



MAG-TIG- Tozaltı Kaynak Bağlantısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal Analizi

Thermal Analysis with a Finite Element Method of MAG-TIG-Submerged Arc Welded Joint

Necat Altınkök

Sakarya Üniversitesi, Hendek Meslek Yüksekokulu, Sakarya, Türkiye

Öz

Kaynak yöntemi en çok tercih edilen birleştirme metodlarından biridir. Kaynak işlemi yapılan numunelerin emniyetinin ve kullanılan yapının güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Isıl gerilmeler kaynak metalinde ve ana malzemedeki makro, mikro yapıyı ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu çalışmada, St 37 çelik malzemeler Metal Active Gas (MAG), Tungsten Inert Gas (TIG) ve Tozaltı kaynak yöntemleriyle birleştirilmiştir. Malzemelerin ısıl özellikleri sıcaklığa göre değişimi incelenmiş ve kaynaklı yapıların nufuziyetinin makro incelemeleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Kaynatılan parçaların sayısal olarak modellenmesi sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Kaynak işlemi sırasında meydana gelen ısıl gerilmeleri ve termal analizleri deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile hesaplanmış, elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbiri ile yakın olduğu görülmüştür. Optimizasyon metodu ile kaynak işleminden sonra malzemelerin özellikleri tahmin edilebildiği gibi kaynak parametrelerinin simülasyonu da sağlanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: MAG kaynağı, Makro yapı incelemeleri, Sonlu elemanlar metodu, TIG kaynağı, Tozaltı kaynağı

Abstract

Welding is one of the most used methods to join metal parts in Metal world. So, the quality of welded parts is very important for the safety of whole welded construction. Thermal stresses affect the microstructure and macrostructure of filler and base metals. These changes also affect mechanic properties of the material. In this study, macro structural investigations of MIG, TIG and SAW for St 37 steel were also studied. Thermal properties of the materials changes as a function of temperature. Thus, in this study, the properties of St 37 steel part were defined in accordance with temperature, which were taken from the reliable literature in Finite Element (FE) Analyses. In order to see heat stress during welding operation, ABAQUS software was used for thermal analysis. According to the experiments and FE Analyses, it is concluded that experimental and modeling results are very similar.

Keywords: MAG welding, Macro structure, Finite element method, TIG welding, Submerged arc welding, Thermal analysis

1. Giriş

Kaynak yöntemi endüstride çok yaygın olarak kullanılan metodlarından biridir. Kaynak yöntemi ile kaynak banyosunun ergiyik bölgesinin, elektromanyetiklik özelliği, faz yapısı, termal ısı geçişi, ergiyik bölgenin kimyasal yapısı, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB), kaynak işlemi sonrası sıcaklığın etkisiyle kaynak bölgesindeki artık gerilmeler, kaynak metali ve ana malzemenin mikro ve makro yapısı gibi özellikler bilinmesi önemlidir. Araştırmacılar çalışmalarında kaynak yönteminin fiziksel ve metalürjik yapısı, kaynak ve ITAB bölgesi mikro ve makro yapısının özellikleri ve

kaynak yönteminin sayısal simülasyonu, kaynak yönteminin araştırılması ve modellenmesi kaynak işleminden sonra meydana gelen uzamaların, distorsiyonların ve artık gerilmelerin belirlenmesinde kullanılmaktadırlar (Anık 1975, Findık 2008).

Bilgisayar tabanlı matematik simülasyonu ile deneysel çalışmalar yapılmadan sonuçlar tahmin edebilir. Kaynaktaki matematiksel modelleme, bir eşitlik kurarak kaynak işlemini tanımlamaktadır. Bu modellemeler, işlem parametreleri ile kaynak işlemi sonrasında metalürjik özellikler ve yapıları arasındaki ilişkiyi gösterebilir. Kaynaktaki işlem parametrelerini ve uygun kaynak şartlarını tanımlamaya yardımcı olabilir. Bazı modellerin doğruluğu, yapıdaki gerilim analiz modellerini ve ısı transferlerini tanımlamak için kullanılan

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: altinkok@sakarya.edu.tr

verilerin doğruluğuna bağlıdır. Nümerik modelleme ile yapılan sonuçların geçerli olması için verilerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması gerekir (Anık 1975).

Kaynak esnasında oluşan termal dalgalanmalar ve kaynak geometrisinin tahmini için kaynak havuzundaki ergime bölgesinin ve ısı transferinin detaylı olarak anlaşılması gerekmektedir. Son yıllarda, kaynak havuzundan iletilen ısı transferinin önemi vurgulanmaktadır. Matematiksel modellemede ısı iletimi için önemli olan faktörler ise yüzey geriliminin değişimi, elektromanyetik ve sınır kuvvetleridir. Birçok çalışmada kaynak havuzundaki ergime bölgesinin yapısı düzgün varsayılır. Fakat deneysel incelemeler ve teorik hesaplamalarda belirtildiği gibi kaynak havuzu ergime bölgesinde düzgün olmaktan çok, düzensiz bir oluşum söz konusudur (Fındık 2008).

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

Tozaltı kaynak yöntemi, iş numunesi ile metal tel elektrot arasında, ark oluşturarak bunların kaynak bölgesi toz örtüsü ile korunur (Akkağ 2006). Metal Active Gas (MAG) yöntemi, sürekli ergiyen tel elektrot ile iş numunesi arasında CO₂ gazı altında metallerin birleştirildiği ark kaynağı yöntemidir. Ergimiş kaynak banyosunun ve arkın Tungsten Inert Gas (TIG) kaynağı erimeyen tungsten elektrod ile Ar koruyucu gaz altında yapılan kaynak yöntemidir (Tükkan 2008, Gözütok 2009). Ark kaynağı işleminde, metal, gaz ve toz reaksiyonları sonucu kaynak bölgesinin akışkanlığı, elektromanyetiklik, faz yapısı, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB) gibi çözümü zor mekanik ve kimyasal etkileşimlerin karmaşık bir işlemidir (Wen vd. 2001). Daha önceleri, konuyla ilgili bazı araştırmacı ve bilim insanlarının yaptıkları çalışmalarda kaynağın ve kaynak metalinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, termal analizlerinin optimizasyon ile belirlenmesinin gerektiğini vurgulamışlardır.

Kaynak işlemi sonucunda ergiyik bölgede meydana gelen ısı çevrim, kaynak bölgesinin yapısını etkilemekte ve mekanik özelliği farklı yapı meydana getirmektedir. Isının

tesiri altında kalan bölge ergiyik bölgeye yakın yerde meydana gelir, bu bölgede sertlik ve mikro-makro yapı incelemeleri yapılabilmektedir. Kaynak işlemi esnasında meydana gelen ısının soğumanın ve ısınmanın meydana geldiği ITAB de malzemenin iç yapısı homojen değildir. Bu nedenle ITAB bölgesinin yapısı hakkında bilgi edinebilmek için optimizasyonu yapılması gerekmektedir (Tülbenççi 1984). ITAB bölgesinin mekanik özellikleri simülasyon ile belirlenmesi, farklı alanlardaki kaynak işlemi görmüş yapıların güvenilirliği açısından önemlidir.

Kaynak işleminin modellenmesi, birleştirme yöntemlerinin önemli uygulamalarından biridir. Modelleme sonucunda elde edilen sonuçlar, kaynak işlemindeki karmaşık fiziksel özelliklerin esaslarını göstermekte ve ayrıca kaynak işleminde kullanılan parametrelerinin simülasyonunda kullanılabilir. Fakat birleştirme yönteminin modellenmesi mekanik ve termal özelliklerin etkilediğinden basit bir olay değildir. Kaynak işleminin simülasyonunda metalürjik yapıların modellemeye etkisi olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir.

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

Yapılan birçok araştırma da ark kaynağı yöntemi, genellikle sonlu elemanlar metodu olan ABAQUS programı ile modellenmiştir. Uygulanan kaynak yöntemlerinde iki ve üç boyutlu sonlu eleman (SE) metodları kullanılmaktadır. Sonlu eleman yöntemi ile yapılan analizler kaynak işleminde ergime ve ITAB deki ısı geçişi özelliklerini incelemek için yapılmaktadır. Uygulanan parametreler ve kaynaklı yapının şekli, kaynak işleminden önce soğuk şekillendirme sonucu içyapıda meydana gelen artık gerilmeler ve distorsiyonlara dikkat edilerek hesaplanmaktadır. Modelleme işleminde, simülasyon sonuçları ile deneysel olarak bulunan sonuçlar karşılaştırmaktadır. Kaynak işlemi sonunda meydana gelen şekilsel çarpılmalar, uzamaları ve artık gerilmelerin yapılan modelleme işlemi ile düşürülebileceğini gösterilmiştir. Bunun sonucu olarak; sonlu elemanlar metodu, kaynak işlemi sonucunu anlamak için yapılabilir ve malzemelerin özelliklerini araştırmak ve geliştirmek için gelecekte faydalı bir araç olarak kullanılabilir (Wen vd. 2001, Gunaraj vd. 2002, Jang vd. 2001, Zhu 2002).

Çizelge 1. St 37 çelik malzemesinin kimyasal özellikler.

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

Çizelge 2. St 37 çelik malzemesinin mekanik özellikleri.

Tensile strength, σ_{uts} (MPa)	363-491
Yield strength, σ_{ys} (MPa)	235
Young module, E (GPa)	206.182
Isı genleşme katsayısı	0.000012

Çizelge 3. MAG ve Tozaltı kaynaklarında kullanılan elektrotların kimyasal bileşimi.

Simge	Kimyasal bileşim (% ağırlık)					
	C	Mn	Si	P	S	Cu
SG2	0.07-0.010	1.4-1.3	0.7-1.0	0.025	0.025	0.30
SG3	0.07-0.010	1.6-1.9	0.8-1.2	0.025	0.025	0.30

Çizelge 4. MAG ve TIG kaynaklarında kullanılan karışım gazının kimyasal bileşimi.

Karışım oranı (%)	
Ar	CO ₂
82	18

Bu çalışmada; farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinin deneysel ve olarak incelemek, buradan elde edilen sonuçlar ile bilgisayar destekli termal analizlerinin yapılarak modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ergiyik bölgenin emniyeti açısından önemli olan ısının tesir altında kalan bölgenin mukavemet özelliklerinin tespiti için MAG-TIG-Toz altı kaynak yöntemleri seçilmiştir. Kaynak edilen numunelerin kaynak bölgesinin deneysel olarak araştırılarak, elde edilen sonuçlar ile modellenmesi yapılmıştır. Kaynaklı bölgesinin mikro yapısı, kaynak parametreleri gibi özellikler kullanılarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Deneysel çalışmada, Tozaltı kaynağı için 300x100x15 mm, MAG ve TIG kaynağı için 150x100x10 mm boyutlarında St 37 düşük alaşımlı çelik malzeme kullanılmıştır. Çizelge 1.'de kaynak işleminde kullanılan St 37 çelik malzemenin kimyasal içeriği, Çizelge 2'de kaynak işleminde kullanılan St 37 çelik malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir. Marka ve mikro yapı incelemeleri Nikon SM2 8000 makine ile yapılmıştır.

TIG kaynak işlemi Esab Origo TIG 3001 marka kaynak makinesi ile DIN 32528 standardında, erimeyen tungsten elektrod ile 36cm/dak kaynak hızında gerçekleştirildi. Kaynak makinesi 22 volta ve 135 ampere ayarlandı. Kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korumak için Ar₂ gazı kullanılmıştır.

MAG kaynağı işlemi Origo™ Mig Pro C 280 kodlu kaynak makinesi 30 volt ve 200 ampere ayarlanarak Geka SG2 standardında elektrod teli 4.2m/dak tel ile hızı ve 36cm/dak kaynak hızımda gerçekleştirilmiştir. Ergiyik bölgeyi havanın zararlı gazlarından korumak için CO₂ gazı kullanılmıştır. Çizelge 3.'de MAG ve Tozaltı kaynaklarında kullanılan elektrotların kimyasal bileşimi, Çizelge 4.'de MAG ve TIG kaynaklarında kullanılan karışım gazının kimyasal içeriği verilmiştir.

Tozaltı Kaynak işlemi Şekil 1.'de görülen ESAB A6 Mastertrac marka kaynak makinesi 35 volta ve 500 ampere ayarlanarak Geka SG3 standardında elektrod teli ile 4,2 m/dak, tel ve 36 cm/dak kaynak hızı ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminde kaynak banyosunu havanın zararlı etkilerinden korumak amacıyla bazik GEKA ELIFLUX BFB tip kaynak tozu kullanılmıştır.

Termal analizlerin tespiti için Sakarya Üniversitesi adına lisanslı Abaqus 6.9-1 programı kullanılarak sonlu elemanlar metodu (SEM) ile simülasyon uygulaması yapılmıştır. Kullanılan element tipi genel olarak quad (dört yüzlü iki kenarlı) olmakla birlikte numunenin küçük bir kısmında

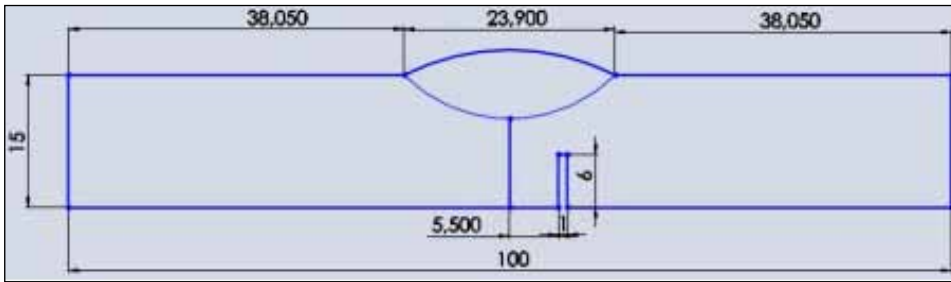
triangular eleman kullanılmıştır. Malzeme aksenal olduğu için iki boyutlu modellenmiştir. Şekil 2.'de modellenen numunenin boyutları görülmektedir. Deneysel sıcaklık ölçümleri şekilde görülen kısımdan 6 mm lik derinlikten PthRh-Pt tip kodlu termokupul ile ölçülmüş ve modelleme sıcaklık değerleri ABAQUS 6.9-1 programı kullanılarak elde edilmiştir.

2.2. Kaynak İşlemleri

TIG kaynak yöntemi, kaynak makinesi 22 volta ve 135 ampere, torc (-) kutuba ve doğru akıma (DC) ayarlanmıştır. Erimeyen saf tungsten elektrod ve kaynak dikişini havanın



Şekil 1. Tozaltı kaynak makinesi.



Şekil 2. Simülasyonu yapılan numune.



Şekil 3. TIG kaynak dikişinin şematik görüntüsü.

zararlı etkilerinden korumak için argon gazı altında 36cm/dak kaynak hızı ile Şekil 3.'de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kaynak dikişi gözeneksiz ve sıçrama kayıpları az olmuştur. Dikiş yüzeyinde cüruf erimeyen elektrod kullanıldığı için çok az ya da hiç meydana gelmemiştir.

MAG kaynak yöntemi, kaynak makinesi 30 volta ve 200 ampere, torc (-) kutuba ve doğru akıma (DC) ayarlanmıştır. Yarı otomatik kaynak olan MAG kaynak yöntemi ile 0.8 mm kalınlığında GEKA SG1 ilave tel ve kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korumak için karbondioksit gazı altında 4.2 m/dak tel ve 36 cm/dak kaynak hızı ile Şekil 4.'de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kaynak dikişi gözeneksiz ve gaz altında yapıldığı için dikiş yüzeyinde cüruf meydana gelmemiştir.

Toz altı kaynak yöntemi, kaynak makinesi 35 volta ve 500 ampere, torc (-) kutuba ve doğru akıma (DC) ayarlanmıştır. Tam otomatik kaynak yöntemi olan Toz altı kaynak yöntemi ile 3.2 mm kalınlığında Geka S2 ilave tel ve kaynak dikişini havanın zararlı etkilerinden korumak için GEKA ELIFLUX BFB bazik tip kaynak tozu altında 70 cm/dak kaynak hızı ile Şekil 5.'de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kaynak dikişi gözeneksiz ve toz altında yapıldığı için dikiş yüzeyinde cüruf meydana gelmiştir. Cürufun meydana gelmesi dikişin yavaş soğumasını sağlar ve çatlamasına engel olur bu özellik kaynak dikişinin mukavemetini artırır.



Şekil 4. MAG kaynak dikişinin şematik görüntüsü.

TIG-MAG ve Toz altı kaynak yöntemleri ile kaynatılmış numunelerin ısının tesiri altında kalan bölge ve kaynak bölgesinin makro yapısı görüntüsünden nufuziyet ölçümleri gerçekleştirildi. Kaynak dikişinin yüksekliği ve nufuziyeti ile a new vision program 10x büyütme ile ölçülmüştür. Makro yapılar Şekil 6.,7. ve 8.'de verilmiştir. Mikro yapı şekillerinde kaynak dikişinin yüksekliği ve nufuziyeti ölçülmüştür. Nufuziyet ölçüm değerleri 1.71, 2.62 ile 3.01 mm arasında değişmektedir.

Şekil 6.'da 22V, 135A, 3.6m/h da TIG kaynak numunesinin nufuziyeti 2.62 mm olmuştur. Uygulanan kaynak parametreleri ile istenilen derinlikte nufuziyet sağlanmıştır. Nufuziyetin yeterli derinlikte olması kaynak yerinin dayanımını artırmaktadır. Benzer sonuçlar (Karadeniz vd. 2007) tarafından da yapılmıştır.

Şekil 7.'de 30V, 200A, 15m/h da MAG kaynak numunesinin nufuziyeti 1.71 mm olmuştur. Şekilde görüldüğü gibi nufuziyet meydana gelmiştir. Meydana gelen nufuziyet kaynak dikişinin mukavemetini etkilenmektedir. Nufuziyetin düşük olması kaynak yerinin mukavemetini düşürmektedir. Benzer sonuçlar (Ateş vd. 1999, Kim vd. 2003) tarafından da yapılmıştır.

Şekil 8.'de 35V, 500A, 70cm/dak da Tozaltı kaynak numunesinin nufuziyeti 3.01 mm olmuştur. Şekilde görüldüğü gibi derin nufuziyet meydana gelmiştir. Meydana gelen nufuziyet kaynak dikişinin mukavemetini etkilenmektedir. Nufuziyetin fazla olması uygulana kaynak yönteminde ısının fazla olması kaynak yerinin nufuziyeti ve dolayısı ile mukavemetini artırmaktadır. Benzer sonuçlar (McGlone vd. 1978) tarafından da yapılmıştır.

3. Sonlu Eleman Modellenmesi

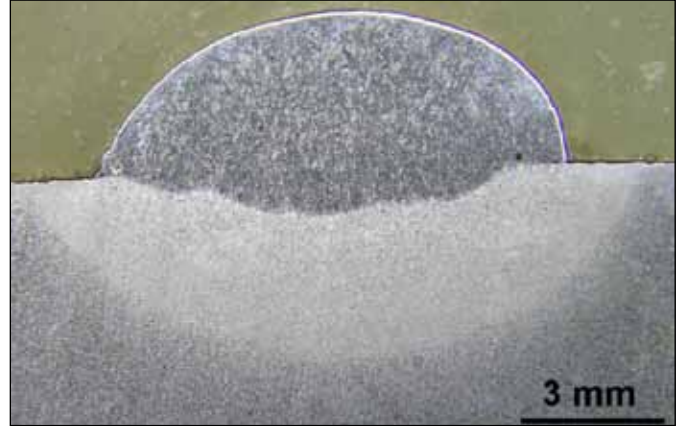
TIG-MAG-Tozaltı kaynaklarının optimizasyonu için ANSYS paket programı ile iki boyutlu bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kaynak ağzı şekli kullanılarak deneysel sonuçlara yakın olması amaçlanmıştır. Kaynaklı yapının iki boyutlu geometrik yapısı farklı tipte elemanlar ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada termal analiz yapılmıştır. İkinci aşamada ise mekanik analizin zamana bağlı olarak elde edilen sıcaklık verileri kullanılmıştır. Şekil 9.'da Simülasyonu için mesh yapılan numune görülmektedir. Benzer çalışmalar (Lindgren 2006) tarafından da yapılmıştır.

3.1. Termal Analiz Sonuçları

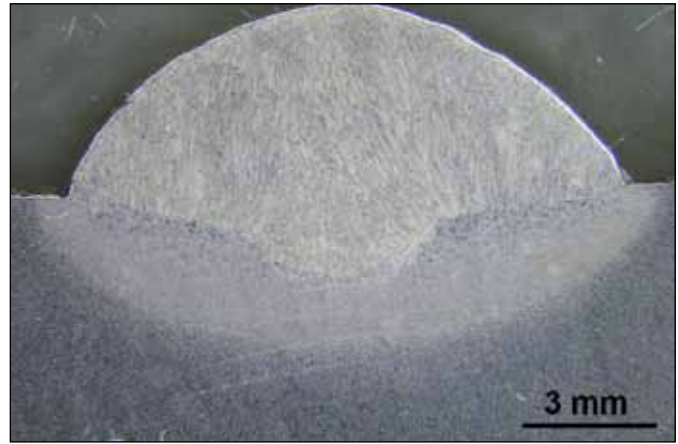
Kaynak işlemi sonunda numunelerde az da olsa distorsiyon meydana gelir. Bunun sonucu olarak numune içerisinde



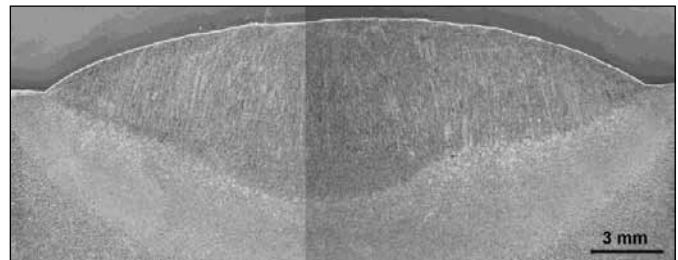
Şekil 5. Tozaltı kaynak dikişinin şematik görüntüsü.



Şekil 6. TIG kaynak dikişinin 22V, 135 A, 36 cm/dak da nufuziyeti, N:2.62 mm.



Şekil 7. MAG kaynak dikişinin 30V, 200 A, 36cm/dak nufuziyeti, N: 1,71 mm.



Şekil 8. Tozaltı kaynak dikişinin 35V, 500 A, 25m/h nufuziyeti, N:3.01 mm.

artık gerilmeler oluşur. Meydana gelen artık gerilmeler numunenin mukavemetine etki eder ve bu gerilmelerin tahmin edilmesi termal analiz sonuçları açısından önemlidir.

Kaynak prosesi esnasında ısı girdisinin yüksek olması nedeniyle numunelerde zamana göre meydana gelen sıcaklık dağılımları kaynaktan hemen sonra belirlenmiştir. Başlangıç sıcaklık değerleri TIG ve MAG kaynağı için 1973 Kelvin, Tozaltı kaynağı için 2573 Kelvin olarak girilmiştir. Simülasyon işleminde termal iletim için iki boyutlu dört düğüm noktalı, tek serbestlik derecesi tek olan düzlem eleman olarak Plane 55 kodu, tüm sıcaklık birimleri Kelvin, zaman birimi ise saat olarak kullanılmıştır.

MAG kaynak işlemi tamamlanincaya kadar 2, 10, 18, 30. saniyede termal analiz simülasyonu uygulanmıştır. Termal analiz görüntüleri incelendiğinde 18. saniye sonunda malzemenin maksimum sıcaklığa çıktığı görülmüştür. Kaynak işleminin 2. saniye sonundaki sıcaklık dağılımları (Şekil 10. (a)) ana malzemenin tamamına dağıldığı ve sadece kaynak dikişinin olduğu bölgede meydana geldiği görülmektedir. 10 saniye sonra ise (Şekil 10. (b)) kaynak metaline yakın kısımlarda sıcaklık artmakta, 18 saniye sonunda kaynak işlemi tamamlandığında kaynak metalinden ana malzemeye olan ısı transferi (Şekil 10. (c)) artarak devam etmekte ve ana malzemede de sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Kaynak işleminden 30. saniye sonra (Şekil 10. (d)) kaynak edilen numunenin yavaş yavaş soğumaktadır. Benzer sonuçlar (Zielinska vd. 2009, Brickstad vd. 1998, Cho vd. 2013) tarafından bulunmuştur.

TIG kaynak işlemi tamamlanincaya kadar 2, 40, 83. saniyelerde termal analiz simülasyonu uygulanmıştır. Termal analiz görüntüleri incelendiğinde 2. saniye sonunda malzemede sıcaklık dağılımının (Şekil 11. (a)) kaynak bölgesinden başlayarak malzeme içine doğru olduğu görülmektedir. Kaynak işleminin 40. saniye sonundaki sıcaklık dağılımının (Şekil 11. (b)) maksimum seviyeye çıktığı ve ısının tesiri altında kalan bölgesine (ITAB)'a kadar dağıldığı görülmektedir. Kaynak işleminden 83. Saniyesinde ise (Şekil 11. (c)) kaynak edilen numunenin soğumaya

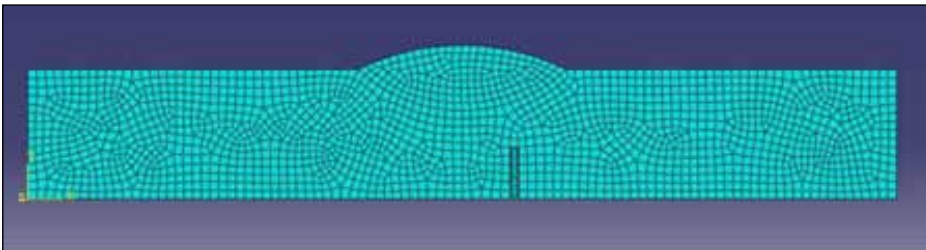
başladığı görülmektedir. Benzer sonuçlar (Tong vd. 2013, Cho vd. 2013) tarafından bulunmuştur.

Tozaltı kaynak işlemi tamamlanincaya kadar 2, 15, 27. saniyelerde termal analiz simülasyonu sonuçlarına göre 2. saniye sonunda malzemede sıcaklık dağılımının (Şekil 12. (a)) uygulanan kaynak yönteminde ısı girişinin yüksek olması nedeniyle Sıcaklık dağılımının ITAB ve ana malzemeye doru hızlı bir şekilde olduğu görülmektedir. Şekil 12. (b)' de 15. saniye termal analiz görüntüsü görülmektedir. Şekilde sıcaklık artışının oldukça fazla olduğu ve ITAB de de yüksek olduğu görülmektedir. Uygulanan kaynak yönteminde sıcaklık değerinin yüksek olduğunu belirtmektedir. Şekil 12. (c) de 15. saniye termal analiz görüntüsü sıcaklık artışının maksimum düzeye ulaştığını ve kaynak işleminin kaynak tozu altında yapılmasından dolayı dikişin çok yavaş soğuduğu ve ani soğuma nedeniyle meydana gelebilecek çatlamabüzülme riskinin meydana gelmeyeceğini göstermektedir. Benzer sonuçlar (Soncu vd. 2010, Choa vd. 2013, Yavuz vd. 2015) tarafından bulunmuştur.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, St-37 yapı çeliğinin MAG-TIG ve Tozaltı kaynakları ile kullanılan birleştirilen numunelerin makro yapı ve sonlu elemanlar yöntemi ile ısı dağılımı ve termal analizi özellikleri incelenmiş aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. St 37 çelik MAG-TIG ve Tozaltı kaynakları ile başarılı bir şekilde kaynatılmıştır.
2. Yapılan termal analiz sonucu numune üzerindeki zamana göre sıcaklık değişimlerinin fazla olduğu yerlerde artık gerilmeler de yüksek olmaktadır.
3. Farklı yöntemleri ile yapılan kaynak işlemlerinin değişik zaman sürelerine bağlı olarak ısı transferinin yüksek olduğu bölgeler araştırılmıştır. Bu bölgeler ergiyik bilge ile ısının tesiri altında kalan bölgeler olduğu saptanmıştır.
4. Bu bölgelerde en fazla ısı girişinin olduğu Tozaltı kaynağında artık gerilmelerin yoğunluğu ve distorsiyon

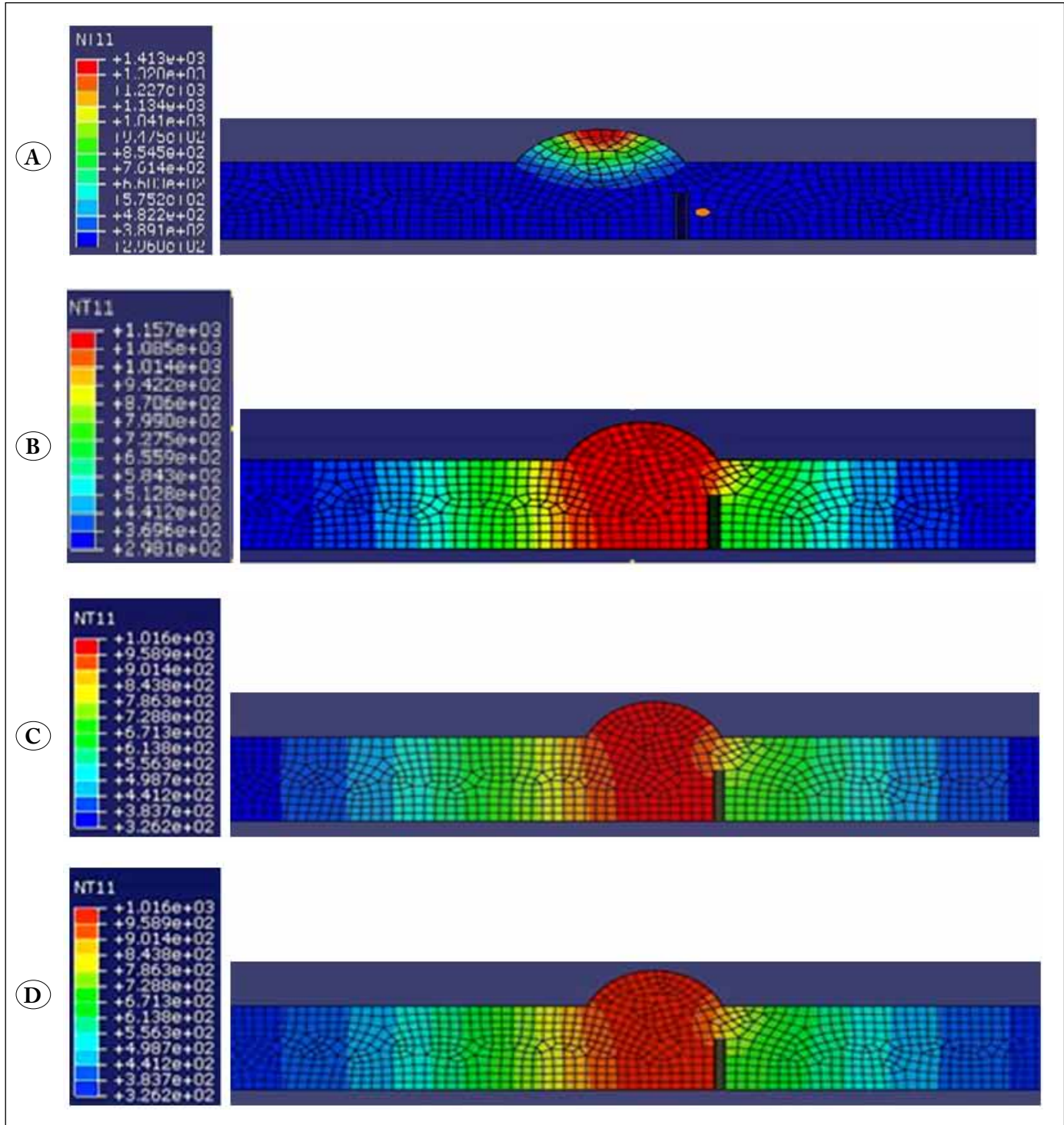


Şekil 9. Modellemede kullanılan mesh edilmiş numune.

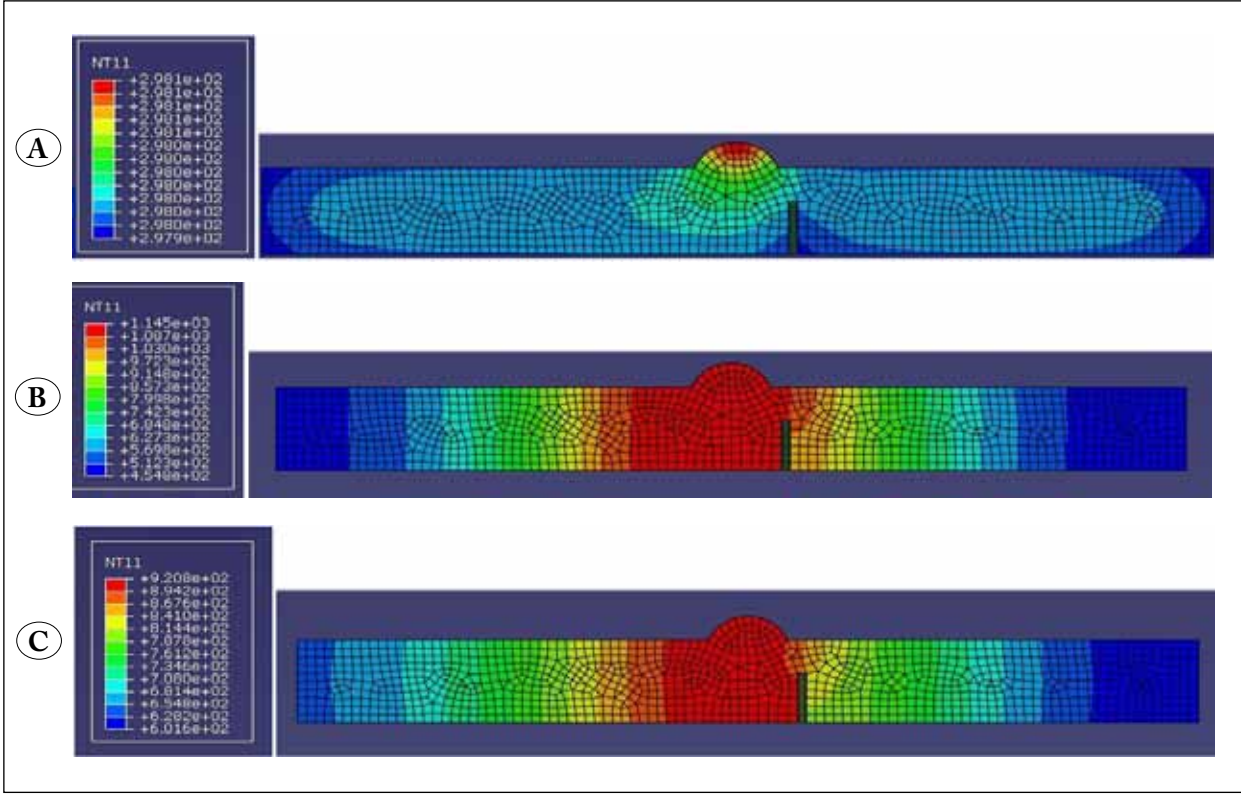
oranının fazla olduğu görülmüştür. Kaynak işlemini kontrollü yapılması gerektiği aksi takdirde bu bölgelerde sıcak yırtılma ve çatlamların meydana gelebileceği görülmektedir.

5. Teşekkür

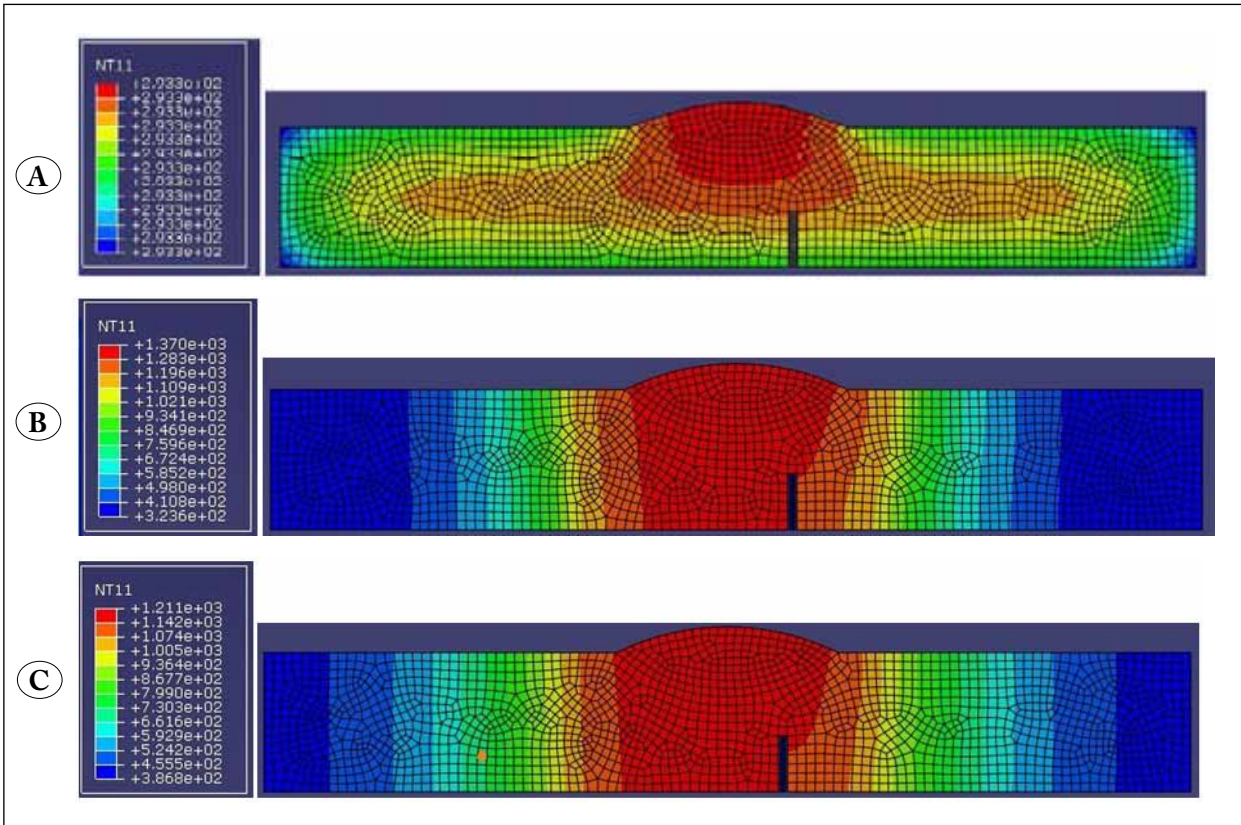
Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Çelik Malzemelerin Nümerik Olarak Modellenmesi isimli Yüksek Lisans Tezinden yararlanılmıştır.



Şekil 10. MAG kaynak işleminin (A) 2. saniyedeki, (B) 10. Saniyedeki, (C) 18. saniyedeki, (D) 30. saniyedeki termal analiz simülasyonunu.



Şekil 11. TIG kaynak işleminin, (A) 2. saniyedeki, (B) 40 saniyedeki, (C) 83 saniyedeki termal analiz simülasyonunu.



Şekil 12. Tozaltı kaynak işleminin, (A) 2. saniyedeki, (B) 15. saniyedeki, (C) 27. saniyedeki termal analiz simülasyonunu.

6. Kaynaklar

- Anık, S. 1975.** Kaynak tekniği çeliklerin kaynak kabiliyeti. *İ.T.Ü. Matbaası*, 70-91s.
- Fındık, T. 2008.** 304 tipi paslanmaz çeliklerin MIG kaynağındaki ısı transferinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, 110-134s.
- Akkağ, N. 2006.** Tozaltı köşe kaynağında yapay zekâ teknolojileri kullanarak dikiş geometrisinin modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, FBE, Sakarya Üniversitesi, 71s.
- Tükkan, G. 2008.** Koruyucu gaz kaynağında (MIG/MAG) gaz debisinin kaynak nüfuziyeti ve kaynak hızına etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, 98-150s.
- Gözütok, E. 2009.** Paslanmaz çeliklerin TIG kaynağında Argon-Hidrojen gaz karışımının birleştirmelerin mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, 65-111s.
- Wen, SW., Hilton P., Farrugi, DCJ. 2001.** Finite element modeling of a submerged arc welding process. *J. Mater. Proc. Techn.*, 119: 203-209.
- Tülbentçi, K. 1984.** Kaynak simülasyonu ve uygulamadaki önemi. *I. Ulusal Kaynak Sempozyumu*. s13, İstanbul.
- Gunaraj, V. Murugan, N. 2002.** Prediction of heat affected zone characteristics in submerged arc welding of structural steel pipes”, *Weld. J. Res.*, AWS, 94-102s.
- Jang, GB., Kim, HK., Kang, SS. 2001.** The effects of root opening on mechanical properties, deformation and residual stress of weldments. *Weld. J. Res.*, 80: 80-89s.
- Zhu, XK., Chao, YJ. 2002.** Effects of temperature dependent material properties on welding Simulation. *Comp. and Struc.*, 80: 967-976.
- Karadeniz, E., Ozsarac, U., Yildiz, C. 2007.** The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. *Mater. and Des.*, 28: 649-656s.
- Ateş, H. Türker, M. 1999.** Determination of penetration with various welding parameters of electrical arc and GMA welding. *Gazi Üniversitesi Journal*, 12(3): 3-7s.
- Kim, IS. Evlat, JS., Kim, IG., J. Y Kim JY., Kim, OS. 2003.** A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO₂ arc welding. *J. Mater. Proc. Tech.*, 136:139-145s.
- McGlone, JC., Chadwick, DB. 1978.** The submerged arc butt welding of mild steel. Part 2. The prediction of weld bead geometry from the procedure parameters. *Weld. Inst. Rep.*, 80.
- Lindgren, LE. 2006.** Numerical modeling of welding. *Comp. Meth. App. Mech. Eng.*, 195: 6710-6736s.
- Zielinska, S., Valensi, F., Pellerin, N., Pellerin, S., Musioła, K., Izarrab, Ch. De, Briand, F. 2009.** Microstructural analysis of the anode in gas metal arc welding. *J. Mater. Proc. Tech.*, 209: 3581-3591s.
- Brickstad, B. Josefson, BL. 1998.** A parametric study of residual stresses in multipass Butt-welded stainless steel pipes. *Inter. J. Pres.*, 75: 11-25s.
- Cho, DW., Na, SJ., Cho, MH., Lee, JS. 2013.** Simulations of weld pool dynamics in V-groove GTA and GMA welding. *Weld. in the World*, 57: 223-233s.
- Tong, Z., Zhentai, Z., Rui, Z. 2013.** A dynamic welding heat source model in pulsed current gas tungsten arc welding. *J. Mater. Proc. Tech.*, 213: 2329-2338s.
- Cho, DW., Na, SJ., Cho, MH., Lee, JS. 2013.** A study on V-groove GMAW for various welding positions. *J. Mater. Proc. Tech.*, 213: 1640-1652s
- Soncu, R., Yavuz, N., Ertan, R. 2010.** Korniş usulü Tozaltı kaynağı ile kaynak edilen St37 malzemesinin sonlu elemanlar yöntemi ile termal analizi. *Uludağ Üniv. Mühendislik-Mimarlık Fak. Derg.*, 15: 89-92.
- Choa, DW., Songb, WH., Chob, MH., Na, SJ. 2013.** Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations. *J. Mater. Proc. Tech.*, 213: 2278- 2291s.
- Yavuz, N., Özcan, R., Polat, FG. 2005.** Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi. *Uludağ Üniv. Mühendislik Mimarlık Fak. Derg.*, 10: 9-18.