

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

**KAYNAK İŞLEMİNDE MEYDANA GELEN KALICI
GERİLMELERİN VE ÇARPILMALARIN
BİLGİSAYARLA SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yüksel ÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ergün NART

Temmuz 2011

TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım boyunca desteğini esirgemeyen ve bana yol gösteren tez danıŐmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Ergün NART 'a sonsuz teŐekrlerimi sunarım.

Tez çalıŐmalarımın her aşamasında beni yönlendiren ve çalıŐmalarıma yaptıkları önemli katkı ve yardımlarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Mesut DURAT'a ve Gümüşova Meslek Yüksek Okulu Müdürü Doç. Dr. Serken SUBAŐI'ya ve Yrd. Doç. Dr. Ömer SAVAŐ 'a çalıŐmalarım boyunca yardım ve desteklerini hiç esirgemeyen Öğr. Gör. Arif UZUN'a teŐekkürü bir borç bilirim.

Tez çalıŐmalarım için kullandığımız ABAQUS yazılımını Sakarya niversitesi'ne kazandıran Rektörlüğüne teşekkür ederim.

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

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	13
BÖLÜM 2.	
PASLANMAZ ÇELİKLER ve KAYNAK YÖNTEMLERİ	16
2.1. Paslanmaz Çelikler	16
2.1.1. Paslanmaz çeliklerin tarihçesi	17
2.1.2. Paslanmaz çeliklerin üstünlükleri	17
2.1.3. Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri	19
2.1.4. Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti.....	21
2.2. Kaynak İşleminin Tanımı	22
2.2.1. Ark Kaynağının Tarihçesi	23
2.2.2. Tozaltı ark kaynağı	25
2.2.2.1. Tozaltı ark kaynağının kullanım alanları.....	27

2.2.2.2. Tozaltı kaynak yönteminin avantajları	28
2.2.2.3. Tozaltı kaynak yönteminin dezavantajları.....	29
2.2.2.4. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak telleri	29
2.2.2.5. Tozaltı ark kaynağında kullanılan kaynak tozları	31
2.2.3. Gazaltı kaynak yöntemi	32
2.2.3.1. Gazaltı kaynak torçları	35
2.2.3.2. Gazaltı kaynağında kullanılan koruyucu gazlar.....	36
2.2.3.3. Gazaltı kaynağının avantajları	37
2.2.3.4. Gazaltı kaynağının dezavantajları.....	38
2.2.4. TIG kaynağı	38
2.2.4.1. TIG kaynak torçları.....	41
2.2.4.2. TIG kaynak elektrotları	43
2.2.4.3. TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazlar	44
2.2.4.4. TIG kaynağının avantajları.....	45
2.2.4.5. TIG kaynağının dezavantajları	46

BÖLÜM 3.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ ve ABAQUS	47
3.1. Giriş	47
3.2. Sonlu elemanlar yönteminin tarihi gelişimi.....	48
3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Esasları.....	49
3.3.1. Sonlu elemanların uygulandığı problem tipleri.....	49
3.3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Yaklaşımlar	50
3.3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Eleman Tipleri	52
3.3.4. Sonlu Elemanlar Yönteminde Eleman Seçimi	54
3.3.4.1. Tek boyutlu elemanlar;.....	54

3.3.4.2. İki boyutlu elemanlar;	54
3.3.4.3. Dönel elemanlar;	55
3.3.4.4. Üç boyutlu eleman;	55
3.3.5. Sonlu Elemanlar Yönteminde Yapılabilecek Hatalar	56
3.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları	56
3.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları	57
BÖLÜM 4.	
KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE ARTIK GERİLMER ve ÇARPILMA	59
4.1. Giriş	59
4.2. Kaynaklı Birleştirmelerde Artık Gerilmeler	59
4.3. Artık Gerilmelerin Oluşum Nedenleri ve Çarpılma	59
4.4. Kalıcı Gerilme Ölçüm Metotları	63
4.4.1. X-Ray Kırınım Yöntemi:	63
BÖLÜM 5.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KAYNAK ANALİZİ	67
5.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları:	67
5.1.1. Sınır koşulu	70
5.2. Isıl Sonuçlar	70
5.3. Yapısal Analiz:	77
5.3.1. ısı-elasto-plastik formülasyon	77
5.3.2. yapısal modeli.....	83
5.3.3. sınır koşulları.....	84
5.3.4. yapısal sonuçlar	84

BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	90
KAYNAKÇA	91

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ITAB	: Isının Tesiri Altında Kalan Bölge
MAG	: Metal Aktif Gaz
MIG	: Metal Inert Gaz
TIG	: Tungsten Inert Gaz
AWS	: American Kaynak Derneği
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
AISI	: Amerikan Normu
A	: Amper
GMAW	: Gaz metal ark kaynağı
DIN	: Alman Standart Enstitüsü
MESH	: Bölünme
λ	: Dalga Boyu
θ	: Işın Demeti Geliş Açısı
ν	: Poisson Oranı
ψ	: Dönme Açısıdır
d_i	: Dönme Açısında Ölçülen Boşluk

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Örtülü elektrod ile ark kaynağı	22
Şekil 2.2.	Bernardos kaynak yöntemi	24
Şekil 2.3.	Zenerer kaynak yöntemi	24
Şekil 2.4.	Slavianoff kaynak yöntemi	25
Şekil 2.5.	Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan 'V' ağızlı parçanın kesit görünüşü	27
Şekil 2.6.	GMAW Kaynak Yönteminde Ark Bölgesi.....	33
Şekil 2.7.	GMAW Kaynak donanımı	34
Şekil 2.8.	GMAW'da hava soğutmalı bir torc kesiti ve bağlantı elemanları	36
Şekil 2.9.	TIG kaynağının temsili görüntüsü	40
Şekil 2.10.	TIG kaynak donanımı prensip şeması	41
Şekil 2.11.	Su soğutmalı TIG kaynak torcunun parçaları	42
Şekil 3.1.	Üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim	52
Şekil 3.2.	(a) iki boyutlu üçgen tipi sonlu eleman (b) Üçgen elemanlar sistemine dönüştürülmüş iki boyutlu delikli bir cisim	53
Şekil 3.3.	üç boyutlu elemanlar (a) dörtyüzlü ve (b) dikdörtgen prizma	54
Şekil 3.4.	SEY'de kullanılan bazı eleman çeşitleri	55
Şekil 3.5.	Eksenel simetrik parça ve sonlu elemanı	55
Şekil 3.6.	Boyutlu elemanlar ve düğüm sayıları	56
Şekil 4.1.	Bir alın dikişindeki enine (T) ve boyuna (L) büzülme gerilmeleri	60
Şekil 4.2.	Bir T bağlantısındaki enine ve boylamasına büzülme gerilmeleri	61
Şekil 4.3.	Bir alın kaynaklı birleştirmede çarpılma	61
Şekil 4.4.	Bir T bağlantısındaki çarpılma	62
Şekil 4.5.	X-Ray Cihazı.....	64
Şekil 4.6.	ψ değerindeki değişim ile kırınımın dönmesi	65

Şekil 5.26.	İsotropik toklaşma hali.....	79
Şekil 5.27.	Kinematik toklaşma hali	79
Şekil 5.28.	Birinci Adımdaki Sınır Koşulları	84
Şekil 5.29.	Kaynak işlemi sonunda $t=0$ iken Von-Misses Gerilme Dağılımı.....	84
Şekil 5.30.	Kaynak işlemi sonunda $t=0.7653$ iken Von-Misses Gerilme Dağılımı.....	85
Şekil 5.31.	Kaynak işlemi sonunda $t=1.915s$ Von-Misses Gerilme Dağılımı.....	85
Şekil 5.32.	Kaynak işlemi sonunda $t=2.257s$ Von-Misses Gerilme Değişimi	85
Şekil 5.33.	Kaynak işlemi sonunda $t=13.30s$ Von-Misses Gerilme Değişimi	86
Şekil 5.34.	Kaynak işlemi sonunda $t=21.21s$ Von-Misses Gerilme Değişimi	86
Şekil 5.35.	Kaynak işlemi sonunda $t=93.26s$ Von-Misses Gerilme Değişimi	86
Şekil 5.36.	Kaynak işlemi sonunda $t=40000s$ Von-Misses Gerilme Değişimi	87
Şekil 5.37.	Kaynak işlemi sonunda 1-1 Güzergahında Von - Misses Gerilme Değişimi	87
Şekil 5.38.	Kaynak işlemi sonunda 2-2 Güzergahında Szz Gerilme Değişimi	88
Şekil 5.39.	Kaynak işlemi sonunda Toplam yer değiştirme Dağılımı	88
Şekil 5.40.	Kaynak işlemi sonunda Logaritmik Birim Şekil Değiştirme Dağılımı.....	89
Şekil 5.41.	Kaynak işlemi sonunda Eşlenik Plastik Birim Şekil Değiştirme Dağılımı.....	89

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Kaynak yönteminin sınıflandırılması .	23
Tablo 2.2.	Tozaltı kaynak tellerinin bileşiminde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri	30
Tablo 2.3.	GMAW’de Kullanılan Farklı Koruma Gazları	37
Tablo 2.4.	Tungsten elektrotların kimyasal bileşikleri ve renk kodları (DIN 32528)	44
Tablo 2.5.	Tungsten elektrotların bileşim ve çaplarına göre akım yüklenebilme kapasiteleri	44
Tablo 5.1.	Yumuşak Çelik Malzemesinin Termal Özellikleri	44

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çift Elipsoid Isı Kaynağı, Sonlu Eleman Analizi, Tozaltı Kaynağı

Kaynak simülasyonlarında en popüler ısı kaynağı modeli *Goldak* çift-elipsoid modelidir. Çünkü çift-elipsoid şekli çok iyi bir kaynak yaklaşımı sağlamaktadır. Basitçe, bu modelde sadece kaynak derinliği ve şekli gibi bilgiler dışında bir Gauss güç yoğunluğu dağılımı kullanılır. Böylece diğer modellere göre basit havuz şekilleriyle daha gerçekçi kaynak uygulamaları sağlamış olur. Ancak özellikle tozaltı kaynakta görülen çift-elipsoid şeklindeki kaynak havuzu daha karmaşık durumlarda, doğru ve geçici sıcaklık alanı hesaplamak için sadece güç yoğunluğu dağılımı yöntemi gereken sıcaklık alanının elde edilmesi açısından yeteri kadar gerçekçi sonuçlar vermeyebilir. Bu nedenle, bu zorluğu aşmak için farklı bir yaklaşım kullanılması gerekir. Bu yüzden, bu araştırmada, kaynak banyosunun doğru şeklini oluşturmak için bazı değişikliklerle yeni bir yaklaşım kullanarak, çift-elipsoid modeliyle daha doğru sonuçlara ulaşılabileceği öne sürülmüştür. Daha sonra, Abaqus 6.10 CAE sonlu elemanlar yazılımı kullanarak bir plaka üzerinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve artık gerilmeler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar tozaltı kaynak işlemi için iyi bir yaklaşım göstermektedir

THE COMPUTER SIMULATION OF THE WELDING PROCESS THAT OCCURRING RESIDUAL STRESS AND DISTORTION

SUMMARY

Keywords: Double Ellipsoid Heat Source, Finite Element Analysis, Submerged Welding

The most popular heat source model in finite element welding simulations is Goldak's double ellipsoid model because the double ellipsoid shape gives a good approximation for many arc welds. Simply, the model uses the depth and shapes information of a weld and utilizes a Gaussian distribution of power density in double ellipsoid, it produces more flexible and realistic weld applications with simple pool shapes compared to the other models. However, when the shape of a weld pool is more complicated than the shape of a double ellipsoid especially as observed in submerged arc welds, it is not realistic to only use the power density distribution function to accurately compute the transient temperature field. Therefore, it has to be found a new way to overcome this difficulty. Thus, in this research, a new approach has been proposed for using double ellipsoid model with some modifications to generate the correct shape of the weld pool. Then, the corresponding finite element temperatures distribution and residual stresses have been obtained on a plate in Abaqus 6.10 CAE software using user subroutines and compared the solutions with experimental results. The results show good approximation for submerged arc welding process.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kaynak, metalik parçaların birleştirilmesinde kullanılan en önemli yöntemlerden birisidir. Kaynağın yaklaşık 3500 yıllık bir maziye sahip olduğu bilinmektedir. İlk olarak Şam' da Arap savaşçılar tarafından kaynak yapılmış bıçakların kullanıldığı ve daha sonra orta çağda altından yapılmış küçük dairesel kutuların basınç kaynağı ile birleştirildiği bilinmektedir [1]. Kaynak yöntemi endüstriyel manada ilk olarak 19. yüzyılın ikinci yarısında kullanılmıştır. El ile elektrik ark kaynağının tarihine bakıldığında başlangıçta üç ayrı yöntem ile karşılaşılır. Bunlar Bernardos kaynak yöntemi, Zerener'in geliştirdiği kaynak yöntemi ve günümüzde kullanılan elektrik ark kaynağının özünü oluşturan Slavianoff tarafından geliştirilen ark kaynak yöntemidir. Bu sayılan kaynak yöntemlerinde erimiş haldeki kaynak banyosunu havada bulunan oksijen ve azotun tesirinden korumak mümkün olmadığı için kaynak dikişi düşük mekanik özelliklere sahip olur. Kaynak banyosunu havanın olumsuz etkilerinden korumak ilk olarak 1908 yılında İsveçli Oscar Kjelberg'in elektrot örtüsünü bulmasıyla mümkün olmuştur [2]. Kaynak dikişini havanın olumsuz etkisinden bir koruyucu gaz ile koruma fikri ilk olarak Alexander usulünde 1926 yılında hayata geçirilmiştir. Bu yöntemde kaynak dikişi metanol gazı ile korunmuştur [3,4].

1928 yılında uygulanan Arcogen usulünde ise elektrot ile birlikte oksijen-asetilen alevi kullanılmıştır. Burada dikişi koruma görevini üfleç alevi yapmıştır. Bu yöntemler günümüzde kullanılmamaktadır. 1940 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki "Nortrop Aircraft Company Inc." firması uçak üretiminde koruyucu gaz olarak bir soy gaz kullanmasına rağmen bu yöntemin patenti 1930'da Hobart ve Devers tarafından alınmıştır. Burada koruma gazı olarak helyum kullanılmıştır. Kaynak bölgesinde soy gazlar dışındaki bir gazın kullanılmasına ilişkin çalışmalar 1952 yılında başlamış ve aynı yıl uygulamaya geçilmiştir. Bu tarihte özellikle otomobil sanayinde, tam otomatik olarak çalışan, yüksek erime özelliğine sahip, çok hızlı, sadece yatay pozisyonda çalışabilen, CO₂ koruyucu gazlı kaynak makineleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemde görülen sadece yatay pozisyonda çalışma ve fazla miktarda sıçrama gibi kısıtlamalar araştırmacıları bu yönde çalışmaya sevk

etmiştir. Araştırmacıların çalışmaları sonucunda, kısa ark boyu ile çalışarak sıçramalar en aza ildirilmiştir. İnce çaplı elektrot kullanarak, elektrotun akım yoğunluğu arttırılmış ise de, arkın oluşturduğu ısı azalmış ve akım yoğunluğunun artması arkı yoğun ve istenilen yöne kontrollü olarak doğrulabilir hale getirmiştir. Böylece bu yöntemle her pozisyonda kaynak yapılabilir. Koruyucu gaz olarak CO₂ gazı kullanılarak yapılan bu kaynak yöntemine *Metal Active Gas* kelimelerinin baş harflerinden yararlanılarak (MAG) adı verilmiştir [3,4].

Kaynağın geçmiş gelişimi bu şekilde iken, günümüzde araştırmacılar ve bilim adamları metal-gaz-toz reaksiyonları, kaynağın fiziksel metalürjisi, kaynak metali, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) mikro yapısı, kalıntı gerilmeler, kaynak işleminin optimizasyonu gibi konularda çalışmaktadırlar. Bu aktivitelerin tamamı kaynak yapısı ve kaynağın bütünlüğünü iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Son zamanlarda ise sayısal benzetim, kaynak işlemlerinin analizi ve optimizasyonu konusunda artarak kullanılmaktadır. Özellikle ITAB bölgesindeki mikro yapısal değişiklikler ve kaynaktaki kalıntı gerilmelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Bilgisayar tabanlı matematiksel benzetimler kaynak mühendisleri için gerekli olan deneysel masraflara ihtiyaç duymaksızın sonuçların yaklaşık tahmin edebilmesine olanak verir. Bu modellerin geliştirilmesi, Rosenthal tarafından analitik çözümlerle 1940'lerde başlamış, ancak 1980'lerde güçlü bilgisayar hamlesiyle hız kazanmıştır [5]. Bu sayısal modelleme ile elde edilen sonuçların geçerli olabilmesi için deneysel verilerle karşılaştırılması gerekir. Goldak çalışmasında, kaynak mühendislerinin kaynak banyosu hakkındaki bilgilerini basit bir yolla göstermek istemiş, ancak bu çalışma basit bir problemten daha karmaşık bir hal alıp uzun ve günümüzdeki birçok yöntemden daha güvenilir olmuştur[6].

Michaleris ve Debicari tarafından yapılan bir çalışmada sayısal bir analiz tekniği kullanarak kaynak işleminde oluşan çarpılmalar hesaplanmış, farklı kaynak yöntemleri ve yöntemleri kaynak çarpılmalarının en aza indirilmesi için değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak, sayısal modelleme yaklaşımı doğrulanmıştır [7].

Kaynak esnasında oluşan kaynak havuzundaki ergime bölgesinin ve ısı transferinin detaylı olarak bilinmesi gerekmektedir. Son zamanlarda, 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 bazen deneyler sonucunda ve teorik hesaplamalarda belirtildiği gibi kaynak havuzu ergime bölgesinde düzgün olmaktan çok, düzensiz bir oluşum vardır [8].

Fiziksel bir sistemin analizini yapabilmek için bir takım denklem ve eşitlikler kullanarak oluşturulan modele matematik model denir. Bazı kabuller yaparak çeşitli fiziksel sistemlerin analitik ifadelerini elde etmek mümkündür. Matematiksel modellemeler, kaynak parametreleri ile kaynaklama sonrasındaki metalurjik özellikleri ve iş parçası arasındaki ilişkiyi gösterebilir. Kaynaktaki işlem parametrelerini ve en iyi kaynak şartlarını tanımlamaya yardımcı olabilir. Sayısal modelleme ile yapılan sonuçların geçerli olması ve verilerin mukayesesi için deneysel verilerle birleştirilmesi gerekir [9].

Bilgisayar yardımıyla oluşturulan modeller çok karmaşık ve detaylı olup binlerce hatta milyonlarca denklem takımının bir araya gelmesiyle oluşturulmaktadır. Günümüzde kullanılan bilgisayar programlarının çoğu matematik modelleri oluşturup, çözümlmek için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) adı verilen yöntemi kullanır. Sonlu elemanlar metodu karmaşık geometriye sahip yapıların, malzeme özelliklerine ve zorlanma koşullarına göre analiz yapabilmektedir. Bilgisayar destekli tasarım programlarıyla bütünleşmiş olması sonlu elemanlar metodunu birçok mühendislik alanında kullanılmasını sağlamıştır.

Bu çalışmanın amacı paslanmaz çelik kaynaklı birleştirmelerdeki kalıcı gerilmelere bağlı çarpılmaları sonlu elemanlar yönteminin en iyi yazılımlarından biri olan ABAQUS© CEA'i kullanarak modellemek ve analiz etmektir. Abaqus ile kaynak modeli oluşturulduktan sonra, St50 ve paslanmaz çelik malzemesi olan AL-6XN malzemelerinin termo-mekanik özellikleri göz önünde bulundurarak, tozaltı kaynak yöntemi ile alın kaynağı işlemi incelenmiş, kaynak sonucunda meydana gelen artık gerilmeler ve çarpılmalar analiz edilmiştir.

BÖLÜM 2. PASLANMAZ ÇELİKLER ve KAYNAK YÖNTEMLERİ

2.1. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çeliklerin en önemli özelliği paslanmamaları yani oksidasyona ve korozyona karşı dirençli olmalarıdır. Bu özellik çeliğin içeriğine %12'den fazla miktarda krom (Cr) katılmasıyla elde edilir. Artan krom miktarına bağlı olarak çeliğin yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci artmaktadır. Çeliğin içeriğinde yalnız yüksek miktarlarda nikel bulunması paslanmayı önlese de, krom ile birlikte bulunması asidik ortamlarda yüksek bir korozyon direnci sağlar. Nikelin yanı sıra molibden katkısı da çeşitli korozyon türlerine karşı çeliği korur. Ancak %6,5'dan fazla molibden içeren paslanmaz çelikler ekonomik olarak üretilmezler.

Krom, çeliğin yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korunmasını sağlamaktadır. Kromlu paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda sürtünmeye karşı mukavemetli çelikler olarak da kullanılmaktadırlar. Aslında çelikler birçok demir alaşımları gibi atmosferde oksitlenirler ve yüzeylerinde pas olarak adlandırdığımız bir oksit tabakası oluşur. Paslanmaz çeliklerde korozyona karşı direnç, içerisindeki krom miktarına bağlı olmaktadır. Çeliğin paslanmazlığı konusunda birçok değişik görüşler oluşmuş ve bunlardan en kabul göreni, paslanmaz çelik üzerinde ince bir oksit tabakasının oluştuğu ve bu tabakanın korozyonun ilerlemesine mani olduğudur.

Günümüzde 170'den fazla paslanmaz çelik türü bulunmaktadır. Bu paslanmaz çelik türleri endüstride değişik amaçlar için oldukça yaygın uygulama alanı bulmuşlardır.

Çeliklerin sınıflandırılmasında en yaygın olarak Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü'nün (AISI) karbon ve alaşımlı çelik standardının nümerik gösterimi kullanılmaktadır.

2.1.1. Paslanmaz çeliklerin tarihçesi

Korozyona karşı dirençli, demir alaşımlarından ve demir-krom alaşımından ilk defa 1820 yılında Stodert ve M. Faraday İngiltere’de yayınladıkları bir kitapta söz etmişlerdir. Fakat önerdikleri % Cr oranı kaplamayı meydana getirecek miktardan daha az olduğundan başarılı olunamamıştı [11].

I. Dünya Savaşından sonra Avrupa’da bir hurdacı diğer hurdalar arasında parlayan bir top namlusu görür. Bu top namlusunun diğer çelikler gibi paslanmadığını merak ederek araştırma yapmak ister ve top namlusunu analiz ettirir. Sonuçta çeliğin içeriğinde yüksek oranda Cr bulunduğunu öğrenir. Keşiften sonra Avrupa’da paslanmaz çelik üretimine başlanır. 1911 yılında, General Elektrik firmasında, çalışan C. Dantsizen, elektrik ampullerinde flaman olarak kullanılmak üzere % 14-16 Cr içeren bir Fe-Cr alaşımı üretmiştir. Aynı yıllarda İngiltere’de Harry Brearley içeriğinde %12,8 Cr bulunan Fe-Cr alaşımını çatal, kaşık, bıçak yapımında kullanmıştır. Aynı araştırmacı kullandığı bu alaşımlara paslanmaz çelik adını vermiştir[12].

Paslanmaz çelik alanında 1904 yılına kadar birçok önemli gelişme olmuştur. Çeliğe katılan çeşitli alaşım elementleriyle farklı özelliklerde birçok yeni alaşım bulunmuştur. Çeşitli araştırmacılar tarafından değişik demir-krom alaşımları yapılmıştır. Bu demir-krom alaşımlarıyla yüksek sertlik ve mukavemet elde edilmeye çalışılmıştır. 1904 senesinde, Guillet düşük karbonlu pasivasyon noktasını geçen bir alaşım yapmayı başarmıştır. Bu aşamadan sonra krom ve demirin metalürjik yapı ve mekanik özellikleri incelenerek Demir-Krom-Nikel alaşımlarına, yani östenitik paslanmaz çeliklere ulaşılmıştır. Fakat bu alaşımlarda pasivasyonun en az %12 Cr ile başladığı bilgisi ilk defa Alman Monnardz tarafından keşfedilmiştir. Monnardz çalışmalarına 1908’de başlamıştır. Demir-Krom alaşımlarının kimyasal özelliklerini ve detaylarını 1911 yılında yayınlamıştır [11].

2.1.2. Paslanmaz çeliklerin üstünlükleri

Paslanmaz çeliklerin tercih sebeplerini birçok başlık altında sıralamak mümkündür.

Bu başlıklardan en önemli olanlarını kısaca özetlersek; korozyon dayanımı, yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanım, imalat kolaylığı, mekanik dayanım, görünüm, sağlığa uygunluk ve uzun ömürlü özellikleri sayılabilir.

a. Korozyon Dayanımı; paslanmaz çeliklerin en büyük özelliklerinin korozyon dayanımı olduğunu söylemek mümkündür. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltiler ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilirler.

b. Yüksek Ve Düşük Sıcaklıklar; Paslanmaz çeliklerin bazı türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi oksitlenmesinde dahi malzemenin mekanik dayanımında önemli bir değişme görülmez. Bazı paslanmaz çelik türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşmezler ve tokluklarını korurlar.

c. İmalat Kolaylığı; Paslanmaz çeliklerin hemen hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilirler.

d. Mekanik Dayanım; Paslanmaz çeliklerin büyük bir çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımı artar. Bu sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Bazı paslanmaz çelik türleri ise ısı işlemleri ile malzemeye çok yüksek bir dayanım kazandırabilirler.

e. Görünüm; Paslanmaz çelikler çok farklı yüzey kalitelerinde üretilebilirler. Bu yüzeylerin görünümü, ve bakımı kolay olduğundan kolaylıkla uzun süreler korunabilir.

f. Sağlığa uygunluk; Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, ve güzel parlak görüntüsü bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

g. Uzun Ömür; Paslanmaz çelikler dayanıklı ve bakımları kolay malzemeler olduğu için imal edilen parçanın tüm kullanım ömrü dikkate alındığında ekonomik malzemelerdir [13].

2.1.3. Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri

Bileşimlerinde en az %12 Cr bulunan çeliklerin yüzey tabakasına kuvvetli bir şekilde tutunmuş, gevrek olmayan, çok ince ve görünmeyen bir oksit tabakası bulunur. Bu oksit tabakası çeliğin oksitlenmesini önlemekle birlikte, oksijen bulunan ortamlarda oluşur ve dış etkilerle bozulduğunda kendi kendini onarır.

Çelik içerisindeki Cr miktarı yükseltilecek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı biraz daha arttırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niobyum, azot, kükürt gibi bazı elementlerle alaşım yapılarak farklı olumlu etkiler sağlanabilir. Çelikteki bu olumlu tepkilerin bir kısmı özet olarak aşağıda verilmektedir. Bu olumlu tepkiler sayesinde, makine tasarımcıları ve imalatçıları, değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz çeliği seçme şansına sahip olurlar [12, 13, 14, 15].

- a) Nikelin (Ni) çelik üzerindeki etkileri;
 1. Kuvvetli bir östenit yapıcıdır ve oksidasyon direncini artırır.
 2. Termal iletimi azaltır.
 3. Ani kuvvetlere karşı dayanıklılığı artırır.
 4. Haddenebilirliği sağlar.
 5. Elektrik direncini artırır.
 6. Kaynak işlemini kolaylaştırır.

- b) Karbon (C) çelik üzerindeki etkileri;
 1. Kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek sertlik ve mukavemet artırıcı etki için katılmaktadır.
 2. Kaynak metalinin korozyon direncini düşürür ve metalin düşük sıcaklıktaki tokluğunu olumsuz yönde etkiler.

- c) Krom (Cr) çelik üzerindeki etkileri;
 1. Bir karbür ve ferrit yapıcıdır.
 2. Korozyon direncini artırır.
 3. Oksidasyon direncini oluşturur.

Bu elementin yüksek sıcaklıkta mukavemet ve sürtünme mukavemetine belirgin bir etkisinin olmadığı söylenbilir.

d) Alüminyum (Al) elik üzerindeki etkileri;

1. Kuvvetli bir ferrit yapıcıdır.
2. kaynak metaline % 12 krom katılarak yapıyı ferritik yani, ısıl işleme sertleşemez hale getirir.
3. Yüksek sıcaklık Oksidasyon direncini artırır.
4. Kuvvetli bir nitrür yapıcıdır.
5. Titanyum ile bazı yüksek mukavemetli alaşımlara katılarak yaşlanma sertleşmesi etkisini azaltır.

e) Bakır (Cu) elik üzerindeki etkileri;

1. Korozyon direnci artırır.
2. % 0,3'den fazla Cu eliğin sertleştirilebilmesini olumsuz etkiler.

f) Molibdenin (Mo) elik üzerindeki etkileri;

1. Yüksek sıcaklıklarda sürtünme ve aşınmaya karşı dayanımı arttırır.
2. Korozyon uygulamalarında kaviteasyona engel olur. Özellikle 304 serisi çeliklerde

g) Tungsten (Volfram) (W) elik üzerindeki etkileri;

1. Kuvvetli bir ferrit yapıcıdır.
2. Bazı alaşımlarının mukavemet ve sürtünme direncini arttırmak için katılır.

h) Titanyum (Ti) elik üzerindeki etkileri;

1. Kuvvetli bir karbür ve nitrür yapıcıdır.
2. Östenitik olan paslanmaz çeliklerde krom- karbür okelmesini önlemek için dengeleme amaçlı kullanılır.
3. Kuvvetli ferrit yapıcıdır.
4. Yüksek sıcaklıklara dayanımlı olan aşımlara, sertlik ve mukavemet artırıcı etkisinden dolayı katılır.

5. Yüksek mukavemetli ve ısıya dayanımlı alaşımlara, yaşlanma sertleşmesini etkilemek için alüminyum ile beraber ilave edilir.

- i) Azot (N) çelik üzerindeki etkileri;
 - 1. Kuvvetli östenit yapıcıdır.
 - 2. yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önlemek için katılır.
 - 3. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda kaynak metalinin tokluğunu olumsuz yönde etkiler.
 - 4. Mukavemeti arttırır.

2.1.4. Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyeti

Paslanmaz çeliklerin kaynağı için, mevcut tüm kaynak yöntemlerinin uygun olduğu söylenebilir. Bir kaynak yönteminin diğer kaynak yöntemine tercih edilmesinde aşağıdaki faktörler göz önüne alınır.

- a) Uygun cihazların varlığı ve kullanılabilirliği
- b) Kaynak edilecek malzemenin kalınlık miktarı
- c) Kaynağın yapılacak ortam
- d) Kaynak pozisyonu
- e) Kaynak yapılacak paslanmaz çeliğin türü
- f) Yardımcı donanım ve takımların karşılanabilirliği

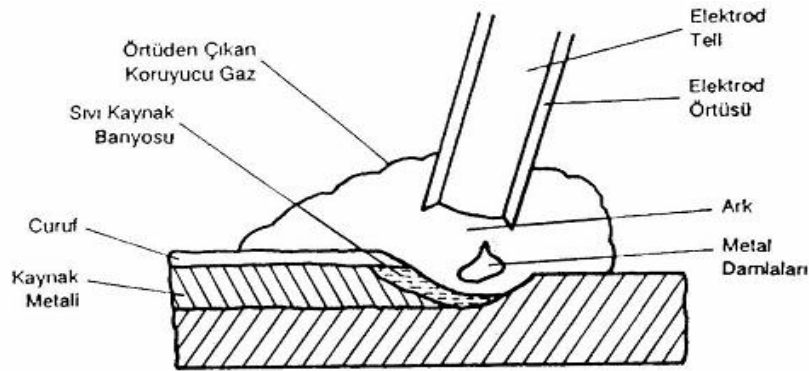
Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikler, değişik ark kaynağı yöntemleri ile kaynak edilebilirler. Fakat paslanmaz çeliklerin birleşimine kattığımız elementler çeliklere olumlu mekanik ve fiziksel özelliklerinin bazı etkileri ile birlikte kaynak kabiliyeti açısından kaynak problemlerini de beraberinde getirebilmektedir. Bu problemlerle oluşturulacak tasarımların servis ömrü ciddi önem taşımaktadır. Bu karakteristikleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- a) Paslanmaz çeliklerin düşük ısı iletme katsayıları
- b) Yüksek ısıl genleşme katsayıları
- c) Yüksek elektrik iletme direnci

- d) Soğuk şekillendirmeye karşı hassasiyet
- e) Kaynakta izlenen yapısal değişimler (tane irileşmesi, karbür oluşumu, sigma fazı, delta ferrit)
- f) Korozyona karşı hassasiyet [16].

2.2. Kaynak İşleminin Tanımı

Kaynak; aynı cins veya farklı cins metallerin ısı, basınç veya her ikisini kullanarak yapılan birleştirme işlemidir. Söz konusu iki metalin birleştirilmesi işleminde ilave olarak ergime sıcaklığı aynı veya yakın bir metal kullanılıyorsa bu metale de ilave metal veya elektrot adı verilir (Şekil 2.1).



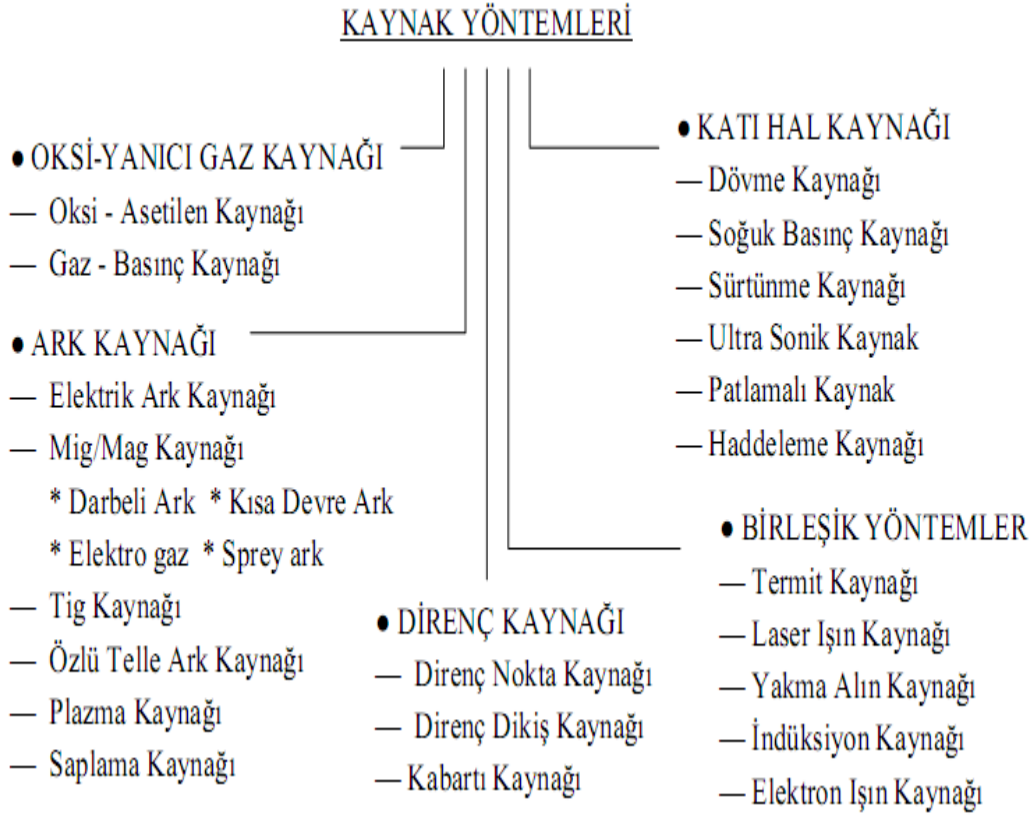
Şekil 2.1. Örtülü elektrot ile ark kaynağı [2]

Tüm kaynak işlemlerinde, birleştirme işleminin gerçekleştirilebilmesi için malzeme kalınlığına uygun ve kontrol edilebilir bir ısı girdisine ihtiyaç vardır. Isı girdisinin en önemli özelliği ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını belirlemesidir. Isının etkisiyle mikro yapıda ciddi değişiklikler gözlenmektedir. Kaynak bölgesinde gereğinden fazla ve kontrol edilemeyen ısı girdisi, kaynak işlemi için bir çok olumsuzluğu beraberinde getirir. Bu olumsuzluklar kaynak işleminde ulaşılmak istenen amaçtan uzaklaşmamıza sebep olur.

Günümüz teknolojisinde birçok kaynak türü kullanılmaktadır. Bu kaynak türlerini kaynak yapılacak malzemeye, kaynağın yapılış biçimine, kaynak işleminin amacına,

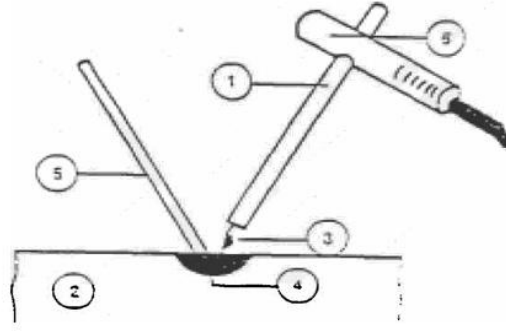
uygulanacak enerji şiddeti ve enerji türüne göre sınıflandırmak mümkündür. Kullanılan başlıca kaynak türleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kaynak yönteminin sınıflandırılması [10]



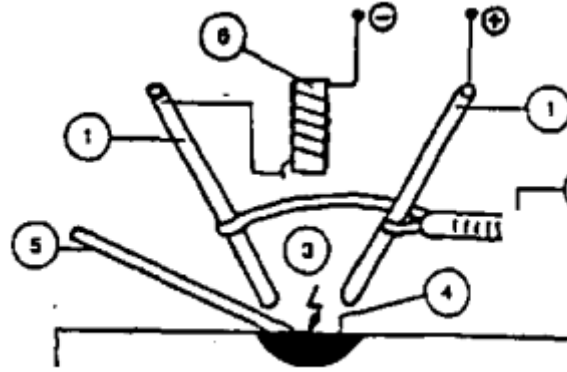
2.2.1. Ark kaynağının tarihçesi

Ark kaynağının tarihi gelişimine baktığımızda, karşımıza üç ayrı yöntem çıkar. Bunların en eski olanı 1885 yılında Benardos tarafından yapılmıştır. Benardos bu yöntemde karbon bir elektrot ile iş parçası arasında bir ark teşkil etmiş, ayrıca bir ilave metal kullanarak kaynak işlemini gerçekleştirmiştir. (Şekil 2.2) Bernardos yönteminde yapılan kaynak dikişi, havanın olumsuz tesirinden korunamadığı için düşük mekanik özelliklere sahiptir [2,11].



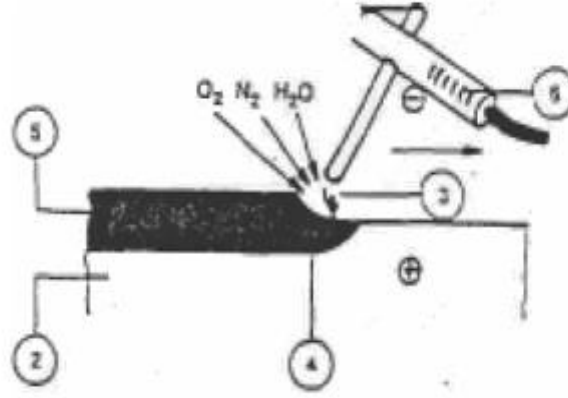
Şekil 2.2. Bernardos kaynak yöntemi [2,11]

Daha sonra Zenerer 1889 yılında arkı iki karbon elektrotu arasında teşkil ederek kaynak işlemini gerçekleştirmiştir. Zenerer yönteminde de ilave bir metal kullanılmıştır (Şekil 2.3) [2,11].



Şekil 2.3. Zenerer kaynak yöntemi [2,11]

Slavianoff 1889 yılında bugünkü elektrik ark kaynağının özünü bulmuştur. Bu yöntemde karbon elektrot yerine, çıplak metalik bir elektrot ile iş parçası arasında ark oluşturulmuş ve çıplak metalik elektrotun erimesiyle kaynak ağzı doldurulmuştur (Şekil 2.4) [2,11].



Şekil 2.4. Slavianoff kaynak yöntemi [2,11]

Slavianoff tarafından bulunan bu yöntemde de kaynak dikişi havanın olumsuz tesirinden korunamamış ve düşük mekanik özelliklere sahiptir. Ancak Oscar Kjelberg 1908 yılında elektrot örtüsünü bularak bu sorunu ortadan kaldırmıştır. Bu buluşla birlikte kaynak, birinci dünya savaşından sonra çok daha hızlı bir gelişim sürecine girmiştir [2].

Türkiye’de ilk metal kaynağı 1920 yılında İstinye ve Gölcük Tersanelerinde kullanılmıştır. Daha sonra 1929’da Savunma Sanayinde, 1930’da Sümerbank Hereke Fabrikasında, 1931’de Karayolları Atölyesinde, 1933’de Eskişehir Hava İkmal Merkezinde kullanılmıştır. Ülkemizdeki planlı ilk kaynak uygulamaları 1934 yılında Eskişehir Vagon Fabrikalarında başlamıştır [2,11]. Ayrıca daha yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan kaynak işleminde son yıllarda sayılamayacak kadar gelişmeler yaşanmıştır.

Üretim hızının artması ile meydana gelen sorunları çözebilmek için daha hızlı kaynak yapabilmenin yolları araştırılmış ve 1933 yılında Tozaltı kaynak yöntemi keşfedilmiştir. Bu yöntem başta ABD ve Rusya ardından Avrupa ülkelerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaynak yöntemiyle kalın saçların, kaynağı yapılabildiğinden savunma sanayinde aktif bir şekilde kullanılmıştır [2,11].

2.2.2. Tozaltı ark kaynağı

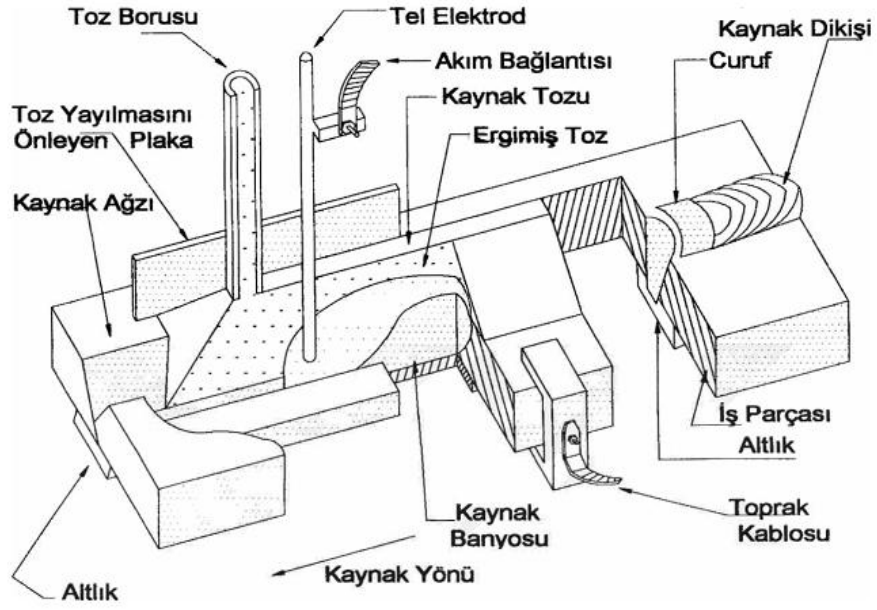
American Welding Society (AWS) tozaltı ark kaynağını şu şekilde tanımlar; Tozaltı kaynak yöntemi, iş parçası ile metal tel elektrot arasında, bir ark oluşturarak bunların

ısıtılmasını sağlayan ve bu suretle birleşmelerini sağlayan bir ark kaynağı işlemidir. Ark ve erimiş durumda olan metal, tanecikli yapıya sahip bir toz örtüsü ile örtünür. Bu kaynak yönteminde basınç kullanılmaz. Dolgu metali, elektrotlar ile toz ve metal taneciklerinden oluşur [12].

Bu kaynak yönteminde bir bobin vasıtası ile sağılan kaynak teli, bir motor tarafından tahrik edilen makaralar arasından ve bir memeden geçerek dikiş bölgesine iletilir. Ark için gereken akımı memeden alan tel ile iş parçası arasında istenilen ark teşekkül etmiş olur. Bu sırada ayrı bir kanaldan gelen silikat ve toprak alkali metalleri ihtiva eden özel bir toz ark bölgesini atmosferin olumsuz tesirinden korur. Kaynak teli ile iş parçası arasında meydana gelen arkın sıcaklığı ile tel ve esas metalin bir bölümü eriyerek arzu edilen birleşmeyi meydana getirmiş olur. Ark işlemi bir toz örtüsü altında gerçekleştiğinden çevreye ışıyım yapmaz böylece ark enerjisinin büyük bir bölümü (yaklaşık olarak % 68'i) doğrudan kaynak için tüketilmiş olur [12].

Bu yöntemle yapılan kaynak işlemi sırasında arkın sıcaklığı ile bir miktar toz da eriyerek kaynak dikişini örten bir cüruf durumuna geçer. Bu cüruf kaynak dikişini ve kaynak banyosunu atmosferin olumsuz etkilerinden korur. Cüruf bölgesi içerdiği, çok kuvvetli oksitleyici (dezoksidan) ve alaşım elementlerinin de yardımıyla kaynak banyosunun dezoksidasyonunu ve kaynatılacak metalin alaşımlanmasını sağlar [12].

Tozaltı ark işlemi, yüksek kalitede kaynak dikişleri elde etmekle birlikte kaynak yüzeyi elle yapılan ark kaynağın yüzeyinden çok daha düzgündür. Tam otomatik ve yarı otomatik uygulamalara uygun olması tozaltı kaynağını, kaynak endüstrisinde daha yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamıştır [13]. Şekil 2.5'de tozaltı kaynak yönteminin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.5. Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynatılan 'V' ağızlı parçanın kesit görünüşü [12]

Tozaltı ark kaynağı otomatik olarak çalışmasının yanında, akım şiddeti de yüksektir. Bu yüzden tek paso ile 85 mm, iki paso ile 180 mm ve daha fazla paso ile 300 mm kalınlığındaki parçaların kaynağını yapmak mümkündür. Bu arada kaynak yapılabilecek en ince saç kalınlığı da 1,2 mm dir. Tozaltı ark kaynağında akım şiddetinin fazla olmasından dolayı, derin nüfuziyetli ve geniş banyolu dikişler elde edilir [4,15].

Tozaltı kaynak yönteminde 40 mm kalınlığındaki bir plaka dakikada 300 mm hızında, 25 mm kalınlığındaki bir plaka ise dakika 750 mm hızında kaynatılabilmektedir [16]. Tozaltı ark kaynak sistemi, bir güç kaynağı ile tel-toz besleme, toz emme, hareketli araba ve kaynak işlevini yerine getiren bir kontrol düzeneğinden oluşur [17].

2.2.2.1 Tozaltı ark kaynağının kullanım alanları

Tozaltı ark kaynağı ağır teçhizat sanayinde, basınçlı kap, kazan, tank gibi büyük çelik tasarım elemanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra tamir ve dolgu yöntemi olarak ta geniş bir uygulama alanına sahiptir [12,14].

Bu kaynak yöntemi ayrıca kaynaklı boru imalinde, demiryolu inşasında, kiriş direk gibi uzun kaynak gerektiren kolonların kaynağında, profil yapımında (I, H, T profilleri gibi) yaygın olarak kullanılmaktadır [18].

Diğer temel kaynak yöntemleriyle kaynaklanmaya uygun olan malzemeler, tozaltı ark kaynağında da eş değer bir kaynaklanma özelliği gösterirler. Bununla birlikte, tozaltı kaynak yöntemi boru fabrikasyonun da kullanılması halinde el ile ark yöntemine göre sekiz kat daha hızlı birleştirmeler sağlar ve düşük hata oranı verir [19,20].

2.2.2.2. Tozaltı kaynak yönteminin avantajları

Yüksek ergime gücü ve kaynak hızı; Tozaltı kaynak yönteminde normal olarak uygulanan akım şiddeti 200 ile 2400 A (amper) arasında değişir fakat çok telli tekniklerde bu değer 5000 A kadar çıkmaktadır [21]. Bu olay tozaltı kaynak yöntemine çok yüksek bir ergime gücü kazandırmakta ve kaynak hızı 6 ile 300 m/saat olarak ayarlanabilmektedir. Bu da diğer kaynak usulleriyle kıyaslanamayacak bir değerdir.

Derin nufuziyet; Tozaltı kaynak yönteminde akım şiddetinin yüksek olmasına bağlı olarak çok yüksek nufuziyet sağlanmaktadır. Bu yöntem ile kaynak ağzı açmadan bir pasoda 18-mm ve ağız açarak da iki paso ile 150-mm kalınlığında parçalar kaynatılabilmektedir [12].

Elektrot tasarrufu; Tozaltı kaynak yönteminde sıçrama kaybının olmayışı ve tel elektrot kullanılması elektrot açısından ciddi tasarruf sağlamaktadır [22].

Enerji tasarrufu; Tozaltı kaynak yönteminde elektrik arkı özel tozlarla örtülü olduğundan ışınlamayı olmamakta ve yüksek akım yoğunluğunun çok az bir kısmı parça tarafından sönmülediğinden dolayı büyük bir enerji tasarrufu sağlanmaktadır [12].

Emniyetli ve düzgün görünüşlü kaynak dikişi; Kaynak bölgesinin düzgün ve etkin bir şekilde tozlarla örtülü olması, kaynak sonrasında emniyetli bir katılma

sağlamaktadır. Kaynak işleminin otomatik olması hata payını çok ciddi oranda azaltmakta ve düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemde kaynak dikişinin yanında yanma olukları oluşmamakta ve emniyetli bir kaynaklama işlemi gerçekleşmektedir [12].

Kaynak dikişi kalitesine kaynakçının etkisinin olmaması; Tozaltı kaynak yönteminde elektronik ve elektro-mekanik ayar ve kumanda sistemi kaynakçı faktörünü ortadan kaldırıyor. Aynı zamanda kaynakçı bedenen çok daha az yorulmuş oluyor [12].

Yüksek ark kararlılığı; Ark bölgesinde buharlaşan cürufun oluşturduğu atmosferle ark bölgesi çok iyi bir şekilde muhafaza edilmekte böylece yüksek akım şiddeti ve yüksek kaynak hızlarının kullanılmasına imkân tanımaktadır [12].

Özel koruyucu donanımlara ihtiyaç duyulmaması; Tozaltı kaynak işleminde ark tamamen toz altında gerçekleştiğinden ışınlam olmamakta böylece gözleri korumak için özel bir donanıma ihtiyaç duyulmamaktadır [12].

2.2.2.3. Tozaltı kaynak yönteminin dezavantajları

1. Makine ve donanımları pahalı olduğundan dolayı ilk yatırım maliyeti yüksektir.
2. İnce kalınlıktaki saçların kaynağında uygun bir yöntem değildir.
3. Kısa boylu ve karışık dikişler için yarı otomatik tozaltı kaynak makineleri imal edilmişse de bu makineler tozaltı kaynak yönteminin tüm özelliklerini taşımamaktadırlar.
4. Bu yöntemle yatay pozisyonda iyi sonuç alınabilse de dik ve korniş pozisyonları için özel tertibatlar gerekmektedir.
5. Tozaltı kaynak yöntemiyle tavan pozisyonu da kaynak yapılamamaktadır [12].

2.2.2.4. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak telleri

Diğer kaynak yöntemlerinde kullanılan elektrotlar, tozaltı kaynak yönteminde kaynak teli olarak adlandırılır. Bu kaynak telleri elektrik ark ocaklarında üretilir. Kaynak

bölgesinin güvenliğini sağlaması açısından kaynak telleri yüksek mangan (Mn) içeren çeliklerden yapılırlar. Çeşitli amaçlar için 1,2 ile 12 mm kalınlığında kaynak telleri kullanılmaktadır. kaynak telleri genellikle bakır veya bronz kaplı olarak üretilirler [22].

Tozaltı ark kaynağında kullanılan kaynak telleri içerdikleri mangan miktarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar [15,23].

Düşük manganli %0,30 – 0,60 Mn

Orta manganli %0,90 – 1,25 Mn

Düşük manganli %1,75 – 2,25 Mn

Tozaltı kaynak tellerinin birleşiminde bulunan Fosfor (P) ve Kükürt (S) oranları %0.03'ü geçmemelidir. Kaynak telinin bileşiminde bulunan diğer elemanların % bulunma değerleri ve kaynak dikişi üzerindeki etkileri Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Tozaltı kaynak tellerinin bileşiminde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri [24]

Alaşım Elementi	% Sınırları	Etkisi
Karbon (C)	0.05 – 0.25	- Sertliği artırır - çekme dayanımını yükseltir
Silisyum (Si)	0.05 – 0.45	- Deokside eder - işlenebilme kabiliyetini yükseltir - kaynak kabiliyetini yükseltir
Manganez (Mn)	0.5 – 3.0	- Sertliği kısmen yükseltir - çentik ve çentik darbe dayanımını yükseltir
Molibden (Mb)	0.5 – 1.0	- ısıya dayanımı artırır
Krom (Cr)	1.0 – 2.9	- sertliği yükseltir - ısıya dayanımı artırır
Nikel (Ni)	1.0 – 2.0	- düşük çalışma sıcaklıklarında dayanımı artırır

Tozaltı kaynak yönteminde, kaynatılacak malzemenin bileşimine göre kaynak teli seçiminin dışında birde kaynak tozunun metalurjik durumu göz önünde bulundurulması gerekir. Böylece yüksek mekanik özelliklere sahip kaynak dikişi elde edilebilir [21].

2.2.2.5. Tozaltı ark kaynağında kullanılan kaynak tozları

Tozaltı kaynak yönteminde, kaynak tozları kaynak bölgesini havanın olumsuz etkisinden koruyan ve çeşitli oranlarda karıştırılmış taneli mineral bileşiklerdir. Kaynak işlemi sırasında ergimeyen kaynak tozları emilerek yeni bir kaynak işleminde kullanılabilir. Tekrar kullanılmak istenen toza %50 oranında yeni kurutulmuş toz ilavesi tavsiye edilmektedir [25].

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak tozları 4 gruba ayrılır [17].

- Kullanım amacına göre kaynak tozları
 - a. Kaynak süresini hızlandıran tozlar,
 - b. Dikişin derinliğini artıran tozlar,
 - c. İnce parçaların kaynağında kullanılan tozlar,
 - d. Dolgu kaynaklarında kullanılan tozlar.

- Üretim Şekillerine Göre kaynak tozları
 - a. Erimiş kaynak tozları,
 - b. Sinterlenmiş kaynak tozları,
 - c. Seramik kaynak tozları.

- Kimyasal Özelliklerine Göre Kaynak Tozları
 - a. Asit yapılı tozlar,
 - b. Nötr yapılı tozlar,
 - c. Bazik yapılı tozlar.

- Yapısında Bulunan Manganez Miktarına Göre Kaynak Tozları
 - a. Yüksek manganlı tozlar (%30-45 MnO)
 - b. Orta seviye mangan içeren tozlar (% 14-20 MnO)
 - c. Düşük manganlı tozlar (<%14)

2.2.3. Gazaltı kaynak yöntemi

Kaynak banyosunu havanın olumsuz tesirinden tozla değil de çeşitli gazlar ile koruyarak gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir. Gazaltı kaynağı, sıcaklığın ergiyen sonsuz bir elektrot ve iş parçası arasında oluşan ark ile sağlandığı bir kaynak işlemidir. Bu yöntem kullanılan gazın davranımına göre iki ayrı isimle anılmaktadır. Kullanılan koruyucu gaz asal gaz ise bu yöntemde MIG (Metal Inert Gaz), kullanılan koruyucu gaz aktif bir gaz ise bu yöntemde de MAG (Metal Aktif Gaz) denilmektedir [26].

Genel olarak MIG kaynağında helyum-argon ve argon gazı koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır. MAG kaynağında ise aktif gaz olarak karbondioksit ve karışım gazı olarak argon-karbondioksit-oksijen kullanılır. Sonuç olarak her iki yöntemde kaynak donanımı aynıdır. Sadece CO₂ korumalı kaynak tüpünün çıkışına bir ısıtıcı eklenir [27].

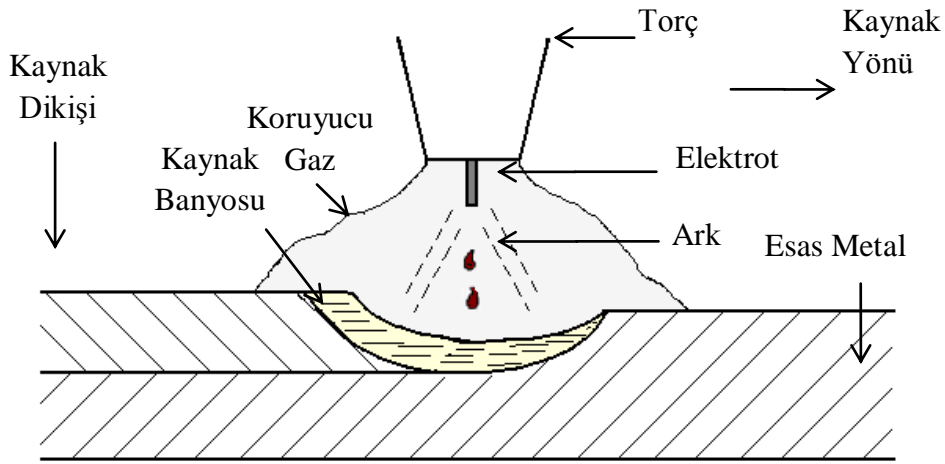
Kaynak banyosu, elektrot, ark ve ana metale komşu olan bölge sürekli olarak beslenen bir akıcı gaz yardımı ile atmosferin zararlı etkilerinden korunmaktadır. Gaz ile yapılan koruma tam bir koruma sağlamalıdır. Aksi takdirde çok küçük boşluklar bile kaynak metalinde istenmeyen durumlara yol açabilmektedir [26].

Gaz metal ark kaynağı (GMAW) sınırsız bir elektrot ile besleniyor olması ve zor pozisyonlarda kaynak işlevini yerine getirebilmesi ile tozaltı kaynak yönteminde yaşanan kısıtlamaları ortadan kaldırmaktadır [26].

Bu yöntemdeki bir gelişmede kullanılan elektrot konusunda yaşanmıştır. İçi dolu olan tel elektrot yerine içi metal tozu ile doldurulmuş olan "özlü elektrotlar"

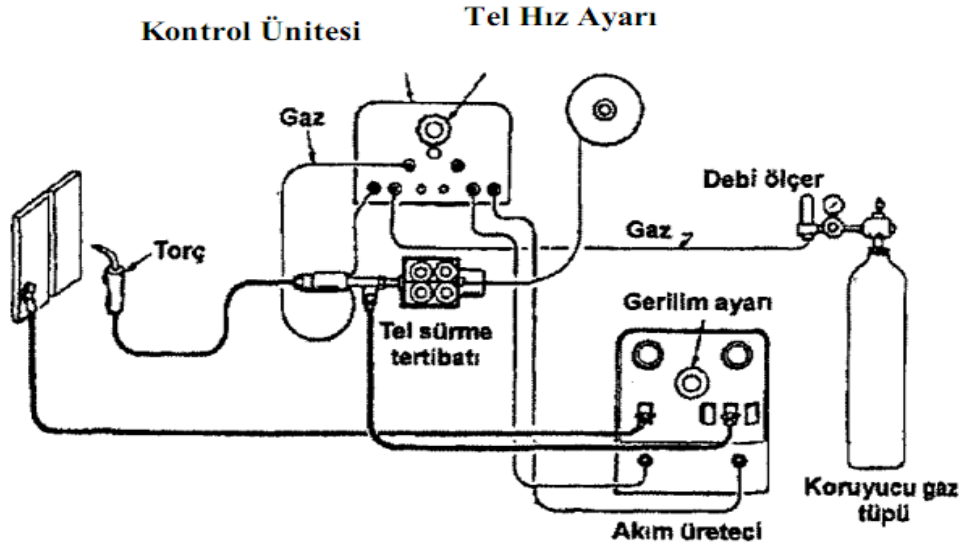
geliştirilmiştir. Böylece örtülü elektrotlardaki örtünün görevini özlü elektrotun öz kısmı ve çekirdek telinin görevini de özü saçan çelik tüpün görmesi sağlanmıştır [27].

Bu yöntem yarı otomatik ve otomatik modelleriyle endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Yarı otomatik olan modellerde ark boyu, kaynak makinesi tarafından kontrol edilebilmektedir. Otomatik olan modellerde ise gaz memesi iş parçasının üzerinde belirli bir hızda otomatik olarak ilerler. Bu durumda kaynakçının kaynak işlemine fiili bir katkısı bulunmamaktadır [27].



Şekil 2.6. GMAW Kaynak Yönteminde Ark Bölgesi

GMAW ile ticari açıdan önemli olan tüm metaller uygun koruyucu gaz, elektrot ve kaynak değişkenleri seçilerek kaynak edilebilirler. GMAW için gerekli olan donanım Şekil 2.7’de gösterilmiştir [28]. Kaynak donanımının 4 temel gruptan oluştuğu görülmektedir. Bunlar kaynak torcu ve kablo grubu, koruyucu gaz ünitesi, güç ünitesi ve elektrot besleme ünitesidir [27].



Şekil 2.7. GMAW Kaynak donanımı [28]

Yukarıdaki şekilde görülen GMAW' nın kaynak donanımı şu kısımlardan oluşur [29].

- Bir kaynak tabancası yani kaynak torcu,
- Tel elektrot ve muhafazasını, kaynak ve şalter kablosunu, gaz hortumunu ve gerekli durumlarda soğutma sıvısının giriş ve çıkış ekipmanlarını bir arada tutan metal spiral takviyeli hortum,
- Tel elektrotun hareketini sağlayan düzenek,
- Kaynak akımının geçişini, soğutma sıvısının devreye girişini, kullanılan koruyucu gazın akışını ve telin hareketini sağlayan kumanda dolabı,
- Kaynak akım üretici,
- Üzerinde basınç düşürme vanası ve gaz debisi ölçme tertibatı bulunan gaz tüpü,

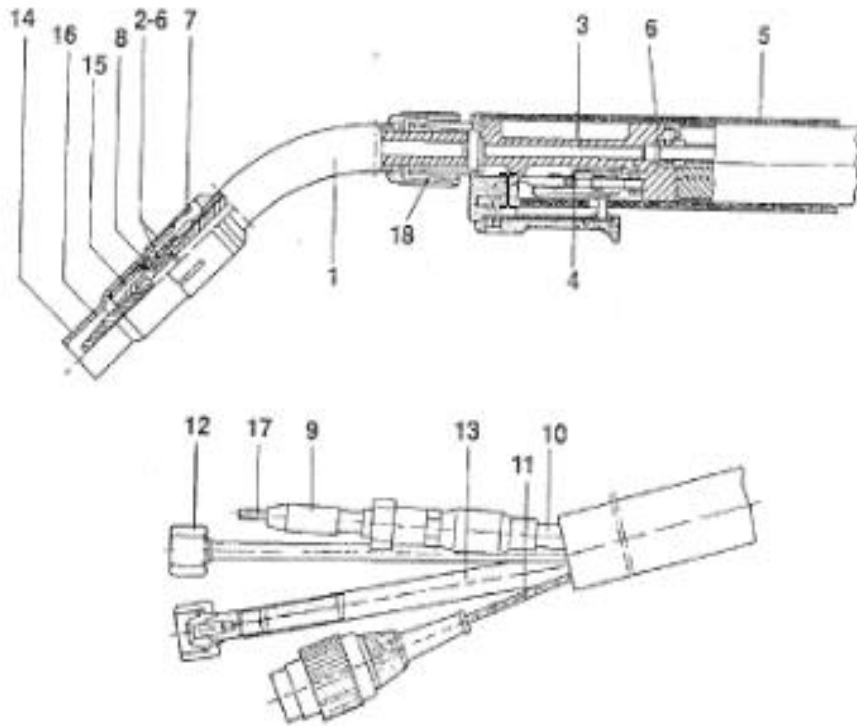
GMAW'da torcu ve kablo grubu üç farklı görevi yerine getirir. Bunlardan birincisi kullanılan koruyucu gazı ark bölgesine taşımaktır. İkinci olarak elektrotun temas yüzeyiyle temasını sağlamak ve son olarak güç ünitesinden gelen akım kablosunu temas tüpüne iletmektir. Kaynak torcunun tetiğine basıldığında, iş parçasına aynı anda gaz, güç ve elektrot iletir ve bir ark oluşumuna sebep olur. Bu oluşan ark boyunun kendi boyunu otomatik olarak ayarlaması için tel besleme ünitesi ile güç ünitesi arasında ilişkiyi sağlayan iki farklı çözüm vardır. Birincisi ve en yaygın olanı sabit gerilimli bir güç ünitesi ile sabit hızlı elektrot besleme ünitesi kullanmaktır.

İkincisi ise azalan bir gerilim ark karakteristiği sağlayarak elektrot besleme ünitesinin besleme hızı ark gerilimi yoluyla kontrol altına alınır [27].

2.2.3.1. Gazaltı kaynak torçları

Gazaltı kaynak yönteminde ark bölgesine koruyucu gazın gönderilmesi ve tel elektrota akım yüklenmesi kaynak torçları ile sağlanır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan yarı bükülmüş şekilde olan ve oksijen - asetilen torcunu andıran türdür [30].

Kaynak işlemi için gereken akım elektrota bakır alaşımlı bir kontak lülesiyle ulaşmaktadır. Kullanılan tel elektrotun çapına uygun şekilde yapılmış kontak lüleleri mevcuttur. Torcun aşırı ısınmasını önlemek için bir torcun içerisine bir soğutma sistemi yerleştirilmiştir [26]. Torçun çalışma durumu göz önüne alınarak soğutma sisteminde iki farklı soğutucu kullanılır. Yüksek akım değerleri ile çalışılması gerektiğinde su soğutmalı torçlar kullanılır. Düşük akım değerleri ile çalışılması durumunda da hava soğutmalı torçlar kullanılmalıdır. Uygulama alanlarına göre çok farklı çeşit ve boyutlarda torçlar bulunmaktadır. Şekil 2.8'de hava soğutmalı bir kaynak torcunun kesiti ve bağlantı paketi verilmiştir [31].



1 Torç Boynu	10 Kılavuz Hortumu
2 Kontak Lülesi Tutucusu	11 Şalter Kablosu
3 Torç Gövdesi	12 Gaz Hortumu
4 Torç Şalteri	13 Akım Kablosu
5 Kabza	14 Gaz Lülesi
6 Conta	15 İzolasyon Ringleri
7 Bağlama Ringi	16 Kontak Lülesi
8 İzolasyon Yüksüğü	17 Elektrod Kılavuzu (spiral)
9 Kılavuz Lülesi	18 Torç Bağlantı Rakoru

Şekil 2.8. GMAW’da hava soğutmalı bir torç kesiti ve bağlantı elemanları [31]

2.2.3.2. Gazaltı kaynağında kullanılan koruyucu gazlar

GMAW’ da kullanılan koruyucu gazların ilk amacı kaynak banyosunu ve ısı tesiri altında kalan bölgeyi (ITAB) oksitleyicilerden ve havanın menfi tesirinden korumaktır. Ergimiş haldeki hemen hemen tüm metaller havadaki azot ve oksijeni kendi bünyelerinde absorbe etmeye çalışırlar. Emilen azot ve oksijen molekülleri ergimiş metal içerisinde çözünerek, katılaştıran kaynak metalindeki elementlerle birleşerek yeni bileşikler oluşturur. Bu olay kaynak metalinin kimyasal ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler ve çeşitli kaynak hatalarının oluşmasına sebep olur. Koruyucu gazlar burada örtülü elektrot görevini görmektedir. Koruyucu gazlar bu temel görevlerinin dışında kaynak işlemi ve kaynak dikişine de önemli etkileri vardır. Bunları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- a) Arkın karakteristiği
- b) Metal transferin şekli
- c) Nufuziyet ve kaynak dikişinin profili
- d) Kaynak hızı
- e) Yanma oluşu oluşma eğilimi
- f) Temizleme etkisi
- g) Kaynak metalinin mekanik özellikleri [27].

İlk yıllarda sadece inert gazlar (argon – helyum) koruyucu gaz olarak kullanılırken şimdi karbondioksit gazı da büyük oranda koruyucu gaz olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca oksijen ve karbondioksit gazı sık sık inert gazlarla karıştırılarak kullanılmaktadır. GMAW’de kullanılan karışım gazların ve inert gazların kimyasal davranışları ve uygulama alanları Tablo 2.3’de gösterilmektedir [26].

Tablo 2.3. GMAW’de Kullanılan Farklı Koruma Gazları [26]

Gaz türü	Gazın bileşimi %	Kullanım yeri
Argon	-	Demir dışı metaller
Helyum	-	Alüminyum, magnezyum ve bakır alaşımları
Karbondioksit	-	Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler
Argon-helyum	20-50 Ar-50-80He	Alüminyum, magnezyum, bakır ve nikel alaşımları
Argon-oksijen	1-2 O ₂	Paslanmaz çelikler
	3-5 O ₂	Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler
Argon-karbondioksit	20-50 CO ₂	Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler
Helyum-argon-karbondioksit	90 He-7 ^{1/2} Ar-2 ^{1/2} CO ₂	Paslanmaz çelikler
	60-70He-25-35Ar-5CO ₂	Düşük alaşımlı çelikler
Nitrojen	-	Bakır alaşımları

2.2.3.3. Gazaltı kaynağının avantajları

Bu yöntemin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan etkenleri, bu yöntemin diğer yöntemlerden üstünlüklerini göstermektedir.

Bu üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- Ticari amaçlı metal ve alaşımların tümünün kaynağında kullanılabilen yegâne eriyen bir elektrotla yapılan kaynak yöntemidir.
- Elektrik ark kaynağında karşılaşılan sınırlı uzunluktaki elektrot boyutu sorunu ortadan kalkmıştır.
- Her pozisyonda kaynak yapılabilir olması tozaltı kaynağında yaşanan sorunları ortadan kaldırmıştır.
- Sürekli bir elektrot ile beslendiğinden dolayı metal yığılma ve kaynak hızı ark kaynağına nazaran çok daha hızlıdır.
- Sürekli bir elektrot ile beslendiğinden hiç durmaksızın uzun dikişler elde edilebilir.
- "Sprey iletim" kullanıldığı takdirde elektrik ark kaynağına nazaran daha derin nüfuziyet elde edilir.
- Yoğun bir cüruf tabakası olmadığından temizlik yönünden sarf edilen zaman çok azdır [27].

2.2.3.4. Gazaltı kaynağının dezavantajları

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi GMAW'da da bazı sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamaları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Kaynak donanımı, ark kaynağına nazaran daha karmaşık ve pahalıdır. Bu yüzden bir yerden bir yere taşınmasında bir o kadar zordur.
- Kullanılan kaynak torcunun büyük olması ve kaynak edilecek metalin koruyucu bir gazla korunmak zorunda olmasından dolayı, kaynak torcu kaynak metaline belli bir mesafede (10 – 19 mm) tutulması gerekir. Bu durumda ulaşılması güç yerlerin kaynağı mümkün olmamaktadır.
- Kaynak arkını kurumak için kullanılan koruyucu gazın hava akımlarından korunması gerekir. Aksi takdirde yöntemin açık alanlarda kullanılması mümkün olmamaktadır [27].

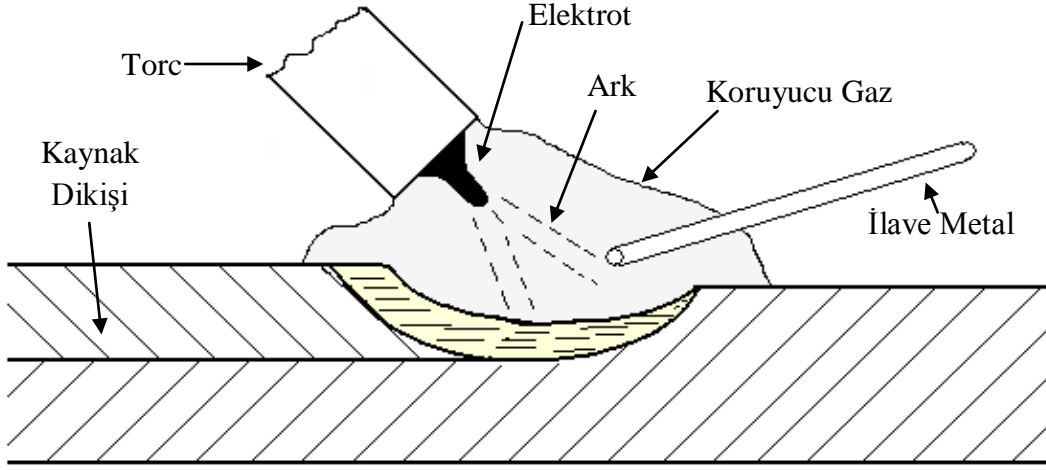
2.2.4. TIG kaynağı

TIG kaynak yönteminde, koruyucu gaz olarak genelde Argon gazı kullanıldığı için bu yöntemin adı Argon-ark kaynağı olarak ta anılmaktadır. TIG kaynağı ismi ise İngilizce Tungsten Inert Gas kelimelerinin baş harflerinin baş harflerinden oluşturulmuştur. Ayrıca Almanca da Tungsten ile aynı anlama gelen wolfram kelimesi kullanıldığından birçok Avrupa ülkesinde TIG yöntemi WIG yöntemi olarak da adlandırılmaktadır [32].

TIG kaynak yöntemi ilk olarak 1930 yılında ABD' de denenmiştir. II. Dünya savaşı sırasında alüminyum alaşımları ve paslanmaz çeliklerin kaynağı işleminde kullanılmıştır. İlk olarak havacılık endüstrisinde ve Mg alaşımlı metallerin kaynağında kullanılmış ve alınan olumlu sonuçlar neticesinde diğer endüstri alanlarında da yaygın kullanılır hale gelmiştir [33].

TIG "Tungsten Inert Gas" yönteminde kaynak arkı, tungsten bir elektrot ile iş parçası arasında oluşmaktadır. Ark sonucunda ortaya çıkan ısının esas metali ve dolgu metalini eritmek amacıyla kullanılması TIG kaynak yönteminin çalışma prensibini oluşturur. Koruyucu gaz olarak argon ya da helyum gazı kullanılmaktadır. Böylece oksidasyon, nitrür oluşumu gibi istenmeyen durumlar engellenmiştir. Hafif metallerin kaynağında geniş ve derin nüfuziyet oluşumu argon ve helyum karışımı koruyucu gazların kullanılması ile sağlanabilmektedir [34,35].

Şekil 2.10'da TIG kaynak yöntemine ait temsili şemada kaynak arkının elektrot ile iş parçası arasında olduğu, ark sonucu oluşan eriyiğin başka bir ilave metal ile beslendiği gösterilmiştir. Kaynak arkının, kaynak eriyiğinin, elektrotun ve ilave metalin nozuldan çıkan bir koruyucu gaz tarafından atmosferin olumsuz etkilerinden korunduğu görülmektedir [31,36].



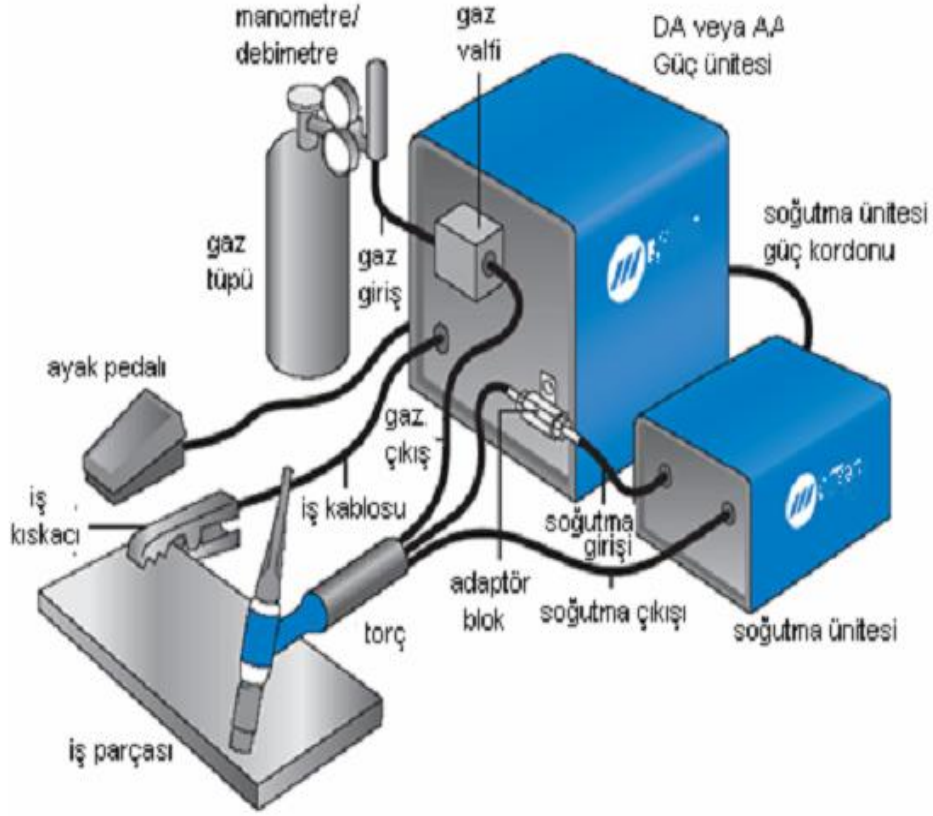
Şekil 2.9. TIG kaynağının temsili görüntüsü [31]

TIG kaynak yönteminde erimeyen tungsten elektrot kullanıldığından bazı durumlarda ilave kaynak metaline ihtiyaç duymadan birleştirme işlemi yapılabilmektedir. İş parçasının kalınlığı ve ağız profili İlave metalin kullanılmasını etkileyen faktörlerdir. Endüstride bu kaynak yöntemi daha çok tamir amaçlı kullanılmaktadır.

TIG kaynak yöntemi prensip olarak her pozisyonda çalışabilmekte ve her kalınlıktaki iş parçalarının birleştirmeleri yapılabilmektedir. Ancak kalın parçaların kaynatılması işleminin uzun zaman alması ekonomik yönden uygun olmamasına sebep olmakta ve çok tercih edilmemektedir. Bu kaynak yöntemiyle 7-mm'den kalın olan iş parçalarının birleştirilmesinde önerilmemektedir. Ancak bu yöntemle çok kaliteli ve yüksek emniyetli birleştirmeler yapılabilmektedir. Bu nedenle uzay ve uçak sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Akım şiddeti azaltılarak çok ince (7 mm ile 0,1 mm arası) parçaların çok kaliteli birleştirilmesi mümkündür.

TIG kaynak donanımı, Şekil 2.10'da görüldüğü gibi şu kısımlardan oluşur [15].

- Tungsten elektrotu taşıyan bir torç
- Uygun bir akım üretici
- Koruyucu gaz sistemi
- Akım kabloları ve gaz hortumu
- Soğutma sistemi
- Akım üretici üzerine monte edilmiş kontrol panelinden oluşur.



Şekil 2.10. TIG kaynak donanımı prensip şması [37]

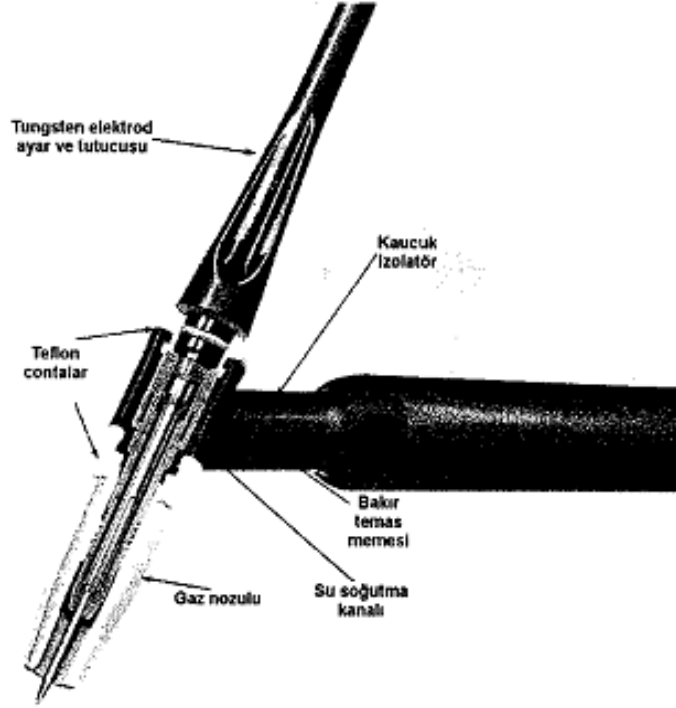
TIG kaynak yönteminde el ile kaynak yapıldığı gibi yarı otomatik ve tam otomatik olarak ta kaynak işlemi yapılmaktadır. El ile kaynak yapılması halinde koruyucu gaz olarak argon tercih edilir. Helyum koruyucu gaz atmosferinde kaynak arkının yüksek enerjide oluşması ve kaynak hızının artmasından dolayı otomatik TIG kaynak yönteminde helyum ve helyum – argon karışımı koruyucu gazlar kullanılır [38].

2.2.4.1. TIG kaynak torçları

Kaynak torçları, akım kablosundan aldığı akım ile iş parçası ve ucundaki tungsten elektrot arasında ark oluşumunu sağlayan aynı zamanda kaynak banyosunu havanın olumsuz etkisinden korumak için koruyucu gazı kaynak banyosunun üzerini örtecek şekilde sevk eden kaynak elemanıdır.

TIG kaynak yönteminde kullanılan torçlar, uygulama anında kullanabilecekleri en yüksek akım şiddetine göre sınıflandırılırlar. Akım şiddeti de torçta aşırı ısınmaya sebep olacağından, torçlar soğutma sistemine göre hava soğutmalı ve su soğutmalı

olarak iki gruba ayrılırlar. Şekil 2.11’de TIG kaynak yönteminde kullanılan su soğutmalı kaynak torçu görülmektedir.



Şekil 2.11. Su soğutmalı TIG kaynak torcunun parçaları [39]

Hava soğutmalı kaynak torçları, soğutma işlevini hava ve gaz yardımıyla yaptığından gaz soğutmalı torçlar diye anılmaktadırlar. Hava soğutmalı torçlar, su soğutmalı torçlara nazaran daha hafif ve daha ucuzdur. Akım yüklenme kapasiteleri 200 (amper) A’dır. Bu torçlar düşük akım şiddetinde çalışabildiğinden ince parçaların kaynağında tercih edilir [40].

Su soğutmalı torçlar, standart olarak 1000 A yüklenme kapasitesine sahip olarak üretilirler. Otomatik TIG kaynak işlemlerinde su soğutmalı torçlar kullanılır. Yüksek akım şiddeti ile daha kalın parçaların kaynak işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Su soğutmalı sistemde sızdırmazlık işlemini yapan contaların bozulması durumunda sistemdeki su kaynak sırasında buharlaşarak koruyucu gaza karışır buda kaynak kalitesini bozar ve kaynak dikişinde gözenek ve çatlaklıkların oluşmasına sebep olur [40].

2.2.4.2. TIG kaynak elektrotları

TIG kaynak yöntemini diğer elektrik ark kaynaklarından ayıran en önemli özellik, kaynak elektrotunun sadece kaynak arkı oluşturmasıdır. İlave metal için ayrıca bir metal parçası kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da ilave metal görülmektedir. Sadece ark oluşturma işlevini gören tungsten elektrot, çok yüksek bir ergime sıcaklığına (3410 °C) sahiptir. Ayrıca çok kuvvetli elektron yayıcı özelliğine sahip olan tungsten elektrotunun yaydığı elektronlar ark sütunu içinde kuvvetli bir elektron akımının oluşmasını sağlar. Tungsten elektrot meydana gelen elektron akımındaki atomları iyonize ederek arkın kararlılığını sağlar [26].

Günümüz endüstrisinde toryum, zirkonyum ve titanyum ile alaşımlandırılmış (%99,5) ticari saflıktaki tungsten elektrotlar kullanılmaktadır. Uygulamada karşılaşılan TIG kaynak elektrotlarını, saf tungsten elektrotlar, çizgili elektrotlar ve alaşımlı elektrotlar olmak üzere üç grup ayırmak mümkündür. TIG kaynak elektrotları AWS (Amerikan Kaynak Derneği), DIN (Alman Standart Enstitüsü) göre sınıflandırılmış ve elektrotların birbirinden ayırt edebilmek için renk kodları kullanılmıştır.

TIG kaynak yönteminde kullanılan Tungsten elektrotları kimyasal bileşimleri ve elektrot çaplarına göre akım yüklenme kapasiteleri değişmektedir. Elektrot çapı elektrotun yüklenebileceği en yüksek akım kapasitesine göre seçilmelidir.

Uygulamalarda elektrot için seçilen en yüksek akım kapasitesine yaklaşıldığında arkın ısı yoğunluğu artmakta ve daha kararlı ark, daha derin nüfuziyet, daha düşük dikiş yüksekliği elde edilmektedir [42].

Tablo 2.4. Tungsten elektrotların kimyasal bileşikleri ve renk kodları (DIN 32528) [41]

İşareti	Malzeme No.	Oksit İçeriği (%)	Renk Kodu
W	26.005	-	Yeşil
WT 10	26.002	0,90 – 1,20 ThO ₂	Sarı
WT 20	26.026	1,80 – 2,20 ThO ₂	Kırmızı
WT 30	26.030	2,80 – 3,20 ThO ₂	Leylak
WT 40	26.036	3,80 – 4,20 ThO ₂	Portakal
WZ 4	26.050	0,30 – 0,50 ThO ₂	Kahverengi
WZ 8	26.062	0,70 – 0,90 ThO ₂	Beyaz
WL 10	26.010	0,90 – 1,20 ThO ₂	Siyah

Tablo 2.5’de DIN standartlarına göre tungsten elektrotlarının bileşim ve çaplarına göre akım yüklenebilme kapasiteleri verilmiştir [41].

Tablo 2.5. Tungsten elektrotların bileşim ve çaplarına göre akım yüklenebilme kapasiteleri [41]

Elektrot çapı (mm)	Alternatif Akım A		Doğru Akım A	
	W Elektrot	WT Elektrot	W ve WT Elektrot	W ve WT Elektrot
0,5	005-015	005-020	005-020	-
1,0	010-060	015-080	015-080	-
1,6	050-100	070-150	070-150	10-20
2,4	100-160	140-235	150-250	15-30
3,2	150-210	225-325	250-400	25-40
4,0	200-275	300-425	400-500	40-55
4,8	250-350	400-525	500-800	55-80
6,4	325-425	500-700	800-1100	80-125

2.2.4.3. TIG kaynağında kullanılan koruyucu gazlar

TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak argon, helyum ve bunların karışımı gibi asal gazlar kullanılır. Tungsten elektrot ile ilave metali çevreleyen bu gazlar elektrot ile ilave metalin hava ile temasını engeller. Aksi durumda tungsten elektrot ark ile

eriyip biter ve ilave metalde havadaki oksijenle temasa geçerek oksitlenir. Ayrıca uygulama için seçilen gaz, iyonizasyonun kolay veya zor gerçekleşmesini sağlayan en önemli etkidir [43]. Kullanılan argon, helyum ve bunların karşımı gibi asal gazlar kimyasal bakımdan nötr durumda olup, kokusuz ve renksizdirler. Bu gazlar nötr karakter taşıdıkları için her hangi bir elementle birleşmezler, renksiz ve kokusuz olan bu gazlar aynı zamanda yanmazlar.

Helyum doğada hidrojen gazında sonra en hafif gazdır ve özgül ağırlığı $0,179 \text{ kg/m}^3$ olup havadan yaklaşık 7 kat daha hafiftir. Argonun özgül ağırlığı ise $1,784 \text{ kg/m}^3$ 'tür ve havadan 1,4 kere daha ağırdır [42]. Koruyucu gazlar arasındaki bu farklılıklar farklı tercih sebebi oluşturur. Tavan kaynak modelinde, gaz sarfiyatından dolayı helyum tercih edilir. Hızlı kaynak uygulamalarında veya kalın parçaların kaynağında derin nüfuziyet için helyum gazı tercih edilir. Argon koruyucu gazı ile ısıyı kontrol altına almak daha kolaydır. Elle yapılan TIG kaynak uygulamalarında argon gazı tercih edilmelidir. Otomatik tezgâhlar ile yapılan hızlı kaynak işlemlerinde helyum gazı kullanmak daha uygun olabilir. Her iki koruyucu gaz ile kaynatılabilen parçalarda daha derin nüfuziyet istendiğinde helyum kullanılır. Argon koruyucu gazı ile yapılan kaynak uygulamalarında ark oluşumu helyuma oranla çok daha kolaydır [43].

TIG kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazlar arasındaki farklılıklarla yapılan kaynak uygulamalarında biri diğerine göre daha iyi sonuç verebilmektedir. Fakat argon gazı, helyuma nazaran kolay temin edilebilmesi ve maliyet açısından daha uygun olmasından dolayı TIG kaynak yönteminde en çok kullanılan koruyucu gaz özelliğine sahiptir [39].

2.2.4.4. TIG kaynağının avantajları

TIG kaynağı aşağıda sıralanan avantajlara sahiptir. Bunlar sırası ile

- Günümüz endüstrisinde kullanılan hemen hemen bütün metallerin ve alaşımlarının kaynağında kullanılabilir.

- Cürufsuz bir kaynak dikişi elde edildiğinden kaynak sonrası temizleme işlemine gerek kalmamaktadır.
- Ark sıçraması gibi bir problem yoktur.
- Kaynak uygulamalarında ilave metale her zaman ihtiyaç yoktur.
- Her pozisyonda kaynak yapabilme olanağı sağlar.(yatay, dik, tavan)
- Ark ve kaynak banyosu net bir şekilde görülebilmektedir.
- Mukavemet ve kalite bakımından mükemmel dikişler elde edilebilir.
- Diğer kaynak yöntemlerine oranla çarpılma çok daha azdır.
- Sürekli bir kaynak dikişi elde etmek mümkündür.

2.2.4.5. TIG kaynağının dezavantajları

TIG kaynağı aşağıda sıralanan dezavantajlara sahiptir. Bunlar ise sırası ile

- TIG kaynak yönteminin metal yığıma hızı diğer kaynak yöntemlerine göre biraz daha düşüktür.
- Kalın parçaların kaynatılması işlemi için ekonomik bir yöntem değildir.
- Kullanılan tungsten elektrotun ucu dikkat edilmediği takdirde kolaylıkla bozulabilir.
- Kirli yüzeylere karşı hassastır bu yüzden yüzey temizliği gerekir.
- İlk yatırım maliyeti diğer yöntemlere göre daha yüksektir [32].

BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE ABAQUS

3.1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin çözümünde kullanılır. Çözülmesi zor ve uzun zaman alan karmaşık problemlere eşdeğer fakat daha basit ve daha kolay hale dönüştürülmüş problemlerin çözümüne gidilmesi sonlu elemanlar yönteminin temel fikrini oluşturur. Bu temel fikirden de anlaşılacağı gibi sonlu elemanlar yöntemiyle tam sonuç değil de tam sonuca çok yakın olan yaklaşık sonuçlar elde edilir. İlk zamanlar sonlu elemanlar yönteminin güvenilirliği test edilmiş ve gerçek sonuçlarla sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan yaklaşık sonuçların karşılaştırılmasına gidilmiştir. Bu çalışmalardan biride 1984 yılında Goldak tarafından yapılmıştır. Goldak çalışmasında kaynak mühendislerinin kaynak bölgesi hakkındaki bilgilerini basit bir yöntemle göstermek istemiş, ancak bu çalışma basit bir problemde daha uzun ve günümüzdeki birçok yöntem ve deneysel verilerin regresyon analizinden daha güvenilir sonuçlar vermiştir [6]. Bu gibi çalışmaların sonuçları sonlu elemanlar yönteminin anlaşılmasında, geliştirilmesinde büyük katkı sağlamıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi üç temel kısımdan oluşur. İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan ve çözümlenmesi uzun zaman alan bölge sonlu elemanlar diye adlandırdığımız geometrik olarak basit olan alt bölgelere ayrılır. İkincisi kısımda her elemandaki, sürekli ve bölgesel fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer birleşimi olarak tanımlanabileceği kabul edilmektedir. Üçüncü kısım ise, istenen değerlerin her eleman için sürekli olan ve tanımlanmış tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları şekil 3.1) değerleri elde edilerek problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Sürekli bir ortamda bulunan alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, titreşim, ısı transferi vs.) sonsuz sayıda değere sahip olabilmektedir. Eğer sürekli ortamın farklı bir bölgesinde aynı sürekli ortam özelliklerine sahip olduğu biliniyorsa,

bu ikinci bölgedeki alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıdaki bir bilinmeyenli denklemlerle tanımlayabiliriz. Bilinmeyen sayısının az veya çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer veya yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgelerinde kendisi ile aynı özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelerin her birine ait olan denklemler takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklemler takımı elde edilmiş olur [44].

Sonlu elemanlar yöntemindeki gelişmeler bu yöntemi çeşitli bilimsel ve mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan çok popüler bir yöntem haline getirmiştir. Bilgisayar kapasitelerindeki gelişmelerle birlikte sonlu elemanlar metodunun çok farklı varyasyonları geliştirilmiştir. Bunlardan bazılarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

- a) Ritz metodu,
- b) Galerkin metodu,
- c) Pseudo-Varyasyonel metodu,
- d) Enerji fonksiyonunun minimizasyonunu temel alan metodu [46]

3.2. Sonlu elemanlar yönteminin tarihi gelişimi

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili ilk olarak 1941-1943 yıllarında alman bilim adamları tarafından yarı analitik bir analiz yöntemi olarak kullanılmıştır. Daha sonra İngiliz bilim adamları 1960 yılında virtüel iş prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmişlerdir. "Sonlu Elemanlar" terimi ilk defa 1960'lı yıllarda Clough'nin yapmış olduğu bir çalışmada dillendirilmiştir. İki boyutlu teoriden sonra yöntem kısa sürede üç boyutlu problemlere de uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminde doğrusal olmayan geometrik problem çözümü ilk olarak 1960 yılında Tunner ve arkadaşları tarafından geliştirildi. Sonlu elemanlar yönteminde ilk düzgün analiz ise 1965 yılında Martin tarafından tartışılmıştır. 1966 – 1969 yılları arasında sonlu elemanlar yöntemi statik problemlerle birlikte dinamik problemlerde de kullanılmaya başlandı.

Zienkiewicz ilk olarak sonlu elemanlar yöntemini yapı alanı dışındaki problemlerin çözümünde 1960 yılında kullanmış ve Sonlu elemanlar yöntemi ile Poisson denklemini çözmüştür. Sonlu elemanlar metodu gittikçe geliştirilerek ısı transferi, yeraltı sularının akışı, manyetik alan, elektro manyetik alan ve diğer birçok alana uygulanmaktadır.

Genel amaçlı kullanılan sonlu elemanlar yöntemine ait paket programları ilk olarak 1970'li yıllarda ortaya çıkmıştır. Paket programlar küçük çapta bilgisayarlarda kullanılmaya başlanması ise 1980'li yılların sonlarına doğru olmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ve uygulamalarıyla ilgili olarak 1990'lı yıllarının ortaları itibarıyla yaklaşık olarak 40,000 makale ve kitap yayınlanmıştır [47].

3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Esasları

Yukarıda tarihi gelişimini gözlemlediğimiz sonlu elemanlar yöntemi, günümüz bilgisayar teknolojisinin sunmuş olduğu imkânlar doğrultusunda, karşılaşılan karmaşık hatta çözümü imkânsız olan problemlerin çok daha kolay ve çok daha kısa sürede çözümünü sunan bir sayısal çözüm yöntemidir.

3.3.1. Sonlu elemanların uygulandığı problem tipleri

Birçok mühendislik alanında uygulanabilen sonlu elemanlar yönteminin bilgisayarlar ile geliştirilmesi ve zamanla geliştirilmesi yöntemin araştırma mühendisleri tarafından benimsenmesine yol açmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin ilk ve en kapsamlı uygulama alanı gerilme analizidir. Sonlu elemanlar yönteminin gerilme analizlerine uygulanmasında üç yaklaşım mevcuttur;

1. Yer değişim yöntemi
2. Kuvvet yöntemi
3. Karma yöntemi

Bunların birincisinde yer değişimleri ve deformasyonlar; ikincisinde kuvvetler ve gerilmeler; üçüncüsünde de bazı kuvvet ve yer değişimleri bilinmeyenler veya serbest değişkenler olarak ele alınmaktadır [50].

İlerleyen teknolojik gelişmelerle beraber sonlu elemanlar yöntemi sadece mühendislik değil çok çeşitli alanlarda ve çok daha yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi aşağıda belirtilen problem tiplerinin çözümünde sıkça kullanılmaktadır:

- a) Denge problemleri; Bu tip problemlerde sistemin durumu zamanla değişmediğinden sabit (kararlı) hal problemleri olarak ta anılmaktadır. Makine ve inşaat yapılarının gerilme analizleri, katılarda ve sıvılarda karalı sıcaklık dağılımları, sürekli akış problemleri bu tip problemlere örnek olarak gösterilebilir [45].
- b) Özdeğer problemleri; Denge ve özdeğer problemler aslında bir sınır değer problemleridir. Bu yüzden özdeğer problemlere denge problemlerinin bir uzantısı denebilir. Özdeğer problemlerde farklı olarak bazı özel ve kritik değerler tayin edilmelidir. Yapıların kararlılığı, öz titreşimleri, lineer visko-elastik, burkulma, sönümlenme, göl ve limanlarda dalgaların serbest titreşimleri, katı ve esnek kaplarda akışkanların çalkalanması gibi problemler bu tip problemlere örnek olarak gösterilebilir [45].
- c) Yayılma Problemleri; Başlangıç değer problemleri olarak ta adlandırılan yayılma problemleri, zamana bağlı olan problemlerdir. Sistemin ardışık durumları başlangıç artlarına bağlı olarak belirlenir. Katılarda ve sıvılarda ısı transferi, kararlı olmayan akışlar, yapıların darbelere karşı davranışı, visko-elastik problemler bu tip problemlere örnek olarak gösterilebilir [45].

3.3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Yaklaşımlar

Sonlu elemanlar yönteminin çalışma prensibi, sistemi oluşturan bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemleri belirleyip daha sonra sistemi oluşturan tüm elemanların

denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir. Bir elemana ait denklemlerin oluşturulmasında birbirinden farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar içinde en yaygın kullanılan dört temel yöntemi aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [44].

1. Direkt yaklaşım; Bu yaklaşım daha çok tek boyutlu elemanların kullanıldığı ve basit problemler için uygundur.
2. Varyasyonel yaklaşım; Sistemdeki bir fonksiyonelin maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisimlerin mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller Reissner prensibi, potansiyel enerji prensibi ve komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğı noktada fonksiyonu maksimum ve minimum eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değerin maksimum veya minimum olduğı anlaşılır.
3. Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı; Elde edilen bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında bulunan yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların tespit edilip bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak elde edilen sonucu minimize etme işlemine "ağırlıklı kalanlar yaklaşımı" denir. Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonellerin elde edilemediğı problemlerde uygulanabilir olmasıdır.
4. Enerji dengesi yaklaşımı; Enerjinin eşitliğı ilkesine dayanır. Bu yaklaşım Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitlidir. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç gerektirmez.

Sonlu elemanlar yöntemi için kullanılan her hangi bir yaklaşım sonlu elemanlar yönteminde problem çözümü işleminde izlenecek yolu değiştirmez. Sonlu elemanlar yönteminde çözüm adımlarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür;

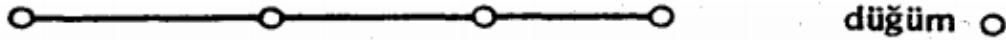
- Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,

- Eleman direngenlik matrisinin teşkili,
- Sistem direngenlik matrisinin hesaplanması,
- Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sistem denklemlerinin çözümü [51].

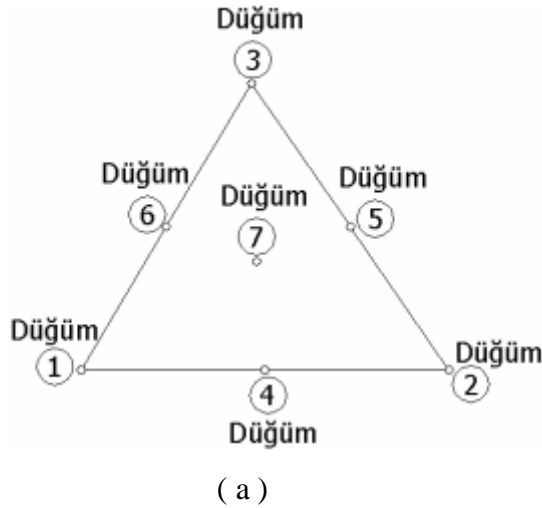
3.3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Eleman Tipleri

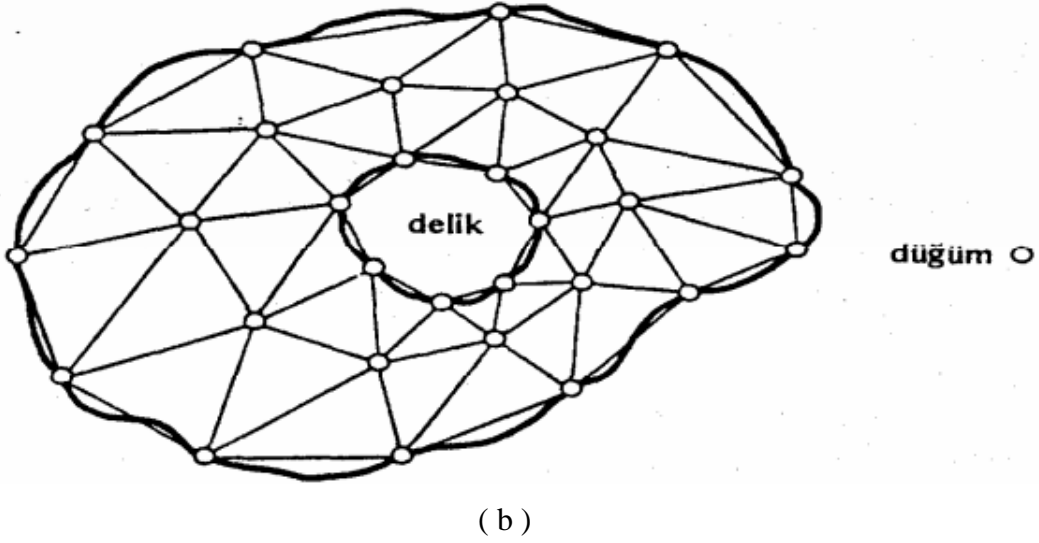
Analizi yapılacak her parça için aynı eleman tipi kullanılmaz. Parçanın şekline ve analiz yapılacak bölgeye eleman tipi belirlenmelidir. Doğru sonuçların alınmasında eleman seçiminin etkisi göz ardı edilmemelidir. Yapılacak analize göre sonlu elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilirler.

Problem çözümünde ortam geometrisi, malzeme özellikleri, eğer varsa yükler ve yer değişimleri bir bağımsız uzay koordinatı ile ifade edilebiliyorsa şekil 3.1'de görüldüğü gibi bir boyutlu sonlu elemanlar tercih edilir.



Şekil 3.12 Üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim [45]

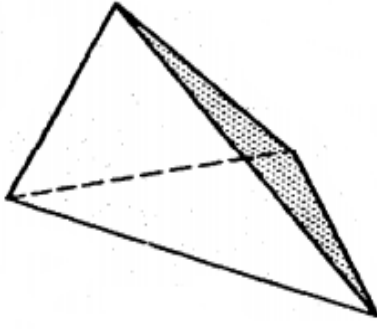




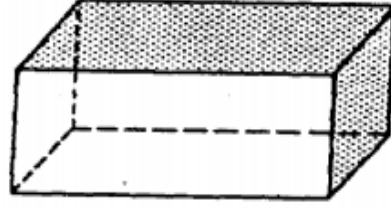
Şekil 13.2. (a) iki boyutlu üçgen tipi sonlu eleman (b) Üçgen elemanlar sistemine dönüştürülmüş iki boyutlu delikli bir cisim [45]

Bazı durumlarda bir ve iki boyutlu olarak yapılan çözümler gereken düzeyde doğru sonuçlar verebildiğinden üç boyuta göre tercih edilebilir. Fakat mühendislik problemleri genelde üç boyutludur. Matrislerin büyüklüğünün arttığı ve hesap yöntemin zorlaştığı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle problem çözümü ABAQUS, ANSYS gibi geliştirilen paket programlarla yapılabildiği gibi fortran ve C gibi programlama dilleri ile programlar yazılarak ta yöntemi kolayca uygulamak mümkündür.

Genelde problemin yapısına göre bir ve iki boyutlu olarak yapılan çözümlere nazaran üç boyutlu yapılan çözümler gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi çözüm bölgesini sonlu elemanlara böldüğü için gerçek çözüme her zaman bir yakınsama söz konusudur. Bölüntü miktarı ve oluşan hata arasında bir ilişki vardır. Kritik bir eleman sayısından sonra bölüntü sayısını artırmak çözümde elde edilen hataya fazla katkı sağlamaz bu kritik eleman sayısına kadar bölüntülemeyi artırmak her zaman daha az hatalı gerçeğe yakın sonuçlar verir. Üç boyutlu problem çözümünde kullanılan eleman tipleri aşağıdaki gibi dörtyüzlü ve altı yüzlü şekillerden oluşurken düğüm sayılarına ve formülasyonlarına göre global matrise katkıları değişir.



(a)



(b)

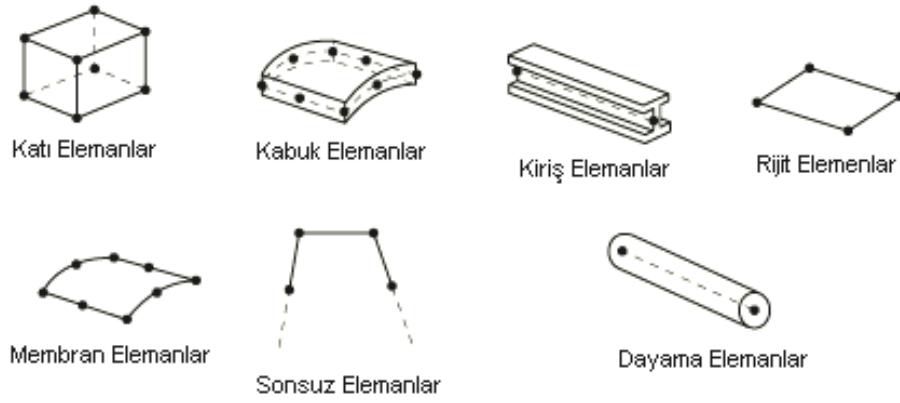
Şekil 14. üç boyutlu elemanlar (a) dörtyüzlü ve (b) dikdörtgen prizma [49]

3.3.4. Sonlu Elemanlar Yönteminde Eleman Seçimi

Sonlu elemanlar ile katı modelleme yapılırken, modeli oluşturacak elemanların şekli ve düğüm sayısı gibi özelliklerin önceden belirlenmesi gerekir. Çünkü sistemin sonlu elemanlara bölünmesi, analizin doğruluğuna en fazla etki eden faktörlerden biri olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle daha doğru sonuçlar elde etmek için doğru bölüntülemeye ve doğru eleman seçimine dikkat etmek gerekir. Örneğin, gerilme analizinde modelin bir bölgesindeki gerilme durumunu en iyi yansıtan eleman tipi o bölge için seçilirken, ısı transferinin gözlenmesi istenen durumda da bu probleme en uygun olan eleman seçilmelidir. Aşağıda sonlu elemanlar yönteminde kullanılan bazı eleman tipleri ve bunların hangi mühendislik uygulamalarında kullanılması gerektiği ile ilgili bilgi verilmektedir [44].

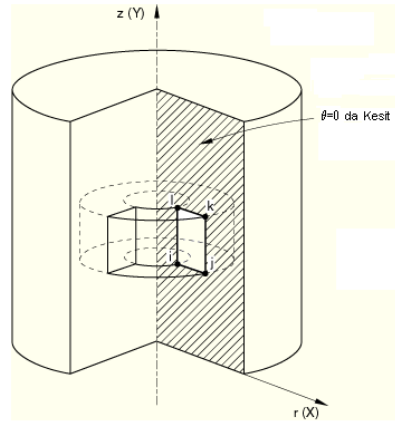
3.3.4.1. Tek boyutlu elemanlar; Tek boyutla ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

3.3.4.2. İki boyutlu elemanlar; Düzlemsel problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümü olan üçgen eleman çeşididir. Üçgen elemanların altı, dokuz ve daha fazla düğümü olan çeşitleri de mevcuttur. Üçgen elemanlar eğrilikler dışında bütün bölgeyi kapsarlar. Üçgen elemanlar, çözüm bölgesini iyi bir şekilde temsil etmeleri bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. Şekil 3.2a'da iki boyutlu bir üçgen eleman görülmektedir.



Şekil 15. SEY’de kullanılan bazı eleman çeşitleri [66]

3.3.4.3. Dönel elemanlar; Eksenel simetrik özelliği gösteren modellerin çözümünde dönel elemanlar tercih edilir. Simetri eksenini etrafında bir veya iki boyutlu elemanların bir tam dönme yapmasıyla dönel elemanlar oluşur. Dönel elemanlar, gerçekte üç boyutludurlar. Eksenel simetrik problemlerin çözümünde tercih edilen eleman tipidir.



Şekil 16. Eksenel simetrik parça ve sonlu elemanı [66]

Yukarıdaki şekilde görülen eksenel simetrik olan kalın cidarlı kovandan Şekil 3.5 parçacığını elde ederiz.

3.3.4.4. Üç boyutlu eleman; Mühendislik problemlerinin büyük çoğunluğu üç boyutludur. Bir ve iki boyutlu olarak yapılan çözümler yeterli doğrulukta sonuçlar verdiğinden gerekmedikçe üç boyutlu çözüm kullanılmaz. Çünkü üç boyutlu çözüm hesap yönünden zorlaştığı gibi zaman olarak ta uzun zaman alır. Bu grubun temel

elemanı üç boyutlu olan üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir. Şekil 3.3'de üç boyutlu elemanlar görülmektedir. Şekil 3.3 ve 3.6 'te ise üç Boyutlu solu elemanlar ve değişik düğüm sayıları ile çeşitleri görülmektedir.



Şekil 17. Boyutlu elemanlar ve düğüm sayıları [66]

3.3.5. Sonlu Elemanlar Yönteminde Yapılabilecek Hatalar

Sonlu elemanlar Yöntemi kullanıcılara mühendislik problemleri çözmek için yaklaşık bir yöntem sunmaktadır. Bir problemin sonlu elemanlar yöntemiyle çözülmesi ile analitik yöntemle çözümlenmesi arasında ortalama % 3 hata payı olacağı bilinmelidir [44]. Yani hata kaçınılmazdır. Fakat bu hatayı küçültmek veya artırmak yöntemi kullana kişileri seçimlerine bağlıdır. Muhtemel oluşacak hatalar aşağıdaki sıralanabilmektedir. Bunlar;

- Prensip hataları
- Geometrik hatalar
- Malzemeye özgü hatalar
- Sınır şartlarına özgü hatalar

3.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları

Genel amaçlı kullanılan birçok sayısal yöntem olmasına rağmen sonlu elemanlar yönteminin tercih edilmesinin birçok sebebi vardır. Sonlu elemanlar yöntemini diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurları şöyle sıralayabiliriz;

- Sonlu elemanlar yönteminde elemanların boyutları ve şekillerinin esnekliği nedeniyle, verilen bir cisim temsil edebilir, hatta karmaşık şekilli bir cisimde daha güvenilir sonuçlar verir.
- Çok karmaşık bölgeler (yani bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri fazla olan bölgeler istendiğinde zorluk çekilmeksizin incelenebilir.
- Sınır şartları kolayca belirlenebilir.
- Farklı malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler için ek bir zorluk göstermez. Geometri ile malzeme doğrusalsızlıkları, zamana bağlı malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Sonlu elemanlar yönteminin çok yönlülük ve esneklik özelliği karmaşık yapılarda, sürekli ortam, alan ve diğer problemlerde sebep-sonuç ilişkilerini hesaplamak için çok etkin bir yöntem olarak kullanılabilir. Analitik ve deneysel metotlardan daha hassas sonuç verir.
- Sebep sonuç bağıntılarına ait olan problemler tümel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanarak genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar yönteminin bu özelliği problemin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- Karmaşık geometrilere rahatlıkla uygulanabilir. (Analizler, parça büyüklüğü ve bilgisayar imkânlarıyla sınırlıdır.)
- Uygulama için herhangi bir tecrübeye ihtiyaç yoktur. Fakat daha önceden elde edilen bilgiler işleme aktarılabilir, test ve deney sonuçları kullanılabilir.
- Simülasyon ile parça imalatında ortaya çıkabilecek muhtemel hatalar en aza indirilmiş olur.
- Üretilmek istenen parçaya göre optimizasyon stratejisi geliştirilebilir. Elde edilen analiz sonuçları tasarım aşamasında parçaya uygulanabilir [48].

3.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları

- Günümüz şartlarında sonlu elemanlar yöntemi, bazı karmaşık olayların uygulanmasında zorluklar yaşamaktadır. Örneğin; temas problemleri, çatlama, kırılma davranışı, yumuşayan doğrusal olmayan malzeme davranışı örnek olarak verilebilir.

- Sonlu elemanlar yöntemi ancak malzeme parametreleri iyi tanımlanmışsa gerçekçi sonuçlar verir.
- Bu yöntemin uygulanması genellikle büyük bilgisayar belleğine ve zaman gereksinim duyar.
- Yapılan çözümlene işleminde doğru sonuç elde edebilmek için sürekli ortamın çok sayıda elemana bölünmesi ve çok sayıda ki giriş bilgileri hatasız olmalıdır. Programın verileri çok iyi kontrol edilmelidir. Bu bölümdeki bir hata doğru sonuca ulaşmamızı engeller.
- Diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi, sonlu elemanlar yönteminde alınan sonuçlar dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır [44].

BÖLÜM 4. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE ARTIK GERİLMER VE ÇARPILMA

4.1. Giriş

Tüm kaynak yöntemlerinde karşılaşılan en önemli sorun artık gerilmeler ve bu gerilmeler sonucu oluşan çarpılmalar. Aynı malzeme ve aynı konstrüksiyon halinde bile özgül ısı girdisi ve kaynak bölgesinin genişliğine bağlı olarak çarpılma miktarları değişir. Esasen çarpılmaların; yapının rijitlik derecesi, kütlesi, malzemenin akma sınırı, elastiklik modülü, ısıl genleşme katsayısı, ısı iletim katsayısı, ergime sıcaklığı, özgül ısı girdisi, kaynak bölgesinin boyutları, konstrüksiyon ile kaynak bölgesi arasındaki sıcaklık farkı gibi büyük bir çoğunluğu sıcaklığın fonksiyonu olarak değişen çok çeşitli faktörlerin etkisinden oluşur [53].

4.2. Kaynaklı Birleştirmelerde Artık Gerilmeler

Bir kaynaklı parçada tüm dış yükler kaldırıldıktan sonra kalan gerilmelere artık gerilmeler adı verilir. Literatürlerde artık gerilmeleri tanımlamak için farklı teknik terimler kullanılmıştır. Bunlar iç gerilmeler, başlangıç gerilmeleri, reaksiyon gerilmeleri, hapsolmuş gerilmeler ve doğal gerilmeler olarak adlandırılabilir. Üniform olmayan sıcaklık değişimine maruz kalan bir yapıdan meydana gelen gerilmelere ısıl gerilmeler denmektedir [54]

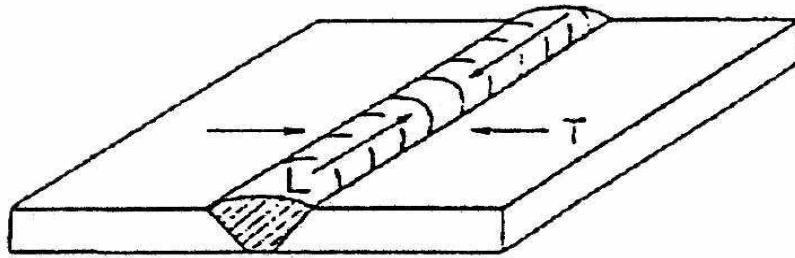
Kaynak işleminde malzemeler bölgesel olarak ergime sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Ancak soğuma işlemi, ısıtma işlemine nazaran daha yavaş gerçekleşir. Isıtma ve soğuma işlemleri arasındaki bu farklılıklar neticesinde kaynak ile birleştirilen malzemelerde artık gerilmeler ve çarpılmalar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

4.3. Artık Gerilmelerin Oluşum Nedenleri ve Çarpılma

Kaynak işlemi ile lokal olarak ergime sıcaklığına kadar ısıtılan kaynaklı parçalarda, soğuma işlemi parça genelinde ve ısınma işlemi hızına nazaran daha yavaş meydana gelir. Bu sebepten dolayı, soğuma işlemi esnasında kaynaklı parçadaki sıcaklık dağılımı üniform değildir ve bağlantı boyunca artık gerilmeler oluşur bunun sonucunda da malzemede yapısal ve metalürjik değişiklikler meydana gelir [54].

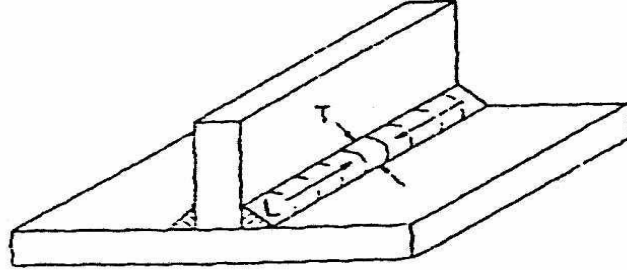
Soğuma işleminin başlamasıyla, kaynak metali ve kaynak metaline bitişik ısının etkisi altındaki bölgenin sıcaklıkları, esas metalin sıcaklığından çok daha yüksektir. Kaynak dikişi katılaşır, büzülürken, kendisini çevreleyen esas metal, ısı etkisi altındaki bölgeye gerilme uygular. Kaynak metali, katılaşmanın başlangıcında sıcaktır ve mekanik özellikleri esas metale nazaran daha zayıftır. Bu sebeple uyguladığı gerilmenin değeri düşüktür. Kaynak bölgesinin sıcaklık değeri ortam sıcaklığına ulaşana dek uygulanan gerilme değeri artar ve esas metal ile ısının etkisi altındaki bölgenin akma dayanımına ulaşır [54].

Kaynak işlemi esnasında, yeni katılaşan bölgeler, kaynak dikişinin diğer bölgelerinin büzülmesine karşı koyarlar. Şekil 4.1' de gösterildiği gibi, ilk kaynak yapılan bölgeler kaynak dikişi doğrultusunda çekiye zorlanırlar. Alın birleştirmelerde, kaynak ağız formundan ya da mevcut pasoların sınırlayıcı etkisinden dolayı kaynak bölgesinin enine hareketi yok denecek kadar azdır. Kaynak dikişindeki büzülmenin neticesinde Şekil 4.1' de görülen enine artık gerilmeler meydana gelecektir [54]



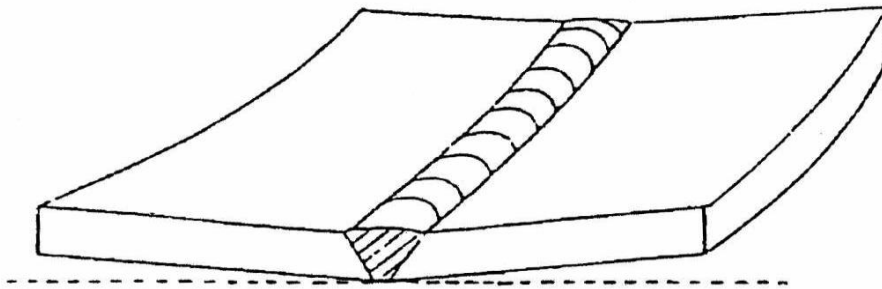
Şekil 4.18 Bir alın dikişindeki enine (T) ve boyuna (L) büzülme gerilmeleri [26]

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



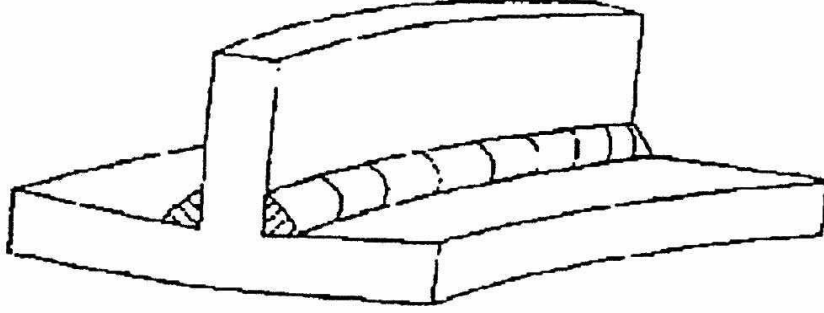
Şekil 19 Bir T bağlantısındaki enine ve boylamasına büzülme gerilmeleri [26]

Kaynak işlemi neticesinde kaynaklı parçalarda meydana gelen artık gerilmeler, ya çarpılmaya yol açarlar ya parçada erken hasara sebep olurlar ya da her ikisine de neden olmadan sadece iç gerilme olarak kalabilirler. Bu etkiler ayrı ayrı gerçekleşebileceği gibi aynı anda da parçada gerçekleşebilir. Kaynak işlemi neticesinde ısınan kaynak bölgesi üniform olmayan büzülme davranışı gösterir, çünkü kaynak dikişinin enine kesitindeki büzülme, bu enine kesite eksantrik kuvvetler uygular ve böylece büzülme miktarları eşit olmaz. Sonuç olarak çarpılma meydana gelir. Kaynaklı parçalar gerilmeler neticesinde elastik olarak Şekil değiştirir ve parçada gözle görülebilecek oranda çarpılmalar meydana gelir. Alın birleştirmelerde, kaynak dikişinin üst bölgesi, kök bölgesine nazaran daha fazla büzülür. Bu sebeple bu tip kaynaklı birleştirmelerde uzunlamasına, enine çarpılmalara ek olarak açısallık çarpılma da meydana gelebilir. Açısallık çarpılmalar, kaynak dikişi boyunca levhada enine egilmelere neden olur. Bu etkiler Şekil 4.3' te gösterilmiştir. [54]



Şekil 20 Bir alın kaynaklı birleştirmede çarpılma [26]

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



Şekil 21 Bir T bağlantıdaki çarpılma [26]

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

Kaynaklı parçada meydana gelen artık gerilme ve çarpılmalar, malzemelerin kırılma davranışını etkiler. Düşük değerlerdeki harici gerilmelerde dahi burkulma ve gevrek kırılma meydana gelir. Parçada artık gerilme ve çarpılmaların birlikte olması halinde, burkulma beklenenden çok daha düşük bazı zorlamaları da meydana getirir. Çeki halinde ise, düşük tokluğa sahip kaynak bölgelerinde artık gerilmeler yüksek lokal gerilmelere sebep olur ve sonuç olarak düşük değerlerdeki gerilmeler tarafından iletilebilen gevrek tip çatlaklar oluşturulabilir. İlaveten artık gerilmeler yorulma ve korozyon hasarlarını da artırır. [54]

4.4. Kalıcı Gerilme Ölçüm Yöntemleri

Kalıcı gerilme ölçüm yöntemlerini üç grupta toplayabiliriz.

1. Mekanik metotlar;

a) Delik delme metodu

b) Halka delik delme metodu

c) Derin delik delme metodu

d) Kesit alma ve katman kaldırma metodu şeklinde sıralanmaktadır.

Bu metotlar tahribatlı ya da yarı tahribatlı olarak da anılır ve bunlar dikkat gerektiren işlemler yardımıyla (delik delerek, katmanlar kaldırarak) bileşenin geometrisinde oluşturulan değişime bağlıdır. Bu metotlarda gerilmedeki bileşke değişiklikler ölçülür ve ondan sonra orijinal gerilme üyeleri belirlenir.

2. Işınlardan kullanıldığı metotlar;

a) X- ışını metodu

b) Nötron difraksiyon metodu

şeklinde sıralanmaktadır.

İnce bir yüzey katmanındaki kalıcı gerilmeyi belirlemek için kullanılan X- ışınları tahribatsızdır. Kalıcı gerilmeleri ölçmek için numune yüzeyinin nötron bombardımanına maruz bırakıldığı, nötron kırınım metotları da bu gruba dahil edilebilir.

3. Diğer metotlar,

a) Manyetik metot

b) Ultrasonik metot

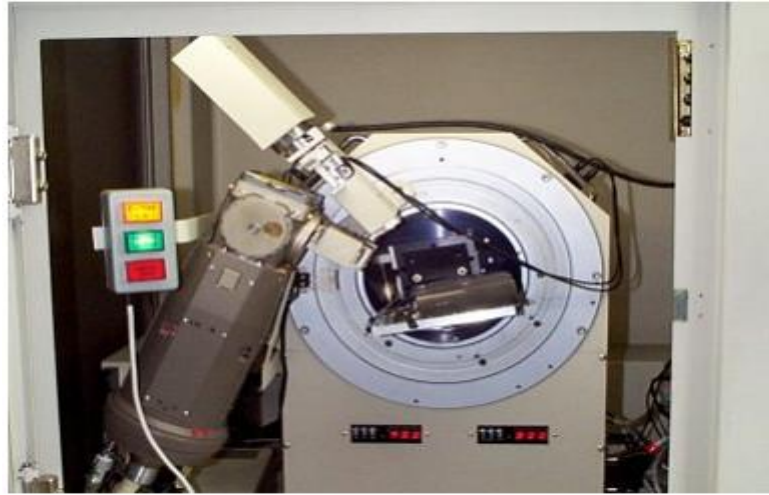
şeklinde sıralanmaktadır [53].

4.4.1. X-Ray Kırınım Yöntemi:

X-Ray Kırınım yöntemi ile artık gerilme ölçümü, tahribatsız ölçüm yöntemlerindedir ve günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Temel olarak artık gerilme ölçülecek olan malzemenin kristal yapısı içindeki atomik uzaklıkların ölçümüne dayalıdır. Yapıdaki atomik düzenin deformasyonu kafes eksenlerinin

uzaklıklarında değişikliğe yol açabilir. Oluşan yeni uzaklık her benzer yönlendirilmiş ekseninde uygulanan gerilme ve kristal yapısına bağlı olarak aynı olacak ve bu sebeple de küçük bir strain gauge olarak davranacaktır.

Ölçüm süresince artık gerilme ölçümü yapılacak parçaya X-Ray ışınları gönderilir ve bu ışınlar malzeme yüzeyine girerler. Kristal yapı bazı X-Ray ışınlarını bir detektöre göre X-Ray ışınlarının açısız olarak konumlarını saptamak için kırar ve bu açısız konumdaki bu ışınların yoğunluklarını kaydeder. Işın demetlerinin konumu gerilmenin saptanmasında yardımcı olur.



Şekil 22 X-Ray Cihazı

Temel olarak ölçüm süresince artık gerilme ölçümü yapılacak numune yüksek seviyede C-Ray ışınlarına Bragg kanunlarına göre aşağıdaki eşitliğe maruz kalır:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Burada **n** tamsayı, λ X-Ray'in dalga boyu, **d** eksenler arası uzaklık ve θ ise X-Ray ışın demetinin geliş açısıdır. Yukarıda da anlatıldığı gibi cihazda bulunan detektör numune etrafında dolaşarak kırınım yapan ışınları kaydeder. Kayıtlar sonrası genellikle en yüksek olarak 2θ açıda oluşan ışın bandı kullanılarak malzemedeki uzamalar, ilk hale kıyaslanarak ölçülebilir. Gerilmeleri saptamak için çok çeşitli ölçüm yöntemleri mevcuttur. Bunlar;

- İki kez maruz bırakma yöntemi

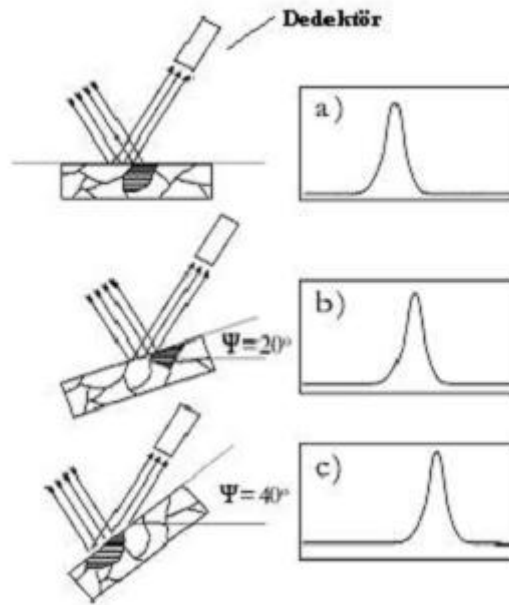
- Paralel Işın Demeti yöntemi
- $\text{Sin}^2 \psi$ yöntemi
- Kenar-eğimi yöntemi

Bunlar arasında en çok kullanılan yöntem $\text{Sin}^2 \psi$ yöntemidir.

$\text{Sin}^2 \psi$ yöntemi, çok kristale sahip malzemelerde artık gerilmelerin ölçümü için kesin bir yöntemdir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere ψ açısı ile dönen numune örnekteki gibi değişecektir. Bu değişimin büyüklüğü artık gerilmenin büyüklüğü ile ilgilidir. Eğer malzeme içersinde artık gerilme yoksa dönme de sıfır olacaktır. Artık gerilme ve ışınların dönmesi arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir:

$$\sigma = \frac{E}{(1+\nu) \sin^2 \Psi} \frac{(d_i - d_0)}{d_0}$$

Burada E Young modülü, ν Poisson oranı ve ψ dönme açısıdır. d_i ise her dönme açısında ölçülen boşluklardır. Eğer parçada mevcut hiçbir Kayma gerilmesi uzaması yoksa d boşlukları doğrusal olarak $\text{sin}^2 \psi$ açısı kadar değişecektir.



Şekil 23 ψ değerindeki değişim ile kırınımın dönmesi

X-Ray kırınım yönteminin diğer artık gerilme ölçüm yöntemleri arasında çok kullanılmasının sebeplerinin en önemlisi yöntemin tahribatsız olmasıdır. Bunun yanı sıra tahribatlı yöntemler ile karşılaştırma yapıldığında daha net sonuçlara ulaşmayı sağlar, ölçümler tekrarlanabilir. Tüm bunlara rağmen, yöntem temel olarak laboratuvar şartlarında yapılmaya uygundur ve uygulama deneyimli kişilerce yapılmalıdır. Ayrıca diğer artık gerilme ölçüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında, daha karmaşık, çok zaman harcanan, pahalı bir yöntem olduğu görülmektedir.

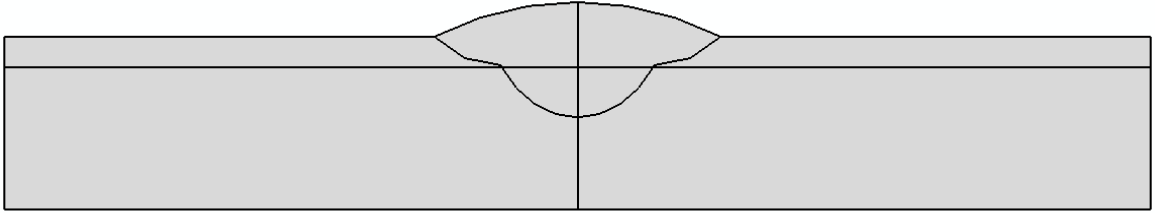
Senkrotron olarak bilinen yöntemde ise daha yoğun X-Ray ışınları kullanılır. Normal X-Ray yöntemine göre daha derinlere girebilir. Bu, 3 boyutlu olarak daha net sonuçlar vererek, milimetrik olarak uzamaların ölçülmesine olanak sağlar.

BÖLÜM 5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KAYNAK ANALİZİ

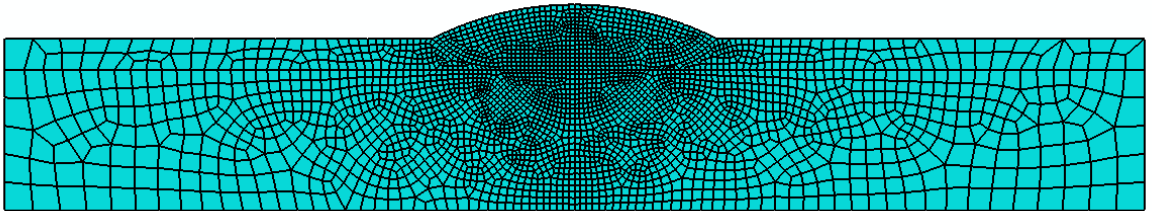
5.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları:

Yayılmış arka bağlı olarak dağıtılmış bir ısı akısı olarak modellenmiş ısı kaynağı deney sırasında gözlenmiştir. Deney önceden ayarlanmış besleme tabanlı olan otomatik SAW makinesi üzerinde yapılmıştır. Kaynak yapılacak iş bilinen bir hızda hareket eden makine yatağı üzerinde yerleştirilmiştir.

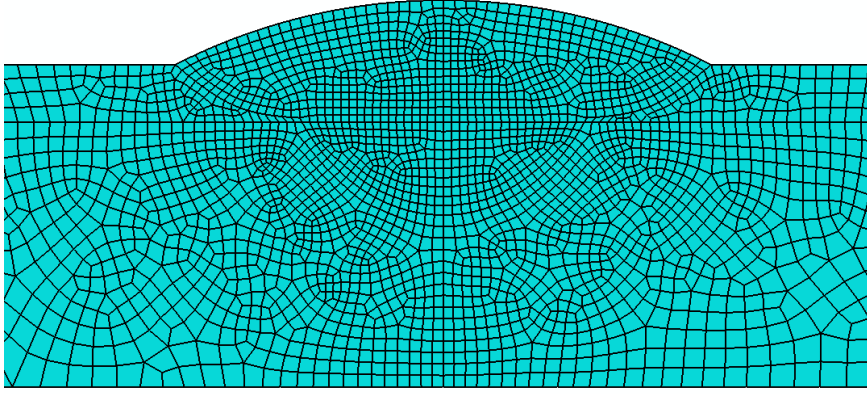
Maliyeti en aza indirmek amacıyla ilk analiz işlemi Şekil 5.2'de gösterildiği gibi kaynak yönüne normal yapılmıştır. Böylece, ısı akışı kaynak yönünde ihmal edilmiştir. Buradaki sadeleştirme arktan kaynak yönünde nispeten az ısı aktığı durumlarda doğrudur. Bu durum yay hızı yüksek olduğu durumlarda doğrudur. Kaynak parçasının şematik diyagramı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Dikiş Kaynağının Geometrik Modeli



Şekil 5.2 Sonlu Elemanlar bölüntüsü



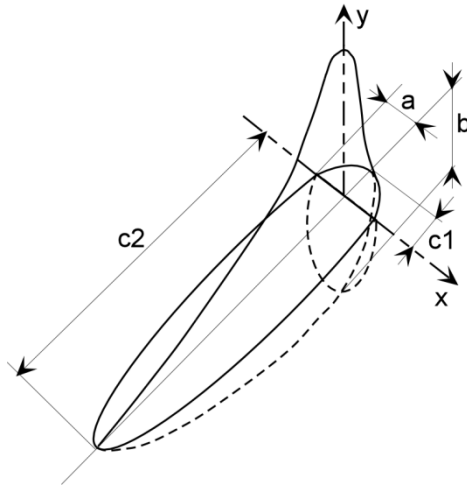
Şekil 5.3. Yakınlaşmış Sonlu Elemanlar bölüntüsü

Sonlu elemanlar metoduna uygulanan hareketli olarak verilen ısı yükü alınarak;

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} C_f \quad (5.1)$$

$$C_f = e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3(z+v(t-t_0))^2/c^2} \quad (5.2)$$

olarak gösterilir.



Şekil 5.4. Çift elipsel Goldak ısı akısı dağılım modeli

Aşağıdaki varsayımlar sonlu elemanlar analizi yaparken yapılmıştır.

1. Malzemenin yoğunluğu termal genişmeden etkilenmemiştir.
2. Doğrusal Newton taşınım soğutma kabul edilmiştir. Hiçbir zorlanmış konveksiyon kuvvet kabul edilmemiştir.
3. Taşımın soğutma kaynak bölgesi hariç tüm yüzeylerde kabul edilmiştir.
4. Isı kaynağı Goldak çiftine eliptik ısı kaynağı modeli kabul edilmiştir.
Diğer kayıpları hesaplamak için ark verimi ($\eta = 0.90$) olarak kabul edilmiştir

Tablo 5.1. Yumuşak Çelik Malzemesinin Termal Özellikleri

Temp. (K)	Thermal Cond. (W/mK)	Specific heat (J/kgK)	Enthapy (J/m ³)
273	51.9	450	1 x 10 ⁹
373	51.1	499.2	2 x 10 ⁹
573	46.1	565.5	2.65 x 10 ⁹
623	41.05	630.5	3.8 x 10 ⁹
823	37.5	705.5	4.1 x 10 ⁹
873	35.6	773.3	4.55 x 10 ⁹
993	30.64	1080.4	5 x 10 ⁹
1023	26	931	5.23 x 10 ⁹
1723	29.45	437.93	9 x 10 ⁹
1783	29.7	400	1.1 x 10 ¹⁰
1853	29.7	735.25	1.1 x 10 ¹⁰
5273	42.2	400	1.25 x 10 ¹⁰

Isı üretimi olmadan güçlü bir ısı iletimi için formüle edilen diferansiyel denklem aşağıdaki formül ile verilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.3)$$

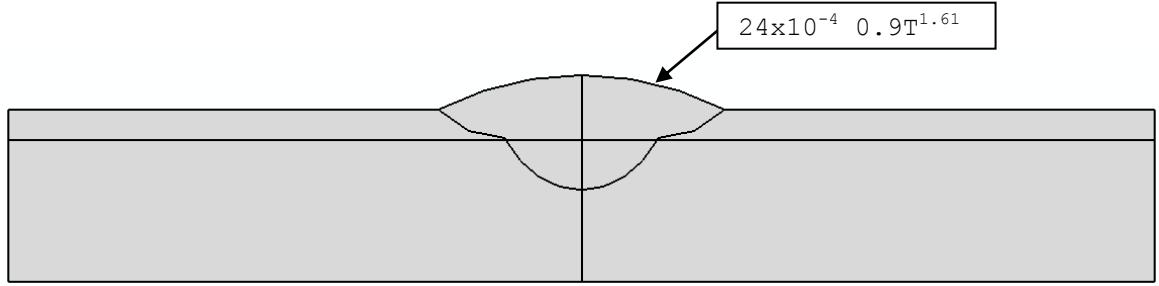
Sekiz düğümlü dördü elementler termal analizi için ve ısı kaynağı uygulamasında ABAQUS CAE 6.10 ile FE (demir) analizi için kullanılan Dflux alt programı için görevlendirilmiştir.

5.1.1. Sınır koşulu

İlk Sınır Koşulu: Kaynak için belirtilen ilk sıcaklık, numunenin tüm unsurlarını kapsar.

$t = 0$ olduğu durumlarda $T = T_{\infty}$ olarak gösterilir. Burada T_{∞} ortam sıcaklığı olarak ifade edilir.

İkinci ve üçüncü sınır koşullarını geliştirmek için, çalışma yüzeyindeki enerji dengesinin olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 5.5. Isıl Sınırı Şartları

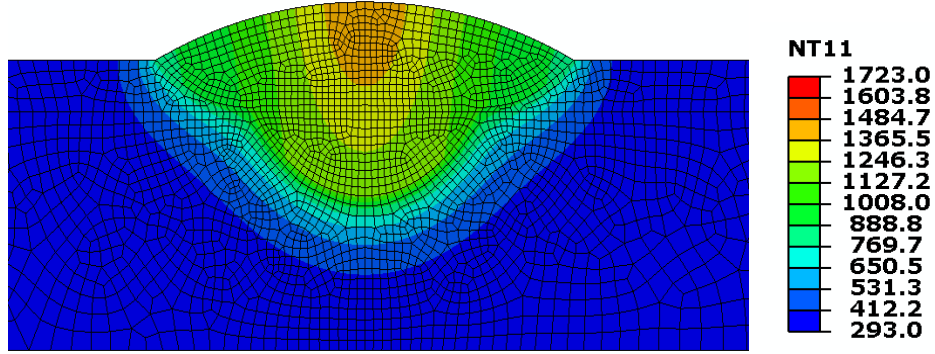
Kaynağı bölgesinin üst sınırı hem taşınım hem de ışıma tabi olduğu için Şekil 5.5'te görüldüğü gibi bir üstel fonksiyon ile ifade edilir [68]. Bu fonksiyon sınır şartı olarak tanımlanarak iteratif çözümde kalaylık sağlar toplam hesaplama zamanını kısaltır. Diğer sınırlar ise 40 W/mK taşınım tabi kabul edilir ve ortama uygun bir taşınım katsayısı kabulü ile modelleme içinde kullanılır.

Modelleme esnasında DFULX alt programı Goldak kaynak ısı modeli için, FILM alt programı ise kaynak bölgesi sınır şartı tanımlamasında kullanılmışlardır.

5.2. Isıl Sonuçlar

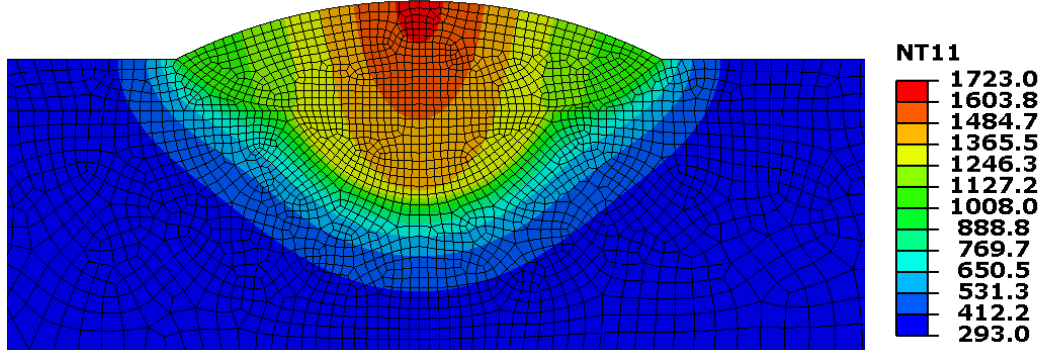
Kaynak simülasyonları 3 boyutlu olarak gerçeğe daha yakın sonuçlar verirler yalnız kaynak sadece ısı analizden ibaret değildir. Eleman sayısı arttıkça 3 boyuta simülasyon bilgisayara çok yük getirir. Eğer kaynak yeterince hızlı ise 2 boyutlu analizler 3 boyutla yaklaşık aynı sonuçları verir. 2 boyutlu analizde z ekseninde hareketlidir ve başlangıç anından itibaren referans kesite ısı etkisi sonlu elemanlar analizi ile incelenir. Godak ısı modelde z boyutu aynen kullanılır. Zamanın artması esnasında

hıza bağı olarak z ekseninde ilerleme sağlanır. Böylece kaynak elektrotu incelenen referans kesite yaklaştıkça sıcaklık dağılımı kaynak bölgesinde artış gösterir.



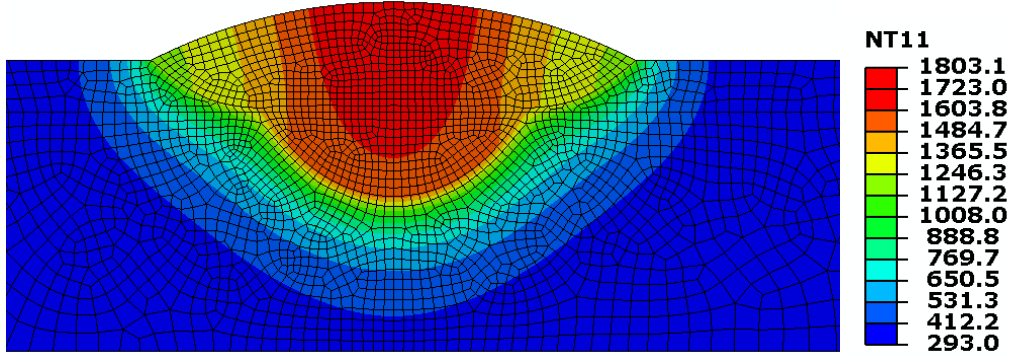
Şekil 5.6. Zamanın 0.9261 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

Şekil 5.6’da görüldüğü gibi 0.9261 sn’de modellemiş olduğumuz malzemede noktasal olarak belirlediğimiz noktada ısıl ilk sonuçlar görülmektedir. Modellemiş olduğumuz malzeme için 1723,0 °C’de malzemenin tamamen ergiyik durumda olduğu kabul edilmiştir.



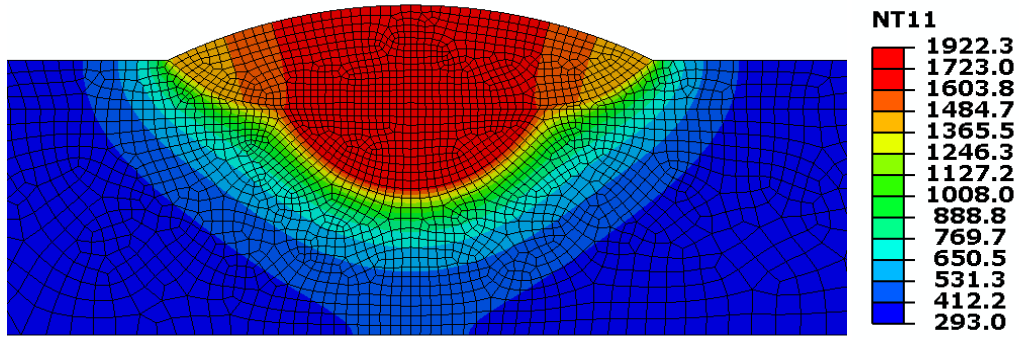
Şekil 5.7. Zamanın 1.141 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

Şekil 5.7’de kaynak torcunun iki boyuttaki ısıl analiz için belirlediğimiz noktaya biraz daha yaklaşmasıyla noktasal düzlemdeki ısıl sonuçlar görülmektedir.



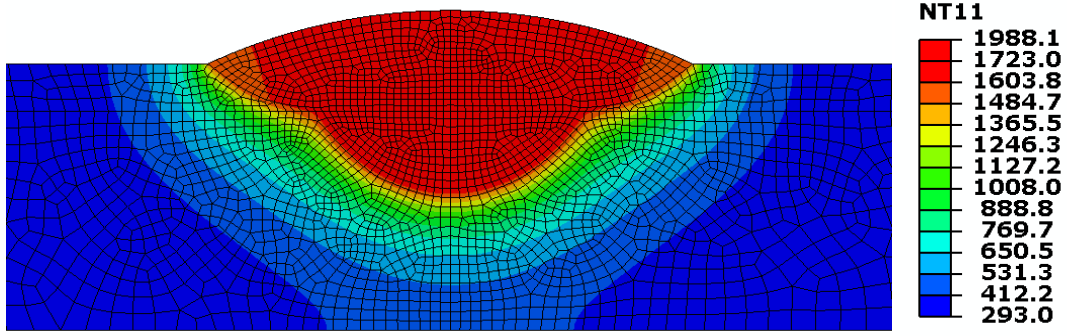
Şekil 5.8. Zamanın 1.381 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

Şekil 5.8’de kaynak torcunun 1.381 sn sonunda ölçüm yaptığımız noktasal düzlemdeki ısı sonuçlarına baktığımızda tepe noktasının sıcaklığının 1803,1 °C’ye çıktığı ve bu ısının daha da artacak olması gözlemlenmiştir.

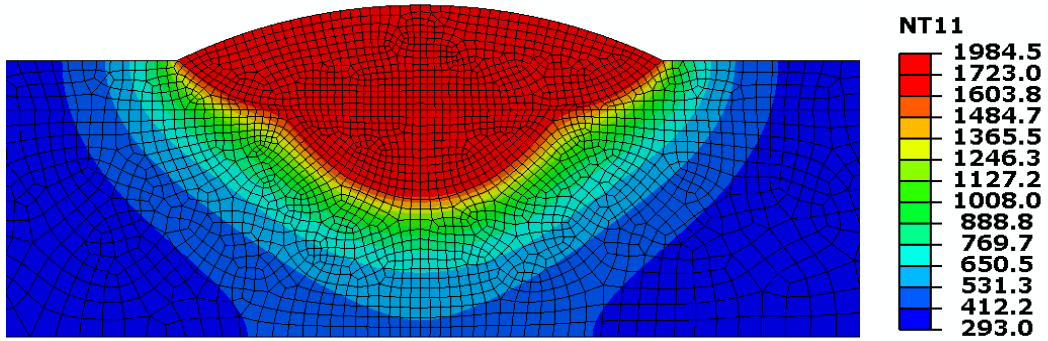


Şekil 5.9. Zamanın 1.621 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

Şekil 5.9’da kaynak torcunun belirttiğimiz noktaya 1.621 sn sonunda yaklaşması sonucu noktasal düzlemdeki ısının 1922,3 °C’ye çıktığı ve kaynak torcunun tam olarak noktasal düzlemimize ulaşmadığı ama kaynak bölgesindeki ısının malzememizin alt kısmına kadar ulaştığı gözlemlenebilir.

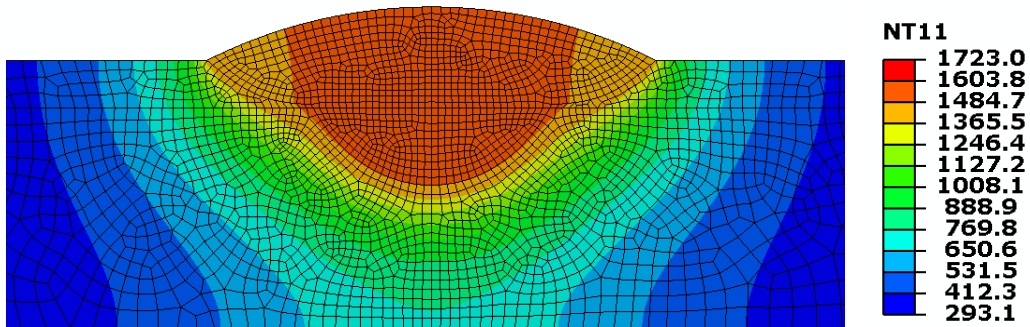


Şekil 5.10. Zamanın 1.907 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

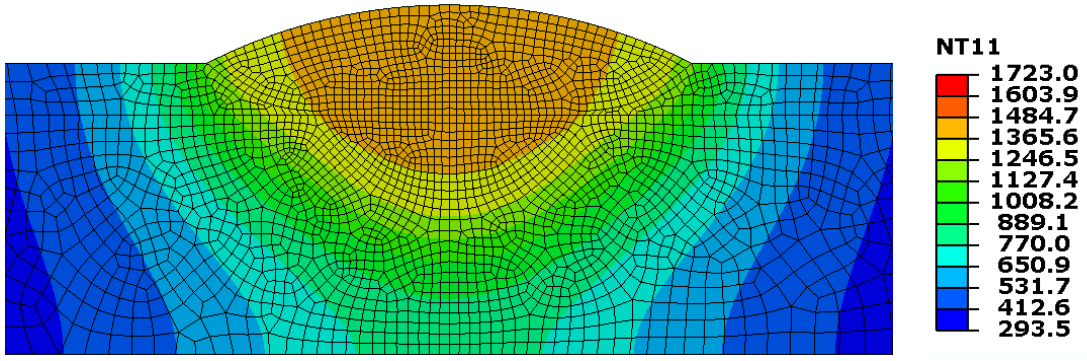


Şekil 5.11. Zamanın 2.339 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

Şekil 5.11’de kaynak bölgesi sıcaklığı tüm bölgede erime sıcaklığını üzerindedir ve istenilen yayılım sağlanmıştır. Bu yayılımın sağlanması için elektrotun referans kesit üzerine gelinceye kadar bitmesi koşulu ile kaynak bölgesindeki ısı iletim katsayısı yapay olarak artırılması rol oynamıştır. Şekil 5.12’de görüldüğü gibi elektrot referans bölgenin önüne geçmiş ve ısı dağılımı azalmaya başlamıştır.

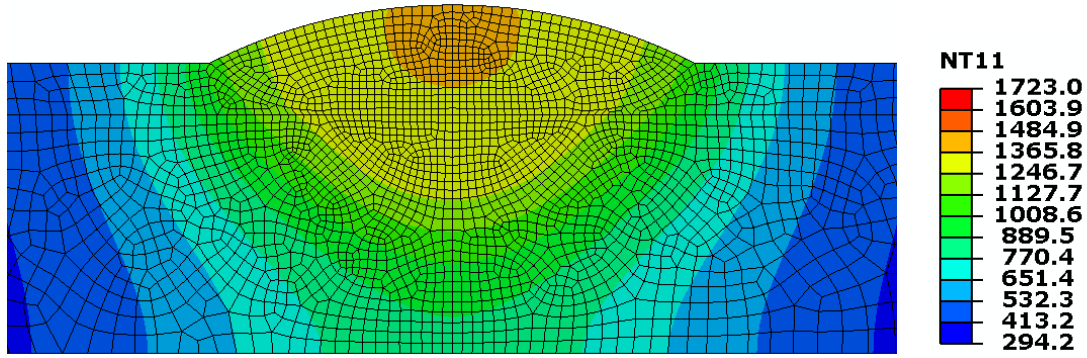


Şekil 5.12. Zamanın 4.229 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

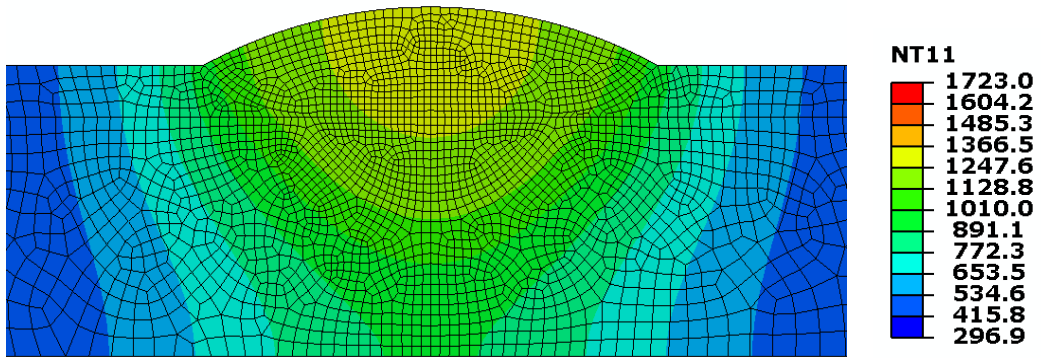


Şekil 5.13. Zamanın 5.152 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

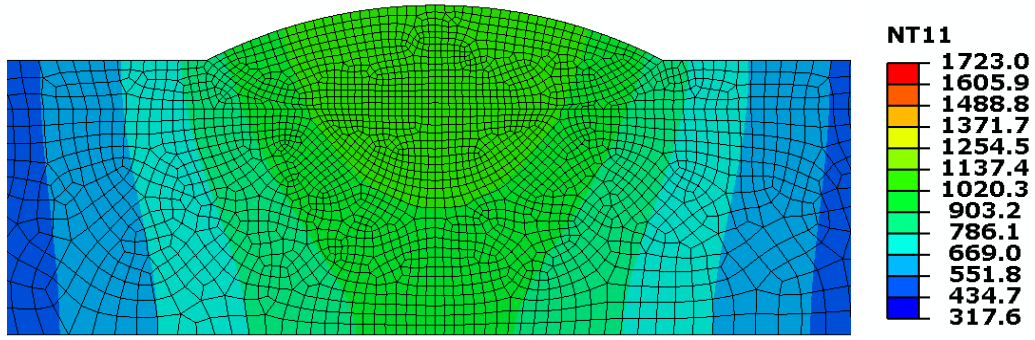
Şekil 5.13-21’de görüldüğü gibi zamanla soğumaya devam ettiği ve bırakılan malzemedeki sıcaklık dağılımının malzemenin iç kısımlarına doğru nüfuziyeti görülmektedir.



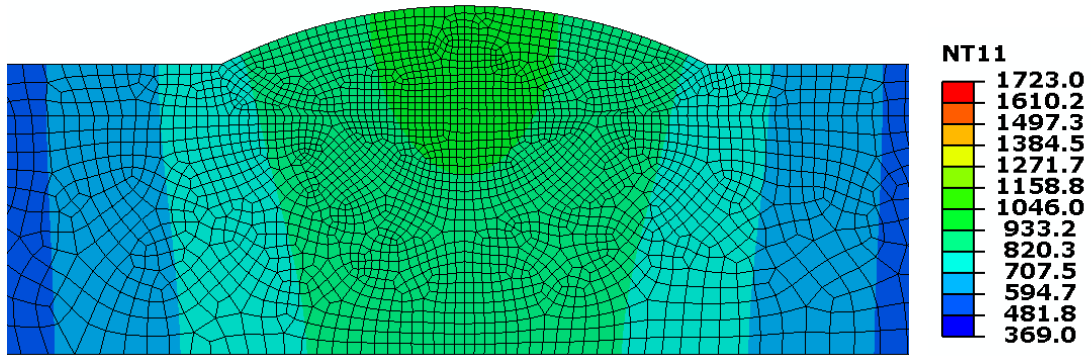
Şekil 5.14. Zamanın 6.022 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı



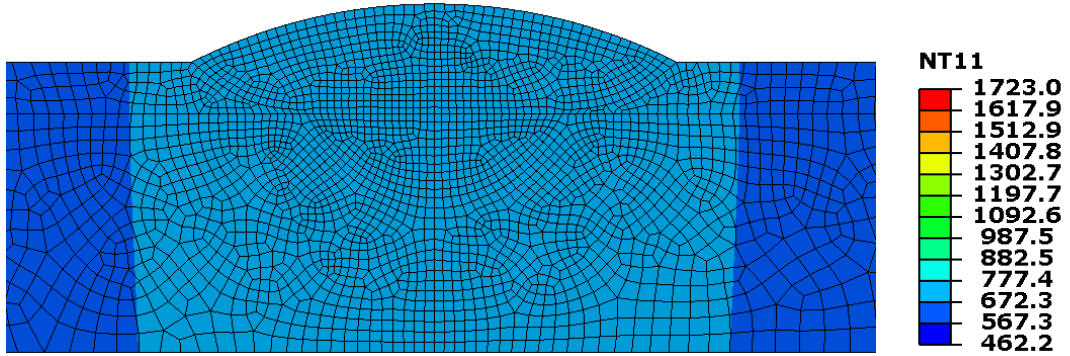
Şekil 5.15. Zamanın 7.568 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı



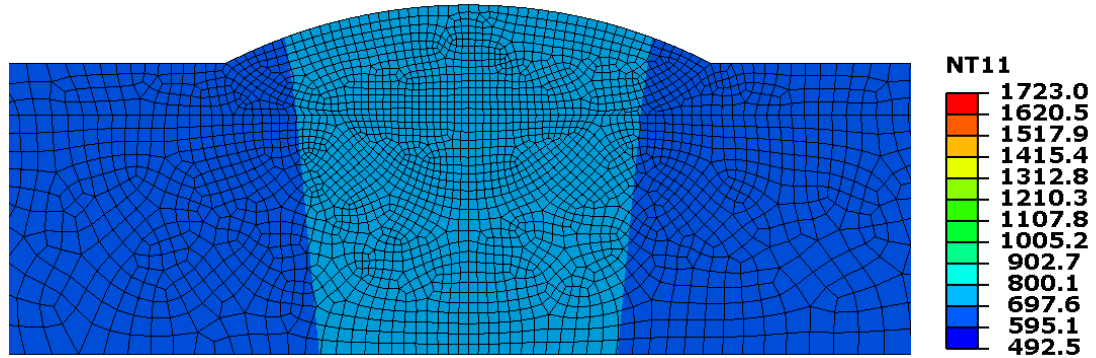
Şekil 5.16. Zamanın 12.44 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı



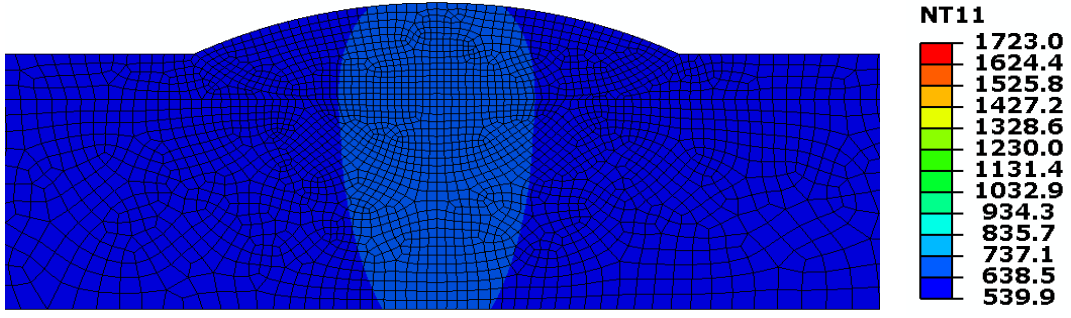
Şekil 5.17. Zamanın 20.78 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı



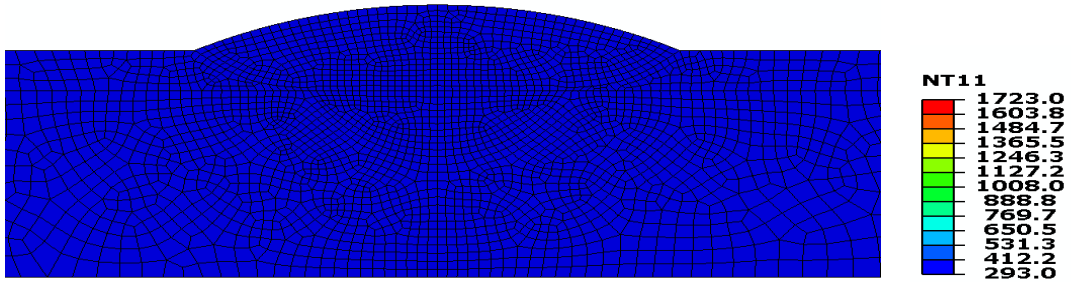
Şekil 5.18. Zamanın 39.24 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı



Şekil 5.19. Zamanın 48.30 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

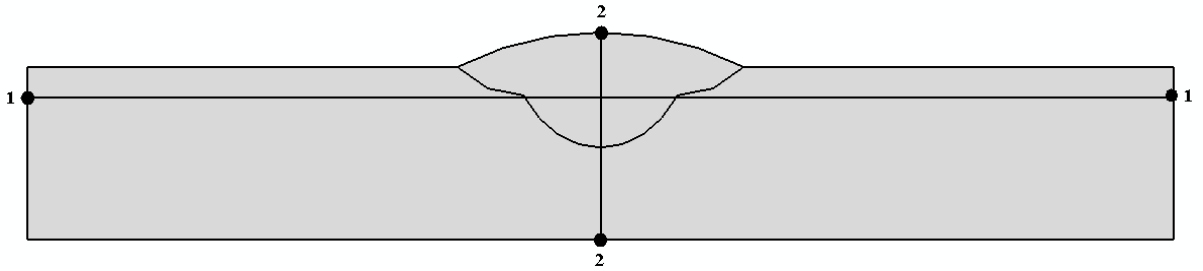


Şekil 5.20. Zamanın 75.49 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

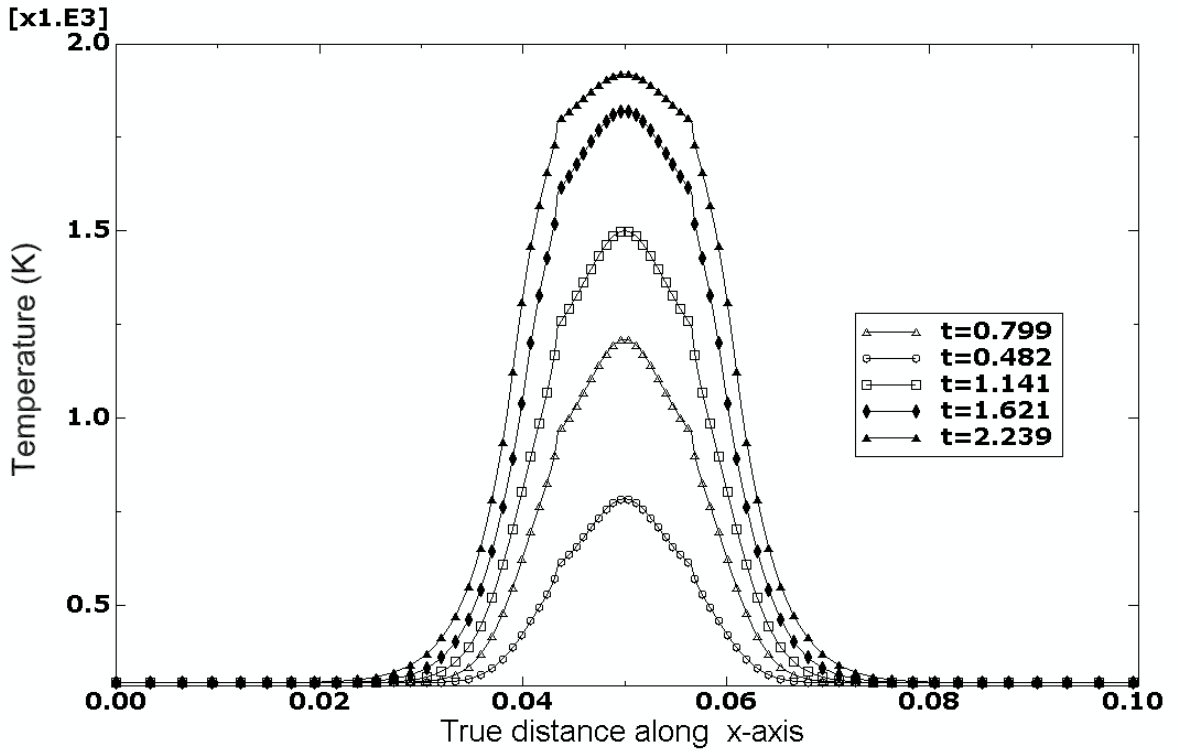


Şekil 5.21. Zamanın 40000 sn anında kaynakta sıcaklık dağılımı

Simülasyon sonuçlarını değerlendirme ve ilgili grafikleri elde ederken iki değişik yol veya güzergâh kullanılacaktır. Bunlar Şekil 5.22’de görüldüğü gibi 1-1 kesiti ile diklemesinden modeli kesen 2-2 güzergâhlarıdır.



Şekil 5.22. Kaynak Model üstünde Veri Değerlendirme Güzergâhları(1-1, 2-2)



Şekil 5.23. Kaynak Model üstünde 1-1 Güzergâhında Zamana Bağlı Sıcaklık Değişimi

Oluşturduğumuz modelin Şekil 5.22’de görülen 1-1 kesitindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı Şekil 5.23’de görülmektedir. 1-1 kesitinde başlangıç anında tüm sıcaklıklar eşit durumda iken kaynak işleminin başlamasıyla birlikte farklı zaman aralıklarında kaynak bölgesindeki sıcaklık değişimi gözlenebilir.

5.3. Yapısal Analiz:

5.3.1. ısı-elasto-plastik formülasyon

Elasto-plastik formülasyonda birim şekil değiştirme ve stres arasındaki ilişki;

$$\sigma = D \varepsilon_e = D \varepsilon - \alpha(T - T_0) - \varepsilon_p \quad (5.4)$$

şeklindedir. Burada formülde düzlemsel birim şekil değiştirmeye göre;

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

dir. ε_p ise plastik şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Artımsal olarak ifade

$$d\sigma = D \left(d\varepsilon - \alpha dT - \frac{T-T_0}{T} d\alpha - d\varepsilon_p \right) + dD \varepsilon_e \quad (5.6)$$

formunda yazılabilir. Artımsal plastik şekil değiştirme aşağıdaki gibi türetilir.

$$F(\sigma, \theta, \sigma_0) = 0 \quad (5.7)$$

Yukarıdaki ifadede F akma sınırı fonksiyonu olarak adlandırılır. θ ise akma sınırı yüzeyinin yer değiştirme miktarını verir. σ_0 akma sınırı yüzeyinin ölçüsünü veren bir değişkendir.

Diğer yandan, akma sınırı yüzeyinin ölçüsü, sıcaklığın ve birikmiş plastik şekil değiştirme miktarının bir fonksiyonu gibi ele alınabilir.

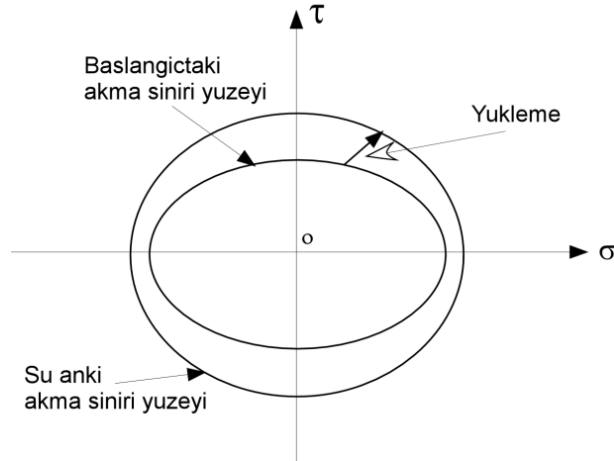
$$\sigma_0 = \sigma_0(E_p, T) \quad (5.8)$$

Genel olarak, akma noktası yüzeyinin şekli, ölçüsü ve konumu, malzemedeki plastik deformasyon süreci ile değişir. Bu fiziksel olaya şekil değiştirme tokluğu denir. İsootropik toklaşma durumunda: akma sınırı yüzeyinin konumunda hiç bir değişiklik olmaksızın, yüzeyin miktarında bir artma olduğu kabul edilir (Şekil 5.26).

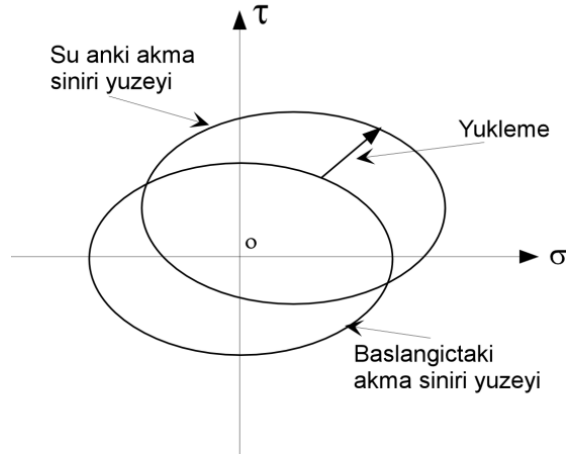
Kinematik toklaşmada ise, miktarı sabit kalmak sureti ile, akma sınırı yüzeyinin konumu değişir (Şekil 5.27). Bauschinger etkisine bağlı olarak, malzemelerin tekrarlı yüklenmesi durumunda bu iki teoremin bir birleşiminin kullanılması en iyi seçenektir.

$$F(\sigma, \theta, \sigma_0) = f(\sigma - \theta) - \sigma_0(E_p, T) = 0 \quad (5.9)$$

$dF > 0$ olması durumunda malzemede gerilme akma noktasını geçer ve plastik deformasyon meydana gelir. $dF < 0$ olması durumu ise elastik geri yükleme olur. $dF = 0$ halinde nötr yükleme oluşur.



Şekil 5.24. İotropik toklaşma hali



Şekil 5.25. Kinematik toklaşma hali

Akma sınırına gelmeden önce $F=0$ ve $dF=0$ dır.

$$dF = \frac{\partial f}{\partial \sigma^*} d(\sigma - \theta) - \frac{\partial \sigma_0}{\partial E_p} dE_p - \frac{\partial \sigma_0}{\partial T} dT = 0 \quad (5.10)$$

formülde $\sigma^* = (\sigma - \theta)$ dir. Prager'e göre akma sınırı yüzeyinin yer değiştirmesi birim plastik şekil değiştirme artımı ile aynı yöndedir.

$$\begin{aligned} d\theta &= C d\varepsilon_p \quad 1 - \xi \\ &= \frac{2H}{3} d\varepsilon_p \quad n \quad 1 - \xi \end{aligned} \quad (5.11)$$

formüldeki ξ bir katsayı ve $C = 2H/3$ sabit tir. İsootropik toklaşma durumunda $\xi = 1$, kinematik toklaşma durumunda ise $\xi = 0$ dir. H değişkeni

$$H = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{E}_p} = \frac{EE^T}{(E - E^T)} \quad (5.12)$$

olarak tanımlanır. Formülde $\bar{\sigma}$ efektif gerilmeyi temsil etmektedir. 5.11 numaralı denklem, 5.10 numaralı denklemde yerine yerleştirilir ise;

$$\begin{aligned} dF = \partial f / \partial \sigma^{*T} \left(d\sigma - \frac{2H}{3} dE_p \quad n \quad 1 - \xi \right) \\ - \partial \sigma_0 / \partial E_p \quad dE_p - \partial \sigma_0 / \partial T \quad dT = 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

denklemini elde edilir. Von-Mises akma sınırı kriterine göre;

$$f = J_2' = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \quad (5.14)$$

formülde J_2' ikinci deviatorik invariyan ve şu andaki akma sınırı dayanımı

$$Y = Y_0 + \xi H E_p^e \quad (5.15)$$

$$\sigma_0 = Y^2 / 3 \quad (5.16)$$

dır. Akma sınırı yüzeyine normal olan vektör;

$$n = \frac{\partial f / \partial \sigma^{*T}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma^{*T}} \right)^T \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma^{*T}}} \quad (5.17)$$

halindedir.

$$\begin{aligned} \partial f / \partial \sigma^{*T} &= \partial J_2' / \partial \sigma^{*T} \\ &= \sigma'_{11}, \sigma'_{22}, \sigma'_{33}, \sigma'_{12}, \sigma'_{23}, \sigma'_{31} \end{aligned} \quad (5.18)$$

En genel halde σ'_{mn}

$$\sigma'_{mn}{}^* = \sigma'_{mn} - \theta_{mn} \quad (5.19)$$

olarak yazılır.

Artımsal teoride, plastik sınırlar içinde tanımlanan bir potansiyel fonksiyon; akma sınırı fonksiyonu olarak adlandırılır. Plastik birim şekil değiştirme artımı akma sınırı yüzeyine normaldir ve

$$de^p = \frac{\sqrt{3/2} \partial f / \partial \sigma^*}{\left[\begin{matrix} \partial f / \partial \sigma^* & \partial f / \partial \sigma^* \\ \partial f / \partial \sigma^* & \partial f / \partial \sigma^* \end{matrix} \right]^{1/2}} dE_p^e = \sqrt{3/2} n dE_p^e = dE_p n \quad (5.20)$$

Efektif plastik birim şekil değiştirme artımı;

$$d\bar{E}_p = \left[2/3 d\varepsilon^p \quad \varepsilon^p \quad d\varepsilon^p \right]^{1/2} = \sqrt{2/3} dE_p \quad (5.21)$$

5.15 ve 5.16 numaralı denklemlerden

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial E_p} = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} Y H \xi \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial T} = \left(\frac{2Y}{3} \right) \frac{\partial Y}{\partial T} \quad (5.23)$$

yazılabilir.

$$\begin{aligned} & n^T f_m \left(d\sigma - \frac{2H}{3} dE_p n \quad 1 - \xi \right) \\ & = \frac{2Y}{3} \left(\left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right) dT + \sqrt{\frac{2}{3}} H \xi dE_p \right) \end{aligned} \quad (5.24)$$

Denklem 5.24 ve 5.6'da $d\sigma$ ifadesini yok ederek tekrar düzenlersek plastik birim şekil değiştirme artım miktarı aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} dE_p & = \frac{n^T D \quad d\varepsilon - \alpha \quad dT - (T - T_0) \quad d\alpha}{S} \\ & + \frac{n^T \quad dD \quad \varepsilon_e - 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \end{aligned} \quad (5.25)$$

formülde

$$\begin{aligned} S = & \mathbf{n}^T \mathbf{D} \mathbf{n} + 2/3 H \mathbf{n} (1 - \xi) \\ & + 2Y/3f_m^{-1} \xi H \sqrt{2/3} \end{aligned} \quad (5.26)$$

dir. Plastik deformasyon altındaki artımsal gerilme:

$$\begin{aligned} d\sigma = & \mathbf{D} \, d\varepsilon - \alpha dT - \mathbf{T} - T_0 \, d\alpha + d\mathbf{D} \, \varepsilon_e \\ & - \mathbf{D} \mathbf{n} \left(\frac{\mathbf{n}^T \mathbf{D} \, d\varepsilon - \alpha \, dT - (T - T_0) \, d\alpha}{S} \right. \\ & \left. + \frac{\mathbf{n}^T \, d\mathbf{D} \, \varepsilon_e - 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \right) \end{aligned} \quad (5.27)$$

olarak bulunur. Yeniden düzenleyerek

$$\begin{aligned} d\sigma = & [\mathbf{D}_p] \, d\varepsilon - \alpha dT - \mathbf{T} - T_0 \, d\alpha \\ & + \left(d\mathbf{D} - \frac{\mathbf{D} \mathbf{n}^T \, d\mathbf{D}}{S} \right) \varepsilon_e \\ & + \left(\frac{\mathbf{D} \mathbf{n} \, 2/3 Y f_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \right) \end{aligned} \quad (5.28)$$

olur. Formülde

$$\mathbf{D}_p = \mathbf{D} - \frac{\mathbf{D} \mathbf{n} \mathbf{n}^T \mathbf{D}}{S} \quad (5.29)$$

dir. $\partial Y / \partial T \, dT$ 15 numaralı formülden türetilerek

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right) dT = \left(\frac{\partial Y_0}{\partial T} \right) dT + \xi \left(\frac{\partial (H \bar{E}_p)}{\partial T} \right) dT \quad (5.30)$$

olarak yazılır. Bu artımsal değerler malzemelerin sıcaklığa göre varyasyonunu kullanarak hesaplanır.

$$\int_{vol} \mathbf{B}^T \, d\sigma \, dvol = dR \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned}
& \int_{vol} \mathbf{B}^T \left[\mathbf{D}_p \right] \mathbf{B} \, dvol = d\mathbf{R} + \\
& \int_{vol} \mathbf{B}^T \left[\left[\mathbf{D}_p \right] \, d\varepsilon - \alpha dT - \frac{T - T_0}{S} d\alpha \right. \\
& \left. - \left(d\mathbf{D} - \frac{\mathbf{D} \, n^T \, d\mathbf{D}}{S} \right) \varepsilon_e \right. \\
& \left. - \left(\frac{\mathbf{D} \, n^T \, 2/3 Y_f^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S} \right) \right] dvol
\end{aligned} \tag{5.32}$$

Yakınsama için hata öngörülen ε_{tol} değerinden küçük olmalıdır [67].

$$\sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n ({}^{r+\Delta t} R_{applied} - {}^{r+\Delta t} F_{calculated})^2}{\sum_{r=1}^n ({}^{r+\Delta t} R_{applied} - {}^r F_{calculated})^2}} \leq \varepsilon_{tol} \tag{5.33}$$

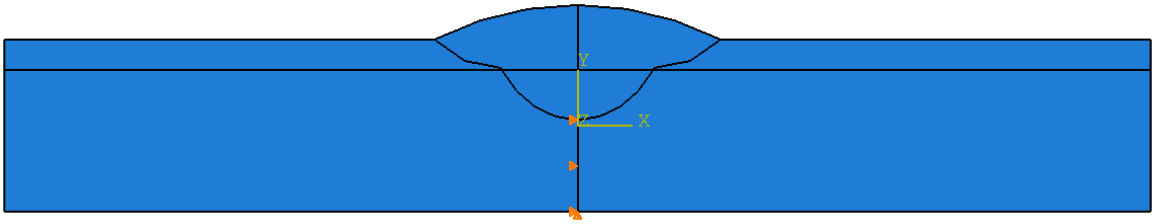
5.3.2. Yapısal modeli

Düzlem modelleri özellikle kalıntı belirlemek için verimli vurguyu belirlemek ve uzun süreli kaynaklar içindir. Bu nedenle, geçici termal ve doğrusal olmayan yapısal analiz gerilme dağılımlarını tahmin etmek için yapılmıştır. Termal analiz sıcaklık geçmişi yapısal analizinde termal yükleme olarak kullanılmıştır. Yapısal analiz ise büyük yer değiştirme formülasyonu ve malzeme modeli olarak sıcaklığa bağlı termo-elasto-plastik modeli içermektedir. Yapılan analizlerde izotropik pekleşme kuralı kabul edilmiştir. Bu model Mises akma kriteri ve ilgili akış kuralları içerir.

Geometrik model gerekli yapısal formülasyon ve kabullerin ardından bölüntülemeye tabi tutulur. Bu çalışmada bölüntüleme işleminde sekiz düğümlü dört elemanlı yapısal analiz için kullanılmıştır. 8 düğümlü dörtlü unsurlar birleştirildiğinde termo-mekanik analiz, iyi uyumluluk nedeniyle seçilmiştir.

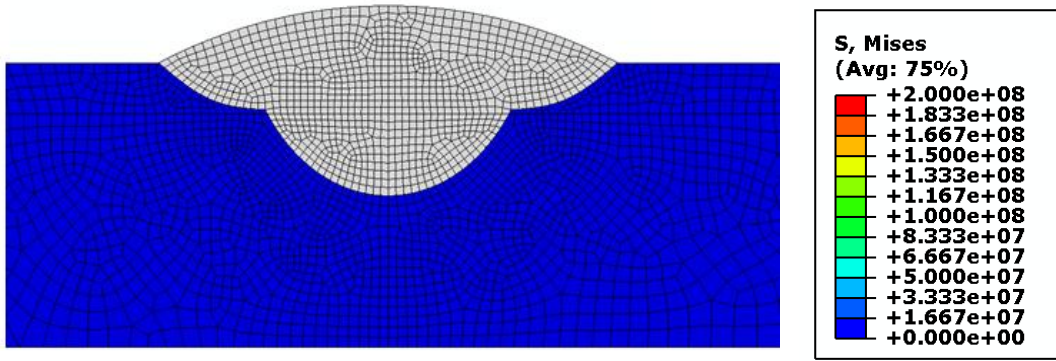
5.3.3. Sınır koşulları

Yapısal analizde, katı cisimlerin hareketleri engelleyen sınır koşulları geliştirilen modelde uygulanmıştır. Stres modeli çözüm işlemi iki aşamada kısıtlanmıştır. Çözümün ilk adımı olan rijit vücut hareketi yapmadan gerçeğine yakın fiziksel sınırlandırma yapılması gereklidir. Kaynak sonrası meydana gelecek şekil değişikliğini rahatça görebilmek için model Şekil 5.26’da gösterildiği gibi sınırlandırılmıştır.



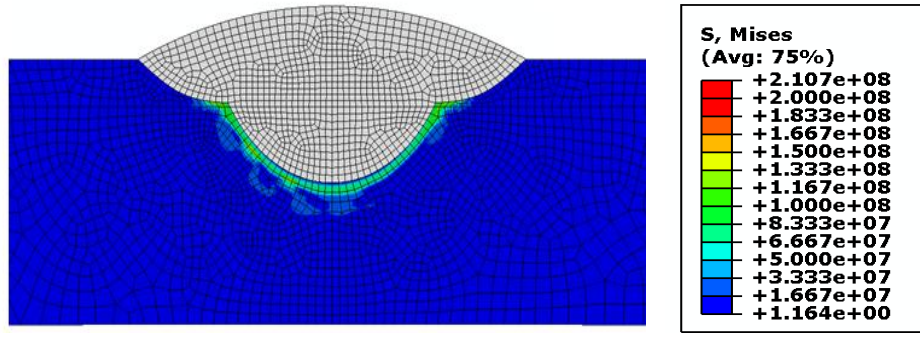
Şekil 5.26. Birinci Adımdaki Sınır Koşulları

5.3.4. Yapısal sonuçlar

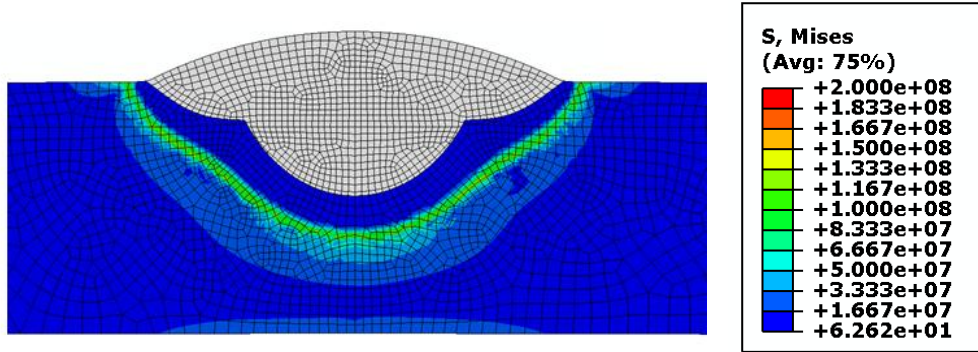


Şekil 5.27. Kaynak işlemi sonunda t=0 iken Von-Mises Gerilme Dağılımı

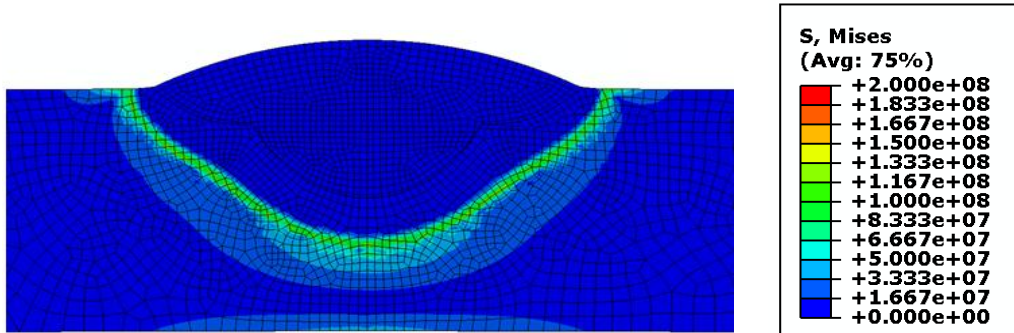
Şekil 5.28-34’da kaynak bölgesinde oluşan artık gerilmelerin zamana bağlı olarak dağılımı verilmektedir. Torcun referans kesitin üzerinden geçmesi anına kadar kaynak bölgesi (beyaz renkle gözüken bölge) birim şekil değiştirme olarak sıfır halde yani elementlerin direngelik matrisi çok küçük bir katsayı ile çarpılarak analiz dışı bırakılır. Böylece bu kaynak bölgesi dışına ulaşan ısı parçadan gerilme oluşturmaya başlar.



Şekil 5.28. Kaynak işlemi sonunda $t=0.7653$ iken Von-Misses Gerilme Dağılımı

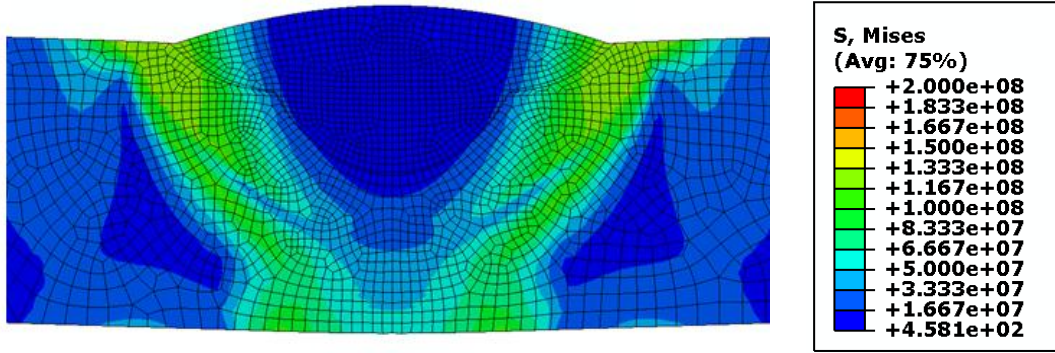


Şekil 5.29. Kaynak işlemi sonunda $t=1.915s$ Von-Misses Gerilme Dağılımı



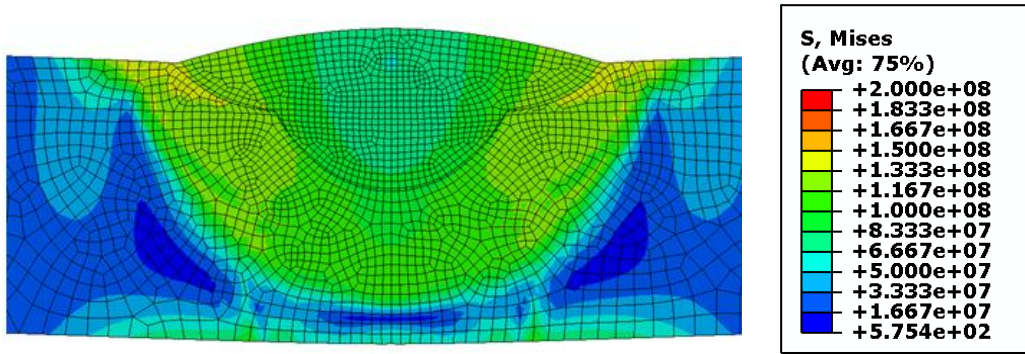
Şekil 5.30. Kaynak işlemi sonunda $t=2.257s$ Von-Misses Gerilme Değişimi

Torcun referans gölgenin tam üstünde olması ile kaynak bölgesindeki elamanlar tekrar eski haline birim şekil değiştirmesiz bir şekilde yer almaya devam eder. Fakat bu zaman zarfında kaynak bölgesi metal erime noktası üzerinde bir sıcaklık ile kaplanmıştır. Bundan sonraki sıcaklık değişimleri artık kaynak bölgesinde gerilmeye sebep olacaktır.

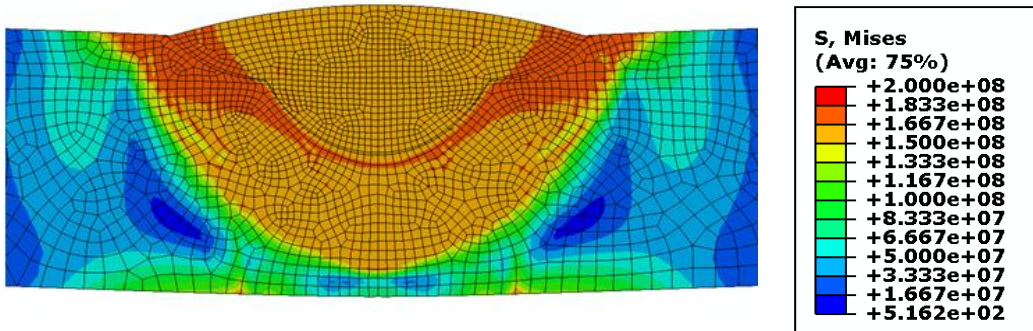


Şekil 5.31. Kaynak işlemi sonunda $t=13.30s$ Von-Misses Gerilme Değişimi

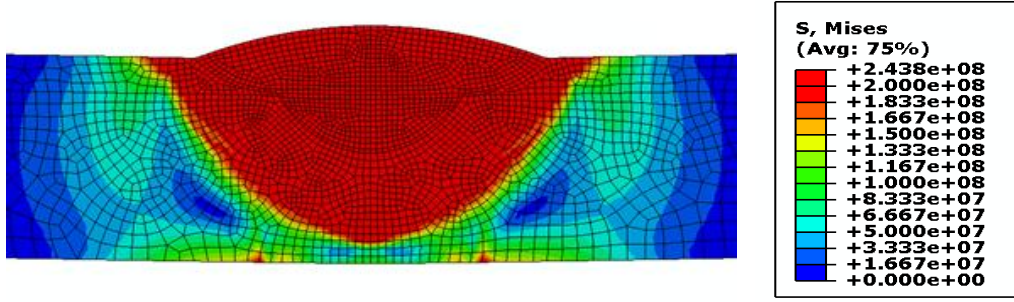
Şekil 5.31-32’de zamanın ilerlemesi ve soğumanın devam etmesi ile kaynak bölgesinde gerilmelerin sınır bölgeden sıcaklığın en yüksek seviyeye ulaştığı tepe noktasına doğru bir şekilde gerçekleştiği görülebilir.



Şekil 5.32. Kaynak işlemi sonunda $t=21.21s$ Von-Misses Gerilme Değişimi

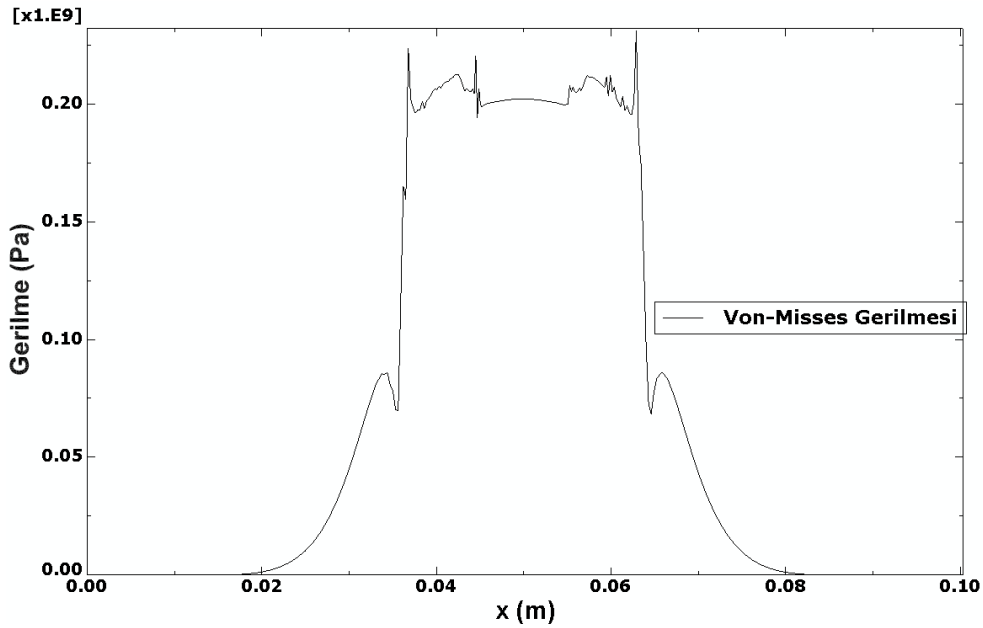


Şekil 5.33. Kaynak işlemi sonunda $t=93.26s$ Von-Misses Gerilme Değişimi



Şekil 5.34. Kaynak işlemi sonunda $t=40000s$ Von-Misses Gerilme Değişimi

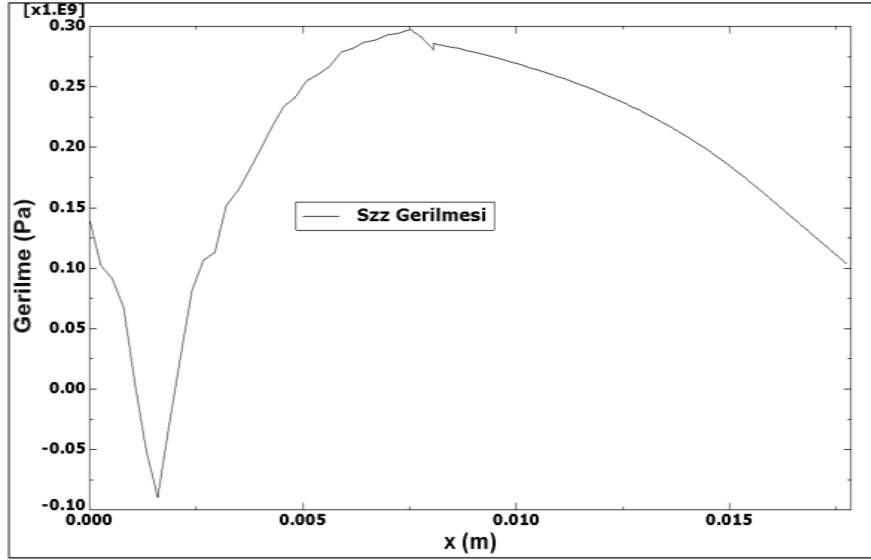
Kaynak zamanı soğumanın taam olarak oda sıcaklığına eriştiği $t=40000s$ 'ye ulaştığı zaman negatif sıcaklık farkı kaynak bölgesinde gerilmeleri akma sınırına ulaştırmıştır. Bu arada unutulmamalıdır ki kaynak analizlerinde malzemenin zamana bağlı özelliklerinin iyi tanımlanması sonuç üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Yüksek sıcaklıklar için literatürden alınan değerler her ne kadar kabul görse de fiziksel olarak mutlak değildir.



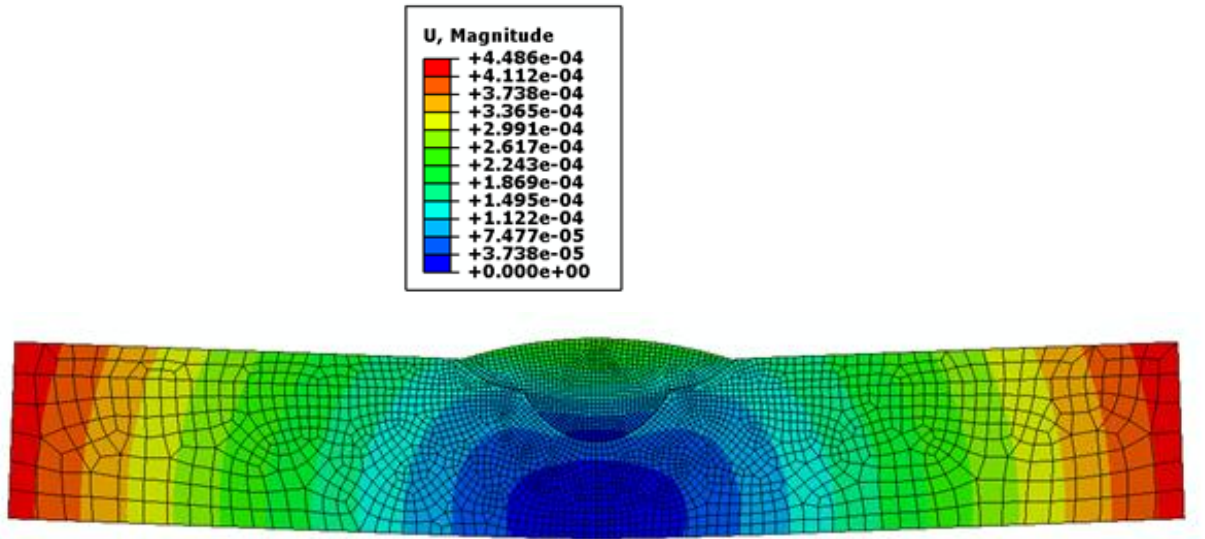
Şekil 5.35. Kaynak işlemi sonunda 1-1 Güzergahında Von-Misses Gerilme Değişimi

Şekil 5.35'de malzeme üzerinden alınan 1-1 kesitindeki Von-Misses Gerilme Değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi kaynak bölgesi üzerinde yaptığımız zamana bağlı sıcaklık değişimiyle doğru orantıda bir artış gerilme oluşumu gözlenmektedir.

Bu artık gerilmelerin malzeme üzerinde oluşturduğu çarpılma Şekil 5.37-39'da gösterilmiştir.

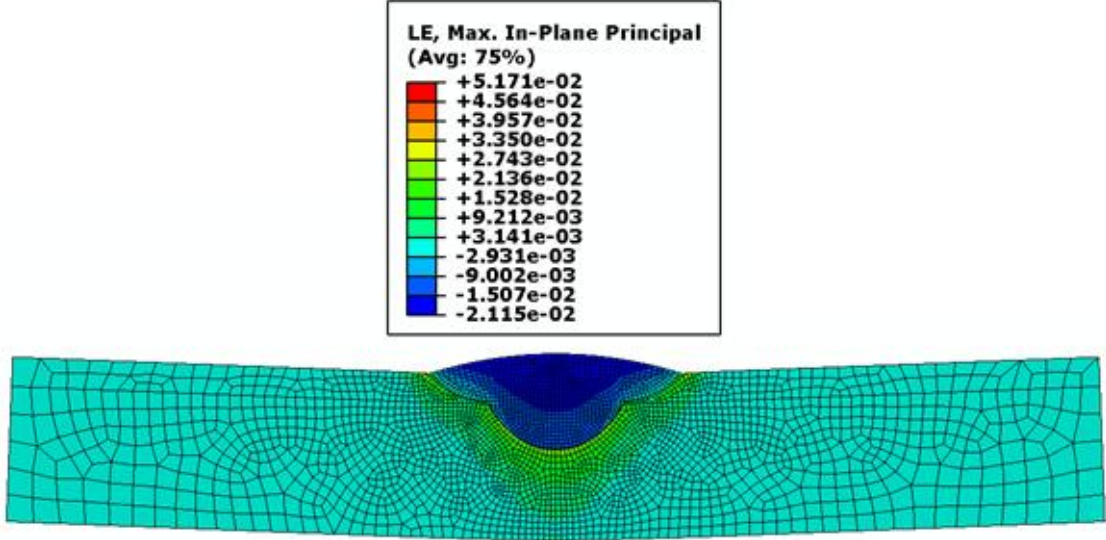


Şekil 5.36. Kaynak işlemi sonunda 2-2 Güzergahında Szz Gerilme Değişimi

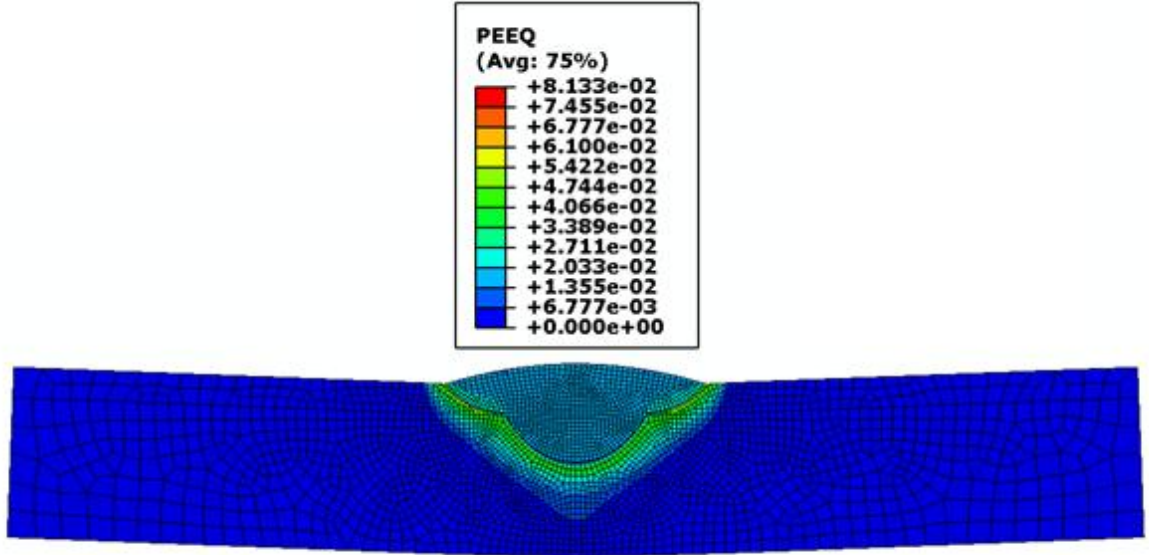


Şekil 5.37. Kaynak işlemi sonunda Toplam yer değiştirme Dağılımı

Şekil 5.38’de ise kaynak bölgesinde negatif bir birim şekil değiştirmenin meydana geldiği soğuyan bölgenin bir çekme gösterdiği görülebilir. Şekil 5.39’da bu şekil değişimine bağlı eşdeğer plastik birim şekil değiştirme görülebilir.



Şekil 5.38. Kaynak işlemi sonunda Logaritmik Birim Şekil Değişirme Dağılımı



Şekil 5.39. Kaynak işlemi sonunda Eşlenik Plastik Birim Şekil Değişirme Dağılımı

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Düz bir plaka üzerine yapılan kaynak tesir analizinde geçek toz altı kaynak işleminden elde edilmiş bir füzyon bölgesi için zamana bağlı ısı elastik-plastik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Kaynak füzyon bölgesi kaynak benzetimlerinde kullanıla gelen klasik şekil olan elips değildir. Bundan dolayı çift elipsoit model direkt olarak kullanılamaz. Parmak ve kraterden oluşan füzyon bölgesi için irregular sınırın doğru bir şekilde ergiyik malzeme ile doldurulması için ısı yayılımında ergime derecesinin üzerindeki sıcaklıklara bu bölgede ulaşılması lazımdır. Bunun için bağlantısız (uncouple) analizin ısı kısmında, Goldak'ın çift elipsoit modeli kullanılarak, elektrotun inceleme kesitinin üzerine gelinceye kadar ki kısımda ısı iletim katsayısının yapay bir artışı ile istenilen ısı yayılım sağlanmıştır. Isı analiz sonunda gerilme hesaplarının yapılacağı yapısal kısım için sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişim mazisi kaydedilmiştir. Yapısal analizde ısı gerilme ve birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Yapısal analiz esnasında malzemenin mekanik özellikleri sıcaklığa göre değişken olarak alındığında Şekil 29-41'de görüleceği üzere dereceli bir artış ile meydana gelmekte ve en son füzyon bölgesi gerilmelerin olduğu bölge olarak görülmektedir. Parça kalıcı gerilmelerin etkisi ile ilk önce dışa doğru sonra içe doğru şekil değiştirmiştir. Kalıcı gerilmelerin miktarı tamamen akma gerilmesinin ve ısı genleşme katsayısının sıcaklık ile değişimine bağlıdır. Değişik malzeme kullanımında en dikkat edilmesi gereken mekanik özellik plastik davranıştır ve kesinlikle hassas karakterize edilmesi gereklidir. Bu kaynak benzetiminde malzeme modeli olarak kullanılan elastik-plastik model yerine viskoplastik model kullanılması faz dönüşümleri gibi ani yapısal değişimlerin eklenmesinde analize eklenmesi durumunda gereklidir. Bu yapılan kaynak analizlerinde faz dönüşümlerinin olmadığı kabul edilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] ÇAVRATOĞLU, N.K., Mühendis ve Makina Dergisi, 48. Cilt, Sayı 564, S, 9 MMOB yayını, 2007
- [2] ANIK, S., TÜLBENTÇİ, K., KALUÇ, E., Örtülü Elektrot İle Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayınları, İstanbul, 1991
- [3] ADSAN, K., TEMEL, M., Otomatik (İleri) Kaynak Teknolojisi, M.E.B. yayınları, S14, 278, 297, istanbul, 1984
- [4] ANIK, S., ANIK, E.S., VURAL, M., Bin Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı Cilt 1 , Birsen Yayınları, S 78, 80, 132, İstanbul, 1993
- [5] ROSENTHAL, D., Mathematical Theory of Heat Distributing During Welding and Casting , Weldign Journal Research Supplement, 220-234, 1941
- [6] GOLDAK, J., CHAKRAVARTI, A., BIBBY, M., and Leung, A new Finite Element Model for Welding Heat Sources Metallurgical Transactions, 15: 299-305, 1984
- [7] MICHALERIS, P., DEBICCARI, A. Prediction Of Welding Distortion, Welding Journal, 172-182, 1997
- [8] MALINOWSKI-BRODNICKA, M., denQuaden, G. and Vink, W. J. P., Welding Journal, 69: 52, 1990
- [9] DAVOUD, M., S., A Comprehensive Study of Gas Metal Arc Welding Process; Finite Element Simulation and Experimental Master of Science Mechanical Engineering, Oklahoma State University, Oklahoma-U. S. A., 100-124, 169-208, 1984
- [10] <http://www.tegim.com/egitim/dosyalar/k-r-bolumler/makine/984-paslanmaz-çeliklerin-kaynagi.html>, Mayıs, 2011
- [11] KOYDUL, H., 316L Paslanmaz Çelik Thompson Protezinin Ringer Solisyonu İçindeki Yorulma Korozyonu, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 1994
- [12] KALUÇ, E., ve TÜLBENTÇİ, K., Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği Seminer Notları, Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi, Eğitim ve Uygulama Merkezi, Kocaeli, 1995
- [13] ARAN, A., ve TEMEL M. A., Paslanmaz Çelik Yası Mamüller, Sarıtaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, 2003

- [14] KUSTUTAN, G., Paslanmaz Çeliklerin Direnç Kaynagında Soğuma Hızının Birleştirilenin Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003
- [15] GÜRLEYİK, M.Y., Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi, Kuzey Gazetecilik Matbaacılık ve Ambalaj Sanayi A.S., Trabzon, 1988
- [16] BAYLAN, O., Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik – Martenzitik Farklı Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklı Bağlantılarında, Mikroyapı ile Özellikler Arasında ilişkinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Zonguldak, 2004
- [17] VURAL, M., Kaynak ve Birleştirme Teknolojisi, İmal Usulleri Ders Kitabı İstanbul Teknik Üniversitesi, S, 232
- [18] ANIK, S., Kaynak Tekniği Cilt 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 1973
- [19] TÜLBENTÇİ, K., Tozaltı Kaynak Yönteminin Üstünlükleri Ve Uygulama Alanları, Kaynak Dünyası, Gedik Yayınları, S, 18-21, İstanbul, 1988
- [20] LITTLE, R., Welding And Welding Technology, S, 172-180, 1973
- [21] SARCKS, J.R., Welding Principles And Practices Revised, S, 869-879, 1981
- [22] ANIK, S., Kaynak Tekniği El Kitabı, Gedik Yayınları, İstanbul, 1991
- [23] DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOHSER, R., Materials And Processes İn Manufacturing, S, 889-891, 1988
- [24] GÜLTEKİN, N., Kaynak Tekniği, Yıldız Üniversitesi, Ankara, 1985
- [25] KAHRAMAN, F., Pasif Ve Özlü Telle Yapılmış Gazaltı Kaynak Dikişlerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Temmuz, 2002
- [26] HOWART, E.B., TİMOTHY, L.G., Metals Handbook , American Society For Metals, 30.17-30.21, Ohio, 1985
- [27] TITLE, L., Submerged Arc Gives Productivity With Quality, Metal Construction, S, 219, 1985
- [28] ANIK, S., Kaynak Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi Ofset Atelyesi, 2, İstanbul, 1982
- [29] KÜLHANLI, M. E., Tozaltı Kaynak Yöntemi, Oerlikon Kaynak Bilimi, 2, S, 82-85, İstanbul, 1985

- [30] VURAL, M., ANIK, S., ANIK, E.S., 1000 Soruda Kaynak Tekniği, Birsen Yayınları, İstanbul, 1993
- [31] ANIK, S., TLBENTI, K., Tozaltı Kaynak Tekniği , Kaynak Teknolojisi, Gedik Kaynak Sanayi
- [32] GÜLTEKİN, N., MüFTüOğLU, F., Tozaltı Kaynak Tozlarının Korunma Şartları, Gedik Yayınları, İstanbul
- [33] Metals Handbook Ninth Edition Volume 6 Welding, Brazing, And Soldering, 1983
- [34] ERYÜREK İ B., Gazaltı Kaynağı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, As Kaynak Yayınları, S, 100, 2003
- [35] AWS, Welding Processes, 8th Edition, USA, 1991
- [36] ERYÜREK, İ. Kaynak Teknolojisi Esasları, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [37] KARADENİZ, S., Kaynak Makinaları, Segem Yayınları, Ankara, 1985
- [38] TLBENTI, K., MIG-MAG Eriyen Elektrot İle Gazaltı Kaynağı, Gedik Holding, İstanbul, S, 118-130, 1990
- [39] GÜRCAN, M., TIG Kaynağı, Segem Yayınlar, Ankara, S, 33, 1986
- [40] KALUÇ, E., Paslanmaz eliklerin MIG ve TIG Kaynağı, Gedik Holding, İstanbul, S, 8-12, 1989
- [41] Anonim, TIG And Plazma Welding, Abington Publishing, England, 9, 1990
- [42] CERİT, A., Makine Mühendisliği El Kitabı , TMMOB Yayınları, Ankara, 2. Cilt , 786-789, 1976
- [36] MATHERS, G., The Welding of Aluminium and Its Alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2002
- [43] <http://www.millerwelds.com/education/TIGhandbook/>, Mayıs 2011
- [44] URAL, M., KALUÇ, E., Paslanmaz eliklerin TIG Yöntemi İle Kaynağı, Metal Makine, 12-20, 1996
- [45] KALUÇ, E., Kaynak Teknolojisi El Kitabı Cilt 1-Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri, MMO Yayınları, No: 356, Ankara, 2004
- [46] ANIK, S., Kaynak Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi,Cilt 3, İstanbul,1991

- [47] STRASSBURG, F.W., Schweissen Nichtrostender Staehle, Band 67, D.V.S., Dusseldorf-Almanya, 1982
- [48] ERTÜRK, İ., Gazaltı Kaynak Yöntemleri, İstanbul, 2004
- [49] ELÖVE, D., TIG Kaynak Yöntemlerinde Elektrik Arkının ve Elektrik Devresinin Davranışları, 2004
- [50] İRSEL, G., Dişli Benzeri Parçaların Ekstrüzyonunda Değişik Ekstrüzyon Oranlı Parçaların Sonlu Elemanlar Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, 2007
- [51] KURTAY, T., Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, İ.T.Ü., Makine Fakültesi, 1980
- [52] SERT, Ş., İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2008
- [53] ÇEVİK, B., Kaynaklı Birleştirmelerin Mekanik Özelliklerine Kalıcı Gerilmelerin Etkisinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009
- [54] BENLİ, S., Kaynaklı Parçalarda Oluşan Artık Gerilmelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2004
- [55] ÖNDER, Ö., Kalça Modellenmesinde Basınç Dağılımının Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2008
- [56] DOĞAN, M., Paslanmaz Çeliklerin Köşe Kaynaklı Birleştirilmelerinde Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2006
- [57] CERİD, MUHAMMET., Investigation Of Stres Distribution In The Transverse Filet Weld Joint, Research Paper. FBE/MAK-90-AR-273, 1990
- [58] ERDİL, A. B., Portal Krenlerin Tasarımı Ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007
- [59] TOPÇU, M., TAŞGETİREN, S., Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu, Denizli, 1998
- [60] KAYA, F., Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Çelik Malzemelerin Nümerik Olarak Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2010

[61] KAFKAS, F., Katman Kaldırma Tekniğine Dayalı Olarak Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesini Sağlayan Bilgisayarlı Ölçme Cihazının Tasarımı ve İmalatı, Gaz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001

[62] ZHANG, Y., PRATIĦAR, S., FITZPATRICK, M., E., EDWARDS, L., Residual Stress Mapping in Welds using the Contour Method, Department of Materials Engineering, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, UK

[63] KANDİL, F., A., LORD, J., D., FRY, A., T., GRANT, P., V., A Review of Residual Stress Measurement Methods -A Guide to Technique Selection, NPL Report MATC(A)04, February 2001

[64] FRY, A., T., Sensitivity Evaluation for X-Ray Diffraction Residual Stress Measurements, NPL Report MATC(104)A, April 2002

[65] <http://www.h-and-m-analytical.com/pdfs/residualstress.pdf>, Mayıs 2011

[66] ABAQUS kullanım klavuzu

[67] Computer & Structure vol.60 N.1 pp.131-154,1996

[68] GOLDAK, J., CHAKRAVARTI, A., and MALCOLM, B., A New Finite Element Model For Welding Heat Sources, Metallurgical Transaction B, June,1984

ÖZGEÇMİŞ

Yüksel Çelik, 1983 yılında Muş' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Muş'da tamamladı. 1999 yılında Muş Teknik Lise Ve Endüstri Meslek Lisesinden mezun oldu. 2000 yılında başladığı Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümünü 2004 yılında bitirdi. 2011 yılında Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Şu anda Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.