

Nikel Kaplanmış Alüminyum Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi

Investigation of Joinability of Nickel Coated Aluminum Sheets with Friction Stir Spot Welding

Murathan KALENDER¹ , Halil ULUPINAR¹ , Yahya BOZKURT¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

Öz

Endüstride üretilen ürünlerin üzerinde çok çeşitli kaynaklı birleştirmeler yapılabilmektedir. Klasik ergitme kaynak yöntemlerinde oluşan sıcaklığa bağlı olarak kaynak bölgesinde gözenek, sıcak çatlak, yüksek ısı girdisi nedeniyle çarpılma ve kimyasal element kaybı gibi problemler meydana gelmektedir. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında bu hatalar elimine edildiğinden dolayı farklı malzemelerin birleştirme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yöntem ile hem aynı cins hem de farklı malzeme kombinasyonlarında kaynak yapmak mümkündür. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, birçok avantajı nedeniyle, otomotiv ve havacılık sektörleri dâhil olmak üzere çeşitli endüstrilerden büyük ilgi görmüş olan bir katı hal kaynak prosesisidir. Al, Cu, Mg ve polietilen gibi malzemelerin kaynağı bu kaynak yöntemi ile sorunsuz bir şekilde yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, nikel kaplanmış ve kaplanmamış AA2024-T3 levhalar sabit kaynak parametreleri kullanılarak sürtünme karıştırma nokta kaynak tekniği ile birleştirilmiştir. Elde edilen mekanik ve mikroyapısal deneyler sonucunda birleştirilen parçaların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, kaynak teknolojileri, nikel, sürtünme karıştırma nokta kaynağı.

Abstract

Various welded joints can be made on the products manufactured in the industry. Depending on the temperature formed in conventional melting welding methods, problems such as pore, hot crack, distortion and chemical element loss occur due to high heat input. Since these faults are eliminated in the friction stir spot welding, they are frequently used in the joining processes of different materials. With the method, it is possible to weld both the same type and different material combinations. Friction stir spot welding is a solid state welding process, which has attracted great attention from various industries, including the automotive and aerospace industries, due to its many advantages. Welding of materials such as Al, Cu, Mg and polyethylene can be made without any problem with this welding method.

In this study, nickel-coated and uncoated AA2024-T3 plates were combined with the friction stir spot welding technique using fixed welding parameters. The mechanical properties of the assembled parts were evaluated as a result of the obtained mechanical and microstructural experiments.

Keywords: Aluminium, welding technologies, nickel, friction stir spot welding.

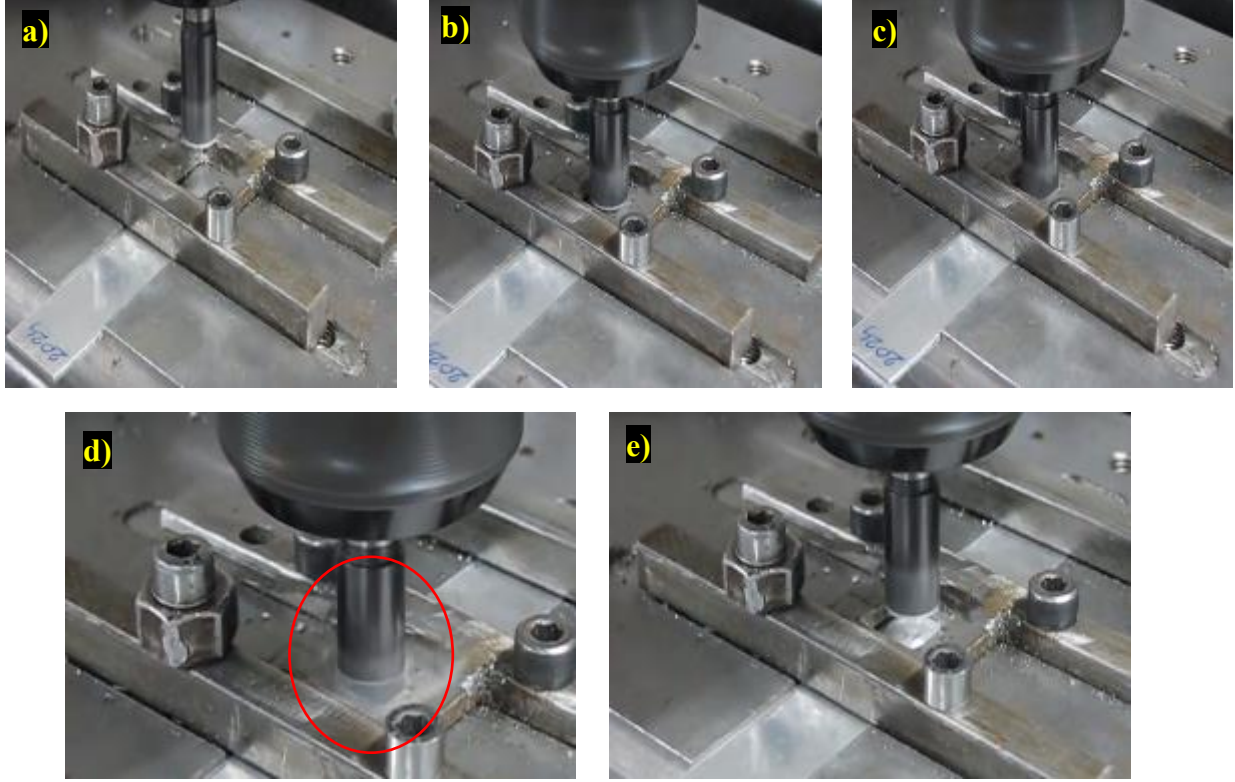
I. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde en çok araştırma ve geliştirme çalışmaları, ağırlığı hafif ve mekanik özellikleri yüksek malzemeler üretmek üzerinedir. Otomotiv sektörü, hassas cihazların imalatı, uzay ve uçak teknolojileri, çelik yapılar, çelik eşya imalatı, boru üretimi, makine sektörü ve elektroteknik gibi pek çok alanda kullanılan metal malzemelerin kaynağında yaşanan sorunlar, farklı kaynak türlerinin gelişimini sağlamıştır. Ayrıca, bu sektörlerde kullanılacak malzemelerde istenilen hafiflik ve yüksek dayanım özelliği, sandviç (en az 3 katmanlı) malzemelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Her katmanda farklı çeşitlerde kullanılan malzemeler hem hafiflik hem de kaynaklanabilirlik açısından olumlu sonuçlar vermektedir. Geliştirilen bu malzemelerin ve yapıların birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemleri daha etkili olmuştur. Katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağından türeyen sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemidir. Elektrik direnç nokta kaynağına (EDNK) alternatif olarak geliştirilen ve sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi temel alınarak geliştirilen SKNK yöntemi, kaynak teknolojisi konusunda karşımıza çıkan en son gelişmelerden birisidir. Yöntem, nokta sürtünme kaynağı veya sürtünme nokta birleştirmesi olarak da adlandırılmaktadır [1].

SKNK düşük maliyetli ve yüksek performans göstermesini isteyen bağlantılar için ideal bir yöntemdir. SKNK ile

çelik, alüminyum, bakır, nikel, titanyum, polietilen vb. malzemelerin birleştirilmesi yapılabilmektedir. Metalik malzemeler ergitilmeden, malzemelerin ergime sıcaklıklarının altında bir sıcaklıkta malzeme katı haldeyken kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir [2].

SKNK prensibi, omuz ve karıştırıcı uç (takım) dahil



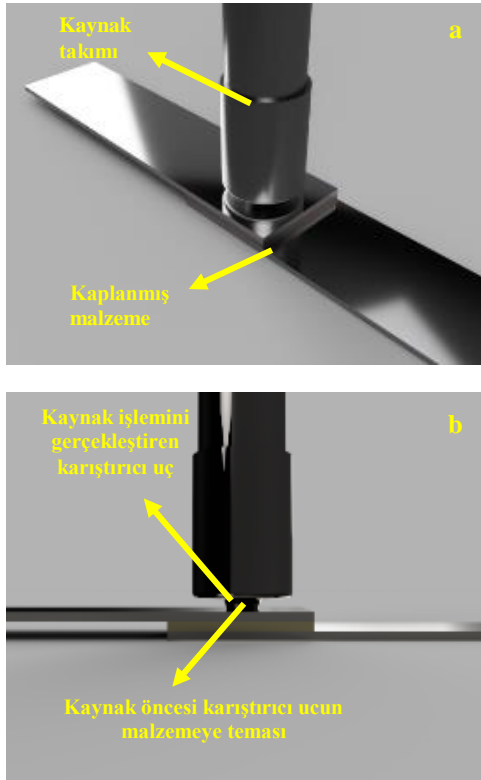
Şekil 1. SKNK basamakları; a) SKNK öncesi, b) SKNK öncesi temas halindeki karıştırıcı uç, c) Omuzun malzeme yüzeyine temasla ısı oluşturmaya, d) Katı hal birleşme, e) İşlemin sonlanması ve kaynak takımının geri çekilmesi [3]

Al-Fe gibi benzer olmayan iki metalin klasik nokta kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Al, Sn, Zn, Zn-Pb alaşımlı kaplanmış çeliklerin EDNK ile birleştirilmesinde özel kaynak ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. SKNK yönteminin büyük benzerlikler gösterdiği EDNK' dan daha az teçhizat maliyeti ve çok düşük enerji tüketimi gerektiği için ekonomik avantaj sağlamaktadır [4].

SKNK'nın diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre avantajlarını metalurjik, çevresel ve enerji olmak üzere üç ana grupta inceleyebiliriz. SKNK yöntemi katı fazda gerçekleştiğinden dolayı kaynak bölgesindeki malzemeye metalurjik olarak hasar vermez. Fakat, bazı alaşımların ergitmeli birleştirilmelerinde kalitesinde büyük sorunlar meydana gelmektedir. Klasik ergitme kaynak yöntemlerinde oluşan sıcaklığa bağlı olarak kaynak bölgesinde gözenek, sıcak çatlak, yüksek ısı girdisi nedeniyle çarpılma ve kimyasal element kaybı gibi problemler meydana gelmektedir [5].

olmak üzere iki parçadan oluşan ergimeyen bir karıştırıcı yardımıyla takımın parça üzerinde nokta birleştirme işlemi yapmasıdır. SKNK işlemi, farklı hızlara sahip dönen takımın levhalar arasına daldırılması, ısı ve basınç yardımıyla nokta kaynak işleminin gerçekleştirilmesidir. Şekil 1'de SKNK işlem basamakları gösterilmektedir [3].

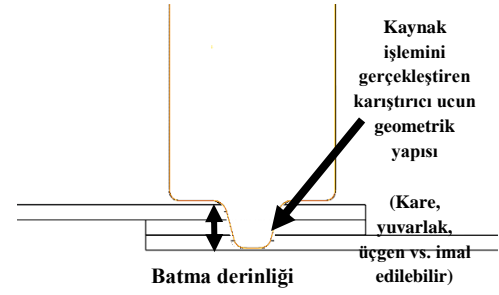
İşlem sırasında sıcaklığın diğer kaynak yöntemlerine göre daha az olması, iş parçasındaki burulmaları en aza indirmektedir. Bu yöntem, iyi bir boyutsal kararlılık ve tekrar edilebilirlik özelliğine sahip olmasının yanı sıra alaşım elementleri üzerinde kayıplar oluşmamaktadır. SKNK sonrasında birleşim bölgesi ince taneli mikroyapıya sahip olduğundan bu bölge mükemmel metalurjik özelliklere sahiptir. Isı girdisi nedeniyle iş parçasında çatlak oluşmaz. Çevresel ve enerji avantajlarına bakıldığında; gaz altı kaynaklarındaki gibi koruyucu gaza gerek yoktur. Ayrıca alüminyum sacların EDNK işleminde bazı büyük problemler meydana gelmektedir. Bu problemlerin başında; çatlaklar, porozite, sıçramalar ve kaynak elektrot aşınması gelmektedir [6-7]. SKNK işlemi sonrasında sıçrama olmadığından yüzey temizliğine gerek kalmaz ve taşlama atıkları oluşmaz. SKNK yöntemiyle gelişmiş malzemelerde birleştirme yapılırken bu malzemelerin hafif olmasında büyük rol alır. Şekil 2'de sandviç levhaların SKNK ile kaynak işleminin şematik hali görülmektedir.



Şekil 2. SKNK işleminde 3 boyutlu şematik görünümü, a) İzometrik görünüş, b) Önden görünüş

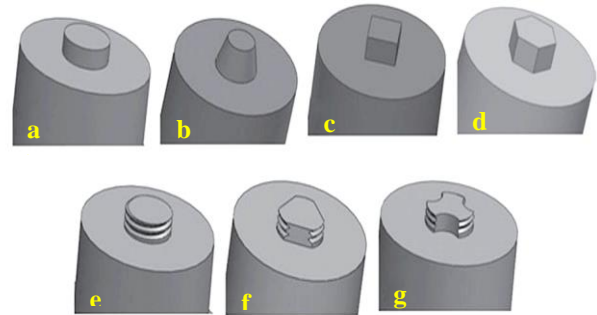
SKNK yöntemi homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır. Takımın omuz ve karıştırıcı ucunun aşınması ve kırılması, takım malzemesinin seçimi için ciddi bir sınırlama getirmektedir. SKNK sonucunda, takımlar işlem sırasında ulaşılan sıcaklıklarda yüksek mekanik dirence sahip olmalıdır. Bununla beraber aşınma ve oksitlenmeye karşı direnç sağlayabilmelidir. SKNK işlemlerinde sıcaklığın tipik olarak işlenmiş malzeme için, ergime sıcaklığının yaklaşık % 80 oranına ulaştığı gözlemlenmiştir [8]. Bununla birlikte, ana metalde oluşan sıcaklıkla birlikte takım içindeki sıcaklık önemli bir değişkendir.

Takım omzu sürtünme veya deformasyon ısısının büyük bir kısmını oluşturur; karıştırıcı uç iş parçaları arasındaki malzeme akışına yardımcı olur. Takımın profili ve geometrisinin yanı sıra SKNK'da yer alan diğer parametreler; takım dönme hızı, dalma (daldırma) derinliği ve bekleme süresidir. Bu proses parametreleri kaynaklı birleştirmenin dayanımını ve yüzey kalitesini belirler. SKNK'dan sonra karışım bölgesinde farklı mikroyapısal bölgeler görülür. Şekil 3' de SKNK işleminde kullanılan takımın örnek geometrisi ve batma derinliği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. SKNK işleminde kullanılan takımın örnek bir geometrisi ve batma derinliğinin şematik olarak gösterimi

Kullanımı zamanla artan SKNK yönteminin uygulama alanları da gün geçtikçe artmaktadır. SKNK yönteminin ihtiyaçlara cevap verebilecek şekilde gelişmesini sağlayabilmek için de kaynak sırasında kullanılan alet, donanım ve makinelerinde geliştirilmesi gerekmektedir [9]. Kaynak işleminde kullanılan fişür, takım ve karıştırıcı uç geometrisinin, kaynak kalitesine ve mekanik özelliklerine doğrudan etki ettiği daha önceki çalışmalarda görülmüştür [10-11]. SKNK uygulamalarında kaynak edilecek malzemenin cinsine bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip takımlar kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda Al ve Al alaşımları için kullanıldığında alaşımsız çeliklerden yapılmış takımlar ile iyi sonuçlar alınmıştır. Ancak ısı işlem görmüş bazı Al türlerinde kullanıldığında takımın aşınmasına ve kısa sürede kırılmasına neden olmuştur. Zaman içinde alaşımsız çelik takımlar yerini alaşımli çelik takımlara bırakmıştır [12]. SKNK prosesinde kullanılan takımlar, takım omuz ve karıştırıcı uç geometrisine göre farklı yapılarda olabilmektedirler [13]. SKNK yönteminde kullanılan bazı takım omuz yapıları Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Farklı karıştırıcı uç geometrileri: (a) silindirik, (b) konik silindirik, (c) kare, (d) altıgen, (e) dişli silindirik, (f) dişli üçgen, and (g) dişli üç köşeli yıldız [13]

Son yıllarda otomotiv sektöründe genellikle kullanılan çelik sacların yerine daha hafif alaşımların kullanılması yönünde önemli kararlar alınmaktadır. Otomobil gövde yapımında ve kapalı panellerde; bagaj kapağı, motor kapağı gibi arabanın birçok bölgesinde alüminyum alaşımı saclar ya da daha ince kesitlerde yüksek mukavemetli çelik saclar kullanılarak gövde ağırlığı azaltılmıştır. Ağırlığın azaltılması otomotiv endüstrisinde önemli yakıt tasarrufları sağlamaktadır [14]. Yöntemin olumlu özellikleri dikkate alındığında SKNK yönteminin endüstride uygulama alanı bulması oldukça kolay bir hale gelmiştir. SKNK tekniğinin yaygın kullanım alanları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. SKNK tekniğinin yaygın kullanım alanları [15-17]

Endüstri Alanı	Uygulama Alanı
Denizcilik Endüstrisi	Güverte için paneller, yan yüzler, bölme ve zeminlerde, alüminyum ekstrüzyonlarında, gemi bölmelerinde, gemi omurga ve üst yapılarında, helikopter merdiven platformlarında, kamaralarda, denizcilik yapılarında, yelkenli gemi için; gemi direk ve zincirlerinde, soğutma tesislerinde, gemi iskeletleri, güverteler ve yüksek hızda gemiler için enerji verimliliği ve hafiflik için iç tasarımlarda uygulanmaktadır.
Havacılık Endüstrisi	Kanatlar, uçak gövdesi ve kuyruk kısımlarında, uzay araçları için kriyojenik yakıt tanklarında, havacılık yakıt tanklarında, askeri uçaklar için dış atık tanklarında, askeri ve araştırma roketlerinde, hatalı MIG kaynaklarının düzeltilmesinde ve özel alaşımlı yüzeylerin bağlantı kısımlarında kullanılmaktadır.
Demiryolu Endüstrisi	Yüksek hızda trenlerin imalinde, demiryolu araçları, yeraltı taşımacılığı ve tramvaylarda, demiryolu tankları ve yük vagonlarında, konteyner iskeletlerinde, vagon ve vagon şasisi ile yüksek hızda trenler için karoserlerde uygulanmaktadır.

Kara Taşımacılığı	Motor ve şasi yataklarında, tekerlek jantı imalinde, uygun hale getirilmiş boşluklar v.b. farklı levha kalınlıklarının kaynağında, kamyon iskeletlerinde, kamyonetlerin arka kaldıraçlarında, hareketli vinç imalinde, kaportası zırhlı araç imalinde, yakıt tanklarında, karavanlarda, otobüs taşımacılığında, motosiklet ve bisiklet gövdelerinde, asansörlerde, Al otomobillerin tamirinde, ayrıca alüminyum esaslı arabalarda iç panellerinin üretiminde uygulanmaktadır.
Yapı-inşaa Endüstrisi	Alüminyum köprüler, Al, Cu ya da Ti' den yapılmış binanın ön yüz panellerinde, pencere iskeletlerinde, alüminyum boru hatlarında, enerji santrali ve kimya endüstrisi için Al reaktörlerde, ısı değiştirici ve klimalarda, boru üretiminde uygulanabilmektedir.
Elektrik Endüstrisi	Elektrikli motor çerçevesinde, elektrik bağlama çubuklarında, elektrikli bağlantılarda, elektronik sargılarda kullanılmaktadır.
Diğer Endüstri Sektörleri	Soğutma panelleri, açılış ekipmanları ve mutfaklarda, beyaz eşyalarda, gaz tankları ve gaz silindirelerinde, un değirmenlerindeki bakır ya da alüminyum bobin bağlantılarındaki uygulamalarda kullanılmaktadır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

Yapılan çalışmada, SKNK işlemi için 1,6 mm kalınlığında kaplanmamış AA2024-T3 alüminyum alaşımı levha ve Ni kaplı AA2024-T3 alüminyum alaşımı levha kullanılmıştır. AA2024-T3 alüminyum ve Ni alaşımının ve kimyasal bileşimi Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilmiştir. Alüminyum levhalar 25x100 mm boyutlarında ve Ni levhalar 25x25 mm boylarında kesilmiştir. Levha üzerine uygulanan kaynak bölgesi 25x25 mm olarak belirlenmiştir. SKNK işlemi yapılan freze makinasında SKNK esnası Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 2. AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik ve kimyasal özellikleri [18]

Malzeme	Mekanik Özellikler		Kimyasal Bileşim (Ağırlıkça %)								
	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
AA2024-T3	435	17	93.11	0.07	0.14	4.5	0.65	1.5	0.01	0.02	-

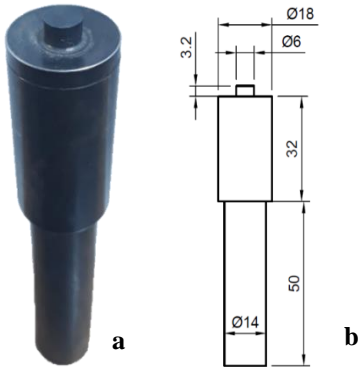
Tablo 3. Nikel alaşımının kimyasal kompozisyonu [18]

Malzeme	Kimyasal Bileşim (Ağırlıkça %)					
	Ni	Fe	Cu	S	O	Co
Ni	29,23	34,58	10,84	19,05	4,56	0,48

**Şekil 5.** a) SKNK işlemi öncesi parçaların fikstüre sabitlenmesi, b) SKNK uygulaması, c) SKNK sonrası birleşen numuneler

2.2. SKNK İşlemi ve Kaynak Parametreleri

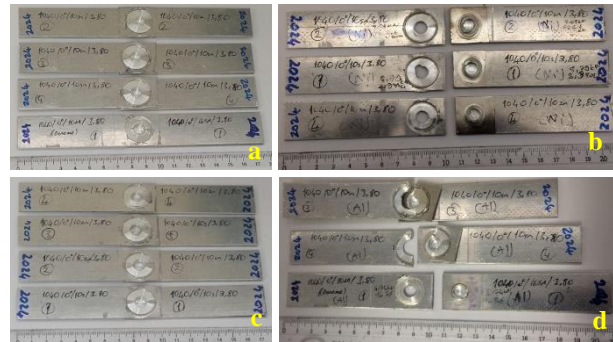
SKNK işleminde Alüminyum Titanyum Nitrat (AlTiN) kaplı takım kullanılmıştır. Bu takım 1.2344 kalite sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. SKNK takımının omuz çapı 18 mm, karıştırıcı uç çapı 6 mm olarak imal edilmiştir. Kullanılan takım ve ölçüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Birleştirme işlemi, takımın saat yönünde döndürülmesiyle gerçekleştirilmiş olup kaynak işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. SKNK işleminde takım dönme hızı 1040 dev/dak. olarak sabitlenmiştir. Takımın kaynak bölgesindeki süresi 10s olarak belirlenmiştir.

**Şekil 6.** a) SKNK işleminde kullanılan takım, b) SKNK işleminde kullanılan takımın ölçüleri

2.3. Çekme Makaslama Deneyi

Birleştirilmiş AA2024-T3/Ni/AA2024-T3 ve AA2024-T3/AA2024-T3 deney numuneleri ASTM-D638 standartına göre test edilmiştir. Çekme deneyi Zwick Z010 model çekme test cihazında gerçekleştirilmiş olup Şekil 7' de gösterilmiştir. Çekme testi oda sıcaklığında ve 5 mm/s'lik sabit çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her parametre için çekme-

makaslama testi sonucu alınıp ortalamalar belirlenmiştir. Çekme testi uygulanmış numuneler Şekil 8'de gösterilmiştir.

**Şekil 7.** a) Zwick Z010 model çekme test cihazı, b) Makine çenesine bağlanmış test numunesi**Şekil 8.** a) Test öncesi AA2024/Ni/AA2024 numuneler, b) Test sonrası AA2024/Ni/AA2024 numuneler, c) Test öncesi AA2024/AA2024 numuneler, d) Test sonrası AA2024/AA2024 numuneler

2.4. Mikroyapı

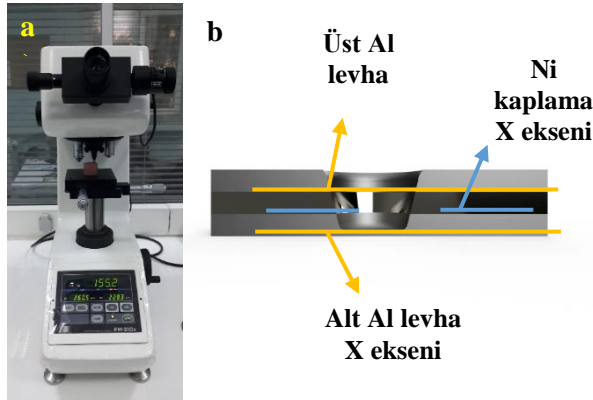
Hazırlanan kaynak numunelerinin kaynak bölgesi üzerinden Buehler Abrasimet 2 cihazı ile uygun kesitte parçalar kesilmiştir. Kesilen parçalara bakalitleme işleminden sonra metalografik işlemler uygulanmıştır. Dağlama reaktifi olarak Keller reaktifi kullanılmıştır. Mikroyapı görüntüleri Olympus BX61M model mikroskop cihazından alınmıştır. Metalografik işlemlerde kullanılan numune kesim cihazı ve mikroskop cihazı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. a) Numune kesme işlemi yapılan Buehler Abrasimet 2 cihazı, b) Mikroyapı görüntüleri alınan Olympus BX61M model mikroskop cihazı

2.5. Mikrosertlik

Mikrosertlik deneyleri için, Şekil 10a' daki FM-310e marka mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Şekil 10b'de gösterildiği gibi SKNK kesitinden kesilen numunelerden, alt ve üst bölgelerden x hattı boyunca her iki yönde olmak üzere 1'er mm aralıklarla ölçüm alınmıştır. Mikrosertlik ölçümleri 10 s'lik bir süre ve 200 gr yük parametrelerinde alınmıştır.



Şekil 10. a) Kullanılan FM-310e marka mikrosertlik cihazı, b) Numune üzerinde sertlik alınan x eksenli bölgeleri

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

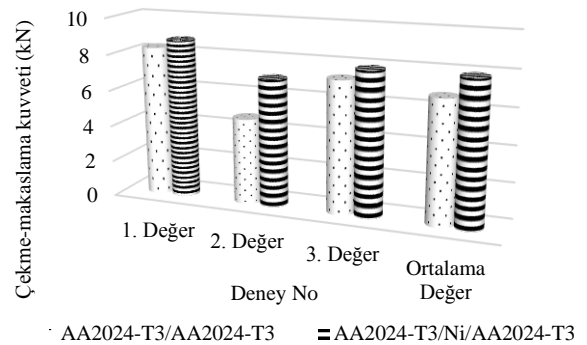
3.1. Çekme Makaslama Deneyi Sonuçları

SKNK işlemi sonucu yapılan çekme-makaslama testlerine bakıldığında optimum çekme kuvvetinin karıştırıcı ucun 2.8 mm derinliğe kadar daldırıldığı numunelerde olduğu görülmektedir. Dalma derinliği 2.8 mm'nin daha üstündeki bir değer ile birleştirilen

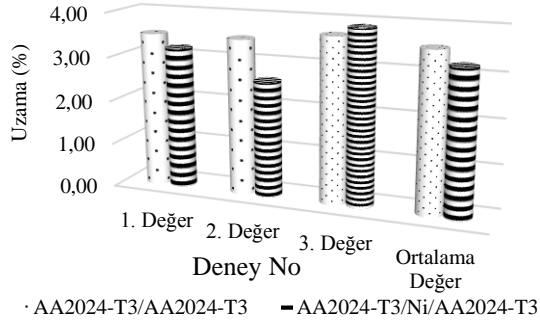
numunelerde mukavemet değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni birleştirilen bölgenin altında kalan metal kalınlığının incelmesidir. Çekme-makaslama kuvvetini etkileyen diğer faktörlerden biri de kullanılan karıştırıcı ucun uzunluğu ve profilidir. Karıştırıcı ucun profili birleştirilen bölgedeki malzeme akışını doğrudan etkilemektedir. SKNK işlemi sırasındaki karıştırıcı uç uzunluğu ve dalma derinliği de malzeme akışını etkileyecektir. Ayrıca bu parametreler ısı oluşumunu etkileyerek kaynak dayanımını belirlemektedir [19]. SKNK yöntemi ile birleştirilen numunelerin çekme makaslama deneyi sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir. Sonuçlar, Şekil 11 ve Şekil 12'de grafik olarak verilmiştir. Numunelerin çekme-makaslama kuvveti ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Ara malzeme ilavesiz (kaplama olmadan) birleştirilen numunenin ortalama çekme-makaslama kuvveti 6,78 kN ve % uzama değeri % 3,56 olarak görülmüştür. Ni kaplanmış numunenin ortalama çekme-makaslama kuvveti 7,91 kN ve % uzama değeri %3,23 olarak belirlenmiştir. Karıştırıcı ucun etki ettiği gerilim sonucunda ısı ve karıştırma etkisinde kalan bölgeye doğru gidildikçe sertlikte artış elde edilmiştir. Bu sertlik artışının alüminyum ve kaplama ile etkileşiminden ve dinamik yeniden kristalleşmeyle oluşan ince taneli yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir [20]. Ayrıca Al-Ni sisteminde kararlı yapılar, en yüksek ergime noktasına, oldukça düşük yoğunluğa, iyi mukavemet özelliklerine ve yüksek sıcaklıklarda korozyon ve oksidasyon direncine sahiptirler [21].

Tablo 4. Çekme makaslama deneyi sonuçları

Deney No	AA2024-T3/AA2024-T3	AA2024-T3/Ni/AA2024-T3	AA2024-T3/AA2024-T3	AA2024-T3/Ni/AA2024-T3
	Çekme-makaslama kuvveti (kN)		Uzama (%)	
1	8.31	8.79	3.7	3.9
2	7.30	7.91	3.5	3.2
3	4.74	7.03	3.5	2.6
Ortalama	6.78	7.91	3.56	3.23



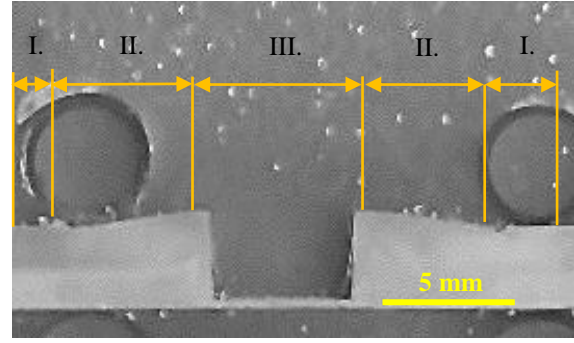
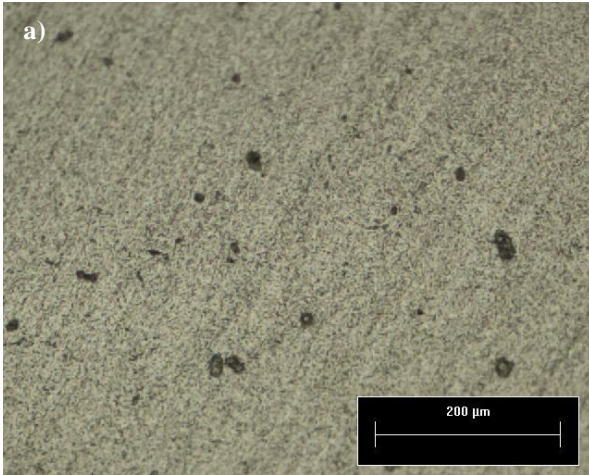
Şekil 11. AA2024-T3/AA2024-T3 ve AA2024-T3/Ni/AA2024-T3 çifti için çekme makaslama deneyi yük değerleri



Şekil 12. AA2024-T3/AA2024-T3 ve AA2024-T3/Ni/AA2024-T3 çifti için uzama değerleri

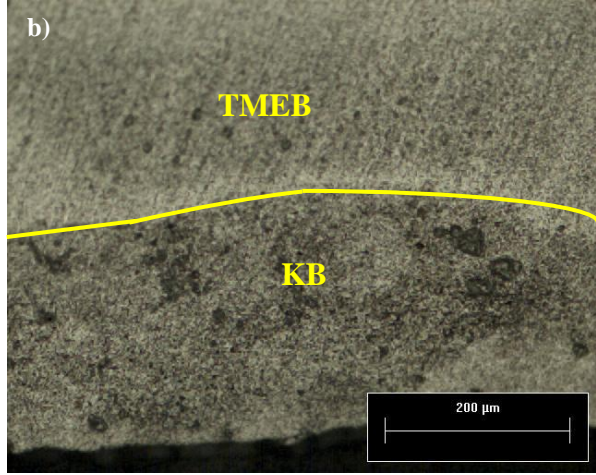
3.2. Mikroyapı Sonuçları

Birleştirmenin merkezinde bulunan kaynak bölgesinin boyutu, kullanılan kaynak takımının geometrisine bağlı olarak değişmektedir. SKNK ile birleştirilmiş parçalarda, karışım bölgesi (KB), termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMEB), ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve ana metal bölgesi olarak toplamda dört bölge bulunmaktadır. Şekil 13'te görüldüğü I. bölge ITAB'ı, II. bölge TMEB'i ve III. bölge KB'yi göstermektedir. Bu farklı bölgelerdeki mikro yapı değişimleri kaynak sonrası mekanik özelliklere önemli etkiler yapmaktadır.



Şekil 13. SKNK ile birleştirilmiş parçalarda oluşan bölgeler

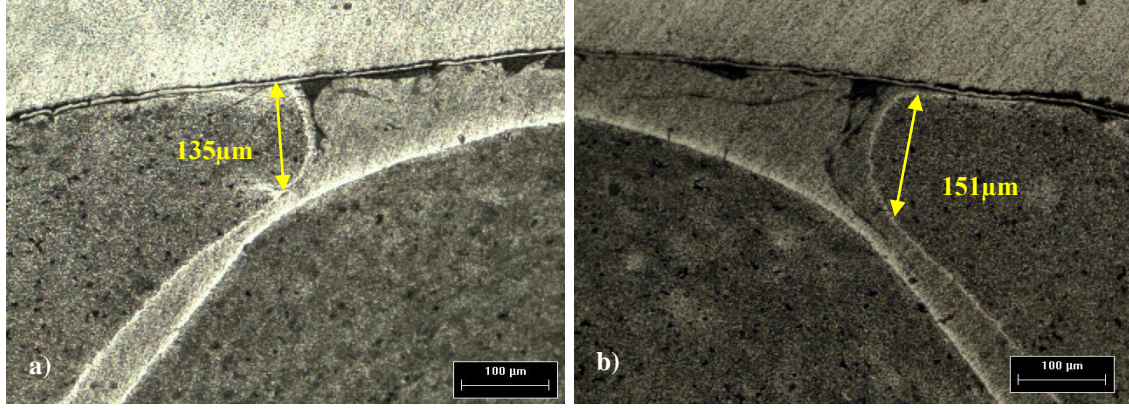
TMEB'de sıcaklık kaynak bölgesine göre daha düşük olduğundan burada gerilme düşüktür fakat deformasyon yüksektir. ITAB, kaynak esnasında termal bir çevrime maruz kalmakta fakat, deformasyon görülmemektedir. Buradaki sıcaklık TMEB'den daha düşüktür ancak kaynak esnasında oluşan kararsız mikroyapılar kaynağın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu TMEB yoğun plastik deformasyon ve yüksek sıcaklık yeniden kristalleşmeye sebep olmaktadır [22]. Kaynak öncesi ve sonrasındaki mikroyapılar Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. a) Ana metal bölgesinin kaynak öncesi mikroskoptaki 100x büyütmedeki görüntüsü, b) KB/TMEB bölgesinin kaynak sonrası mikroskoptaki 100x büyütmedeki görüntüsü

Y.C.Waterloo yaptığı çalışmada, farklı takım dönme hızları altında yapılan kaynaklar arasında kanca yüksekliği arasında bir fark olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, takımın dönme hızı azaldığında, kanca yüksekliğinin arttığını, böylelikle üst ve alt levhalar arasındaki mekanik kilitlemenin, daha yüksek bir

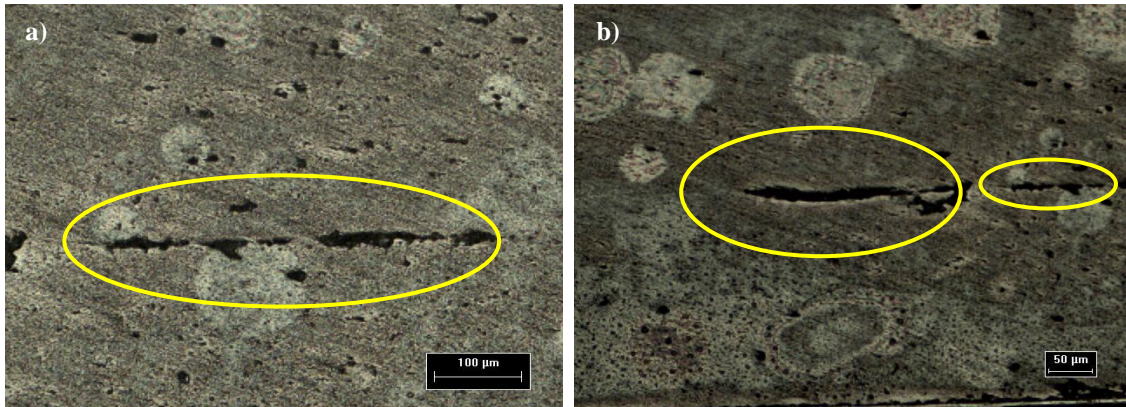
takım dönme hızı altında yapılan birleştirmedeki kancanınkinden daha mukavemetlidir. Şekil 15'e bakıldığında kanca boylarının 135 µm ve 151µm olduğu belirlenmiştir. Bu durum ana ve ara metallerin birbirlerine tutunmasını arttırmış olup mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir [23].



Şekil 15. Kanca bölgesinin 100x büyütmedeki görüntüsü, a) KB' nin solundaki (takım ilerleme yönünün tersi) ITAB bölgesinde kanca oluşumu, b) Sağ (takım ilerleme yönü) ITAB bölgesinde kanca oluşumu

Tane boyutu önemli bir mikroyapı parametresidir ki bu parametre çatlak büyümesini etkileyebilir. Özellikle korozif bir ortamda karışım bölgesindeki tane boyutu değişimi önemlidir. SKNK sırasında dinamik olarak yeniden kristalleşmenin karışım bölgesinde eş boyutlara sahip ince taneler meydana getirdiği kabul edilmektedir. SKNK parametreleri, takım geometrisi, iş

parçasının bileşimi, iş parçasının sıcaklığı, basınç ve aktif soğumanın SKNK malzemelerinde yeniden kristalleşmiş tanelerin boyutuna önemli bir tesiri olmaktadır. AA2024-T3/Ni/AA2024-T3 malzeme çiftinin SKNK sonrası oluşan mikroyapı ve soğuma sırasında oluşan mikro çatlaklar Şekil 16'da gösterilmiştir [24].



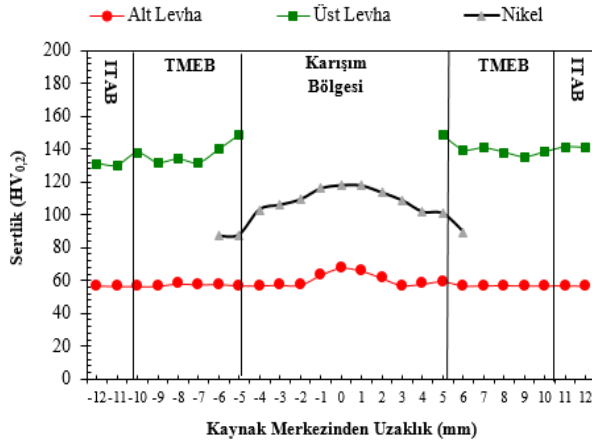
Şekil 16. a) Çatlak olan bölgenin mikroskoptaki 100x büyütmedeki görüntüsü, b) Birleşmeme hatası olan bölgenin mikroskoptaki 50x büyütmedeki görüntüsü

3.3. Mikrosertlik Sonuçları

Al alaşımları ana hatlarıyla, çökeltme sertleşmesi alaşımları ve katı çözünme sertleşmesi, alaşımları içerisinde sınıflandırılırlar. SKK, genellikle çökeltme sertleşmesi yapılmış Al alaşımlarındaki KB civarında yumuşatılmış bir bölge meydana getirir. Kaynağın ısı dönüşümü esnasında, çökeltme sertleşmesi ile tane büyümesi ya da çözünmesiyle böyle bir yumuşak bölgeye sebebiyet verir. Burada kaynaklanan metalin tokluğu da artmaktadır. Mustafa ve Mithat'ın yaptığı çalışmada ERNiCrMo3 ilave metali ile birleştirilen numunenin darbe tokluk değerleri test sıcaklığına bağlı olarak nikelsiz yapılan kaynağın değerlerinden daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir [25].

SKNK sonrası Al levhalara baktığımızda kaynak bölgesinde ölçülen değere göre kısmen bir yumuşama görülmüştür. ITAB ve TMEB bölgelerinde ise 60-65

HV değerlerinde sertlik ölçülmüştür. Bu değer, o bölgede sıcaklıktan dolayı tane boyutunun arttığını ve Al levhanın kısmen yumuşadığını göstermektedir. Nikel, alt ve üst Al levhanın sertlik değer grafiği Şekil 17'de gösterilmiştir. Alt levhadaki sertliğin üst levhaya göre daha düşük olmasının nedeni, parçaların birleştirilmesi sırasında yüksek basınçtan kaynaklanan ısı girişi nedeniyle yumuşamasıdır. Kontrolsüz çökeltme sonucu ikincil faz partiküllerinin irileşmesi ve tane sınırlarında kararlı fazlarının oluşması neticesinde, diğer numunelere nazaran önemli bir sertlik düşüşü meydana gelmiştir. Bu yumuşama mukavemet artırıcı çöktürlerin çözülmesine ve/veya kabalaşmasına neden olmaktadır [26]. Kaynak arayüzeyinde oluşan Ni₃Al matris alaşımının tane boyutundan çok daha küçük tane boyutuna sahip bir dinamik yeniden kristalleşme bölgesi oluşmuş olup sertlik artışı meydana gelmiştir [21].



Şekil 17. SKNK sonrası Al levhaların Ni kaplama bölgesi ile alt ve üst bölgelerinin mikrosertlik grafiği

IV. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ni kaplı ve kaplanmamış AA-2024-T3 alaşımlı levhalar SKNK yöntemiyle birleştirilmiştir. Maksimum ve minimum çekme makaslama kuvvetleri belirlenmiştir. Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Ni kaplanmış alüminyum ve kaplanmamış alüminyum levhaların SKNK işlemi başarılı olarak gerçekleştirilmiştir.
2. Çalışmadan elde edilen verilere göre, Ni, metalinin alüminyum metalin kaynaklanabilirliği üzerinde çekme-makaslama kuvvetini artırıcı özellikler gösterdiği bulunmuştur.
3. Numunelerin çekme-makaslama kuvveti ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Ara malzeme ilavesiz birleştirilen numunenin ortalama çekme-makaslama kuvveti 6,78 kN ve % uzama değeri % 3,56 olarak görülmüştür. Ni kaplı birleştirmenin ortalama çekme-makaslama kuvveti 7,91 kN ve uzama değeri %3,23 olarak belirlenmiştir.
4. Çekme makaslama kuvvetlerine bakıldığında Ni alaşımının alüminyum alaşımının kaynaklanabilirliği üzerinde olumlu etki yarattığı görülmüştür.
5. Karıştırıcı uç uzunluğu ve profilleri kaynak dayanımını doğrudan etkiye sahip olup, kanca dayanımını artırarak çekme makaslama testinde olumlu sonuçlar vermiştir.
6. SKNK sonrası Al levhalar, KB'de ölçülen değere göre kısmen bir yumuşama görülmüştür. ITAB ve TMEB bölgelerinde ise 60-65 HV değerlerinde sertlik elde edilmiştir. Bu değer, o bölgelerdeki sıcaklıktan dolayı tane boyutunun arttığı ve Al levhanın kısmen yumuşadığından dolayıdır.
7. Kanca boylarının 135 µm ve 151 µm olduğu belirlenmiştir. Bu durum ana metal ve kaplanmış metalin difüzyonunu arttırmış olup mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

Teşekkür (Acknowledgment)

FEN-C-YLP-100719-0245 numaralı proje kapsamında verdiği finansal destekten ötürü Marmara Üniversitesi

Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (BAPKO) sonsuz şükranlarımızı sunarız.

REFERANSLAR

- [1] Coşkun M. H. (2009). Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF 7114 ve DP 600 çelik sacların direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemleri ile birleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- [2] Kurt, A. (1990). Katı hal kaynak teknikleri. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Ders Notları, Ankara, 1-10.
- [3] Bilici, M. K., Bakır, B., Bozkurt, Y., Çalış, İ. (2016). Taguchi analysis of dissimilar aluminum sheets joined by friction stir spot welding. Pamukkale Üniversitesi Müh. Bilim Dergisi, 22(1), 17-23.
- [4] Matsuyama, K. (2006). Trends of automobile vehicles and the joining technologies. International Institute of Welding Document, IIW Doc. III- 1386-06,.
- [5] Yamamoto, M., Gerlich, A., North, T.H., Shinozaki, K. (2007). Mechanism of cracking in AZ91 friction stir spot welds. Science and Technology of Welding and Joining, 12, 208-216.
- [6] Thornton, P., Krause, A., Davies, R. (1996). "Aluminium spot weld", Welding Journal, 75, 101-108.
- [7] Spinella, D.J., Brockenbrough, J.R., Fridy, J.M. (2005). Trends in aluminium resistance spot welding for auto industry. Welding Journal, 84, 35-40.
- [8] Oruç, E., Kalender, M., Ulupınar, H., Bozkurt, Y. (2019). Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilen ara katmanlı AA2024-T3 levhaların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Uluslararası Fen Matematik ve Mühendislik Bilimleri Kongresi, İzmir, Türkiye.
- [9] Meran, C., Çolak, M. (2008). Tool holder design for friction stir welding. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(3): 671-679.
- [10] Kalender, M., Kılıç, S.E., Bozkurt, Y., Salman, S., Turker, A. (2009). Design and development of portable fixture for various dimensions specimens joining by friction stir welding. Orta Doğu Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Konferansı.
- [11] Kalender, M., Kılıç, S.E., Bozkurt, Y., Ersoy, S., Salman, S. (2018). Farklı malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında takım geometrisinin mekanik özelliklere etkisi. International Conference on Welding Technologies and Exhibition, Saraybosna, Bosna Hersek.
- [12] Kahraman, B. (2009). Otomotiv endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımı sacların direnç nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemleri ile birleştirilmesi.

- Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [13] Khan, N. Z., Siddiquee, A. N., Khan, Z. A. (2017). Friction stir welding dissimilar aluminum alloys, CRC Press Taylor & Francis Group.
- [14] Badarinarayan, H., Hunt, F., Okamoto, K. (2007). Friction stir welding and processing. American Society for Metals, 235-250, America.
- [15] Bozkurt, Y. (2008). Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen AA2124/SiCp/25 kompozit levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Metal Eğitimi Bölümü, İstanbul.
- [16] Dawes, C.J. (1999). Friction stir welding. The Welding Institute, TALAT Lecture 4410 Cambridge, 1-13.
- [17] Dawes, C.J., Thomas, W.M. (1996). Friction stir process welds aluminum alloys. Welding Journal, 75 (3),41-45.
- [18] Soytemiz, G. (2019). Cu ve Ni Kaplanmış Alüminyum Alaşımli Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı, İstanbul.
- [19] Bozkurt, Y., Salman, S., Turker, A. (2018). The investigation and comparison of friction stir spot welding and electrical resistance spot welding of AA2024 aluminum alloy joints. ICENS 4th International Conference on Engineering and Natural Science, Kiev, Ukraine.
- [20] Kaçar, R., Emre, H., Demir, H., Gündüz, S. (2011). Al-Cu-Al malzeme çiftinin sürtünme karıştırma nokta kaynak kabiliyeti. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., Vol 26, No 2, 349-357.
- [21] Arıcı, G. (2013). Nikel alüminatların sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliklerinin araştırılması. Yüksek lisans tezi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Ocak.
- [22] Chung-Wei, Y., Fei-Yi, H., Truan-Sheng, Lui., Li-Hui, C., Jiun-Yu, J. (2009). Weibull statistics for evaluating failure behaviors and joining reliability of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. Materials Transactions, Vol. 50, No. 1, 145-151.
- [23] Yuyang Chen, W. (2015). Refill friction stir spot welding of dissimilar alloys”, Ontario, Canada, pp.18.
- [24] Yan, J. (2004). Fundamental study in fsw processing and fsw process-structure property relationship for AA2024 and AA2524. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering and Information Technology, University of South Carolina.
- [25] Tümer, M., Kerimak, M.Z.. (2017) Nikel bazlı süper alaşım inconel 625 ile AISI 304L paslanmaz çelik malzeme çiftinin birleştirilmesinde farklı ilave metallerin tokluk ve mikroyapısal özelliklere etkisi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 4, No: 1, 116-126.
- [26] Bozkurt, Y., Salman, S., Cam, G. (2013). Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints. Science and Technology of Welding and Joining, Vol 18, No 4, pp. 337-345.