

AKÜ FEMÜBİD 19 (2019)
015202 (129-139)

AKU J. Sci. Eng. 19 (2019)
015202 (129-139)

Doi: 10.35414/akufemubid.436609

Araştırma Makalesi / Research Article

Farklı Mıknatıs Geometrilerinin Manyetik Alan Destekli Direnç Punta Kaynağına Etkisi

Serdal Arslan¹, Muhammet Karabaş^{2,*}

¹ Harran Üniversitesi, Birecik Meslek Yüksekokulu, 63400, Birecik, Türkiye.

² Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 30000, Hakkari, Türkiye.

e-posta: serdalarслан@harran.edu.tr, muhammetkarabas@hakkari.edu.tr (*sorumlu yazar)

ID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-5633>, <https://orcid.org/0000-0002-0666-6132>

Geliş Tarihi: 25.06.2018 ; Kabul Tarihi: 11.03.2019

Öz

Bu çalışmada, doğru akım punta kaynak sistemleri için E-Nose elektrod geometrisine yerleştirilen mıknatıslı modelin sürekli hal analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hali hazırda üretimi gerçekleştirilen beş farklı mıknatıs konfigürasyonu için puntalanacak malzemedeki akım yoğunluğu değerlerinin yanı sıra mıknatısların itme kuvvetleri bakımından da değerlendirmeler yapılmıştır. Genel olarak blok, halka ve yarım halka mıknatıs konfigürasyonları seçilmiştir. Aynı kutup birbirine bakacak şekilde (N-N veya S-S) elektrotlara yerleştirilen mıknatısların meydana getirdiği itme kuvveti puntalama kuvvetini azaltmaktadır. Bu bakımdan puntalama kuvvetinde azalma meydana getirmeksizin kaynak kalitesini arttırmaya yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sabit kaynak akımında mıknatıs geometrisinin değişimine bağlı olarak kuvvet değerleri hesaplatılmıştır. Sonra bu beş mıknatıs sabit kaynak akımı altında düşük kuvvet, yüksek akım yoğunluğu sağlanması bakımından optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda çıkan en uygun geometriler farklı kaynak akımlarında akım yoğunluğu bakımından mıknatıssız durum ile karşılaştırılmıştır. Böylece bu çalışma ile en iyi mıknatıs geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca literatürde harici manyetik alanların kaynak kalitesinin olumlu etkisi göz önüne alındığında doğru akım punta kaynak elektroduna yerleştirilen mıknatıs ile kaynak kalitesinin artırılabilceği nümerik çalışma ile gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler

Punta kaynağı; Kaynak elektrodu; Mıknatıs; Harici manyetik alan

Effect of Different Magnet Geometry On Magnetically Assisted Resistance Spot Welding

Abstract

In this study, state analysis of the magnet model placed in the E-Nose electrode geometry for DC spot welding systems was performed using the finite element method. For five different magnet configurations that are currently in production, the current density values of the welded material as well as the pushing forces of the magnets are evaluated. Block, ring and half ring magnet configurations are selected for analysis. The repelling force brought by the magnets placed in the electrodes (N-N or S-S) with the same polarity facing each other reduces the welding force on electrodes. In this regard, analysis has been carried out to increase the quality of the welding without reducing the effect of electrode force on resistance spot welding process. Firstly, the force values are calculated according to the change of the magnet geometry in the same welding current. Then, Optimization studies was carried out to ensure low force, high current density under same welding currents for these five different magnets. The optimal geometry resulting from the optimization studies is compared to the magnetless condition in terms of current density at different welding currents. Thus, it was tried to determine the best magnet geometry with this study. Besides, considering the positive effect of the welding quality of the external magnetic fields in the literature, the numerical study shows that the welding quality can be increased by the magnet placed on the DC spot welding electrode.

Keywords

Spot Welding; Welding Electrode; Magnet; External Magnetic Field

1. Giriş

Direnç punta kaynağı günümüzde birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılan, kontak yüzeyleri bir veya daha fazla nokta ile birleştirilmesini sağlayan en eski kaynak tekniklerinden birisidir. Özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu kaynak tekniğinde kaynak işlemini etkileyen en önemli parametreler akım yoğunluğu, kaynak süresi, plaka kalınlığı ve malzemesi, elektrod geometrisi, elektrod kuvveti ve devre akımıdır (Eisandeh ve ark. 2010). Birleştirilecek malzemeler ve elektrod geometrisi kaynaklama işlemi üzerinde metalurjik ve termodinamik olarak oldukça etkilidir. Kaynak süresi ise akım yoğunluğu ile ilgilidir. Ayrıca kaynak akımının yoğunluğu kaynak makinesinin elektriksel ve elektronik karakteristiği ile de ilişkilidir.

Hesaplamalı modelleme yöntemleri direnç punta kaynak işleminin temellerini anlamak, yeni kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi ve kaynak kalitesinin artırılması açısından oldukça geniş imkânlar sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ticari yazılımlar (Ansys, Comsol, Femlab, Flux, Magnet, Abaqus, vb.) günümüzde hesaplamalı modelleme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Tarimer ve arkadaşları (Tarimer ve ark. 2011), punta kaynak elektrod çeşitlerinin akım yoğunluğunu Ansys Maxwell programı kullanarak incelemişlerdir. Literatürde direnç punta kaynak işleminin sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur (Nied 1984, Cho ve Cho 1989, Zhang ve ark. 2009). Bu çalışmalarda $\frac{1}{4}$ üç boyutlu aksel simetrik sonlu elemanlar modeli ile direnç punta kaynak işleminde dikdörtgen bir elektrotta sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Ayrıca elektrod geometrisinden dolayı elektrod keskin köşelerinde ve kenarlarında temas gerilmesinin çok yüksek olduğunu, en yüksek sıcaklığın ise elektrotun birleştirilecek parçaların birbirine temas ettiği yüzeylere yakın bölgelerinde oluştuğunu görmüşlerdir. Kaynak süresi arttığında temas direnci azalmaktadır ve sıcaklık içlere doğru artarak geleneksel direnç kaynağında olduğu gibi plakalar arasında kaynaklanmış bölgeyi oluşturmaktadır (Zhang ve ark. 2009). Roberts (Roberts 1951), iş

parçalarının ve elektrodların temas yüzeylerinin toplam direnci zamana bağlı direnç olarak düşünmüş ve farklı malzemeler ile punta direnç kaynağında kaynak direncindeki değişimleri deneysel olarak incelemiştir. Fakat teknolojik imkânların kısıtlı olması sebebiyle etkili bir direnç ölçüm sistemi kurmak ve kaynak işlemi sırasında dirençteki fiziksel değişimleri detaylı şekilde araştırmak mümkün olmamıştır. Wei (Wei ve ark. 1996) şerit ve silindir şeklindeki elektrodlar için süreklilik denklemi, momentum denklemi, enerji denklemi, elektrod ve iş parçası için manyetizma denklemi oluşturmuştur. Khan (Khan ve ark. 1999) Alüminyum alaşımlarının düz uçlu elektrodlar ile nokta direnç kaynağı sonucu oluşacak kaynak bölgesinin yapısını tahmin edebilmek için bir model geliştirmiştir. Chan ve çalışma arkadaşları (Chan ve Scotchmer 2006) ise nokta direnç kaynağında kullanılan standart elektrod geometrisi ile parabolik nokta geometrisine sahip (ParaCap) elektrodun kullanım ömrünü karşılaştırmıştır. Ayrıca parabolik uç geometrisine sahip elektrodların daha uzun ömürlü olduğunu tespit etmişlerdir. Bowers ve çalışma arkadaşları geometrik faktörlerin direnç punta kaynak işlemine etkisini araştırmışlardır ve elektrodlar için en uygun dizaynın termal, mekanik olarak rijitliğe ve düzgün dağılımlı bir akım yoğunluğuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca elektrod yüzey açısının 90 olması durumunda elektrod yüzeyindeki akım yoğunluğunu düzenli hale geldiğinden bahsetmişlerdir (Bowers ve ark. 1990). Nied (Nied 1984) en yüksek akım yoğunluğu dağılımının elektrod ile iş parçasının birbiri ile birleştiği alan çevresinde meydana geldiğini tespit etmiştir. Sundaresan ve Ram (Sundaresan ve Ram 1999) punta kaynak işleminde manyetik alanın ark salınımını azalttığı ve bununda kaynak bölgesinin tane boyutunu düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Mousavi ve çalışma arkadaşları ise (Mousavi ve ark. 2003) punta kaynak işlemi esnasına yönü sürekli değişen elektromanyetik alan sonucunda çekirdeklenme ve tane oluşumu aşamaları için önemli bir faktör olan tane ayrışması işleminin kolaylaştığından bahsetmişlerdir. Chen (Chen ve ark. 2016) ve çalışma arkadaşları ise statik manyetik alanın kaynak işlemi stabilize ettiğini, lazer nokta kaynak bölgesinde oluşan ve kaynağın mekanik

özelliklerini etkileyen çatlak ve intermetalik bileşikleri azalttığını bulmuşlardır. Popov ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada 3,5 mm kalınlığında östenitik nikelsiz çeliklerin direnç punta kaynağında dış radyal merkezli aksel sabit manyetik alanın kaynak bölgesinde gözenekli yapı oluşumunu azaltabileceğini ve kaynağın darbe tokluğunu ve yorulma ömrünü arttırabileceğini belirtmişlerdir (Popov 1993). Watanabe ve çalışma grubu ise 301 kalite paslanmaz çelik için punta kaynağında manyetik alan etkisini araştırmışlar ve manyetik alanın kaynak yönüne dik olması sonucunda manyetik alanın artmasıyla kaynaklanmış bölgenin alanının artmakta olduğunu, paralel olduğunda ise manyetik alanın kaynak bölgesini etkilemediğini tespit etmişlerdir (Watanabe, Takeda ve ark. 2006). Yang ve arkadaşları (Li ve ark. 2014) harici manyetik alanın alüminyum malzemelerin punta kaynağı üzerindeki etkileri incelemiştir. Harici bir miknatıstan sağlanan manyetik kuvvetin kaynak esnasında oluşan ergimiş metalin hareketini kolaylaştırdığını ve bununda kaynaklanmış bölgenin alanını arttırdığını bildirmişlerdir. Elektromanyetik kuvvet etkisi direnç punta kaynak işleminde kaynak süresi üzerinde de etkilidir. Doğru kaynak süresi ile direnç punta kaynak işleminde elektromanyetik etkiyi arttırmak mümkündür (Li ve ark. 2014). Shen ve arkadaşları (Shen ve ark. 2013) yaptıkları bir çalışmada elektromanyetik kuvvet ile kaynaklanmış bölgenin geometrisinin değişebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, harici manyetik alan altında yapılan punta kaynak işleminde geleneksel direnç punta kaynak işlemine göre kaynaklanmış bölgenin alanının daha dar ve ince olduğunu tespit etmişlerdir. Elektromanyetik alan punta kaynak işleminde kaynak mikro-yapı da etkilemektedir. Elektromanyetik alan etkisi ile kaynaklanmış bölgede tane yönlenmesinin daha az meydana gelmektedir. Ayrıca kaynak işlemi sonrası soğuma sonucu meydana gelen büzülme boşlukları çok daha azdır. Manyetik alan kuvveti etkisinde yapılan punta kaynak işlemi sonucunda kaynak bölgesinin kırılma karakteristikleri de gevrekten süneğe doğru geçiş yapılabilir ve kaynağın mekanik özelliklerini geliştirebilir. Harici manyetik alan etkisiyle, gerilme-kesme kuvveti, çapraz-gergi kuvveti ve kaynakların

sünekliliği önemli ölçüde gelişebilir. Buna ek olarak, özellikle yüksek çevrim şartlarında kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımı manyetik alan etkisi ile arttırılabilir (Shen ve ark. 2013, Popov 1993).

Li ve arkadaşları östenitik paslanmaz çelikler için geleneksel punta kaynağı ile manyetik alan destekli punta kaynağının kaynak bölgesinin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlar ve manyetik alan destekli yapılan punta kaynak birleştirmesinin kopma mukavemetinin geleneksel yöntemle göre %10 daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca Kopma bölgesi kırılma şekli incelendiğinde gevrek kırılmadan sünek kırılmaya doğru bir geçişin meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Kaynaklı birleştirmelerde ani hasarlardan kaçınılması için her zaman kırılma şeklinin sünek olması istenmektedir (Li ve ark. 2018).

Yukarıda verilen literatür ışığında direnç punta kaynak işleminde harici elektromanyetik alanların kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

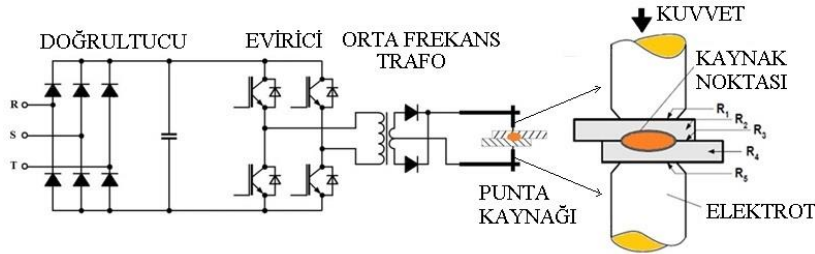
Punta kaynak makinaları kaynak akımına göre alternatif akım ve doğru akım olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğru akım punta kaynak makinalarının Alüminyum kaynağında göstermiş olduğu performanstan dolayı son yıllarda bu konu üzerine çalışmalar artmıştır. Doğru akım punta kaynak makinalarının transformatörlerinde de kullanılan yeni nüve malzemelerinin icat edilmesinin yanı sıra güç elektroniğinde kullanılan anahtarlama elemanları da orta ve yüksek frekanslı punta kaynak makinalarının gelişmesini sağlamıştır. Orta ve yüksek frekanslı makinalar aynı güç değerlikli şebeke frekansındaki makinalara nazaran daha küçük ebatlarda (orta ve yüksek frekansın sağlamış olduğu avantajlardan ötürü) imal edilebilmektedir. Diğer bir deyişle makine performansında kayıp olmaksızın makine ebadında ve ağırlığında önemli düşüş olması nedeniyle robotik uygulamalarda kullanılabilir en uygun kaynak makinalarıdır. Geleneksel yöntemlere nazaran hem kaynak kalitesinde hem de elektriksel özellikleri açısından avantajlar sunması bakımından orta ve yüksek

frekanslı punta kaynak makinaları yaygınlaşmaktadır (Li ve ark., Nagasathya, Boopath ve ark. 2013).

Orta ve yüksek frekanslı punta kaynak işlemi Şekil 1'de şematik olarak görülmektedir. Kaynak işlemi esnasında joule etkisi ile kaynak ısı ortaya çıkmaktadır ve bu ısı zamana bağlı direnç değeri ve bu dirençten geçen akım ile orantılı olarak değişebilir. Bu ilişki (1) numaralı denklem ile tanımlanır;

$$Q = I^2 \cdot f(R) \cdot t \quad (1)$$

Burada; Q ısı enerjisini, I kaynak akımı, t kaynak süresini, R uygulanan gerilime bağlı olarak direnç



Şekil 1. Orta frekanslı punta kaynak makinası eşdeğer devresi (Arslan 2011).

Orta frekanslı doğru akım punta kaynak makinalarının geleneksel kaynak teknolojisine karşı sağladığı avantajlarından (düşük enerji kaybı, makina boyutlarının küçülmesi, seri imalat işlemlerine uygun olması, yüksek verim, alüminyum kaynak edilebilirlik, vb.) dolayı kullanımı artmaktadır. Üç faz gerilim doğrultulur. Anahtarlama elemanları ile orta frekans AC (1000 Hz) gerilim transformatöre uygulanır. Orta uçlu trafo çıkışına bağlanan diyotlar ile doğru akım elde edilmektedir.

Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, kaynak elektrotuna sürekli mıknatis yerleştirilerek punta kaynak kalitesini arttırmaya yönelik çeşitli geometrilerde mıknatis tasarımları önermektedir. Tasarlanan mıknatis yapılarının değişimlerinin kuvvet değişimleri incelenmiştir. Doğru akım punta kaynak sistemleri için E-Nose elektrod geometrisine yerleştirilen sürekli mıknatis tasarımları manyetostatik analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kuvvetin minimum ve akım yoğunluğunu maksimum yapmak amacıyla

punta kaynak işlemi esnasında değişen direnç fonksiyonunu temsil eder.

Orta ve yüksek frekans doğru akım punta kaynak makinalarının çalışma prensibi olarak (Şekil 1); güç ihtiyaçlarından dolayı üç fazlı olarak beslenmektedir. Üç faz doğrultucu ile doğru akıma dönüştürülür. Evirici devresi ile orta ve yüksek frekanslı gerilim elde edilir. Orta veya yüksek frekanslı transformatörler ile çıkış gerilimi 6-15 V değerlerine kadar düşürülür. Genellikle transformatör orta uçlu yapıda ve güç transformatörünün çıkışında bulunan yüksek akımlı Schottky diyotlar ile doğru akım elde edilerek kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir.

mıknatis geometrilerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen geometrilerin akım yoğunluğu üzerindeki etkileri mıknatissız geometri ile karşılaştırılmıştır. Bu analiz sonuçlarında en iyi mıknatis geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Modelleme Ve Farklı Mıknatis Geometrileri

Manyetohidrodinamik (MHD) teorisi (Li ve ark. 2011), kaynak anındaki Lorentz kuvveti Eş.2 ile tanımlanır:

$$\vec{P} = \vec{j} \times \vec{B} = (\vec{j}_E + \vec{j}_v + \vec{j}_q) \times \vec{B} \quad (2)$$

Burada \vec{j}_E akım yoğunluğu \vec{j}_v , eriyik kaynaklı akım yoğunluğu ve \vec{j}_q yük hareketinden kaynaklı akım yoğunluğu olarak verilmiştir. Basitleştirilmiş olarak Lorentz kuvveti Eşitlik 3 ile verilmiştir:

$$\vec{F} = \vec{j}_E \times \vec{B} \quad (3)$$

Geleneksel direnç punta kaynak işleminde kaynak bölgesine etki eden Lorentz kuvveti \vec{F}_{RSW} aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$\vec{F}_{RSW} = \vec{F}_{in} = \vec{j}_E \times \vec{B}_{in} \quad (4)$$

Burada B_{in} indüklenen manyetik alanı, \vec{F}_{in} ise indüklenen manyetik kuvveti temsil eder. Kaynak işlemi esnasında manyetik kuvvet \vec{F}_{ex} iletim akımı \vec{j}_E ve manyetik alan sabiti B_{ex} ile ilişkili olarak aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Shen, Li ve ark. 2011).

$$\vec{F}_{ex} = \vec{j}_E \times \vec{B}_{ex} \quad (5)$$

Direnç punta kaynağında harici manyetik alan sabiti ile birlikte Lorentz kuvveti için aşağıdaki gibi bir denklem tanımlanabilir.

$$\vec{F}_{RSW*}MAG = \vec{F}_{in} + \vec{F}_{ex} = \vec{j}_E \times \vec{B}_{in} + \vec{j}_E \times \vec{B}_{ex} \quad (6)$$

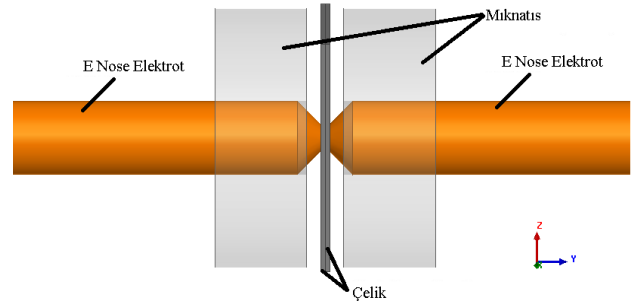
Harici manyetik alanın artışı harici manyetik kuvvetin artışı sağlamaktadır.

Şekil 4-5-6'da görüldüğü üzere E nose şeklindeki elektrotlara çeşitli geometrilerde mıknatıslar yerleştirilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği üzere kaynak işleminin y ekseninde gerçekleştiği kabul edilmiştir. Elektrotlara kuvvet uygulanmaksızın ($F_x=0$, $F_y=0$, $F_z=0$) ilk temas anı incelenmiştir. Manyetostatik analizi gerçekleştirilmiştir. Amper kanunu gereği çözüm gerçekleştirilmesi için elektrotlar çok uzun ve dıştan devresini tamamlamaktadır.

İlk anda akım sıfır olduğu için kaynak bölgesinde yalnızca mıknatısların meydana getirmiş olduğu manyetik alan ve mıknatısların aynı kutuplarının birbirini itmesi nedeniyle mıknatıs kuvveti de söz konusudur. Kaynak yapmaya çalışırken elektrotlar birbirine yaklaştıkça aynı kutupların birbirini itme kuvveti artmaktadır. Bilindiği gibi bu kuvvetin artış miktarı mesafenin karesi ile ters orantılıdır. Bu nedenle elektrodun birleşme durumunda mıknatıs pozisyonu ve boyutu değiştirilerek itme kuvveti incelenmiştir. Çünkü itme kuvvetinin büyüklüğünün yüksek olması birleştirme işlemi için uygulanacak harici kuvveti azaltmaktadır. Uygulamada bu kuvvet;

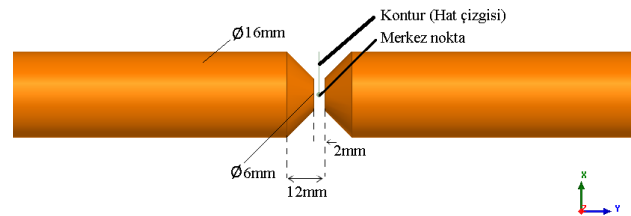
kaynak için uygulanacak harici kuvvetten küçük olmasına karşın mıknatıs destekli kaynak sistemleri için dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada temel amaç uygulamadaki etkin kuvveti azaltmadan veya etkilemeden harici manyetik akı yoğunluğu artırılarak kaynak kalitesini artırılmasıdır.

Kaynak akımı DC 12 KA elektrod boyunca geçen akım olarak tanımlanmıştır. Bu durumda hem mıknatıs hem de kaynak akımının meydana getirdiği manyetik alanlar kaynak edilecek malzeme üzerinde etkilidir. Burada mıknatıs malzemesi olarak NdFeB35, mıknatıs manyetik akı yoğunluğu 1.1 T, mıknatıs maksimum enerji miktarı 287–310 kJ/m ve zorlayıcı alan şiddeti 907 kA/m'den yüksektir. Elektrot malzemesi bakır (geçirgenliği 1) ve kaynak malzemesi olarak paslanmaz çelik (geçirgenliği 1) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Elektrotlara yerleştirilen mıknatıslı model.

Doğru akım kaynak modeli Şekil 3'te verilmiştir. Akım yoğunluğunu değişimini incelemek amacıyla Şekil 3'te görüldüğü üzere merkez nokta ve merkez noktadan elektrot yarıçapı boyunca hat çizgisi tanımlanmıştır.

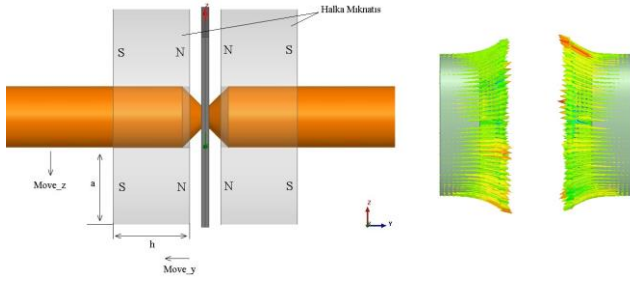


Şekil 3. Mıknatıssız modelin 2D görünüşü; elektrod boyutlandırma verileri, merkez nokta ve merkezden elektrod yarıçapı boyunca hat çizgisi.

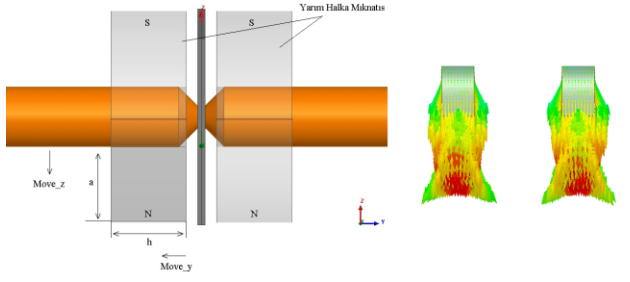
Bu çalışmada tasarlanan mıknatıs geometrileri Şekil 4, 5, 6, 7, 8'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Şekil 4'te elektrotlara yerleştirilen halka mıknatıslar ve

manyetizasyon yönü görülmektedir. İki adet halka miknatıs tanımlanmıştır. Şekil 4 ve Şekil 5 için miknatısların temel geometrisini belirleyen a (genişlik) ve h (yükseklik) olarak tanımlanmıştır. Miknatıslar eksen üzerinde yansıma yapılarak oluşturulmuştur. Move_z ve Move_y yönünde hareket ettirilerek manyetik akı yoğunluğu değişimi ve kuvvet değişimi incelenmiştir.

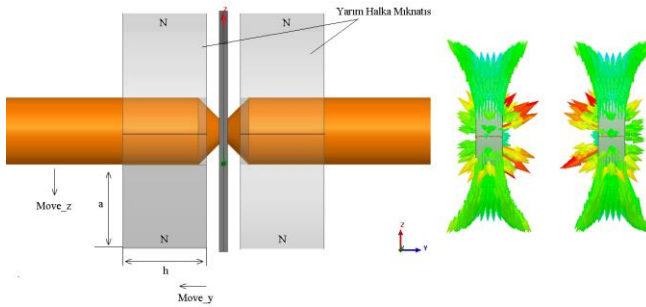
Şekil 5'teki elektrotlara yerleştirilen yarım halka miknatısların farklı manyetizasyon yönlü modeli Şekil 6'da verilmiştir. Yine 4 adet yarım halka miknatıs tanımlanmıştır.



Şekil 4. Tasarım A: Elektrotlara yerleştirilen halka miknatıs ve manyetizasyon yönü.



Şekil 5. Tasarım B: Elektrotlara yerleştirilen yarım halka miknatıs ve manyetizasyon yönü.



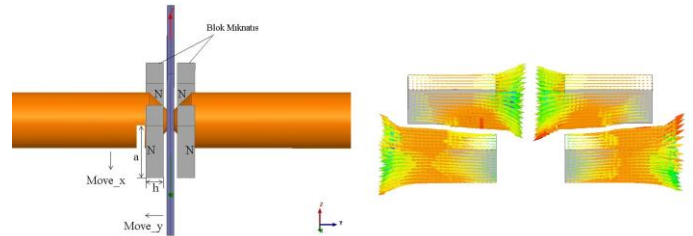
Şekil 6. Tasarım C: Elektrotlara yerleştirilen yarım halka miknatıs ve manyetizasyon yönü.

Şekil 7 ve 8 'de elektrotlara yerleştirilen blok miknatıslar ve manyetizasyon yönü görülmektedir. Dört adet blok miknatıs tanımlanmıştır. Şekil 7 ve 8 için miknatısların temel geometrisini belirleyen a (genişlik) ve h (yükseklik) olarak tanımlanmıştır.

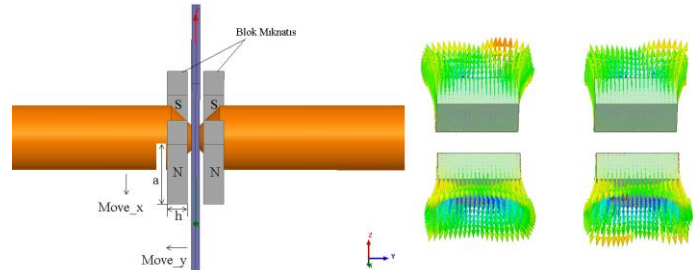
Miknatıslar; çizimde ayna (mirror) komutu ile oluşturulduğu için Move_x ve Move_y yönünde hareket ettirilerek manyetik akı yoğunluğu değişimi ve kuvvet değişimi incelenmiştir.

3. Elektrotlara Yerleştirilen Miknatıs Modellerinin Kuvvet Değişiminin İncelenmesi Ve Optimizasyonu

Bilindiği gibi karşılıklı yerleştirilen aynı kutuplu veya zıt kutuplu miknatısların itme veya çekme kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin büyüklüğü miknatısın geometrisi ile orantılı olarak değişmesine karşın miknatıslar arası mesafe ile ters orantılı olarak değişmektedir. Elektrotlara yerleştirilen miknatısların geometrik değişkenlere göre kuvvet değişimi Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde miknatıs ebatları (a ve h ölçüleri) büyüdükçe kuvvetin artması beklenen bir sonuçtur. Ancak miknatısların manyetizasyon yönü değişimi kuvvet değişimini önemli ölçüde etkilemektedir. A tasarımı en fazla kuvvet değişimi oluşmaktadır. Benzer şekilde Şekil 10 incelendiğinde miknatıs ebatları (a ve h ölçüleri) büyüdükçe kuvvetin artması beklenen bir sonuçtur. Ancak D ve E miknatıslarının manyetizasyon yönüne bağlı olarak kuvvet değişimi önemli ölçüde etkilemektedir. D tasarımında en fazla kuvvet değişimi oluşmaktadır.



Şekil 7. Tasarım D: Elektrotlara yerleştirilen ikili çubuk miknatıs ve manyetizasyon yönü.



Şekil 8. Tasarım E: Elektrotlara yerleştirilen ikili çubuk miknatıs ve manyetizasyon yönü.

Şekil 3'te yer alan miknatıssız kaynak modelinde eksen merkezinden çizilen hat çizgisi boyunca 8 mm

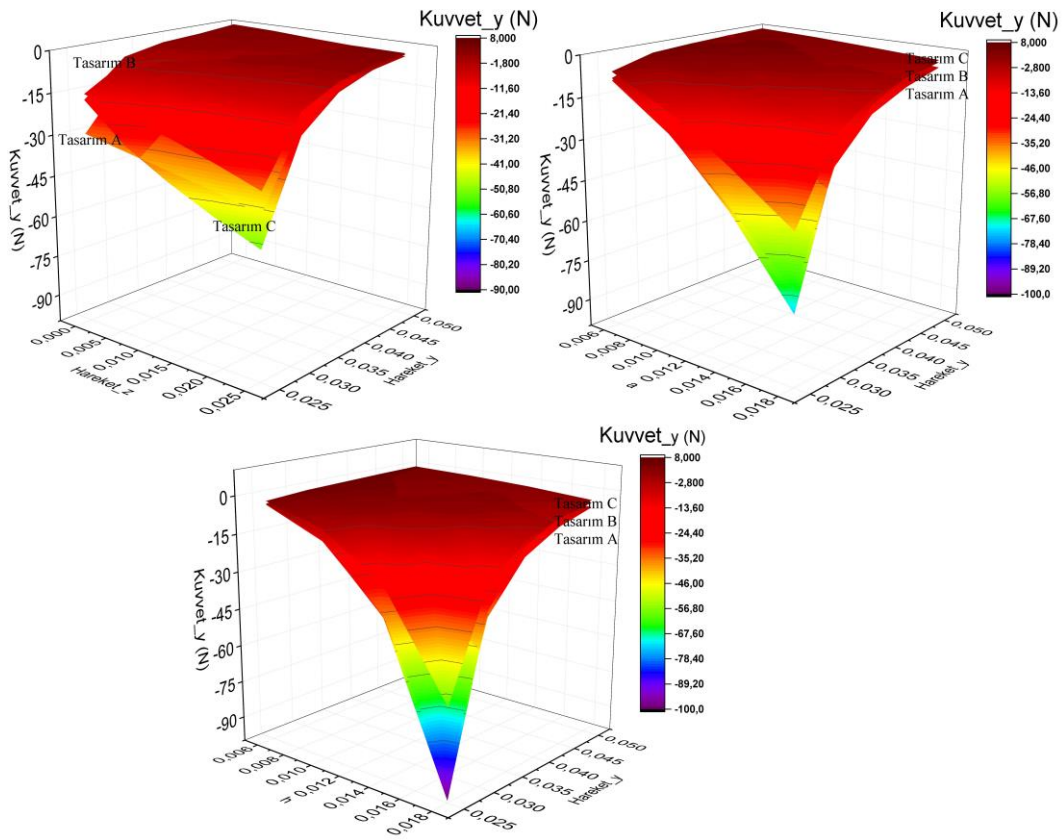
mesafeye kadar akım yoğunluğu azalmakta ve 8 mm’de sıfır değerine çok yakındır (Arslan 2017). Optimizasyon amaç fonksiyonu hem kuvvet değerini sıfıra indirgemeye hem de 8 mm’deki akım yoğunluğunu yükseltmeyi amaçlamaktadır. Optimizasyon işlemine ait temel bilgiler Çizelge 1’de verilmiştir.

Tasarımların kuvvet değişimleri dikkate alındığında tasarımların başlangıç, minimum-maksimum değişim aralığı ve optimizasyon sonucu elde edilen optimum geometri değerleri Çizelge 2 ve Çizelge

3’de verilmiştir. Çizelge 2 ve 3’te verilen optimizasyon sonucu geometrilerinin kuvvet değişimleri Şekil 11 ile verilmiştir.

Çizelge 1. Ansys Maxwell 3D, Genetik Algoritma’da tanımlanan amaç foksionları

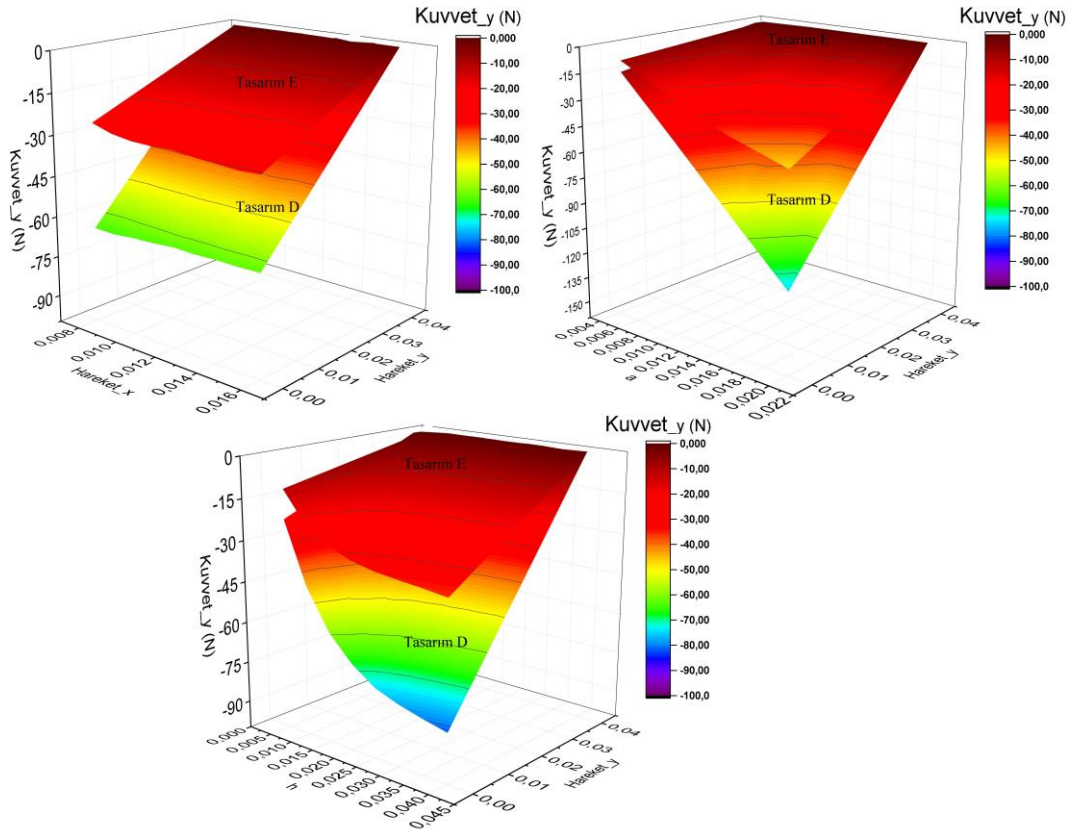
Amaç Fonksiyonu	Kuvvet=0	Ağırlık Değeri=1
1		
Amaç Fonksiyonu 2	$J_{8mm} \geq 25000000$	Ağırlık Değeri=2
İterasyon Sayısı	1000	



Şekil 9. Tasarım A-B-C’nin geometrik değişkenler ile itme kuvveti değişimi.

Çizelge 2. Tasarım A,B,C boyutlandırma değişkenleri.

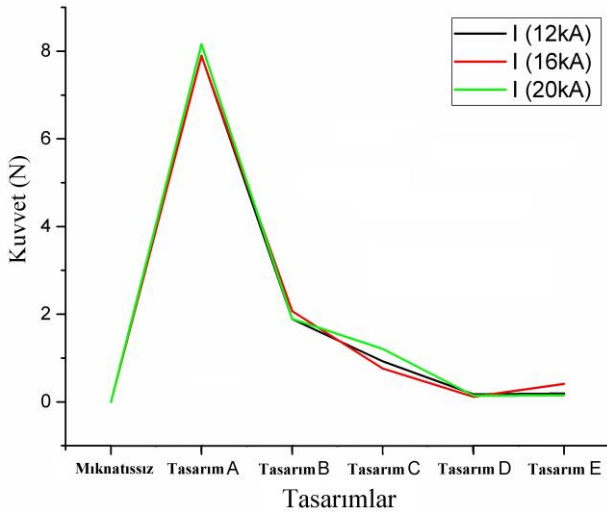
Değişkenler	Başlangıç değeri	Minimum	Maksimum	Optimum Tasarım A	Optimum Tasarım B	Optimum Tasarım C	Birim
Move_y	0.035	0.03	0.05	0.038	0.035	0.032	m
Move_z	0.008	0.004	0.012	0.009	0.007	0.005	m
a	0.012	0.006	0.018	0.01	0.007	0.01	m
h	0.012	0.006	0.018	0.015	0.014	0.008	m



Şekil 10. Tasarım D-E'nin geometrik değişkenler ile itme kuvveti değişimi.

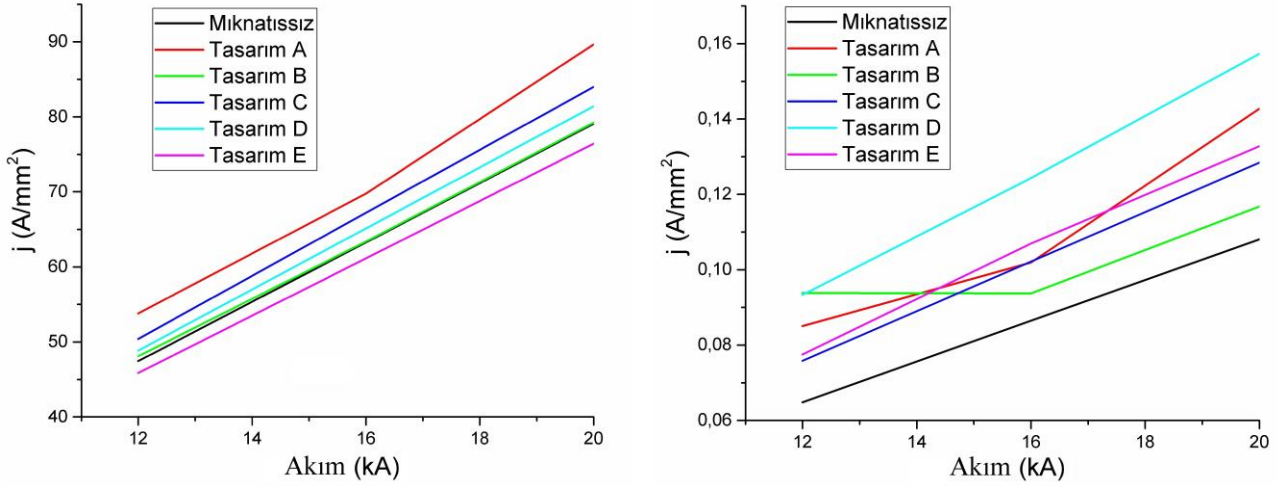
Çizelge 3. Tasarım D,E boyutlandırma değişkenleri.

Değişkenler	Başlangıç değeri	Minimum	Maksimum	Optimum Tasarım D	Optimum Tasarım E	Birim
Move_x	0.012	0.008	0.016	0.01	0.008	m
Move_y	0.03	0.02	0.04	0.031	0.025	m
a	0.008	0.004	0.012	0.007	0.009	m
h	0.02	0	0.04	0.03	0.026	m



Şekil 11. Modellerin kuvvet değişimi.

Tüm modellerde harici kuvvet sıfırdır. Bu nedenle miknatıssız model sıfırdan başlamıştır. Modellere göre A tasarımı en yüksek kuvvete sahiptir. Yaklaşık 8N itme kuvveti olması harici uygulanan kuvveti azaltacaktır. Diğer modeller kuvvet bakımından önemli bir etkiye neden olmayacaktır. Harici manyetik alanlı ve harici manyetik alansız çözümler sonucunda akım yoğunluğu elektrod çapına kadar düzgün değişime göstermesinin yanı sıra elektrot çapının dışından uzaklaştıkça manyetik akım yoğunluğu hızla azalır (Arslan 2017). Bu nedenle merkez ekseninden 4mm ve 8mm uzaklıktaki akım yoğunluğu değişimi Şekil 12 ile verilmiştir.



Şekil 12. Eksen merkezinden 4mm ve 8mm uzaklıktaki akım yoğunluğu değişimleri.

Burada 20 kA kaynak akımı için eksen merkezinden 4 mm uzaklıktaki akım yoğunluk değerleri mıknatıssız durumda akım yoğunluğu 79 A/mm² iken A tasarımında 89.64 A/mm², B tasarımında 79.2 A/mm², C tasarımında 83.9 A/mm², D tasarımında 81.4 A/mm² ve E tasarımında ise 76.41 A/mm² olarak bulunmuştur. Eksen merkezinden 8 mm uzaklıktaki akım yoğunluk değerleri çok küçük değerlikte olduğundan dolayı kaynak nüfuziyetine katkı beklenmektedir. Yine eksen merkezinden 4 mm uzaklıktaki akım yoğunluk değerleri incelendiğinde tasarım modellerinden B ve E modeli mıknatıssız modele çok yakındır. Bu nedenle kaynak üzerinde önemli bir etki beklenmemektedir. Kuvvetin küçük olduğu ve akım yoğunluğunun yüksek olduğu C ve D tasarımı kullanılabilir. Ancak C tasarımının uygulamada imalat problemleri (manyetizasyon yönünden ötürü) göz önünde bulundurulduğunda D tasarımı en iyi model olarak söylenebilir. Ayrıca kuvvet yüksekliği göz önünde bulundurulmazsa en iyi tasarım A olarak söylenebilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada doğru akım punta kaynağı için harici mıknatısın akım yoğunluğu ve kuvvet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı mıknatıs geometrileri farklı kaynak akımlarında akım yoğunluğu ve kuvvet açısından değerlendirilmiştir.

Literatürde harici manyetik alan kaynağı olarak mıknatıs kullanılan çoğu uygulama çalışmasında (Li ve ark. 2011, 2013, 2014, 2018, Shen ve ark. 2013) halka mıknatıs kullanılarak punta kaynağı üzerindeki avantajlar geniş olarak verilmiştir. Ancak çalışmalarda kullanılan mıknatıs ebatları ve maliyet karşılaştırması Çizelge 4 ile verilmiştir:

Çizelge 4. Ebat ve Maliyet Karşılaştırmaları.

Referanslar	Ebat (mm) (ϕ_d, ϕ_i, h)	Toplam Yaklaşık Maliyet (TL)
Li ve ark 2013	40x20x20	250,9
Li ve ark 2014	100X40X10	878,3
Li ve ark 2018	50X24X30	603,5
Bu çalışma Tasarım A	40,02X19,62X15,7	199,7

Not: Burada ϕ_d dış çap, ϕ_i iç çap, h yükseklik olarak verilmiştir. İnternet referansında belirtilen NdFe35 mıknatıs perakende birim maliyeti 1 kg=900 TL ve yoğunluğu 7400 kg/m³ olarak alınarak yaklaşık maliyet hesaplanmıştır. Bu çalışmada optimum elde edilen halka mıknatıs literatürde ele alınan mıknatıslara nazaran hem maliyet hem de harici kuvvet bakımından avantaj sağlayacaktır.

Kısaca çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Elektrotlara aynı kutup birbirine bakacak şekilde yerleştirilen mıknatısların meydana getirdiği itme kuvveti

puntalama için gerekli net kuvveti azaltmasının yanı sıra bu kuvvetin büyüklüğüne dikkat edilmelidir.

- Nüfuziyet artışı için elektrod çapı dışında kalan bölgenin akım yoğunluğunun yüksek olması kaynak kalitesini arttırmaktadır ve yapılan uygulamalarda (Li ve ark. 2014, Shen ve ark. 2013) kaynaklı bölgenin mikro yapısında önemli değişimler meydana gelmektedir.
- Analizler; harici puntalama kuvveti sıfır alınarak gerçekleştirilmiştir. Mıknatısların itme kuvveti en küçük ve akım yoğunluğu en büyük mıknatıs geometrisi Tasarım C (yarım halka) ve Tasarım D (blok mıknatıs)'dir. Ancak itme kuvveti (8 N) ihmal edilebilir veya puntalama için uygulanan harici kuvvete nazaran çok küçük olduğu düşünülürse en iyi mıknatıs Tasarım A (halka mıknatıs) olduğu görülmüştür. Ayrıca mıknatıs maliyetleri düşünüldüğünde en iyi geometri Tasarım D olarak değerlendirilebilir.
- Mıknatısların manyetizasyon yönü akım yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirmektedir.
- Kaynak anındaki sıcaklık etkisinden dolayı mıknatısların akı kaybına uğramaması için H veya A sınıfı Neodmiyum mıknatıs kullanılmalıdır. Ayrıca yüksek Curie sıcaklığına ve yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip mıknatıslar da kullanılabilir.
- Yüksek güçlü punta kaynak makinalarında, yüksek kaynak akımları için (12kA den yüksek) mıknatıslı modellerin kaynak üzerindeki etkileri artmaktadır.

5. Kaynaklar

Arslan, S. (2011). "Orta frekanslı punta kaynak transformatörü ve makinası tasarımı." Gazi üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 146s.

Arslan, S. (2017). Doğru Akım Punta Kaynak Kalitesini Arttırmaya Yönelik Harici Manyetik Alan Etkisinin

İncelenmesi, Mesleki Bilimler Kongresi, 6 (3): 553 – 559.

Bowers, R. J., C. D. Sorensen and T. W. Eagar (1990). "Electrode Geometry in Resistance Spot-Welding." *Welding Journal* 69(2): S45-S51.

Chan, K. R. and N. Scotchmer (2006). Longer Electrode Life from a New Geometry, an Innovative Multilayer Coating, and Internal Cooling Fins. The 4th International Seminar on Advances in Resistance Welding.

Chen, R., C. M. Wang, P. Jiang, X. Y. Shao, Z. Y. Zhao, Z. M. Gao and C. Yue (2016). "Effect of axial magnetic field in the laser beam welding of stainless steel to aluminum alloy." *Materials & Design* 109: 146-152.

Cho, H. S. and Y. J. Cho (1989). "A Study of the Thermal-Behavior in Resistance Spot Welds." *Welding Journal* 68(6): S236-S244.

Eisandeh, H., M. Hamedi and A. Halvae (2010). "New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method." *Materials & Design* 31(1): 149-157.

Khan, J. A., L. Xu and Y. J. Chao (1999). "Prediction of nugget development during resistance spot welding using coupled thermal-electrical-mechanical model." *Science and Technology of Welding and Joining* 4(4): 201-207.

Li, W., Feng, E., Cerjanec, D., & Grzadzinski, G. A. (2004, May). Energy consumption in AC and MFDC resistance spot welding. In *Sheet Metal Welding Conference XI* (pp. 11-14).

Li, Y., Z. Luo, F. Y. Yan, R. Duan and Q. Yao (2014). "Effect of external magnetic field on resistance spot welds of aluminum alloy." *Materials & Design* 56: 1025-1033.

Li, Y. B., Zhang, Q. X., Qi, L., & David, S. A. (2018). Improving austenitic stainless steel resistance spot weld quality using external magnetic field. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23 (7), 619-627.

Li, Y. B., Shen, Q., Lin, Z., & Hu, S. J. (2011). Quality improvement in resistance spot weld of advanced high strength steel using external magnetic

- field. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(5), 465-469.
- Li, Y. B., Li, Y. T., Shen, Q., & Lin, Z. Q. (2013). Magnetically assisted resistance spot welding of dual-phase steel. *Weld. J*, 92(4), 124-132.
- Mousavi, M. G., M. J. M. Hermans, I. M. Richardson and G. den Ouden (2003). "Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds." *Science and Technology of Welding and Joining* 8(4): 309-312.
- Nagasathya, N., S. R. Boopath and A. Santhakumari (2013). "MFDC - An Energy efficient Adaptive technology for Welding of Thin Sheets." 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (Iceets).
- Nied, H. A. (1984). "The Finite-Element Modeling of the Resistance Spot-Welding Process." *Welding Journal*, 63(4): S123-S132.
- Popov, V. (1993). "Effect of the magnetic field on the formation of the joint in resistance spot welding." *Welding international*, 7(11): 905-907.
- Roberts, W. L. (1951). "Resistance Variations during Spot Welding." *Welding Journal*, 30: 15.
- Shen, Q., Y. B. Li and G. L. Chen (2013). "A Novel Method Using Electromagnetic Stirring to Improve Resistance Spot Weld Quality of Advanced High Strength Steel (AHSS)." *Trends in Welding Research: Proceedings of the 9th International Conference*: 661-669.
- Shen, Q., Y. B. Li, Z. Q. Lin and G. L. Chen (2011). "Effect of External Constant Magnetic Field on Weld Nugget of Resistance Spot Welded Dual-Phase Steel DP590." *Ieee Transactions on Magnetics*, 47(10): 4116-4119.
- Sundaresan, S. and G. D. J. Ram (1999). "Use of magnetic are oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in alpha-beta titanium alloys." *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(3): 151-160.
- Tarimer, I., S. Arslan, E. M. Guven and M. Karabas (2011). "A Case Study of a New Spot Welding Electrode Which Has the Best Current Density by Magnetic Analysis Solutions." *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, 62(4): 233-238.
- Yao, Q., Luo, Z., Li, Y., Yan, F. Y., & Duan, R. (2014). Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld. *Materials & Design*, 63, 200-207.
- Watanabe, Y., T. Takeda and H. Sato (2006). "Effect of magnetic field on weld zone by spot-welding in stainless steel." *Isij International*, 46(9): 1292-1296.
- Wei, P. S., S. C. Wang and M. S. Lin (1996). "Transport phenomena during resistance spot welding." *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 118(3): 762-773.
- Zhang, X. Q., G. C. Xu, J. Wen and C. S. Wang (2009). "The Research for Resistance Spot Welding with Rectangular Electrode." 2009 Ieee International Conference on Mechatronics and Automation, Vols 1-7, Conference Proceedings: 2484-2488.

İnternet kaynakları

- 1- <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.magnetmarket.com.tr%2Fneodyum-miknatıslar%2Fnormal-delik-neodyum-miknatıslar%2Fcap-40mm-x-del-capi-20mm-x-kalinlik-8mm-neodymium-magnet.html&date=2019-02-22>, (22.02.2019)