

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

**KÖŞE KAYNAK BAĞLANTISINDA ELASTO-
PLASTİK GERİLME ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Remzi TİMUR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Yrd.Doç. Dr. Muhammet CERİT

Eylül 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖŞE KAYNAK BAĞLANTISINDA ELASTO- PLASTİK GERİLME ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Remzi TİMUR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE
İMALAT

Bu tez 10 / 09 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd.Doç.Dr. Muhammet CERİT
Jüri Başkanı

Prof.Dr. Fehim FINDIK
Üye

Doç.Dr. Kenan GENEL
Üye

ÖNSÖZ

Dünyada çok uzun süredir ve ülkemizde de son yıllarda önemli araştırma konusu olan kaynaklı parçalardaki meydana gelen gerilme analizleridir. Bu tez çalışmasında köşe kaynağında termal etkilerden dolayı oluşan artık gerilme ve yer değiştirmeler ile uygulanan aksenal çekme kuvveti neticesinde meydana gelen elasto-plastik gerilmeler incelenmiştir. T kaynağı ve iç bükey köşe kaynağı bağlantı şekilleri ile de sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmada Ansys 11.0 sonlu eleman paket programı ile analizi süresince konuyla ilgili yardımı ve zamanını benimle paylaşan hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Muhammet CERİT'e, Yrd.Doç.Dr. Ergün NART'a tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Makine Yük. Müh. Hakan BALABAN'a , Arif SARISOY'a, Abdülkadir AYDIN'a ve tüm hayatım boyunca bana destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK İŞLEMİ.....	6
2.1. Kaynak İşleminin Tanımı.....	6
2.2. Elektrik Ark Kaynağı.....	6
2.3. Kaynaklı Birleştirme Çeşitleri.....	8
2.3.1. Alın kaynaklı birleştirmeler.....	8
2.3.2. İç köşe ve dış köşe kaynaklı birleştirmeler.....	9
2.3.3. Bindirme kaynaklı birleştirmeler.....	10
BÖLÜM 3.	
ÇELİKLERİN ISIL ÖZELLİKLERİ VE KAYNAK BÖLGESİ.....	11
3.1. Çeliklerin Ergitme Kaynağında Kaynak Bölgesi.....	11
3.2. Çeliklerin Isıl Özellikleri.....	12
3.2.1. Isı iletim katsayısı.....	13
3.2.2. Özgül ısı.....	14

3.2.3. Yoğunluk.....	14
3.2.4. Isı transfer katsayısı.....	14
3.3. Elektrik Ark Kaynağında Sıcaklık Dağılımı.....	14
3.3.1. Ark ısısı.....	14
3.3.2. Kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı.....	15
3.3.3. Soğuma hızı.....	16
3.4. Çeliklerde Kaynak Bölgesi.....	16
BÖLÜM 4.	
KAYNAK İŞLEMİNDE OLUŞAN ARTIK GERİLMELER VE OLUŞUM	
NEDENLERİ.....	19
4.1. Kaynak İşleminde Artık Gerilmeler.....	19
4.2. Artık Gerilmelerin Oluşum Nedenleri.....	19
4.3. Artık Gerilmelerin Oluşumu.....	23
4.3.1. Yapısal uyumsuzluk neticesi ile meydana gelen artık gerilmeler.....	23
4.3.2. Isıl gerilmeler neticesinde meydana gelen artık gerilmeler.....	25
BÖLÜM 5.	
ELASTO-PALASTİK GERİLME ANALİZİ TEORİSİ.....	
5.1. Elasto-Plastik Gerilme Analizi.....	28
5.1.1. Plastisitenin matematik teorisi.....	29
5.1.2. Elasto-plastik gerilme şekil değiştirme ilişkisi.....	32
5.2. Elasto-Plastik Problemlerin Nümerik Çözümleri.....	35
5.2.1. Bir boyutlu ideal elasto-plastik problem.....	35
5.2.2. Şekil değiştirme sertleşmesi lineer olmayan iki boyutlu elasto-plastik problem.....	38
5.2.3. Elasto-plastik problemlerin matris formülasyonu.....	40
5.2.4. Elasto-plastik problemlerin nümerik çözümü.....	42
BÖLÜM 6.	
SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ VE ANSYS.....	
	46

6.1. Giriş.....	46
6.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Adımları.....	47
6.3. Ansys Sonlu Elemanlar Yöntemi Paket Programı.....	48
6.3.1. Modelin oluşturulması.....	49
6.3.2. Sonlu eleman seçimi.....	49
6.3.3. Sonlu eleman modelinin oluşturulması.....	49
6.3.4. Malzeme ve eleman sabitlerinin belirlenmesi.....	50
6.3.5. Yük ve sınır koşullarının belirlenmesi.....	50
6.3.6. Çözüm.....	50
6.3.7. Sonuçların değerlendirilmesi.....	50
BÖLÜM 7.	
KÖŞE KAYNAK BAĞLANTISININ SONLU ELEMANLAR	
YÖNTEMİYLE ANALİZİ.....	51
7.1. Problemin Tanımı.....	51
7.2. Problemin Çözüm Aşamaları.....	58
7.3. Termal Analiz Sonuçları.....	66
7.4. Yapısal Analiz Sonuçları.....	71
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR.....	87
EKLER.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	108

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

F	: Kuvvet
σ	: Gerilme
E	: Elastisite Modülü
ν	: Poisson Oranı
ϵ	: Şekil Değişirme Birimi
N	: Newton Kuvvet Birimi
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
α	: Isı Transfer Katsayısı
ρ	: Yoğunluk
c	: Özgül Isı
k	: Isı İletim Katsayısı
σ_{ij}	: Gerilme Bileşenleri
ϵ_{kl}	: Şekil Değişirme Bileşenleri
λ, μ	: Lamé Sabitleri
K	: Rijitlik Matrisi
I	: Deviatorik Gerilme İnvaryantı
ϵ_e	: Elastik Bölgedeki Şekil Değişimi
ϵ_p	: Plastik Bölgedeki Şekil Değişimi
δ	: Uzama
σ_y	: Akma Gerilmesi
σ_e	: Eşdeğer Gerilme
A	: Köşe Kaynağı
B	: İç Bükey Köşe Kaynağı
C	: 45 °'lik Kaynak Ağzı Açılmış Köşe Kaynağı
D	: 45 °'lik Kaynak Ağzı Açılmış İç Bükey Köşe Kaynağı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Elektrik arkı mekanizmasının şematik gösterilişi.....	7
Şekil 2.2.	Örtülü elektrot ile ark kaynağında kaynak bölgesi.....	8
Şekil 2.3.	Alın birleştirmeler.....	9
Şekil 2.4.	Kıvrık alın birleştirmeler.....	9
Şekil 2.5.	İç köşe birleştirmeler.....	9
Şekil 2.6.	Dış köşe birleştirmeler	10
Şekil 2.7.	Bindirme kaynağı birleştirmeleri.....	10
Şekil 3.1.	Alın ve köşe birleştirmelerinde segregasyon bölgeleri.....	11
Şekil 3.2.	Isının etkisi altındaki bölgedeki tane yapısı değişimi.....	12
Şekil 3.3.	Kaynak sırasında ısının tesiri altındaki bölge.....	13
Şekil 3.4.	Çeliklerde kaynak bölgesi.....	17
Şekil 4.1.	Bir alın dikişindeki enine (T) ve boyuna (L) büzülme gerilmeleri.....	20
Şekil 4.2.	Bir T bağlantısındaki enine ve boylamasına büzülme gerilmeleri.....	20
Şekil 4.3.	Bir alın kaynaklı birleştirmede distorsiyon.....	21
Şekil 4.4.	Bir T bağlantıdaki distorsiyon.....	22
Şekil 4.5.	Farklı uzunluktaki çubukların uç bölgelerinden birleştirilmeleri sonucu oluşan artık gerilmeler.....	23
Şekil 4.6.	Tespit edilmiş çubuğun ısıtılmasının artık gerilmeler üzerine etkisi.....	24
Şekil 4.7.	Sıcaklık ve gerilme dağılımı.....	26
Şekil 5.1.	Akma yüzeyi plastik deformasyon ilişkisi.....	32
Şekil 5.2.	Akma yüzeyi ve normal vektörü.....	34
Şekil 5.3.	Bir boyutlu durumda lineer gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	36

Şekil 5.4.	Şekil değiştirme sertleşmesi lineer olmayan malzemede gerilme şekil değiştirme ilişkisi ve Newton-Rapson iterasyonu.	39
Şekil 6.1.	Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi.....	47
Şekil 6.2.	Bir üçgen sonlu eleman ve düğüm noktaları.....	48
Şekil 7.1.	Modelin 2 boyutlu görünüşü.....	52
Şekil 7.2.	Kaynak ağzı açılmamış iç köşe kaynağı.....	53
Şekil 7.3.	Kaynak ağzı açılmamış iç bükey (R=16mm) iç köşe kaynağı ...	54
Şekil 7.4.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe kaynağı (T Kaynağı).....	55
Şekil 7.5.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe kaynağı.....	56
Şekil 7.6.	İncelenen köşe kaynak tiplerinin genel görünümü A- iç köşe kaynağı, B- iç bükey iç köşe kaynağı, C- 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe kaynağı (T Kaynağı), D- 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey iç köşe kaynağı (T Kaynağı).....	57
Şekil 7.7.	Isıl analizde seçilen 2 boyutlu katı eleman.....	58
Şekil 7.8.	AH36 çeliğinin sıcaklığa bağlı ısı taşınım katsayısı, özgül ısısı ve ısı iletim katsayısı	59
Şekil 7.9.	AH36 çeliğinin sıcaklığa bağlı elastisite modülü, ısıl genleşme katsayısı ve poisson oranı.....	59
Şekil 7.10.	Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin elastisite modülünün sıcaklığa bağlı değişimi.....	61
Şekil 7.11.	Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin poisson oranının sıcaklığa bağlı değişimi.....	61
Şekil 7.12.	Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin ısıl genleşme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	62
Şekil 7.13.	Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	62
Şekil 7.14.	Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin ısı taşınım katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	63
Şekil 7.15.	Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi.....	63

Şekil 7.16.	AH36 Çeliğinin gerilme –plastik gerilme eğrisi.....	64
Şekil 7.17.	Modelin elemanlara bölünmüş şekli.....	64
Şekil 7.18.	Modellere uygulanan sınır şartları.....	65
Şekil 7.19.	İç köşe kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	66
Şekil 7.20.	İç köşe kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 7.21.	İç köşe kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 7.22.	İç köşe kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı..	68
Şekil 7.23.	İç köşe kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı	68
Şekil 7.24.	İç köşe kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	69
Şekil 7.25.	İç köşe kaynak bağlantısının 60.saniyeye kadar olan max. sıcaklık-zaman grafiği.....	70
Şekil 7.26.	İç köşe kaynak bağlantısının 60.saniyeye kadar olan min. sıcaklık-zaman grafiği.....	71
Şekil 7.27.	İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler).....	72
Şekil 7.28.	İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık erilmeler)....	72
Şekil 7.29.	İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	73
Şekil 7.30.	İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	73
Şekil 7.31.	İç köşe kaynak bağlantısında kaynak ana metalinin en büyük gerilme değerlerinin adımlara göre değişimi grafiği.....	75
Şekil 7.32.	İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki anda ısıl gerilmeler neticesinde meydana gelen elastik gerinimler.....	76
Şekil 7.33.	İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki anda ısıl gerilmeler neticesinde meydana gelen elastik gerinimler.....	76

Şekil 7.34.	İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki anda ısı gerilmeler neticesinde meydana gelen plastik gerinimler.....	77
Şekil 7.35.	İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki anda ısı gerilmeler neticesinde meydana gelen plastik gerinimler.....	77
Şekil 7.36.	Modellerin ilk 10. saniye kadar olan soğuma grafikleri.....	79
Şekil 7.37.	Modellerin soğuma zamanına göre artık gerilmelerden kaynaklanan toplam yer değiştirme grafikleri.....	79
Şekil 7.38.	Modellerin zamana göre artık gerilmelerden kaynaklanan en büyük eşdeğer gerilme grafikleri.....	80
Şekil 7.39.	Modellerin artık gerilmelerden dolayı üst kaynak ayağında meydana gelen eşdeğer gerilme grafikleri.....	80
Şekil 7.40.	Modellerin artık gerilmelerden dolayı alt kaynak ayağında meydana gelen eşdeğer gerilme grafikleri.....	81
Şekil 7.41.	Modellerin artık gerilmelerden dolayı kaynak kökünde meydana gelen eşdeğer gerilme grafikleri.....	81
Şekil 7.42.	Modellerin artık gerilmelerden dolayı üst kaynak ayağında meydana gelen maksimum yer değiştirme grafikleri.....	82
Şekil 7.43.	Modellerin artık gerilmelerden dolayı alt kaynak ayağında meydana gelen maksimum yer değiştirme grafikleri.....	82
Şekil 7.44.	Modellerin artık gerilmelerden dolayı kaynak kökünde meydana gelen maksimum yer değiştirme grafikleri.....	83
Şekil E.1.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	90
Şekil E.2.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	90
Şekil E.3.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı.....	91
Şekil E.4.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	91
Şekil E.5.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	92

Şekil E.6.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	92
Şekil E.7.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler).....	93
Şekil E.8.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler).....	93
Şekil E.9.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)...	94
Şekil E.10.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	94
Şekil E.11.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki elastik gerilmeleri.....	95
Şekil E.12.	İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki plastik gerilmeleri.....	95
Şekil E.13.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	96
Şekil E.14.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	96
Şekil E.15.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı.....	97
Şekil E.16.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	97
Şekil E.17.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	98
Şekil E.18.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	98
Şekil E.19.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler).....	99
Şekil E.20.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak	

	bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler).....	99
Şekil E.21.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	100
Şekil E.22.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	100
Şekil E.23.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki elastik gerilmeleri.....	101
Şekil E.24.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki plastik gerilmeleri.....	101
Şekil E.25.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	102
Şekil E.26.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı.....	102
Şekil E.27.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı.....	103
Şekil E.28.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	103
Şekil E.29.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil E.30.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı.....	104
Şekil E.31.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T	

	Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler).....	105
Şekil E.32.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış i bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)..	105
Şekil E.33.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış i bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	106
Şekil E.34.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış i bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar).....	106
Şekil E.35.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış i bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki elastik gerinmeleri.....	107
Şekil E.36.	45° 'lik kaynak ağzı açılmış i bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki plastik gerinmeleri.....	107

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 7.1.	Ah36 Çeliğinin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	47
------------	-----------------------------------------------------	----

ÖZET

Anahtar kelimeler: Köşe Kaynağı, Distorsiyon, Elasto-Plastik Gerilme, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ansys, Termal Analiz, Yapısal Analiz

Konstrüktif tasarımlarda köşe kaynakları sıkça karşımıza çıkar. Bu çalışmada köşe kaynağının elasto-plastik analizinin yapılması amaçlanmıştır. Köşe kaynağının farklı türevleri olan 45°'lik kaynak ağızı açılmış köşe kaynağı (T kaynağı) ve iç bükey köşe kaynağı için de analizler yapılarak sonuçlar kıyaslanmıştır. Analiz için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve Ansys programından yararlanılmıştır. Bununla birlikte oluşan artık gerilmeler neticesinde köşe kaynağında meydana gelen kritik durumlar da belirtilmiştir.

THE ELASTO-PLASTIC STRESS ANALYSIS OF THE FILLET WELD JOINT

SUMMARY

Key Words: Fillet Weld, Distortion, Elasto-Plastic Strain, Finite Element Method, Ansys, Thermal Analysis, Structural Analysis

Fillet welds often meets to us in constructive design. In the study it has been aim to make elasto-plastic structural analysis of fillet weld. The different variations of fillet weld combining, the fillet weld of which edge opened 45 degrees and the concave fillet weld were analysed and the result were compared. It has been used finite elements methods for analysis and made of Ansys programme. At the same time, with the help of the residual stress, the critical cases which is occurred in the fillet weld is examined too.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kaynak işleminde, birleştirilecek parçalar lokal olarak ergime sıcaklığına kadar ısıtılır. Fakat soğuma işlemi, ısınma işlemine göre yavaş gerçekleşir. Parçaların soğuma sırasındaki lokal büzölmeler, parçalarda artık gerilmeler ve distorsiyonlara neden olur. Eğer ısıl genleşme yada çekmeden dolayı oluşan yük metalin akma noktasından daha büyük olursa bölgesel plastik deformasyon oluşur. Plastik deformasyon yapıyı rahatsız eder ve malzemenin boyutlarında değişimlere yol açar.

Kaynak yapılan parçalarda meydana gelen artık gerilmeler, malzemelerin tam ve doğru imalinde ve işlenmesinde önemli problemler yaratır. Çünkü bu gerilmeler gevrek kırılmaya neden olur ve kaynak yapılan malzemenin direncini düşürür. Bu sebeple artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımı ile kaynak şartları üzerindeki etkilerinin analizi birbirleri ile bağlantılı işlemlerdir.

Birçok araştırmacı, artık gerilmeleri önceden hesaplamak için analitik ve deneysel metotlar geliştirmişlerdir. Bununla birlikte bilgisayar teknolojisindeki ve özellikle sonlu elemanlar yöntemindeki gelişmeler, kaynaklı yapılardaki artık gerilmelerin analizini kolaylaştırmıştır.

Ning-Xu M.A. ve arkadaşları tarafından 1995 yılında yapılan bir çalışmada T profildeki iç köşe kaynağında meydana gelen artık gerilmeler sonlu elemanlar analizi yardımıyla hesaplanmıştır. Bu çalışmada tek pasolu ve çok pasolu iç köşe kaynaklı birleştirmelerdeki artık gerilmelerin dağılımı tek pasolu ve çok pasolu ile oluşturulan kaynaklar aracılığı ile incelenmiştir. Çıkan analiz sonuçları, iç köşe kaynak dikişine bitişik bölgelerde büyük enine çeki artık gerilmelerin olduğunu göstermiştir. Çok pasolu analizde, tek pasolu analize göre daha büyük artık çeki gerilmeleri olduğu saptanmıştır. Ayrıca, oluşan bu artık gerilmelerin üzerine levha kalınlığı, ısı girdisi, kaynak nüfuziyeti ve kaynak sırasının etkileri de incelenmiştir. Nüfuziyet ve ısı

girdisinin artması ile boyuna artık çeki gerilmeleri azalmıştır. Levha kalınlığının artması ile boyuna çeki gerilmeleri de artmıştır [1].

Wang ve arkadaşlarının yaptığı 1996 yılına ait bir çalışmada ise, yüksek sıcaklık çevrimlerine maruz kalan kaynaklı parçalarda meydana gelen karmaşık işlemlerin analizinin bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak gelişim gösterdiği belirtilmiştir. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlılığından ve kaynaklı yapılarda büyük deformasyonların oluşmasından dolayı; malzeme ve geometrik nonlineerliklerin dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda sayısal doğruluk ve kararlılığın önemli olduğu belirtilmiştir. Daha önce birçok araştırmacı tarafından ısıl elastik-plastik analiz üzerine yapılan araştırmalarda özellikle elastikten plastiğe geçiş ve yükün kaldırılması durumlarında hayli yüksek oranlarda sayısal hataların yapıldığını Wang ve arkadaşları bu çalışmada göstermişlerdir [2].

Bir çalışmada ise, kaynaklı yapılarda meydana gelen artık gerilmelerin ve yapının dayanımının tespitinde kaynak işlemi sırasında sıcaklık ve soğuma sürelerinin analizlerinin esas alınması gerekliliği savunulmuş ve son yıllarda nonlineer sıcaklığa bağlı mekanik özelliklere sahip sayısal yöntemlerin geliştirildiğinin önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmada, sıcaklık düşümlerinin çok yüksek olduğu ark membaı çevresinde sık elemanlara bölme ve geri kalan alanlarda daha seyrek ve kaba elemanlara bölme sağlayan zamana bağlı adaptif elemanlara bölme tekniği kullanılmıştır. Literatürde bulunan örnek bir çalışma ile hesaplanan sıcaklık değerleri karşılaştırılarak, yöntem doğrulanmıştır [3].

İç köşe ark kaynaklarındaki zamana bağlı sıcaklık dağılımının tahminine yönelik analitik bir çalışma Jeong ve arkadaşları tarafından 1997 yılında gerçekleştirilmiştir. Bir enerji denklemi yardımıyla sonlu kalınlıktaki sonsuz bir levhanın yüzeyindeki taşınım sınır şartlarıyla, zamana bağlı üç boyutlu ısı taşınım denkleminin çözümüne ulaşılmıştır. Elektrik arkı ısı girdisinin, ilerleyen bir Gaussyan dağılımına sahip olduğu kabul edilerek iç köşe kaynaktaki analiz değerlendirilmiştir. Farklı şartlar altındaki TIG ve özlü tel ark kaynağında yapılan deneyler ile çözümün geçerliliği

kontrol edilmiştir. Tanımlanan şartlar dahilinde yapılan analitik çözümün doğruluğu kabul edilmiştir [4].

Dong ve arkadaşları, çevresel kaynaklı bir boruda meydana gelen artık gerilmeleri üç boyutlu sonlu eleman yöntemi ile hesaplamışlardır. Çevresel olarak hareket eden bir ısı kaynağına sahip kabuk eleman modelinin, düşük maliyetli ve artık gerilmelerin tahmininde başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak başlangıç ve bitiş noktalarına yakın bölgelerdeki zamana bağlı artık gerilme davranışları bu çalışma dahilinde tartışılarak, boru cidar kalınlığının ve kaynak hızının artık gerilmeler üzerindeki etkileri gösterilmiştir [5].

Hong ve arkadaşlarının 1998 yılında yaptıkları çalışmada iki boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak çok pasolu kaynak dikişlerinde meydana gelecek olan tahmini artık gerilmeler hesaplanmıştır. Kullanılan modeller beş pasolu bir levhanın düzlemsel kaynağı ile altı pasolu bir borunun çevresel kaynağıdır. Yapılan deneysel çalışmalarla modellerden elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmış ve kaynak için ısı girdisi büyüklüğü ile başlangıç sıcaklık şartlarının artık gerilmelere etkisi araştırılmıştır [6].

Avustralya Adelaide Üniversitesinde Nguyen ve Wahab tarafından yapılan bir çalışmada da, kaynak geometrisinin ve artık gerilmelerin kombine yüklemeye maruz kaynaklı birleştirmelerin yorulma dayanımlarına etkileri araştırılmıştır. Kaynak ağız açısı, kaynak ağız mesafesi, parça kalınlığı gibi kaynak özellikleri ile artık gerilmelerin alın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı parçanın gerilme ve eğilme yükleri altındaki davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Nümerik model ile elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalar neticesi ile elde edilen bilgilerle karşılaştırılmış ve nümerik model doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, alın kaynağı ile birleştirilen malzemenin yorulma ömrü ve yorulma dayanımını arttırmak amacıyla, kaynak ağız açısını kaynak kökünde azaltma ya da tamamen ortadan kaldırmanın gerekliliği tespit edilmiştir [7].

Teng ve Lin'in 1998 yılında Tayvan'da yürüttükleri çalışmada, alın kaynaklarında kaynak şartlarının artık gerilmelere etkileri tartışılmıştır. Bu çalışmada, tek pasolu

ark kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilen çelik plakalardaki artık gerilmeler sonlu elemanlar tekniği ile hesaplanmıştır. Ayrıca kaynak hızı, numune boyutları, harici mekanik sınırlayıcılar ve ön ısıtma işlemlerinin kaynak ile birleştirme neticesinde oluşan artık gerilmeler üzerindeki etkileri de tartışılmıştır. Yapılan bu çalışmaların neticesinde, alın kaynağında, kaynak dikişinin ortasında çeki gerilmeleri bulunmuştur ve bu gerilmelerin büyüklüğünün akma gerilmesi değerinde olduğu saptanmıştır. Kaynak uçlarında bası gerilmeleri bulunmuştur. Orta bölgelerdeki enine artık gerilmeler artan numune boyu ile azaltılmıştır. Erime bölgesine yakın bölgelerde oluşan çeki artık gerilmelerinin numune kalınlığının azalması ile arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek kaynak hızı, kaynak ark ısısının etkisi altındaki bölgelerde artık gerilmeleri azaltmıştır. Sınırlandırılmış birleştirmelerdeki artık gerilmeler, sınırlandırılmamış birleştirmelere nazaran daha yüksek değerlerde olmuştur. Ön ısıtma işleminin ise kaynak işleminde meydana gelen artık gerilmeleri azalttığı bu çalışma dahilinde gözlenmiştir [8].

Murugan ve arkadaşları, 2001 yılında Hindistan' da AISI 304 tipi paslanmaz çeliklerde ve düşük karbonlu çeliklerde çok pasolu kaynak işlemi sonucunda meydana gelen sıcaklık dağılımı ve artık gerilmeler X-ışını difraksiyon yöntemi ile ölçülmüştür. El ile yapılan çok pasolu ark kaynağı ile birleştirilmiş farklı kalınlıklardaki AISI 304 tipi paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çelik malzemelerde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve artık gerilmeler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kaynak işlemi neticesinde oluşan artık gerilme dağılımını incelemek için, kaynak işlemi sırasındaki sıcaklık dağılımını ölçmenin ve anlamının önemli olduğu belirtilmiştir [9].

Teng ve arkadaşları 2001 yılında T köşe kaynaklarında meydana gelen artık gerilme ve distorsiyonların sonlu elemanlar yöntemi ile analizini araştırdılar. T köşe dolgu kaynaklarındaki termo mekanik davranışların analizi ile artık gerilmelerin ve açılmal distorsiyonların hesabı sonlu elemanlar yöntemi ile bulunarak termo elasto-plastik analizini açıklamışlardır. Ayrıca bu çalışmada T köşe dolgu kaynaklarında zamanla kaynak yerinin besleme değişimini simüle ederek, elemanın doğma ve ölmesi tekniğini (Birth and Death) açıklamaktadır. Bundan başka, parça kalınlığının, kaynak nüfuziyet derinliğinin ve kaynakta kısıtlama durumlarının artık gerilme ve

distorsiyonlar üzerindeki etkileri de tartışılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde, enine artık gerilmelerde kaynak dikişine yakın bölgelerde yüksek çeki gerilmelerinin olduğu ve bu bölgeden uzaklaştıkça gerilme değerlerinin sıfıra kadar düştüğü tespit edilmiştir. Boyuna artık gerilmelerde ise, kaynak dikişi yakınlarında yüksek çeki gerilmeleri mevcutken, kaynak dikişinden uzak bölgelerde bası gerilmelerinin olduğu görülmüştür. Parça kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı, açılmal distorsiyonlara neden olurken, flanş yukarı doğru eğmektedir. Flanş kalınlığını arttırmanın, kaynak dikişindeki çeki artık gerilme değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Nüfuziyet derinliğinin veya ısı girdisi değerini arttırmak, kaynak dikişine yakın bölgelerdeki çeki artık gerilmelerin değerini düşürdüğünü göstermişlerdir [10].

Bu çalışmanın amacı, kaynaklı birleştirmelerdeki prosesi sonlu elemanlar kodu ANSYS' i kullanarak simüle etmektir. Köşe kaynağında meydana gelen elasto-plastik gerilmeler dört farklı kaynak bağlantı modeli oluşturulduktan sonra, parçanın mekanik ve fiziksel özellikleri de göz önünde bulundurularak modellerde birbirleri ile karşılaştırılmışlardır. Meydana gelen eşdeğer gerilmeler, yer değiştirmeler, soğuma zamanları ile artık gerilmelerden kaynaklanan elastik ve plastik deformasyonlar, sonlu elemanlar kullanılarak bilgisayar yardımıyla incelenmiştir.

BÖLÜM 2. KAYNAK İŞLEMİ

2.1. Kaynak İşleminin Tanımı

Kaynak ile birleştirme işlemi için birbirlerine eşdeğer iki tanım yapılabilir. Makroskobik anlamda kaynak, iki veya daha fazla parçayı aralarında malzeme sürekliliği sağlanarak birleştirmektir. Süreklilik, kaynak bölgesi malzemesi ile iş parçalarının aynı malzeme özelliklerinde olmasıdır. Mikroskobik anlamda kaynak etmek, birleştirilecek parçaların birleşme yüzeylerindeki atomlarının karşılıklı çekme bölgelerine getirilmesidir [11].

Kaynak işlemi, birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla parçayı ısı, basınç ya da her ikisi kullanılarak aynı türden bir malzeme katarak veya katmadan yapılan birleştirme işlemidir.

Metal kaynağı yöntemleri, uygulanan enerjinin şiddeti ve türüne göre ergitme kaynağı, basınç kaynağı olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca uygulanan işlemin amacına göre birleştirme ve dolgu kaynağı olarak da sınıflandırabiliriz.

Kaynak ana malzemesine göre, metal kaynağı ve plastik kaynağı olarak iki gruba ayırabiliriz.

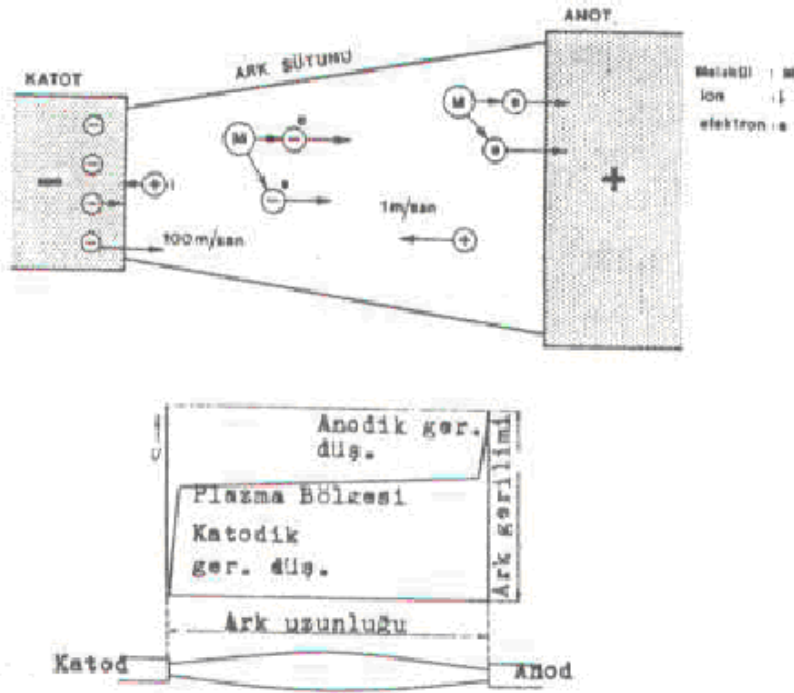
Uygulanan kaynak yöntemine göre ise el kaynağı, yarı mekanize kaynak, tam mekanize kaynak ve otomatik kaynak olarak sınıflandırma yapabiliriz.

2.2. Elektrik Ark Kaynağı

Kaynak işlemi için gerekli ısı enerjisi elektrot ile iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı aracılığı ile sağlanan ergime kaynağı türüdür.

Bir gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasında bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştiği takdirde, bu iki plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve bir elektrik akımı akar. Burada akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan sistemler sınıflandırılmıştır. Eğer bu akımın şiddeti 10 Amperden büyük ise elde edilen sistem elektrik arkı adını alır.

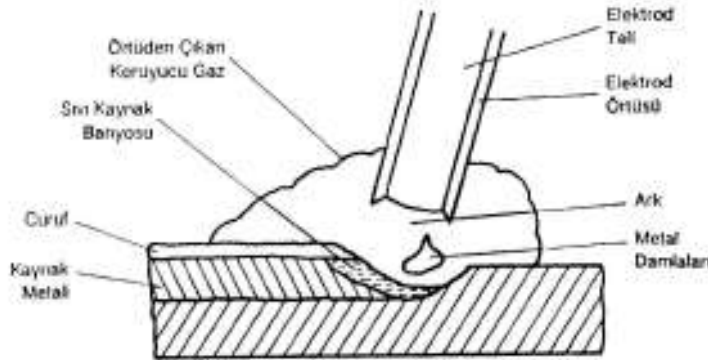
Bir elektrik arkında artı kutba anod, eksi kutba katod adı verilir. Anod ile katod arasında uygulanan gerilim sonucu ortaya çıkan elektrik alanı tesiri ile elektronlar (-) kutuptan (+) kutba doğru, iyonlar (+) kutuptan (-) kutba doğru hareket ederler. Elektrik arkı mekanizmasının şematik gösterilişini Şekil 2.1' de görebiliriz [11].



Şekil 2.1 Elektrik arkı mekanizmasının şematik gösterilişi

Örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağında, ark ergiyen elektrot ile iş parçası arasında yanar ve ergiyen elektrot ile ergiyen iş parçası kaynak metali haline gelir. O anda elektrot örtüsü yanarak ergir, kısmen iyonize ve kısmen buharlaşma ile açığa çıkan gaz ark bölgesini korur. Meydana gelen cüruf kaynak dikişini örterek kaynak

bölgesini korur. Örtülü elektrot ile ark kaynağında kaynak bölgesinin şematik gösterimini Şekil 2.2' de görebiliriz [12].



Şekil 2.2 Örtülü elektrot ile ark kaynağında kaynak bölgesi

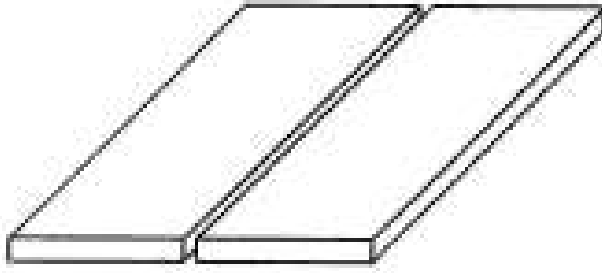
Ayrıca elektrot örtüsüne katılan alaşım elementleri yardımıyla, kaynak dikişini alaşımlandırarak, istenen özelliklerde kaynak bağlantısı elde edilebilmektedir.

2.3. Kaynaklı Birleştirme Çeşitleri

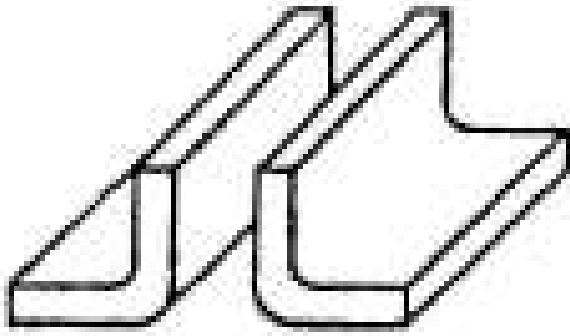
Kaynaklı birleştirme tasarımında uygulanan birleştirme türleri üç ana gruba ayrılabilir.

2.3.1. Alın kaynaklı birleştirmeler

İki parçanın aynı düzlem üzerinde birbirleri ile alın altına kaynakla birleştirilmesidir. Üç grupta toplanabilir. Kıvrık Alın Birleştirme, Küt Alın Birleştirme , V veya X Alın Birleştirme. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4' de Alın ve Kıvrık Alın Birleştirmeler gösterilmiştir.



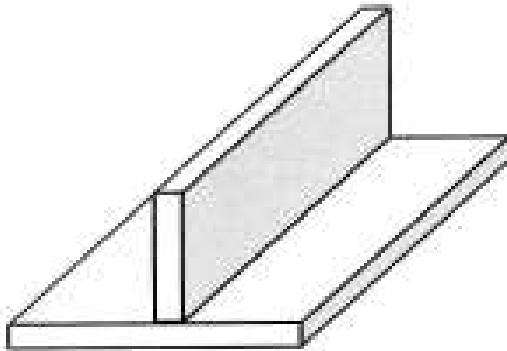
Şekil 2.3 Alın birleştirmeler



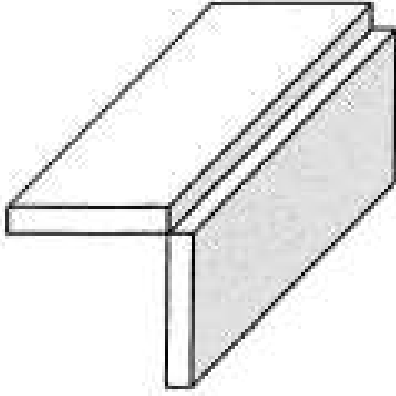
Şekil 2.4 Kıvrık alın birleştirmeler

2.3.2. İç köşe ve dış köşe kaynaklı birleştirmeler

İki parça düzlemlerinin birbirine dik pozisyonlarda birleştirilmesidir. Şekil 2.5 ve 2.6' da İç ve Dış Köşe kaynaklı birleştirmeler gösterilmiştir.



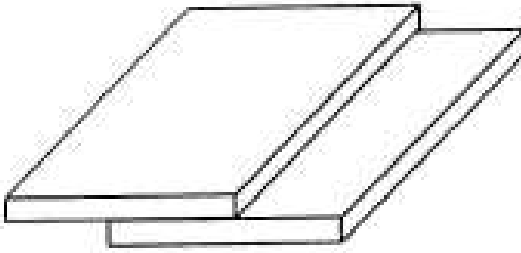
Şekil 2.5 İç köşe birleştirmeler



şekil 2.6 Dış köşe birleştirmeler

2.3.3. Bindirme kaynaklı birleştirmeler

Bu birleştirme türünde, kaynak işlemi iki sac birbirlerinin üzerine konularak yapılır. Kaynakçı açısından yapılması en zor kaynaklı birleştirme türüdür. Çünkü kaynakçı iki parçaya ısı dağılımını eşit uygulamak zorundadır. Eğer buna dikkat edilmez ise, üstteki parça ergimeye başlarken diğer parça henüz ısınmamış olabilir. Bindirme Kaynağı Birleştirmeleri ile ilgili şekil aşağıda gösterilmiştir [12].



şekil 2.7 Bindirme kaynağı birleştirmeleri

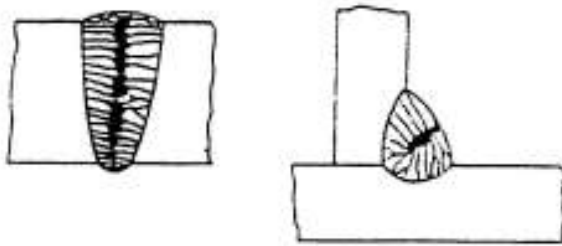
BÖLÜM 3. ÇELİKLERİN ISIL ÖZELLİKLERİ VE KAYNAK BÖLGESİ

3.1. Çeliklerin Ergitme Kaynağında Kaynak Bölgesi

Kaynak bölgesi ikiye ayrılır. Bunlar, kaynak metal ve ısının tesiri altındaki bölgedir (ITAB).

Ergiyen bölge, kaynak banyosunda meydana gelen türbülans dolayısıyla katılaşmadan önce birbirlerine karışmış esas metal ve kaynak metalinden oluşur. Uygulanan kaynak yöntemi ve kaynak ağız formuna bağlı olarak karışımdaki esas metalin kaynak metaline oranı değişiklikler gösterebilir.

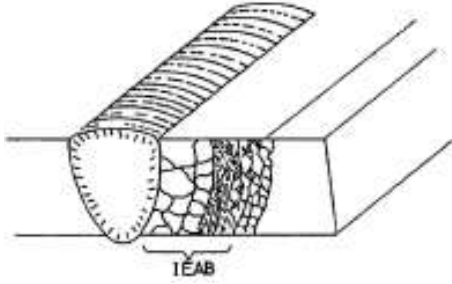
Kaynak metalinin katılaşması, kendini çevreleyen esas metale ısı iletimi ile olur ve bölgenin yapısı iri ve uzun tanelidir. Kalın parçaların nüfuziyet kaynağında, ergiyen bölgenin ortasında segregasyondan dolayı bir boşluk meydana gelir. Bu durum Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Alın ve köşe birleştirmelerinde segregasyon bölgeleri

Isının tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak metalinin esas metal ile birleştiği kısımdan itibaren takriben 1400 ile 700°C arasında bir sıcaklığın etkisi altındaki

bölgedir. Çelik malzemenin kaynağında bu bölgedeki tane yapısının değişimi Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Isının etkisi altındaki bölgedeki tane yapısı değişimi

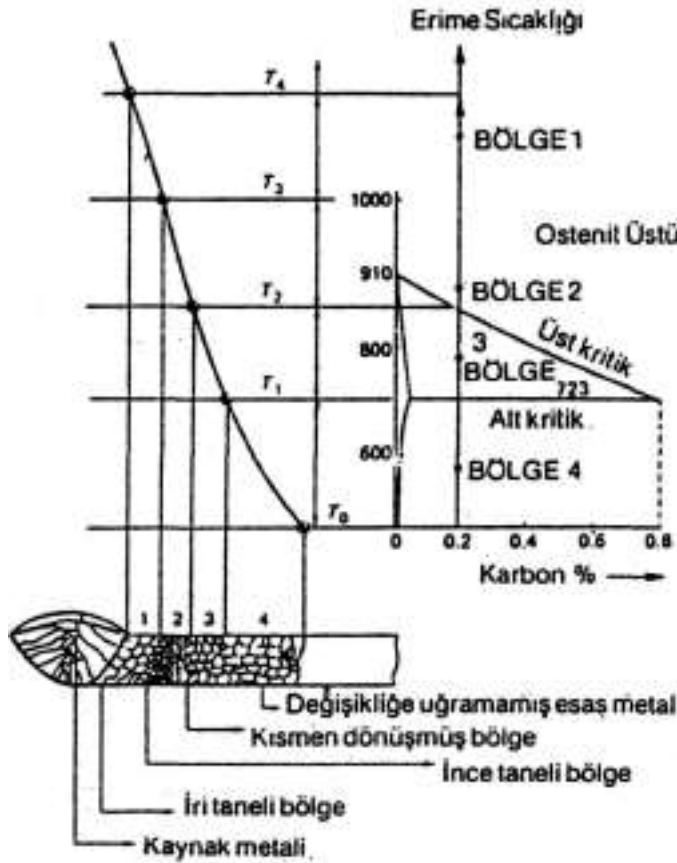
Bu bölgenin sıcaklık dağılımı, kaynak şartlarına bağlıdır. Isının etkisi altındaki bölgedeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı bilirse, kaynaktan sonraki iç yapının bilinmesi mümkün olabilir. Çelik malzemenin kaynağında bu bölgedeki sıcaklığa bağlı tane yapısı değişimi Şekil 3.3' de gösterilmiştir.

3.2. Çeliklerin Isıl Özellikleri

Kaynak işlemi vasıtasıyla birleştirilen metallere uygulanan ısı çevrim, kaynak bölgesinde metalürjik dönüşümler meydana getirir ve bu dönüşümler neticesinde malzemelerin mekanik özellikleri değişir. Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımı ve değişimi bilindiği takdirde bu özelliklerdeki değişimler önceden tahmin edilebilir.

Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımı ve değişiminde, malzemenin ısı özellikleri ve kaynak edilecek parçaların geometrisi etkilidir.

Kaynak işlemi esnasında kaynak bölgesi sıcaklığının malzemenin ilk sıcaklığı ile ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklık değeri arasında geniş bir aralıkta değişmesi, malzemenin ısı özelliklerinde de çok büyük değişiklikler meydana getirir. Isıl özellikler sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişmektedir.



Şekil 3.3 Kaynak sırasında ısının tesiri altındaki bölge

3.2.1. Isı iletim katsayısı

Malzemenin fiziksel bir özelliğidir ve ısı iletim kabiliyetini gösterir. Birim zamanda, birim yüzeyden, birim uzunlukta $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık düşümü halinde ısı akımı miktarına eşittir. Her metal için farklıdır ve metalin yapısına ve sıcaklığına bağlıdır.

Kaynak yapılan metalin sıcaklığı, ortam sıcaklığı ile ergime sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklığa kadar değişiklik gösterdiğinden, ısı iletim katsayısı da sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir.

Çeliklerde ısı iletim katsayısı, bileşimindeki karbon ve diğer alaşım elementlerinin cinsine ve miktarına bağlı olarak değişir. Karbon miktarı arttıkça ısı iletim kabiliyeti azalmaktadır.

3.2.2. Özgül ısı

Özgül ısı, birim kütledeki maddenin sıcaklığını bir derece değiştirebilmek için gerekli ısı enerjisine denir. Teorik olarak quantum teorisine göre hesaplanabilmekte ise de deneysel olarak tespit edilir.

3.2.3. Yoğunluk

Çeliklerin yoğunluğu, içerisindeki karbon miktarı, alaşım elementleri ve sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir.

3.2.4. Isı transfer katsayısı

Isı transfer katsayısı, α , ortamın fiziksel bir özelliğidir ve $\alpha = k / \rho^c$ şeklinde formüle edilebilir. Burada, k ısı iletim katsayısını, ρ yoğunluğu ve c özgül ısıyı simgelemektedir.

3.3. Elektrik Ark Kaynağında Sıcaklık Dağılımı

3.3.1. Ark ısı

Kaynak işleminin gerçekleşebilmesi için, kaynak yöntemine uygun bir ısı enerjisine ihtiyaç duyulur. Elektrik ark kaynağında, kaynak enerjisi olarak arkın ısı enerjisinden faydalanılır.

Anod ile katod arasına uygulanan gerilim ile katod önünde oluşan elektrik alanı sayesinde katoddan elektron çıkar. Anoda doğru,

$$F = -e * E$$

3.1

kuvveti ile hareket eden elektronlar, önüne gelen kütlelere çarpar. atomlardan elektron çıkarır ve her çıkan elektron aynı yöne giderken çıkan iyonlar ters yöne doğru giderler.

Elektronlar anoda, iyonlarda katoda ulaşarak nötr olacaklardır. Elektronlar anoda çarpınca kinetik enerjilerini verirler ve anoddan (+) ve (-) yüklü parçacıkları çıkartırlar. (+) yüklü iyonlarda katoda çarpınca aynı Şekilde (+) iyon ve (-) elektron çıkarırlar.

Bu elastik ve plastik çarpışma ısıya dönüşür. ıkan ısı enerjisi kutupları ısıtır. Bu ısı enerjisi ile kutuplardan elektron çıkar.

Kızgın katodun, anodun ve arkın sıcaklığı, uygulanan gerilim ve akım Şiddetine göre 5000 ila 20000 °K arasında değişim göstermekle beraber çoğu araştırmada 6000 °K civarında olduğu kabul edilmiştir [13].

3.3.2. Kaynak bölgesinde sıcaklık dağılımı

Kaynak işleminde, kaynak edilecek malzemelere verilecek ısı enerjisi, metalin ergimesini sağlayarak ısı geçiş kanunlarına göre metal sac içerisinde yayılır.

Kaynak işleminde, ısının etkisi altındaki bölgenin özelliklerini önceden tahmin edebilmek ve uygulanan sıcaklığın elik malzemenin özelliklerine etkilerini inceleyebilmek açısından kaynak esnasında parçalara uygulanan ısıl çevrim (ısınma ve soğuma) bilinmelidir.

Malzemelere uygulanan ısıl işlem çevrimlerinin, malzeme özelliklerinde meydana getireceği değişiklikleri saptayabilmek için; ısınma hızı, erişilen maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklıkta kalma süresi ve soğuma hızı kavramlarının bilinmesi gerekmektedir.

Normal endüstriyel ısıl çevrimlerden farklı olarak, kaynak işleminde malzemelere uygulanan ısıl çevrimi kontrol altında tutabilmek çok zordur. Kaynak işleminde ısınma hızı ve maksimum sıcaklıkta kalma süresinin neticeye tesiri çok azdır. Isıl çevrimde esas dikkate alınması gereken faktörler erişilen maksimum sıcaklık ile soğuma hızıdır.

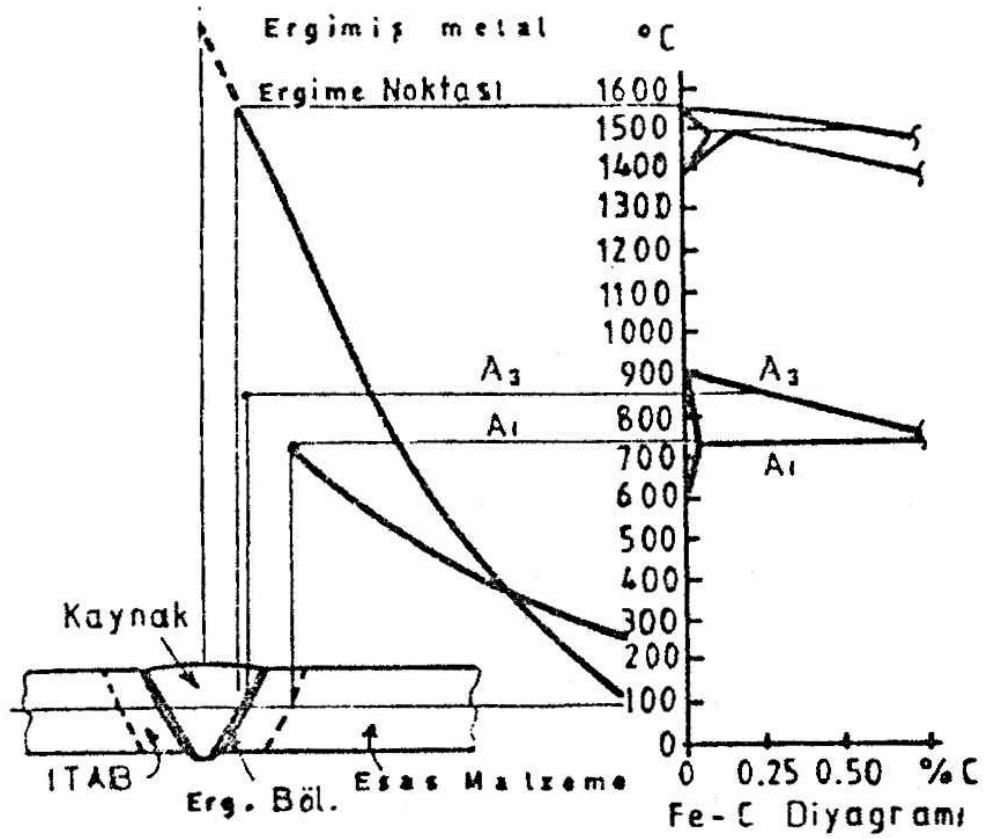
3.3.3. Soğuma hızı

Kaynak işlemi ile birleştirilen parçaların, ısının etkisi altındaki bölgede içyapılarına etki eden en önemli değişken soğuma hızıdır.

Sıcaklık dağılımını veren denklemlerden hareket edilerek herhangi bir noktadaki soğuma hızını veren denklemleri elde edebilmek mümkündür. Bu denklemlerden hesaplanan soğuma hızına göre de, kaynak işlemi neticesinde ısının etkisi altındaki bölgede meydana gelecek iç yapı ve mekanik özellikler önceden belirlenerek kaliteli ve emniyetli kaynaklı birleştirmeler yapılabilir. Bu sebepten dolayı kaynak işleminde soğuma hızının bilinmesi önemli bir faktördür.

3.4. Çeliklerde Kaynak Bölgesi

Kaynak dolgusunun bulunduğu ve kaynak işleminde uygulanan ısıdan etkilenen tüm bölgelere kaynak bölgesi adı verilir. Bu bölge, kaynak metali ve ısının etkisi altındaki bölge olmak üzere iki ana bölgeye ayrılır. Ergime bölgesi ile ısının etkisi altındaki bölgeyi birbirinden ayıran ergime sınırı ve kaynak ısısından etkilenmeyen bölge ile de birbirinden farklı dört bölge meydana gelir. Bu bölgeleri Şekil 3.4' de görebiliriz.



Şekil 3.4 Çeliklerde kaynak bölgesi

Ergime bölgesi, ısının etkisiyle ergiyen ve daha sonra katılaştıran bölgedir. Kaynak metalini (ilave metal) ile esas metalin karışımından meydana gelir.

Esas metalin kaynak metaline oranı; uygulanan kaynak yöntemine ve paso sayısına bağlı olarak değiştiğinden, ergime bölgesinin karışım oranı bilinse bile bu bölgenin bileşimini hesaplamak imkânsızdır. Çünkü alaşım elemanlarının bir kısmı yanma ile yok olurlar.

Kaynak banyosu katılaştıkça, kaynak yerine verilen ısının büyük bir bölümü ısı iletimi yolu ile esas metal üzerinden transfer edilir.

Ergime çizgisi, ergiyen ve ergimemiş ısının etkisi altındaki bölgeyi birbirlerinden ayıran ara yüzeydir. Bu sınır parlatma ve dağlama işlemleri ile çıplak gözle görülebilmektedir.

Isının etkisi altındaki bölge, 1450 °C ile 700 °C arasında değişim gösterir. Ulaşılan maksimum sıcaklık ile bağlantılı olarak farklı özelliklerde bölgeler meydana gelebilir.

Kaynak ile birleştirme işleminde, ısının etkisi altındaki bölge çok hızlı olarak ısınır ve bununla birlikte parça kalınlığı, ısı kaynağının şiddeti, varsa ön tavlama sıcaklığı ve çelik malzemenin ısıl özelliklerinin fonksiyonu olarak hızla soğumaktadır.

Soğuma hızı, çelik malzemenin bileşimine bağlı olarak kritik soğuma hızını aştığında ve özellikle 900 °C üzerindeki bir sıcaklığa kadar ısınan bölgelerde sert ve gevrek martenzitik yapı oluşur. Bu sebepten dolayı kaynak işleminde en kritik bölge ısının etkisi altındaki bölge olmaktadır.

BÖLÜM 4. KAYNAK İŞLEMİNDE OLUŞAN ARTIK GERİLMELER VE OLUŞUM NEDENLERİ

4.1. Kaynak İşleminde Artık Gerilmeler

Bir kaynaklı parçada tüm dış yükler kaldırıldıktan sonra kalan gerilmelere artık gerilmeler adı verilir. Literatürlerde artık gerilmeleri tanımlamak için farklı teknik terimler kullanılmıştır. Bunlar iç gerilmeler, başlangıç gerilmeleri, reaksiyon gerilmeleri, hap solmuş gerilmeler ve doğal gerilmeler olarak adlandırılabilir. Uniform olmayan sıcaklık değişimine maruz kalan bir yapıdan meydana gelen gerilmelere ısıl gerilmeler denmektedir.

Kaynak işleminde malzemeler lokal olarak ergime sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Ancak soğuma işlemi, ısıtma işlemine nazaran daha yavaş gerçekleşir. Isıtma ve soğuma işlemleri arasındaki bu farklılıklar neticesinde kaynak ile birleştirilen malzemelerde artık gerilmeler ve distorsiyonlar oluşur.

4.2. Artık Gerilmelerin Oluşum Nedenleri

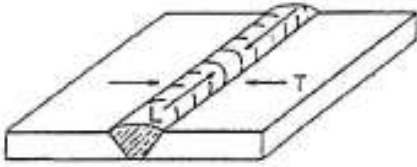
Kaynak işlemi ile lokal olarak ergime sıcaklığına kadar ısıtılan kaynaklı parçalarda, soğuma işlemi parça genelinde ve ısınma işlemi hızına nazaran daha yavaş meydana gelir. Bu sebepten dolayı, soğuma işlemi esnasında kaynaklı parçadaki sıcaklık dağılımı uniform değildir ve bağlantı boyunca yapısal ve metalürjik değişiklikler meydana gelir.

Soğuma işleminin başlamasıyla, kaynak metali ve kaynak metaline bitişik ısının etkisi altındaki bölgenin sıcaklıkları, esas metalin sıcaklığından çok daha yüksektir.

Kaynak dikişi katlaşıp, büzülürken, kendisini çevreleyen esas metal, ısı etkisi altındaki bölgeye gerilme uygular. Kaynak metali, katılmanın başlangıcında

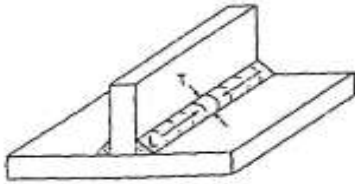
sıcaktır ve mekanik özellikleri esas metale nazaran daha zayıftır. Bu sebeple uyguladığı gerilmenin değeri düşüktür. Kaynak bölgesinin sıcaklık değeri ortam sıcaklığına ulaşana dek uygulanan gerilme değeri artar ve esas metal ile ısının etkisi altındaki bölgenin akma dayanımına ulaşır.

Kaynak işlemi esnasında, yeni katılaştıran bölgeler, kaynak dikişinin diğer bölgelerinin büzülmesine karşı koyarlar. Şekil 4.1' de gösterildiği gibi, ilk kaynak yapılan bölgeler kaynak dikişi doğrultusunda çekiye zorlanırlar. Alın birleştirmelerde, kaynak ağız formundan ya da mevcut pasoların sınırlayıcı etkisinden dolayı kaynak bölgesinin enine hareketi yok denecek kadar azdır. Kaynak dikişindeki büzülmenin neticesinde Şekil 4.1' de görülen enine artık gerilmeler meydana gelecektir.



Şekil 4.1 Bir alın dikişindeki enine (T) ve boyuna (L) büzülme gerilmeleri

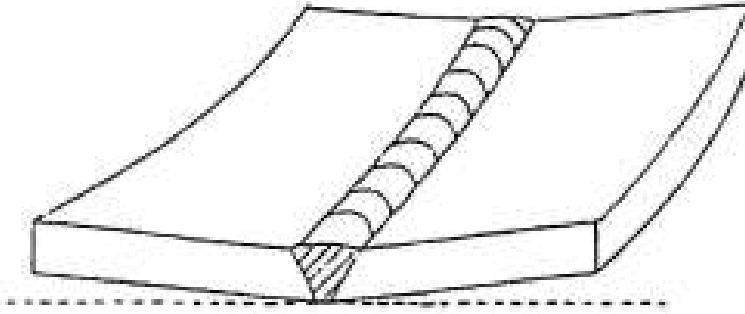
İç köşe kaynaklarında, kaynak dikişinde meydana gelen gerilmeler Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Büzülme neticesiyle meydana gelen bu gerilmeler, kaynak yüzeyine dik ve paralel çeki gerilmeleridir.



Şekil 4.2 Bir T bağlantısındaki enine ve boylamasına büzülme gerilmeleri

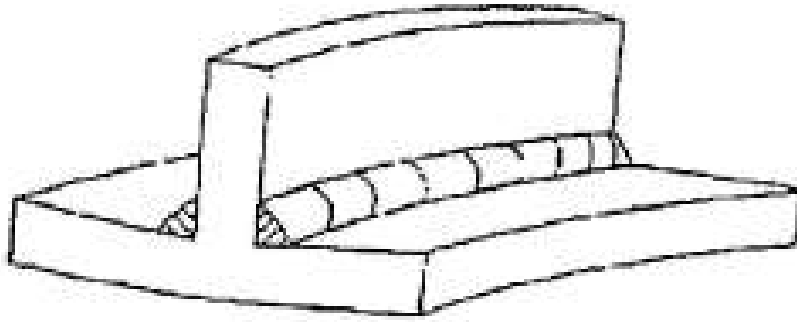
Kaynak işlemi neticesinde kaynaklı parçalarda meydana gelen artık gerilmeler, ya distorsiyona yol açarlar ya parçada erken hasara sebep olurlar ya da her ikisine de

neden olmadan sadece iç gerilme olarak kalabilirler. Bu etkiler ayrı ayrı gerçekleşebileceği gibi aynı anda da parçada gerçekleşebilir. Kaynak işlemi neticesinde ısınan kaynak bölgesi uniform olmayan büzülme davranışı gösterir, çünkü kaynak dikişinin enine kesitindeki büzülme, bu enine kesite eksantrik kuvvetler uygular ve böylece büzülme miktarları eşit olmaz. Sonuç olarak distorsiyon meydana gelir. Kaynaklı parçalar gerilmeler neticesinde elastik olarak şekil değiştirir ve parçada gözle görülebilecek oranda distorsiyonlar meydana gelir. Alın birleştirmelerde, kaynak dikişinin üst bölgesi, kök bölgesine nazaran daha fazla büzülür. Bu sebeple bu tip kaynaklı birleştirmelerde uzunlamasına, enine çarpılmalara ek olarak açısız çarpılma da meydana gelebilir. Açısız çarpılmalar, kaynak dikişi boyunca levhada enine eğilmelere neden olur. Bu etkiler Şekil 4.3' te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Bir alın kaynaklı birleştirmede distorsiyon

İç köşe kaynaklarında da, Şekil 4.4' te görülebileceği gibi alın kaynağındakine benzer enine, boyuna büzülme ve açısız distorsiyonlar görülür.



Şekil 4.4 Bir T bağlantıdaki distorsiyon

Farklı tekniklerle, kaynak işlemi sonucunda oluşacak distorsiyonlar engellenebilir. Bu tekniklerden birinde parça kaynak işlemi sonunda oluşması istenen geometride yerleştirilir ya da kaynak esnasında distorsiyona uğraması engellenir. Bir başka teknikte ise, kaynak metali, simetri ekseninin her iki tarafında dengeli olacak şekilde konstrüksiyon tasarlanır ve bu dizayn doğrultusunda kaynak yapılır. Seçilen kaynak yöntemi ve kaynak sırası, distorsiyon ve artık gerilme oluşumunda çok etkili parametrelerdir. Distorsiyona uğrayan kaynaklı parçalar eğer gerek görülürse, kaynak işleminden sonra ısı işlemlerle doğrultulabilir.

Kaynaklı parçada meydana gelen artık gerilme ve distorsiyonlar, malzemelerin kırılma davranışını etkiler. Düşük değerlerdeki harici gerilmelerde dahi burkulma ve gevrek kırılma meydana gelir. Parçada artık gerilme ve distorsiyonların birlikte olması halinde, burkulma beklenenden çok daha düşük bası zorlamalarında meydana gelir. Çeki halinde ise, düşük tokluğa sahip kaynak bölgelerinde artık gerilmeler yüksek lokal gerilmelere sebep olur ve sonuç olarak düşük değerlerdeki gerilmeler tarafından ilerletilebilen gevrek tip çatlaklar oluşturulabilir. İlâveten artık gerilmeler yorulma ve korozyon hasarlarını da artırır.

Kaynaklı parçalarda, kaynak işlemi neticesinde meydana gelen artık gerilmeleri azaltmak için ısı işlemler uygulanabilir. Isıl gerilim giderme işlemlerinde parça malzemesinin akma sınırı, plastik şekil değişiminin oluşabileceği daha düşük seviyeye düşürülür ve böylece gerilmeler azaltılır. Isıl gerilim giderme işlemlerinden parçanın mekanik özellikleri de etkilenir. Örneğin, kaynaklı parçada ısının etkisi

altındaki bölge temperlenerek kaynak dikişindeki artık gerilmeler azaltıldığında, çelik parçaların gevrek kırılmaya karşı direnci artar.

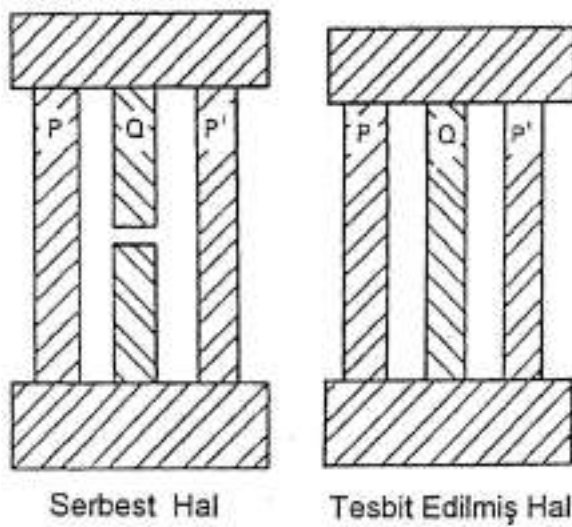
Kaynaklı metal yapılarda güvenilirliğin artırılması çok önemlidir. Mühendislerin tasarım aşamasında, artık gerilme ve distorsiyonun etkilerini, süreksizliklerin varlığını, parçanın mekanik özelliklerini, tahribatsız deney şartlarını ve toplam imalat maliyetlerini göz önünde bulundurmaları gerekmektedir.

4.3. Artık Gerilmelerin Oluşumu

Kaynak işlemi neticesinde kaynaklı parçada meydana gelen artık gerilmeler, kendilerini oluşturan mekanizmalara göre; yapısal uyumsuzluk ya da ısıl genleşmeler sonucunda oluşan gerilmeler olarak sınıflandırılabilir.

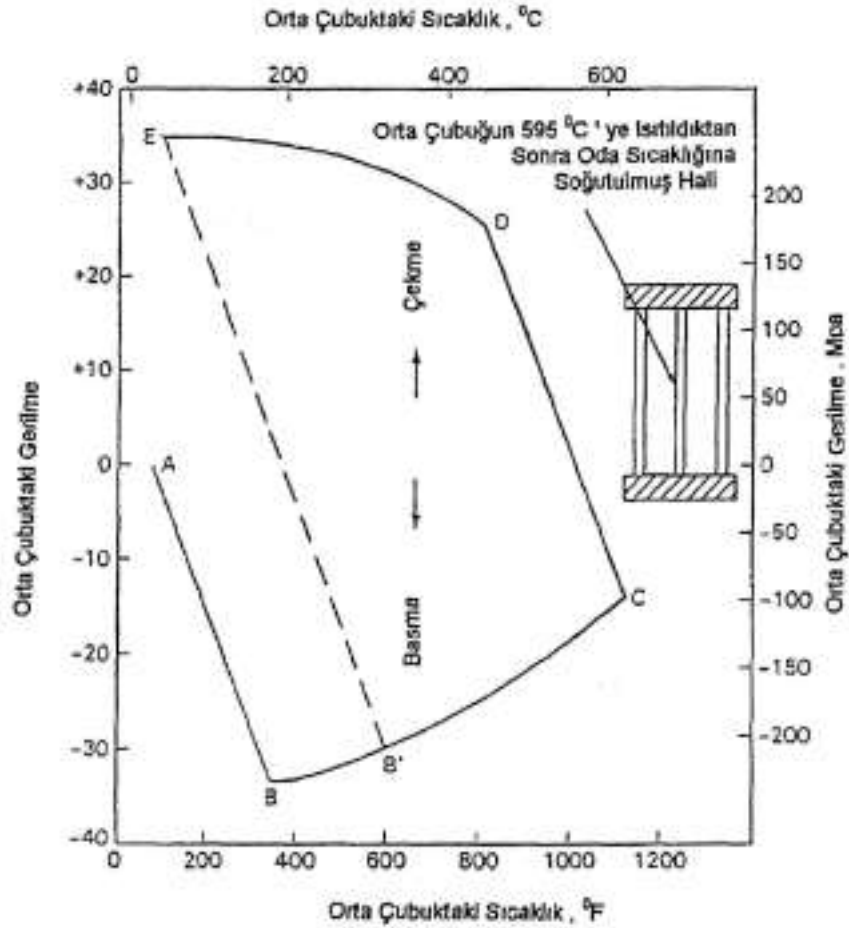
4.3.1. Yapısal uyumsuzluk neticesi ile meydana gelen artık gerilmeler

Şekil 4.5' te gösterilen farklı uzunluktaki çubukların uç bölgelerinden birbirine birleştirilmesi örneği artık gerilme oluşmasına ait klasik bir örnektir [14]. Kısa çubukta Q çeki gerilmeleri, uzun çubuklarda ise P ve P' bası gerilmeleri meydana gelmektedir.



Şekil 4.5 Farklı uzunluktaki çubukların uç bölgelerinden birleştirilmeleri sonucu oluşan artık gerilmeler

Şekil 4.6' da ise ısıtma ve soğutma çevrimi sebebiyle oluşan artık gerilmeler açıklanmıştır. Uzunluk ve kesitleri aynı alaşımsız yapı çeliğinden üç adet çubuk, uçlarından iki rijit parça ile birleştirilmiştir. Bu iki parça ve ortadaki çubuk 595°C ' ye ısıtılmış, dıştaki iki çubuk oda sıcaklığında tutularak, orta çubuk oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Şekil 4.6' da, sistemde meydana gelen artık gerilmeleri göstermek için, orta çubuktaki gerilmelerin sıcaklık ile değişimi grafik olarak gösterilmiştir. Dışta bulunan iki çubuk, ortadaki çubuğun deformasyonuna karşı koyar. Bu sebepten dolayı, dıştaki iki çubuktaki gerilmelerin her biri, orta çubuktaki gerilme değerinin yarısına eşittir ve ters yöndedir [14].



Şekil 4.6 Tespit edilmiş çubuğun ısıtılmasının artık gerilmeler üzerine etkisi

Orta çubuk ısıtılmaya başladığında, çubukta bası gerilmeleri oluşur, çünkü çubuktaki genleşme, dıştaki çubuklar tarafından engellenir. Orta çubuktaki sıcaklık arttıkça, AB çizgisinde gösterildiği gibi bası gerilmeleri artar. Bası halindeki akma

dayanımına (B noktası) 170°C sıcaklık değerinde ulaşılır. Sıcaklık bu değer üzerinde çıkarken, orta çubuktaki gerilme, BC eğrisinden görülebileceği gibi sıcaklıkla azalan akma dayanımı ile sınırlıdır. Orta çubuk 595°C sıcaklığa ulaştığında ısıtma işlemi C noktasında kesilir.

Soğuma işlemi esnasında, orta çubukta elastik davranış görülür. Orta çubukta gerilme değeri aniden düşer, bası halinden çeki haline dönüşür ve kısa bir sürede D noktasındaki akma dayanımına ulaşır. Sıcaklık daha da düşerken, orta çubuktaki gerilme tekrar DE eğrisi ile gösterilen sıcaklığa bağlı akma dayanımıyla sınırlı kalır. Böylece orta çubukta, oda sıcaklığında akma dayanımına eşit bir artık çeki gerilmesi meydana gelir. Dıştaki çubuklarda ise, bası artık gerilmeler bulunur ve orta çubuktaki gerilme değerinin yarısına eşittir.

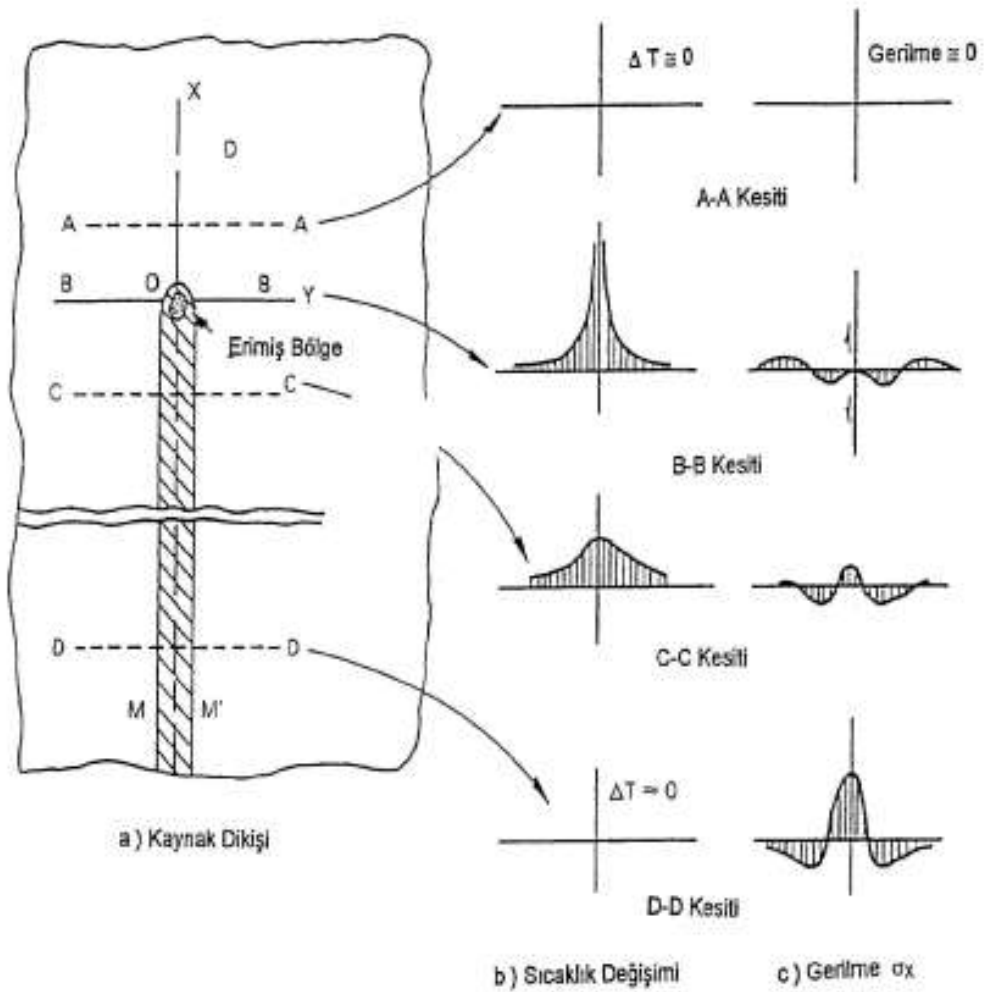
Eğer B ve C noktaları arasında orta çubuğun ısıtılması kesilip oda sıcaklığına kadar soğutulsa idi, akma gerilmesinin seviyesi, DE eğrisi üzerine ulaşana kadar, çeki gerilmesi B'E 'ye paralel bir hat boyunca elastik olarak oluşur, oda sıcaklığına geldiğinde ise, artık gerilmelerin son durumu aynı kalırdı.

4.3.2. Isıl gerilmeler neticesinde meydana gelen artık gerilmeler

Şekil 4.7' de kaynak işlemi esnasında sıcaklık ve gerilmelerdeki değişiklikler şematik olarak gösterilmiştir. Bir levha üzerinde x-x doğrultusu boyunca kör bir paso oluşturulmuştur. Yerel bir O noktasında, v sabit hızıyla hareket eden kaynak arkı Şekil 4.7-a' da gösterilmiştir.

x-x doğrultusu üzerinde A,B,C ve D noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.7-b' de açıklanmıştır. Kaynak arkı önündeki A-A kesitinde, kaynak sebebi ile oluşan sıcaklık değişimi hemen hemen sıfırdır. Kaynak arkı gerisindeki B-B kesitinde ise sıcaklık dağılımı dikdir. Kaynak arkı gerisindeki C-C kesitindeki sıcaklık dağılımında diklik daha azdır. Çok geride kalan D-D kesitinde ise sıcaklık değişimi neredeyse sıfırdır ve uniform bir dağılıma sahiptir.

A-A, B-B, C-C ve D-D kesitlerindeki x yönündeki gerilmelerin dağılımı (σ_x) Şekil 4.7-c' de verilmiştir. A-A kesitindeki kaynak sebebiyle meydana gelen ısıl gerilmeler sıfırdır. Kaynak dikişi altındaki B-B kesitindeki gerilmeler de sıfıra yakındır çünkü sıvı metal yük taşımaz. Isının etkisi altındaki bölgelerdeki gerilmeler, bası gerilmeleridir çünkü düşük sıcaklıktaki çevre metaller (esas metal) bu bölgelerin genişmesini engeller. Kaynak arki yakınındaki metal sıcaklığı çok yüksektir ve sonuç olarak akma dayanımları düşüktür. Bası gerilmeleri, metalin mevcut sıcaklığındaki akma seviyesindedir. Kaynak bölgesinden uzaklaştıkça bası gerilmelerinin değeri bir maksimum değeri ulaşır. Denge şartlarından dolayı belirli bir uzaklıkta, çeki gerilmelerinin, ısının etkisi altındaki bölgelerdeki bası gerilmeleri ile dengelenmesi gerekir. B-B kesitindeki bu denge durumu ve gerilme dağılımı Şekil 4.7-c' de ifade edilmiştir.



Şekil 4.7 Sıcaklık ve gerilme dağılımı

C-C kesitinde, kaynak metali ve ısının etkisi altındaki bölge artık soğumuştur ve büzölmeye başlar. Bu nedenle kaynak metali çeki gerilmelerine sebep olur. Şekil 4.7c' de, gerilme dağılımından da göröleceği gibi oluşan çeki gerilmeleri, esas metaldeki bası gerilmeleri tarafından dengelenmiştir.

Artık gerilmelerin son durumu D-D kesitinde gösterilmiştir. Bu kesit boyunca, kaynak dikişinden uzakta esas metalde bası gerilmeleri, kaynak dikişi ve ısının etkisi altındaki bölgelerde ise çok yüksek çeki gerilmeleri meydana gelmiştir. Tüm bu gerilme dağılımları Şekil 4.7-c' de gösterilmiştir.

BÖLÜM 5. ELASTO PLASTİK GERİLME ANALİZİ TEORİSİ

5.1. Elasto Plastik Gerilme Analizi

Malzeme davranışı Hook yasasına uygun olarak $\sigma = E\varepsilon$ ile incelenir. Buna göre uygulanan yük kaldırıldığında eleman başlangıç boyutlarına geri dönmektedir. Bu durum elastik davranış olarak da adlandırılır. Malzeme lineer bir davranış göstermektedir. Oysa özellikle metalik malzemeler belli bir yüklemekten sonra kalıcı bir şekilde (plastik) şekil değiştirmeye başlarlar. Plastik şekil değişimine uğramış olan elemandan yüklemeyi kaldırdığında yalnızca elastik uzamalar kalkar, plastik uzamalar ise eleman üzerinde kalır. Plastik deformasyonun başlangıcı, bir akma kriteri tarafından belirlenir ve akma sonrası deformasyon malzeme rijitliğinin düşmesi ile ortaya çıkar.

Burada malzemenin elasto-plastik davranışını nümerik olarak modellenmesi üzerinde durulacaktır. Bunun için çeşitli metodlar vardır. Genelde,

- Rijitlik matrisi metodu,
- Başlangıç şekil değişimi metodu,
- Başlangıç gerilmesi metodu

olarak adlandırılan üç temel yöntem kullanılmaktadır.

Rijitlik matrisi değişimi metodu problem için en doğru yaklaşımı vermekle beraber plastik deformasyon bölgesinde her iterasyon sonunda direngenlik matrisinin yeniden hesaplanmasını gerektirir. Bu da problem çözme süresini uzatacağından düşük hızlı bilgisayarlar için daha az tercih edilen bir yöntemdir.

Başlangıç şekil değişimi metodunda elastik olarak hesaplanmış gerilme için malzemenin gerçek davranışına uygun bir elasto-plastik başlangıç şekil değiştirmesi

aranır. Metot, akma başladıktan sonra da mukavemet artışı devam eden malzemeler için geliştirildiğinden, ε_0 'ın tanımlanamadığı ideal elasto-plastik malzeme gibi durumlarda bu metot kullanışsızdır.

Başlangıç gerilmesi metodu Zienkiewicz'in çalışmalarına dayanır ve elasto-plastik problemlerin çözümü için en çok kullanılan metottur. Teori, tek boyutlu bir problemin zorlanmasına dayanılarak anlatılmış, çok eksenli gerilme durumu için genelleştirilmiştir.

5.1.1. Plastisitenin matematik teorisi

Plastisitenin matematik teorisi, elasto-plastik özellik gösteren malzemelerin gerilme şekil değiştirme ilişkilerini izah etmekten ibarettir. Plastik davranışlar zamana bağlı olmayan kalıcı şekil değiştirmelerle karakterize edilir. Bu şekil değiştirmeler malzemenin özelliğine göre belli bir gerilme değerine ulaşıldıktan sonra meydana gelir. Elasto-plastik incelemenin yapılabilmesi için şu üç şartın gerçekleşmesi gerekir.

- 1-Elastik şartlarda malzeme davranışını tarif etmek için gerilme ve şekil değiştirmeler arasında lineer bir ilişki olmalıdır.
- 2-Plastik akmanın meydana geldiği noktada bir akma kriterinin göz önüne alınması gerekir.
- 3-Akma başladıktan sonra gerilme ve şekil değiştirmeler arasında bir formülizasyona ihtiyaç vardır.

Birinci durum, Hooke yasası tensör formunda şöyle ifade edilebilir.

$$\{\sigma_{ij}\} = [C_{ijkl}] \{\varepsilon_{kl}\} \quad (5.1)$$

Burada $\{\sigma_{ij}\}$ ve $\{\varepsilon_{kl}\}$ sırasıyla gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerini ifade etmektedir. $[C_{ijkl}]$ ise elastik sabitler tensörüdür. İzotropik bir malzeme için,

$$[C_{ijkl}] = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu \delta_{ik} \delta_{jl} + \mu \delta_{il} \delta_{jk} \quad (5.2)$$

şeklinde yazılabilir. burada λ ve μ Lamé sabitleridir δ_{ij} Kroneker delta olarak adlandırılmaktadır ve

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (5.3)$$

olarak verilir. Lamé sabitleri $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $\mu = \frac{E}{1-\nu}$ ise, şeklindedir.

İkinci şart için, plastik deformasyonun başlangıcı her hangi bir akma kriterlerine göre belirlenebilir. Malzemenin akması için gerekli olan gerilmenin $\{\sigma_{ij}\}$ her istikamet ve yükleme şekli için değiştiği kabul ediliyorsa,

$$f(\sigma_{ij}) = g(K) \quad (5.4)$$

bize akma denklemini verecektir. Burada $f(\sigma_{ij})$ bir fonksiyon, $g(K)$ ise deneysel olarak belirlenen malzemenin plastik deformasyon katsayısı (K) nın bir fonksiyonunu ifade etmektedir. Akma kriterleri koordinat sistemine bağlı değildir. Yalnızca gerilme invariantlarına bağlıdır. Bir malzemede sadece asal gerilmeler mevcutsa $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = g(K)$ akma fonksiyonunu verecektir. Deneysel gözlemler plastik deformasyonun hidrostatik basınçtan bağımsız olduğunu göstermiştir. Bu yüzden akma fonksiyonu invariantlara bağlı olarak,

$$f(I_2, I_3) = g(K) \quad (5.5)$$

şeklinde tanımlanabilir. I_2 ve I_3 deviatorik gerilmelerin ikinci ve üçüncü invariantlarıdır. Deviatorik gerilmeler,

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3 \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Malzemenin akmasıyla ilgili bir çok kriter ortaya konmuştur. Metaller için en geçerli teoriler, Tresca ve Von-Misses akma teorileridir. Tresca kriteri maksimum kayma gerilmesi belirli bir değere ulaştığında akmanın başladığı kabulü üzerine kurulmuştur. Asal gerilmeler büyükten küçüğe doğru $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ şeklinde sıralanıyorsa, Tresca ya göre,

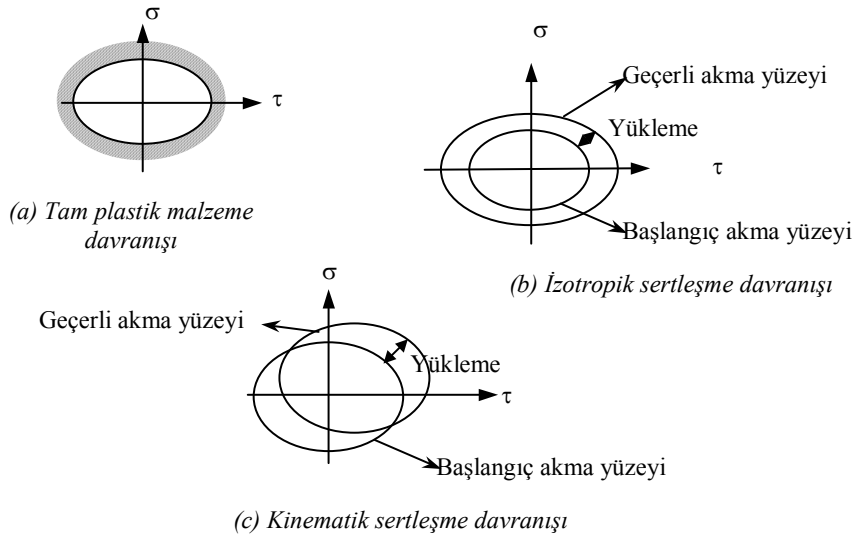
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad (5.7)$$

olduğunda akma başlar. σ_0 tek eksenli çekme deneyinden elde edilen akma sınırır. Von Misses ise akmanın başlangıcı için

$$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \sigma_0^2 \quad (5.8)$$

eşitliğini vermektedir. Burada denklemin sol tarafı eşdeğer gerilme olarak da adlandırılmaktadır.

Akmanın başlamasından sonra plastik şekil değiştirmenin derecesi, plastik deformasyonu meydana getiren gerilmenin şiddetine bağlıdır. Bu, şekil değiştirme sertleşmesi (strain hardening) olarak adlandırılır. Akma yüzeyi, plastik deformasyonun her derecesinde değişeceği için ardarda gelen akma yüzeyleri çeşitli sebeplerden plastik şekil değiştirmeye bağlıdır. Değişik durumlar Şekil 5.1'de izah edilmiştir. Şekil 5.1a'da tam plastik malzeme davranışı gösterilmiştir. Plastikleşme derecesi ile akma gerilmesi bağımsızdır. Eğer bir sonraki akma yüzeyleri önceki akma eğrisine göre uniform bir artış gösteriyorsa Şekil 5.1b'de görüldüğü gibi şekil değiştirme sertleşmesi modeli izotropiktir. Diğer taraftan bir sonraki akma yüzeyleri, şekil ve yönlenmeleri korur fakat gerilme uzayında yer (konum) değiştirirlerse (Şekil 5.1c) bu mekanizma da kinematik sertleşme mekanizması olarak adlandırılır.



Şekil 5.1 Akma yüzeyi plastik deformasyon ilişkisi

Bazı malzemelerde (toprak vb.) şekil değiştirme sertleşmesi yerine şekil değiştirme yumuşaması meydana gelir. Plastik deformasyon arttıkça akma gerilmesi düşer. Bu yüzden izotropik bir model için sırasıyla ilk akma eğrisi ile daha sonra meydana gelen akma eğrileri birbiriyle çakışır. Akma sebebiyle lokal hasarlar oluşur ve akma yüzeyi hasar kriteri olarak adlandırılır. Akma yüzeyindeki değişimler akma gerilmesi fonksiyonu g 'nin, sertleşme parametresi K ile ifade edilmesi sonucu bulunur.

5.1.2. Elasto plastik gerilme şekil değiştirme ilişkisi

Başlangıç akmasından sonra malzemenin davranışı kısmen elastik kısmen de plastiktir. Malzemenin tamamının plastik deformasyonuna kadar toplam şekil değiştirme elastik ve plastik bileşenlerden meydana gelir.

$$(d\varepsilon_{ij})_t = (d\varepsilon_{ij})_e + (d\varepsilon_{ij})_p \quad (5.9)$$

elastik şekil değiştirmenin artımı (1) deki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin diferansiyel ifadesiyle verilmiştir. Gerilmeleri deviatorotik ve hidrostatik bileşenlere ayırarak plastik şekil değiştirme artışı,

$$(d\varepsilon_{ij})_p = \frac{d\sigma'_{ij}}{2\nu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} \quad (5.10)$$

şeklinde elde edilir. Gerilme artımıyla plastik şekil değiştirme bileşeni arasında bir ilişki kurmak istenirse malzeme davranışı üzerinde bir kabul daha yapmak gerekir. Plastik potansiyel (Q) olarak adlandırılan gerilme gradyanı ile plastik şekil değiştirme artımı orantılı olmalıdır.

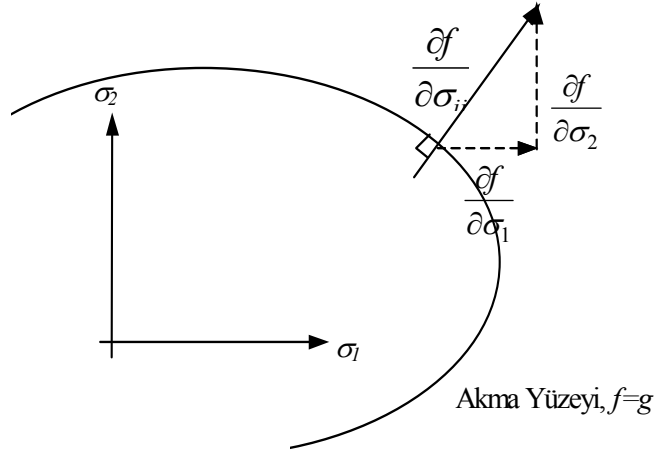
$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\delta Q}{\delta \sigma_{ij}} \quad (5.11)$$

Burada orantı sabiti olan $d\lambda$ ' ya plastik çarpan denir. (11) akmadan sonraki plastik şekil değiştirmeyi gösterdiğinden akma şartı olarak adlandırılır. Q ; I_2 ve I_3 'ün fonksiyonu olmalıdır. Her ne kadar $f \equiv Q$ ise de bu durum için özel bir dönüştürme prensibi geliştirilebilir. f ve Q her ikisi de I_2 ve I_3 ' nün fonksiyonu olduğundan birbirine denk kabul edilebilir. Böyle bir kabul,

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}} \quad (5.12)$$

verir. Bu eşitliğe Normalite şartı denir. $df/\delta \sigma_{ij}$ akma yüzeyine dik bir vektör gösterir (Şekil 5.2). Temas noktası, dikkate alınan gerilmeler noktasıdır.

Plastik şekil değiştirme artımının akma yüzeyine dik bir vektör vermesi için n boyutlu uzay vektörü oluşturması gerekir. $f=I_2$ durumunda,



Şekil 5.2 Akma yüzeyi ve normal vektörü

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial I_2}{\partial \sigma_{ij}} = \sigma'_{ij} \quad (5.13)$$

olur. Böylece,

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \sigma'_{ij} \quad (5.14)$$

olur. Buna Prandtl Reuss denklemi denir. Prandtl Reuss denklemi teorik çalışmalarda çok geniş uygulama alanı bulmuştur. (5.12, 5.13, 5.14) denklemleri kullanılarak tam artım denklemi,

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{\delta \sigma'_{ij}}{2\nu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{ij} + d\lambda \frac{\delta f}{\delta \sigma_{ij}} \quad (5.15)$$

şeklinde yazılabilir.

5.2. Elasto Plastik Problemlerin Nümerik Çözümleri

5.2.1. Bir boyutlu ideal elasto plastik problem

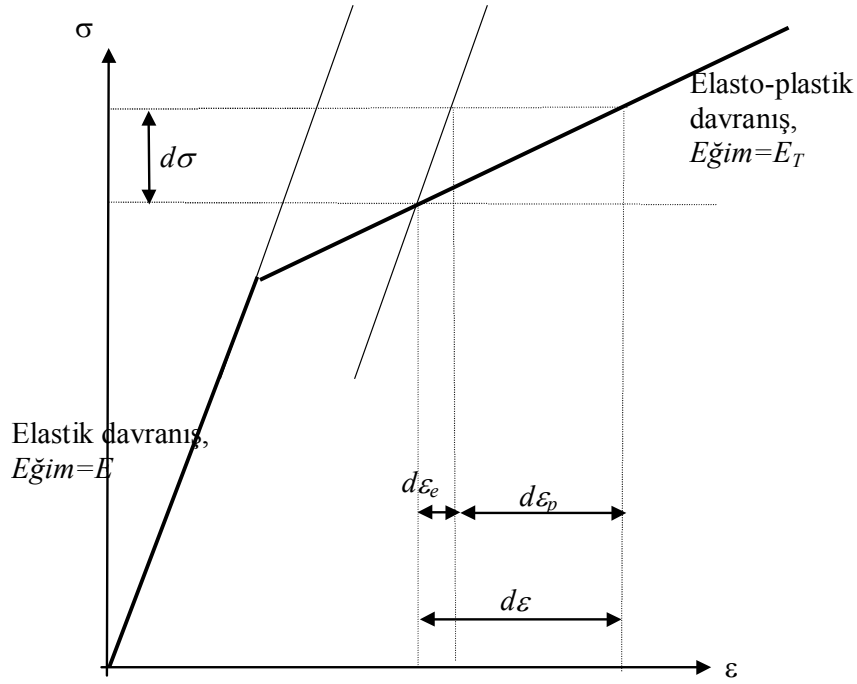
Bir boyutlu durumda gerekli malzeme parametreleri tek eksenli çekme deneyi ile belirlenir. (Şekil 5.3) idealize edilmiş gerilme şekil değiştirme eğrisini göstermektedir. Burada malzeme davranışı çekme ve basmada aynı olarak kabul edilmiştir. Malzeme başlangıçta, (akma gerilmesi olarak kabul edilen σ_y 'ya ulaşınca kadar) Hook yasasına uygun olarak şekil değiştirir. Kuvvetin daha fazla artırılmasıyla malzemenin teğetsel modülü E_T 'ye uygun olarak lineer bir deformasyon sertleşmesi gösterdiği farz edilmiştir. Akmadan sonra bir yük artımı kabul edersek bu artımdan dolayı meydana gelen gerilme artması $d\sigma$ ve buna karşılık gelen şekil değiştirme de $d\varepsilon$ olmak üzere, şekil değiştirme elastik ve plastik kısımlara ayrılabilir.

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad (5.16)$$

Şekil değiştirme sertleşmesi parametresi (H') ise

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon_p} \quad (5.17)$$

şeklindedir. (5.16) ve (5.17) den,



Şekil 5.3 Bir boyutlu durumda lineer gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\epsilon_t - d\epsilon_e} = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad (5.18)$$

elde edilir.

L boyunda ve kesit alanı A olan lineer bir çubuk eleman düşünelim. Bu elemana gittikçe artan eksenel bir F kuvveti tatbik edelim. Meydana gelen uzama δ ise ve F/A akma gerilmesinden küçükse malzemenin davranışı elastik olur ve direngenliği,

$$[k]_e = \frac{F}{\delta} = \frac{EA}{L} \quad (5.19)$$

dir. Matris formunda ise,

$$[k]_e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

şeklinde ifade edebilir. Kuvvet malzemede akma meydana gelinceye kadar arttırıldığında meydana gelen dF artışı, $d\delta$ lik bir uzamaya sebep olur ve şekil değiştirme,

$$d\varepsilon = \frac{d\varepsilon_e + d\varepsilon_p}{L} \quad (5.21)$$

olarak ifade edilebilir. Kuvvet artışı ise,

$$dF = d\sigma.A = A.H'.d\varepsilon_p \quad (5.22)$$

şeklinde yazılabilir. Malzemenin plastik bölgedeki davranışı için,

$$[k]_{ep} = \frac{dF}{d\delta} = \frac{A.H'.d\varepsilon_p}{L(d\sigma / E + d\varepsilon_p)} \quad (5.23)$$

veya

$$[k]_{ep} = \frac{EA}{L} \left(1 - \frac{E}{E + H'}\right) \quad (5.24)$$

elde edilir. bunu matris formunda şöyle ifade edebiliriz:

$$[k]_{ep} = \frac{EA}{L} \left(1 - \frac{E}{E + H'}\right) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Burada ilk terim elastik rijitliği ikinci terim akma nedeni ile oluşan indirgenmiş rijitliği gösterir. Eleman rijitlik matrisi sonlu elemanlar metodunda şöyle yazılabilir:

$$[k]_e = \int [B]^T [D] [B] dV = A \int [B]^T [D] [B] dx \quad (5.26)$$

Bir boyutlu uygulamada $[D]=E$ dir. Elastik rijitlik matrisi daha önce verilmiştir. Elesto-plastik malzeme davranışında $[D]$,

$$[D]_{ep} = E \left(1 - \frac{E}{E + H'} \right) \quad (5.27)$$

şeklinde ifade edilir. Tam plastik malzeme davranışı için başlangıç akma eşitliği (5.18)'den $H'=0$ bulunur.

5.2.2. Şekil değiştirme sertleşmesi lineer olmayan iki boyutlu elasto plastik problem

Gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 4'de verilen elasto-plastik bir malzeme düşünelim. Akmaya noktasına kadar malzeme davranışı lineer elastiktir ve bir elastisite modülü (E) ile uygunluk gösterir. Akmadan sonra ise malzeme eğrinin her noktasında değişen elasto-plastik teğetsel modül (E_T) ye uygun davranır. Bu durumda sertleşme-şekil değiştirme hipotezi ($K=f(K)$) ni sağlayacak şekilde, uygulanan eşdeğer gerilme ifade edilebilir:

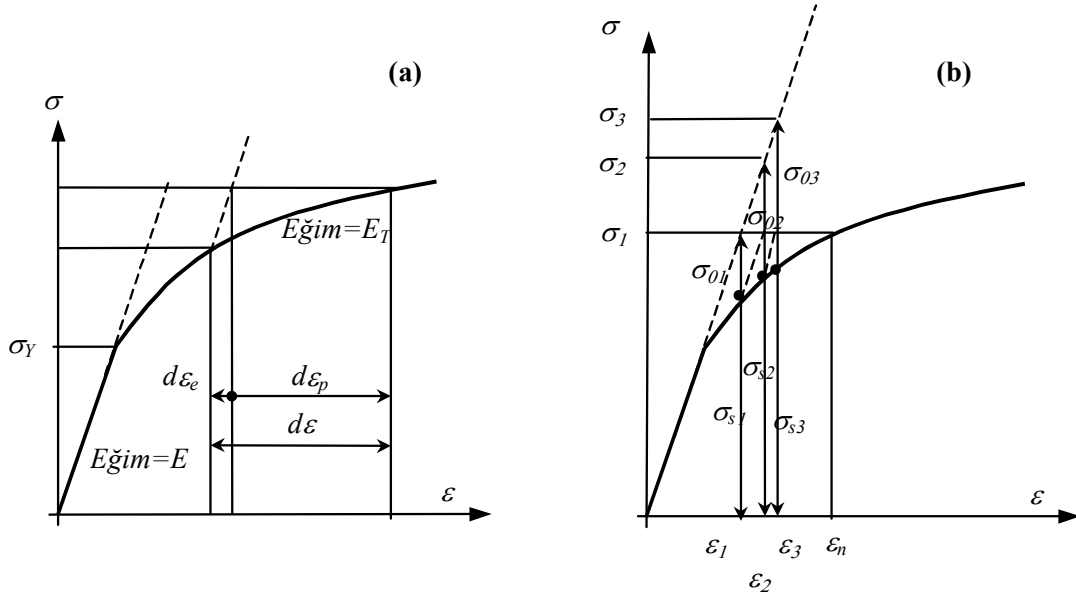
$$\bar{\sigma} = H'(\bar{\varepsilon}_p) \quad (5.28)$$

veya türevi alınarak,

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = H'(\bar{\varepsilon}_p) \quad (5.29)$$

yazılır. Tek eksenli gerilme durumu için $\sigma=\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ olup, dolayısıyla eşdeğer gerilme (I_2 ile orantılıdır.):

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}} = \sigma \quad (5.30)$$



Şekil 5.4 Şekil değıştirme sertleşmesi lineer olmayan malzemede gerilme şekil değıştirme ilişkisi ve Newton-Rapson iterasyonu

Eğer yükleme yönünde şekil değıştirme artımı $d\epsilon_p$ ise $(d\epsilon)_p = d\epsilon_p$ ve plastik şekil sıkıştırılmaz kabul edildiğinde poisson oranı 0.5 alınarak $(d\epsilon_2)_p = -0.5d\epsilon_p$ olur. Buna göre eşdeğer plastik şekil değıştirme.

$$d\bar{\epsilon}_p = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)\{(\epsilon'_{ij})_p(\epsilon'_{ij})_p\}^{1/2}} = d\epsilon_p \quad (5.31)$$

olarak elde edilir. (5.30) ve (5.31) kullanılarak (5.29) denklemi:

$$H'(\bar{\epsilon}_p) = \frac{d\sigma}{d\epsilon_p} = \frac{d\sigma}{d\epsilon_t - d\epsilon_e} = \frac{1}{\frac{d\epsilon_t}{d\sigma} - \frac{d\epsilon_e}{d\sigma}} \quad (5.32)$$

elde edilir. Buradan,

$$H' = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} \quad (5.33)$$

olur. Sertleşme fonksiyonu (H') tek eksenli çekme deneyi ile bulunur. Nümerik hesaplar için (H')'nün önceden bulunması gerekir.

5.2.3. Elasto plastik problemlerin matris formülasyonu

İlk olarak akma şartının gerçekleşip gerçekleşmediğine bakılır. Akma fonksiyonu

$$f(\sigma) = g(K) \quad (5.34)$$

ile verilmektedir. Burada $\{\sigma\}$ gerilme vektörü, K sertleşme parametresi olmak üzere

$$dK = \{\sigma\}^T d\{\varepsilon_p\} \quad (5.35)$$

şeklinde diferansiyel olarak tanımlanır. Akma yüzeyi denklemi ise,

$$f(\sigma, K) = f(\sigma) - g(K) = 0 \quad (5.36)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kısmî türevler alınırsa,

$$dF = \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial F}{\partial K} dK = 0 \quad (5.37)$$

veya kısa ifadesiyle,

$$\{a\}^T d\{\sigma\} - Ad\lambda = 0 \quad (5.38)$$

dır. Burada,

$$\{a\}^T = \frac{dF}{d\sigma} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \cdot \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \right] \quad (5.39)$$

ve

$$\{a\} = -\frac{1}{\partial\lambda} \cdot \frac{\partial F}{\partial K} dK \quad (5.40)$$

dır. $\{a\}$ akma vektörü olarak adlandırılır. Bu durumda şekil değiştirmedeki değişim

$$d\varepsilon = [D]^{-1} d\sigma + d\varepsilon \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (5.41)$$

şeklinde elde edilir. Burada $[D]$ elastik sabitler matrisidir. Her iki tarafı $\{a\}^T [D] = \{d_D\}^T$ alınarak $\{a\}^T d\sigma$ ortadan kaldırılırsa plastik çarpan,

$$d\lambda = \frac{1}{[A + \{a\}^T [D] \{a\}]} \{a\}^T \{d_D\} d\{\varepsilon\} \quad (5.42)$$

bulunur. Son iki denklemi birleştirirsek elasto-plastik artımlı gerilme değiştirme ilişkisi,

$$d\{\sigma\} = [D]_{ep} d\{\varepsilon\} \quad (5.43)$$

şeklini alır. Burada,

$$[D]_{ep} = [D] - \frac{\{d_D\} \{d_D\}^T}{A + \{d\}^T \{a\}}, \quad \{d_D\} = [D] \{a\} \quad (5.44)$$

Bu formül bir boyut için bulunanın yaklaşık aynısıdır. Tek eksenli durumda akma gerilmesi $\sigma_Y / \sqrt{3} = \sigma_1 = k$ olduğundan (5.39) ifadesi,

$$A = \frac{1}{\partial\lambda} \cdot \frac{\partial F}{\partial K} dK = \frac{1}{\partial\lambda} \frac{\partial \sigma_Y}{\partial K} dK \quad (5.45)$$

halini alır. σ_Y yalnızca k 'nın fonksiyonu olduğundan son terim tam diferansiyel olarak ele alınabilir. Normalite şartı uygulanarak (5.39) ifadesi,

$$dK = \{\sigma\}^T d\{\varepsilon_p\} = \{\sigma\}^T d\lambda \{a\} = d\lambda \{a\}^T \{\sigma\} \quad (5.46)$$

olur veya tek eksenli durumda $\sigma = \bar{\sigma} = \sigma_Y$ ve $d\varepsilon_p = d\bar{\varepsilon}_p$ olduğundan,

$$dK = \sigma_Y d\{\bar{\varepsilon}_p\} = d\{\varepsilon\} \{a\}^T \{\sigma\} \quad (5.47)$$

buradan da,

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon_p} = \frac{d\sigma_Y}{d\varepsilon_p} = H' \quad (5.48)$$

bulunur. Euler'in homojen fonksiyonlar için tanımı kullanılırsa,

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma} \sigma = \sigma_Y \quad (5.49)$$

yazılabilir veya

$$\{a\}^T \{\sigma\} = \sigma_Y \quad (5.50)$$

(5.42), (5.44), (5.46) dan $d\lambda = d\bar{\varepsilon}_p$ ve $A = H'$ elde edilir.

5.2.4. Elasto plastik problemlerin nümerik çözümü

Malzeme lineer elastik davranış gösterdiği kabulüyle yapılan elastik gerilme hesabından elde edilen gerilmelerin eşdeğeri her hangi bir akma kriterine göre (Von Mises) hesaplanır. Hesaplanan gerilme malzemenin akma sınırını geçiyorsa malzemede elasto-plastik gerilmeler meydana gelmiş demektir. Bu durumda başlangıç gerilmesi yaklaşımı kullanılarak elasto-plastik gerilmeler ile iç gerilmelerin hesabı yapılabilir. Hesaplama yöntemi Şekil 5.4 de verilmiştir.

Bu gerilme şekil değiştirme diyagramı eşdeğer σ - ε_t diyagramıdır. Eşdeğer gerilme (σ_e) elastisite modülü E 'ye bölünerek eşdeğer birim şekil değiştirme bulunur.

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} \quad (5.57)$$

Bu eşdeğer birim şekil değiştirme miktarı σ - ε_t diyagramına götürülerek elasto-plastik gerilme miktarı, σ_s bulunur. iç gerilme (σ_0) aşağıdaki eşitlikten

$$\sigma_0 = \sigma_e - \sigma_s \quad (5.58)$$

olarak hesaplanır. Artık gerilmeler tek eksenli değildir. Başlangıç gerilmesini vektörel olarak gösterirsek,

$$\{\sigma_0\} = \{\sigma_{0x}, \sigma_{0y}, \tau_{0xy}\} \quad (5.59)$$

yazabiliriz. Buradan,

$$\{\sigma_{0i}\} = \{\sigma_i\} \frac{\{\sigma_{0i}\}}{\{\sigma_{ei}\}} \quad (5.60)$$

elde edilir. Burada i indisi ile gösterilen gerilmeler elastik olarak hesaplanan gerilme bileşenleridir. Başlangıç gerilmesi de bu gerilmelerle orantılıdır. Bunun doğruluğu için $\{\sigma_{0i}\}$ nin eşdeğerinin σ_e ye eşit olması gerekir. Yani $\{\sigma_{0e}\} = \{\sigma_e\}$ olmalıdır. Bu durumda yukarıda verilen şekil üzerindeki gerilmeler en genel gerilme durumundaki eş değer gerilmeleri verir.

Bundan sonra iterasyona başlanabilir. Lineer elastik hesaplanmış gerilme vektörü σ_I olsun. Bunun eşdeğeri σ_{Ie} dir. σ - ε_t eğrisinden ε_I e karşılık gelen σ_{sI} Newton

Rapson yöntemiyle bulunur. $\left(\varepsilon_1 = \frac{\sigma_e}{E}\right)$ olduğuna göre,

$$\sigma_{01} = \sigma_e - \sigma_{s1} \quad (5.61)$$

elde edilir. Şekil 5.1'den,

$$\{\sigma_{01}\} = \{\sigma_1\} \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{e1}} \quad (5.62)$$

$$\sigma_2 = \{\sigma_1\} + \{\sigma_{01}\} \quad (5.63)$$

olduğu görülür. Bu ifadeyi genelleştirerek iç gerilme için,

$$\{\sigma_{0i}\} = \{\sigma_i\} \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{ei}} \quad (5.64)$$

yazılabilir. Bu da

$$\sigma_{0i} = \sigma_{ei} - \sigma_{si}, \quad \varepsilon_t = \frac{\sigma_{ei}}{E} \quad (5.65)$$

olarak gösterilebilir. Metalik malzemeler için çekme-uzama eğrisi denklemi, K sertleşme katsayısı ve n de sertleşme üsteli olmak üzere, genel olarak

$$\sigma_{si} = \sigma_Y + K(\varepsilon_{ti})^n \quad (5.66)$$

şeklinindedir. Buradan elasto-plastik gerilme σ_{si} bulunabilir ve buna göre ikinci iterasyon için başlangıç gerilmesi

$$\{\sigma_{n+1}\} = \{\sigma\} + \{\sigma_n\} \quad (5.67)$$

olarak elde edilir. Burada iç gerilmeden dolayı oluşan kuvvet

$$\{P_i\} = \int_v [B] \{\sigma_0\} dv \quad (5.68)$$

olarak hesaplanır. Rijitlik matrisi bilinmektedir. Bu kuvvet etkisi altında tüm düğümlere ait deplasmanlar hesaplanır. Bir önceki iterasyondaki deplasmanlar bilinmektedir. Bu ikisinin farkı alınarak malzemenin tam plastik olduğu bölgeye ulaşıp ulaşmadığı kontrol edilir.

$$\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1} = 0 \quad (5.69)$$

Bu şart sağlanıyorsa çözüm bitmiştir. Bu şart sağlandığı durumdaki eşdeğer gerilme ile o düğümde hesaplanan elasto-plastik gerilme farkı o düğüme ait iç gerilmeyi verecektir [15].

BÖLÜM 6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ANSYS

6.1. Giriş

Mühendislerin karşılaştıkları karmaşık ve zor fiziksel problemlerin çözümünde kullandıkları yöntemler genel olarak ikiye ayrılır.

- Analitik çözüm yöntemleri,
- Sayısal çözüm yöntemleri.

Mühendislikte karşılaşılan birçok problemi analitik yöntemler ile çözmek mümkün değildir. Analitik çözümler, sadece basitleştirilmiş bazı özel haller için elde edilebilir. Geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır şartları karmaşık problemleri yaklaşık olarak çözebilmek amacıyla, kabul edilebilen sonuçlar veren sayısal yöntemler kullanılmalıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal yöntemler içerisinde önemi gün geçtikçe artan, mühendisler tarafından tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Sayısal yöntemlerin çoğu, bilgisayarlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmadan önce geliştirilerek kullanılmış ve sonradan bilgisayara uygulanmıştır. Ancak sonlu elemanlar yöntemi bilgisayar gelişiminin bir ürünüdür ve diğer sayısal yöntemlerden farkı, yüksek hızlı bilgisayarlara çok daha uygun özelliklere sahip olmasıdır.

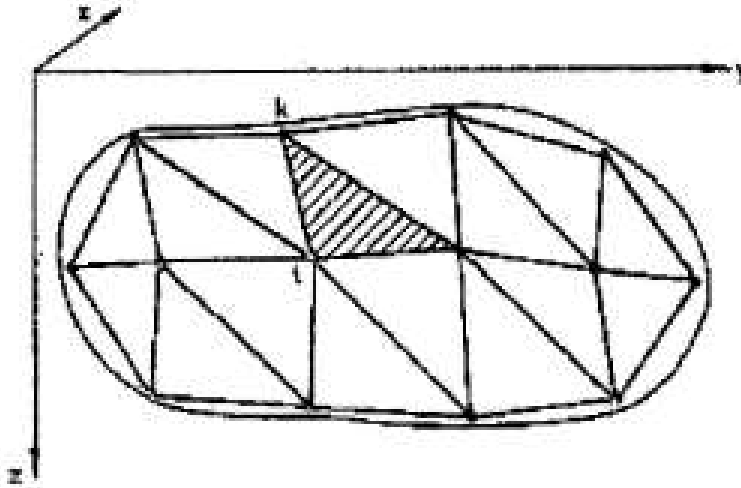
Sonlu elemanlar yönteminin statik analiz, akışkan mekaniği, ısı transferi, elektromanyetik analiz ve akustik gibi birçok fiziksel olayın çözümünde uygulama

alanı bulması ve bilgisayarlara uygulanması kolay bir algoritmaya dayanması karşılaşılan problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

6.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Adımları

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli ortamlara genellikle şu adımlar ile uygulanır [16].

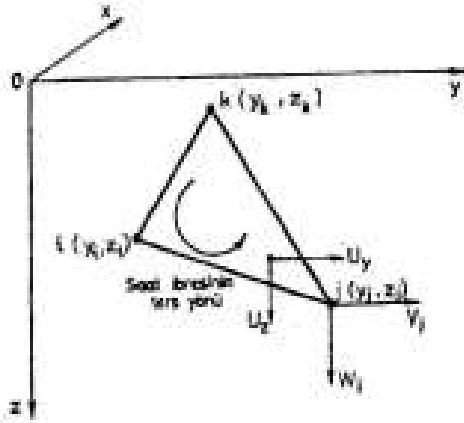
- Sürekli ortam, eğri ya da yüzeyler ile belirli şekilde ve sayıda "sonlu elemanlara" bölünür. Şekil 6.1' de çözüm bölgesi üçgen elemanlara bölünmüştür.



Şekil 6.1 Çözüm bölgesinin üçgen elemanlara bölünmesi

- Sonlu elemanlar, birbirlerine ve sürekli ortama belirli sayıda "düğüm noktaları" ile bağlanırlar. Bu noktaların yer değişimleri ya da dönmeleri problemin bilinmeyenleridir. Örneğin Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' de üçgen elemanların köşeleri düğüm noktalarıdır ve bunlar iki doğrultuda hareket ederler yani iki serbestlik derecesine sahiptirler. Bu demektir ki, üçgen eleman altı serbestlik derecesine sahiptir ve bilinmeyen sayısı altıdır. Bunlara "düğüm yer değiştirmeleri" adı verilir.

- Serbest değişkenlerin sonlu eleman içerisindeki değişimleri "değişken fonksiyonları" ya da "değişken modelleri" ile ifade edilir.



Şekil 6.2 Bir üçgen sonlu eleman ve düğüm noktaları

- Sonlu eleman deformasyon hali, deformasyon - yer değişim bağlantıları kullanılarak, gerilme hali, gerilme - deformasyon bağlantıları kullanılarak düğüm yer değişimleri cinsinden ifade edilmektedir.
- Sonlu elemana etki eden tüm iç ve dış yükler dengede olmalıdır. Bunun için minimum enerji prensibi kullanılarak denge denklemleri kurulur.
- Kurulan bu denge denklemleri, her bir sonlu eleman için ayrı ayrı yapılarak, aynı düğüm noktasına komşu elemanlardan gelen etkiler toplanır. Böylece düğüm yer değiştirmeleri hesaplanır.
- Sürekli ortamın sınırlarındaki şartlar kullanılır ve denklem takımı çözülür. Böylece düğüm yer değiştirmeleri hesaplanır.
- Bulunan yer değiştirmeleri yardımıyla elemanlardaki deformasyon hali, gerilme hali bileşenleri ve istenirse asal gerilmeler hesaplanır.

6.3. Ansys Sonlu Elemanlar Yöntemi Paket Programı

ANSYS, SAP 80/90/2000, NASTRAN, IDEAS, ADAMS, LUCAS, MARC, ABAQUS, FLOTRAN vs. dünyada çok kullanılan sonlu elemanlar yöntemine dayalı paket programlardır.

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 ve çözümün görselleştirilmesi ile de sonuçların daha anlaşılır olması sağlanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı programların analizlerde takip ettikleri işlem sırası genel olarak hemen hemen aynıdır. Takip edilen işlem sırası genel hatlarıyla yedi adımda özetlenebilir.

6.3.1. Modelin oluşturulması

Çözümü istenen problem geometrisi kullanılan paket program içerisinde ya da CAD programında oluşturulur. Model başka CAD programında oluşturulursa, IGES, DXF, SAT gibi dönüştürücü formatlar ile transfer edilebilir.

6.3.2. Sonlu eleman seçimi

Bu bölüm için kullanıcının sonlu eleman yöntemi ile ilgili yeterince bilgi sahibi olması gerekir. Çözümü istenen cismin geometrisi, analizin tipi (mukavemet, ısı transferi, manyetik analiz gibi) ve sınır şartları eleman seçimini etkiler. Sonlu eleman paket programının kütüphanesinden ya da kullanıcının model geometrisine ve problem tipine uyumlu bir eleman tanımlaması ile eleman seçimi yapılabilir. Örneğin ANSYS paket programında farklı analiz tipleri için yaklaşık olarak 140 adet eleman bulunmaktadır.

6.3.3. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Karmaşık olan model geometrisi daha küçük ve davranışı bilinen elemanlara bölünerek sonlu elemanlar modeli oluşturulur. Model ne kadar hassas olarak küçük elemanlara bölünürse, elde edilecek sonuçlar da gerçeğe o kadar yakın değerlerde olacaktır. Ancak fazla eleman sayısı demek modeldeki bilinmeyen sayısının da artması demektir ki bu da bilgisayarlarda daha fazla hesaplama yapılması anlamına

gelir ve sonucun elde edilme süresi uzar. Genellikle sonlu elemanlar paket programları otomatik olarak sonlu elemanlar modelini oluştursalar da, bazı hassas bölgeler üzerinde düzeltmeler yapmak gerekebilmektedir.

6.3.4. Malzeme ve eleman sabitlerinin belirlenmesi

Elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk, ısı transfer katsayısı gibi malzeme özellikleri ve seçilen eleman ve analiz tipine göre kesit alanı, atalet momenti gibi değerler sabit olarak ya da bir değişkene bağımlı olarak kullanıcı tarafından belirlenmelidir.

6.3.5. Yük ve sınır koşullarının belirlenmesi

Model üzerine gelen yükler belirlenir. Bu aşamada modelin bağlantı şekilleri kullanıcı tarafından doğru bir şekilde tanımlanmalıdır.

6.3.6. Çözüm

Bu aşamada sonlu elemanlar modelinin denklemleri, seçilen bir matris çözüm yöntemi vasıtasıyla çözülür.

6.3.7. Sonuçların değerlendirilmesi

Elde edilen analiz sonuçlarının liste halinde ya da grafiksel olarak ekranda görüntülenmesi işlemidir.

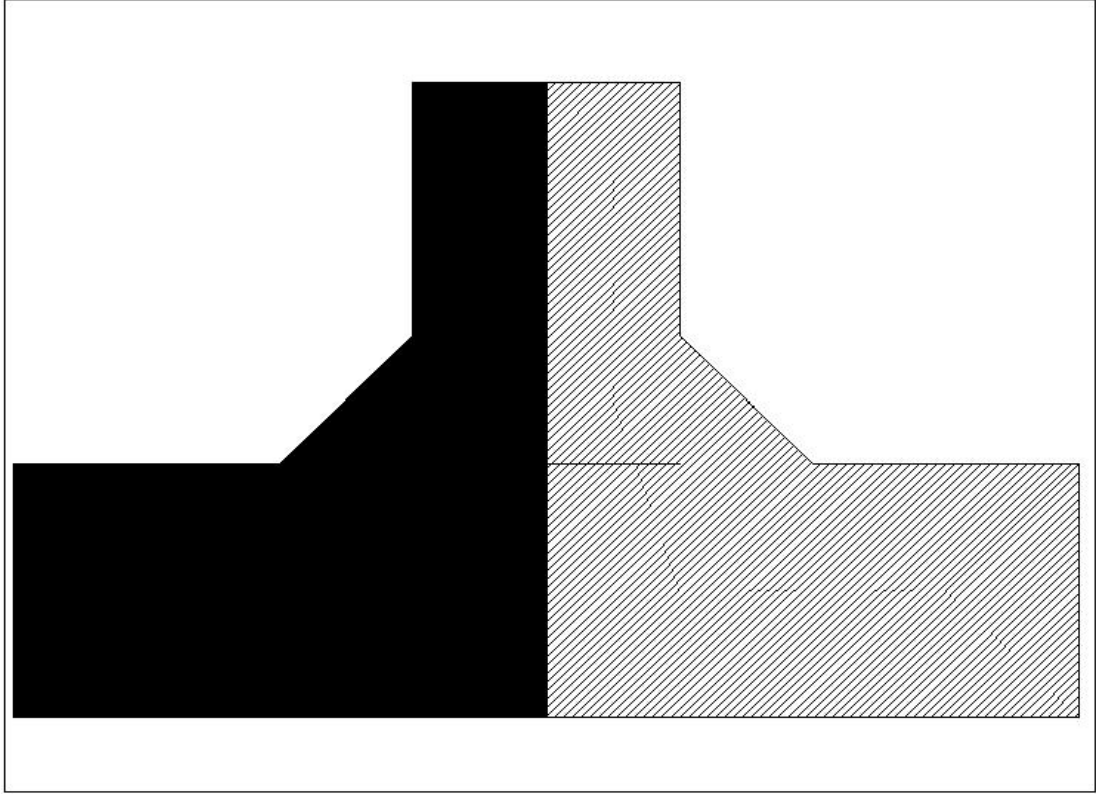
BÖLÜM 7. KÖŞE KAYNAK BAĞLANTISININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

7.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada, kaynaklı birleştirmelerden biri olan köşe kaynak bağlantısının kaynak sonrası meydana gelen soğuma süresi, artık gerilmeleri, artık gerilmeler neticesinde meydana gelen elastik ve plastik gerinimleri ile yer değiştirmeleri ANSYS 11.0 sonlu elemanlar paket programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Kaynak sonucu meydana gelen gerilmeleri incelerken dört farklı köşe kaynağı göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar kaynak ağzı açılmamış iç köşe kaynağı, 16mm'lik çapa sahip iç bükey iç köşe kaynağı, 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe kaynağı (T kaynağı) ve 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe kaynağı (T kaynağı) olarak ele alınmıştır.

Kaynaklı parça 2 boyutlu modellenerek, kaynak dikişinin elektrik ark kaynağı yöntemiyle tek pasoda oluşturulduğu ve kaynak ana metali ile kaynak metalinin malzemesi aynı olduğu varsayılp AH36 alaşımsız yapı çeliği kullanıldığı kabul edilmiştir. İncelenen köşe kaynak geometrilerinden kaynak ağzı açılmamış durumdaki iç köşe kaynak bağlantısının Şekil 7.1 gösterilmiştir.

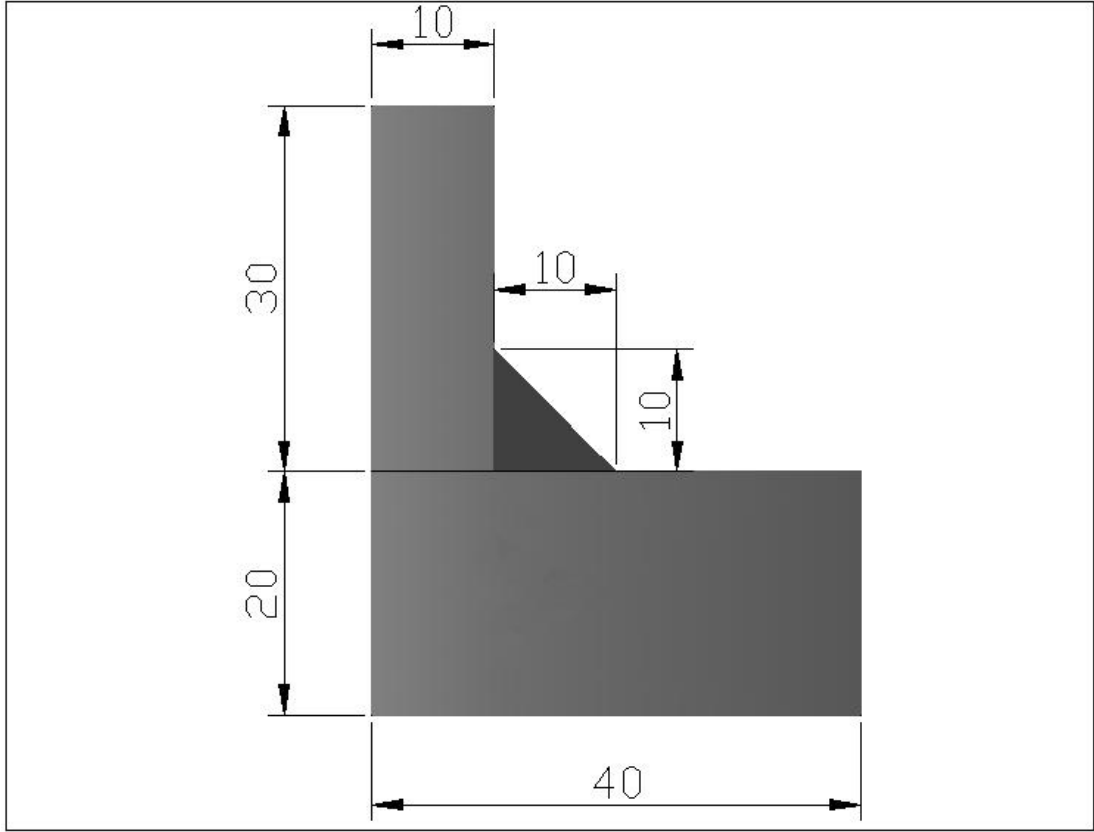


Şekil 7.1. Modelin 2 boyutlu görünüşü

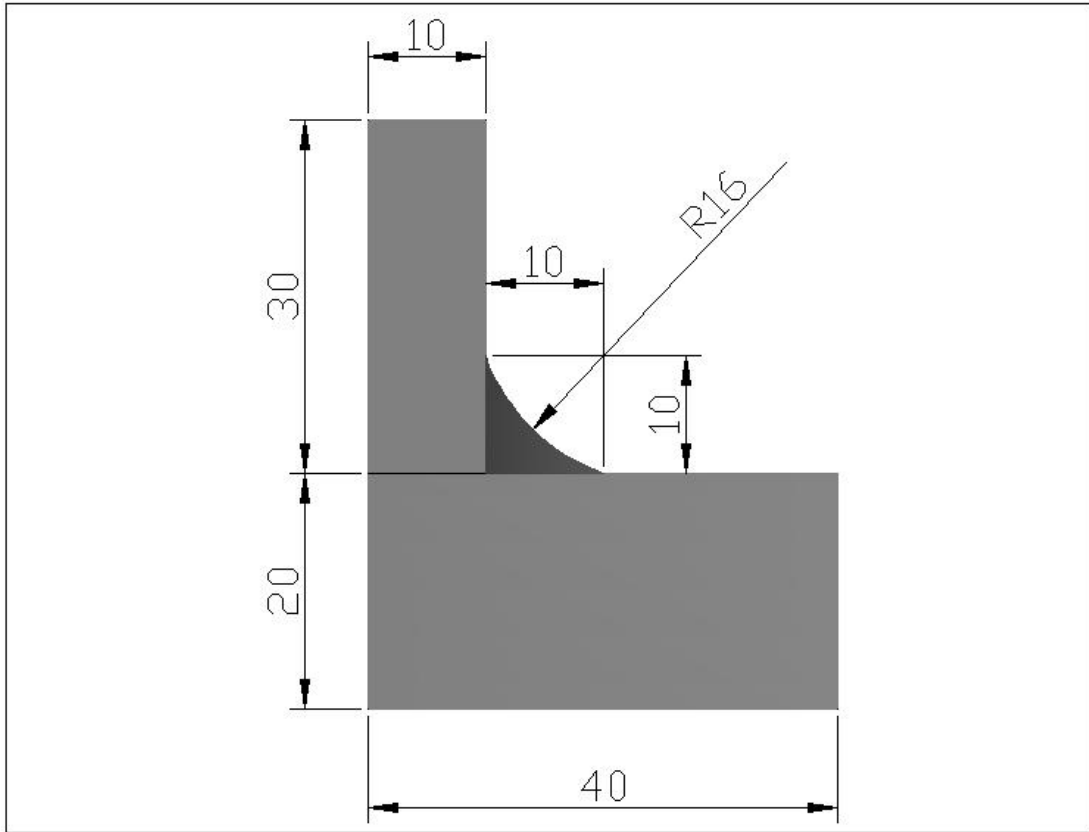
Sistemin yalnızca Şekil 7.1'deki taralı kısmını incelemek yeterli olacaktır. Bu, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapmada rutin bir durumdur. Sistemi tam olarak modellemek problemi daha karmaşık hale getireceği gibi modelin "meshlenmesi" ve çözüm sürecini gereksiz yere uzatacaktır. Sonuçlardaki sapma ihmal edilebilecek kadar az olmaktadır.

Bu tanımlama sonucu Ansys simetri eksenini üzerindeki noktaları kayar mesnetli "düşey doğrultuda yer değiştirebilir ama yatay doğrultuda yer değiştiremez" biçiminde yorumlar.

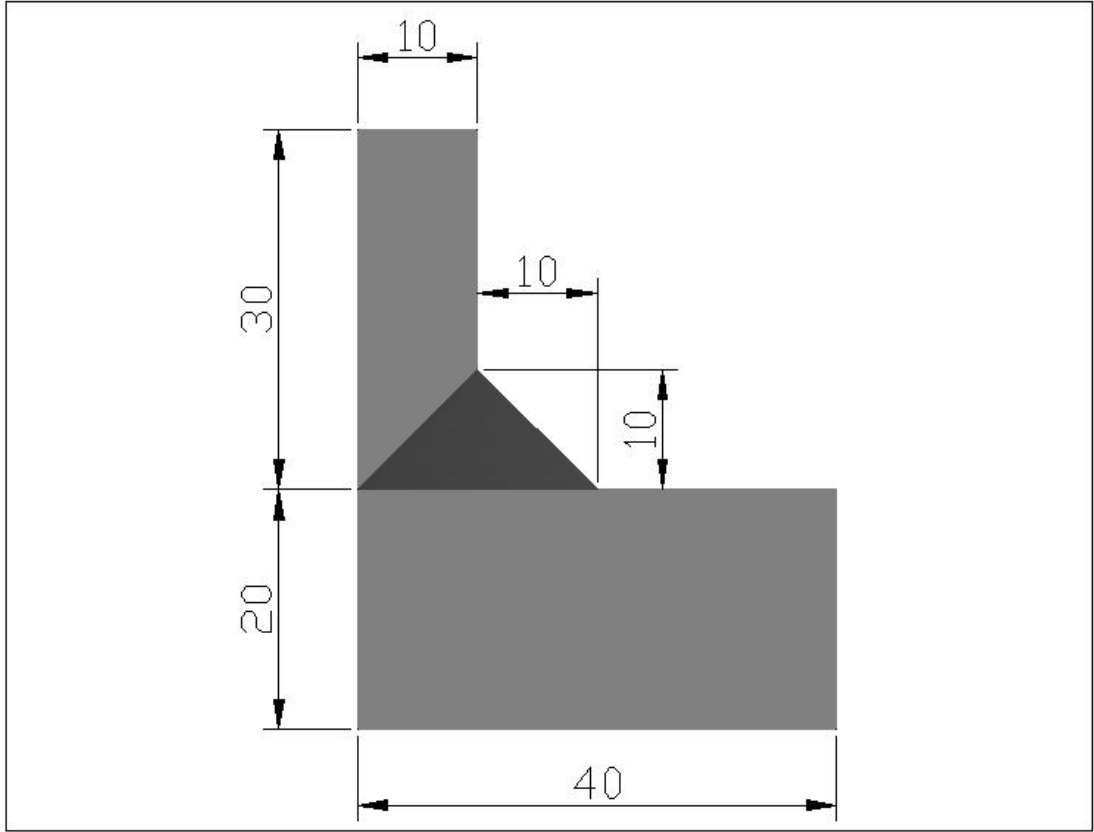
Kaynak dikişinin alt ve üst ayak uzunluğu 10mm ve parça kalınlıkları ise alt esas metalde 20mm üst esas metalde 10mm seçilmiştir. Yapılan analiz 4 farklı model üzerinde uygulanmıştır. Analizi yapılan modeller şekil 7.2., şekil 7.3. şekil 7.4. ve şekil 7.5.'te ölçülendirilmiş olarak gösterilmiştir.



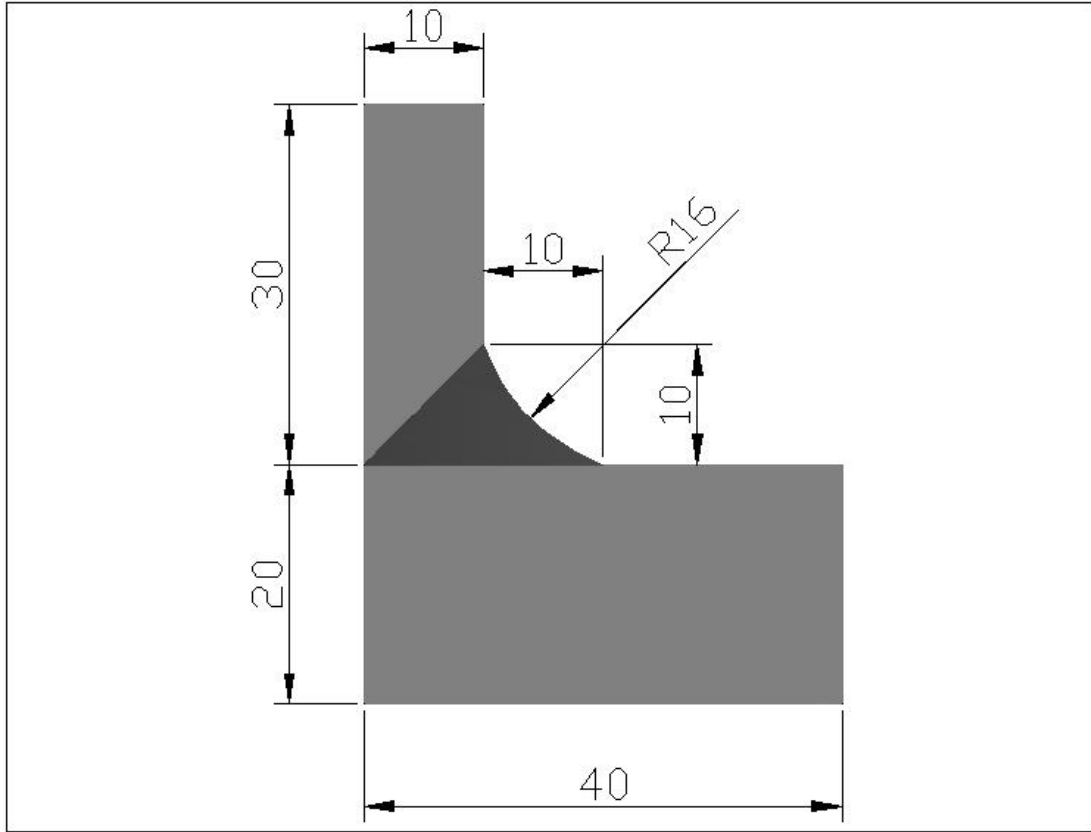
Şekil 7.2. Kaynak ağzı açılmamış iç köşe kaynağı



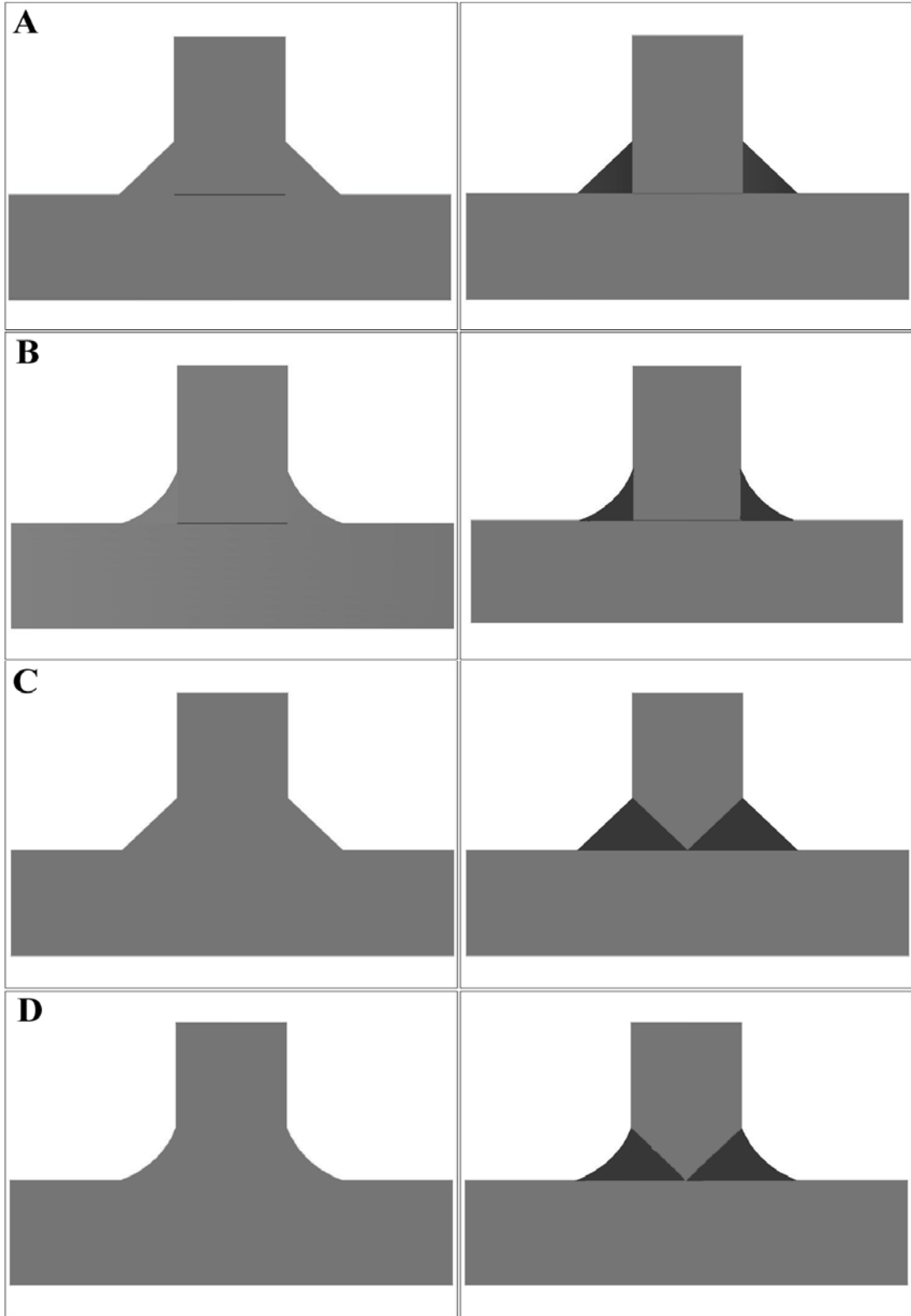
Şekil 7.3. Kaynak ağzı açılmamış iç bükey (16mm) iç köşe kaynağı



Şekil 7.4. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe kaynağı (T kaynağı)



Şekil 7.5. 45°'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe kaynağı (T kaynağı)

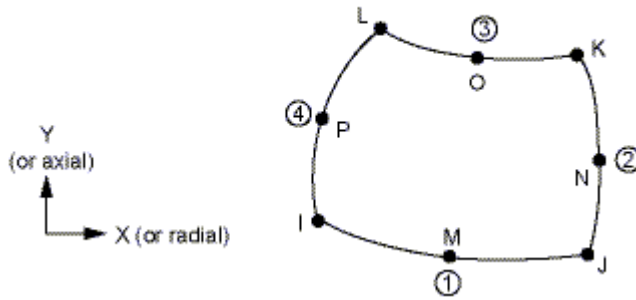


Şekil 7.6. İncelenen köşe kaynak tiplerinin genel görünümü A- iç köşe kaynağı, B- iç bükey iç köşe kaynağı, C- 45° 'lik kaynak ağızı açılmış iç köşe kaynağı (T Kaynağı), D- 45° 'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey iç köşe kaynağı (T Kaynağı)

7.2. Problemin Çözüm Aşamaları

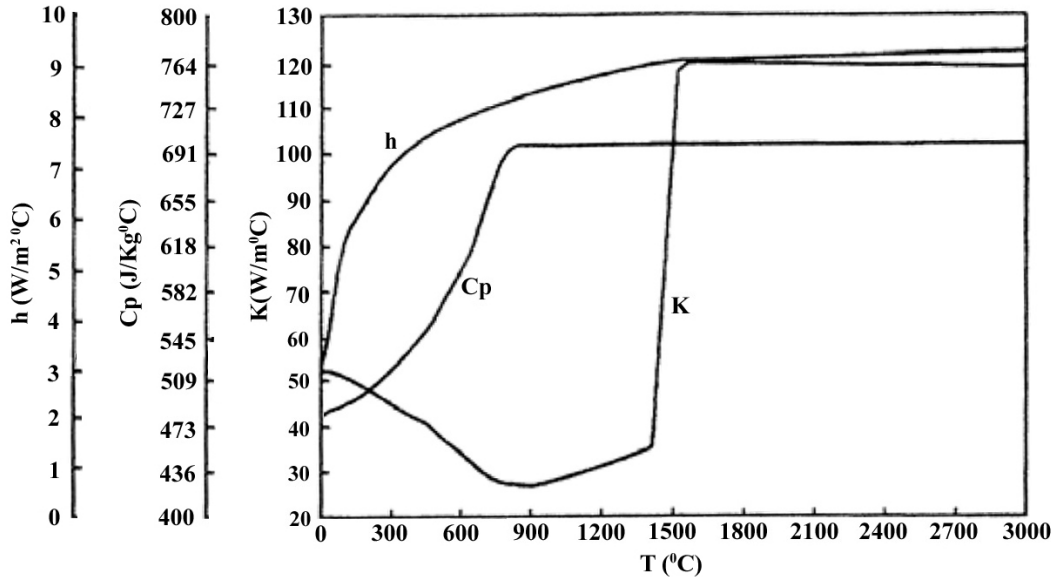
Köşe kaynaklı birleştirmelerde meydana gelen gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi Şekil 7.7 'de gösterildiği gibi model elemanlara bölünmüştür. Eleman seçiminde hassas bir ısı analiz yapmak amacıyla Transient Thermal Solid (Quad 8 Node 77) – Plane77 elemanı seçilerek “mesh” yapılmıştır.

PLANE77 Geometry

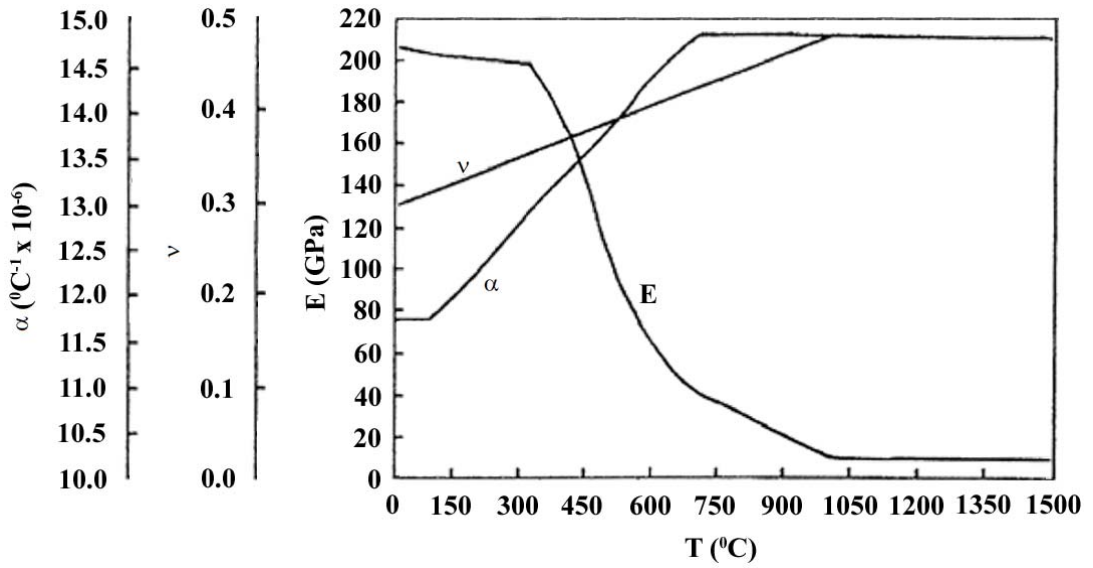


Şekil 7.7. Isıl analizde seçilen 2 boyutlu katı eleman [17].

Yapısal analizde de aynı elemanın eşleniği seçilerek analiz yapılmıştır. Yapısal analizdeki 2 boyutlu katı eleman Structural Solid (Quad 8 Node 183) - Plane183 elemanı seçilir. Daha sonra kaynaklı parçanın sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri girilir. Malzeme olarak AH36 çeliği seçilmiştir. Bu çeliğin sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



Şekil 7.8. AH36 Çeliğinin sıcaklığa bağlı ısı taşınım katsayısı, özgül ısısı ve ısı iletim katsayısı [18].



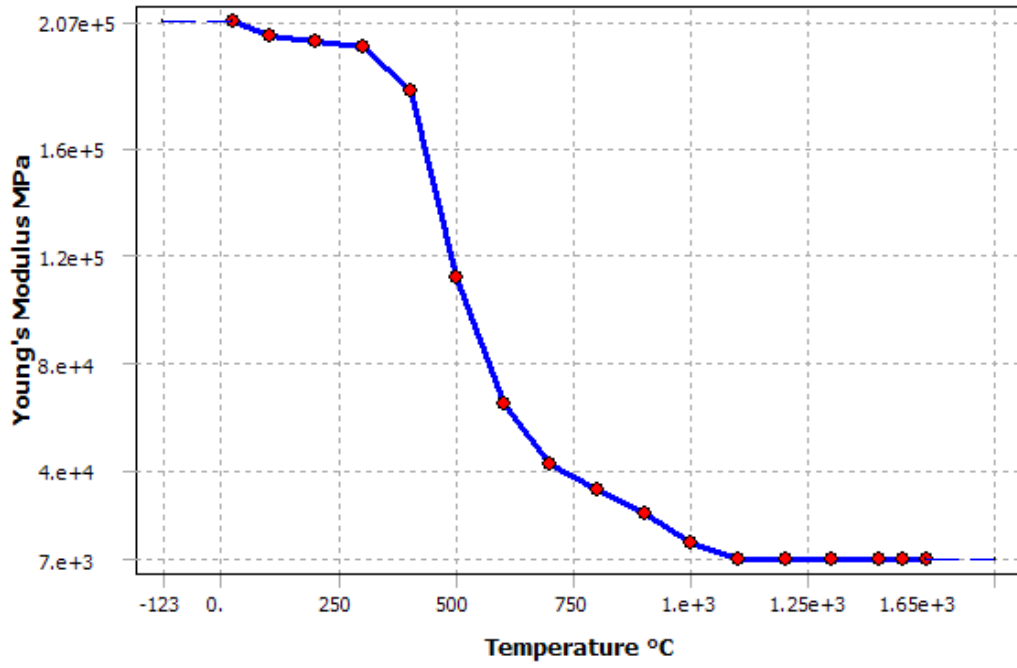
Şekil 7.9. AH36 Çeliğinin sıcaklığa bağlı elastisite modülü, ısıl genişleme katsayısı ve poisson oranı [18].

Malzeme özellikleri grafiklerden okunarak ayrı ayrı ANSYS veri tabanına girilir. AH36 çeliğinin fiziksel ve mekanik özellikler grafiğinden okunan değerler Tablo 7.1.'de gösterilmiştir. Program kendi içinde bunların grafiğini oluşturarak kullanacağı sıcaklıklardaki malzeme özelliklerini kendi grafiğinden okur [19].

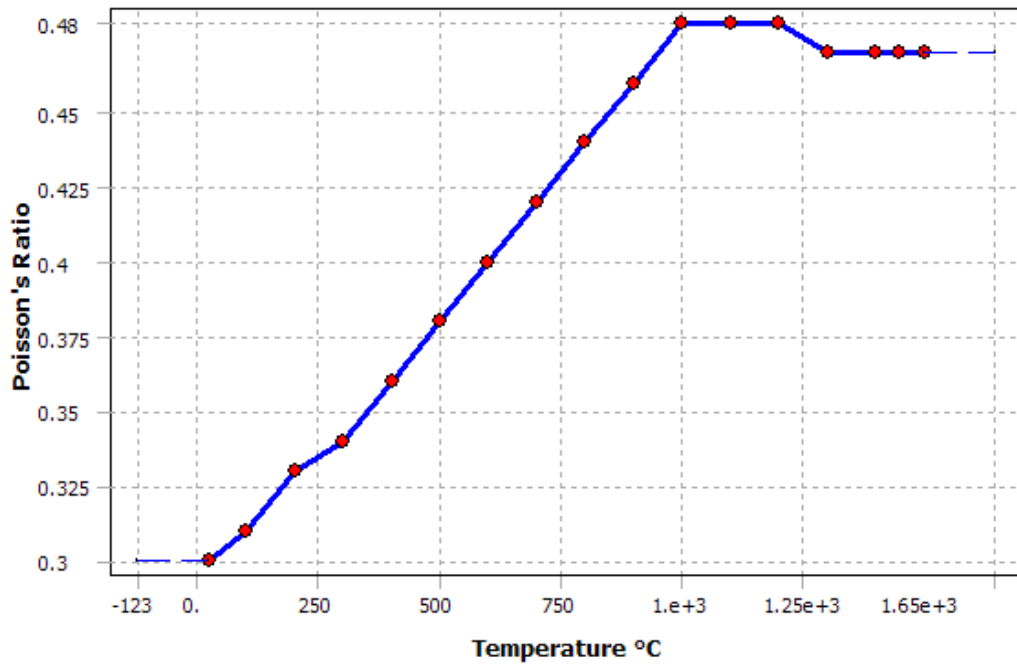
Sıcaklık, °C	Elastisite Modülü, E (GPa)	Poisson Oranı, ν	Isıl İletkenlik Katsayısı, K (W/m °C)	Özgül Isı, C _P (J/kg °C)	Isıl Genleşme Katsayısı, α (x10 ⁻⁶ /°C)	Isı Taşımım Katsayısı, h (W/m ² °C)
20	207	0.30	52	485	11.8	3.2
100	202	0.31	50	486	11.8	5.5
200	200	0.33	48	495	12.1	6.3
300	198	0.34	45	513	12.7	6.8
400	181	0.36	42	532	13.2	7.4
500	112	0.38	38	555	13.7	7.7
600	65	0.40	34	586	14.2	7.8
700	42	0.42	30	636	14.7	8.1
800	33	0.44	27	683	14.8	8.3
900	24	0.46	26	698	14.7	8.5
1000	13	0.48	28	698	14.7	8.6
1100	7	0.48	30	698	14.7	8.7
1200	7	0.48	31	698	14.7	8.8
1300	7	0.47	32	698	14.7	8.9
1400	7	0.47	34	698	14.7	9.0
1450	7	0.47	35	698	14.7	9.1
1500	7	0.47	95	698	14.7	9.2

Yoğunluğu, $\rho = 7850$ (kg/m³)

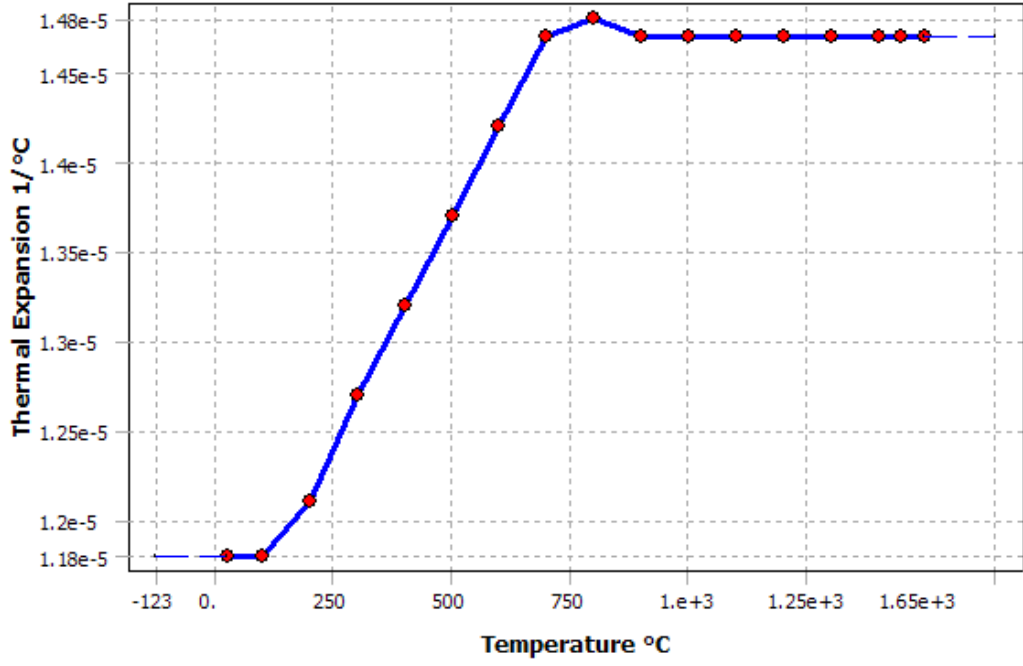
Tablo 7.1. AH36 Çeliğinin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri



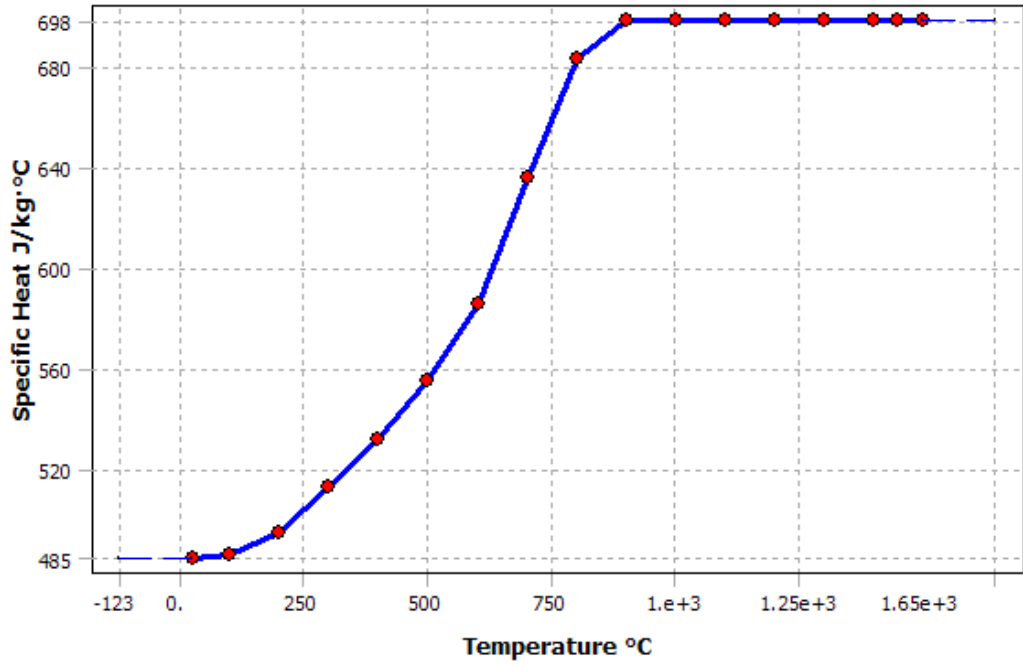
Şekil 7.10. Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin elastisite modülünün sıcaklığa bağlı değişimi



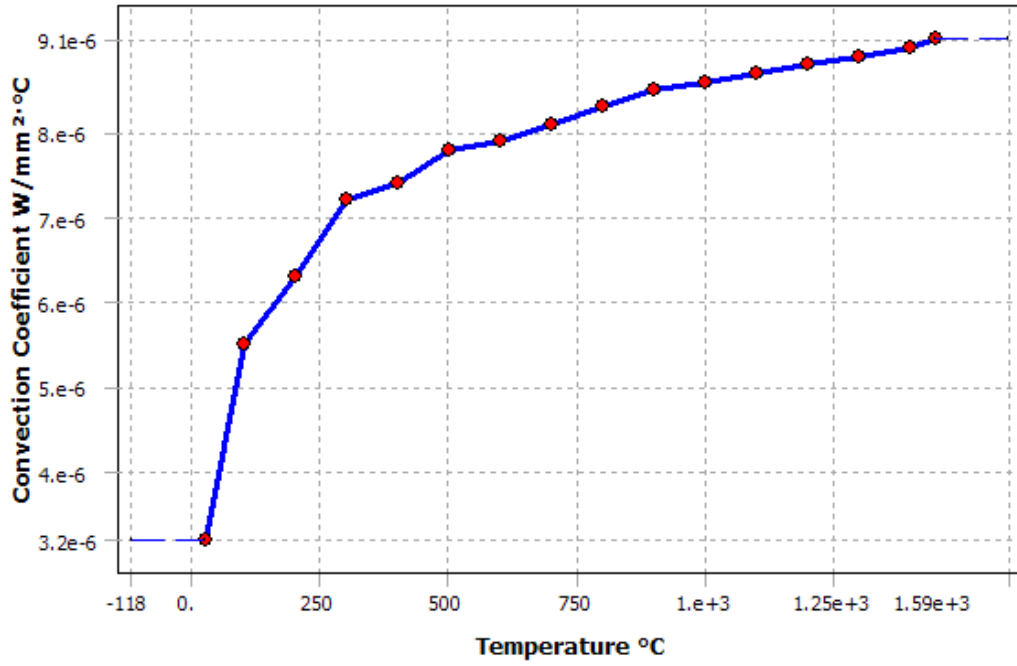
Şekil 7.11. Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin poisson oranının sıcaklığa bağlı değişimi



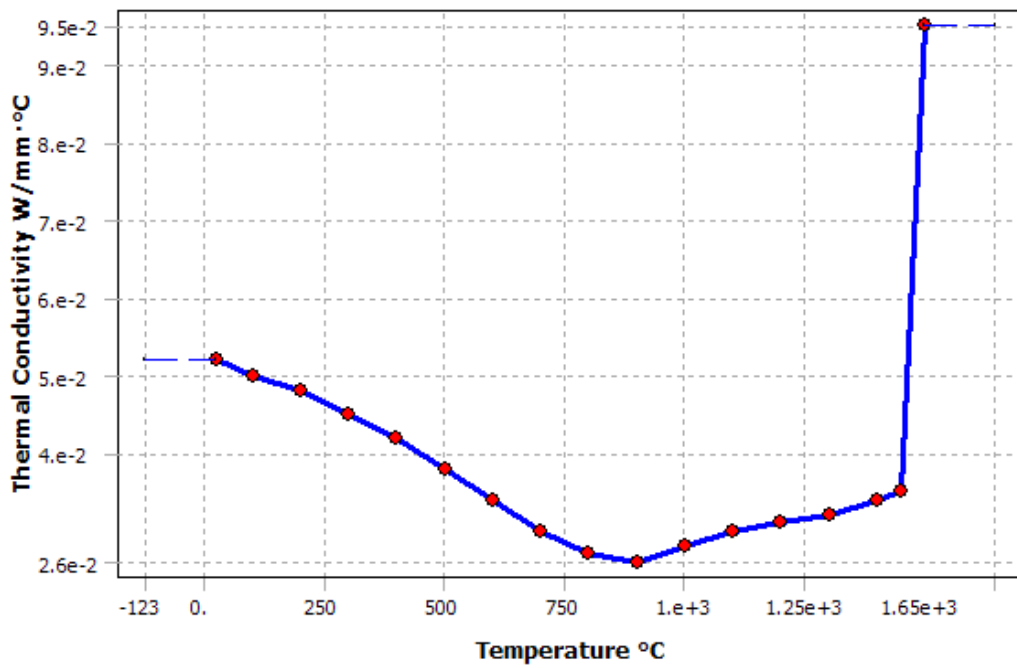
Şekil 7.12. Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin ısıl genleşme katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 7.13. Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin özgül ısısının sıcaklığa bağlı değişimi

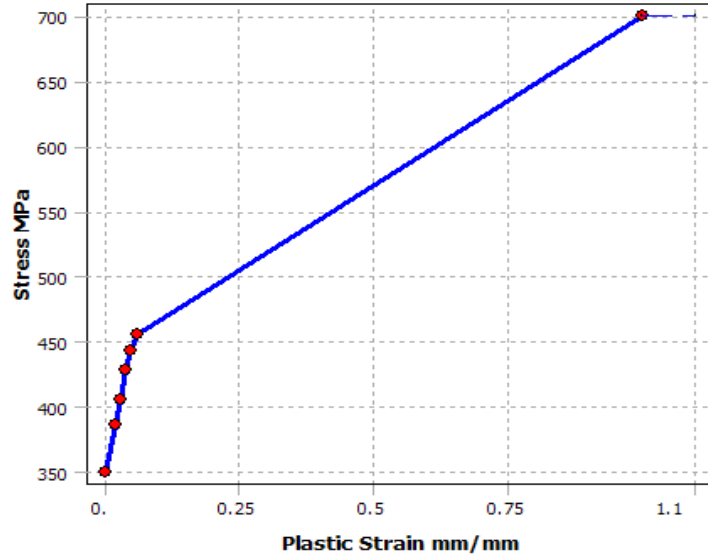


Şekil 7.14. Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin ısı taşınım katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi



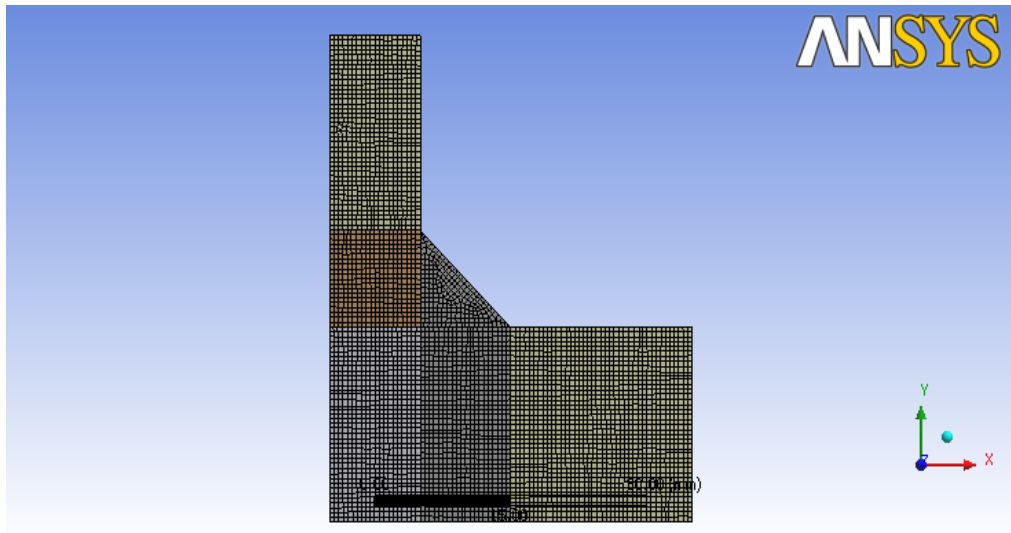
Şekil 7.15. Programın kendi oluşturduğu AH36 çeliğin ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı değişimi

Elasto-plastik bir analiz yapacağımızdan dolayı plastik bölgenin özellikleri bir eğri (multilinear izotropic hardening) ile ifade edilir. AH36 çeliğinin gerilme-gerinme eğrisi şekil 7.16.'da verilmiştir. Ayrıca malzemenin akma gerilmesi 350 Mpa olarak alınmıştır.



Şekil 7.16. AH36 Çeliğinin gerilme –plastik gerinme eğrisi

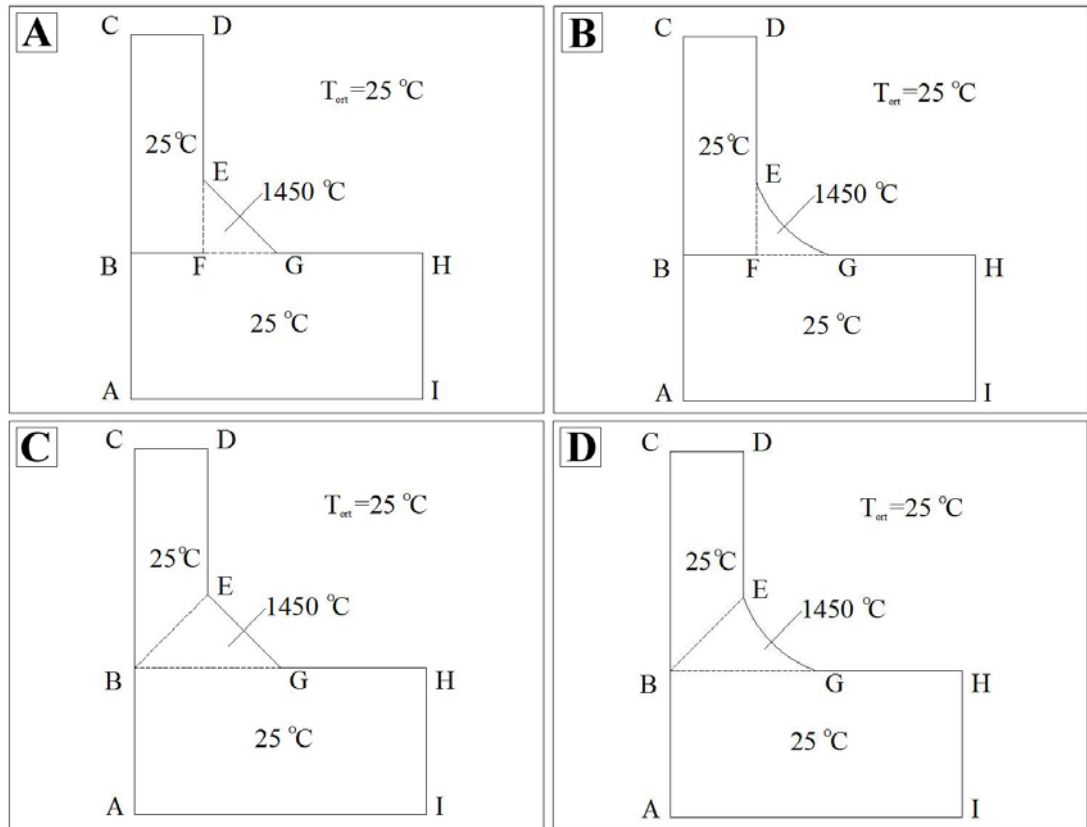
Parçanın modeli oluşturulduktan sonra elemanlara bölünür. Model elemanlara bölündükten sonraki görünümü şekil 7.17'deki gibidir.



Şekil 7.17. Modelin elemanlara bölünmüş şekli

Model elemanlara bölündükten sonra geriye kalan başlangıç şartları da seçilir. Kaynak metalinin tüm modellerde başlangıç sıcaklığı 1450 °C ve aynı şekilde tüm modellerde esas ana metalin sıcaklığı ise 25 °C olarak seçilir. Şekil 7.18'te görülen dört model içinde AC çizgisi simetrik olduğundan adyabatik yani ısı transferinin bu çizgilerde sıfır olduğu kabul edilmiştir. CD-DE-EG-GH-HI-IA çizgilerinde ise hava ile doğal taşınımın ve ortam sıcaklığının 25 °C olduğu farz edilmiştir. BF çizgisi ise üst esas metal ile alt esas metalin temas yüzeyi olup bu kısımda nodlar arası birleşme söz konusu değildir. Fakat kaynak ağzı açılmış olan C ve D modellerinde üst esas metal ile alt esas metal arasında temas yüzeyi bulunmamaktadır. İki parça arasında kaynak ana metali doldurur.

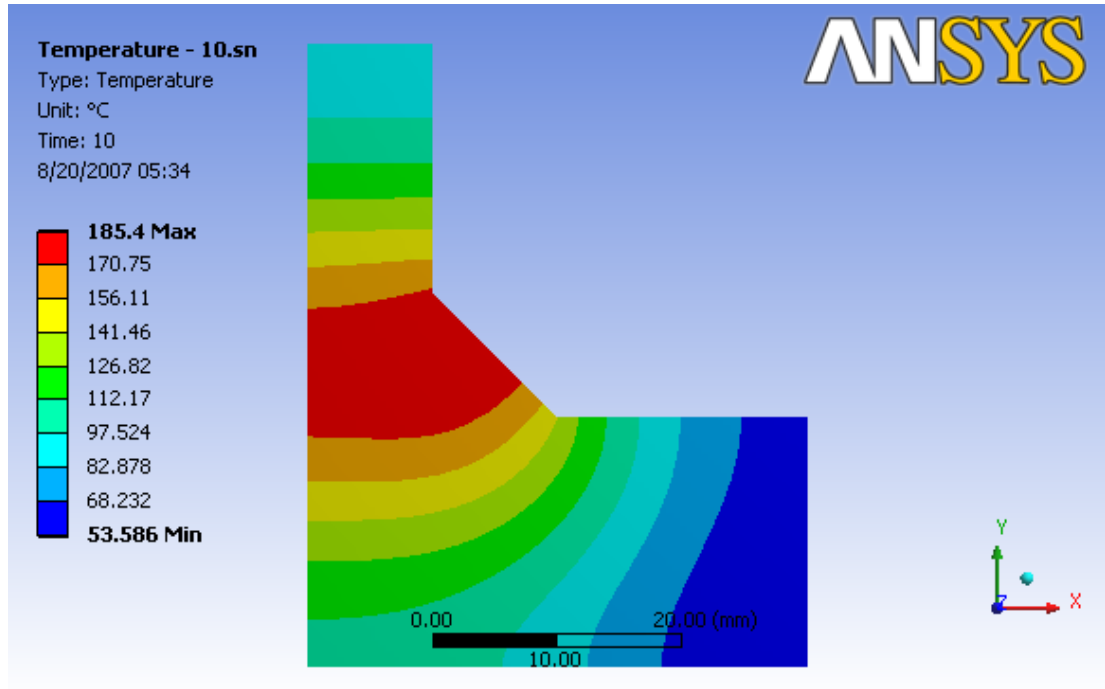
Yukarıda köşe kaynaklar için oluşturulan adımlar aynı malzeme özellikleri ve aynı sınır şartları altında olduğu kabul edilerek ele alınan dört modelde de termal ve yapısal analiz aşamasına geçilmiştir.



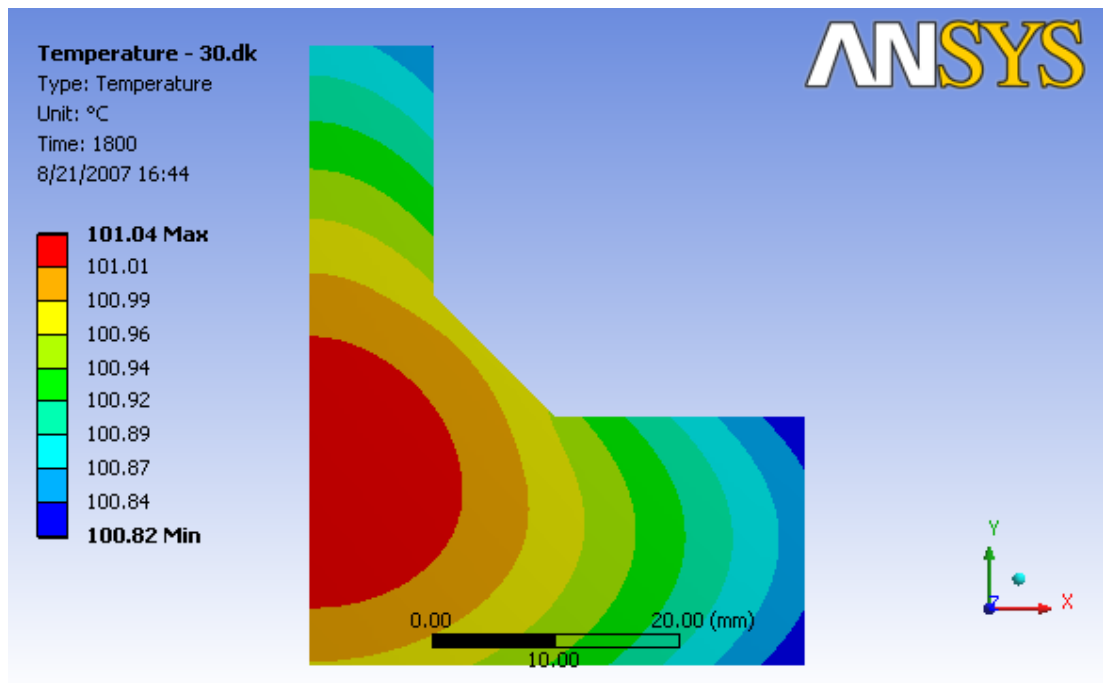
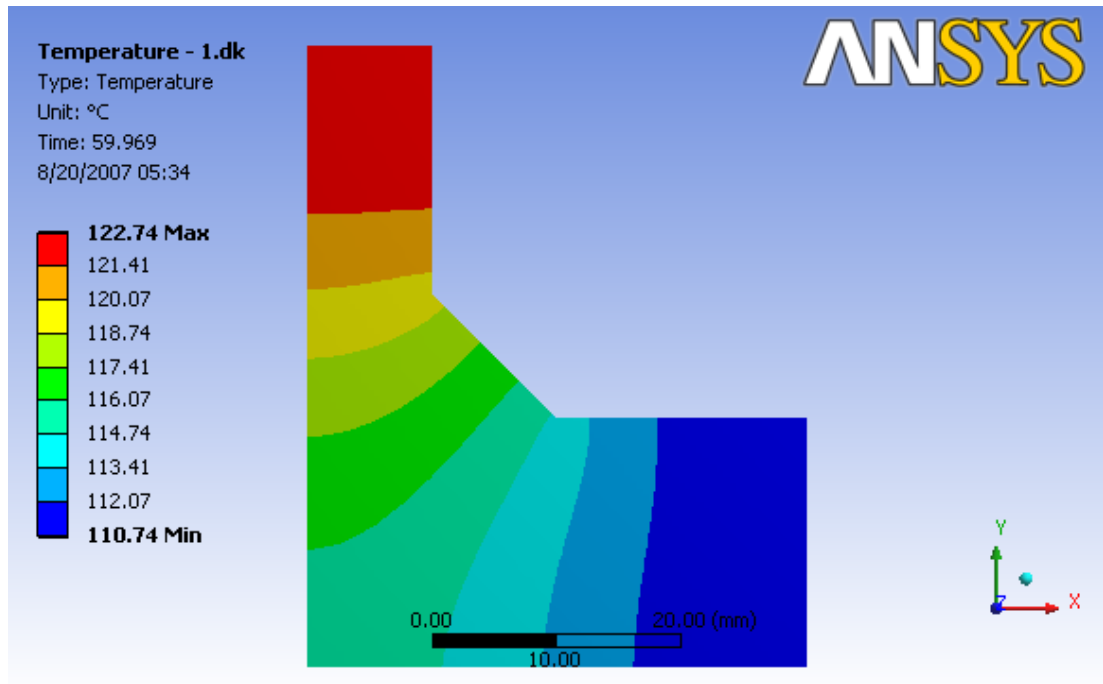
Şekil 7.18. Modellere uygulanan sınır şartları

7.3. Termal Analiz Sonuçları

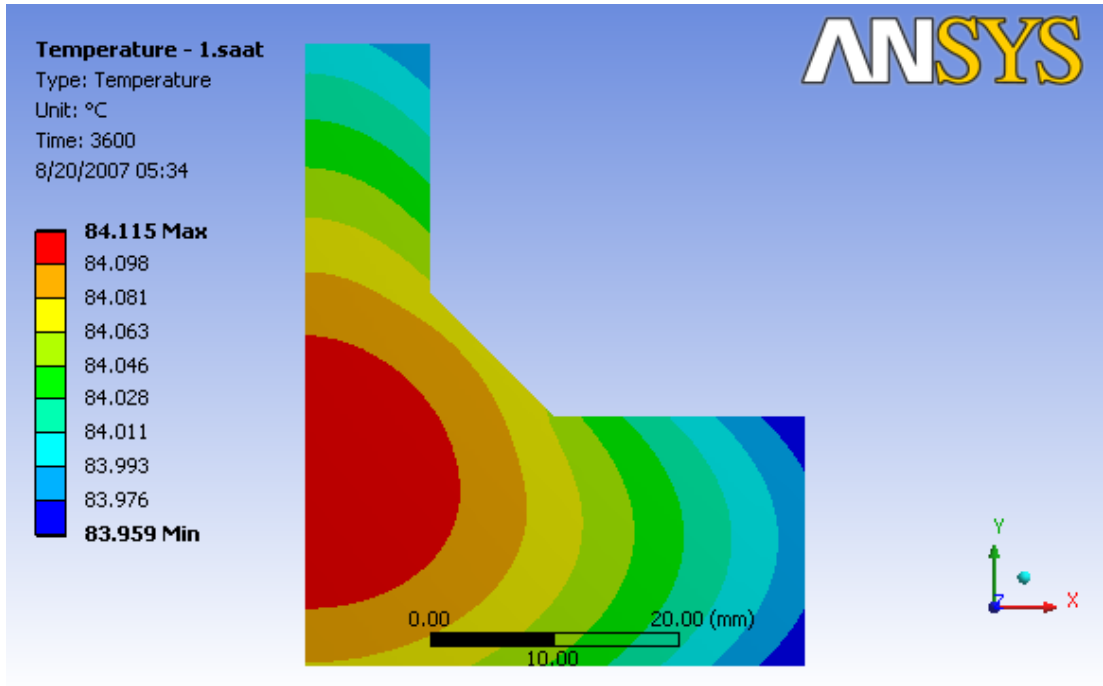
Tüm bu yükleme şartları altında parçanın ısıl analizi çözülerek, program sonuçları oluşturduğu veri kütüğüne ve sonuç dosyasına yazar. Kaynak metalinden esas metale ısı geçişinin değişik zamanlardaki durumu aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



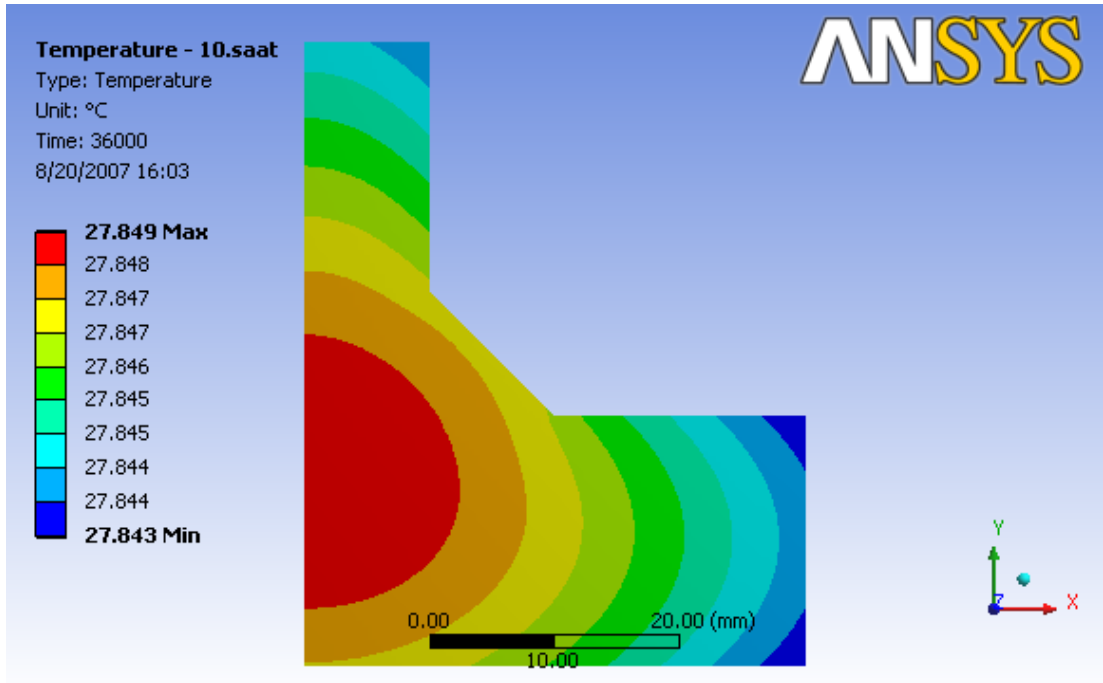
Şekil 7.19. İç köşe kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



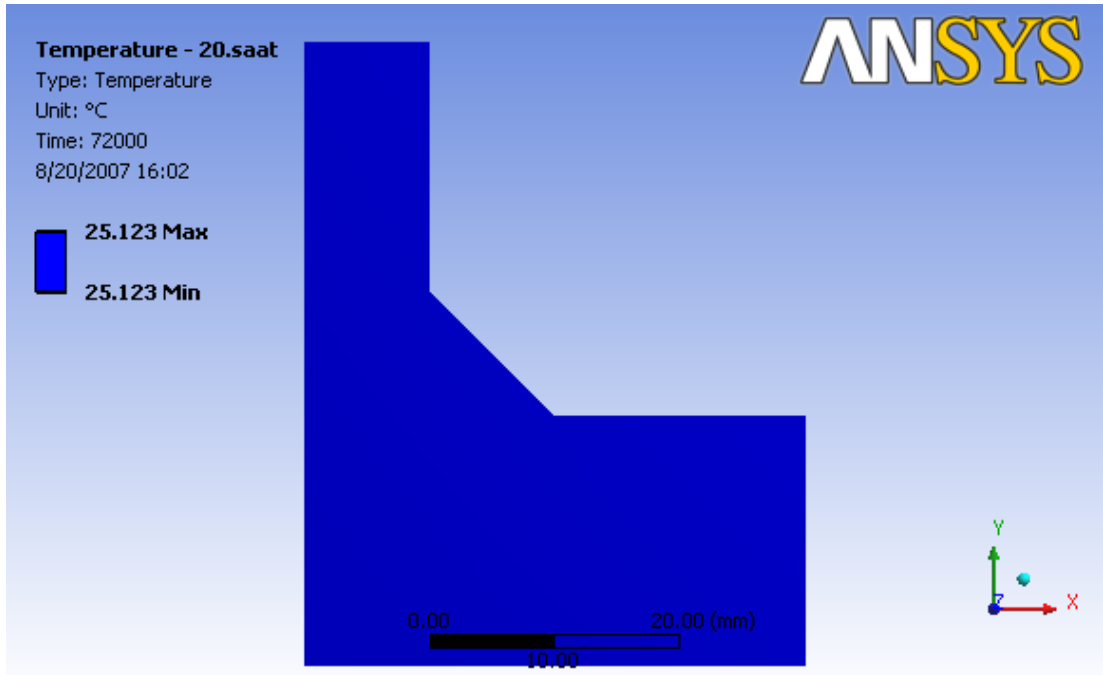
Şekil 7.21. İç köşe kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 7.22. İç köşe kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı

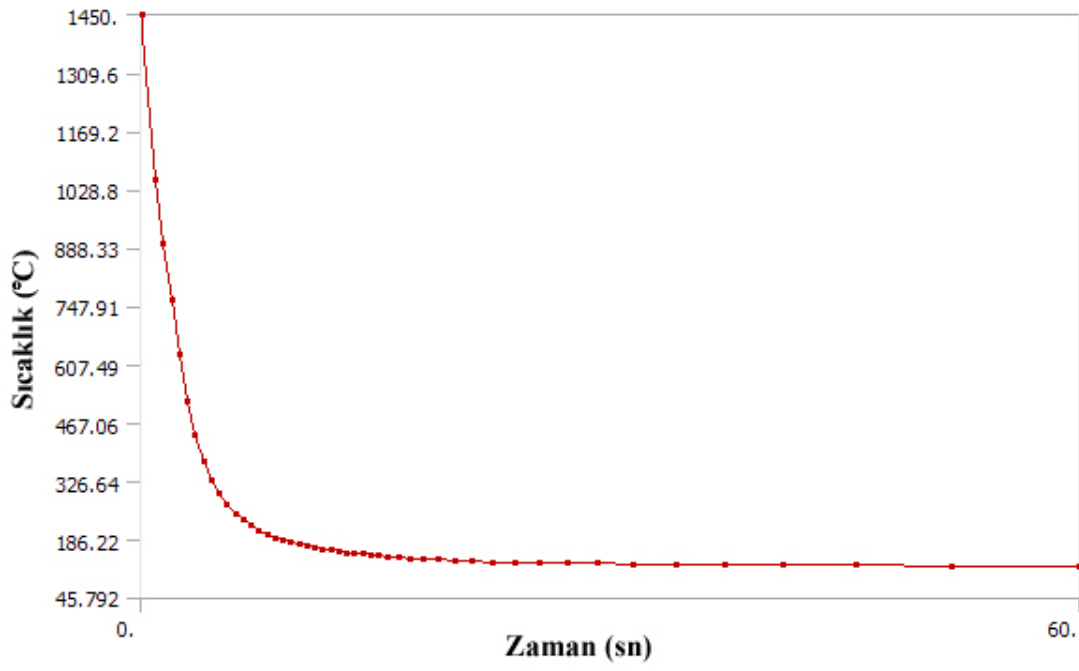


Şekil 7.23. İç köşe kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı

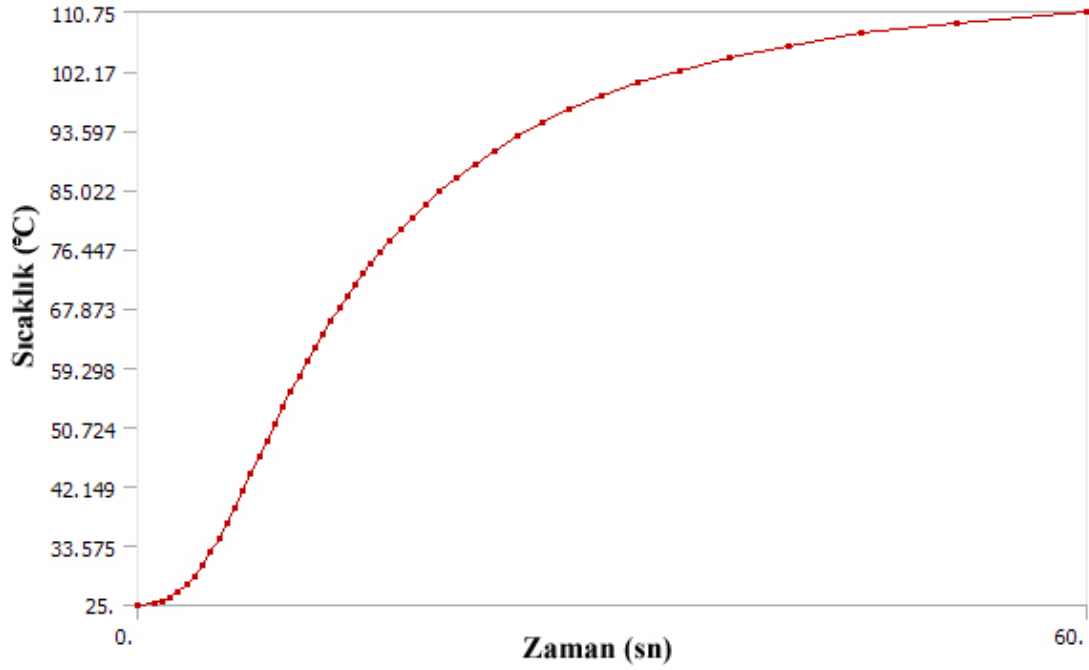


Şekil 7.24. İç köşe kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı

Kaynak metalinin sıcaklığının 10. saniye sonunda 1450 °C'den 185 °C'ye, 60. saniye sonunda ise 122 °C'ye düştüğü ve esas metal sıcaklığının ise 25 °C'den 60 saniyede 110 °C'ye yükseldiği görülmektedir. Şekil 7.21'den ise 30 dakika sonra parçanın tamamının yani kaynak metali ve esas metal sıcaklığının aynı sıcaklık değerine ulaştığı anlaşılır. Parçanın tamamının ortam sıcaklığına gelmesi yaklaşık olarak 20 saat sürmektedir. Fakat ortam sıcaklığına yaklaşması ilk bir saatten sonra başlamıştır. Bu zamandan sonra sıcaklık değerlerinin değişimi yani soğuma miktarı azalmaktadır. Aşağıdaki grafiklerde 60.saniyeye kadar parçanın sıcaklık-zaman eğrileri görülür. Grafiklerde ilk bir dakikanın göz önüne alınmasının sebebi yüksek sıcaklık farklarının bu zaman aralığı içinde olmasından dolayıdır.



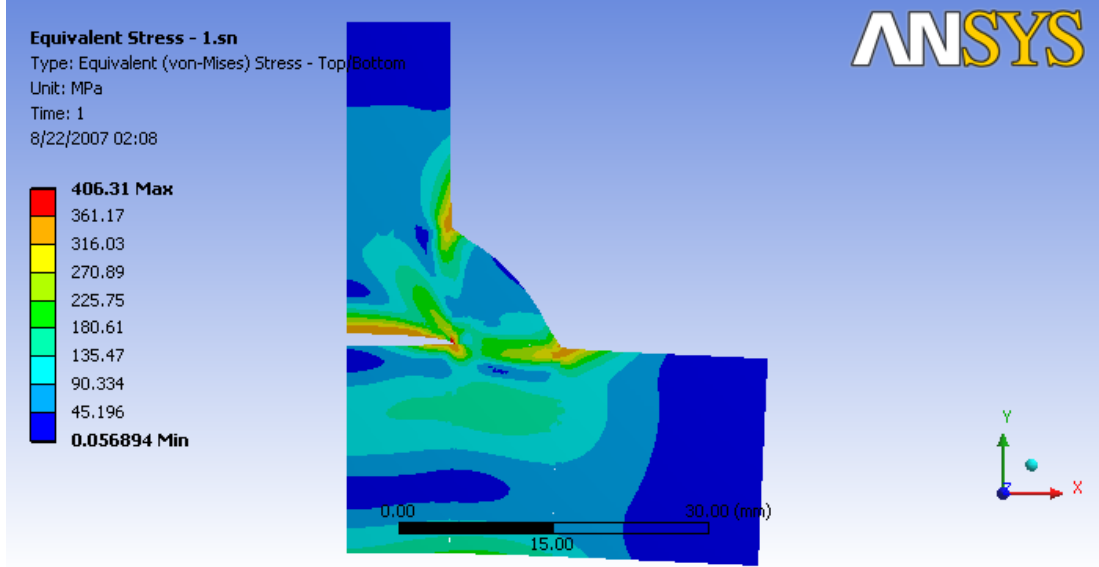
Şekil 7.25. İç köşe kaynak bağlantısının 60.saniyeye kadar olan max. sıcaklık-zaman grafiği



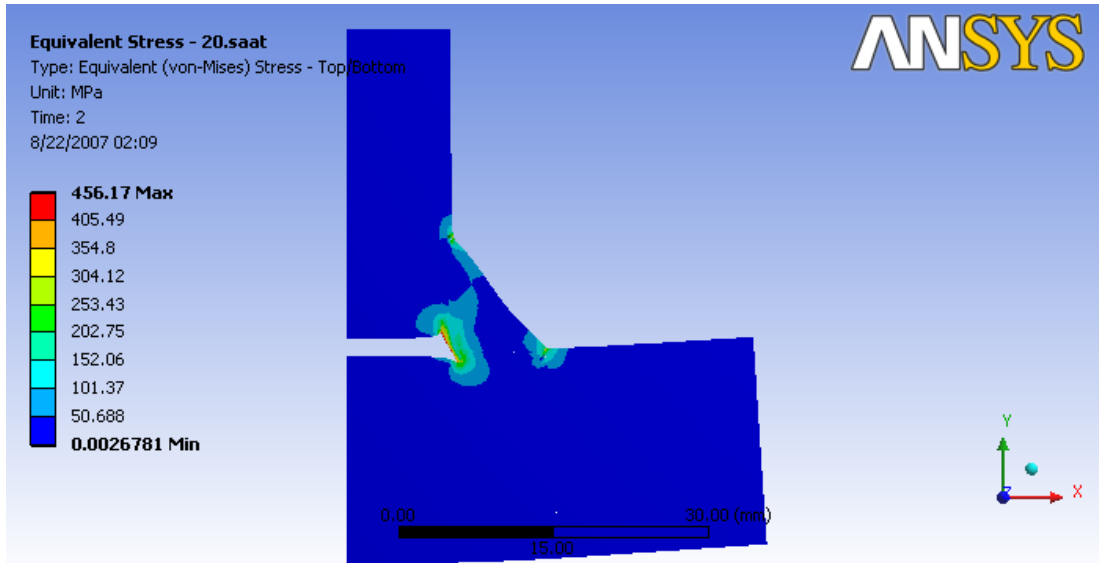
Şekil 7.26. İç köşe kaynak bağlantısının 60.saniyeye kadar olan min. sıcaklık-zaman grafiği

7.4. Yapısal Analiz Sonuçları

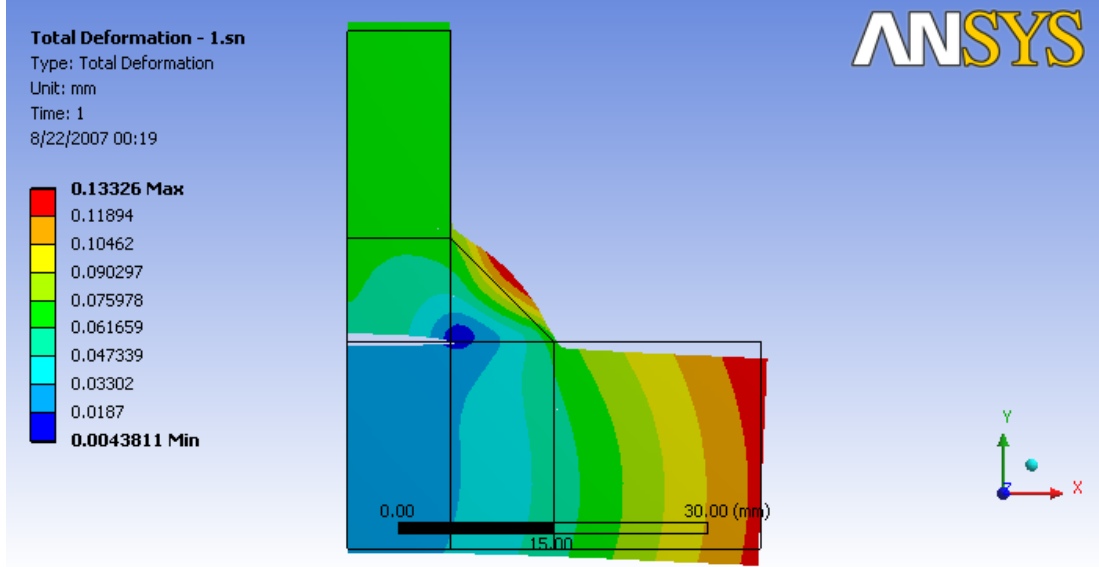
Isısal analiz için seçilen Transient Thermal Solid (Quad 8 Node 77) – Plane77 elemanının yapısal analiz eşleniği kullanılarak değiştirilir. İç köşe kaynak bağlantısının yapısal analizinde sınır şartları da değiştirilir. Yüksek sıcaklık farkından dolayı meydana gelen gerilme ve distorsiyonları daha rahat görebilmek için modellerde üst ana metal ile alt ana metalin simetrik kabul edilen çizgilerine (AC çizgisi) $UX=0$ deplasman uygulanarak meydana gelen değişimler elde edilir. Böylelikle alt esas metalin açılmal distorsiyondan dolayı ısının tesiri altında olmayan sağ uç kısmının Y yönünde yer değiştirdiği görülebilir. Uygulanan deplasman ve sıcaklıktan dolayı meydana gelen gerilme ve yer değiştirme sonuçları aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Aşağıdaki elde edilen gerilme değerleri analiz yapılırken 2 adımda sonuçlandırılmıştır. İlk adım kaynağın yapıldığı 1.saniye sonundaki gerilme ve yer değiştirmeler ikinci adımda ise parçanın tamamen soğuduğu 20.saat sonundaki gerilme ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



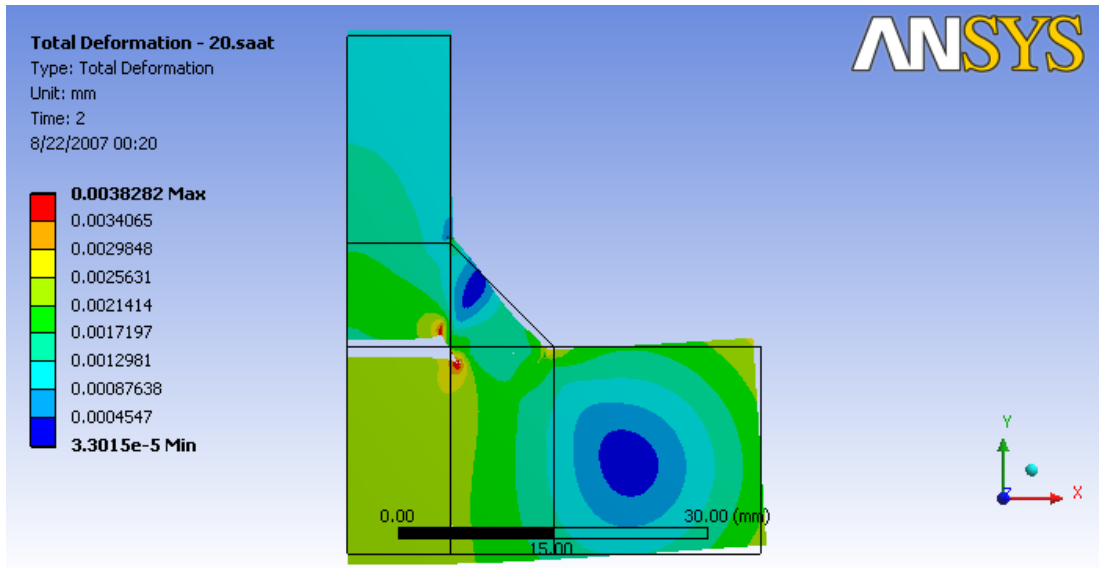
Şekil 7.27 İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



Şekil 7.28 İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



Şekil 7.29. İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



Şekil 7.30. İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)

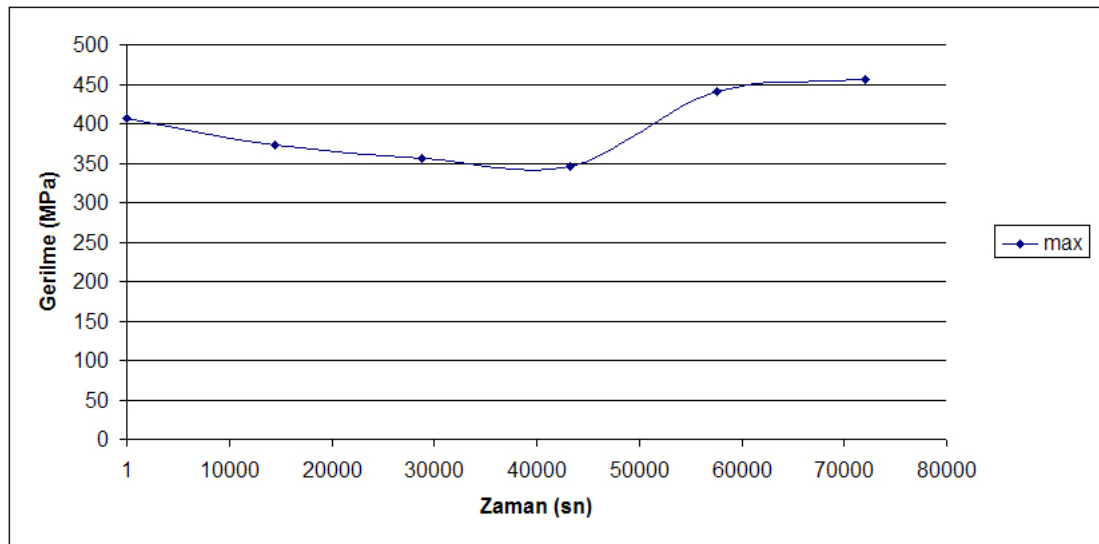
Yukarıdaki şekillerde yapısal analiz sonucunda parçada kaynak yapıldığı anda ve parça sıcaklığının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonra parçada kalan artık gerilme değerleri ve distorsiyonlar görülmektedir. Von-Mises'e göre 1.saniyede hesaplanan en büyük eşdeğer gerilme değeri 406 Mpa'dır. Şekil 7.27'de de görüldüğü gibi kaynak ana metalinden uzaklaştıkça gerilme değerlerinin azaldığı görülür. Bunun sebebi ısı transferinin yeni başlamış olmasıdır. Zaten meydana gelen gerilmelerde yüksek sıcaklık farklarından dolayı oluşan basma ve çeki gerilmeleridir. Parçanın alt ana metali uç kısmından aşağıya doğru yer değiştirdiği görülür. Bunun sebebi modelin AC çizgisinden sınırlandırılmış olmasından dolayı, parça kaynak edilmeye başladığı anda çeki gerilmelerinin oluşmasıdır.

Kaynak işlemi esnasında, yeni katılan bölgeler, kaynak dikişinin diğer bölgelerinin büzülmesine karşı koyarlar. Kaynak ana metali katılıp, büzülürken, kendisini çevreleyen esas metal, ısı etkisi altındaki bölgeye gerilme uygular. Kaynak metali, katılmanın başlangıcında sıcaktır ve mekanik özellikleri esas metale nazaran daha zayıftır. Bu sebeple uyguladığı gerilmenin değeri düşüktür. Kaynak bölgesinin sıcaklık değeri ortam sıcaklığına ulaşana dek uygulanan gerilme değeri artar ve esas metal ile ısının etkisi altındaki bölgenin akma dayanımına ulaştığı ve çoğu zaman bu değer üzerinde çıktığı gözlenir. Ulaşılan maksimum gerilme değeri kaynak kökünde meydana gelmiştir. Bunun neticesinde kaynak ana metali üst ve alt ana metali çekmeye çalışmasından dolayı şekil 7.27'deki formu alır. Aynı zamanda en büyük gerilme değerleri kaynak kökü ile üst ve alt kaynak ayak uçlarında olduğu görülür. Bunun bu şekilde olmasının sebebi kaynak metalinin çeki gerilmesi oluşturması neticesinde en yakın bölgelerin çeki gerilmelerine maruz kalmasıdır. Kaynak kökü ile kaynak ayak uçlarında gerilmelerin yüksek olması ise parçanın geometrisiyle alakalıdır. Kaynak ana metalinin ilk saniyede dış bükey durumunda olması yine çeki gerilmelerinden dolayıdır. Çünkü kaynak metali üst esas metal ile alt esas metali temas yüzeylerinden çekmeye çalışacaktır.

Şekil 7.28'de parçanın tamamen soğuduktan sonraki parça da kalan artık gerilme değerleri görülmektedir. Bu şekle bakıldığında ilk durumdan farklı olarak alt esas metalin sağ ucunun +Y yönünde yer değiştirdiği gözlenir. Bunun sebebi parça soğurken aynı zamanda büzülmesidir. Kalıcı artık gerilmeler sadece kaynak kökü ile

üst ve alt kaynak uçların da oluşmuştur. Gerilme değerlerine bakıldığında da, model de analiz için kullanılan çeliğin akma dayanımının üzerinde olduğu ve kalıcı şekil değişiklikleri ile deformasyonların meydana geldiği gözlenir. Bu şekilde bir sonuç ortaya çıkması olağan bir sonuçtur.

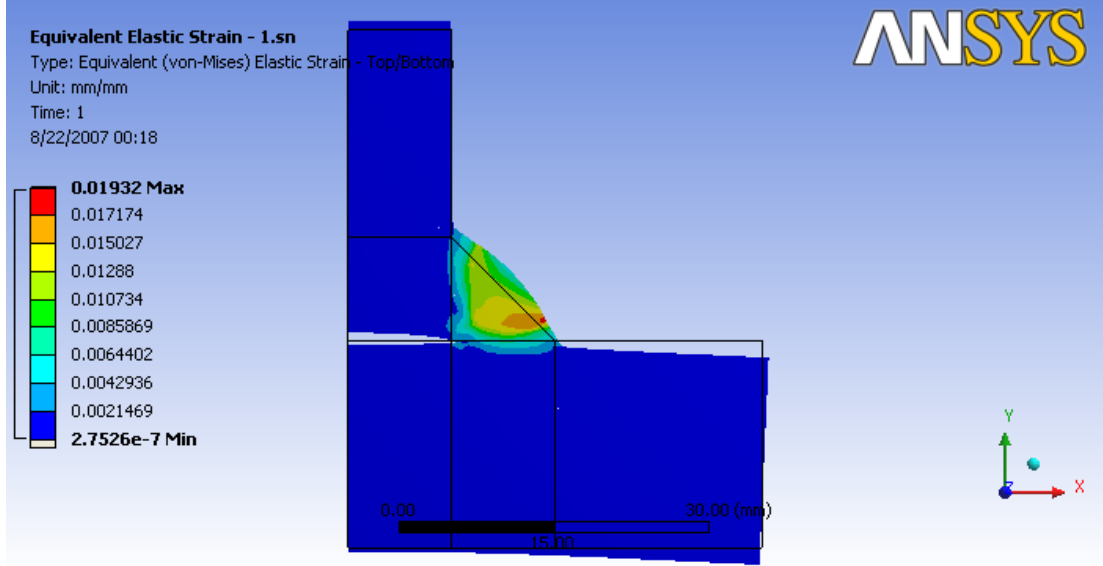
Şekil 7.29. ve 7.30. da kaynağın yapıldığı anda ve kaynaktan sonra ortam sıcaklığına ulaşıldığı durumda meydana gelen yer değiştirmeler görülmektedir. Soğuma sonunda parçada kalıcı şekil değişikliği olmuştur. Bu değer alt ana metalin sağ ucunda en büyük değerde olup meydana gelen yer değiştirme miktarı 0.0038282 mm'dir



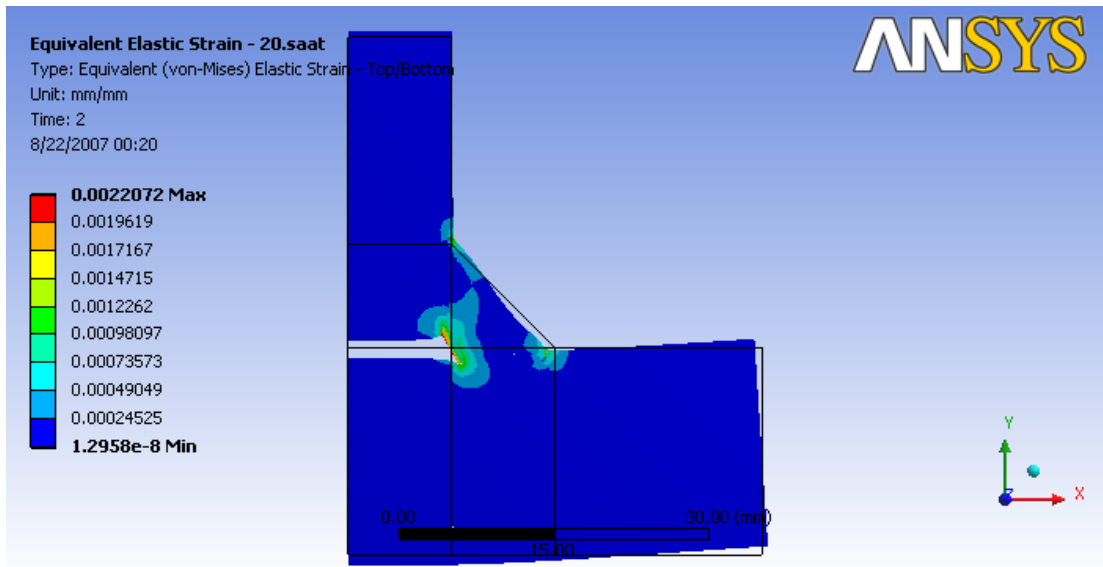
Şekil 7.31. İç köşe kaynak bağlantısında kaynak ana metalinin en büyük gerilme değerlerinin zamana göre değişimi grafiği

Şekil 7.31 deki grafikte kaynak yapıldıktan hemen sonra parçada meydana gelen en büyük gerilme değeri 406 MPa'dır. Bu değer akma dayanımı değeri üzerinde olduğundan parçada elastik deformasyonlar oluşur. Soğumanın başlaması ile birlikte kaynak dikişi ve esas metal arasındaki ısı transferinin etkisiyle gerilme değeri bir miktar düşecektir. Fakat artan zaman bası kuvvetlerini artıracak ve büzülmelere sebebiyet verecektir. Grafiğe bakıldığında soğumanın en son hali olan ortam sıcaklığına ulaştığı durum da gerilme değerinin ilk değerine nispeten yükseldiği görülür. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra homojen sıcaklığı ulaştığı 25 °C de parçanın en

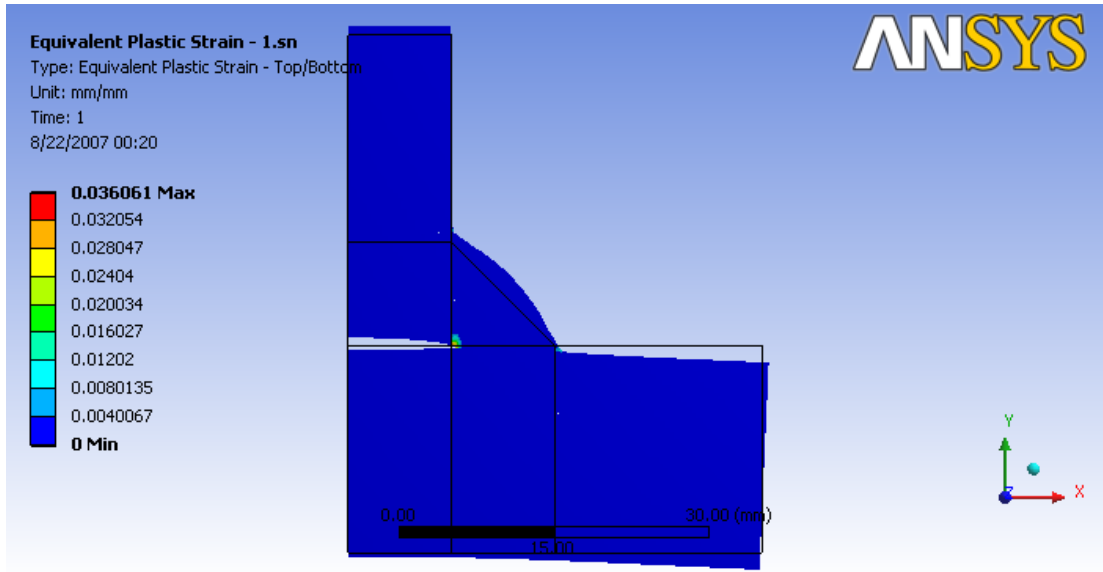
büyük gerime değeri 452 MPa olup kalıcı şekil değişikliklerinin (plastik deformasyon) ortaya çıktığı gözlenir.



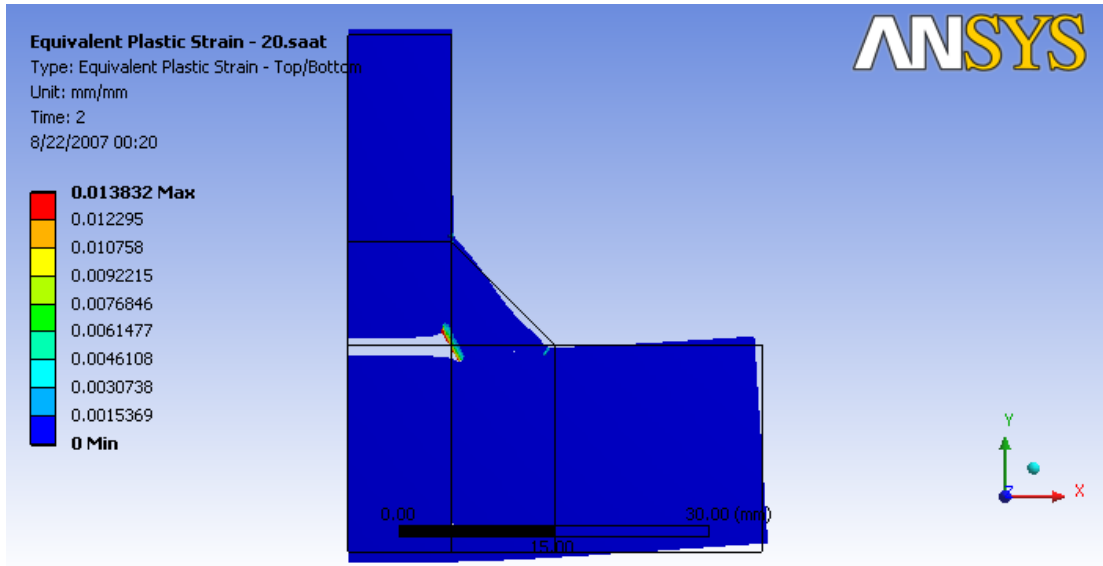
Şekil 7.32. İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki anda ısıl gerilmeler neticesinde meydana gelen elastik gerinimler



Şekil 7.33. İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki anda ısıl gerilmeler neticesinde meydana gelen elastik gerinimler



Şekil 7.34. İç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki anda ısı gerilmeler neticesinde meydana gelen plastik gerinimler



Şekil 7.35. İç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki anda ısı gerilmeler neticesinde meydana gelen plastik gerinimler

Yukarıdaki şekillere incelendiğinde kaynağın yapıldığı anda en büyük elastik gerininin alt kaynak ayağına yakın olan kısımda 0.01932 mm/mm değerinde meydana geldiği gözlenir. Aynı anda meydana gelen plastik gerinimler ise ilk durumdan farklı olarak kaynak kökünde oluşmuş ve 0.03606 mm/mm değerindedir. Kaynak ana metali ile esas metal arasındaki sıcaklık farkının tamamen ortadan kalktığı en son durum için oluşan elastik gerinim değeri 0.0022072 mm/mm ve plastik gerinim değeri ise 0.013832 mm/mm değerindedir. Sıcaklık değerinin homojen olduğu anda en büyük elastik ve plastik gerinimler kaynak kökünde meydana gelmiştir.

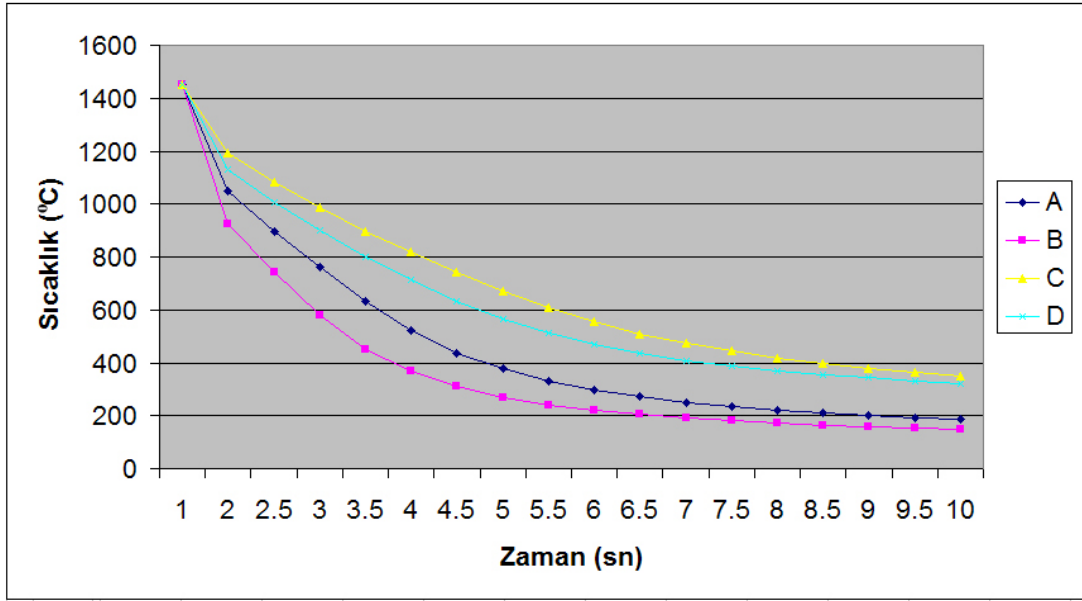
İç köşe kaynak bağlantısı için yapılan yukarıdaki adım ve analizler diğer modellerimiz içinde uygulanır. Elde edilen sonuçlar neticesinde modeller ilk modelin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bundan sonraki adımlarda grafiklerde kolay okunabilmesi ve karışıklığı önlemek için modellerimiz aşağıdaki şekilde kısaltılmıştır.

A - İç Köşe Kaynağı,

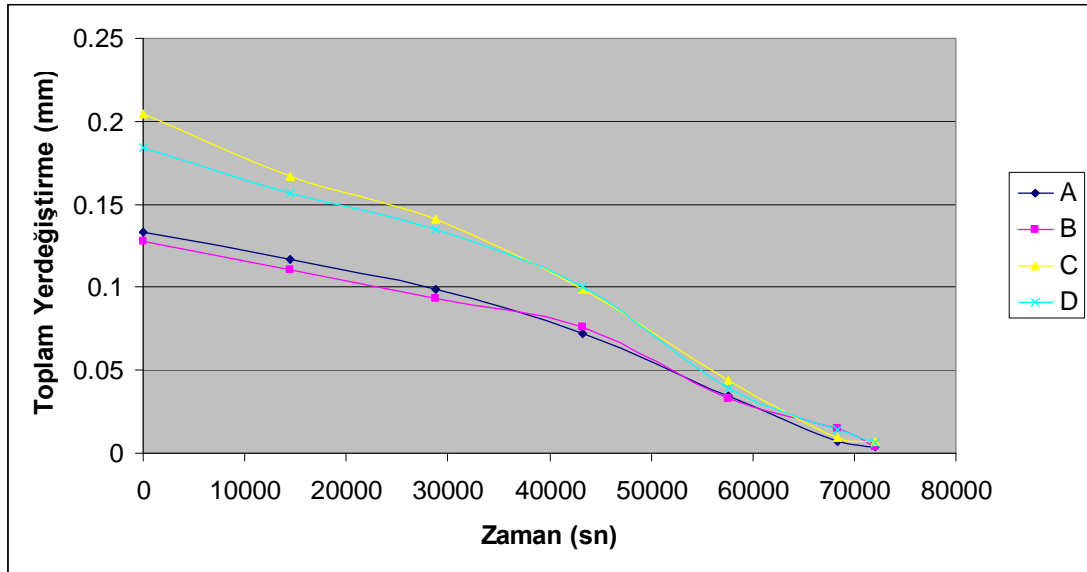
B – İç Bükey (R=16mm) İç Köşe Kaynağı

C - 45°'lik Kaynak Ağızı Açılmış İç köşe kaynağı (T Kaynağı),

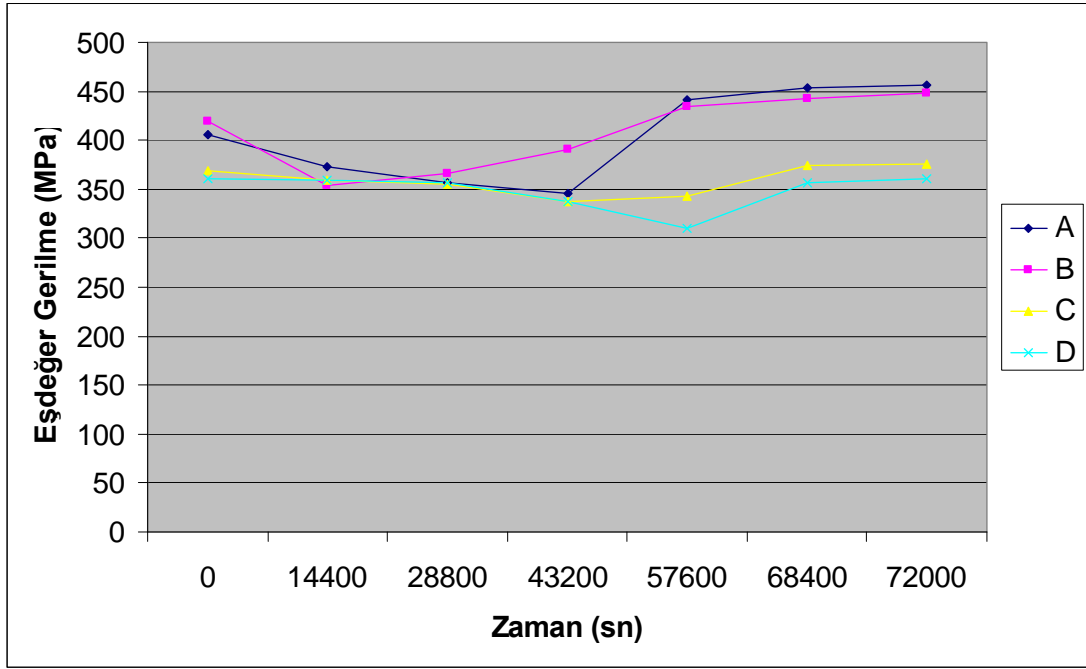
D - 45°'lik Kaynak Ağızı Açılmış İç Bükey (R=16mm) İç köşe kaynağı (T Kaynağı),



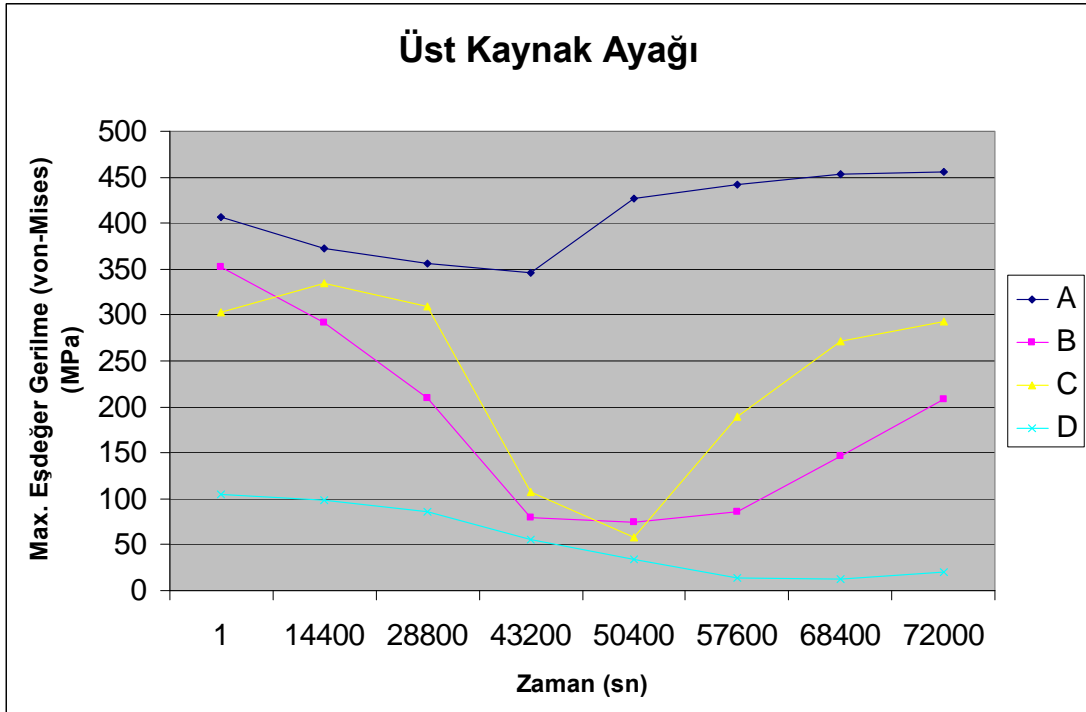
Şekil 7.36. Modellerin ilk 10. saniye kadar olan soğuma grafikleri



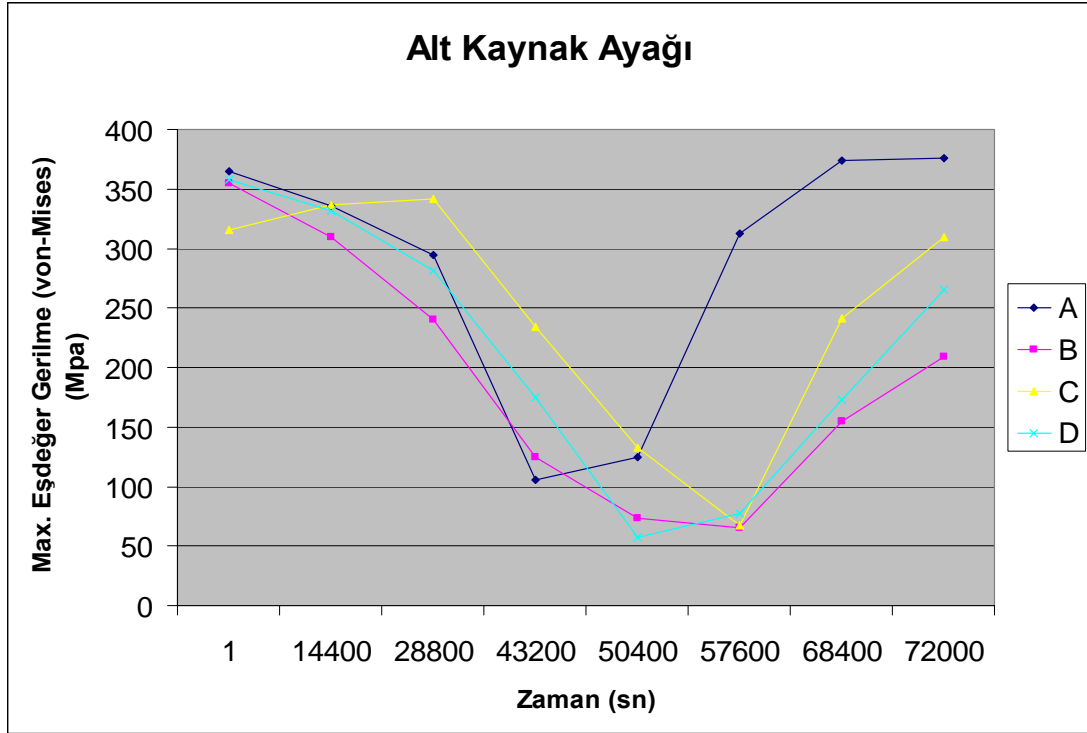
Şekil 7.37. Modellerin soğuma zamanına göre artık gerilmelerden kaynaklanan toplam yer değıştirme grafikleri



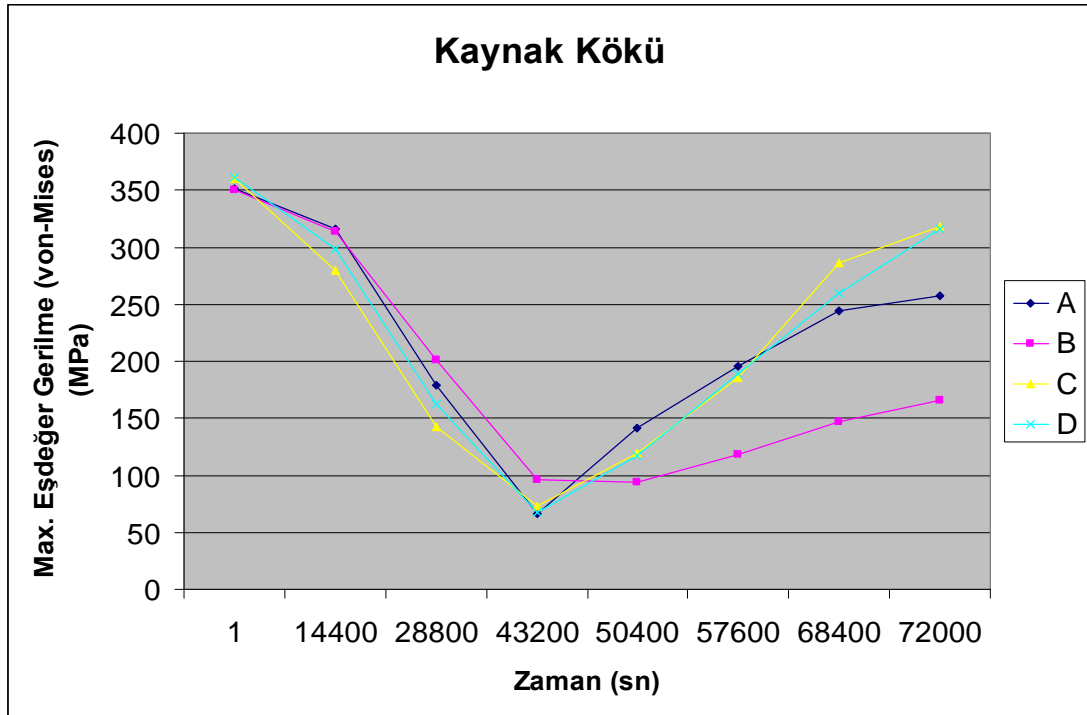
Şekil 7.38. Modellerin zamana göre artık gerilmelerden kaynaklanan en büyük eşdeğer gerilme grafikleri



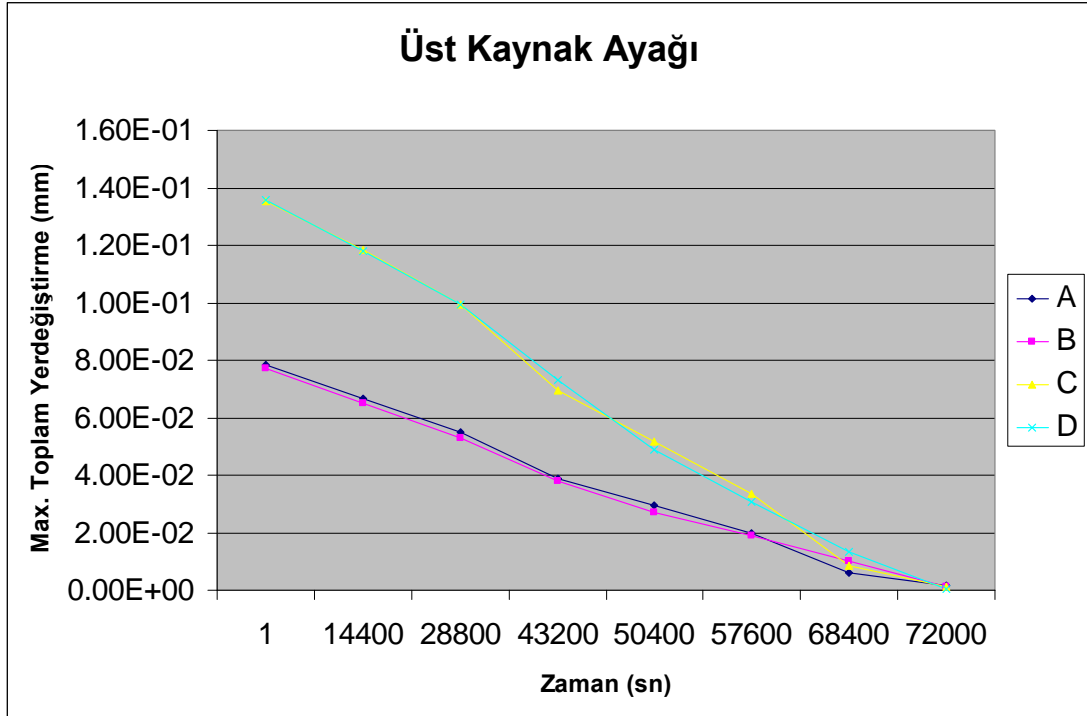
Şekil 7.39. Modellerin artık gerilmelerden dolayı üst kaynak ayağında meydana gelen eşdeğer gerilme grafikleri



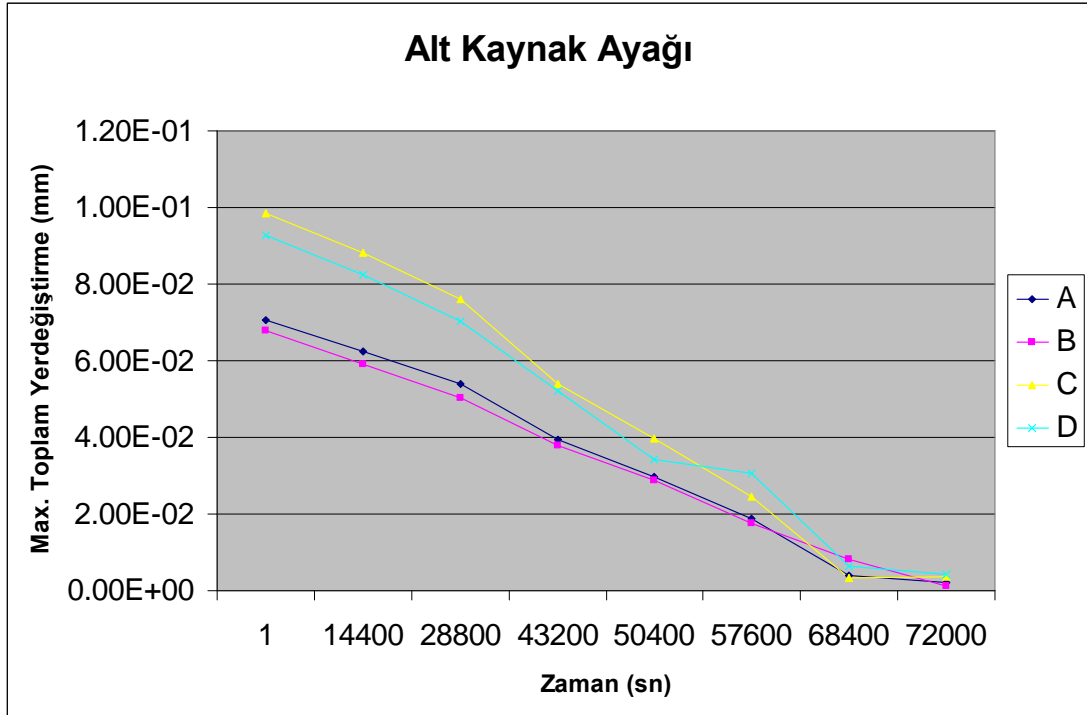
Şekil 7.40. Modellerin artık gerilmelerden dolayı alt kaynak ayağında meydana gelen eşdeğer gerilme grafikleri



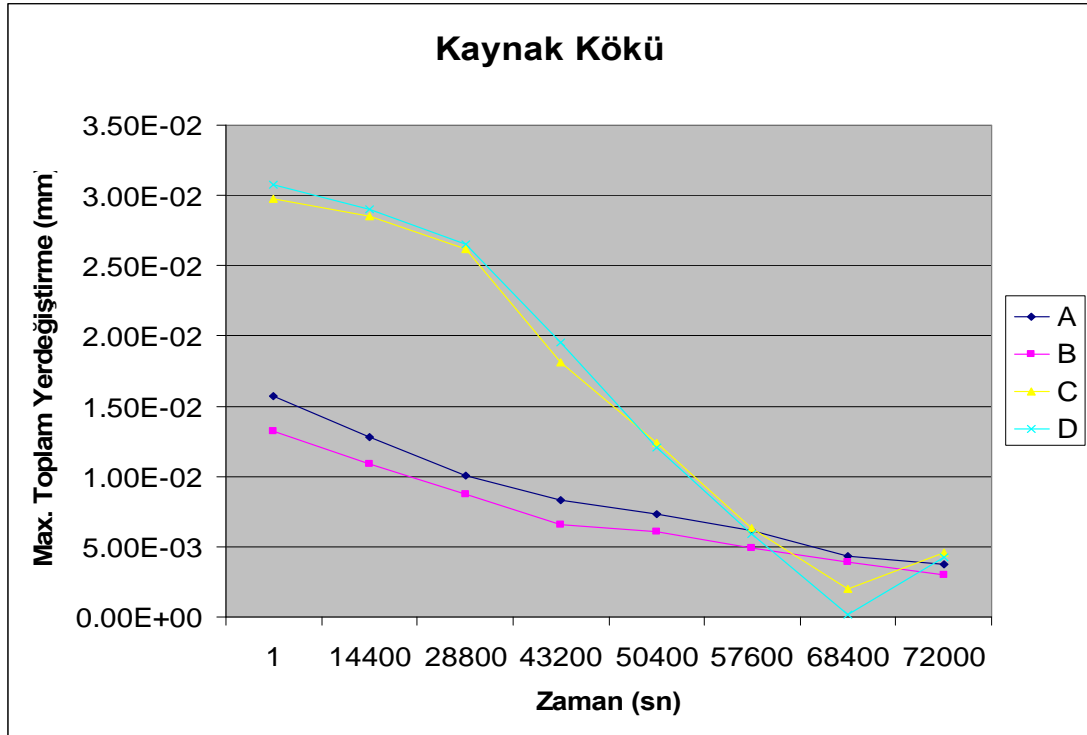
Şekil 7.41. Modellerin artık gerilmelerden dolayı kaynak kökünde meydana gelen eşdeğer gerilme grafikleri



Şekil 7.42. Modellerin artık gerilmelerden dolayı üst kaynak ayağında meydana gelen maksimum yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.43. Modellerin artık gerilmelerden dolayı alt kaynak ayağında meydana gelen maksimum yer değiştirme grafikleri



Şekil 7.44. Modellerin artık gerilmelerden dolayı kaynak kökünde meydana gelen maksimum yer değiştirme grafikleri

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dört ayrı kaynak bağlantı modeli için termal ve yapısal analizler incelenmiştir. Bunlar köşe kaynak bağlantısı, iç bükey (R=16mm) köşe kaynak bağlantısı, 45 °'lik kaynak ağızı açılmış köşe kaynak (T kaynağı) bağlantısı ve 45 °'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey (R=16mm) köşe kaynak (T kaynağı) bağlantısıdır. Bu bağlantı şekillerinde meydana gelen artık gerilmeler, yer değiştirmeler ile elastik ve plastik deformasyonları analiz edilerek birbirleri ile olan emniyetleri kıyaslanmıştır.

Bütün kaynaklı parçalar az veya çok distorsiyona uğrarlar ve daima parça içinde artık gerilmeler kalır. Kaynaktan sonra oluşan gerilme ve distorsiyonlar parçanın kalitesine etki eder, düzgün çalışmasını engelleyebilir. Bu bakımdan daha proje aşamasında iken parçada oluşacak gerilme ve distorsiyonları önceden tahmin etmek bunları önleyecek şekilde tasarım yapmak gerekmektedir. Bu değerleri önceden tahmin etmek için deneysel çalışmalar yapılır. Fakat farklı durum ve karışık problemler için deneysel çalışmalar yapmak her zaman için mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda nümerik metotlara başvurulur. Hesaplar bilgisayar ortamında çözüldüğünden karmaşık problemleri çözmek daha hızlı ve kolaydır. Bu şekilde farklı durumlardaki kaynaklı parçaların gerilme ve distorsiyon değerleri kolayca elde edilir ve ona göre önlem alınır.

Kaynağın soğuma süresi, kaynak bölgesinin (parçanın) sıcaklığına, kaynak dikişi miktarına, esas ana metalin kalınlığına ve ortam sıcaklığına bağlıdır. Termal analiz de görülmüştür ki en hızlı soğuma iç bükey köşe kaynak bağlantısında meydana gelmiştir. Soğumanın iç bükey köşe kaynak bağlantısında hızlı olması kaynak dikiş miktarı ile alakalıdır. Miktar artıka soğuma azalacaktır. Kaynak ağızı açılmış kaynak bağlantılarında ise ilk iki modele nispeten soğuma süreleri daha uzun sürer. T kaynağının düz köşe kaynak ve iç bükey kaynak olmasına göre ise kaynak dikişinin

miktarından dolayı yine iç bükey de soğuma hızlıdır. Bu değişim elde edilen grafiklerde ilk 10. saniye içinde modellerde meydana gelen sıcaklık değişimlerine bakılarak görülebilir.

Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise ilk saniyelerde maksimum sıcaklık kaynak dikişine yakın olan, ısının tesiri altındaki bölge olan kaynak kökü ile alt esas metalin sol ayak ucu arasında meydana gelmiştir. İlk saniyelerde bu şekilde bir sıcaklık dağılımı göstermesi, ısı transferinin en yakın bölgelerden başladığının göstergesidir. En büyük sıcaklık değeri kaynak modelin simetrik olduğu düşünüldüğünde ana metal kalınlığından dolayı kaynak kökü ile ana metallerin kaynak dikişine yakın olan bölgelerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Burada sıcaklık değerinin maksimum olması ise modellerimizin sol kısmını simetrik kabul ettiğimizden kaynaklanmaktadır. Kalınlık artıkça ısı transferi geç olacaktır. Böyle bir dağılım izlemesi olağan bir durumdur.

Homojen bir sıcaklığa ulaşılması tüm modellerde yaklaşık bir saatte yakın bir zaman içerisinde olur. Fakat parçaların sıcaklığının bütün yüzeylerde aynı değer olan ortam sıcaklığına ulaşması için 20 saatte yakın bir zamanın gerektiğini göstermiştir. Soğumanın ilk zamanlar da hızlı olması zamanın artmasıyla maksimum ve minimum sıcaklık farkları arasındaki değişim çok az olacaktır. Buda modellerin ortam sıcaklığına ulaşma sürelerini artıracaktır.

Kaynaktan sonra kalan artık gerilmeler parçanın emniyetine etki eder. Artık gerilmeler sistemin çalışma gerilmeleri ile birleşip gevrek kırılmaya ve gerilmeli korozyona sebebiyet verir. Bu bakımdan iş parçasından aşırı emniyet istenmemelidir. Parçada kalan artık gerilmeler ısıl işlemler ile azaltılabilir. Fakat ısıl işlemler ekonomik yapılmalıdır. Bütün bu sebeplerden ötürü kaynaktan sonra oluşabilecek artık gerilmelerin önceden tahmininin yapılması ve ona göre tasarım yapmak gerekir.

Kaynak işlemi sırasında ısınan işlem parçası genleşme ve daralma etkileri ile homojen dağılmamış kuvvetler ile karşı karşıya gelir. İlk olarak sıvı metal banyosu ısıl genleşme nedeni ile ilk etrafındaki soğuk malzemeye baskı kuvveti uygular. Daha sonra ise soğuyan kaynak bölgesine ısıdan etkilenen bölge tarafından çekme

kuvveti uygulanır. Eğer ısı genleşme ya da çekmeden dolayı oluşan yük, ana metalin akma noktasından daha büyük olursa bölgesel plastik deformasyon oluşur. Plastik deformasyon parçanın mukavemetini olumsuz etkiler ve malzemenin boyutlarında değişmelere yol açar.

Modeller için alınan sonuçlara bakıldığında artık gerilmelerin kaynak kökü ile kaynak ayak uçlarında en büyük değerlerde olduğu görülür. Bu bölgelerde oluşmasının sebebi kaynak ana metalinin sıcaklıktan dolayı meydana getirdiği çeki ve bası kuvvetleridir. Kaynağın yapıldığı ilk anda görülmüştür ki alt esas metalin hareketine izin verilen sağ tarafı kaynak banyosunun ısı genleşmesi nedeni ile bası kuvveti oluşturmasından dolayı parçayı Y yönünde yer değiştirmesine sebep olmuştur. Fakat soğuma ile birlikte büzölmeler olduğundan dolayı distorsiyonlar yön değiştirerek alt esas metalin hareketine izin verilmiş olan kaynak dikişine uzak olan ucu +Y yönünde yer değiştirdiği görülecektir. En büyük açısız distorsiyon 45°'lik köşe kaynak (T kaynağı) bağlantısında meydana gelmiştir. Kaynak ağız açılması parçanın emniyetini artırmasına rağmen kaynak dikişinin miktarından dolayı distorsiyonları da artırmaktadır. Aynı malzeme özellikleri ve benzer kaynak bağlantı şekli kullanılarak daha önceden deneysel ve sayısal benzer çalışmalar yapılmıştır [20]. Yapılan bu analiz sonucunda elde edilen gerilme ve yer değiştirme değerleri, daha önce yapılan benzer çalışmalara yakın sonuçlar çıkardığı görülmüştür.

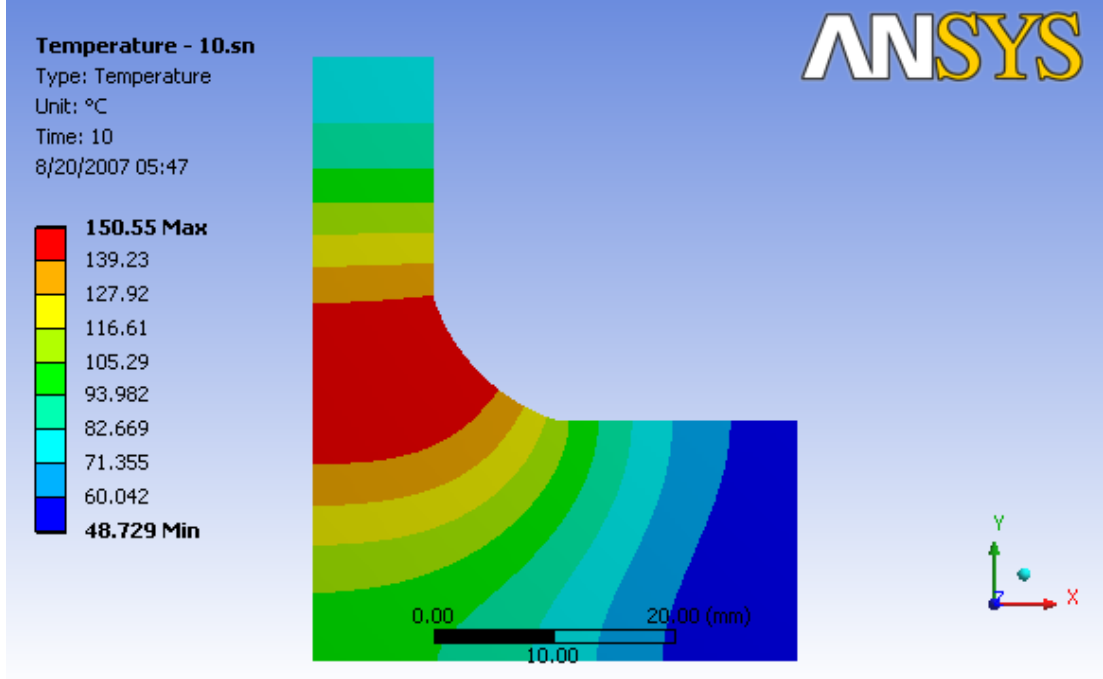
Alınan sonuçlara bakıldığında dört bağlantı şekli için toplam yer değiştirme ve eş değer gerilme değerine göre en emniyetli olan model 45°'lik kaynak ağız açılmış iç bükey köşe kaynak (T kaynağı) bağlantısı olduğu görülür. Fakat distorsiyonlar da ilk iki modele oranla bu bağlantı şeklinde daha büyük olduğu görülür. Bunun yanında termal analizlerde göz önüne alındığında kaynak dikişi miktarının en fazla olduğu T kaynaklarında soğumanın en geç olduğu gözlenir. Köşe kaynağı ve iç bükey köşe kaynağında ise yer değiştirme ve gerilme değerlerine göre emniyetli olan bağlantı şeklinin bu çalışmada iç bükey köşe kaynak bağlantısı olduğu görülür.

KAYNAKLAR

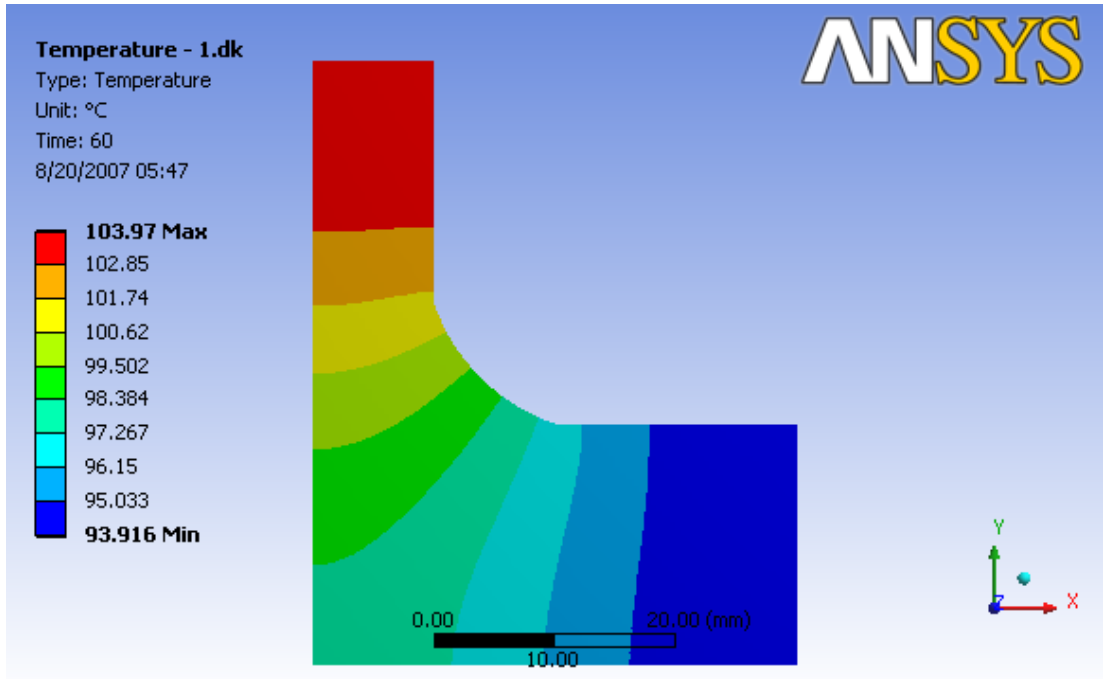
- [1] NING, X., M.A., & UEDA, Y., & MURAKAWA, H. & MAEDA, H., FEM analysis of 3D welding residual stresses and angular distortion in T-type fillet welds. *JWRI*, 24. 1995; 115-122.
- [2] WANG, J., & UEDA, Y., & MURAKAWA, H., & YUAN, M.G., & YANG, H.Q., Improvement in numerical accuracy and stability of 3D FEM analysis in welding”, *Welding Journal*. 1996; 129-134.
- [3] PRASAD, N.S., & NARAYANAN, T.K.S., Finite element analysis of temperature distribution during arc welding using adaptive grid technique. *Welding Journal*. 1996; 123-128.
- [4] JEONG, S.K., & CHO, H.S., An analytical solution to predict the transient temperature distribution in fillet arc welds”. *Welding Journal*. 1997; 223-232.
- [5] DONG, Y., & HONG, J.K., & TSAI, C.L., & DONG, P., Finite element modeling of residual stresses in austenitic stainless steel pipe girth welds. *Welding Journal*. 1997; 442-449.
- [6] HONG, J.K., & TSAI, C.L., & DONG, P., Assessment of numerical procedures for residual stress analysis of multipass welds. *Welding Journal*. 1998; 372-378.
- [7] NGUYEN, T.N., & WAHAB, M.A., The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. *Journal of Material Processing Technology*, 77. 1998; 201-208
- [8] TENG, T.L., & LIN, C.C., Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75. 1998; 857-864
- [9] MURUGAN, S., & RAI, S.K., & KUMAR, P.V., & JAYAKUMAR, T., & RAJ, B., Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78. 2001; 307-317
- [10] TENG, T.L., & FUNG, C.P., & CHANG, P.H., & YANG, W.C., Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78. 2001; 523-528
- [11] KARADENİZ, S., Kaynak makinaları. *İzmir. DEU Müh. Fak.Yayınları*.

- [12] ANIK, S., & TÜLBENTÇİ, K., & KALUÇ, E., Örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağı. *İstanbul. Gedik Holding A.S.Yayınları*. 1991.
- [13] KILIK, R., Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılım ve değişimine ısı özelliklerin, gizli ergime ısısının ve elektrod çapının etkisi. *İstanbul. İTÜ Doktora Tezi*. 1983.
- [14] GRONG, O., Metallurgical modeling of welding. *The Institute of Materials*. 1994.
- [15] TOPÇU, M., & TAŞGETİREN, S., Mühendisler için sonlu elemanlar metodu. *PAÜ Mühendislik Fakültesi Matbası, Ders Kitapları Yayın No: 007, ISBN 975-6992-03-4*, 1998; DENİZLİ.
- [16] KURTAY, T., Sonlu elemanlar yöntemine giriş. *İTÜ Makina Fakültesi Yayınları*. 1980.
- [17] ANSYS, Inc., ANSYS Theory manual release 11.0., Swanson *Analysis System.U.S.A.* 2006.
- [18] P. MICHALERIS., & A. DEBICCARI., Prediction of welding distortion. *Welding Journal*, 76. 1997; 172-181
- [19] MOAVANI, S., Finite element analysis theory and application with ANSYS, *Prentice-Hill*, 1999.
- [20] MICHALERIS. P., & DANTZING. J., & TORTORELLI. D., Minimization of welding residual stress and distortion in large structures, *The Penn State University, University Park, PA*, 1999.

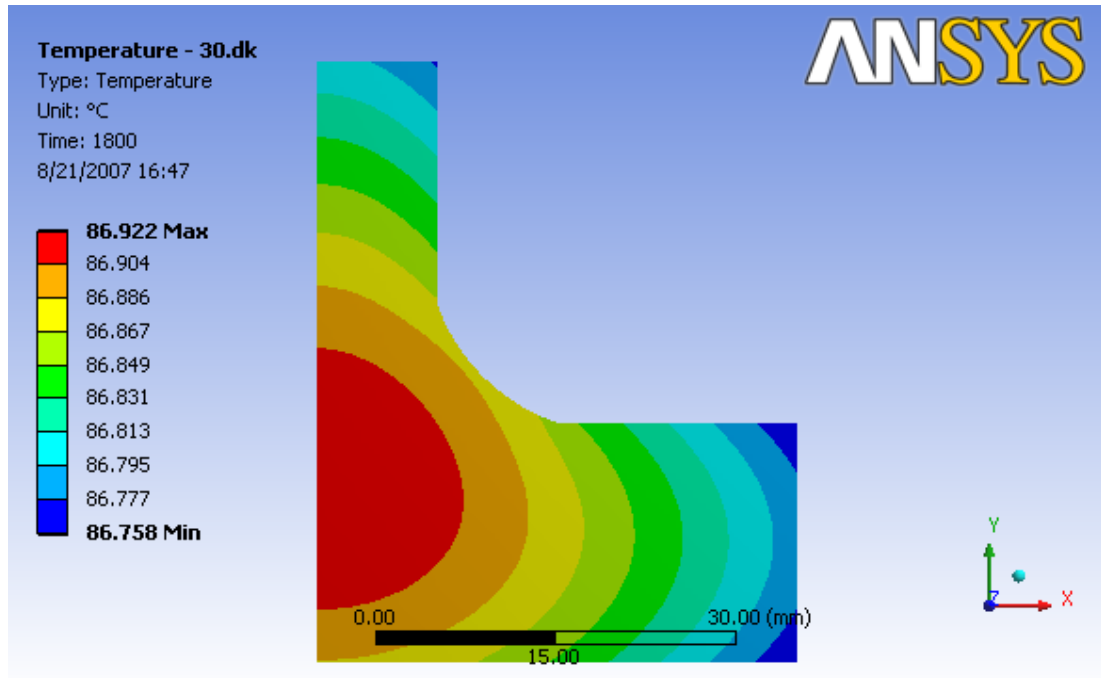
EKLER



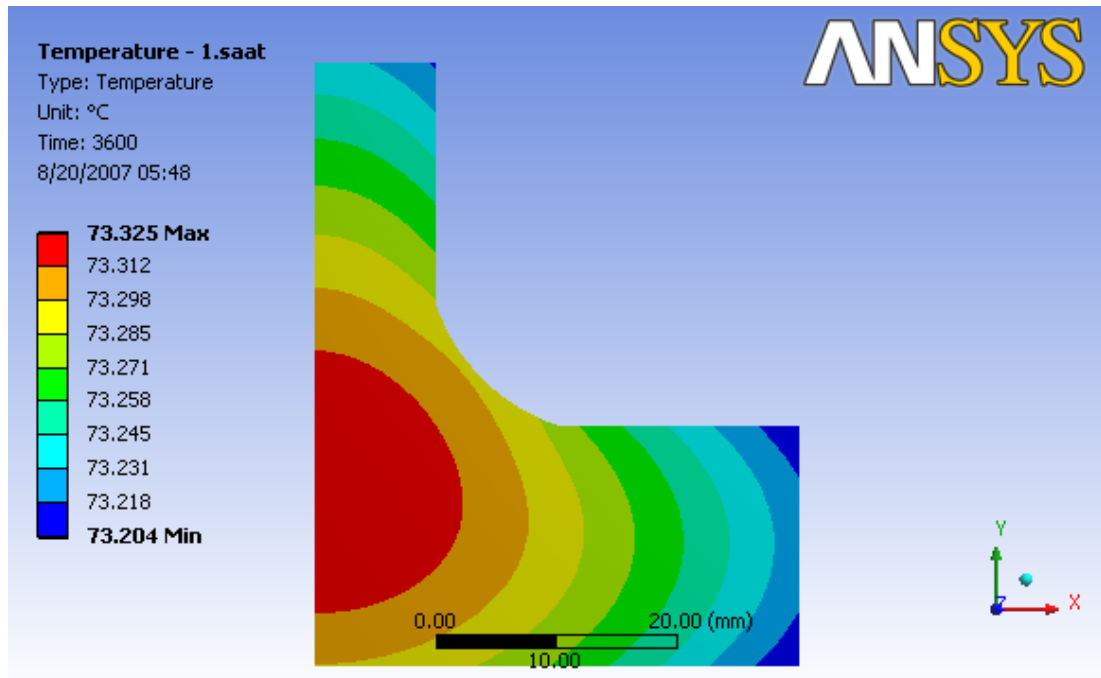
Şekil E.1. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



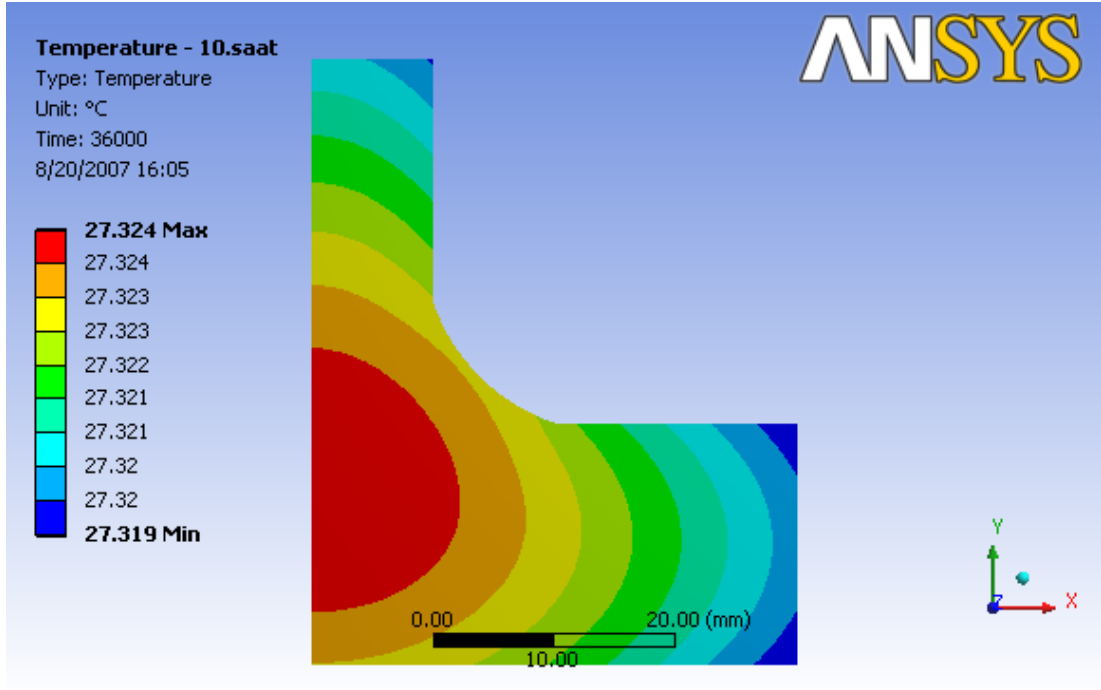
Şekil E.2. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



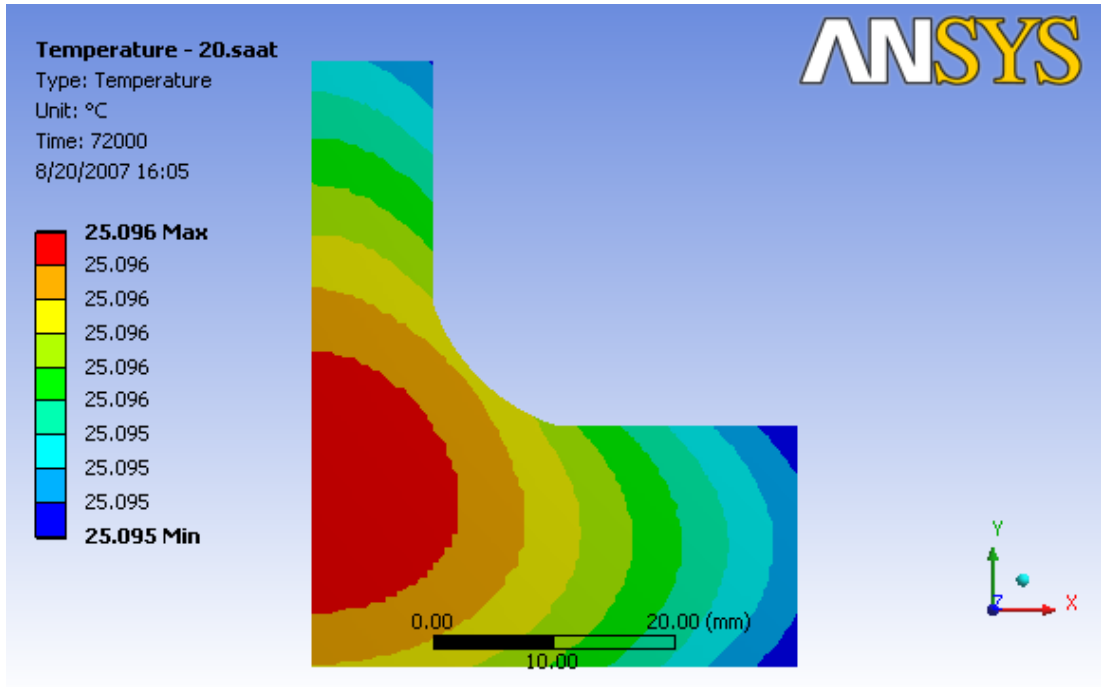
Şekil E.3. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı



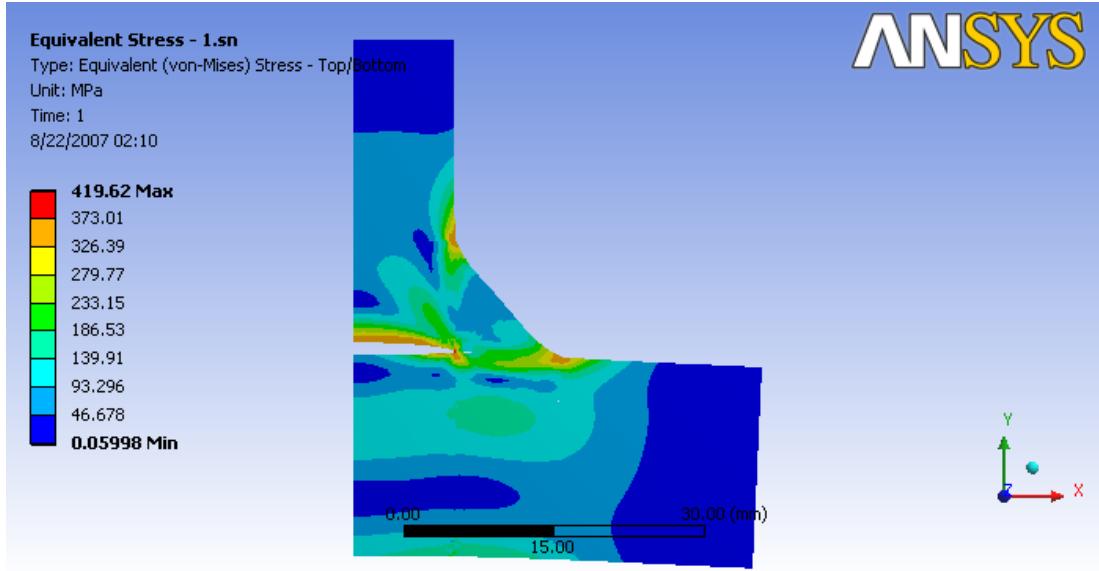
Şekil E.4. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



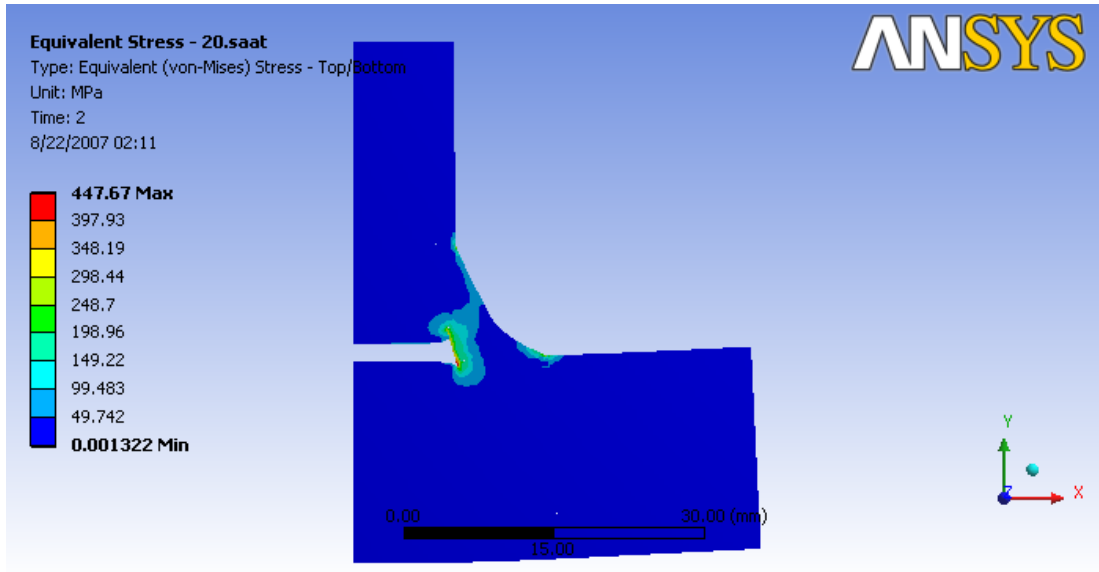
Şekil E.5. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



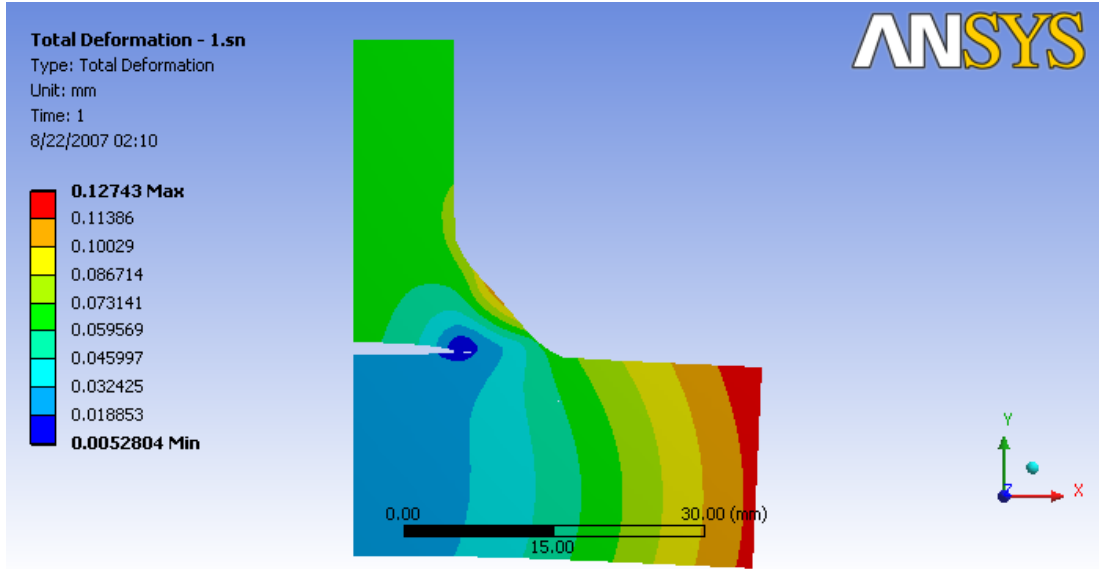
Şekil E.6. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



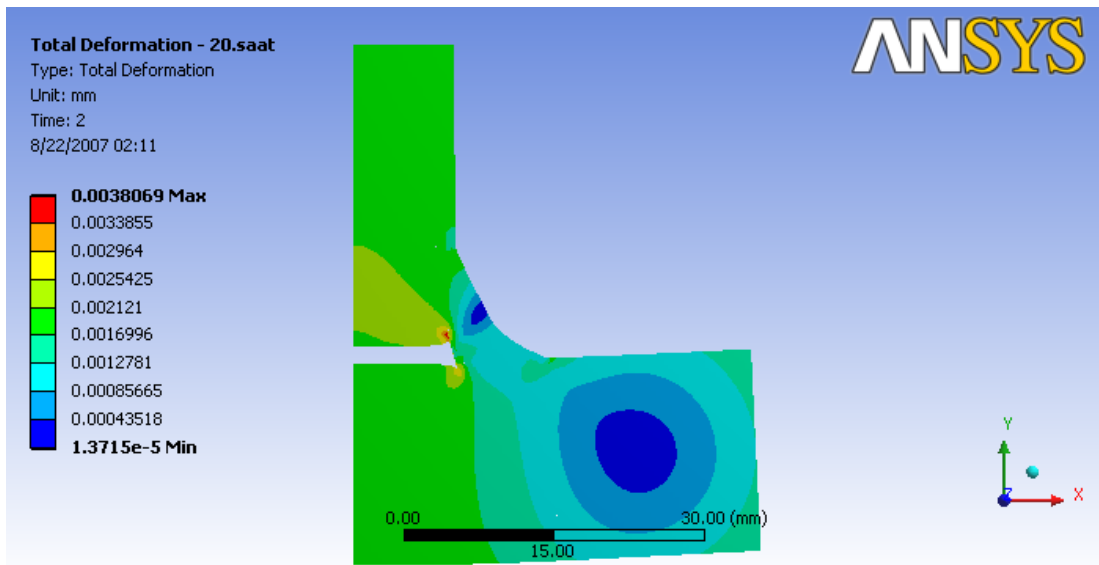
Şekil E.7. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



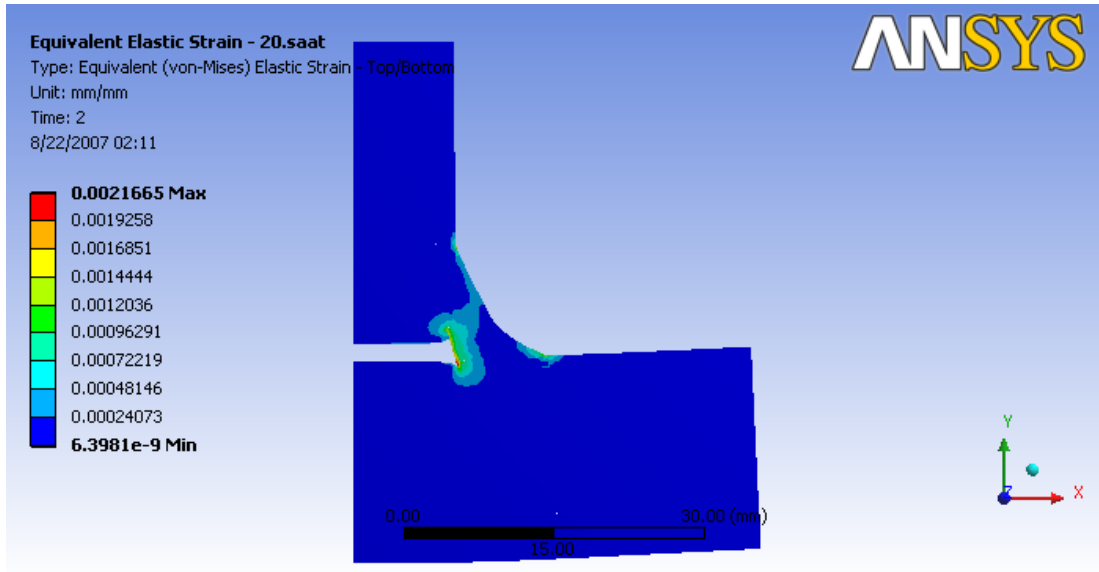
Şekil E.8. İç bükey (R=16mm) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



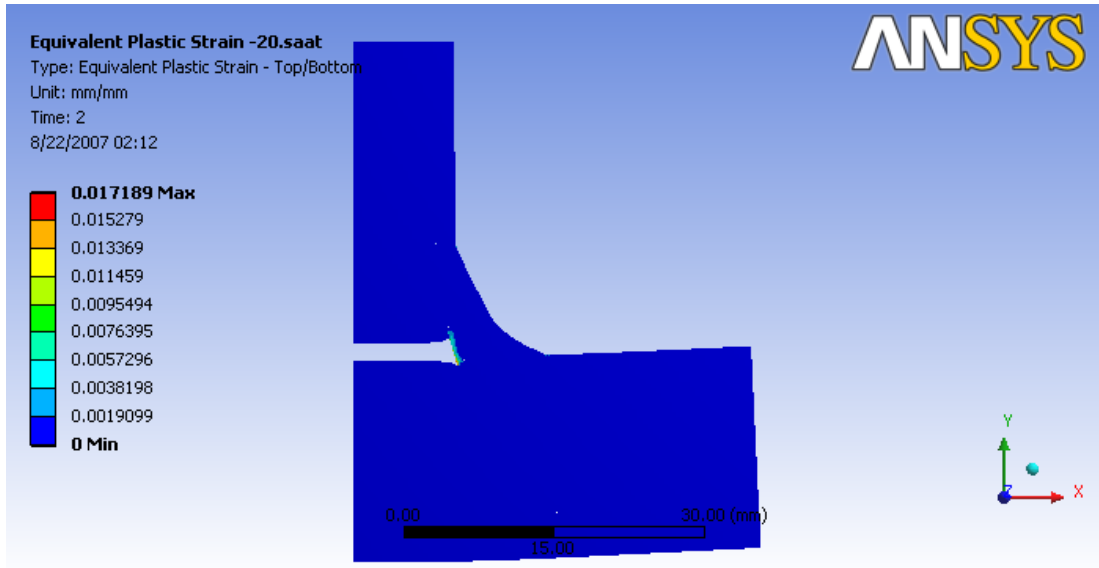
Şekil E.9. İç bükey ($R=16\text{mm}$) iç köşe kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



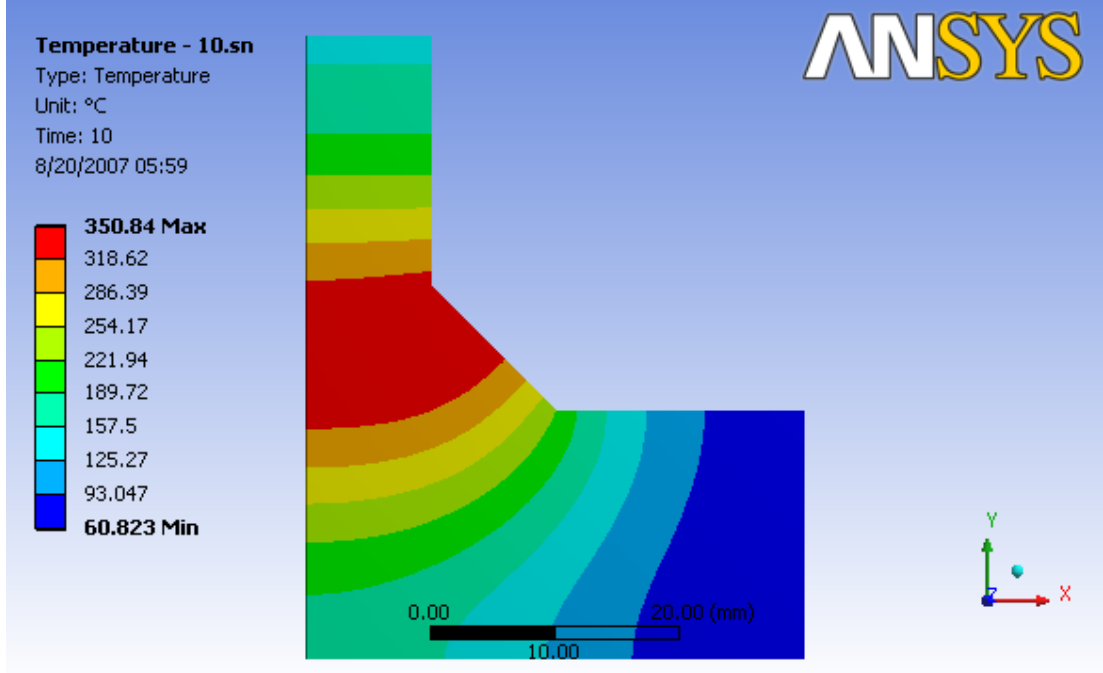
Şekil E.10. İç bükey ($R=16\text{mm}$) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



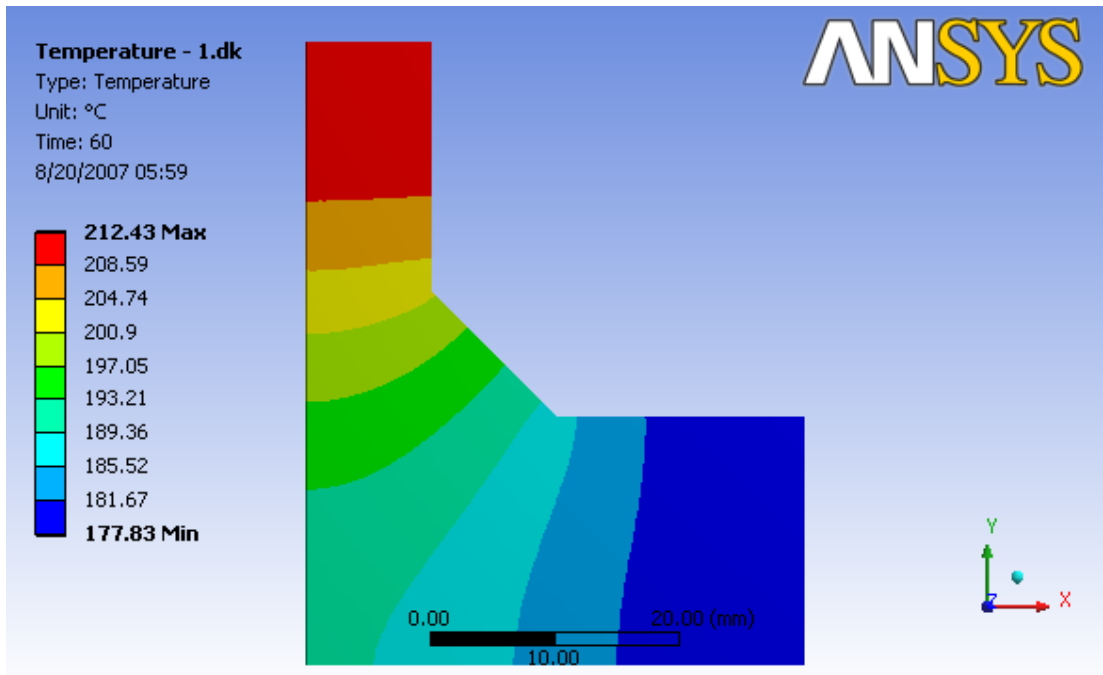
Şekil E.11. İç bükey ($R=16\text{mm}$) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki elastik gerinmeleri



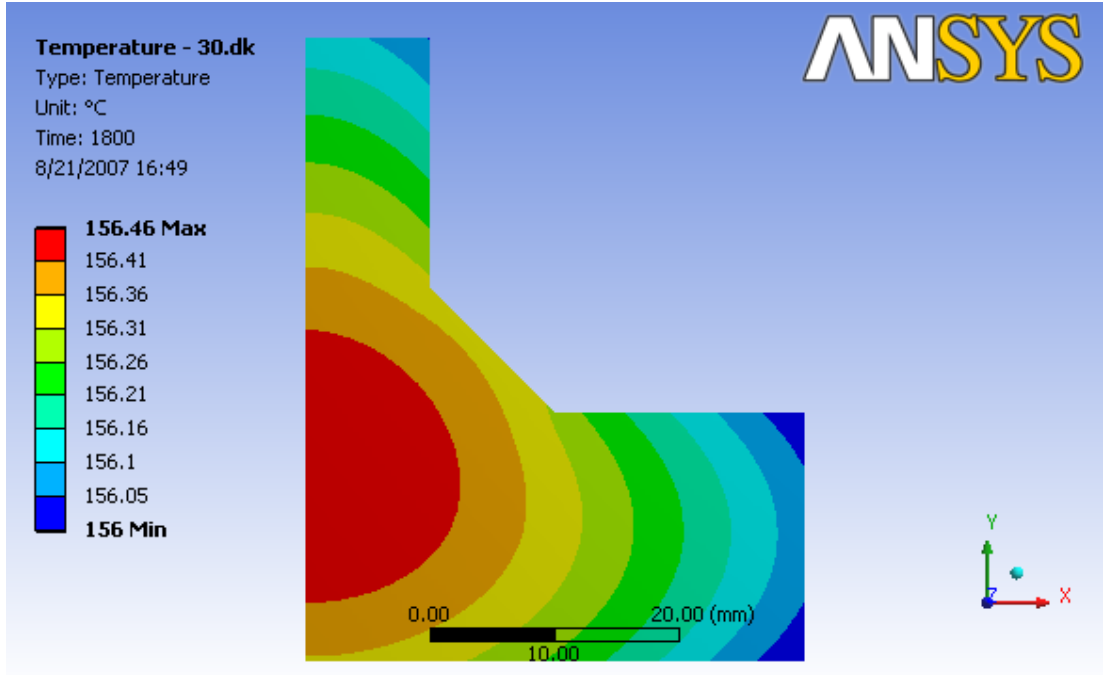
Şekil E.12. İç bükey ($R=16\text{mm}$) iç köşe kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki plastik gerinmeleri



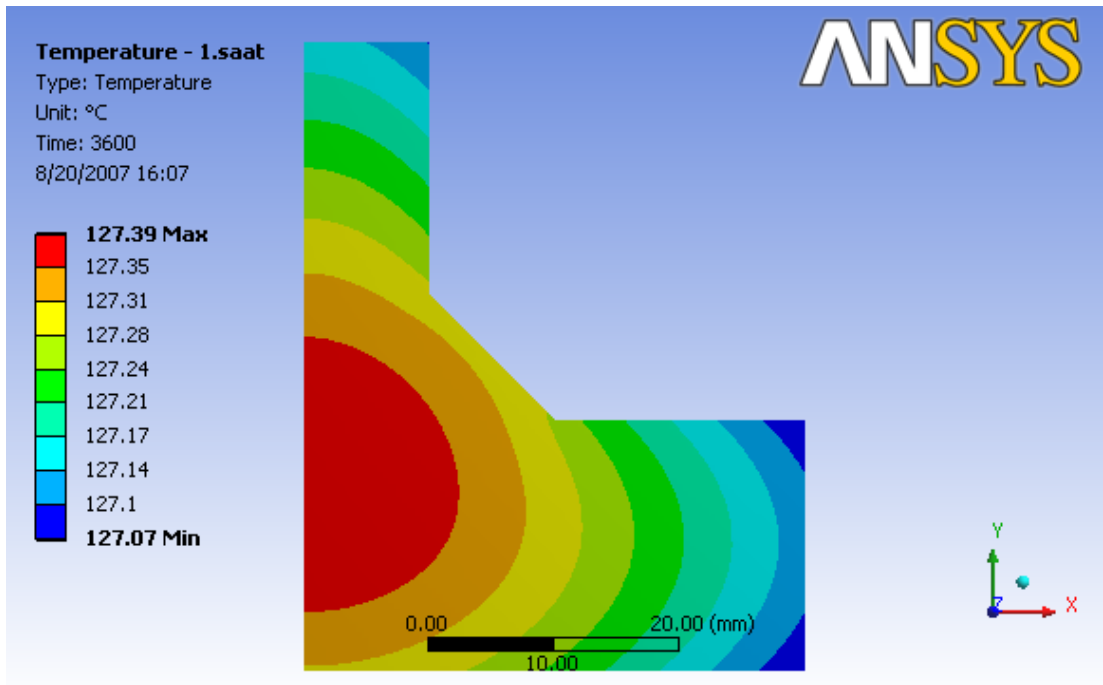
Şekil E.13. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



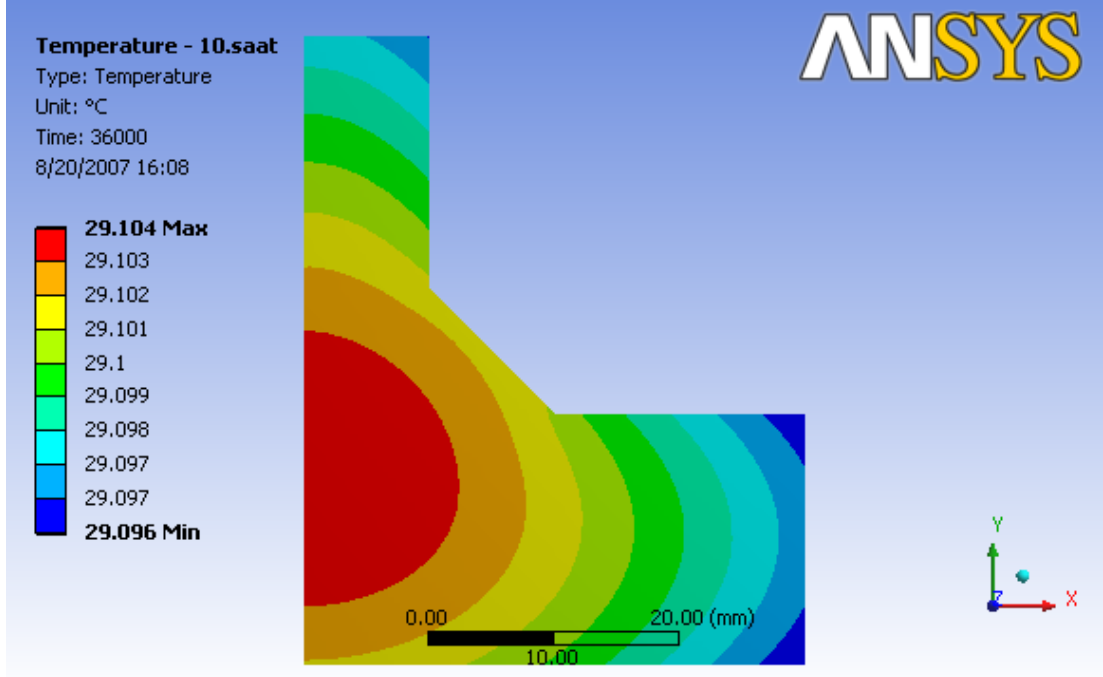
Şekil E.14. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



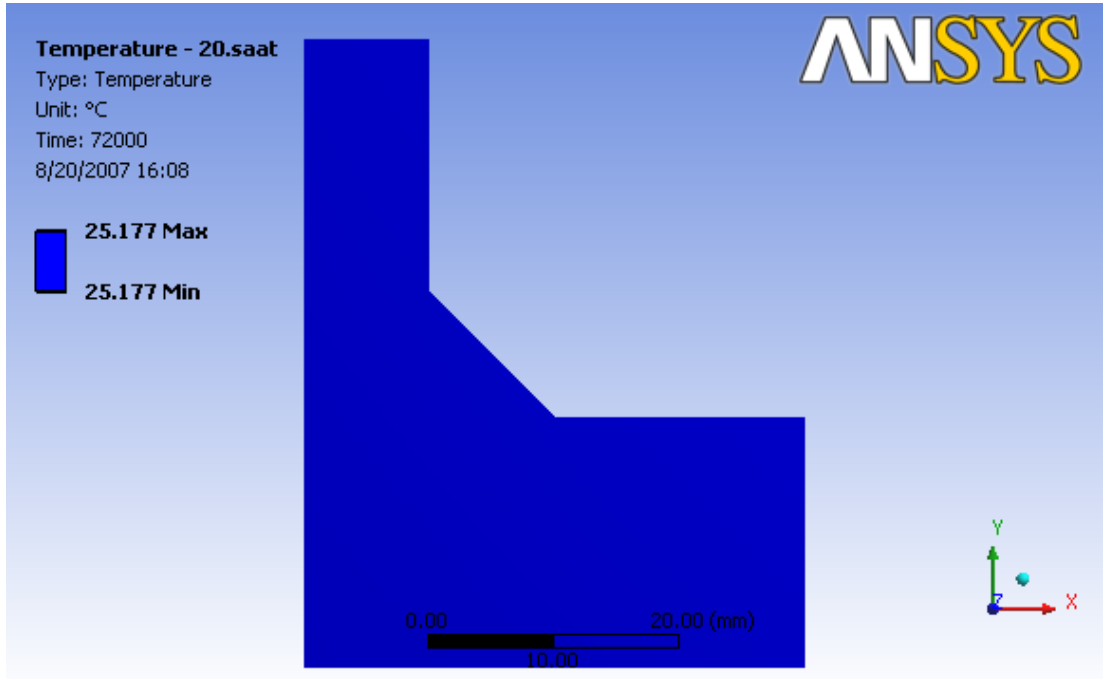
Şekil E.15. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı



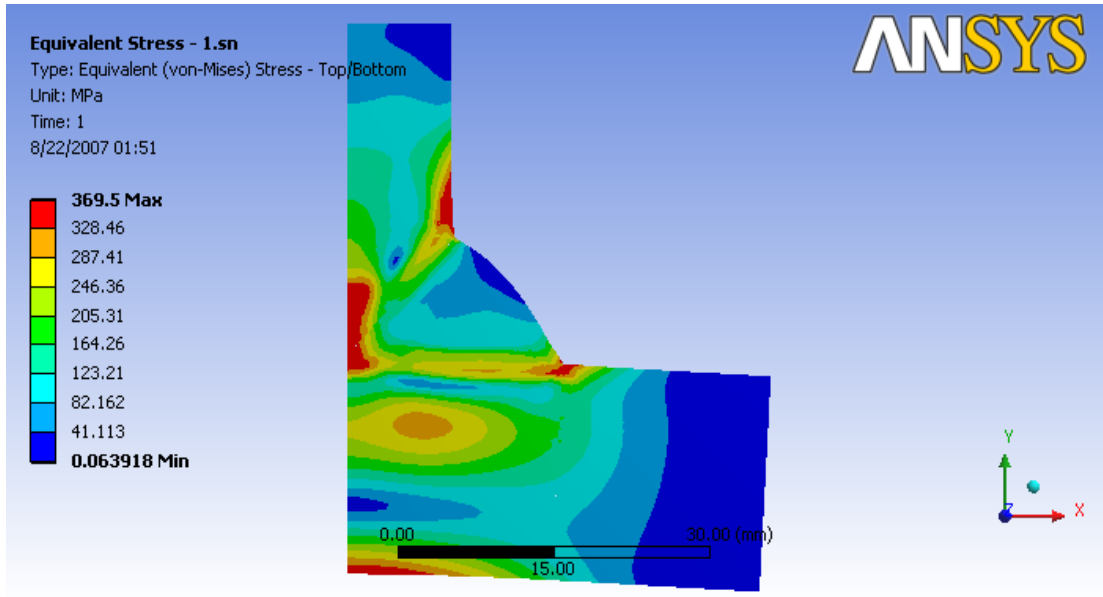
Şekil E.16. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



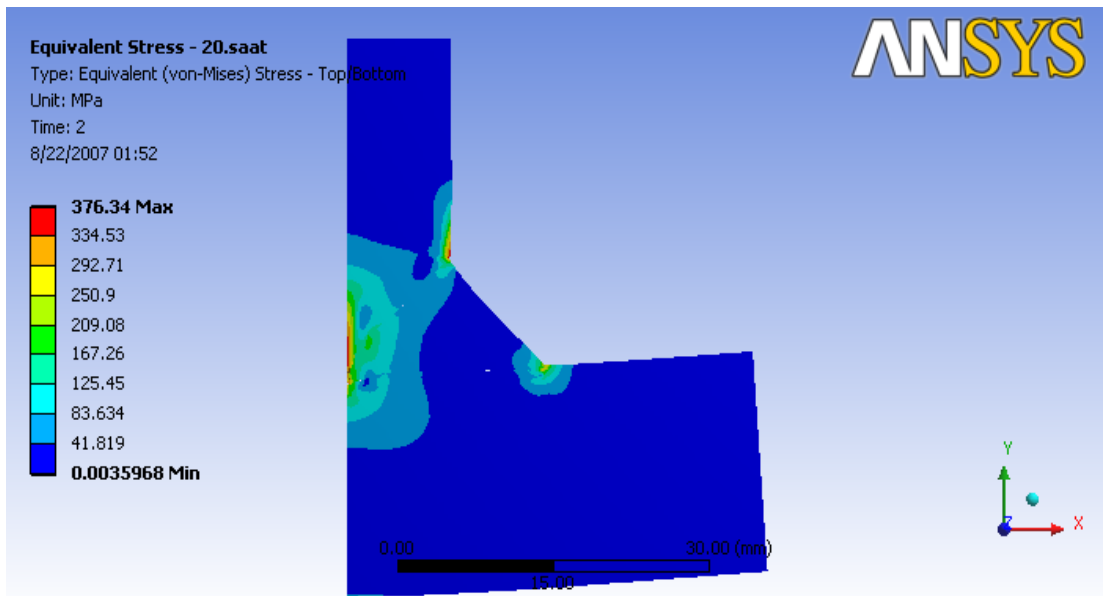
Şekil E.17. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



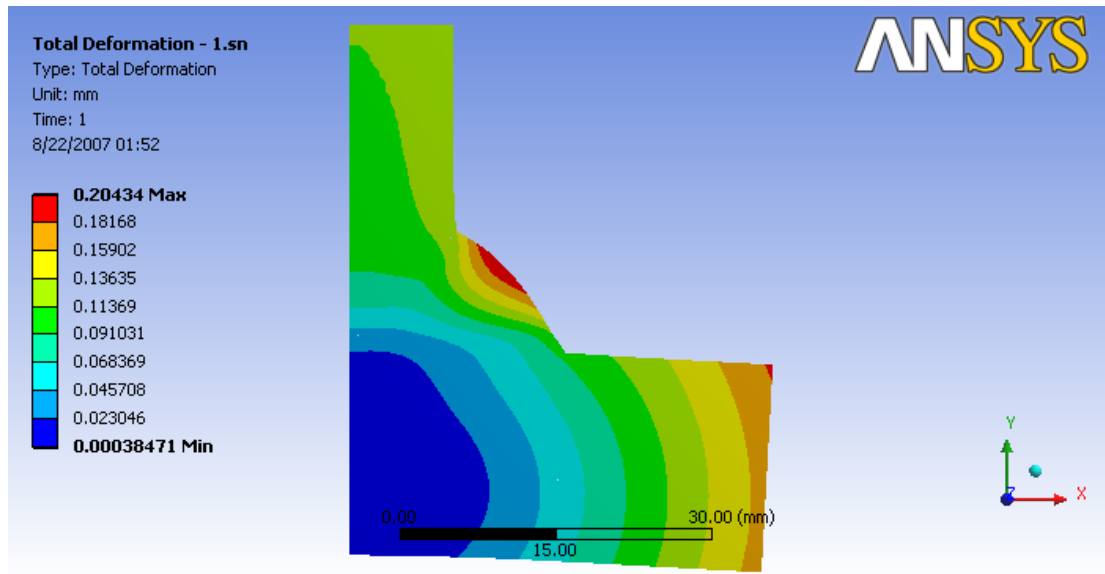
Şekil E.18. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



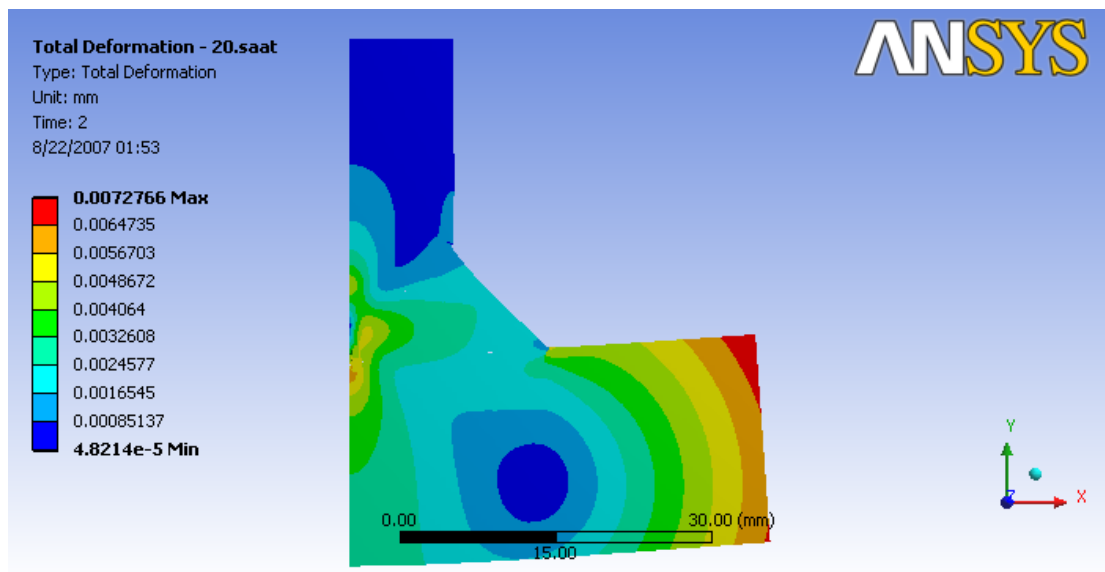
Şekil E.19. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



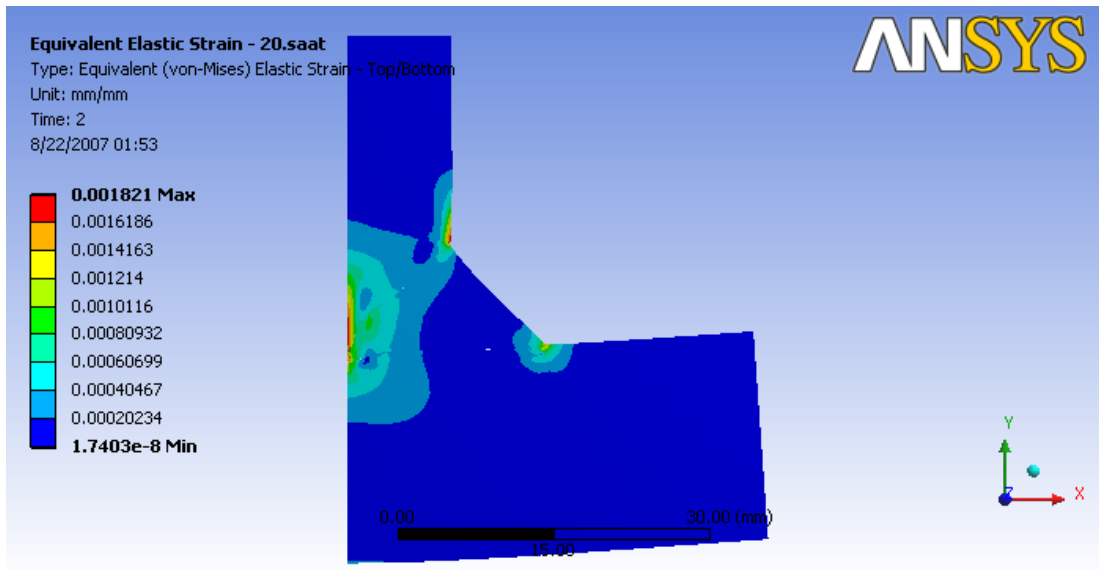
Şekil E.20. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



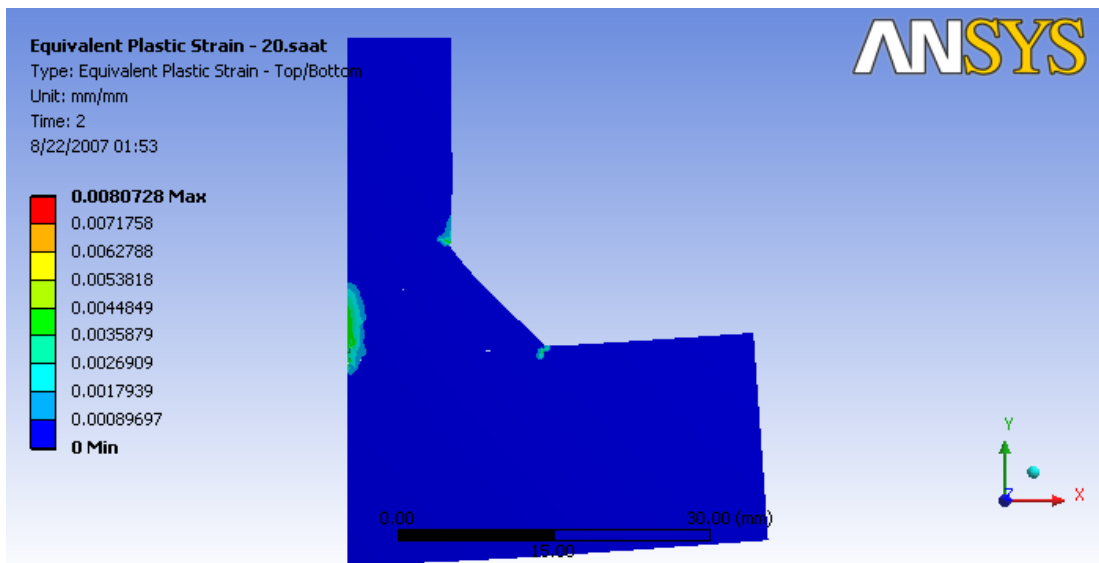
Şekil E.21. 45°'lik kaynak ağızı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



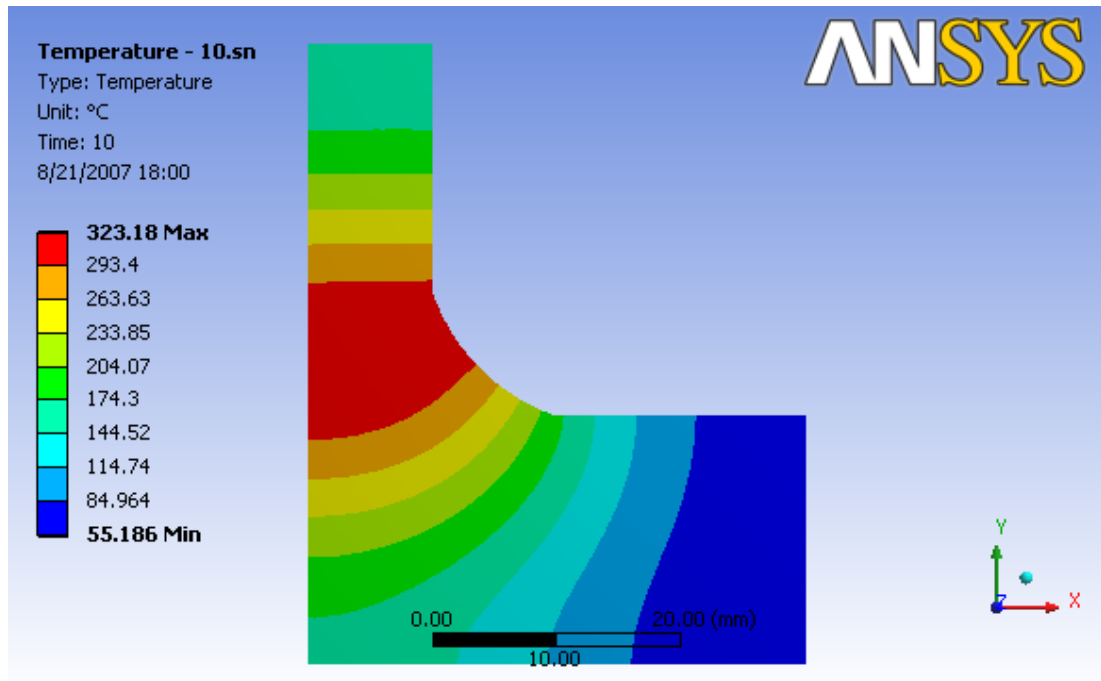
Şekil E.22. 45°'lik kaynak ağızı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



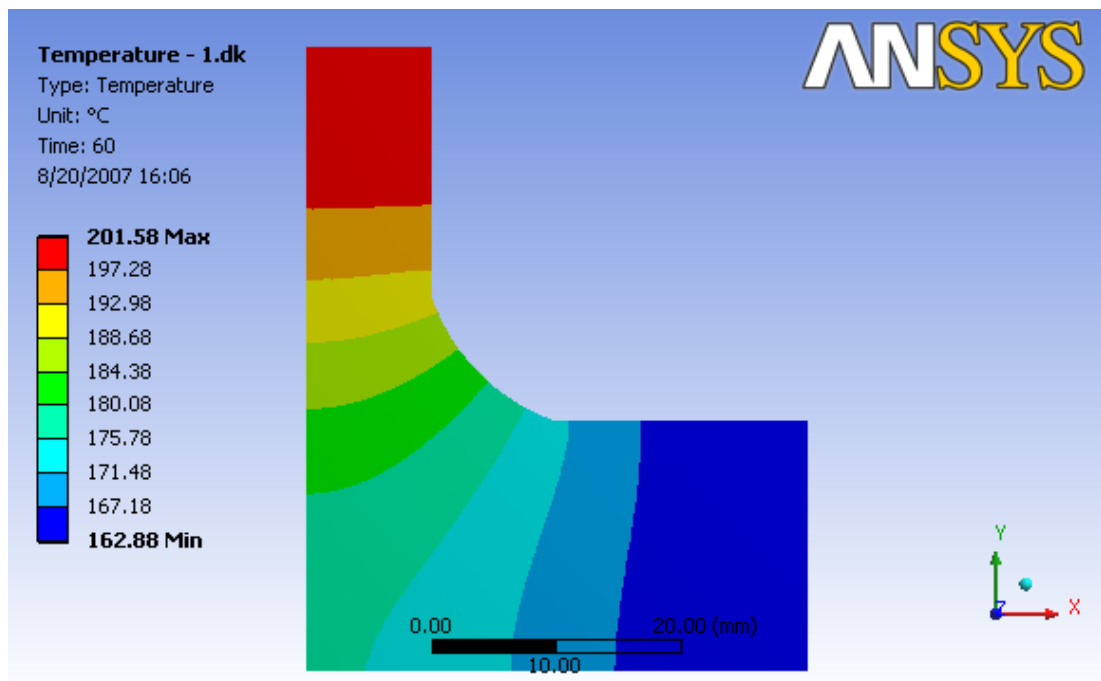
Şekil E.23. 45° 'lik kaynak ağızı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki elastik gerinmeleri



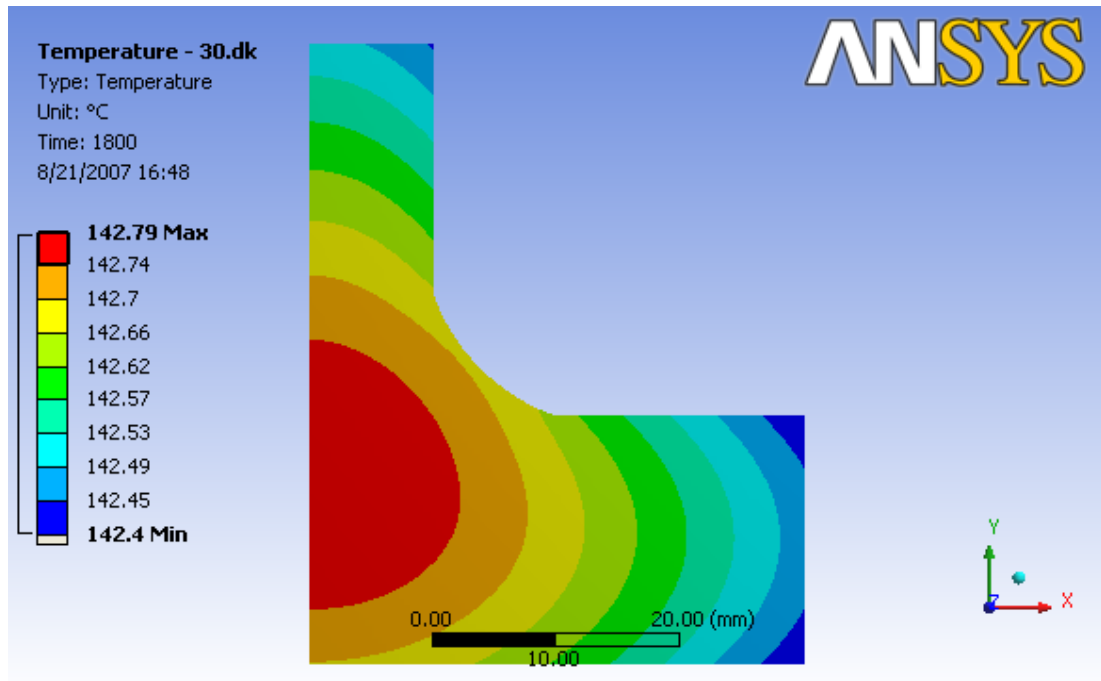
Şekil E.24. 45° 'lik kaynak ağızı açılmış iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki plastik gerinmeleri



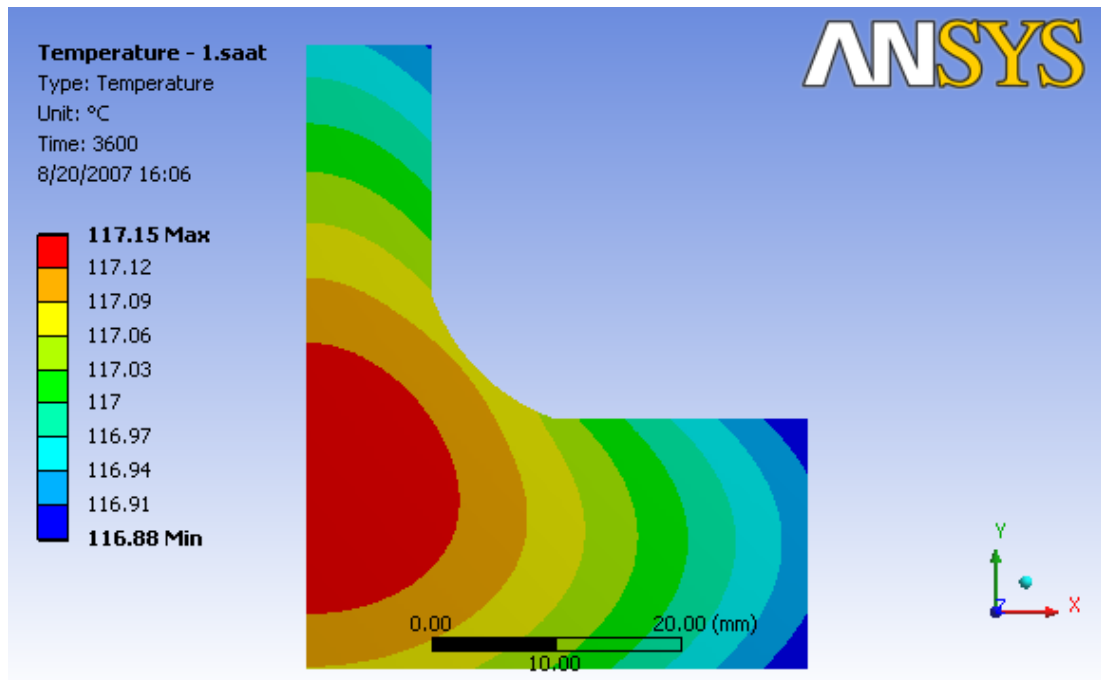
Şekil E.25. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



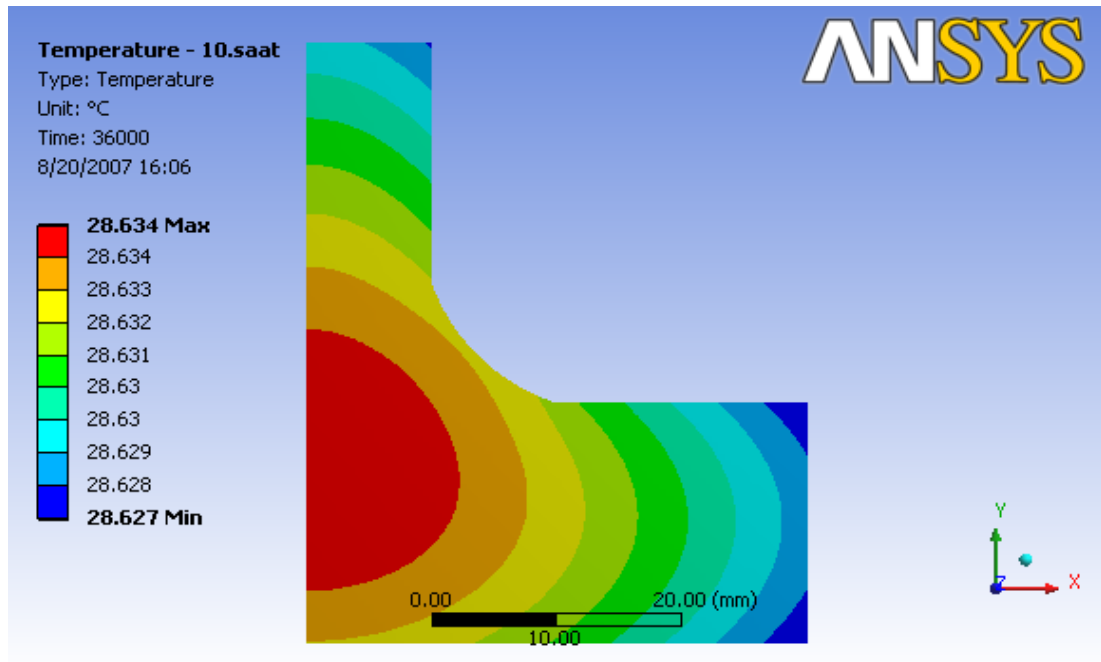
Şekil E.26. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 60.saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



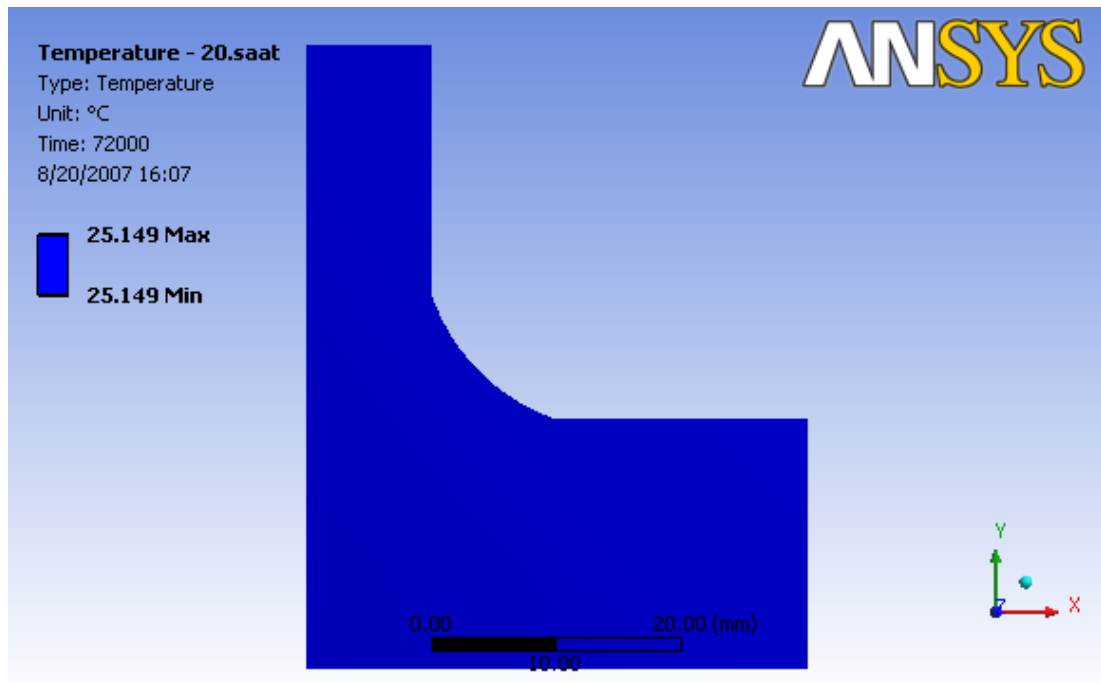
Şekil E.27. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 30.dakika sonundaki sıcaklık dağılımı



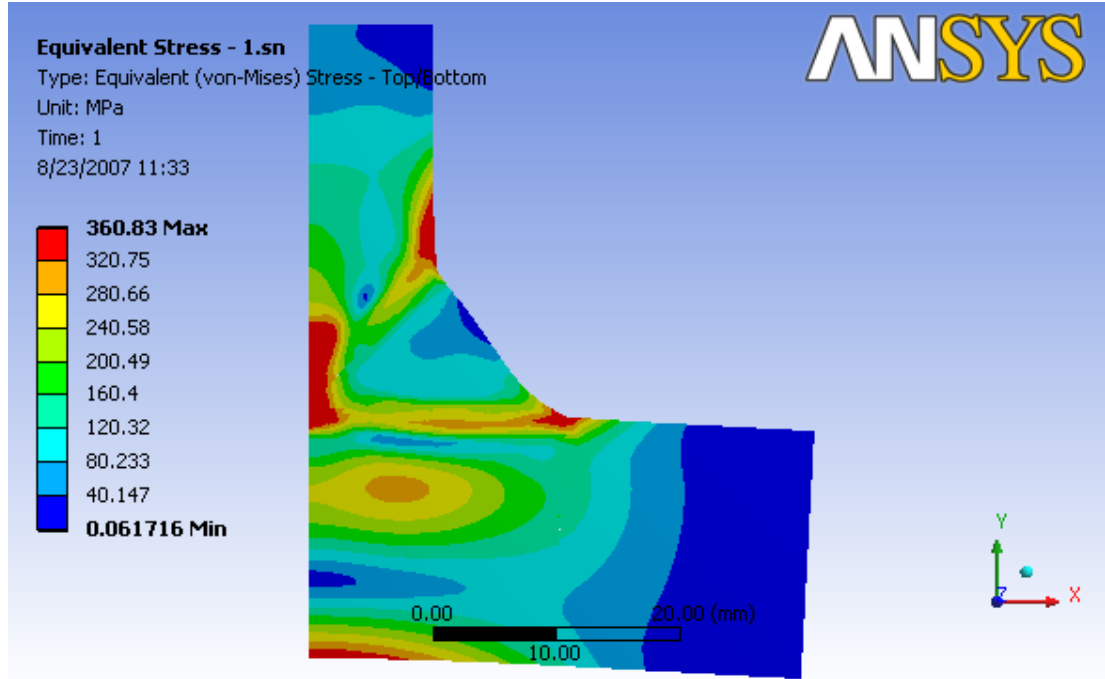
Şekil E.28. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 1 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



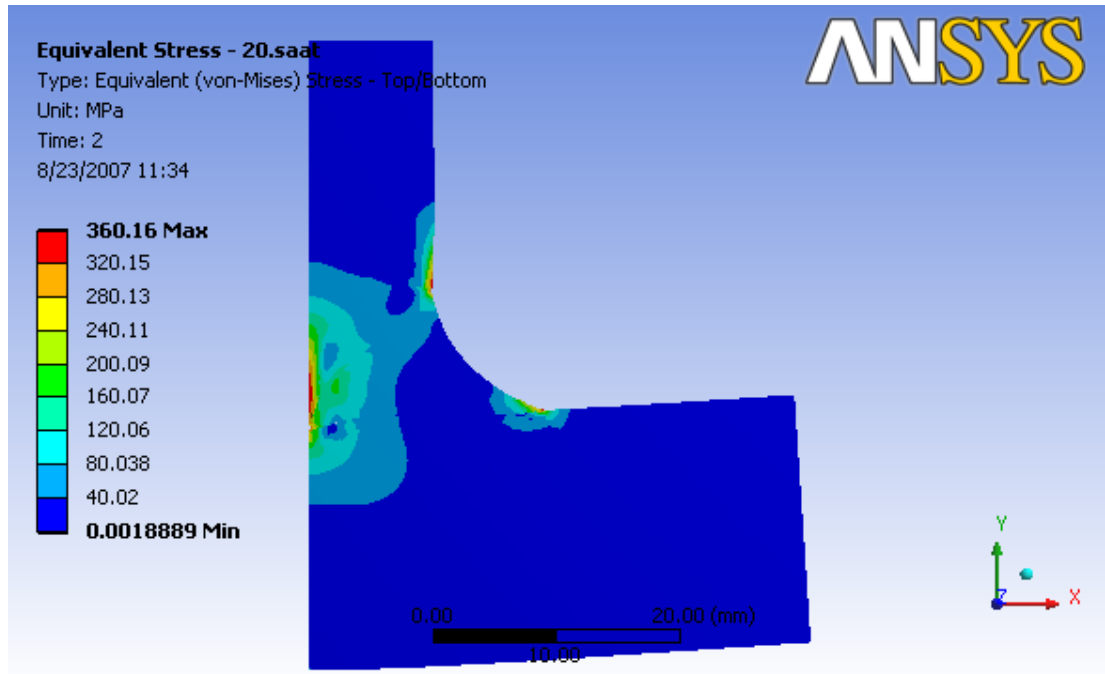
Şekil E.29. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 10 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



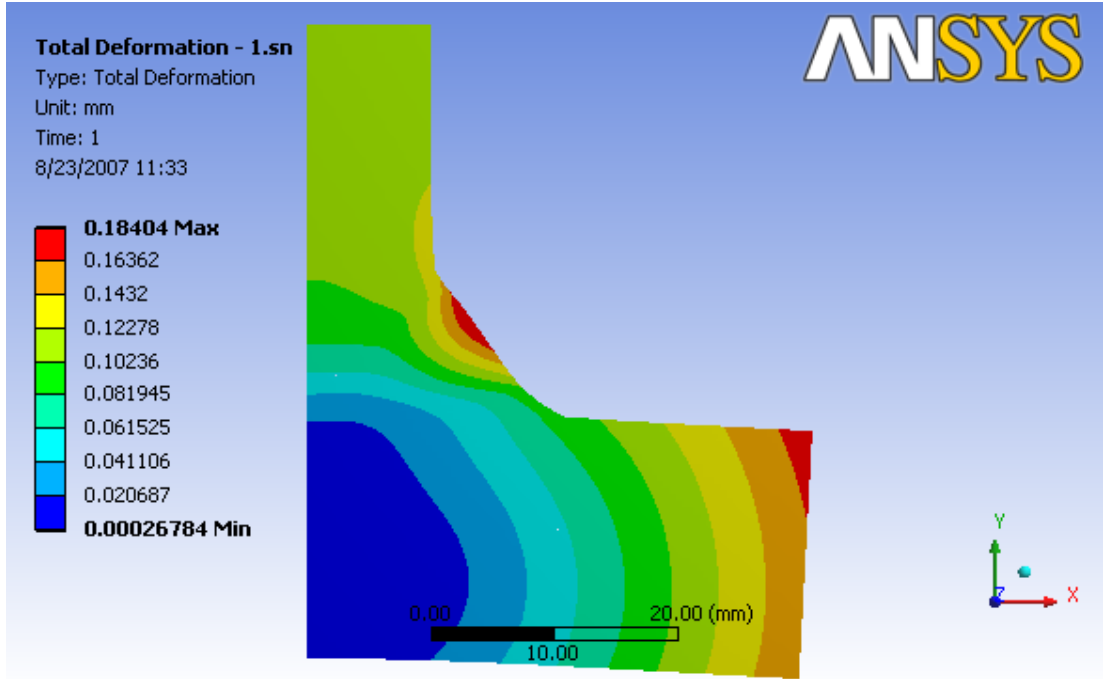
Şekil E.30. 45° 'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının 20 saat sonundaki sıcaklık dağılımı



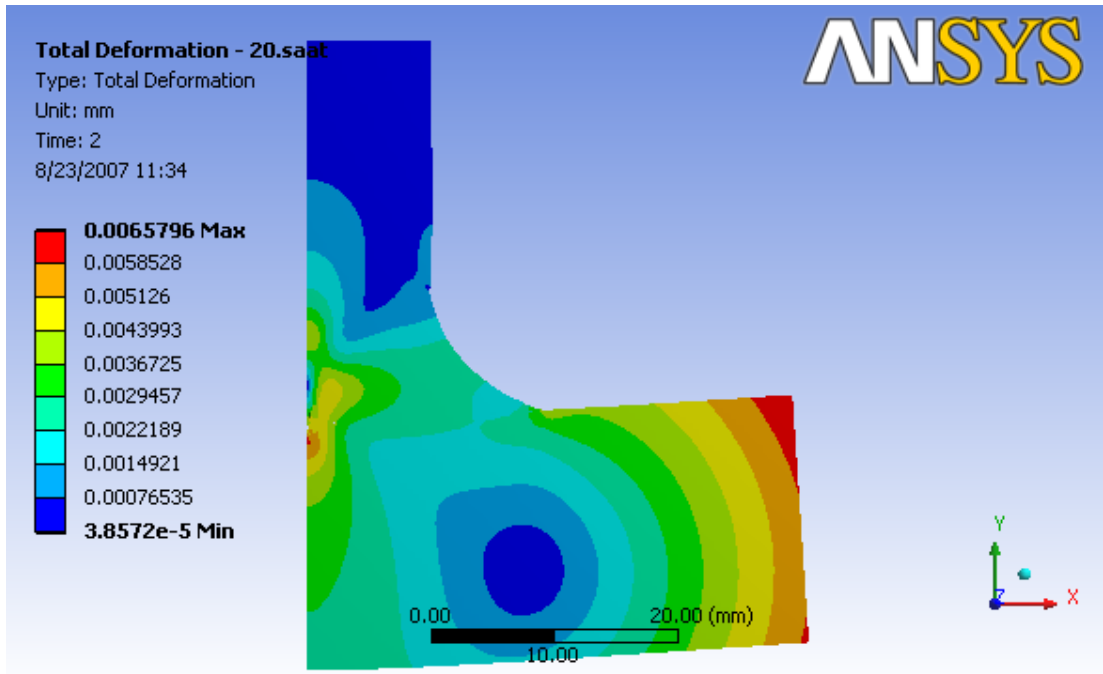
Şekil E.31. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



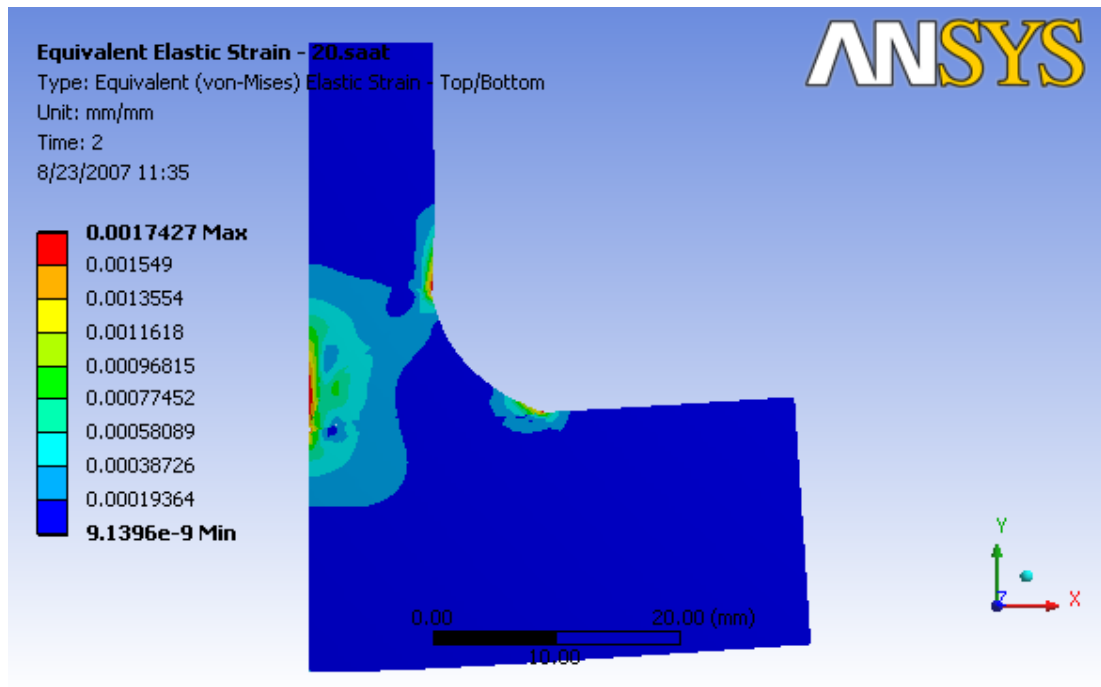
Şekil E.32. 45°'lik kaynak ağzı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki von-Mises'e göre eşdeğer gerilmesi (artık gerilmeler)



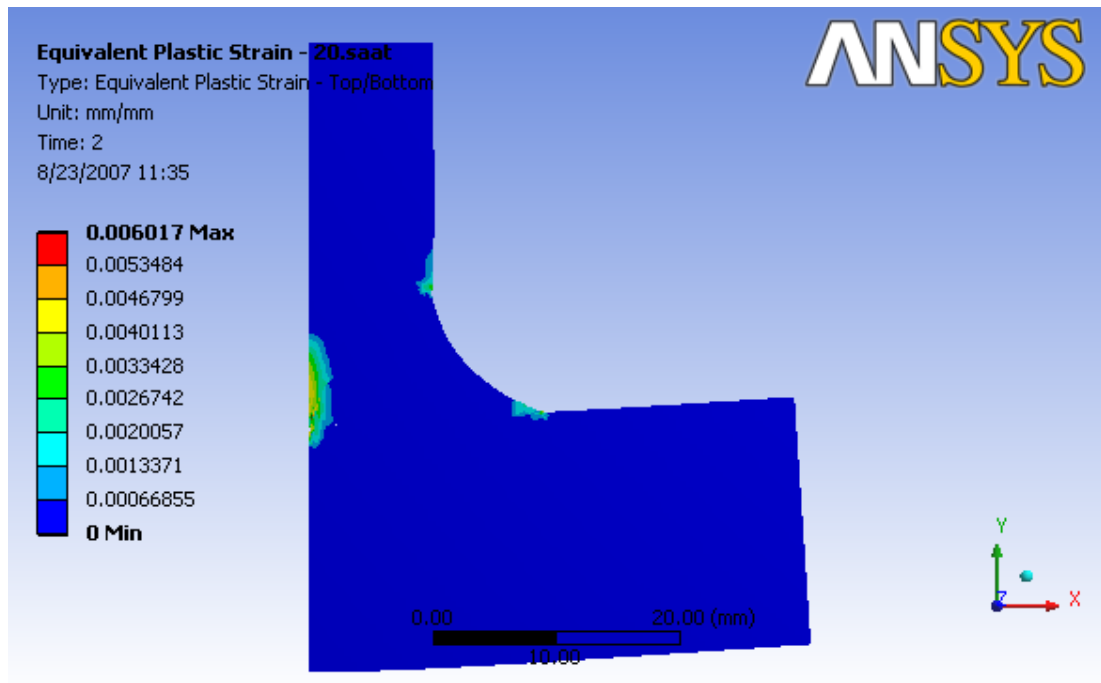
Şekil E.33. 45° 'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının kaynaktan hemen sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



Şekil E.34. 45° 'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki yer değiştirme dağılımı (açısal distorsiyonlar)



Şekil E.35. 45°'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki elastik gerinmeleri



Şekil E.36. 45°'lik kaynak ağızı açılmış iç bükey (R=16mm) iç köşe (T Kaynağı) kaynak bağlantısının ortam sıcaklığına ulaştıktan sonraki plastik gerinmeleri

ÖZGEÇMİŞ

Remzi Timur, 09.05.1984 te Konya/Akşehir' de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul da tamamladı. 1999 yılında Büyükçekmece Esenyurt Lisesinden mezun oldu. 1999 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2003 yılında bitirdi. 2003 – 2004 yılları arasında Adapazarı'nda özel bir şirkette Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı. 2004 yılından itibaren İstanbul da yine özel bir şirkette halen mühendis olarak görev yapmaktadır.