



## Microstructures occurring in the joined thermoplastics sheets with friction stir welding

İdris Karagöz<sup>1\*</sup>, Mustafa Öksüz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Material Processing Technologies, Yalova University, Yalova, 77100, Turkey

<sup>2</sup>Department of Polymer Engineering, Yalova University, Yalova, 77200, Turkey

### Highlights:

- Joining of thermoplastics with friction stir welding
- Joining of thermoplastics by using high-speed in the CNC vertical processing center with friction stir welding
- Effect of welding tools and welding parameters on microstructure and mechanical properties

### Keywords:

- Friction stir welding
- Joining of thermoplastics
- Plastic welding
- Welding microstructure
- Welding performance

### Article Info:

Received: 14.11.2016

Accepted: 10.10.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416359

### Acknowledgement:

### Correspondence:

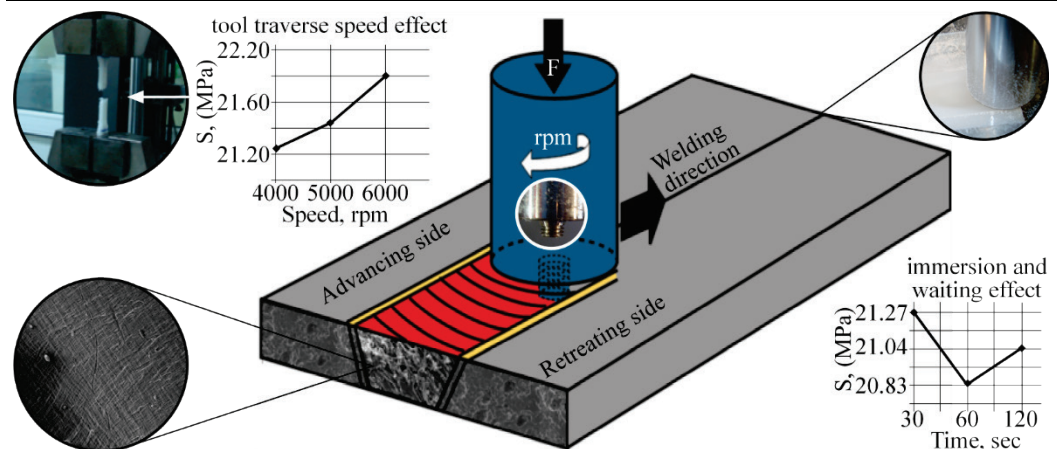
Author: İdris Karagöz

e-mail:

idris.karagoz@yalova.edu.tr

phone: +90 226 815 5553

### Graphical/Tabular Abstract



**Purpose:** This study aims to investigate the post-welding microstructures of thermoplastic materials joined in the CNC vertical processing center by using high speeds, to determine the change in weld strength according to the material type and different welding parameters, and to contribute to the development of the method in a industrially usable manner for thousands of thermoplastic materials with properties and different areas of use.

**Theory and Methods:** Friction stir welding is a solid-state welding technique that is industrially applied in the joining of metals and alloys but is not yet industrially widespread for thermoplastics. The application of welding is quite simple. In the joining of thermoplastics by friction stir welding, the same or similar processes with metal joining techniques are applied. In this study, 6x75x400 mm Polyethylene and Polypropylene plates were unilaterally joined in an AWEA BM-850 model CNC vertical processing center by friction stir welding using M12 tip traditional aluminium style welding tool and high speeds. After joining, samples were taken for mechanical and thermal tests by water jet cutting. Tensile tests were applied to the samples to determine the welding performance. The hardness of the welded zone was measured as Shore D in order to determine the effect of the tool shoulder on the weld strength. The effects of welding parameters on the material properties such as glass transition temperature, melting and boiling point, crystallization time, and crystallization rate were attempted to be determined by the DSC test. After the tensile test, microstructure analyses were carried out by a scanning electron microscope on the samples taken from the fracture surface and joint zone.

**Results:** It was determined that the mechanical properties and welding performance of PE and PP plates varied depending on the welding parameters. Upon comparing the reference samples with the test results obtained from the welded joints, results similar to the reference samples were obtained for PE and PP. It was observed that the hardness of the joint zone differed on the surface and below the surface. The welding parameters affected the crystallization rates and changed the crystallization temperature. In the SEM examinations, a microstructure similar to the microstructure in metals was observed

**Conclusion:** PE and PP plates were successfully joined using high speeds in the CNC vertical processing center. It was determined that an increase in the tool revolution increased the welding temperature and crystallization, the immersion and waiting period at the start of welding were effective in the heat convection along the weld line, and an increase in the tool shoulder immersion depth reduced the weld strength. It was observed that welding parameters were effective on the mechanical properties and microstructure, and different zones were formed depending on the temperature in the weld zone.



## Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinde meydana gelen mikroyapılar

İdris Karagöz<sup>1\*</sup>, Mustafa Öksüz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksek Okulu, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, 77100, Yalova, Türkiye

<sup>2</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi
- Termoplastiklere CNC dik işleme merkezinde yüksek devirler kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağının uygulaması
- Kaynak takımı ve kaynak parametrelerinin mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi

#### Makale Bilgileri

Geliş: 14.11.2016

Kabul: 10.10.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416359

#### Anahtar Kelimeler:

Sürtünme karıştırma kaynağı,  
termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı,  
plastiklerin kaynağı,  
kaynak mikroyapısı,  
kaynak performansı

#### ÖZET

Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak tekniği (SKK) ile birleştirilmesi oldukça yenidir ve konu hakkında literatürde çok fazla çalışma yer almamaktadır. Bu çalışmada, 6 mm kalınlığındaki Polietilen (PE) ve Polipropilen (PP) levhalar CNC dik işleme merkezinde yüksek devirler kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. PE levhaların birleştirilmesinde kaynak takım devir hızı ve kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süreleri değiştirilmiş, PP levhaların birleştirilmesinde ise takım omzu dalma derinliği değiştirilerek kaynak performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takım devir hızında meydana gelen artışın, kaynak bölgesinde oluşan sıcaklığa bağlı olarak kaynak performansını arttırdığı, kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesinde ve bu ısının kaynak hattı boyunca taşınması üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Takım omzu dalma derinliğindeki artışın birleşme bölgesindeki fibril boyları ve sıcaklık üzerinde etkili olduğu, oluşan basıncın mikroyapıyı etkileyerek mekanik özellikleri düşürdüğü belirlenmiştir. Kaynak bölgesinde takım dönme devrindeki artışın kristallenme oranını arttırdığı, kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresi ile takım omzu dalma derinliğindeki artışın ise kristallenme oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ile yapılan mikroyapı incelemelerinde kaynaklı bölgede dört farklı mikroyapı bulunmuştur. Bu yapılar; 1- Isıdan etkilenmeyen bölge, 2-Birleşme ara yüzeyi, 3- Termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi ve 4- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan kalan bölge, şeklinde sınıflandırılmıştır.

## Microstructures occurring in the joined thermoplastics sheets with friction stir welding

### H I G H L I G H T S

- Joining of thermoplastics with friction stir welding
- Joining of thermoplastics by using high-speed in the CNC vertical machining center with friction stir welding
- Effect of welding tools and welding parameters on microstructure and mechanical properties

#### Article Info

Received: 14.11.2016

Accepted: 10.10.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416359

#### Keywords:

Friction stir welding,  
joining of thermoplastics,  
plastic welding,  
welding microstructure,  
joining,  
welding performance

#### ABSTRACT

Joining of thermoplastics with friction stir welding is a quite new subject, and there are not many studies on the subject in the literature. In this study, Polyethylene and Polypropylene plates 6 mm in thickness were successfully joined by using high-speed in the CNC vertical machining center. It was determined that the increase occurring in the tool translational speed increased the welding performance depending on the temperature in the weld zone. It was determined that the increase in the tool shoulder immersion depth was effective in the fibril lengths and temperature in the joining zone, the pressure arising decreased the mechanic features by affecting the microstructure. It was observed that the increase in tool rotational speed in the weld zone increased the crystallization rate, the increase in the immersion and waiting periods at the beginning of welding and the tool shoulder immersion depth decreased the crystallization rate. In the microstructure examinations performed with the scanning electron microscope, four different microstructures were found in the weld zone. These structures were classified as: 1-The area which is not affected by the heat, 2-Joining interface, 3-Stirring zone affected thermomechanically, and 4- The zone remaining under the unjoined welding tool stirring tip part.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal kaynak teknikleri arasında yer alan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), başlangıçta alüminyum alaşımlarının kaynağı için geliştirilerek patenti alınan ve plastiklere uygulanması için üzerinde çalışmalar yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir [1, 2]. Ergitme kaynak yöntemlerinde oluşan sıcaklığa bağlı olarak birleşme bölgesinde çok farklı sorunlarla karşılaşmaktadır [3]. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), kaynak sonrası çok az deformasyonlu, çatlak veya boşluk meydana getirmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın zor olduğu pek çok malzemenin kaynağını basitleştirmiştir [4]. Yöntemin uygulanması oldukça basittir [5]. Birleştirilmek üzere sabitlenmiş plaka, boru vb. malzemelerin kaynak bölgesine sabit devirde, silindirik omza sahip bir takım daldırılır. Takım kaynak yapılacak hat boyunca sabit ilerleme hızı ile hareket ettirilir. Kaynak bileşenlerinin (takım ve malzeme) sürtünmesiyle yüksek kalitede katı hal kaynağının gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısı meydana gelir [6, 7]. Oluşan bu ısı malzemeyi yumuşatır. Kaynak takımının omzu, karıştırıcı pim tarafından yumuşatılarak geriye atılan malzemelere baskı uygulayıp kontrol ederek katı hal kaynağı şeklinde malzemelerin kaynaklanmasında rol oynar [8].

Sürtünme karıştırma kaynağı, günümüzde metal ve alaşımları için endüstriyel olarak otomotiv [1], havacılık ve uzay sanayi [6], petrol ve rafineri sanayi [8], kara, deniz ve demiryolu taşımacılığı [9], gibi çok farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Ancak termoplastikler için geleneksel SKK' nın uygulanabilmesi, plastiklerin termal ve viskoelastik özelliklerine bağlı olarak sınırlı kalmakta ve endüstriyel olarak uygulama alanı bulamamaktadır [10]. Termoplastiklerin SKK ile birleştirilmesi üzerine yapılan mevcut çalışmalar incelendiğinde, pek çok araştırmacı tarafından uygulama esnasında benzer sorunlarla karşılaşıldığı görülmüştür [11]. Karşılaşılan bu sorunlar şu şekilde ifade edilebilir:

- Birleştirme bölgesinde malzeme tutulmasındaki zorluk nedeniyle, kaynak bölgesinde boşluklar oluşması [2, 12].
- Yeterli kaynak ısısının elde edilebilmesi için kaynak ilerleme hızlarının oldukça düşük olması ve kaynak hattı boyunca ısının taşınmasındaki zorluklar [13, 14].
- Birleştirme sonrası kaynak mukavemetlerinin düşük olması [14, 15].
- Kaynak bölgesinde polimerin kaynak takımı tarafından homojen bir şekilde karıştırılamaması ve plastiğin küçük yuvarlak parçalar şeklinde birbiri ile kaynaması [10, 16].
- Kaynak bölgesinde oluşan boşluklara bağlı olarak düzgün olmayan bir kaynak yüzeyi [17, 18].

SKK termoplastikler için henüz endüstriyel olarak kullanılmamaktadır. SKK sonrası termoplastikler de oluşan mikroyapı, fiziksel, mekaniksel ve termal özellikler hakkında SKK uygulamalarını yaygınlaştıracak yeterli bilgi henüz elde edilememiştir [5, 10]. Sürtünme karıştırma kaynağının bir türevi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı

özellikleriyle ilgili aynı durum söz konusudur [19]. Bu çalışmada PE ve PP levhalar CNC dik işleme merkezinde yüksek devirler kullanılarak yatay pozisyonda alın altına birleştirilmiştir. Kaynak performansı ön ısıtma ve soğutma süreleri [1, 2], birleştirilecek malzeme türü [18, 20], kaynak takımı ilerleme ve dönme hızı [21], takım geometrisi [17, 22] gibi pek çok parametreden etkilenmektedir. Bu çalışmada; takım dönme ve ilerleme hızı, batma derinliği ve kaynak başlangıcında ön ısıtma süresi gibi farklı parametre değerleri kullanılarak, kaynak bölgesinde oluşan mikroyapı ve mekanik özellikler ile birleştirme performansı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma ile kaynak sonrası oluşan mikroyapıların incelenmesi, malzeme türüne ve değişen parametrelere göre kaynak mukavemetinin belirlenmesi, farklı özelliklere sahip ve kullanım alanı farklı binlerce termoplastik malzeme göz önünde bulundurulduğunda yöntemin endüstriyel olarak kullanılabilir şekilde geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

Bu çalışmada endüstrideki kullanım oranları dikkate alınarak Polietilen (PE) ve Polipropilen (PP) malzemeler SKK ile birleştirme amacıyla tercih edilmiştir. PE 1930'lu yıllarda İngiltere'de Imperial Chemical Industries (ICI) laboratuvarında çok yüksek basınç altında etilenin çok az oksijen yardımı ile polimerleştirilmesi şeklinde üretilmiştir [23, 24]. Başlangıçta 2000 bar gibi çok yüksek basınç altında gerçekleştirilen bu tepkimenin teknolojisinin uygulanabilir hale getirilmesi uzun yıllar sürmüş ve ilk olarak alçak yoğunluklu olarak adlandırılan polietilen grubu üretilmiştir. Çok geçmeden mekanik ve elektriksel özelliklerinin farkına varılan polietilen birçok farklı uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. 1950'li yıllarda Ziegler-Natta adıyla anılan yeni bir katalizörün bulunması ile etilenin düşük basınç altında polimerleştirme tepkimesi geliştirilmiş ve 1970'li yıllardan itibaren yöntem PE' nin bütün çeşitlerine uygulanarak PE dünya çapında çok kullanılan plastik madde haline gelmiştir [25]. PP 1954 yılında Natta tarafından bulunmuştur [23, 26]. Polimerizasyon sırasında Ziegler-Natta katalizörlerinin aktivitesine bağlı olarak izotaktik, sindiyotaktik ve ataktik polimerler oluşabilir. Genel olarak PP, ortalama %93 izotaktik, %5,5 sindiyotaktik ve %1,5 civarında da ataktik polimerlerden oluşur. PP' nin yoğunluğu ticari olarak kullanılmakta olan tüm plastik malzemelere oranla daha düşüktür. Sıcaklıkta genleşmesi ve soğudukça büzülmesi PE' ne göre çok düşüktür. Bundan dolayı nadiren deforme olurlar veya çatlaklar. Genellikle; homopolimer, kopolimer ve random kopolimer olmak üzere üç ana gruba ayrılan PP oldukça iyi kimyasal dirence sahiptir [23, 26]. Yani PP kimyasal olarak tepkimeye girmeyen bir yapıdadır [27]. Çalışmalarda Simona (Almanya) firmasına ait ticari adları PE-HWST (Polietilen) ve PP-DWST (Polipropilen) olmak üzere iki farklı polimer malzeme kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan malzemelere ait teknik parametreler Tablo 1'de verilmiştir [28]. Çalışmalarda 6 mm kalınlığındaki PE (Yüksek yoğunluklu) ve PP plakalar

ASTMD-412-A' ya göre numune alınması planlandığı için 75x400 mm ölçülerinde kesilmiş ve düzgün bir birleştirme yüzeyi için frezelenmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3'te verilen kaynak parametreleri kullanılarak PE ve PP levhalar, yüksek takım dönme devri ve takım ilerleme hızlarına çıkabilen CNC dik işleme merkezinde (AWEA BM-850, Tayvan), M12 uçlu geleneksel alüminyum stili kaynak takımı ve yüksek devirler kullanılarak SKK yöntemi ile tek taraflı olarak birleştirilmiştir. Birleştirme sonrası 6x150x400 mm ölçülerinde bir plaka elde edilmiştir. PE ve PP malzemelerin SKK ile birleştirilmesinde kullanılan parametreler Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

SKK ile birleştirilmiş 6x150x400 mm ölçüsündeki plakalardan ASTM D412 Tip A (UL-62-A) standardına uygun olarak Şekil 1a' da gösterildiği gibi su jeti ile kesilmek suretiyle mekanik ve ısıl deneyler için numuneler alınmıştır. Kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D412 Tip A (UL-62-A)' ya göre alınan numunelere TS EN ISO 527-1 standardına uygun olarak çekme testleri uygulanmıştır. Çekme deneyiyle,

malzemelerin kopma mukavemeti, uzama miktarı, uygulanan çekme kuvvetine bağlı olarak esneklik veya kırılma hakkında bilgiler elde edilebilmektedir [29, 30]. Yapılan deneylerde elastik yapıdaki plastiklerin fazla, sert ve kırılma olanların ise birim uzama miktarının az olduğu dikkate alınmıştır. Çekme testi sonucunda elde edilen ve malzemenin sünekliliğini gösteren kopma uzaması darbe dayanımının bir göstergesidir [30]. ASTM D412 Tip A (UL-62-A)' ya göre SKK ile birleştirilmiş malzemelerden alınan numuneler çekme deneyi için, Zwick marka Z010 universal tip cihazda TS EN ISO 527-1 standardına uygun olarak çeneler arasına sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminden sonra çeneler birbirinden 5 mm/dak sabit bir hızla uzaklaştırılırken test numunesi iki ucundan belirli bir hızla Şekil 1b'de gösterildiği gibi numuneler kopuncaya kadar gerdirilmiştir. Plastik malzemelerin çekme dayanımını çekme test hızına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir [31]. Tüm numuneler için 5 mm/dak sabit hız kullanılarak, Tablo 2 ve Tablo 3'te verilen her bir parametre değeri için minimum beş deney yapıp ortalaması alınmıştır. Sertlik malzeme yüzeyinden itibaren kalıcı bir boşluk oluşturmaya

**Tablo 1.** Çalışmalarda kullanılan malzemelere ait teknik özellikler [28]  
(Technical features of the materials used in the studies)

Teknik Özellikler	PE-HWST	PP-DWST
Ekstrüder kalıp bileşimi	PE, EN, 45 T 003/6	PP-H,EHN, 16-09-003
Ekstrüder kalıplama standardı	TS EN ISO 1872	TS EN ISO 1873
Kalıplama basıncı	PE, QN, 45 T 003/6	PP-H, QHN, 16-09-003
Yoğunluk (TS EN ISO 1183)	0,947 g/cm <sup>3</sup>	0,905 g/cm <sup>3</sup>
Çekme mukavemeti (TS EN ISO 527)	22 MPa	32 MPa
Akma uzaması (TS EN ISO 527)	%9	%8
Elastik çekme modülü (TS EN ISO 527)	900 MPa	1400 MPa
Çentik darbe dayanımı (TS EN ISO 179)	21 kJ/m <sup>2</sup>	7 kJ/m <sup>2</sup>
Sertlik (TS EN ISO 868)	50 Shore D	55 Shore D
Çalışma sıcaklık aralığı	-50 / +80 °C	0 / +100 °C

**Tablo 2.** Polietilen malzemelerin SKK için belirlenen ve deneylerde kullanılan kaynak parametreleri  
(Welding parameters of Polyethylene materials determined for FSW and used in the experiments)

Deney Kodu	Malzeme Kalınlığı (mm)	Takım Dalma (mm)	Dalma Bekleme (s)	Kaynak Takımının Dönme Devri (d/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)
1	6	5,75	30	5000	20
2	6	5,75	30	6000	20
3	6	5,75	30	4000	20
4	6	5,75	60	4000	20
5	6	5,75	120	4000	20

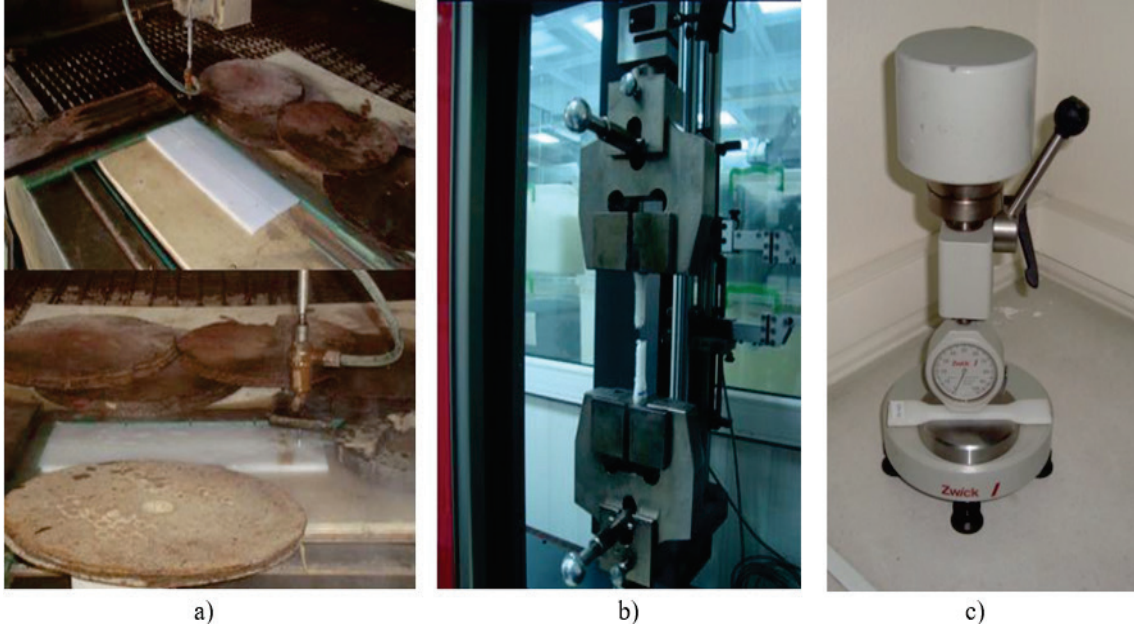
**Tablo 3.** Polipropilen malzemelerin SKK için belirlenen ve deneylerde kullanılan kaynak parametreleri  
(Welding parameters of Polypropylene materials determined for FSW and used in the experiments)

Deney Kodu	Malzeme Kalınlığı (mm)	Omuz Dalma (mm)	Dalma Bekleme (s)	Kaynak Takımının Dönme Devri (d/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)
29/09-01		0			
29/09-02	6	0,25	90	5400	25
29/09-03		0,75			
29/09-04		1,0			

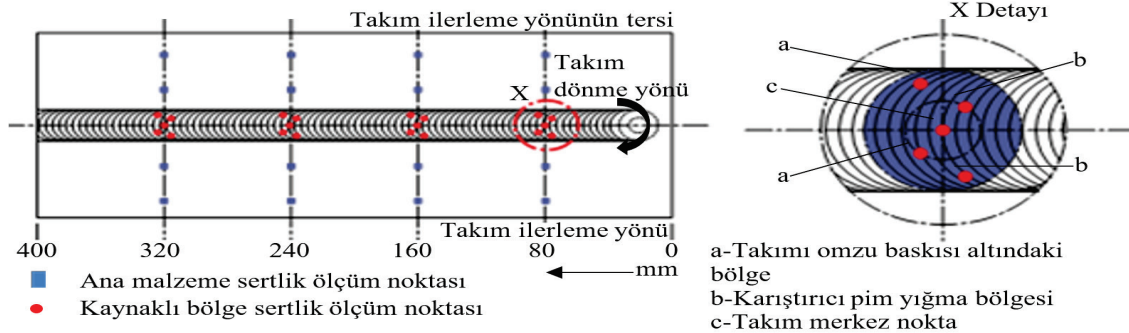
(çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye) karşı malzemenin gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir [29, 30]. Bu nedenle kaynaklı bölgenin mukavemetinin belirlenmesi ve yapılan diğer testlerin sonucuyla birlikte, çekme dayanımı, elastik modül değeri, akma dayanımı gibi mekanik özelliklerin doğru tanımlanabilmesi açısından önemlidir [30]. Kaynak sonrası kaynaklı bölgenin sertliği ASTM D412 Tip A (UL-62-A)' ya göre alınmış numune üzerinde Şekil 1c' de gösterilen Zwick marka durometre yardımıyla TS EN ISO 868 standardına uygun olarak Shore D cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerleri ASTM D2240 Shore D tipi skala yardımıyla kontrol edilmiştir.

Shore sertliği ya da diğer adıyla durometre sertlik testi genellikle kauçuk, PE ve PP gibi yumuşak malzemelerin sertliğinin ölçülmesi amacıyla yaygın olarak kullanılır [29]. Durometre' nin basınç uygulanan kısmında 30° açılı, 0,1 mm uç çaplı bir iğne benzeri bir ayağın malzeme yüzeyine

değecek şekilde bastırıldığında göstergede okunan değer sertlik olarak alınmıştır. Birleştirme hattı boyunca kaynak bölgesinin ve ana malzemenin sertliği Şekil 2'de gösterildiği şekilde yapılmıştır. Kaynak takım omzunun altında kalan bölgenin sertliği, kaynak takım karıştırıcı pimin yığıma bölgesinin sertliği ve kaynak takım ucu merkez noktasındaki sertlik ölçümleri Şekil 2'de verilen X detayında gösterildiği şekilde yapılmıştır. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) testiyle, kontrollü bir atmosfer ortamında sıcaklığın ve zamanın fonksiyonu olarak malzemedeki camsı geçiş sıcaklığı, erime ve kaynama noktası, kristalleşme zamanı, sıcaklığı vb. gibi geçişlerin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu geçişler sıcaklık ve ısı akışına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [29]. DSC ile yaptığımız bu ölçümler bize endotermik, ekzotermik ve ısı kapasitesindeki değişiklikleri içeren fiziksel ve kimyasal değişimler hakkında kantitatif ve kalitatif bilgileri vermektedir [29, 32]. Bu deneyde; SKK sonrası kaynaklı bölgeden alınan örneklerin ve ana



**Şekil 1.** a) SKK ile birleştirme sonrası su jeti ile test numunesinin alınması b) Alınan numunelerin çekme test cihazında sabit bir hızda kopuncaya kadar çekilmesi c) Durometre ile sertliğin ölçülmesi  
(a)Obtaining a test sample with water jet after joining with FSW b) Pulling the samples taken in the tension test device at a constant speed until they break off c) Measuring hardness with a durometer)



**Şekil 2.** Sertlik ölçüm noktaları (Hardness measuring points)

malzemenin Setaram DSC 151 cihazında 50 ml/dak N<sub>2</sub> akımı altında, 20°C/dak ısıtma hızında erime termogramları kaydedilmiştir. DSC erime piklerinin analiziyle, farklı parametre değerlerinde SKK ile birleştirilmiş örneklerin erime davranışları incelenmiş, kristal lamel kalınlıkları ve kristalizasyon yüzdeleri hesaplanmıştır. Kristalizasyon yüzdeleri, örneklerin DSC erime eğrileri altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilen erime entalpilerinin ( $\Delta H_m$ , J/g), PE ve PP'nin %100 kristal haldeki erime entalpisine (PE  $\Delta H_m$ : 293 J/g, PP  $\Delta H_m$ : 209 J/g) oranlanmasıyla hesaplanmaktadır [29, 33]. Kristalizasyon yüzdeleri hesaplanmasında kullanılan Eş. 1 aşağıda verilmiştir [33].

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \quad (1)$$

Farklı parametre değerleri kullanılarak SKK ile birleştirilmiş PE ve PP malzemelerden alınan örneklerin DSC erime eğrilerinden elde edilen erime pik sıcaklıkları ( $T_m$ ) ve erime entalpileri kullanılarak, kristal lamel kalınlıkları Eş. 2'de verilen Gibbs-Thomson eşitliğiyle hesaplanmıştır [12, 13].

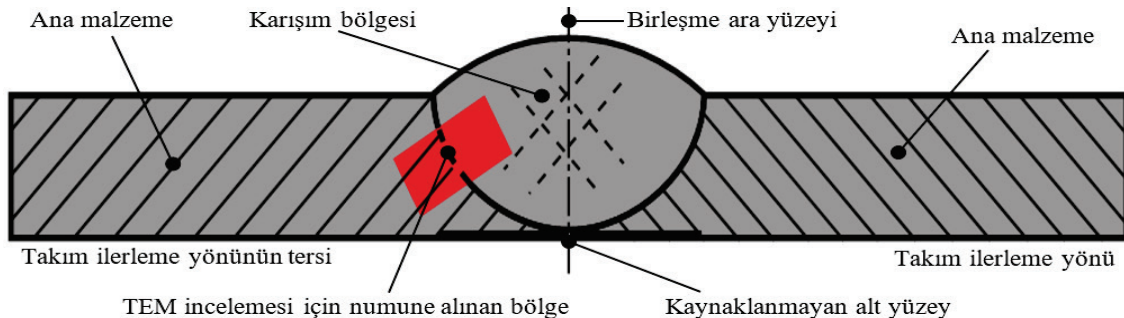
$$\frac{T_m}{T_m^0} = 1 - \frac{2\delta e}{\lambda \Delta H_m} \quad (2)$$

Denklemden  $T_m^0$  denge erime sıcaklığını (PE 146°C, PP 174°C),  $\delta e$  kristallerin serbest yüzey enerjisini (PE 90 mJ/m<sup>2</sup>, PP 29 mJ/m<sup>2</sup>),  $\lambda$  kristal lamel kalınlığını (nm),  $\Delta H_m$  erime entalpisini (J/g) ifade etmektedir [33, 34]. Çok küçük bir alana odaklanan elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışan taramalı elektron mikroskobu (TEM) yardımıyla, termoplastik levhaların birleştirme sonrası kaynak bölgesinden alınan numuneler üzerinde mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda Şekil 3'de gösterilen şekilde PE ve PP ana malzeme ve SKK ile birleştirilmiş bölgelerden alınan numunelerin JSM5600 modeli taramalı elektron mikroskobu yardımıyla yüksek çözünürlüklü görüntüleri alınmıştır. Elde edilen görüntüler referans numunelerle karşılaştırılarak oluşan mikroyapılar incelenmiş ve SKK sonrası kaynak bölgesinde oluşan mikroyapılar belirlenmeye çalışılmıştır. Mikroyapıların plastik malzeme türüne ve farklı kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak bölgesinde oluşan sıcaklığa göre değişiklik gösterip göstermeyeceği incelenmiştir. Kaynak bölgesinde ısının etkisi ile oluşan bölgeler ve karışımın mikroyapısı tanımlanarak, kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak SKK ile birleştirilen ve çekme deneyine tabi tutulan PE ve PP numunelerinde Tablo 4'te görüldüğü mekanik özelliklerde ve kaynak performansında (KP) farklı değerler elde edilmiştir. Çekme deneyine ait sonuçlar, DSC deneyi sonrasında elde edilen erime sıcaklıklarına göre hesap edilen kristal yüzdeleri Tablo 4'de toplu olarak verilmiştir. SKK kaynak performansı açısından sonuçlar referans numunelerle karşılaştırıldığında, PE ve PP malzemeler için oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

PE malzeme için diğer parametre değerleri aynı, kaynak takım dönme devrinin farklı olarak seçildiği 1, 2 ve 3 nolu deney sonuçları karşılaştırılmıştır. 6000 d/dak en yüksek kaynak devrine sahip, deney kodu 2 nolu birleştirme %96 SKK performansı ile ana malzeme mukavemetine en yakın değer olarak ölçülmüştür. Tablo 4'te görüldüğü gibi takım dönme devri arttıkça SKK kaynak performansında artış meydana gelmiştir. Çekme deney sonuçlarına göre, kaynak takım devir hızının artması SKK kaynak performansını arttırmıştır. Bunun takım dönme devrinin artmasıyla birlikte kaynak bölgesinde oluşan birleştirme ısısı artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlardan kaynak bölgesindeki ısının kaynak mukavemeti üzerinde etkili olduğunu ve devir hızının kaynak performansını etkilediğini görebiliriz. PE malzeme için dalma ve bekleme süresinin etkisinin belirlenmesi amacıyla, takım dönme devrinin 4000 d/dak olarak sabit tutulduğu ve sırasıyla 30, 60 ve 120 s kaynak başlangıcında dalma ve bekleme yapılan 3, 4 ve 5 nolu deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda kaynak başlangıcında kaynak takımı karıştırıcı piminin malzemelere dalması sonrasında 30 s beklenmesi ve takımın birleştirme hattı boyunca hareket ettirilmesiyle %93 oranıyla en yüksek kaynak performansı elde edilmiştir. Bununla takım devir hızında olduğu gibi kaynak bölgesinde oluşan sıcaklıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaynak başlangıcında kısa süreli bekleme (< 30 s) birleştirme bölgesinde yeterli ısı sağlanamadığı için takımın ilerleme hareketi ile birlikte yeterli ısı elde edilinceye kadar (~100 mm) kaynak bölgesinin yüzey kalitesinin kötü olduğu ve kaynak kalitesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı şekilde uzun dalma ve bekleme sürelerinde (> 120 s) kaynak bölgesinde



Şekil 3. Mikroyapı incelemeleri için numune alınan bölgeler (Zones from which samples were taken for microstructural examinations)

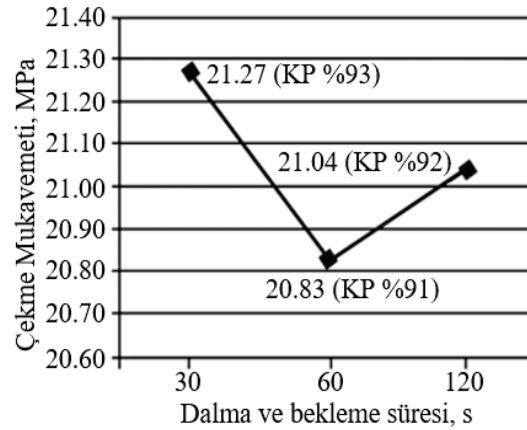
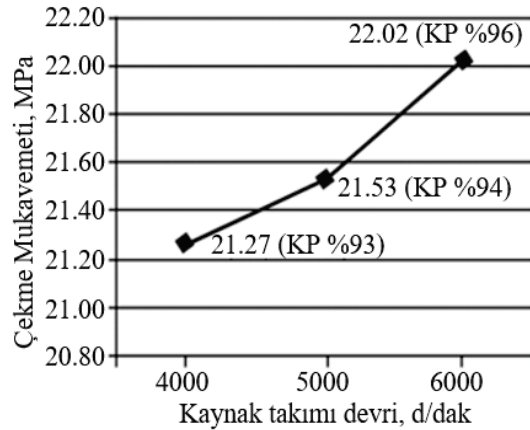
oluşan aşırı ısıdan dolayı malzeme daha akışkan bir hale gelmiş ve kaynak bölgesinde eriyen malzemenin kontrolü zorlaşmıştır. Birleştirme işleminde kullanılan takımın omuz çapına, karıştırıcı pim çapına, takım geometrisine, malzeme türü ve kalınlığına göre dalma ve bekleme süresinin de değişiklik göstereceği düşünülmektedir. Tablo 4’de sayısal olarak ifade edilen takım dönme devrinin ve kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin etkisi Şekil 4’te grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekil 4’te verilen grafik üzerinde takım dönme devrinin ve kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin çekme mukavemeti ve kaynak performansı üzerindeki etkisi daha iyi anlaşılmaktadır.

Kaynak takımı omuz baskısının incelendiği PP malzemeler için en yüksek kaynak performansı, takım omzunun malzeme yüzeyine paralel olacak şekilde birleştirme işleminin gerçekleştirildiği 29-09/01 kodlu numunelerde %84 olarak elde edilmiştir. Takım omzu dalma derinliği 0,25

mm olduğunda kaynak performansı referans numuneye göre yaklaşık %63, dalma yapılmayan 29-09/01 kodlu birleştirme işlemine göre %57 oranında azalmıştır. Dalma derinliğinin artırılmasıyla birlikte kaynak mukavemeti hızla azalmıştır. Bu durumun birleştirme işlemi esnasında takım omzunun malzemelere dalmasıyla ilerleme yönünde meydana gelen boşluktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çekme deney sonrası numuneler üzerinde yapılan incelemede kopmanın ilk olarak bu boşluktan başladığı gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu boşluğun çentik etkisi göstererek kopmayı hızlandırdığı ve buna bağlı olarak kaynak mukavemetini azalttığı düşünülmektedir. Tablo 4’de sayısal olarak ifade edilen takım omzu dalma derinliğinin etkisi Şekil 5a’ da grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 5’te verilen grafik üzerinde takım omzu dalma derinliğinin çekme mukavemeti ve kaynak performansı üzerindeki etkisi Şekil 5b’ de verilen çekme deney sonrası numunelerin kopma görüntüleri ile birlikte değerlendirildiğinde daha iyi anlaşılacaktır.

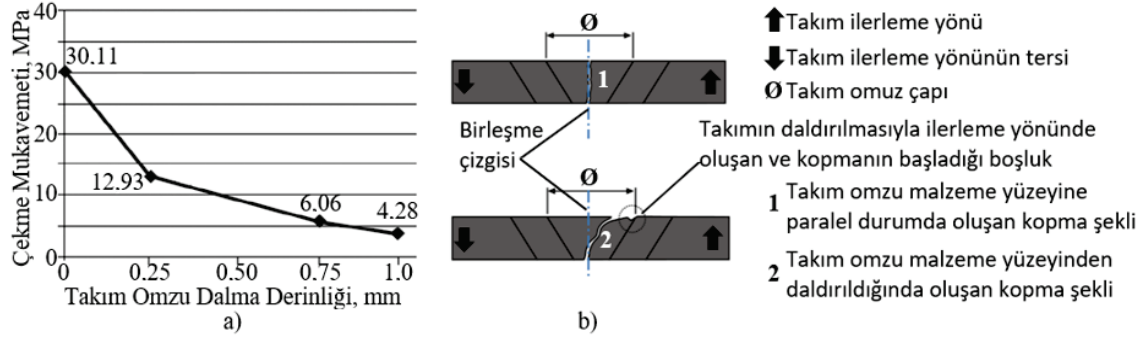
**Tablo 4.** Çekme deney sonuçları (Results of the tension test)

Deney Kodu	Akma Mukavemeti MPa	Akma Mukavemeti Standart Sapması	Akma Uzaması %	Elastik Çekme Modülü MPa	Çekme Mukavemeti MPa	Çekme Mukavemeti Standart Sapması	Çekme Uzaması %	SKK Kaynak Performansı %	Kristal Yüzdeleeri Xc
PE Referans Numune	22,13	0,56	11,18	919	22,97	0,49	103,56	100	54,60
1	20,73	1,05	12,33	861	21,53	1,13	18,47	94	52,50
2	20,97	0,40	12,28	881	22,02	0,92	18,41	96	49,10
3	20,41	0,09	12,44	851	21,27	0,58	18,65	93	50,20
4	19,65	0,44	13,32	833	20,83	0,39	19,98	91	47,40
5	19,78	0,52	12,87	842	21,04	0,57	19,30	92	49,10
PP Referans Numune	33,41	0,38	13,34	1404	35,11	0,49	5,29	100	41,20
29-09/01	-	-	11,40	1200	30,11	0,55	2,10	84	30,00
29-09/02	-	-	-	-	12,93	1,31	3,36	37	32,00
29-09/03	-	-	-	-	6,06	0,92	1,97	17	31,30
29-09/04	-	-	-	-	4,28	0,53	1,76	12	31,60



**Şekil 4.** a) Kaynak takım devri b) Kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin PE malzemenin kaynak performansı (KP) üzerindeki etkisi

(a) Welding tool rotation b) Effect of the immersion and waiting periods at the beginning of welding on the welding performance (WP) of PE material)



**Şekil 5.** a) Takım omzu dalma derinliğinin çekme mukavemeti üzerindeki etkisi b) Takım omzu daldırılmış ve takım omzu daldırılmamış numunelerin kopma görüntüsü

(a) Effect of the tool shoulder immersion depth on tensile strength b) Rupturing image of the tool shoulder immersed and tool shoulder not immersed samples)

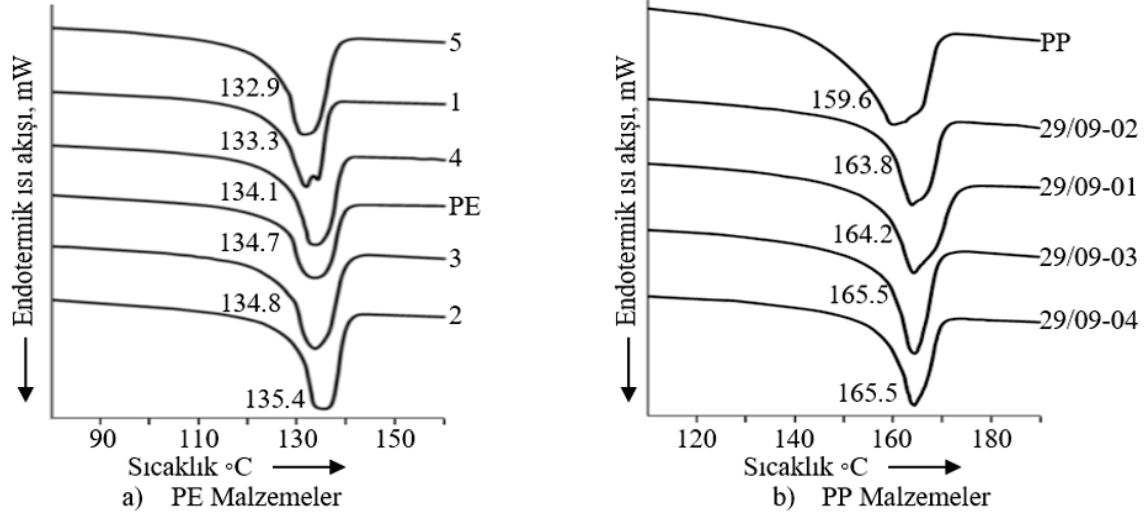
**Tablo 5.** Shore D sertlik testi sonuçları (Shore D hardness test results)

Malzeme	Deney Kodu	Referans Numune Sertliği (Shore D)		Kaynaklı Bölge Sertliği (Shore D)			
		Yüzey	Yüzeyin 1 mm altında	Yüzey	Sertlik Artışı (%)	Yüzeyin 1 mm altında	Sertlik Artışı (%)
PE	1			54	7	45	-4
	2			54	7	42	-11
	3	50	47	53	6	43	-9
	4			56	11	41	-13
	5			55	9	42	-11
PP	29/09-01			63	18	37	-27
	29/09-02			67	18	40	-22
	29/09-03	55	51	63	13	39	-24
	29/09-04			65	15	39	-24

PE ve PP malzemeler için takım omzunun altında kalan bölgeden ve yüzeyin 1 mm altında yapılan ana malzeme ve kaynaklı bölgeye ait sertlik ölçüm sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Ölçüm öncesi kalibre master yardımıyla skalanın kalibrasyonu kontrol edilmiş ve mastara uygun değerler elde edilmiştir. Hem PE hem de PP malzemeler için yüzey sertlikleri referans numune yüzey sertliğinden yüksek olarak ölçülmüştür. Malzeme yüzeyinde, PE için maksimum %11, PP için maksimum %18'lik bir artış söz konusudur. Bunun takım omzunun malzeme yüzeyine yaptığı baskıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. SKK ile yapılan birleştirme işlemleri sonrasında kaynaklı bölgenin üst yüzey sertliğinde bir artış meydana gelmektedir. Bu sertlik artışının, kaynak parametreleri ve takım geometrisi gibi özelliklere bağlı olarak değişiklik göstereceği düşünülmektedir. Yüzeyin 1 mm altında yapılan ölçümlerde sertlik değerlerinin farklılaştığı görülmektedir. SKK işlemi uygulanmamış PE ve PP referans numunelerde bu duruma plakaların üretilmesi esnasında yapılan hızlı soğutmanın neden olduğu düşünülmektedir. Hızlı soğutmanın malzeme yüzeyinde sertleşmeye neden olması beklenen bir durumdur. Ölçüm sonuçları da bu durumu desteklemektedir. SKK ile birleştirilen PE ve PP levhalarda ise yüzey ve yüzeyin 1 mm altında referans numunelere göre daha fazla fark olmasının

kaynak takımı omuz kısmının malzeme yüzeyine yaptığı baskıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Tablo 4'te verilen ve DSC sonuçlarından elde edilen kristallenme oranları sertlikle birlikte incelendiğinde, birleştirme bölgesindeki kristallenme oranlarının sertlik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Kristallenme oranının sertliği arttırdığı düşünülmektedir. Birleştirme bölgesindeki kristallenme oranlarına göre sertlikte değişikliklerin gözlenmesi beklenen bir durumdur [29]. PP malzemelerde sertlik ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, takım omzunun ve takım omzu dalma derinliğinin sertlik üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Ancak daha sağlıklı bir değerlendirme yapılabilmesi için, malzemenin yönlenmesi, kaynaklı bölgenin karışımı gibi farklı faktörlerinde göz önünde bulundurulması gerektiği düşünülmektedir. Malzeme türüne göre sertlik ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, PP'ye ait değerlerin PE'den daha yüksek olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu duruma PP'nin PE'ye kıyasla sahip olduğu sert ve gevrek yapısının neden olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde PP malzemelerin birleştirilmesinde takım omzu dalma derinliğinin malzeme yüzeyine yaptığı baskının da sertlik artışında etkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 6'da PE ve PP malzemelere ait DSC eğrileri verilmiştir. DSC eğrilerinden de görüleceği gibi, PE referans numune için erime sıcaklığı



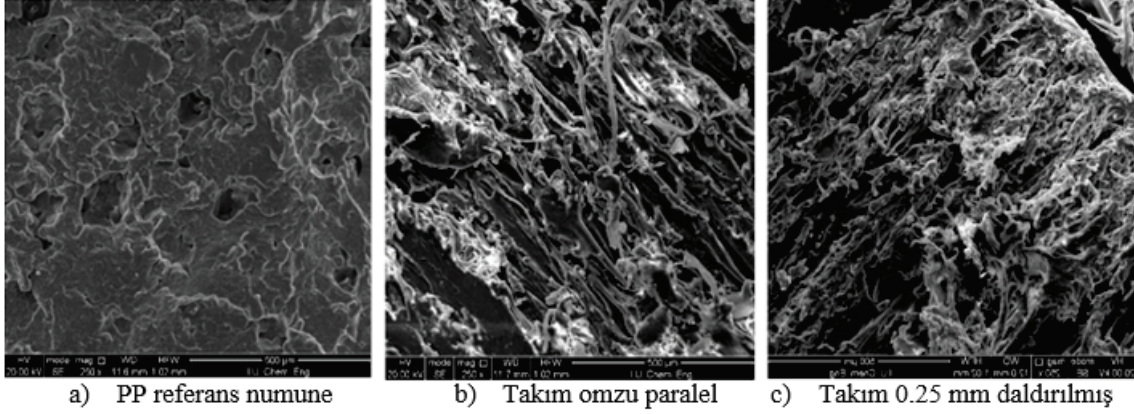


Şekil 6. DSC eğrileri a) PE malzemeler b) PP malzemeler (DSC curves a) PE material b) PP material)

134,7°C ve PP referans numune için erime sıcaklığı 159,6°C olarak ölçülmüştür. Şekil 6'da verilen DSC eğrileri Tablo 4'te verilen kristallenme oranlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, takım devir hızındaki artışa bağlı olarak kristallenme oranının azaldığı ve bununda erime sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Takım omzu dalma derinliğinin de takım devir hızıyla benzer etkiyi gösterdiği gözlemlenmiştir. Dalma ve bekleme süresince kaynak bölgesinde meydana gelen ısının kaynak bölgesinin kristallenme oranı üzerinde etkili olduğu ve bununda erime sıcaklığını etkilediği tespit edilmiştir. Sıcaklığın ve kaynak mukavemetinin bir parametre olduğu uygulamalarda kristallenme oranına bağlı olarak kaynak mukavemetinde değişiklikler olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 7a' da PP ana malzemeye uygulanan çekme testi sonrası kırık yüzeyden alınan numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen TEM fotoğrafı verilmiştir. Şekilde verilen mikroyapıdan da anlaşılacağı gibi, birleştirme işlemi öncesi PP levha içyapısındaki izotaktik bloklar doğası gereği sert bir yapı oluşturmakta ve malzemenin dayanımını arttırmaktadır. TEM incelemelerinde, yapının sert, gevrek ve kırık yüzey şekillerinde belirgin bir yönelme ve kayda değer deformasyonun oluşmadığı görülmüştür.

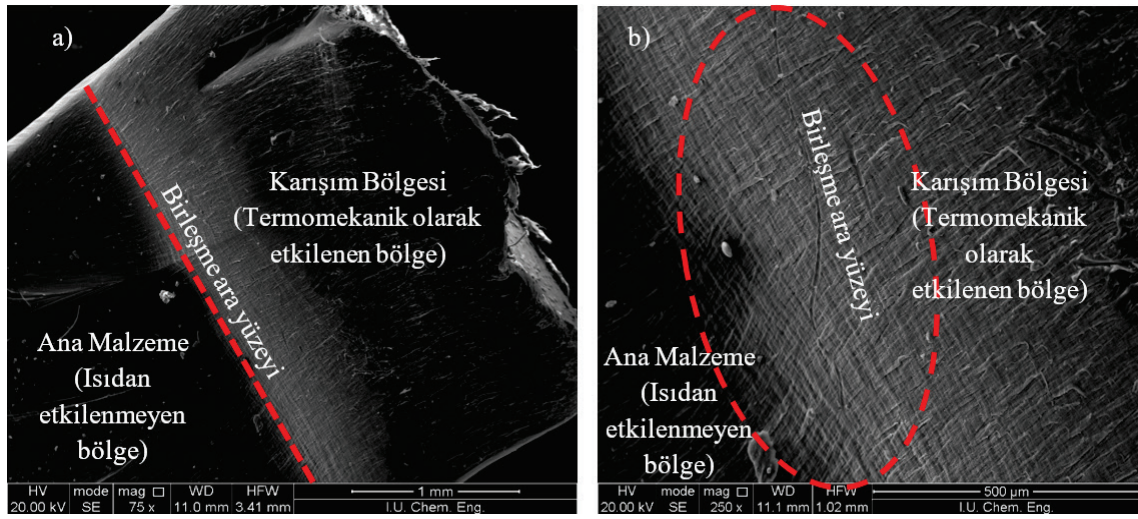
Mikroyapı görüntüleri DSC (diferansiyel taramalı kalorimetre) deneyi ile elde edilen %41,2 kristallenme oranı, 37,5 ( $\lambda$  nm) kristal lamel kalınlığı ve çekme testiyle elde edilen 35,11 MPa çekme mukavemet değerleriyle uyumluluk göstermektedir. Şekil 7b' de takım omzunun malzeme yüzeyine paralel olduğu ve Şekil 7c' de ise malzeme üst yüzeyinden 0,25 mm daldırılarak birleştirme işlemi yapılan malzemelere ait TEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7'de verilen TEM görüntüleri incelendiğinde takım omzu dalma derinliğinin PP levhaların üst yüzeyinden baskı yaptığı ve üst yüzeyden itibaren malzeme iç kısmına 0,25 mm daldırıldığında kaynak esnasında oluşan sıcaklık ve basınca bağlı olarak, mikroyapının farklılaştığı ve mikroyapı içerisindeki fibrillerde yönelme olduğu gözlemlenmektedir. Mikroyapıda meydana gelen bu değişimin, ürün performansını ve mekanik özelliklerini

olumsuz etkilediği görülmektedir. Dalma derinliğinin artmasıyla birlikte, birleştirme bölgesinde oluşan sıcaklık ve basınca bağlı olarak fibril boylarında meydana gelen kısalmanın, birleştirme bölgesinde daha gevrek bir yapıya neden olduğu ve sünekliliği azalttığı düşünülmektedir. Nispeten kaynak bölgesinde oluşan bu gevrek yapının kaynak nüfuziyetini azalttığı ve takım omzunun dalmasıyla üst yüzeyde oluşan boşluğun gösterdiği çentik etkisiyle birlikte kaynak mukavemetinin düşmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Tablo 4'te verilen çekme deney sonuçları ve Şekil 7'de verilen TEM görüntüleri bu durumu doğrulamaktadır. Şekil 7b' de 29/09-01 kodlu birleştirme işlemi kaynak bölgesine ait TEM görüntüleri verilmiştir. DSC deneyi ile elde edilen %30 kristallenme oranı, 55,1 ( $\lambda$  nm) kristal lamel kalınlığı ve mekanik deneylerle elde edilen 30,11 MPa çekme mukavemeti Şekil 7b' deki TEM görüntüleriyle uyumluluk göstermektedir. Şekil 7c' de 29/09-02 kodlu birleştirme işlemi kaynak bölgesine ait TEM görüntüleri verilmiştir. DSC deneyi ile elde edilen %32 kristallenme oranı, 49,1 ( $\lambda$  nm) kristal lamel kalınlığı ve mekanik deneylerle elde edilen 12,93 MPa çekme mukavemeti Şekil 7c' deki TEM görüntüleri uyumluluk göstermektedir. Malzeme üst yüzeyinden takım omzu dalma derinliğinin artmasıyla sıcaklık ve basınca bağlı olarak fibril boylarının kısalması ve birleştirme bölgesinde daha gevrek bir yapının oluştuğu düşünülmektedir. Mekanik deney sonuçları ile TEM görüntüleri bu düşüncüyü destekler niteliktedir. PE referans numune için; %54,6 kristallenme oranı, 14,5 ( $\lambda$  nm) kristal lamel kalınlığı ve 22,97 MPa çekme mukavemet değeri elde edilmiştir. PE referans numune için DSC ve mekanik deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; PE malzeme mikroyapısının daha düzgün ve daha fazla hücre yoğunluğuna sahip olduğu ve molekül zincirlerinde belirgin bir yönelme olmadığı düşünülmektedir. SKK ile birleştirilmiş PE levhalar üzerinde yapılan TEM incelemelerinde, Şekil 8a' da görüldüğü gibi ana malzeme ile birleştirme bölgesinin birbirinden belirgin şekilde ayrıldığı gözlemlenmektedir. İki bölge arasında makro boyutta görülemeyen ancak TEM incelemelerinde ayırt edilebilen bir renk farkı meydana gelmektedir.



**Şekil 7.** Ana malzeme ve birleştirilmiş PP levhalara ait TEM görüntüsü a) PP referans numune b) Takım omzu paralel c) Takım 0,25 mm daldırılmış

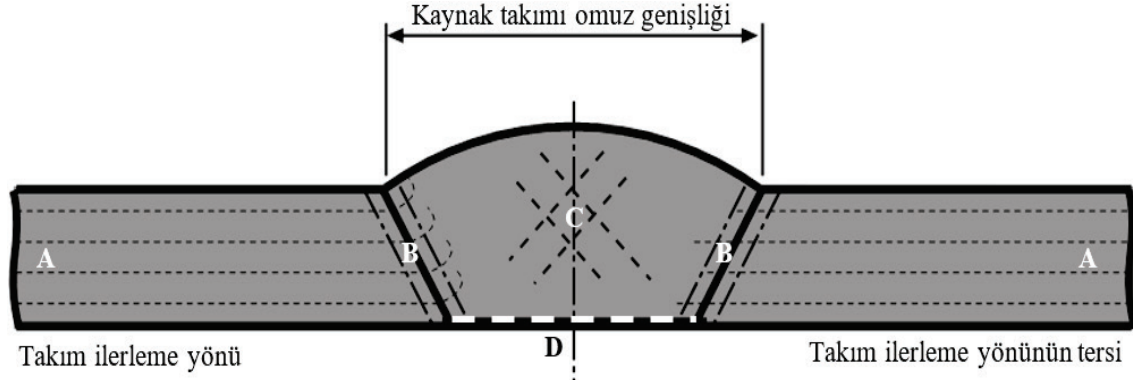
(SEM image of the main material and joined PP plates, a) PP reference sample b) Tool shoulder parallel c) Equipment immersed 0.25 mm)



**Şekil 8.** PE levha birleştirme bölgesi 75x a) ve 250x b) büyütme TEM görüntüsü (75x (a) and 250x (b) enlargeable SEM image of the PE plate joining zone)

Şekil 8’de görüleceği gibi metal ve alaşımlarının aksine termoplastikler için, çok geniş bir ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) aralığı olarak ifade edilecek bir bölge söz konusu değildir. Bunun yerine Şekil 8b’ de belirgin bir şekilde görülen çok ince bir çizgi şeklinde bir birleştirme ara yüzeyinden söz etmek mümkündür. Birleştirme bölgesinin her iki tarafında kalan bölgeler (ana malzeme ve termomekanik karışım bölgesi) makro ölçülerde homojen görünmesine rağmen mikro ölçülerde TEM ile yapılan incelemelerde birbirinden oldukça farklı yapılar sergilemektedir. Bu farklılığın birleştirme bölgesinde oluşan sıcaklık ve basıncın etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaynak parametreleri farklı pek çok numune üzerinde yapılan TEM incelemelerinde, Şekil 8’de verilen TEM görüntüsüne benzer şekilde birleştirme ara yüzey görüntüsüne rastlanmıştır. Birleşme ara yüzey görüntüsünün, ısı iletiminin termoplastik malzemenin ergimesi için yeterli olmadığı ana malzeme ile kaynak takımı tarafından ertirilerek plastik kıvamına getirilmiş malzemenin sıcaklık farkının oluşturduğu bir sınır noktası şeklinde oluştuğu düşünülmektedir. Tek taraflı SKK ile

birleştirilmiş termoplastik levhalar üzerinde yapılan TEM incelemeleri sonucunda elde edilen görüntülerin değerlendirilmesiyle, kaynak bölgesinde oluşan mikroyapılar Şekil 9’da şematik olarak verilmiştir. Genel hatlarıyla mevcut tüm TEM görüntüleri incelendiğinde, kaynaklı bölgede dört farklı mikroyapı tespit edilmiştir. Strand tarafından yapılan çalışmada da benzer yapılar tespit edilmiştir [2]. Bu yapılar; 1- Isıdan etkilenmeyen bölge, 2- Birleşme ara yüzeyi, 3- Termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi ve 4- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge, şeklinde sınıflandırılmıştır. Şekil 9’da verilen bölgelerin daha iyi anlaşılması amacıyla bu bölgeler aşağıda kısaca açıklanmıştır. Isıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) : Bu bölge birleştirme işleminden uzaktır ve deforme olmamıştır. Her ne kadar birleştirme bölgesinde termoplastikler için yüksek sayılabilecek sıcaklıklara çıkan termal döngüler görülse de, plastiklerin sahip olduğu düşük ısı iletim katsayısı ( $2,0-8,0 \text{ cal/cm.san.} \cdot \text{C} \times 10^4$ ) nedeniyle, mikroyapı ve mekanik özellikler açısından ısıdan etkilenmezler. Birleşme ara yüzeyi: Karışım bölgesi ile ana malzeme arasında bir geçiş



**Şekil 9.** Kaynak bölgesi mikroyapısının şematik gösterimi a) Isıdan etkilenmeyen bölge (ana malzeme) b) Birleşme ara yüzeyi c) Termomekanik olarak etkilenen bölge d) Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge  
(Schematic display of the microstructure of the weld zone ( a) Zone unaffected by the heat (main material) b) Joining interface c) Zone affected thermomechanically d) Zone remaining under the unjoined welding stirring tip part)

noktası özelliği taşır. Tıpkı kompozit malzemelerdeki ara yüzey gibidir. Ana malzeme tarafında kaynak takımı karıştırıcı uç kısmının etkisiyle çok ince bir film şeklinde (Şekil 8a) ortaya çıkar. Karışım bölgesindeki malzeme sirkülasyonuna, karıştırıcı uç kısmının geometrisine ve çapına göre oluşum şekillerinde değişiklik gösterebilir. Şekil 8b' de gösterildiği gibi birleşme ara yüzeyi karışım bölgesi ve ana malzeme arasında takım geometrisine bağlı olarak girintili çıkıntılı şekilde oluşmuştur.

Termomekanik olarak etkilenen bölge (karışım bölgesi): Termomekanik olarak etkilenen bölge ya da diğer bir ifade ile karışım bölgesinde SKK kaynak takımı termoplastik malzemeyi deformasyona uğratmaktadır. Bu bölgede kristalleşme ve termomekanik etki gerçekleşmektedir. Polimer zincirlerinin yönelmeleri, kristallenme oranı, molekül yoğunlukları, kristal lamel kalınlıkları birleştirme işlemi öncesine göre; kaynak takımının sahip olduğu geometri, karıştırıcı uç kısmın özellikleri, takım ilerleme ve takımın dönme yönü, hızı gibi parametrik faktörlerin birleşimiyle oluşan ısı etkisi ile farklılık gösterebilir. Ayrıca kaynak takımı tarafından koparılan parçalar az miktarda da olsa birleştirme bölgesi dışına doğru savrulduğu için birleştirilen malzemelerin birleştirme bölgesi üst yüzeyinden bir miktar malzeme kaybı söz konusu olabilir. Şekil 8b' de ana malzeme ve karışım bölgesindeki kristal lamellerin farklı yönlendiği görülmektedir. Karışım bölgesinde meydana gelen yönelmeler üzerinde kaynak takımının karıştırıcı uç kısmı ve takım omzunun etkili olduğu düşünülmektedir. Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge: Bu bölge tek taraflı birleştirme işlemlerinde, plaka kalınlığı ile kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı farkı kadar, birleşme bölgesinde karıştırıcı uç kısmının altında kalan alandır. Karıştırıcı ucun alt tarafında kaldığı için herhangi bir fiziksel değişime uğramadığı düşünülmektedir. İnce bir film tabakası şeklinde, birleşme bölgesi alt yüzey hattı boyunca ilerler ve birleştirme bölgesinde oluşan ısıdan etkilenerek karışım bölgesine yapışmış gibi gözükür. Ancak arada çok ince bir boşluk vardır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 6 mm kalınlığındaki PE ve PP levhalar, CNC dik işleme merkezinde yüksek devirler kullanılarak SKK ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. PE levhaların SKK ile birleştirilmesinde kaynak takım devir hızı ve kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süreleri değiştirilmiş, PP levhaların SKK ile birleştirilmesinde ise takım omzu dalma derinliği değiştirilerek kaynak performansı ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takım devir hızının artmasıyla, kaynak bölgesinde kaynak için gerekli olan ısının arttığı bununla kaynak performansını arttırdığı görülmüştür. Kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinin de kaynak için gerekli olan ısının elde edilmesinde ve bu ısının kaynak hattı boyunca taşınması üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Takım omzu dalma derinliğinin artmasıyla birleştirme bölgesinde fibril boylarına, sıcaklık ve basınca bağlı olarak oluşan gevrek yapı mekanik özellikleri düşürmüştür. Takım omzu dalma derinliğindeki artış, birleştirme bölgesi takım ilerleme yönünde meydana gelen boşluğu arttırmıştır. Oluşan bu boşluk çekme deneyinde çentik etkisi göstererek mekanik özelliklerin düşmesinde etkili olmuştur. Kaynak bölgesinde takım devir hızındaki artış kristallenme oranını arttırırken, kaynak başlangıcında dalma ve bekleme süresinde ve takım omzu dalma derinliğindeki artış kristallenme oranını azaltmıştır. Mekanik özellikler ve mikroyapı üzerinde kaynak parametrelerinin ve malzeme türünün çok etkili olduğu ve kaynak bölgesinde bu parametrelere bağlı olarak oluşan sıcaklığın mikroyapıyı ve mekanik özellikleri farklılaştırdığı söylenebilir. TEM incelemeleriyle, kaynaklı bölgede dört farklı mikroyapı tespit edilmiştir. Bu yapılar; 1- Isıdan etkilenmeyen bölge, 2- Birleşme ara yüzeyi, 3- Termomekanik olarak etkilenen karışım bölgesi ve 4- Birleştirilmeyen kaynak takımı karıştırıcı uç kısmı altında kalan bölge, şeklinde sınıflandırılmıştır. Kaynak bölgesinde mikroyapı oluşumunu etkileyecek parametreler için alt ve üst limit değerlerinin belirlenerek bir optimizasyonun yapılması, kaynak bölgesindeki sıcaklık ölçümleri ile sıcaklığın mikroyapı

üzerindeki etkisinin incelenmesi bundan sonraki çalışmalar olarak yapılabilir. Elde edilen sonuçlar bu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılabilir.

#### 4. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karagöz İ., Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak özellikleri, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
2. Strand S.R., Effects of friction stir welding on polymer microstructure, Master of Science, Brigham Young University Department of Mechanical Engineering Utah, USA, 2004.
3. Emre H.E., Kaçar R., Fatigue behaviours of friction welded drill pipes, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (2), 417-426, 2013.
4. Mishra R.S., Ma Z.Y., Friction stir welding an processing, Mater. Sci. Eng., R 50 (50), 1-78, 2005.
5. Bozkurt Y., Uzun H., Salman S., Effect of tool wear on mechanical properties of friction stir welded AA2124/SiCp/25 composite plates, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26 (1), 139-149, 2011.
6. Kaluç E. ve Taban E., Sürtünme Eleman İle Kaynak (FSW) Yöntemi, Makine Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye, 2007.
7. Dawes C.J., Friction Stir Welding, TALAT Lecture 4140, TWI Training in Aluminium Application Technologies, Birmingham, UK, 1999.
8. Çam G., Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi, Mühendis ve Makine Dergisi, 46 (541), 30-39, 2005.
9. Bozkurt Y., Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen AA2124/SiCp/25 kompozit levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
10. Scialpi A., Troughton S., Andrews S., Filippis L., Viblade™ : Friction Stir Welding For Plastic, Welding International, 23 (11), 846-855, 2009.
11. Nelson W.T., Sorenson C.D., Johns C.J., Friction Stir Welding of Polymeric Materials, United States Patent US 6, 811, 632 B2, November 2, 2004.
12. Şelale S., Polietilen malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006.
13. Arıcı A.A., Ertürk A.T., Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilen Polietilen Levhalarda Kaynak Bölgesi Özelliklerinin Belirlenmesi, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, İstanbul-Türkiye, 490-494, 7-9 Kasım, 2007.
14. Rezgui M.A., Ayadi M., Cherouat A., Hamrouni K., Zghal A., Bejaoui S., Application of Taguchi approach to Optimize Friction Stir Welding Parameters of Polyethylene, EPJ Web of Conferences 6, (07003), 2010.
15. Kiss Z., Czigány T., Applicability of Friction Stir Welding in Polymeric Materials, Mechanical Engineering, 51 (1), 15-18, 2007.
16. Squeo E.A., Bruno G., Guglielmotti A., Qudrini F., Friction Stir Welding of Polyethylene Sheets, The Annals of Dunărea De Jos University of Galati, Fascicle V Technologies in Machine Building, 1221 (4566), 241-246, 2009.
17. Payganeh G.H., Arab M., Asl Y.D., Ghasemi F.A., Broujeni M.S., Effects of Friction Stir Welding Process Parameters on Appearance and Strength of Polypropylene Composite Welds, International Journal of The Physical Sciences, 6 (19), 4595-4601, 2011.
18. Troughton M., Handbook of Plastics Joining A Practical Guide, 2nd Edition, Published William Andrew Inc., USA, 2008.
19. Bilici M.K., Yükler A.İ., Kurtulmuş M., Effects of friction stir spot welding parameters on the weld fracture load of high density polyethylene sheets, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (2), 439-445, 2012.
20. Czigány T., Kiss Z., Microscopic Analysis of The Morphology of Seams in Friction Stir Welded Polypropylene, eXPRESS Polymer Letters, 6 (1), 54-62, 2011.
21. Bozkurt Y., The Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters to Achieve Maximum Tensile Strength in Polyethylene Sheets, Material and Design, 35 (2012), 440-445, 2011.
22. Ahmadi H., Arab N.B.M., Ghasemi F.A., Farsani R.E., Influence of Pin Profile on Quality of Friction Stir Lap Welds in Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composite, International Journal of Mechanics and Applications, 2 (3), 24-28, 2012.
23. Ezdeşir A., Erbay E., Taşkıran İ., Yağcı M.A., Cöbek M., Bilgic T., Polimerler I, Pagyay Yayıncılık Turizm ve Ticaret Limited Şirketi, İstanbul, Türkiye, 1999.
24. New World Encyclopedia. History of polyethylene. <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Polyethylene>. Yayın tarihi Mayıs 11, 2015. Erişim tarihi Şubat 15, 2016.
25. Prados J. Today in History Blog: Polyethylene is discovered. <http://www.kgrayengineeringeducation.com/blog/index.php/2010/03/27/engineering-education-to-day-in-historyblogpolyethylene-is-discovered-3>. Yayın tarihi Mart 27, 2010. Erişim tarihi Şubat 15, 2013.
26. Creative Mechanisms. Everything you need to know about polypropylene (PP) plastic. <https://www.creative-mechanisms.com/blog/all-about-polypropylene-pp-plastic>. Erişim tarihi Haziran 13, 2016.
27. Murathan A., Murathan A., Karadavut S., Useability of high density polypropylene textile waste in composite material production, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (1), 9-14, 2014.
28. Simona. Technical Data Sheet PE-HWST and PP-DWST, 2009, www.simona.de, Erişim Tarihi 11, 2014.
29. Saçak M., Polimer Teknolojisi, Gazi Kitapevi, Ankara, Türkiye, 2012.

30. Savaşkan T., Malzeme Bilgisi Ve Muayenesi, Celepler Matbaacılık, Trabzon, Türkiye, 2007.
31. Katmer Ş., Karataş Ç., Effects of injection molding conditions on residual stress in HDPE and PP parts, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 319-327, 2015.
32. Sobociński M., Estimation of UHMWPE crystallinity degree variation, Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics 13(4), 117-122, 2014.
33. Durmuş A., Yalçinyuva T., Şekillendirme Sonrası Isıl Süreçlerin Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boruların Mekanik Özelliklerine Etkisi, 6. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İzmir-Türkiye, 7-10 Eylül, 2004.
34. Şekercioğlu T., Kaner S., Plastiklerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi, Mühendis ve Makine, 55 (648), 37-43, 2014.

