

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KAYNAKLI MALATTA PROSES ÖNCESİ SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZLER VE DENEYSEL
DOĞRULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRAH DEMİRAY

BALIKESİR, HAZİRAN - 2014

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI



KAYNAKLI MALATTA PROSES ÖNCESİ SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZLER VE DENEYSEL
DOĞRULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRAH DEMİRAY

BALIKESİR, HAZİRAN - 2014

KABUL VE ONAY SAYFASI

Emrah Demiray tarafından hazırlanan “KAYNAKLI İMALATTA PROSES ÖNCESİ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZLER VE DENEYSEL DOĞRULAMA” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 27.05.2014 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. İlker EREN

Üye
Prof. Dr. İrfan AY

Üye
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz GÜR

Üye
Yrd. Doç. Dr. Ziya AKSOY

Üye
Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Cihan ÖZGÜR

ÖZET

**KAYNAKLI İMALATTA PROSES ÖNCESİ SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZLER VE DENEYSEL DOĞRULAMA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
EMRAH DEMIRAY
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. İLKER EREN)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2014

Kaynaklı imalat sırasında kaynaklanan parçalarda ani bir ısı girdisi sonucunda hızlı bir ısınma olmaktadır. Sonrasında ortam sıcaklığına göre hızı değişen bir soğuma gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda da malzeme özelliklerinde ve şeklinde çeşitli değişimler meydana gelmektedir. Kaynak sonrasında kaynak metali ve ana malzeme bölgelerinde meydana gelen en önemli sonuçlardan birkaçı şu şekildedir; kaynak bölgesinde meydana gelen faz değişiklikleri, kalıntı gerilmeler, haz bölgesinin genişliği, parçalardaki nüfuziyet değerleri ve kaynaklanan parçalardaki deformasyon değerleridir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kaynak operasyonları öncesinde kaynak prosesi sonuçlarını öngörebiliriz. Sonlu elemanlar yazılımı ile gerçek kaynak parametrelerimizi kullanarak kaynak simülasyonları yapabiliriz. Simülasyonlardan aldığımız bilgilerle gerçek kaynak prosesinde ne gibi sorunlar ve zorluklarla karşılaşacağımız hakkında öngörü sahibi olabiliriz. Aldığımız bu simülasyon sonuçlarına göre gerçek proses öncesinde parametrelerimizi tekrar kontrol edebiliriz. Böylece uygun kaynak kalitesini sağlamak çok daha kolay olmaktadır. Bu çalışmada kaynak prosesi için Sysweld simülasyon yazılımını kullandık. Parça kalınlığına göre değişen sonuçları görmek için farklı kalınlıklarda parçalar kullandık. Simülasyon sonuçlarından bazılarını gerçek kaynak prosesi sonuçları ile karşılaştırdık ve yaptığımız bu karşılaştırma sonuçlarını inceledik.

ANAHTAR KELİMELELER: Kaynak, Simülasyon, Sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

FINITE ELEMENT ANALYSES IN WELDING MANUFACTURING BEFORE THE PROCESS AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

MSC THESIS

EMRAH DEMİRAY

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. İLKER EREN)

BALIKESİR, JUNE 2014

During the welding process, materials have very fast warm up because of the high heat input. At the end of the process, velocity of the cooling down is much more slower than velocity of warming. The velocity of cooling down also changes according to the environmental conditions. By virtue of these thermal events many changes occur in the materials property and its shape. Some of the most important results of welding process which come out after the welding operations are; phase changes of the materials in welded area, residual stresses, width of heat affected zones, penetrations values for each material and deformation of welded parts. We can predict these results of the welding process before the welding operations with using finite element method. With a finite element method software, we can do the simulation of welding process with using our real welding parameters. With these simulation informations we can see all issues and difficulties about our welding process which we can encounter during the real process. If we need something to change about the welding parameters according to the simulation results, we can check all of process parameters again before the real welding process. In this way it will be much more easier to obtain the appropriate welding quality. In this study we used Sysweld simulation software for welding processes. To see the changes of results which is according to the part thickness, we used parts of different thicknesses. We compare some simulation results with the real process results and lastly we examine the results of the comparisons.

KEYWORDS: Welding, Simulation, Finite element method

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	ix
KISALTMALAR	x
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER	3
2.1 Kaynak Tekniği Tanımı	3
2.2 Kaynağın Tanımı	3
2.3 Kaynak Proseslerinin Sürekli Gelişimi.....	3
2.4 Temel Kaynak Tanımları	4
2.4.1 Eritme Kaynağı	4
2.4.2 Basınç Kaynağı	4
2.4.3 Kaplama Kaynağı	5
3. GAZALTI KAYNAK YÖNTEMLERİ	6
3.1 Yöntemlerin Sınıflandırılması	6
3.2 TIG & WIG Kaynağı	6
3.3 Gaz Altı Metal Ark Kaynağı.....	7
3.4 Yöntemlerin Tarihçesi	8
3.5 Yöntemlerin Sınıflandırılması	9
4. ERİYEN ELEKTROD İLE GAZALTI KAYNAĞI	10
4.1 Bu Yöntemde Kullanılan Koruyucu Gazlar.....	11
4.2 Gazaltı Kaynak Yönteminde Elektrod Seçimi.....	11
4.2.1 Esas Metalin Mekanik Özellikleri.....	12
4.2.2 Esas Metalin Kimyasal Bileşimi	12
4.2.3 Koruyucu Gazın Türü	12
4.2.4 Esas Metalin Kalınlığı ve Geometrisi	13
4.3 Arkta Kaynak Metali Taşınımı	13
4.3.1 Kısa Ark	14
4.3.2 Uzun Ark.....	14
4.3.3 Sprey Ark	15
4.3.4 Darbeli Ark.....	15
4.4 Kaynak Parametrelerinin Seçimi	15
4.4.1 Kaynak Öncesi Saptanan Parametreler	16
4.4.1.1 Elektrod Çapı	16
4.4.1.2 Koruyucu Gaz Türü	17
4.4.2 Birinci Derecede Ayarlanabilir Parametreler.....	18
4.4.2.1 Kaynak Akım Şiddeti.....	18
4.4.2.2 Kaynak Akım Gerilimi	18
4.4.2.3 Kaynak Hızı	19
4.4.3 İkinci Derecede Ayarlanabilir Parametreler.....	19

4.4.3.1	Serbest Tel Uzunluğu.....	19
4.4.3.2	Torç Açısı.....	20
5. KAYNAKLI İMALATTA TERMAL GERİLMELER VE ÇARPIMLAR		
5.1	Çeliklerin Isıl Özellikleri ve Kaynak Bölgesi.....	22
5.1.1	Çeliklerin Ergitme Kaynağında Kaynak Bölgesi.....	22
5.1.2	Çeliklerin Isıl Özellikleri.....	23
5.1.2.1	Isı İletim Katsayısı.....	23
5.1.2.2	Özgül Isı.....	23
5.1.2.3	Yoğunluk.....	24
5.1.2.4	Isı Transfer Katsayısı.....	24
5.1.3	Kaynak Bölgesinde Sıcaklık Dağılımı.....	24
5.1.4	Soğuma Hızı.....	25
5.1.5	Çeliklerde Kaynak Bölgesi	25
6. KAYNAKLI İMALAT SONRASI OLUŞAN ARTIK GERİLME VE DİSTORSİYONLAR		
6.1	Kaynak İşleminde Artık Gerilmeler	27
6.1.1	Artık Gerilmelerin Oluşum Nedenleri	27
6.2	Isı Etkisinde Oluşan Artık Gerilme ve Distorsiyonlar.....	31
6.2.1	Distorsiyon Tipleri	33
6.2.1.1	Kaynak Dikiş Tipine Bağlı Olarak Değişen Distorsiyonlar.....	33
6.2.2	Distorsiyonlar ile Artık Gerilmeler Arasındaki İlişki	36
6.2.3	Paso Sayısının Distorsiyona Etkisi	38
6.3	Büzülme ve Artık Gerilmelerin Engellenmesi	38
7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ,KULLANILACAK PARAMETRE VE EKİPMANLAR		
7.1	Sonlu Elemanlar Yönteminin Metodolojisi	41
7.2	Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi.....	41
7.3	Test Parçaları	42
7.4	Proses Parametreleri ve Yöntemi.....	43
7.5	Simülasyon Sonucunda Elde Edilecek Sonuçlar	44
7.6	Kullanılacak Program ve Ekipman	44
7.6.1	Sysweld Programı, Genel Özellikleri ve Sağladıkları.....	45
7.6.2	Gom Optik Tarama Cihazı.....	47
7.6.3	Leica Koordinat Ölçüm Sistemi.....	48
8. SYSWELD İLE SİMÜLASYON VE SONUÇLARI		
8.1	Mesh Atma.....	49
8.2	Sysweld Parametre Girişi.....	51
8.2.1	Projenin Tanımlanması	51
8.2.2	Data Türünün Belirlenmesi	51
8.2.3	Kaynaklanacak Malzemeler ve İlave Tel Türünün Belirlenmesi.....	52
8.2.4	Kaynak Prosesinin Türü ve Kaynak Yolunun Belirlenmesi	53
8.2.5	Kaynak Hızı, Kaynak Zamanı ve Kaynak Havuzu Bilgileri.....	53
8.2.6	Isı Girdisi Miktarı.....	54
8.2.7	Kaynak Prosesi Sonrası Soğuma Koşulları.....	55
8.2.8	Parçaların Sabitleme Noktaları	55
8.2.9	Yükler ve Deformasyonlar	56
8.2.10	Çözüm Parametreleri.....	57
8.2.11	Çözüm İşleminin Başlatılması ve Sonlanması.....	57

8.3	Simülasyon Sonuçları ve Yorumlar	60
8.3.1	3 mm'lik Parçanın Simülasyon Sonuçları.....	60
8.3.1.1	Kesitlerdeki Sıcaklık Dağılımı ve Nüfuziyet Miktarı	61
8.3.1.2	Ölçüsel Değişimler	64
8.3.1.3	Malzeme İç Yapısındaki Değişim Dağılımları	66
8.3.1.4	Kaynak Sonrası Oluşan İç Gerilmeler	69
8.3.2	5 mm'lik Parçanın Simülasyon Sonuçları.....	70
8.3.2.1	Kesitlerdeki Sıcaklık Dağılımı ve Nüfuziyet Miktarı	71
8.3.2.2	Ölçüsel Değişimler	74
8.3.2.3	Malzeme İç Yapısındaki Değişim Dağılımları	75
8.3.2.4	Kaynak Sonrası Oluşan İç Gerilmeler	78
8.3.3	8 mm'lik Parçanın Simülasyon Sonuçları.....	79
8.3.3.1	Kesitlerdeki Sıcaklık Dağılımı ve Nüfuziyet Miktarı	79
8.3.3.2	Ölçüsel Değişimler	82
8.3.3.3	Malzeme İç Yapısındaki Değişim Dağılımları	83
8.3.3.4	Kaynak Sonrası Oluşan İç Gerilmeler	85
9.	GERÇEK KAYNAK PROSESİNİN UYGULANMASI	86
9.1	Parçaların Kaynak Prosesi Öncesinde Kontrolü.....	86
9.2	Parçaların Kaynatılması	90
9.2.1	3 mm'lik Parçanın Kaynağı ve Sonuçları	90
9.2.1.1	Kaynak Sonrası Açısal Değişim Miktarı	92
9.2.1.2	Kaynak Sonrası Nüfuziyet Derinlikleri	97
9.2.2	5 mm'lik Parçanın Kaynağı ve Sonuçları	98
9.2.2.1	Kaynak Sonrası Açısal Değişim Miktarı	100
9.2.2.2	Kaynak Sonrası Nüfuziyet Derinlikleri	103
9.2.3	8 mm'lik Parçanın Kaynağı ve Sonuçları	104
9.2.3.1	Kaynak Sonrası Açısal Değişim Miktarı	106
9.2.3.2	Kaynak Sonrası Nüfuziyet Derinlikleri	109
10.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	111
11.	KAYNAKLAR.....	113

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 5.1 : Isı etkisi altında kalan alanda tane yapısı değişimi	22
Şekil 6.1 : Bir alın dik,işindeki enine (T) ve boyuna (L) büzülme gerilmeleri. ...	28
Şekil 6.2 : Bir T bağlantısındaki enine ve boylamasına büzülme gerilmeleri.....	28
Şekil 6.3 : Bir alın kaynaklı birleştirmede distorsiyon.	29
Şekil 6.4 : Bir T bağlantıdaki distorsiyon.....	30
Şekil 6.5 : Isıtılan çubuklarda serbest genişleme.....	31
Şekil 6.6 : Isıtılan çubuklarda sınırlandırılmış genişleme.....	31
Şekil 6.7 : Isı etkisindeki plakada distorsiyon	32
Şekil 6.8 : X kaynak ağzında enine büzülme.....	33
Şekil 6.9 : X kaynak ağzında boyuna büzülme.....	33
Şekil 6.10: T birleşiminde büzülme.....	34
Şekil 6.11: T ve alın birleşiminde açısıl çarpılma.....	34
Şekil 6.12: İnce levhalarda boyuna büzülme etkisinde oluşan buruşma	35
Şekil 6.13: I profilde kaynak eksenine doğrultusunda oluşan büzülme.	35
Şekil 6.14: T profilde açısıl çarpılma.....	35
Şekil 6.15: Boruya kaynaklı plakada oluşan buruşma.....	35
Şekil 6.16: Distorsiyon ve artık gerilme arasındaki ilişki.....	36
Şekil 6.17: Alın kaynağında kaynak eksenindeki artık gerilmeler.....	36
Şekil 6.18: İnce ve kalın levhalarda artık gerilmelerin karşılaştırılması.	37
Şekil 6.19: T birleşiminde rijitliğin açısıl çarpılmaya etkisi.	37
Şekil 6.20: Geri adım teknikleri.....	39
Şekil 7.1 : Gom cihazı ve örnek tarama datası.	47
Şekil 7.2 : Leica ölçüm sistemi.....	48
Şekil 8.1 : Genel olarak mesh hali.	50
Şekil 8.2 : Atılan mesh sıklığının değişimi.....	50
Şekil 8.3 : Projenin tanımlanması.....	51
Şekil 8.4 : Model türünün seçilmesi	52
Şekil 8.5 : Malzeme cinsinin ve ilave telin belirlenmesi	52
Şekil 8.6 : Kaynak yolunun belirlenmesi.....	53
Şekil 8.7 : Kaynak banyosu özellikleri.....	54
Şekil 8.8: Enerji Girişi.	54
Şekil 8.9: Soğuma koşulları.....	55
Şekil 8.10: Sabitleme koşulları	56
Şekil 8.11: Yükleme ve deformasyonlar	56
Şekil 8.12: Çözüm parametreleri.	57
Şekil 8.13: Çözüm işleminin çalışması.....	58
Şekil 8.14: İlk termal çözümün tamamlanma anı	58
Şekil 8.15: İkinci termal çözümün tamamlanma anı.	59
Şekil 8.16: Log dosyasının incelenmesi	59
Şekil 8.17: Kaynak öncesi ara boşluk.....	60
Şekil 8.18: Kaynak öncesi diklik açısı.....	61
Şekil 8.19: 3 mm'lik parçanın başlangıç kısmına ait nüfuziyet kesiti.....	62
Şekil 8.20: 3 mm'lik parçanın orta kısmına ait nüfuziyet kesiti.....	62
Şekil 8.21: 3 mm'lik parçanın bitiş kısmına ait nüfuziyet kesiti.....	63

Şekil 8.22: Kaynak enasında sıcaklık dağılımı anlık görüntüsü.....	64
Şekil 8.23: Kaynak sonrası açısal değişim	65
Şekil 8.24: Kaynak sonrası parçalar arasındaki mesafenin değişim miktarı	65
Şekil 8.25: Kaynak sonrası martensit dağılımı.....	66
Şekil 8.26: Kaynak sonrası kesitler arası martensit dağılımı.....	67
Şekil 8.27: Kaynak sonrası beynit dağılımı.....	68
Şekil 8.28: Kaynak sonrası kesitler arası beynit dağılımı.....	68
Şekil 8.29: Kaynak sonrası iç gerilme dağılımı.....	69
Şekil 8.30: Kaynak sonrası kesitler arası iç gerilme dağılımı	70
Şekil 8.31: Kaynak öncesi ara boşluk.....	71
Şekil 8.32: Kaynak öncesi açısı.....	71
Şekil 8.33: 5 mm'lik parçanın başlangıç kısmına ait nüfuziyet kesiti.....	72
Şekil 8.34: 5 mm'lik parçanın orta kısmına ait nüfuziyet kesiti.....	73
Şekil 8.35: 5 mm'lik parçanın bitiş kısmına ait nüfuziyet kesiti	73
Şekil 8.36: Kaynak esnasında sıcaklık dağılımı anlık görüntü.....	74
Şekil 8.37: Kaynak sonrası açısal değişim	74
Şekil 8.38: Kaynak sonrası parçalar arasındaki mesafenin değişim miktarı	75
Şekil 8.39: Kaynak sonrası martensit dağılımı	75
Şekil 8.40: Kaynak sonrası kesitler arası martensit dağılımı.....	76
Şekil 8.41: Kaynak sonrası beynit dağılımı.....	77
Şekil 8.42: Kaynak sonrası kesitler arası beynit dağılımı.....	77
Şekil 8.43: Kaynak sonrası oluşan iç gerilmeler	78
Şekil 8.44: Kaynak sonrası oluşan kesitler arası iç gerilmeler	78
Şekil 8.45: 8 mm'lik parçanın başlangıç kısmına ait nüfuziyet kesiti.....	79
Şekil 8.46: 8 mm'lik parçanın orta kısmına ait nüfuziyet kesiti	80
Şekil 8.47: 8 mm'lik parçanın bitiş kısmına ait nüfuziyet kesiti	81
Şekil 8.48: Kaynak esnasında sıcaklık dağılımı anlık görüntü.....	81
Şekil 8.49: Kaynak sonrası açısal değişim	82
Şekil 8.50: Kaynak sonrası parçalar arasındaki mesafenin değişim miktarı	82
Şekil 8.51: Kaynak sonrası martensit dağılımı	83
Şekil 8.52: Kaynak sonrası martensit dağılımı	83
Şekil 8.53: Kaynak sonrası Beynit dağılımı	84
Şekil 8.54: Kaynak sonrası kesitler arası beynit dağılımı.....	84
Şekil 8.55: Kaynak sonrası iç gerilme dağılımı.....	85
Şekil 8.56: Kaynak sonrası kesitler arası iç gerilme dağılımı	85
Şekil 9.1 : Kullanılacak test parçaları.	87
Şekil 9.2 : Kullanılacak test parçalarının düzlemsellik ölçümü	88
Şekil 9.3 : Alt parçanın görüntüsü	89
Şekil 9.4 : Test parçalarının puntalanmış durumu.	90
Şekil 9.5 : Puntalanmış parçaların açısal kontrolü.....	90
Şekil 9.6 : Kaynak öncesi parçanın son hali	91
Şekil 9.7 : Kaynak sonrası parçanın durumu	92
Şekil 9.8 : Taramaya hazır parçanın görünümü.....	93
Şekil 9.9 : Parçanın tarama esnasında görüntüsü.....	94
Şekil 9.10: Taranan parçadan bir görüntü.....	94
Şekil 9.11: Referans deliklerin tanımlanması	95
Şekil 9.12: Tarama işlemi tamamlanan parça.....	95
Şekil 9.13: Taranan parçada açısal kontrol.....	96
Şekil 9.14: Taranan parçanın data ile karşılaştırılması.....	96
Şekil 9.15: Taranan parçanın renklendirilmesi.....	97

Şekil 9.16: Taranan parçada renklere göre sapmalar.....	97
Şekil 9.17: Alt parçadaki nüfuziyet miktarı.....	98
Şekil 9.18: Üst parçadaki nüfuziyet miktarı	98
Şekil 9.19: Parçalar arası boşluk miktarı	99
Şekil 9.20: Parçanın kaynak öncesi durumu.....	100
Şekil 9.21: Parçanın kaynak sonrası durumu.....	100
Şekil 9.22: Parçanın tarama datası.....	101
Şekil 9.23: Parçadaki açısal değişim miktarı.....	102
Şekil 9.24: Parçanın data ile karşılaştırılması.....	102
Şekil 9.25: Parçanın renklendirilmesi.....	103
Şekil 9.26: Parçadaki sapmaların renklere göre dağılımı	103
Şekil 9.27: Alttaki parçadaki nüfuziyet miktarı.....	104
Şekil 9.28: Üstteki parçadaki nüfuziyet miktarı	104
Şekil 9.29: Parçalar arası mesafe miktarı	105
Şekil 9.30: Parçanın kaynak öncesi son hali.....	105
Şekil 9.31: Parçanın kaynak sonrası görünümü.....	106
Şekil 9.32: Parçanın tarama işlemine hazır durumu	107
Şekil 9.33: Tarama işlemi sırasında yazımlımdan bir görüntü	107
Şekil 9.34: Tarama işlemi tamamlanan parça.....	108
Şekil 9.35: Kaynak sonrası parçada meydana gelen açısal değişim.....	108
Şekil 9.36: Kaynak sonrası tarama datası ve modelin karşılaştırılması.....	109
Şekil 9.37: Kaynak sonrasında deformasyonların görülmesi	109
Şekil 9.38: Alttaki parçadaki nüfuziyet miktarı.....	110
Şekil 9.39: Üstteki parçadaki nüfuziyet miktarı	110
Şekil 9.40: Parçalar arası boşluk miktarı	111

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 9.1: Ölçümü yapılan parçaların düzelmesellik sonuçları.....	88
Tablo 9.2: Ölçümü yapılan test parçalarının açısız kontrol sonuçları.....	91

KISALTMALAR

GTAK	: Gaz altı tungsten ark kaynağı
GMAK	: Gaz altı metal ark kaynağı
TIG	: Tungsten inert gaz kaynağı
WIG	: Wolfram inert gaz kaynağı
MAG	: Metal aktif gaz kaynağı
MIG	: Metal inert gaz kaynağı
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
α	: Isı transfer katsayısı
k	: Isı iletim katsayısı
q	: Yoğunluk
c	: Özgül ısı
Ar	: Argon gazı
CO₂	: Karbondioksit gazı
PA	: Kaynak pozisyonu
CAE	: Bilgisayar destekli mühendislik
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi

ÖNSÖZ

Günümüzde imalat sektöründe kalite ve maliyet kavramları birinci derecede önem taşıyan konular olmuştur. İmalatta verimliliği arttırmak ve imalat sonrasında oluşabilecek problemlerin imalat öncesinde öngörülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla kaynaklı imalat öncesi yapacağımız simülasyonların bize neler kazandıracığı konusunda bir çalışma yapmayı hedefledik.

Tez çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen ve bana yol gösteren tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. İlker EREN hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren ve çalışmalarına yaptıkları çok önemli katkı ve yardımlarından dolayı sayın Dr. Caner BATIGÜN hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca yardım ve desteklerini hiç esirgemeyen Dr. Kayhan ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında kullandığım Sysweld yazılımını bana sağlayan ve konuyla ilgili her desteği veren ONATUS Firması Müdürü Sayın Onur ÖZTÜK'e teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Bana hayatım boyunca maddi ve manevi destek olan aileme, eşime ve tez hazırlama sırasında yardımcı olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Kaynak, metalik parçaların birleştirilmesinde kullanılan en önemli yöntemlerden birisidir. Kaynağın yaklaşık 3500 yıllık bir maziye sahip olduğu bilinmektedir. İlk olarak Şam’ da Arap savaşçılar tarafından kaynak yapılmış bıçakların kullanıldığı ve daha sonra orta çağda altından yapılmış küçük dairesel kutuların basınç kaynağı ile birleştirildiği bilinmektedir. Kaynak yöntemi endüstriyel manada ilk olarak 19. yüzyılın ikinci yarısında kullanılmıştır. Bu zamandan itibaren çeşitli kaynak yöntemleri ihtiyaç doğrultusunda geliştirilerek günümüze kadar gelinmiştir [1].

Kaynaklı imalatta proses parametreleri olarak birçok değişken faktör bulunmaktadır. Bu değişken faktörlerin herbiri doğrudan proses sonucuna etki edebilmekte ve farklı durumların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Parametrelerin herhangi birinin değişmesi sonuçları direk olarak etkilemektedir. Bu kısımda önemli olan bu parametreler arasında en ideal ilişkiyi yakalayarak istenilen sonucu elde etmektir. Kaynaklı imalatta amaç kaynak prosesi sonrasında elde ettiğimiz kaynak dikişinin özelliklerinin en az ana malzeme kadar olmasıdır.

Kaynaklı imalat sonrasında kaynaklanan parçalarda, iç gerilmeler, distorsiyonlar ve ölçüsel kaçıklıklar, istemediğimiz iç yapı dönüşümleri, ergime hataları, yetersiz nüfuziyet derinlikleri ve buna benzer birçok sorunla karşılaşabiliriz. Bu sorunları çözmek veya en az seviyeye indirmek amacı ile kaynak öncesinde çeşitli ön hazırlıklar yapılmaktadır. Fakat karmaşık ve çok fazla kaynak dikişinin olduğu karmaşık yapılarda kaynak öncesi yapılan bu ön hazırlıklarda yetersiz kalmaktadır. Ön hazırlık ve parametrelerin belirlenmesi amacıyla hazırlanan kaynak talimatlarına göre yapılan kaynaklarda, kaynak dikişlerinin tek başına istenilen kalite seviyesinde olması sağlanabilir. Fakat bu yapıya tümüyle baktığımızda kaynaklı imalat sonucu meydana gelen çarpılmalar ve iç gerilmeler gibi önemli sorunlara yol açabilecek olumsuz durumları sadece bu ön hazırlıklarla engelleyemeyebiliriz. İmalat sonrasında karşılaştığımız bu olumsuz durumları düzeltmek hem çok pahalı hemde zaman açısından büyük bir kayıp olmakla beraber, çoğu zaman düzeltilmesi mümkün olmayan durumlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Kaynaklı imalat sonrasındaki bu

olumsuz sonuçları engellemek amacıyla kaynak öncesinde sonlu elemanlar yöntemi alt yapısını kullanan çeşitli yazılımlarla uygulanacak kaynak prosesin simülasyonu yapılarak gerçek proses sonrasında karşılaşılabilecek sonuçlar öngörülme çalışılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan bu simülasyonlar ile kaynak sonrasında meydana gelebilecek, deformasyon miktarları, malzeme içersinde oluşan iç gerilmeler, malzeme içersindeki iç yapı dönüşümleri, malzemelerin maruz kaldığı ısı girdisi miktarları, malzeme içersindeki ısı dağılımlar, kaynak sonrası soğuma hızı, ısı etkisi altında kalan alan miktarının genişliği, parçalardaki nüfuziyet derinlikleri ve bunlar gibi birçok konu hakkında öngörü bilgileri edinilebilmektedir. Sonrasında ise simülasyon sonuçlarından edinilen bu bilgiler ışığında kaynak öncesi parametreler düzenlenerek gerekli ön hazırlıklar yapılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemleri ile yapılan simülasyonlarda en önemli konu gerçek proses parametrelerinin ve ortam koşullarının olabildiğince yüksek seviyede simülasyon ortamına yansıtılabilmesidir. Diğer bir konu ise programın bize simülasyonu hassas yapmamızı sağlayacak yazılımsal alt yapıyı sağlaması ve bizim bu alt yapıyı doğru olarak kullanabilmemizdir. Gerçek prostedeki koşulları simülasyon ortamına ne kadar doğru taşırsak elde ettiğimiz sonuçların verdiği öngörü yüzdesi gerçeğe okadar yakın olacaktır.

Bu çalışmada çeşitli kalınlıkardaki parçaların köşe kaynağı işlemi belirlenen parametreler ışığında Sysweld programı ile kaynak simülasyonlarını yaparak elde ettiğimiz sonuçların bir kısmını yine aynı parametreleri kullanarak yaptığımız gerçek kaynak prosesi sonuçları ile karşılaştırdık. Kalınlığa göre kaynak prosesi sonucunda meydana gelen değişiklikler analiz edildi. Simülasyon sonuçları ile gerçek proses sonuçlarının tutarlılık miktarı konusu araştırıldı. Sonuç olarak kaynak prosesi öncesinde yapılan prosesin bize neler kazandırdığı konusunu işlemiş olduk. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan kaynak prosesi simülasyonları ile gerçek prosesi uygulamadan karşımıza çıkacak sonuçları öngörmenin bize sağladığı avantajları yaptığımız bu çalışma ile ortaya koymuş oldu.

2. KAYNAK İLE İLGİLİ TEMEL BİLGİLER

2.1 Kaynak Tekniği Tanımı

Kaynak tekniği temel olarak iki parçanın birleştirilmesi, ayrılması ve kaplanması gibi konuları içerisine alan bir prosesler bütünüdür.

Kaynak tekniği, kaynak, lehim, termik kesme gibi imalat proseslerinin ve yapıştırma, soğuk birleşme, montaj, birleştirme ve kesme gibi komşu proseslerin tamamını kapsayan bir ana başlıktır [2].

2.2 Kaynağın Tanımı

Kaynak; iki veya daha fazla malzemenin ısı ve/veya basınç etkisi ile ilave bir malzeme kullanarak ya da kullanmayarak sürekli bir iç yapı oluşturacak şekilde birleştirilmesi veya ana malzeme üzerinin kaplanması işlemidir [2].

Kaynak prosesi, parçaların birleştirilmesi işleminde yoğun olarak kullanılan ve standartlarda özel proses olarak adlandırılan bir yöntemdir.

2.3 Kaynak Proseslerinin sürekli gelişimi

Kaynak prosesinin ve çeşitlerinin tarihi gelişim sırasına bakacak olursak şöyle bir sıralama ile karşılaşırız.

1792 yılında Lichtenberg bir saat yayının bir bıçağın ağzı ile eritildiğinden bahsetmektedir.

1808 yılında Bir İngiliz fizikçi olan Davy ve Ritter tarafından ilk arkın oluşturulup gözlendiği varsayılır.

1815 yılında arkın çok yüksek sıcaklığı bilinmekte ve metallerin eritilmesinde kullanılmaktadır.

1867 yılında Amerikalı Thomson dirençten dolayı elde edilen ısıyı kaynakta kullanılabilir hale getirmiştir. Bu sayede direnç basınç kaynağı doğmuştur.

1885 yılında Bernados karbon arkını metalleri eritmekte kullanmıştır.

1888 yılında Bernados ilk nokta kaynağını yapmıştır.

1889 yılında Zerener iki karbon elektrot ile kaynak yapmıştır.

1890 yılında Slavianoff metal ark kaynağı yapmaya başlamıştır. Burada ark metal bir çubuk ve iş parçası arasında yanmaktadır.

1895 yılında Goldschmidt termit kaynağını bulmuştur. Günümüzde alümino termit kaynağı olarak adlandırılmaktadır.

1898 yılında Linde havayı ayrıştırarak oksijen kazanma projesini geliştirmiştir.

1907 yılında İsveçli Oscar Kjeliberg ark kaynağı için kullanılan örtülü çubuk elektrotları geliştirmiştir [2].

2.4 Temel Kaynak Tanımları

2.4.1 Eritme Kaynağı

Birleşecek yüzeylerin dış bir kuvvet kullanmadan genellikle eritilmiş bir dolgu malzemesi kullanarak ana malzemenin de bununla beraber eritilerek kaynaklanması işlemidir [2].

2.4.2 Basınç Kaynağı

Birleşecek her iki yüzey üzerine yeterli kuvvet uygulanarak az veya çok plastik deformasyon oluşturarak kaynaklanması işlemidir. Genellikle dolgu malzemesi kullanılmaz [2].

2.4.3 Kaplama Kaynağı

Metal yüzeyine kaynaklama yöntemi ile farklı bir tabaka kaplanması işlemidir. Genel olarak bu yöntem parçanın dış yüzeyinde daha sert bir tabaka oluşturmak amacı ile kullanılmaktadır [2].

3. GAZ ALTI KAYNAK YÖNTEMLERİ

3.1 Yöntemlerin Sınıflandırılması

Gaz altı ark kaynak yöntemleri, elektrod, koruyucu gaz ve ark türüne göre sınıflandırılabilir. İlk büyük sınıflandırma, elektrod türüne göre yapılmıştır. Burada yöntemler, erimeyen ve eriyen elektrod olarak gruplandırılabilir. Erimeyen elektrodlar tungstenden üretilmişlerdir ve yöntem grupları bu nedenle Gaz Altı Tungsten Ark Kaynağı (GTAK) olarak adlandırılmıştır. Eriyen elektrodlar ise hem ark taşıyıcı hem de ilave metal görevi yaptığından ve genellikle kaynak yapılan metalle aynı kimyasal bileşime sahip olduğundan, bu yöntem Gaz altı Metal Ark Kaynağı (GMAK) olarak adlandırılmaktadır [3].

3.2 TIG / WIG Kaynağı

TIG kaynağı, 1940–1944 senelerinde A.B.D.' de magnezyum ve diğer hafif metal alaşımlarının kaynağı için geliştirilmiş ve koruyucu gaz olarak da o zamanlar helyum gazı kullanılmıştır. TIG – "Tungsten Inert Gas" /WIG - "Wolfram Inert Gas" usulünde kaynak arkı erimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşmaktadır. Ark, elektrot ve erimiş banyo havanın etkisinden bir argon veya helyum atmosferi ile korunmaktadır. Koruyucu gazın soy bir gaz olması dolayısıyla oksidasyon ve diğer istenmeyen haller önlenmektedir. Kaynak İşlemi içinde oksiasetlen kaynağında olduğu gibi, ayrıca bir kaynak ilave metaline ihtiyaç vardır. TIG kaynağı, esas olarak bir ark kaynağı şeklidir. Özellikle alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif metallerin kaynağına uygundur. TIG kaynak yöntemi için elektrik akımı, su ve gazın her an sağlanması ve kontrol edilmesi gerektiğinden, bu yöntemde kullanılan ekipman, ark kaynağında kullanılanlara göre daha karmaşık ve pahalıdır. Yöntem yaygın olarak TIG adıyla bilinir. TIG kaynağı, elektrik ark kaynak yönteminin daha ileri bir aşamasıdır. Bu prosesin tam adında Tungsten kelimesi, arka elektrik akımını iletmeyi sağlayan, erimeyen elektrodu, Inert kelimesi, diğer elementlerle kimyasal olarak birleşmeyen bir gazı ve Gas kelimesi de, erimiş banyo

ve arkı örten, kaynak bölgesini çevreleyen havayı uzak tutan malzemeyi simgeler. TIG yöntemiyle, genellikle diğer kaynak yöntemleriyle oluşturulan kaynaklara göre daha üstün özellikte dikişler elde edilir [4].

3.3 Gazaltı Metal Ark Kaynağı

Bu yöntemde kaynak için gerekli ısı, sürekli beslenen ve ergiyen bir tel elektrotla kaynak banyosu arasında oluşturulan ark yoluyla ve elektrottan geçen kaynak akımının elektrotta oluşturduğu direnç sonucu meydana gelen ısınma aracılığıyla üretilir. Elektrot çıplak bir tel olup, elektrot besleme tertibatıyla kaynak bölgesine sabit bir hızla sevk edilir. Çıplak elektrot, kaynak banyosu, ark ve esas metalin kaynak bölgesine komşu bölgeleri, atmosferin olumsuz etkilerine karşı dışarıdan sağlanan ve bölgeye bir gaz memesinden iletilen uygun bir gaz veya gaz karışımı tarafından korunur [5].

Örtülü elektrod kullanarak, el ile yapılan ark kaynağının en büyük dezavantajları, güvenilir bir bağlantı elde edilebilmesi için kaynakçının belirli bir düzeyde yetiştirilmiş olması ve kaynak hızının sınırlı oluşudur. Bu iki husus da sonucun pahalı olmasına ve acele yapılması gereken işlerin belirli bir termin süresinden önce bitirilememesine neden olmaktadır. Özellikle kalın parçaların kaynağında, kaynak süresi çok uzun olmaktadır. Elektrod çapı belirli bir ölçüden sonra arttırılamamaktadır. Örneğin 6 mm'den daha kalın çaplı elektrodlar kullanıldığında, kaynakçının işlem esnasında kaynak banyosuna hâkimiyeti güçleşmektedir [5].

Kaynak esnasında, cürufun temizlenmesi ve elektrod değiştirilmesi için harcanan zaman genellikle kaynak süresini aşmaktadır. Her elektrodun uç kısmında birkaç santimetrelik bir kısım kullanılmadan atılmakta ve bu da maliyeti etkilemektedir. Akım şiddetini arttırarak erime süresini kısaltmak da iyi sonuç vermemektedir. Çünkü bu kaynak yönteminde elektrod fazlaca ısındığından örtü ark bölgesinden önce yanarak bozulmakta ve kendinden beklenen görevi yerine getirememektedir. Ayrıca el ile yapılan kaynakta hızın, belirli bir değerin üzerine çıkması kaynakçının, kaynağa hakimiyetini güçleştirmektedir. Burada elektrot örtüsünün sağladıklarını şu şekilde sıralayabiliriz [5].

- Bir koruyucu gaz atmosferi oluşturarak kaynak banyosunu havanın oksijen ve azotunun olumsuz etkilerinden korur ve banyoyu oksijenden korur.
- Arkın tutuşmasını ve oluşumunu kolaylaştırır.
- Eriyen metal damlalarının yüzey gerilimini etkileyerek tavan ve dik kaynak pozisyonlarında kolaylık sağlar.
- Kaynak dikişinin üzerini bir cüruf tabakası ile örterek, dikişin yavaş soğumasına yardımcı olur.
- Kaynak banyosuna gerekli alaşım elementlerini katarak, dikişin mekanik özelliklerini istenen yönde geliştirir.
- Erime hızını yükseltir.

Elektrod örtüsünün bu görevleri içinde en önemlisi ve en vazgeçilmezi bir koruyucu gaz atmosferi oluşturarak, kaynak banyosunu havanın oksijen ve azotunun olumsuz etkilerinden korumasıdır. Bu nedenle, örtünün yerini alacak olan nesne mutlaka bu görevi yüklenmiş olmalıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda iki ayrı yoldan gidilerek, bugün toz altı ve gaz altı diye adlandırdığımız kaynak yöntemleri geliştirilmiştir [5].

3.4 Yöntemlerin Tarihçesi

Eriyik halindeki kaynak banyosunun bir gazla korunması fikri oldukça eskidir. İlk defa 1926 yılında ortaya atılan Alexander usulünde kaynak dikişi metanol gazı ile korunmuş ve daha sonraları 1928'de Arcogen usulü geliştirilmiştir. Bu usulde hem bir elektrod hem de oksiasetilen alevi birlikte kullanılmıştır. Burada üfleç alevi, dikişi havanın etkisinden korumaktaydı. Bugün bu usullerin her ikisi de terk edilmiştir. Diğer taraftan, kaynak metalinin atmosferin etkilerine karşı korunması, sistemli bir şekilde incelenmiş ve yine 1926 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde Weinmann ve Langmuir tarafından hidrojenin bir koruyucu gaz olarak kullanılmasıyla arkatom usulü uygulama alanına girmiştir. Koruyucu gaz olarak inert bir gazın kullanılması, ancak 1930 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde Hobart ve Devers tarafından patent olarak alınmış ve 1940 yılında da Nortrop Aircraft Company Inc. firması tarafından, uçak inşaatında magnezyum ve

alaşımlarının kaynağında kullanılmıştır. Burada önce helyum gazı kullanılmış ve daha sonra da 1942 yılında Linde Air Product Company ve Union Carbide and Carbon Corporation tarafından hem helyum ve hem de argon gazları kullanılarak hafif metal ve alaşımlarının kaynağı yapılmıştır. Inert gazlardan başka kaynak yerinde karbondioksit gibi aktif bir gazın kullanılması konusundaki ilk çalışmalara 1952 yılında başlanmıştır. Bugün çeşitli inert gaz ve aktif gazların kullanıldığı, donanımı aynı ancak gaz karışımları farklı olan çeşitli gaz altı ark kaynak yöntemleri mevcuttur [4].

3.5 Yöntemlerin Sınıflandırılması

Gaz altı metal ark kaynağında hem asal hem de aktif gazlar kullanılabilir. Bu nedenle gaz altı metal ark kaynağı, Metal Inert Gaz (MIG) kaynağı ve Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı olarak ayrılır. Nüfuziyet formu, dikişin görünüşü ve sıçrama oluşumu, kullanılan aktif gaz türünün eritme gücüne bağlı olan Metal Aktif Gaz kaynağı, koruyucu gaz türüne göre, eğer aktif gaz (CO_2 ve O_2) bileşenleri olan argon esaslı bir koruyucu gaz kullanılıyorsa MAG-M kaynağı ve kaynak karbondioksiti (CO_2) kullanılıyorsa MAG-C kaynağı olarak alt gruplara ayrılır [4].

4. ERİYEN ELEKTROD İLE GAZALTI KAYNAĞI

İlk defa ABD'de alüminyum ve alaşımlarının sonra da sırası ile yüksek alaşımlı çeliklerin, bakır ve alaşımlarının, karbonlu çeliklerin kaynağında kullanılmış olan MIG (Metal Inert Gas) kaynak yönteminde ark helyum veya argon gibi asal bir gaz atmosferi altında yanar. Bu yönteminin TIG yönteminden farkı arkın iş parçası ve kaynak metali ihtiyacını sağlayan eriyen bir elektrot arasında oluşturulmasıdır [5].

Bir MIG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

- Bir kaynak tabancası.
- Tel şeklindeki elektrot ve muhafazasını kaynak kablosunun, soğutma suyu giriş ve çıkış elemanlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli hortum.
- Tel şeklindeki elektrodun hareketini sağlayan tertibat.
- Kaynak akımının geçişini, soğutma suyunun devreye girişini, koruyucu gazın akışını ve telin hareketini sağlayan kumanda dolabı.
- Kaynak akım üretici.

Üzerinde basınç düşürme ventili ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan koruyucu gaz tüpü MIG kaynak yönteminde doğru akım kullanılır ve elektrodun kolaylıkla eriyebilmesi ve verimliliğin artırılması açısından örtürü, örtülü elektrotla yapılan elektrik ark kaynağına nazaran daha yüksek bir akım yoğunluğu ile çalışılır. Ark boyunun sabit kalması için sürekli olarak eriyen kaynak metali miktarına göre elektrot telinin kaynak donanımı tarafından otomatik olarak ilerletilmesi, bu yöntemde kaynakçının çalışma şartlarını kolaylaştırır. Örtülü elektrotla yapılan ark kaynağının aksine bu yöntemde kaynakçının yetiştirilmesi bir sorun yaratmaz. Yalnız bu yöntemde akım yoğunluğunun yüksekliği dolayısı ile kuvvetli bir ışıma oluştuğunda gözlerin ve cildin korunması için gereken önlemler alınmalıdır [5].

4.1 Bu Yöntemde Kullanılan Koruyucu Gazlar

Bütün koruyucu gaz kaynak yöntemlerinde olduğu gibi MIG/MAG yönteminde de koruyucu gazın ark bölgesini tamamen örtmesi ve atmosferin olumsuz etkilerinden koruması gerekir. Ark atmosferinin karakteri, kullanılan çeşitli gaz ve gaz karışımlarına bağlı olarak değişir. Argon, helyum gibi asal gazların meydana getirdikleri ark atmosferinin nötr bir karakter göstermesine karşın, argon gazına oksijen veya karbondioksit gibi aktif gazların karıştırılmasıyla ark atmosferine oksitleyici bir karakter kazandırabilir. Hidrojen gazının karıştırılması halinde ise redükleyici bir gaz atmosferi oluşur. Argon gazına oksijen veya karbondioksit gazlarını karıştırılması ile oluşan egzoterm bir reaksiyon neticesinde kaynak banyosunun sıcaklığı yükselir ve yüzey gerilimi zayıflar. Böylece kaynak banyosunun akıcılığı yükseltilmiş olur. He ve Ar karışımı koruyucu gaz olarak yukarıda belirtilmiş olan özelliklerini karışım oranına göre gösterirler. Argon gazına az miktarda oksijen, çeşitli oranlarda CO₂ ilave ederek karışım gazlar elde edilir. Karbondioksit atmosferi altında yapılan, diğer bir deyimle karbondioksiti koruyucu gaz olarak kullanılan kaynak yöntemine Metal Activ Gas kelimelerinin baş harflerinden faydalanılarak MAG adı verilmiştir. Alüminyum, magnezyum ve alaşımları gibi kolaylıkla oksitlenen malzemelerin kaynağında CO₂, gibi aktif bir gazın kullanılmamasına rağmen, bu gaz çeliklerin kaynağında yeni imkanların ortaya çıkmasına sebep olmuştur [5].

4.2 Gazaltı Kaynak Yönteminde Elektrod Seçimi

Eriyen elektrod ile gaz altı kaynak yönteminde en önemli problemlerden bir tanesi de tel elektrodun seçimidir. Bu kaynak yönteminde tel ve koruyucu gaz kombinasyonu sonucunda ortaya çıkan kaynak metalinin bileşimi gereken mekanik ve fiziksel özellikleri karşılamak zorundadır, bu bakımdan elektrod seçiminde aşağıda belirtilmiş olan hususlar göz önüne alınmak zorundadır. Elektrod seçimini etkileyen en önemli faktör esas metalin fiziksel ve mekanik özellikleri ile kimyasal bileşimidir [5].

4.2.1 Esas Metalin Mekanik Özellikleri

Bu kritere göre elektrod seçimi, genellikle esas metalin çekme ve akma mukavemeti göz önüne alınarak yapılır. Bazı durumlarda, özellikle ferritik çeliklerde malzemenin kırılma tokluğunun da (çentik - darbe mukavemeti) göz önüne alınması gereklidir [5].

4.2.2 Esas Metalin Kimyasal Bileşimi

Esas metalin kimyasal bileşiminin bilinmesi, özellikle renk uyumunun, korozyon direncinin, sürünme dayanımının, elektriksel ve ısı iletkenliğinin söz konusu olduğu hallerde gereklidir. Bunun yanı sıra çelikler halinde, ısının tesiri altında kalan bölgede, sertleşme oluşup oluşmayacağına önceden belirlenmesi bakımından da esas metalin kimyasal bileşiminin bilinmesi gereklidir [5].

4.2.3 Koruyucu Gazın Türü

Koruyucu gaz olarak asal gaz veya karışımlarının kullanılması halinde bir yanma kaybı söz konusu değildir. Buna karşın bir aktif gaz, örneğin karbondioksit veya asal gaz ve aktif gaz karışımı kullanılması halinde bir takım yanma kayıpları ile karşılaşılır. Daha önceden belirtilmiş olduğu gibi aktif gaz kullanılarak çeliklerin kaynatılması halinde az bir miktar demir oksijen tarafından oksitlenir ve ortaya çıkan demir oksit de bileşimdeki mangan ve silisyum tarafından redüklenir. Buradaki silisyum ve mangan kaybı elektrod tarafından karşılanmak zorundadır. Bu bakımdan çeliklerin kaynağında MIG Yöntemi için geliştirilmiş bir elektrod MAG yönteminde kullanılamaz [5].

4.2.4 Esas Metalin Kalınlığı ve Geometrisi

Kaynakla birleştirilecek olan parçaların, kalın kesitli veya karışık şekilli olmaları halinde, çatlamanın önlenmesi için kaynak metalinin sünek olması gereklidir. Bu durumlarda en iyi sünekliği sağlayan kaynak metalini oluşturacak türde bir elektrod seçilmelidir [5].

4.3 Arkta Kaynak Metali Taşınımı

MIG - MAG kaynağında gerekli ısı enerjisi, iş parçası ve eriyen tel elektrod arasında oluşturulan elektrik arkı tarafından sağlanmaktadır. Bu arkı, iş parçası ve tel elektrod arasında kızgın gaz ve metal buharları tarafından elektriğin iletimi diye tanımlayabiliriz. Katoddan (eksi kutup) elektrodlar büyük bir hızla anoda (artı kutup) doğru giderler ve bunların bu hızlı hareketlerinin enerjisi de ısıya dönüşür. Hızla hareket eden elektronların çarptıkları bölge de aşırı ısınır, malzeme erir ve kısmen buharlaşır. Elektronlar bu hızlı hareketleri esnasında atomların dış kabuklarına çarparlar ve oradan da elektronların ayrılmasına neden olurlar. Elektron kaybeden atom ise artık nötr değildir yani iyon haline gelmiştir ve pozitif yüklüdür. Yükünden ötürü de hızla katoda (eksi kutba) doğru gider ve oranın ısınmasına neden olur ve bu şekilde erime ve buharlaşma sürekli devam eder. Elektron ve iyonların elektrik alanı içinde hareketleri bir ark sütunu oluşturur ve buna plazma adı verilir. Burada görülen iyonların çok azı kullanılan koruyucu gaza aittir, bunlar metal atomlarından oluşmuşlardır. Koruyucu gaz atomlarının bu iyonlaşma olayına iştirak etmemelerine rağmen, koruyucu gaz tür ve bileşimi dikişin biçimine ve ark içinde kaynak metali taşınımına etki eder. Kaynak işlemi esnasında metal damlacıklarının geçiş özeliğine göre çalışma karakteristiği seçimi ile 14 ila 24 V arasında kısa ark, 23 ila 34 V arasında ise uzun ve sprej ark (duş şeklinde damla geçişi) elde edilir. 18 ila 28 V arasında ise uzun ve kısa ark arası bir damla geçişi karşılanır. Damla geçişine bağlı olarak akım yoğunluğu kısa ark halinde 125 A/mm^2 ' den küçük, uzun ve sprej ark halinde ise bu değerden büyük olmalıdır [5].

4.3.1 Kısa Ark

Kısa ark yöntemi ince elektrodlarla (0.6 ilâ 1.2 mm) kısa ark boyu yani düşük ark gerilimi ve düşük akım şiddeti ile kaynak yapıldığında karşılaşılan bir ark türüdür. Burada ark oluşunca elektrodun uç kısmı hemen erimeye başlar ve burada bir damlacık oluşur. Damlacık banyoya doğru akarken elektrod ve iş parçası arasında kısa devre oluşur, gerilim düşer, akım şiddeti yükselir damla elektroddan kopar ve kısa devre ortadan kalkar. Bu olay sürekli olarak tekrarlanır. Uygulanan akım şiddeti, ark gerilimi koruyucu gaz türü ve elektrod metaline bağlı olarak bu işlem saniyede 20 ilâ 200 kere tekrarlanır. Burada kaynak metali iş parçasına sadece kısa devre anında geçmekte ve ark tarafından taşınmamaktadır. Kısa ark boyu halinde düşük ark gerilimi, düşük akım şiddeti ile çalışılması ve metal transferinin kısa devre esnasında gerçekleşmesi sonucu iş parçasına uygulanan ısı girdisi çok düşüktür. Bu bakımdan ince parçaların kaynağı ve çarpılma tehlikesinin büyük olduğu haller için çok uygun bir ark türüdür. Ayrıca bu tür ark ile yapılan kaynakta kaynak banyosunun çok büyük olmaması ve hemen katılaşması nedeni ile, dik ve tavan kaynaklan ve geniş kök aralıklarının örülmesinde de uygun bir yöntemdir [5].

4.3.2 Uzun Ark

Akım şiddeti ve ark gerilimi biraz daha yüksek tutulursa kısa devre ile kaynak metali taşınımı yerine globüler (damlasal) metal taşınımı hali oluşur. Bu halde ark tutuşur tutuşmaz elektrodun uç kısmında erime başlar ve bir damlacık oluşur, damlacık irileşir ve elektrod çapını aştıktan sonra elektroddan kopar ve yerçekimi yardımı ile ark sütunu boyunca ilerler ve banyoya düşer. Ark geriliminin yüksek olması nedeni ile burada ark boyu uzundur ve dolayısı ile normal halde damla banyoya intikal ederken kısa devre oluşumu nadirdir. Bu tür ark hemen hemen bütün kullanılan koruyucu gazlar ile ortaya çıkar. Sadece CO₂ haricindeki gazlarda bu ark ancak çalışma bölgesinin alt kısımlarındaki değerlerde görülür. Buna karşın CO₂' nin koruyucu gaz olarak kullanılması halinde hemen hemen her çalışma bölgesinde damlasal metal taşınımı görülür. Damlaların iri olması ve metalin kaynak banyosuna yerçekimi ile taşınmasından ötürü bu yöntemde tavan kaynağı yapmak zorlaşır [5].

4.3.3 Sprey Ark

Kaynak metalinin iş parçasına duşlama şeklinde geçişi, sprej ark halinde görölür. Kaynak metalinin iş parçasına bu şekilde taşınımı elektrod ucunun sivrileşmesi sonucu bu sivrilmiş uçların koparak iş parçasına çok küçük damlalar halinde geçişi ile gerçekleşir. Damlacıklar tel çapından çok küçüktür ve telden uzun ark halinden çok daha süratle ayrılırlar. Damla sayısı saniyede birkaç yüze kadar çıkabilir. Sprej ark genel olarak argon veya argonca zengin koruyucu gaz ile yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi kullanıldığından ortaya çıkar. Sprej ark, yüksek akım şiddetlerinde oluştuğundan özellikle kalın parçaların kaynağı için çok uygundur ve bu yöntemde sıçrıntı çok azdır. Yüksek erime gücü nedeni ile banyo diğer ark türlerine nazaran daha geniş oluşur. Bu bakımdan yatay ve oluk pozisyonlarda dolgu ve kapak pasolarının çekilmesi için çok uygundur. Kök pasolar için ancak altlık kullanmak koşulu ile uygulanabilir. Bu ark türünde yüksek güçlerde çalışıldığından torcun çok iyi bir şekilde soğutulması gereklidir [5].

4.3.4 Darbeli Ark

Bu yöntemin uygulanabilmesi için bu tür kaynak akımını üreten özel bir kaynak akım üretesine gerek vardır. Burada sözü edilen darbeli doğru akım ile alternatif akımı birbirlerinden iyi ayırt etmek gereklidir. Darbeli doğru akımda akım şiddeti, saptanmış iki değer arasında seçilmiş olan frekansta değişmektedir. Bu yöntem ile arzulanan her çalışma bölgesinde kısa devre oluşturmadan iş parçasına az bir ısı girdisi uygulanarak çalışmak mümkün olabilmektedir. Ayrıca frekansı ayarlayarak istenen sayıda ve irilikte erimiş metal damlacıklarının iş parçasına geçişi sağlanabilmektedir. Bu yöntemin tek dezavantajı kaynak akım üreticinin ve tel ilerletme tertibatının pahalı ve donanımın bakımının da zor olmasıdır [5].

4.4 Kaynak Parametrelerinin Seçimi

Kaynak parametreleri kaynak işlemini ve elde edilen kaynak bağlantısının kalitesini belirleyen en önemli unsurlardır. Kaynak parametreleri, kaynaklanan metal veya alaşım ile kaynak metalinin türü ve kaynak ağız geometrisi göz önünde

bulundurularak saptanır. Bu parametrelerin seçimi kaynakçının çalışma koşullarını kolaylaştırdığı gibi gereken özellikte kaynaklı bağlantı elde edebilme olasılığını da artırır. Kaynak parametreleri, kaynak öncesi saptanan ve kaynak süresince değiştirilmesi mümkün olmayan parametreler, birinci derecede ayarlanabilir ve ikinci derecede ayarlanabilir parametreler olmak üzere üç ayrı grupta incelenebilir. Birinci gruba giren parametreler kaynağın uygulanmasından önce saptanan, kaynak koruyucu gaz türü, elektrod türü ve çapı gibi etmenlerdir. Bunların kaynak işlemi esnasında değiştirilmesine olanak yoktur. Bu parametreler, kaynaklanan malzemenin türü, kalınlığı, kaynak pozisyonu, erime gücü ve bağlantıdan beklenen mekanik özellikler göz önüne alınarak saptanır. Birinci derecede ayarlanabilir diye adlandırılan, ikinci gruba giren parametreler, ilk gruba giren parametreler seçildikten sonra, kaynak dikişini kontrol altında tutan, dikişin biçimini, boyutlarını, ark stabilitesini ve kaynaklı bağlantının emniyetini etkileyen değişkenlerdir. MIG-MAG kaynağında bu parametreler akım şiddeti, ark gerilimi ve kaynak hızıdır. Bu parametreler kolaylıkla ölçülebildiği gibi, kaynak esnasında da gereken hallerde yeniden ayarlanabilen ve tüm dikişi en sıkı ve etkin bir biçimde kontrol altında tutan etmenlerdir. Üçüncü gruba, kaynak işlemi süresince sürekli olarak değişen ve kaynak dikişinin biçimini oldukça şiddetli bir şekilde etkileyen parametreler girer. Bu parametrelerin önceden seçilip değerlendirilmeleri oldukça zordur ve bazı hallerde etkilenen de açık bir şekilde görülmez. Bunlar genelde ikinci gruba giren parametreleri etkileyen ve dolaylı olarak da kaynak dikişinin biçimini belirleyen parametrelerdir. MIG-MAG kaynağın da bunlar torç açısı ve elektrod serbest uç uzunluğu olarak sıralanabilir [5].

4.4.1 Kaynak Öncesi Saptanan Parametreler

4.4.1.1 Elektrod çapı

Her tür elektrod bileşimi için çapa bağlı olarak bir akım şiddeti aralığı vardır. Büyük çaplı elektrodlar daha yüksek akım şiddeti ile kullanılabilirler ve daha yüksek bir erime gücüne sahiptirler ve daha derin nüfuziyetli dikişler oluştururlar.

Erime gücü akım yoğunluğunun bir fonksiyonudur, eş çaplı iki elektrod farklı akım şiddetlerinde kullanıldıklarında, yüksek akım şiddeti ile yüklenende, akım yoğunluğu büyük olduğundan, daha yüksek bir erime gücü elde edilir. Kullanılacak olan kaynak elektrodunun çapının seçiminde kaynatılan parçanın kalınlığı, nüfuziyet derecesi, erime gücü, arzu edilen kaynak dikişi profili, kaynak pozisyonu ve elektrodların fiyatı göz önünde bulundurulur [5].

4.4.1.2 Koruyucu Gaz Türü

Gaz altı kaynağında çeşitli türlerde gazlar kullanılır ve her gazın oluşturduğu erime gücü, dikiş biçimi ve nüfuziyet birbirlerinden farklıdır. Koruyucu gaz türünün aynı zamanda kaynak esnasında sıçrama miktarına, kaynak hızına, kaynak metalinin arktaki transfer şekline ve elde edilen bağlantının mekanik özelliklerine etkisi vardır. Demir esaslı metallerin kaynağında saf karbondioksit ile, argon-karbondioksit ve argon ve oksijen karışımları kullanılır. Karbondioksitin koruyucu gaz olarak kullanılması halinde aynı akım şiddeti için en büyük erime gücü, en derin nüfuziyet, en geniş ve en konveks kaynak dikişi elde edilir. Karbondioksit en ucuz koruyucu gaz olmasına karşın en fazla sıçrama kaybı ve en fazla duman oluşturan gazdır. Karbondioksitin koruyucu gaz olarak kullanılması halinde oluşan yüksek ısı girdisi dolayısı ile aynı akım şiddeti için daha yüksek hızlarda kaynak yapmak mümkün olabilmektedir. Argon ile argon ve oksijen karışımı gazlar, kaynak esnasında karbondioksitin tam bir karşıtı özellik gösterirler. Bu gazlar ile en düşük erime gücü, en az nüfuziyet, en dar ve en az yüksek kaynak dikişi elde edilir. Argon ve oksijen karışımı gazlar aynı zaman da en az duman ve en az sıçrama oluşturan bir kaynak işlemi sağlarlar. Argon ve karbondioksit karışımı gazlar ise karbondioksit ve argon-oksijen karışımı arasında bir özellik gösterirler [5].

4.4.2 Birinci Derecede Ayarlanabilir Parametreler

4.4.2.1 Kaynak Akım Şiddeti

Kaynakta kullanılan akım şiddetinin erime gücüne, kaynak dikiş biçim ve boyutlarına aynı zamanda nüfuziyete etkisi diğer bütün parametrelerden daha şiddetlidir. Sabit gerilim sistemli olan MIG-MAG kaynak makinalarında, kaynak akım şiddeti tel hızı ile beraberce, tel hız ayarı düğmesinden ayarlanır, tel iletme hızı arttıkça, kaynak akım şiddeti de artar. Bütün diğer kaynak parametreleri sabit tutulduğu zaman kaynak dikişinin eninin, yüksekliğinin, nüfuziyetinin ve boyutlarının artan akım şiddeti ile arttığı görülür. Aşırı yüksek akım şiddeti çok geniş bir kaynak banyosu ve derin nüfuziyete neden olduğundan delinmelerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Çok düşük akım şiddeti de çok kötü bir nüfuziyete ve elektrod metalinin parçanın üzerine yığılmasına neden olur [5].

4.4.2.2 Kaynak Akım Gerilimi

Sabit gerilim karakteristlikli bir kaynak akım üreticinde ark gerilimi veya kaynak gerilimi, elektrod ucu ile iş parçası arasındaki uzaklık tarafından belirlenir. Bir uygulama için ark gerilimi, kullanılan koruyucu gaz, elektrod çapı, kaynak pozisyonu, ağız şekli ve esas metalin kalınlığı göz önünde bulundurularak saptanır. Her koşulda aynı kaynak dikişini veren bir sabit ark boyu mevcut değildir. Örneğin, ark boyu, aynı gerilim için helyum ve karbondioksit kullanılması halinde, argonun koruyucu gaz olarak kullanılması haline nazaran çok daha uzundur. Bütün diğer parametreler sabit tutulmak koşulu ile ark geriliminin artması, halinde kaynak dikişi yaygın ve geniş bir biçim alır. Nüfuziyet ise artan ark gerilimi ile bir optimum değere kadar artar ve bu değerden sonra azalmaya başlar. Yüksek ark gerilimi, nüfuziyet miktarının azlığı dolayısı ile bazı geniş aralıklarda kök pasoda köprü kurabilmek için kullanılır. Çok küçük ark gerilimi çok dar ve aşırı şişkin (konveks) kaynak dikişlerinin oluşmasına, aşırı derecede küçük ark gerilimi ise poroziteye neden olur [5].

4.4.2.3 Kaynak Hızı

Kaynak hızı yarı otomatik yöntemlerde kaynakçı, otomatik veya mekanize yöntemlerde ise makina tarafından ayarlanır. Kaynak hızı, kaynak arkının iş parçası boyunca olan hareketi veya birim zamanda yapılan kaynak dikişi boyu olarak tanımlanır. En derin nüfuziyet kaynak hızının optimum değerinde elde edilir ve bu hızın yavaşlaması veya artması hallerinde ise nüfuziyet azalır. Kaynak hızı yavaş olduğu zaman, birim zamanda birim boya yığılan kaynak metali artar ve buda kaynak banyosunun büyümesine neden olur. Çok akışkan hale gelen sıvı metal ağız içinde arkın önüne doğru akar ve bu da nüfuziyetin azalmasına neden olur ve sonuçta geniş bir kaynak dikişi elde edilir. Kaynak hızının artması, dikiş yüksekliğinin artmasına neden olur. Aşırı derecede yavaş kaynak hızı, fazla miktarda kaynak metalinin yığılması ve nüfuziyetin azlığı nedeni ile ağız kenarlarında kalan bölge oluşmasına neden olur. Hızın artması birim boya verilen ısının azalmasına ve dolayısı ile de esas metalin eriyen miktarlarının azalmasına neden olur ve bu da nüfuziyeti azaltır. Kaynak hızının aşırı artması, kaynak metalinin kaynak ağzını doldurmaması nedeni ile dikiş kenarlarında yanma oluklarını andıran yarıkların oluşmasına neden olur [5].

4.4.3 İkinci Derecede Ayarlanabilir Parametreler

4.4.3.1 Serbest Tel Uzunluğu

Elektrod serbest tel uzunluğu, torç içindeki kontak borusunun en uç noktası ile tel elektrodun uç kısmı arasındaki mesafe olarak tarif edilir. Bu boyun uzaması sonucu elektrodun elektrik direnci artar ve elektrodun ön ısınması diye tanımlanan sıcaklığı yükselir ve dolayısı ile de elektrodun uç noktasını eritebilmek için gerekli akım şiddetinde azalma ortaya çıkar. Serbest tel uzunluğunun artması erime gücünün artmasına, nüfuziyetin azalmasına neden olur. Sonuç olarak serbest tel uzunluğunun aşırı miktarda artması, fazla miktarda soğuk kaynak metalinin (düşük sıcaklıkta) kaynak dikişine yığılmasına neden olur [5].

4.4.3.2 Torç Açısı

Kaynak elektrodunun veya torcunun iş parçasına nazaran konumu ve kaynak esnasındaki hareketi kaynak dikişinin formunu etkileyen etmenlerden bir tanesidir. MIG - MAG kaynağında da, aynen oksiasetilen kaynağında olduğu gibi sola ve sağa kaynak yöntemi uygulanabilir. Torcun kaynak yapılan iş parçasına tam dik olarak tutulması halinde sağ veya sol kaynak arasında sonuç yönünden bir fark görülemez. Buna karşın kaynak hamlacı 30° ye kadar bir hareket açısı ile tutulduğu zaman sol ve sağ kaynağın dikiş biçimi üzerine olan etkisi açık bir şekilde görülür. Hareket açısı 30° yi aşmadığı sürece, bu açı, kaynağın, kaynakçı tarafından kontrolüne yardımcı olur. Kaynakçı kaynak banyosunu ve elektrod ucunun erimesini rahatlıkla görebildiği için dikişin kalitesi yükselir. Buna karşın bu değer aşıldığında nüfuziyet azalır ve dikiş incelikler. Bu durumda kaynak hızının artırılması gerekir. Aksi halde sıvı metal kaynak banyosunun önüne doğru ilerler ve dikişte gözenek ve kalıntı oluşumu olasılığı artar. Eğimin fazlaşması diğer yönden koruyucu gaz akımının da etkilediğinin, gazın koruma etkinliği azalır [5].

5. KAYNAKLI İMALATTA TERMAL GERİLMELER VE ÇARPILMALAR

Kaynaklı birleştirme sürecinde oluşan bölgesel termal genişleme ve soğuma sürecinde meydana gelen kendini çekme kuvvetleri sebebiyle oluşan kalıntı gerilmeler, kaynaklı birleştirmeli konstrüksiyonların çarpılmasındaki en önemli etkidir. Esasen çarpılmaların, yapının rijitlik derecesi, kütlesi ile malzemenin akma sınırı, elastiklik modülü, ısıl genişleme katsayısı, ısı iletim katsayısı, ergime sıcaklığı, özgül ısı girdisi, kaynak bölgesinin boyutları ve konstrüksiyon ile kaynak bölgesi arasındaki sıcaklık farkı gibi büyük bir çoğunluğu sıcaklığın fonksiyonu olarak değişen çok çeşitli faktörlerin etkisinde olması, önceden hassas bir biçimde hesaplanmalarını olanaksız kılmaktadır [6, 7]. Bir çok değişken faktörün bir arada olması özellikle karmaşık yapılarda çarpılmayı öngörmeyi zorlaştırmaktadır.

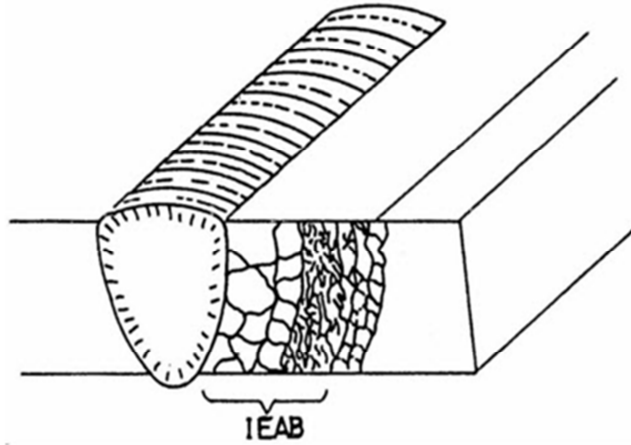
Kalıntı gerilmelere sebep olan çarpılma kuvvetlerinin şiddetine bağlı oluşan çeşitli tür ve miktardaki çarpılmalar, üründen beklenen fonksiyonların sağlanmasını engeller. Özellikle büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılan, kafes veya dolu gövdeli kirişlerde oluşan çarpılmalar, büyük oranda ölçü ve geometrik sapmalara sebep olduğundan, ya ürünü kullanılamaz duruma getirmekte veya düzeltme işlemleri için ilave ekonomik kayıplara sebep olmaktadır [8, 9].

Kaynaklı konstrüksiyonlar da oluşabilecek bu olumsuz etkileri minimize edebilmek için, özgül ısı girdisinin düşürülmesi ve uygun kaynak sırası planının tatbiki gerekir [6, 10, 11]. Bu amaçla yapılan literatürde ki çalışmaların çoğu, özel konstrüksiyonlarda karşılaşılan çarpılma problemlerinin çözümüne yönelik kaynak sıralarının sunulmasına veya çarpılmayla ilgili temel deneysel verilerden elde edilen sonuçların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesine yöneliktir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda kullanılan yöntem ise, bir konstrüksiyona uygulanan kaynak planının meydana getirdiği çarpılmaların belirli doğrultularda boyutsal değişim olarak ölçülmesini içerir [6, 12, 13].

5.1 Çeliklerin Isıl Özellikleri ve Kaynak Bölgesi

5.1.1 Çeliklerin Ergitme Kaynağında Kaynak Bölgesi

Kaynak bölgesi ikiye ayrılır. Bunlar, kaynak metal ve erime çizgisinin ana malzeme tarafında kalan ısının tesiri altındaki bölgedir. Ergiyen bölge, kaynak banyosunda meydana gelen türbülans dolay 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. Bu bölgenin yapısı iri ve uzun tanelidir. Kalın parçaların nüfuziyet kaynağında, ergiyen bölgenin ortasında segregasyondan dolayı bir boşluk meydana gelir [14].



Şekil 5.1: Isı etkisi altında kalan alanda tane yapısı değişimi [14].

Isının tesiri altındaki bölge (IEAB), kaynak metalinin esas metal ile birleştiği kısımdan itibaren yaklaşık 1400 ile 700°C arasında bir sıcaklığın etkisi altındaki bölgedir. Çelik malzemenin kaynağında bu bölgedeki tane yapısının değişimi Şekil 5.1’ de gösterilmiştir [14].

Bu bölgenin sıcaklık dağılımı, kaynak şartlarına bağlıdır. Isının etkisi altındaki bölgedeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı bilinirse, kaynaktan sonraki iç yapının bilinmesi mümkün olabilir [14].

5.1.2 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 [14].

5.1.2.1 Isı İletim Katsayısı

Malzemenin fiziksel bir özelliğidir ve ısı iletim kabiliyetini gösterir. Birim zaman da, birim yüzeyden, birim uzunlukta 1 °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 [14].

5.1.2.2 Özgül Isı

Özgül ısı, birim kütledeki maddenin sıcaklığını bir derece değiştirebilmek için gerekli ısı enerjisine denir [14].

5.1.2.3 Yoğunluk

Çeliklerin yoğunluğu, içerisindeki karbon miktarı, alaşım elementleri ve sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir. Birim hacimdeki kütle miktarı olarak ifade edilir [14].

5.1.2.4 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 [14].

5.1.3 Kaynak Bölgesinde Sıcaklık Dağılımı

Kaynak işleminde, kaynak edilecek malzemelere verilecek ısı enerjisi, metalin ergimesini sağlayarak ısı geçiş kanunlarına göre metal içerisinde yayılır. Kaynak işleminde, ısının etkisi altındaki bölgenin özelliklerini önceden tahmin edebilmek ve uygulanan sıcaklığın çelik malzemenin özelliklerine etkilerini inceleyebilmek açısından kaynak esnasında parçalara uygulanan ısı çevrim (ısınma ve soğuma) bilinmelidir. Malzemelere uygulanan ısı 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 ısı çevrimlerinden farklı olarak, kaynak işleminde malzemelere uygulanan ısı çevrimi kontrol altında tutabilmek çok zordur. Kaynak işleminde ısınma hızı ve maksimum sıcaklıkta kalma süresinin neticeye etkisi çok azdır. Isıl çevrim de esas dikkate alınması gereken faktörler erişilen maksimum sıcaklık ile soğuma hızıdır [14].

5.1.4 Soğuma Hızı

Kaynak işlemi ile birleştirilen parçaların, ısının etkisi altındaki bölgede iç yapılarına 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 içyapı ve mekanik özellikler önceden belirlenerek kaliteli ve emniyetli kaynaklı birleştirmeler yapılabilir. Bu sebepten dolayı kaynak işleminde soğuma hızının bilinmesi önemli bir faktördür [14].

5.1.5 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 [14].

Ergime bölgesi, ısının etkisiyle ergiyen ve daha sonra katılaştıran bölgedir. Kaynak metali (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 imkansızdır. 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 [14].

Isının etkisi altındaki bölge, 1450 °C ile 700 °C arasında değişim gösterir. Ulaşılan maksimum sıcaklık ile bağlantılı olarak farklı özelliklerde bölgeler meydana gelebilir [14].

Kaynak ile birleştirme işleminde, ısının etkisi altındaki bölge çok hızlı olarak ısınır ve bununla birlikte parça kalınlığı, ısı kaynağının şiddeti, varsa n tavlama sıcaklığı ve elik malzemenin ısıl özelliklerinin fonksiyonu olarak hızla soğumaktadır. Soğuma hızı, elik malzemenin bileşimine bağlı olarak kritik soğuma hızını aştığında ve özellikle 900 °C zerindeki bir sıcaklığa kadar ısınan bölgelerde sert ve gevrek martenzitik yapı oluşur. Bu sebepten dolayı kaynak işleminde en kritik bölge ısının etkisi altındaki bölge olmaktadır [14].

6. KAYNAKLI İMALAT SONRASI OLUŞAN ARTIK GERİLME VE DİSTORSİYONLARIN NEDENLERİ

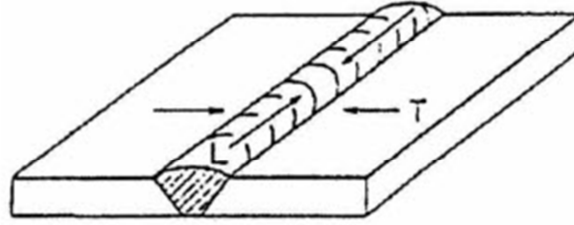
6.1 Kaynak İşleminde Artık Gerilmeler

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, hapsolmuş 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 [14].

6.1.1 Artık Gerilmelerin Oluşum Nedenleri

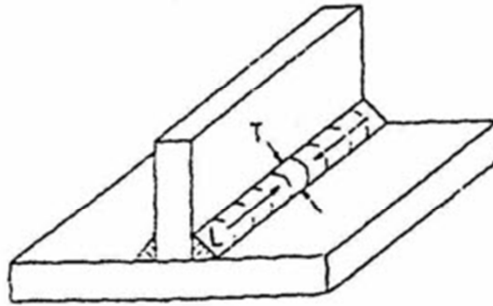
Kaynak işlemi ile lokal olarak ergime sıcaklığına kadar ısıtılan kaynaklı parçalar da, soğuma işlemi parça genelinde ve ısınma işlemi hızına nazaran daha yavaş meydana gelir. Bu sebepten dolayı, soğuma işlemi esnasında kaynaklı parçadaki sıcaklık dağılımı uniform değildir ve bağlantı boyunca yapısal 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 katılaşıp, 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 [14].

Kaynak işlemi esnasında, yeni katılan bölgeler, kaynak dikişinin diğer bölgelerinin büzülmesine karşı koyarlar. Şekil 6.1’ de gösterildiği gibi, ilk kaynak yapılan bölgeler kaynak dikişi doğrultusunda çekiye zorlanırlar. Alın birleştirmeler de, kaynak ağız formundan ya da mevcut pasoların sınırlayıcı etkisinden dolayı kaynak bölgesinin enine hareketi yok denecek kadar azdır. Kaynak dikişindeki büzülmenin neticesinde Şekil 6.1’de görülen enine artık gerilmeler meydana gelecektir [14].



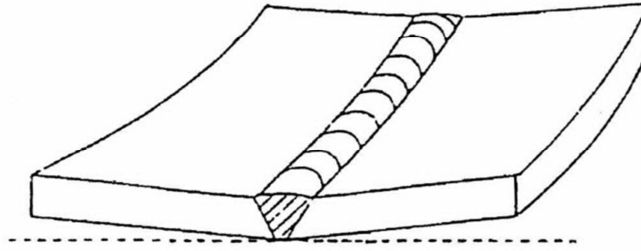
Şekil 6.1: Bir alın dikişindeki enine (T) ve boyuna (L) büzülme gerilmeleri [14].

İç köşe kaynaklarında, kaynak dikişinde meydana gelen gerilmeler Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Büzülme neticesiyle meydana gelen bu gerilmeler, kaynak yüzeyine dik ve paralel çeki gerilmeleridir [14].



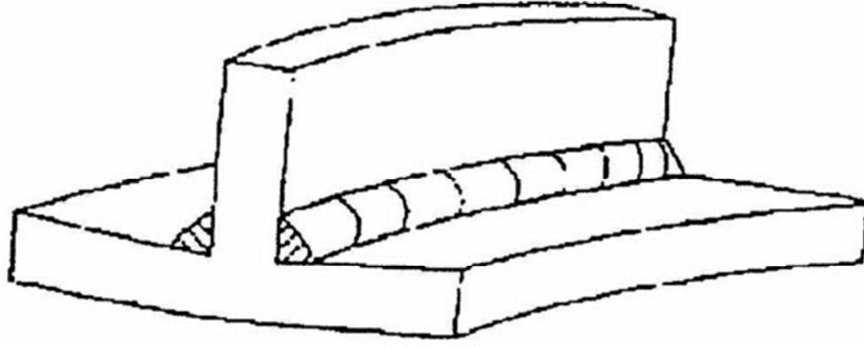
Şekil 6.2: Bir T bağlantısındaki enine ve boylamasına büzülme gerilmeleri [14].

Kaynak işlemi neticesinde kaynaklı parçalarda meydana gelen artık gerilmeler, ya distorsiyona yol açarlar yada parçada erken hasara sebep olurlar. Bir başka ihtimalde 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 çarpımlara ek olarak açısız çarpılma da meydana gelebilir. Açısız çarpılmalar, kaynak dikişi boyunca levhada enine eğilmelere neden olur. Bu etkiler Şekil 6.3'te gösterilmiştir [14].



Şekil 6.3: Bir alın kaynaklı birleştirmede distorsiyon [14].

İç köşe kaynaklarında da, Şekil 6.4'te görülebileceği gibi alın kaynağındakine benzer enine, boyuna büzülme ve açısız distorsiyonlar görülür [14].



Şekil 6.4: Bir T bağlantıdaki distorsiyon [14].

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 ısıtma işlemleriyle düzeltilir [14].

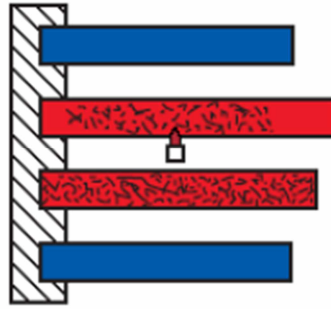
Kaynaklı parçada meydana gelen artık gerilme ve distorsiyonlar, malzemelerin kırılma davranışını etkiler. Düşük değerlerdeki harici gerilmelerde dahi burkulma ve gevrek kırılma meydana gelir. Parçada artık gerilme ve distorsiyonların birlikte olması halinde, burkulma beklenenden çok daha düşük basınç 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. İlave olarak artık gerilmeler yorulma ve korozyon hasarlarını da artırır [14].

Kaynaklı parçalarda, kaynak işlemi neticesinde meydana gelen artık gerilmeleri azaltmak için ısıtma işlemleri 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 [14].

6.2 Isı Etkisinde Oluşan Artık Gerilme ve Distorsiyonlar

Kaynaklı imalat esnasında oluşan artık gerilme ve distorsiyonların en önemli nedeni ulaşılan yüksek sıcaklıklardır. Malzemelerin ısı etkisinde genişmesi ve daha sonra soğuma ile büzülmesi distorsiyon ve artık gerilmeleri doğurur [15].



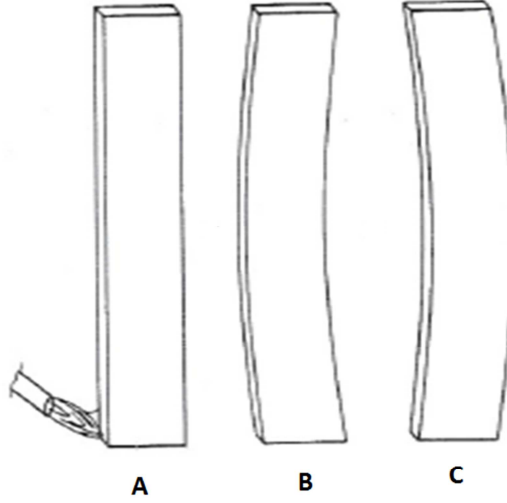
Şekil 6.5: Isıtılan çubuklarda serbest genişleme [15].



Şekil 6.6: Isıtılan çubuklarda sınırlandırılmış genişleme [15].

Şekil 6.5’de ısıtılan çubuklarda serbest genişleme de herhangi bir yönde sınırlandırılmamış bir metal çubuğun ısı etkisi altında serbest genişleme ve büzülmesi gözükmemektedir. Böylesi bir ısıl çevrime maruz kalan bir malzemede artık gerilme

yada distorsiyon oluşmamaktadır. Ancak Şekil 6.6'da ısıtılan çubuklarda sınırlandırılmış genleşme de gözüktüğü üzere aksel doğrultuda sınırlandırılmış bir çubukta ısınma esnasında deformasyonlar sınırlandırılmamış eksenlerde oluşurken ısı tesiri ortamdaki kaldırılıp çubuk soğumaya terkedildiğinde deformasyon üç ekseninde de oluşmakta ve çubuk boyunda bir kısalma gözlemlenmektedir [15].



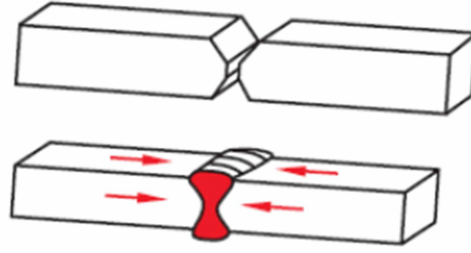
Şekil 6.7: Isı Etkisindeki Plakada Distorsiyon [15].

Şekil 6.7'de ısı etkisindeki plakada distorsiyondaki örnekte 6.4 mm kalınlığında, 50 mm genişliğinde ve 300 mm uzunluğunda metal bir plaka gözükmektedir. Şekil 6.7 A'da gözüktüğü gibi bir ısı kaynağı uzunluk boyunca plakanın üzerinden geçirilmektedir. Bu ısı etkisi nedeniyle plakanın üzerinde diferansiyel bir sıcaklık dağılımı oluşmaktadır. Bu diferansiyel ısınma aynı zamanda diferansiyel bir genleşmeye neden olur. Plakanın üst kenarından aşağıya doğru yaklaşık olarak 13 mm mesafeden itibaren plakadaki sıcaklık ortam sıcaklığına eşittir. Bu sebeple ısı etkisi ile genişleyen üst kısmı oda sıcaklığındaki alt kısım sınırlamaktadır. Bu nedenle Şekil 6.7 B'deki deformasyon oluşmaktadır. Soğuma etkisinde ise büzülme çabışan üst kısmı alt kısım ters yönde sınırlandıracak ve Şekil 6.7 C'deki durum ortaya çıkacaktır [15].

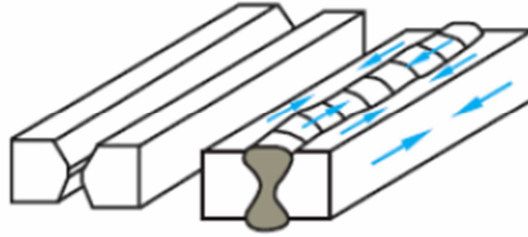
6.2.1 Distorsiyon Tipleri

6.2.1.1 Kaynak Dikiş Tipine Bağlı Olarak Değişen Distorsiyonlar

Kaynaklı imalat ile birleştirilecek olan parçalarda, kaynak ağız hazırlığına ve konstrüksiyonun seçimine bağlı olarak farklı tiplerde distorsiyonlar oluşmaktadır [15].

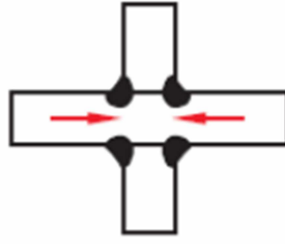


Şekil 6.8: X kaynak ağızında enine büzülme [15].



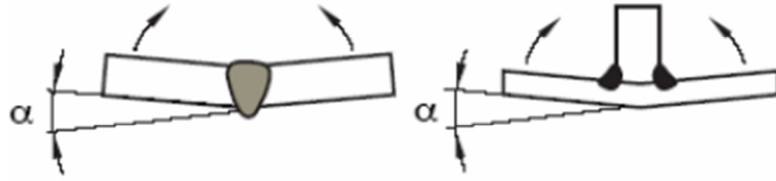
Şekil 6.9: X kaynak ağızında boyuna büzülme [15].

Şekil 6.8’de X kaynak ağızında enine büzülme de görülen X kaynak ağız hazırlığına sahip bir levhada oluşan enine büzülmedir. Şekil 6.9’da X kaynak ağızında boyuna büzülme de ise boyuna bir dikişte, dikiş eksenindeki çekme gerilmeleri neticesin de oluşan boyuna büzülme görülmektedir [15].

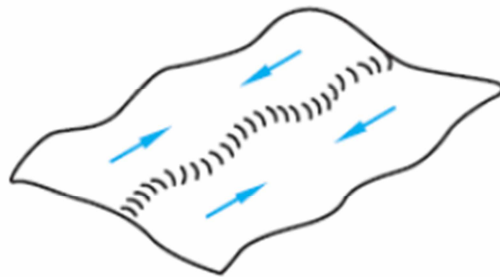


Şekil 6.10: T birleşiminde büzülme [15].

Şekil 6.10'da T birleşiminde büzülme de ise dört adet köşe kaynağı ile birleştirilmiş olan T birleşiminde oluşan büzülme gözükmemektedir. Şekil 6.11' de T ve alın birleşimlerde açılma çarpılma da V ağız hazırlığına sahip bir alın kaynağında ve tek yönlü bir T birleşimin de oluşan açılma distorsiyon görülmektedir [15].



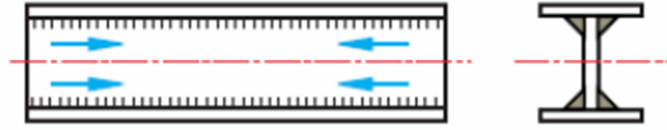
Şekil 6.11: T ve alın birleşimlerde açılma çarpılma [15].



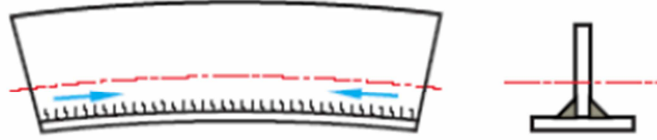
Şekil 6.12: İnce levhalarda boyuna büzülme etkisinde oluşan buruşma [15].

Şekil 6.12'de ince levhalarda boyuna büzülme etkisinde oluşan buruşmada ince bir levha da, boyuna dikişin yarattığı artık gerilmeler nedeniyle oluşan stabilite kayıpları şeklinde buruşma görülmektedir. Yine Şekil 6.13'de I Profilde kaynak

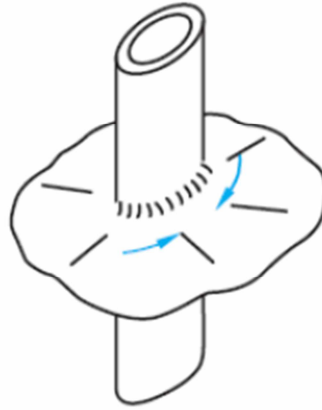
ekseni doğrultusunda oluşan büzülme de, köşe kaynakları ile imal edilmiş bir I profilde oluşan aksenal daralma görülürken, Şekil 6.14'de T profilde açısıl çarpılma da köşe kaynağı kullanılarak imal edilmiş olan bir T profilde oluşan açısıl distorsiyon görülmektedir. Son olarak Şekil 6.15'de boruya kaynaklı plakada oluşan buruşma da ise, bir borunun etrafına kaynatılan levhada kaynak dikişinin yarattığı aksenal çekme nedeniyle oluşan buruşmalar görülmektedir [15].



Şekil 6.13: I profilde kaynak eksenine doğrultusunda oluşan büzülme [15].



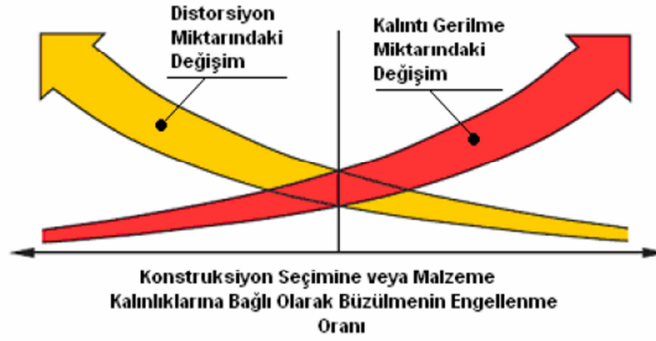
Şekil 6.14: T profilde açısıl çarpılma [15].



Şekil 6.15: Boruya kaynaklı plakada oluşan buruşma [15].

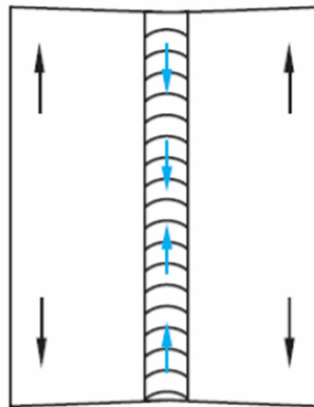
6.2.2 Distorsiyonlar ile Artık Gerilmeler Arasındaki İlişki

Kaynaklı imalat esnasında oluşan artık gerilmeler ile yukarıda örnekleri verilen distorsiyonlar arasında ters bir ilişki mevcuttur. Kaynaklı birleşimin uygulandığı konstrüksiyonun rijitliği arttırıldıkça, kaynak sonrası oluşan büzülme ve distorsiyonlar azalırken, bunların yerini artık gerilmeler almaktadır. Bu durum Şekil 6.16'da distorsiyon ve artık gerilme arasındaki ilişkide görülmektedir [15].



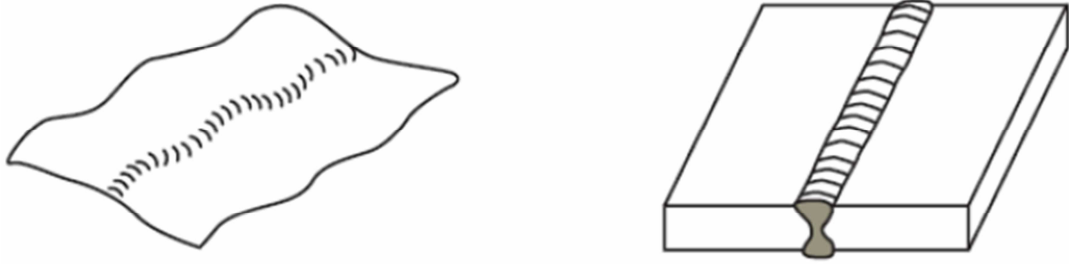
Şekil 6.16: Distorsiyon ve Artık Gerilme Arasındaki ilişki [15].

Bu şekilde, yatay eksen büzülmenin kullanılan kalın malzemeler ya da konstrüksiyon nedeni ile engellenme oranını verir. Eksen üzerinde sağa doğru gidildikçe büzülmenin engellenme oranı artarken kırmızı ok ile ifade edilen artık gerilme miktarında da artış oluşur. Eğer büzülmenin engellenme oranı düşerse, bu durum da sarı ok ile gösterilen distorsiyon miktarında bir artış görülür [15].

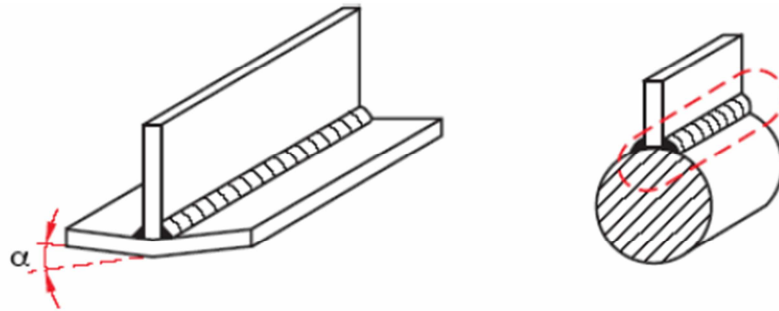


Şekil 6.17: Alın kaynağında kaynak eksenindeki artık gerilmeler [15].

Şekil 6.17’de alın kaynağında kaynak eksenindeki artık gerilmelerde tipik bir alın kaynağı sonrası oluşan artık gerilmeler görülmektedir. Bu artık gerilmeler Şekil 6.18’de ince ve kalın levhalarda artık gerilmenin karşılaştırılmasında görüldüğü üzere ince malzemelerde buruşmaya varabilecek büyüklükte deformasyonlar oluşmasına neden olabilecekken, kalın malzemelerde düşük distorsiyona ve yüksek mertebeler de artık gerilmelere neden olmaktadır [15].



Şekil 6.18: İnce ve kalın levhalarda artık gerilmenin karşılaştırılması [15].



Şekil 6.19: T birleşiminde rijitliğin açısız çarpılmaya etkisi [15].

Şekil 6.19’da T birleşiminde rijitliğin açısız çarpılmaya etkisinde ise bir T birleşimin neden olduğu açısız distorsiyon gözükürken yine aynı şeklin sağında kalın malzeme kullanımı nedeniyle bir önceki konstrüksiyona göre daha yüksek miktarda artık gerilmenin oluştuğu ancak deformasyonun görülmediği bir birleşim görülmektedir [15].

6.2.3 Paso Sayısının Distorsiyona Olan Etkileri

Çok sayıda paso ile kaynatılan kalın levhalarda, her bir paso sonrası oluşacak olan distorsiyon miktarı kümülatif olarak birikeceğinden distorsiyon miktarı artar. Çok pasolu imalatlarda distorsiyon miktarının azaltılabilmesi için ilk paso, daha sonraki pasoların yaratacağı büzülme kuvvetlerine karşı bir direnç oluşturacağından, daha geniş tutulmalıdır. Ayrıca sonraki pasonun önceki pasoların yarattığı artık gerilmeleri gidermesi için bir miktar ısı girdisi distorsiyonu azaltacaktır. Son olarak ağız genişliğini azaltmak, U biçiminde tasarlanmış kaynak ağız hazırlığı, ya da X dikiş tipini kullanmak da distorsiyonu azaltır [15].

6.3 Büzülme ve Artık Gerilmelerin Engellenmesi

Kaynaklı imalat nedeni ile oluşan distorsiyonun engellenmesi için, hem tasarım hem de imalat esnasında bir takım önlemlerin uygulanması gerekmektedir. Büzülmeler nedeni ile oluşan distorsiyonların engellenmesi için ;

1. Gereksiz kaynak dikiş kalınlığından kaçınılmalıdır. Kaynaktaki dikiş miktarı arttıkça oluşacak büzülme miktarı da artar. Kaynaklı imalatta gereken dikiş miktarının doğru tespiti ve gereksiz malzeme yığılmasından kaçınılması distorsiyonu azalttığı gibi zamandan ve paradan da tasarruf sağlar. Bunun sağlanabilmesi için köşe kaynaklarının dikiş profilinin düz yada konveks bir biçimde oluşturulması, alın kaynaklarında ise dikiş hazırlığının uygun yapılması gerekmektedir. Yine alın kaynaklarında, kalın plakalar kaynatılıyor ise x dikiş hazırlığı, pozisyon sınırlaması yok ise, distorsiyon miktarını oldukça azaltır. Eğer ulaşım zorluğu söz konusu ise v yerine u ağız hazırlığı tercih edilmelidir [15].

2. Kaynak dikişinden beklenen mekanik dayanım için yeterli olan minimum dikiş uzunluğunu uygulamak gereklidir. Aralıklar ile kaynak, uzun ve sürekli dikişler ile karşılaştırıldığında, çok daha az büzülme ve artık gerilmeye neden olur [15].

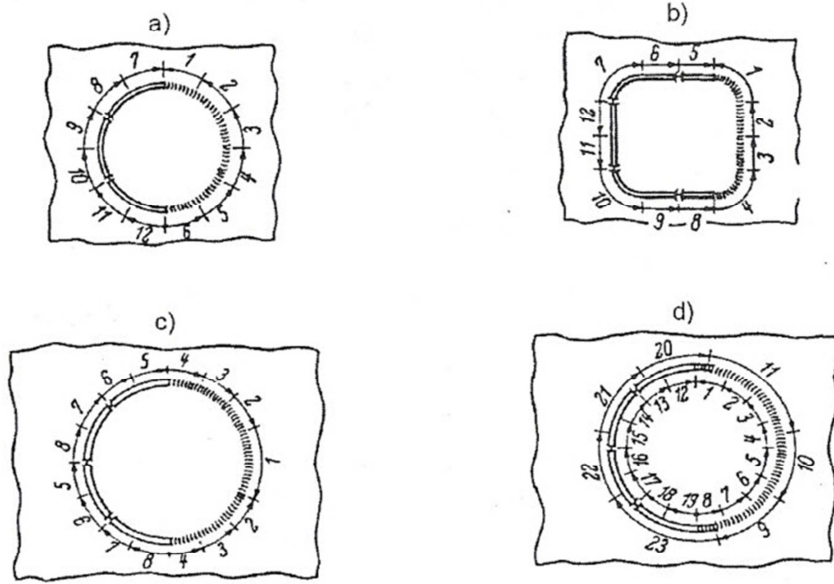
3. İnce elektrodlar ile atılmış fazla sayıda paso yerine, daha kalın elektrodlar ile atılmış daha az sayıda paso ile imal edilmiş bir kaynaklı bağlantıda, her bir pasonun

oluşturacağı distorsiyon kümülatif olarak birikeceğinden, daha az miktarda distorsiyona neden olacaktır [15].

4. Konstrüksiyonun tasarlanmasında kaynaklı bağlantıların nötral eksene yakın konumlandırılması gerekmektedir. Bu sayede büzölmeleri yaratan çekme kuvvetlerinin moment kolları azaltılmış olur [15].

5. Kaynak ağızlarının nötral eksene göre simetrik olarak tasarlanması sayesinde bir dikişin yaratacağı etki diğeri bir dikişin etkisi ile nötralize edilebilir [15].

6. Kaynak esnasında geri adım tekniğı kullanılırsa distorsiyon miktarı azalır. Şekil 6.20'de geri adım tekniğı örneklerinde uygulama metodu farklı kalınlıklar da ve paso sayılarındaki örnek dikişler için gösterilmektedir [15].



Şekil 6.20: Geri adım teknikleri [15].

7. Kaynak sonrası oluşacak distorsiyonun tersi yönde ön deformasyon uygulanabilir [15].

8. Kompleks geometrilere sahip ürünlerin imalatı esnasında, uygun kaynak sırası belirlenerek distorsiyon miktarları azaltılabilir [15].

7. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ YARDIMIYLA PROSES ÖNCESİ SİMÜLASYONLAR VE SONUÇLARININ GERÇEK PROSES İLE KARŞILAŞTIRILMASI

7.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Metodolojisi

Temel olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi, fiziksel çevrenin sonlu parçacıklara ayrılması, daha sonra bu sonlu parçacıkların belirli etkenler altındaki davranışlarından yola çıkılarak ilgili sistemde aranan değişimlerin belirlenmesinden ibarettir. Bu metodun kullanılması esnasında ilk olarak belirlenmesi gereken modelden istenen sonuçların gerçeğe yakınlığıdır. Bu yakınsama derecesi yükseldikçe çözüme ulaşmak için harcanan zaman artar [15].

Bu anlamda sırası ile ;

- 1.Modelin kurulması
- 2.Geometrisi belirlenen sistemin istenen sonuca uygun olarak elemanlara ayrılması
- 3.Sınır koşullarının ve dış yüklerin sisteme tanımlanması
- 4.Çözüm

adımları ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözüme ulaşılır [15].

7.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi

Sonlu Elemanlar Yönteminin geçmişi yüz yıl kadar öncesine dayansa da, metodun efektif olarak kullanılması için elli yıllık bir sürenin geçmesi gerekmiştir. Sürekli ortamların küçük parçacıklara, ilgili çalışmada elastik çubuklara, indirgenmesine dair ilk çalışmalar 1906 yılında yapılmış olsa da bugün bildiğimiz anlamı ile sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1943 yılında ortaya konulmuştur.

Yöntemin efektif kullanımının önündeki en önemli engel, metodolojinin ürettiği denklem sisteminin efektif bir biçimde çözülememesidir. Önceleri uzay ve uçak sanayinde kullanılan bilgisayar programlarının 1980'lerden itibaren kişisel bilgisayarlarda da kullanılabilmesi ile Sonlu Elemanlar Yöntemi mühendislik problemlerinin çözümünde belirli bir şekilde etkinlik kazanmıştır [15].

Proses öncesi yapılan simülasyonlar bize daha prosesi uygulamadan, nelerle karşılaşabileceğimizi ve nasıl sonuçlar elde edeceğimiz hakkında öngörüler vermektedir. Bu bilgileri daha prosesi uygulamadan elde edeceğimiz için simülasyon yaparak ciddi bir zaman, maliyet kazancımız olacaktır. Bununla birlikte gerçek prosesteki hata oranımızın minimum düzeyde olması sağlanacak ve hedeflenen kalite seviyesine ulaşmak için avantaj sağlamış olacağız.

Yapılan bu çalışma ile, kaynak öncesi sonlu elemanlar yöntemi prensiplerine göre çalışan paket bir program yardımıyla yapılacak simülasyon ile elde edilecek sonuçların gerçek proses sonucunda karşılaşacağımız sonuçlarla tutarlılığının ne kadar uyumlu sonuçlanacağı analiz edilecektir. Yaptığımız simülasyon sonucunda elde edilen sonuçlar, gerçek proseste elde edeceğimiz sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Sonuçlar değerlendirilerek simülasyonun bize sağladığı avantajlar göz önüne çıkacaktır.

7.3 Test Parçaları

Bu çalışmada farklı kalınlıklarda hazırlanmış test parçalarının köşe kaynağı prosesi simülasyonu yapılacaktır. Malzeme olarak S355 J2 G3 seçilmiştir. Deney yapılacak parça kalınlıkları ise 3 mm, 5 mm ve 8 mm'dir. Farklı kalınlıklar kullanılmasının nedeni malzeme kalınlığına göre değişen sonuçlarında irdelenmesidir. Parça boyutları ise 200 x 300 mm olarak belirlenmiştir.

7.4 Proses Parametreleri ve Yöntemi

Yapılan çalışmada test parçalarının PB pozisyonunda köşe kaynağı simülasyonu yapılacaktır. Kaynak yöntemi olarak endüstride yoğun olarak kullanılan MAG (Metal Active Gas) kaynak yöntemi seçilmiştir. Köşe kaynağı olarak tek taraftan dikiş çekilmiştir. Torç açısı iki malzemeye 45° olacak şekilde ayarlanmış, kaynak açısı ise 90° olarak belirlenmiştir. Kaynak gazı olarak % 82 Ar ve % 18 CO₂ içeren karışım gazı kullanacağız.

3 mm kalınlığındaki parçalar için kaynak parametreleri ;

Voltaj : 22 V
Amper : 170 A
Kaynak Hızı : 45 cm/min
Parçalar Arası Boşluk : 0.5 mm
Pozisyon : PA

5 mm kalınlığındaki parçalar için kaynak parametreleri ;

Voltaj : 22 V
Amper : 170 A
Kaynak Hızı : 45 cm/min
Parçalar Arası Boşluk : 1 mm
Pozisyon : PA

8 mm kalınlığındaki parçalar için kaynak parametreleri ;

Voltaj : 30 V
Amper : 200 A
Kaynak Hızı : 28 cm/min
Parçalar Arası Boşluk : 1 mm
Pozisyon : PA

Bu parametreler kullanılarak yapılacak simülasyon sonuçları, gerçek olarak yapılacak kaynak prosesi sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

7.5 Simülasyon Sonucunda Elde Edilecek Sonuçlar

Yapılan simülasyon sonucunda bize programın sağlayacağı birçok veri elde edilebilir. Bu simülasyon sonrasında kontrol edeceğimiz sonuçlar ise bir kaynak prosesi açısından en önemli sonuçlar olan, kesitlerdeki nüfuziyet derinliği, kaynak sonrası meydana gelen ölçüsel değişimler (çarpılmalar), sıcaklık dağılımı, iç yapı değişimleri ve kalıntı gerilmelerin incelenmesi olacaktır.

Buradan elde ettiğimiz sonuçlardan nüfuziyet derinliği, kaynak sonrası meydana gelen ölçüsel değişimler gerçek yapılan kaynak prosesinde de ölçülerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

7.6 Kullanılacak Program ve Ekipmanlar

Yapılacak çalışmada kaynak simülasyonu için sonlu elemanlar yöntemini kullanan programlardan kaynak simülasyonları için özel olarak yazılmış Sysweld programı kullanılacaktır.

Gerçek yapılan proses sonucunda ise kaynaklanan deney parçasındaki çarpılmaları görmek amacıyla parça boyutsal olarak ölçülecektir. Parçalar kaynak sonrasında optik tarama sistemi ile taranacak ve tarama datası üç boyutlu modeli ile örtüştürülecektir. Böylece kaynak işlemi sonucunda ortaya çıkan çarpılmaların ne kadar olduğu görülmüş olacaktır. Bu ölçüsel kontrolü yapmak için GOM (Geometric Optical Measuring System) optik ölçüm sistemi kullanılacaktır.

Kaynak sonrası prosesten kaynaklanan çarpılmaların sağlıklı ölçülebilmesi için kaynak öncesi paçaların düzlemselliği ve dik köşe kaynağı yapılacağı için açının kaynaktan önce belli bir tolerans aralığı içinde (0.02° tolerans ile) 90° derece olması gerekmektedir. Kaynak prosesi öncesi bunların kontrolünde yapılmalıdır. Bu amaçla

Leica koordinat ölçüm cihazı kullanılacaktır. Böylece kaynak öncesinde parçaların düzlemsellik ölçümlerinin ve dik köşe kaynağı açısının kontrolü yapılmış olacaktır. Gerçek yapılan proses sonucunda elde ettiğimiz sonuçların simülasyon sonuçları ile olabildiğince yakın çıkması için bu hazırlıklar çok önemlidir.

7.6.1 Sysweld Programı, Genel Özellikleri ve Sağladıkları

Sysweld programı ESI Grup tarafından kaynak simülasyonları üzerine geliştirilmiş bir sonlu elemanlar yazılım programıdır. ESI Group, kaynak ve ısı işlem süreçlerinin yazılım ortamında modellenerek, ileri tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine yönelik, tüm dünyada önde gelen ana sanayi firmaları tarafından kullanılan SYSWELD yazılımının geliştiricisi olan firmadır. ESI Group, 1973 yılında kurulmuş, dünyanın 30 ayrı noktasında doğrudan ofisi bulunan, 1000'in üzerinde doktoralı personeli istihdam eden, farklı disiplinlere yönelik olarak simülasyon ve analiz yazılımları geliştiren bir yazılım şirkettir. ESI Group yazılım çözümleri, savunma sanayi başta olmak üzere, otomotiv ana sanayi, deniz sistemleri ve havacılık sektörüne yönelik bir çok ana sanayi firmasının, ileri mühendislik teknik alt yapısını oluşturmaktadır.

Sysweld programının Türkiye distribütörü ise Onatus firmasıdır. ONATUS Öngörü Teknolojileri, 2004 yılında kurulmuş bir mühendislik firmasıdır. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) konusunda, yazılım satışı, yazılım teknik desteği, proje, eğitim ve danışmanlık hizmetleri vermektedir. Müşteri beklenti ve ihtiyaçlarının çözülmesine odaklı ekibi ile 2004 yılından günümüze kadar olan süreçte bir çok başarılı projeye imza atmış olan ONATUS, alanında uzman kadrosu ile, Ankara ve İstanbul ofislerinde çalışmalarını yürütmektedir.

WELDING SIMULATION SOLUTION kaynak kalitesi ve deformasyona bağlı tüm simülasyonların gerçekleştirilebildiği yazılım paketidir. WELDING SIMULATION SOLUTION ile aşağıdaki simülasyonların tamamı gerçekleştirilebilmektedir;

- Kalıntı gerilme hesaplamaları
- Mikro yapı değişimleri

- Akma gerilmesi hesaplamaları
- Faz dönüşümleri
- Termal dağılımlar
- Karbürleme, indüksiyonla sertleştirme, su verme gibi ısı işlem prosesleri
- TIG, MAG, Lazer gibi tüm kaynak metodları ile gerçekleştirilen prosesler
- Deformasyon (çarpılma hesaplamaları)
- Tüm metalik malzemelerin deformasyon ve kalıntı gerilme simülasyonları
- Deformasyon (çarpılma hesaplamaları)
- WPS (Kaynak Planı) oluşturulması
- Klemp noktalarının deformasyona olan etkilerinin belirlenmesi
- Kaynak sıra ve yönünün deformasyona olan etkisi

konularında gerekli olan bilgi edinilmektedir.

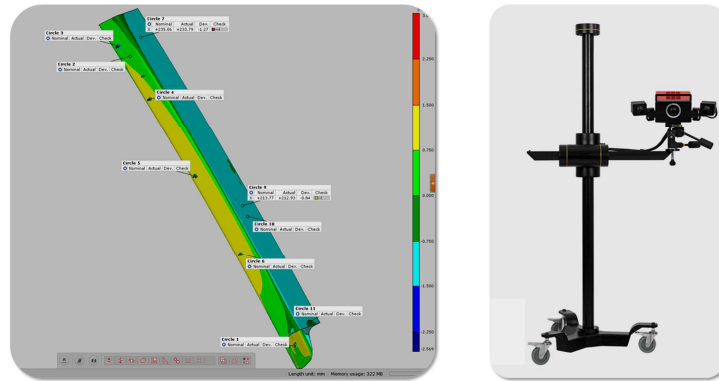
Bu simülasyon çalışmalarıyla birlikte elde edilen kazanımlar;

- Oluşturulan FEA modellerinin, kaynak montajlı proseslere entegrasyonu
- Parça bazında FEA modellerinin, kaynak montaj prosesleri için oluşturulması
- Kaynak montajlı proseslerde kullanılan malzemelerin karakterizasyonu için gerekli test metodolojisi
- Simülasyon sonuçlarının, test verileri ile validasyonu
- Kalıntı gerilmelerin, numerik simülasyonla tahmini ve azaltılması
- Deformasyonların, numerik simülasyonla tahmini ve azaltılması
- Faz dönüşümlerinin, kaynak prosesi esnasında kontrol altında tutularak hedef sertlik ve mikro yapı değerlerinin elde edilmesi
- Kalıntı gerilmeler nedeniyle malzeme yorulma ve çatlak oluşumu davranışlarının numerik simülasyonla tahmini
- Farklı kaynak planlarının, deformasyon ve kalıntı gerilme özelliklerinin karşılaştırılması
- Kaynak proseslerinde parçayı sabitlemek amacıyla kullanılan klempelerin açılma ve kapanma zamanlarının, deformasyon temelinde simülasyon ortamında incelenmesi

- Klemplerin, deformasyon hedefleri doğrultusunda konumlarının optimizasyonu
- Kaynak sonrası, soğutma şartlarının mikro yapı dönüşümleri açısından incelenmesi ve hedef değerler doğrultusunda kontrol altında tutulması
- Kaynak prosesi esnasında, sıcaklık dağılımının simülasyon ortamında kontrol altında tutulması
- Farklı malzemelerin kaynaklanabilirlik özelliklerinin, simülasyon ortamında karşılaştırılması
- Kaynak nüfuziyet derinliğinin simülasyon ortamında kontrol altında tutulması ile, kaynak montajlı parçalara, kaynak prosesi sonrasında uygulanması muhtemel statik yüklemeler altında, parça dayanımı hakkında öngörülerde bulunulması

7.6.2 GOM Optik Tarama Cihazı

GOM (Geometric optical measuring system) ile üretimi tamamlanmış bir ürünün üç boyutlu model ile olan boyutsal farkını kontrol edebiliriz. Üç boyutlu modele göre imalat sırasında meydana gelen ölçüsel kaçıklıklar toleranslar arasında mı değil mi bunu görebiliriz. Taranan parçanın toz bulutu şeklinde bir datası oluşur ve bu data çeşitli referanslar ve yöntemler kullanılarak üç boyutlu model ile karşılaştırılır ve farklar gözlemlenir. Böylece nerede ne kadar kaçıklık var onu görebiliriz. Şekil 7.1’de cihaz ve bir tarama datası örneğini görebilirsiniz. Kullandığı yazılım ise yine cihazın kendisine özgü ATOS yazılımıdır.



Şekil 7.1: GOM cihazı ve örnek tarama datası.

7.6.3 LEICA koordinat Ölçüm Sistemi

Leica cihazı ise üç boyutlu koordinat sorgulama işlemleri için kullanılan bir ölçüm sistemidir. Bu cihazla oluşturulan herhangi bir referans noktasına göre ölçmek istediğimiz her noktanın konumunu üç eksende sorgulayabiliriz. Yüzeylerin düzlemselliği, açılar, ara mesafeler ve bunun gibi tüm boyutsal sorgulamalar bu cihazla ölçülebilmektedir.

Lazer ölçüm mantığı ile çalışan bir sistemdir. Lazerin katettiği mesafeye göre ölçüm hassasiyeti değişmektedir. Kullandığı yazılım ise PCDIMS yazılımıdır.



Şekil 7.2: Leica ölçüm sistemi.

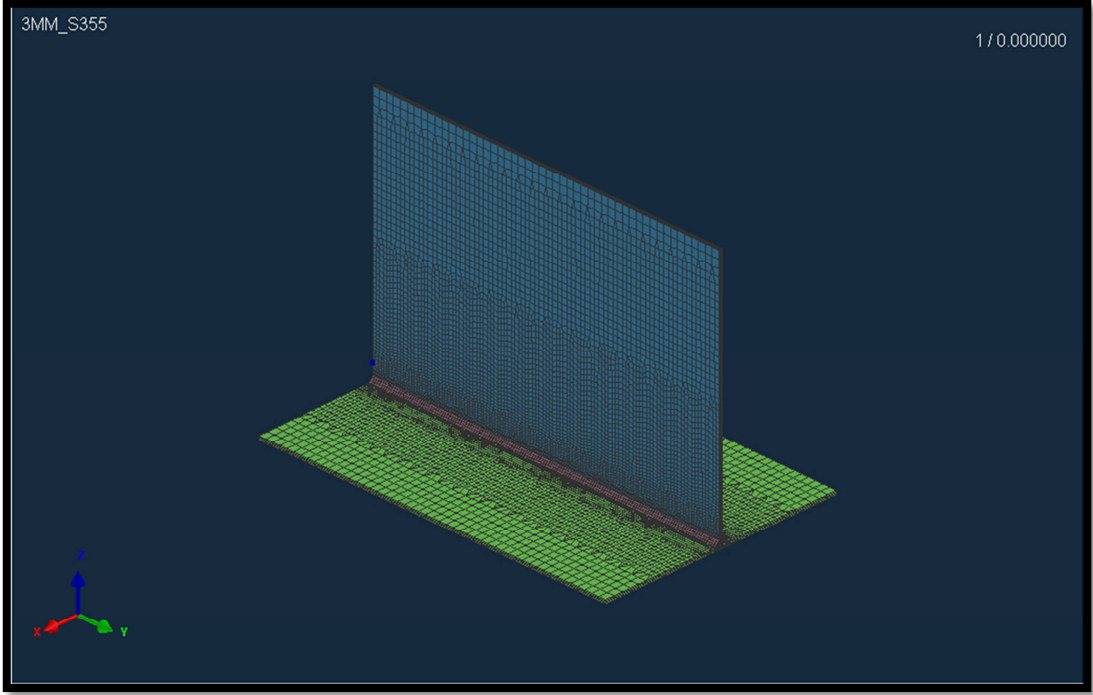
8. SYSWELD İLE SİMÜLASYON VE SONUÇLARI

Test parçalarına ait kaynak yönteminde kullanacağımız kaynak parametrelerini önceden belirtmiştik. Burada farklı kalınlıklarda parçalardan oluşan üç adet prosesin simülasyonu yapılacaktır. Test parçalarına öncelikle sonlu elemanlar mantığına göre Mesh atılacaktır. Daha sonra ise kaynak parametreleri programa girilerek Solver çalıştırılacaktır. Çözüm işlemi tamamlandıktan sonra bir kaynak prosesi esnasında ve sonrasında karşılaşılabileceğimiz durum ve sonuçların analizi yapılacaktır.

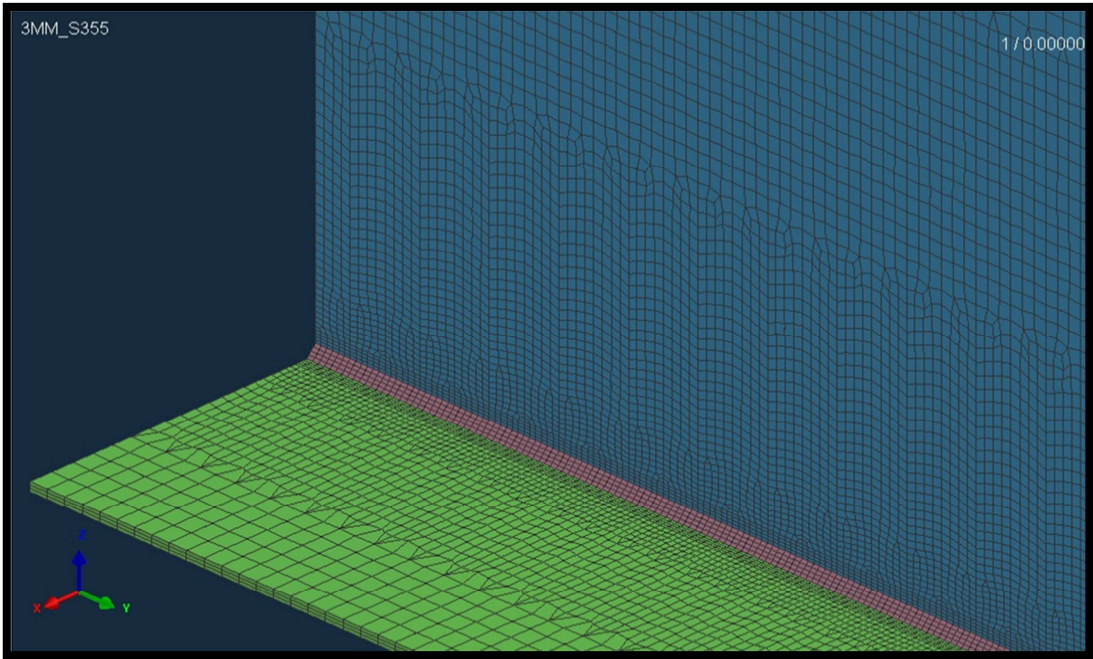
8.1 Mesh Atma

Mesh atma işlemi sırasında seçilen mesh elemanı ve atılan mesh hassasiyeti sonuçların gerçek değerlere daha yakın çıkması ve sonuçların güvenilirliği açısından çok önemlidir. Kaynaklı imalat parçaları üzerinde simülasyon yaparken kaynak prosesi içersin de olan bölgelerin (kaynak ve haz bölgesi gibi) diğer bölgelere göre daha ince Mesh atılması gerekmektedir.

Bu simülasyon da Mesh elemanı olarak program içerisinde bulunan Quadratic mesh elemanını seçtik. Kaynak bölgesi ve haz bölgesinde mesh aralığını 1 mm olarak belirledik. Mesh aralığı ana malzeme üzerine gittikçe büyümektedir. En uzak noktada bu aralık 7 mm' ye kadar çıkarılmıştır. Güvenilir sonuçlar almak için değişimin yoğun ve detaylı olduğu bölgelerde Mesh aralıkları küçük tutulmalıdır. Yoksa bütün değişim detayları görülemez. Hesaplama yapılırken her bir mesh düğümü için hesap yapılmaktadır. Ayrıntı istenen bölgelerde ne kadar fazla mesh düğümü varsa o kadar iyi sonuçlar elde edilir. Fazla değişim görülmeyen bölgelerde mesh genişletilebilir. Çünkü burada ayrıntılı hesaba gerek yoktur. Böylece hesaplama süresi azaltılabilmektedir. Şekil 8.1 ve 8.2' de mesh atılmış simülasyon parçalarına ait görüntüleri görebiliriz.



Şekil 8.1: Genel olarak mesh hali.

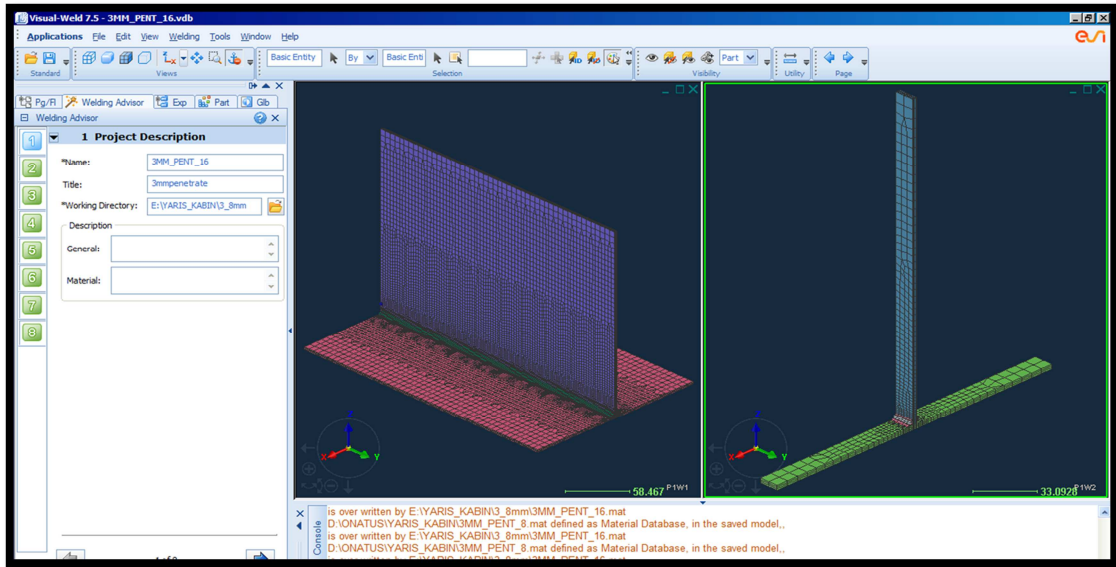


Şekil 8.2: Atılan mesh sıklığının değişimi.

8.2 Sysweld Parametre Girişi

8.2.1 Projenin Tanımlanması

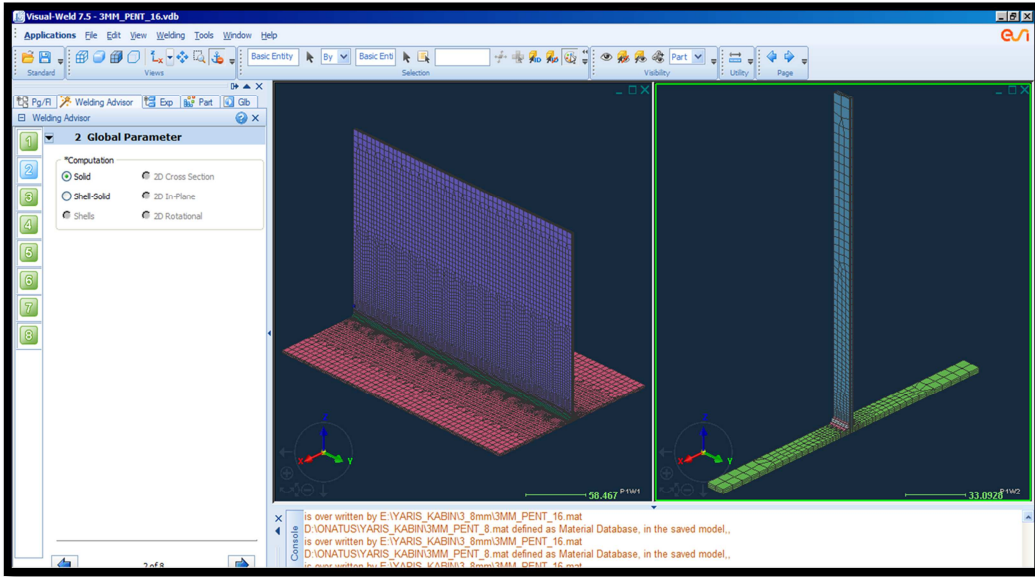
Mesh işlemleri tamamlandıktan sonra yapacağımız ilk işlem projeye ait genel bilgilerin girilmesi olacaktır. Projeye ait isim ve başlık bilgilerini girdikten sonra, çalışmanın yapılacağı ve verilerin toplanacağı çalışma klasörünü de belirliyoruz. Bu kısım yaptığımız birinci adımdır. Buradaki gerekli bilgileri verdikten sonra ikinci adıma geçebiliriz. Şekil 8.3' te bu adımdaki pencereyi görebiliriz.



Şekil 8.3: Projenin tanımlanması.

8.2.2 Data Türünün Belirlenmesi

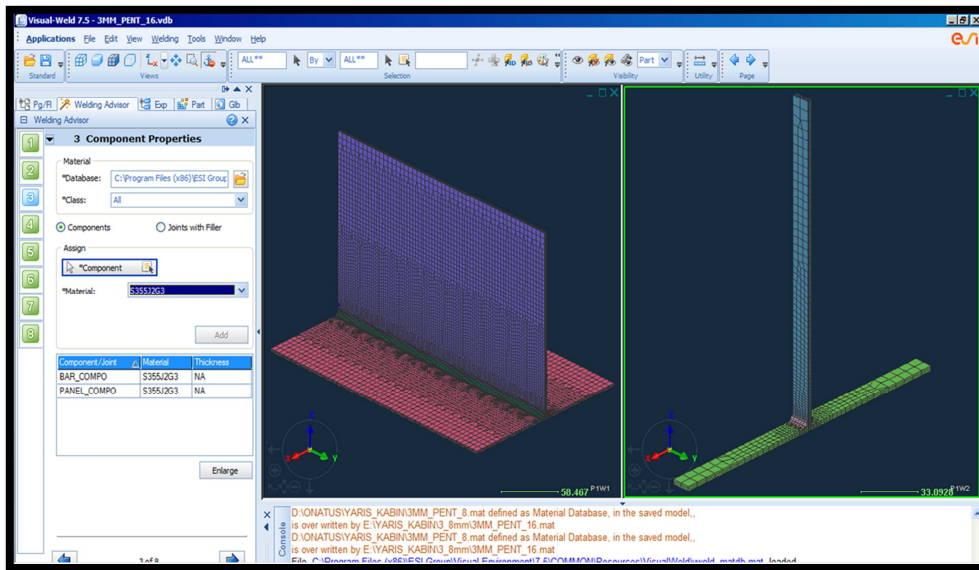
Bu kısımda kullanacağımız modelin format olarak çeşidini beliryoruz. Biz katı model ile çalışacağımız için Solid seçeneğini seçiyoruz ve bu adımdaki işlemlerimizi tamamlıyoruz. Şekil 8.4' te bu parametrenin girildiği alanı görebiliriz.



Şekil 8.4: Model türünün seçilmesi.

8.2.3 Kaynaklanacak Malzemeler ve İlave Tel Türünün Belirlenmesi

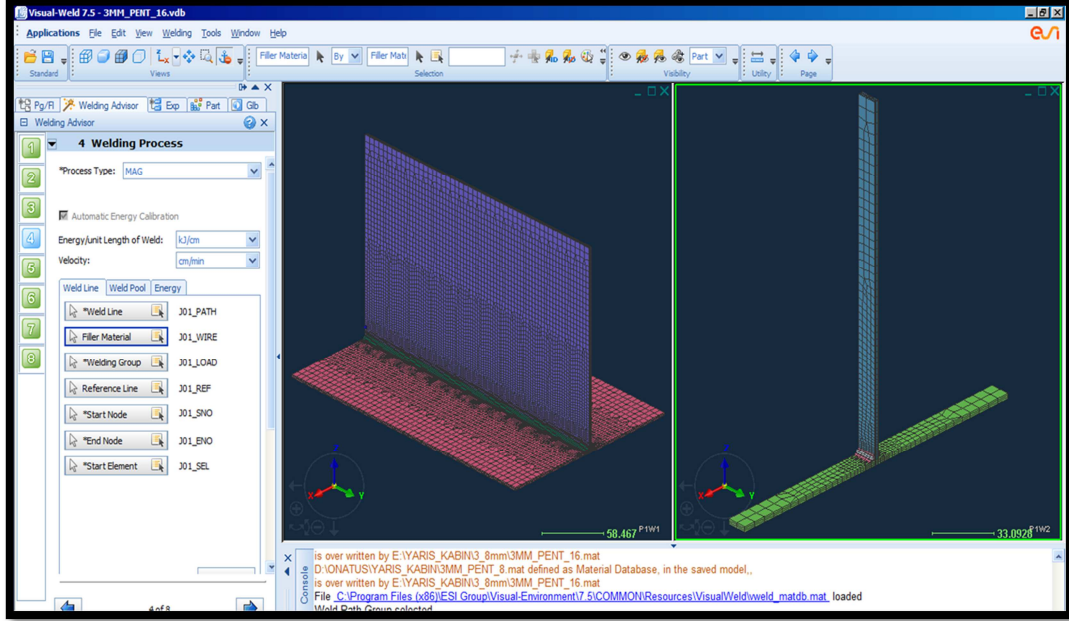
Bu kısımda kaynaklanacak iki parçanın malzeme cinsini ve kullanacağımız kaynak telinin türünü girerek bu adımdaki işlemimizi Şekil 8.5’ te olduğu gibi tamamlıyoruz.



Şekil 8.5: Malzeme cinsinin ve ilave telin belirlenmesi.

8.2.4 Kaynak Prosesinin Türü ve Kaynak Yolunun Belirlenmesi

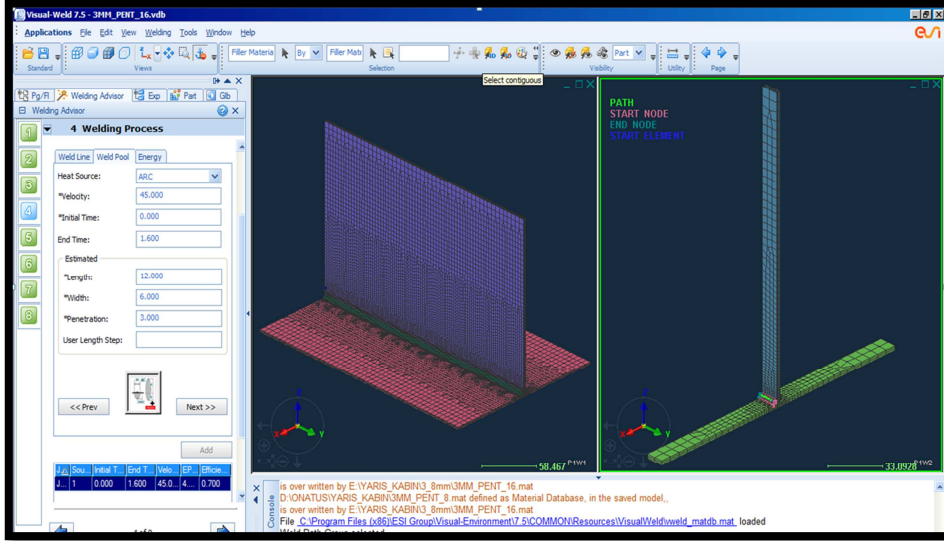
Bu kısımda kaynak prosesinin türünü seçiyoruz. Bizim kullanacağımız proses Metal aktif gaz kaynağı olacaktır. Bu seçimi yaptıktan sonra kaynak yolunu belirleyerek Şekil 8.6' daki gibi bu adımda tamamlıyoruz.



Şekil 8.6: Kaynak yolunun belirlenmesi.

8.2.5 Kaynak Hızı, Kaynak Zamanı ve Kaynak Havuzu Bilgileri

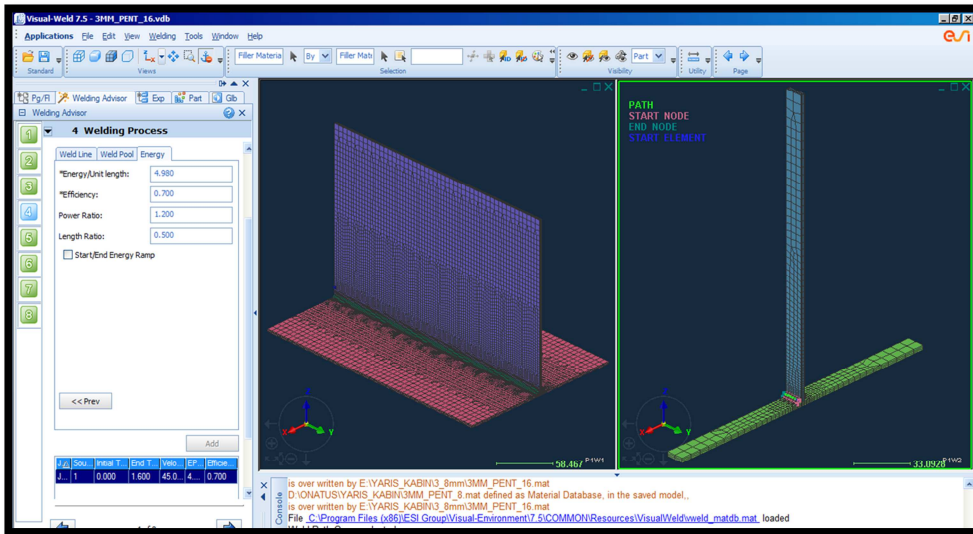
Bu kısımda ilk olarak kaynak hızını belirliyoruz. Daha sonra ise kaynağa başlangıç ve bitiş zamanlarını giriyoruz. Kaynak havuzu ve boyutlatı hakkında ise tahmini bilgiler veriyoruz. Bu kısımda kaynak tekniğine hakim olmanın çok önemli olduğu açığa çıkmaktadır. Şekil 8.7' de görüldüğü gibi bu değerleri girerek bu basamaktaki işlemide sonuçlandırarak devam ediyoruz.



Şekil 8.7: Kaynak banyosu özellikleri.

8.2.6 Isı Girdisi Miktarı

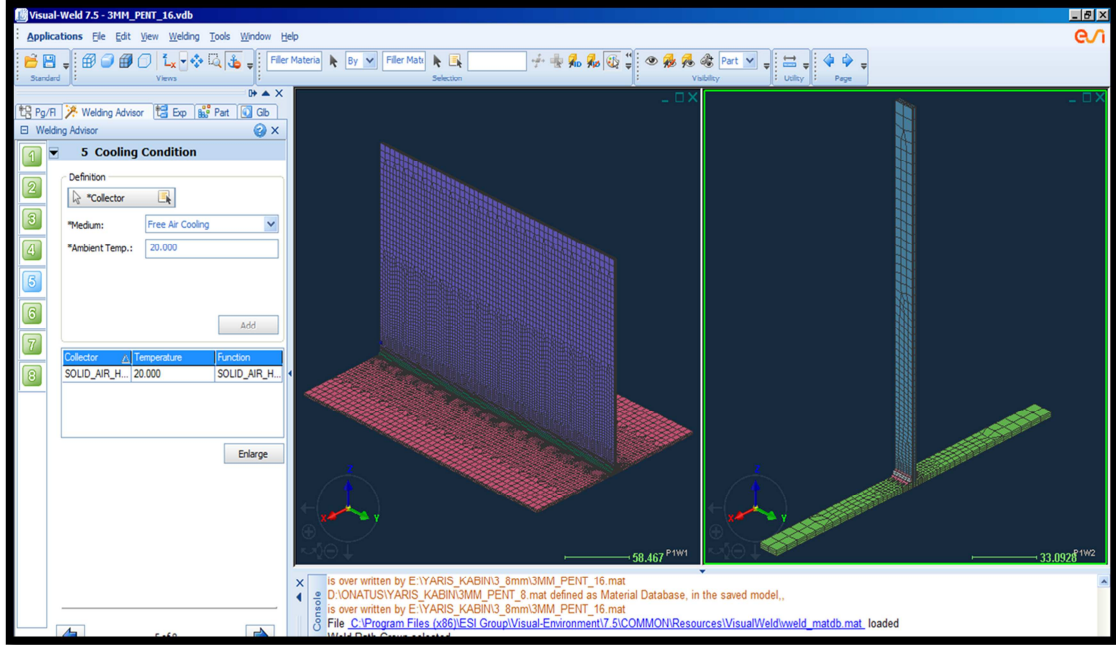
Bu kısımda proses esnasında malzemeye girecek ısı miktarı programa girilmektedir. Bilindiği gibi ısı miktarı kaynak prosesinde kaynak hızı, akım değeri ve voltaja göre değişen bir değerdir. Proses açısından da oldukça kritik bir parametredir. Şekil 8.8' deki gibi bu parametreyi de girerek bu adımda tamamlıyoruz.



Şekil 8.8: Enerji girişi.

8.2.7 Kaynak Prosesi Sonrası Soğuma Koşulları

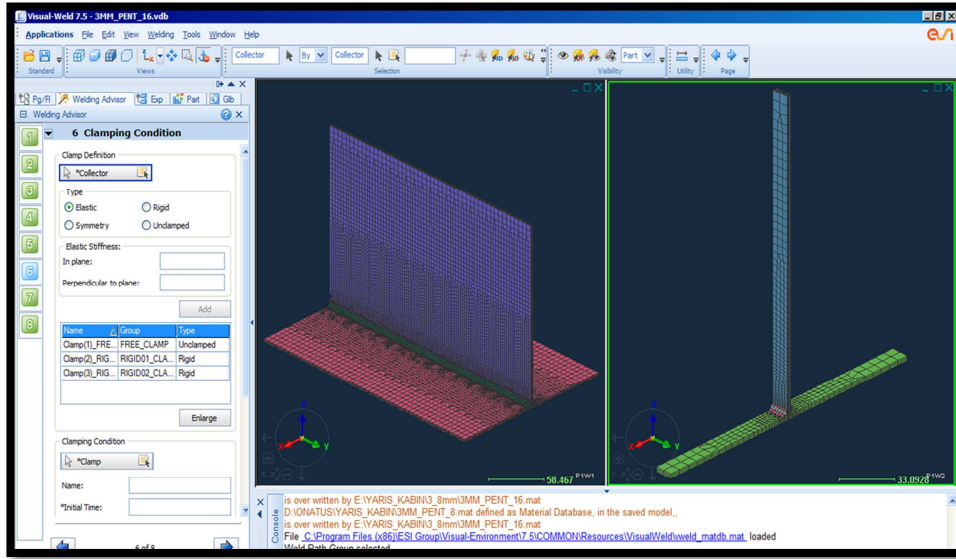
Bu kısımda kaynak sonrası soğuma koşulları girilmektedir. Proseste kaynak oda sıcaklığı koşullarında yapılacağı için soğumada bu ortamda olacaktır. Şekil 8.9' daki bölümde bu bilgileri girerek bu adımda tamamlanır.



Şekil 8.9: Soğuma koşulları.

8.2.8 Parçaların Sabitleme Noktaları

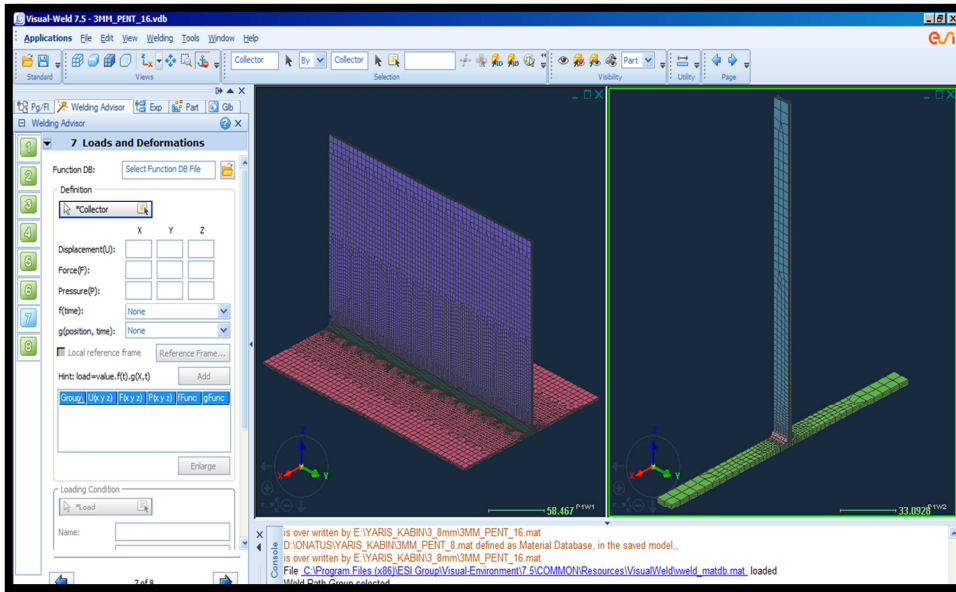
Parçalar kaynak prosesine başlamadan önce belli noktalardan sabitlenmektedir. Altteki parça dört köşesinden sabitlenerek rijit hale getirilmiştir. Üstteki parçayı ise üst taraftaki iki köşesinden sabitleyerek, bu parçanın kaynak sonrasındaki x ve y eksenleri yönündeki hareketleri incelenecektir. Şekil 8.10' da görüldüğü gibi bu adımda tamamlayarak devam edilecektir.



Şekil 8.10: Sabitleme koşulları.

8.2.9 Yükler ve Deformasyonlar

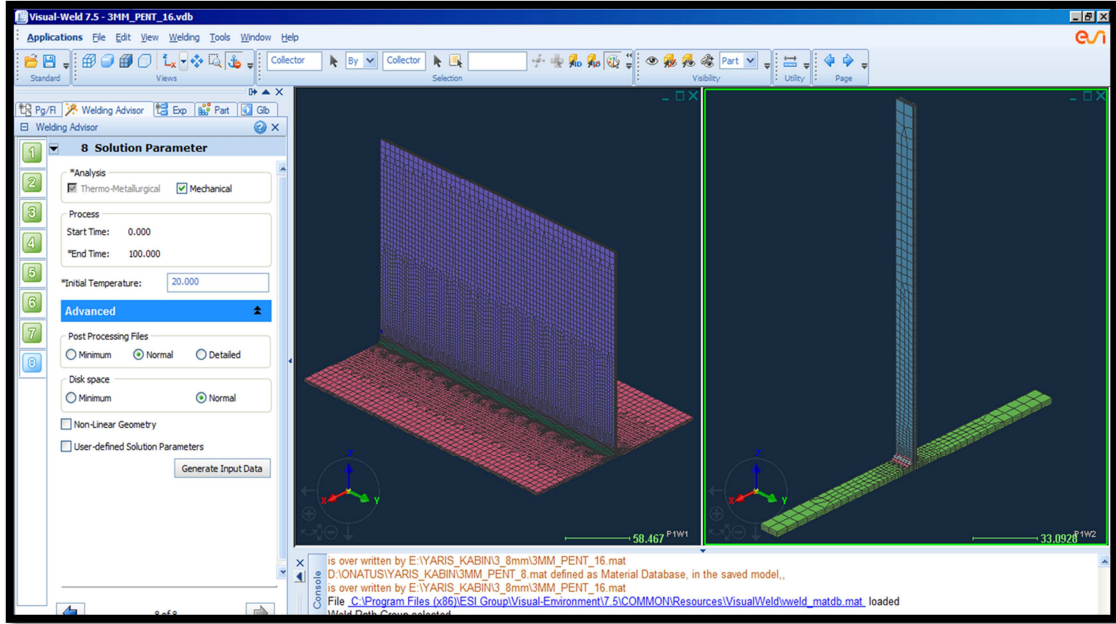
Kaynak esnasında veya sonrasında parçamıza herhangi bir yük uygulanmamaktadır. Bu nedenle bu kısımda herhangi bir veri girişi yapmadan Şekil 8.11'deki gibi devam ediyoruz.



Şekil 8.11: Yükleme ve deformasyonlar.

8.2.10 Çözüm Parametreleri

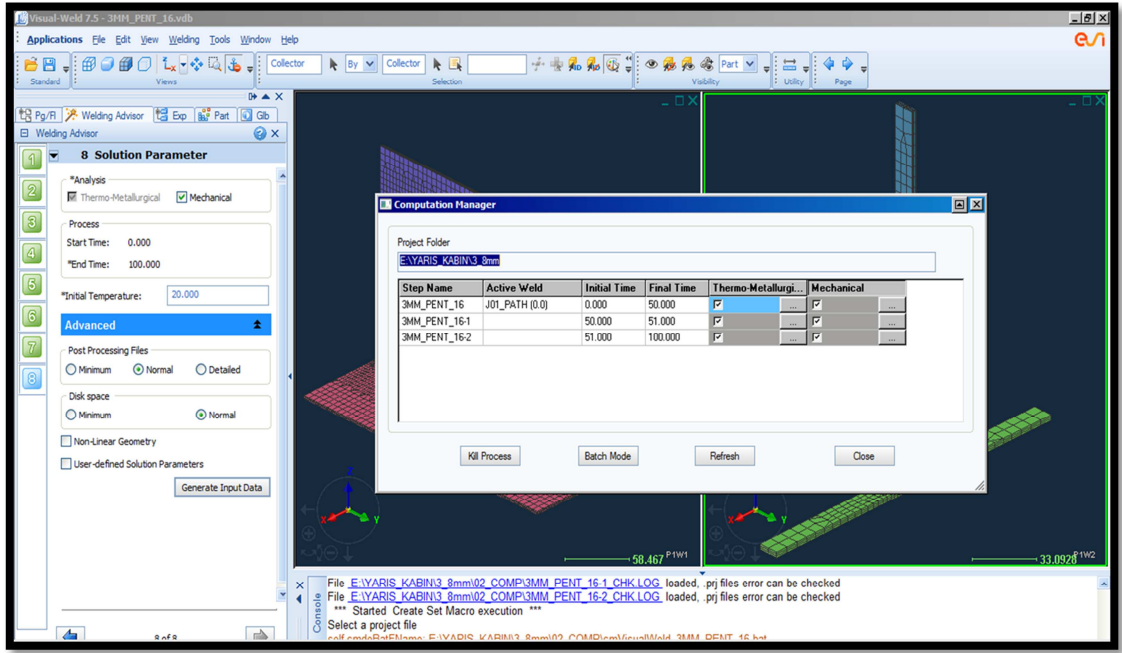
Bu kısımda istediğimiz çözüm türlerini ve çözümle ilgili diğer bazı parametreler girilmektedir.. Mekanik çözüm istediğimizi belirtiyoruz ve aynı zamanda ön ısıtma sıcaklığında vererek çözüm datasını oluşturuyoruz. Şekil 8.12' deki gibi son adımda tamamlarak çözüm kısmına geçiliyor.



Şekil 8.12: Çözüm parametreleri.

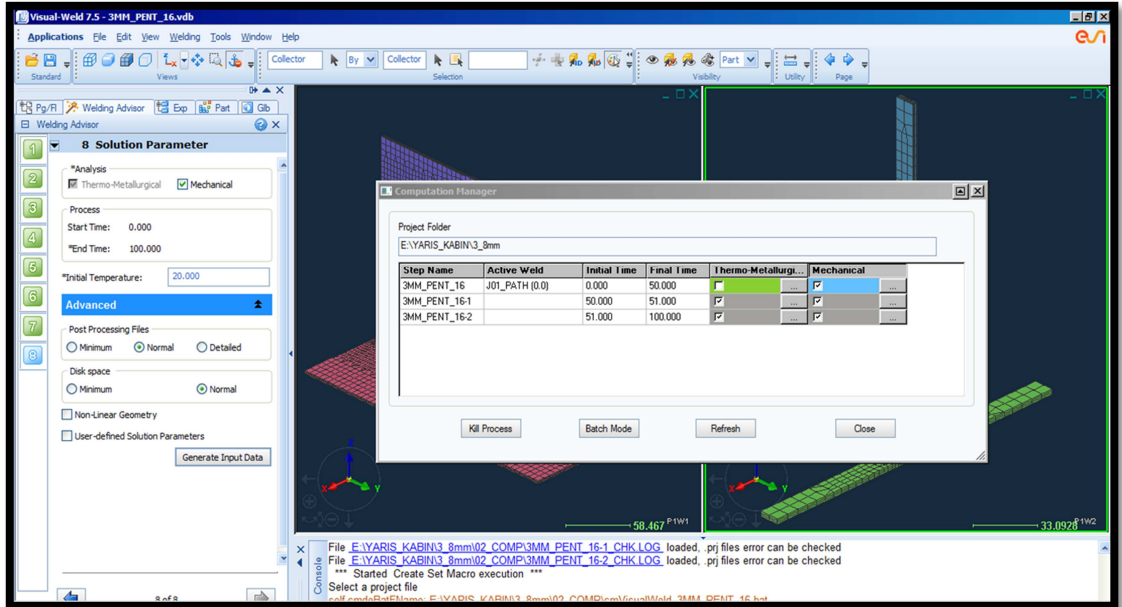
8.2.11 Çözüm İşleminin Başlatılması ve Sonlanması

Parametreleri girme işlemini tamamladıktan sonra artık çözüm kısmına geçiyoruz. Yaptığımız prosesin karmaşıklığına göre bu işlemin tamamlanma süresi değişebilmektedir. Termal çözümün yanında mekanik çözüm sonuçlarında alacağımız için çözüm işlemi bir miktar daha uzayacaktır. Çözüm aşamaları Şekil 8.12 'te görülmektedir. Bu bilgiler eşliğinde çözücüye çalıştırmaya başlıyoruz.



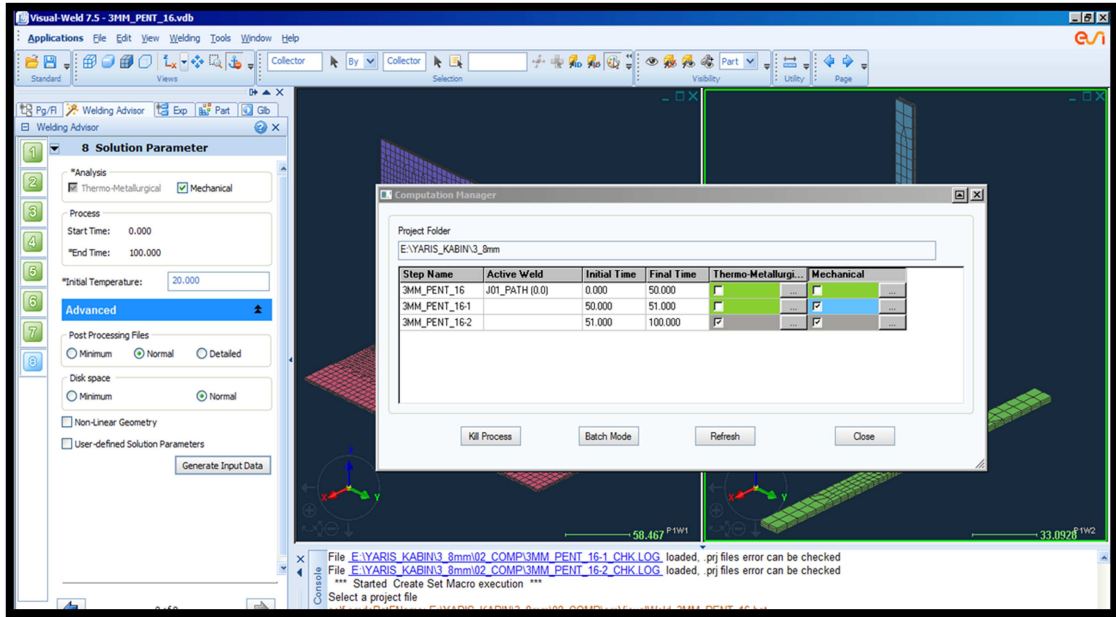
Şekil 8.13: Çözüm işleminin çalışması.

Çözüm işlemi başladıktan bir süre sonra ile termal çözümün sonuçlandığı Şekil 8.14' teki gibi bu sütunun yeşil olmasıyla görülmektedir. Daha sonra bu bölümdeki mekanik çözüm işlemine geçilmektedir.



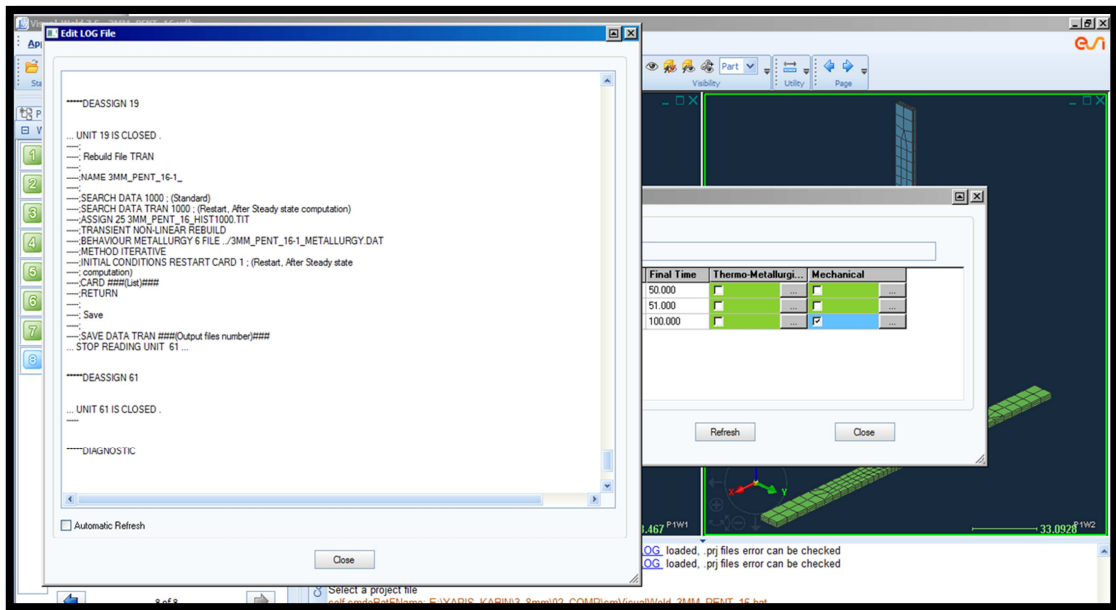
Şekil 8.14: İlk termal çözümün tamamlanma anı.

Çözüm işlemi bu şekilde sonlanana kadar adım adım devam etmektedir. Şekil 8.15' te görüldüğü gibi ikinci termal çözümde sırasıyla sonuçlanmıştır.



Şekil 8.15: İkinci termal çözümün tamamlanma anı.

Çözüm tamamlandıktan sonra içerisinde çözüme ait bilgilerin bulunduğu Şekil 8.16' daki Log dosyasını inceleyebiliriz.

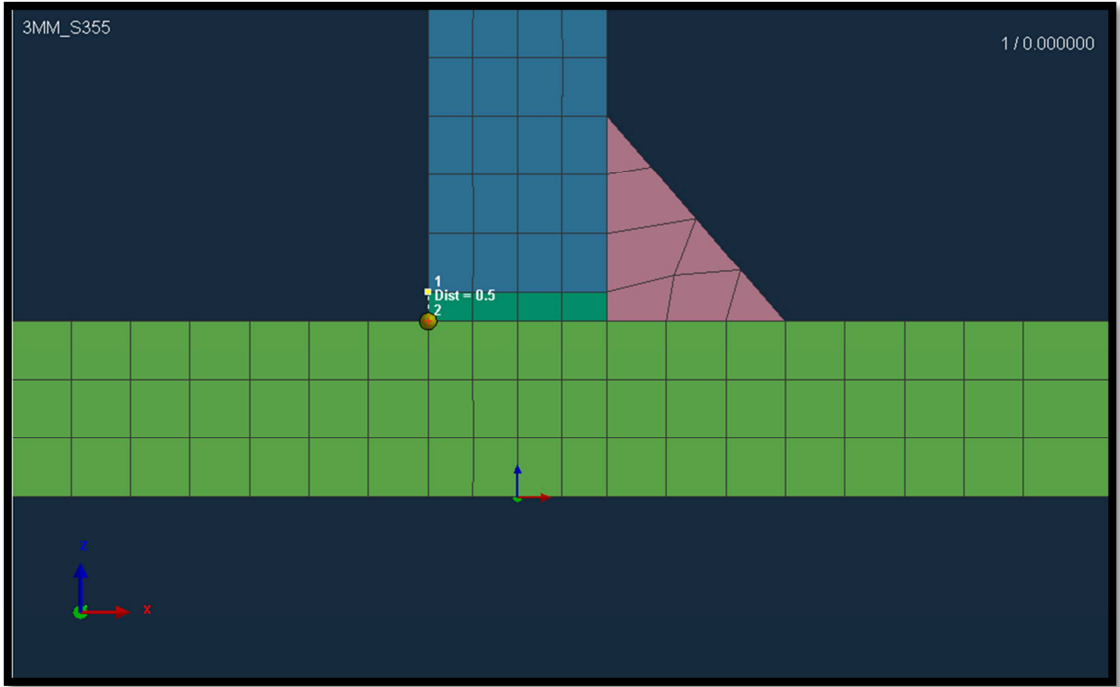


Şekil 8.16: Log dosyasının incelenmesi.

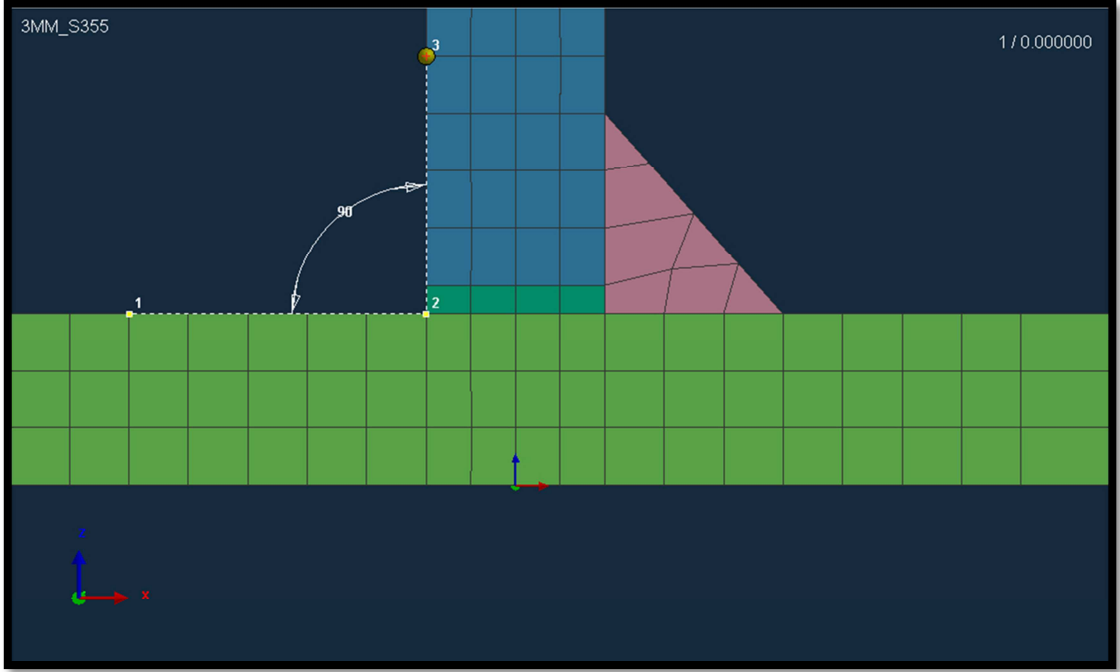
8.3 Simülasyon Sonuçları ve Yorumlar

8.3.1 3 mm'lik Parçanın Simülasyon Sonuçları

Kaynak öncesi köşe kaynağı yapılacak 3 mm kalınlık değerine sahip test parçalarının Şekil 8.17' de kaynak prosesi öncesinde ara mesafesi gözükmektedir. Parçalar arası ara mesafe 0.5 mm olarak bırakılmıştır. Şekil 8.18' de ise parçalar arası açının 90° olduğu görülmektedir. Parçalar bu konumda iken verilen parametreler dahilinde kaynak prosesi simülasyon ortamında gerçekleştirilecektir.



Şekil 8.17: Kaynak öncesi ara boşluk.



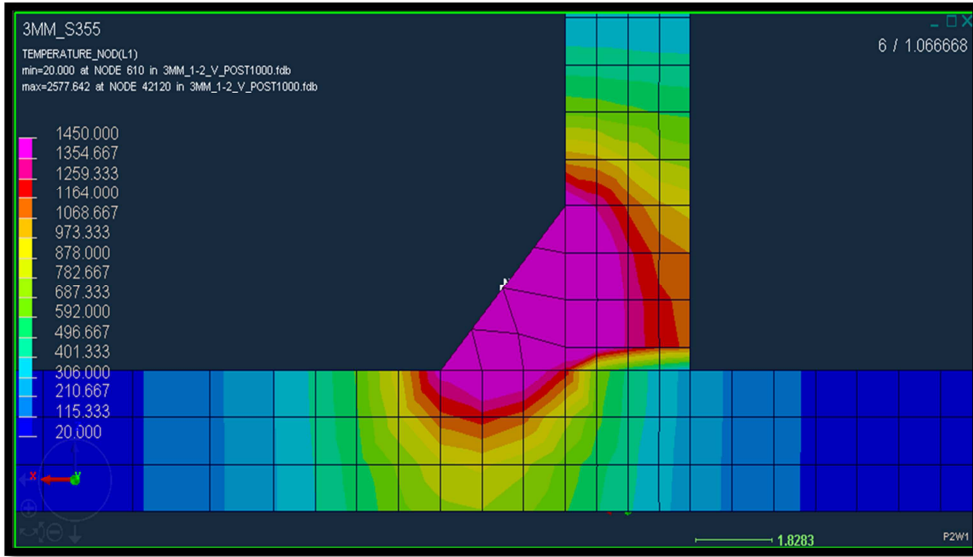
Şekil 8.18: Kaynak öncesi ara diklik açısı.

8.3.1.1 Kesitlerdeki Sıcaklık Dağılımı ve Nüfuziyet Miktarı

Simülasyon sonucunda elde edilen önemli bir veri, kaynak işlemi sonrasında parçalarda elde ettiğimiz sıcaklık dağılımı ve buna bağlı olan nüfuziyet derinlikleridir. Burada 3 mm kalınlığa sahip parçaların başlangıç, orta kısım ve bitiş kısımlarından kesitler alarak bu değerleri inceledik.

Başlangıç kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;

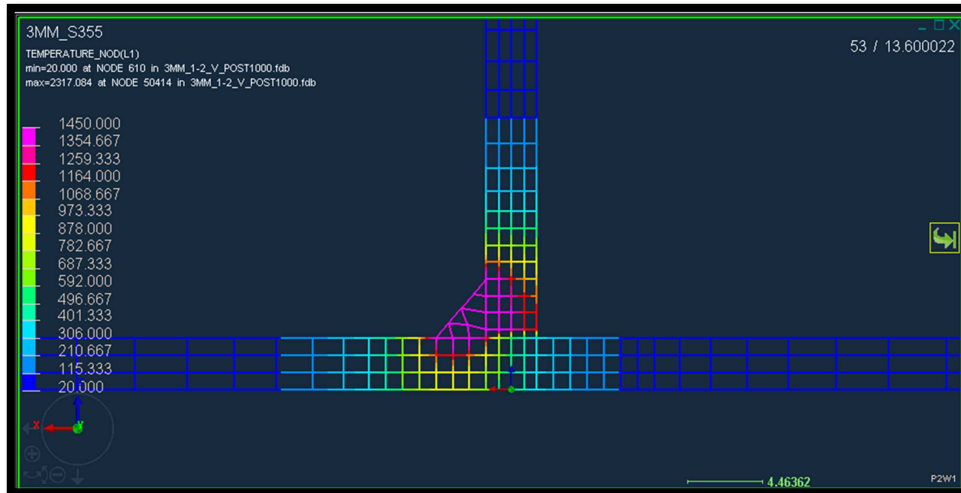
Şekil 8.19’da mor renkli kısımlar parçalarda olan nüfuziyet profilini göstermektedir. Bu kesit görüntüsüne baktığımızda üstteki parçanın nüfuziyetinin alttaki parçaya nazaran biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Üst parçanın nüfuziyet miktarı ortalama 1.5 mm civarındadır. Alt parçanın nüfuziyet miktarı ise ortalama 0.9 mm civarındadır. Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımı da sıcaklık miktarına göre renklendirilmiş şekilde görülmektedir.



Şekil 8.19: 3 mm'lik parçanın başlangıç kısmına ait nüfuziyet kesiti.

100. mm' de ki elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak ;

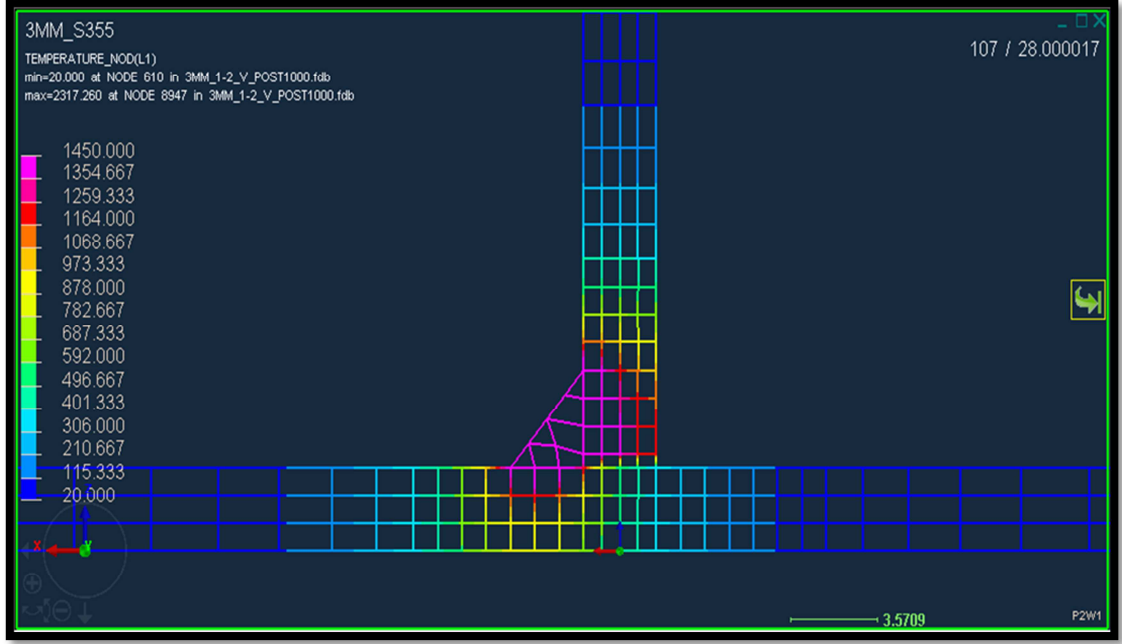
Şekil 8.20' deki kesit görüntüsüne baktığımızda nüfuziyet miktarının parçanın bu kısma kadar ısınması nedeniyle çok az da olsa arttığı görülmektedir. Üst parçanın nüfuziyet miktarının ortalama 1.6 mm civarında, alt parçanın nüfuziyetinin ise ortalama 1 mm civarında olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ısı etkisi altında kalan alanda bir miktar genişlemiştir.



Şekil 8.20: 3 mm'lik parçanın orta kısmına ait nüfuziyet kesiti.

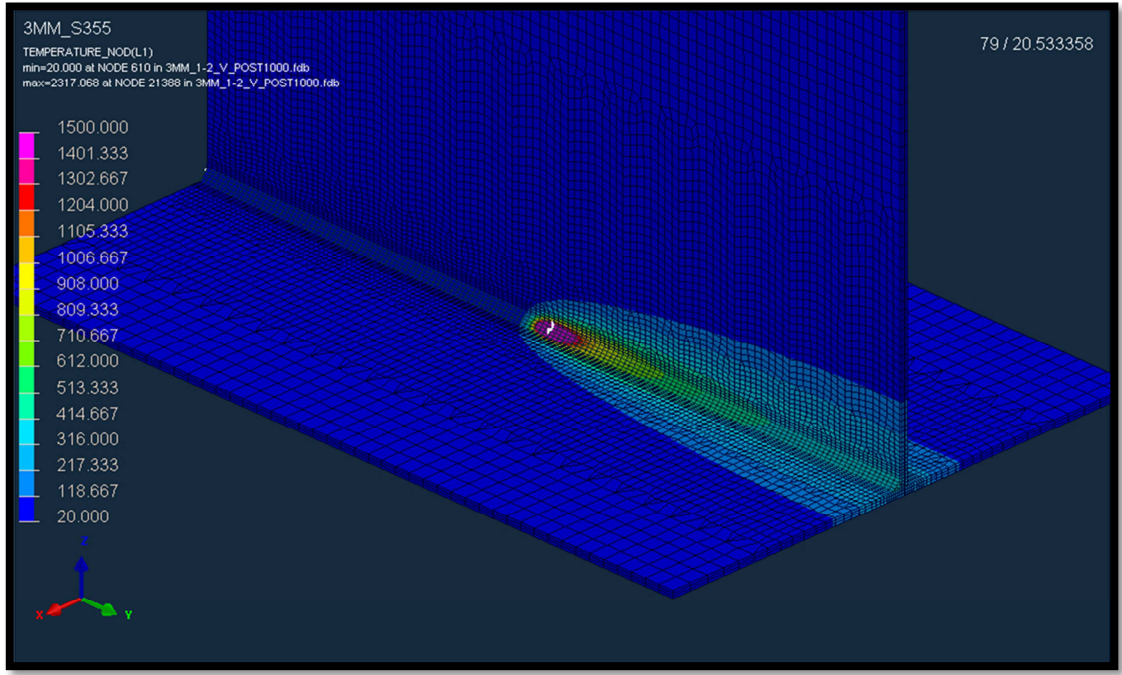
Bitiş kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;

Şekil 8.21' deki kesit görüntüsüne bakarsak nüfuziyet kesitinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Burada yine üst parçada ortalama 1.6 – 1.7 mm' lik bir nüfuziyet derinliği, alttaki parçada ise ortalama 1 mm' lik bir nüfuziyet derinliği olduğu görülmektedir.



Şekil 8.21: 3 mm' lik parçanın bitiş kısmına ait nüfuziyet kesiti.

Kaynak prosesinin başlamasıyla beraber malzemeye yüksek bir hızda ısı girdisi gerçekleşmektedir. Malzeme sıcaklığı ani bir şekilde yüksek değerlere çıkmaktadır. Şekil 8.22' de malzemeye verilen ısı girdisi sonucu sıcaklık dağılımının herhangi bir andaki dağılım şekli görülmektedir.

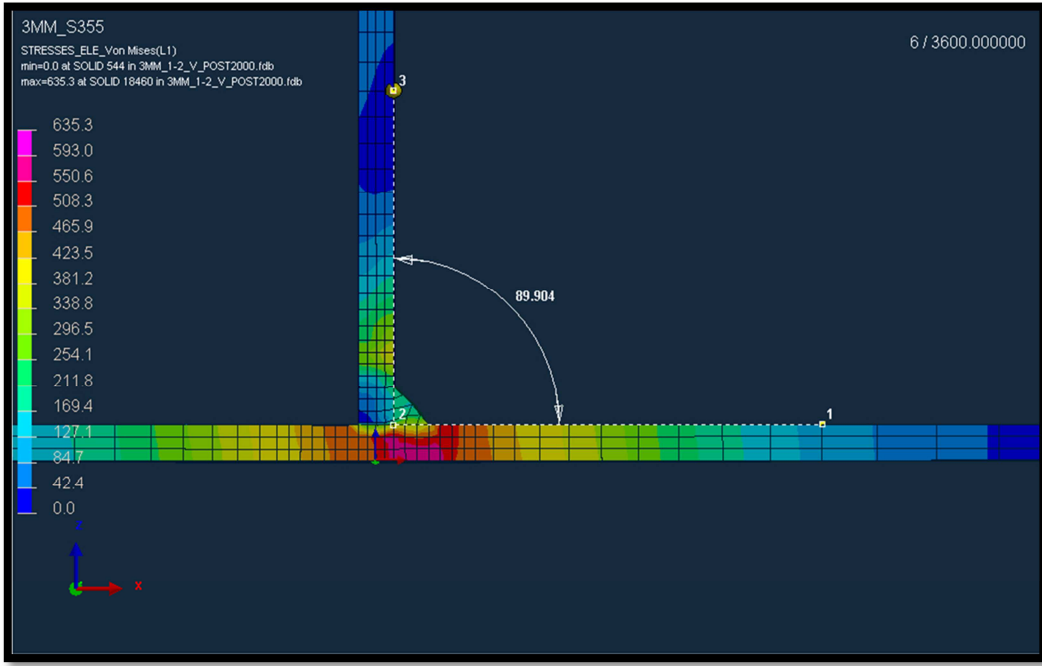


Şekil 8.22: Kaynak esnasında sıcaklık dağılımı anlık görüntü.

8.3.1.2 Ölçüsel Değişimler

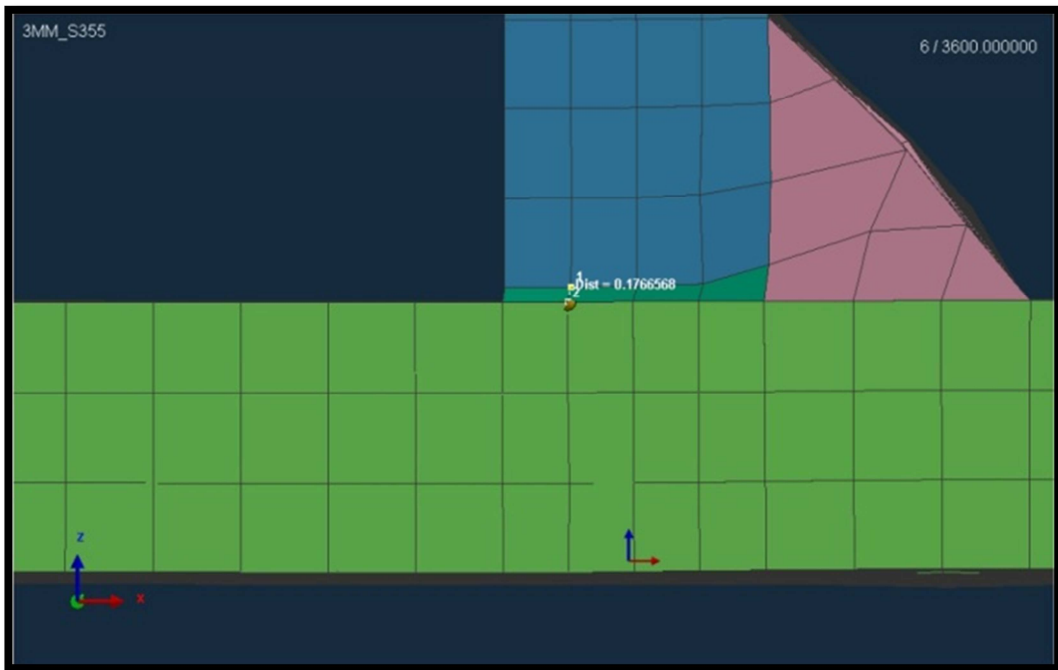
Kaynak prosesi sırasında meydana gelen hızlı bir sıcaklık artışı ve sonrasında değişik hızlarda meydana gelen soğuma esnasında meydana gelen büzülme sonuçunda parçada belli deformasyonlar oluşmaktadır. Bu deformasyonlar sonucunda ise parça geometrisinde ölçüsel değişimler meydana gelmektedir. Kaynak prosesi öncesinde parçalar arasındaki açının 90° , ara mesafenin ise 0.5 mm olarak ayarlanmıştı.

Şekil 8.23' te kaynak simülasyonu sonucunda parçada meydana gelen açısal değişim miktarı görülmektedir. 90° olan başlangıç açısı simülasyon sonucunda 89.904 olarak değişmiştir.



Şekil 8.23: Kaynak sonrası açısal değişim.

Şekil 8.24' te ise kaynak simülasyonu öncesinde 0.5 mm olan ara boşluk mesafesinin kaynak simülasyonu sonucunda 0.176 mm' ye düştüğü görülmektedir.



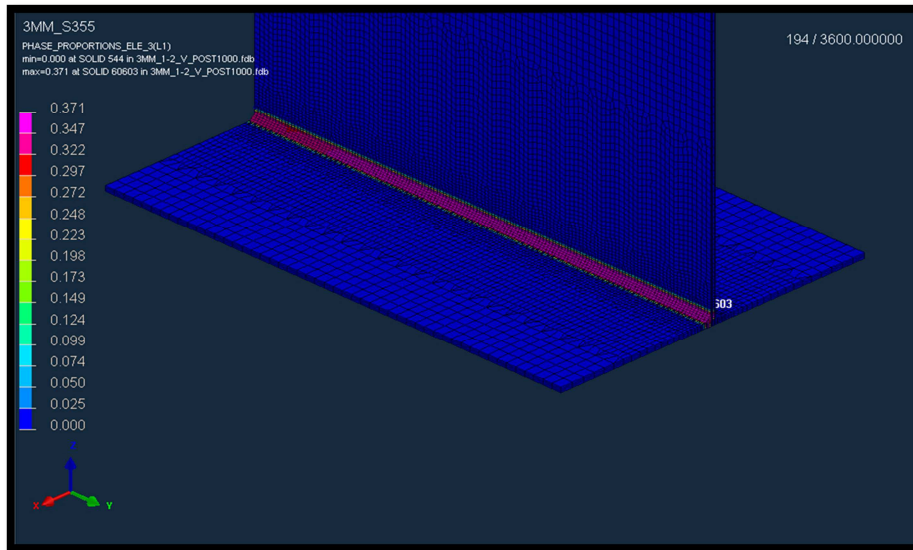
Şekil 8.24: Kaynak sonrası parçalar arasındaki mesafenin değişim miktarı.

8.3.1.3 Malzeme İç Yapısındaki Değişim Dağılımları

Kaynaklı imalat sonrasında yüksek hızda yüksek sıcaklıklara çıkan malzemeler ortam koşullarına bağlı olarak belirli hızlarda soğumaktadırlar. Bu soğuma hızına bağlı olarak kaynak bölgesinde iç yapı değişimleri görülmektedir. Bu iç yapı değişikliklerine bağlı olarak kaynak bölgesinin mekanik özellikleri belirlenmektedir. Bu bölgede meydana gelebilecek yüksek oranda bir martenzit oluşumu kaynaklı bölgenin kırılma olmasına neden olmaktadır. Kaynak sonrası bu bölge hızlı bir şekilde soğumaya maruz kalırsa bu bölgede martenzit yapı oluşma miktarı artar.

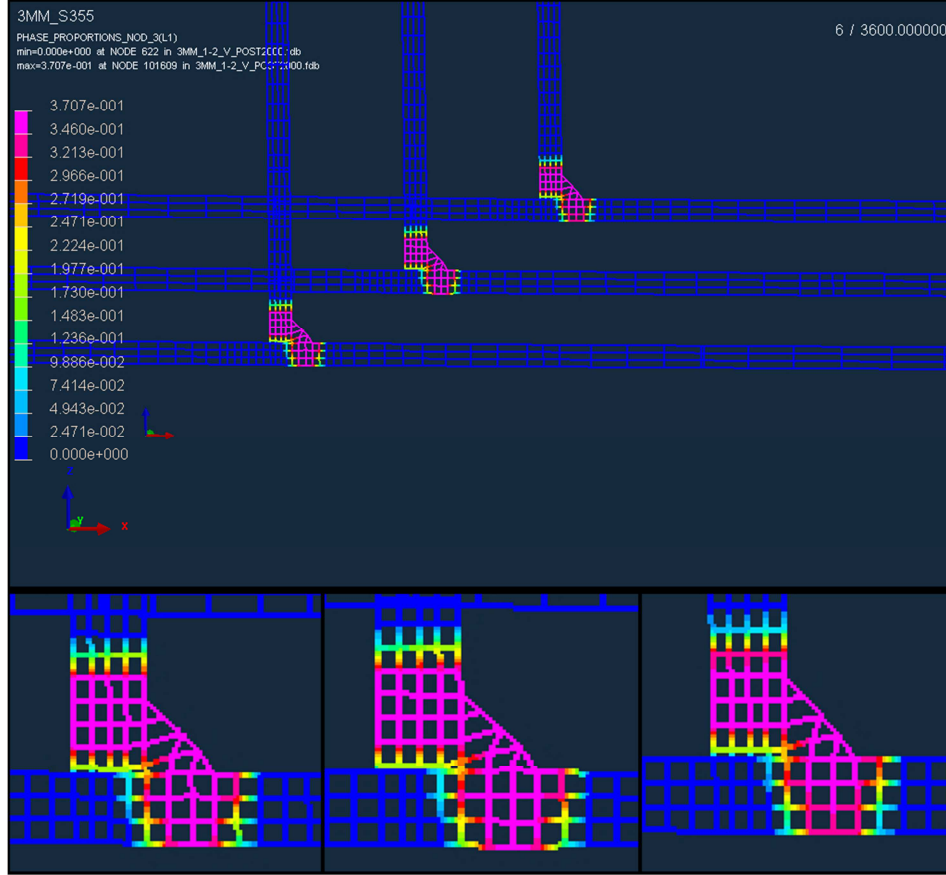
Bu faz kaynak bölgesinde istemediğimiz bir faz yapısıdır. Çeliklerdeki karbon oranı miktarına göre ve kaynak sonrasında parçanın soğuma hızına göre oluşma miktarı değişen bir faz yapısıdır. Karbon miktarı arttığında da martensit yapı oluşma miktarında artmaktadır.

Şekil 8.25' te kaynak simülasyonu sonrasında kaynaklı bölgede meydana gelen martenzit fazının dağılımını görebilmekteyiz. Yanda okuduğumuz değerler fraction (kesir) olarak verilmiş değerlerdir. Bunları yüz ile çarparsak yüzdesel miktarlarını bulabiliriz. Renklere göre baktığımızda maksimum martenzit miktarı % 37 değerlerine kadar çıkmıştır.



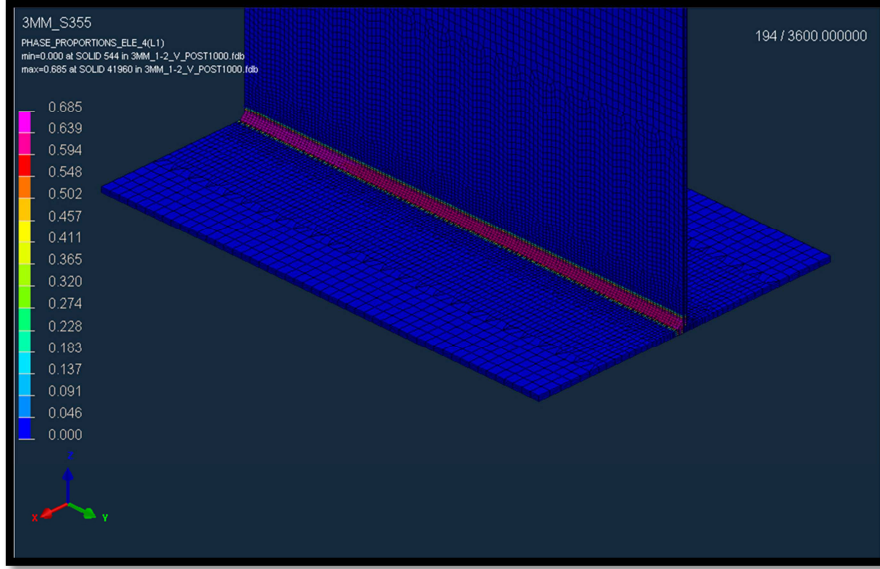
Şekil 8.25: Kaynak sonrası martenzit dağılımı.

Şekil 8.26 ise başlangıç, orta ve bitiş kısmına ait kesitlerde oluşan martenzit dağılımlarını göstermektedir. Bu dağılıma baktığımızda kesitler arasında fazla bir fark olmadığı gözlemlenebilir.

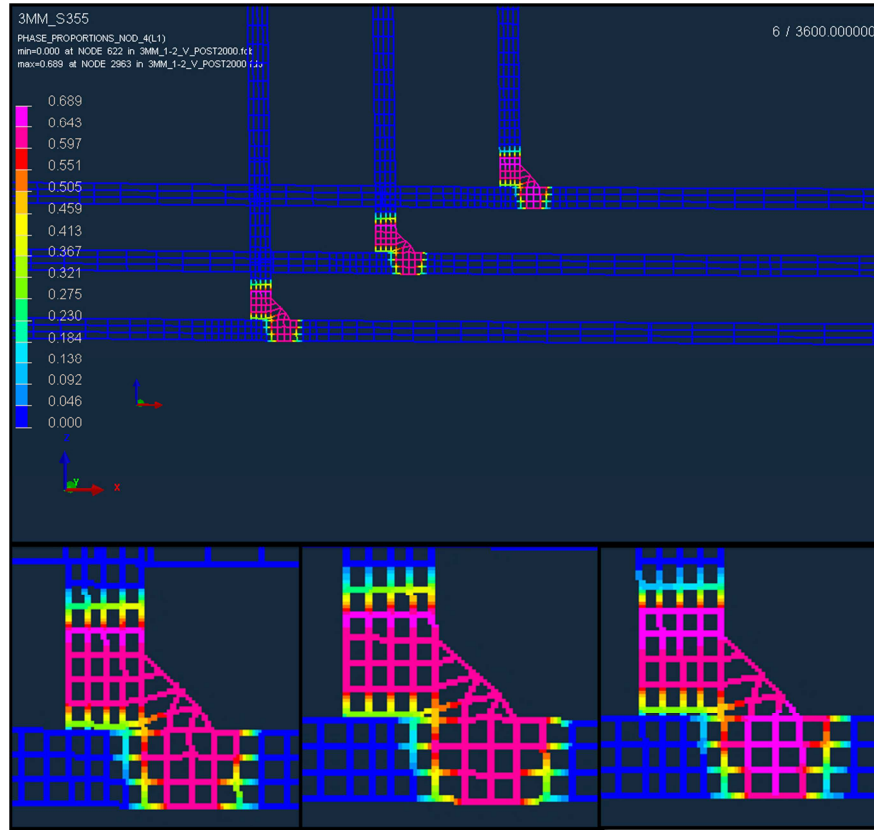


Şekil 8.26: Kaynak sonrası kesitler arası martenzit dağılımı.

Kaynak sonrasında bu bölgede meydana gelen fazlardan bir diğeri ise beynit fazıdır. Östenitin, perlit oluşumu için büyük, fakat martenzit oluşumu için küçük soğuma hızları ile soğutulması sonucu oluşur. Şekil 8.27' ye baktığımızda kaynak dikişi boyunca beynit fazının dağılımını görebiliriz. Yine sol tarafta verilen değerleri yüz ile çarptığımızda bölgelere ait yüzdesel beynit miktarını hesaplamış oluruz. Buna göre beynit miktarının maksimum olduğu bölgelerde bu değer % 68 civarındadır.



Şekil 8.27: Kaynak sonrası beynit dağılımı.

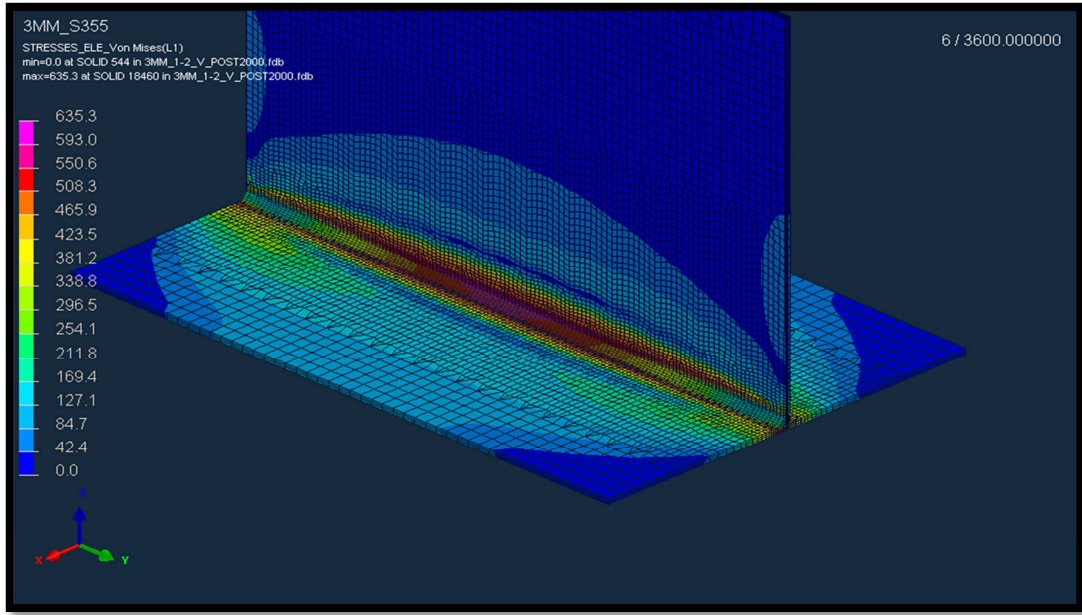


Şekil 8.28: Kaynak sonrası kesitler arası beynit dağılımı.

Şekil 8.28' de ise başlangıç, orta ve bitiş kısmına ait beynit dağılımlarını görebiliriz. Bitiş kısmında soğumunda etkisi ile beynit miktarı bir miktar artış göstermiştir.

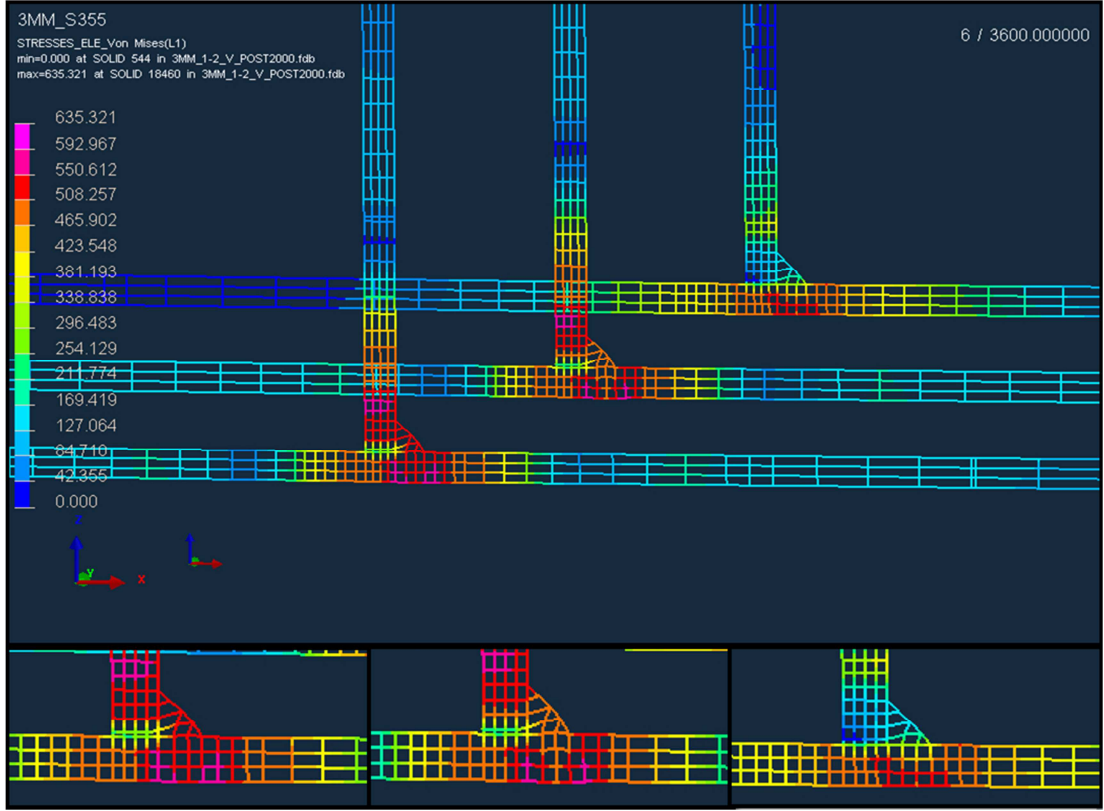
8.3.1.4 Kaynak Sonrası Oluşan İç Gerilmeler

Kaynak işlemi sırasında meydana gelen termal olaylar nedeni ile kaynak bölgelerinde kaynaktan sonra kalıntı gerilmeler oluşabilmektedir. Kalıntı gerilme miktarı çarpılma ile ters orantılıdır. Malzeme çarpılamassa bu bize kalıntı gerilmenin daha yüksek olacağını gösterir. Şekil 8.29' da parçada kaynak sonrasında dikiş boyunca kalan kalıntı gerilme miktarı görülmektedir.



Şekil 8.29: Kaynak sonrası iç gerilme dağılımı.

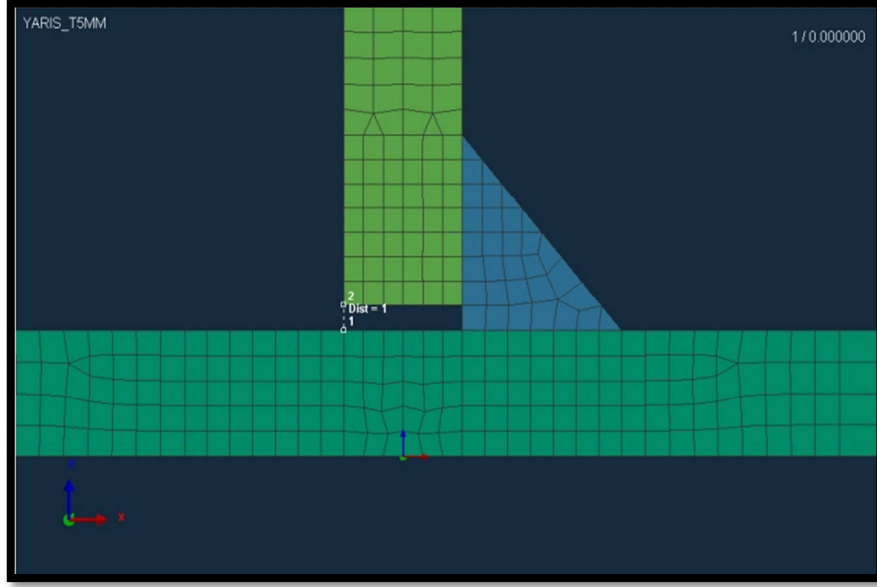
Şekil 8.30' da ise başlangıç, orta ve bitiş kısmına ait kalıntı gerilmelerin miktarını görebiliriz. Bitiş kısmına doğru yine soğuma hızının da etkisi ile kalıntı gerilme miktarının arttığı görülmektedir. Gerilme değerlerinin birimi MPa'dır.



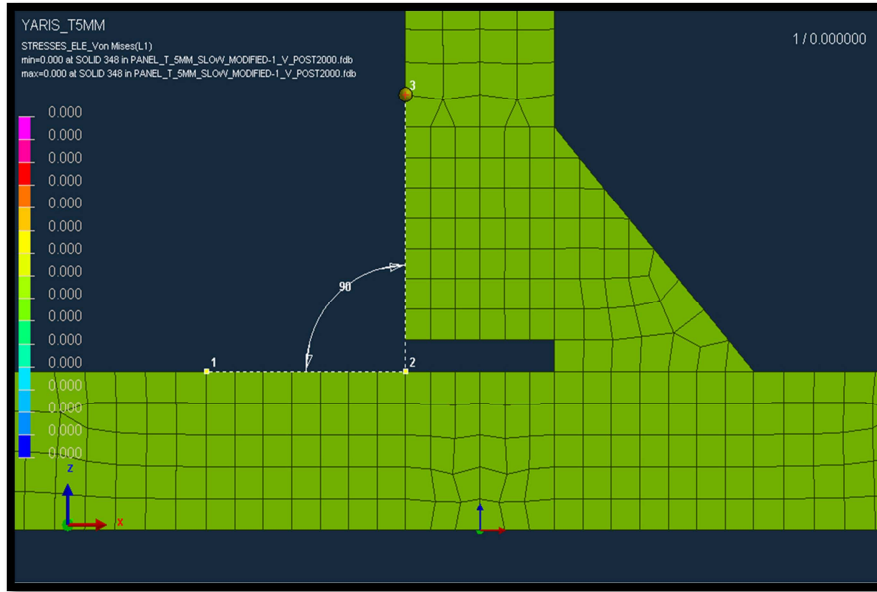
Şekil 8.30: Kaynak sonrası kesitler arası iç gerilme dağılımı.

8.3.2 5 mm'lik Parçanın Simülasyon Sonuçları

Kaynak öncesi köşe kaynağı yapılacak 5 mm kalınlık değerine sahip test parçalarının Şekil 8.31' de kaynak prosesi öncesinde ara mesafesi gözükmemektedir. Parçalar arası ara mesafe 1 mm olarak bırakılmıştır. Şekil 8.32' de ise parçalar arası açının 90° olduğu görülmektedir. Parçalar bu konumda iken verilen parametreler dahilinde kaynak prosesi simülasyon ortamında gerçekleştirilecektir.



Şekil 8.31: Kaynak öncesi ara boşluk.



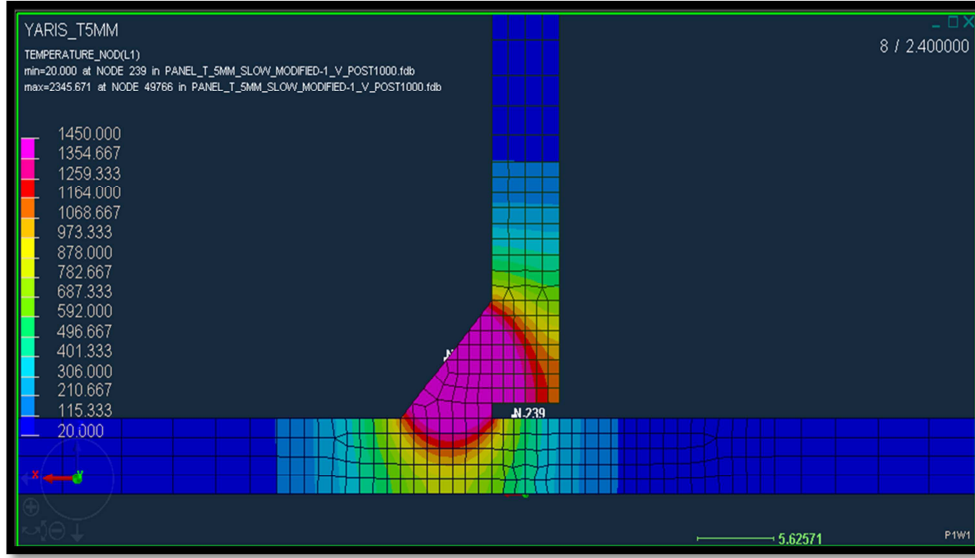
Şekil 8.32: Kaynak öncesi açısı.

8.3.2.1 Kesitlerdeki Sıcaklık Dağılımı ve Nüfuziyet Miktarı

Simülasyon sonucunda elde ettiğimiz önemli bir veri, kaynak proses sonrasında parçalarda elde ettiğimiz sıcaklık dağılımı ve buna bağlı olan nüfuziyet derinlikleridir. Burada 5 mm kalınlığa sahip parçaların başlangıç, orta kısım ve bitiş kısımlarından kesitler olarak bu değerleri inceledik.

Başlangıç kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;

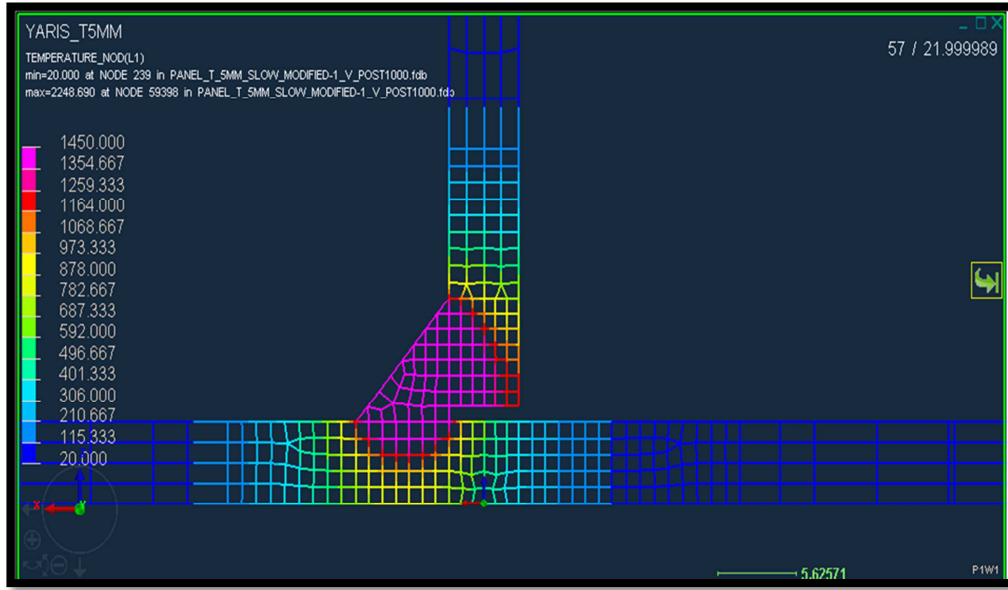
Şekil 8.33' te üst parçanın nüfuziyet miktarı ortalama 2.7 mm civarındadır. Alt parçanın nüfuziyet miktarı ise ortalama 1.5 mm civarındadır. Ara mesafenin 1 mm çıkartılması ile üstteki parçadaki nüfuziyet miktarı artmıştır. Kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımı da sıcaklık miktarına göre renklendirilmiş şekilde görülmektedir.



Şekil 8.33: 5 mm'lik parçanın başlangıç kısmına ait nüfuziyet kesiti.

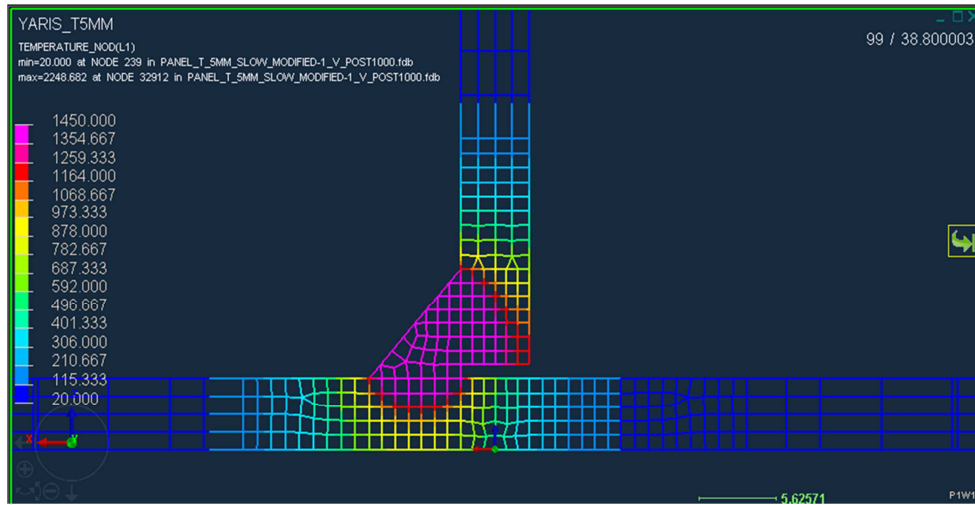
100. mm' deki elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak ;

Şekil 8.34' teki kesit görüntüsüne baktığımızda nüfuziyet miktarının parçanın bu kısma kadar ısınması nedeniyle bir önceki 3 mm'lik parçadaki gibi çok az da olsa arttığı görülmektedir. Üst parçanın nüfuziyet miktarının ortalama 2.8 mm civarında, alt parçanın nüfuziyetinin ise ortalama 1.5 mm civarında olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ısı etkisi altında kalan alanda bir miktar genişlemiştir.



Şekil 8.34: 5 mm'lik parçanın orta kısmına ait nüfuziyet kesiti.

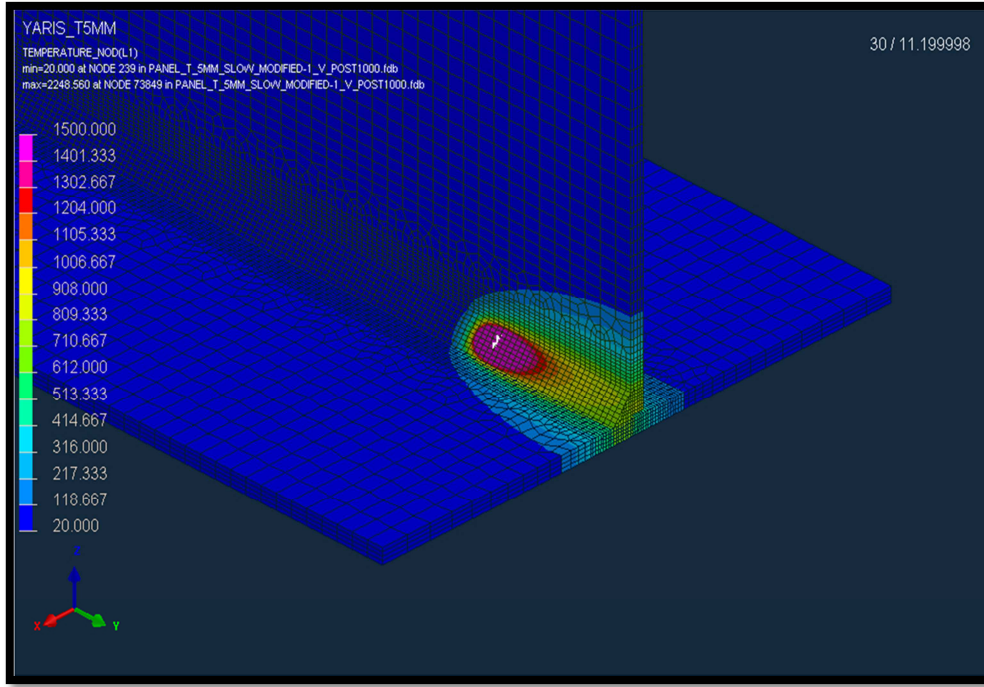
Bitiş kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;



Şekil 8.35: 5 mm'lik parçanın bitiş kısmına ait nüfuziyet kesiti.

Şekil 8.35' teki kesit görüntüsüne bakarsak nüfuziyet kesitinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Burada yine üst parçada ortalama 2.8 – 2.9 mm'lik bir nüfuziyet derinliği, alttaki parçada ise ortalama 1.5 mm'lik bir nüfuziyet derinliği olduğu görülmektedir.

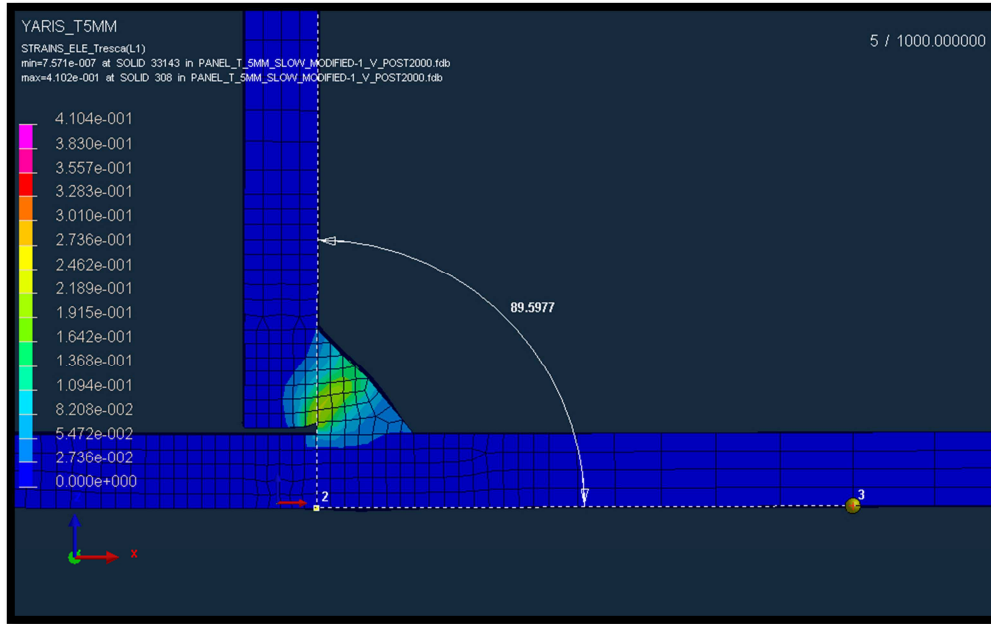
Şekil 8.36' da ise kaynak esnasındaki anlık sıcaklık dağılımını görebiliriz. Kaynak banyosunun olduğu noktalarda sıcaklık maksimum değerlerde olmaktadır.



Şekil 8.36: Kaynak esnasında sıcaklık dağılımı anlık görüntü.

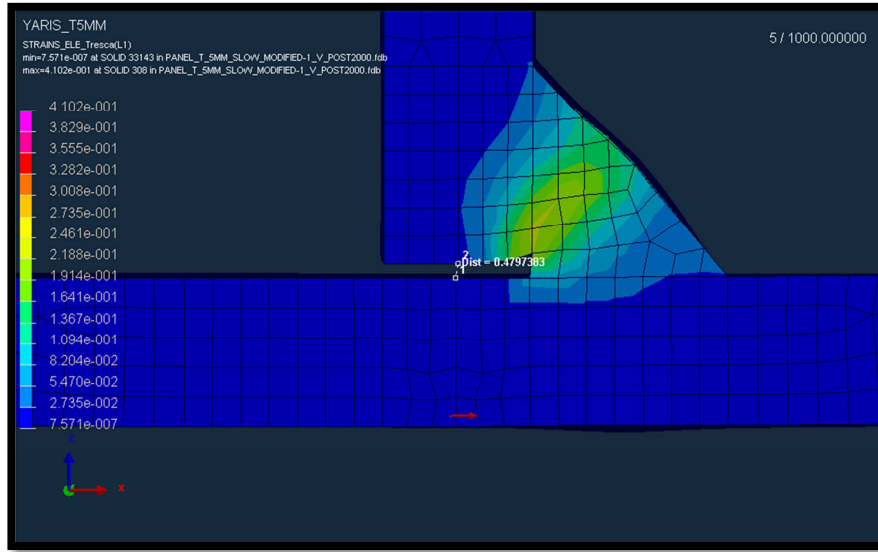
8.3.2.2 Ölçüsel Değişimler

Kaynak sonrasında meydana gelen açısal değişim sonucunda Şekil 8.37’ de görüldüğü gibi 90° olan açı değeri 89.597° olmuştur.



Şekil 8.37: Kaynak sonrası açısal değişim.

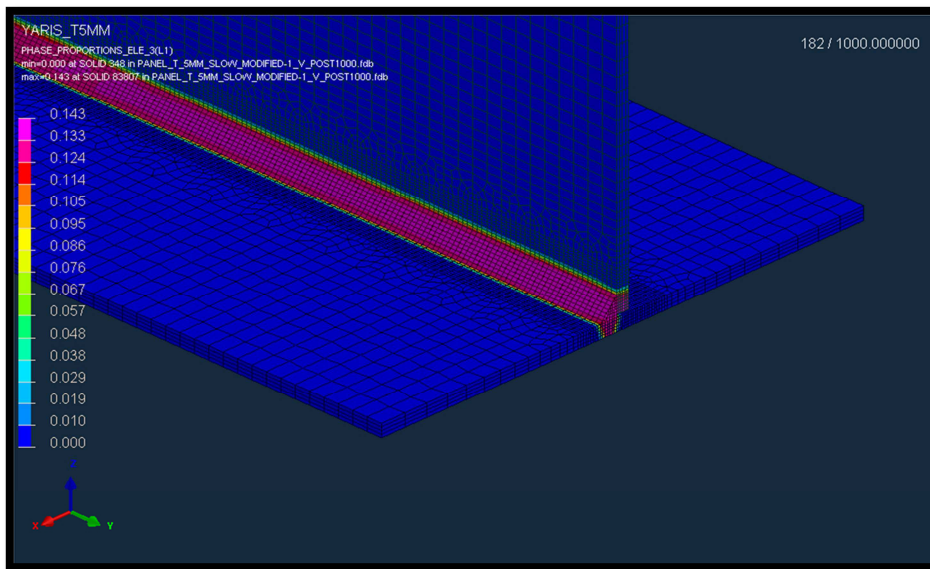
Kaynak sonrasında parçalar arasında olan 1 mm' lik boşluk Şekil 8.38' de görüldüğü gibi 0.479 mm' ye düşmüştür.



Şekil 8.38: Kaynak sonrası parçalar arasındaki mesafenin değişim miktarı.

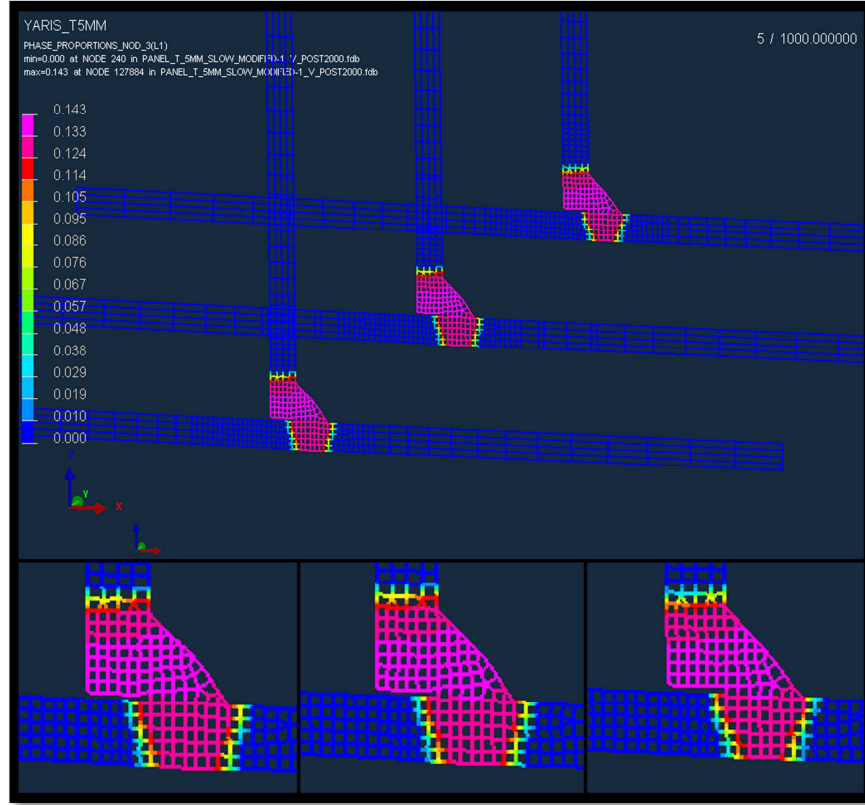
8.3.2.3 Malzeme İç Yapısındaki Değişim Dağılımları

Simülasyon sonucunda 5 mm kalınlıktaki parçada kaynak dikişi boyunca oluşan martenzit miktarı dağılımını Şekil 8.39' da görebiliriz.



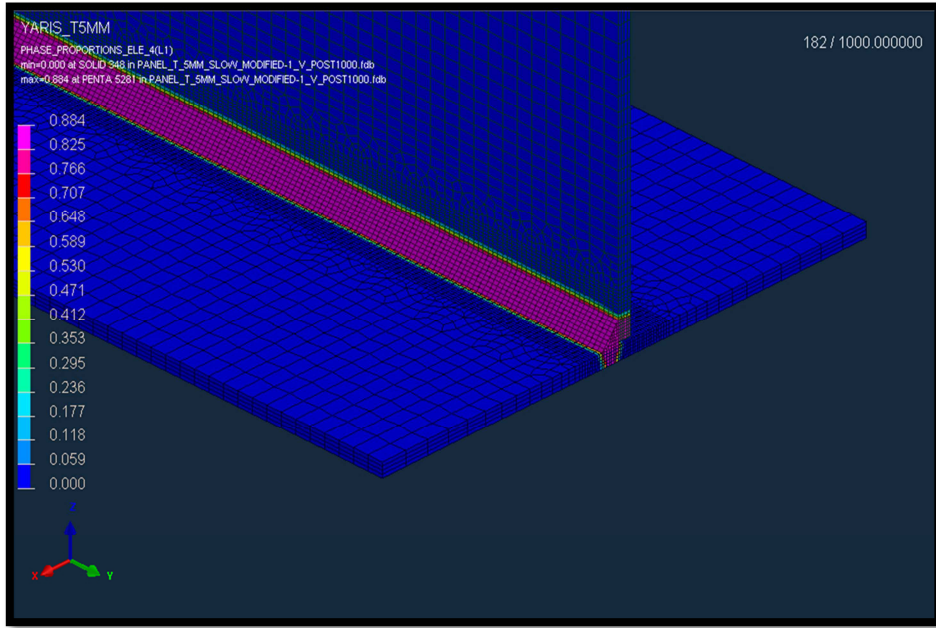
Şekil 8.39: Kaynak sonrası martenzit dağılımı.

Şekil 8.40' da ise başlangıç, orta ve bitiş kısmına ait kesitlerdeki martenzit miktarları görülmektedir. Martenzit miktarının kaynak ilave metalinin yoğun olduğu kaynak dikiş kısımlarında bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir.

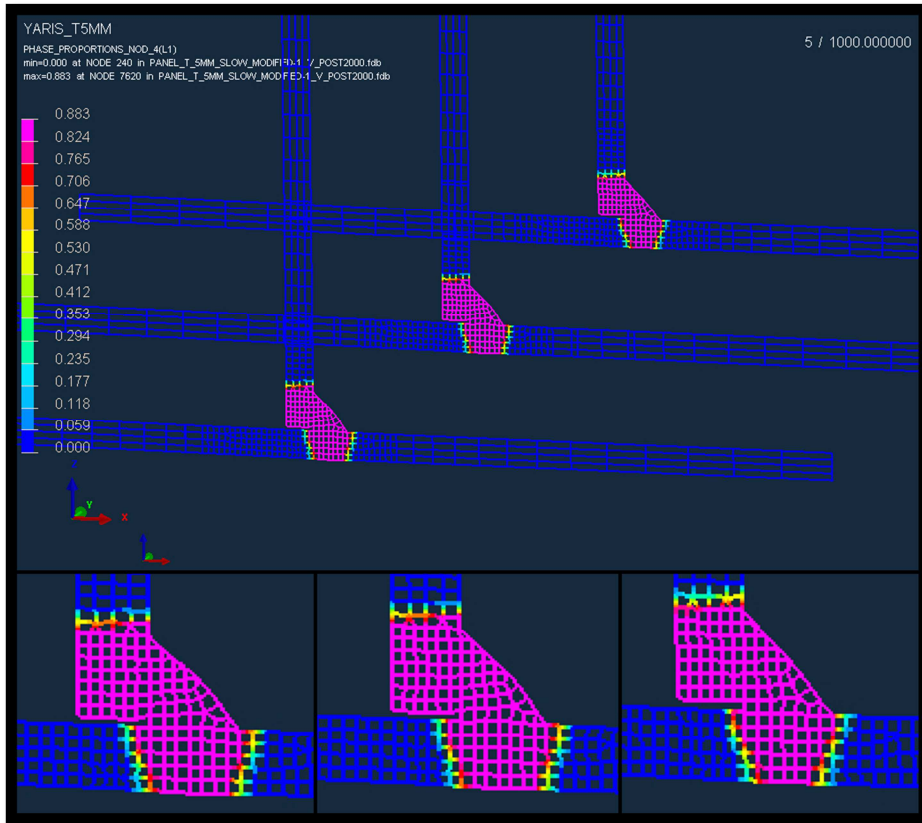


Şekil 8.40: Kaynak sonrası kesitler arası martenzit dağılımı.

Şekil 8.41'de ise kaynak sonrasında dikiş boyunca oluşan beynit miktarının dağılımını genel olarak görebiliriz. Şekil 8.42' de ise yine parçamızın kaynak sonrasında başlangıç, orta ve bitiş kısımlarına ait beynit dağılımları yer almaktadır. Bu üç bölgeye ait beynit dağılımlarına bakıldığında hemen hemen birbirine eşit bir şekilde olduğu görülmektedir.



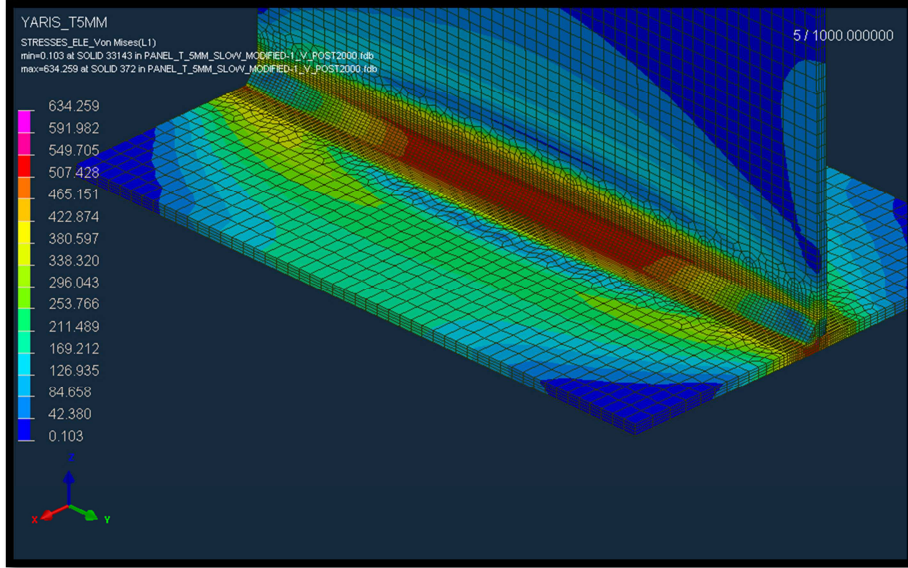
Şekil 8.4: Kaynak sonrası beyrit dağılımı.



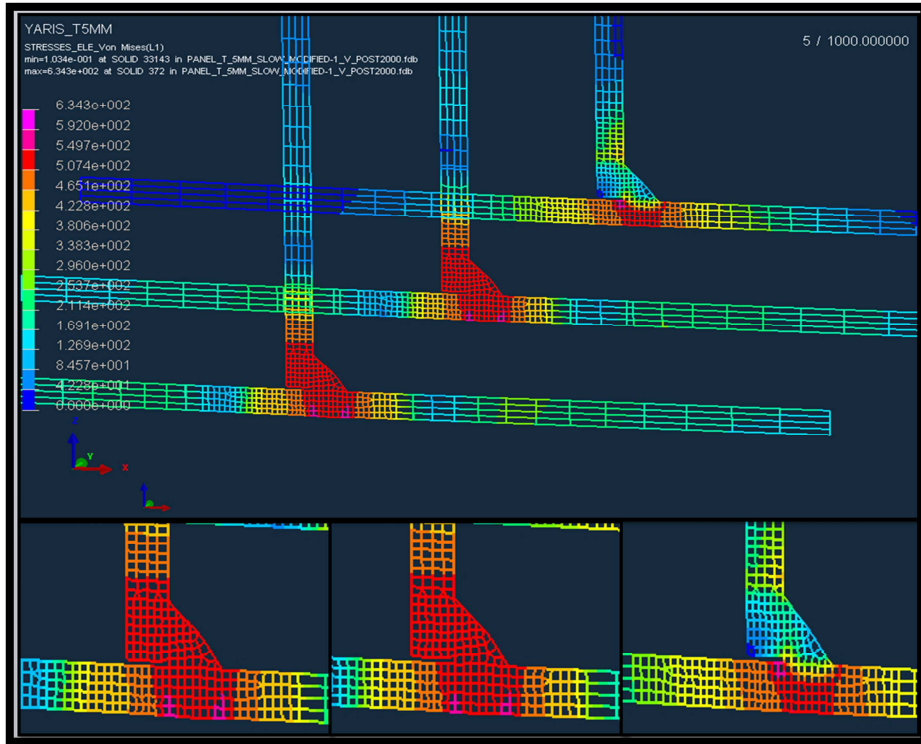
Şekil 8.42: Kaynak sonrası kesitler arası beyrit dağılımı.

8.3.2.4 Kaynak Sonrası Oluşan İç Gerilmeler

Kaynak işlemi sonucunda 5 mm kalınlıktaki parçada mevcut olan kalıntı gerilme miktarını ve bunların dağılımını Şekil 8.43' te net olarak görebiliriz. Şekil 8.44' te görüldüğü gibi kesitlere göre dağılan kalıntı gerilmeler bitiş kısmında yoğunlaşmıştır.



Şekil 8.43: Kaynak sonrası oluşan iç gerilmeler.



Şekil 8.44: Kaynak sonrası oluşan kesitler arası iç gerilmeler.

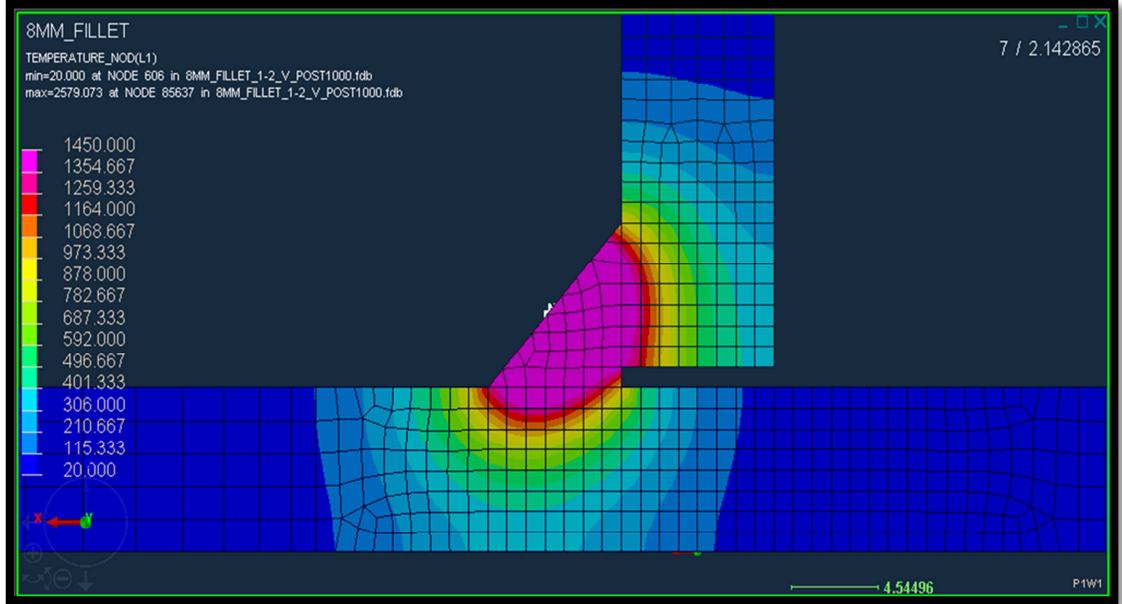
8.3.3 8 mm'lik Parçanın Simülasyon Sonuçları

Kaynaklı imalatta parça kalınlıkları arttıkça yeterli eritme gücünü sağlayabilmemiz için daha fazla ısı girdisi sağlamamız gerekmektedir. Çünkü parça kalınlaştıkça parçanın soğuma hızı artacaktır. Parça üzerinden ısı kaçıışı hızlı bir şekilde gerçekleşir. Bu nedenle 8 mm kalınlığa sahip parçanın simülasyonunda parametre değerlerinde bir yükseltme yapılmıştır.

8.3.3.1 Kesitlerdeki Sıcaklık Dağılımı ve Nüfuziyet Miktarı

Başlangıç kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;

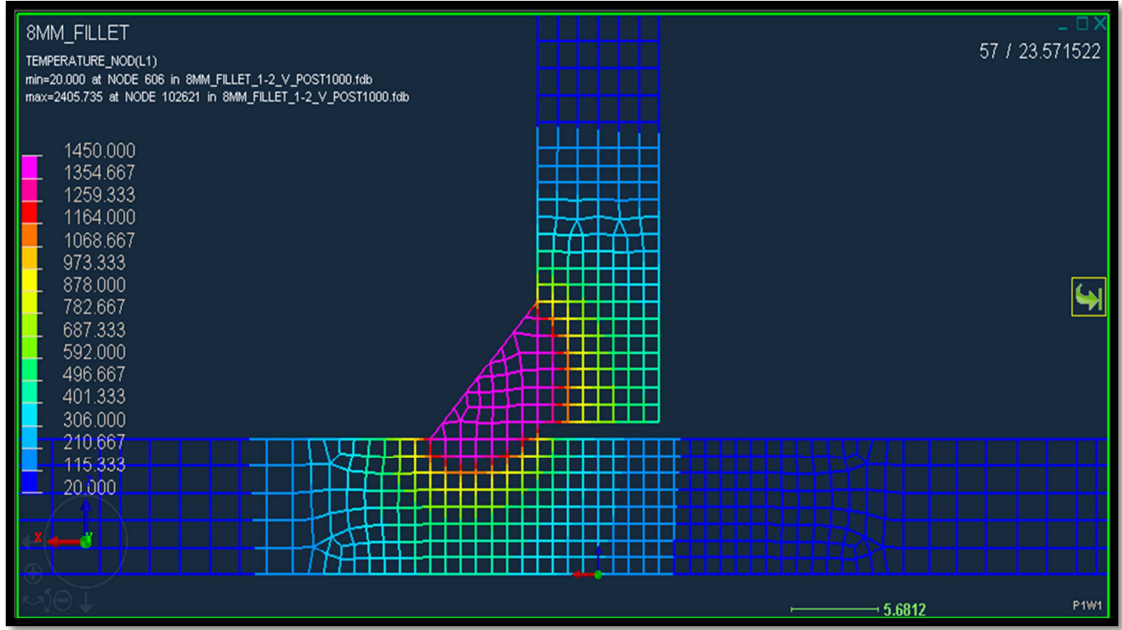
Parçalar arası ara mesafe miktarı 1 mm olarak belirlenmiştir. Açığı ise yine 90° dik köşe kaynağı prosesi şeklinde ayarlanmıştır. Bu parametreler eşliğinde yapılan kaynak simülasyonu sonucunda Şekil 8.45' te görüldüğü gibi üstteki parçada elde edilen nüfuziyet derinliği ortalama olarak 1 mm civarındadır. Altındaki parçadaki nüfuziyet derinliği ise ortalama olarak 1.1 mm civarında olmuştur.



Şekil 8.45: 8 mm' lik parçanın başlangıç kısmına ait nüfuziyet kesiti.

Orta kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;

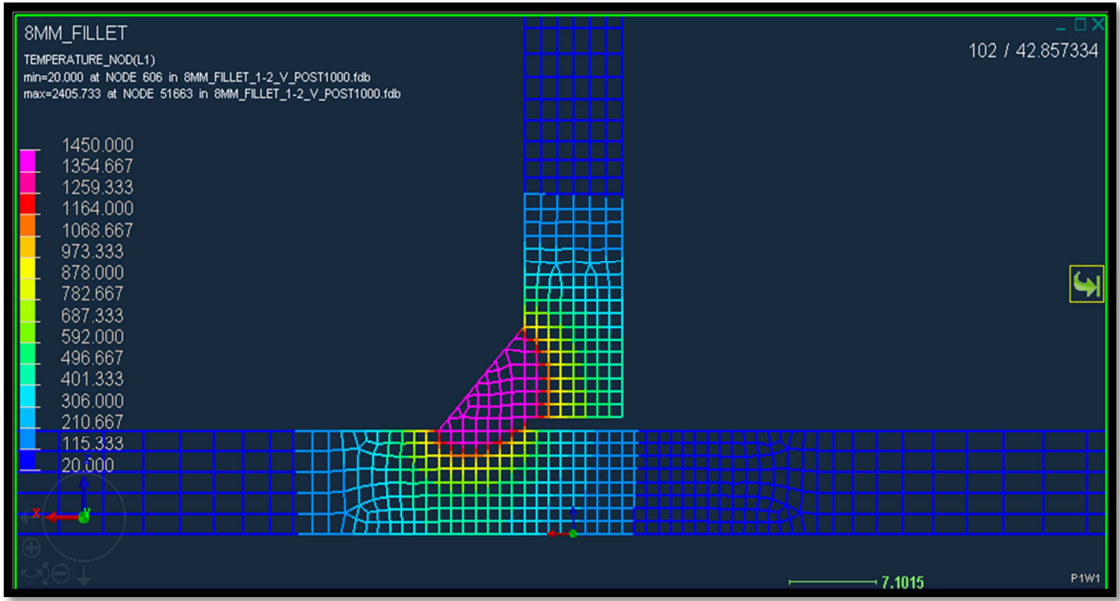
8 mm' lik parçanın orta kısmındaki nüfuziyet kesitine bakıldığında bu kısma kadar gelirken parça sıcaklığının artmasından dolayı bu kısımda bir miktar daha iyi bir erime olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle bu kısımdaki nüfuziyet derinliği azda olsa bir miktar artmış görünmektedir. Şekil 8.46' da görüldüğü üzere üstteki parçada 1.2 mm civarında bir nüfuziyet derinliği sağlanmışken, alttaki parçada ise sağlanan nüfuziyet derinliği 1.1 – 1.2 mm civarlarındadır.



Şekil 8.46: 8 mm' lik parçanın orta kısmına ait nüfuziyet kesiti.

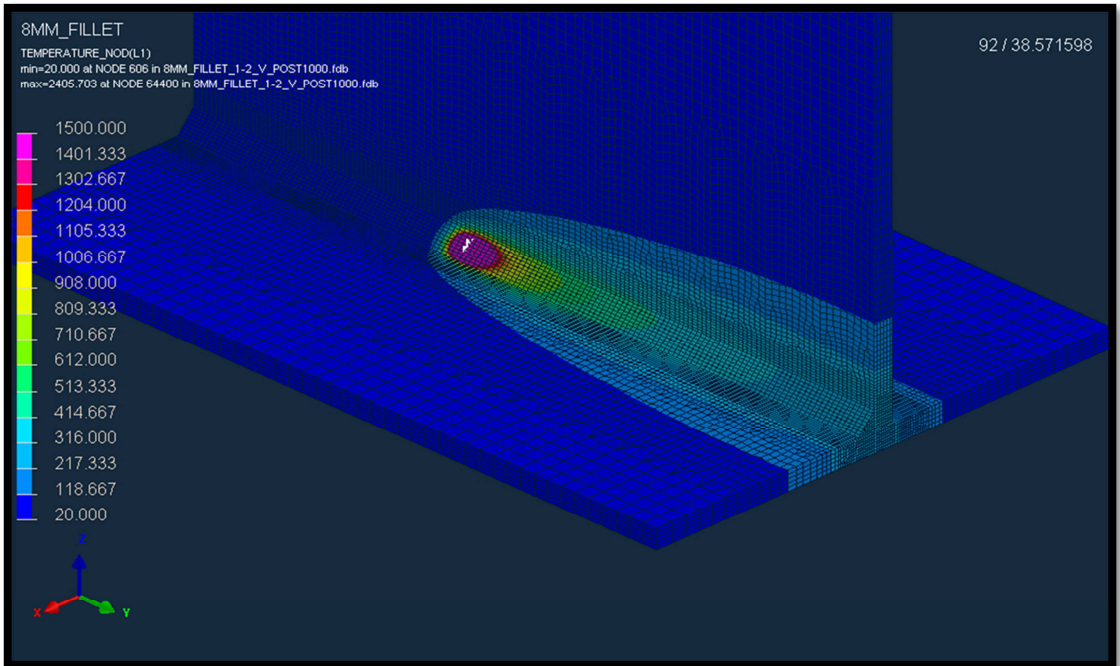
Bitiş kısmında elde ettiğimiz sonuçlara bakacak olursak;

Parçanın bitiş kısmında nüfuziyet değerleri yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Şekil 8.47' teki kesite baktığımızda üstteki parçada 1.1 – 1.2 mm civarında, alttaki parçada ise 1 – 1.1 mm civarında nüfuziyet derinliklerinin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 8.47: 8 mm' lik parçanın bitiş kısmına ait nüfuziyet kesiti.

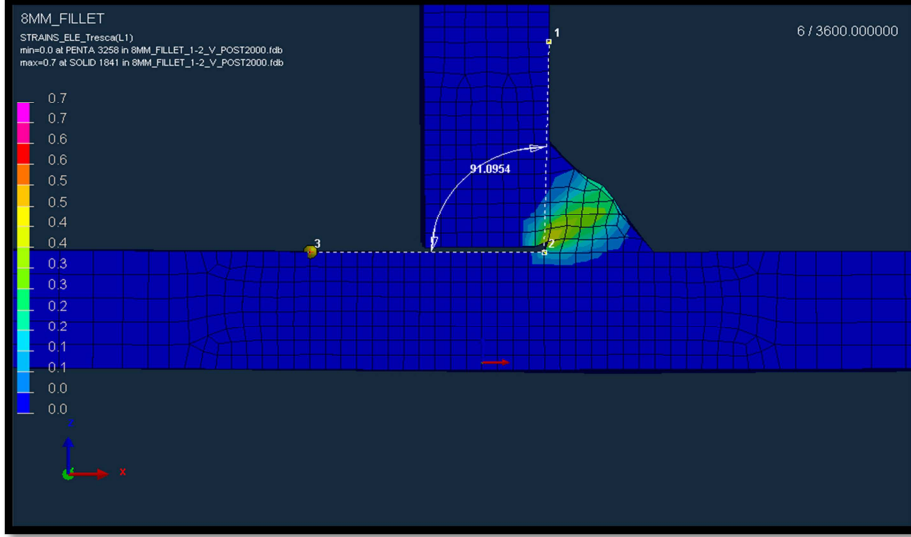
Şekil 8.48' de 8 mm' lik parçada kaynak esnasında meydana gelen anlık sıcaklık dağılımına ait değişimi görebiliriz.



Şekil 8.48: Kaynak esnasında sıcaklık dağılımı anlık görüntü.

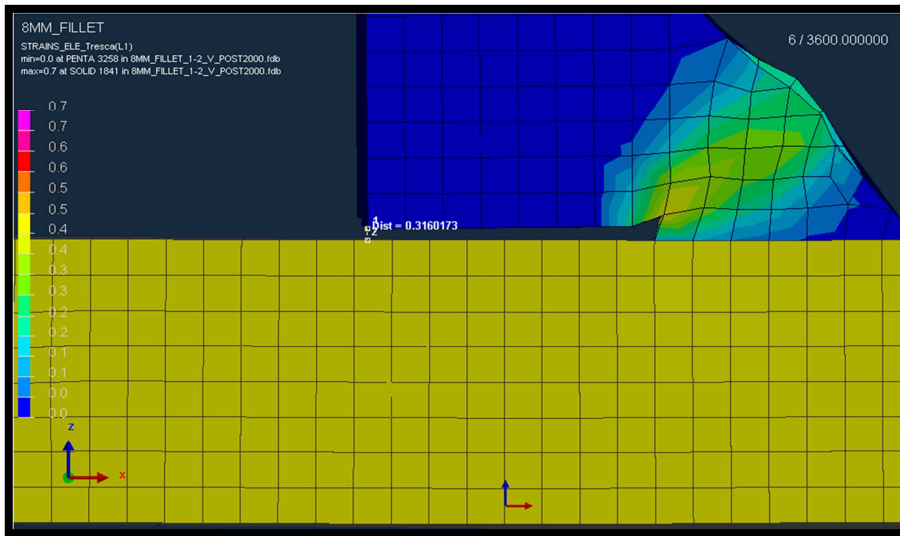
8.3.3.2 Boyutsal Değişimler

Parametreler eşiliğinde 8 mm' lik parça için yapılan kaynak simülasyonu sonucunda parçada meydana gelen açısal değişimi Şekil 8.49' da görebiliriz. Başlangıçta 90° olan açı kaynak sonrasında 89.046° olmuştur.



Şekil 8.49: Kaynak sonrası açısal değişim.

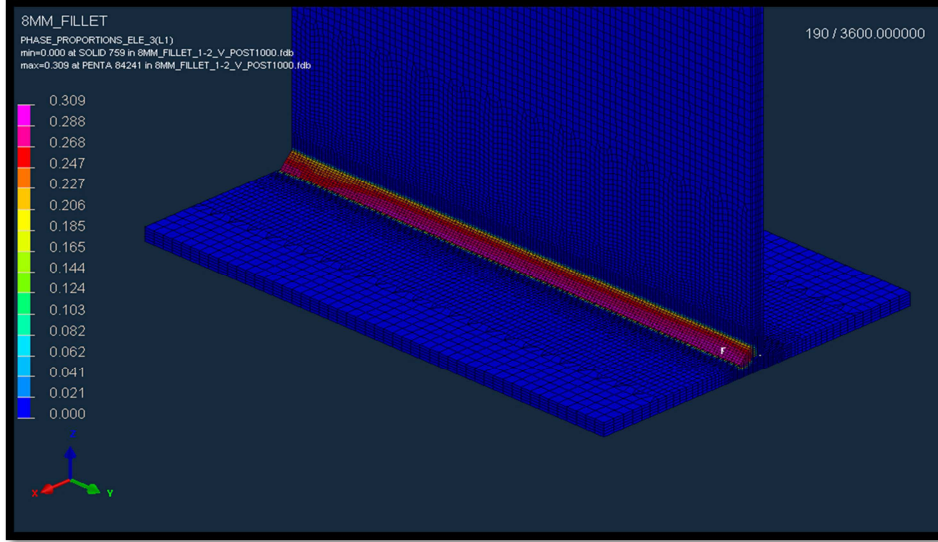
Kaynak öncesinde 1 mm olan boşluk miktarı kaynak simülasyonu tamamlandığında Şekil 8.50' de görüldüğü gibi 0.316 mm civarında kalmıştır.



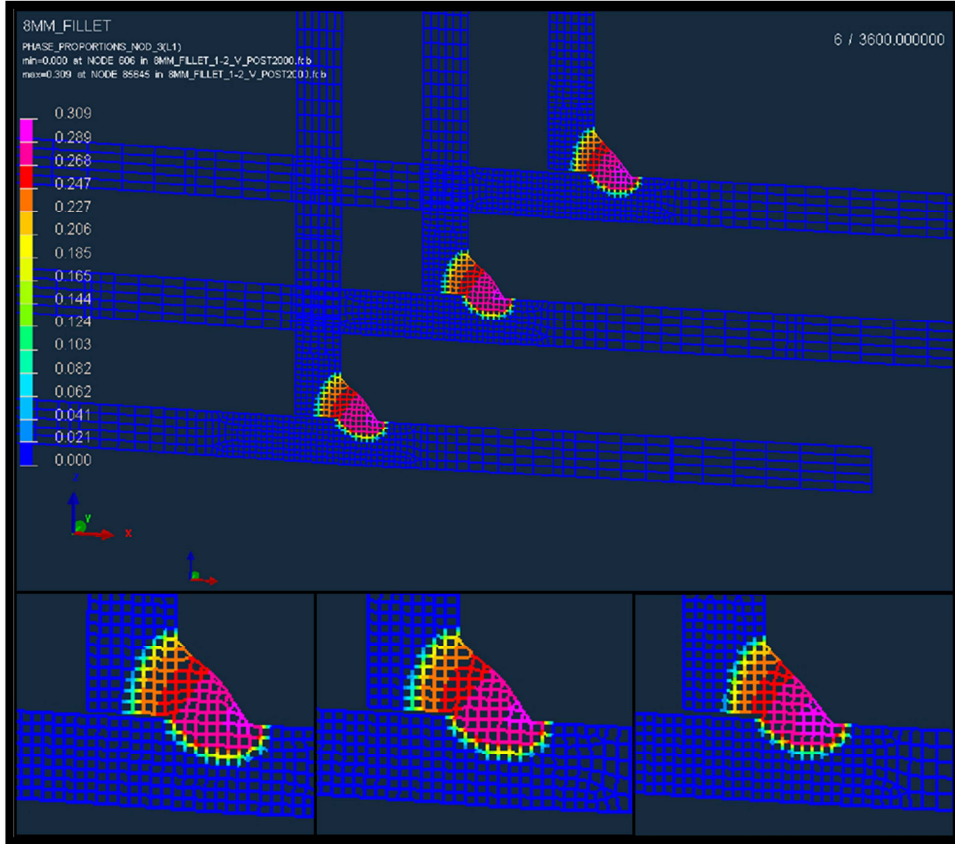
Şekil 8.50: Kaynak sonrası parçalar arasındaki mesafenin değişim miktarı.

8.3.3.3 Malzeme İç Yapısındaki Değişim Dağılımları

Şekil 8.51’ de 8 mm kalınlıktaki parçanın kaynak dikişi boyunca dağılan martenzit oranını görebiliriz. Şekil 8.52’ de ise kesitlere göre dağılan martenzit miktarı görülmektedir.

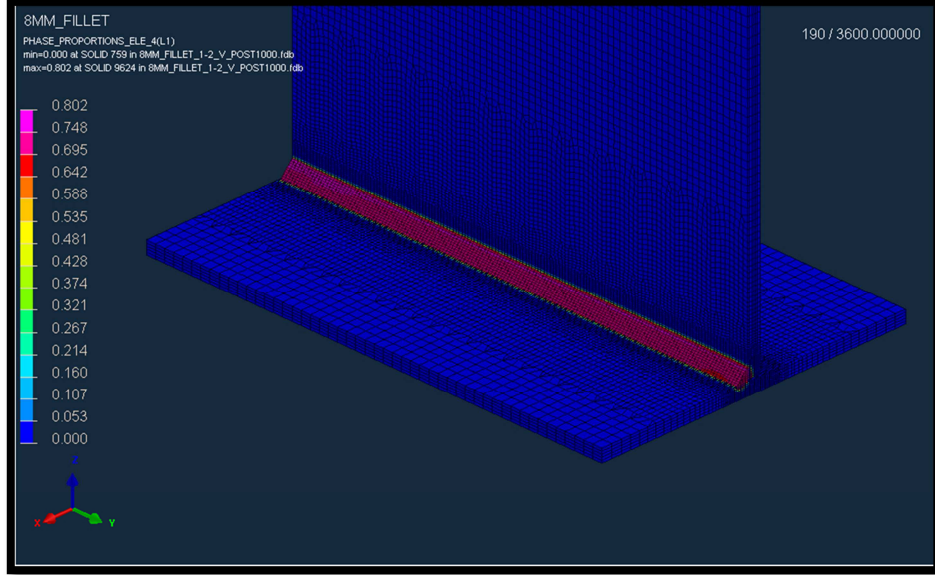


Şekil 8.51: Kaynak sonrası martenzit dağılımı.

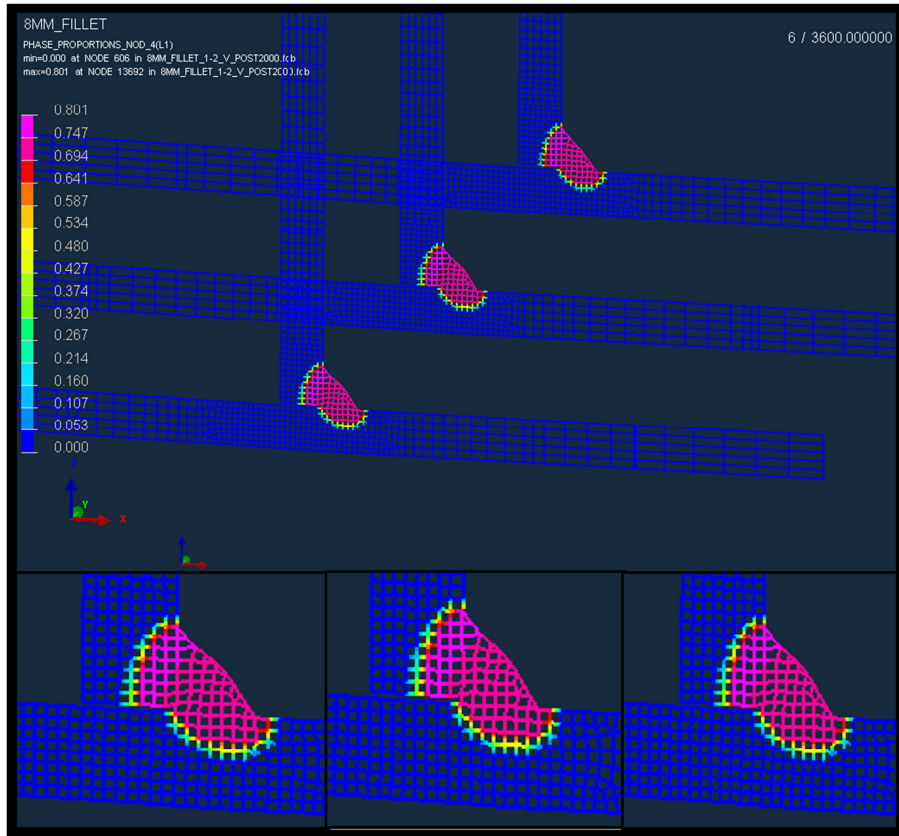


Şekil 8.52: Kaynak sonrası martenzit dağılımı.

Şekil 8.53' te kaynak sonrasında kaynak bölgesinde meydana gelen beyrit fazını görebiliriz. Şekil 8.54' te ise kesitlerdeki beyrit fazının dağılımı görülmektedir.



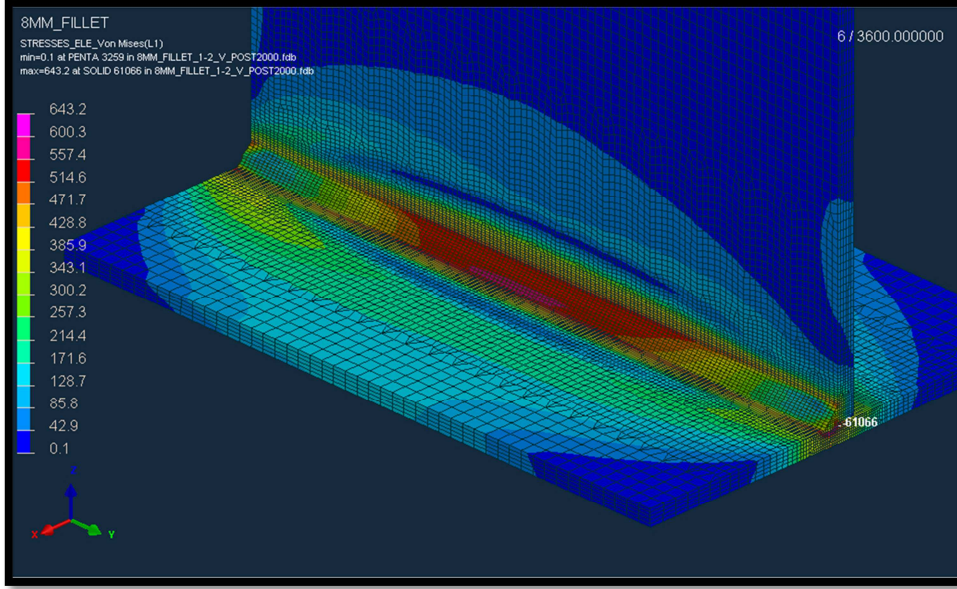
Şekil 8.53: Kaynak sonrası Beyrit dağılımı.



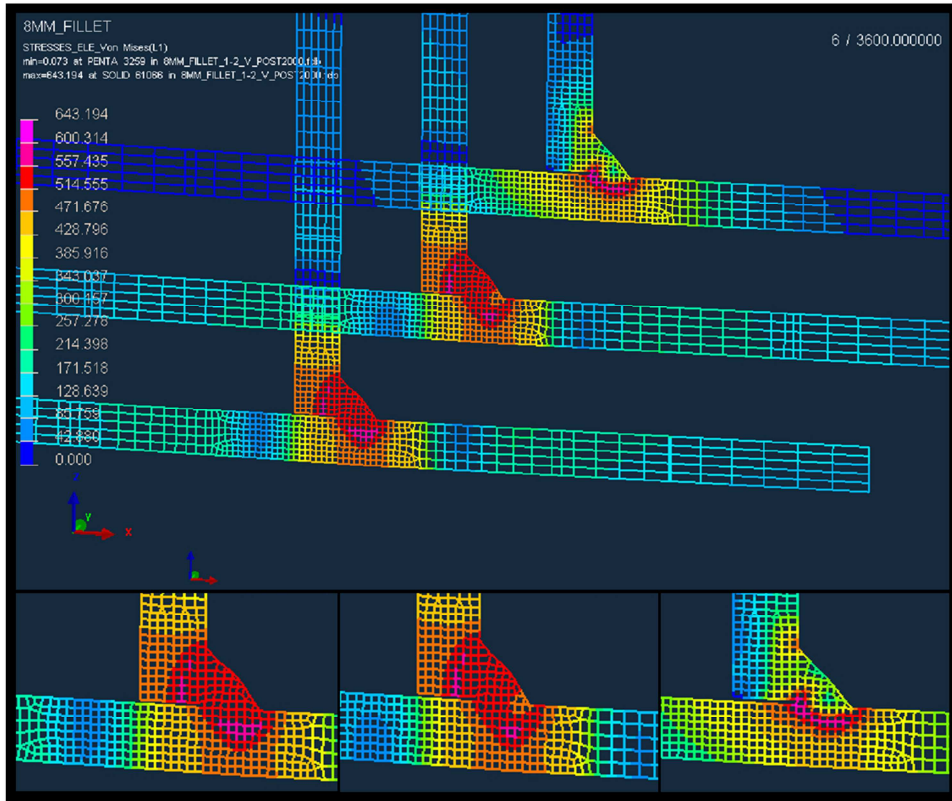
Şekil 8.54: Kaynak sonrası kesitler arası beyrit dağılımı.

8.3.3.4 Kaynak Sonrası Oluşan İç Gerilmeler

Kaynak sonrasında 8 mm kalınlıktaki parçada meydana gelen iç gerilmeleri ve dağılımlarını Şekil 8.55’ te görebiliriz. Şekil 8.56’ da ise kesitlere göre değişen gerilme miktarlarını ve bölgesel dağılımlarını görebiliriz.



Şekil 8.55: Kaynak sonrası iç gerilme dağılımı.



Şekil 8.56: Kaynak sonrası kesitler arası iç gerilme dağılımı.

9. GERÇEK KAYNAK PROSESİNİN UYGULANMASI

9.1 Parçaların Kaynak Prosesi Öncesinde Kontrolü

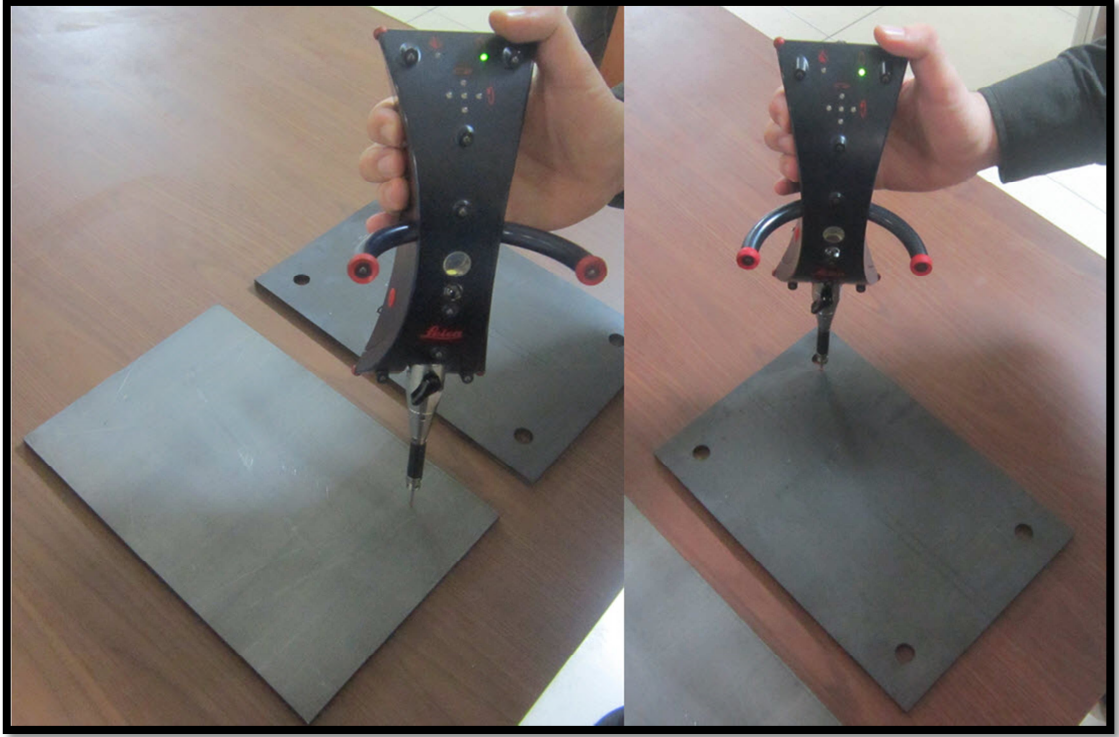
Gerçek proses sonrası ölçüsel değişim ile simülasyon sonucundan alınan ölçüsel değişim miktarlarının olabildiğince tutarlı olması için kaynatılacak test parçalarının da boyutsal olarak kontrol edilip hatasız olması gerekmektedir. Kaynak sonrası deformasyonun kontrolü yapılacağı için, bu parçaların kaynak öncesi düzlemselliğini kontrol edeceğiz. Test parçaları 3 mm, 5 mm ve 8 mm kalınlıklardan oluşmaktadır. Her kalınlık için bir adet test parçası hazırlayarak sonuçları değerlendireceğiz ve bu sonuçlar ile simülasyon sonuçlarını karşılaştıracacağız. Bir çift test parçasını Şekil 9.1’ de görebiliriz. Parça boyutları 200 mm’ ye 300 mm olup, malzemesi S 355 J2 G3’ tür.



Şekil 9.1: Kullanılacak test parçaları.

Toplamda altı adet parçanın düzlemselliğini Leica koordinat ölçüm cihazı ile kontrol ettik. Kontroller için sac parçaların yüzeylerinden noktalar alarak bu

noktalardan geçen düzelemler oluşturduk. Bu düzlemlerin düzlemsellik derecesini kontrol ettik. Şekil 9. 2' de ölçüm esnasında yapılan işlemi görebiliriz.



Şekil 9.2: Kullanılacak test parçalarının düzlemsellik ölçümü.

Sonuçlara bakacak olursak;

Tablo 9.1: Ölçümü yapılan parçaların düzlemsellik sonuçları

Kontrol Edilen Parçlar	Düzlemsellik Sonuçları
3 mm Üst	0.010
3 mm Alt	0.011
5 mm Üst	0.009
5 mm Alt	0.008
8 mm Üst	0.011
8 mm Alt	0.010

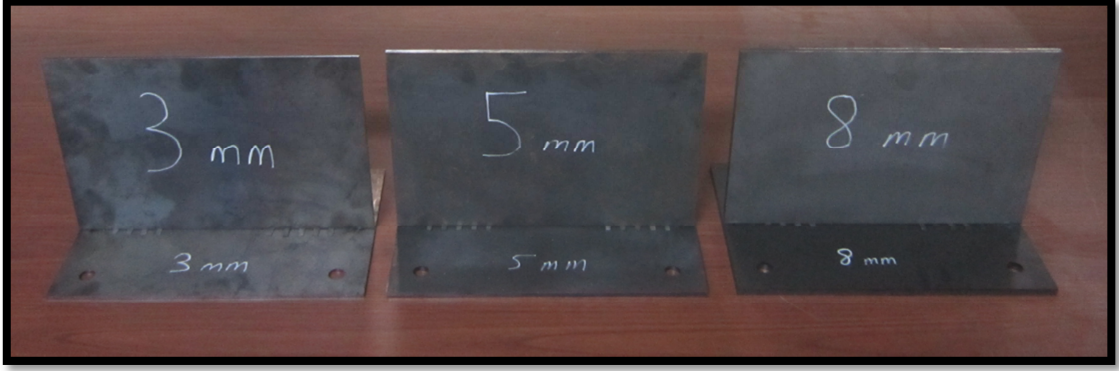
Parçalara ait düzlemsellik sonuçları oldukça iyi görünmekte ve kaynak öncesi sonuçları etkileyecek seviyede bir deformasyon bulunmamaktadır.

Bundan sonrasında ise kaynak prosesi öncesinde parçalar arası verilen boşluk sağlanacak şekilde parçalar puntalanır. Parçalar arası boşluk miktarı 3 mm için 0.5 mm, diğer kalınlıklar için ise 1 mm olarak belirlenmiştir. Parçaları puntalarken bu aralıkları sağlamak amacıyla 0.5 mm ve 1mm'lik ince küçük saclar kullanılmıştır. Alt parçada proses sonrası yapılacak ölçümlerde referans olarak kullanılmak üzere 4 adet delik bulunmaktadır. Yine üst parçayı alt parçanın tam ortasına yerleştirmek amacıyla alt parça lazerde kesilirken üst parçanın oturacağı bölge lazerde çizilmiştir. Şekil 9.3' te alt parçaya ait görüntüyü görebiliriz.



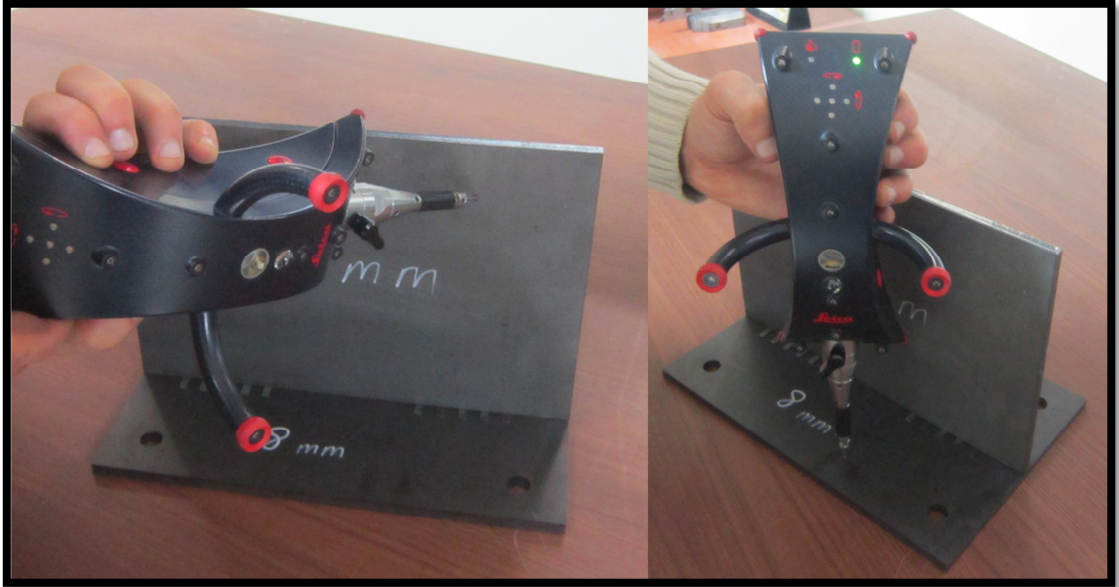
Şekil 9.3: Alt parçanın görüntüsü.

Şekil 9.4' te parçaların puntalanmış hali görünmektedir. Puntaladıktan sonra ise köşe kaynağı diklik açısı kontrol ediyoruz.



Şekil 9.4: Test parçalarının puntalanmış durumu.

Alt parça ve üst parçadan alınan noktalar ile oluşturulan düzlemler arasındaki açıyı kontrol ediyoruz. Bu açının 0.02° lik bir tolerans aralığında olması gerekmektedir. Bu aralığa girecek şekilde açıyı puntalı parçalarda ayarlıyoruz. Parçalar puntalandıktan sonra Şekil 9.5’ te görüldüğü gibi Leica cihazı ile parçaların açısal kontrolü yapılır.



Şekil 9.5: Puntalanmış parçaların açısal kontrolü.

Tablo 9.2: Ölçümü yapılan test parçalarının açısal kontrol sonuçları

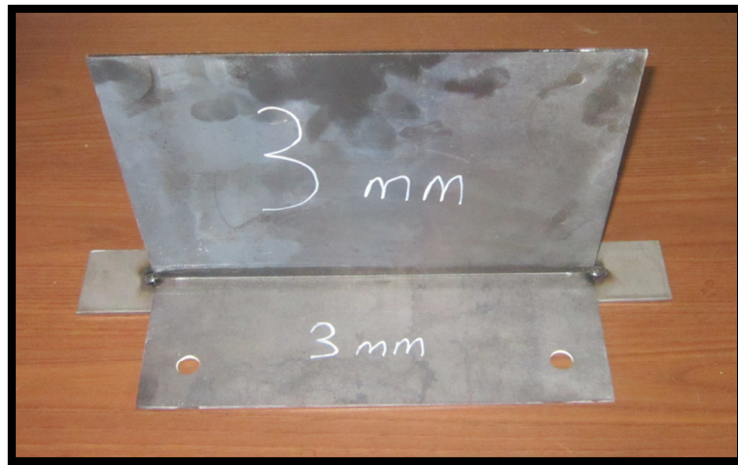
Kontrol Edilen Test Parçaları	Açısal Kontrol Sonuçları
3 mm	90.011°
5 mm	90.009°
8 mm	89.998°

9.2 Parçaların Kaynatılması

Parçalarla ilgili ölçüsel kontroller yapıldıktan sonra parçalar kaynak prosesine hazır hale geldiler. Bu aşamadan sonra parçaları kaynatarak sonuçlarını inceleyeceğiz.

9.2.1 3 mm' lik Parçanın Kaynağı ve Sonuçları

Parçalara, kaynak esnasında bitiş ve başlangıç hatalarını ortadan kaldırmak amacıyla her iki tarafına kulak şeklinde parçalar kaynatılmıştır. Şekil 9.6' da parçanın Kaynak öncesindeki son halini görebiliriz. Artık parçamız belirlenen parametrelerle kaynatılmaya hazırdır.

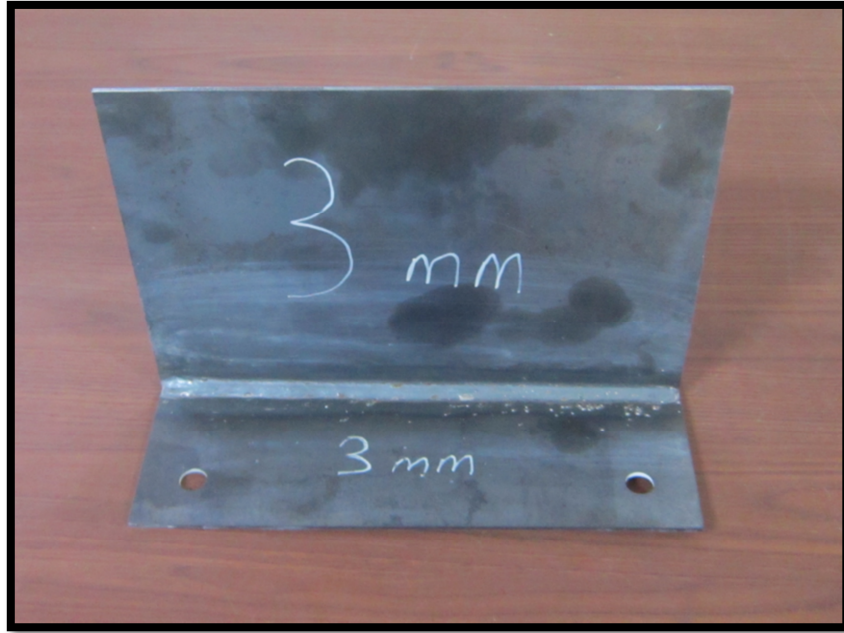


Şekil 9.6: Kaynak öncesi parçanın son hali.

3 mm kalınlığındaki parçalar için kaynak parametreleri ;

Voltaj : 22 V
Amper : 170 A
Kaynak Hızı : 45 cm/min
Parçalar Arası Boşluk : 0.5 mm
Pozisyon : PA

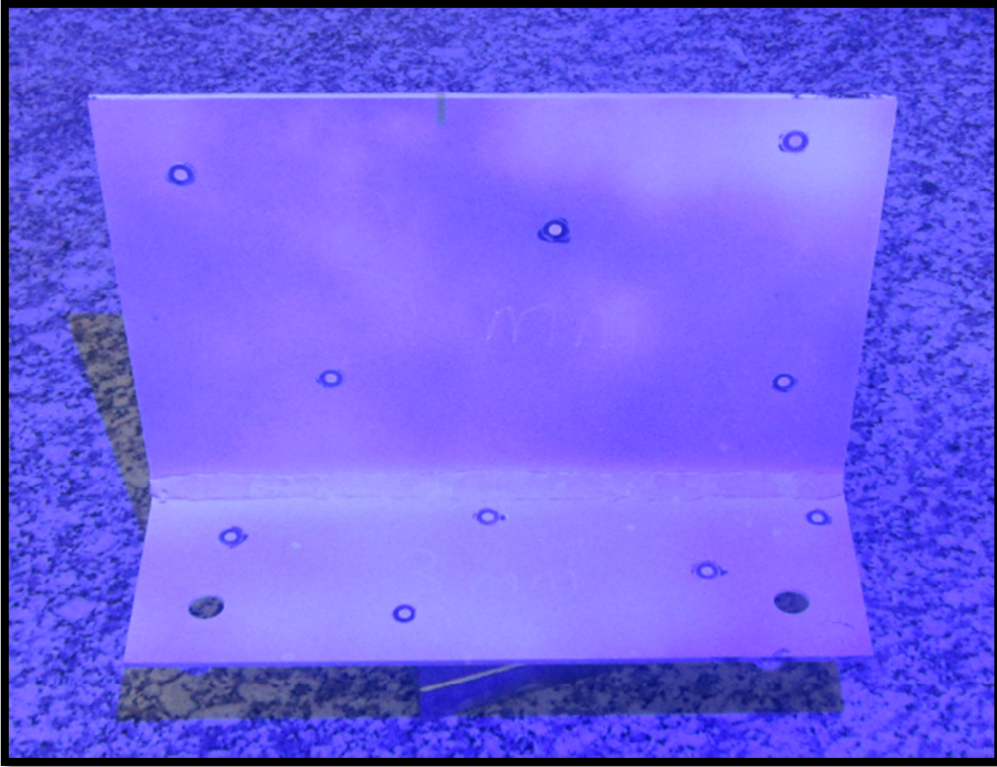
Bu parametrelerle parçamızı kaynatarak kaynak sonrasında yan kısımlara puntalamış olduğumuz parçaları kesiyoruz. Test parçamızın kaynak prosesi sonrasındaki durumunu Şekil 9.7' de görebiliriz. Kaynak prosesini tamamladıktan sonra parçamızın ilk olarak ölçüsel kontrolünü yapacağız. Kaynak sonrasındaki açılma miktarını ölçeceğiz. Sonrasında ise makro kesitler alarak nüfuziyet derinliklerini ölçeceğiz.



Şekil 9.7: Kaynak sonrası parçanın durumu.

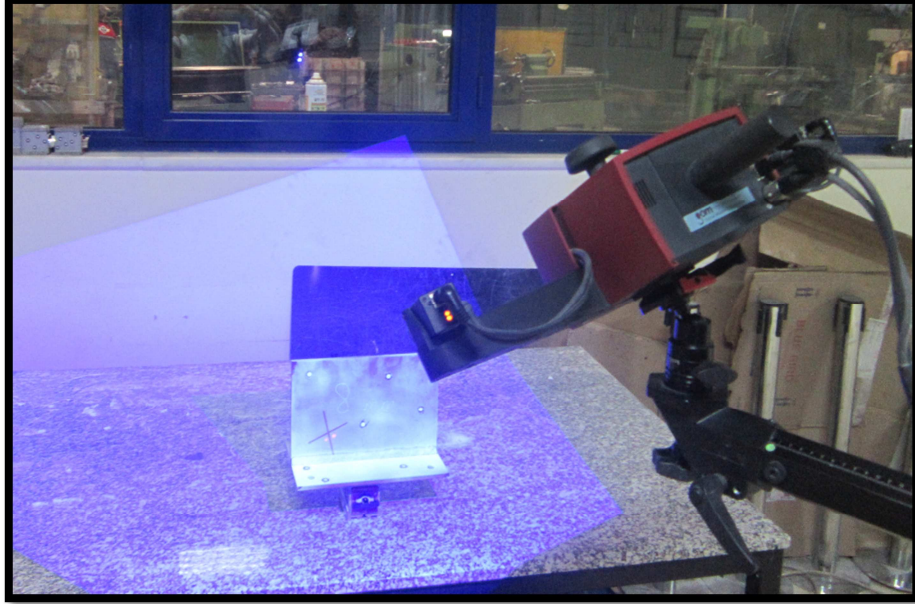
9.2.1.1 Kaynak Sonrası Açısal Değişim Miktarı

Kaynak öncesinde 90° olan (0.02° tolerans ile) parçalar arası açının kaynak sonrasında kaç derece olduğu ölçülür. Bu amaçla kullanacağımız yöntem kaynaklı parçanın GOM cihazı ile taranarak, tarama sonrasında düzlemler arasındaki açının ölçülmesi ve tarama datasının model ile karşılaştırılmasıdır. Parçayı tarama işlemi için hazırlıyoruz. Tarama esnasında kullanılacak referans noktalarını parça üzerine yapıyoruz. Tarama esnasındaki parlamaları önlemek amacıyla da parça toz sprey boya ile beyaz renge boyanır. Şekil 9.8’ de görüldüğü gibi parçamız tarama işlemine hazırdır.



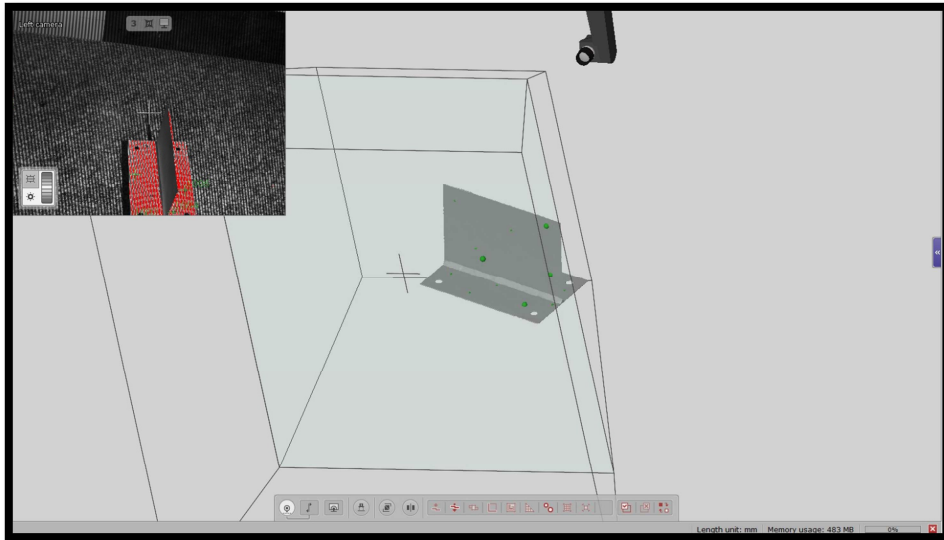
Şekil 9.8: Taramaya hazır parçanın görünümü.

Test parçasının ön hazırlıklarını tamaladıktan sonra tarama işlemine başlıyoruz. Çeşitli açılardan çekimler yaparak parçanın tamamının tarama işlemini tamamlıyoruz. Şekil 9.9’ da tarama esnasından bir görüntü görebiliriz.



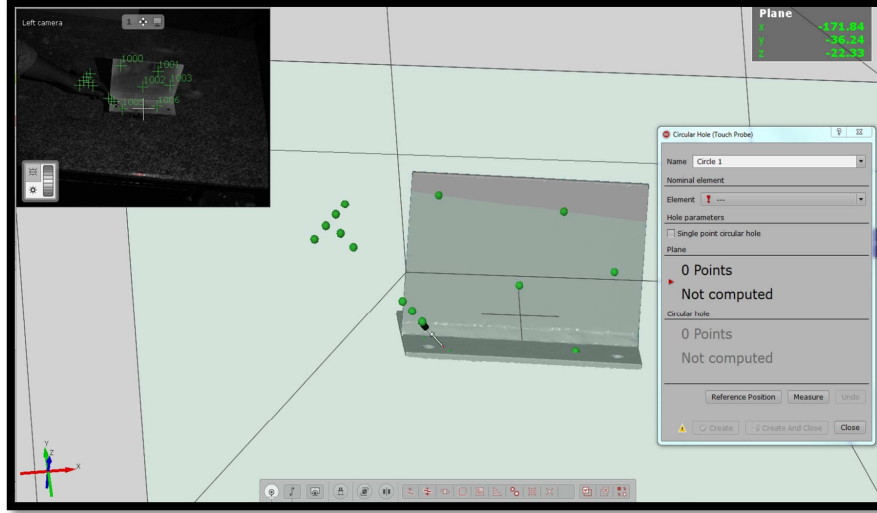
Şekil 9.9: Parçanın tarama esnasında görüntüsü.

Şekil 9.10’ da parçanın devam eden tarama işlemi sırasında alınan bir görüntüyü görebiliriz. Çeşitli açılardan alınan görüntülerle tarama işlemi devam ederken kaynaklı parçanın form yapısı nokta bulutu şeklinde oluşmaktadır.



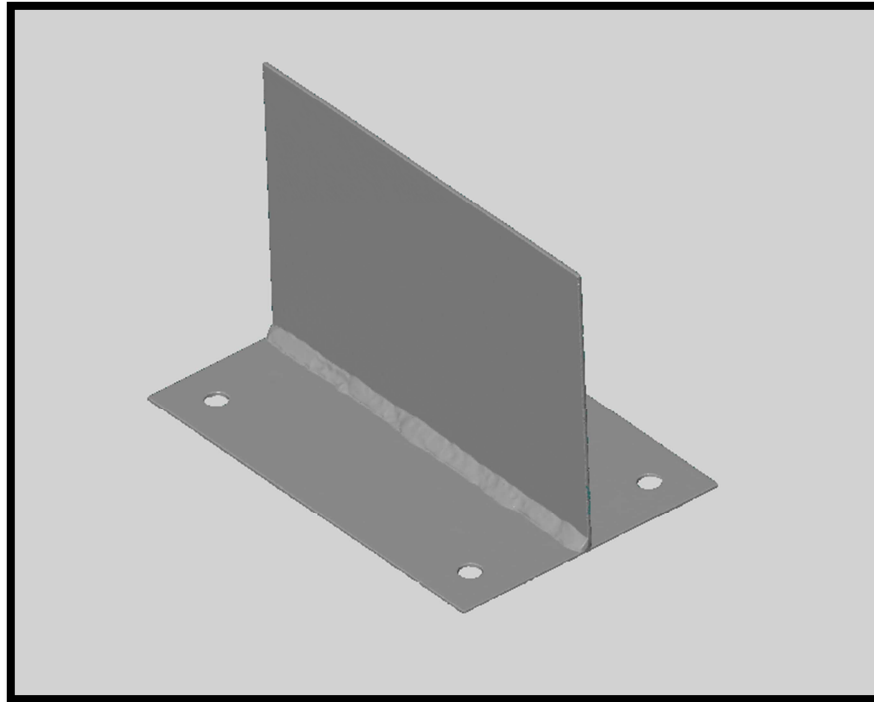
Şekil 9.10: Taranan parçadan bir görüntü.

Şekil 9.11’ de ise parçanın model ile üst üste oturtulması amacıyla kullanılacak referans deliklerin tanımlanmasını görebiliriz. Bu dört delik model ile tarama datasının örtüştürülmesi amacı ile kullanılacaktır.



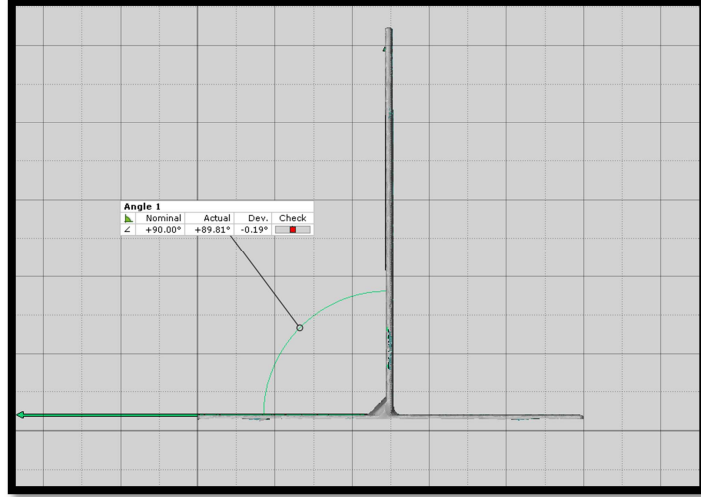
Şekil 9.11: Referans deliklerin tanımlanması.

Deliklerin alınmasından sonra parçanın tarama işlemi tamamlanmıştır. Elde ettiğimiz data Şekil 9.12’ de görüldüğü gibi aslında bir nokta bulutudur. Bu nokta bultunu Mesh şeklinde örerak sonrasında data ile karşılaştıracamız.



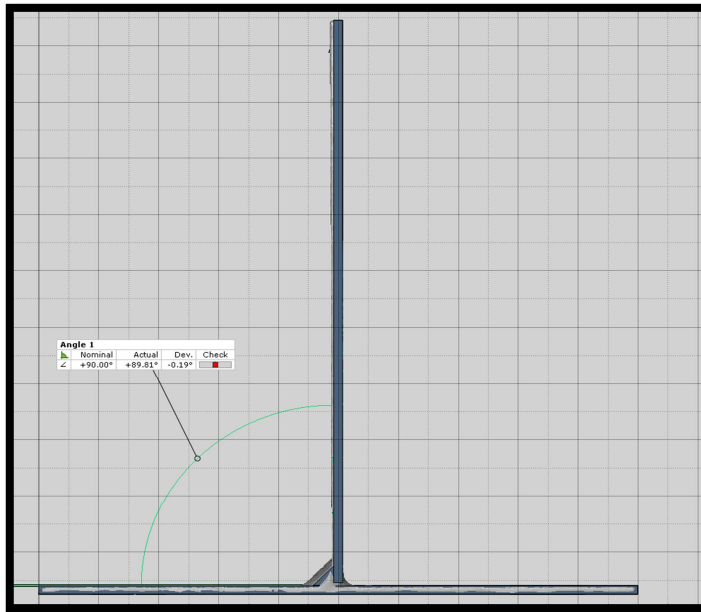
Şekil 9.12: Tarama işlemi tamamlanan parça.

Tarama işlemi tamamlanan 3 mm kalınlıktaki test parçasında kaynak sonrasında açı Şekil 9.13' te görüldüğü gibi 89.81° olarak ölçülmüştür. Simülasyonda ise bu açı 89.90° olarak ölçülmüştür. İki sonucu karşılaştırdığımızda simülasyon sonuçları ve gerçek proses sonuçları arasında 0.09° bir fark görünmektedir.



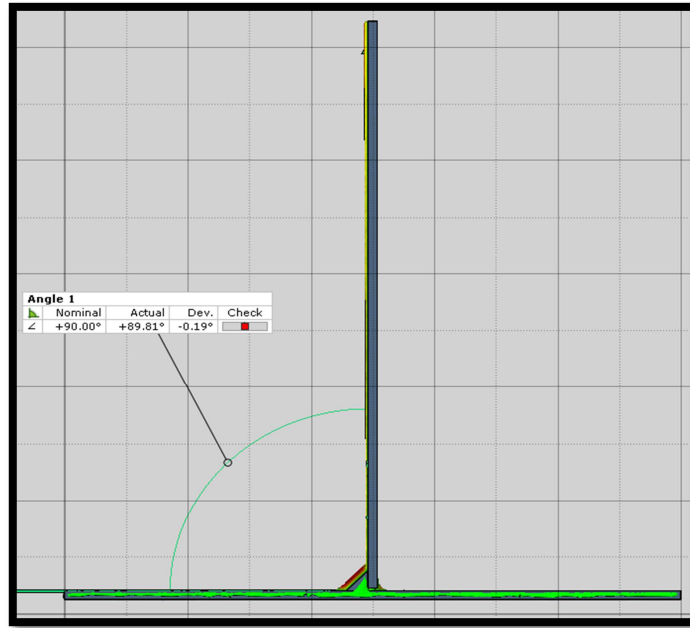
Şekil 9.13: Taranan parçada açısal kontrol.

Tarama datasını Şekil 9.14' teki gibi data ile üst üste çakıştırıldığında kaynak sonrasında oluşan açısal farkı daha net bir şekilde görebiliriz.



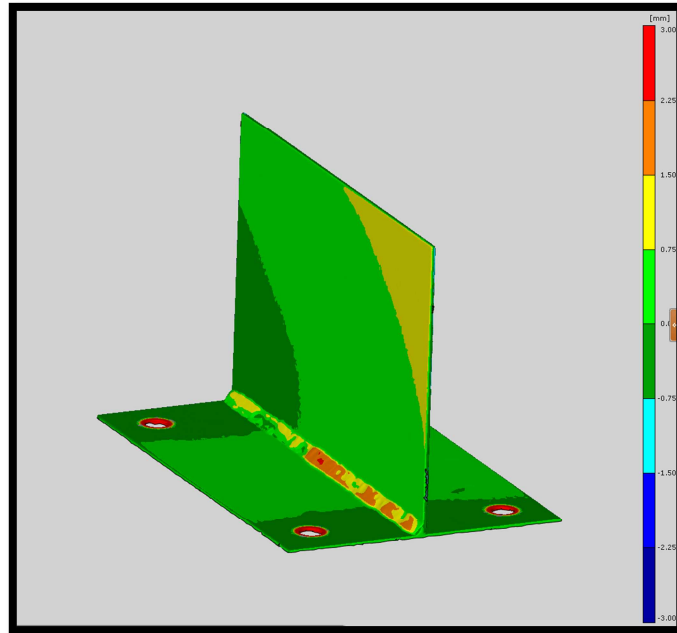
Şekil 9.14: Taranan parçanın data ile çakıştırılması.

Yüzey değışim miktarlarını net bir şekilde görmek için tarama datası ile modeli çakıştırdıktan sonra Şekil 9.15' teki gibi renklendirerek görebiliriz.



Şekil 9.15: Taranan parçanın renklendirilmesi.

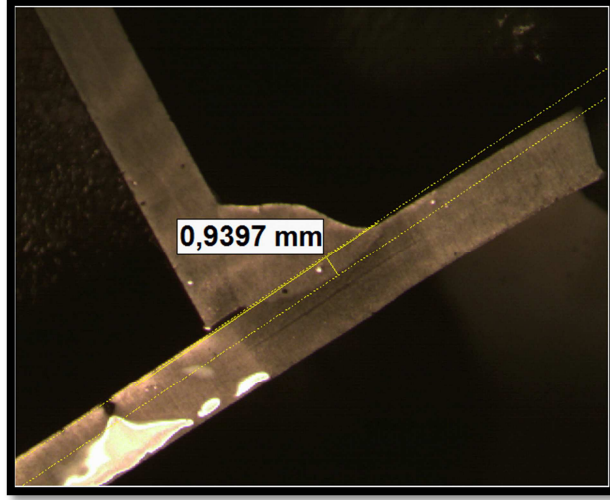
Şekil 9.16 'da renk dağılımına göre bölgelerin dataya göre ne kadar değıştiğini görebiliriz. Bu şekilde istediğimiz noktanın modele göre ne kadar sapma gösterdiğini net bir şekilde görme şansımız olmaktadır.



Şekil 9.16: Taranan parçada renklere göre sapmalar.

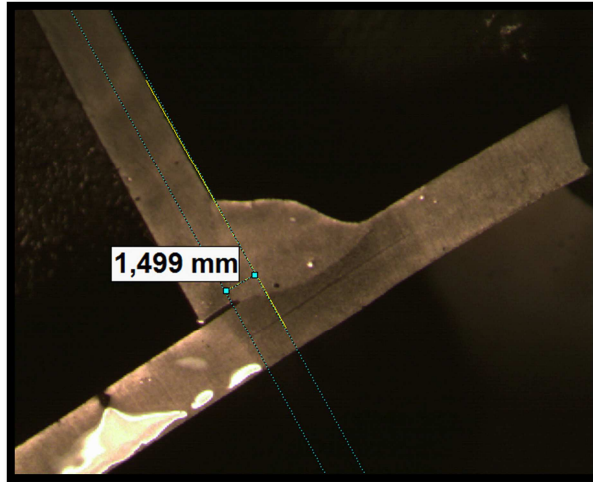
9.2.1.2 Kaynak Sonrası Nüfuziyet Derinlikleri

Kaynaklanan iki parçadaki nüfuziyet miktarları ve iki parça arasındaki ara mesafe değişimini parçadan aldığımız makro kesit ile inceleyeceğiz. Kaynak sonrasında attaki parçadaki nüfuziyet oranına bakacak olursak bu değer Şekil 9.17’de görüldüğü gibi 0.9 mm ile 1 mm arasında değişmektedir. Simülasyon sonuçlarında ise bu değer ortalama 1 mm civarında idi.



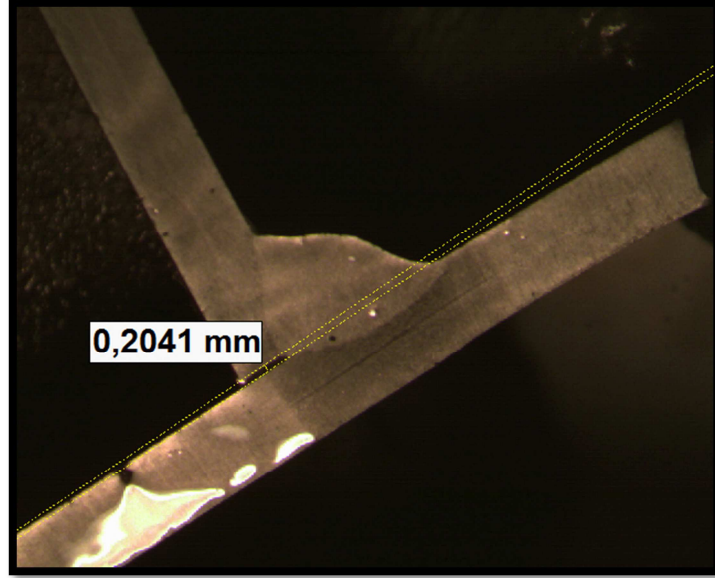
Şekil 9.17: Alt parçadaki nüfuziyet miktarı.

Üst parçadaki nüfuziyet derinliğini ölçecek olursak buradaki değerler ise Şekil 9.18’de görüldüğü gibi 1.4 ile 1.6 mm arasında değişmektedir. Simülasyon sonuçlarında ise bu değer ortalama olarak 1.5 civarında değiştiğini görmekteyiz.



Şekil 9.18: Üst parçadaki nüfuziyet miktarı.

Kaynak öncesinde iki malzeme arasındaki boşluk 0.5 mm olarak bırakılmıştı. Kaynak sonrasında iki malzeme arasındaki boşluğu ölçecek olursa Şekil 9.19’ da görüldüğü gibi bu değer ortalama olarak 0.204 mm civarında gelmektedir. Simülasyon sonuçlarında ise bu değer 0.176 mm civarında gerçekleşmişti.



Şekil 9.19: Parçalar arası boşluk miktarı.

9.2.2 5 mm’ lik Parçanın Kaynağı ve Sonuçları

Parçamıza yine başlangıç ve bitiş hatalarını önlemek amacıyla Şekil 9.20’ de ki gibi kulakları puntalayarak kaynak prosesine hazır hale getiriyoruz. Bu parça için kullanacağımız kaynak parametreleri şu şekildedir;

Voltaj : 22 V
Amper : 170 A
Kaynak Hızı : 45 cm/min
Parçalar Arası Boşluk : 1 mm
Pozisyon : PA



Şekil 9.20: Parçanın kaynak öncesi durumu.

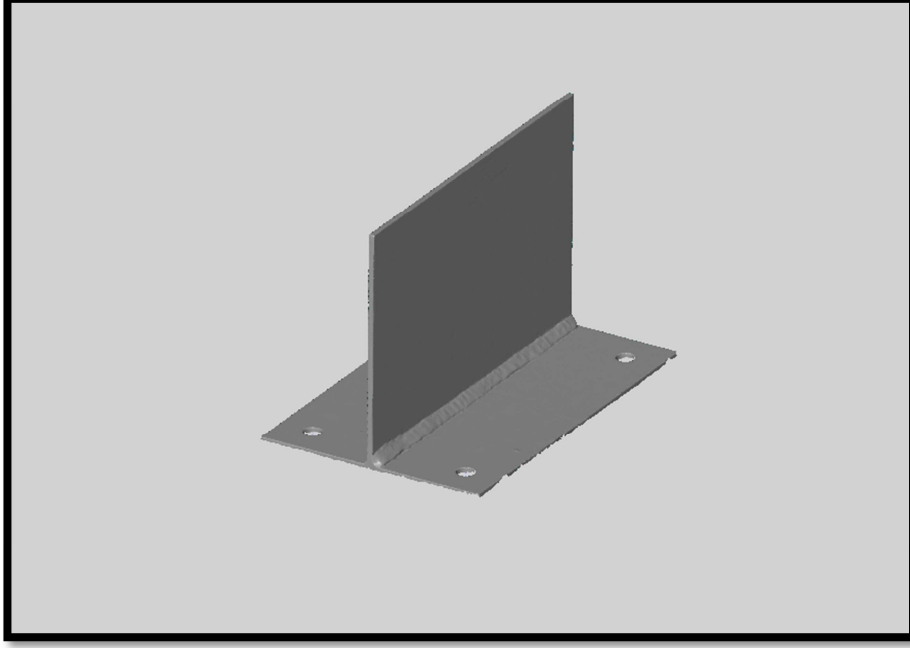
Kaynak sonrasındaki parçamızı Şekil 9.21’ de görebilirsiniz. Şimdi açısal değişim miktarını ve parçalardaki nüfuziyet derinliklerini ölçeceğiz.



Şekil 9.21: Parçanın kaynak sonrası durumu.

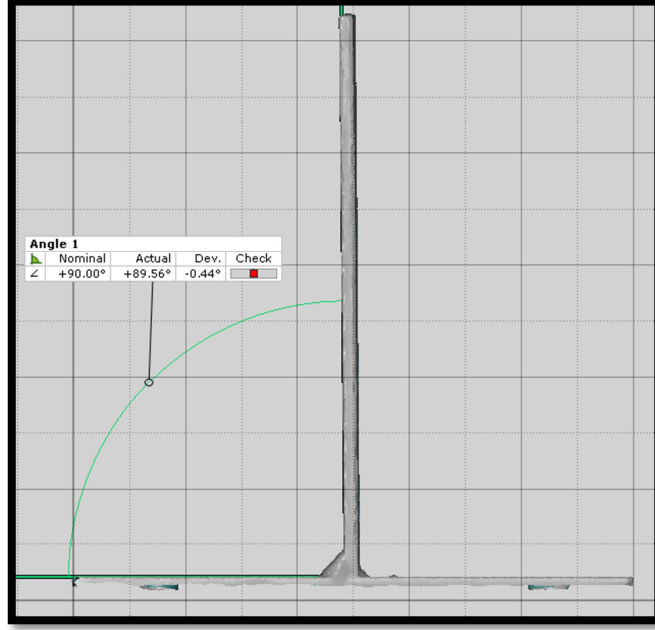
9.2.2.1 Kaynak Sonrası Açısal Değişim Miktarı

Bir önceki parçamızda olduğu gibi buradada kaynak öncesinde 90° olan (0.02° tolerans ile) parçalar arası açının kaynak sonrasında kaç derece olduğunu ölçeceğiz. Parçamızın taraması için ön hazırlıkları tamamladıktan sonra tarama işlemine başlıyoruz. Şekil 9.22' de parçamızın taranmış halini görebiliriz.



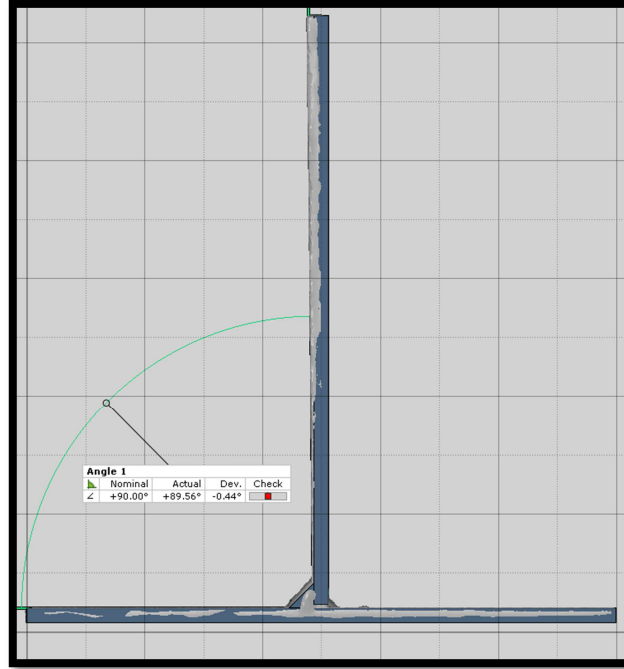
Şekil 9.22: Parçanın tarama datası.

Şekil 9.23' te görüldüğü gibi parçalardan alınan düzlemler arasındaki açı 89.56° olarak ölçülmüştür. Parçamızın kaynak öncesinde 90° olan açısı kaynak sonrasında 89.56° olmuştur. Simülasyon sonuçlarına baktığımızda ise bu açısal değişim 89.59° olarak gerçekleşmiştir. Gerçek proses ile simülasyon arasındaki fark yalnızca 0.03° değerinde bir fark vardır.



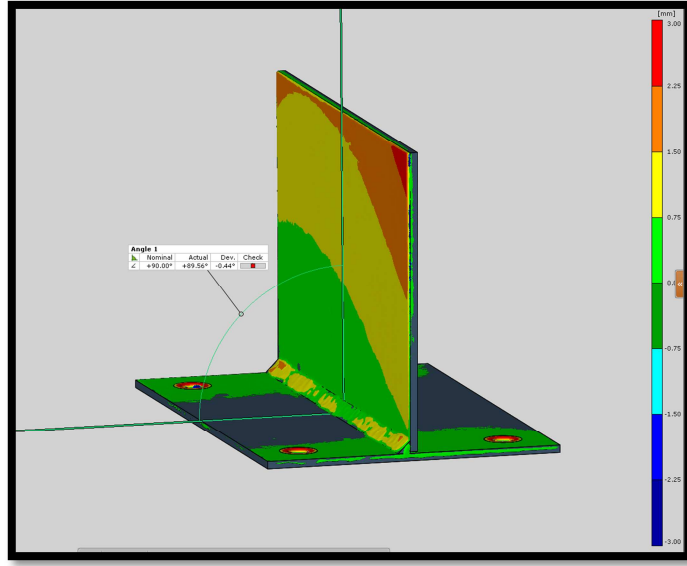
Şekil 9.23: Parçadaki açısal değişim miktarı.

Tarama datası ile modelimizi yine referans delikleri kullanarak üst üste çakıştırdığımızda gerçek parçadaki açısal değimin dataya göre durumunu daha net bir şekilde görebiliriz. Şekil 9.24' te tarama datasının model üzerine oturtulmuş haldeki görüntüsünü görebiliriz.



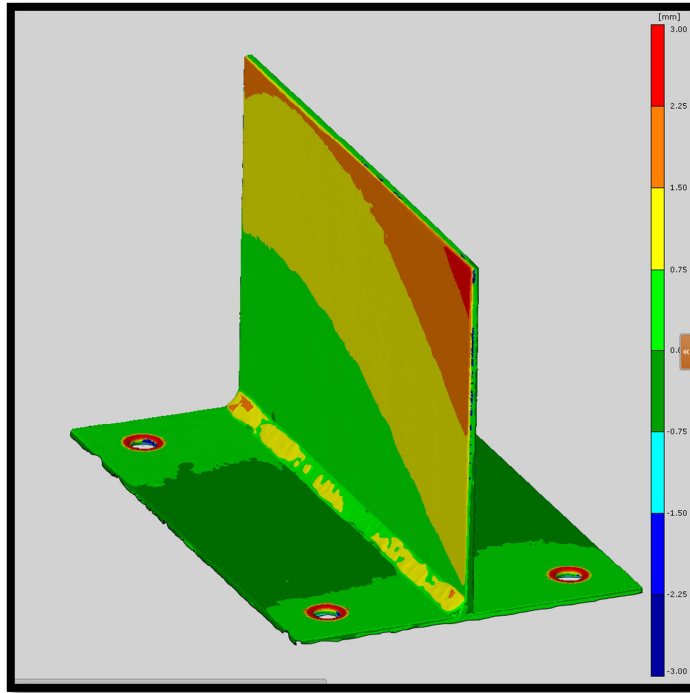
Şekil 9.24: Parçanın data ile çakıştırılması.

Şekil 9.25’ te yüzey değişimlerinin renklere göre dağılımını görebiliriz. Üst parçada yukarı doğru gidildikçe değişim miktarı artmaktadır.



Şekil 9.25: Parçanın renklendirilmesi.

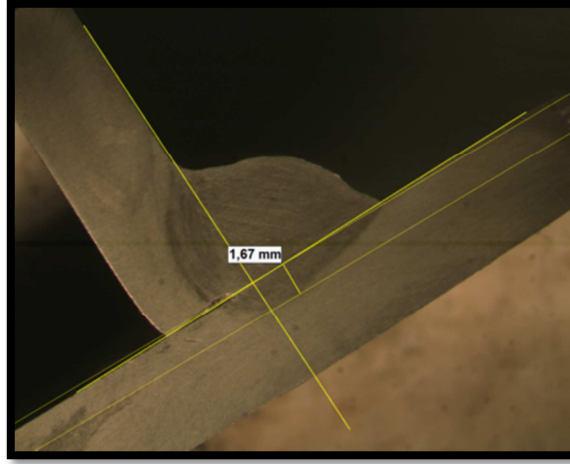
Parçamızda kaynak sonrasında meydana gelmiş yüzey değişimlerini Şekil 9.26’ daki gibi genel olarak görebiliriz.



Şekil 9.26: Parçadaki sapmaların renklere göre dağılımı.

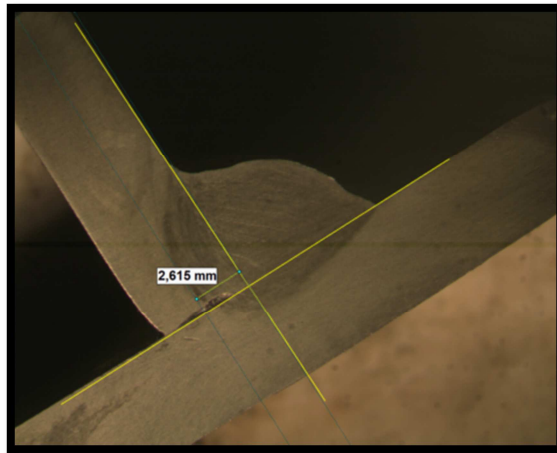
9.2.2.2 Kaynak Sonrası Nüfuziyet Derinlikleri

Kaynaklanan iki parçadaki nüfuziyet miktarları ve iki parça arasındaki ara mesafe değişimini parçadan aldığımız makro kesit ile inceleyeceğiz. Kaynak sonrasında alttaki parçadaki nüfuziyet oranına bakacak olursak bu değer Şekil 9.27’de görüldüğü gibi 1.5 mm ile 1.7 mm arasında değişmektedir. Simülasyon sonuçlarında ise bu değer ortalama 1.5 mm civarında idi.



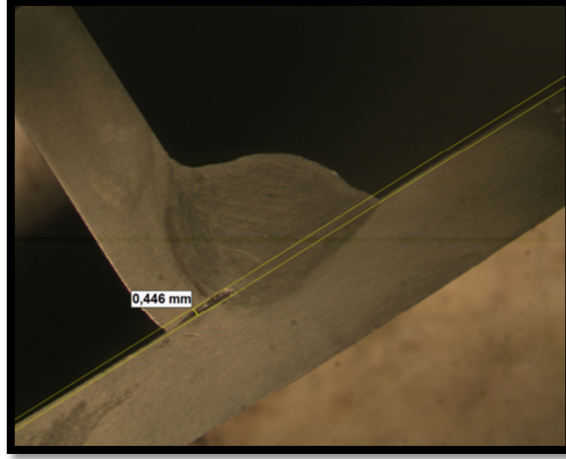
Şekil 9.27: Alt parçadaki nüfuziyet miktarı.

Üstteki parçada ise nüfuziyet miktarı iki parçanın ara mesafesi nedeniyle daha fazladır. Bu kısımdaki nüfuziyet miktarı ise Şekil 9.28’de görüldüğü gibi 2.5 mm ile 2.7 mm arasında değişmektedir.



Şekil 9.28: Üst parçadaki nüfuziyet miktarı.

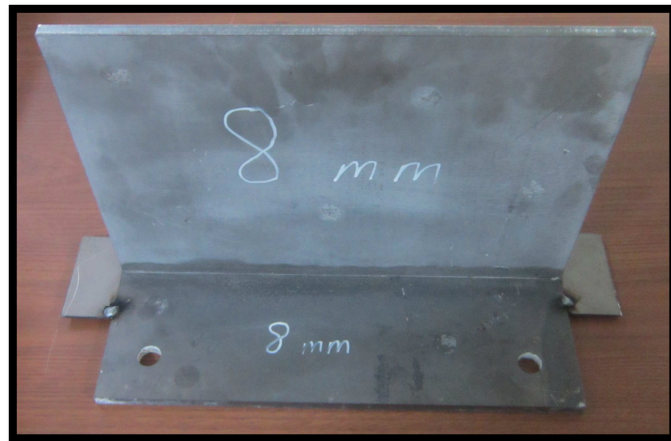
Kaynak öncesinde iki parça arasında bırakılan 1 mm boşluk kaynak sonrasında Şekil 9.29’ da görüldüğü gibi 0. 446 mm’ye düşmüştür. Simülasyon sonuçlarında bu değer 0.479 mm idi.



Şekil 9.29: Parçalar arası mesafe miktarı.

9.2.3 8 mm’ lik Parçanın Kaynağı ve Sonuçları

Parçalara, kaynak esnasında bitiş ve başlangıç hatalarını ortadan kaldırmak amacıyla her iki tarafına kulak şeklinde parçalar kaynatılmıştır. Şekil 9.30’ da parçanın kaynak öncesindeki son halini görebiliriz. Artık parçamız belirlenen parametrelerle kaynatılmaya hazırdır.



Şekil 9.30: Parçanın kaynak öncesi son halini.

8 mm kalınlığındaki parçalar için kaynak parametreleri ;

Voltaj : 30 V
Amper : 200 A
Kaynak Hızı : 28 cm/min
Parçalar Arası Boşluk : 1 mm
Pozisyon : PA

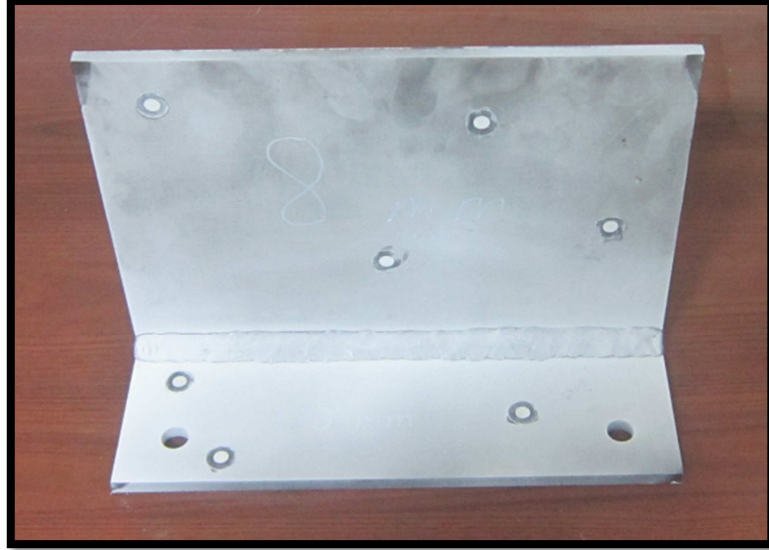
Bu parametrelerle parçamızı kaynatarak kaynak sonrasında yan kısımlara puntalamış olduğumuz parçaları kesiyoruz. Test parçamızın kaynak prosesi sonrasında durumunu Şekil 9.31' de görebiliriz. Kaynak prosesini tamamladıktan sonra parçamızın ilk olarak ölçüsel kontrolünü yapacağız. Kaynak sonrasında açısal değişim miktarını ölçeceğiz. Sonrasında ise makro kesitler alarak nüfuziyet derinliklerini ölçeceğiz.



Şekil 9.31: Parçanın kaynak sonrası görünümü.

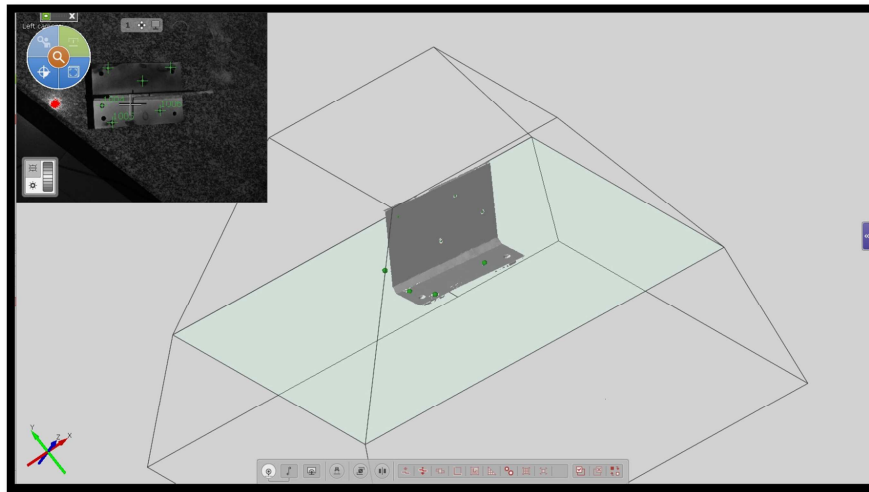
9.2.3.1 Kaynak Sonrası Açısal Değişim Miktarı

Son olarak 8 mm kalınlıktaki test parçamız şekil 9.32’ de görüldüğü gibi tarama işlemine hazırdır.



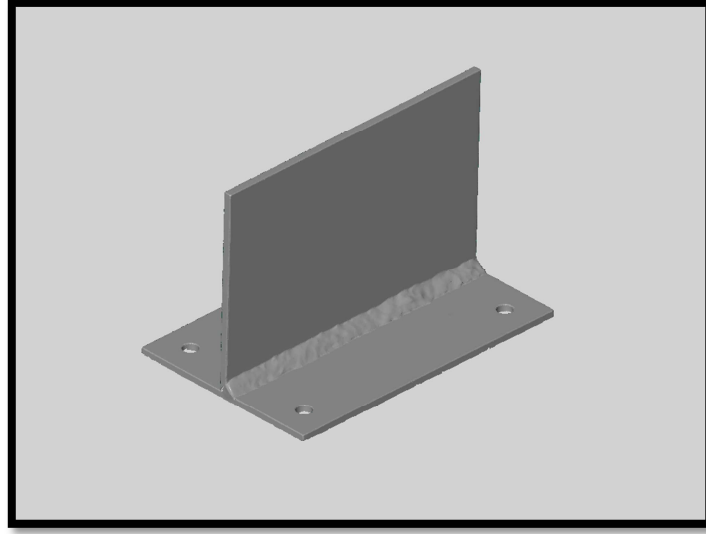
Şekil 9.32: Parçanın tarama işlemine hazır durumu.

Şekil 9.33’ de parçanın devam eden tarama işlemi sırasında alınan bir görüntüyü görebiliriz. Çeşitli açılardan alınan görüntülerle tarama işlemi devam ederken kaynaklı parçanın form yapısında toz bulutu şeklinde oluşmaktadır.



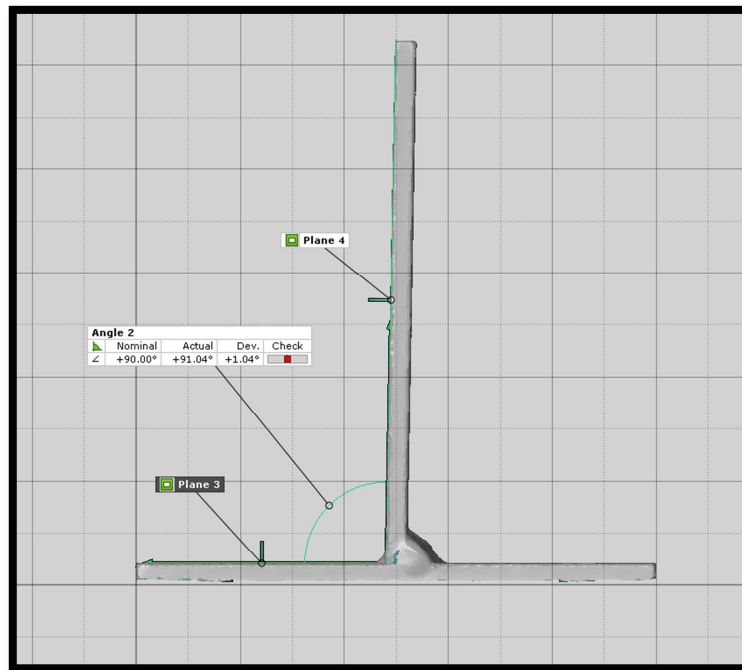
Şekil 9.33: Tarama işlemi sırasında yazılımlımdan bir görüntü.

Deliklerin alınmasından sonra parçanın tarama işlemi tamamlanmıştır. Elde ettiğimiz data aslında Şekil 9.34’ te görüldüğü gibi bir toz bulutudur.



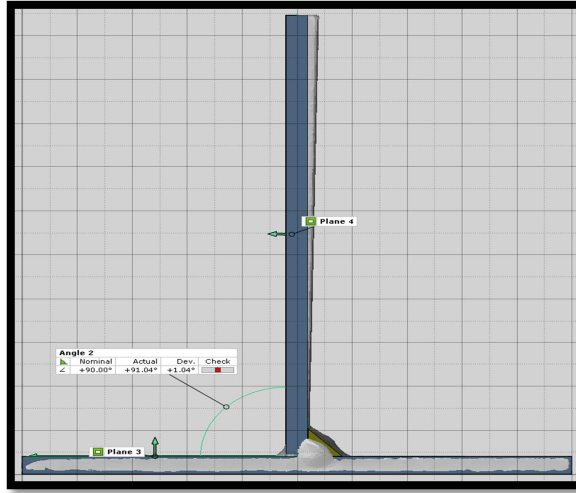
Şekil 9.34: Tarama işlemi tamamlanan parça.

Parçamızı tarama işelmini tamamladıktan sonra yüzeylerin her noktasını kapsayacak düzlemler atarak arasındaki açıyı ölçebiliriz. Şekil 9.35’ de alınan düzlemler arasındaki açı değerini görebiliriz. Kaynak sonrası açı 91.04° olmuştur.



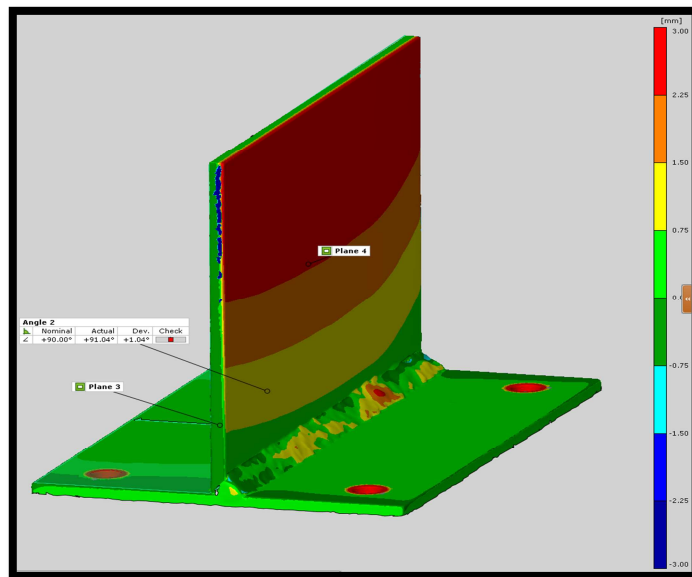
Şekil 9.35: Kaynak sonrası parçada meydana gelen açısal değişim.

Model ile tarama datasını referans deliklerini kullanarak üst üste çakıştırdığımızda açısal sapmayı daha net bir şekilde görebiliriz. Şekil 9.36' da yukarı doğru gidildikçe parçalar arası değişim net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 9.36: Kaynak sonrası tarama datası ve modelin çakıştırılması.

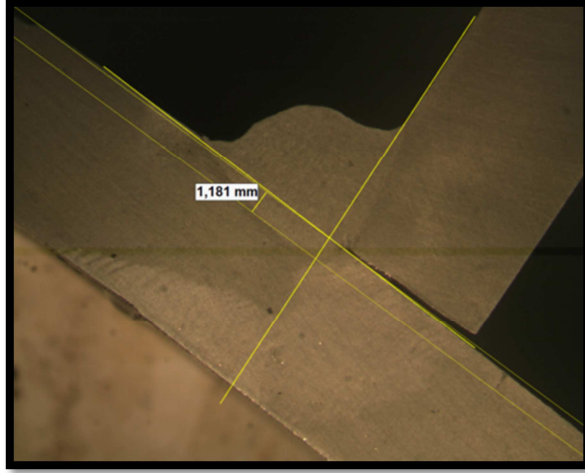
Tarama datasının modele göre olan yüzey değişim miktarlarını görebilmek amacıyla değişim olan kısımları renklendirirsek nerede ne kadar değişim olduğunu daha net bir şekilde görebiliriz. Şekil 9.37 'de kaynak sonrası parçada meydana gelen ölçüsel deformasyonlar görülebilmektedir.



Şekil 9.37: Kaynak sonrasında deformasyonların görülmesi.

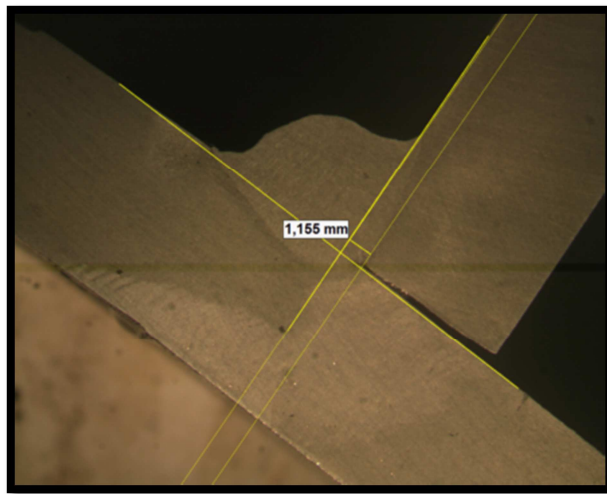
9.2.3.2 Kaynak Sonrası Nüfuziyet Derinlikleri

Kaynak işlemi sonrasında alttaki parçadaki nüfuziyet derinliği Şekil 9.38' de 1 ile 1.2 mm arasında gelmektedir.



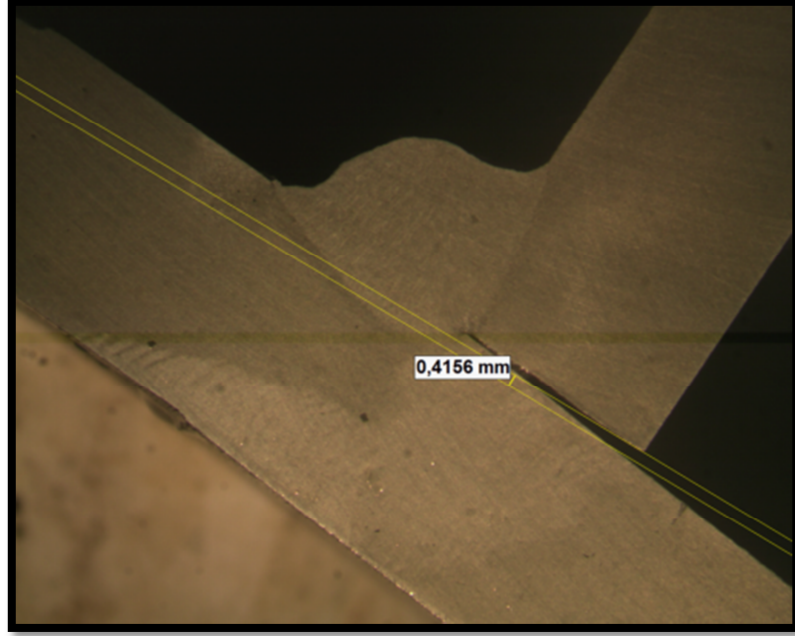
Şekil 9.38: Alttaki parçadaki nüfuziyet miktarı.

Alt parçada ise yine nüfuziyet değeri Şekil 9.39'da görüldüğü gibi 1 ile 1.2 mm arasında değişmektedir. Simülasyon sonuçlarında ise bu değerler ortalama 1.1 mm civarında idi.



Şekil 9.39: Üstteki parçadaki nüfuziyet miktarı.

Kaynak öncesinde 1 mm olan ara mesafe kaynak sonrasında Şekil 9.40' ta görüldüğü gibi 0.415 civarına inmiştir. Simülasyon sonuçlarında bu değer 0.316 mm civarında idi.



Şekil 9.40: Parçalar arası boşluk miktarı.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kaynak öncesi yapılan proses simülasyonlarında en önemli konunun, gerçek proses koşullarının olabildiğince simülasyon ortamına yansıtılması gerekliliği olduğuna değinildi. Bu sağladığında simülasyon sonuçları ile gerçek proses sonuçlarının birbirine göre tutarlılık seviyesi artacaktır. Çalışmada olabildiğince bu sağlamaya çalışıldı. Aynı malzemelerin farklı kalınlıkları kullanıldı. Kalınlığa göre bazı kaynak parametreleri değışti. Parçaların konumları, bağlanma şekilleri, ortam koşulları ve bunlar gibi diğer proses unsurlarını ise her parça için aynı tutuldu. Farklı üç kalınlığı içeren parçalara yapılan simülasyon ile parçalardaki ölçüsel değışimler, nüfuziyet oranları, iç yapıdaki değışimler, kalıntı iç gerilmeler ve kaynak esnasındaki sıcaklık dağılımını sonuçları alındı. Sonrasında ise aynı parametreleri kullanarak kaynak prosesi gerçekleştirildi. Simülasyon sonuçlarından elde ettiğimiz parçalardaki nüfuziyet miktarları, ölçüsel değışimler gibi sonuçları gerçek proseste elde ettiğimiz sonuçlar ile karşılaştırdık.

Tüm kaynaklı imalatlarda imalat sırasında ve imalat sonrasında parçalarda çeşitli değışimler meydana gelmektedir. Bunlar proses kalitesine doğrudan etki eden olaylardır. Bu değışimlerden en önemlileri, parçalarda kaynak sonrası meydana gelen deformasyonlar, iç yapı değışiklikleri, kaynak sonrasında istenilen nüfuziyet değeri, kalıntı gerilmeler gibi unsurlardır. Bu konularda istenilen sonuçlar alınmadığı zaman ciddi kalite problemleri ile karşılaşılabilir. Burada oluşacak sorunları gidermek mümkün olmayabilir. Bu nedenle de imalatı tamamlanan parça hurda olabilir. Onarılabilen parçalarda ise ciddi bir zaman kaybı ve maliyet ortaya çıkmaktadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda kaynak prosesini gerçekleştirmeden önce proses sonuçlarının neler olabileceği konusunda bir ön bilgi sahibi olmak, istenmeyen sonuçlarla karşılaşma riskimizi oldukça azaltacaktır. İşte bu noktada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak proses öncesi yapılacak olan simülasyonlar çok önemli konuma gelmektedir.

Yapılmış olan bu çalışmada simülasyon sonucunda elde edilmiş nüfuziyet değeri ve parçaların çarpılma eğilimlerinin yönleri, gerçekte yapılmış olan

kaynaklı test parçalarının sonuçları ile paralel şekilde sonuçlanmıştır. Simülasyon sonuçlarını aldıktan sonra proses aynı parametreler ışığında gerçekleştirildi ve simülasyondaki sonuçlara oldukça yakın sonuçlar elde etmiş olduk. Böylece herhangi bir düzeltme veya proses parametrelerinde değişikliğe ihtiyaç duyulmuş olsaydı, parçalar imalata başlamadan, simülasyon evresinde bu müdahaleleri yaparak olası mümkün sorunları en azami dereceye indirilmiş olurdu. Böylece ciddi bir zaman kaybı ve olası onarım maliyetlerini engelleyecek ve hatta parçaların hurdaya çıkmasını da engellemiş olurdu. Simülasyonlarla birlikte imalat kalitesi artırılarak, imalatta yapacağımız optimizasyon çalışmalarını bilgisayar ortamında yapabilecek imkan elde edilmiş olur.

11. KAYNAKLAR

[1] Çelik, Y., “ Kaynak işleminde meydana gelen kalıcı gerilmelerin ve çarpılmaların bilgisayar simülasyonu “ , Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2011).

[2] SLV München, *Uluslararası kaynak mühendisliği eğitimi notları*, Odtü kaynak teknoloji merkezi, Ankara, (2010).

[3] Anık, S. ve Vural, M., *Gaz altı ark kaynağı*, Kaynak teknolojisi eğitim araştırma ve muayene enstitüsü: Gedik eğitim vakfı, 2-3, (1990).

[4] Anık, S. ve Tülbentçi, K., *Gaz altı kaynak tekniği*, Kaynak teknolojisi eğitim araştırma ve muayene enstitüsü: Gedik eğitim vakfı, (1990).

[5] Tülbentçi, K., *Mig-Mag eriyen elektrod ile gazalyı kaynağı*, Kaynak teknolojisi eğitim araştırma ve muayene enstitüsü: Gedik eğitim vakfı, 1-7-30-50-60, (1990).

[6] Yükler, İ., *Çok pasolu köşe kaynaklarında çatlamlar*, Böhler kaynak Dünyası, 9-10, (1998).

[7] Anık, S., Tülbentçi, K., ve Kaluç, E., *Örtülü elektrot ile ark kaynağı*, İstanbul, (1991).

[8] Michaleris, P., Dantzing, J., and Tortorelli, D., “*Minimization of welding residual stress and distorsion in Large structures*”, *Welding Journal*, 77- 78, (1999).

[9] Deo, M.V. and Michaleris, P., “*Mitigation welding induced buckling distortion using transient thermal tensioning*”, *Science and Technology of welding and joining*, 1-17, (2002).

[10] Hackmair, C., Werner, E., and Ponisch, M., “Application of welding simulation for chassis components within the development of manufacturing methods, *Computational Materials Science*”, 27-28, (2003).

[11] Tsai, C.L., Park, S.C., and Cheng, W.T., “Weiding distortion of a thin-plate panel structure, *Welding research supplement*”, 155-156, (1999).

[12] Voutchkov, I., Keane, A.J., Bhaskar, A., and Olsen, T.M., “*Weld sequence optimization: The use of surrogate models for solving sequential combinatorial problems*”, *Computer Methods application mechanical engineering*, 193-194, (2005).

[13] Tseng, K.H, and Chou, C.P., “The study of nitrogen in argon gas on the argular distorsion of austenitic stainless steel weldments”, *Journal of materials processing tecnology*, 140-142, (2003).

[14] Benli, S., “ Kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmelerin incelenmesi “, Yüksek lisans tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, 12-25, İzmir, (2004).

[15] Vural, U., “ Kaynaklı imalat sonrası oluşan distorsiyonları sonlu elemanlar yöntemi ile analizi”, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, 5-18-29, İstanbul, (2009).