



Sıcak Plaka Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş Benzer ve Benzer Olmayan Alçak Yoğunluklu Polietilen (AYPE) Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak Araştırılması

Comparative Investigation of Mechanical Properties of Similar and Dissimilar Low Density Polyethylene (LDPE) Welds Joined with Hot Plate Welding Method

Nahit Öztoprak * 

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: nahit.oztoprak@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 04.03.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 24.04.2020

DOI:10.21205/deufmd.2020226620

Atıf şekli/How to cite: ÖZTOPRAK, N., (2020). Sıcak Plaka Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş Benzer ve Benzer Olmayan Alçak Yoğunluklu Polietilen (AYPE) Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak Araştırılması. DEUFMD 22(66), 861-874.

Özet

Polimerlerin kullanımıyla ilgili endüstriyel talepler ve dolayısıyla daha güvenilir birleştirme teknikleri arayışı giderek artmaktadır. Termoplastikleri birleştirmek için en basit ve ekonomik yöntemlerden biri olan Sıcak Plaka Kaynağı (SPK) kullanımının güçlü bağlantılar ürettiği bilinmektedir. Bu çalışma, Alçak Yoğunluklu Polietilen (AYPE) malzeme ile Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) malzemenin uygun parametreler eşliğinde SPK yöntemi kullanılarak, güvenilir biçimde birleştirilmesinin mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırmada, benzer ve farklı polietilen sınıfları birbirleri ile birleştirilerek, bağlantıların mekanik özellikleri, çekme dayanımı ve çarpma davranışları açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ana malzemeler ve bağlantıların kendi arasında karşılaştırılmıştır. Çekme deneyleri sonrası bağlantıların kırılma yüzeyleri de irdelenmiştir. Buna göre, AYPE malzemeler YYPE malzemeler ile birleştirilerek, AYPE malzemelerin kendi aralarındaki kaynak işlemine göre daha üstün çekme dayanımı ve şekil değiştirme davranışı elde edilmiştir. İlaveten, benzer olmayan kaynak bağlantılarında benzer bağlantılara göre çarpma enerjisinin büyük ölçüde arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak plaka kaynağı, Düşük yoğunluklu polietilen, Yüksek yoğunluklu polietilen, Mekanik özellikler

Abstract

Industrial demands of utilizing polymers and therefore, the search for more reliable joining techniques is gradually increasing. The use of Hot Plate Welding (HPW), which is one of the simplest and most economical methods of joining thermoplastics, is known to manufacture strong joints. This study reveals that it is possible to join LDPE and HDPE snugly using HPW method with appropriate parameters. In the research, similar and dissimilar polyethylene classes are joined with each other and mechanical properties of the joints are examined in terms of the tensile strength and impact behaviors. Obtained results are compared considering the base materials themselves and between

the joints. After the tensile tests, fracture surfaces of the joints are also scrutinized. Accordingly, LDPE are joined with HDPE, resulting in superior tensile strength and deformation behavior compared to the welding process of LDPE materials among themselves. Additionally, it has been reported that the impact energy significantly increases in dissimilar welds in comparison to the similar welds.

Keywords: Hot plate welding, Low-density polyethylene, High-density polyethylene, Mechanical properties

1. Giriş

Günümüz malzeme teknolojisindeki ilerlemeler ve artan endüstriyel talep ile birlikte polimerik malzemelere olan ilgi artmaktadır. Plastikler, çelik ve demir dışı malzemeler ile karşılaştırıldıklarında, düşük maliyetleri ve endüstrinin farklı alanlarındaki mühendislik uygulamaları için daha elverişli olmaları nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedirler. Ambalaj sanayinden otomotive kadar yaygın bir kullanım alanları mevcuttur [1]. Plastikler içerisinde termoplastik polimerler özellikle otomotiv ve havacılık sanayilerinde üstün ısı yalıtım özellikleri, ağırlık azaltımı sağlamları ve üretim maliyetlerindeki düşüklük nedeniyle metalik malzemelerin yerini almaktadırlar. Bu avantajlarının yanında, yeniden ısıtılabilme, yeniden biçimlendirilebilme, geri kazanılabilirlik, üst seviye yorulma direnci ve kırılma tokluğuna sahip olma gibi öne çıkan özellikleri sebebiyle de termosetler ve elastomerler ile karşılaştırıldığında en yaygın kullanım alanına sahip olan polimer çeşididirler [2,3]. Polietilenler ise sağlamlık, esneklik, yüksek darbe dayanımı ve uygun kimyasal direnç özellikleri ile dikkati çeken en yaygın kullanım alanına sahip poliolefin termoplastiklerdendir [4,5]. Aynı zamanda düşük maliyetli olan bu polimerler, yoğunluk ve sonucundaki özellik değişimleri nedeniyle düşük yoğunluklu polietilen, doğrusal düşük yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen şeklinde üretilebilmekte ve sınıflandırılmaktadırlar [6,7].

Düşük yoğunluklu polietilen hafif ağırlığı, yüksek kimyasal dayanımı, üretim sürecindeki kolaylığı ve en önemlisi ucuz bir polimer türü olması gibi cazip özellikleri nedeniyle geniş endüstriyel kullanım alanına sahiptir [8-10]. Yarı kristal (~40%) bir polimer olan bu malzemenin çok çeşitli endüstriyel uygulama alanları bulunmaktadır [11]. Geri dönüşümlü olma özelliği, bu polimer sınıfının paketlemeden, su yalıtımı veya korozyon

direnci istenen uygulamalara kadar kullanımını mümkün kılmaktadır [12]. Öte yandan, yüksek yoğunluklu polietilen diğer polietilen sınıflarına göre nispeten yüksek ergime sıcaklığı ve daha dengeli mekanik özellikleri sebebiyle, ısı ve mekanik mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [13,14]. Yüksek süneklik, yüksek tokluk, üstün kimyasal ve çevresel dayanıklılık özellikleri bu malzemelerin otomotiv parçalarından boru hatlarına, paketlemeden denizcilik sektöründe kullanımına kadar geniş ve yaygın uygulama alanlarının önünü açmıştır [15-18].

Polietilenlerin mühendislik uygulamalarındaki artan kullanımı, bu malzemelerin kendi aralarında ve farklı polietilen sınıfları ile güvenilir biçimde birleştirilme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Mekanik bağlantı, yapışkanlı birleştirme ve direkt birleştirme yöntemleri termoplastik malzemelerin bilinen birleştirme teknikleridir. Direkt birleştirme yöntemlerinden biri olan Sıcak Plaka Kaynağı (SPK), basit ve ekonomik oluşu nedeniyle diğer yöntemler arasında oldukça ilgi çekmektedir [2]. Sahip olduğu potansiyel bu yöntemin araç arka lambalarından, akü kutularına, yakıt tanklarından gaz veya sıvı iletim hatlarındaki borulara kadar uygulama alanı bulmasını sağlamıştır [19-21]. Bu yöntem genel olarak sırasıyla ısıtma, birleştirme ve soğutma aşamalarından oluşmaktadır. Kaynaklanacak parçaların yüzeyi politetrafloroetilen kaplı ısıtma elemanı ile tam olarak veya bazı durumlarda kısmen ergimenin sağlanması için temas ettirilir. Kaynak süresince uygun basınç değerleri ile kaynaklanacak parçalar ve sıcak levha arasındaki temasın sürekliliği sağlanır. Bu noktada, uygulanan basıncın aşırı veya çok az olmaması kaynak dayanımı açısından önemlidir. Son olarak, malzeme yumuşaması ve akışının görülmesi ile beraber sıcak plaka kaldırılır ve ergimiş yüzeyler sağlıklı bir birleşme sağlanıncaya kadar birbirlerine doğru bastırılır [22]. Isıtma plakasının sıcaklığı, ısıtma süresi, kaynak süresi ve birleştirme işlemi esnasındaki

basınç bu tekniğin temel değişkenleri olarak bilinmektedir [23,24]. Kaynaklanacak malzemelerin ergime noktası başarılı bir kaynak işlemi için oldukça önemli bir parametredir [25].

Termoplastik malzemelerin sıcak plaka kaynağı ile birleştirme işlemine yönelik bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde, araştırmaların çoğunlukla benzer polimerlerin veya polimer matris kompozitlerin kaynağına odaklandığı görülmüştür [26-30]. Hâlbuki mühendislik uygulamalarında benzer olmayan malzemelerin yaygın biçimde ortak kullanımları mevcuttur. Ayrıca, benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesi, sadece parçanın önemli kısmında daha üstün ve daha güvenli malzemenin kullanımına olanak sağlaması ve böylece parça üretim maliyetini azaltması nedeniyle günümüzde oldukça popüler bir uygulama haline gelmiştir [31]. Bu çalışmada, AYPE malzemeler kendi aralarında ve YYPE malzemeler ile SPK tekniği kullanılarak birleştirilmiş, elde edilen bağlantıların mekanik özellikleri ana malzemelere göre ve bağlantıların kendi aralarında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çekme testi sonrası kırılma yüzeyleri de taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çekme dayanımı ve çarpma davranışı açısından kaynaklı benzer bağlantılara kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip bağlantılar elde edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, teknik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen PETKİM Petrokimya Holding A.Ş. ürünleri AYPE (PETİLEN G03-5) ve YYPE (PETİLEN YY I668) termoplastik malzemeler kullanılmıştır. Söz konusu ürünlerden özel kalıplar kullanılarak, TS EN ISO 294-1 “Plastikler-Termoplastik malzemelerden enjeksiyon kalıplama ile deney parçalarının hazırlanması-Bölüm 1: Genel prensipler ve çok amaçlı çubuk deney parçalarının kalıplanması” [32] standardına uygun ana malzeme çekme test ve Sıcak Plaka Kaynak (SPK) numuneleri Dr BOY 50T enjeksiyon kalıplama makinesi aracılığıyla üretilmiştir. Numune üretiminde kullanılan enjeksiyon makinesi Şekil 1’de gösterilmektedir.

2.2. Sıcak plaka kaynağı

Benzer ve benzer olmayan polietilen sınıflarının SPK yöntemi ile birleştirilmesi sonrası bağlantıların mekanik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, kaynak işlemleri, sabit basınç temelinde pozisyon kontrol prensibine göre Tablo 3’de verilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Söz konusu parametreler, araştırma öncesi yapılan deneysel ön çalışmalar ve malzemelerin kristalleşme sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir [33]. Üç ana düzeneğin bir araya gelmesi ile oluşan sistemde, ısıtma plakası düzeneği, birbirlerinden bağımsız olarak farklı plaka sıcaklıklarını elde etme imkânı oluşturması sebebiyle özellikle farklı malzemelerin birleştirme işleminin yapılabilmesini sağlamaktadır. Pnömatik hareket düzeneği, numunelerin sıcak eleman ile bir araya getirilmesi, ergitme işlemi sonrası sıcak elemandan uzaklaştırılması ve kaynak işlemi için malzemelerin alın alına getirilmesi noktasında kullanılmaktadır. Son olarak kumanda kutusu (kontrol ünitesi) da, kaynak parametrelerini düzenlemenin yanında, pistonlar ve sıcak elemanların kontrolünü sağlamaktadır. Şekil 2 SPK makine tertibatını ve çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir. Birleştirilecek numune boyutları da Şekil 3’de verilmiştir.

Tablo 1. AYPE ürün teknik özellikleri [34]

Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Akış Hızı [190°C/2.16 kg] (g/10 dk)	Ergime Noktası (°C)	Kopmada Gerilme Dayanımı (MPa)	Akmada Gerilme Dayanımı (MPa)
0.92	0.3	110	26*	12*

(*) 50 µm kalınlıktaki filmlerde ölçülmüş değerleri yansıtmaktadır.

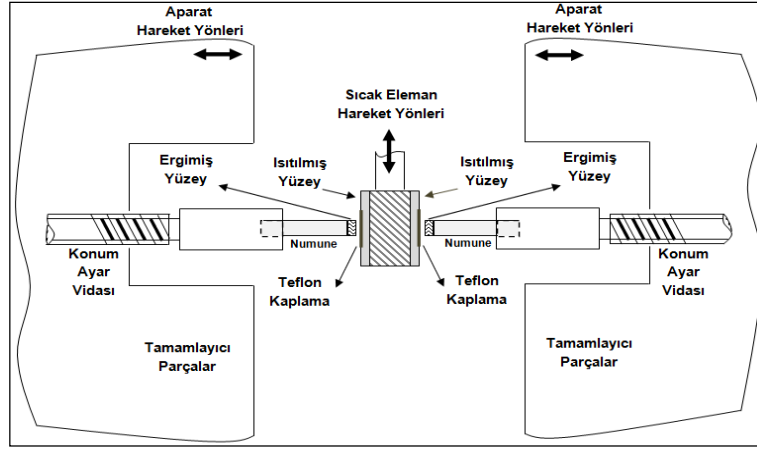
Tablo 2. YYPE ürün teknik özellikleri [35]

Yoğunluk (g/cm ³)	Erime Akış Hızı [190°C/2.16 kg] (g/10 dk)	Ergime Noktası (°C)	Kopmada Gerilme Dayanımı (MPa)	Akmada Gerilme Dayanımı (MPa)
0.965	5.5	134	17*	30*

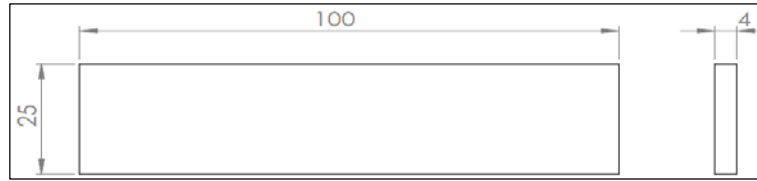
(*) Basınçla kalıplanmış plakadan ölçülen değerleri yansıtmaktadır.

**Şekil 1.** Enjeksiyon kalıplama makinesi**Tablo 3.** SPK parametreleri

#Bağlantı	#Malzemeler	#Plaka Sıcaklığı (°C)	#Isıtma Süresi (s)	#Kaynak Mesafesi (mm)	#Kaynak Zamanı (s)	#Çalışma Basıncı (Bar)
AA	AYPE-AYPE	220-220	25-25	1.5	45	3.3
AY	AYPE-YYPE	220-235	25-25	1.5	45	3.3



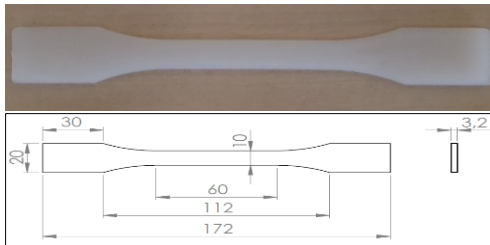
Şekil 2. SPK makinesi şematik çizimi ve çalışma prensibi



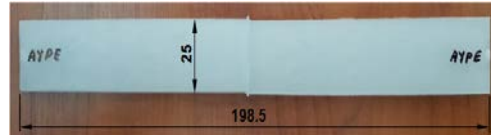
Şekil 3. SPK yöntemi ile birleştirilecek numune boyutları

2.3. Kaynaklı numunelerin çekme testi

Kaynaklı bağlantıların dayanımını belirleyebilmek için numunelere, Shimadzu AG-X (100 kN) deney cihazı kullanılarak TS EN 12814-2 standardına göre [36] 23 ± 2 °C sıcaklıkta 5 mm/dk hızda çekme testleri uygulanmıştır. Ana malzemelere ait kaynaksız çekme testi numuneleri de karşılaştırma için aynı koşullarda test edilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 sırasıyla ana malzemelere ve kaynaklı bağlantılara ait çekme deney numunelerini ve ölçülerini göstermektedir. Her bir bağlantı çeşidi için 4 örnek teste tabi tutulmuştur (Şekil 6). Numuneler bağlantıların maksimum mukavemeti ve bu gerilme değeri altındaki yüzde uzaması açısından incelenmiş, karşılaştırma açısından 4 örnekten elde edilen ortalama değerler kullanılmıştır.



Şekil 4. Çekme testi numuneleri ve ölçüleri



Şekil 5. Kaynaklı numuneler ve ölçüleri



Şekil 6. AYPE-YYPE (AY) bağlantı numuneleri

2.4. Kaynaklı numunelerin çarpma deneyleri

Kaynaklı birleştirmelerin soğurduğu enerjiyi ve çarpma tokluğunu belirlemek için, Izod çentiksiz çarpma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Testler ana malzemeler ile aynı koşullar dikkate alınarak uygulanmıştır. Gerilim yoğunlaştırıcı çentik istenmediğinden ve kaynaklı bağlantılardan çentikli numune oluşturmak doğru olmayacağından söz konusu yöntem

seçilmiştir. Ana malzemeler için 100 mm × 25 mm × 4 mm boyutlara sahip SPK numuneleri kullanılırken, kaynaklı numune boyutları çekme testindeki örnek boyutları ile aynıdır. Yapılan testler sonucunda, 4 numuneden elde edilen ortalama değer hesaplanmış ve karşılaştırma için kullanılmıştır. Ana malzemelere ve kaynaklı numunelere uygulanan çarpma deneyleri, Şekil-7'de gösterilen sarkaç tipi çarpma test cihazı (maksimum enerji: 294.2 J, sarkaç etkili ağırlığı: 18.75 kg, dönme ekseninden numune merkezine uzaklık: 825 mm, VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig) yardımıyla oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 7. Sarkaç tipi çarpma mukavemeti deney cihazı ve numune konumlanması

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Çekme özellikleri

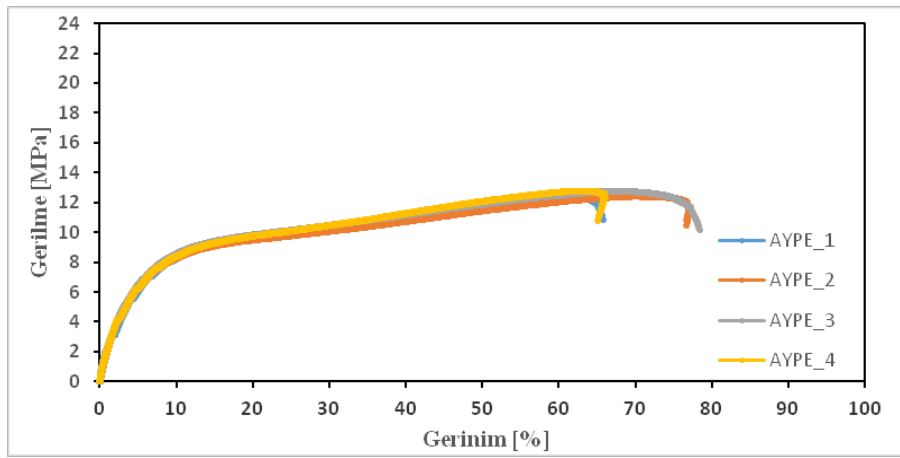
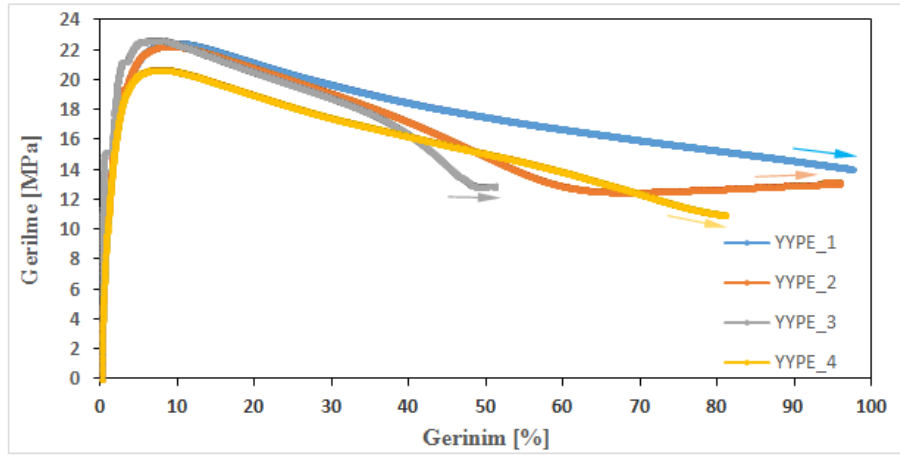
AYPE ve YYPE ana malzemelerin maksimum çekme dayanımı, yüzde uzama değerleri sırasıyla 12.60 MPa, %65.60 ve 22.07 MPa, %8.10 olarak elde edilmiştir. Çekme deneylerine ait sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Söz konusu testler sonucunda elde edilen gerilim-gerinim eğrileri de Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir. Beklenildiği gibi, AYPE malzemelerin daha düşük mukavemet ve hasar

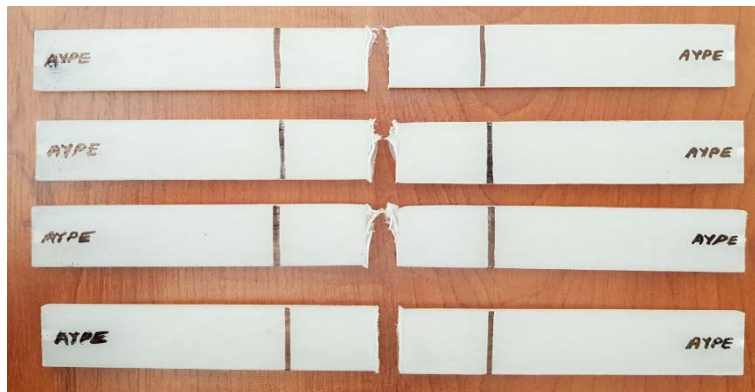
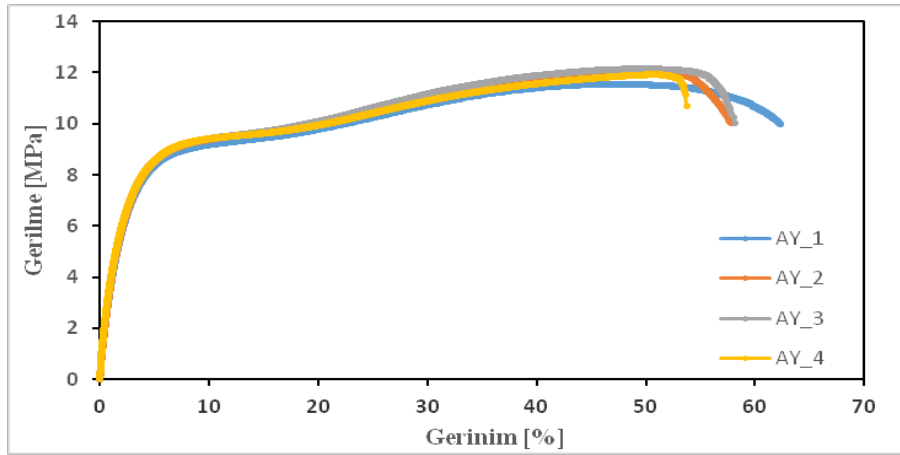
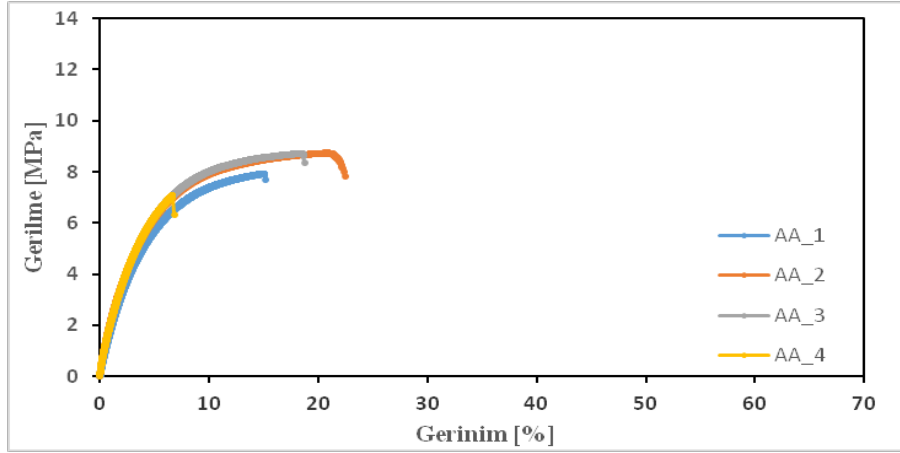
anında uzama değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, YYPE malzemelerin de maksimum gerilme altındaki boyca uzamasının AYPE numunelere göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu noktada, YYPE malzemelerin birim şekil değiştirme değerinin ~%700 ve daha fazla olması, bu değerlerin de çekme cihazı tarafından doğru şekilde ölçülemeyeceğinin bilinmesinden dolayı, malzeme elastik bölge sonrası maksimum gerilme değerine ulaşmış ölçüm boyu içerisinde boyun vermeye başladıktan belli bir uzama sonrası testler sonlandırılmıştır [37]. Şekil 9 içerisinde gösterilen oklar her bir numunenin şekil değişiminin devam ettiğini ifade etmektedir.

Benzer (AA) ve benzer olmayan (AY) bağlantılara ait gerilme-gerinim eğrileri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Buna göre, AA bağlantıların ana malzemelerden (AYPE) farklı biçimde gevrek bir davranış göstererek, maksimum gerilme altında daha düşük şekil değiştirme değerlerinde hasara uğradığı gözlemlenmiştir. AA bağlantıların hepsi kaynak bölgesinden hasara uğramıştır. Numunelerin hasar bölgeleri Şekil 12'de verilmiştir. Diğer taraftan, AY bağlantıların çekme davranışları AYPE ana malzeme çekme davranışı ile benzerlik göstermektedir. Bu duruma sebep olarak AY bağlantıların daha düşük mukavemet özelliklerine sahip ana malzemedan (AYPE) boyun vererek kaynak bölgesi dışından hasara uğraması gösterilebilir (Şekil 13). AY bağlantılarda, test numunelerinden sadece bir tanesi kaynak bölgesinden hasara uğramıştır. Şekil 14 numunelerin hasar bölgelerini göstermektedir. Benzer malzemelerin kaynak işlemi sonrası mekanik davranışı ile karşılaştırıldığında, AY bağlantıların AA bağlantılardan farklı olarak viskoelastik aşama, viskoelastik ve viskoplastik aşamalar arasında gerilme platosu benzeri bir geçiş bölgesi ve şekil değiştirme sertleşmesi ile devam eden bir viskoplastik davranışa sahip oldukları belirlenmiştir [38]. Bunun yanında, AY bağlantıların çekme özelliklerinin birbirlerine çok yakın olması, SPK işlemi sonrası benzer olmayan birleştirmelerin çekme davranışının tekrarlanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 4. AYPE ve YYPE ana malzemelerin çekme deneyi sonuçları

Numune		1	2	3	4	Ortalama Değer
AYPE	Azami Çekme Mukavemeti (MPa)	12.50	12.40	12.73	12.76	12.60
	Azami Gerilme Altında Boyca Uzama (%)	60.65	70.42	68.04	63.27	65.60
YYPE	Azami Çekme Mukavemeti (MPa)	22.47	22.31	22.73	20.75	22.07
	Azami Gerilme Altında Boyca Uzama (%)	9.52	8.80	6.82	7.27	8.10

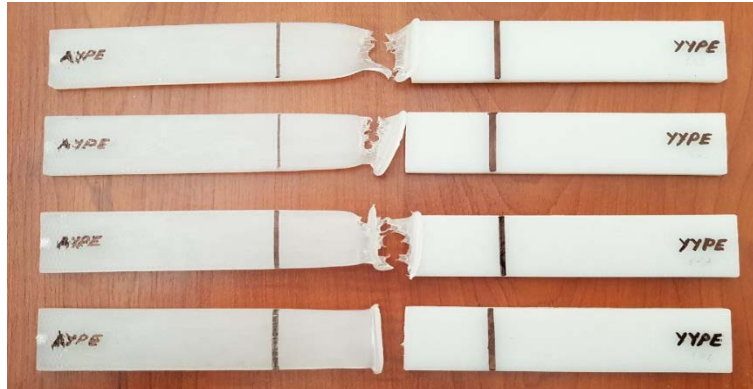
**Şekil 8.** AYPE numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışı**Şekil 9.** YYPE numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışı



Şekil 12. AA bağlantıların çekme deneyleri sonrası kopma bölgeleri



Şekil 13. AY bağlantılarının çekme deneyleri esnasındaki şekil değişim görüntüsü



Şekil 14. AY bağlantılarının çekme deneyleri sonrası hasar bölgeleri

Deney sonuçları SPK sonrası AA bağlantılarda, maksimum çekme mukavemeti açısından %64.37'lik bir kaynak verimliliği olduğunu göstermektedir. Numuneler kaynak bölgesinden hasara uğradıkları için ana malzemeye (AYPE) göre birim şekil değiştirme değerleri düşüktür. Benzer bağlantıların söz konusu çekme dayanım özellikleri, AYPE malzemeler YYPE malzemeler ile birleştirilerek maksimum çekme mukavemeti açısından %94.60 ve maksimum gerilme değeri altında şekil değiştirme açısından %75.06'ya çıkarılmıştır. Bu sonuçlar benzer olmayan polietilen sınıflarının SPK yöntemi kullanılarak daha üstün mekanik özellikler ile başarılı bir şekilde kaynaklanabilirliğini ispat etmektedir. Tablo 5

AA ve AY bağlantıların çekme deneylerine ait sonuçların özetini sunmaktadır.

Kaynaklı bağlantıların verimlilik hesabında AYPE ana malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak işlemler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, her iki bağlantı türünün çekme özellikleri elastisite modülleri (E) açısından da incelenmiştir. AA bağlantılar 184.75 MPa'lık ortalama bir elastisite modülüne sahipken, benzer olmayan bağlantıların elastisite modül değeri 415.70 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modül değeri malzemelerin karakteristik bir özelliği ve mukavemetinin bir ölçüsü olarak düşünüldüğünde, AY bağlantıların AA bağlantılara göre çekme dayanımının daha üstün olduğu bir kez daha gösterilmiştir.

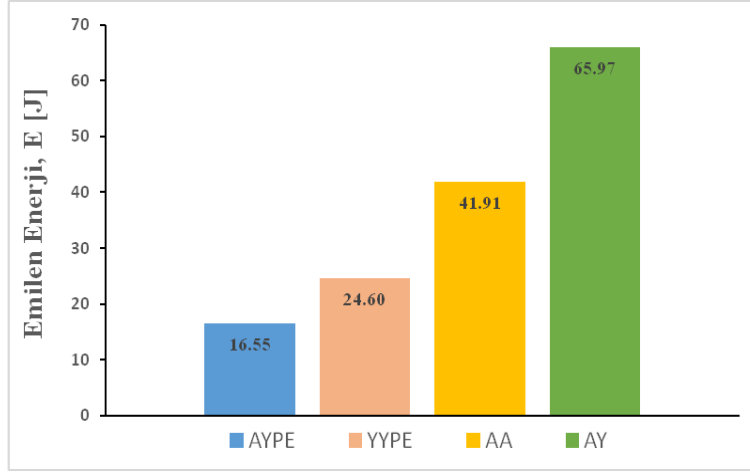
Tablo 5. Benzer ve benzer olmayan polietilen bağlantıların çekme deneyi sonuçları

Bağlantı	1	2	3	4	Ortalama Değer	
AA	Azami Çekme Mukavemeti (MPa)	7.91	8.73	8.72	7.07	8.11
	Azami Gerilme Altında Boyca Uzama (%)	14.92	20.80	18.60	6.64	15.24
AY	Azami Çekme Mukavemeti (MPa)	11.54	12.06	12.14	11.92	11.92
	Azami Gerilme Altında Boyca Uzama (%)	46.84	49.47	49.63	51.00	49.24

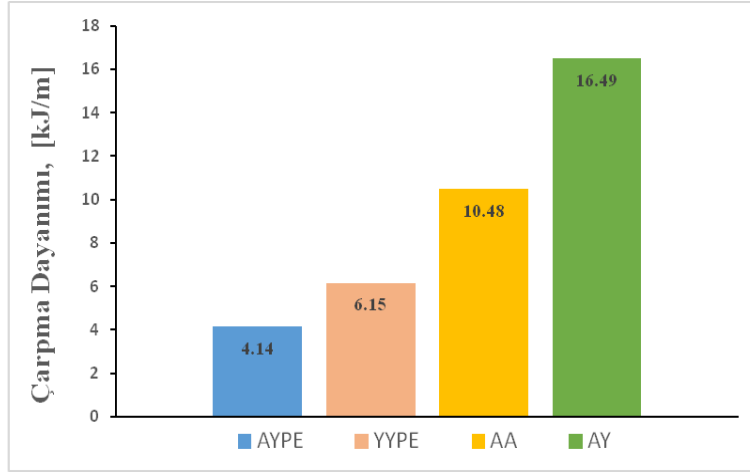
3.2. Çentiksiz çarpma dayanımı

SPK tekniği ile birleştirilmiş benzer ve benzer olmayan polietilen bağlantıların çarpma dayanımını ve çarpma enerjisini belirlemek için, ana malzemeler ve her bir bağlantı çeşidi için 4 adet test gerçekleştirilmiştir. Sonrasında elde edilen sonuçlar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Buna göre, ana malzemelerde beklenildiği gibi [39,40] bir hasar (parçalanma) gözlemlenmemiş ancak testler esnasında örneklerde absorbe edilen enerji miktarları kayıt altına alınarak ortalamaları hesaplanmıştır. Çarpma dayanımları da, emilen enerji değerleri numune kalınlıklarına bölünerek elde edilmiştir. Izod çarpma deney sonuçları, absorbe edilen enerjiler ve çarpma dayanımları açısından sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16'da görülebilir. Sonuçlara göre, YYPE ana malzemelerin AYPE malzemelere göre daha yüksek enerji soğurduğu ve dolayısıyla oda sıcaklığında daha iyi çarpma dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir [41,42].

Kaynaklı numuneler ana malzemeler ve kendi aralarında karşılaştırıldığında, AA ve AY bağlantıların, numuneler hasara uğrasın veya uğramasın her iki ana malzemeden daha fazla enerji absorbe ettiği belirlenmiştir. Bu noktada, AA bağlantılarda iki numune ve AY bağlantılarda bir numune kaynak bölgesinden hasara uğramış; diğer örneklerde parçalanma (kopma) görülmemiştir. Öte yandan, AY bağlantılarda AA bağlantılara göre %57.41 oranında daha fazla enerji emilimi olduğu açıkça görülmektedir. Kaynaklı bağlantıların çekme dayanım özelliklerine benzer şekilde, AYPE malzemeler YYPE malzemeler ile güvenli biçimde birleştirilerek benzer bağlantılara göre çarpma anında emilen enerji değerlerinde ciddi ölçüde artış sağlanmıştır.



Şekil 15. Çarpma davranışlarının absorbe edilen enerjiler yönünden karşılaştırılması

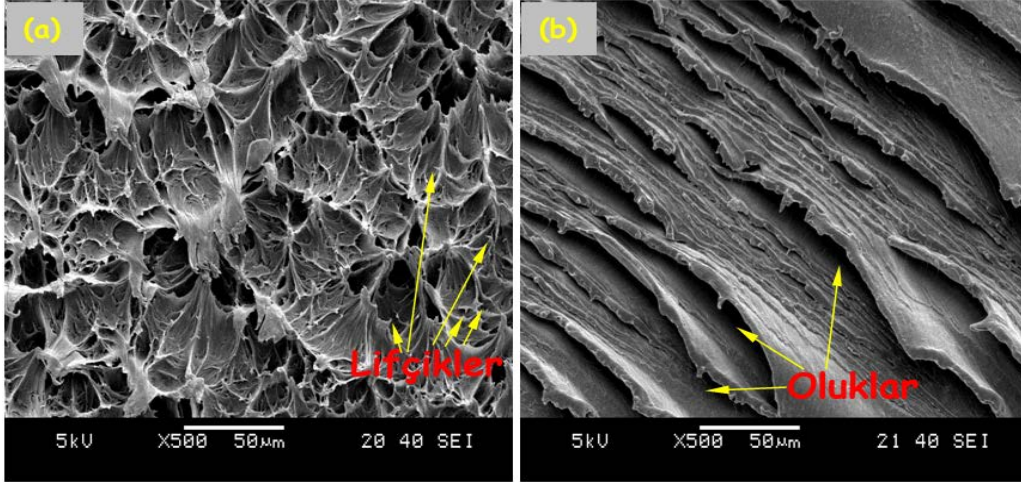


Şekil 16. Çarpma davranışlarının çarpma dayanımları yönünden karşılaştırılması

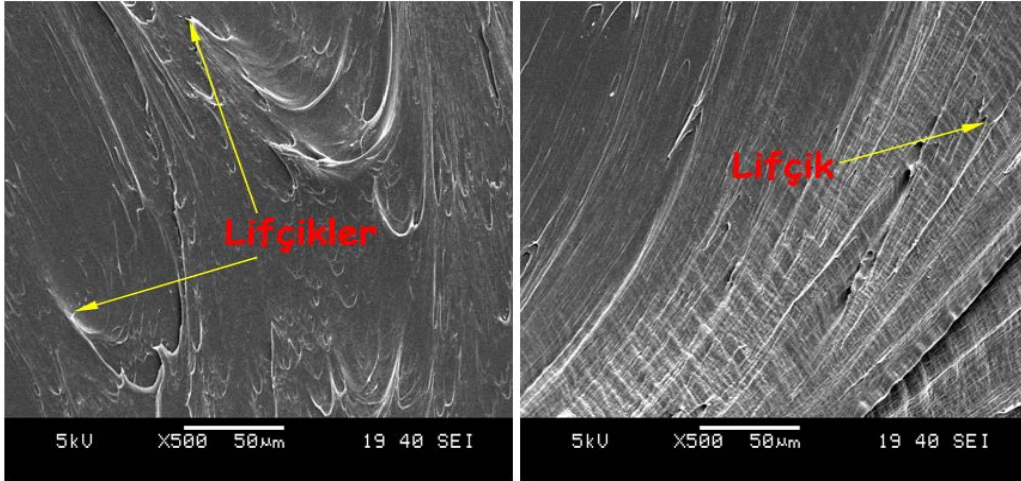
3.3. Kırılma yüzeyi incelemesi

Çekme deneyleri sonrası kaynak bölgesinden hasara uğrayan bağlantıların kırılma yüzeyleri, kaynak bölgesinin mekanik davranışını ve malzeme tepkisini belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (JEOL JSM-6060) altında incelenmiştir. Şekil 17-18 söz konusu bağlantıların kırılma yüzeylerine ait resimleri göstermektedir. Buna göre, çekme testi sonrası hasara uğrayan AY bağlantı YYPE numune yüzeyinin (Şekil 17(a)), yüksek süneklik göstergesi olan çok sayıda gerili lifçiklerden (stretched fibrils) oluştuğu belirlenmiştir. Bu lifçikler (fibrils) işlem esnasında önemli

miktarda enerji harcadığını ifade etmektedir [43]. Aynı örneğin AYPE numune tarafı (Şekil 17(b)) ise çatlaklı tabaka (blocky structure) şeklinde [44], girinti ve oluklardan oluşan süreksiz bir kırılma yüzeyine sahiptir. Öte yandan AA bağlantıda ise, her iki numune kırılma yüzeyleri (Şekil 18), uzun gerili lifçikler yerine yer yer nokta şeklinde ince lifçikler (point-like fibrils) içeren gevrek kırılma yüzeyi biçiminde karakterize edilebilir. Bu durum, AY bağlantıların çekme testleri sonucu elde edilen daha yüksek mukavemet ve uzama özellikleri ile uyum göstermektedir.



Şekil 17. Çekme testi sonrası AY bağlantı taramalı elektron fotoğrafları: (a) YYPE numune yüzeyi (b) AYPE numune yüzeyi



Şekil 18. Çekme testi sonrası AA bağlantı taramalı elektron fotoğrafları

4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında benzer ve farklı polietilen sınıfları SPK tekniği kullanılarak birleştirilmiş, bağlantıların mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiş ve bulgular ana malzemeler ve bağlantıların kendi arasında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, AYPE malzemeler YYPE ile başarılı biçimde birleştirildiğinde, maksimum çekme mukavemeti ve maksimum gerilme altında şekil değiştirme özelliklerinin benzer AYPE bağlantı ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde arttığı saptanmıştır. Bu bağlantıların çekme testlerinde benzer AYPE bağlantıların aksine

kaynak bölgesi dışından (ana malzemeden) hasara uğrama eğiliminde oldukları görülmüştür. Çekme deneyleri sonrası incelenen kırılma yüzeylerinde benzer olmayan AYPE-YYPE bağlantı için, benzer AYPE bağlantılarda rastlanan gevrek kırılma göstergesi olan ince lifçikler yerine, yüksek süneklik işareti olan gerili lifçikler gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre, AYPE malzemelerin YYPE ile birleştirildiklerinde benzer bağlantılara göre daha fazla enerji emilimi gösterdikleri belirlenmiştir.

Kaynakça

- [1] Kiszka, A., Lomozik, M. 2013. Vibration welding of high density polyethylene HDPE – purpose, application, welding technology and quality of joints, *Kovove Materialy*, Cilt. 51, s. 63-70. DOI: 10.4149/km_2013_1_63
- [2] Amanat, N., James, N.L., McKenzie, D.R. 2010. Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices, *Medical Engineering & Physics*, Cilt. 32, s. 690-699. DOI: 10.1016/j.medengphy.2010.04.011
- [3] Mubarak, Y.A., Abdulsamad, R.T. 2019. Thermal properties and degradability of low density polyethylene microcrystalline cellulose composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Cilt. 32, s. 487-500. DOI: 10.1177/0892705718766387
- [4] Moreno-Moreno, M., Romero, Y.M., Zambrano, H.R., Restrepo-Zapata, N.C., Afonso, C.R.M., Unfried-Silgado, J. 2018. Mechanical and thermal properties of friction-stir welded joints of high density polyethylene using a non-rotational shoulder tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt. 97, s. 2489-2499. DOI: 10.1007/s00170-018-2102-y
- [5] Rojas, K., Canales, D., Amigo, N., Montoille, L., Cament, A., Rivas, L.M., Gil-Castell, O., Reyes, P., Ulloa, M.T., Ribes-Greus, A., Zapata, P.A. 2019. Effective antimicrobial materials based on low-density polyethylene (LDPE) with zinc oxide (ZnO) nanoparticles, *Composites Part B*, Cilt. 172, s. 173-178. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.05.054
- [6] Charitos, I., Georgousis, G., Kontou, E. 2019. Preparation and Thermomechanical Characterization of Metallocene Linear Low-Density Polyethylene/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Polymer Composites*, Cilt. 40, s. E1263-E1273. DOI: 10.1002/pc.24961
- [7] Liang, J-Z. 2019. Melt spinning flow behaviour of high-density polyethylene blended with low-density polyethylene, *Plastics, Rubber and Composites*, Cilt. 48, s. 256-262. DOI: 10.1080/14658011.2019.1603026
- [8] Siddique, S., Smith, G.D., Yates, K., Mishra, A.K., Matthews, K., Csetenyi, L.J., Njuguna, J. 2019. Structural and thermal degradation behaviour of reclaimed clay nano-reinforced low-density polyethylene nanocomposites, *Journal of Polymer Research*, Cilt. 26, s. 1-14. DOI: 10.1007/s10965-019-1802-9
- [9] Zia, J., Paul, U.C., Heredia-Guerrero, J.A., Athanassiou, A., Fragouli, D. 2019. Low-density polyethylene/curcumin melt extruded composites with enhanced water vapor barrier and antioxidant properties for active food packaging, *Polymer*, Cilt. 175, s. 137-145. DOI: 10.1016/j.polymer.2019.05.012
- [10] Chavan, S., Gumtapure, V., Peruma, D.A. 2019. Characterization of linear low-density polyethylene with graphene as thermal energy storage material, *Materials Research Express*, Cilt. 6, 065511. DOI: 10.1088/2053-1591/ab0e36
- [11] Azizi, S., Ouellet-Plamondon, C.M., Nguyen-Tri, P., Fréchet, M., David, E. 2019. Electrical, thermal and rheological properties of low-density polyethylene/ethylene vinyl acetate/graphene-like composite, *Composites Part B*, Cilt. 177, 107288. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107288
- [12] Sabet, M., Soleimani, H. 2019. Broad studies of graphene and low-density polyethylene composites, *Journal of Elastomers & Plastics*, Cilt. 51, s. 527-561. DOI: 10.1177/0095244318802608
- [13] Guichard, B., Cassagnau, P., Sudre, G., Fulchiron, R., Ledieu, B., Espuche, E. 2019. Effect of a Post-Annealing Process on Microstructure and Mechanical Properties of High-Density Polyethylene/Silica Nanocomposites, *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, Cilt. 57, s. 535-546. DOI: 10.1002/polb.24809
- [14] Zhang, Q., Khan, M.U., Lin, X., Cai, H., Lei, H. 2019. Temperature varied biochar as a reinforcing filler for high-density polyethylene composites, *Composites Part B*, Cilt. 175, 107151. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107151
- [15] Durmus, A., Ercan, N., Alanalp, M.B., Gökkurt, T., Aydin, I. 2019. Effects of Liquid Crystal Polymer and Organoclay Addition on the Physical Properties of High-Density Polyethylene Films, *Polymer Engineering and Science*, Cilt. 59, s. 1344-1353. DOI: 10.1002/pen.25117
- [16] Fairbrother, A., Hsueh, H-C., Kim, J.H., Jacobs, D., Perry, L., Goodwin, D., White, C., Watson, S., Sung, L-P. 2019. Temperature and light intensity effects on photodegradation of high-density polyethylene, *Polymer Degradation and Stability*, Cilt. 165, s. 153-160. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.002
- [17] Liu, Y., Shao, X., Huang, J., Li, H. 2019. Flame sprayed environmentally friendly high density polyethylene (HDPE)-capsaicin composite coatings for marine antifouling applications, *Materials Letters*, Cilt. 238, s. 46-50. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.11.144
- [18] Zhang, Q., Cai, H., Ren, X., Kong, L., Liu, J., Jiang, X. 2017. The Dynamic Mechanical Analysis of Highly Filled Rice Husk Biochar/High-Density Polyethylene Composites, *Polymers*, Cilt. 9, 628, s. 1-10. DOI: 10.3390/polym9110628
- [19] Bucknall, C.B., Drinkwater, I.C., Smith, G.R. 1980. Hot plate welding of plastics: Factors affecting weld strength, *Polymer Engineering and Science*, Cilt. 20, s. 432-440. DOI: 10.1002/pen.760200609
- [20] Yousefpour, A., Hojjati, M., Immarigeon, J-P. 2004. Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Cilt. 17, s. 303-341. DOI: 10.1177/0892705704045187
- [21] Friedrich, N., Hoffschlag, R., Schöppner, V., Schnieders, J., Gövert, S. 2012. Cycle Time Reduction by Forced Air Cooling For Hot Plate Welding, *Welding in The World*, Cilt. 56, s. 101-107. DOI: 10.1007/BF03321340
- [22] da Costa, A.P., Botelho, E.C., Costa, M.L., Narita, N.E., Tarpani, J.R. 2012. A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications, *Journal of Aerospace Technology and Management*, Cilt. 4, s. 255-265. DOI: 10.5028/jatm.2012.04033912
- [23] Birley, A.W., Buxton, R. 1989. The hot plate welding of high-density polyethylene, *Polymer Testing*, Cilt. 8, s. 277-287. DOI: 10.1016/0142-9418(88)90029-3

- [24] Ülker, A., Kocatüfek, U.E., Sayer, S., Yeni, Ç. 2015. Application of the Taguchi method for the optimization of the strength of polyamide 6 composite hot plate welds, *Materials Testing, Cilt. 57, s. 531-542. DOI: 10.3139/120.110741*
- [25] Tariq, F., Naz, N., Khan, M.A., Baloch, R.A. 2012. Failure Analysis of High Density Polyethylene Butt Weld Joint, *Journal of Failure Analysis and Prevention, Cilt. 12, s. 168-180. DOI: 10.1007/s11668-011-9536-y*
- [26] Nonhof, C.J. 1996. Optimization of Hot Plate Welding for Series and Mass Production, *Polymer Engineering and Science, Cilt. 36, s. 1184-1195. DOI: 10.1002/pen.10512*
- [27] Nieh, J-Y., Lee, L.J. 1998. Hot Plate Welding of Polypropylene. Part I: Crystallization Kinetics, *Polymer Engineering and Science, Cilt. 38, s. 1121-1132. DOI: 10.1002/pen.10279*
- [28] Nieh, J-Y., Ni, J., Lee, L.J. 1998. Hot plate welding of polypropylene. Part II: Process simulation, *Polymer Engineering and Science, Cilt. 38, s. 1133-1141. DOI: 10.1002/pen.10280*
- [29] Oliveira, M.J., Bernardo, C.A., Hemsley, D.A. 2001. Morphology and mechanical behavior of polypropylene hot plate welds, *Polymer Engineering and Science, Cilt. 41, s. 1913-1922. DOI: 10.1002/pen.10888*
- [30] Taşkıran, E., Sayer, S., Özses, Ç., Yeni, Ç., Ülker, A. 2015. Effect of process parameters and talc ratio on hot plate welding of polypropylene, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Cilt. 46, s. 860-872. DOI: 10.1002/mawe.201500438*
- [31] Stokes, V.K. 1998. Experiments on the hot-tool welding of three dissimilar thermoplastics, *Polymer, Cilt. 39, s. 2469-2477. DOI: 10.1016/S0032-3861(97)00569-7*
- [32] TS EN ISO 294-1(2018): Plastikler - Termoplastik malzemelerden enjeksiyon kalıplama ile deney parçalarının hazırlanması - Bölüm 1: Genel prensipler ve çok amaçlı çubuk deney parçalarının kalıpllanması.
- [33] Ehrenstein, G.W. 2004. *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Hanser. München, 710s.*
- [34] <https://app.petkim.com.tr/web/urun/File.ashx?fn=UR.12-BF-U1213&l=tr&fl=urunler> (Erişim Tarihi: 13.12.2019).
- [35] <https://app.petkim.com.tr/web/urun/File.ashx?fn=UR.15-BF-U40203&l=tr&fl=urunler> (Erişim Tarihi: 13.12.2019).
- [36] TS EN 12814-2(2003): Yarı mamul termoplastik malzemeler-Kaynaklı bağlantı deneyleri-Bölüm 2: Çekme deneyi.
- [37] Mahmoud, M.E., El-Khatib, A.M., El-Sharkawy, R.M., Rashad, A.R., Badawi, M.S., Gepreel, M.A. 2019. Design and testing of high-density polyethylene nanocomposites filled with lead oxide micro- and nano-particles: Mechanical, thermal, and morphological properties, *Journal of Applied Polymer Science, Cilt. 136, 47812, s. 1-11. DOI: 10.1002/app.47812*
- [38] Addiego, F., Martino, J.D., Ruch, D., Dahoun, A., Godard, O., Patlazhan, S. 2011. Quantification of Cavitation in Neat and Calcium Carbonate-Filled High-Density Polyethylene Subjected to Tension, *Journal of Engineering Materials and Technology, Cilt. 133, 030904, s. 1-7. DOI: 10.1115/1.4004046*
- [39] Lushcheikin, G.A. 2017. Modelling the impact strength of polymeric materials, *International Polymer Science and Technology, Cilt. 44, s. 27-32. DOI: 10.1177/0307174X1704401006*
- [40] <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Plastic-Properties/HDPE-vs-LDPE> (Erişim Tarihi: 24.01.2020).
- [41] Nishimura, H., Narisawa, I. 1991. Evaluation of impact properties of butt-fusion-jointed medium-density polyethylene pipes for gas distribution, *Polymer, Cilt. 32, s. 2199-2204. DOI: 10.1016/0032-3861(91)90046-L*
- [42] <http://www.sdplastics.com/polyeth.html> (Erişim Tarihi: 24.01.2020).
- [43] Singh, G., Bhunia, H., Rajor, A., Choudhary, V. 2011. Thermal properties and degradation characteristics of polylactide, linear low density polyethylene, and their blends, *Polymer Bulletin, Cilt. 66, s. 939-953. DOI: 10.1007/s00289-010-0367-x*
- [44] Brough, I., Haward, R.N., Healey, G., Wood, A. 2004. Scanning electron micrographs of high density polyethylene fracture surfaces, *Polymer, Cilt. 45, s. 3115-3123. DOI:10.1016/j.polymer.2004.02.036*