

## TOZALTI KAYNAK BAĞLANTISININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE TERMAL VE MEKANİK ANALİZİ

*Nurettin YAVUZ\**

*Reşat ÖZCAN\**

*Ferhat G. POLAT\*\**

**Özet:** Günümüzde en yaygın olarak kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri olan kaynak işleminde malzemenin kaynak sonrası davranışlarını önceden tahmin edebilmek, kaynaklı yapının mukavemeti ve çalışma verimi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, tozaltı kaynağı yöntemi kullanılarak kaynak edilmiş parçaların kaynak metali, ısının tesiri altında kalan bölge ve esas metal bölgelerinin mekanik özelliklerini, düz çekme numuneleri kullanılarak belirlemek amacıyla deneysel bir araştırma yapılmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak tozaltı kaynağı işleminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modellemede ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılmıştır. Analiz iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak kaynak işleminde meydana gelen ısı çevriminden hareketle termal analiz yapılmıştır. Termal analiz sonucunda elde edilen veriler mekanik analize girdi olarak ikinci aşamada kullanılmıştır. Modelleme ile kaynak sonrası malzemenin durumu önceden tahmin edilebildiği gibi kaynak parametrelerinin optimizasyonu da sağlanabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Tozaltı Kaynağı, Mekanik Özellikler, Sonlu Eleman Modellemesi.

### Thermal and Mechanical Analysis with a Finite Element Method of Submerged Arc Welded Joint

**Abstract:** In the welding process, which is one of the most widely used joining process, to estimate the behaviours of the material after welding is very important for the strength and working productivity of weldments. In this study, an experimental investigation on the mechanical properties of submerged arc welded joints using flat tensile specimens was carried out to determine the tensile properties of the base metal, weld metal and heat-affected zone of weldments and a finite element model of the submerged arc welding process was carried out using the results of the experiments ANSYS finite element package program was used in modelling. Analysis was realized in two steps. Initially, thermal analysis was made by the thermal cycle that occurs in the welding process. Then the results those obtained from the thermal analysis have been used in the second step as inputs for the mechanical analysis. The situation of the material after welding can be estimated by modelling, also the optimisation of welding parameters can be done.

**Key Words:** Submerged Arc Welding, Mechanical Properties, Finite Element Modelling.

## 1. GİRİŞ

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

Kaynak işlemi, özellikle de ark kaynağı; plazma-metal etkileşimleri, metal-gaz / toz reaksiyonları, kaynak banyosu akışkan akışı, elektromanyetik hareket, faz dönüşümü, ısı transferi, kaynak metali kimyası, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) mikro yapısı, artık gerilmeler mekanik özellikler vb. gibi anlaşılması zor fiziksel kimyasal ve mekanik olguların etkileşimini içeren kompleks bir işlemdir (Wen S.W.ve arkadaşları (2001)). Önceleri, bu konuyla ilgilenen araştırmacılar ve bilim adamları çalışmalarının büyük bir kısmını kaynak fiziksel metalurjisi, kaynak metali ve ITAB mikro yapılarının karakterizasyonu ve kaynak işleminin optimizasyonu konularına ayırırken; son zamanlarda nümerik simülasyon, kaynak işleminin

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, Bursa.

\*\* Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Görükle, Bursa.

analizi ve optimizasyonuna yardımcı bir araç olarak artarak kullanılmakta ve özellikle kaynaktaki artık gerilme ve uzamaların belirlenmesinde uygulanmaktadır.

Kaynak işleminin kaynak bölgesine uyguladığı ısı çevrim (ısınma ve soğuma), bu bölgenin iç yapısını değiştirmekte ve dolayısıyla mekanik özellikleri farklı bir bölge ortaya çıkmaktadır. Isının tesiri altında kalan bölge (ITAB) olarak adlandırılan bu bölgenin kaynak dikişinin etrafında birkaç milimetre genişliğinde oluşu, bu bölgeye sertlik ve metalografik muayene dışında diğer muayene usullerinin uygulanmasını imkansız kılınmaktadır.

Kaynağa uygulanan sıcaklığın dağılımı dolayısıyla çeşitli bölgelerde farklı sıcaklıklara kadar ısınmış ve soğumuş gayet dar bir bölge olan ITAB içerisinde iç yapı bakımından teorik olarak homojen bir bölge mevcut değildir. Dolayısıyla bu kısmın özellikleri hakkında fikir sahibi olabilmek amacıyla simülasyon yapılmaktadır (Tülbentçi 1984).

Mekanik özellikleri net olarak bilinmeyen bir bölge olan ITAB'ın, modelleme ile mekanik özelliklerinin önceden tahmin edilmesi, birçok alanda kullanılan kaynaklı yapıların emniyetinin sağlanması açısından önemlidir.

Bu çalışmada; yukarıda bahsedilen nedenlerle kaynak edilmiş parçaların bilgisayar destekli mukavemet analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla kaynak edilmiş parçaların kaynak bölgesinin deneysel olarak incelenerek, buradan elde edilen sonuçlar ile modellemenin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Kaynak bölgesinin özellikle de kaynaklı yapının emniyet açısından büyük önem taşıyan ITAB'ın mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için kaynak yöntemi olarak diğer yöntemlere göre hem daha geniş bir ITAB'a sahip (yüksek ısı girdisi dolayısıyla) hem de otomatik bir yöntem olan (kaynak hatalarının minimum olduğu) Tozaltı Kaynağı seçilmiştir. Bu yöntem kullanılarak yapılan kaynağın; kaynak metal, ITAB ve esas metal bölgelerinden çeşitli düz çekme numuneleri çıkartılarak bunlara çekme testleri uygulanmıştır. Bulunan mekanik özellikler, kaynak dikişinin metalografik görüntüsü, kaynak parametreleri vb. özellikler kullanılarak modelleme gerçekleştirilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaynak işleminin simülasyonu, kaynak işlemi üzerine yapılan araştırmaların en önemli konularından birisidir. Bu konuyla ilgili olarak çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, nümerik analiz ve matematiksel modeller kullanarak bilgisayarların da yardımıyla kaynak işleminde karşılaşılan kompleks durumlar açıklanmaya çalışılmıştır. Kaynaklı bir yapıdaki kaynak metal, esas metal ve özellikle de kaynak emniyeti açısından büyük önem taşıyan ısının tesiri altında kalan bölgenin yapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmış olup, bunlar kullanılan kaynak yöntemi, malzeme ve benzeri birçok faktöre göre de farklılıklar göstermektedir.

Bu deneysel çalışmada gerek kullanılan kaynak yöntemi gerekse deneylerde kullanılan numunelerin klasik yöntemlerden farklı bir şekilde elde edilmiş olması gibi faktörler konuyla birebir ilgili olan araştırmaların sayısını kısıtlamıştır.

Wen S.W. ve arkadaşlarının (2001) yapmış oldukları çalışmada çok telli bir tozaltı kaynağı prosesi (SAW), genel amaçlı bir sonlu eleman paket programı olan ABAQUS kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada, kısaca kaynak işlemi ve bunun kalın çeperli boru hattı imalatındaki uygulaması açıklanmaktadır. Tozaltı kaynağı işleminin iki ve üç boyutlu sonlu eleman (FE) modelleri geliştirilmiştir. Sonlu eleman analizleri kaynak süresince ergime ve ısının tesiri altında kalan bölgelerdeki ısı transferi karakteristiklerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İşlem parametreleri ve kaynaklı yapı geometrisinin etkileri, kaynak öncesi şekil verme işlemlerinden kaynaklanan artık gerilme ve distorsiyonlar göz önüne alınarak ve de alınmayarak hesaplanmıştır. Sonlu eleman tahminleri ile deneysel sonuçların karşılaştırmaları sunulmuştur. Kaynağın neden olduğu geometrik distorsiyonlar artık gerilmeler ve uzamaların işlem optimizasyonu sayesinde minimize edilebileceği gösterilmiştir. Böylelikle kanıtlanmıştır ki; sonlu elemanlar analizi, tozaltı kaynağı prosesini daha iyi anlamak amacıyla uygulanabilir ve dolayısıyla ürün özelliklerini optimize etme görüşüyle gelecekteki işlem geliştirme ve kontrolü için faydalı bir araçtır.

Tsirkas ve ark. (2002) tarafında yapılmış çalışmada lazer kaynağı prosesini simüle etmek amacıyla üç boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve lazer kaynaklı panel distorsiyonları tahmin edilmiştir. Sonlu eleman hesaplamalara, termal metalurjik ve mekanik yönleri de hesaba katan SYSWELD FE kodları kullanılarak yapılmıştır. Lazer kaynağı prosesinin simülasyonu termo mekanik analize dayanan lineer olmayan ısı transferi analizi kullanılarak yapılmıştır. Analiz, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini ve sürekli soğuma dönüşümü (CET) diyagramlarını kullanarak metalurjik dönüşümleri dikkate almaktadır. İncelenen geometri, farklı kaynak parametrelerinin kullanıldığı, kalın AH 36 gemi inşa çeliği plakalarından oluşmuş

bir alın kaynaklı numunedir. Deneysel testler, kaynaklı numunelerin distorsiyonlarının ölçülmesi ve sonlu eleman (FE) yaklaşımını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizi sonuçlarının deneysel ölçümleri uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Çam ve ark.'nın (1999) yapmış oldukları çalışmada, düz (yassı) mikro çekme numuneleri benzer ve benzer olmayan malzemelerin lazer ışını kaynaklı birleştirmeleri mekanik özelliklerinin belirlenmesi için uygun bulunmuştur. Lazer kaynağında ısıl çevrimlerin genellikle diğer geleneksel ark kaynağı proseslerinin içerdiğinden daha hızlı gerçekleşmesi ve ergime bölgesinin çok küçük boyutlarda olmasından dolayı bir lazer kaynağı birleştirme alanının çekme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zordur. Bu yüzden lazer ışını kaynaklarının kaynak metali ve ısının tesiri altındaki bölgenin (ITAB) çekme özelliklerini belirlemek için bir test prosedürü oluşturmak amacıyla düz mikro çekme numuneleri kullanarak lazer kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Düz çekme numunelerinin testine ilaveten, mekanik özellikler geleneksel enine numuneler ve yuvarlak çekme numuneleri ile incelenmiştir. Mikro çekme numunelerinin sonuçları standart yuvarlak çekme numuneleriyle karşılaştırılmış ve bu gibi birleştirmeler için mikro çekme numuneleri tekniğinin uygunluğu açıkça gösterilmiştir.

Zhu ve Chao (2002) tarafından yapılmış çalışmada, sonlu eleman kaynak simülasyon kodu (WELDSIM) kullanılarak detaylı üç boyutlu lineer olmayan termal ve termo mekanik analizler gerçekleştirilmiştir. Kaynak prosesinin bilgisayarlı simülasyonunda geçiş sıcaklığındaki her sıcaklık bağımlı malzeme özelliğinin, artık (kalan) gerilme ve distorsiyonların etkisini incelemek amaçlanmıştır. Alüminyum levhaların kaynağı, üç grup halindeki malzeme özellikleri yani sıcaklığın fonksiyonu olan, oda sıcaklığı değerleri ve kaynaktaki tüm sıcaklık değişimi sürecindeki ortalama değerler kullanılarak simülasyonda dikkate alınmıştır.

Wu ve ark.'nın (2001) yapmış oldukları çalışmada, iki çelik plakanın alın kaynaklı birleştirilmesi işlemi simüle edilmiştir. Sonlu eleman (FE) analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kaynak işlemi süresince oluşturulan sıcaklık dağılımını elde etmek için lineer olmayan geçici bir termal analiz yapılmıştır. Gerilme analizi, termal analizden elde edilen sıcaklıklar ile geliştirilmiştir. Termal ve gerilme analizlerinde genel amaçlı ANSYS FE programı kullanılmıştır. Kaynak metali, esas metal ve ısıdan etkilenen bölgenin malzeme özellikleri sıcaklık bağımlıdır. Ancak, kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgenin malzeme özelliklerine ilişkin bilgilerin eksikliğinden, her iki bölgenin termal ve mekanik özelliklerinin bu analizde esas metalin özelliklerinin aynısı olduğu varsayılmıştır. Yayımlanmış deneylerden ve nümerik simülasyonlardan elde edilmiş artık gerilme ve distorsiyonların sonuçlarıyla bu çalışmadakiler karşılaştırılarak modelin geçerliliği kanıtlanmıştır. Artık gerilmeler üzerine çeşitli faktörlerin etkileri incelenmiştir.

Meo ve Vignjevic (1999) tarafından yapılmış çalışmada, kaynaklı alüminyuma plakaların kaynak prosesi süresince sıcaklık dağılımları, distorsiyonlar ve artık gerilme alanlarını tespit etmek amaçlanmıştır. Sonlu eleman metodu kullanılarak kaynak prosesinin nümerik bir analizi gerçekleştirilmiştir. Nümerik analiz sonuçları deneysel testlerle karşılaştırılmış, sonuçta değerlerin birbirine uygunluğu gösterilmiştir.

Jang ve ark.'nın (2001) yapmış oldukları çalışmada, çok pasolu kaynakların mekanik özellikleri incelenmiş ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak kaynak deformasyonu ve artık gerilmeler simüle edilmiştir.

Zhang ve ark.'nın (2000) yapmış oldukları çalışmada, BWR reaktör göbeği örtüsünün (reaktör çekirdeğini çevreleyen silindirik bir kabuk) çevre kaynağındaki artık gerilmelerin belirlenmesi amacıyla bir modelleme sunulmuştur

Teng ve Lin (1998) tarafından yapılmış çalışmada, ANSYS sonlu eleman teknikleri kullanılarak çelik plakaların tek pasolu ark kaynağındaki artık gerilmeler belirlenmiştir. Ayrıca artık gerilmeler üzerine kaynak hızı, numune boyutu, dış mekanik kısıtlamalar ve ön ısıtmanın etkileri tartışılmıştır.

Gunaraj ve Murugan (2002) tarafından yapılmış çalışmada, yapısal çelik boruların tozaltı kaynağında proses değişkenlerinin ve ısı girdisinin etkilerini belirlemek amacıyla matematiksel modeller geliştirilmiştir.

Kuo ve Wu (2002) tarafından yapılmış çalışmaya göre, kaynaklı plakaları etkileyen deformasyon ve artık gerilmelerin miktarı ısı girdisi metodu; kaynak hızı ve etkileyen deformasyon ve geometrik koşullar; kaynaklı yapı sınırlamaları olmak üzere kaynak prosesinin üç yönü ile doğrudan ilişkilidir. ITAB'daki sıcaklık davranışı, genellikle bütün olarak tüm kaynaklı plakanın mukavemetini belirler. Araştırmayı bu bölgedeki sıcaklık davranışına yönlendirmek sadece bu bölgedeki sıcaklığın malzeme kompozisyonunu etkilemesinden değil, ayrıca görüntülemek için kaynak sistemine geri besleme sinyali sağlamak ve kaynak prosesini kontrol amacıyla da kullanılabilir.

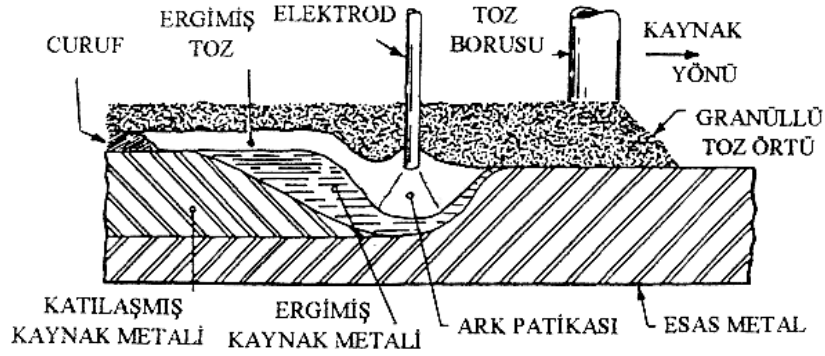
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Tozaltı Kaynağı

Tozaltı ark kaynağı yöntemi ilk olarak Mc Keesport, Pensilvanya’da kurulan bir boru fabrikası için National Tube firması tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem borulardaki boyuna dikişlerin kaynağını yapmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu yöntemin patenti 1930’da Robinoff tarafından alınmış ve daha sonra Linde Air Products firmasına satılmıştır. Tozaltı ark kaynağı yöntemi 1930’ların sonlarında ve 1940’ların başlarında savunma yapılanması süresince tersanelerde ve savunma sanayinde kullanılmıştır. Bu yöntem en verimli kaynak yöntemlerinden birisidir ve günümüzde güncelliğini korumaktadır. (Cary 1989).

Tozaltı kaynağı, 1933 yılından itibaren Amerika’da yayılmaya başlamış. 1937’den itibaren de Avrupa’da uygulama alanı bulmuş ve özellikle İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra gelişerek endüstride büyük önem kazanmıştır (Anık 1982, 2000). Türkiye’de ise likit (sıvılaştırılmış) petrol gazlarının kullanılmaya başlanmasıyla çok miktardaki LPG tüpünü imal etmek için 1960 yıllarında uygulanmaya başlanmıştır (Bir 1988). Çelik malzemelerin kaynağı için elverişli olan bu metot gemi inşa sanayinde, kaynaklı boru imalatında, sanayi kazanlarının ve basınçlı kapların imalatlarında, çelik konstrüksiyon imalatında, dolgu kaynağı işlerinde ve metal kaplama işlerinde kullanılmaktadır (Bir 1988, Gourd 1996).

Tozaltı kaynağı, temelde otomatik olarak kaynak yerine gelen çıplak tel elektrod ile iş parçası arasında oluşan arkı kullanan bir ark kaynağı prosesidir. Bu yöntemde ark, kaynak verme devamlı olarak dökülen koruyucu bir toz tabakası altında oluşur. Bu sebepten, bu yöntem tozaltı ark kaynağı olarak adlandırılmıştır (Anık 2000, Gourd 1996). Şekil 1’de yöntemin şematik diyagramı yer almaktadır.



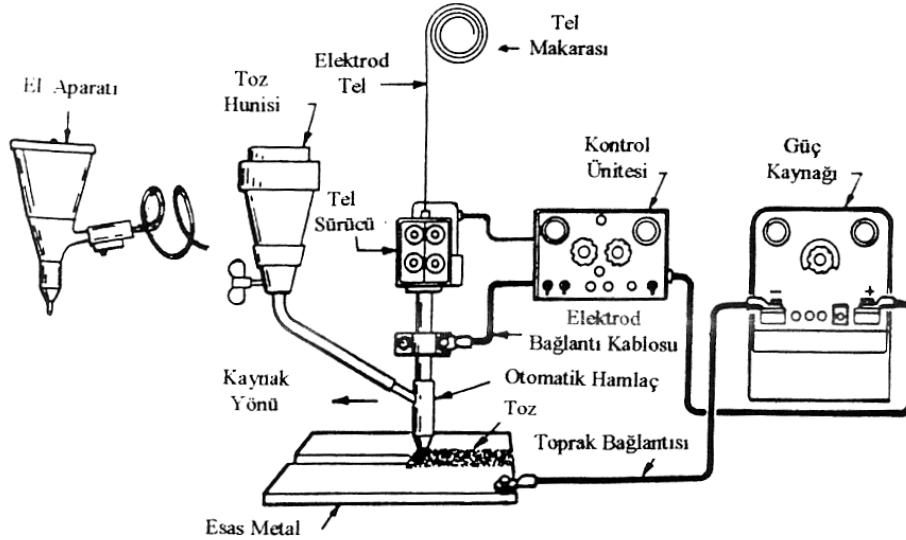
Şekil 1:

Tozaltı kaynağı yönteminin şematik diyagramı (Cary 1989).

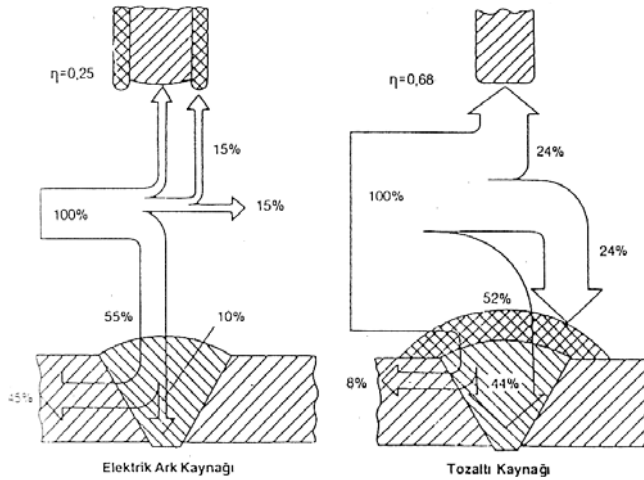
Elektrik arkı metalin ergimesi için gerekli ısıyı sağlar. Böylelikle arkın ürettiği yüksek miktardaki ısı birleştirilecek parçaların kenarlarını ertirirken, sürekli olarak kaynak bölgesine itilen elektrod eriyerek gerekli ilave metali sağlar. Elektrod eridiğinden, servo kontrolü motor tarafından arka doğru beslenir. Elektrodun besleme hızı erime hızına eşit tutulur. Böylece ark uzunluğu daima sabit kalır. Elektrod ve elektrodu besleyen sistem bir otomatik sistem tarafından bağlantı çizgisi boyunca hareket ettirilir. Kaynak edilen iş parçası sabit olup bir araba düzenine monte edilen ve kaynak kafası denilen toz hunisi, tel bobini, kontrol ünitesi birlikte hareket ederler. Kaynak süresince kaynak ilerleme hızı (araba hızı) sabit tutulur. Silindirik parçalarda ise kaynak kafası sabit olup, iş parçası döner. Toz, ark oluşumu başladığı anda dökülmeye başlar. Ark bu toz altında olduğundan dışarıdan görülmez. Toz denen tanecikli madde eriyerek bir cüruf örtüsü oluşturarak elektrik arkını tamamen çevreleyerek arkı ve eriyik kaynak metalini havanın etkilerinden korur. Kaynak tozu kaynak kafasının üzerinde bulunan bir toz kabından aşağıya dökülerek elektrodun etrafından bir lüle vasıtasıyla yayılır. Ergimemiş toz bazı makinalarda yeniden kullanılmak amacıyla bir vakum sistemi ile çekilerek depolanır ve basınçlı hava ile fazla toz tekrar gönderilir (Cary 1989, Macun ve ark. 1980, Gourd 1996, Bir 1988). Tozaltı kaynağı donanımının şematik olarak gösterilişi Şekil 2’de verilmektedir.

Tozaltı kaynağı yüksek kaynak hızı, güzel kaynak görünüşü ve doğru uygulandığında hatasız kaynak dikişleri verdiği için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca tozaltı kaynağı otomatik bir kaynak usulü olmasının yanı sıra yüksek güçlü de bir yöntemdir. Bir paso ile 85 mm, iki paso ile 180 mm ve çok paso ile 300 mm kalınlığa kadar parçaların kaynağını yapmak mümkün olmaktadır. Kaynak yapılabilecek en ince saç ise 1,2 mm’dir. 5-50 mm arasındaki uygulamalar daha yaygındır. Gemi inşa endüstrisinde, basınçlı kaplar ve depolama tankları imalinde, demir yolu vagonları, otomotiv endüstrisi, boru imali, çelik

binalar ve köprüler için kolon ve kirişler imali, inşaat makinaları yapımı gibi alanlarda çeşitli uygulamaları vardır. Dakikada 2 m ve daha yüksek kaynak hızları ile çalışılabilir. Bu yöntemde normal elektrik ark kaynağına nazaran elektrod teli daha yüksek bir akım şiddeti ile yüklendiğinden daha derin nüfuziyetli ve geniş banyolu dikişler elde edilir. Örneğin 4 mm çapındaki bir elektrodla elektrik ark kaynağında 150-190 amper arasında kaynak yapılırken, tozaltı ark kaynağında 400-650 amper arasında bir akım ile kaynak yapılabilir. Derine işleme kabiliyeti iyi olduğundan kaynak ağzı açmadan 30 mm'ye kadar kalınlıktaki parçaların iki taraftan kaynağında kullanılabilir. Şekil 3'de örtülü elektrod ile yapılan elektrik ark kaynağı ve tozaltı kaynağındaki ısı bilançosu değerleri görülmektedir (Anık 1982, 2000, Macun ve ark. 1980).



Şekil 2:  
Tozaltı kaynağı donanımı şematik diyagramı (Cary 1989).



Şekil 3:  
Elektrik ark kaynağı ve tozaltı kaynağındaki ısı bilançosu (Anık 2000).

Normal yapı çelikleri, hafif alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, bakır ve bakır alaşımları bu yöntemle kaynatılabilirler. Alüminyum için uygun kaynak tozu son zamanlarda geliştirilmiş olmakla beraber henüz ticari uygulaması yoktur. Titanyum için de aynı şeyi söylemek mümkündür. Dökme demirin bu yöntemle soğuk kaynağı mümkün değildir (Macun ve ark. 1980). Yüksek ve orta karbonlu çelikler ile alaşımlı çeliklerin kaynağı da bu yöntemle yapılabilir, ancak uygulamada tercih edilmemektedir. Deneysel olarak bakır alaşımları, nikel alaşımları ve hatta uranyumun kaynağında kullanılmıştır (Cary 1989).

Bu yöntem daha ziyade yatay pozisyonda kaynağa elverişlidir. Bununla beraber 18-20° meyille yukarıdan aşağıya 6-7° meyille aşağıdan yukarıya kaynak uygulamaları vardır. Ayrıca gerekli toz tutma sistemleri sağlanarak yan pozisyonda kaynak yapılabilir.

Alın kaynağında bir pasoda 15 mm'ye kadar kalınlıkları kaynatmak, köşe kaynaklarında ise tek pasoda 6 mm boğaz kalınlıkları sağlamak mümkündür (Macun ve ark.1980).

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, St 52-3 kalitesindeki alaşımsız yapı çelikleri (imalat çelikleri) tozaltı kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. St 52-3 çeliğinin DİN 17100'e göre kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

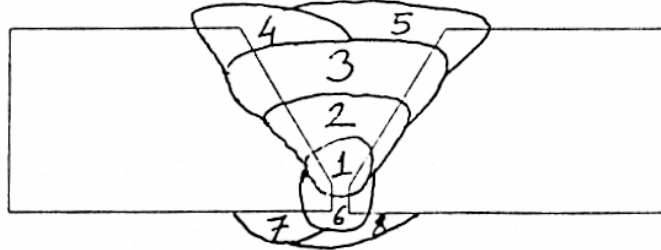
**Çizelge 1.**  
**St 52-3 çeliğinin kimyasal bileşimi.**

Eriyik Analizi (%)						Parça Analizi (%)					
C	Si	Mn	P	S	N	C	Si	Mn	P	S	N
0,20	0,55	1,60	0,040	0,040	-	0,22	0,60	1,70	0,050	0,050	-

**Çizelge 2.**  
**St 52-3 çeliğinin mekanik özellikleri.**

Çekme Dayanımı R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı R <sub>eH</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama %	Çentik-Darbe Dayanımı ISO-V(j)
490-630	Min 345	20	-20°C'de min 27

20 mm kalınlığında 125 x 500 mm boyutlarındaki iki plakanın alın kaynağı ESAB LAW 1000 DC otomatik tozaltı kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynağa ilişkin kaynak ağızı detayı Şekil 4'de ve kaynak parametreleri de Çizelge 3'te gösterilmiştir.



*Şekil 4:*  
*Kaynak ağızı detayı. (Ağız açısı 60°)*

**Çizelge 3.**  
**Kaynak parametreleri.**

Kaynak Teli Tipi	Tel Çapı (mm)	Paso No	Akım Cinsi	Akım (Amper)	Voltaj (Volt)	Kaynak Hızı (cm/dk.)
SDA-S2Si	4	1	DC	500	27	70
		2		600	29	70
		3		650	29	65
		4		650	29	65
		5		650	29	70
		6		500	27	70
		7		600	30	70
		8		500	28	70

Kaynak metali olarak 4 mm çapındaki SDA-S2Si tozaltı kaynak teli kullanılmıştır. Kaynak metalinin kimyasal bileşimi Çizelge 4'te görülmektedir. Kaynak metalinin mekanik özellikleri ise Çizelge 5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.**  
**Kaynak metalinin kimyasal bileşimi (%).**

C	Mn	Si	P	S
0,1	1,0	0,3	<0,025	<0,025

**Çizelge 5.**  
**Kaynak metalinin mekanik özellikleri.**

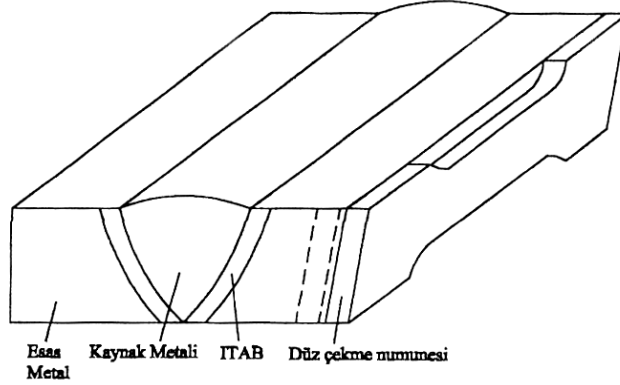
Çekme Dayanımı $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı $R_{eH}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama %	Çentik-Darbe Dayanımı ISO-V(j)
>460	530-690	>20	-20°C'de > 60, -40°C'de > 47

Kaynak tozu olarak ESAB OK 10.71 (EN 760'a göre SA AB 1 67 AC H5) kullanılmıştır. Kaynak tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 6.**  
**Kaynak tozunun kimyasal kompozisyonu (%).**

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaF <sub>2</sub>	MgO	FeO	TiO	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
18,2	31,1	6,1	188	27,3	3,5	1,2	0,005	2,5	0,3

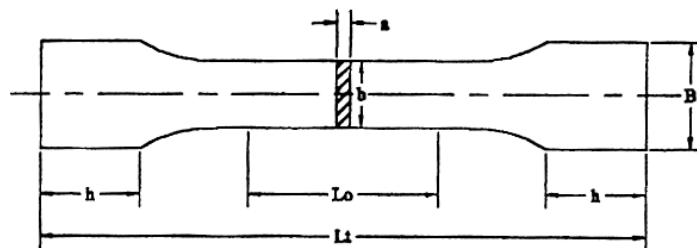
Kaynak işlemi yapıldıktan sonra kaynak metali, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve esas metalin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kaynak edilmiş parçadan Şekil 5'de görüldüğü gibi kaynak dikişine paralel düz çekme numuneleri soğutma sıvısı kullanılarak freze ile işlenmek suretiyle çıkarılmıştır. Numunelerin yüzeyleri taşlanarak yüzey pürüzlülükleri giderilmeye çalışılmıştır. Elde edilen numunelerin boyutları Çizelge 7'de yer almaktadır.



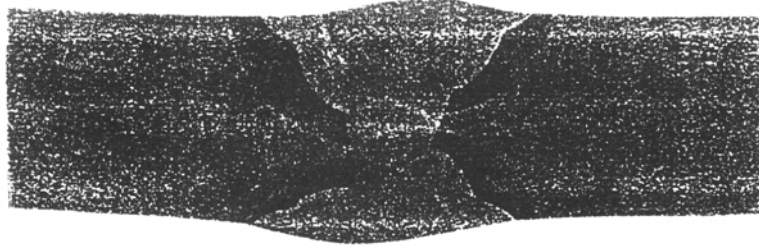
*Şekil 5:*  
*Çekme numunelerinin çıkarılışının şematik gösterilişi.*

**Çizelge 7.**  
**Numunelerin boyutları.**

Numune No	[mm]					
	a	b	B	h	L <sub>0</sub>	L <sub>1</sub>
1	1,63	12,0	19	35	50	160
2	1,70	12,5	19	35	50	160
3	1,65	13,6	19	35	50	160
4	1,65	12,4	19	35	50	160
5	1,69	12,6	19	35	50	160
6	1,65	12,4	19	35	50	160
7	1,64	12,5	19	35	50	160



Kaynak metali ve ITAB bölgelerinin belirlenebilmesi amacıyla da kaynak kesitinden bir numune çıkartılarak yüzey parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulup kaynak kesitinin metalografik görüntüsü optik mikroskop kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 6). Numunelerin çekme deneyleri Zwick marka çekme testi cihazıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 8’de yer almaktadır.



Şekil 6:  
Kaynak kesitinin makrografisi (Ebat 20x75 mm).

Çizelge 8.  
Çekme deneyi sonuçları.

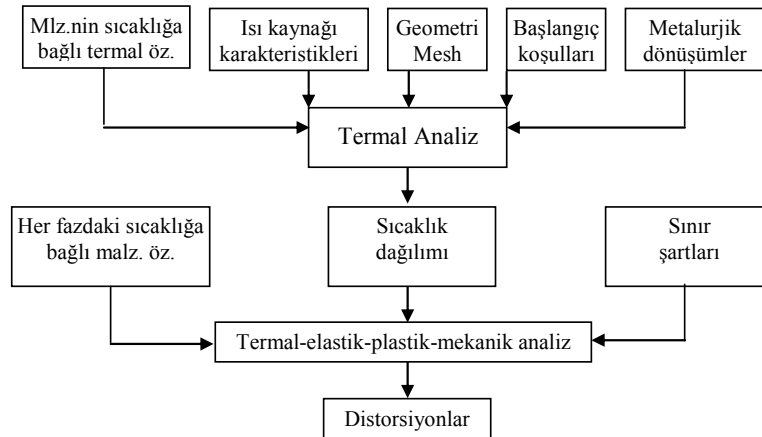
Test No	Malzeme	E-Modülü E (Gpa)	Akma Muk. $R_{P0,2}$ (Mpa)	Çekme Muk. $R_m$ (Mpa)	Uzama %
1	ITAB	263	404	585	16,9
2	ITAB	234	427	568	17,5
3	Kaynak Metali	154	361	453	18,0
4	Kaynak Metali	158	369	535	20,7
5	Esas Metal	128	339	537	18,1
6	Esas Metal	233	309	549	24,2

### 3.3.2. Sonlu Eleman Modellenmesi

Kaynak prosesinin nümerik simülasyonu, yıllardır kaynak araştırmalarında en önemli konulardan birisi olmuştur. Simülasyon sonuçları, kaynak prosesindeki bazı kompleks olguların fiziksel esaslarını açıklamakta kullanılabilir. Ancak, kaynak prosesinin simülasyonunu termal, mekanik ve metalurjik fenomenlerin etkileşimlerini içerdiğinden kolay bir iş değildir. Kaynak prosesinin simülasyonunun en önemli yönlerinden birinin metalurjik transformasyonların modele girilmesi olduğu birçok araştırmacı tarafından kabul edilmiştir.

Tozaltı kaynağının simülasyonu için ANSYS sonlu eleman paket programı kullanılarak iki boyutlu bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Kaynak ağzı detayı dikkate alınarak modelin mümkün olduğu kadar gerçeğe yakın olması planlanmıştır. İki boyutlu kaynaklı yapı geometrisi çeşitli tipteki elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analiz iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak termal analiz yapılmış ve zamana bağlı olarak elde edilen sonuç sıcaklık alanları mekanik analize girdi olarak ikinci aşamada kullanılmıştır. Şekil 7’deki akış şeması sonlu eleman (FE) hesaplamasında izlenen prosedürü göstermektedir.

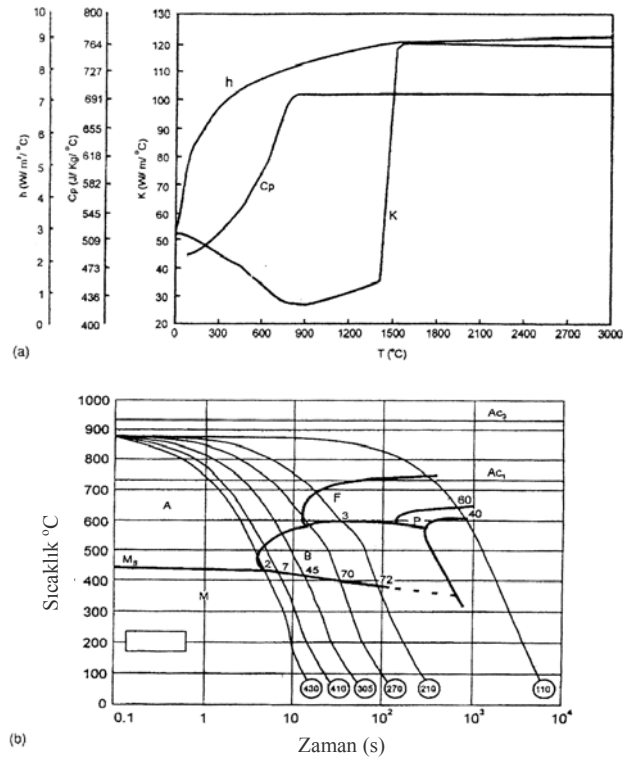


Şekil 7:  
Kaynak simülasyonu prosedürü akış şeması.



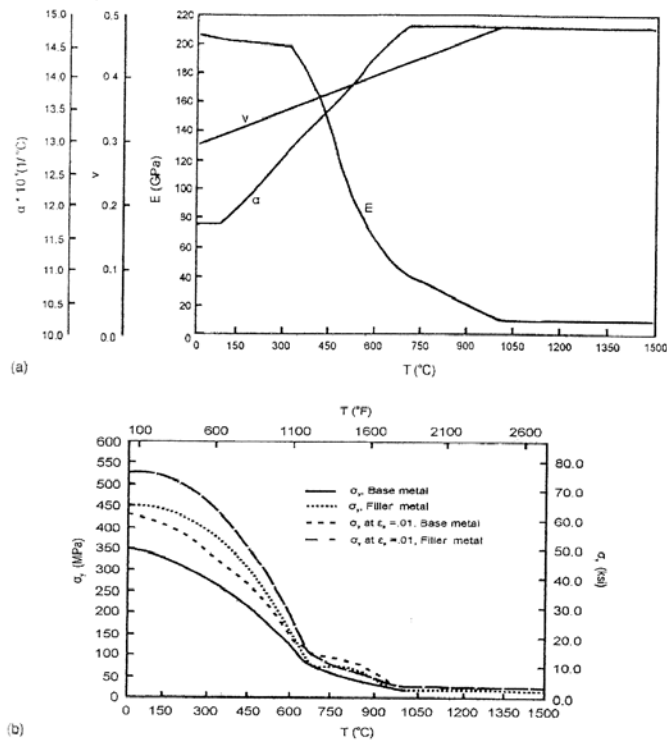
Termal analiz sıcaklık bağımlı termal malzeme özellikleri kullanılarak yapılmıştır. Bu özelliklere ait değerler ve sürekli soğuma dönüşümü diyagramı Şekil 8’de gösterilmiştir.

Termal analiz sonuçları mekanik analize girdi olarak sıcaklığa bağlı mekanik özelliklerle birlikte kullanılmıştır. Sıcaklık bağımlı mekanik özelliklere ait değerler Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 8:

- a) Termal malzeme özelliklerinin sıcaklıkla değişimi,  
b) Sürekli soğuma dönüşümü diyagramı (Tsirkas ve ark. 2002)



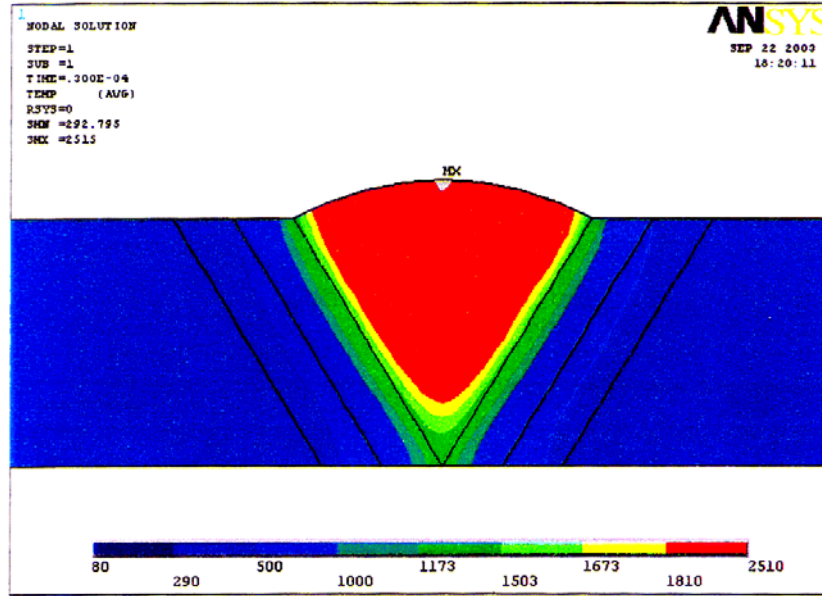
Şekil 9:

- Mekanik malzeme özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (Tsirkas ve ark. 2002)  
a) Elastisite modülü (E), poisson oranı (v) ve ısı genleşme katsayısı ( $\alpha$ )  
b) Malzemenin akma mukavemeti ( $\sigma_y$ )

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Termal Analiz Sonuçları

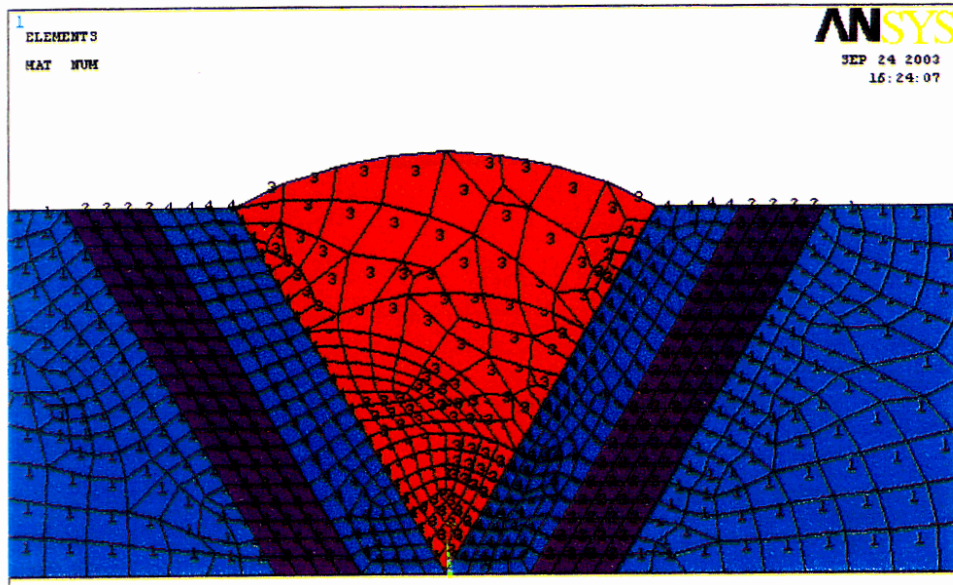
Kaynak işlemi sırasında yüksek ısı girdisine maruz kalan parçada kaynaktan hemen sonra oluşan sıcaklık dağılımları zamana göre belirlenmiştir. Başlangıç sıcaklık değeri 2573 Kelvin olarak girilmiştir. Analizde iki boyutlu termal iletim için dört düğüm noktası içeren, tek serbestlik dereceli Plane 55 kodlu düzlem eleman kullanılmıştır. Tüm sıcaklık birimleri Kelvin, zaman birimi ise saat olarak verilmiştir.



Şekil 10:  
Sıcaklık dağılımı (0,108 sn.'deki).

### 4.2. Mekanik Analiz Sonuçları

Termal analizde elde edilen sonuçlar kullanılarak mekanik analiz gerçekleştirilmiştir. Malzemenin mekanik ve termal özellikleri için deneylerden elde edilen ve literatürden bulunan değerler kullanılmıştır. Analizde katı yapı modellemede kullanılan dört düğüm noktası içeren, iki serbestlik dereceli Plane 42 kodlu düzlem eleman kullanılmıştır. Parça dört ayrı bölgeye bölünerek analiz edilmiştir. Birinci bölge esas metal, ikinci bölge ısı tesiri altındaki bölüm, üçüncü bölge kaynak metal ve dördüncü bölge ısı tesiri altında kalan ara bölgeyi temsil etmektedir.



Şekil 11:  
Sonlu eleman modeli.

## 5. KAYNAKLAR

1. Anık, S.(1975) Kaynak Tekniđi (Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti). İ.T.Ü. Matbaası, 3, 10–155. İstanbul.
2. Anık, S. (1975) Kaynak Tekniđi (Tozaltı Kaynağı ve Koruyucu Gazla Kaynak). İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, 2, 1-106 İstanbul.
3. Anık, S. Dikiciođlu A. ve Vural. M. (1997) İmal Usulleri. Birsen Yayınevi, 1. 6–9, 30–35. İstanbul.
4. Anık,S, Anık E.S. ve Vural M. (2000) 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı. Birsen Yayınevi,. İstanbul.
5. Anonim, A. (1988) Kaynak Bilimi. Oerlikon Yayınları, 3, 125–132 İstanbul.
6. Bir, A. 1988 İmal Usulleri (Ders Notu). U.Ü. Basımevi, Bursa.
7. Cary, H.B. (1989) Modern Welding Technology, Prentice Hall, New Jersey.
8. Çam, G., Erim, S. Yeni, Ç. and Koçak, M. (1999) Determination of Mechanical and Fracture Properties of Eser Beam Welded Steel Joints. Welding Journal Research supplement. 193-201.
9. Çiğdem, M. (1996) İmal Usulleri. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
10. Çuhadar, N, Sağışman M. ve Anık, S. (1960) Umumi Kaynak Terimleri Lugatı. İ.T.Ü. Makine Fakültesi Malzeme ve İmal Usulleri Enstitüsü Yayınları, 13, 91. İstanbul.
11. Giachino, J. Weeks, W, and Johnson. G. S, (1973) Welding Technology. American Technical Publishers Inc, Illions.
12. Eryürek, İ.B., Bodur, O. ve Dikiciođlu, A. (1996) Kaynak Teknolojisi Esasları. Birsen Yayınevi, İstanbul.
13. Gunaraj, V. and Murugan, N. (2002) Prediction of Heat –Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural steel Pipes. Welding Journal Research 94-102.
14. Gültekin, N. (1991) Kaynak Tekniđi. Engin Ofset Matbaası, İstanbul.
15. Jang, G.B., Kim, H.K. and Kang S.S. (2001) The Effects of Root Opening on Mechanical Properties, Deformation and Residual Stres of Weldments. Welding Journal Research Supplement. 80–89.
16. Kuo, H.C. and L.J. W. (2002) Prediction of Heat-affected Zone using Grey Teory. Journal of Materials Processing Technology, 120. 151–168.
17. Lancaster , J.F. (1993) Metallurgy of Welding. Chapman &Hall, London.
18. Macun, A, Sungur, M. ve Gürcan. M. (1980) Tozaltı ve Gazaltı Kaynak Teknikleri ve Uygulaması. Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi (SEGEM), 67,38-70, Ankara.
19. Meo, M. and Vıgnjević, R. (1999) Welding Simulation Using FEA. The World Engineering Congress&Exhibition 99.59-64. Malaysia.
20. Teng, T.L. and Lin C.C. (1998) Effect of Welding Conditiond an Residual Stresses due to Butt Welds. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 75. 857-864.
21. Tsirkas, S.A., Apanikos P. and Kermanıdı, T. (2002) Numerical Simulation of the aser Welding Process in Butt-joint Specimens. Journal of Materials Processing Technology, 6403. 1–11.
22. Tülbentçi, K. (1984) Kaynak Simülasyonu ve Uygulamadaki Önemi. I. Ulusal Kaynak Sempozyumu Tebliğ Özetleri. İ.T.Ü. Makina Fakültesi Malzeme ve İmal Usulleri Birimi. 13. 26. İstanbul.
23. Wen, S. W, Hilton P. and Farrugia, D.C.J. (2001) Finite element Modelling of a Submerged Arc Welding Process. Journal of Materials Processing Technology, 119. 203-209.
24. Wu, .A. Syngellakis, S. and Mellor. B.G. (2001) Finite Element Analysis of Residual Stresses in a Butt Weld. The Post Graduate Conference in Engineering Materials Proceedings, University of Southampton.
25. Zhang, J, Dong P, Brust F.W, Shack W.J., Mayfield M.E. and Mcneil M. (2000) Modelling of Weld Residual Stresses in Core Shroud Structures. Nuclear Engineering and Design, 195. 171–187.
26. Zhu, X.K. and Chao Y.J. (2002) Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Welding Simulation. Computers and Structures, 80. 967–976.