiştir. Bu işlemde herhangi bir şekil bozukluğu veya ölçü hatasına rastlanmamıştır. Düzenek oluşturulmadan önce konstrüksiyon su terazisi yardımıyla dengeye alınmıştır (Resim 6.2.b.). Daha sonra kaynak işlemi için deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney konstrüksiyonunu oluşturma aşamaları Resim 6.2’de verilmiştir. Kaynaklı birleştirme sürecinde distorsiyon oluşumunu görebilmek amacı ile model sabitlenmemiştir.



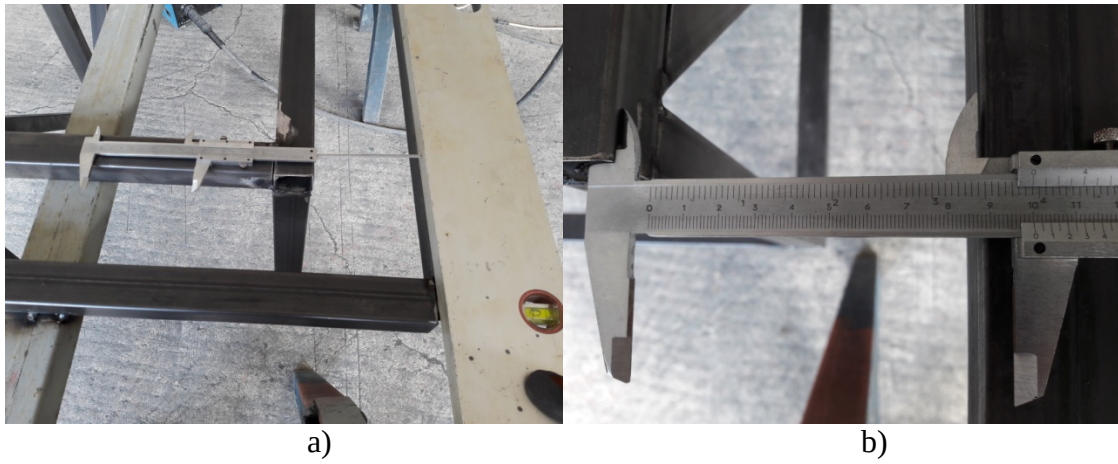
Resim 6.2. Deney konstrüksiyonunu oluşturma aşamaları a) Yan yüzeyin lokal birleştirilmesi, b) Montajın teraziye alınması

Burada kaynak işlemi nedeniyle oluşan distorsiyonun ölçülebilmesi için konstrüksiyonunun dört bir yanına profil yerleştirilmiştir. Profiller Resim 6.3’de görüldüğu üzere deney konstrüksiyonu ile birlikte terazilenmiştir.



Resim 6.3. Deney düzeneğinin profillerle teraziye alınması

Resim 6.4’de deney konstrüksiyonunun etrafına ölçü için yerleştirilen profillerin görüntüleri verilmiştir. Profillerin deney konstrüksiyonu ile arasındaki mesafe her kenardan 100 mm olacak şekilde sabitlenmiştir.



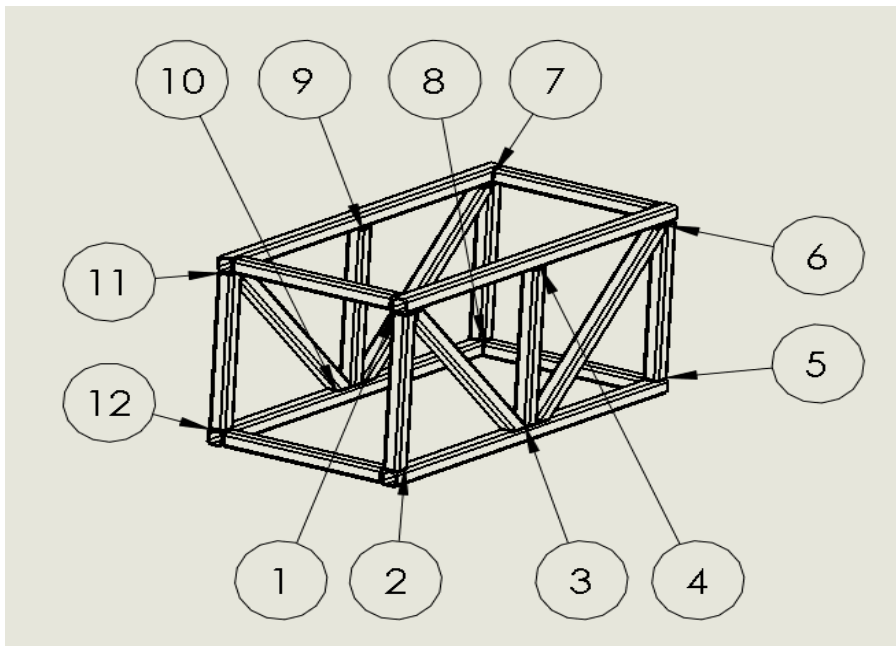
Resim 6.4. Deney düzeneğinin ölçü kontrolü a) x ekseninden profile olan uzaklık
b) z ekseninden profile olan uzaklık

Deney konstrüksiyonunun profillere uzaklığı 100 mm mesafeye sabitlenmeden önce köşelerinin birbirlerine olan uzaklığı ölçülmüştür ve 141,5 mm bulunmuştur (Resim 6.5).



Resim 6.5. Köşeler arası mesafe ölçümü

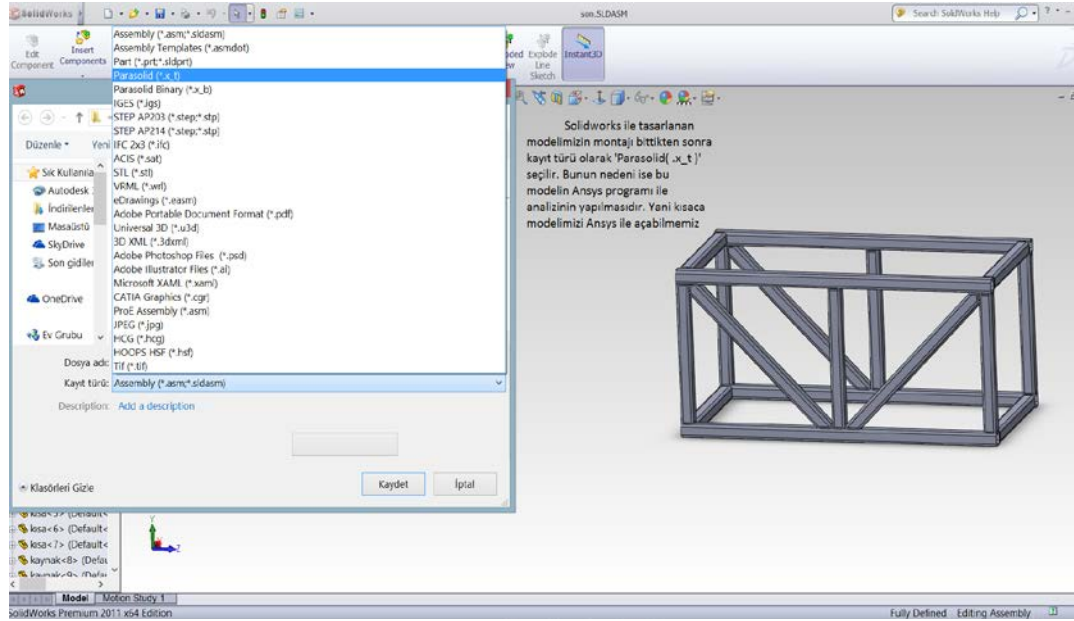
Tüm bu işlemler yapıp hatalar düzeltildikten sonra kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri Şekil 6.3’de gösterilen kaynak sırası planına uygun yapılmıştır.



Şekil 6.3. Kaynak sırası planı

6.2. ANSYS’de Model Oluşturma ve Analiz

ANSYS gibi analiz programlarında tasarım yapmak oldukça zordur. Bu yüzden deney parçası daha önce verilen ölçülerde Solidworks programında oluşturulmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken husus Solidworks programında tasarımı yapılan konstrüksiyonun ANSYS’e uygun uzantı dosyası kullanılarak kaydedilmesidir. Yani ANSYS’de sorunsuz çalışabilmek için, uzantı türü Parasolid(.x_t) olmalıdır (Resim 6.6.).



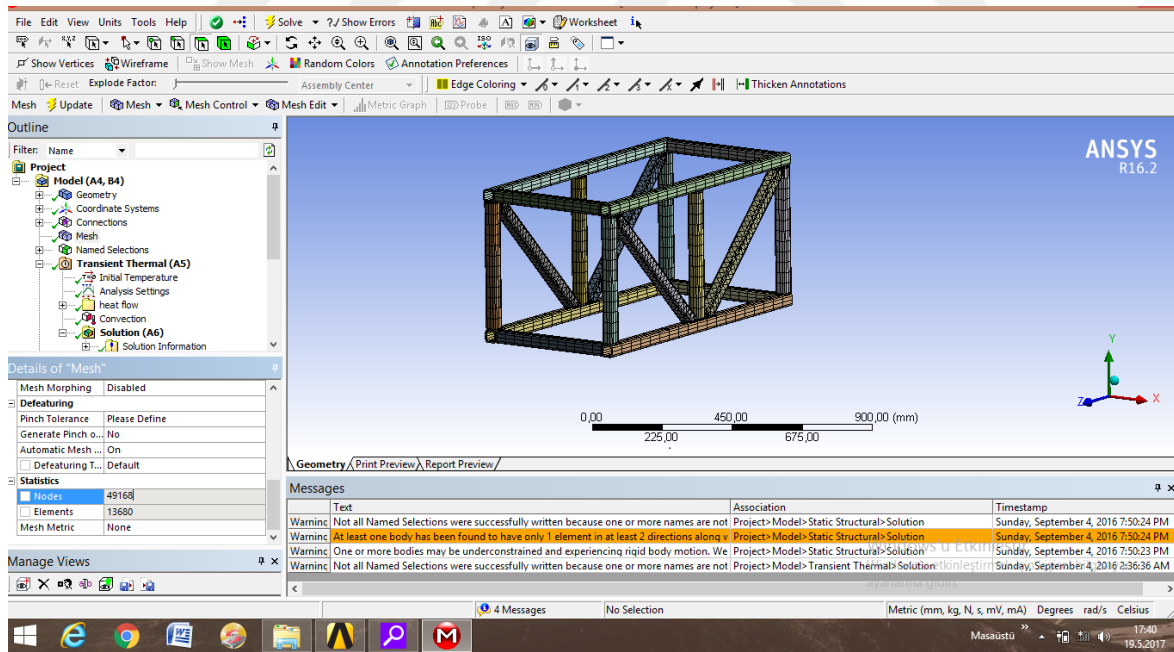
Resim 6.6. Solidworks tasarım dosyasını Parasolid(.x_t) olarak kaydetme

Daha sonra ANSYS programı çalıştırılır. Burada kaynak bölgesi sıcaklığından dolayı konstrüksiyonda meydana gelecek çarpılmalar gözlemlenmek istenildiği için termal analizinin yapılması gerekmektedir. 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. Örneğin; 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 davranacağını 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. Ancak konstrüksiyon bir bütün olarak düşünüldüğünde serbest hareket edebilir olarak tanımlanmalı ve ihmal edilebilir ağırlığı da dâhil herhangi bir yük ve ya kuvvet uygulaması olmamalıdır. Konstrüksiyonun imalat aşamasında da herhangi bir sabitleme yapılmamış ve konstrüksiyon serbest olarak kaynaklanmıştır. Bu çalışmada deneysel kısımda verilen kaynak parametreleri dikkate alınmıştır. Kaynak bölgesi sıcaklığının 1600 °C olduğu kabul edilmiştir. Aynı değer ANSYS’de analiz için sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

Konstrüksiyon sonlu elemanlara böldükten 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 6.7’de verilmiştir. Bu çalışmada 49168 nokta ve 13680 adet sonlu eleman tanımlıdır. Mesh sayısı ne kadar fazla olursa elde edilecek veriler de o kadar hassas olacaktır. Ancak mesh sayısının fazla olması işlem süresini uzatmaktadır.



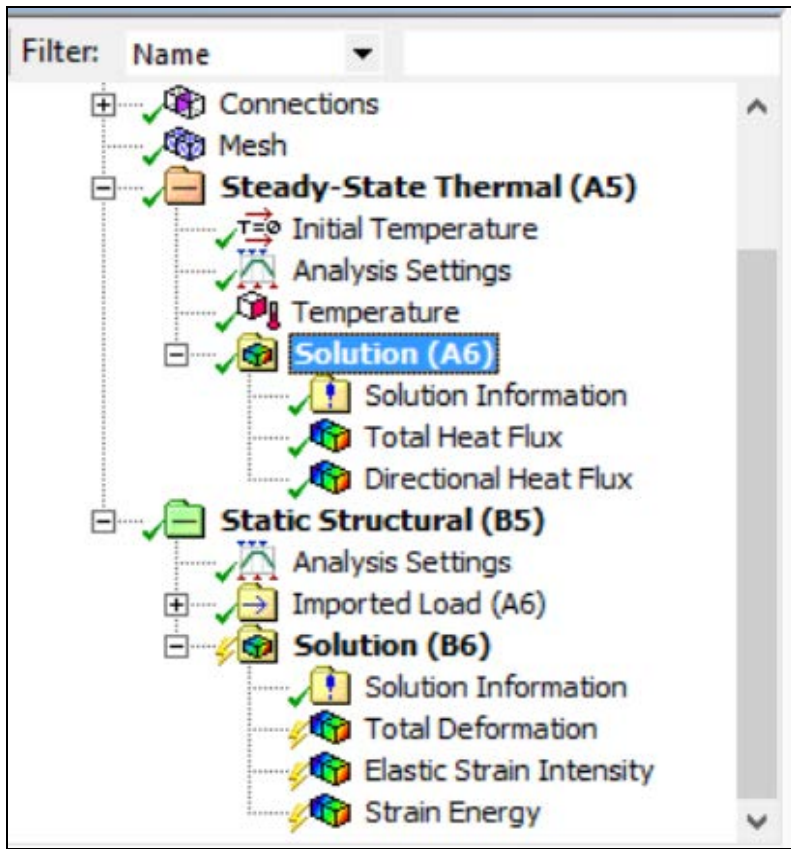
Resim 6.7. Modelin mesh görüntüsü

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.

Analiz seçimlerinin sorunsuz bir şekilde yapıldığı unsur ağacından takip edilmektedir (Resim 6.8.).



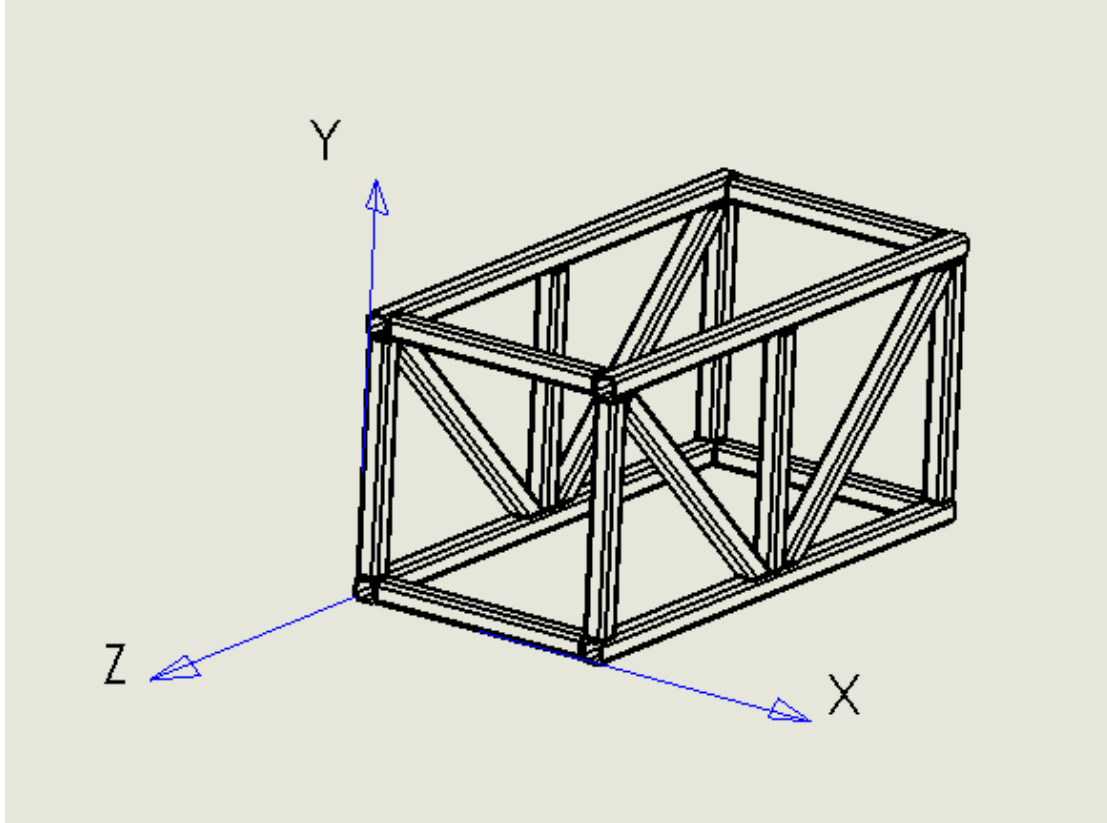
Resim 6.8. Unsur ağacında işlem basamaklarının takip edilmesi

Resim 6.8'den anlaşılabacağı 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. Çelik Kafes Kiriş Oluşumunda Distorsiyon Sonuçları ve Tartışma

Kaynak işlemleri bittikten sonra deney düzeneğinde kaynaktan dolayı meydana gelen ölçü değişimleri belirlenerek oluşan distorsiyonlar ölçülmüştür. Konstrüksiyonda kaynaktan dolayı x ekseninde en fazla 3,2 mm ölçü değişimi meydana geldiği, z ekseninde 1,9 mm ve y ekseninde de 2,4 mm değişim olduğu tespit edilmiştir. Konstrüksiyonun şematik gösterilişi şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Konstrüksiyonun şematik gösterilişi

Deney konstrüksiyonu genel yapısı ölçülere uygun oluşturulup puntalama işlemi yapıldıktan sonra kaynaklanmadan önce su terazisi yardımı ile bütün yüzeylerden x, y ve z eksenlerine 90° açı oluşturacak şekilde hizalanmıştır. Ölçü kontrolünün yapılması için konstrüksiyon etrafına 100 mm mesafede profiller sabitlendikten sonra kaynak işlemi uygulanmıştır.

Kaynaklama süreci tamamlandıktan sonra 1, 6, 7 ve 11 numaralı kaynak dikişinin x, y ve z eksenlerinden ölçümü yapılmıştır. Ayrıca bu dikişlerin köşegenlere olan uzaklıkları belirlenmiştir. Şekil 7.1’de 1 numaralı kaynak dikişi için yapılan ölçümler görülmektedir.



Resim 7.1. 1 numaralı kaynak dikişi için değişen ölçülerin belirlenmesi a) y ekseninden alınan ölçü b) Köşelerden alınan ölçü

1 numaralı kaynak dikişi bölgesinin x ve z ekseninde sabitlenmiş profile olan uzaklığı 100 mm, köşelerin uzaklığı 141,5 mm ölçülmüştü. Su terazisi ile yapılan ölçümde ise deney konstrüksiyonu ve profiller arasında kot farkı olmadığı görülmüştü. Bu değerlerin kaynaktan sonra değiştiği anlaşılmıştır. Kaynak sonrası ölçümlerde y eksenindeki kot farkının artı yönde 2,4 mm, x eksenindeki uzaklığın 103,2 mm, z eksenindeki uzaklığın da 97.2 mm olarak değiştiği görülmüştür. Köşelerin birbirine uzaklığı ise 142,5 mm olarak ölçülmüştür.

6 numaralı kaynak dikişi bölgesinin y eksenindeki kot farkının eksi yönde 1,7 mm, x ekseninde profile olan uzaklığının 102,8 mm, z ekseninde profile olan uzaklığının da 101,7 mm olduğu tespit edilmiştir. Köşelerin birbirine olan uzaklığı ise 144,5 mm olarak ölçülmüştür.

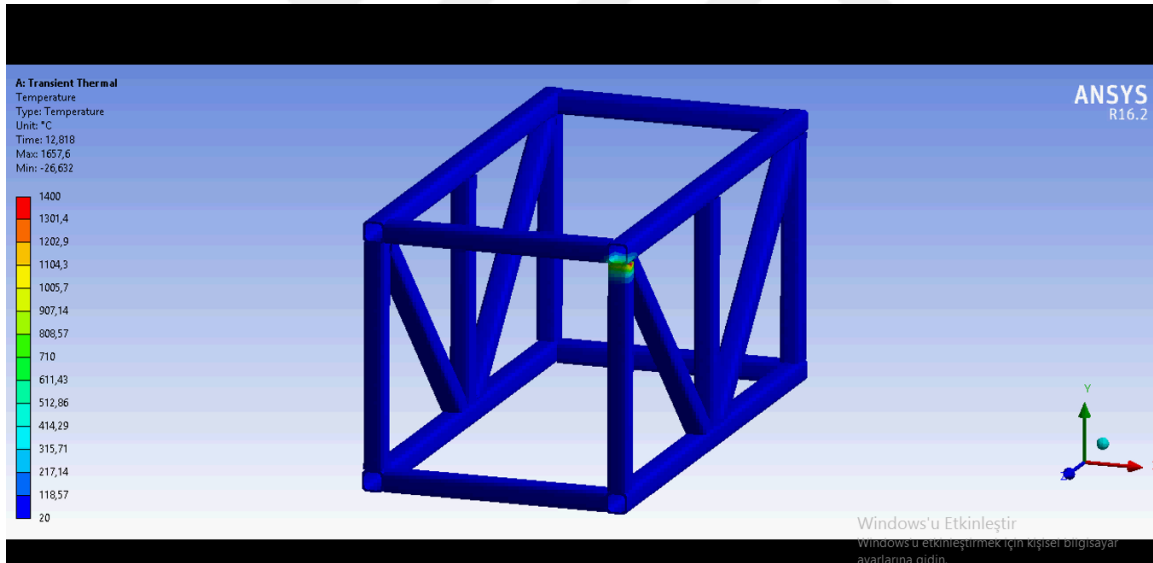
7 numaralı kaynak dikişi bölgesinin y eksenindeki kot farkının artı yönde 1,6 mm, x ekseninde profile olan uzaklığının 97,2 mm, z ekseninde profile olan uzaklığının da 98,1 mm olduğu tespit edilmiştir. Köşelerin birbirine olan uzaklığı ise 138,1 mm olarak ölçülmüştür.

Son olarak 11 numaralı kaynak dikişi bölgesinin y eksenindeki kot farkının eksi yönde 2,1 mm, x ekseninde profile olan uzaklığının 96,8 mm, z ekseninde profile olan uzaklığının da 101,8 mm olduğu tespit edilmiştir. Köşegenlerin birbirine olan uzaklığı ise 140,5 mm olarak ölçülmüştür.

7.2. Konstrüksiyonun ANSYS’de Analiz Sonuçları ve Tartışma

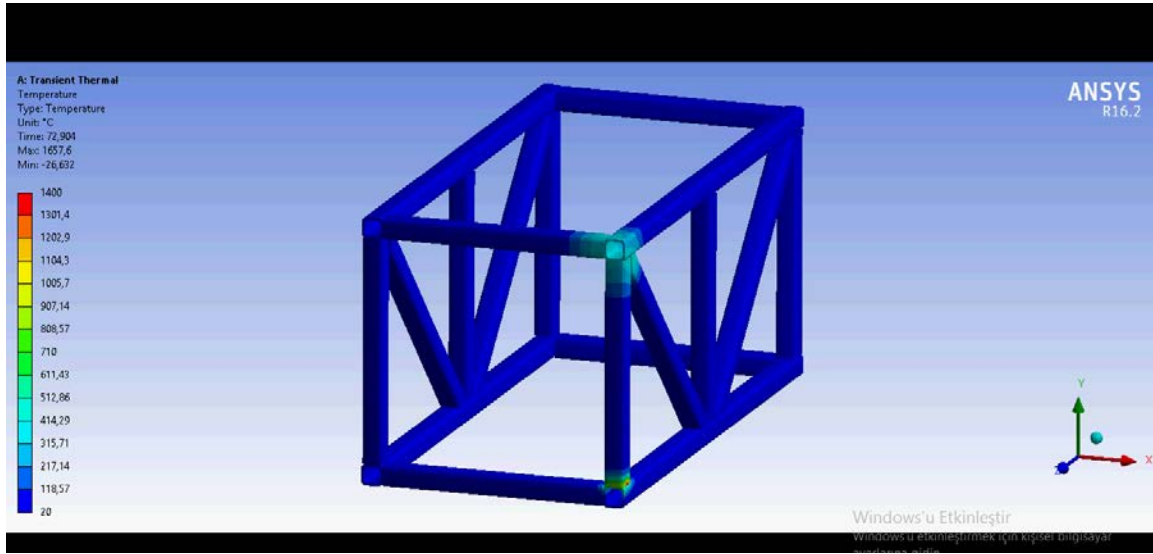
Kaynak sırasında meydana gelen ısıl değişimlerin ANSYS’de modellenmesi

Bölüm 6’da imalatı gerçekleştirilen konstrüksiyon şartlarına uygun olarak ANSYS modeli birebir ölçülerde oluşturulmuştur. Modelin ANSYS’de çözümü kaynak sırası planına (Bkz Şekil 6.3) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 1 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısıl çözümleme Resim 7.2’de verilmektedir.



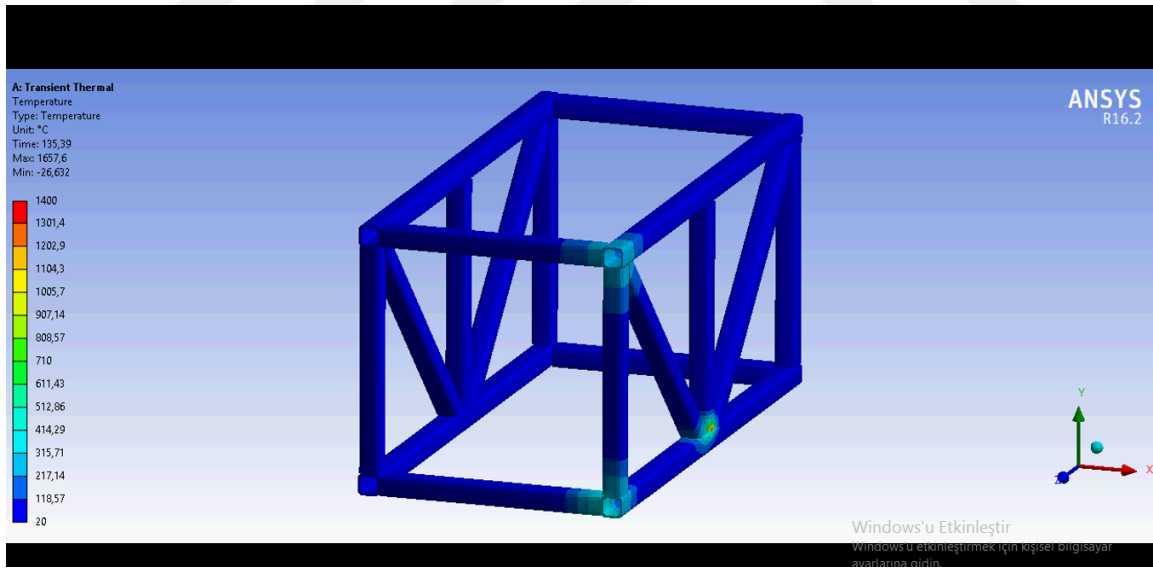
Resim 7.2. 1 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısıl çözümleme

Resim 7.2 ve Resim 7.3’de verilen ANSYS kaynak uygulaması görüntüleri incelendiğinde 1. noktadan kaynak gerçekleştirilip 2. noktaya başladığında 1. nokta henüz soğumamış durumdadır ve sıcaklığı yaklaşık olarak 600 °C civarındadır. Benzer durum diğer köşeler için de geçerlidir. Model oluşturulurken gerçek çalışma ortamında olduğu gibi bir sonraki ANSYS uygulaması bir önceki uygulama şartları üzerinde gerçekleştirilmiştir.



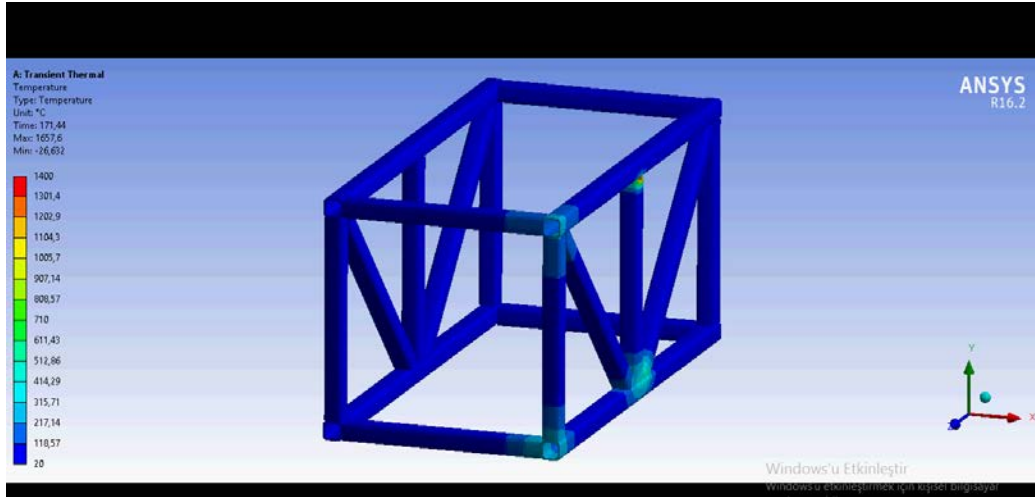
Resim 7.3. 2 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısııl çözümleme

Yine Resim 7.4’de 3. kaynak dikişi çekilirken 1. Kaynak dikişinin hızla soğumaya devam ettiği görülmektedir ve soğumanın 135. saniyesinde 1. kaynak dikişi sıcaklığı yaklaşık olarak 350 °C civarındadır.

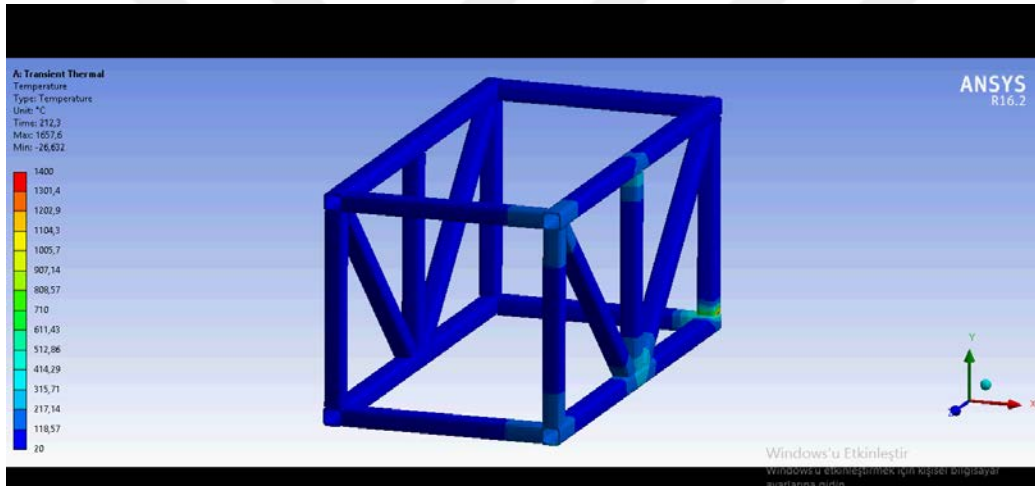


Resim 7.4. 3 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısııl çözümleme

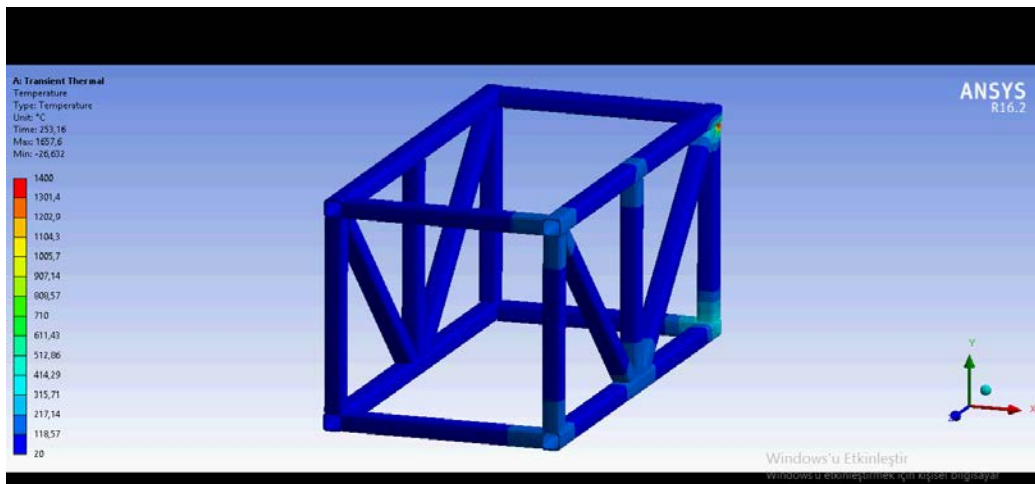
Resim 7.5-13’de kaynak sırası planına göre ANSYS ısııl çözümleme görüntüleri verilmektedir.



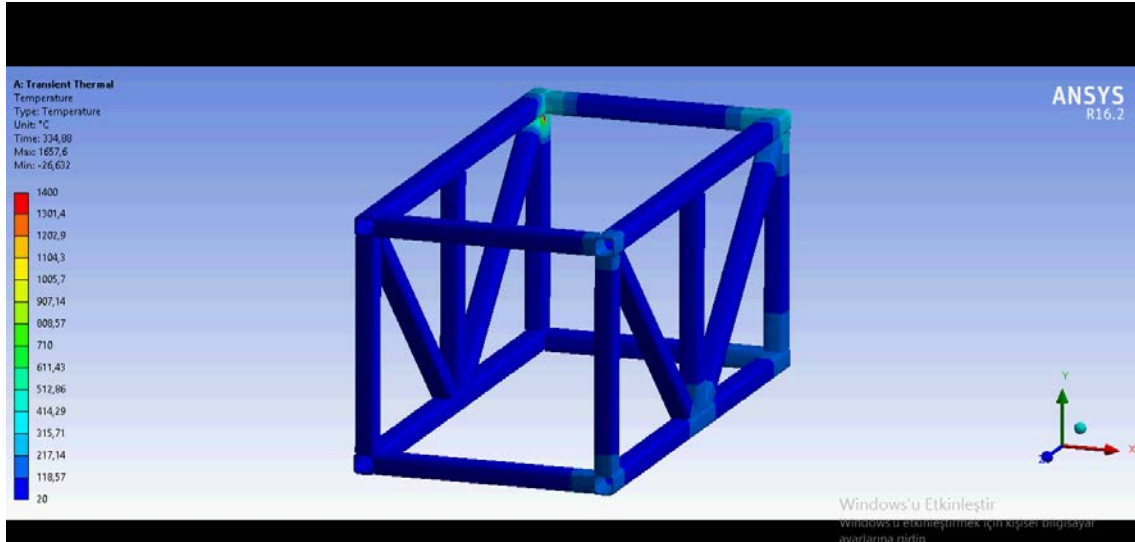
Resim 7.5. 4 numaralı kaynak dikişi için ANSYS'de ısı çözümü



Resim 7.6. 5 numaralı kaynak dikişi için ANSYS'de ısı çözümü

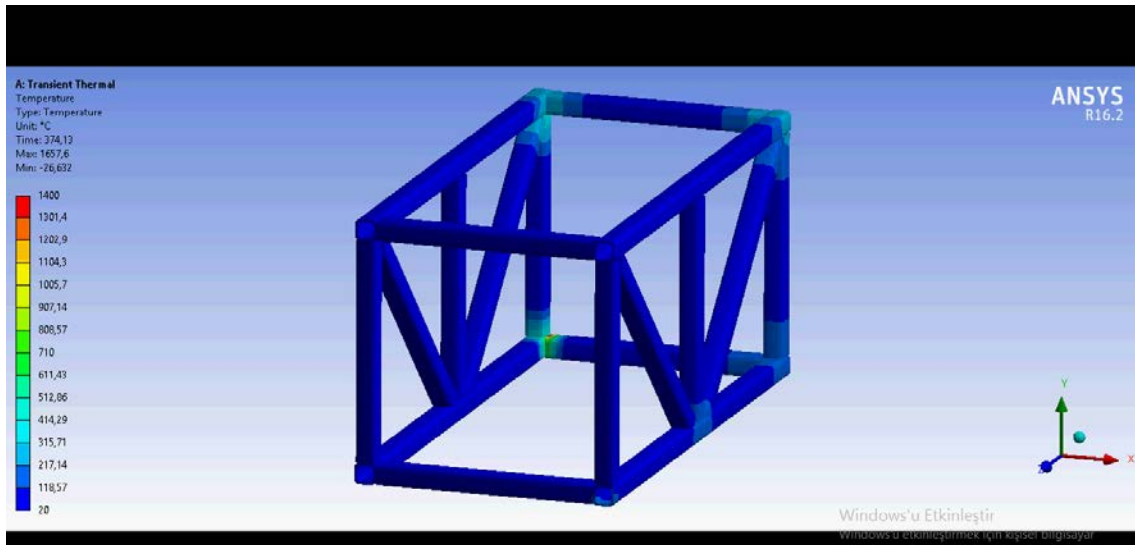


Resim 7.7. 6 numaralı kaynak dikişi için ANSYS'de ısı çözümü

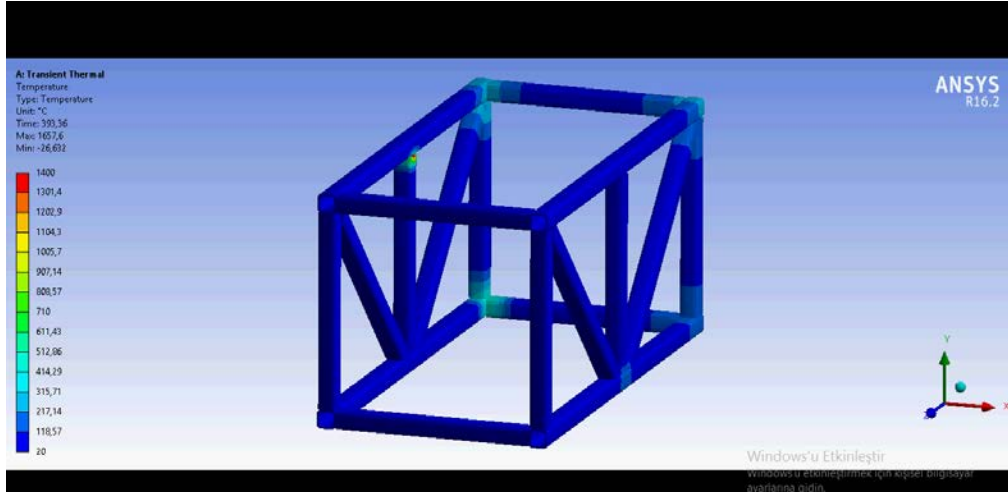


Resim 7.8. 7 numaralı kaynak dikişi için ANSYS'de ısı çözümü

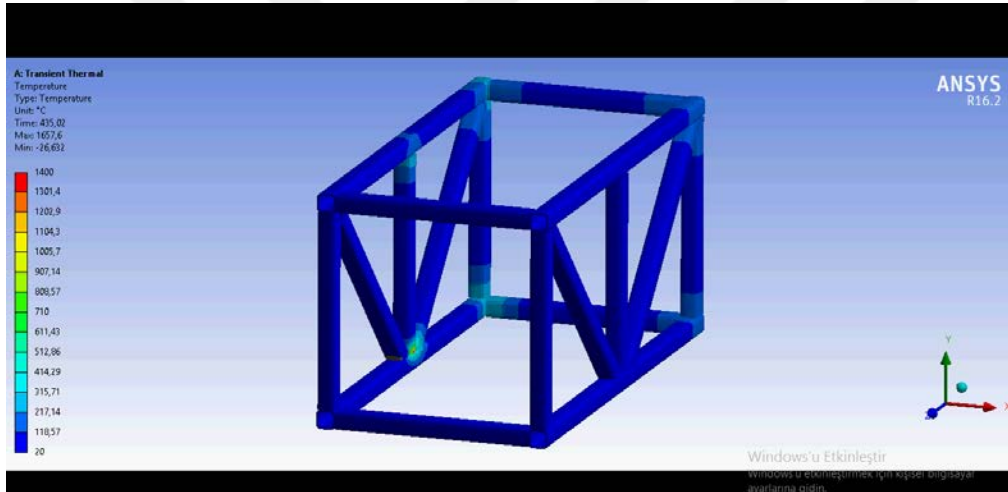
Resim 7.9'da 8. kaynak dikişinin ısı çözümü görülmektedir. Kaynak işleminin 374. saniyesinde 1. kaynak dikişinin tamamen soğuduğu ve ortam sıcaklığına döndüğü görülmektedir. 8. Kaynak dikişi sıcaklığı ve yerine dikkat edilirse 1. kaynak dikişinin diyagonalinde olduğu görülür. Bu köşelerin farklı zamanlarda oluşan yüksek sıcaklık farkının ($1380\text{ }^{\circ}\text{C}$) distorsiyona yol açacağı tahmin edilmektedir.



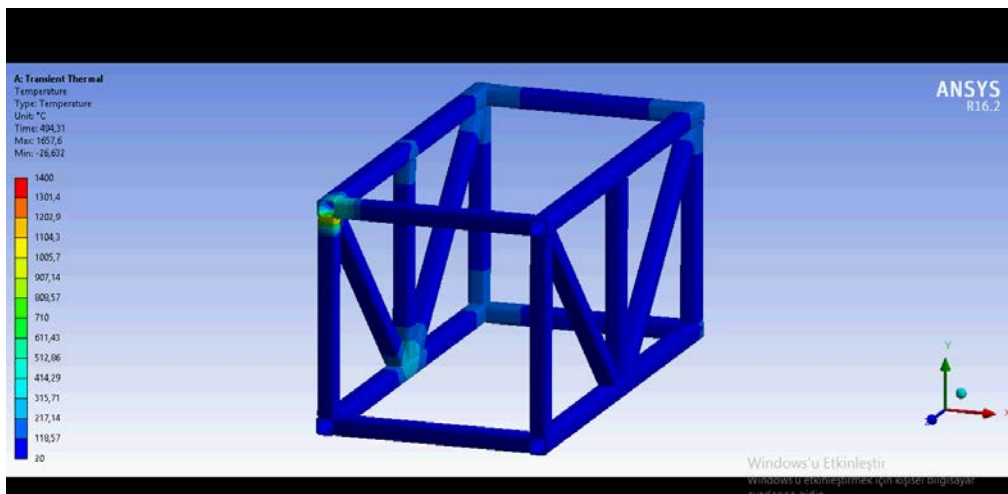
Resim 7.9. 8 numaralı kaynak dikişi için ANSYS'de ısı çözümü



Resim 7.10. 9 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısıl çözümleme

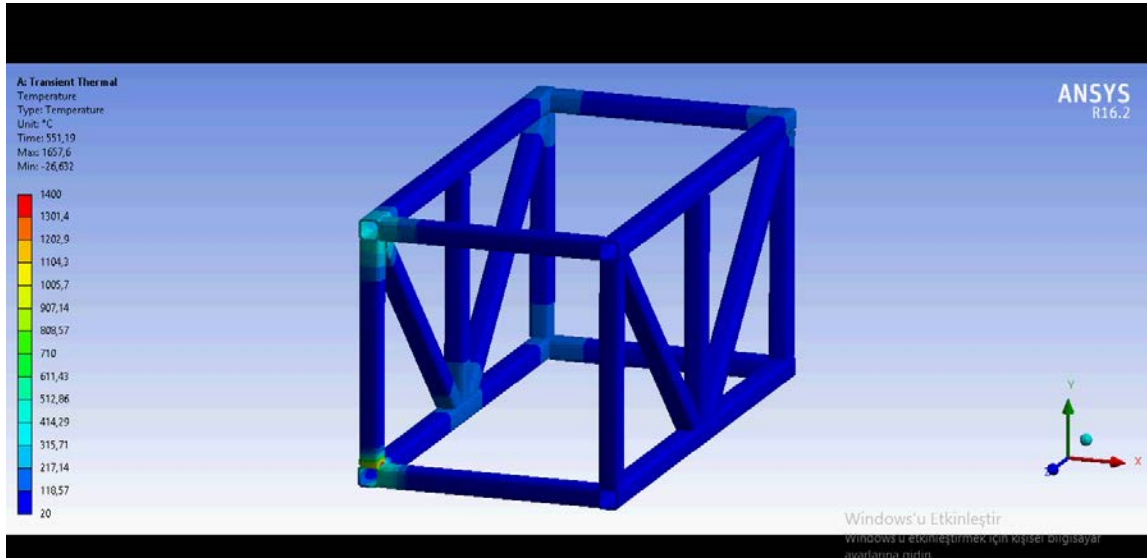


Resim 7.11. 10 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısıl çözümleme



Resim 7.12. 11 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısıl çözümleme

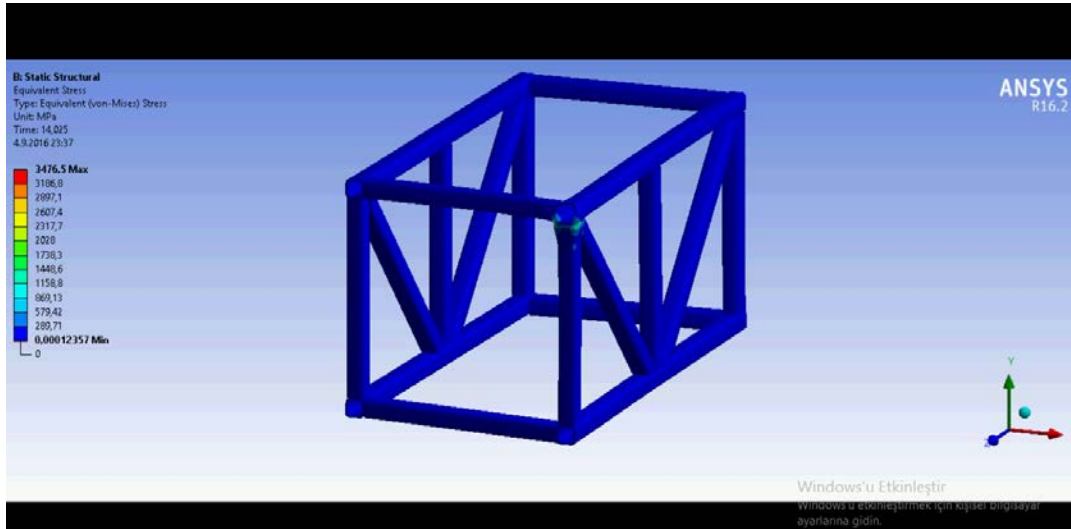
Resim 7.13’de 12. kaynak dikişinin çekildiği 551. saniyenin görüntüsü verilmektedir. 1, 2, 3, 4 ve 5. kaynak dikişlerinin tamamen soğuduğu, 11. kaynak dikişi bölgesinin sıcaklığının 600 °C civarında olduğu ve diğer kaynak dikişlerinin de farklı sıcaklıkta olduğu anlaşılmaktadır. Yine kaynak bölgelerinin merkezlerinde hızla soğuma gerçekleşirken sıcaklığın konstrüksiyona hızlı bir şekilde yayıldığı ve yayılmanın kaynak dikişlerinden ısı çekerek soğumaya neden olduğu gözlenmektedir.



Resim 7.13. 12 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de ısı çözümü

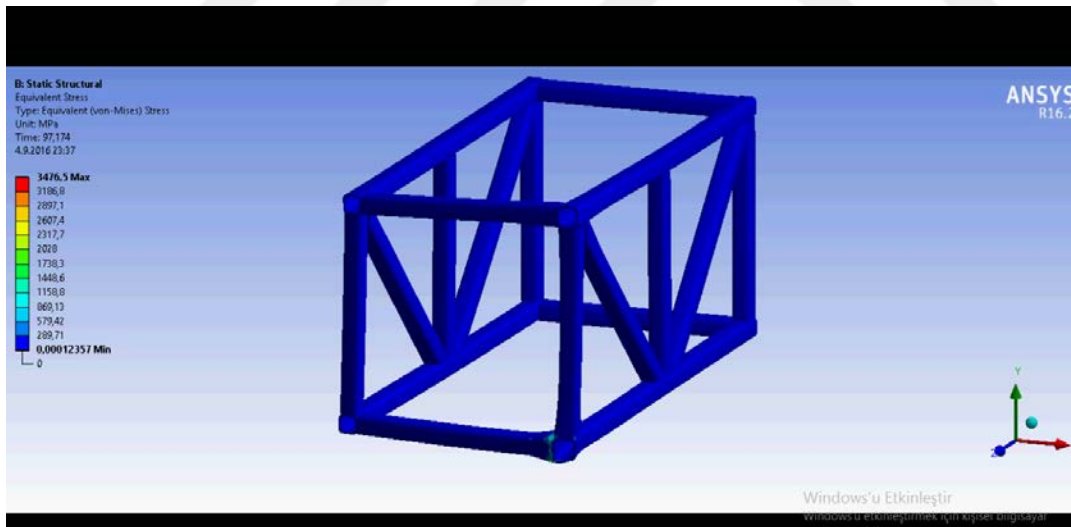
Kaynak sırasında meydana gelen distorsiyonların ANSYS’ de modellenmesi

Kaynak sırasına uygun olarak gerçekleştirilen ANSYS mekanik çözümleme aşamaları Resim 7.14-25’de verilmektedir. Her kaynak bölgesine sıcaklık etki ettiği andan itibaren malzemede genleşme gözlemlenmiştir. Isınmayla genişleyen kaynak bölgeleri zamana bağlı olarak ısı kaynağının kaynak dikişinden uzaklaşmasıyla beraber soğumaya başlamış ve büzülme tespit edilmiştir.



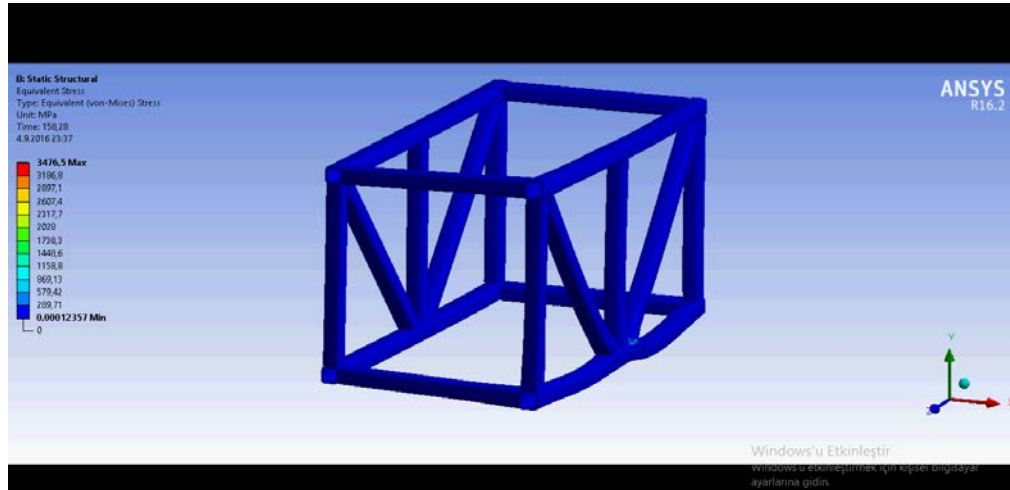
Resim 7.14. 1 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme

Resim 7.15’deki görüntüde 2. kaynak dikişinin çekilmesiyle 1. kaynaktaki olduğu gibi genişleme meydana gelmekte fakat 1. kaynak dikişinin hızla soğumasının ardından tekrar büzüşmektedir ve eski halini alma eğilimindedir.

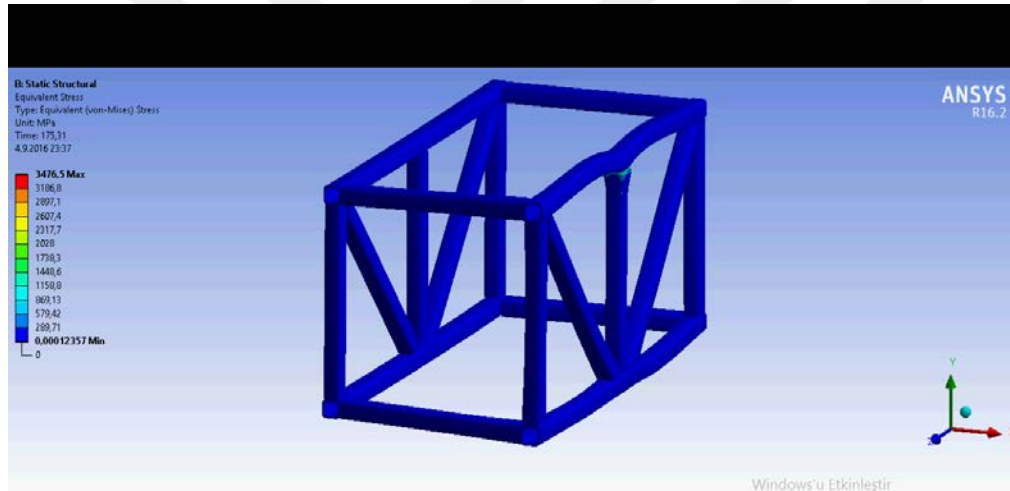


Resim 7.15. 2 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme

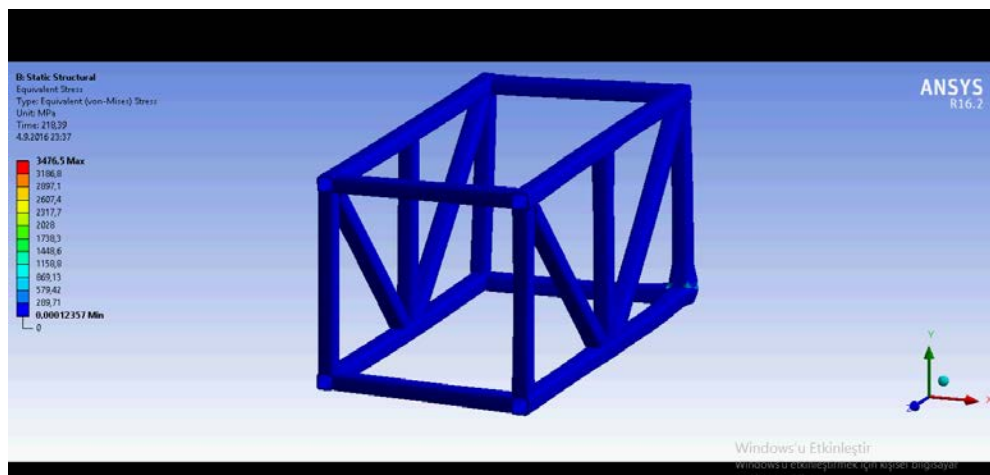
3 ve 10 numaralı kaynak dikişleri dört yapı elemanının birleşim noktası olmasından dolayı en fazla kaynak metalinin yığıldığı bölgelerdir ve diğer bölgelerden daha fazla sıcaklık artışı olduğunun göstergesidir. ANSYS’de simülasyonu yapılan her bölgenin genişleme hareketi 50 kat büyütülerek izlenmiştir. Resim 7.16’da yapısal elemanın 3 numaralı kaynak bölgesinden ısı girişi ile mekanik hareketi verilmiştir.



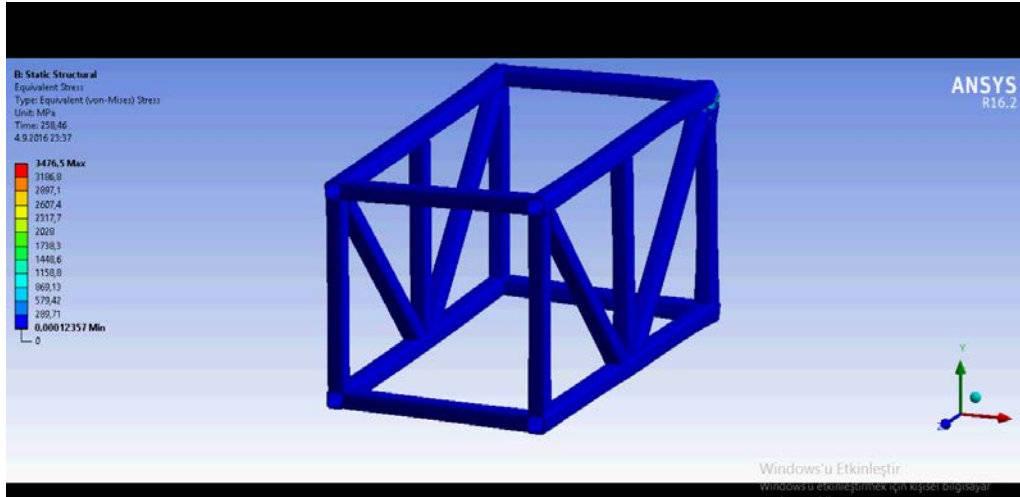
Resim 7.16. 3 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



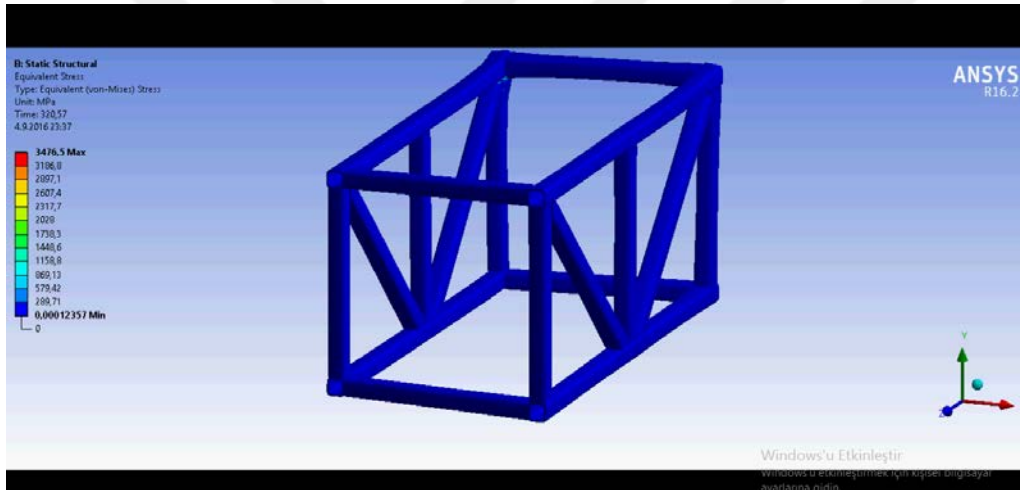
Resim 7.17. 4 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



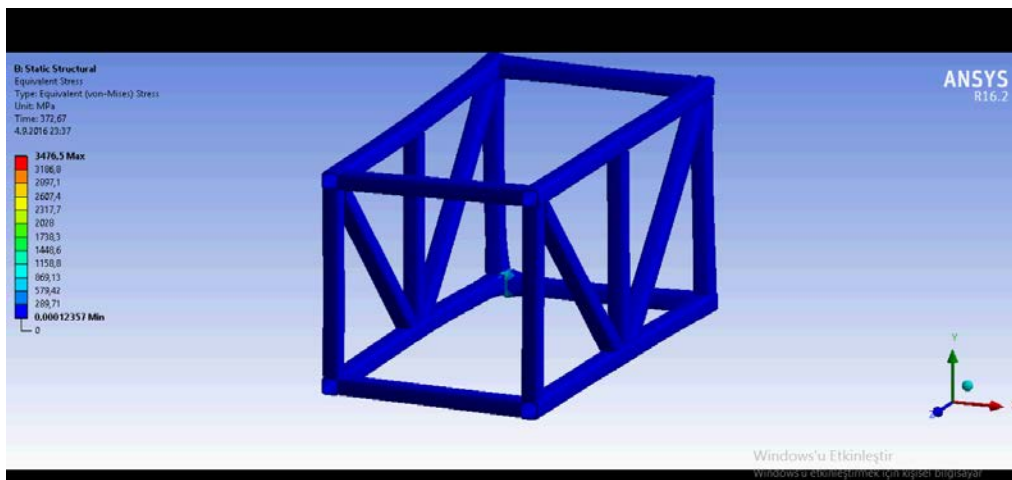
Resim 7.18. 5 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



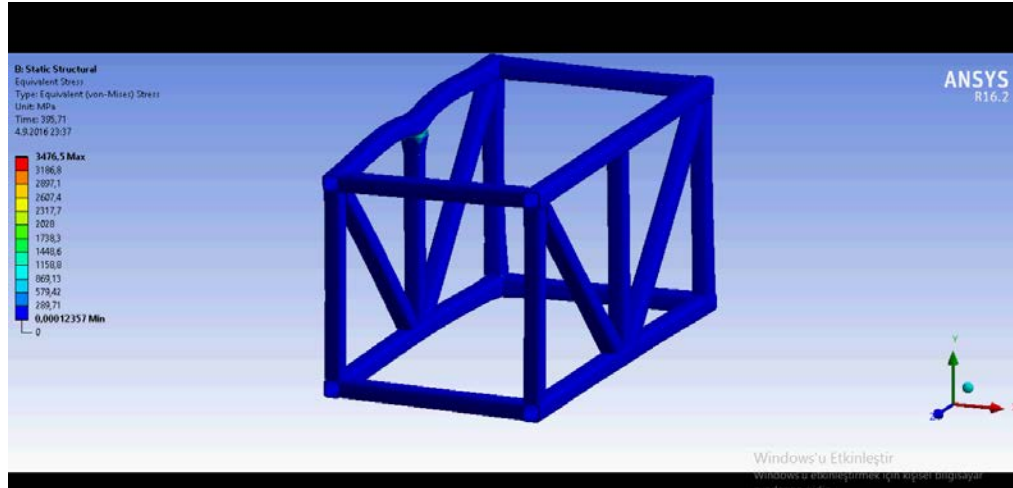
Resim 7.19. 6 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



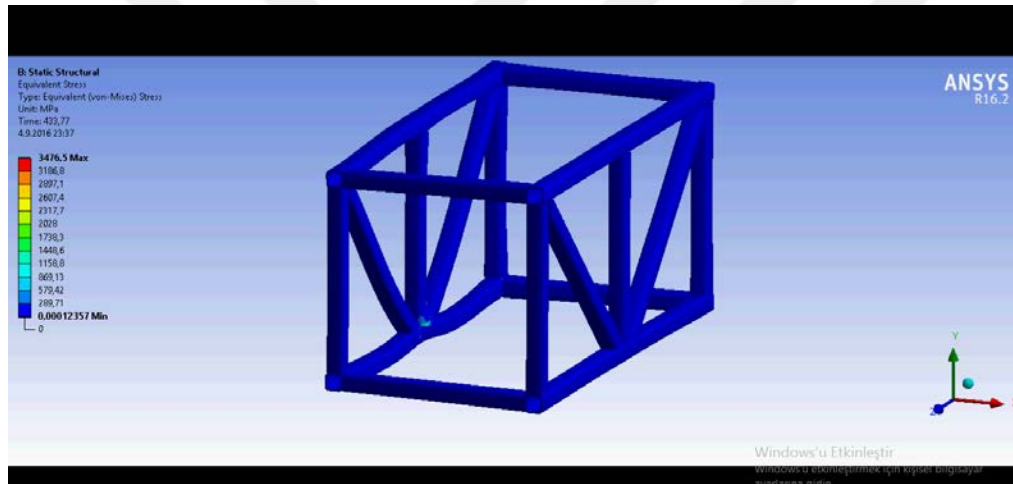
Resim 7.20. 7 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



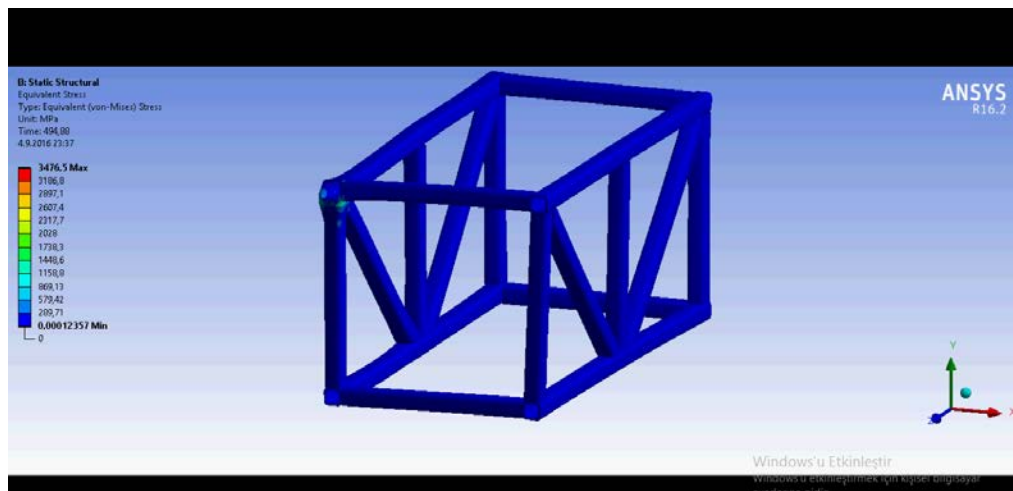
Resim 7.21. 8 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



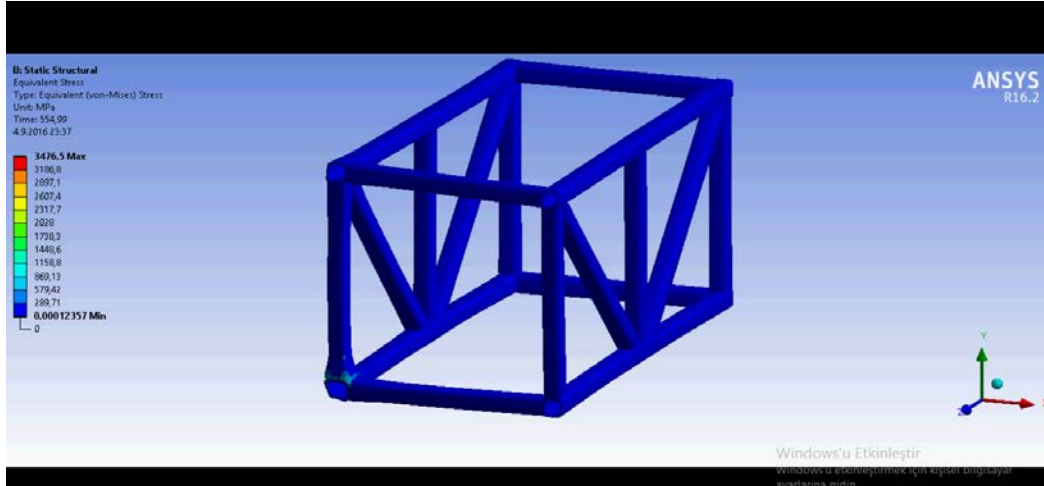
Resim 7.22. 9 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



Resim 7.23. 10 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



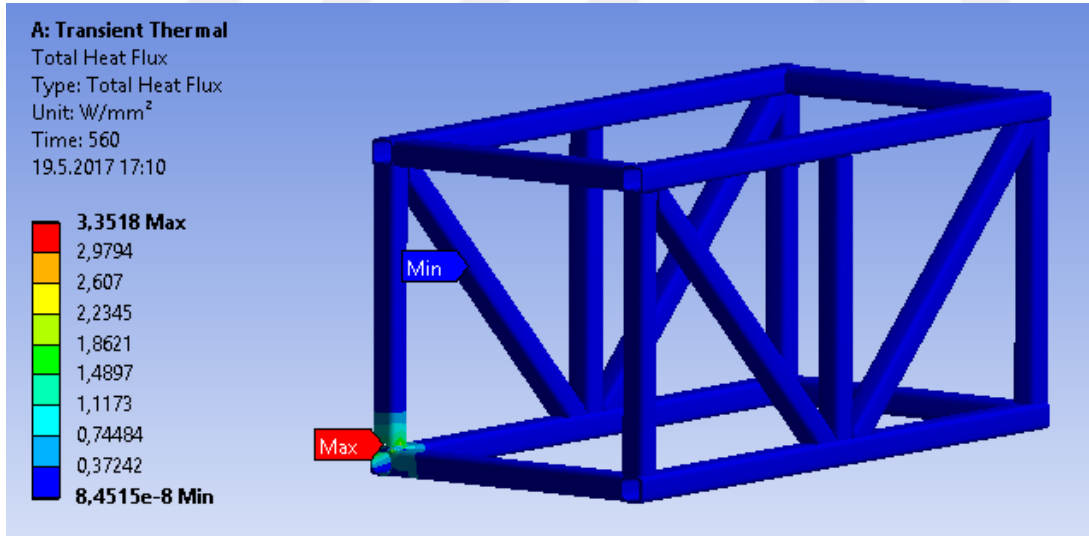
Resim 7.24. 11 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme



Resim 7.25. 12 numaralı kaynak dikişi için ANSYS’de mekanik çözümleme

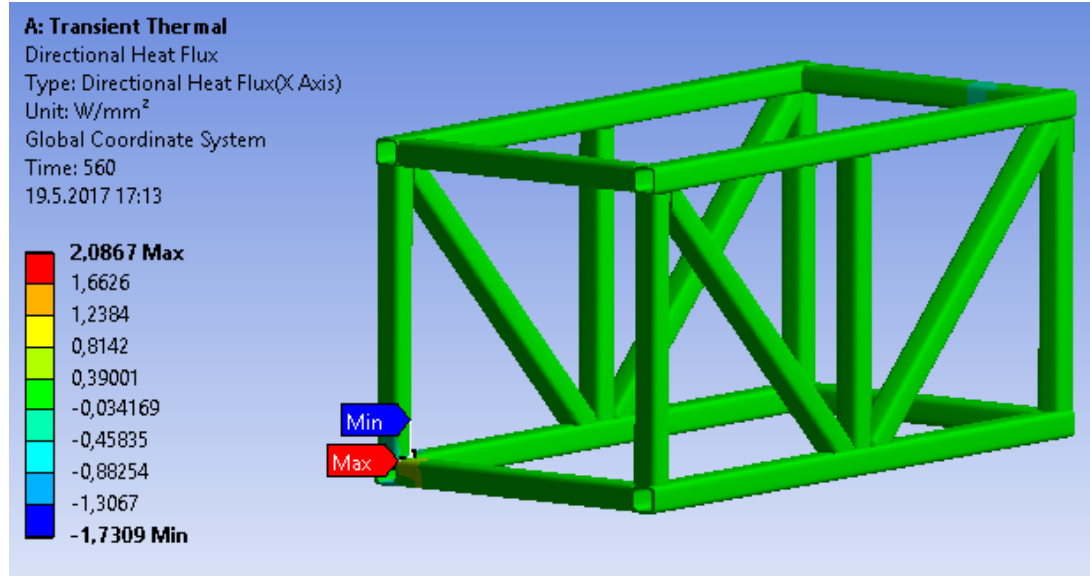
Kaynak sırasında meydana gelen diğer çözümler

Resim 7.26’da toplam ısı akış çözümü görülmektedir. Maksimum ısı akışı bağlantı köşelerine yakın olup değeri: $1,708 \times 10^{-11} \text{ W/mm}^2$ dir.



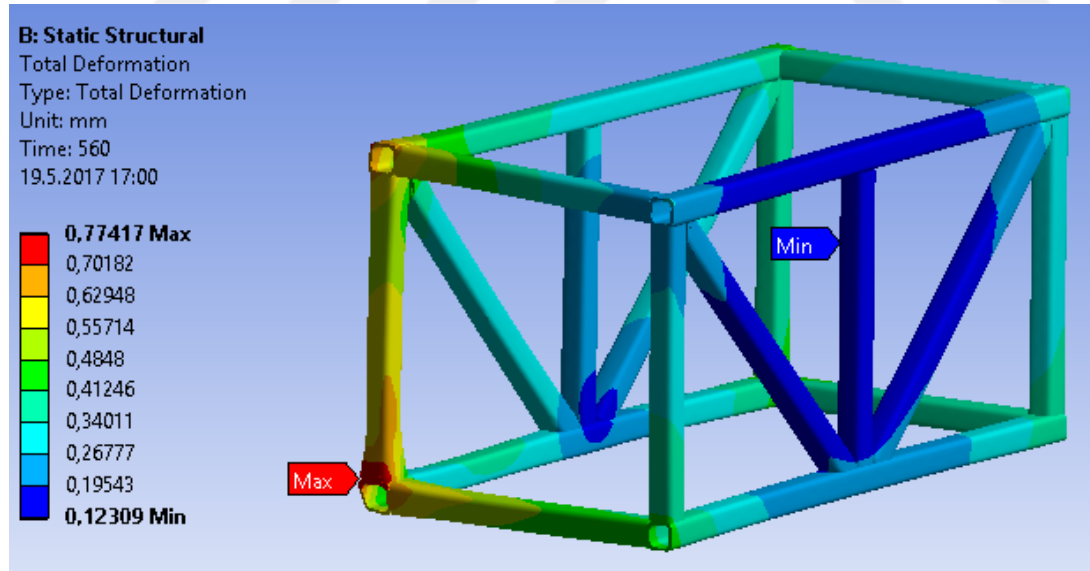
Resim 7.26. Toplam ısı akışı çözümü

Resim 7.27’de kaynaklanan köşelerden profillerin merkezine doğru ısı akışı olduğu görülmektedir. Kırmızı bölgeler ısı akışının gerçekleştiği maksimum bölgelerdir ve değeri: $1,365 \times 10^{-11} \text{ W/mm}^2$ dir.



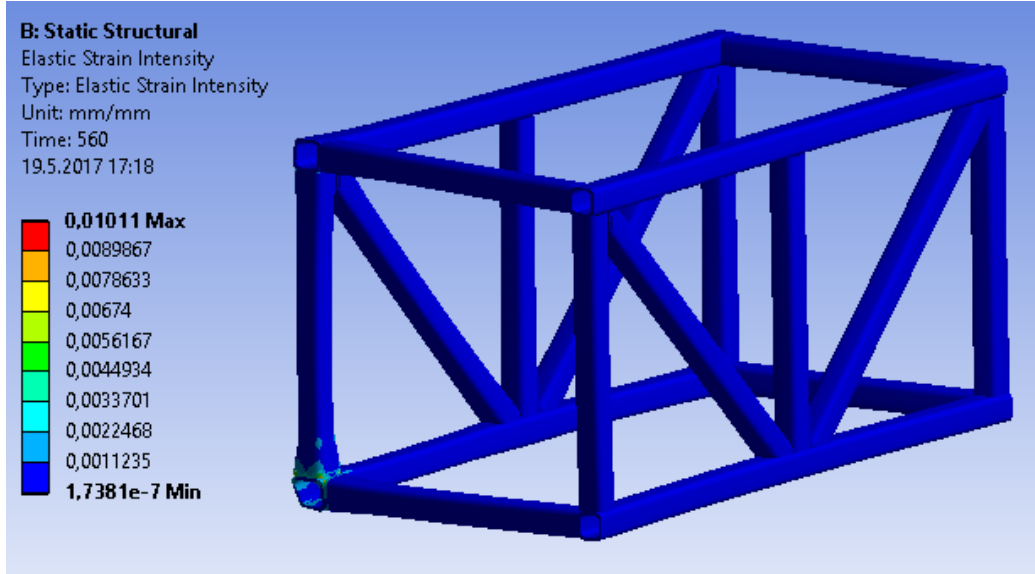
Resim 7.27. Isı akış yönü

Resim 7.28’de toplam deformasyon miktarı görülmektedir. Burada oluşturulan dikdörtgen prizmasının köşeleri (kırmızı ile gösterilen yerler) en fazla deformasyona uğramakta ve değeri: 0.77 mm’dir.



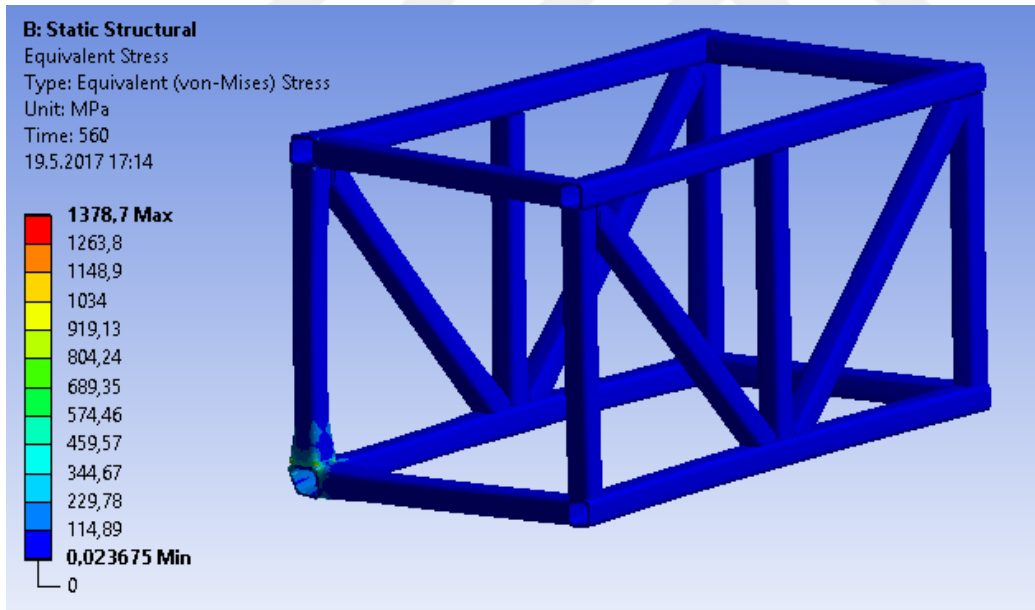
Resim 7.28. Toplam deformasyon miktarı

Resim 7.29’da elastik gerilme miktarı görülmektedir ve değeri: 0,0076 mm/mm’dır. Bu değer oldukça küçüktür.



Resim 7.29. Elastik gerilme miktarı

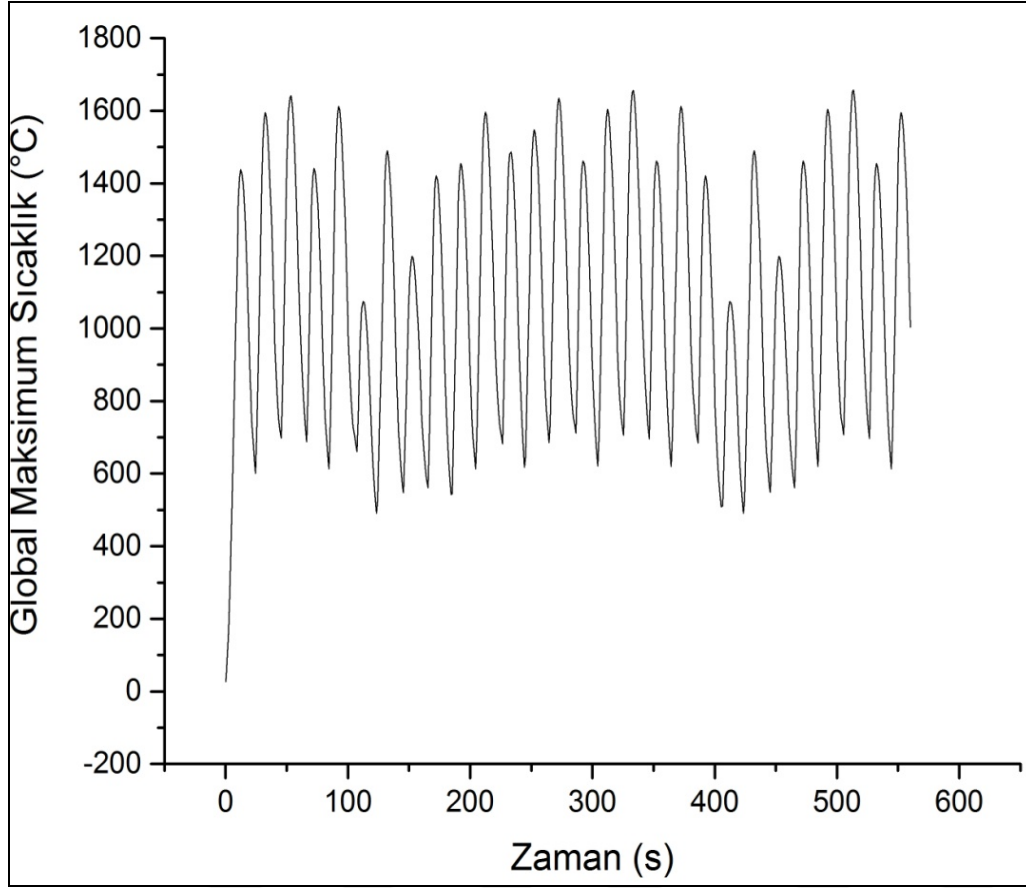
Resim 7.30’da görüldüğü üzere konstrüksiyonun eşdeğer gerilme değeri 1378.7 MPa’dır.



Resim 7.30. Eşdeğer gerilme değeri

7.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

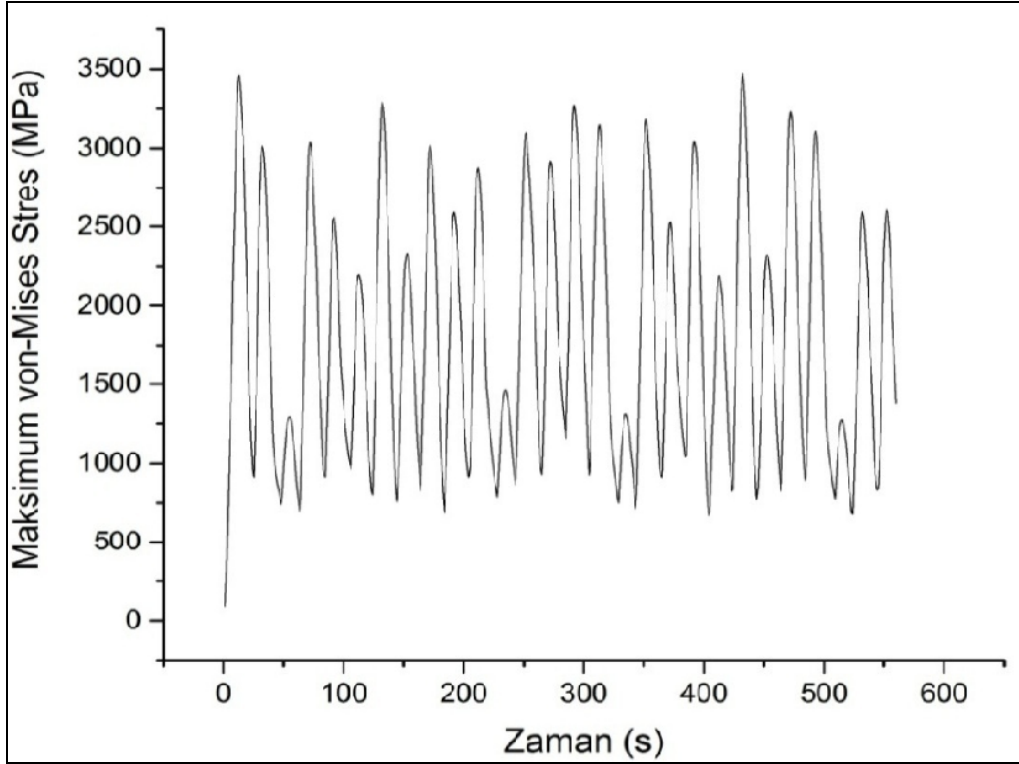
Şekil 7.2’de zamana bağlı sıcaklık değişimi görülmektedir. Ortam sıcaklığı ve kaynak ısı girdisi arasındaki yüksek sıcaklık farkı nedeniyle sürekli artan-azalan sıcaklık eğrileri grafiğe şeklindeki gibi yansımıştır.



Şekil 7.2. Zaman-Sıcaklık dağılım eğrileri

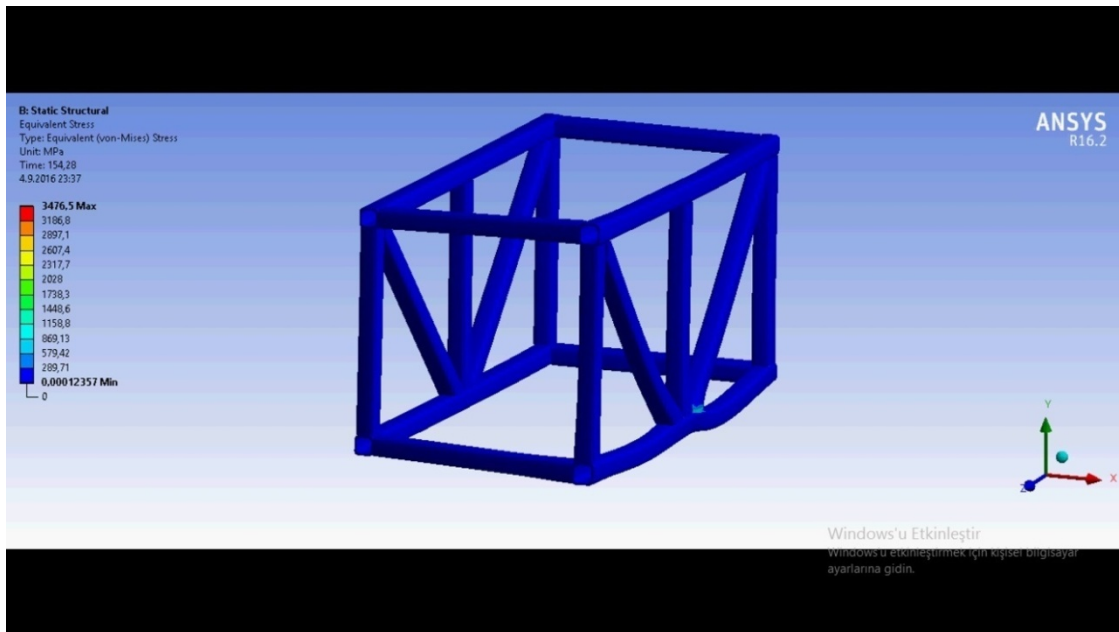
Resim 7.2’de görüldüğü üzere bir kaynak bölgesinden bir diğerine geçildiği andan itibaren hızlı bir şekilde soğuma gerçekleşmekte ve Şekil 7.2’deki gibi zaman-sıcaklık eğrileri elde edilmektedir.

Yine aynı şekilde ısı girdisinden dolayı deney konstrüksiyonunda oluşan sıcaklık değişimine bağlı zaman-gerilim grafiğinde de benzer sonuçlara ulaşıldığı görülür (Şekil 7.3). Konstrüksiyona kaynaktan dolayı giren ısı, kaynak bölgesinin sürekli değişmesi ile hızlı bir şekilde soğuması sonucu sürekli artan azalan gerilmelere sebep olmaktadır.



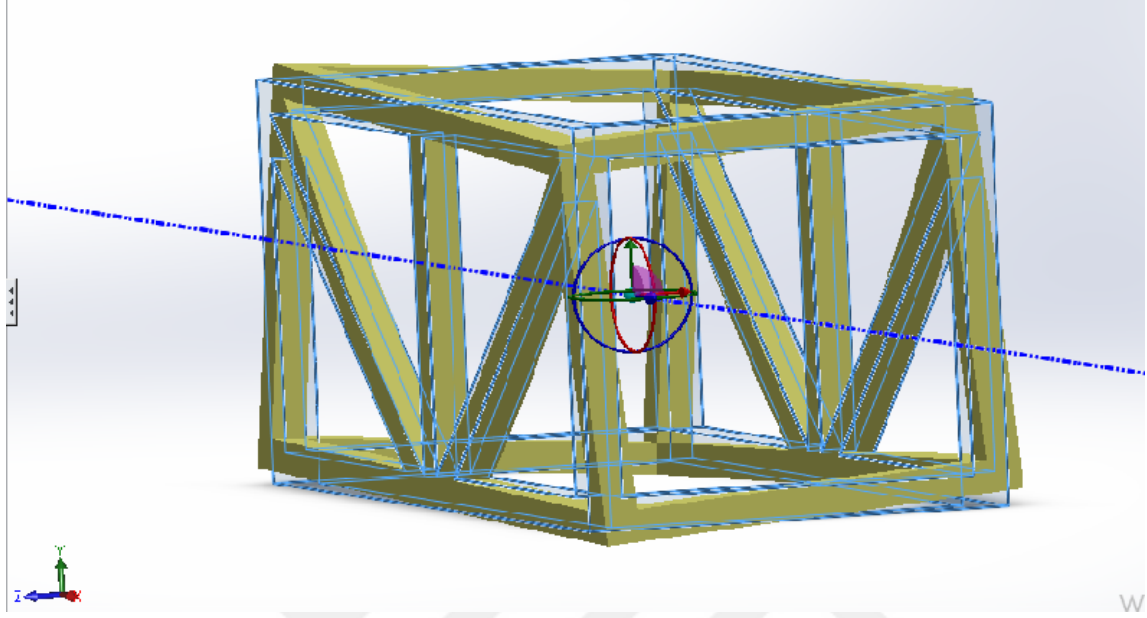
Şekil 7.3. Zaman- Gerilim dağılım eğrileri

Hem Resim 7.31’de hem de Şekil 7.3’de görüldüğü üzere konstrüksiyonda oluşan maksimum gerilme 3476.5 MPa’dır ve kaynakla beraber giren ısı hızlı bir şekilde yayıldığı için süreklilik yoktur. Bu değer anlık tepe noktasıdır ve soğuma ile beraber azalmaktadır.



Resim 7.31. Sıcaklık girişi ile gerilim dağılımı

Resim 7.32’de ise konstrüksiyonun kaynaktan dolayı maruz kaldığı çekme gerilmelerinin etkisi görülmektedir. Burada mavi çizgiler kaynaktan önceki yapıyı temsil etmektedir.



Resim 7.32. Çekme gerilmelerinin etkisi

Bu çalışmada deneysel olarak sadece ölçü hatalarının tespiti üzerinde durulmuştur. Deneysel parametreler kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında ölçü değişimleri olduğu görülmüştür. ANSYS ‘de yapılan çözümlemede ise toplam deformasyon miktarına ilave olarak; toplam ısı akışı, ısı akışının yönü ve miktarı, elastik gerilme miktarı ve gerilme enerji miktarına ulaşılmıştır. Yapılan analiz sonucunda gerilim yoğunluğunun kaynak metalinde olmasının yanı sıra özellikle de ana malzeme ile birleşim noktalarında olduğu görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yapılan deneysel ve Ansys analiz sonuçlarından elde edilen veriler birbiri ile tamamen aynı olmamakla birlikte yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel çalışmada konstrüksiyonun dış yüzeylerine 100 mm mesafede sabitlenen profillerden oluşturulan düzenden elde edilen verilerin ANSYS programından elde edilen verilerle örtüştüğü görülmüştür.

Birleştirilecek parçalarda kaynak işleminden dolayı meydana gelebilecek ısı 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 yapılabileceği gibi birden fazla kaynak planı oluşturarak kaynak sırasının konstrüksiyondaki değişime etkisi de araştırılabilir.

- Farklı malzemeler (paslanmaz çelik, yüksek karbonlu çelik, alaşımlı çelikler, vb.) kullanarak benzer çalışmalar yapılabilir.
- Makine tasarımlarında sıkça karşılaşılan; farklı malzemelerin kaynak edilme durumu göz önüne alınarak tasarım değiştirilebilir.
- Malzemelerin kalınlıkları ile orantılı ısı girdisi ve değişen kaynak parametreleri baz alınarak deney tekrarlanabilir.
- Aynı deney farklı programlarda analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılabilir.
- 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.
- Kaynak yöntemlerinin ve akım değerlerinin distorsiyonlar üzerindeki etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Fındık, T. (2005). *Paslanmaz Çelik Malzemelerin Gazaltı (MIG) Kaynağı Sırasındaki Isı Transferinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analiz*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-15.
2. Knoedel P., Gkatzogiannis S. and Ummenhofer T. (2017). Practical aspects of welding residual stress simulation. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 83-96.
3. Carmo D.A., Faria A.R. (2015). A 2D finite element with through the thickness parabolic temperature distribution for heat transfer simulations including welding. *Finite Elements in Analysis and Design*, 93, 85-95.
4. Huang H., Yuan Z., Qian H., Ye Y., Leng J. and Wei Y. (2016). Design and analysis of a novel ship pipeline welding auxiliary device. *Ocean Engineering*, 123, 55-64.
5. 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-1Mo-0.25V Steel Cylinder. *Science Direct*, 130, 552-559.
6. Akbari D., Sattari-Far I. (2009). Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 769-776.
7. Bajpei T., Chelladurai H. and Ansari M.Z. (2017). Experimental investigation and numerical analyses of residual stresses and distortions in GMA welding of thin dissimilar AA5052-AA6061 plates. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 340-350.
8. Yuquan, G., Dongjiang, W., Guangyi, M. and Dongming, G. (2014). Numerical Simulation and Experimental Investigation of Residual Stresses and Distortions in Pulsed Laser Welding of Hastelloy C-276 Thin Sheets. *Science Direct*, 43(11), 2663-2668.
9. Krasovskyy, A., Sönnichsen, S. and Bachmann D. (2014). On the residual stresses in multi-pass welds: coupling of welding simulation and fatigue analysis. *Science Direct*, 10, 506-511.
10. Nam, J. Y., Seo, D. H., Lee, S. Y., Hwang, W. K. and Lee, B. Y. (2011). The effect of residual stress on the SCC using ANSYS. *Science Direct*, 10, 2609-2614.
11. Varghese, J., Sumanth, M.R., and Suresh M.R. (2012). Numerical simulation of residual stress in a spot welded low karbon steel plate. *SciVerse Science Direct*, 38, 2913-2921.
12. Vemanaboina, H., Akella, S. and Buddu, R.K. (2014). Welding Process Simulation Model For Temperature and Residual Stress Analysis. *Science Direct*, 6, 1539-1546.

13. Prasad, V.V.M., Varghese, J.V.M., Suresh M.R. and Kumar, S.D. (2016). 3D simulation of residual stress developed during TIG welding of stainless steel pipes. *Science Direct*, 24, 364-371.
14. Anık, S., Tülbentçi, K., Kaluç, E. (1991). *rtl Elektrot ile Ark Kaynağı*. İstanbul: Gedik Holding Yayını, 165-180.
15. Buzluk, M. (2007). *Elektrik ve Gazaltı Kaynağında Kalıntı Gerilmelerin llmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-50.
16. Eryürek, İ.B. (2006). *Gazaltı Kaynağı*. İstanbul: Askaynak Yayınları, 4, 77.
17. Tülbentçi, K. (1990). *MIG - MAG Eriyen Elektrod ile Gazaltı Kaynağı*. İstanbul: Gedik Holding Yayınları, 1-7, 23.
18. Koma, E. (2005). *MIG/MAG Kaynak Eğitim Notları*. İstanbul: As Kaynak Yayınları, 20-22.
19. Durgutlu, A. (1997). *Ark Kaynağı Yöntemlerinde Kaynak Hızının Mikroyapı ve Nfuziyete Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 50-52, 112-114.
20. Vural, H.İ. (2006). *Kafes Kiriş Sistemlerinde Optimum Kaynak Sırası Planı ve Distorsiyon (arpılma) Kuvvetlerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 19-36, 48-70.
21. Anık, S. (1991). *Kaynak Tekniği El Kitabı*. İstanbul: Gedik Holding Yayınları, 22.
22. Şen, S. (2009). *Ark Kaynak İşlemi Sonucu Oluşan Kalıntı Gerilmelerin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Similasyonu İle İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-19, 27-30.
23. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kocaeli.makine.com%2Fders-notlari%2Fdemir-karbon-denge-diyagrami%2F&date=2017-04-29>, Son Erişim Tarihi: 29.04.2017.
24. anacık, A. (1998). *eliklerin Kaynağında Açısal Distorsiyon*, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-36, 59-119, 155, 164.
25. Oğuz, B. (1986). *Ark Kaynağı*. İstanbul: Oerlikon Yayınları, 241-246, 254-290.
26. Vural, U. (2009). *Kaynaklı İmalat Sonrası Oluşan Distorsiyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-11, 16-18.
27. Bailey, N. (1994). *Weldability of Ferritic Steels*. Cambridge: Abington Publishing, 129.

28. *American Society for Metals*. (1993). *Welding and Brazing, Metals Handbook* (Ninth Edition). Ohio: Metals Park, 1094-1102.
29. Anık, S. (1983). *Kaynak Teknolojisi El Kitabı*. İstanbul: Engör Matbaası, 104-117.
30. Altan, M. (2002). *Kaynak Distorsiyonları ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 30-31.
31. Incropera, P. F., DeWITT, P. D. (2010). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*. (Çev. T. Derbentli, O. F. Genceli, A. Güngör, A. Hepbaşlı, Z. İlken, N. Özbalta, F. Özgüç, C. Parmaksızoğlu ve Y. Uralcan). İstanbul: Literatür Yayınları:51 (Eserin orijinali 1989’da yayımlandı). 3-11.
32. Benli, S. (2004). *Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 34-35.
33. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.hascelik.com%2Ftr%2Fcelik-hakkinda%2Fyapi-celikleri%2F71&date=2017-05-18>, Son Erişim Tarihi: 29.04.2017.
34. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.oerlikon.com.tr%2Frs_250_mk_gazalti_kaynak_makinesi.html&date=2017-05-18, Son Erişim Tarihi: 29.04.2017.
35. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.askaynak.com.tr%2Furunler%2Fkaynak-elektrodlari-telleri-ve-tozlari%2Fgazalti-%28mig-mag%29-kaynak-telleri%2Fas-sg2&date=2017-05-18>, Son Erişim Tarihi: 29.04.2017.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : LAÇIN, Naim
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.01.1985 Yerköy/YOZGAT
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (545) 882 41 88
 e-mail : naimlacins@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	OMÜ Müh. Fak. / Makine Mühendisliği	2015
Lisans	Gazi Ü. T.E.F. / Metal Eğitimi Bölümü	2011
Ön Lisans	Kocaeli Ü. Gemi İnşaa Bölümü	2008
Lise	Yerköy Şehit S. Nezih Özok Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-2008	ADMARİN SHİPYARD	Kalite Kontrol Sorumlusu
2011-2013	ÇABA MAKİNE A.Ş.	Teknik Ressam
2014-...	MEB	Metal Öğretmeni

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Tarih kitapları okumak, araştırma yapmak, bilimsel programları takip etmek, seyahat etmek, araç kullanmak, yürüyüş yapmak.



GAZİ GELECEKTİR..