

## S235'İN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ISIL VE YAPISAL ANALİZİ

Başar Yavuz<sup>[\*]</sup>

### Özet

Nokta direnç kaynağı, sahip olduğu avantajlarından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Nokta direnç kaynağını daha ekonomik hale getirebilmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda amaç bu yöntemin gelişmesini sağlamaktır. Çalışmalar en yüksek gerilim bölgesinin çekirdek civarında oluştuğunu göstermiştir. Bu durum bu bölgenin kaynaklı bölge için en zayıf nokta olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada nokta direnç kaynağı ile birleştirilen S235 çeliğinin durumu ısı ve yapısal olarak analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaynak, Nokta Direnç Kaynağı, Sonlu Elemanlar Analizi, Isıl Analiz, Yapısal Anali

### Thermal and Structural Analysis of S235

### Abstract

Resistance spot welding (RSW) is a widely used method in industry due to its advantages. Many researches are done in order to make RSW more economically. To reach this point, many researches have been done. This analysis tries to help development of the resistance spot welding. The research shows that maximum stress occurs around the nugget which means that these areas are the weakest part of the welding. In this paper, thermal and structural analysis are done for S235 steel.

**Keywords:** Welding, Resistance Spot Welding, Finite Element Analysis, Thermal Analysis, Structural Analysis

## 1. GİRİŞ

Nokta direnç kaynağı imalat işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac metallerin birleştirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem otomatize edilebilmesi, hızlı uygulanabilirliği ve düzgün son ürün kalitesi gibi özellikleri sayesinde oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Nokta direnç kaynağı 4 basamaklı bir işlem adımlarına sahiptir. İlk olarak sac metaller bir araya getirilir, ikinci olarak elektrik akımı uygulanır. Bu şekilde birleşme noktasında malzemelerin ergimesi için ısı üretilir. Akım uygulanması sırasında sac metallerin sıkıştırılması için belirli bir kuvvet uygulanır. Üçüncü aşamada kuvvet etkisi devam ederken akım kesilir. Son olarak kuvvet kaldırılır ve birleştirilmiş parçalar makineden alınır.

Bir çok araştırmacı daha ekonomik ve daha kaliteli kaynak uygulaması yapmak için çalışmalara devam etmektedir. Nokta direnç kaynağında en önemli nokta kaynak çekirdeğidir. Bu nedenle bu alanda yapılan çalışmalar bu konu hakkında oldukça çok bilgi oluşmasını sağlamıştır. Deneysel yöntemlerin kullanılması oldukça pahalı ve zor olmaktadır. Bu gerçek insanları 1,2 ve 3 boyutlu modellerle araştırmaya itmiştir.

[\*] Makine Mühendisliği, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, basaryavuz@gmail.com

Zhigang ve diğerleri (2006) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak ısı ve mekânîk özellikleri araştırmışlardır. Moshayedi ve Sattari-Far (2012) östenitik paslanmaz çeliklerde çekirdek büyümesini nümerik ve deneysel yöntemler kullanarak incelemiştir. Yine Moshayedi ve Sattari-Far (2014) kaynak süresinin ve akımın artık gerilim üzerindeki etkisini incelemiştir. Kaynak süresinin ve akımın artmasının artık gerilmeleri de arttırdığını gözlemiştir. Gould (1994) çekirdek oluşumu ve büyümesini incelemiştir. Bu çalışmada deneysel çalışmaların yanında sonlu elemanlar analizini 1 boyutlu bir ısı transfer modeli oluşturmak amacıyla kullanmıştır. Radyal ısı transferinin çekirdek genişlemesini kısıtladığını ortaya çıkarmıştır. Tsai ve Jammal (1989 ve 1992) Ansys paket programı ile nokta direnç kaynağının karakteristikleri konusunda çalışmalar yapmıştır. Feulwarch ve diğerleri (2004) ara yüzey kontak özelliklerini bulmak için bir formül geliştirmişlerdir.

Florea ve diğerleri (2013) 6061-T6 kullanarak çalışmalar yapmışlardır. Kaynak parametrelerinin yorulma dayanımını ve mikro yapıyı değiştirdiğini gözlemlemiştir. Loulou ve Bardou (2001) elektrot yüzeyi ve metal arasında ki ısı transfer katsayısının belirlenmesi için yeni bir yöntem kullanmışlardır. Zou ve diğerleri (2009) elektrot yüzeyine yapılan kaplamanın kullanım ömrüne etkisini incelemiştir. Bu çalışmalarla, kaplanmış elektrot kullanıldığında daha düşük akım değerleri ile kaynak işlemi yapılabilmektedir.

Bu çalışmada uygulanan kuvvet kaynaklı oluşan deformasyonlar ve artık gerilmeler bulunmuştur. Isıl dağılımda incelenmiştir. Sıcaklığın ve kuvvetin etkisinin modellenmesi için Ansys paket programı kullanılmıştır.

## 2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Tüm mühendislik uygulamaları bir fiziksel sistemdir. Çoğu zaman bu sistem kolayca çözülemez. Bu sistemlerin çözülmesi için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Ancak bu modellerin sahip olduğu çok sayıda denklem ve formüller çözümü oldukça zorlaştırmaktadır. Bu modelleri kolaylaştırmak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Burada sistem küçük parçalara bölünür. Her parça kendi başına çözümlenir. Daha sonra tüm parçalar birbirine bağlanır ve tüm sistem için çözüm yapılmış olur.

Bu çalışmada ısı ve yapısal analizler yapılmıştır. Isıl analiz için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z) = \rho C \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} \quad (1)$$

Bu eşitlikte; R ısı akış miktarını, T sıcaklığı, Q üretilen ısı,  $\rho$  yoğunluğu, C öz ısı ve t ise zamanı temsil etmektedir.

$$R_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$R_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.2)$$

$$R_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.3)$$

$k_x$ ,  $k_y$  ve  $k_z$  üç doğrultudaki ısı iletkenliği tanımlamaktadır. Eğer (2.1), (2.2), (2.3) ü (1) denklemine yerleştirirsek aşağıdaki eşitliği elde etmiş oluruz.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Bu eşitlik ısı iletkenlik için diferansiyel denklemdir. Eğer başlangıç koşulları aşağıdaki gibiyse;

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (4)$$

Ve sınır koşulları da;

$$\left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} N_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} N_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} N_z \right) + q_s + h_c(T - T_\infty) + h_r(T - T_r) = 0 \quad (5)$$

5. denklemden,  $N$  kosinüsü,  $h_c$  konveksiyon ısı transfer katsayısını,  $h_r$  radyasyon ısı transfer katsayısını,  $q_s$  ısı akışını,  $T_\infty$  dış ortam sıcaklığını,  $T_r$  ise radyasyon ısı üretim alanının sıcaklığını tanımlamaktadır.

Sıcaklığa bağlı malzeme sabiti  $g$ ;

$$g = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t g[T(\tau)] d\tau \quad (6)$$

Son eşitlik aşağıdaki şekli alır.

$$T(\tau) = T(t-\Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t-\Delta t) - T(t-2\Delta t)] \quad (7)$$

Yapısal analiz için ise aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (9)$$

Bu denklemden  $\sigma_{ij}$  gerilimi,  $b_i$  kütle kuvvetini tanımlamaktadır.

Isıl elasto-plastik malzeme modeli Von-Mises elastisite kriterine göre çalışmaktadır.

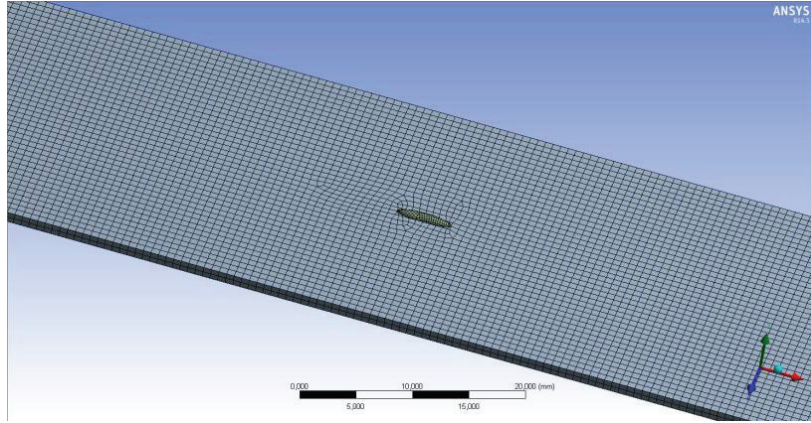
$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT \quad (10)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (11)$$

Bu eşitliklerde  $D^e$  elastik rijitlik matrisini,  $D^p$  plastik rijitlik matrisini,  $C^{th}$  ısıl rijitlik matrisini,  $d\sigma$  gerilme artışı,  $d\varepsilon$  uzama artışı,  $dT$  ise sıcaklık değişimini tanımlamaktadır.

### 3. MODELİN ANALİZİ

Bu çalışmada Ansys sonlu elemanlar paket programı ısı ve yapısal analizlerin yapılması için kullanılmıştır. Model yaklaşık olarak 150000 düğüm noktası ve 28000 elemana bölünmüştür.



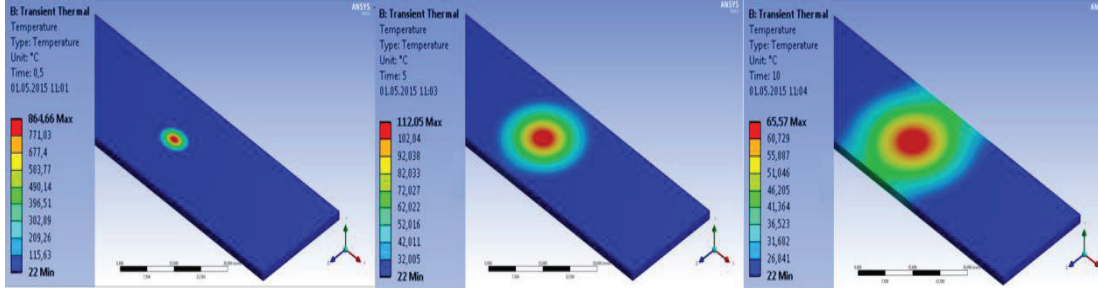
Şekil 1: Sonlu elemanlar modeli

Model 2 sac parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar kaynakla birleştirilmiş ve 100x1x100 (mm) ölçülerindedir. Çevre sıcaklığı 22 °C olarak tanımlanmış, modelin 2 yüzeyi de referans yüzeyler olarak seçilmiştir. Analiz de sac malzemesi olarak S235 çelik malzeme kullanılmıştır. Malzeme özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 1: S235 Malzeme özellikleri

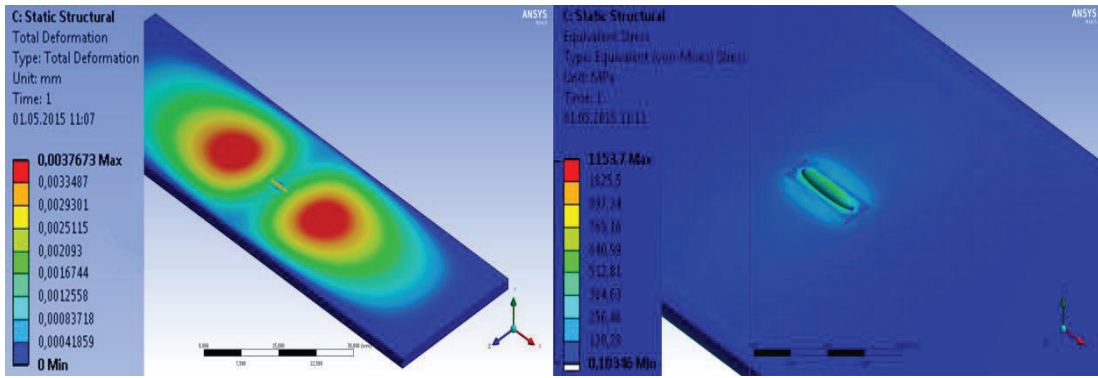
	<b>S235</b>
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7700
<b>Poisson Oranı</b>	0.3
<b>Elastiklik Modülü (GPa)</b>	200
<b>Akma Mukavemeti (MPa)</b>	1034
<b>Çekme Mukavemeti (MPa)</b>	1158
<b>Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)</b>	42.7
<b>Öz Isı (J/kgK)</b>	477

Isıl analiz için malzemenin 0.3 saniyede ergime sıcaklığına ulaştığı ve bu saniyede çekirdek oluşumunun gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bu saniyeden sonra sac metal soğumaya başlamıştır ve ısı dağılımı gözlenmiştir. Isıl ve yapısal analizlerde elektrot baskı kuvveti olarak 5000 N kuvvet iki sac parçaya da uygulanmıştır. S235 çelik için malzeme de 0.3 saniyede 1500 °C ulaşılmıştır. 0.5 saniyede 847 °C olarak ölçülen en yüksek sıcaklık 5. saniyede 112 °C ve son olarak 10. saniyede 65 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 2: S235'in 0.5, 5 ve 10. saniyelerdeki ısı dağılımı

En yüksek deformasyon değeri 0.003 mm olarak kaynak çekirdeğinin etrafında ki bölgede gözlenmiştir. En yüksek gerilim değeri anlık olarak 1153 MPa olarak ölçülse de 1 saniye sonunda 500 Mpa olarak ölçülmüştür.



Şekil 3: S235 için en yüksek gerilim ve deformasyon

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada S235 çelik sac için ısı dağılımı, uygulanan kuvvet kaynaklı deformasyonla birlikte en yüksek gerilim değerleri bulunmuştur. Bu analizler için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Sınır koşullarının ve malzeme özelliklerini eklenmesi ile analiz işlemi yapılmıştır. Sınır koşullarını değiştirilmesi ile farklı koşullar için bu analiz işlemi gerçekleştirilebilir.

1.saniyenin sonunda kadar soğuma işlem yavaş bir seyirde ilerlerken daha sonra çok daha hızlı bir soğuma gerçekleşmiştir. Uygulanan kuvvet nedeniyle kaynak çekirdeği etrafında deformasyon oluşmuştur. En yüksek gerilme değerleri anlık olarak yüksek değerlerde gözüksede daha sonra düşüş göstermiştir. En yüksek gerilme değeri çekirdek çevresinde ve elektrotun baskı yaptığı ara yüzeyde görülmektedir.

**REFERANSLAR**

Feulvarch, E., V. Robin., J.M., Bergheau, 2004. Resistance Spot Welding Simulation: A General Finite Element Formulation of Electrothermal Contact Conditions. *Joining Material Process Technology*, Vol.153:436–441.

Florea R.S., D.J. Bammann, A. Yeldell, K.N. Solanki, Y. Hammi, 2013. Welding Parameters Influence on Fatigue Life and Microstructure in Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy. *Materials and Design*:456-465

Gould J.E., 1994. An Examination of Nugget Development During Spot Welding Using Both Experimental and Analytical Techniques. *Weld Journal*, Vol.66(1):1–10.

Loulou T., J.P. Bardon, 2001. Estimation of Thermal Contact Conductance During Resistance Spot Welding. *Experimental Heat Transfer*, Vol.14:251–264

Moshayedi H., I. Sattari-Far, 2014. Resistance Spot Welding and The Effects of Welding Time and Current on Residual Stress, *Journal of Materials Processing Technology*:2545-2552

Moshayedi H., I. Sattari-Far, 2012. Numerical and Experimental Study of Nugget Size Growth in Resistance Spot Welding of Austenitic Stainless Steel, *Journal of Materials Processing Technology*:347-354

Tsai C.L., O.A. Jammal, D.W. Dickinson, 1992. Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth, *Weld Journal*, Vol.71(2):47–54.

Tsai C.L., O.A. Jammal, D.W. Dickinson, 1989. Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding Using Finite Element Method. In: Paper presented at the trends in welding research, 2nd International Conference, Materials Park, OH, USA

Zhigang, H., W. Yuanxun, L. Chunzhi, C. Chuanyao, 2006. A Multi-coupled Finite Element Analysis of Resistance Spot Welding Process, *Acta Mechanica Solida Sinica*:86-94

Zou J., Q. Zhao, Z. Chen, 2009. Surface Modified Long-life Electrode for Resistance Spot Welding of Zncoated Steel, *Journal of Materials Processing Technology*:4141-4146

<http://www.steelss.com/Carbon-steel/s235.html>