

TERMOPLASTİKLERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAK BİRLEŞTİRİLMESİNDE KAYNAK PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ

Mustafa Kemal BİLİCİ¹, Ahmet İrfan YÜKLER², Onur FİDANER³

¹mkbilici@marmara.edu.tr Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

²iyukler@marmara.edu.tr Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

³onurf@marmara.edu.tr Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

ÖZET

Polipropilen ve yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynak birleştirmesi yapılmıştır. İş parçaların cinsine göre kaynak bölgesinin sıcaklığı değişmektedir. Birbirleri ile birleştirilen polipropilen parçaların kopma kuvveti en yüksek değerde olmuştur. Polietilen levha kaynakların kopma kuvveti daha düşük olmuştur. Polipropilen-polietilen kaynak birleştirmelerinin kopma kuvveti malzemelerin malzemelerin uyumsuzluğuna bağlı olarak küçük değerde kalmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sürtünme karıştırma nokta kaynak, termoplastiklerin kaynağı, termoplastiklerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı.

ABSTRACT

The effects of welding parameters on static strength in friction stir spot welds of thermoplastics were studied. High density polyethylene and polypropylene sheets were used in experiments. The temperature of the welding zone changes with the welding sheet material. Polypropylene sheets gave the highest weld fracture load. The fracture load of dissimilar sheets friction stir spot welds were low because high density polyethylene and polypropylene immiscible and thermodynamically incompatible.

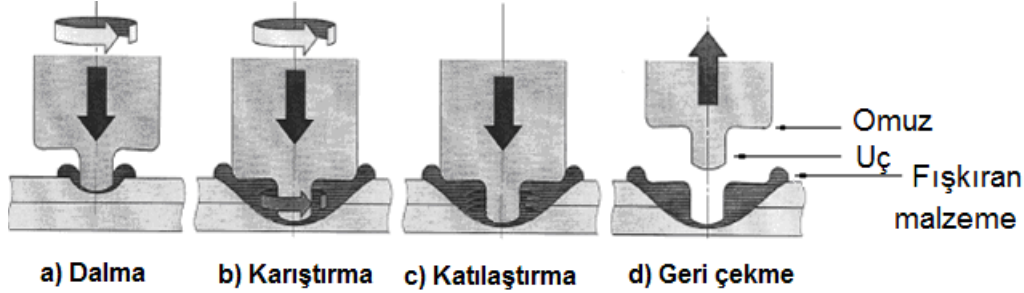
Key words: Friction stir spot welding, thermoplastics welding, thermoplastics friction stir spot welding.

1. GİRİŞ

Sürtünme karıştırma kaynak (SKK) ve sürtünme karıştırma nokta kaynak (SKNK) yöntemleri alüminyum alaşımların birleştirilmesinde standart kaynak yöntemi haline gelmiştir [1]. SKNK yöntemi, çizgisel kaynak dikişi üreten SKK yönteminin nokta halinde dikiş üreten bir versiyonudur. Bu iki kaynak yöntemi metalleri katı halde birleştiren kaynak yöntemleridir. Termoplastiklerin birleştirilmesinde SKK yöntemi [2-4] ve SKNK yöntemi [5-11] başarı ile uygulanmaktadır.

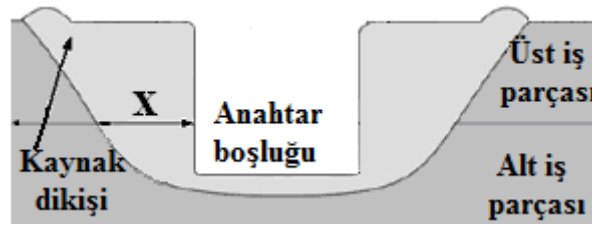
SKNK yönteminin termoplastiklere uygulama safhaları Şekil 1'de görülmektedir [6,7]. Kaynak yönteminin dalma, karıştırma, katılaşma ve geri çekme adı verilen safhası vardır. Metallerin SKNK kaynağında ise metal ergimesi gerçekleşmediğinden katılaşma safhası yoktur [12]. Kaynak işleminde kullanılan takım uç ve omuz adı verilen iki kısımdan oluşmaktadır [13]. Kaynağın dalma safhasında sabit hızla dönen kaynak takımı belli bir basma kuvveti ile iş parçalarının içerisine belirli

bir derinliğe kadar daldırılır. Daha sonra takım malzeme içerisinde belli bir süre döndürülür. Karıştırma safhası adı verilen bu süreçte kaynak takımının ucu ve omuzu çevresindeki malzemeleri karıştırırlar. Karıştırılan termoplastik malzeme ısınır ve erir [6,8]. Alt ve üst iş parçalarının eriyen kısımları takımın dönme hareketi ile birbirine karışırlar. Tespit edilen karıştırma süresi sona erince takımın dönmesi durdurulur. Sıvı malzeme katılaşana kadar kaynak takımı dönmeden iş parçası



Şekil 1. Termoplastiklerde SKNK yönteminin dört safhası: (a) Dalma, (b) Karıştırma, (c) Katılaştırma ve (d) Geri çekme [6,7].

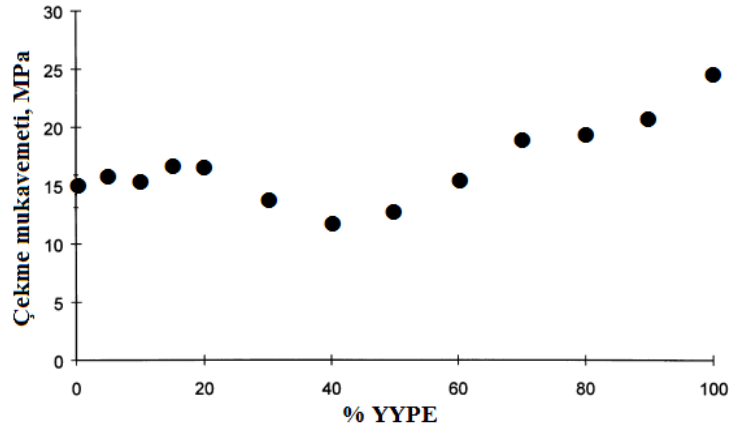
içerisinde bekletilir. Bu safhaya katılaştırma safhası adı verilmektedir. SKNK yöntemi ile elde edilen birleştirmenin kesidi şematik olarak Şekil 2'de görülmektedir [14]. Kaynak sırasında ergidikten sonra katılaşarak iki iş parçasını birleştiren kaynak çekirdeğini alt ve üst iş parçalarının temas yüzeyindeki kalınlığına kaynak dikiş genişliği (X) adı verilmektedir [15]. Kaynağın dayanımı kaynak dikiş genişliği ile doğru orantılıdır [15]. Kaynak dikiş oluşumunda kaynak parametreleri [6,8,10] (takım dönme hızı, takım karıştırma süresi, katılaştırma süresi) ve takım geometrisi [7] (uç geometrisi, omuz geometrisi) çok etkili olarak kaynaklı birleştirmenin dayanımını tayin etmektedir [16].



Şekil 2. Bir sürtünme karıştırma nokta kaynağının kesitinin şematik görünümü.
X: Kaynak dikiş kalınlığı [14].

Polimerler çok geniş özelliklere sahip olduklarından bu malzemelerin üretimi ve tüketimi sürekli olarak artmaktadır. Polimerlerin metallere nazaran üstünlükleri (düşük yoğunluk, düşük maliyet, kimyasallara karşı yüksek direnç, yüksek ısı ve elektrik izolasyonu) olmasına rağmen mekanik özellikleri (mukavemet, elastisite modülü) metallere nazaran daha düşüktür [17]. Bu nedenle polimerlerden yapılmış iş parçalarının mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı farklı araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalardan bir tanesi de polimer karışım üretimidir [18]. İki farklı polimerin birbirine karıştırılması ile üstün mekanik özelliklere sahip iş parçası üretilebilmektedir. Polimer karışımları, saf polimerlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği [19] ve polimerlerin geri dönüşümü uygulamalarını kolaylaştırdığından [20] büyük önem kazanmıştır. Bir polimer karışımının özellikleri kendisini oluşturan komponentlerin birbiri içerisinde karışma özelliklerine, komponentlerinin birbirine olan uyumlarına, elde edilen karışımın morfolojisine ve kristalleşmesine direkt olarak bağlıdır [20]. Komponentler sıvı halinde iken karışımlar yapıldığından ısıtma sıcaklığı, uygulanan kalıplamanın kayma gerilme şiddetine, kalıp sıcaklığına, kalıplama sonrası soğutma hızı gibi üretim koşullarına bağlı olarak karışımın özellikleri değişiklikler gösterir [21,22].

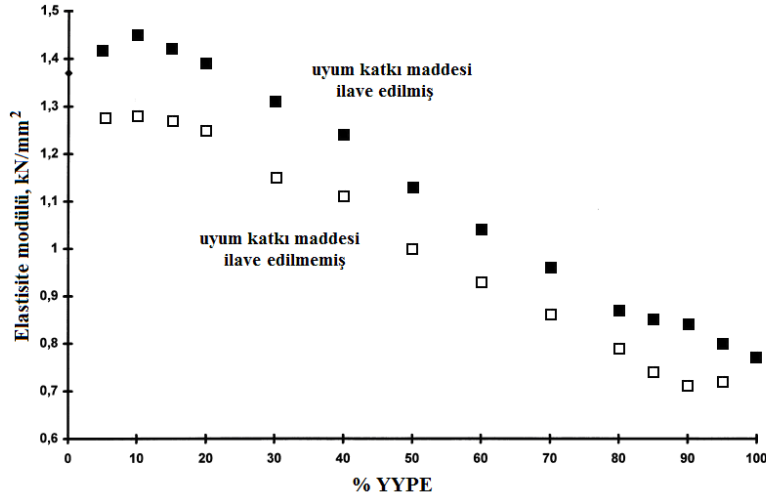
Polipropilenin (PP) ve yüksek yoğunluklu polietilenin (YYPE) fiyatları nispeten düşük olması ve birçok endüstriyel uygulamalar için gerekli özelliklere sahip olması bu iki malzemeyi en yaygın tüketilen termoplastikler arasına sokmuştur [23]. Bu iki polimer birbiri içerisinde karışmazlar ve termodinamik olarak uyumsuzdurlar [17]. Bu iki komponentten üretilen karışımlarda ağırlık oranı fazla olan komponent morfolojinin matrisini oluşturur [19]. Ağırlığı az olan komponent ise matris içerisinde küçük küçük bölgeler oluşturur [24]. Karışımın morfolojisi genellikle kaba olduğundan ve fazlar arası bağlar zayıf olduğu için karışımın mekanik özellikleri düşük olmaktadır [25]. Şekil 3'te PP-YYPE karışımlarında komponent ağırlık oranına bağlı olarak karışım çekme mukavemetinin değişimi görülmektedir [26]. Şekil 3'te görüldüğü gibi bazı karışımların çekme mukavemeti saf PP'nin çekme mukavemetinin altında kalmaktadır. Karışım üretim koşullarına bağlı olarak karışımda kristalleşme oranı yükseldikçe fazlar arası bağlar kuvvetlenir ve daha iyi mekanik özellikler elde edilir [27].



Şekil 3. PP-YYPE karışımlarında çekme mukavemetinin karışım oranına bağlı olarak değişimi [26].

PP-YYPE karışımlarında komponentlerin birbirine uyumluluğunu sağlayan etilen vinilasetat kopolimer (EVA), etilen propilen dien kopolimer (EPDM) gibi katkı maddeleri ilave edilirse karışım morfolojisi incelik ve fazlar arası bağlar kuvvetlenir [25]. Böylece karışımın mekanik özellikleri gelişmiş olur. Şekil 4'te PP-YYPE karışımlarına uyumluluk sağlayan katkı maddesinin karışım elastisite modülü üzerindeki olumlu tesiri görülmektedir [28].

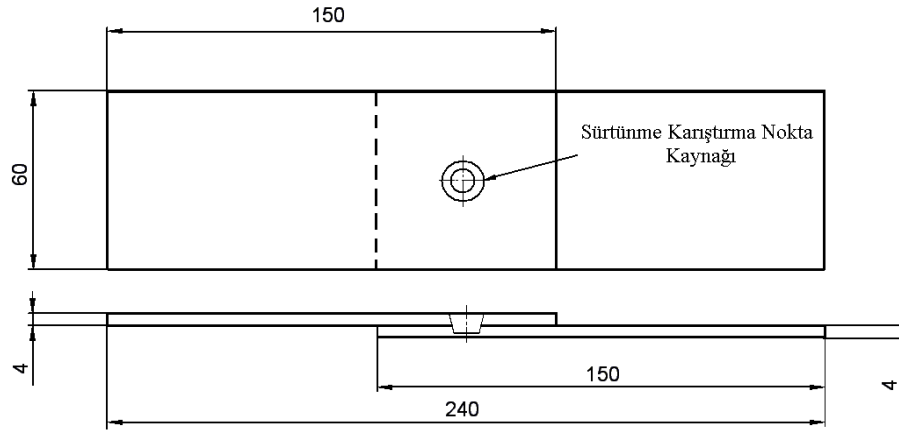
Bugüne kadar termoplastiklerin SKNK çalışmalarında aynı cinsteki iş parçalarının birleştirilmesi yapılmıştır. Farklı termoplastiklerin SKNK birleştirilmeleri ile ilgili hiçbir yayın mevcut değildir. Bu nedenle bu çalışmada PP ve YYPE parçalarının SKNK yöntemi ile birleştirilmelerinde kaynak parametrelerinin etkisi araştırılmıştır.



Şekil 4. PP-YYPE karışımlarında uyum katkı malzemesinin karışım elastisite modülündeki tesiri [28].

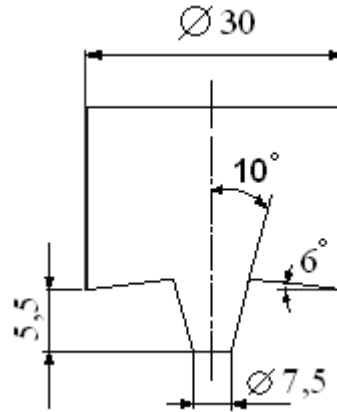
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada 4 mm kalınlıkta polipropilen (PP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) levhalar kullanılmıştır. Bu levhalardan çekme-makaslama kaynak deney numuneleri kesilmiştir. Deney numunelerinin boyutu ve bunlara uygulanan kaynak Şekil 5’de şematik olarak görülmektedir. Deneylerde kullanılan takım SAE 1040 çeliğinden üretilmiş ve 40 R_c sertliğine ısıl işlem ile sertleştirilmiştir. Kullanılan takımın geometrisi Şekil 6’da görülmektedir. Kaynak sırasında sadece kaynak takım dönme hızı veya karıştırma süresi değiştirilmiştir. Bu değişen kaynak parametrelerinin çalışma aralıkları Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 5. Çekme-makaslama numunesinin şematik boyutları

Bütün kaynaklarda takım dalma hızı 0,33 mm/s ve takım dalma derinliği 5,70 mm olarak sabit tutulmuştur. Katılma süresi her deneyde 45 saniye olmuştur.



Şekil 6. Kaynak takımının kesiti

Tablo 1. Kaynak parametreleri ve çalışma aralıkları.

Değişken parametreler	Birimi	Çalışma aralığı
Takım dönme hızı	devir / dakika (d/d)	360-2400
Takım karıştırma süresi	saniye (s)	15-120

Kaynak işlemleri üniversal freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kaynak birleştirme noktasının çekme-makaslama numunesinin tam ortasında teşekkül etmesi için bir bağlama kalıbı kullanılmıştır. Bu kalıp sayesinde bütün deneylerin kaynak işlemleri standart halde gerçekleştirilmiştir. Bütün kaynak işlemleri oda sıcaklığında yapılmıştır. İlk olarak sıcaklık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde kaynak karıştırma süresinin bitmesi ile birlikte kaynak takımı geri çekilmiş ve kaynak dikişinin sıcaklığı infraruj termometre ile 10 cm mesafeden ölçülmüştür. Daha sonra çekme makaslama numunelerinin kaynakları yapılmıştır. Her deney koşulunda 6 adet kaynak numunesi hazırlanmıştır. Çekme-makaslama deneyleri oda sıcaklığında Instron çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde çekme hızı 5 mm/s olarak sabit tutulmuştur. Aynı şartlarda kaynaklanan 5 numunenin çekme-makaslama testinden elde edilen kaynak kopma kuvvetlerinin basit aritmetik ortalaması alınmıştır. Çekme-makaslama deneyinden elde edilen ortalama kaynak kırılma sonucu makale içerisinde kaynak kopma kuvveti olarak belirtilmiştir.

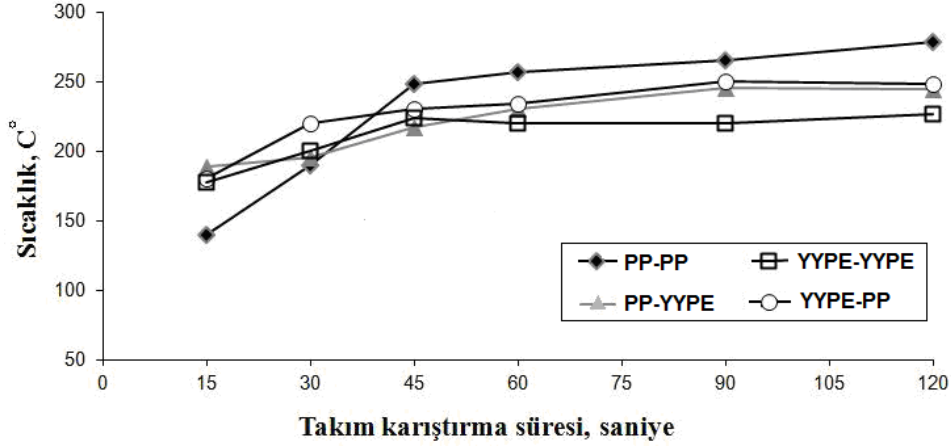
Kaynak bölgesi boyutlarını tayin etmek için çekme makaslama numunelerinin ortasından 30 µm kalınlıkta ince bir film tabakası çıkartılmıştır. Bu numuneler Leica R6125 model mikrotorm ile kesilmiştir. İki cam arasına yerleştirilen ince film tabakaları 12,88X büyütmede VSC-5000 model video spektral komprator yardımı ile fotoğrafları alınmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

Şekil 7'de 1100 d/d takım dönme hızı ile karıştırılan kaynaklarda takım karıştırma süresine bağlı olarak ölçülen kaynak bölgesi sıcaklığı görülmektedir. YYPE' nin ergime sıcaklığı 131 °C ve PP' nin ergime sıcaklığı 171 °C olduğu bilinmektedir [29]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağında kaynak bölgesinde oluşan ısı ise 1 numaralı denklemde ifade edilmiştir [30].

$$Q = 13,17 \mu\text{PNR}^3 \quad (1)$$

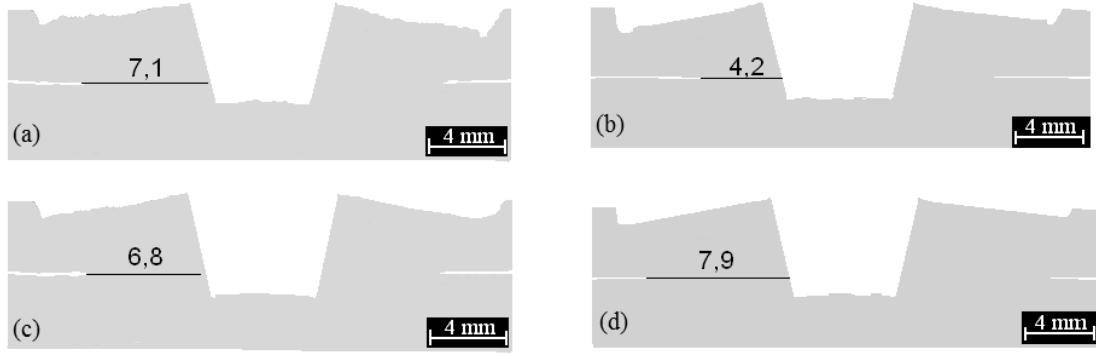
Q : Kaynakta oluşan ısı oranı,
 μ : Malzemenin sürtünme katsayısı
P : Takımın yaptığı basınç
N : Takımın dönme hızı
R : Takımın yarı çapı



Şekil 7. Takım karıştırma süresinin kaynak bölgesi sıcaklığı üzerindeki tesiri.

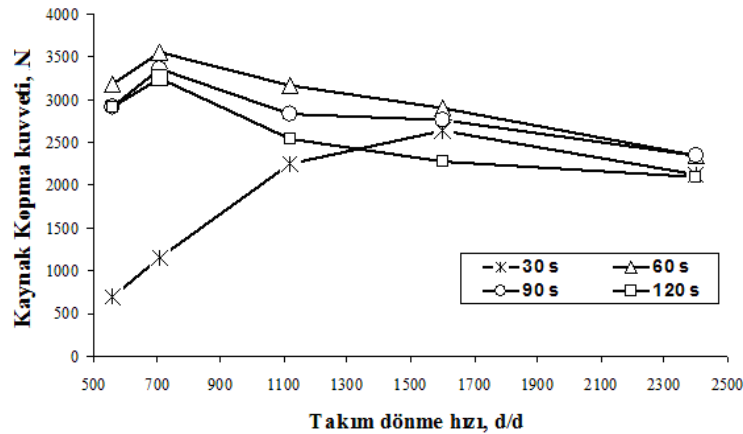
Kaynak takım ısısı, dönen takımın iş parçaları ile temas ettiği yüzeylerde oluşur ve karıştırdığı malzemeyi ısıtır [30]. Takımın dönme hızı ile sürtünme ısısının artacağı anlaşılmaktadır. Şekil 7' de elde edilen parçaların kaynak bölgesinde ölçülen sıcaklıklar görülmektedir. YYPE-YYPE birleştirmelerinde 15 saniye karıştırma süresinde bile kaynak bölge sıcaklığı (170 °C) malzeme ergime sıcaklığının üzerine çıkmıştır. Kaynak bölgesinde ergime gerçekleşmiştir. Karıştırma süresi 45 saniye olana kadar sıcaklık artmıştır ve sıcaklık 218 °C' ye varmıştır. Daha uzun karıştırma sürelerinde ise sıcaklıkta önemli bir değişim gerçekleşmemiştir. Kaynak bölgesi sıcaklığı arttıkça malzeme sürtünme katsayısı azaldığından, artan karıştırma süresi kaynak bölgesinde oluşan ısı oranını yükseltmediğinden sıcaklıkta önemli değişim olmamıştır.

Şekil 8'de takım karıştırma süresi ve takım dönme hızının YYPE-YYPE birleştirmelerinde kaynak dışı kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Karıştırma süresi 30 saniye sabit tutularak yapılan kaynaklarda takım dönme hızı artırılınca dış kalınlığı büyümüştür. 710 d/d dönme hızı için 4,2 mm, 1600 d/d hız için 6,8 mm ve 2400 d/d hız için 7,9 mm dış kalınlığı elde edilmiştir. Takım dönme hızının artması ile dış kalınlığının büyüdüğü tespit edilmiştir. Takım dönme hızı arttıkça kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarı arttığından malzemenin ısınması artmış, eriyen malzeme miktarı çoğalmış ve dış kalınlığı büyümüştür. Şekil 8'a ve 8b karşılaştırıldığında ise karıştırma süresinin etkisi ortaya çıkmaktadır. 710 d/d takım dönme hızında 60 saniye karıştırma süresi için 7,1 mm dış kalınlığı elde edilirken 30 saniye karıştırma süresi için sadece 4,2 mm kalınlık elde edilmiştir. Sabit takım dönme hızında karıştırma süresi uzadığı için kaynak ısı artmakta ve dış kalınlılaşmaktadır. Diğer malzemelerin kaynaklarında takım dönme hızının ve karıştırma süresinin benzer etki yaptığı tespit edilmiştir. Tebliğin çok uzun olmaması için daha fazla kaynak kesit görüntüsüne yer verilmemiştir.

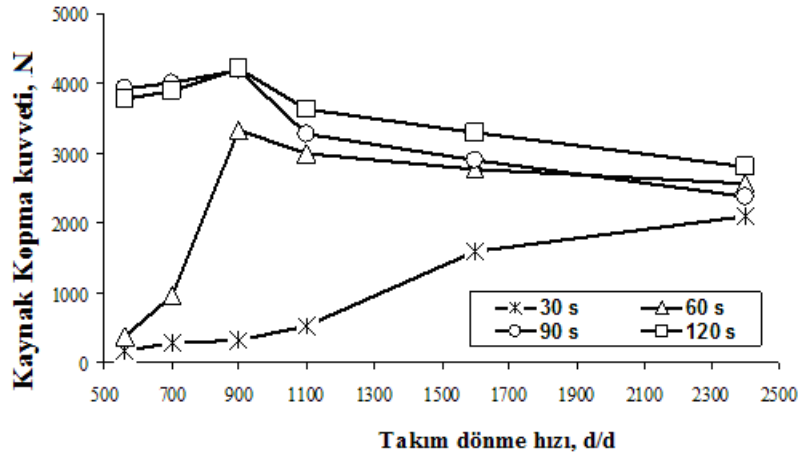


Şekil 8. (a) 710 d/d takım dönme hızı, 60 s karıştırma süresi, (b) 710 d/d takım dönme hızı, 30 s karıştırma süresi, (c) 1600 d/d takım dönme hızı, 30 s karıştırma süresi, (d) 2400 d/d takım dönme hızı, 30 s karıştırma süresi ile kaynak edilen YYPE-YYPE levhaların kaynak kesit makro görüntüsü.

Şekil 9' da YYPE-YYPE birleştirmelerinde takım dönme hızı ve karıştırma süresinin müştereken kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi görülmektedir. İlk olarak 30 saniye karıştırma süresine ait eğriyi incelediğimizde kaynak kopma kuvveti, takım dönme hızı 560 d/d – 1600 d/d arasında yükselmektedir. Daha uzun karıştırma süresinde ise kaynak kopma kuvveti azalmaktadır. 30 saniye karıştırma süresi için 1600 d/d dönme hızı, kaynak dayanımı açısından optimum olmaktadır. 1600 d/d ve 30 saniye için elde edilen dikiş kalınlığı 6,8 mm olduğundan kaynak kopma kuvveti 710 d/d ve 60 saniye kaynağından daha düşük olmaktadır. Çünkü ikinci kaynakta dikiş kalınlığı 7,1 mm olduğundan daha yüksek kopma kuvveti elde edilmiştir [15]. Metallerde önemli olan dikiş kalınlığı termoplastiklerde de önemli olduğu ortaya çıkmaktadır [5-8]. Karıştırma süresi 30 saniye olan kaynaklarda takım dönme hızı 1600 d/d' dan 2400 d/d hıza arttırılınca daha kalın dikiş (Şekil 8c ve Şekil 8d) elde edilmesine rağmen kaynak kopma kuvveti azalmıştır. Takım dönme hızının artması ile kaynakta iki zıt mekanizmanın tesiri ile kaynak kopma kuvveti azalmıştır. Etkili olan ilk mekanizma kaynak dikişinin kalınlaşması ile kaynak kopma kuvvetinin artmasıdır [6,8]. İkinci mekanizma ise mekanik bölünme olayıdır [31]. Sıcaklığı yüksek sıvı termoplastik malzemelerin şekillendirilmesi sırasında uygulanan kalıplama basıncının yüksek olması halinde malzemelerin moleküler ağırlığında azalma olmaktadır [32]. Moleküler ağırlığındaki azalma polimer mukavemetini düşürmektedir [33]. Bu olaya mekanik bölünme adı verilmektedir. YYPE ve PP SKNK birleştirilmelerinde bu mekanizma gerçekleştiğinden kaynak kopma kuvveti azalmaktadır [6,8]. YYPE levhaların SKNK birleştirilmelerinde optimum dikiş veren kaynak parametrelerinin dışına çıktığında kaynak kopma değerinin düştüğü Şekil 9'da görülmektedir. 30 saniye karıştırma süresi için 1600 d/d takım hızı optimum olmaktadır. 60, 90 ve 120 saniyelik karıştırma süreleri için 710 d/d takım dönme hızı optimum olmuştur. YYPE-YYPE kaynaklarında en yüksek mekanik dayanım 710 d/d dönme hızı ve 60 saniye kaynak şartında elde edilmiştir.



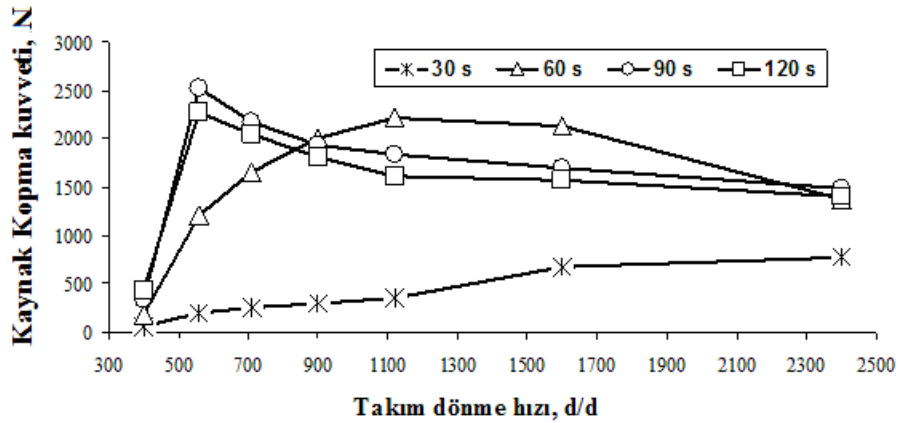
Şekil 9. Takım dönme hızı ile karıştırma süresinin YYPE-YYPE levhaların kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi.



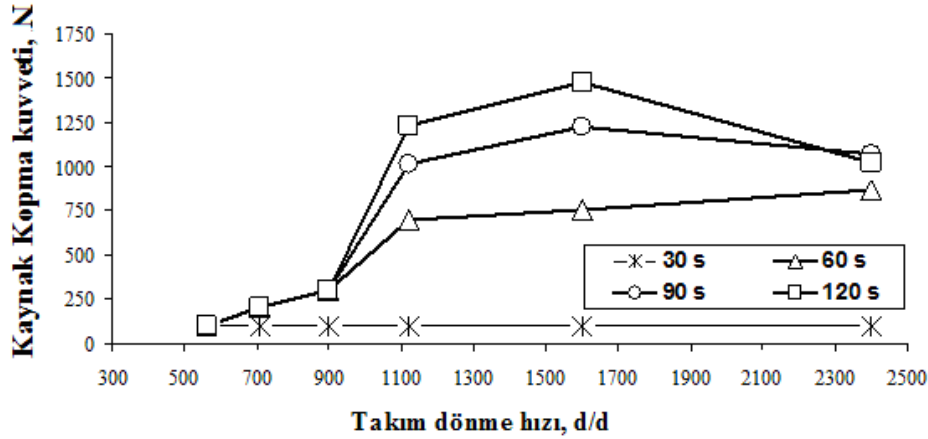
Şekil 10. Takım dönme hızı ile karıştırma süresinin PP-PP levhaların kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi.

Şekil 10'da PP-PP kaynaklarında 900 d/d takım hızı ve 90–120 saniye karıştırma süresinin optimum kaynak parametreleri olduğu görülmektedir. Bu malzemenin kaynaklarında 900 d/d takım hızından daha düşük dönme hızlarında ve 90 saniyeden daha kısa karıştırma sürelerinde az miktarda sürtünme ısısı olduğundan meydana gelen dikişin kalınlığı küçük olduğu için düşük kaynak kopma kuvvetleri elde edilmiştir. Optimum dönme hızın üzerine çıkılınca aşırı kaynak ısısından dolayı mekanik bölünme gerçekleştiği için kaynak kopma kuvveti düşmektedir [8]. Kaynak parametreleri PP-PP ve YYPE-YYPE birleştirilmelerinde çok benzer etki göstermektedir.

Şekil 11 ve 12' de Şekil 9 ve 10' daki eğrilerin benzerleri mevcuttur. YYPE-PP birleştirmelerinde üst iş parçası YYPE ve alt iş parçası PP olmuştur. PP-YYPE birleştirmelerinde ise parçaların yeri ise tam tersi olmuştur. Farklı cinsteki malzemelerin SKNK birleştirmelerinde oluşan sıvı kaynak karışımında üst parça ağırlık olarak çoğunluğu teşkil eder. Karışımın dominant olan malzemeye bağlı olarak optimum takım dönme hızı ve maksimum kaynak kopma kuvveti değişmekte olduğu Şekil 11 ve Şekil 12'de görülmektedir. YYPE-PP SKNK birleştirilmelerinde elde edilen maksimum kaynak kopma kuvveti PP-YYPE birleştirilmelerinden daha yüksek çıkmıştır. Ancak elde edilen kaynak kopma kuvveti PP-PP ve YYPE-YYPE birleştirmelerinden çok düşük olmaktadır. YYPE ve PP termodinamik olarak uyumsuz olduklarından kaynak bölgesinde oluşan karışımın mukavemeti ana malzemelerin mukavemetinden düşük olduğu için kaynak kopma kuvveti düşük olmuştur.



Şekil 11. Takım dönme hızı ile karıştırma süresinin YYPE-PP levhalarının birleştirme kaynağı kopma kuvveti üzerindeki etkisi.



Şekil 12. Takım dönme hızı ile karıştırma süresinin PP-YYPE levhalarının birleştirme kaynağı kopma kuvveti üzerindeki etkisi

Kaynak dikisinde YYPE oranı daha yüksek olduğunda kaynak dayanımı daha fazla olmaktadır. YYPE ve PP karışımlarında benzer sonuçlar elde edilmiştir [26]. PP oranı arttıkça dayanımın düştüğü Şekil 4'te de görülmektedir. SKNK uygulamalarında 30 saniye karıştırma süresi için YYPE-PP ve PP-YYPE birleştirmelerinin hepsinde yetersiz kaynak ısı oluşmasına bağlı olarak yetersiz kaynak dikiş kalınlığı elde edildiğinden kaynak kopma kuvveti çok küçük değerlerde kalmıştır. 90 ve 120 saniye karıştırma sürelerinde optimum takım dönme hızı iş parçaların cinsine bağlı olduğu Şekil 11 ve 12' de görülmektedir. YYPE-PP kaynaklarında 560 d/d takım dönme hızı ve 90 saniye karıştırma süresinde en büyük kaynak kopma kuvveti elde edilmektedir.

4. GENEL SONUÇLAR

4 mm kalınlıktaki YYPE ve PP levhaların SKNK birleştirmeleri yapılmıştır. Aynı cins ve farklı cinsteki iş parçaların kaynak deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak dikışı ve mekanik özellikler değişmektedir.
2. Yetersiz ısı oluşturan kaynak koşullarında düşük kaynak kopma kuvveti elde edilmektedir.
3. Aşırı ısı oluşturan kaynak koşullarında mekanik bölünme oluşmakta ve kaynak kopma kuvveti azalmaktadır.
4. PP-PP kaynaklarının kopma kuvveti YYPE-YYPE kaynaklarından daha yüksek olmaktadır.
5. YYPE ve PP uyumsuz olduklarından YYPE-PP ve PP-YYPE kaynaklarının kopma kuvveti YYPE-YYPE ve PP-PP kaynaklarından düşük olmaktadır.
6. Karma malzeme kaynaklarında en yüksek kaynak kopma kuvveti YYPE-PP birleştirmelerinde elde edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] TOSHIYA, S, KENZO, M, SHYUHEI, Y, KENJI, I, Friction stir spot welding of pure aluminium sheet in view of high temperature deformation, **Transaction of Joining and Welding Research Institute**, Vol.40 (2): 1-5, (2011).
- [2] STRAND, S.R, Effects of friction stir welding on polymer microstructure, Master of Science Thesis, **Brigham Young University**, Mechanical Engineering Department, (2004).

- [3] ARICI, A., ŞELELE, S., Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. **Science and Technology of Welding and Joining**, 12, 536-539, (2007).
- [4] ARICI, A., SINMAZ, T., Effect of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene, **Journal of Materials Science**, 40, 3313-3316, (2005).
- [5] BİLİCİ, M. K, YÜKLER, A.İ., KURTULMUŞ, M., Yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında kaynak ucu geometrisinin kaynak mukavemetine etkisi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 23, 3, 111- 122, (2011).
- [6] BİLİCİ, M.K., YÜKLER, A.İ., Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets, **Materials and Design**, 33, 145-152, (2012).
- [7] BİLİCİ, M.K., YÜKLER, A.İ., KURTULMUŞ, M., Takım geometrisinin yüksek yoğunluklu polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynağına tesiri, **Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 15,3, 265-270, (2011).
- [8] KURTULMUŞ, M., Friction stir spot welding parameters for polypropylene sheets, **Scientific Research and Essays**, 7(8), 947-956, (2012).
- [9] BİLİCİ, M.K., Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene, **Materials and Design**, 35, 113-119, (2012).
- [10] ARICI, A., MERT, Ş., Friction stir spot welding of polypropylene, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 1,1, 1-4 (2008).
- [11] OLIVEIRA, P.H.F., FILHO, S.T.A., SANTOS, J.F.D., HAGE, E., A Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA, **Materials Letters**, 64 (19), 2098–2101 (2010).
- [12] AWANG, M, MUCINO, V.H, FENG, Z, DAVID, S A, Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding(FSSW) process: Use of an explicit adaptive meshing scheme, **SAE International Paper**, 01, 1251-1256, (2005).
- [13] TOZAKI, Y., UEMATSU, Y., TOZAKI, K., Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. **International Journal of Machine Tools**, 47, 2230-2236., (2007).
- [14] GERLICH, A., SU, P., North, T.H., BENDZSAK, G.J., Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys, **Materials Forum**, 29, 290-294, (2005).
- [15] SANTELLA, M.L., GRANT, G.J., FENG, Z., HOVANSKI, Y., Friction stir spot welding of advanced high strength steel, **FY Progress Report**, Oak Ridge National Laboratory, USA, (2006).
- [16] JAYARAMAN, M, SIVASUBRAMANIAN, R, BALASUBRAMANIAN, V, LAKSHMINARAYANAN, A,K, Optimization of process parameters for friction stir welding of cast aluminium alloy A319 by Taguchi method, **Journal of Scientific Industrial Research**, 68, 36-43, (2009).
- [17] MOURAD, A.H.I., Thermo - mechanical characteristics of thermally aged polyethylene polypropylene blends, **Materials and Design**, 31, 918–929, (2010).
- [18] SHANKS, R.A., LI, J., YU, L., Polypropylene–polyethylene blend morphology controlled by time–temperature–miscibility, **Polymer**, 41, 2133–2139, (2000).

- [19] CHEN, J., CAO, Y., LI, H., The Effect of Propylene–Ethylene Copolymers with different comonomer content on melting and crystallization behavior of polypropylene, **Journal of Applied Polymer Science**, 116, 1172–1183, (2010).
- [20] TAI, C.M., LI, R.K.Y., NG, C.N., Impact behaviour of polypropylene/polyethylene blends, **Polymer Testing**, 19, 143–154, (2000).
- [21] BORYSIAK, S, The Influence of Processing Parameters on the Supermolecular Structure of Isotactic polypropylene in PP/LDPE Blends, **Fibres & Textile in Eastern Europe**, 16 (6), 93-96, (2008).
- [22] KUA, H.C., JENG, M.C., Effects of part geometry and injection molding conditions on the tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene polymer, **Materials and Design**, 31, 884–893, (2010).
- [23] DIKOBÉ, D G, LUYT, A S, Comparative study of the morphology and properties of PP/LLDPE/ wood powder and MAPP/LLDPE/ wood powder polymer blend composites, **eXPRESS Polymer Letters**, 4 (11), 729-741 (2010).
- [24] JOSE, S., APREM, A.S., FRANCIS, B., CHANDY, M.C., WEMER, P., ALSTAEDT, V., THOMAS, S., Phase morphology, crystallisation behaviour and mechanical properties of isotactic polypropylene/ high density polyethylene blends, **European Polymer Journal**, 40, 2105–2115, (2004).
- [25] SAUZA, A.M.C., DEMARQUETTE, N.R., Influence of coalescence and interfacial tension on the morphology of PP/HDPE compatibilized blends, **Polymer**, 43, 3959-3967, (2002).
- [26] LOOS, J., BONNET, M., PETERMANN, J., Morphologies and mechanical properties of syndiotactic polypropylene (sPP)/polyethylene (PE) blends, **Polymer**, 41, 351–356, (2000).
- [27] LI, J, 1 SHANKS, R, A, LONG, Y, M echanical Properties and Morphology of Polyethylene-polypropylene blends with controlled thermal history, **Journal of Applied Polymer Science**, 76, 1151-1164, (2000).
- [28] SCHURMANN, B.L., NIEBERGALL, U., SEVERIN, N., BURGER, C., STOCKER, W., RABE, J.P, Polyethylene (PEHD)/polypropylene (iPP) blends: mechanical properties, structure and morphology, **Polymer**, 39 (22), 5283-5291, (1998).
- [29] MARK, J.E., **Polymer Data Handbook**, Oxford University Press, New York, (1999).
- [30] MA, N., KUNUGI, A., HIRASHIMA, T., OKUBO, K., KOMIYAKA, M., FEM simulation for friction spot joining process **Welding International**, 23 (1), 9–14, (2009).
- [31] CAPONE, C., LANDRO, L.D., INZOLI, F., PENCO, M., SARTORE, L., Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing, **Polymer Engineering Science**, 47, 1813-1819, (2007).
- [32] SMITH, A.P., SPONTEK, R.J., ADE, H., On the similarity of macromolecular responses to high energy processes: mechanical milling v.s. irradiation, **Polymer Degradation Stability**, 72, 519-524, (2001).
- [33] COSTA, H.M., RAMOS, V.D., ROCHA, M.C.G., Rheological properties of polypropylene during multiple extrusion, **Polymer Testing**, 24, 86-93, (2005).