

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

**ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN
ÇELİK MALZEMELERİN NÜMERİK OLARAK
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferdi KAYA

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Necat ALTINKÖK

Haziran 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARK KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN
ÇELİK MALZEMELERİN NÜMERİK OLARAK
MODELLENMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Ferdi KAYA

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 09/06/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Necat ALTINKÖK
Jüri Başkanı


Yrd. Doç. Dr. Mesut DURAT
Üye


Yrd. Doç. Dr. Uğur ÖZSARAÇ
Üye

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok değerli danışmanlarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Necat ALTINKÖK ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mesut DURAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın deneysel aşamasında tozaltı kaynağının atılmasında yardımcı olan Modül Çelik Yapı'nın müdürü Metin OYSU'ya, sıcaklık ölçümlerindeki katkılarından dolayı Arş. Gör. Ömer SAVAŞ'a, makro yapı fotoğraflarının çekilmesinde yardımcı olan Arş. Gör. Murat ÇOLAK'a, deneysel çalışmalarına yaptığı önemli katkı ve yardımlarından dolayı Öğr. Gör. Gürhan DENİZ'e, malzemelerin modellenmesinde yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Ergün NART'a, ve ABAQUS 6.9-1 lisanslı programı kullandıran İnşaat Fakültesi öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu güne kadar her zaman yanımda olan annem Ayfer KAYA'ya ve babam Zekeriya KAYA'ya, ayrıca çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım. “2009-50-01-019” kodlu ve “Ark Kaynak Yönetimiyle Birleştirilen Çelik Malzemelerin Nümerik Olarak Modellemesi” isimli proje ile çalışmalarımızı destekleyen Sakarya Üniversitesi ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Sakarya, Haziran 2010

Ferdi KAYA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Kaynak ve Yöntemlerinin Önemi	1
1.2. Kaynak Yönteminde Modellemenin Önemi	1

BÖLÜM 2.

MATERYAL ve KAYNAK YÖNTEMLERİ	4
2.1. Kaynak İşleminin Tanımı.....	4
2.2. Ark Kaynak Yöntemleri.....	4
2.2.1. Tozaltı kaynağı.....	5
2.2.1.1. Tozaltı kaynağının çalışma prensibi.....	6
2.2.1.2. Tozaltı kaynak telleri.....	7
2.2.1.3. Tozaltı kaynak tozları.....	8
2.2.1.4. Tozaltı kaynağının kullanım alanları	9
2.2.1.5. Tozaltı kaynağının avantajları	10
2.2.1.6. Tozaltı kaynağının dezavantajları	11
2.2.2. MAG gazaltı kaynağı	11
2.2.2.1. Mag kaynak Torçları	13
2.2.2.2. Koruyucu gazlar	14

2.2.2.3. MAG kaynağının avantajları.....	15
2.2.2.4. Mag kaynağının dezavantajları	15
2.2.3. TIG kaynağı	16
2.2.3.1. TIG kaynak torçları	19
2.2.3.2. TIG kaynak elektrotları	21
2.2.3.3. Koruyucu gazlar	22
2.2.3.4. TIG kaynağının avantajları	24
2.2.3.5. TIG kaynağının dezavantajları.....	25
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMANLAR METODU.....	26
3.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihsel Gelişimi.....	27
3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Esasları	28
3.3. Sonlu Elemanlarla Modelleme	29
3.3.1. Geometrinin modellemesi	29
3.3.2. Eleman seçimi	30
3.3.3. Yükler.....	31
3.3.4. Sınır koşulları	31
3.3.5. Sonuçların yorumlanması.....	32
3.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları.....	32
3.5. Abaqus Sonlu Elemanlar Yazılımı.....	33
3.5.1. Programın bölümleri	34
3.5.2. Programın çalıştırılması	35
3.5.3. Katı modelin oluşturulması	36
3.5.4. Malzeme girişi	38
3.5.5. Sınır şartların ve yüklerin tanımlanması	39
3.5.6. Parçanın (mesh) bölünmesi	40
3.5.7. İş (job) menüsü.....	41
3.5.8. Analiz sonrası işlemler (postprocessor) menüsü.....	42
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	43
4.1. Kaynak Malzemesinin Özellikleri.....	43

4.2. TIG Kaynağı.....	43
4.3. MAG Kaynağı.....	45
4.4. Tozaltı Kaynağı.....	46
4.5. Numunelerin Hazırlanması.....	48
4.6. Kaynaklı Parçanın Geometrik Modelinin Oluşturulması.....	49
4.6.1. Malzeme tanımlama.....	50
4.6.2. Mesh işlemi.....	52
4.6.3. Analiz tipi seçimi.....	53
4.6.4. Temas özelliklerinin belirlenmesi.....	53
4.6.5. Taşınım özelliklerinin belirlenmesi.....	55
4.6.6. Sıcaklık değerlerinin girilmesi.....	56
4.6.7. Analizi başlatma.....	57
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME.....	58
5.1. TIG Kaynak Yöntemi.....	58
5.1.1. TIG kaynağının mikro ve makro yapı incelemeleri.....	58
5.2. Tozaltı kaynağı.....	59
5.2.1. Tozaltı kaynağının mikro ve makro yapı incelemeleri.....	60
5.3. MAG Kaynağı.....	60
5.3.1. MAG kaynağı mikro ve makro yapı incelemeleri.....	61
5.4. Modellenen Kaynakların Termal Analizleri.....	62
5.4.1. MAG kaynağı.....	62
5.4.2. Tozaltı kaynağı.....	66
5.4.3. TIG kaynağı.....	69
BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA ve ÖNERİLER.....	74
6.1. Sonuçlar.....	74
6.2. Öneriler.....	75
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ITAB	: Isının tesiri altındaki bölge
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
SEM	: Sonlu elemanlar metodu
AWS	: Amerikan kaynak topluluğu
mm	: Minimetre
cm	: Santimetre
m	: Metre
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
A	: Amper
V	: Volt
D	: Nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör
R	: Yük vektörü
K	: Sabitler matrisi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Tozaltı kaynak yönteminin şematik gösterimi	7
Şekil 2.2.	Gazaltı kaynak makinasının şematik gösterimi	12
Şekil 2.3.	Hava soğutmalı kuğu boynu tür bir torç kesiti ve torç bağlantı paketi	13
Şekil 2.4.	TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi	17
Şekil 2.5.	TIG kaynak donanım şeması	18
Şekil 2.6.	TIG kaynak torcunun parçaları	20
Şekil 3.1.	Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar	27
Şekil 3.2.	Bir elemana ait deplasmanlar	29
Şekil 3.3.	Abaqus/Cae programının ara yüzü	34
Şekil 3.4.	Abaqus/Cae çalışma ekranı	36
Şekil 3.5.	Abaqus/Cae katı model oluşturma menüsü	37
Şekil 3.6.	Abaqus/Cae çizin ekranı	38
Şekil 3.7.	Malzeme tanımlama ekranı	38
Şekil 3.8.	Sınır şartları menüsü	39
Şekil 3.9.	Yükler menüsü	39
Şekil 3.10.	Mesh menüsü	40
Şekil 3.11.	Element tipi menüsü	41
Şekil 3.12.	İş menüsü	42
Şekil 4.1.	TIG kaynak makinesi	44
Şekil 4.2.	MAG kaynak makinası	46
Şekil 4.3.	Tozaltı kaynak makinesi	47
Şekil 4.4.	Numune kesme cihazı	48
Şekil 4.5.	Netkon Gripo zımparalama makinesi	49
Şekil 4.6.	Modellenen parçanın boyutları	49
Şekil 4.7.	Modellenen parçanın iki boyutlu görünüşü	50
Şekil 4.8.	Parçanın iletkenlik değerleri	50

Şekil 4.9.	Parçanın özgül ısı değeri.....	51
Şekil 4.10.	Parçanın yoğunluk değeri	52
Şekil 4.11.	Modellemede kullanılan mesh edilmiş parça	53
Şekil 4.12.	Edit Contact Property diyalog kutusu.....	54
Şekil 4.13.	Havayla temas eden yüzeyler	55
Şekil 4.14.	Edit Interaction diyalog kutusu	55
Şekil 4.15.	Edit Predefined Field diyalog menüsü.....	56
Şekil 4.16.	İş menüsü.....	57
Şekil 5.1.	TIG kaynak dikişinin makro yapısı.....	58
Şekil 5.2.	TIG kaynak dikişinin mikro yapısı	59
Şekil 5.3.	Tozaltı kaynağının makro yapısı.....	60
Şekil 5.4.	Tozaltı kaynak dikişinin mikro yapısı.....	60
Şekil 5.5.	MAG kaynak dikişinin makro yapısı	61
Şekil 5.6.	Mag kaynak dikişinin mikro fotoğrafı	62
Şekil 5.7.	Mag kaynak kaynak simülasyonunun 2. saniyedeki görüntüsü.....	63
Şekil 5.8.	Mag kaynak kaynak simülasyonunun 10. saniyedeki görüntüsü.....	63
Şekil 5.9.	Mag kaynak kaynak simülasyonunun 18. saniyedeki görüntüsü.....	64
Şekil 5.10.	Mag kaynak kaynak simülasyonunun 30. saniyedeki görüntüsü.....	64
Şekil 5.11.	MAG kaynağının deneysel ve model sıcaklık grafiği.....	65
Şekil 5.12.	Tozaltı kaynağı simülasyonunun 2. Saniyedeki görüntüsü.....	66
Şekil 5.13.	Tozaltı kaynağı simülasyonunun 15. saniyedeki görüntüsü	67
Şekil 5.14.	Tozaltı kaynağı simülasyonunun 27. saniyedeki görüntüsü	67
Şekil 5.15.	Tozaltı kaynağı simülasyonunun 30. Saniyedeki görüntüsü.....	68
Şekil 5.16.	Tozaltı kaynağının deneysel ve model sıcaklık grafiği.....	69
Şekil 5.17.	TIG kaynağı simülasyonunun 2. saniyedeki görüntüsü	70
Şekil 5.18.	TIG kaynağı simülasyonunun 40 saniyedeki görüntüsü	70
Şekil 5.19.	TIG kaynağı simülasyonunun 83 Saniyedeki görüntüsü	71
Şekil 5.20.	TIG kaynağı simülasyonunun 160. Saniyedeki görüntüsü	71
Şekil 5.21.	TIG kaynağının deneysel ve model sıcaklık grafiği	72

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Başlıca kaynak yöntemleri.....	5
Tablo 2.2.	Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri	8
Tablo 2.3.	Tungsten elektrodların kimyasal bileşimleri ve renk kodları	22
Tablo 2.4.	Argon ve helyum gazlarının TIG yönteminde davranışlarının karşılaştırılması.....	24
Tablo 4.1	St 37 çelik malzemenin kimyasal özellikleri	43
Tablo 4.2	St 37 çelik malzemenin mekanik özellikleri	43
Tablo 4.3.	TIG kaynak makinasının teknik özellikleri	45
Tablo 4.4.	MAG kaynağının teknik özellikleri	46
Tablo 4.5.	Kaynak telinin kimyasal içeriği	47
Tablo 4.6.	Tozaltı kaynağının teknik özellikleri	48

ÖZET

Anahtar Kelimeler: MAG Kaynağı, TIG Kaynağı, Tozaltı Kaynağı, Sonlu Elemanlar Yöntemi.

Kaynak işlemleri günümüzde en yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden birisidir. Bu nedenle, kaynak edilmiş parçaların emniyetinin olması, kullanıldığı tüm yapının güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Isıl gerilmeler kaynak metalinde ve ana malzemedeki makro ve mikro yapıyı değiştirmektedir. Bu değişim malzemelerin mekanik özelliklerini de etkiler. Bu çalışmada, St 37 çelik malzeme MAG, TIG ve Tozaltı kaynak yöntemleriyle birleştirilerek makro incelemeleri yapılmıştır.

Malzemelerin ısıl özellikleri sıcaklığa göre değişim göstermektedir. Bu sebeple ABAQUS programına St 37 tipi çelik malzemenin özellikleri tanımlanırken sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmıştır. Kaynak esnasında oluşan ısıl gerilmeleri hesaplamak için termal analiz yapılması ve sonuçların deneysel olarak elde edilen sıcaklık değerleri ile kıyaslanması gerekmektedir. Termal analizler ABAQUS programında fortran dilinde özel programlar yazılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbiri ile oldukça benzer olduğu görülmüştür.

NUMERICAL MODELING OF STEEL MATERIALS JOINED BY USING ARC WELDING

SUMMARY

Keywords: MAG Welding, TIG Welding, Submerged Arc Welding, Finite Element Method

Welding is one of the most used methods to join metal parts in Metal world. So, The quality of welded parts is very important for the safety of whole welded construction.

Thermal stresses affect the microstructure and macrostructure of filler and base metals. These changes also affect mechanic properties of the material. In this study, macro structural investigations of MIG, TIG and SAW for ST 37 steel were also studied.

Thermal properties of the materials changes as a function of temperature. Thus, in this study, the properties of St 37 steel part were defined in accordance with temperature, which were taken from the reliable literature in FEA. In order to see heat stress during welding operation, ABAQUS software was used for thermal analysis.

According to the experiments and FE Analyses, it is concluded that experimental and modeling results are very similar.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Kaynak ve Yöntemlerinin Önemi

Kaynak işlemi günümüzde en yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden birisidir. Bu nedenle, kaynak edilmiş parçaların emniyetinin sağlanması birleştirmelerin kullanıldığı tüm yapının güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Kaynak işlemi, özellikle de ark kaynağı; plazma-metal etkileşimleri, metal-gaz-toz reaksiyonları, kaynak banyosu akışkan akışı, elektromanyetik hareket, faz dönüşümü, ısı transferi, kaynak metali kimyası, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) mikro yapısı, artık gerilmeler mekanik özellikler vb. gibi anlaşılması zor fiziksel kimyasal ve mekanik olguların etkileşimini içeren karmaşık bir işlemdir.

Önceleri, bu konuyla ilgilenen araştırmacılar ve bilim adamları çalışmalarının büyük bir kısmını kaynağın fiziksel metalürjisi, kaynak metali ve ITAB bölgesi mikro yapılarının karakterizasyonu ve kaynak işleminin optimizasyonu konularına ayırırken; son zamanlarda nümerik simülasyon, kaynak işleminin analizi ve optimizasyonuna yardımcı bir araç olarak artarak kullanılmakta ve özellikle kaynaktaki artık gerilme ve uzamaların belirlenmesinde uygulanmaktadır.

1.2. Kaynak Yönteminde Modellemenin Önemi

Bilgisayar tabanlı matematik simülasyonu ile deneysel masraflara ihtiyaç duymaksızın sonuçlar tahmin edebilir. Bu modellerin geliştirilmesi, Roscnthal tarafından analitik çözümlerle 1940' larda başlamış, ancak 1980' lerde güçlü bilgisayar hamlesiyle hız kazanmıştır. Geliştirilen nümerik modeller yöntemlerin anlaşılabilirliği, geliştirilmesi, kontrolü ve verimliliğinde bir artış sağlamıştır.

Kaynaktaki matematiksel modelleme, bir eşitlik kurarak kaynak işlemini tanımlamaktadır. Matematiksel modellemeler, işlem parametreleri ile kaynaklama sonrasındaki metalürjik özellikleri ve yapılar arasındaki ilişkiyi gösterebilir. Kaynaktaki işlem parametrelerini ve uygun kaynak şartlarını tanımlamaya yardımcı olabilir. Bazı modellerin doğruluğu, yapıdaki gerilim analiz modellerini ve ısı transferini tanımlamak için kullanılan verilerin doğruluğuna bağlıdır. Nümerik modelleme ile yapılan sonuçların geçerli olması ve verilerin mukayesesi için deneysel verilerle birleştirilmesi gerekir [1,2].

Kaynağın matematiksel formülasyonu basit olabilir. Malzeme özellikleri, sınır şartları ve başlangıç bilgileri ark kaynağında termal bir problemi formüle etmek için gereklidir. Problemi tam olarak modellemek sıcaklık dağılımlarına bağlı olduğu için malzeme özellikleri gereklidir. Bu durum problemlerdeki karmaşıklığın ana nedenidir. Ancak bu varsayımla termal modelleme de gerçek problemi tasvir etmek yeterli olmayabilir. Gerçekte malzeme özellikleri ve diğer varsayımlar sonuçları doğrudan etkileyeceğinden matematiksel formülasyonda analitik çözüm için gereklidir.

Modellemelerde ideal kaynak şartlarının oluşturulması, kaynatılacak plaka içinde ısı iletimi için analitik çözümlerle termal dönüşümlerin hesaplanmasındaki ilk girişimlerde yarı sonsuz olarak ve ısı kaynağı çizginin basit bir noktası tarafından temsil edilir olarak varsayılır. Çözüm için varsayımlardaki bu sınırlamaların hemen, hemen hepsi analitik çözümlerinin doğruluğunda ve ısı iletim denklemlerinin çözümünde doğrudan nümerik metotlar kullanmayı zorlaştırır. Doğrusal olmayan, sıcaklık ve difüzyon modellemede bağımsız olarak kullanılabilir ve faz değişimindeki gizli ısı ayrılabilir. Günümüzde nümerik modellemelerde genellikle ark kaynağının karmaşık bir ısı kaynağı temsili ile geçici ısı rejimi olarak kaynak yöntemlerinde göz önüne alınan çözüm yöntemi sonlu elemanlar metodudur. Bu yaklaşım tek bir enerji-denge eşitliği için bir çözümün zorluğunu azaltır. Arkın nümerik olarak temsili ısı akışının nasıl olacağı hakkında oluşum ve ilave olarak kaynak havuzunun son şekline etki eden hem kaynak havuzundaki kütle akışı hem de ergiyik metal içindeki ısı yayılımı akışı modellemede dikkate alınmak zorundadır.

Kaynak esnasında oluşan termal dalgalanmalar ve kaynak geometrisinin tahmini için kaynak havuzundaki ergime bölgesinin ve ısı transferinin detaylı olarak anlaşılması gerekmektedir. Son yıllarda, kaynak havuzundan iletilen ısı transferinin önemi vurgulanmaktadır. Matematiksel modellemede ısı iletimi için önemli olan faktörler ise yüzey geriliminin değişimi, elektromanyetik ve sınır kuvvetleridir. Birçok araştırmada kaynak havuzundaki ergime bölgesinin yapısı düzgün varsayılır. Fakat deneysel incelemeler ve teorik hesaplamalarda belirtildiği gibi kaynak havuzu ergime bölgesinde düzgün olmaktan çok, düzensiz bir oluşum söz konusudur [3].

Fiziksel bir sistemin analizlerini yapabilmek amacıyla bir takım denklem ve eşitlikler kullanılarak oluşturulmuş modele matematik model denilmektedir. Bazı kabuller yaparak çeşitli fiziksel sistemlerin analitik ifadelerini elde etmek mümkün olmaktadır. Bu analitik ifadeler sayesinde oluşturulan matematik model, basit ve kolay hesaplanabilir. Ancak çok karmaşık problemlerin modellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu durumda incelenen yapının bilgisayarda modellenmesi önemli bir çözüm yolu olmaktadır. Bilgisayar yardımıyla oluşturulan modeller çok karmaşık ve detaylı modeller olup binlerce hatta milyonlarca denklem takımının bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır.

Günümüzdeki bilgisayar programlarının çoğu, matematik modelleri oluşturur ve çözümlmek için Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ya da Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ismi verilen yöntemi kullanır. Karmaşık geometriye, malzeme özelliklerine ve zorlanma koşullarına sahip yapıların analiz edilmesine olanak sağlaması ve bilgisayar destekli tasarım programları ile entegre edilebilmesi nedeni ile sonlu elemanlar metodu bir çok mühendislik dalında kendine uygulama alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada; yukarıda bahsedilen nedenlerle kaynak edilmiş parçaların bilgisayar destekli termal analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla kaynak edilmiş parçaların kaynak bölgesinin deneysel olarak incelenerek, buradan elde edilen sonuçlar ile modellemenin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bulunan mekanik özellikler, kaynak dikişinin metalografik görüntüsü, kaynak parametreleri vb. özellikler kullanılarak modelleme gerçekleştirilmiştir [1].

BÖLÜM 2. MATERYAL ve KAYNAK YÖNTEMLERİ

2.1. Kaynak İşleminin Tanımı

Kaynak; parçaların ısı veya basınç ile ya da her ikisini de kullanarak, ilave malzeme kullanarak veya kullanmadan yapılan birleştirme işlemidir. Bu işlem esnasında birleştirilecek malzemelerin kaynak bölgeleri plastik veya sıvı duruma getirilmektedir.

Kaliteli bir kaynak dikişi için kaynak metali ile esas metal arasında bir birleşmenin oluşması ve bu birleşmenin bağlantı boyunca sürekli olması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, kaynağın mukavemetinin tam olması için bağlantının tüm uzunluğu boyunca her noktada birleşme sağlanmalıdır. Tüm kaynak uygulamalarında, birleştirme için, kaynak bölgesinde söz konusu parça kalınlığı için yeter derecede ve kontrol altında tutulabilen bir ısı girdisine ihtiyaç vardır. Isı girdisinin en önemli karakteristik özelliği soğuma hızını dolayısı ile kaynak metali ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını belirlemesidir. Kaynak bölgesine gereğinden fazla ısının sevk edilmesi, kaynak banyosunun büyümesine ve kontrolünün zorlaşmasına, ısı tesiri altındaki bölgenin büyümesine, distorsiyonların artmasına, kaynak metalinin tokluğunun azalmasına, çekme dayanımının azalmasına, gerilme dayanımının azalmasına ve tane irileşmesine sebep olacağından başarısız bir kaynak elde edilir.

Gerek kaynak için kontrollü ısı girdisi sağlaması gerekse uygulama açısından büyük kolaylık sunması, ark kaynak yöntemlerinin çok geniş bir alanda kullanılmasının en önemli sebepleridir [4].

2.2. Ark Kaynak Yöntemleri

Kaynak türleri yapılış biçimi, kullanılan elektrotlar ve koruyucu olarak kullanılan materyalleri sebebiyle birçok sınıflara ayrılabilir. Günümüz teknolojisinde çok fazla

kaynak türü kullanılmaktadır. Kullanılan başlıca kaynak yöntemleri Tablo 2.1' de gösterilmiştir [5].

Tablo 2.1. Başlıca kaynak yöntemleri [5]



2.2.1. Tozaltı kaynağı

American Welding Society (AWS) tozaltı ark kaynağını şöyle tanımlar. Tozaltı kaynak yöntemi, iş parçası ile metal tel elektrot arasında, bir ark oluşturarak bunların ısıtılmasını sağlayan ve bu suretle birleşmelerini temin eden bir ark kaynağı prosesidir. Ark ve erimiş metal tanecikli yapıya sahip bir toz örtüsü ile korunur. Basınç kullanılmaz. Dolgu metali, elektrotlar ile toz ve metal taneciklerinden elde edilir [6].

Bu kaynak yönteminde, bir bobinden sağılan kaynak teli, bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir memeden geçerek dikişe iletilir; ark için gerekli akımı

memeden alan tel ile iş parçası arasında ark teşekkül eder, ayrı bir kanaldan gelen ve silikat ve toprak alkali metalleri ihtiva eden özel bir toz ark bölgesini atmosferin menfi tesirlerinden korur. Kaynak teli ve iş parçası arasında meydana gelen arkın sıcaklığından tel ve esas metalin bir kısmı eriyerek arzu edilen birleşmeyi meydana getirirler [7].

Yüksek erime gücüne ve kaynak hızına sahip olmakla birlikte çeşitli türden çeliklerin kaynağı için de çok uygun olan bu yöntem kazan, profil, gemi ve basınçlı kap üretimi ile dolgu kaynağı işlemlerinde yoğun bir biçimde kullanılmaktadır [6].

2.2.1.1. Tozaltı kaynağının çalışma prensibi

Bu kaynak yönteminde, bir bobinden sağılan kaynak teli bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir temas memesinden geçerek kaynak bölgesine gönderilir. Gerekli akımı temas memesinden alan tel ile iş parçası arasında ark oluşur ve ayrı bir kanaldan gelen silikat ve toprak alkali metalleri içeren özel bir toz, ark bölgesini havanın olumsuz etkilerinden korur. Kaynak teli ve iş parçası arasında oluşan arkın sıcaklığından tel ve esas metalin bir bölümü eriyerek istenen birleşmeyi sağlar. Ark, bir toz örtüsü altında bulunduğundan çevreye ışınlam yapmaz ve bu şekilde ark enerjisinin büyük bir bölümü (yaklaşık olarak % 68'i) doğrudan doğruya kaynak için tüketilmiş olur.

Arkın sıcaklığında bir miktar toz da eriyerek dikişi örten bir cüruf durumuna geçer ve bu cüruf henüz çok sıcak olan kaynak dikişini ve banyoyu atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, içerdiği dezoksidan ve alaşım elementleri yardımıyla kaynak banyosunun dezoksidasyonunu ve kaynak metalinin alaşımlanmasını gerçekleştirir. Şekil 2.1' de tozaltı kaynak yönteminin şematik gösterimi verilmiştir[6].

Tablo 2.2. Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri[7]

Alaşım Elementi	% Sınırları	Etkisi
Karbon (C)	0.05 - 0.25	- Sertliği artırır - Çekme dayanımını yükseltir
Silisyum (Si)	0.05 – 0.45	- Deokside eder - İşlenebilme kabiliyetini yükseltir - Kaynak kabiliyetini yükseltir
Manganez (Mn)	0.5 – 3.0	- Sertliği kısmen yükseltir - Çentik ve çentik darbe dayanımını yükseltir - Uzamayı artırır
Molibden (Mo)	0.5 – 1.0	- Isıya dayanımı artırır
Krom (Cr)	1.0 – 2.9	- Sertliği yükseltir - Isıya dayanımı artırır
Nikel (Ni)	1.0 – 2.0	- Düşük çalışma sıcaklıklarında dayanımı artırır

2.2.1.3. Tozaltı kaynak tozları

Tozaltı kaynak tozları istenen özelliklere bağlı olarak çeşitli şekillerde ve oranlarda karıştırılmış taneli mineral bileşiklerdir.

DIN 32 522'ye göre tozaltı kaynak tozları 7 grupta toplanmıştır.

1. Alaşım ve düşük alaşımlı çeliklerin birleştirme kaynağında kullanılan toz fardır. Si ve Mn'in geçiş/yanma davranışı rakamla ifade edilir.

2. Alaşım ve düşük alaşımlı çeliklerin birleştirme kaynağında kullanılan tozlardır. Si ve Mn'in geçiş/yanma davranışı rakamla ifade edilirken Mo ve diğer elemanların Geçiş/yanma davranışı sadece sembollerıyla verilir.

3. Sert dolgu tozu olup Si ve Mn' in geçiş/yanma davranışı rakamla ifade edilirken C, Cr, Mo gibi elemanlar sadece sembolleriyile verilir.

4. %5' in üzerinde Cr içeren yüksek sıcaklığa dayanıklı çeliklerin birleştirme kaynağına, alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin uygun ilave metalle dolgu kaynağında kullanılan tozlardır. Geçiş/yanma davranışı Si, Mn, Cr sırasıyla rakamla ifade edilir.

5. Paslanmaz ve ısıya dayanıklı Cr' lu ve Cr-Ni' li çeliklerin birleştirme ve dolgu kaynağında kullanılan tozlar olup geçiş/yanma davranışı Si, Mn, Cr, Nb, C sırasıyla rakamla ifade edilir.

6. Paslanmaz ve ısıya dayanıklı Cr' lu ve Cr-Ni' li çeliklerin birleştirme ve dolgu kaynağı için Cr içermeyen tozlar olup geçiş/yanma davranışı Si, Mn, Cr, Nb, C sırasıyla rakamla ifade edilir.

7. Nikel ve nikel esaslı alaşımların birleştirme ve dolgu kaynağında kullanılan tozlar olup geçiş/yanma davranışı Si, Mn, Cr, Nb, sırasıyla rakamla ifade edilir [9].

2.2.1.4. Tozaltı kaynağının kullanım alanları

- Basınçlı kap, kazan ve tank yapımında,
- Ağır otomotiv sanayinde,
- Gemi inşaatında,
- elik konstrüksiyon sanayinde,
- Kaynaklı boru imalinde,
- Demiryolu inşasında,
- Kiriş, direk ve uzun kaynak gerektiren kolonların kaynağında,
- Aşınan makine parçalarının tamir ve dolgu işlerinde,
- Profil yapımında (I, H, T profilleri gibi) birleştirme kaynak yöntemi olarak kullanılmaktadır [12].

2.2.1.5. Tozaltı kaynağının avantajları

Yüksek kaynak gücü ve kaynak hızı: kaynak hızı 6 ila 300 m/saat arasında ayarlanabilmektedir. Bu bakımlardan tozaltı kaynak usulü diğer konvansiyonel kaynak usulleri ile mukayese edilemeyecek derecede yüksek bir erime gücü ve kaynak süratine sahiptir.

Yüksek nüfuziyet: Kaynak akım şiddetinin yüksek olması bu usulde ağız açmadan bir paso ile 18 mm. ve ağız açarak da iki paso ile 150 mm. kalınlığındaki parçaları rahatlıkla kaynatmak mümkündür.

Enerji tasarrufu: Tozaltı kaynak usulünde elektrik enerjisinin büyük bir kısmı kaynak için kullanılmakta ve dolayısıyla büyük bir enerji tasarrufu sağlanmış olmaktadır.

Elektrot tasarrufu: Tozaltı kaynak usulünde sıçrama kaybı yoktur; tel elektrot kullanıldığından elektrot artığı zayıtı da yoktur.

Emniyetli ve düzgün görünüşlü kaynak dikişi: Kaynak yerinin muntazam ve düzgün bir şekilde cürufle örtülmesi emniyetli bir katılma saylamaktadır. Bu şekilde kaynak banyosunun oluşumu daha kolay sağlanmakta ve geçiş bölgesinin sertleşme ihtimali azalmaktadır. Erimiş viskoz cüruf dikiş formunun düzgün ve tırtılsız olmasını sağlamakta ve kenarlarda yanma oluklarının oluşmasına imkân vermemektedir.

Kaynak dikişi kalitesine kaynakçı faktör tesir etmemektedir: Tozaltı kaynak usulünde elektromekanik ayar ve kumanda sisteminin mevcudiyeti kaynakçı faktörünü ortadan kaldırmaktadır.

Yüksek ark kararlılığı: Ark bölgesinde buharlaşan cüruf dolayısı ile ark çok iyi bir şekilde muhafaza edilebilmektedir. Bu husus yüksek akım şiddeti ve büyük kaynak hızlarının kullanılabilmesine imkân vermektedir.

Özel koruyucu donanımlara ihtiyaç yoktur: Ark tozaltından yandığından, görünen ışınlar ve ultraviyole ışınları etrafa yayılmaz ve dolayısı ile gözleri korumak için özel maskeye ihtiyaç yoktur [7].

2.2.1.6. Tozaltı kaynağının dezavantajları

- Pahalı makine ve donanıma ihtiyaç duyulduğu için, ilk yatırım masrafları yüksektir.
- İnce saçların kaynağı için uygun bir yöntem değildir.
- Kısa boylu ve karışık şekilli dikişler için yarı otomatik tozaltı makineleri geliştirilmişse de, bunlar tozaltı kaynak yönteminin bütün üstünlüklerini bünyelerinde toplayamamaktadırlar. Karışık şekilli kaynak dikişine sahip çok sayıda yapılması gereken parçalar için özel geliştirilmiş makineler kullanılabilir.
- Tozaltı kaynak yöntemi ile yatay pozisyonda iyi sonuç alınabilmektedir. Dik ve korniş pozisyonu için özel tertibatlar geliştirilmiş olmakla beraber dik pozisyon için günümüzde daha çok elektro cüruf kaynağı tercih edilmektedir.
- Bu yöntem ile tavan pozisyonunda kaynak yapmanın olanağı yoktur [11].

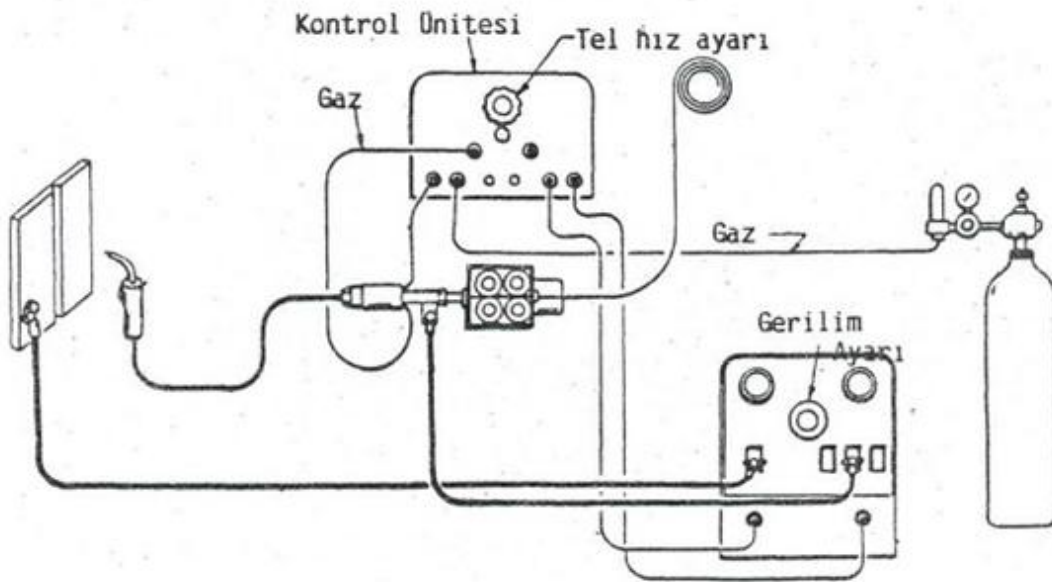
2.2.2. MAG gazaltı kaynağı

MAG yöntemi, ergiyen sonsuz tel elektrot ile iş parçası arasında yanan bir ark ile elektrotun ergitilerek metallerin birleştirildiği bir elektrik ark kaynağı yöntemidir. Ergimiş kaynak banyosunun ve arkın korunması kullanılan koruyucu bir gaz veya gaz karışımı tarafından yapılmaktadır. Şekil 2.2' de gazaltı kaynak makinası şematik olarak gösterilmiştir [12].

İlk defa ABD' de alüminyum ve alaşımlarının sonra da sırası ile yüksek alaşımlı çeliklerin, bakır ve alaşımlarının, karbonlu çeliklerin kaynağında kullanılmıştır. Bu yönteminin TIG yönteminden farkı arkın iş parçası ve kaynak metali ikmalini sağlayan eriyen bir elektrot arasında oluşturulmasıdır.

Bir MAG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

- Bir kaynak tabancası,
- Tel şeklindeki elektrot ve muhafazasını kaynak kablusunun, 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 [13].



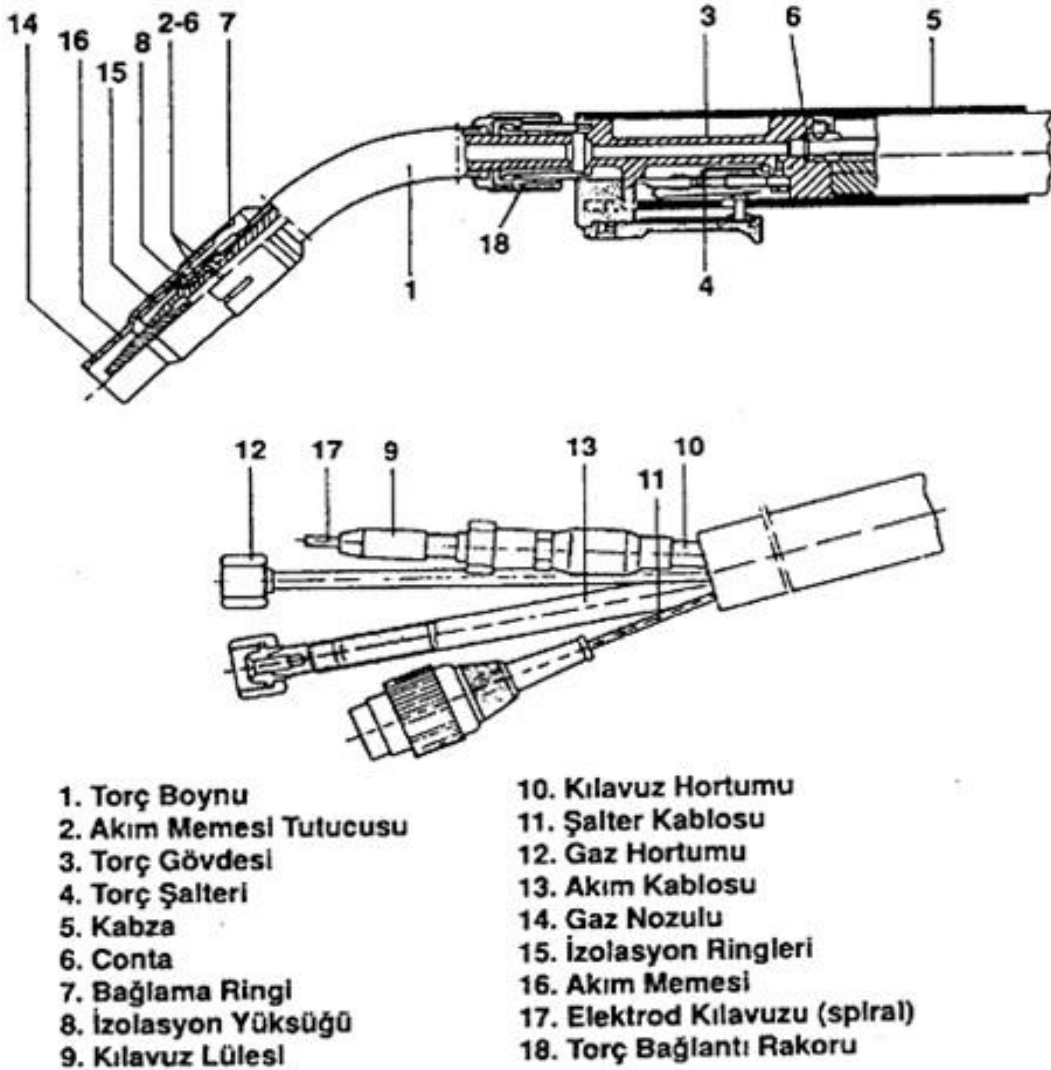
Şekil 2.2. Gazaltı kaynak makinasının şematik gösterimi [8]

MAG kaynak yönteminde doğru akım kullanılır ve elektrodun kolaylıkla eriyebilmesi ve produktivitenin artırılması açısından örtülü, 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 ışınlım oluştuğunda gözlerin ve cildin korunması için gereken önlemler alınmalıdır [13].

2.2.2.1. MAG kaynak torçları

MAG kaynağında ark bölgesine koruyucu gazın gönderilmesini ve tel elektrota akımın yüklenmesi torç ile sağlanır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan, oksiasetilen torcunu andıran bir şekilde bükülmüş olan türüdür. Tabanca şeklinde olanı da vardır. Şekil 2.3' te hava soğutmalı kuğu boynu tür bir torç kesiti ve torç bağlantı paketi gösterilmiştir [14].



Şekil 2.3. Hava soğutmalı kuğu boynu tür bir torç kesiti ve torç bağlantı paketi [15]

MAG yönteminde tel, torcu terk etmeden az önce bakır esaslı bir kontak lülesi içinden geçerken bir kaynak akımı ile yüklenir; bu kontak lülesine eş eksenli olarak, üflecin ağız kısmında bir gaz lülesi bulunur ve lüle sayesinde gaz akımı laminar olarak kaynak bölgesine sevk edilir.

Torç, kaynak makinasına, içinde tel elektrot kılavuzunu, akım kablosunu, koruyucu gaz hortumunu ve gerektiğinde soğutma suyu geliş ve dönüş hortumlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli ve kalın bir hortum ile bağlanmıştır. Bu kalın hortuma, torç bağlantı paketi adı verilir [14].

2.2.2.2. Koruyucu gazlar

Gazaltı kaynak yönteminde üç çeşit sarf malzeme mevcuttur. Bunlar elektrik enerjisi, koruyucu gaz ve ek kaynak metali olup kaynak bölgesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir.

Bütün gazaltı kaynak yöntemlerinde olduğu gibi MAG yönteminde de koruyucu gazın ark bölgesini tamamen örtmesi ve atmosferin olumsuz etkilerinden koruması gerekecektir. Koruyucu gaz, ergimiş kaynak banyosu içindeki alaşım elementlerinin atmosferdeki oksijen ile reaksiyona girmesini engellemek, azot ve hidrojen gibi diğer zararlı gazların kaynak metaline sıvı kaynak banyosunda çözülerek girmesini önlemek işlevlerini yerine getirir. Ergimiş halde hemen hemen tüm metaller havadan oksijen ve azot absorbe ederler ve ergimiş metalde çözünen bu gazlar katılaştıkça kaynak metalindeki elementler ile birleşir, yeni bileşikler oluştururlar. Bu olay kaynak metalinin kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkiler, çeşitli kaynak hatalarının oluşmasına neden olur.

MAG kaynağında soy gazlar, aktif gazlar veya bunların çeşitli oranlardaki karışımları kullanılır. Genel olarak soy gazlar diğer elementlerle etkileşime girmediklerinden demir dışı metallerin kaynağında, aktif gazlar veya aktif ve soy gaz karışımları da çeşitli tür çeliklerin kaynağında uygulama alanı bulmaktadır. Kaynak işlemi için yapılan gaz seçiminde çeşitli etmenlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bunlar:

- Kaynatılan metal veya alaşımın kimyasal yapısı,
- Ark karakteristiği ve metalin damla geçiş biçimi,
- Kaynak hızı,
- Parça kalınlığı, gereken nüfuziyet ve kaynak dikişinin biçimi,
- Kaynak dikişinden beklenen mekanik özellikler,
- Kaynak banyosunda oluşan oksitlerin temizlenme yöntemi,
- Elde edilebilirlik ve gazın maliyeti [16].

2.2.2.3. MAG kaynağının avantajları

Yöntemin yaygın olarak kullanılma nedeni, doğal olarak sağladığı üstünlüklerden kaynaklanmaktadır.

Bu üstünlükler aşağıda sıralanmıştır:

- Ticari metal ve alaşımların tümünün kaynağında kullanılabilen yegane ergiyen elektrodla kaynak yöntemidir.
- Elektrik ark kaynağında karşılaşılan sınırlı uzunlukta elektrod kullanma problemini ortadan kaldırmıştır.
- Kaynak her pozisyonda yapılabilir. Bu tozaltı kaynağında mümkün değildir.
- Metal yığıma hızı elektrik ark kaynağına nazaran oldukça yüksektir.
- Sürekli elektrod beslenmesi ve yüksek metal yığıma hızı nedeniyle, kaynak hızları elektrik ark kaynağına nazaran yüksektir.
- Elektrod beslenmesinin sürekli olması nedeniyle hiç durmadan uzun kaynak dikişleri çekilebilir [17].

2.2.2.4. MAG kaynağının dezavantajları

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi gazaltı kaynağının kullanılmasını zorlaştıran bazı sınırlamalar da mevcuttur.

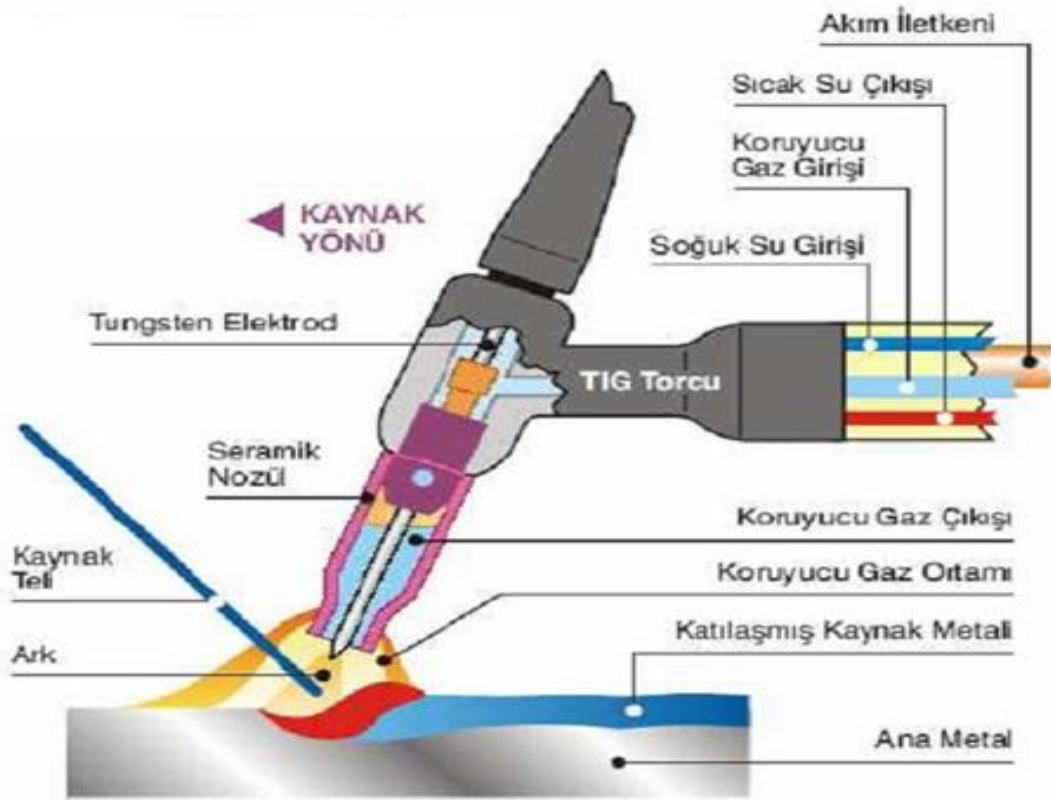
Bu sınırlamalar aşağıda sıralanmıştır:

- Kaynak donanımı, elektrik ark kaynağına nazaran, daha karmaşık, daha pahalı ve bir yerden başka bir yere taşınması daha zordur.
- Kaynak torcunun elektrik ark kaynağı pensesinden daha büyük olması nedeniyle ve kaynak metalinin koruyucu gazla etkin bir şekilde korunması amacıyla torcun bağlantıya 10 ila 20 mm arasında değişen yakın bir mesafeden tutulması gerektiği için, bu yöntemin ulaştırılması güç olan yerlerde kullanılması pek mümkün değildir.
- Kaynak arkı koruyucu gazı bulunduğu yerden uzaklaştıran hava akımlarından korunmalıdır. Bu nedenle, kaynak alanının etrafı hava akımına karşı koruma altına alınmadıkça, yöntemin açık alanlarda kullanılması mümkün değildir.
- Göreceli olarak, çalışma anında yüksek şiddette ısı yayılması ve ark yoğunluğu nedeniyle, bazı kaynakçılar bu yöntemi kullanmaktan kaçınabilir [17].

2.2.3. TIG kaynağı

TIG kaynağı; kaynak için gerekli ısı enerjisi tungsten bir elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan ark tarafından sağlanan ve kaynak bölgesinin de elektrodu çevreleyen bir nozuldan gönderilen asal gaz tarafından korunan kaynak yöntemidir. Şekil 2.4' te TIG kaynak yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

Koruyucu bir asal gaz atmosferi altında kaynak yöntemi uygulaması ilk defa İkinci Dünya savaşında uçaklarda kullanılan bazı magnezyum alaşımlı parçaların birleştirilmesiyle başlamıştır. Çok kısa bir süre içinde bu yöntemin çeşitli sahalarda kullanılabilmesi ve diğer yöntemlerle kaynatılması zor metal ve alaşımların kaynağı için uygunluğu anlaşılmış ve bugün en çok aranan yöntemlerden birisi haline gelmiştir.



Şekil 2.4. TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi [18]

TIG kaynağında başlangıçta helyum daha sonraları ise argon gazı kullanılmaya başlamıştır. Hafif metal ve alaşımlarının kaynağında kullanılan argon gazının çok saf olması gerekir. Aksi takdirde gaz içerisinde bulunabilecek su buharı, oksijen ve azot gibi safiyetsizlikler kaynağın kalitesini düşürür.

TIG kaynak yönteminin kaynakçı tarafından kullanılması kolay olup prensip olarak gaz eritme kaynağına oldukça benzemektedir ve çok geniş, uygulama alanına sahiptir. Bu yöntemde erimeyen elektrot kullanıldığından bazı durumlarda ilave kaynak metaline gerek olmadan birleştirme yapılabilmektedir. Gerekliğinde gaz kaynağında olduğu gibi ilave metal kullanılmaktadır. Endüstride bu kaynak yöntemi daha çok kök pasoların çekilmesinde ve tamir işlerinde kaynakçıya büyük kolaylık sağladığından kullanım alanı her geçen gün yaygınlaşmaktadır [18].

Bir TIG kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur:

1- Kaynak hamlacı olarak adlandırılan kaynak torcu.

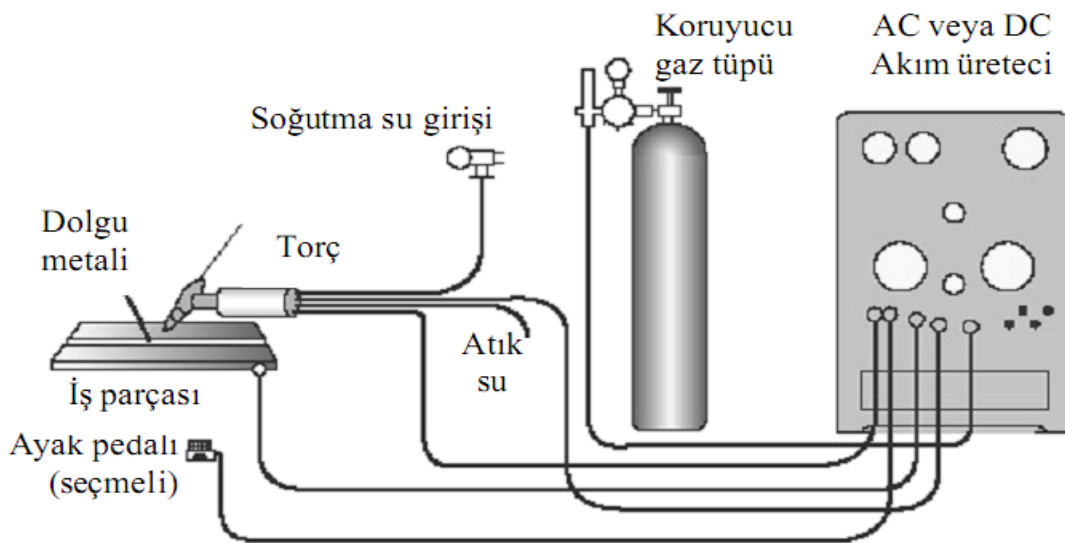
2- Kaynak akım ve kumanda şalter kablosunu, gaz hortumunu ve gerektiğinde soğutma suyu giriş ve çıkış hortumlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli, torç bağlantı paketi.

3- Kaynak akımının, gaz akışının ve gerektiğinde soğutma suyunun devreye giriş ve çıkışını, yüksek frekans ünitesini, arkın tutuşmasını ve alternatif akım ile çalışma halinde arkın sürekliliğini sağlayan devreleri de bünyesinde toplayan kumanda dolabı.

4- Kaynak akım üretici.

5- Üzerinde basınç düşürme ventili ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan koruyucu gaz tüpü [19].

TIG kaynak yöntemi prensip olarak her kalınlık ve her pozisyondaki parçalara uygulanabilmekte olup, daha kalın parçalar için uzun süreli işlemler gerektiğinden ekonomik olmamakta ve tercih edilmemektedir. Bundan dolayı 7 mm' den daha kalın parçaların birleştirilmesinde önerilmemekle beraber bu kaynak yöntemi ile çok kaliteli ve daha emniyetli birleştirmeler sağlanabilmektedir. Bu nedenle uçak ve uzay endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulmaktadır. Akım şiddeti azaltılarak diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi imkânsız olan çok ince saclar bu yöntemle kaliteli bir şekilde birleştirilebilmektedir. 0.1 mm kalınlığına sahip parçalar bile kaynak edilebilmektedir. Şekil 2.5' te TIG kaynak donanımının şeması gösterilmiştir.



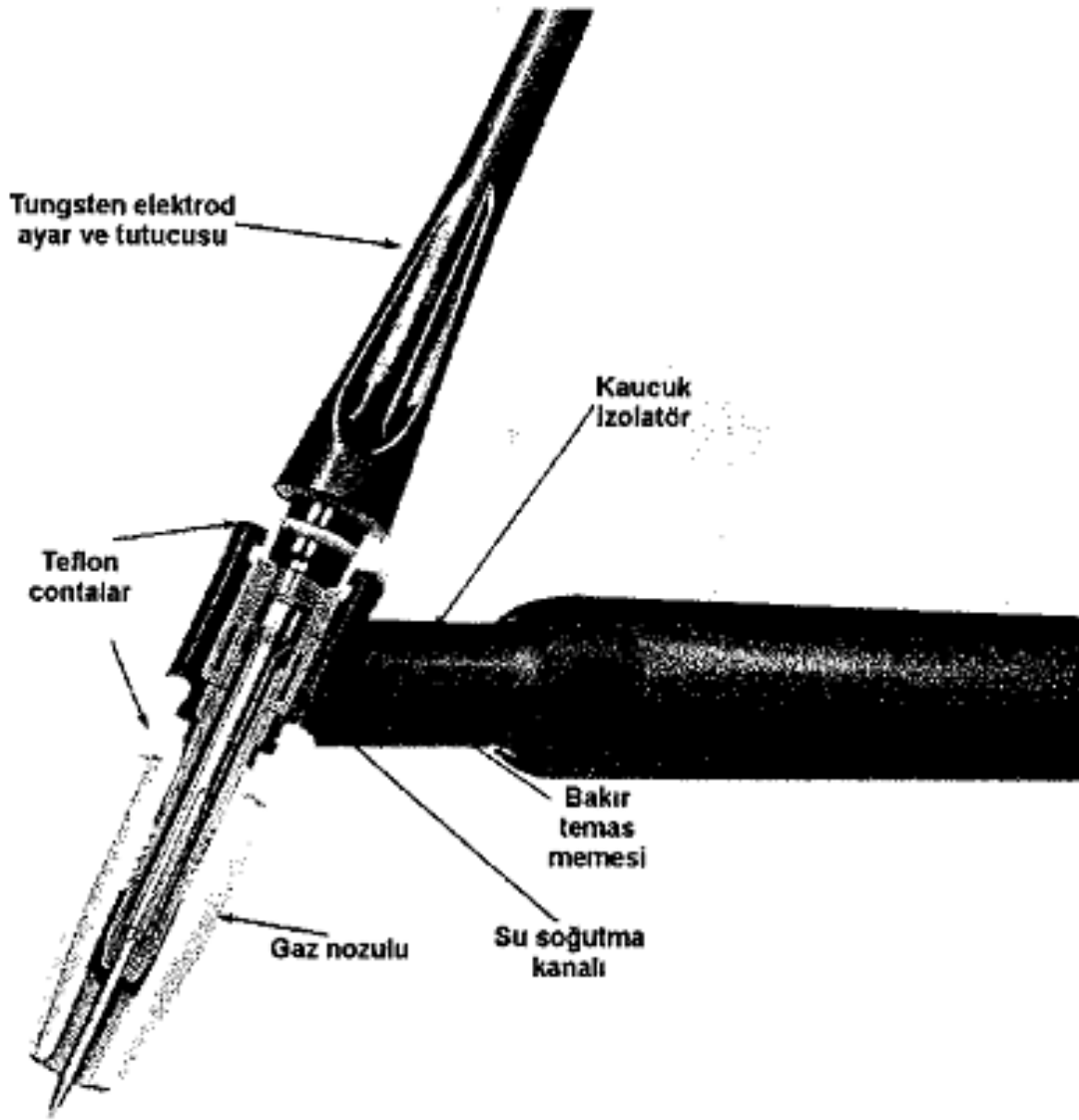
Şekil 2.5. TIG kaynak donanım şeması [18]

Şekil 2.5' ten de görüldüğü gibi bu donanım; akım üretici, koruyucu gaz tüpü, gaz basınç debi ayar donanımı, torç ve kontrol panelinden oluşmaktadır. Yüksek akım şiddetleri durumlarında torcu soğutmak için soğutma suyu devresi kullanılmaktadır. TIG kaynak yönteminde el ile kaynak yapıldığı gibi yarı otomatik ve tam otomatik olarak kaynak yapılabilir [18].

2.2.3.1. TIG kaynak torçları

TIG kaynak yönteminde torç, iş parçası ile ucundaki tungsten elektrod arasında kaynak için gerekli olan elektrik arkını oluşturabilmek için akım kablosundan aldığı akımı elektroda iletmek, koruyucu gazı kaynak banyosunun üzerini örtecek biçimde göndermek görevlerini yerine getirmek için geliştirilmiş bir elemandır.

TIG kaynak yönteminde kullanılan torçlar, uygulama koşulları göz önünde bulundurularak çeşitli tür ve büyüklüklerde üretilmektedirler. El ile yapılan TIG kaynağında kullanılan torçlar hafif, küçük ve elektrik akımı kaçaklarına karşı etkin bir biçimde yalıtımlı olarak tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Torç ile akım üretici gaz tüpü ve soğutma suyu bağlantıları değişik kalınlıklardaki kablolar ve hortumlarla sağlanır ve bunların tümü torç bağlantı paketi adı verilen çelik spiral takviyeli bir kalın hortum içine yerleştirilmiştir. Şekil 2.6' da TIG kaynak torcunun parçaları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. TIG kaynak torcunun parçaları [20]

Torçlar uygulamada kullanılabilecekleri en yüksek akım şiddetine göre sınıflandırılırlar. Her büyüklükteki torca belirli sınırlar içinde kalmak koşulu ile çeşitli çap ve türlerde elektrod ve gaz nozulu takılabilir. Torçları sınıflandırmada en önemli kriter yüklenebilecekleri en yüksek akım şiddeti olduğunda ve bu konuda torcun soğutma sistemini belirlediğinden genelde torçlar hava soğutmalı ve su soğutmalı olarak iki ana gruba ayrılırlar.

TIG kaynak torçlarına takılan gaz nozulları, torcun biçimine, türüne, kapasitesine, hava veya su soğutmalı olmasına, kullanılan gaz debisine ve kaynak yerine göre

değişik çaplarda ve türlerde olabileceği gibi değişik malzemelerden de üretilmiş olabilir [20].

2.2.3.2. TIG kaynak elektrotları

TIG kaynak yöntemi ile diğer elektrik ark kaynağı yöntemleri arasındaki en önemli fark, ek kaynak metalinin elektrot tarafından sağlanmaması ve elektrotun sadece ark oluşturma görevini üstlenmiş olmasıdır; bu bakımdan burada, erime sıcaklığı 3500°C civarında olan tungsten, elektrot malzemesi olarak seçilmiştir. Yüksek erime sıcaklığının yanı sıra tungsten çok kuvvetli bir elektron yayıcıdır ve yayınan elektronlar ark sütunu içinde kuvvetli bir elektron akımı oluşturur ve ark sütunundaki atomları iyonize ederek, arkın kararlılığını sağlar.

Günümüz endüstrisinde ticari saflıktaki tungsten (% 99.5 W) ile toryum, zirkonyum ve tantanyum ile alaşımlandırılmış elektrotlar kullanılmaktadır. Uygulamada karşılaşılan TIG kaynak elektrotlarını, saf tungsten elektrotlar, alaşımlı elektrotlar ve çizgili elektrotlar olmak üzere üç grup altında toplamak mümkündür. TIG kaynak elektrotları, AWS A5.12 ile DIN 32528 de bileşimlerine göre sınıflandırılmış ve bunları birbirlerinden kolaylıkla ayırt edebilmek için de renk kodları kullanılmıştır[21].

DIN 32528 de TIG kaynak elektrotlarının çapları (0,5), (1,0), (1,6), (2,0), (2,4), (3,0), (3,2), (4,0), (5,0), (6,0), (6,4) ve (8,0) mm boyları ise 50, 75, 150, 175 mm olarak belirlenmiştir. AWS A5.12 de ise elektrotların çapları (0,01), (0,02), (0,04), (1/16), (3/32), (1/8), (5/32), (3/16), (1/4) inç boyları ise 3, 6, 7, 12, 18 ve 24 inç olarak saptanmıştır. Yedi inçten daha uzun olanlar sadece mekanize ve otomatik kaynak yöntemlerinde kullanılırlar. Uygulamada elektrot çapı, elektrotun maksimum akım yüklenebilme kapasitesi göz önüne alınarak seçilmelidir, bu değere yaklaşıldığında arkın ısı yoğunluğu artmakta, daha stabil bir ark ile nüfuziyeti fazla, dikiş yüksekliği az bir kaynak dikişi elde edilebilmektedir. Tablo 2.2' de tungsten elektrodların kimyasal bileşimleri ve renk kodları gösterilmiştir [21].

Tablo 2.3. Tungsten elektrodların kimyasal bileşimleri ve renk kodları [20].

İşareti	Malzeme No	Oksit İçeriği	Katışıklar %	Renk Kodu
W	2,6005	-	< 0,20	Yeşil
WT 10	2,6022	0,90...1,20 ThO ₂	< 0,20	Sarı
WT 20	2,6026	1,80...2,20 ThO ₂	< 0,20	Kırmızı
WT 30	2,6030	2,80...3,20 ThO ₂	< 0,20	Leylak
Wt 40	2,6036	3,80...4,20 ThO ₂	< 0,20	Portakal
WZ 4	2,6050	0,30...0,50 ZrO ₂	< 0,20	Kahverengi
WZ 8	2,6062	0,70...0,90 ZrO ₂	< 0,20	Beyaz
WL 10	2,6010	0,90..1,20 LaO ₂	< 0,20	Siyah

2.2.3.3. Koruyucu gazlar

TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz kullanmanın tek amacı kaynak sırasında, kaynak banyosunu ve ergimeyen tungsten elektrodu havanın olumsuz etkilerinden korumaktır. TIG kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazlar, helyum ve argon veya bunların karışımı gibi asal gazlar olup, kimyasal bakımdan nötr karakterde, kokusuz ve renksiz monoatomik gazlardır. Bunlar kimyasal olarak nötr bir karakter taşır ve diğer elementlerle birleşmez, her ikisi de renksiz ve kokusuz birer gaz olup, yanmazlar. Hafif metal ve alaşımlarının kaynağında bulunan argonun çok saf olması istenir.

Oksijen ve azotu az olan argon temiz ve parlak bir kaynak dikiş yüzeyi verir. Eğer azot ve oksijen miktarı sınır üzerinde bulunursa, yapılan kaynakta dikişin yüzeyi ve geçiş bölgeleri gri kahverengi veya mat bir durum alır. Argon gazı 150-180 atmosfer basınç altında tüplere doldurularak nakledilir. Tüpün muhtevası, tüpün büyüklüğüne göre 6-9 m³'dür. Argon, oksijen gibi kaynak basıncına özel basınç düşürme monometreleriyle düşürülür. Argon miktarı, yine tüp üzerinde bulunan ve basınç düşürme monometresiyle birlikte takılan özel aletlerle ölçülür. Bu da ayrıca otomatik kumanda cihazına bağlıdır.

Kaynak sırasında koruyucu gazlar kaynak bölgesine bir ısı katkısında bulunmasalar da, ısı girdisini bir dereceye kadar etkilerler. TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak kullanılan asal gazlar veya bunların karışımı kaynak sırasında kızgın durumda bulunan tungsten elektrod ve erimiş kaynak banyosu ile bir reaksiyon oluşturmazlar, kaynak metalinin kalitesine olumsuz bir etkide bulunmalarına karşın, kaynak hızına ve kaynaklı bağlantının kalitesine önemli etkide bulunurlar [20].

Koruyucu gaz tüketimi ve dolayısıyla ayarlanması gereken gaz debisi;

- Malzemenin kalınlığından,
- Esas metalden,
- Elektrot çapından,
- İlave tel çapından etkilenir.

Ayrıca bu değerlerden, kaynak banyosunun büyüklüğü, ısının tesiri altındaki bölge, kaynak hızı, torcun hareketleri ve kaynak ağzının şekli ve çevredeki hava hareketleri (rüzgar vs.) nedeniyle sapmalar ortaya çıkabilir. Koruyucu gaz tüketimi, akış miktarının bağlı olduğu gaz memesinin çapı tarafından belirlenir. Tablo 2.3' te argon ve helyum gazlarının TIG yönteminde davranışlarının karşılaştırılması verilmiştir [18].

Tablo 2.4. Argon ve helyum gazlarının TIG yönteminde davranışlarının karşılaştırılması [19]

Argon	Helyum
<p>- Düşük ark gerilimi sonucu ısı girdisinin azalması, 1,5 mm' den ince parçaların el ile kaynağında büyük üstünlük sağlar.</p> <p>- Alüminyum ve alaşımları gibi yüzeyleri refrakter bir oksit tabakası ile kaplı malzemelerin kaynağında temizleme etkisi daha şiddetlidir.</p> <p>- Arkın tutuşması daaha kolaydır. Ark daaha sakin ve stabil yanar.</p> <p>- Havadan ağır olması nedeni ile daha az koruyucu gaz ile daha etkin bir koruma sağlar</p> <p>- Dik ve tavan kaynaklarında gaz sarfiyatının fazla olmasına karşın ısı girdisinin azlığı kaynakçının kolaylıkla hakim olabilmesine olanak sağlar.</p> <p>- Otomatik kaynak işlerinde hızın yükselmesi gözenek oluşumuna neden olur.</p> <p>- Farklı metallerin kaynağında daha iyi sonuç verir.</p>	<p>- Yüksek ark gerilimi ile oluşan daha sıcak ark ısı iletkenliği yüksek malzemeler ile kalın parçaların kaynağında üstün sonuçlar verir.</p> <p>- Yüksek ısı girdisi ve yüksek kaynak hızı daha dar bir ITAB oluşturur ve bunun sonucu kaynak bağlantısının mekanik özellikleri iyileşir ve çarpılması ve kendini çekmeler azalır.</p> <p>- Havadan çok daha hafif olması sonucu koruyucu gaz sarfiyatı yüksektir ve torcun memesinden çıkan gaz akımı hava hareketlerine hassastır.</p> <p>- Otomatik kaynak işlemlerinde yüksek kaynak hızlarında karşılaşılan gözenek ve yanma çentikleri oluşumu kontrol altına alınabilir.</p>

2.2.3.4. TIG kaynağının avantajları

- Bütün metal ve alaşımları kaynatılabilir. Paslanmaz çelikler, ısıya mukavim çelikler dökme demir ve çelik, alüminyum, Magnezyum, bakır ve alaşımları, titanyum, nikel, molibden, niyobyum, tungsten gibi.

- Bu yöntemle yapılan kaynaklarda mukavemet ve kalite bakımından mükemmel dikişler elde edilir.
- Dekapana ihtiyaç yoktur.
- Kaynak dikişleri genellikle kaynaktan sonra olduğu gibi kullanılır.
- Çok küçük alanın ısıtılması ve ısının sürekli transferi dolayısıyla diğer yöntemlere göre çarpılmalar daha azdır.
- Tungsten elektrodla dikişte çok az bir karbür ayrışması meydana gelir.
- Her çeşit birleştirme şekli uygulanabilir; yatay, dik ve tavan pozisyonlarında kaynak yapılabilir
- Kaynak torcu hafiftir ve dolayısıyla rahat bir çalışma olanağı sağlar.
- Bu yöntem sayesinde ayrı cins metalleri ve alaşımları birbirleriyle kaynatmak mümkündür.
- TIG kaynak yönteminde genellikle koruyucu gaz olarak Argon kullanılır.
- Kaynak dikişi üzerinde cüruf yoktur [21].

2.2.3.5. TIG kaynağının dezavantajları

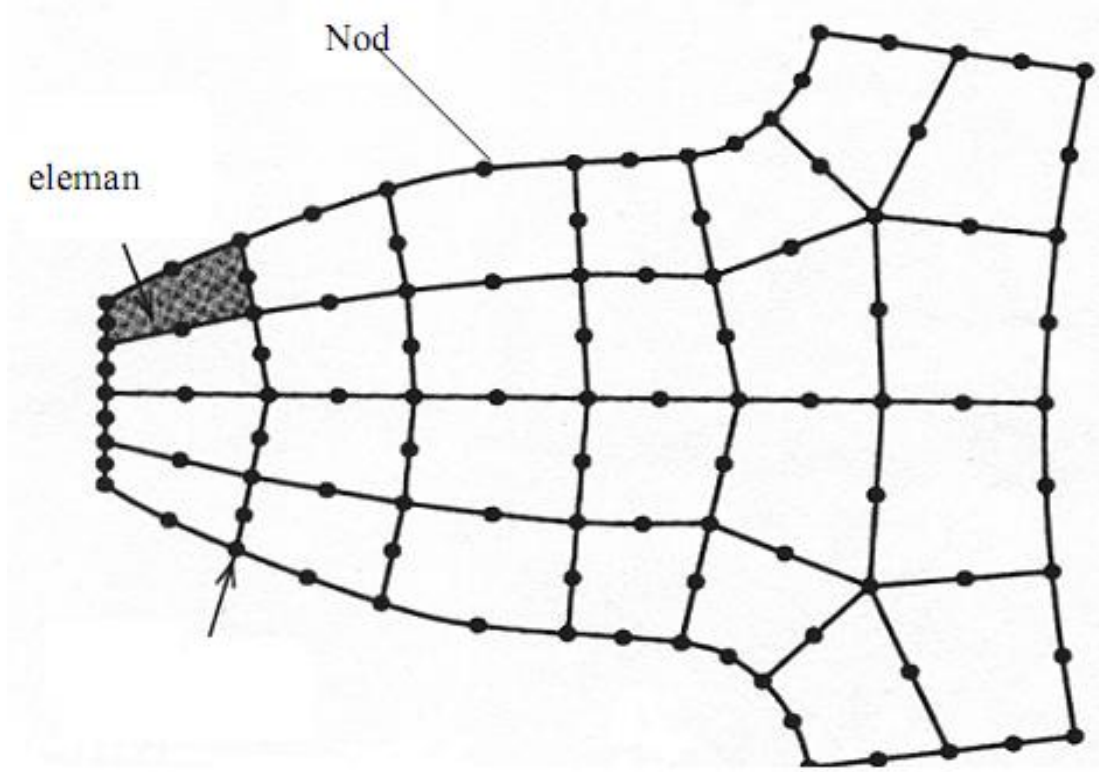
- TIG kaynağının metal yığıma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşüktür.
- Kalın kesitli malzemelerin kaynağında ekonomik bir yöntem değildir.
- Koruyucu gaz gerekir.
- Kirliliğe hassastır bu yüzden yüzey temizliği gerektirir.
- Açık havada zor kullanılır.
- Kimyasal yapı düzeltilemez [19].

BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar yöntemi; nümerik bir teknik olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Yöntem ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar düğüm noktası adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebirsel bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler düğüm noktalarındaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır [22].

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi $[K].[D]=[R]$ şeklindedir. Burada $[D]$ büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $[R]$ bilinen yük vektörü ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde $[K]$ rijitlik matrisi olarak bilinmektedir [23].



Şekil 3.1. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanlar [23]

3.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Tarihsel Gelişimi

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlandı. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuştur. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa Clough (1960) tarafından çalışmasında telâffuz edilmiştir. Metodun üç boyutlu problemlere uygulanması iki boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir (Argyis, 1964). İlk gerçek kabuk elemanlar aksenal simetrik elemanlar olup (Grafton ve Strome (1963)), bunları silindirik ve diğer kabuk elemanları izlemiştir.

Araştırmacılar 1960'li yılların başlarında non-lineer problemlerle ilgilenmeye başladılar. Turner ve diğerleri (1960) geometrik olarak non-lineer problemler için bir çözüm tekniği geliştirdi. Sonlu elemanlar metoduyla stabilite analizi ise ilk Martin (1965) tarafından tartışılmıştır. Statik problemlerin yanı sıra dinamik problemlerde

sonlu elemanlar metoduyla incelenmeye başlandı (Zienkiewicz ve diğerleri (1966)) ve Koenig ve Davids (1969). 1943 yılında Courant bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir [24].

Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar metoduyla çözümü 1960'li yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve Cheung (1965) sonlu elemanlar metodu ile Poisson denklemini çözmüştür. Doctors (1970) ise metodu potansiyel akışa uygulamıştır. Sonlu elemanlar metodu geliştirilerek ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan ve diğer birçok alana uygulanmaktadır.

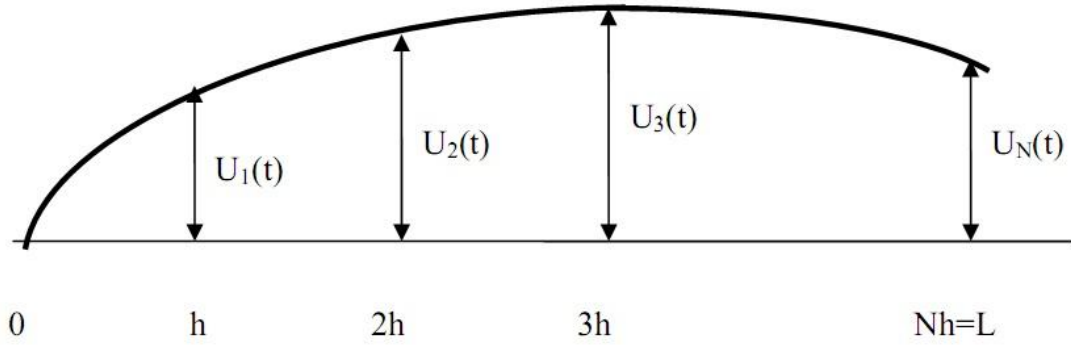
Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru ise artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlandı. 1990 yıllarının ortaları itibarıyla sonlu elemanlar metodu ve uygulamalarıyla ilgili yaklaşık olarak 40.000 makale ve kitap yayınlanmıştır [25].

3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Esasları

Yapıların karmaşıklığının giderek artması ve dijital bilgisayarların giderek daha karmaşık hale gelmesi sonucu sonlu elemanlar metodu ile yeni analiz yöntemleri geliştirilmesini beraberinde getirdi. Sonlu elemanlar yönteminin arkasındaki düşünce düzensiz yöntemler için bir formülasyon yaratıp bunu bilgisayara aktarmaktır. Sonuçta, bu metotla karmaşık, sürekli yapıların sonlu elemanlardan oluştuğu kabul ediliyor. Yer değiştirmelerin birbiriyle uyumlu olması ve iç kuvvetlerin birkaç eleman tarafından paylaşılan düğüm noktalarında dengede olmasıyla tüm yapı bir bütün olarak hareket etmeye zorlanır. Sonlu elemanlar yönteminin sürekli, küçük elemanlardan oluştuğu kabul edilse de, özünde bir ayırma işlemidir. Bu şunu ifade eder sürekli elemanların herhangi bir noktasındaki bir yer değiştirme sonlu elemanın düğüm noktasındaki deplasmanların bir interpolasyon fonksiyonu ile çarpılmasıdır.

Sonlu elemanlar yöntemini diğer tüm yöntemlere göre avantajı ilk olarak bir eleman için hareket denklemlerinin oluşturulup daha sonra bütün elemanlar için bunun birleştirilmesidir. Bir elemanın içindeki herhangi bir noktadaki hareket interpolasyon

fonksiyonu ile belirlenir. Burada, interpolasyon fonksiyonları genelde düşük dereceli ve tüm elemanlar için aynı olan polinomlardır. Şekil 3.2' de bir elemana ait deplasmanlar gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Bir elemana ait deplasmanlar [26]

Sonlu elemanlar metodu günümüzde yapısal analizlerde direk rijitlik metodu ile ilgili olarak kullanılmaktadır. Bu direk yaklaşım statik problemler için yeterli olabilir ancak titreşim gibi dinamik problemleri ele almada pek çok zorluğu vardır. Aslında sonlu elemanlar metodu Rayleigh-Ritz metodunun özel bir durumu olarak değerlendirilir. Başlangıcından beri metod bağımsız olarak elde edilmekle birlikte, bu sayede orijinal yapısal uygulamaların önüne geçmiştir [26].

3.3. Sonlu Elemanlarla Modelleme

3.3.1. Geometrinin modellemesi

Sonlu elemanlar metodunda modelleme basitçe nod ve elemanlardan oluşan bir ağ yapısı hazırlamak değildir. Problemi gerekli şekilde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek ancak problemin fiziğinin iyi şekilde anlaşılmasıyla mümkündür. Kötü şekil verilmiş elemanlar ile hesaplanması istenilen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtamayacak kadar büyük boyutlu elemanlar modellemede istenmez. Zaman ve bilgisayar olanaklarını boş yere harcamamıza neden olacak, gereksiz kadar çok sayıda elemanlardan oluşan bir modellemede istenmemektedir. Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama

alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır.

Sınır koşullarının doğru olarak anlaşılıp, modellenmesi son derece önemlidir. Özellikle simetrik yapılarda modelin sadece bir kısmının hesaplamalarda kullanılması yeterli olabilmektedir (örneğin yarısı veya dörtte biri gibi). Böyle durumlarda yüklemenin simetrik olup, olmamasına göre hesap alanının sınırındaki nodlarda sınır koşullarının doğru yorumlanması son derece önemlidir [23].

3.3.2. Eleman seçimi

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranında, elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılabilir [27]:

Tek boyutlu elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu (düzlem) problemlerinin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır.

Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri ekseni

etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, aksenal simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözüme olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.

Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikkörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir [28].

3.3.3. Yükler

Bir problemde sisteme etki edebilecek kuvvetler şunlar olabilir:

Tekil kuvvetler: Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğümüne ne yönde etki ediyorsa genel kuvvet vektöründe etki ettiği düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin cinsine göre tekil yük kavramı değişebilir. Örneğin ısı iletimi probleminde elastisite problemindeki tekil yüke karşılık noktasal ısı kaynağı veya tanımlı ısı akışı yükleri bulunmaktadır.

Yayıllı kuvvetler: Bu kuvvetler bir kenar boyunca ya da bir alanda etkili olurlar.

Kütle kuvvetleri: Eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir [29].

3.3.4. Sınır koşulları

Sınır koşulları yapıların mekaniğinde mesnet şartları olarak da isimlendirilmektedir. Sonlu eleman modellemelerinde sınır koşulları sık sık yanlış veya eksik olarak tanımlanmaktadır. Modellemede sınır koşullarına gerekli özen daima gösterilmelidir. Her ne kadar yapılan hata küçük gibi görülse de, sonuçlar üzerindeki etkisi oldukça büyük olacaktır. Sonlu elemanlar modelinde aktif olmayan serbestlik dereceleri çözüm işleminden önce sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırılması gereken serbestlik derecesi modelin sınırda veya başka bir bölgesinde olabilir.

Doğru bir modelleme için düzlem elemanların her bir nodu için üç serbestlik derecesi atanır. Sınır koşulları için ise yine sınırdaki yer alan nodlar için bu serbestlik derecelerinden bazılarının kısıtlanması gerekebilir. Bazı durumlarda gerçek problem için sınır koşulları net olarak anlaşılır olmayabilir. Böyle durumlar için çözümün üst ve alt sınırlarını iki ayrı analizle saptamak fiziksel olarak daha anlamlı olabilir. Örneğin iki uçundan mesnetlenmiş üniform yüklü bir kirişin uçları dönmeye belli olmayan bir dereceye kadar kısıtlanmış olabilir. Böyle bir durum için kirişin uçları bir çözüm için basit mesnetli olarak kabul edilir, diğer bir analiz içinse tamamıyla tespit edilmiş olarak kabul edilerek problem çözülür. İki analizden elde edilen değerler aslında gerçek problem için alt ve üst sınırları göstermektedir [23].

3.3.5. Sonuçların yorumlanması

Bu adım karar alınan ve belki de tüm işlem boyunca en önemli olan adımdır. Bu noktada iki önemli sorunun cevabı aranmalıdır: Sonuçlar ne kadar iyi ve bu sonuçlarla ne yapmalıyım? Birincisi hata tahmini yapılmasına ihtiyaç duyar ve ikincisi de problemin fiziksel doğasını kapsar. Bu soruların cevapları analizin tamamını veya belli adımlarını tekrar ettirmeyi gerektirebilir. Bununla birlikte uygulamada, problemlerin büyük kısmında, sadece aynı problemin çeşitli analiz sonuçlarını karşılaştırarak güvenilir sonuçlar elde edilebilir [25].

3.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları

Sonlu elemanlar yöntemini diğer yöntemlere üstün kılan başlıca özellikler şunlardır:

- Sonlu elemanlar, boyutlarının esnekliği nedeniyle, karmaşık şekilli bir cisim temsil edebilir.
- Çok bağıntılı bölgeler (bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler kolayca incelenebilir.
- Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme nonlineeriteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Sınır şartları kolayca uygulanır.

Seramik malzemeler gibi çok sert malzemelere başlangıç çatlakları açılması çok zor olmaktadır. Ayrıca böylesine zor koşullarda açılan çatlaklar istenen boyutlarda da oluşturulamamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, başlangıç çatlakları, bilgisayar ortamında, arzu edilen boyutta rahatlıkla oluşturulabilir [22].

3.5. Abaqus Sonlu Elemanlar Yazılımı

Abaqus, ileri seviye bir sonlu elemanlar yazılımı olup %100 sonlu elemanlar üzerine odaklanmış olan Abaqus Inc. tarafından geliştirilmiştir. Abaqus Inc.; havacılık, savunma, otomotiv, inşaat ve genel imalat endüstrisindeki kritik uygulamalar için ürün geliştiren dünya çapındaki firmaların ana sonlu elemanlar yazılım sağlayıcısıdır.

Sonlu elemanlar çözümlenmeleri için Abaqus, Se yazılımlarına göre daha yüksek performanslı, güvenilir, kaliteli daha gerçekçi Se modelleri oluşturmaya ve çözmeye imkân veren bir Se yazılımı olarak bilinir. Abaqus' ün 3 ana çekirdek yazılımı vardır. Abaqus /Standard, Abaqus /Explicit, Abaqus /Cae.

Abaqus /Standard; statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bunların bağlaşımlı çözümlenmeleri için geliştirilmiş, yeni ve gelişmiş eleman, malzeme ve temas modelleme kabiliyetine sahip güçlü bir sonlu elemanlar çözücüsüdür. Abaqus /Standard ayrıca plastik enjeksiyon kalıp çözümlenmeleri için ilgili yazılımlarla sonuç alışverişi yapabilmektedir. Abaqus/Explicit, zamana bağlı dinamik ve statik problemlerin modellenmesi ve çözümlenmesi için geliştirilmiş bir Se çözücüsüdür.

Abaqus /Cae, yukarıda bahsedilen Abaqus çözücülerini için tümünden bir kullanıcı arayüzü ortamı sağlar. Günümüz kullanıcı ve bilgisayar ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilmiş bir sonlu elemanlar yazılımıdır.

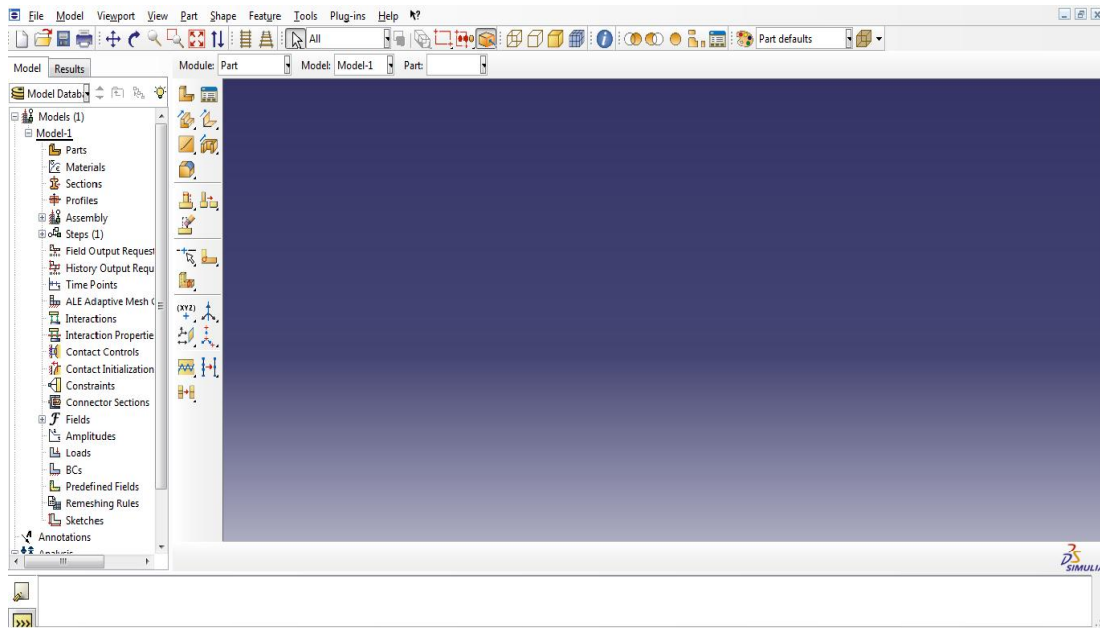
Abaqus ' u benzersiz yapan bazı güçlü özellikleri:

- İleri malzeme modelleri,
- Geni ve gelişmiş eleman kütüphanesi,
- Güçlü değişken temas çözümlenme yeteneği,

- İç ve dış akustik yayılımı,
- Conta modelleme yeteneği,
- Lastik malzeme hesaplamaları,
- SAPAT (Su Altı Patlama) çözümlene kabiliyeti,
- Büyük ölçekli Se çözümlenmeleri,
- Endüstrisi standardı güçlü ve güvenilir algoritmalar,
- Hızlı, kararlı, güvenilir doğrudan ve dolaylı çözümler,
- Yüksek çoklu işlem performansı,
- Kapalı (Implicit) ve Açık (Explicit) çözümlenmeler arasındaki sonuç,
- Uygulamaya dönük özelleştirilebilme,
- Mekanizmaların esnek kinematik ve dinamik analizleri,
- Unsur tabanlı parametrik modelleme [30].

3.5.1. Programın bölümleri

Abaqus/Cae programı çalıştırıldığında Şekil 3.3' de görülen ana pencere ekrana gelir. Öncelikle, Abaqus/Cae görsel bir şekilde bir problemin modellenerek analiz edebilmeyi sağlaması yanında birde komut yazılarak çözüme verilmesi olanağını sunmaktadır.



Şekil 3.3. Abaqus/Cae programının ara yüzü

Abaqus/Cae programının ara yüzü, kendi altında üç ayrı pencereden oluşmaktadır. Solda “Model Ağacı” ismi verilen bir pencerede kullanıcı parçanın modellenmesinden analiz sonuçlarının görüntülenmesine kadar olan tüm işlemler tanımlayabilmektedir. Sağda “Çizim Bölgesi” penceresi bulunmaktadır. Bu pencerede kullanıcı yaptığı tüm işlemleri görsel olarak görebilmektedir. En altta ise “Prompt Bölgesi” penceresi bulunmaktadır. Bu kısımda, kullanıcı yaptığı işlemlerin sonucunda program tarafında enteraktif diyalogları görebilir ayrıca “Python Script” te hazırlanmış hesap makinasını kullanabilir.

Menü çubuğu: Mevcut bütün menüleri içerir. Kontekst çubuğunda modül değiştirilirse menü çubuğunun da içeriği değişir, hangi modül seçildiyse o modül ile ilgili menüler gelir.

Araç çubuğu: Çok kullanılan bazı menülere hızlı erişim sağlar.

Kontekst (içerik) çubuğu: Yapılacak çalışmayı belirli bir düzende yapılabilmesi için kullanıcıya modüller sunar.

Model ağacı: Yapılan çalışmanın adımlarını model ağacında görülür. Model ağacı, yapılan çalışma üzerinde değişiklik yapabilme ve modüller arasında geçişi sağlar.

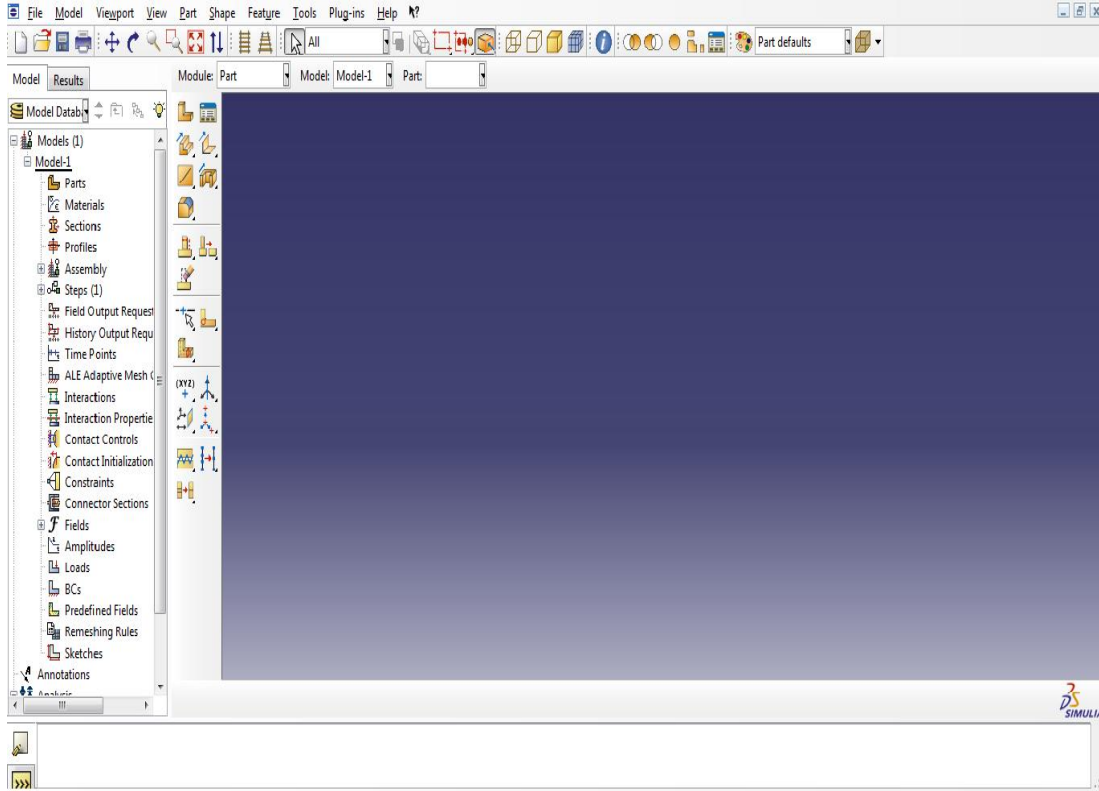
Araç kutusu bölgesi: Bir modele girildiği zaman o modülle ilgili komutlar araç kutusu bölgesinde bulunur. Aynı komutlar, menü çubuğunda da yer alır. Fakat araç kutusu sayesinde bu komutlara çok hızlı bir şekilde ulaşılabilir.

Çizim bölgesi: Çizimin yapıldığı ekrandır.

Prompt bölgesi: Bir komut seçildiği zaman o komutun kullanımı ile ilgili bilgi sahibi değilse kullanıcı, mesaj bölgesinde uyarıları takip ederek hangi adımları yapması gerektiğini görebilir [31].


3.5.2. Programın çalıştırılması

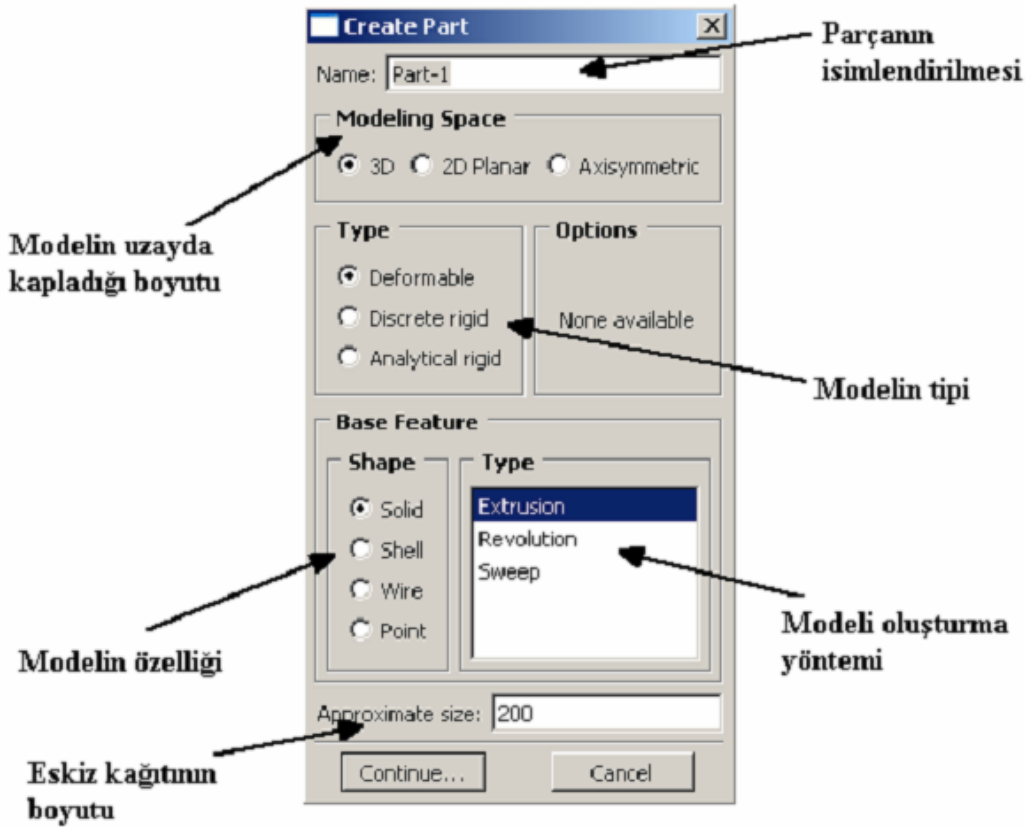
Abaqus/Cae programını çalıştırmak için: Başlat > Programlar > Abaqus 6.9-1 > Abaqus/Cae tıklanır. Program çalıştırdıktan sonra Şekil 3.4’ deki çalışma ekranı görüntülenir.



Şekil 3.4. Abaqus/Cae çalışma ekranı

3.5.3. Katı modelin oluşturulması

Veritabanı oluşturabilmek için  (New Model Database) butonuna tıklanır. Bu butona “File > New” yolu izlenerek de ulaşılabilir. Bu buton basıldıktan sonra Şekil 3.5’ te görülen “Create Part” diyalog kutusu görüntülenir. Diyalog kutusu malzemenin modellenebilmesi çeşitli seçenekler sunar.



Şekil 3.5. Abaqus/Cae katı model oluşturma menüsü

Parçanın isimlendirilmesi: Modellenen parçaların mantıklı bir şekilde isimlendirilmesini sağlar.

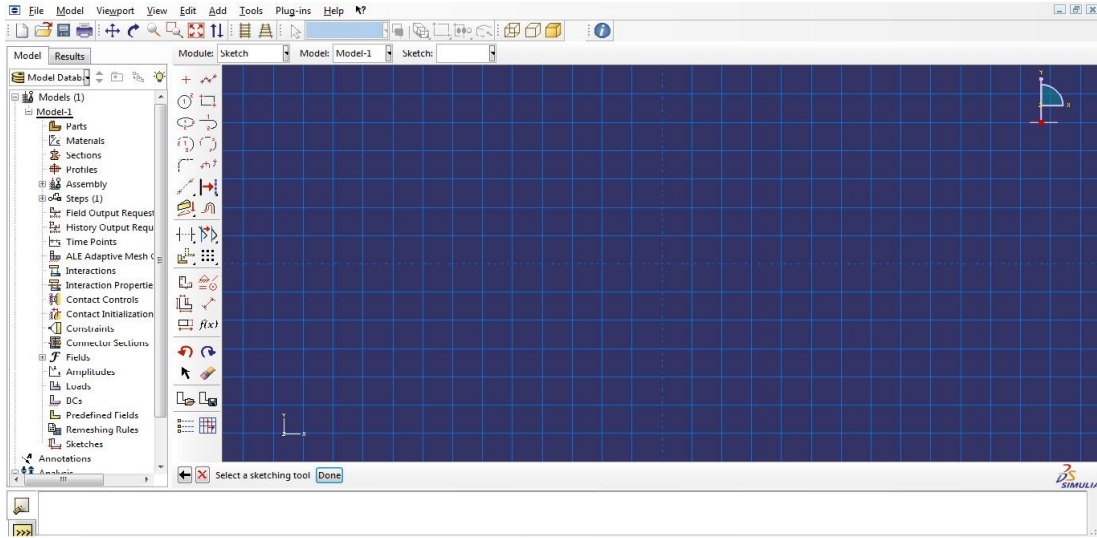
Modelin uzayda kapladığı boyut: Çalışılacak model üç boyutlu ise “3D”, eğer model iki boyutluysa “2D”, eğer model bir eksen etrafında simetrik ise “Axisymmetric” seçeneği seçilir.

Modelin özelliği: Oluşturulacak modelin tipi katı ise “Solid”, kabuk ise “Shell”, çubuk veya ince kiriş ise “Wire”, eğer noktalardan oluşuyorsa “Point” seçeneği seçilmelidir.

Modeli oluşturma yöntemi: Bu kısım kullanıcıya en kolay hangi şekilde modellemenin oluşturulabileceğini sunmaktadır.


Modelin tipi: Modelin tipini belirlemeye yardımcı olur.

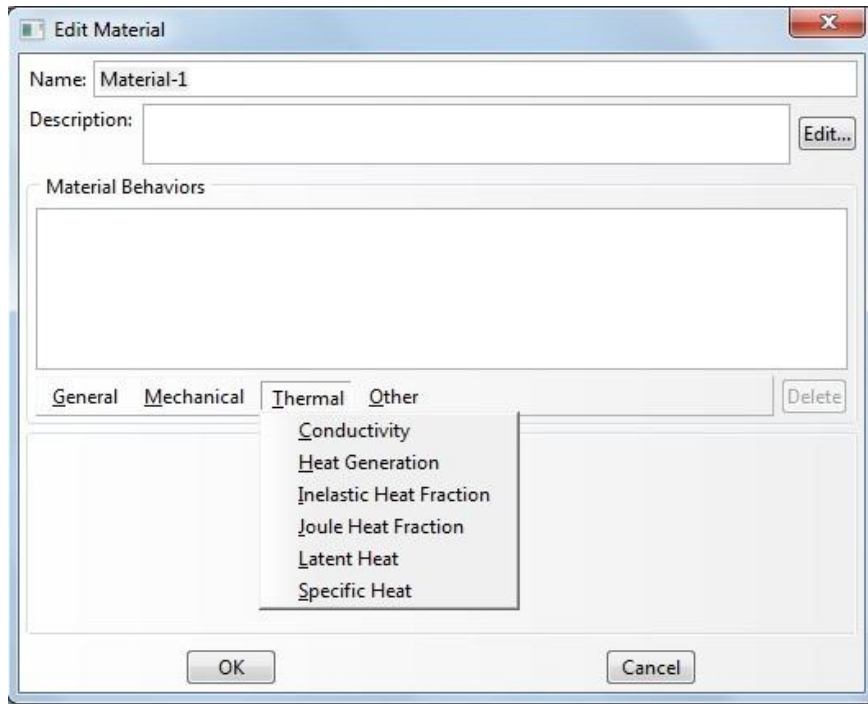
Eskiz kâğıdının boyutu: Program çizimin kolay bir şekilde yapılabilmesi için otomatik olarak çizim alanını böler. Her dilim arasındaki mesafenin ne kadar olması isteniyorsa ölçü bu kutuya girilir. Şekil 3.6. da Abaqus/Cae çizim ekranı gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Abaqus/CAE çizim ekranı

3.5.4. Malzeme girişi

Ürünün modellenmesi yapıldıktan sonra oluşturulan modelin malzeme özellikleri tanımlanmalıdır. Create Material  butonunu tıkladıktan sonra Şekil 3.7' de ki pencere ekrana gelir. Tanımlama işlemi Şekil 3.7' de görülen ekranda yapılır

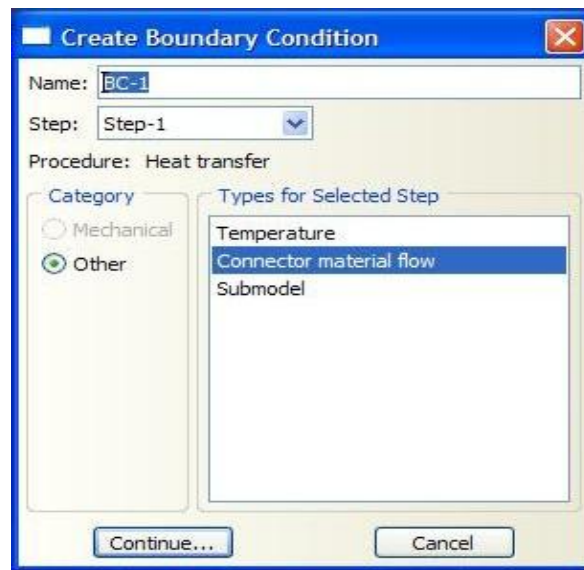


Şekil 3.7. Malzeme tanımlama ekranı

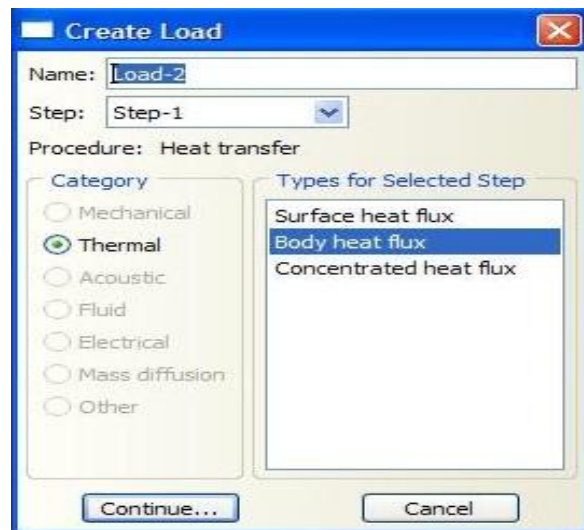
Malzemeye isim verildikten sonra malzemenin cinsi ve davranışı seçeneklerden seçilir. Aynı anda malzemeye birçok özellik tanımlanabilir ve en ince ayrıntısına kadar malzemenin davranışları programa tanımlanabilir.

3.5.5. Sınır şartların ve yüklerin tanımlanması

Şekil 3.8’ de görülen menüde malzemenin sınır şartları tanımlanır. Şekil 3.9’ da görülen menüde yükler tanımlanır.



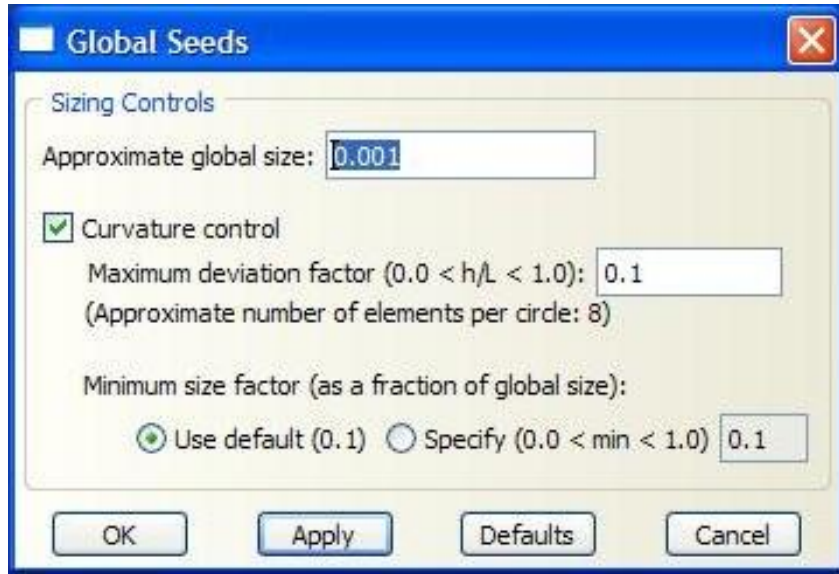
Şekil 3.8. Sınır şartları menüsü



Şekil 3.9. Yükler menüsü.

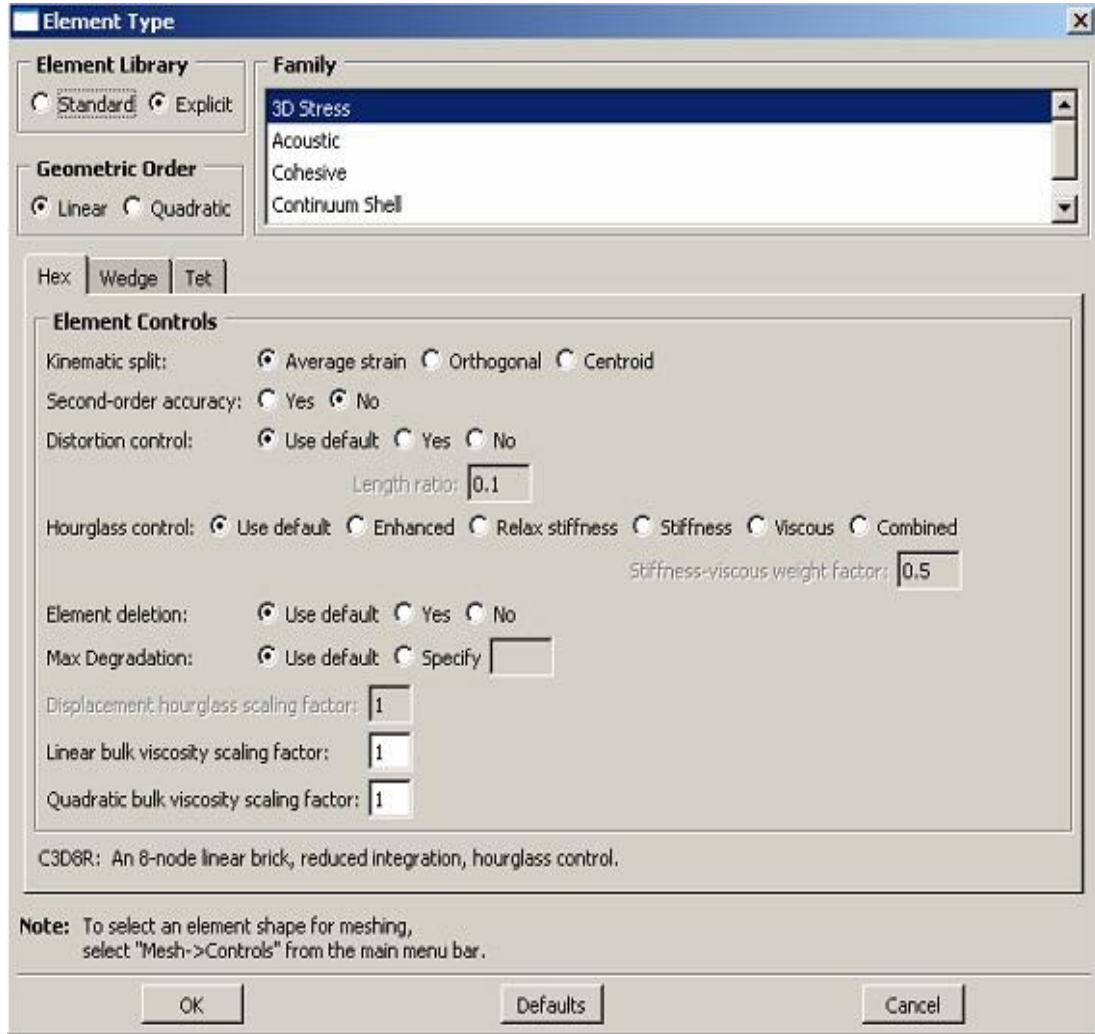
3.5.6. Parçanın (mesh) bölünmesi

Abaqus/Cae kullanıcıya otomatik olarak kendi seçtiği en küçük mesh boyutlarını sunmaktadır. Eğer analizin daha doğru ve kesin sonuçları vermesi istenirse kullanıcı tarafından mesh değeri daha da düşürülebilir. Değer çok küçük olursa, bu parçadaki eleman sayısı artır ve analizin çözülmesi daha uzun zaman alır. Analiz hızı bilgisayar özellikleriyle doğru orantılıdır.



Şekil 3.10. Mesh menüsü

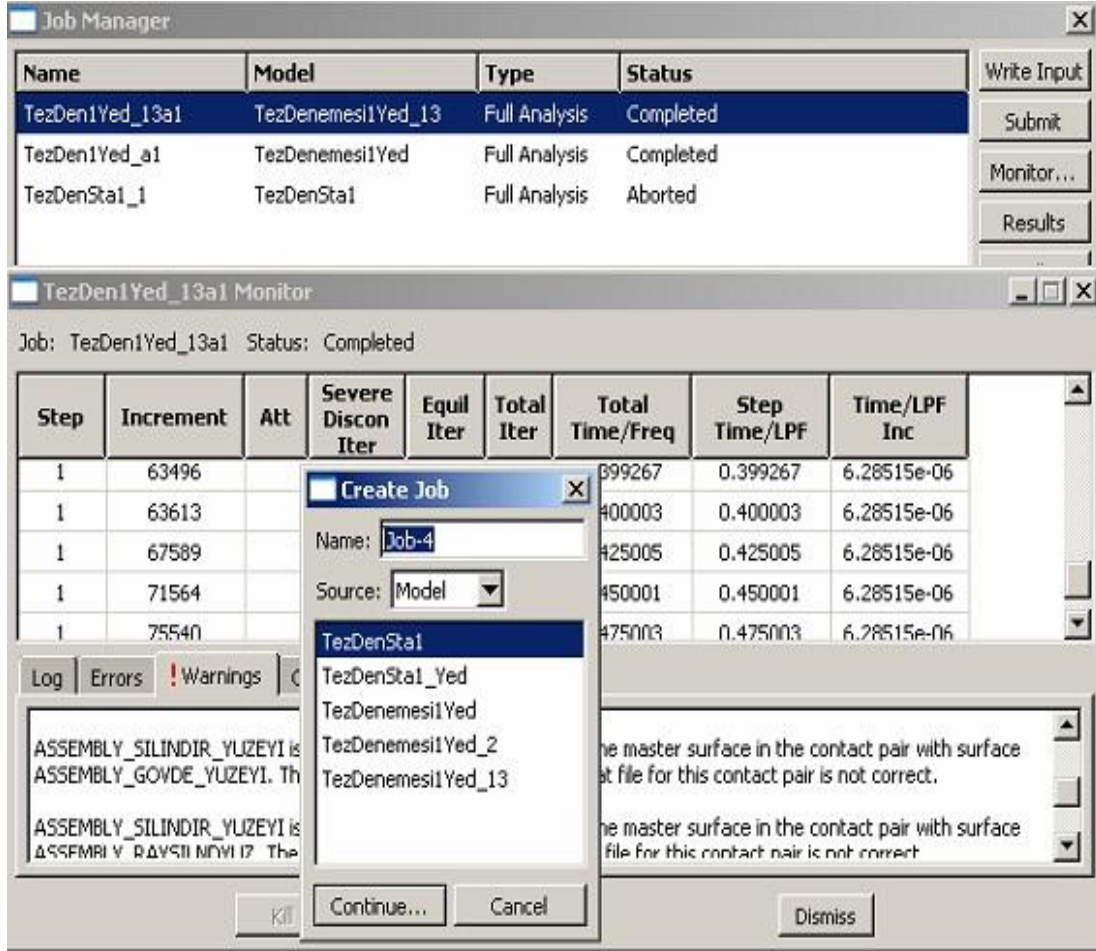
Parça mesh edildikten sonra eleman tipi kısmına geçilir. Abaqus/Cae programının en önemli özelliklerinden biri de bizim seçtiğimiz model tipine uygun olan eleman tipi seçeneklerini sunmasıdır. Burada bilinmesi gerek husus, yapılacak yüklemeler sırasında parçanın maruz kalacağı deformasyonlara uygun tepki verecek eleman tipinin seçilmesidir. Şekil 3.11' de eleman tipi seçme menüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Element tipi menüsü

3.5.7. İş (job) menüsü

Bu menüde, analiz sırasında oluşan hataları, analizin hangi durumda olduğunu veya uyarıların neler olduğu gözlemlenebilmektedir. Analizin bitmesinde sonra sonucun yazı editörüne kaydedilmesi veya görüntülenmesi sağlanır. Şekil 3.12’ de iş menüsü ekranı gösterilmektedir.



Şekil 3.12 İş menüsü

3.5.8. Analiz sonrası işlemler (postprocessor) menüsü

Abaqus/Cae programının bir diğer güçlü özelliği analiz sonucunda sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması için yeterli görsel araçları sağlamasıdır. Postprocessing aşamasında çözümde elde edilen değerler ekrana grafik olarak yansıtılmakta, karşılaştırmalar yapılmakta ve çıktı alınmaktadır. Örneğin, çözümü yapılmış bir parçanın gerilme, ivme, sıcaklık, yer değiştirme vs. gibi önemi yüksek sonuçlar görsel olarak gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, yukarıda bahsettiğimiz sonuçların gözlenmesi sırasında parça analiz adımları süresince nasıl hareket ettiğini hareketli bir görüntü şeklinde birebir taklidi yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Bu aşamada ayrıca çeşitli enerjilerin zamana göre dağılımları izlenebilmektedir. Aşağıda verilen menüden analiz sonrasında birçok sonucun görüntülenmesi sağlanmaktadır [31].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kaynak Malzemesinin Özellikleri

Deneysel çalışmada St 37 düşük alaşımlı çelik malzeme kullanılmıştır. Kaynak işleminde kullanılmak üzere St 37 çelik malzeme şerit testerede, tozaltı kaynağı için 300x100x15 mm, MAG kaynağı ve TIG kaynağı için 150x100x10 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Tablo 4.1’ de kaynak işleminde kullanılan St 37 çelik malzemenin kimyasal içeriği, Tablo 4.2’ de kaynak işleminde kullanılan St 37 çelik malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. 1. St 37 çelik malzemenin kimyasal özellikleri [32]

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%ağırlık)													
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	W	Fe
St 37	0.217	0.001	0.426	0.026	0.022	0.0001	0.064	0.001	0.001	0.001	0.017	0.001	0.003	99.2199

Tablo 4.2. St 37 çelik malzemenin mekanik özellikleri [32]

Çelik Türü	Çekme Dayanımı Td Kg/cm ² (N/mm ²)	Akma Sınırı Kg/cm ² (N/mm ²)	Elast. Modülü E: Kg/cm ² (N/mm ²)	Isı Genleşme Katsayısı
St 37	3700-4500 (363-4 91)	2400 (235)	2.100.000 (206.182)	0.000012

4.2. TIG Kaynağı

St 37 çelik malzemenin TIG kaynağında Esab Origo™ TIG 3001i marka TIG kaynak makinası kullanıldı. Şekil 4.1’ de TIG kaynak makinası gösterilmiştir. Makinanın teknik özellikleri Tablo 4.3’ de verilmiştir. TIG kaynağında elektrod olarak 1,6 mm

apında ve 150 mm uzunluğunda tungsten elektrod kullanıldı. Kaynak makinesi 22 volta ve 135 ampere ayarlandı. Kaynak torcu (-) kutuba bağlanarak ve makine doğru akımda çalıştırıldı. Kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korumak için argon gazı kullanılmıştır. Kaynak hızı 3,6 m/h dir.



şekil 4.1. TIG kaynak makinesi [33]

Tablo 4.3. TIG kaynak makinasının teknik özellikleri [33]

Teknik Özellikler	Origo™TIG 300i
Şebeke Gerilimi, 3 faz	400 V-50/60 Hz
Sigorta	16 A
Akım aralığı (TIG)	4-300 A
Akım Aralığı (MMA)	16-300 A
Kaynak Akımı (% 35)	300 A/ 22 V
Kaynak Akımı (% 60)	240 A/19.6 V
Kaynak Akımı (% 100)	200A/18V
Boşta Çalışma Gerilimi	57-67 V
Boyutlar, mm (u×g×y)	652×249×423
Ağırlık	3 kg

4.3. MAG Kaynağı

Numunenin MAG kaynağında ESAB Origo™ Mig C 280 marka kaynak makinası kullanılmıştır. Şekil 4.2' de kaynak makinasının resmi gösterilmiştir. Kaynak makinasının teknik özellikleri Tablo 4.4' de verilmiştir. Kaynak işleminden önce kaynak makinesi 30 volt ve 200 ampere ayarlanmıştır. Kaynak makinesinde kullanılan kaynak teli "GEKA SG 1" marka olup 0,8 mm kalınlığındadır. Kaynak banyosunu havanın zararlı etkilerinden korumak amacıyla CO₂ gazı kullanılmıştır. Tel hızı 18 m/h olup kaynak hızı 15 m/h dir.



Şekil 4.2. MAG kaynak makinası [34]

Tablo 4.4. MAG kaynağının teknik özellikleri [34]

Teknik Özellikler	Origo™Mig Pro C 280
Şebeke Gerilimi, 3 faz	400/415 V,50/60Hz
Kaynak Akımı (% 30)	280 A/28V
Kaynak Akımı (% 60)	190 A/24V
Kaynak Akımı (% 100)	150 A/22V
Gerilim Kademe Sayısı	10
Tel Besleme Hızı, m/min	1.9-19
Tel Çapı (paslanmaz) Ø mm	0.6-1.0
Boyutlar mm (u×g×y)	840×425×830
Ağırlık	97 kg

4.4. Tozaltı Kaynağı

Numunelerin tozaltı kaynağında ESAB A6 Mastertrac marka tozaltı kaynak makinesi kullanıldı. Şekil 4.3' de tozaltı kaynak makinasının resmi gösterilmektedir. Tablo 4.5' de kaynak telinin kimyasal içeriği verilmiştir. Kaynak makinesinin teknik

özellikleri Tablo 4.6’ da verilmektedir. Kaynak işlemine başlamadan önce kaynak makinesi 35 volta ve 500 ampere ayarlandı. Deneysel çalışmada kullanılan kaynak telinin cinsi “Geka S2” olup kaynak telinin çapı 3,2 mm dir. Tel hızı 11,5 m/s, kaynak hızı 25 m/h olarak ayarlanmıştır. Kaynak işleminde kaynak banyosunu havanın zararlı etkilerinden korumak amacıyla “GEKA ELİFLUX BFB” bazik tip kaynak tozu kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Tozaltı kaynak makinesi [35]

Tablo 4.5. Kaynak telinin kimyasal içeriği

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,12	0,1	1,0	0,025	Max 0,025	Max 0,3

Tablo 4.6. Tozaltı kaynağının teknik özellikleri [35]

Özellikler	Tek telli tozaltı	İki telli tozaltı	İki kafalı tozaltı
%100 devrede kalma oranındaki güç. (A)	1500	1500	2x1500
Tel çapı, mm	3.0-6.0	2x2.0-3.0	2x3.0-6.0
Tel sürme hızı, (m/min)	0.2-4.0	0.2-4.0	0.2-4.0
Traktör hızı, (m/min)	0.1-2.0	0.1-2.0	0.1-2.0
Ölçüler (mm)	1410x750	1410x750	1410x990
Ağırlık (kg)	110	110	158

4.5. Numunelerin Hazırlanması

Kaynak işlemi uygulanan St 37 çelik malzemelerden Şekil 4.4' de görünen Netkon Metacut marka kesme cihazı yardımıyla ITAB bölgesine en yakın yerden numuneler alındı. Alınan numuneler metalografi için zımparalama işleminde kolaylık sağlaması amacıyla içinde reçine bulunan bir kalıba konularak kalıplandı.



Şekil 4.4. Numune kesme cihazı [36]

Kalıplanan numuneler sırasıyla 80, 120, 200, 400, 600, 800, 1000 numaralı zımpara kâğıtlarıyla düzgün yüzeyler elde edilene kadar zımparalandı. Zımparalama işleminde Şekil 4.5' de görülen Netkon Gripo marka zımpara makinası kullanıldı.

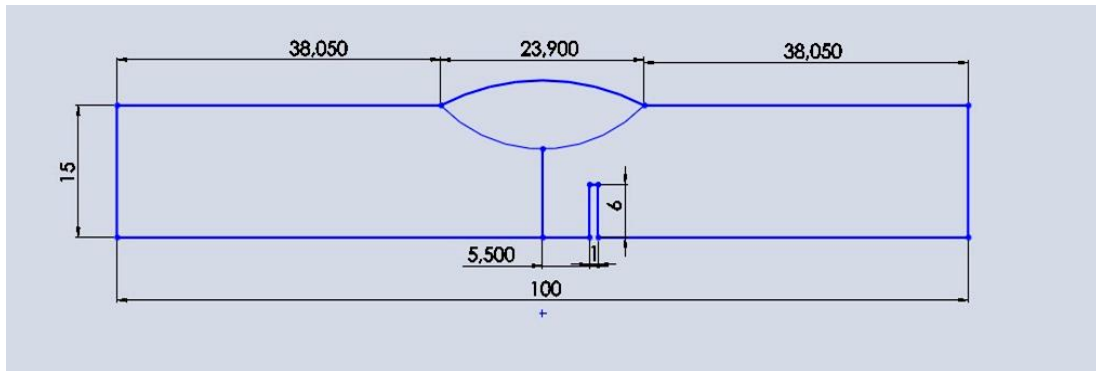


Şekil 4.5 Netkon Gripo zımparalama makinesi [37]

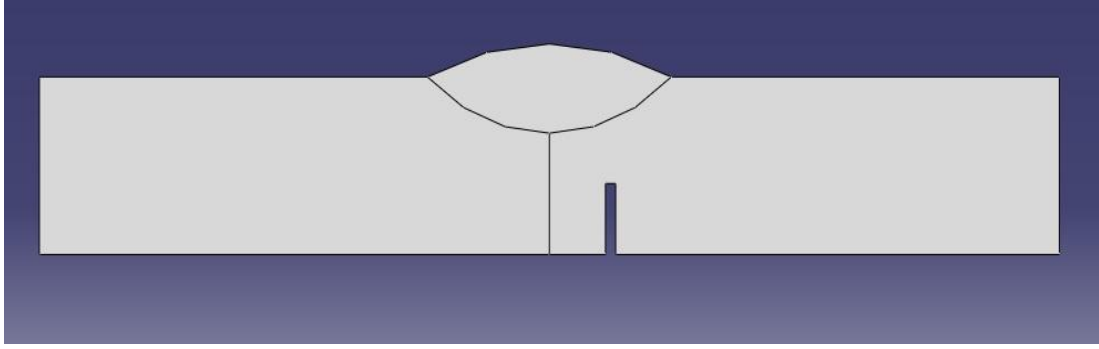
Numunelerin zımparalama işlemi bittikten sonra Şekil 4.5’ de görülen makineye parlatma çuhası takılarak 1 μm ’ luk elmas parlatma solüsyonu yardımıyla numuneler pürüzsüz bir yüzey elde edilene kadar parlatıldı. Parlatılan numuneler nitrik asit ile yüzeyleri dağlandı. Daha sonra Nikon SM2 8000 marka mikroskop ile mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.

4.6. Kaynaklı Parçanın Geometrik Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada modelleme işlemi Sakarya Üniversitesi adına lisanslı Abaqus 6.9-1 programı ile yapıldı. Malzemeler tozaltı kaynağında 300x100x15 mm, TIG ve MAG kaynağında 150x100x10 mm boyutlarında olup St 37 çelik malzeme kullanıldı. Malzeme aksenel olduğu için iki boyutlu modellendi. Şekil 4.6’ da modellenen parçanın boyutları ve Şekil 4.7’ de modellenen malzeme gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Modellenen parçanın boyutları



Şekil 4.7. Modellenen parçanın iki boyutlu görünüşü

4.6.1. Malzeme tanımlama

Malzeme olarak St 37 çelik çelik kullanılmıştır. Assembly modülünden Property modülüne geçiş yapılarak Material > Create yolu izlenildi ve ekrana gelen Edit Material diyalog kutusuna gerekli malzeme özellikleri girildi. Parçanın iletkenlik değerleri Şekil 4.8’ de, özgül ısı değeri Şekil 4.9’ da ve Şekil 4.10’ da yoğunluk değeri verilmiştir.

	Conductivity	Temp
1	51.9	273
2	51.1	373
3	46.1	573
4	41.05	623
5	37.5	823
6	35.6	873
7	30.64	993
8	26	1023
9	250	1723
10	100	1783
11	50	1853

Şekil 4.8. Parçanın iletkenlik değerleri

Edit Material

Name: st37

Description:

Material Behaviors

Conductivity
Density
Specific Heat

Specific Heat

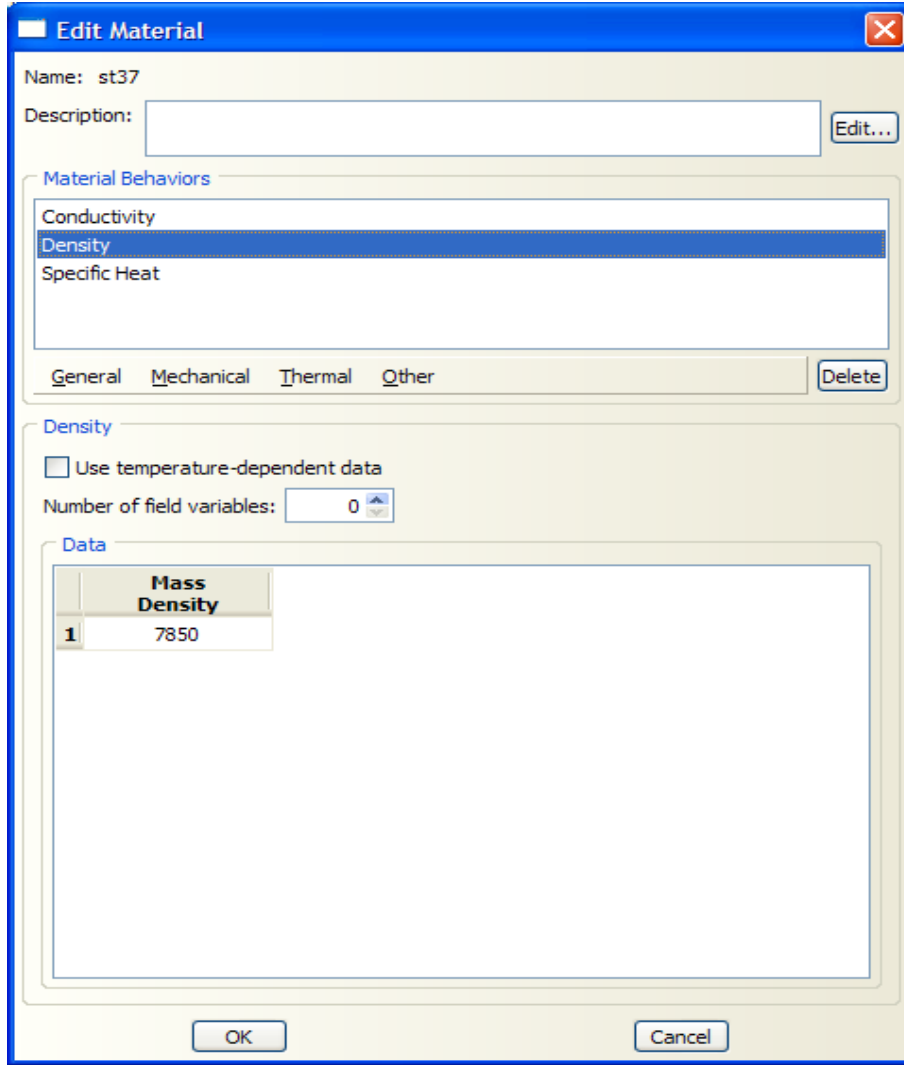
Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Data

	Specific Heat	Temp
1	450	273
2	499.2	373
3	565.5	573
4	630.5	623
5	705.5	823
6	773.3	873
7	1080.4	993
8	931	1023
9	437.93	1723
10	400	1783
11	735.25	1853

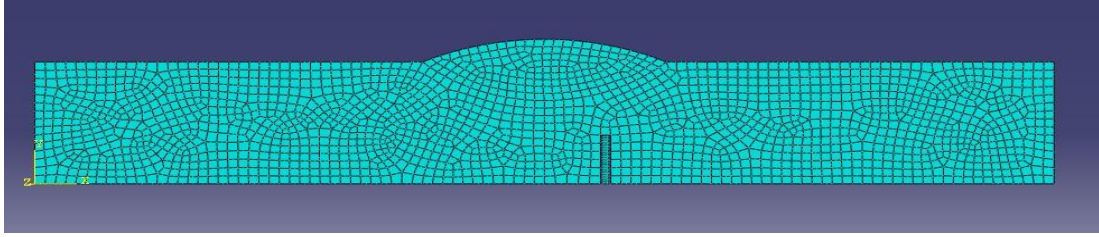
Şekil 4.9. Parçanın özgül ısı değeri



Şekil 4.10. Parçanın yoğunluk değeri

4.6.2. Mesh işlemi

Malzeme tanımlama işleminden sonra mesh işlemine geçilmiştir. Kullanılan element tipi genel olarak quad (dört yüzlü iki kenarlı) olmakla birlikte parçanın küçük bir kısmında triangular eleman kullanılmıştır. Şekil 4.11' de mesh edilen malzeme gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Modellemede kullanılan mesh edilmiş parça

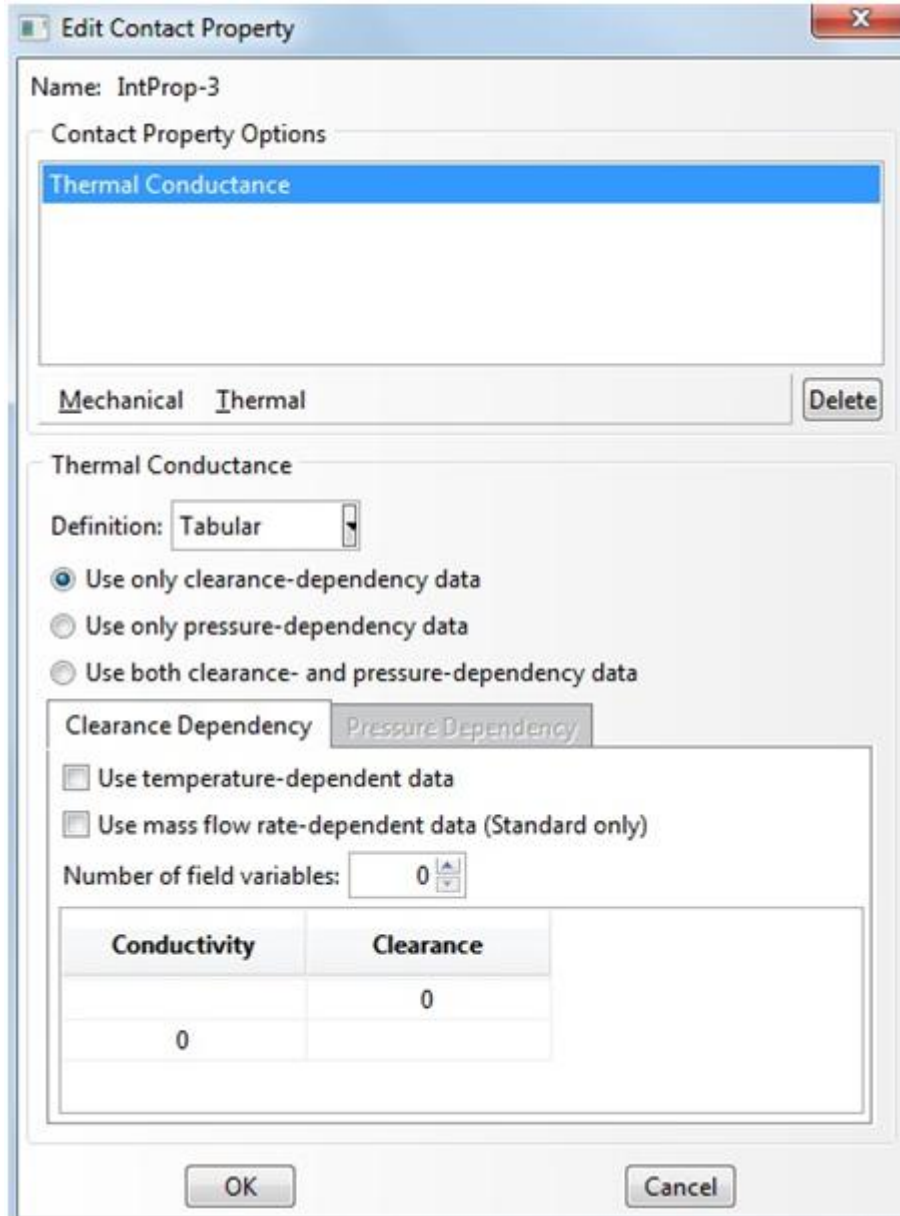
TIG kaynak yöntemiyle kaynaklanan parçanın modellenmesinde 3730 düğüm noktası ve 1158 elementten, MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanan parçanın modellenmesinde 3887 düğüm noktası ve 1210 element, tozaltı kaynak yöntemiyle kaynaklanan parçanın modellenmesinde 5984 düğüm noktası ve 1989 element kullanılmıştır.

4.6.3. Analiz tipi seçimi

Mesh işleminin ardından yapılacak analiz tipi belirlendi. Analiz tipi olarak termal analiz seçildi.

4.6.4. Temas özelliklerinin belirlenmesi

Step meüsünden Interaction modülüne geçiş yapılarak Interaction > Property > Create > Contact yolu izlenildi ve ekrana gelen Edit Contact Property diyalog kutusuna gerekli temas özellikleri girildi. Şekil 4.12' de Edit Contact Property diyalog kutusu görülmektedir.

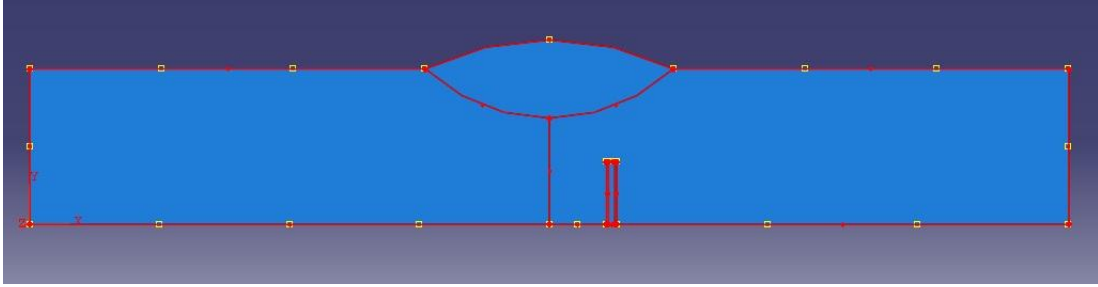


Şekil 4.12. Edit Contact Property diyalog kutusu

Ardından Edit Contact Property diyalog kutusuna girilen bu temas özellikleri, Iteraction > Cretate > Surface to surface contact yolu izlenerek parça ile prob arasındaki temas yüzeyine atandı.

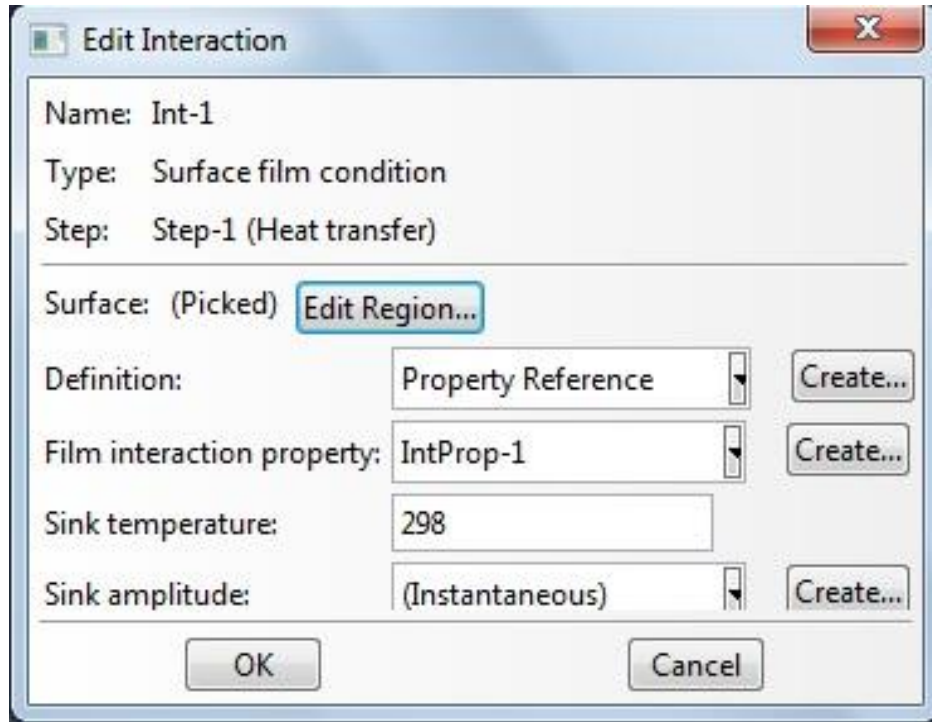
4.6.5. Taşımın özelliklerinin belirlenmesi

Interaction menüsü içerisinde iken Interaction > Create > Surface film condition yolu izlenerek havayla temas eden yüzeyler belirlendi. Şekil 4,13' de parçanın havayla temas eden yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 4.13. Havayla temas eden yüzeyler

Edit Interaction diyalog kutusuna kaynak işlemi sırasında ki ortam (hava) sıcaklığı 298 K olarak girildi. Şekil 4.14' de Edit Interaction diyalog kutusu görülmektedir.



Şekil 4.14. Edit Interaction diyalog kutusu

4.6.6. Sıcaklık değerlerinin girilmesi

Parçaya kaynak işlemine başlamadan önceki ortam sıcaklığını atayabilmek için Predefined Field > Create yolunu izledik ve ekrana gelen Create Predefined Field diyalog kutusunda Temperature özelliğini seçtik. Daha sonra Edit Predefined Field diyalog menüsü ortam sıcaklığı 293,3 K girildi.

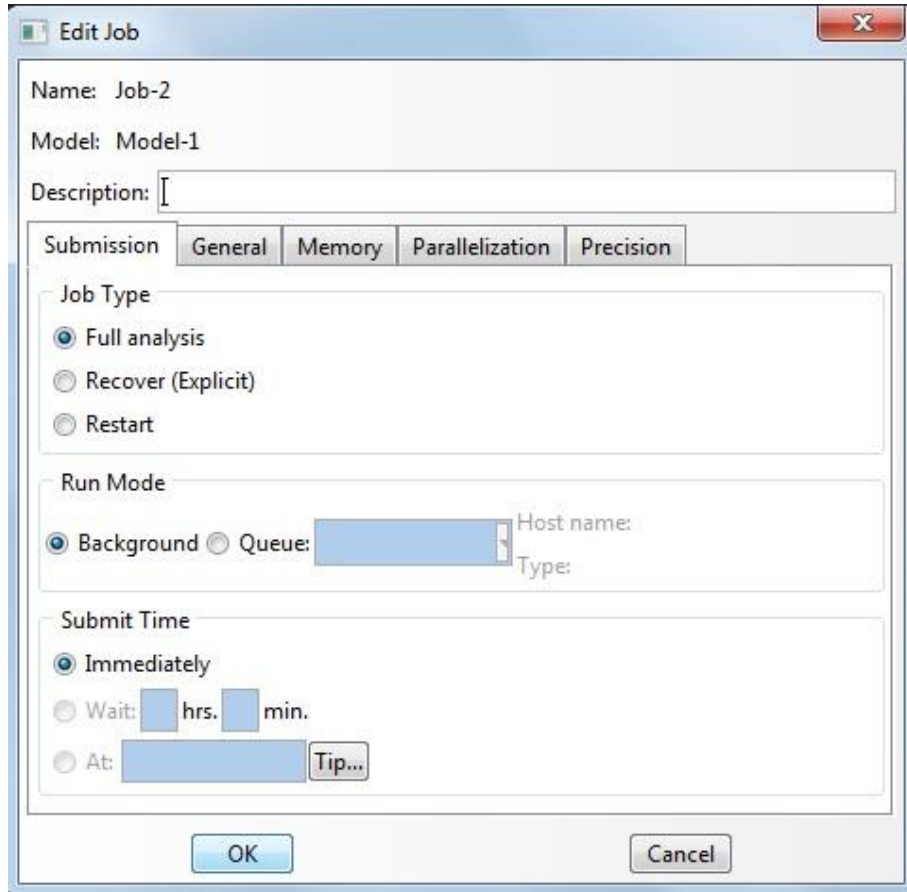
Analiz başlangıcında parçanın sıcaklığı ortam sıcaklığına eşittir. Isı kaynağını tanımlamak için Fortran yazılım programı kullanılarak kodlar yazılmış ve ısı kaynağı analiz programında ancak bu şekilde tanımlanabilmiştir.



Şekil 4.15. Edit Predefined Field diyalog menüsü

4.6.7. Analizi başlatma

Analizi başlatmak için Create Job komutu ile yeni bir iş oluşturulmuştur. Full Analysis seçilmiştir. İş oluşturulmasının ardından analiz çalıştırılarak böylece analiz bitmiş oldu. Şekil 4.16' da iş menüsü görülmektedir.



Şekil 4.16. İş menüsü

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR ve İRDELEME

5.1. TIG Kaynak Yöntemi

Deneysel çalışmada St 37 çelik malzeme kullanılmıştır. Kaynak edilecek çelik malzeme şerit testerede 150x100x10 mm boyutlarında kesilmiştir. Kaynak işlemine başlamadan önce kaynak makinesinde gerekli parametreler ayarlanmıştır. Kaynak makinesi 22 volta ve 135 ampere ayarlandı. Kaynak torcu (-) kutuba bağlanarak ve makine doğru akımda çalıştırılmıştır. Kaynak işleminde saf tungsten elektrod ve kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korumak için argon gazı kullanılmıştır. Kaynak hızı 3,6 m/h dir. Şekil 5.1' de kaynak edilen malzeme görülmektedir.

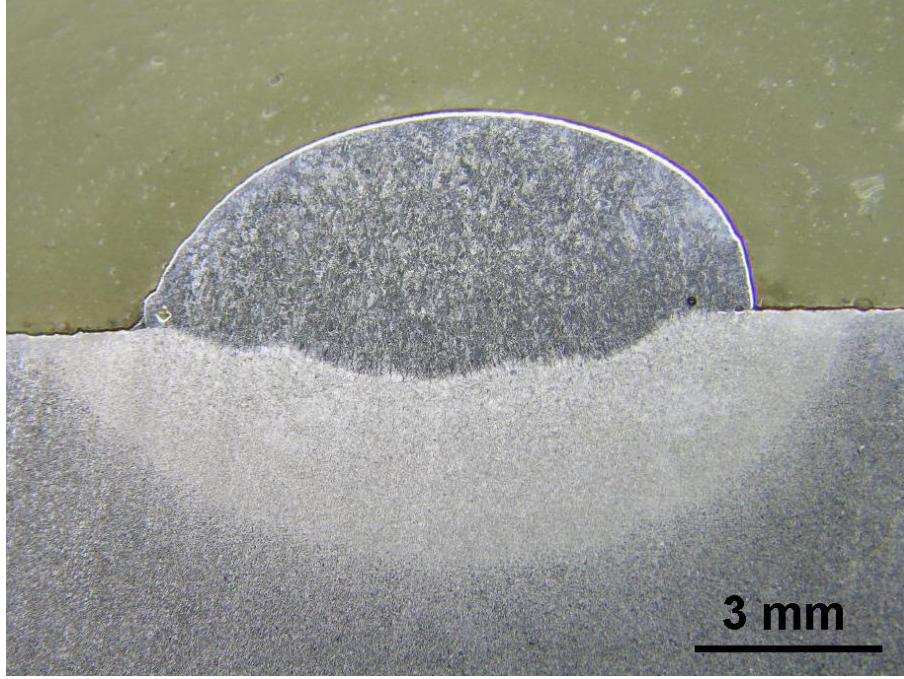
5.1.1.TIG kaynağının mikro ve makro yapı incelemeleri

Kaynak dikişinin Şekil 5.1' de ısının tesiri altında bölge görülmektedir. Kaynak dikişi düzgün ve kaynak parametrelerine uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 5.1. TIG kaynak dikişinin makro yapısı

TIG kaynak işlemi yapılan numune ITAB bölgesinin hemen yanından kesilerek metalografik işlemler uygulandı. 10x büyütme yapılan malzemenin mikro yapısı Şekil 5.2’ de görülmektedir. Şekilde ITAB ve nüfuziyet bölgeleri görülmektedir.



Şekil 5.2. TIG kaynak dikişinin 10x büyütmedeki mikro yapısı

5.2. Tozaltı kaynağı

Deneysel çalışmada St 37 çelik sac malzeme kullanılmıştır. Kaynak edilecek çelik malzeme şerit testerede 300x100x10 mm boyutlarında kesilmiştir.

Kaynak işlemine başlamadan önce kaynak makinesi 35 volta ve 500 ampere ayarlandı. Deneysel çalışmada kullanılan kaynak telinin cinsi “Geka S2” olup kaynak telinin çapı 3,2 mm dir. Tel hızı 11,5 m/s, kaynak hızı 25 m/h olarak ayarlanmıştır.

Kaynak işleminde kaynak banyosunu havanın zararlı etkilerinden korumak amacıyla “GEKA ELIFLUX BFB” bazik tip kaynak tozu kullanılmıştır.

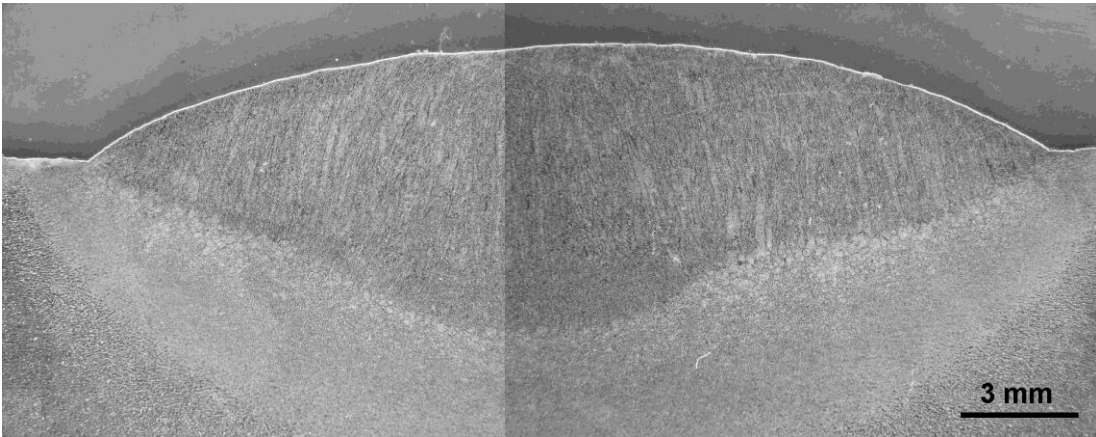
5.2.1.Tozaltı kaynağının mikro ve makro yapı incelemeleri

Kaynak dikişi yerde yatay pozisyonda yapılmıştır. Şekil 5.3' de kaynak işleminde ki elektrod hareketleri ile kaynak dikişi görülmektedir.



Şekil 5.3. Tozaltı kaynağının makro yapısı

Kaynaklanan malzeme ITAB bölgesinin yanından kesilerek metalografik işlemler uygulanmıştır. Metalografi işlemi uygulanan parçanın mikro yapısı incelenmiştir. Şekil 5.4' de 10x büyütme yapılan malzemenin mikro yapısı verilmiştir. Şekilde nüfuziyetin yeterli düzeyde olduğu ve kaynak işleminin kuralara uygun olarak yapıldığı görülmektedir.



Şekil 5.4. Tozaltı kaynak dikişinin 10x büyütmedeki mikro yapısı

5.3. MAG Kaynağı

Deneysel çalışmada St 37 çelik sac malzeme kullanılmıştır. Kaynak edilecek çelik malzeme şerit testerede 150x100x10 mm boyutlarında kesilmiştir.

Kaynak işleminden önce kaynak makinesi 30 volt ve 200 ampere ayarlanmıştır. Kaynak makinesinde kullanılan kaynak teli “GEKA SG 1” marka olup 0,8 mm kalınlığındadır.

Kaynak banyosunu havanın zararlı etkilerinden korumak amacıyla CO₂ gazı kullanılmıştır. Tel hızı 18 m/h olup kaynak hızı 15 m/h dir. Kaynaklanan malzeme ITAB bölgesinin yanından kesilerek metalografik işlemler uygulanmıştır.

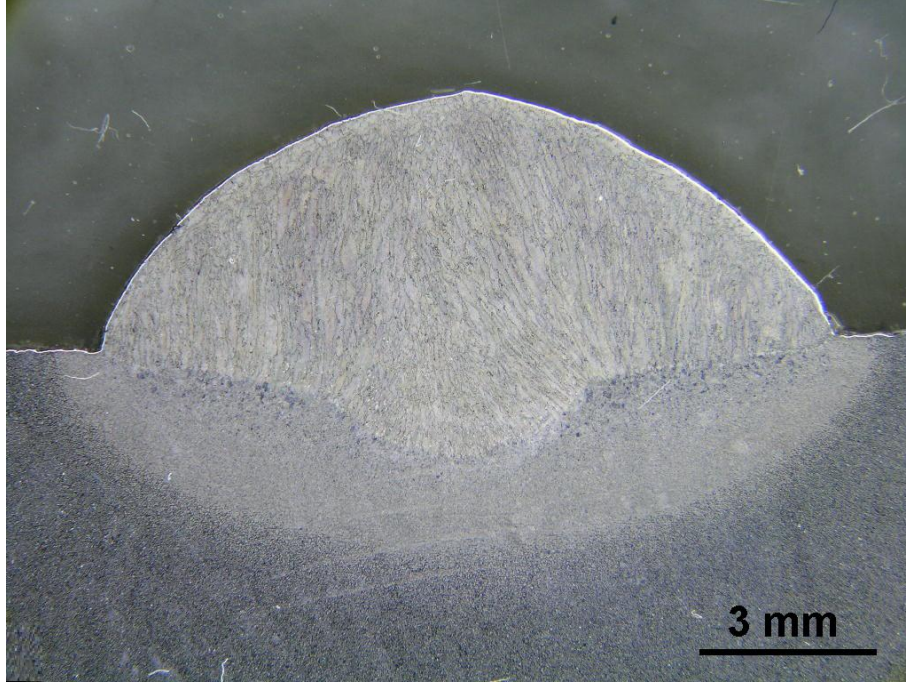
5.3.1.MAG kaynağı mikro ve makro yapı incelemeleri

Şekil 5.5’ de MAG kaynağı ile kaynak edilmiş malzeme görülmektedir. Kaynak dikişi yatay pozisyonda yapılmıştır. Şekil 5.5’ de elektrod hareketleri ile dikişin düzgün ve kaynak işlemine uygun olarak yapıldığı görülmektedir.



Şekil 5.5. MAG kaynak dikişinin makro yapısı

Kaynaklanan malzeme ITAB bölgesinin yanından kesilerek metalografik işlemler uygulanmıştır. Metalografi işlemi uygulanan parçanın mikro yapısı incelenmiştir.. Şekil 5.6’ da 10x büyütme yapılan malzemenin mikro yapısı verilmiştir. Şekilde nüfuziyetin yeterli düzeyde olduğu ve kaynak işleminin kuralara uygun olarak yapıldığı görülmektedir.

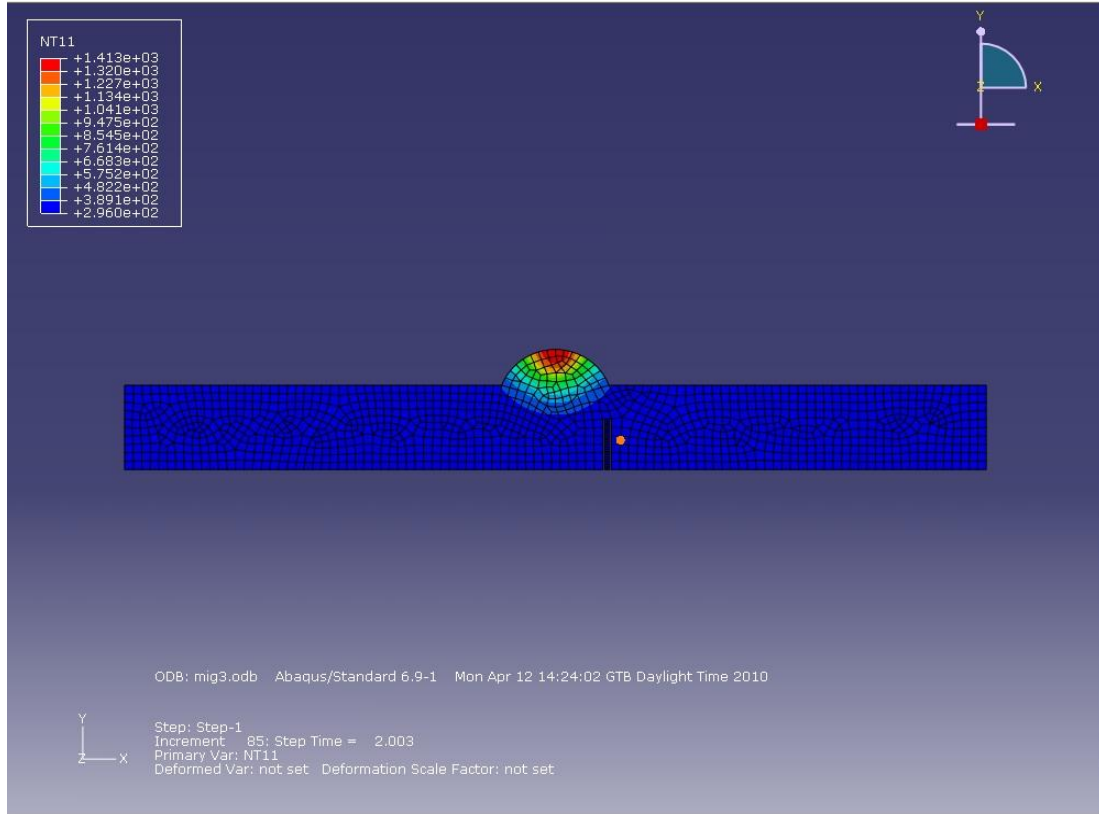


Şekil 5.6. Mag kaynak dikişinin 10x büyütmedeki mikro fotoğrafı

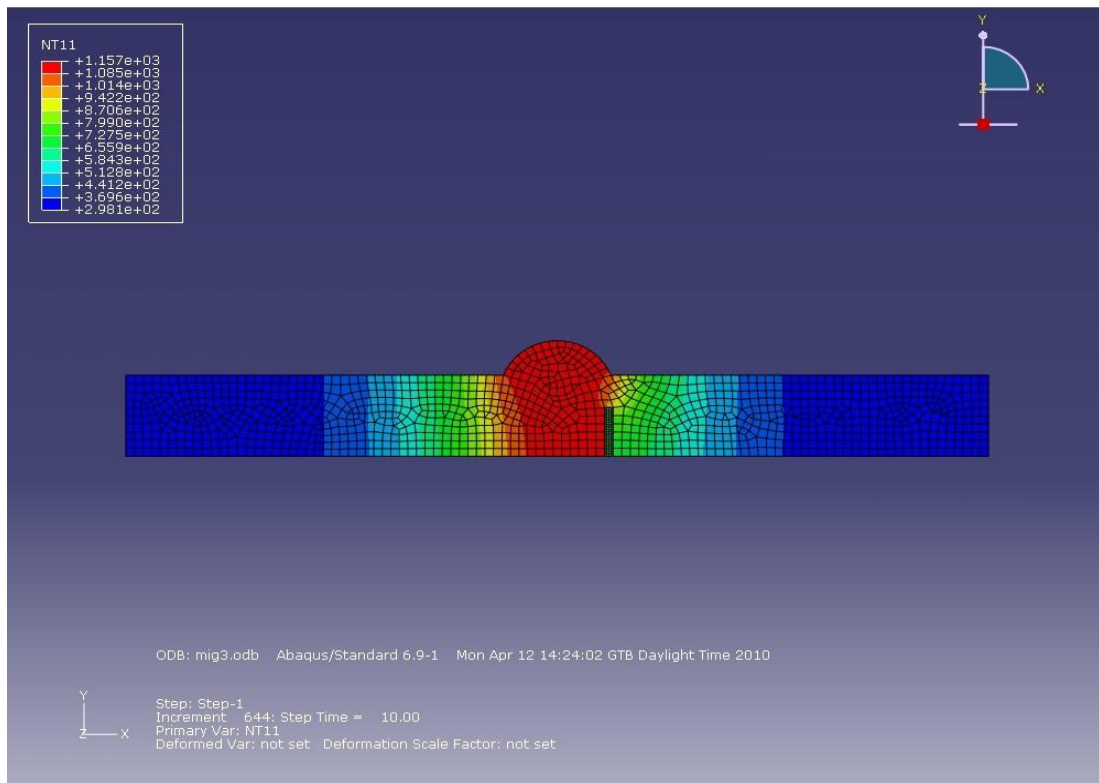
5.4. Modellenen Kaynakların Termal Analizleri

5.4.1. MAG kaynağı

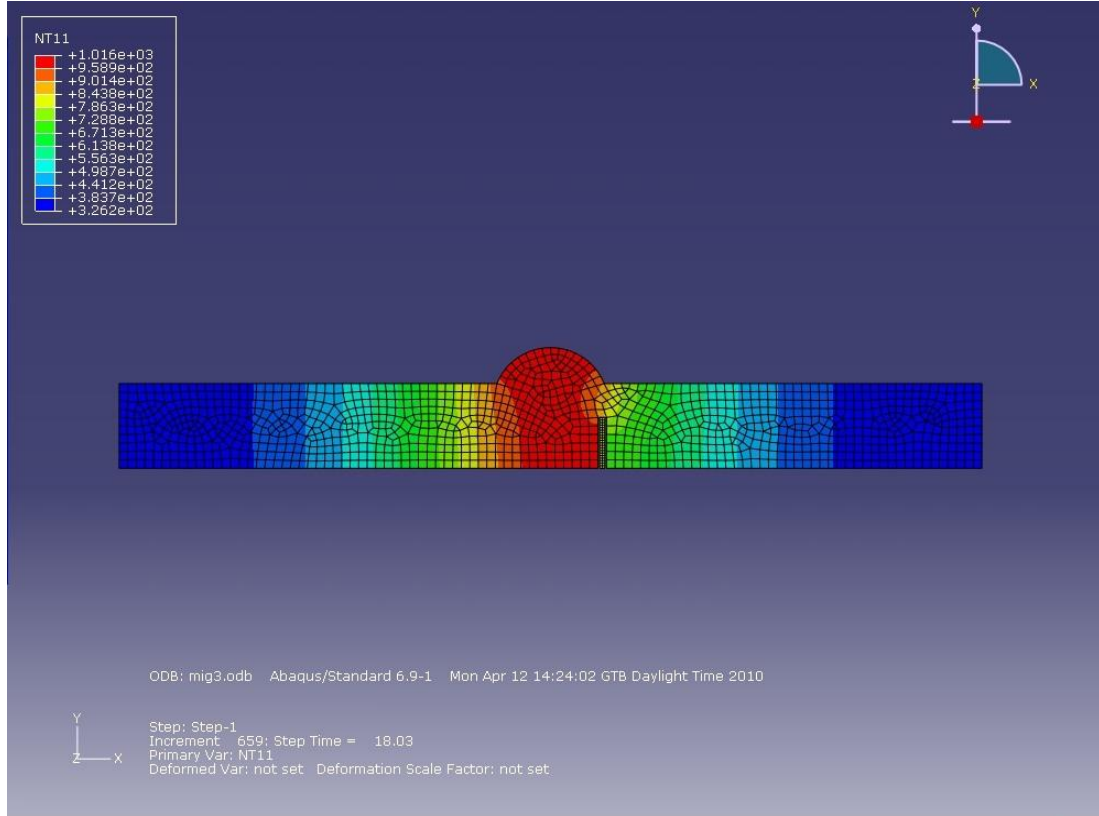
Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10' da 15 m/h kaynak hızında yapılan kaynak işleminin ABAQUS programında modellenmiş sıcaklık dağılım görüntüleri ile Şekil 5.11'de deneysel ölçümlerden ve ABAQUS programından elde edilen ana malzeme sıcaklık grafikleri verilmektedir. 150 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğindeki bir parçanın seçilen parametreler dâhilinde 18 saniyelik zaman diliminde kaynaklanarak deney yapılmış, ABAQUS programında da deneysel çalışmalara eşdeğer olması için aynı ölçülerde geometrik model oluşturulmuş ve kaynak işlemi 18 saniyede tamamlanmıştır.



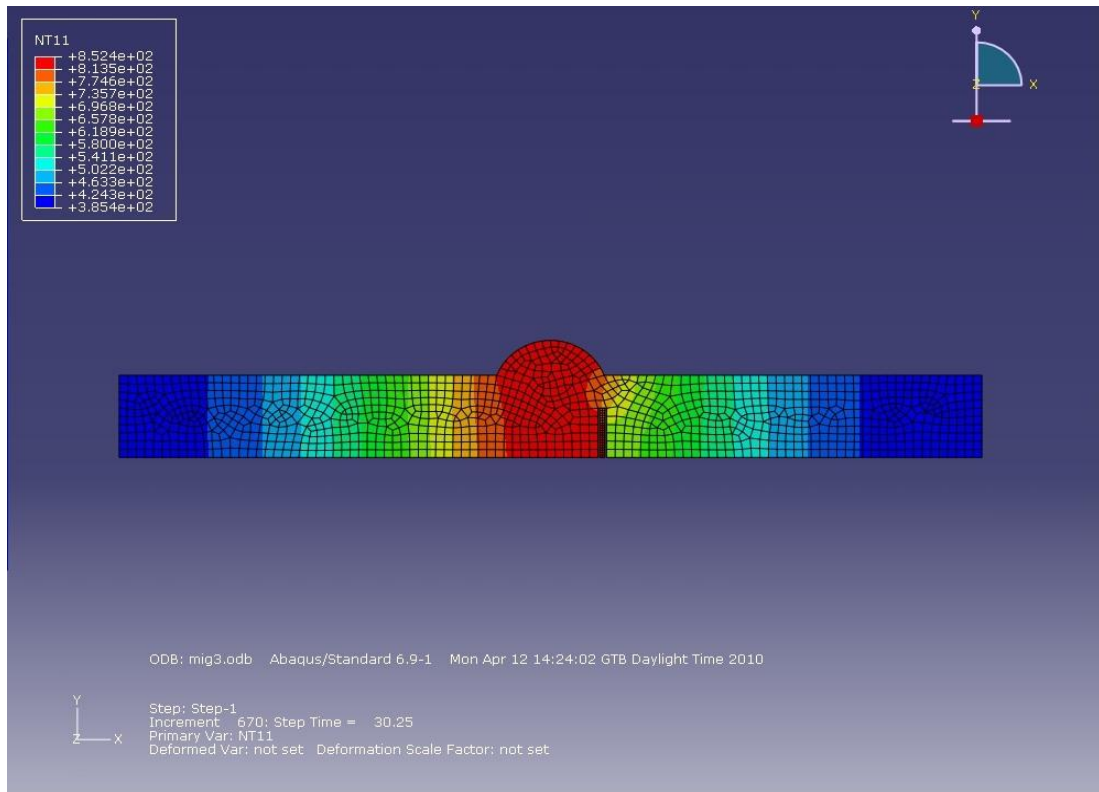
Şekil 5.7. Mag kaynak kaynak simülasyonunun 2. saniyedeki görüntüsü



Şekil 5.8. Mag kaynak kaynak simülasyonunun 10. saniyedeki görüntüsü

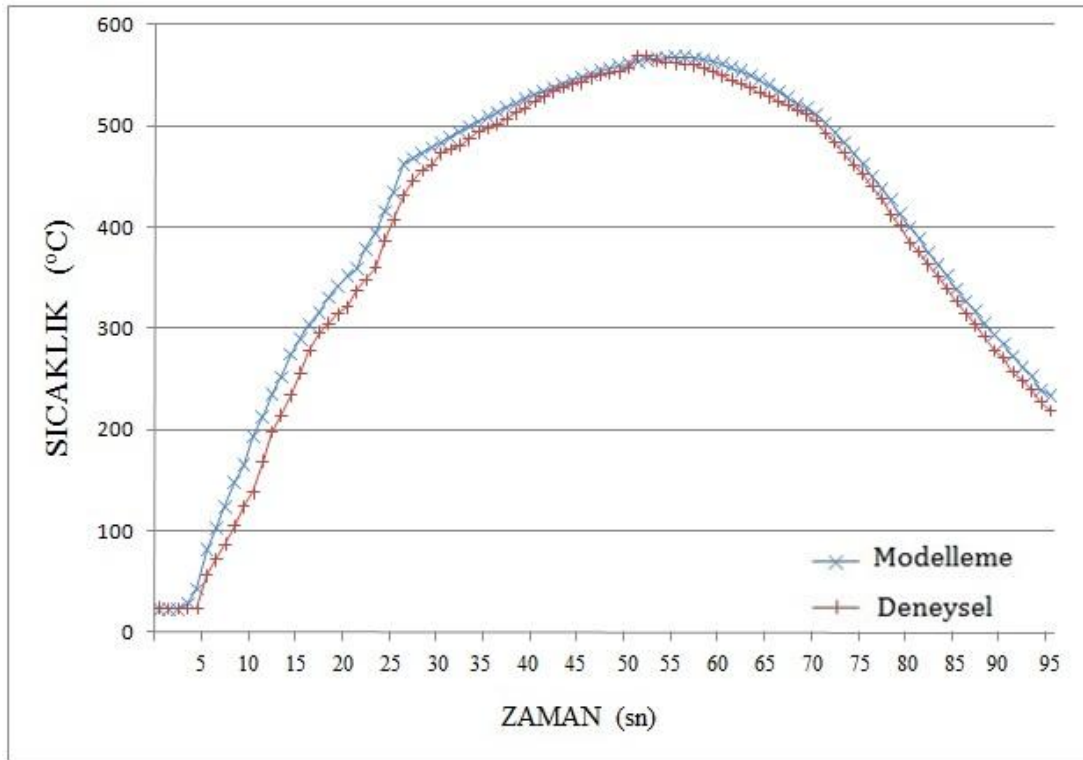


Şekil 5.9. Mag kaynak kaynak simülasyonunun 18. saniyedeki görüntüsü



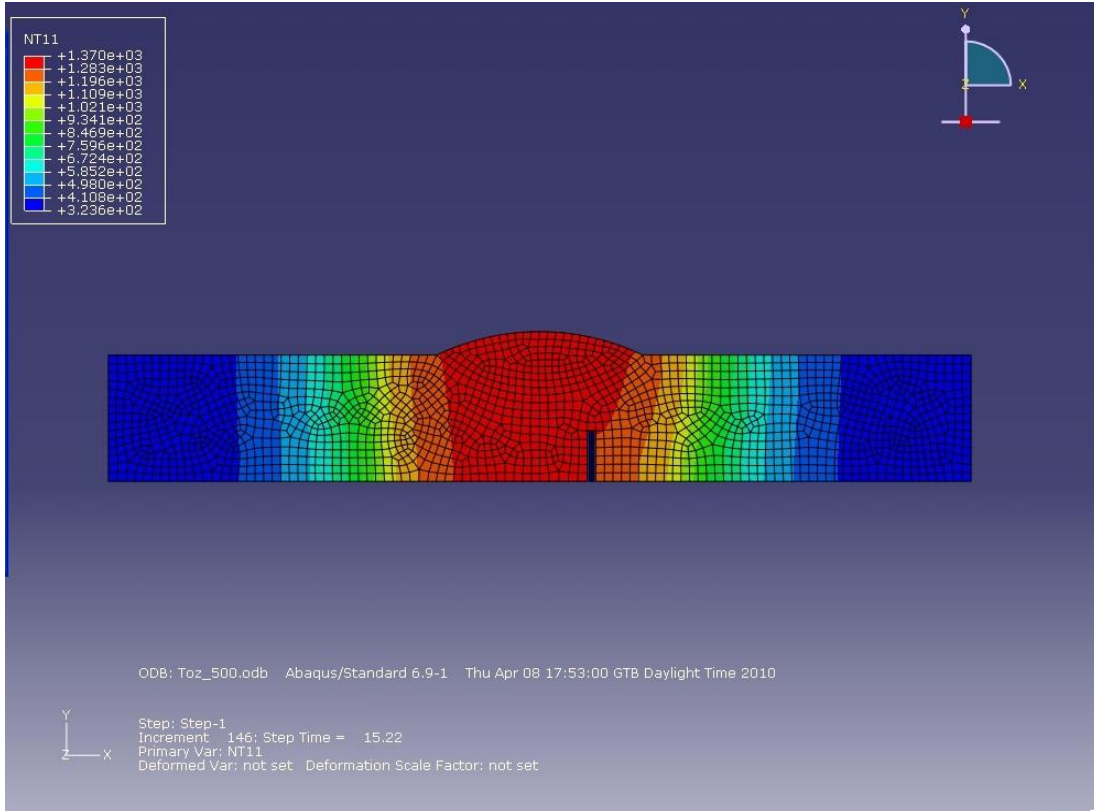
Şekil 5.10. Mag kaynak kaynak simülasyonunun 30. saniyedeki görüntüsü

Kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar 2, 10, 18, 30. saniyede örnekler alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 18 saniye sonunda malzemenin maksimum sıcaklığa çıktığı görülmüştür. Kaynak başlatıldığından 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımları (Şekil 5.7) ana malzemenin tamamına yakını halen daha oda sıcaklığında iken, 6 saniye sonra (Şekil 5.8) kaynak metaline yakın kısımlarda sıcaklık artmakta, 18 saniye sonunda kaynak işlemi tamamlandığında kaynak metalinden ana malzemeye olan ısı transferi artarak devam etmekte ve ana malzemenin sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Kaynaktan 30 saniye sonra (Şekil 5.10) kaynak edilen parçanın yavaş yavaş soğuduğu görülmektedir. Şekil 5.11’ de deneysel ve model sıcaklık grafiği görülmektedir. Kırmızı renkte deneysel sonuçlardan elde edilen grafik, mavi renkte modelleme sonucu elde edilen grafik görülmektedir.

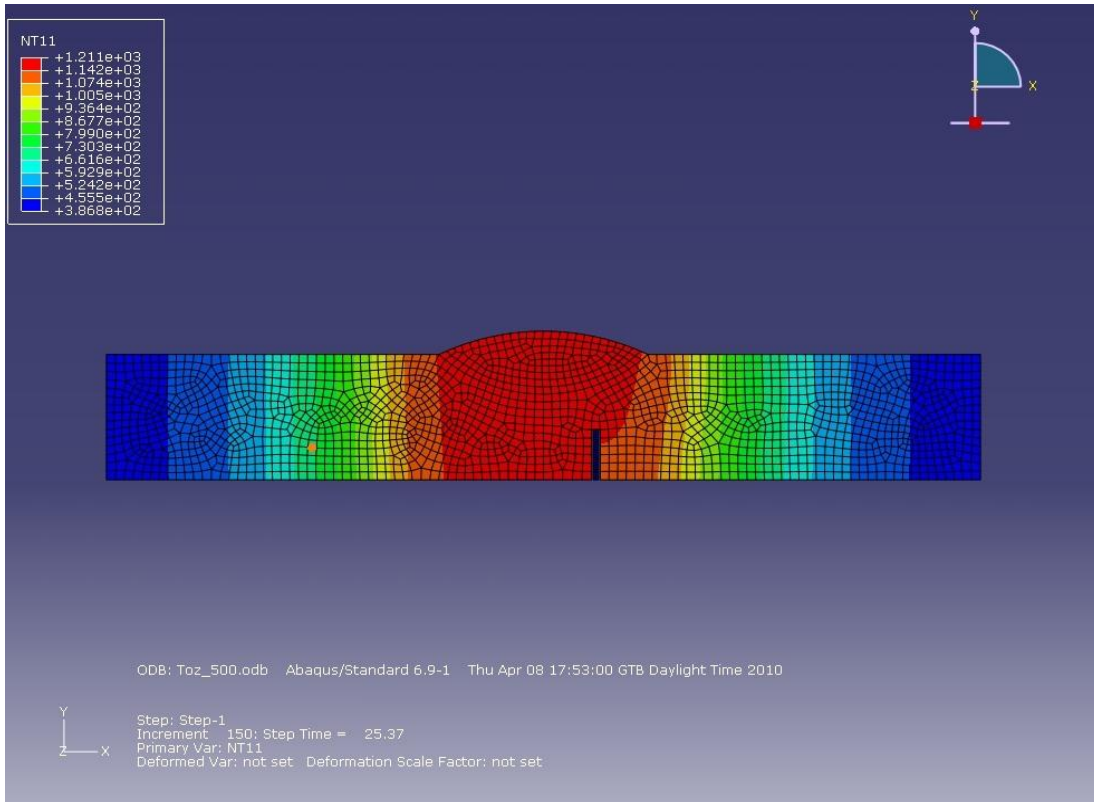


Şekil 5.11 MAG kaynağının deneysel ve model sıcaklık grafiği

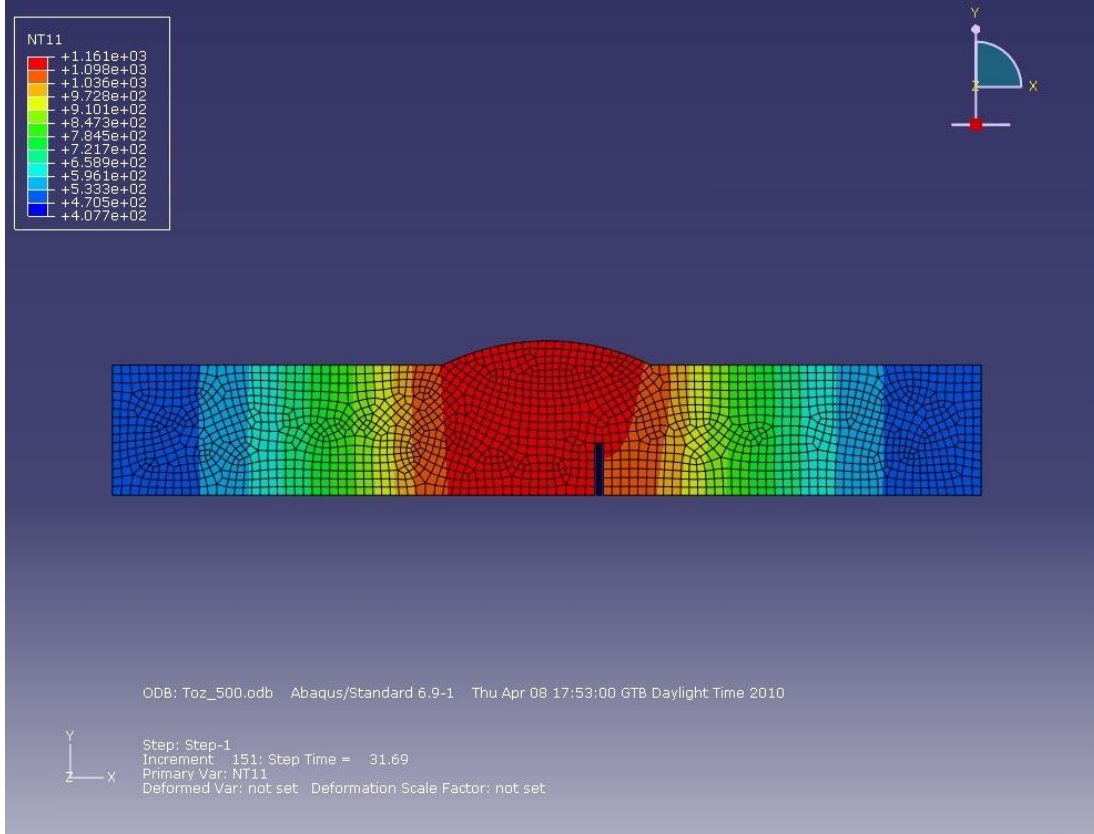
Şekil 5.11’de verilen ana malzeme sıcaklık grafikleri incelendiğinde deneysel ölçümden alınan verilere göre malzeme sıcaklığı maksimum 569,58°C, ABAQUS programından elde edilen sonuçlarda kaynak işleminden sonra malzeme sıcaklığı 568,09°C ulaştığı görülmüştür. Deneysel sonuçlardan elde edilen grafik ile



Şekil 5.13. Tozaltı kaynağı simülasyonunun 15. saniyedeki görüntüsü

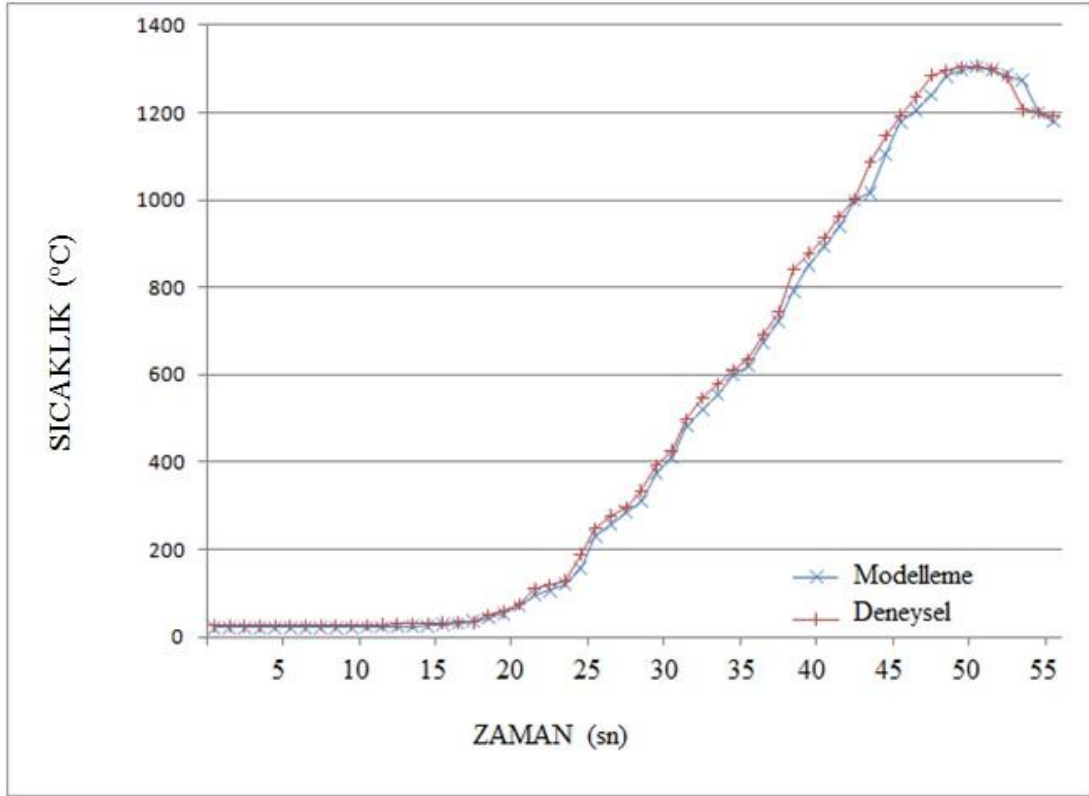


Şekil 5.14. Tozaltı kaynağı simülasyonunun 27. saniyedeki görüntüsü



Şekil 5.15. Tozaltı kaynağı simülasyonununun 30. Saniyedeki görüntüsü

Kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar 2, 15, 27, 30. saniyede örnekler alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 27 saniye sonunda malzemenin maksimum sıcaklığa çıktığı görülmüştür. Kaynak başlatıldığından 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımları (Şekil 5.12) ana malzemenin tamamına yakını halen daha oda sıcaklığında iken, 15 saniye sonra (Şekil 5.8) kaynak metaline yakın kısımlarda sıcaklık artmakta, 27 saniye sonunda kaynak işlemi tamamlandığında kaynak metalinden ana malzemeye olan ısı transferi artarak devam etmekte ve ana malzemenin sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Kaynaktan 30 saniyede (Şekil 5.10) kaynak edilen parçanın yavaş yavaş soğuduğu görülmektedir. Şekil 5.16' da deneysel ve model sıcaklık grafiği görülmektedir. Kırmızı renkte deneysel sonuçlardan elde edilen grafik, mavi renkte modelleme sonucu elde edilen grafik görülmektedir.

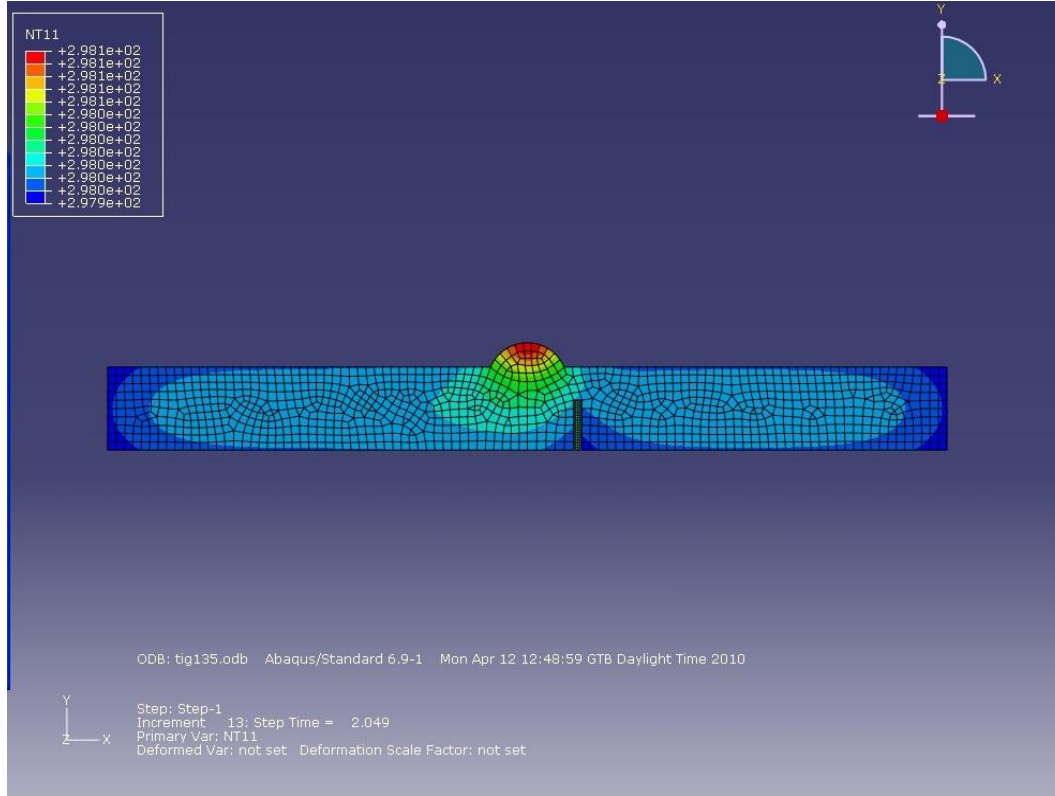


Şekil 5.16. Tozaltı kaynağının deneysel ve model sıcaklık grafiği

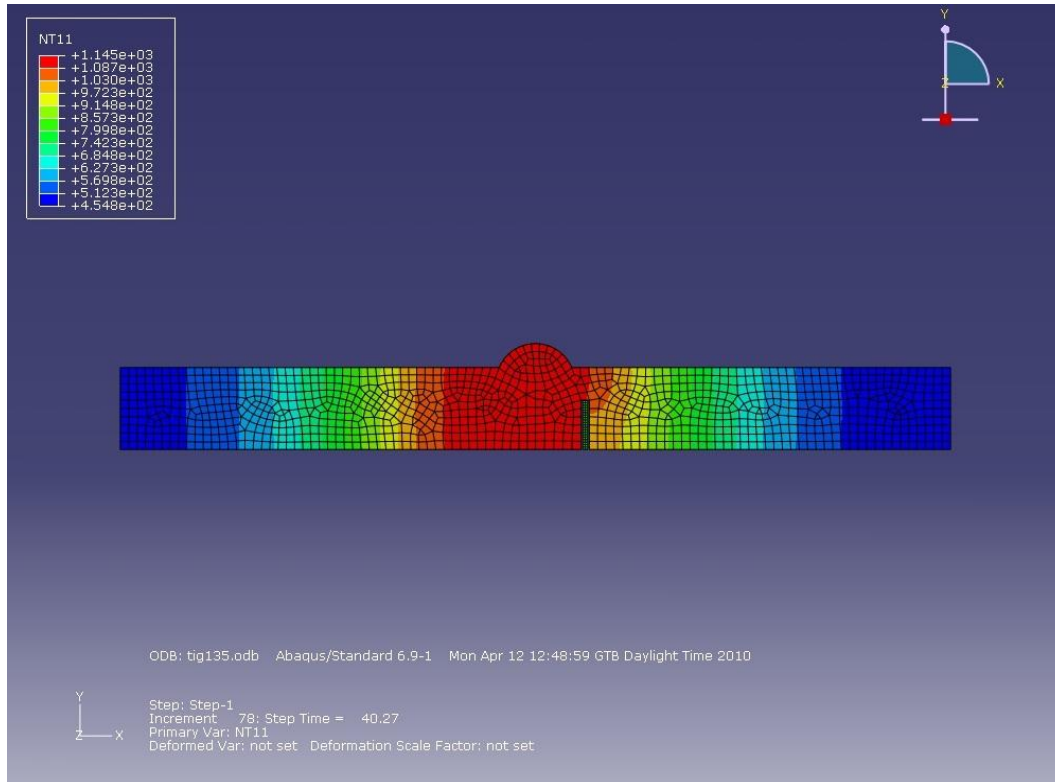
Şekil 5.15'de verilen ana malzeme sıcaklık grafikleri incelendiğinde deneysel ölçümden alınan verilere göre malzeme sıcaklığı maksimum 1304,5°C, ABAQUS programından elde edilen sonuçlarda kaynak işleminden sonra malzeme sıcaklığı 1306,34°C ulaştığı görülmüştür. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere simülasyon programı ile deneysel sonuçların birbiriyle örtüştüğü görülmekte ve yaptığımız modelleme sonuçlarının doğruluğu anlaşılmaktadır.

5.4.3. TIG kaynağı

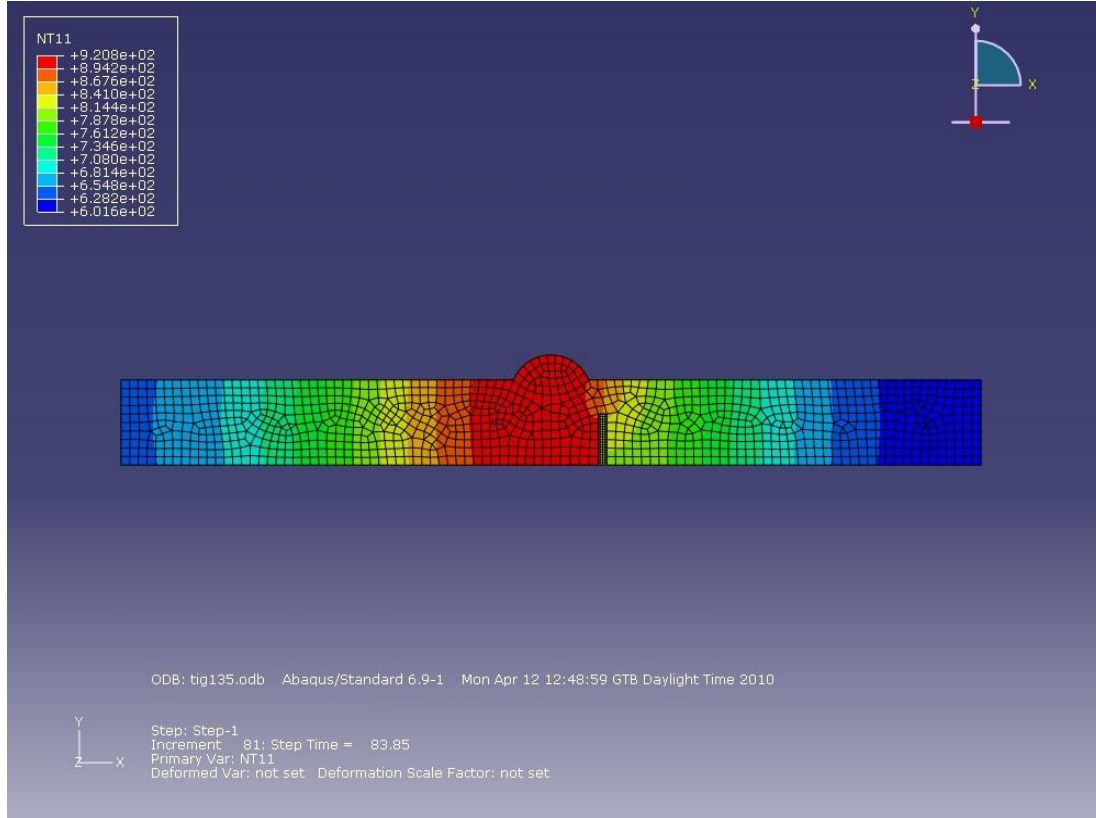
Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20' da 3,6 m/s kaynak hızında yapılan kaynak işleminin ABAQUS programında modellenmiş sıcaklık dağılım görüntüleri ile Şekil 5.21'de deneysel ölçümlerden ve ABAQUS programından elde edilen ana malzeme sıcaklık grafikleri verilmektedir. 150 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğindeki bir parçanın seçilen parametreler dâhilinde 97 saniyelik zaman diliminde kaynaklanarak deney yapılmış, ABAQUS programında da deneysel çalışmalara eşdeğer olması için aynı ölçülerde geometrik model oluşturulmuş ve kaynak işlemi 97 saniyede tamamlanmıştır.



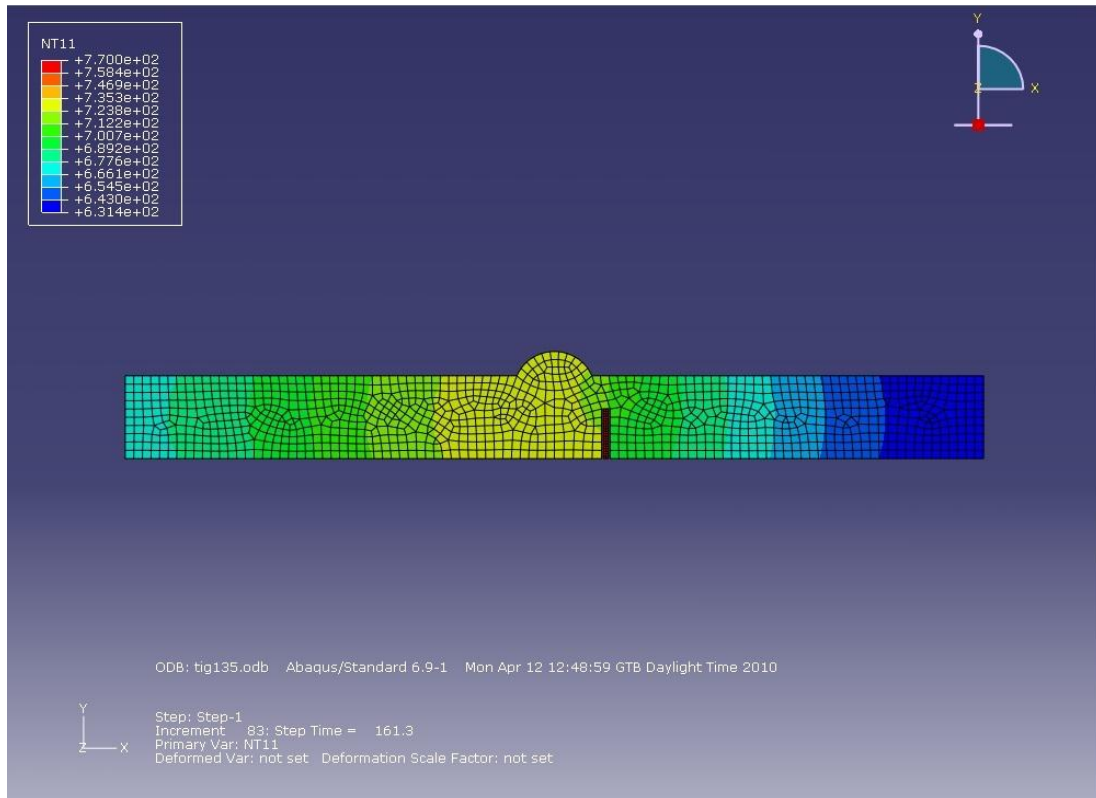
Şekil 5.17. TIG kaynağı simülasyonunun 2. saniyedeki görüntüsü



Şekil 5.18. TIG kaynağı simülasyonunun 40 saniyedeki görüntüsü

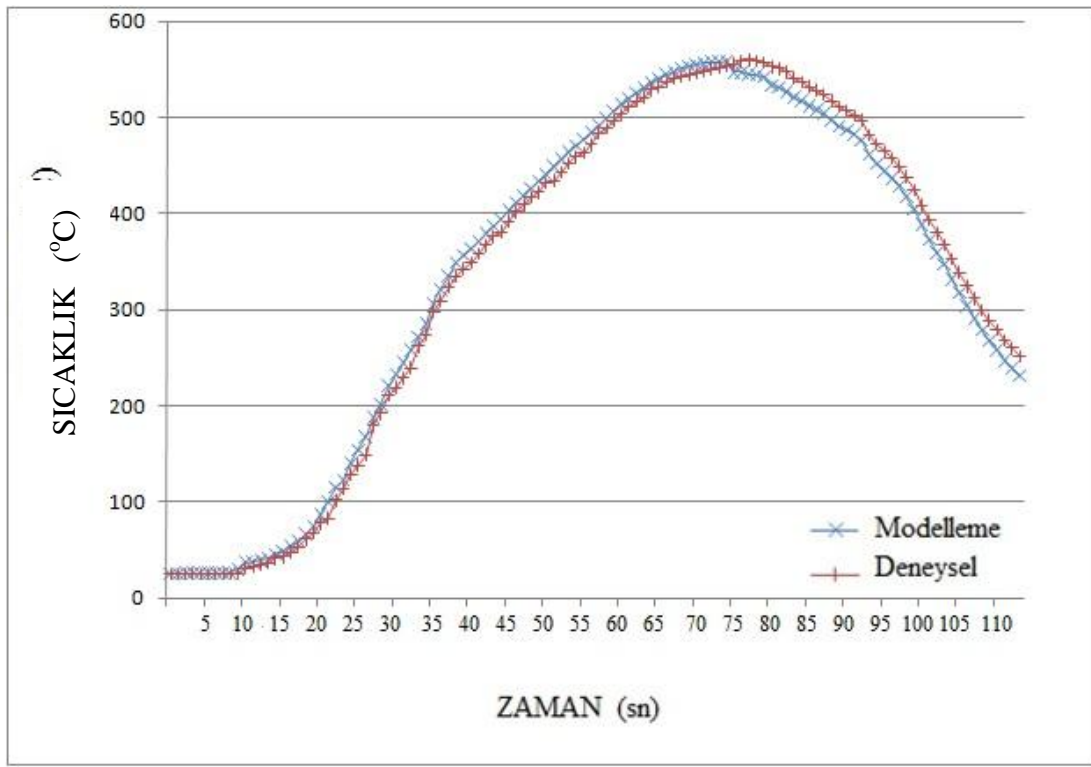


Şekil 5.19. TIG kaynağı simülasyonunun 83 Saniyedeki görüntüsü



Şekil 5.20. TIG kaynağı simülasyonunun 160. Saniyedeki görüntüsü

Kaynak işlemi tamamlanıncaya kadar 2, 40, 83, 160. saniyede örnekler alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 83 saniye sonunda malzemenin maksimum sıcaklığa çıktığı görülmüştür. Kaynak başlatıldığından 2 saniye sonraki sıcaklık dağılımları (Şekil 5.17) ana malzemenin tamamına yakını halen daha oda sıcaklığında iken, 40 saniye sonra (Şekil 5.18) kaynak metaline yakın kısımlarda sıcaklık artmakta, 83 saniye sonunda kaynak işlemi tamamlandığında (Şekil 5.19) kaynak metalinden ana malzemeye olan ısı transferi artarak devam etmekte ve ana malzemenin sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Kaynaktan 160 saniye sonra (Şekil 5.20) kaynak edilen parçanın yavaş yavaş soğuduğu görülmektedir. Şekil 5.21’ de deneysel ve model sıcaklık grafiği görülmektedir. Kırmızı renkte deneysel sonuçlardan elde edilen grafik, mavi renkte modelleme sonucu elde edilen grafik görülmektedir



Şekil 5.21. TIG kaynağının deneysel ve model sıcaklık grafiği

Şekil 5.21’de verilen ana malzeme sıcaklık grafikleri incelendiğinde deneysel ölçümden alınan verilere göre malzeme sıcaklığı maksimum 558,05°C, ABAQUS programından elde edilen sonuçlarda kaynak işleminden sonra malzeme sıcaklığı 560,36°C ulaştığı görülmüştür. TIG kaynağının deneysel ve model sıcaklıkları

arasında yaklaşık 2°C' lik sıcaklık farkı bulunmaktadır. Bu sonuç da modellemenin güvenilirliğini göstermektedir.

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

- 1- TIG kaynağında 3.6 m/h kaynak hızında yeterli miktarda ergime olmadığından ve ilave metal miktarı az olduğundan nüfuziyet de az olmuştur.
- 2- Farklı kaynak yöntemleri ile yapılan kaynak işlemlerinde 3.6, 25 ve 15 m/h olarak seçilen kaynak hızları içerisinde en hızlı kaynak 25 m/h kaynak hızı ile MAG kaynak yönteminde olmuş ve ısı girdisi az olduğundan ITAB daha dar olmuştur.
- 3- Yapılan deneyler sonucunda MAG kaynak yöntemi 25 m/h kaynak hızında kaynak metali sıcaklığının 569,58°C altına düşmesi yaklaşık 18 saniyede gerçekleşirken, TIG kaynak yöntemi 3.6 m/h kaynak hızında kaynak metali sıcaklığının 558,05°C yaklaşık 83 saniyede gerçekleşirken, Tozaltı kaynak yöntemi 15 m/h kaynak hızında kaynak metali sıcaklığının 1304,5°C altına düşmesi yaklaşık 27 saniyede gerçekleşmiştir.
- 4- Modelleme işleminde geometrik modelin oluşturulması, sonlu eleman türünün uygun seçilmesi, sonlu elemanlar ağının doğru yapılması, başlangıç ve sınır şartlarının doğru tanımlanması modelin doğru çözülmesinde en önemli faktörlerdir. Kaynak sırasında meydana gelen termal dağılım ve termal dağılımın neden olduğu kalıcı gerilmelerin önceden tahmininin yapılabilmesi ve kaynak konstrüksiyonunun tasarımında önemlidir.
- 5- Kaynak işlemi sonunda malzemede kalan kalıcı gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi ile rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Yapılan analizler sonucunda gerilim yoğunluğunun kaynak metalinde olmasının yanı sıra kaynağın başlangıç ve bitiş noktalarındaki kaynak metali alt bölgesinde özellikle de ana malzeme ile birleşim noktasında olduğu görülmektedir.
- 6- Yapılan çalışmalar sonunda deneysel çalışmalar sonuçları ve sonlu elemanlar çözüm sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

6.2. Öneriler

- 1- Aynı deneyler farklı malzemeler üzerinde yapılabilir.
- 2- Farklı kaynak yöntemleri ile deneyler yapılarak ABAQUS'de modellenmesi önerilir.
- 3- Farklı kalınlıklardaki malzemeler benzer şekilde modellenebilir.
- 4- Benzer deneyler farklı programlarda modellenerek sonuçlar karşılaştırılabilir. .
- 5- Yapılar üzerindeki kaynak sırasının yapıda meydana getireceği gerilimleri tahmin etmek için deneysel çalışmalar ve modellemeler yapılabilir.
- 6- Kaynaklı birleştirmelerin mekanik testleri ve modelleme araştırmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ANIK, S., “Kaynak Tekniği (Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti)”, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul,1975.
- [2] BOS, E. “ Ark Esaslı Kaynak Yöntemleriyle Kaynak İşleminde Isı tüketimi İle Malzeme/Kalınlık İlişkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999
- [3] FINDIK, T., “304 Tipi Paslanmaz Çeliklerin Mig Kaynağındaki Isı Transferinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ağustos, 2008
- [4] BOS, E., “Ark Esaslı Kaynak Yöntemleriyle Kaynak İşleminde Isı Tüketimi ile Malzeme/Kalınlık İlişkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007
- [5] BARAN, M., “Düşük Karbonlu Çelik ve Bakır Malzemelerin Elektrik Ark, Tig ve Mig Kaynağı İle Birleştirilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dumlupınar Üniversitesi, Ekim, 2007
- [6] AKKAŞ, N., “Tozaltı Köşe Kaynağında Yapay Zeka Teknolojileri Kullanarak Dikiş Geometrisinin Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Ağustos, 2006
- [7] ANIK, S., TÜLBENTÇİ, K., “Tozaltı Kaynak Tekniği”. Kaynak Teknolojisi, Gedik Kaynak Sanayi
- [8] KALUÇ, E., “Kaynak Teknolojisi El Kitabı”, TMMOB yayınları
- [9] KÜLHANLI, E., “Kaynak Bilimi”, Oerlikon Yayını, Sayı 2, 1988
- [10] APAY, S., “Tozaltı Sert Dolgu Kaynağına Bor Tozu İlavesinin Aşınma Özellikleri Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ekim, 2007

- [11] KILINÇER, S., “Düşük Karbonlu Çeliklerin Tozaltı ark Kaynak Yönteni İle Kaynak Edilebilirliğin Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Şubat, 1998
- [12] KAHRAMAN, F., “Masif Ve özlü Telle Yapılmış Gazaltı Kaynak Dikişlerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Temmuz, 2002
- [13] Eryürek, İ. “Kaynak Teknolojisi Esasları”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [14] DURMUŞOĞLU, Ş., “Gazaltı Kaynağında Kaynak Kalitesine Tesir Eden Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, 2006.
- [15] GÜNER, M., “Mag Kaynağında Elektrod Tipinin Kaynak Dikişi Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007
- [16] TÜRKKAN, G., “Koruyucu Gaz Kaynağında (Mig/Mag) Gaz Debisinin Kaynak Nüfuziyeti ve Kaynak Hızına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2008
- [17] ERYÜREK, B. İ., “Gazaltı Ark Kaynağı”, İTÜ Yayınları
- [18] GÖZÜTOK, E., “Paslanmaz Çeliklerin Tig Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Birleştirmelerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, 2009.
- [19] KURT, İ., H., “Tig Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, 2006.
- [20] TABAN, E., “5XXX Serisi Alüminyum Alaşımlarının Tıg, Mıg ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, 2004.
- [21] ELEKTRİKÇİ, O., “TIG Kaynağı ile Birleştirilmiş Demir Esaslı T/M Malzemelerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Celal Bayar Üniversitesi, 2007
- [22] ÖZDEMİR, A., “Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik olarak Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2006.

- [23] ERGİN, A., BAYRAKTAR, E., ÜNSAN, Y., Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Gemi İnşaatı Uygulamaları, İstanbul, 2000.
- [24] YAŞAR, C., “Plastik Üzerine Kkapsamalı Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi”, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniveritesi, 2004
- [25] ÇELİK, İ., M., “Türbin Sabit Kanatçığının Verilen Isı Transfer Katsayısı ve Basınç Dağılımı Kullanarak Ansys ile 2 Boyutlu Termal ve Yapısal Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, 2005.
- [26] AKKAYA, Y., “Düzlem Gerilme Durumunda Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006.
- [27] PENÇE, E., “Eğitim Amaçlı Ansys Paket programının Tanıtılması, Ansys Öğretimi ve Uygulama Örnekleri”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 2007.
- [28] AKAY, L., “Kompozit Boruların Darbe Yüklerine Karşı Davranışlarının İncelenmesi”, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniveritesi, 2005.
- [29] ALTINEL, E., “Kompozit Darbe Davranışına İmpektör Geometrisi, plaka Boyutu ve Kalınlığın Etkisi”, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniveritesi, 2006.
- [30] AKÇE, H., CAN, Ö., “Çimento Döner Fırını Destek Galesinde Sıkı Geçme Durumunda Gerilmelerin İncelenmesi”, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniveritesi, 2007.
- [31] BEDİR, S., “Çift Yönlü Asansör Freni Bloklarının Modellenmesi ve sonlu Elemanların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007.
- [32] ÇELİK, A., ÖZEL A., ALSARAN, A., “Farklı Malzemelerin Kaynağının Deneysel ve Teorik İncelenmesi”, Atatürk Üniversitesi
- [33] http://www.grupmetalmakina.com.tr/origo_tig_3001i.html 15.03.2010
- [34] <http://www.ozmetal.net/default.asp> 16.03.2010
- [35] <http://www.ozmetalsan.net/tozalti-kaynak-makinalari%3BcPK.html> 16.03.2010

- [36] <http://www.atestor.hu/index.php/hu/termekek/metkon-metacut-darabolo-vagoge.html?id=11> 19.03.2010
- [37] <http://www.obiettivoqualita.net/Italiano/PreparazioneCampioni.htm>
19.03.2010

ÖZGEÇMİŞ

Ferdi KAYA, 01,03,1983' de Çanakkale' de doğdu. İlk, orta eğitimini Pınarbaşı İlköğretim okulunda tamamladı. 2001 yılında Gelibolu Anadolu Ticaret Meslek Lisesi, Bilgişlem Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Metal Öğretmenliği bölümünü 2008 yılında bitirdi. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümünü kazandı ve halen Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölüm'ün de Yüksek Lisans öğrencisi olarak öğrenimine devam etmektedir.