

Polipropilen Malzemeye Uygulanan Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Takım Geometrisinin Bağlantı Dayanımına Etkisinin İncelenmesi

Gültekin Çakır^{1*}, Şenol Mert², Sevda Mert³

¹ İmalat Mühendisliği Bölümü/Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

² İmalat Mühendisliği Bölümü/Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Türkiye

³ Kompozit Malzeme Teknolojileri/Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Türkiye

*cakirgultekin@gmail.com

Özet - Sürtünme karıştırma nokta kaynak (SKNK) yöntemi otomasyona yatkındır. Bu sayede, robot ve otomasyon sistemlerine entegre edilerek kolayca geliştirilmiştir. Yöntem sayesinde, kısa işlem zamanı ile etkili bindirme bağlantıları elde edilebilir. Bu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki polipropilen (PP) levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile bindirme bağlantıları CNC tezgâhta yapılmıştır. Farklı iki takım geometrisi üzerinde çalışılmış ve kaynak bağlantısının dayanımına, takım geometrisinin etkisi incelenmiştir. Kaynak işlemi, CNC dik işleme tezgâhında ISO GM kod sistemi kullanılarak yazılmış bir program yardımı ile uygulanmıştır. En uygun takım geometrisinin bulunması amacıyla, kaynaklı numunelerin TS EN 12814-2 standardına uygun olarak çekme testleri yapılmıştır. Bu çalışmada, kaynaklı numunelere uygulanan çekme testleri sonucunda, elde edilen maksimum çekme kuvveti ve en uygun takım geometrisi belirlenmiştir. En yüksek çekme kuvvetine, Takım 2 ile 1000 dev/dk takım devri, 90 sn karıştırma süresi, 5,75 mm dalma derinliğinde ulaşılmıştır. Takım 2 ile oluşturulan kaynaklı bağlantı için maksimum çekme kuvveti 4038 N olarak elde edilmiştir. Bu değer esas malzemenin yaklaşık olarak % 70'ine eşdeğerdir.

Anahtar Kelimeler - Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı, Polipropilen, Takım Geometrisi, Bağlantı Dayanımı, Çekme Kuvveti, CNC Tezgâh

Investigation of the Effect on Joining Strength of the Tool Geometry in the Friction Stir Spot Welding Applied to Polypropylene Material

Abstract - Friction stir spot welding (FSSW) method is prone to automation. In this way, by integrating the robot and automation systems have been easily developed. Thanks to the method, the effective overlapping joints can be obtained a short processing time. In the study, 4 mm thick polypropylene (PP) sheets were done lap joints with FSSW in the CNC machine. On the two different tool geometries were studied and the effect on weld joining strength of the tool geometry was examined. Welding process was applied with the aid of a written program using the ISO GM code system on the CNC vertical processing machine. In order to find the most optimum tool geometry, the welded samples were carried out the tensile tests according to TS EN 12814-2 standard. In this study, the maximum tensile force and the most optimum tool geometry have been determined as a result of tensile tests applied to the welded samples. The maximum tensile force with the Tool 2 has been achieved at the tool rotation speed of 1000 rpm, dwell time of 90 s, tool penetration depth of 5,75 mm. The maximum tensile force with Tool 2 was obtained as 4038 N for the welded joining. This value is equivalent to approximately 70% of the base material.

Keywords - Friction Stir Spot Welding, Polypropylene, Tool Geometry, Joining Strength, Tensile Force, CNC Machine

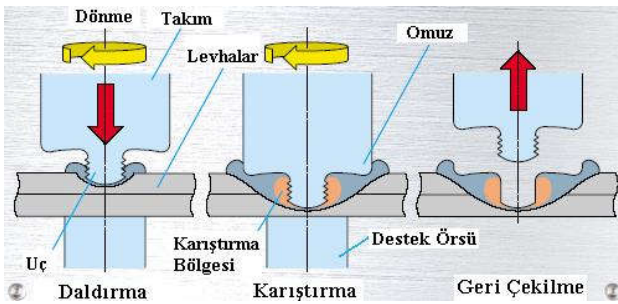
I. GİRİŞ

Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemi 1993 yılında Mazda tarafından icat edilmiş, tamamen yeni ve ergime olmaksızın bindirme bağlantısı gerçekleştirilen bir katı faz kaynak yöntemidir [1]-[10]. SKNK, sürtünme karıştırma kaynağından (SKK) türetilmiştir ve otomotiv sektöründe oldukça dikkat çekmektedir [11]-[13]. Otomotiv endüstrisinde alüminyum sacların birleştirilmesinde direnç nokta kaynağı sonucunda oluşan hataların giderilmesi için

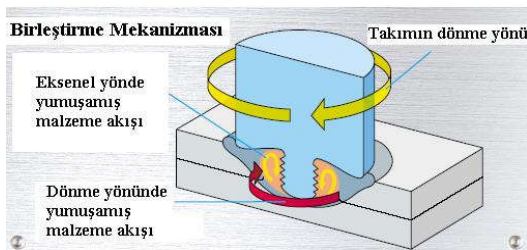
geliştirilen SKNK, başarılı bir şekilde, alüminyum [14], magnezyum [15], çelik levhalara [16] uygulanmaktadır. SKNK ile plastikler üzerine yapılan ilk çalışmalar neticesinde, bu yöntemin polimer esaslı malzemelere de uygulanabilirliği kanıtlanmıştır [1], [5], [8], [17]. Sonrasında ise çeşitli polimer malzemelerin SKNK yöntemi ile birleştirilerek optimum parametrelerin saptanabilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. SKNK yönteminin metal malzemelere ilaveten plastik malzemelere de

uygulanabilmesi, yönteme önemli bir avantaj kazandırmıştır [3], [4], [11], [17]-[25].

SKNK yönteminin, karıştırıcı uç formuna sahip silindirik omuzlu bir takım ile, üç kademe gerçekleştirilen pratik bir uygulaması vardır [3], [4], [8], [26]-[29]. Üç aşamadan oluşan bu uygulama, Şekil 1'de görüldüğü gibi sırasıyla, daldırma, karıştırma (bekleme) ve geri çekilme aşamalarından oluşur. Daldırma, belirli bir devirde dönen kaynak takımı uç kısmının birleştirilecek parçaların üst yüzeyine temas etmesiyle başlayıp omuz kısmının üst parçaya temas etmesiyle biter. Bu ilerleme sırasında uç ile malzeme arasında ortaya çıkan sürtünme nedeniyle oluşan ısı malzemenin yumuşamasına yol açar [8], [28], [29]. Takımın özellikle omuz kısmının da sürtünmeye katılmasıyla, daha geniş bir bölgede daha yüksek bir kaynak sıcaklığına ulaşılır [20]. Kaynak takımının omuz tabanına ait yüzey alanının sürtünme ısını önemli oranda etkilediği bilinmektedir [30]. Bundan sonra başlayan karıştırma aşamasında, omuz kısmının da oluşturduğu sürtünme ile kaynak bölgesinde daha fazla ısı meydana gelir. Isıyla birlikte yumuşayan malzeme çifti, dönen takımın dönme yönünde yumuşamış bir malzeme akışı gerçekleştirir. Ayrıca, takım ucunun vida dişleri nedeniyle, eksel yönde de bir yumuşamış malzeme akışı hareketi söz konusudur [8], [28] (Şekil 2). Böylelikle, yumuşayan her iki parça malzemesi takım ucu etrafında karıştırılarak, aralarında bağ kurulur. Birleştirme tamamladığında, dönmeye devam eden kaynak takımının kaynak bölgesinden uzaklaştırılması ile geri çekme olarak adlandırılan son aşama tamamlanmış olur [8], [27].



Şekil 1. SKNK yönteminin aşamaları [8]



Şekil 2. SKNK yönteminde birleştirme mekanizması [8]

SKNK yöntemi uygulanırken sonuca etki eden beş ana parametre vardır. Bunlar; kaynak takımının geometrisi, kaynak takımının devir sayısı, karıştırma süresi, dalma hızı ve kaynak takımının malzemeye dalma derinliğidir [1], [5], [17], [31]-[33].

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, SKNK işlemi sonucunda oluşturulan kaynak noktalarının dayanımına takım geometrisinin önemli oranda etki ettiği görülmüştür. Bilici ve diğ. dört farklı uç profili (silindirik, konik, vida dişi açılmış

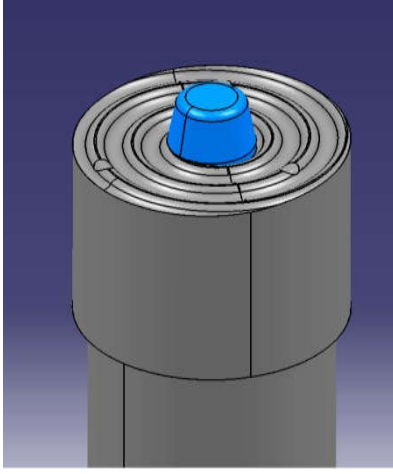
silindirik ve üçgen) ile, belirli koniklik açısı, kesit boyutu ve uç uzunluğuna sahip takımlarla oda sıcaklığında kaynaklı bağlantılar gerçekleştirmişlerdir. Yüksek yoğunluklu polietilen levhaların SKNK ile birleştirilmesinde, kullanılan takımın uç geometrisinin, kaynak kopma kuvvetine etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, konik takım uç profilinin, en yüksek kaynak kopma kuvvetine sahip kaynak dikliği oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca kaynak takımının uç kesit boyutu ve koniklik açısının, diklik oluşumu ve kaynak kopma kuvveti üzerinde etkisinin olduğu sonucuna varmışlardır [34]. Bilici ve diğ., yapmış oldukları bir diğer çalışmada ise yine konik uç profiline ait takım ile en iyi kaynak dayanımı değerini elde etmişlerdir [23]. Mert Ş. ve diğ. yapmış oldukları araştırma çalışmasında, sürtünme karıştırma kaynağında, kaynak dayanımını artırmak için kullanılan kaynak takımı geometrisinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmaları detaylı bir şekilde incelemişlerdir [35]. Badarinarayan H. ve diğ. yaptıkları çalışmada, 3 farklı omuz taban açısında (10^0 konkav, 0^0 düz, 10^0 konveks) ürettikleri takımlarla, alüminyum 5754-O levhalar üzerinde uyguladıkları SKNK sonucunda, en iyi kaynak dayanımına 10^0 konkav tabanlı takım ile ulaşmışlardır [36]. Badarinarayan H. ve diğ. bir diğer çalışmalarında ise iki farklı uç geometrisi (silindirik, üçgen) kullanmışlar ve kaynak dayanımı açısından silindirik uçlu kaynak takımının daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir [37]. Tozaki T. ve diğ. üç farklı uç uzunluğuna (3,7 - 3,1 - 2,4 mm) sahip takım ile yaptıkları çalışma sonucunda, uç uzunluğu arttıkça kaynak dayanımında da artış olduğunu gözlemlemişlerdir [38].

Yapılan bu çalışmada, polipropilen levhalara uygulanan SKNK yöntemi ile oluşan kaynak dayanımına, kullanılan kaynak takım geometrisinin etkileri incelenmiştir. Bunun için iki farklı kaynak takım geometrisi belirlenmiştir. Her kaynak bağlantısı için, iki adet 4 mm kalınlığındaki polipropilen levhanın SKNK yöntemi ile bindirme kaynak bağlantıları yapılmış ve kaynaklanan numunelere kaynak bölgesinin dayanımını belirleyebilmek için TS EN 12814-2 standardına uygun olarak çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek kaynak takımı geometrisinin kaynak dayanımına etkileri ortaya konulmuştur.

II. MATERYAL VE METOD

Deneyisel çalışmada kaynaklı bağlantıların oluşturulmasında kullanılacak olan numuneler için, DIN EN ISO 15013 TG1.1 standardında, RÖCHLING Engineering Plastics firması tarafından 2000x1000x4 mm boyutlarında ekstrüzyon ürünü olarak üretilmiş, Polystone P-grau Homopolimer polipropilen (PP) levhalar temin edilmiştir. Malzemenin erime sıcaklığı $162-167^{\circ}\text{C}$, yoğunluğu $0,91 \text{ gr/cm}^3$, akma gerilmesi 32 MPa, elastik modülü 1300 MPa, darbe direnci 4 KJ/m^2 , shore sertliği 72 scale D'dir [39]. Bu çalışmada, kaynak işlemi için kullanılan farklı geometriye sahip takımların malzemesi AISI/SAE 4140 ıslah çeliğidir. Yapılan bu çalışmada kullanılan takım geometrileri, literatürde var olan takım geometrilerinden faydalanılarak ve yapılan ön çalışmaların neticesinde alınan iyi sonuçlara bakılarak belirlenmiştir. Takımlardan birincisinin omuz çapı 28 mm ve omuz tabanı düz, takım ucu M9 ve uç uzunluğu 5,5 mm'dir (T1). İkinci takım ise, omuz çapı 28 mm ve omuz tabanı spiral kanallı, küçük çapı 7 mm ve büyük çapı 9 mm olan 5,5 mm uzunluğunda konik uçlu bir takım (T2). T2'nin spiral omuz tabanının tasarımı CATIA-V5 CAD yazılımında yapılmıştır. Yapılan yeni takım tasarımının ekran

görüntüsü Şekil 3'te görülmektedir. Tasarımı yapılan modelin işlenmesi ise MasterCAM X5, CAM yazılımında yapılarak kod dosyası oluşturulmuştur. Oluşturulan kod dosyası CNC dik işleme tezgâhına yüklenerek CNC dik işleme tezgâhında takımın işlenmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. CATIA-V5 CAD programında tasarlanan T2 kodlu takım

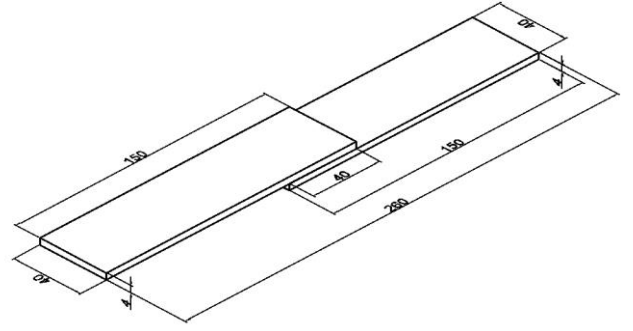
T2'de kullanılan omuz tabanının spiral olarak imal edilmesindeki amaç, takımın omuz kısmının üst parçaya teması ve bir miktar malzemenin içeri girmesi esnasında, takımın altından sıyrılıp kaynak bölgesini terk eden malzeme kaybının önüne geçilmek istenmesidir. Spiral omuz tabanında bulunan spiral kanallar takım dönme yönüne bağlı olarak dışarıdan içeriye doğru malzemeyi sürükler ve omuz tabanı ile teması sonucunda yumuşayan malzemenin kaynak bölgesinden dışarıya kaçışını engeller. Bu sayede daha fazla malzeme kaynak bölgesinde kalarak, kaynak dayanımının artmasına yardımcı olunacağı düşünüldüğü bu tasarım gerçekleştirilmiştir. SKNK işlemi için kullanılan takımlara ait teknik resim ve fotoğraflar Şekil 4'te verilmiştir.

Takım Kodu	Takımın Teknik Resmi	Takımın Fotoğrafi
T1		
T2		

Şekil 4. Kullanılan kaynak takımlarının teknik resimleri ve fotoğrafları

SKNK ile birleştirilecek numuneler TS EN 12814-2 standardına uygun geometride hazırlanmıştır. Bunun için, 4 mm kalınlığındaki PP levhadan, ekstrüzyon yönünde 150x40 mm ölçülerindeki numuneler, daire testere tezgâhı yardımı ile kesilerek Şekil 5'te gösterildiği gibi üst üste bindirilmiş ve üç

eksenli CNC dik işleme tezgâhında SKNK işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. SKNK bağlantısı için numunelerin bindirme şekli

SKNK işlemi için kullanılan üç eksenli CNC dik işleme merkezinin, maksimum devri 10000 dev/dk, maksimum ilerlemesi 20000 mm/dk, konumlama hassasiyeti 0,005 mm, kontrol paneli FANUC marka Oi-Mate modeli ve kullandığı kod sistemi ISO GM'dir. SKNK işlemi için kontrol paneli üzerinden kullanılan parametreleri içeren CNC programı yazılmış ve daha sonra bu program çalıştırılarak kaynak operasyonunun otomatik olarak yapılması sağlanmıştır.

Bu çalışmada her bir kaynak takımı için 750-1000-1250-1500-1750 ve 2000 dev/dk olmak üzere 6 farklı takım devri, 30-60-90-120 ve 150 sn olmak üzere 5 farklı bekleme süresi, 5,75-6-6,25 ve 6,5 mm olmak üzere 4 farklı dalma derinliği, kaynak parametre değerleri olarak belirlenmiştir. Her bir parametre değeri için SKNK işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen her bir numunenin kaynak mukavemetini belirlemek amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Bunun için maksimum yüklem kapasitesi 5 kN olan universal elektromekanik test cihazı kullanılarak, kaynaklı parçaların TS EN 12814-2 standardına uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme test hızı 20 mm/dk ve çeneler arası mesafe 180 mm olarak ilgili standarda göre belirlenmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen maksimum çekme kuvvetleri değerlendirilerek, kaynak takımı geometrisinin kaynak dayanımına etkileri ortaya konulmuştur.

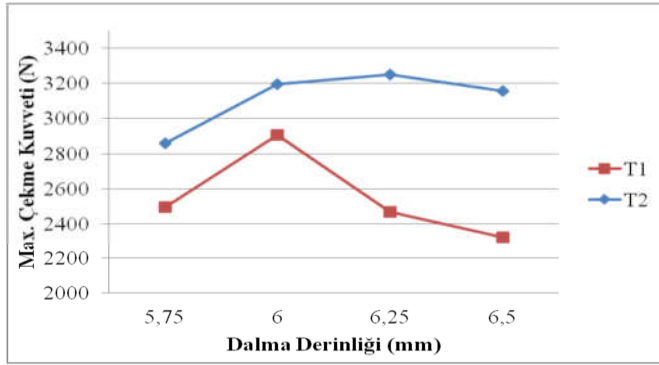
III. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu çalışmada takım geometrisinin SKNK dayanımına etkisini araştırmak için 2 farklı takım geometrisi kullanılmıştır. T1 ve T2 ile üretilen SKNK numunelerinin çekme testleri sonucunda T2 ile daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. T2 ile elde edilen maksimum çekme kuvveti 4037 N'dur. T2 kullanılarak elde edilen maksimum çekme kuvvetine sahip numuneye ait kaynak parametre değerleri, 1000 dev/dk takım devri, 100 m/sn dalma hızı, 90 sn karıştırma süresi ve 5,75 mm dalma derinliğidir. T1 ile elde edilen maksimum çekme kuvveti 2907 N'dur. T1 kullanılarak elde edilen maksimum çekme kuvvetine sahip numuneye ait kaynak parametre değerleri, 1000 dev/dk takım devri, 100 m/sn dalma hızı, 60 sn karıştırma süresi ve 6 mm dalma derinliğidir. Her iki takım için oluşturulan kaynaklı bağlantılardan elde edilen maksimum çekme kuvvetleri ve SKNK parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. T1 ve T2 takımları ile kaynaklanan numunelerin maksimum çekme kuvvetleri ve SKNK parametreleri

Takım Kodu	Takım Devri (dev/dk)	Dalma Hızı (mm/dk)	Karıştırma Süresi (sn)	Dalma Derinliği (mm)	Max. Çekme Kuvveti (N)
T1	1000	100	60	6	2907
T2	1000	100	90	5,75	4037

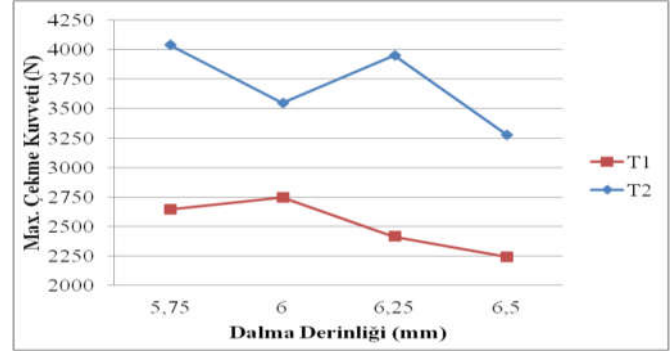
Kaynak dayanımına takım geometrisinin etkisini incelemek için yapılan bu çalışmada, karşılaştırılan iki takım geometrisi için yapılan deneyler sonucunda, T1 için elde edilen en iyi karıştırma süresi 60 sn'dir. Her iki takım için 1000 dev/dk sabit takım devri ve 60 sn sabit karıştırma süresinde, farklı dalma derinliklerine göre üretilen numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre en yüksek çekme kuvveti değeri, T2 ile üretilen 6,25 mm dalma derinliğine sahip numunelerde 3259 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi T1 için en yüksek çekme kuvveti değeri, 6 mm dalma derinliğine sahip numunelerde 2907 N olarak elde edilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, T2 için dalma derinliği değeri 6,25 mm için incelendiğinde, bu değer azaldıkça ve arttıkça maksimum çekme kuvvetinde düşmeler olduğu görülmektedir. T1'in dalma derinliği değeri 6 mm için incelendiğinde, bu değer azaldıkça ve arttıkça yine maksimum çekme kuvvetinde belirgin düşmeler olduğu görülmektedir. Bu nedenle de optimum kaynak parametrelerinin tercih edilmesinin, kaynaklı bağlantının dayanımı açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Ayrıca, 60 sn sabit karıştırma süresi için, T2 ile kullanılan tüm dalma derinliklerinde, T1'den daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 6. 60 sn sabit karıştırma süresi için T1 ve T2 ile kaynaklanan numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerlerinin farklı dalma derinliği değerleri ile değişimi

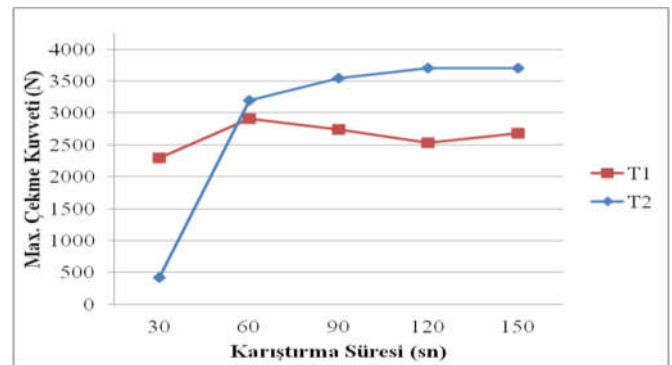
T2 için elde edilen en iyi karıştırma süresi 90 sn'dir. Her iki takım için 1000 dev/dk sabit takım devri ve 90 sn sabit karıştırma süresinde, farklı dalma derinliklerine göre üretilen numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Buna göre en yüksek çekme kuvveti değeri, T2 ile üretilen 5,75 mm dalma derinliğine sahip numunelerde 4037 N olarak elde edilmiştir. T1 için en yüksek çekme kuvveti değeri, 6 mm dalma derinliğine sahip numunelerde 2746 N olarak elde edilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, T2 için dalma derinliği 6 mm iken, çekme kuvveti değeri bir miktar düşmüştür. Dalma derinliği 6,25 mm'ye çıkarıldığında ise çekme kuvveti değerinin de bir miktar arttığı, dalma derinliğinin 6,5 mm'ye çıkarılarak, başlangıç dalma derinliğine göre çok fazla artırılmasının ise kaynak noktasının bağlantı dayanımına olumsuz yönde etki yaptığı görülmüştür. T1 için dalma derinliği değeri 6 mm için incelendiğinde, bu

değer azaldıkça ve arttıkça maksimum çekme kuvvetinde bir miktar düşüş gözlenmiştir. Bu nedenle de, optimum kaynak parametrelerinde kaynak noktalarının oluşturulmasının, kaynaklı bağlantının dayanımı açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Ayrıca, 90 sn sabit karıştırma süresi için, T2 ile kullanılan tüm dalma derinliklerinde, T1'den daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 7. 90 sn sabit karıştırma süresi için T1 ve T2 ile kaynaklanan numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerlerinin farklı dalma derinliği değerleri ile değişimi

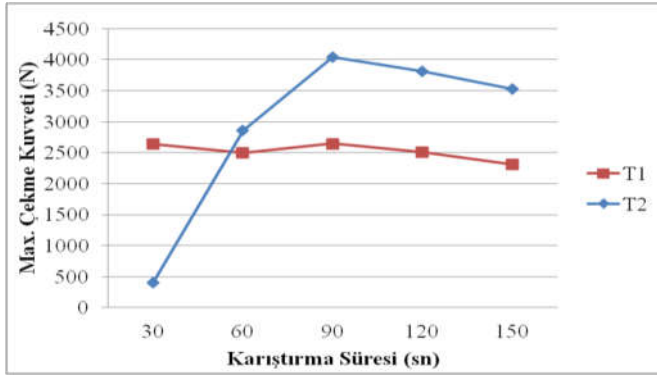
T1 için bulunan en iyi dalma derinliği değeri 6 mm'dir. Her iki takım için 1000 dev/dk sabit takım devri ve 6 mm sabit dalma derinliğinde, farklı karıştırma sürelerine göre üretilen numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre en yüksek çekme kuvveti değeri, T2 ile üretilen 120 ve 150 sn karıştırma süresine sahip numunelerde 3700 N olarak elde edilmiştir. T1 için en yüksek çekme kuvveti değeri, 60 sn karıştırma süresine sahip numunelerde 2907 N olarak elde edilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, T2 için dalma derinliği değeri 60 sn'nin altında iken maksimum çekme kuvveti değeri çok düşük elde edilmiştir. Karıştırma süresi 60 sn'nin üzerine çıktığında ise maksimum çekme kuvvetinde bir miktar artış gözlemlenmiştir. T1 ve T2 ile belirli bir karıştırma süresi değerinin üzerine çıktığında veya altına düşüldüğünde, maksimum çekme kuvvetinde bir miktar düşüş görülmüştür. Bu nedenle de optimum kaynak parametrelerinde çalışmanın bağlantının dayanımı açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Ayrıca, 6 mm sabit dalma derinliği için, T2 ile kullanılan hemen hemen tüm karıştırma sürelerinde, T1'den daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 8. 6 mm sabit dalma derinliği için T1 ve T2 ile kaynaklanan numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerlerinin farklı karıştırma süreleri ile değişimi

T2 için bulunan en iyi dalma derinliği değeri 5,75 mm'dir. Her iki takım için 1000 dev/dk sabit takım devri ve 5,75 mm

sabit dalma derinliğinde, farklı karıştırma sürelerine göre üretilen numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Buna göre en yüksek çekme kuvveti değeri, T2 ile üretilen 90 sn karıştırma süresine sahip numunelerde 4037 N olarak elde edilmiştir. T1 için en yüksek çekme kuvveti değeri, 90 sn karıştırma süresine sahip numunelerde 2645 N olarak elde edilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, T2 için dalma derinliği değeri 90 sn'nin altında seçilirse, çekme kuvveti değerinin belirgin bir şekilde düştüğü görülmüştür. Karıştırma süresi 90 sn'nin üzerine çıkıldığında da maksimum çekme kuvvetinde bir miktar düşme görülmüştür. T1 için karıştırma süresi 90 sn'nin üzerindeki ve altındaki değerlerde maksimum çekme kuvveti değerlerinde bir miktar düşüş görülmüştür. Bu nedenle de optimum kaynak parametrelerinde çalışmanın bağlantının dayanımı açısından avantaj sağladığı görülmüştür. Ayrıca, 5,75 mm sabit dalma derinliği için, T2 ile kullanılan hemen hemen tüm karıştırma sürelerinde, T1'den daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 9. 5,75 mm sabit dalma derinliği için T1 ve T2 ile kaynaklanan numunelere ait maksimum çekme kuvveti değerlerinin farklı karıştırma süreleri ile değişimi

Farklı geometrilere sahip kaynak takımları ile birleştirilen numunelerin çekme testi öncesi ve sonrası fotoğrafları incelendiğinde, T1 ile üretilen numunelerin kaynak bölgesi merkezinde, takım dönme hareketine devam ederken geri çekildiğinden, yumuşayan malzeme akarak kaynak bölgesinde uç boşluğunun kalmasını engellemiştir (Şekil 10). T2 ile üretilen numunelerde ise, karıştırma işlemi sonunda takımın dönme hareketi durdurularak bir süre dalma konumunda bekletilmiş, ardından durur konumda iken geri çekilmiştir. Bu işlem sonucunda kaynak merkezinde uç boşluğu oluşmuştur (Şekil 11). Üretilen numunelerin çekme testi sonucunda oluşan kopma bölgeleri incelendiğinde ise, T1 ile üretilen numunede sünek kopma görülmektedir. Malzemenin kopma öncesi, sünek kırılmayı ifade eden oldukça fazla çekme lifleri gösterdiği, bindirme bağlantısının alt parçasına ait fotoğrafta görülmektedir. T2 ile üretilen numunede ise, üst parçada yine sünek kopma izleri görülmektedir. Kopma şekillerine ve oluşan çekme liflerine bakıldığında, kendi deney setleri içinde, en yüksek çekme kuvvetlerinin elde edildiği numunelere ait bu görüntüler, elde edilen yüksek çekme kuvveti değerleri ile örtüşmekte ve yapılan çalışmayı doğrular niteliktedir.



Şekil 10. T1 ile kaynaklanan en yüksek kaynak dayanımına sahip numunenin çekme testi öncesi ve sonrası fotoğrafları



Şekil 11. T2 ile kaynaklanan en yüksek kaynak dayanımına sahip numunenin çekme testi öncesi ve sonrası fotoğrafları

T2'nin omuz tabanında bulunan helisel kanallar, T1'e göre yüzey alanını daha fazla artırmıştır. Dolayısı ile sürtünmeden doğan ısı artmış ve kaynaklanabilme kabiliyeti iyileştirilmiştir. Ayrıca omuz tabanında bulunan helisel kanallar, dönme yönüne bağlı olarak dışarıdan içeriye doğru malzemeyi sürüklemeye özelliği gösterdiğinden, omuz tabanı ile malzemenin teması sonucunda, yumuşayan malzemenin kaynak havuzundan dışarıya kaçıması engellenmeye çalışılmıştır. Bu sayede kaynak bölgesinin hacmi maksimum seviyede tutulmuş ve en yüksek kaynak dayanımının elde edilmesi sağlanmıştır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada iki farklı takım geometrisi kullanılarak takım geometrisinin kaynak dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Farklı takım geometrileri ile oluşturulan kaynaklı bağlantılara uygulanan çekme deneyleri ile, kaynak takımı geometrisinin kaynak dayanımı üzerinde çok önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür. Konik uçlu ve spiral tabanlı takımın (T2), üzerine dış açılmış ve silindirik uçlu, düztabanlı takıma (T1) göre, kaynak bağlantısı mukavemetini artırdığı tespit edilmiştir. Kaynak takımına ait uç ve omuz geometrilerinin, optimum belirlenmesi durumunda, daha yüksek dayanım değerlerinin elde edileceği saptanmıştır.

SONUÇLAR

1. SKNK yöntemi ile oluşturulan kaynak bağlantılarının dayanımına, kaynak takımının sahip olduğu geometrinin önemli ölçüde etkisi vardır.
2. T2 kodlu konik merkez pimli ve spiral omuz tabanlı takım ile kaynaklanan numuneler üzerinde yapılan çekme testleri sonucunda, T1 kodlu M9 uçlu ve içbükey yapıdaki omuz tabanına sahip takımla kaynaklanan numunelere göre daha yüksek çekme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır.
3. T1 ile kaynaklanan numunelerden elde edilen en yüksek, maksimum çekme kuvveti değeri 2907 N'dur. Aynı şartlarda, T2 ile kaynaklanan numunelerden elde edilen en yüksek maksimum çekme kuvveti değeri 4037 N'dur. Bu sonuç, SKNK yöntemi ile kaynaklanacak malzemeler için, takım tasarımının çok büyük bir önem arz ettiğini göstermektedir.
4. Kaynak havuzundaki malzeme hacmi kaynak dayanımını etkilemektedir. Bu yüzden takım tasarımı

yapılırken, kaynak bölgesinin hacmini en yüksek değerde tutmak için, en uygun kaynak takımı geometrisini tasarlamak, dayanım değerlerini olumlu yönde etkilemektedir.

5. Her zaman için, optimum kaynak parametreleri ile çalışmanın, bağlantının dayanımı açısından önemli avantaj sağladığı görülmüştür.

6. T2 ile elde edilen 4037 N maksimum çekme kuvveti değeri, esas malzemenin maksimum çekme kuvveti olan 5864 N değerinin, yaklaşık olarak %70'ine eşdeğerdir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Düzce Üniversitesi DÜBAP 2013.07.04.170 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. Bu çalışmaya proje desteği veren, üniversitemizin yetkililerine sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Ş. Mert, "Polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi" Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010.
- [2] Z. Feng, S. Diamond, M. L. Santella, T. Y. Pan, and N. Li, "High strength weight reduction materials-friction stir welding and processing of advanced materials", Oak Ridge National Laboratory Report, DE-AC05-00OR22725, 101-108, 2004.
- [3] Z. Feng, M. L. Santella, S. A. David, R. J. Steel, S. M. Packer, T. Pan, M. Kuo, and R. S. Bhatnagar, "Friction stir spot welding of advanced high-strength steels-a feasibility study", SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA, 11-14 April 2005.
- [4] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chean, Z. Feng, and M. L. Santella, "Structure properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum", *Materials Science and Engineering*, vol. 441, pp. 79-96, 2006.
- [5] A. A. Arıcı ve Ş. Mert "Polipropilen malzemenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi", *PAGEV Plastik Dergisi*, 95, Sayfa 152-162, 2007.[6] P. C. Lin, J. Pan, and T. Pan, "Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of 6111-T4 sheets. Part 1: Welds made by a concave tool", *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 74-89, 2008.
- [7] P. C. Lin, J. Pan, and T. Pan, "Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool", *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 90-105, 2008.
- [8] Ş. Mert ve A. A. Arıcı, "Friction stir spot welding method using in polypropylene sheet materials joining", 12th International Materials Symposium, Pamukkale University, pp 1150-1156, Denizli, October 2008.
- [9] V. X. Tran, J. Pan, and T. Pan, "Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens", *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 2175-2190, 2008.
- [10] V. X. Tran, J. Pan, and T. Pan, "Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminum 5754-O and 7075-T6 sheets" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 3724-3739, 2009.
- [11] Ş. Mert ve S. Mert, "Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin incelenmesi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt 2, Sayı 1, Sayfa 26-35, 2013.
- [12] Ş. Mert ve S. Mert, "Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde kullanılan makine ve ekipmanların incelenmesi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi (Journal of Advanced Technology Sciences)*, Cilt 2, Sayı 3, Sayfa 121-129, 2013.
- [13] Ş. Mert ve S. Mert, "Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynak Yönteminin Otomotiv Sektöründeki Yeri", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, Sayfa 432-438, 2015.
- [14] M. Fujimoto, S. Koga, N. Abe, Y. S. Sato, and H. Kokawa, "Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 7, pp. 663-670, 2008.
- [15] Y. H. Yin, N. Sun, T. H. North, and S. S. Hu, "Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210 (14), pp. 2062-2070, 2010.
- [16] M. I. Khan, M. L. Kuntz, P. Su, P. Su, A. Gerlich, T. North, and Y. Zhou, "Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12 (2), pp. 175-182, 2007.
- [17] A. A. Arıcı and Ş. Mert, "Friction stir spot welding of polypropylene," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 27 (18), pp. 2001-2004, 2008.
- [18] Kawasaki Heavy Industries Ltd., "A new method for light alloy joining - friction spot joining - kawasaki robot", Japan, www.kawasakirobot.com, visit date: 18 March 2006.
- [19] J. Hinrichs, "Friction stir spot welding", *Friction Stir Link Inc.*, www.frictionstirlink.com, visit date: 21 March 2006.
- [20] Ş. Mert and A. Arıcı, "Design of optimal joining for friction stir spot welding of polypropylene sheets", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16(6), pp. 522-527, 2011.
- [21] F. Yusof, Y. Miyashita, N. Seo, Y. Mutoh, and R. Moshwan, "Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 17, pp. 544-549, 2012.
- [22] M. K. Bilici and A. I. Yukler, "Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets", *Materials and Design*, vol. 33, pp. 545-550, 2012.
- [23] M. K. Bilici and A. I. Yukler, "Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets", *Materials and Design*, vol. 33, pp. 145-152, 2012.
- [24] A. Mostafapour and F. T. Asad "Investigations on joining of Nylon 6 plates via novel method of heat assisted friction stir welding to find the optimum process parameters", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 21 (8), pp. 660-669, 2016.
- [25] Y. Yan, Y. Shen, W. Zhang, and W. Guan, "Effects of friction stir spot welding parameters on morphology and mechanical property of modified cast nylon 6 joints produced by double-pin tool", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 2511-2523, 2017.
- [26] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng, and S. David, "Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (fssw) process: use of an explicit adaptive meshing scheme", SAE International, 2005-01-1251, 2005.
- [27] P. Su, A. Gerlich, and T. North, "Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloy sheets", SAE International, 2005-01-1255, 2005.
- [28] S. Lathabai, M. J. Painter, G. M. D. Cantin, and V. K. Tyagi, "Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy", *Scripta Materialia*, vol. 55 (10), pp. 899-902, 2006.
- [29] A. Gerlich, P. Su, and T. H. North, "Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys", *Journal of Materials Science*, vol. 40 (24), pp. 6473-6481, 2005.
- [30] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50 (1), pp. 1-78, 2005.
- [31] B. Çevik, "Polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesine karıştırıcı takım dönme yönü ve karıştırma süresinin etkisi", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, Cilt 2, Sayı 3, Sayfa 28-33, 2013.
- [32] M.K. Bilici, "Polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynak özellikleri", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
- [33] K. Kaptan, "Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirmelerinde farklı karıştırıcı uç formlarının birleştirme kalitesine etkilerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2008.
- [34] M. K. Bilici, A. İ. Yukler ve M. Kurtulmuş, "Yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında kaynak ucu geometrisinin kaynak mukavemetine etkisi", *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Sayı 23(3), Sayfa 111-122, 2011.
- [35] Ş. Mert ve E. Kaluç, "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", *Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi*, Sayfa 103-115, 2003.
- [36] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li, and K. Okamoto, "Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49 (11), pp. 814-823, 2009.

- [37] H. Badarinarayan, Q. Yang, and S. Zhu, "Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49 (2), pp. 142-148, 2009.
- [38] Y. Tozaki, Y. Uematsu, and K. Tokaji, "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47 (15), pp. 2230-2236, 2007.
- [39] CatalogI (2014), RÖCHLING Engineering Plastics Catalog, Polystone Thermoplastics Characteristics and Applications, Available: <http://www.roechling.com/>, visit date: 27 July 2014.