

Atıf İçin: Dağlı, M., Demirer, A. ve Yumat, E. (2026). Farklı HDPE Boruların Alın Kaynağı Prosesinde Optimizasyon Tekniği ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Optimum Parametrelerin Belirlenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(1), 197-209.

To Cite: Dağlı, M., Demirer, A. & Yumat, E. (2026). Investigation of Mechanical Properties of Different HDPE Pipes in Butt Welding Process with Optimization Technique and Determination of Optimum Parameters. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 16(1), 197-209.

Farklı HDPE Boruların Alın Kaynağı Prosesinde Optimizasyon Tekniği ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Optimum Parametrelerin Belirlenmesi

Muhammet DAĞLI^{1*}, Ahmet DEMİRER², Esra YUMAT³

Öne Çıkanlar:

- Sıcak Eleman ile Alın Kaynağı
- Hidrostatik İç Basınç testi
- Mekanik testler
- PE80 - PE100
- CYY Optimizasyon

Anahtar Kelimeler:

- PE80
- PE100
- Sıcak Eleman Alın Kaynağı
- Çekme dayanımı
- Sertlik
- Hidrostatik İç Basınç

ÖZET:

PE borular, esneklik, dayanıklılık ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle su, gaz, kanalizasyon, sulama ve yangın koruma sistemleri gibi birçok altyapı uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, PE80 ve PE100 sınıfı boruların alın kaynağı işlemi için optimum kaynak parametrelerini belirlemeyi ve PE100 ile PE80 boruların alın kaynağıyla birleştirildiğinde mekanik özelliklerinin nasıl etkileneceğini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, üç farklı kaynak sıcaklığı (215, 220, 225°C), iki birleştirme basıncı (1 ve 2 bar), ısıtma ve soğutma süreleri kullanılarak bu boruların optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. PE80+PE80, PE100+PE100 ve PE100+PE80 boru kombinasyonları için alın kaynağı işlemi gerçekleştirilmiş ve bu işlemlerin mekanik performansları etkileri test edilmiştir. Çekme dayanımı, sertlik ve hidrostatik iç basınç testleriyle kaynak sonrası mekanik özellikler detaylı olarak incelenmiştir. PE100 borular, PE80'e kıyasla daha yüksek çekme dayanımı ve sertlik değerleri gösterirken, PE80+PE100 kombinasyonlarında kaynak parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesi gerektiği ortaya konmuştur. Cevap Yüzey Metodu kullanılarak PE100-PE80 kombinasyonu için optimum parametreler belirlenmiş ve bu kombinasyonun mekanik dayanım açısından test edilmiştir. Sonuç olarak, PE100 ve PE80 boruların kaynak sonrası mekanik performanslarının optimum koşullarda önemli ölçüde iyileştirilebileceği gözlemlenmiştir. Optimum parametreler kullanıldığında PE80+PE100 kombinasyonunun çekme dayanımı %46.7 oranında iyileşmiş ve 11.28 N/mm²'den 16.55 N/mm²'ye yükselmiştir. Aynı şekilde, sertlik değerleri 49 Shore D'den 57 Shore D'ye çıkarak %16 oranında bir artış göstermiştir. Hidrostatik iç basınç testinde ise Deney 6 (225°C kaynak sıcaklığı ve 2 bar basınç) PE80+PE100 kombinasyonu optimum şartlar altında 11 bar'a kadar dayanım göstermiş ve bu da orijinal duruma kıyasla önemli bir iyileşme sağlamıştır.

Investigation of Mechanical Properties of Different HDPE Pipes in Butt Welding Process with Optimization Technique and Determination of Optimum Parameters

Highlights:

- Butt Fusion Welding with Hot Element
- Hydrostatic Internal Pressure Test
- Mechanical Tests
- PE80 - PE100
- RSM Optimization

Keywords:

- PE80
- PE100
- Butt Fusion Welding
- Tensile Strength
- Hardness
- Hydrostatic Internal Pressure

ABSTRACT:

Polyethylene (PE) pipes are widely utilized in infrastructure applications such as water distribution, gas transportation, sewage, irrigation, and fire protection due to their flexibility, durability, and corrosion resistance. This study aims to optimize the butt welding parameters for PE80 and PE100 pipes and evaluate their mechanical properties post-welding. Experiments were conducted using three welding temperatures (215°C, 220°C, and 225°C), two joining pressures (1 bar and 2 bar), and varying heating and cooling times. Butt welding was applied to PE80+PE80, PE100+PE100, and PE100+PE80 combinations. Tensile strength, hardness, and hydrostatic internal pressure tests were performed to assess mechanical performance. Results indicate that PE100 pipes exhibit higher tensile strength and hardness than PE80. However, optimizing welding parameters is critical for PE80-PE100 combinations. Using the Response Surface Method, the optimal welding parameters were identified and validated. Under optimal conditions, the tensile strength of the PE80+PE100 combination increased by 46.7%, from 11.28 N/mm² to 16.55 N/mm². Hardness values improved by 16%, rising from 49 Shore D to 57 Shore D. Additionally, in the hydrostatic internal pressure test, the PE80+PE100 combination (welded at 225°C and 2 bar) withstood up to 11 bar, significantly improving its pressure resistance. In conclusion, optimizing butt welding parameters enhances the mechanical properties of PE100 and PE80 pipes, making them more suitable for infrastructure applications.

¹ Muhammet Dağlı ([Orcid ID: 0000-0002-1336-903X](https://orcid.org/0000-0002-1336-903X)), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

² Ahmet Demirer ([Orcid ID: 0000-0003-1252-9203](https://orcid.org/0000-0003-1252-9203)), Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

³ Esra Yumat ([Orcid ID: 0000-0002-7662-9142](https://orcid.org/0000-0002-7662-9142)), Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Muhammet Dağlı, e-mail: muhammetdagli@gmail.com

GİRİŞ

Yüksek yoğunluklu Polietilen (HDPE) borular, gaz ve su taşımacılığı gibi kritik alanlarda dayanıklılık, esneklik ve korozyon direnci gibi avantajlarıyla yaygın olarak tercih edilmektedir (Guo, ve ark., 2016). Ayrıca kolay kurulum ve düşük bakım maliyetleri, PE boruyu yeni kurulan düşük basınçlı gaz boru hattı sistemleri için en popüler aday haline getirmektedir (Tan, 2021). HDPE nin bir türü olan PE100, moleküler yapısındaki gelişmişlik sayesinde PE80'e göre daha yüksek mukavemet sergilemektedir ve özellikle yüksek basınçlı uygulamalara daha uygun hale gelmiştir (Zhang ve Jar, 2016; Bayrakçıl ve ark., 2024).

PE boruların birleştirilmesinde en yaygın kullanılan yöntem alın kaynağıdır. Bu işlem, boru uçlarının ısıtılarak eriyik hale getirilip kontrollü bir basınçla birleştirilmesi prensibine dayanır ve farklı çaplara sahip borularda uygulanabilir (Cai ve ark., 2011; Galchun ve ark., 2015; Dağlı ve ark., 2023). Alın kaynağının uygun şekilde birleştirilmesi durumunda, boru bağlantılarının 50 yıl gibi uzun bir hizmet ömrü sağlaması beklenir (Kim ve ark., 2019). Ancak, kaynak işlemi sırasında eksik füzyon, iç boşluklar ve yüzey pürüzlülüğü gibi çeşitli hatalar oluşabilir ve bu hatalar bağlantı mukavemetini azaltarak boru sisteminin güvenilirliğini etkileyebilir (Haroon ve ark., 2019; Galchun ve ark., 2015). PE80 ile PE100 boruların birleştirilmesi esnasında farklı fiziksel özellikler ve farklı erime noktaları nedeniyle kaynak bölgesinde kristal yapıda düzensizlikler ve iç gerilmeler meydana gelebilmektedir. Galchun ve ark. (2015), PE80 ile PE100 boruların alın kaynağı ile birleştirilmesi sonucu daha düzensiz kristallerin oluştuğunu ve bu durumun kaynak bölgesinde iç gerilmelere yol açabileceğini belirtmiştir. (Sun ve ark., 2019). Özellikle Bayrakçıl ve ark. (2024) tarafından yürütülen araştırmada, PE100'ün pürüzsüz iç yüzey yapısının sıvı akışına karşı daha az direnç gösterdiği ve kaynak sonrası bağlantı mukavemetinin iyileştirilebileceği belirtilmiş ve böylece, PE boruların alın kaynağı ile birleştirilmesi sonucunda oluşan mikro yapı, kaynak mukavemeti ve uzun vadeli güvenilirlik açısından önemli bilgiler elde edilmiştir (Pathak ve Pradhan, 2020). Aynı tür HDPE boruların kaynağının farklı HDPE türlerine göre mekanik özelliklerin yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Demchenko ve ark., 2017).

Bu çalışmanın temel amacı, iki farklı HDPE türü olan PE80 ve PE100 boru malzemelerinin sıcak eleman alın kaynağı işlemi sonrası mekanik ve hidrostatik iç basınca dayanım özelliklerini karşılaştırmaktır. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan 63mm dış çapındaki, iki farklı basınç dayanımına sahip PE boruların endüstride birleştirme zorunluluğunun bulunması durumunda nasıl davranış göstereceğini belirlemek ve optimum kaynak parametrelerini araştırmak üzere yapılan deneysel bir çalışmadır. Çalışmada hidrostatik iç basınç testi yapılmasının nedeni, borunun uzun süre çalışma basıncına dayanımını, sızdırmazlığını, standartlara uygunluğunu ve uzun süreli kullanım güvenilirliğini değerlendirmektir.

Çalışmada optimizasyon tekniği için Cevap yüzey yöntemi (Response Surface Methodology-RSM) kullanılmıştır. RSM, bir veya daha fazla çıktıyı (cevap değişkenini) etkileyen birden çok girdinin (bağımsız değişkenin) etkisini incelemek ve bu değişkenler arasındaki ilişkileri modellemek ve optimize etmek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir (Montgomery, 2020). Bu araştırma, farklı PE boruların (PE80+PE100) alın kaynağı sonrası mekanik performansının deneysel ve istatistiksel olarak irdelenmesinde önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Yapılan çalışmada, sıcak eleman alın kaynağı yöntemiyle birleştirilmek üzere iki farklı yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) türevi olan PE80 ve PE100 borular kullanılmıştır. PE80 borular sarı renkte temin edilmiş olup, PE80 ve PE100 boruların teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. PE80 ve PE100 boruların malzeme özellikleri tablosu

Ürün Özellikleri	Birim	PE80	PE100	Standart
Yoğunluk	g/cm ³	0.930	0.960	DIN 1872
Erime Akış Hızı (MFI)	g/10 dk.	0.20-0.70	<0.25	ISO 1133
Çekme Mukavemeti	MPa	20-22	25-28	DIN 53455
Kopma Uzaması	%	≥ 350	≥ 350	ISO R 527
Sertlik	ShoreD	58-60	60-63	ASTM D 2240
Elastik Modülü	MPa	550-650	800-1000	ISO R 527

PE80 ve PE100 borular bazı durumlarda birleştirilmesi gerekmektedir. Fakat bu konuda yeterli bilgi birikimi olmadığından farklı adaptörlerle bağlantılar yapılarak kullanılmaktadır. Çalışmada bu eksikliğin olabildiğince giderilmesine yönelik deneysel bir çalışma ve analiz gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan borular Arılı/Pipelife markasına aittir ve teknik özellikleri bu üreticinin bilgi föylerinden alınmıştır. Deneylerde kullanılan boruların dış çapı 63 mm, et kalınlığı ise 5.8 mm olarak belirlenmiştir. Numuneler, standartlara uygun olarak 90cm uzunluğunda kesilerek hazırlanmıştır.

Metot

PE100+PE100 ve PE80+PE80 kaynak şartları

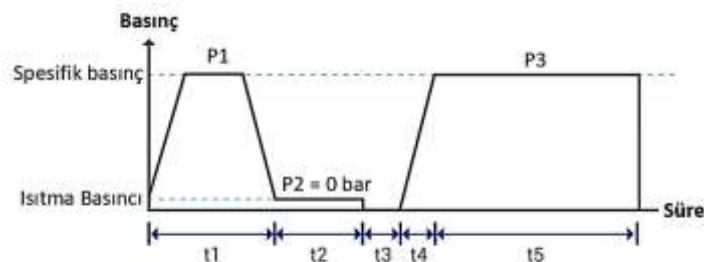
Deneysel çalışmada, kıyaslama için aynı tür plastik boruların (PE100+PE100 ve PE80+PE80) alın kaynağı, Ritmo Basic 200 marka sıcak eleman alın kaynak makinasında gerçekleştirilmiş ve kullanılan parametreler Çizelge 2'de verilmiştir. Aynı zamanda basınç ve süre parametrelerine göre alın kaynak uygulama grafiği Şekil 1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. PE80 ve PE100 boruların sıcak eleman alın kaynak parametreleri

Parametreler	Birim	Semboller	Numuneler	
			PE100+PE100	PE80+PE80
Kaynak Sıcaklığı	°C	-	225	215
Birleştirme Basıncı	bar	P3	2	1
Isıtma Süresi*	sn	t1, t2	60	60
Isıtıcı Çıkarma Süresi + Birleştirme Süresi	sn	t3 + t4	5	5
Soğutma Süresi	dk	t5	10	10
Yürüme Basıncı**	bar	-	15	15

* İlk 15 saniye (t1) basınçlı, sonraki 45 saniye (t2) boyunca basınçsız şekilde ısıtma sağlanır.

**Yürüme basıncı: İki borunun karşılıklı konumlandırılması sırasında uygulanan basınçtır.



*P1: Yanaştırma basıncı (5 bar)

**P2: Isıtma basıncı (0 bar)

Şekil 1. Basınç ve süre parametrelerine göre sıcak eleman alın kaynak uygulaması grafiği (Hawkeye, 2008; Starostin ve Ammosova, 2009).

Kaynak deneyleri sırasında PE80 ve PE100 malzemelerinin farklı fiziksel özellikleri göz önüne alınmıştır. PE100 için 225°C, PE80 için ise 215°C kaynak sıcaklıkları tercih edilmiştir. Birleştirme basıncı değerleri, PE100 için 2 bar, PE80 için 1 bar olarak belirlenmiştir. Bu farklılıklar, boruların erime sıcaklıkları ve viskozite özelliklerindeki farklılıklara dayanmaktadır.

PE100+PE80 kaynak şartlarının belirlenmesi

Yapılan çalışmada, PE80 ve PE100 boruların alın kaynağı işlemi için optimum parametrelerin belirlenmesi amacıyla “Cevap Yüzey Yöntemi (CYY) - Response Surface Method” kullanılmıştır. Bu yöntem, farklı kaynak sıcaklıkları ve birleştirme basıncı seviyeleri arasındaki etkileşimlerin analiz edilmesinde etkili bir araç olarak tercih edilmiştir. PE80 ve PE100 borular için alın kaynağı işlemlerinde kullanılan değişken parametreler ve seviyeleri Çizelge 3’te; sabit parametreler ise Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 3. PE80+PE100 kaynağında ve analizinde kullanılan değişken parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kaynak Sıcaklığı	°C	215	220	225
Birleştirme Basıncı	bar	1 ve 2	1 ve 2	1 ve 2

Çizelge 4. Deney ve analizde kullanılan sabit parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Birim	Seviye 3
Isıtma Süresi	sn	60
Isıtıcı Çıkarma Süresi + Birleştirme Süresi	sn	5
Soğutma Süresi	dk	10
Yürüme Basıncı	bar	15

Çizelge 3 ve Çizelge 4’te verilen parametreler, kaynak işlemi sırasında mekanik performansı etkileyen kritik değişkenleri ve sabit koşulları ifade etmektedir. CYY, Design Expert® yazılımı kullanılarak optimize edilmiş ve deneylerin planlanması için altı farklı kaynak parametresi varyasyonu belirlenmiştir. Bu varyasyonlar Çizelge 5’te özetlenmiştir.

Çizelge 5. PE80+PE100 deney sayısı ve faktörleri

DENEY NO	Kaynak Sıcaklığı (°C)	Birleştirme Basıncı (bar)
1	215	1
2	215	2
3	220	1
4	220	2
5	225	1
6	225	2

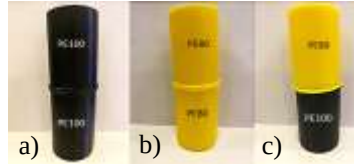
Deney planında, kaynak sıcaklığı 215°C, 220°C ve 225°C, birleştirme basıncı ise 1 bar ve 2 bar seviyelerinde değiştirilerek optimum koşullar araştırılmıştır. Sabit tutulan diğer parametreler, kaynak işlemi boyunca deney sonuçlarının tutarlılığını sağlamak amacıyla dikkatle uygulanmıştır. Deney varyasyonlarına uygun olarak alın kaynağı işlemi gerçekleştirilmiş ve her bir varyasyon için en az üç adet numune hazırlanmıştır. Kaynak makinası, 63 mm dış çaplı ve 5.8 mm et kalınlığına sahip PE80 ve PE100 borular üzerinde çalıştırılmıştır. Çalışmada PE80+100 boruların birleştirme sonunda kabul edilebilir dudak geometrisi oluşturulmuştur, bu geometrik durum kaynak parametrelerinin makro düzeyde doğruluğunu göstermektedir. Kaynaklı bağlantı prosesinde aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

Kaynak aşamaları

Çalışmada, alın kaynağı işlemleri sırasında PE80 ve PE100 boruların birleştirilmesi için her bir kaynak işlemi, standartlara uygun ve belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Farklı HDPE Boruların Alın Kaynağı Prosesinde Optimizasyon Tekniği ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Optimum Parametrelerin Belirlenmesi

Hazırlanan numune görselleri Şekil 2’de verilmiştir. Kaynak makinesinin teknik özellikleri Çizelge 6’da gösterilmektedir.



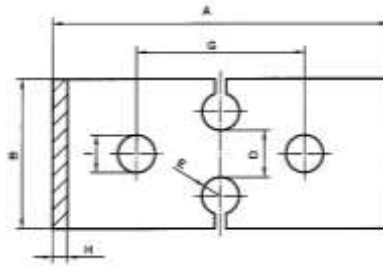
Şekil 2. Kaynak yapılan ürünler a) PE100+PE100 b) PE80+PE80 c) PE80+PE100

Çizelge 6. Kaynak makinası teknik özellikleri tablosu

Teknik Özellikler	Birim	Değer
Kaynatılabilecek Malzeme türleri	-	HDPE, PE, PB, PVDF
Çalışma Aralığı (Ø)	mm	63-200
Güç Kaynağı (gerilim)	V	110-230
Tıraşlama Makinası Gücü	W	1100
Toplam Güç	W	3250
Çevrim	-	4000
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	°C	180-280
Basınç Çalışma Aralığı	bar	0-150

Çekme testi

Kaynaklı birleştirme ile elde edilen her bir numuneye uluslararası standartlarda belirlenmiş çekme, sertlik ve hidrostatik iç basınç testleri uygulanmıştır. PE100+PE100, PE80+PE80 ve PE80+PE100 boru kombinasyonlarının mekanik dayanımlarını değerlendirmek amacıyla öncelikle çekme testleri yapılmıştır. Testler, alın kaynağı yapılan termoplastik boruların çekme dayanımını ölçmek için kullanılan TR ISO 13953 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numuneleri, alın kaynağı işlemi tamamlanan boru parçalarından standartlara uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 3). Tip A deney parçası boyutları kullanılmış ve test numuneleri için ölçüler Çizelge 7’de verilmiştir. Her bir deney için en az üç numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Böylece sonuçların güvenilirliği artırılmıştır.



Şekil 3. Makina ile işlenmiş Tip A çekme deney parçası (Et kalınlığı $e < 25$ mm için, TS ISO 13953)

Çizelge 7. Tip A deney parçasının boyutları (TS ISO 13953)

Özellik	Sembol	Birim	Tip A Deney Parçasının Boyutları	
			Anma dış çapı $d_n \leq 160$	$d_n > 160$
Min. toplam uzunluk	A	mm	180	180
Uçlardaki genişlik (mm)	B	mm	60 ± 3	80 ± 3
Kenarı paralel olan dar kısmın uzunluğu	C	mm	Uygulanmaz	Uygulanmaz
Dar kısmın genişliği	D	mm	25 ± 1	25 ± 1
Yarıçap	E	mm	5 ± 0.5	10 ± 0.5
Tutma yerleri arasındaki ilk mesafe	G	mm	90 ± 5	90 ± 5
Kalınlık	H	mm	Tam et kalınlığı	Tam et kalınlığı
Çekme deliklerinin çapı	I	mm	20 ± 5	20 ± 5

Çekme testleri, numuneleri ISO291 standardına göre hazırlanmış ve çekme cihazında 5 mm/dk hızında teste tabi tutulmuştur (Şekil 5). Elde edilen veriler, her deney parametresi için en az üç kez

tekrarlanmış ve ortalamalar alınmıştır. Şekil 4 ve Şekil 5’te numunelerin hazırlanma süreci ve test cihazı detayları verilmiştir. Test sırasında, her numunenin çekme dayanımı (N/mm^2) hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 9’da özetlenmiştir.



Şekil 4. Çekme testi için hazırlanan numuneler

Marka: Tinius Olsen

Model: H25KS

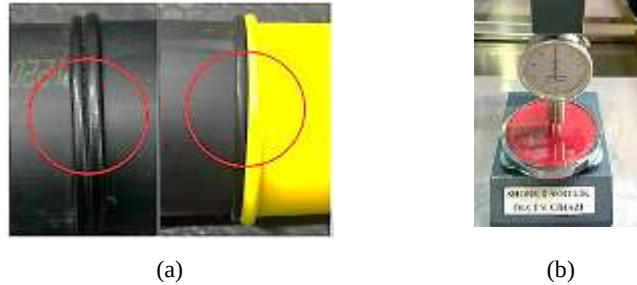
Kapasite: 25000 kN



Şekil 5. Çekme test cihazı ve çene bağlantı düzeneği

Sertlik testi

Ölçümler, Shore D sertlik ölçüm cihazı kullanılarak alınmıştır (Şekil 6b). Her bir deney numunesi için alın kaynak bölgesinden ve ana malzeme bölgelerinden olmak üzere toplamda 20 ölçüm noktası belirlenmiştir (Şekil 11). Her numune üzerinde, kaynak bölgesi ve ana malzeme bölgesi boyunca doğrusal bir hat üzerinde sertlik ölçümleri alınmıştır. Çizelge 10’da farklı kaynak kombinasyonları için sertlik değerlerinin ortalamaları verilmiştir.



Şekil 6. a) Shore D Sertlik testi için numune alınan bölgeler b) Shore D Sertlik Ölçüm Cihazı

Hidrostatik iç basınç testi

Bu test, boruların standart çalışma koşullarından daha yüksek iç basınca maruz kaldığında nasıl bir performans sergilediğini simüle ederek, boru sistemlerinin hizmet ömrü boyunca dayanıklılığını ölçmeyi amaçlar. Testler, ISO 1167 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

PE80 ve PE100 plastik borular ortalama 50 yıl servis ömrü garantisi altında hızlı çatlak yayılma dirençleri mükemmeldir. Bu çalışmada, PE100+PE100, PE80+PE80 ve PE80+PE100 boru kombinasyonlarının alın kaynağı işlemi sonrası uçlarına kör tapalar yerleştirilerek sızdırmaz hale getirilmiştir (Şekil 7). Test numuneleri, 80°C sıcaklıkta su ile doldurularak iç basınca maruz bırakılmıştır. Boru numuneleri, üç farklı basınç seviyesinde (9.2 – 10 ve 11 bar) 165 saat boyunca sabit sıcaklıkta standartlara uygun olarak test edilmiştir. Deney parametreleri ve sonuçları Çizelge 11’de verilmiştir.

Testler sırasında uygulanan basınç değerleri, PE80 ve PE100 malzemelerinin özelliklerine uygun olarak belirlenmiştir. Formül 1’de verilen çevresel gerilme denklemi (ISO 1167-4 Termoplastik borular,

bağlantı parçaları iç basınca karşı direncin belirlenmesi) kullanılarak, deneysel test basınç değerleri hesaplanmıştır:

$$P = 10 \times \sigma \times \frac{2 \times e_{min}}{d_m - e_{min}} \quad (1)$$

P = Deneysel basınç değeri (bar)

σ = Uygulanan basıncın neden olduğu çevre gerilmesi (MPa)

d_m = Deney parçasının ölçülen ortalama dış çapı (mm)

e_{min} = Deney parçasının serbest uzunluğunun ölçülen en düşük et kalınlığı (mm)

Çizelge 8. 80°C Su içinde hidrostatik iç basınca dayanım testi için deney parametreleri (ISO 1167)

PE80		PE100	
Gerilme (σ) (MPa)	Deney Süresi (h)	Gerilme (σ) MPa	Deney Süresi (h)
4.5	165	5.4	165
4.4	233	5.3	256
4.3	331	5.2	399
4.2	474	5.1	629
4.1	685	5.0	1000
4.0	1000	-	-

Formül (1) de değerler yerine konularak yapılan hesaplamalar sonucunda, PE80 malzemesi için hidrostatik test basınç değeri yaklaşık 9.20 bar, PE100 malzemesi için ise 11 bar olarak tespit edilmiştir. Tüm deney numuneleri, Çizelge 8’de verilen ilk satırdaki şarta göre 80°C sıcaklıkta 165 saat boyunca üç farklı basınçta (9.20 bar, 10 bar ve 11 bar) hidrostatik iç basınç testine tabi tutulmuştur (Şekil 7).



Şekil 7. İç basınç testi için kör tapa takılmış numuneler

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çekme testi sonuçları

Çizelge 9’da farklı deney kombinasyonları için elde edilen çekme dayanımı sonuçları verilmiştir.

Çizelge 9. PE80+PE 100 çekme dayanımı deney sonuçları tablosu

Deney No	Kaynak Sıcaklığı (°C)	Birleştirme Basıncı (bar)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
PE100+100	225	2	20
PE80+80	215	1	15
PE80+100			
1	215	1	11.28
2	215	2	11.56
3	220	1	14.77
4	220	2	14.78
5	225	1	16.50
6	225	2	16.55

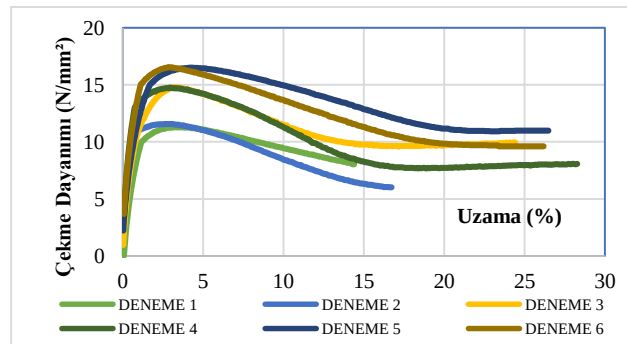
Kaynak sıcaklığının artışı, çekme dayanımı üzerinde pozitif yönde etkili bir parametre olduğu görülmektedir. Birleştirme basıncı ikinci derece bir etkiye sahiptir. PE80+PE100 kombinasyonu, 215°C’de 11.28 N/mm² çekme dayanımı gösterirken, 225°C’de bu değer 16.55 N/mm²’ye kadar

yükselmiştir. Bu artış, yüksek sıcaklıklarda kaynak bölgesinde daha homojen bir füzyon sağlanması ile ilişkilendirilebilir. En yüksek çekme dayanımı, 225°C kaynak sıcaklığı ve 2 bar birleştirme basıncı ile yapılan deneyde (Deney 6) elde edilmiştir. Bu sonuç, PE80 ve PE100'ün farklı fiziksel özelliklerine rağmen uygun kaynak parametreleriyle PE80+80 bağlantısından daha yüksek dayanım sağlayabildiğini göstermektedir. PE100+PE100 kombinasyonu, ortalama 20 N/mm² çekme dayanımı ile en yüksek mukavemeti gösterirken, PE80+PE80 kombinasyonu ise 15 N/mm² ile daha düşük bir mukavemet sergilemiştir. PE80+PE100 kombinasyonu, optimum parametrelerle bu değerlerin ortalamasına yakın bir dayanım göstermiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'de tüm deney kombinasyonları için çekme dayanımı ve %uzama verileri görselleştirilmiştir. Bu grafikler, kaynak sıcaklığı ve basınç seviyelerinin mekanik dayanım üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır. Numunelerin çekme testinde Deney 1 ile 4 arasındaki numuneler ısı tesiri olan bölgeden koptukları tespit edildi. Deney5 ve Deney6 numunelerinde %85 oranında boru bölgesinden kopmuştur (Şekil 8).

Galchun ve ark. (2015) Polietilen boruların kaynağında nano yapılandırılması ve termal özellikleri hakkında çalışma yapmışlar. Farklı molekül ağırlığına sahip polietilen borulara (PE100+PE100, PE80+PE100 ve PE80+PE80) alın kaynak işlemine farklı mekanik ve termal testler gerçekleştirmişler. Yapılan termogravimetrik testler sonucunda sırasıyla maksimum termal bozunma sıcaklıkları, 260, 270 ve 280 °C dir. Diferansiyel taramalı kalorimetre testinde ise polimer zincirlerinin ilk hareketlenmeye başladığı sıcaklık (Tg) sırasıyla 124.34 °C, 118.90 °C ve 117.10 °C dir. Camı geçiş sıcaklıklarından anlaşılacağı üzere kristallik oranı en yüksek ve mekanik dayanımı en iyi olan PE100+PE100 kaynak işlemi yapılan borulardır. PE100+PE80 borular ise mekanik özellik olarak ara değerdedir. Bu çalışma gerçekleştirmiş olduğumuz deneysel çalışmayı doğrular niteliktedir. Uzun ve Kocaman'ın (2018) PE100 boruların üç farklı kaynak sıcaklığı parametresi kullanılarak yaptıkları birleştirme işlemlerinde makroskobik dış görünüşün birbirine benzediği bu nedenle çekme testi ile optimum parametreleri incelemişlerdir. En uygun kaynak sıcaklığının 225°C ve çekme dayanımının ise 18 N/mm² olduğunu tespit etmişlerdir. Kıyaslama için yaptığımız bu çalışmamızda PE100+PE100 boruların 2 bar birleştirme basıncında 225 °C deki çekme dayanımı 20 N/mm² olduğu belirlenmiştir.

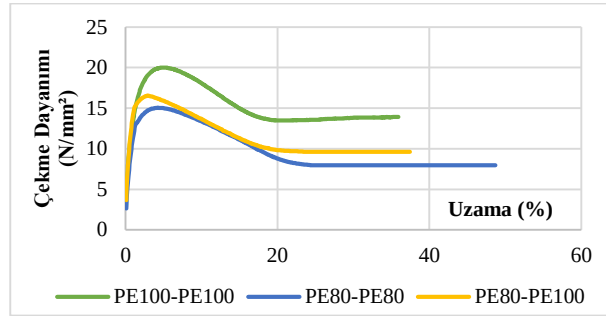


Şekil 8. Çekme test sonuçlarının detaylı gösterimi. a) Deney 1, b) Deney 2, c) Deney 3, d) Deney 4, e) Deney 5, f) Deney 6



Şekil 9. Tüm deneyler için çekme dayanımı- %uzama grafiği

Farklı HDPE Boruların Alın Kaynağı Prosesinde Optimizasyon Tekniği ile Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ve Optimum Parametrelerin Belirlenmesi



Şekil 10. PE80+PE80, PE80+PE100 ve PE100+PE100 çekme dayanımı- %uzama sonuçları

*PE80+PE100 optimum parametreler kullanılarak yapılan testten elde edilen deney 6 sonucu alınmıştır.

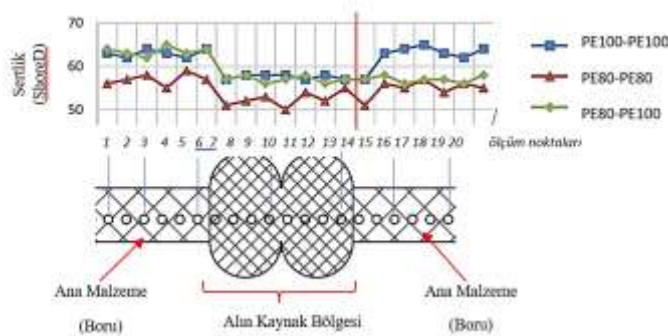
Sertlik testi sonuçları

Ölçümler, doğrusal bir hat boyunca belirlenen 20 noktadan alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Şekil 11’de görselleştirilmiş olan konumlardan elde edilen sertlik sonuçları Çizelge 10’da verilmiştir. Her bir kombinasyonun kaynak bölgesi boyunca ölçülen sertlik değerlerinin dağılımı Şekil 11 görselinde grafiksel olarak gösterilmiştir. Kaynak bölgesinin sertliği genel olarak boru bölgesinden daha yumuşak yani düşük sertlikte olduğu görülmektedir. Ayrıca, PE80+PE100 kombinasyonunda kaynak bölgesinde kaynak sıcaklığı arttıkça sertlikte artış net bir şekilde gözlemlenmiştir.

Çizelge 10. PE100+PE100, PE80+PE80 ve PE100+PE80 alın kaynaklı bağlantı sertlik değerleri

Deneyler	Boru Bölgesi (1)					Alın Kaynak Bölgesi										Boru Bölgesi (2)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PE100+PE100	63	62	64	63	62	64	57	58	58	58	57	58	57	57	63	64	65	63	62	64
PE80+PE80	56	57	58	55	59	57	51	52	53	50	54	52	55	51	56	55	57	54	56	55
PE100+PE80 – 1-215°C	62	63	64	61	62	63	50	48	49	50	48	49	50	48	55	56	57	55	57	56
PE100+PE80 – 2-215°C	64	65	63	62	64	65	50	50	51	49	50	50	51	49	56	57	58	55	56	57
PE100+PE80 – 3-220°C	60	61	62	60	61	62	53	54	52	53	54	53	52	53	54	55	56	56	54	55
PE100+PE80 – 4-220°C	63	64	64	63	65	62	53	53	54	52	53	54	52	53	57	58	56	55	57	58
PE100+PE80 – 5-225°C	61	62	63	60	61	62	56	57	55	56	57	56	55	56	55	56	57	54	55	56
PE100+PE80 – 6-225°C	64	63	62	65	63	64	57	58	56	57	58	56	57	57	58	56	57	57	56	58

*Yüksek sertlik değerleri koyu renkle işaretlenmiştir. Sertlik sıralaması yazımındaki sıraya göre verilmiştir (örn. PE100+PE80 de önce PE100 sonra 80 deki sertlikler verilmiştir).



Şekil 11. Kaynak hattı üzerindeki bölgeler ve sertlikleri

PE100+PE100 kombinasyonu için kaynak bölgesi sertliği 57.5 Shore D, ana malzeme sertliği ise 63 Shore D olarak ölçülmüştür. Bu sertlikteki azalma oranı %8.73; benzer şekilde, PE80+PE80 kombinasyonunda kaynak bölgesi sertliği 52.25 Shore D, ana malzeme sertliği ise 57 Shore D olarak

tespit edilmiştir. Sertlikteki azalma oranı %8.33 olarak belirlenmiştir. Kaynak sıcaklığı arttıkça ve birleştirme basıncı optimize edildikçe sertlik değerleri yükselmiştir. Deney 1’den Deney 6’ya kadar kaynak bölgesi ortalama sertlik değerleri sırasıyla 49, 50, 53, 53, 56 ve 57 Shore D olarak ölçülmüştür.

En yüksek kaynak bölgesi sertliği, 225°C kaynak sıcaklığı ve 2 bar birleştirme basıncı ile yapılan 6. deneyde elde edilmiştir. Bu değer, PE100+PE100 kombinasyonunun sertlik seviyesine aynı zamanda PE80 boru ana sertliğine (57 Shore D) oldukça yakın gerçekleşmiştir. Sertlikteki bu artış, yüksek sıcaklıklarda daha homojen bir kaynak yapısının oluştuğunu ve PE100’ün sertlik değerlerinin PE80 ile uyumlu hale geldiğini göstermektedir.

Hidrostatik iç basınç testi sonuçları

Test sonuçları, boruların sızıntı, deformasyon ve patlama gibi hasar belirtileri göstermemesi üzerine değerlendirilmiştir. Bu kriterlere uygun olan sonuçlar, boru bağlantılarının uzun vadeli dayanıklılığı açısından olumlu bir performans sergilediğini göstermektedir.

Yapılan 20 farklı hidrostatik iç basınç testi (80°C’de 165 saat sonundaki) Çizelge 11’de verilmiştir. Test sonucunu “Başarılı” olarak tamamlayan ve ayrıca test süresi dolmadan hasar görerek “Başarısız” olan deney numuneleri de tabloda verilmiştir. Başarısız deney numunelerinin test tamamlama süreleri ayrıca belirtilmiştir. Hidrostatik iç basınç verilerine göre 9.2 ve 10 bar basınçlarda hasar olmadan test tamamlanırken, 11 bar gibi yüksek basınçta ise 225°C de 1 ve 2 bar birleştirme basınçlarında 165 saati hasarsız tamamladıkları görülmektedir. PE100 için istenen standart 11 bar basınç değerini PE80+PE100 kaynaklı bağlantı hasarsız geçmiştir.

Çizelge 11. Hidrostatik iç basınç test sonuçları

Deney No	Kaynak Sıcaklığı (°C)	Birleştirme Basıncı (bar)	Hidrostatik Test Basıncı (bar)	Sonuç (80°C - 165 h)
PE100+PE100	225	2	11	Başarılı
PE80+PE80	215	1	9.20	Başarılı
PE80+100				
1	215	1	9.20	Başarılı
2	215	2		Başarılı
3	220	1		Başarılı
4	220	2		Başarılı
5	225	1		Başarılı
6	225	2		Başarılı
1	215	1	10.00	Başarılı
2	215	2		Başarılı
3	220	1		Başarılı
4	220	2		Başarılı
5	225	1		Başarılı
6	225	2		Başarılı
1	215	1	11.00	Başarısız (80 h)
2	215	2		Başarısız (95 h)
3	220	1		Başarısız (110 h)
4	220	2		Başarısız (130 h)
5	225	1		Başarılı
6	225	2		Başarılı

Akkurt ve Ertürk (2010) “Sıcak eleman alın kaynak yöntemi ile birleştirilmiş PE doğalgaz borularının güvenilirliklerinin araştırılması” başlıklı çalışmada 225-315 mm nominal çaplı PE80 ve PE100 plastik boruların alın kaynak bağlantısını çalışmışlardır. Kaynak parametreleri 2 bar birleştirme basıncında, 230°C kaynak sıcaklığında ayrı ayrı kaynaklanmış çekme, eğme, katlama ve hidrostatik iç basınç testleri uygulamışlar ve çalışma sonunda hasar durumları incelenmiştir. Hidrostatik iç basınç

testlerinde 80°C de 165h ve 1000h; 20°C de 100h testlerinde PE100+PE100 ve PE80+PE80 bağlantılarda hasarsızlık sonucu tespit etmişlerdir.

Demchenko ve arkadaşları (2017) yapmış oldukları başka bir çalışmada ise, yine farklı molekül ağırlıklarına sahip polietilen borular (PE100+PE100, PE80+PE100 ve PE80+80) alın kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra kaynaklı borular geniş açılı X ışını saçınımı (waxs) testine tabi tutulmuş ve test sonucunda % kristallik oranı derecelerini belirlemişlerdir. PE100+PE100 alın kaynağı yapılan boruların mekanik dayanımı diğer bağlantılardan daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada uzun bir süre (bir yıl) içinde sadece amorf değil aynı zamanda kristal fazın da gevşediğini (kristalin α -formunun karışık $\alpha\beta$ -formuna dönüştüğü) göstermiştir.

Cevap Yüzey Yöntemi Analiz Sonuçları

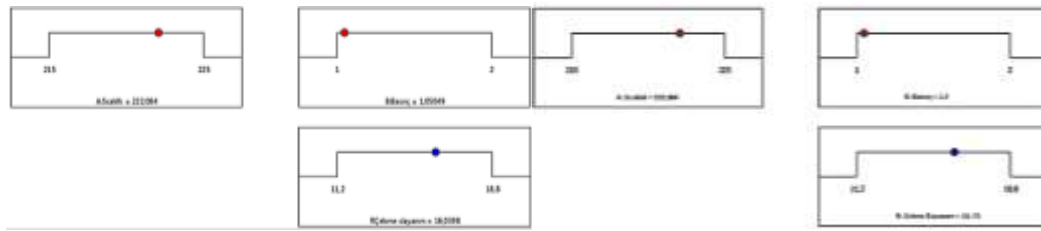
CYY, kaynak sıcaklığı ve birleştirme basıncı gibi bağımsız değişkenlerin, kaynak bölgesinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini analiz ederek optimum parametreler belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan değişken parametreler ve seviyeler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

1. Kaynak Sıcaklığı (°C): 215, 220 ve 225
2. Birleştirme Basıncı (bar): 1 ve 2

Modelin analizi sırasında, çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikler hedef olarak belirlenmiş ve optimum koşulları sağlayan değişken kombinasyonları hesaplanmıştır.

Şekil 12, CYY'nin analiz sonuçlarını ve optimum koşulları görsel olarak göstermektedir. Grafikte, kaynak sıcaklığı ve birleştirme basıncı parametrelerinin mekanik dayanım üzerindeki etkileri ve modelin önerdiği optimum değerler açıkça görülmektedir.



Şekil 12. Cevap Yüzey Yönteminin verdiği optimum proses değerleri

Analiz sonucunda 222°C ve 1.05 bar basınçta 16.04 N/mm² çekme dayanımı elde edilebileceğini, şayet aynı sıcaklıkta 1.2 bar basınçta ise en yüksek 16.55 N/mm²'lik çekme dayanımına ulaşılabilirliğini tespit etmiştir. Elde edilen bu veriler doğrulama deneyleri ile yeniden üretimi gerçekleştirilmiş ve Çizelge 12'de sunulmuştur. Doğrulama test sonuçları ilk çalışmada yapılan (225°C ve 1 ve 2 bar) sonuçlarla uyumluluk göstermektedir. 222°C de, 1.2 bar birleştirme basıncıyla 16.50 N/mm² çekme dayanımını elde edilmiş ve 165 saatlik hidrostatik iç basınç testini de hasarsız başarıyla tamamlamıştır.

Çizelge 12. Optimum parametrelerle göre yapılan doğrulama deney sonuçları

Özellik	Birim	Opt. Parametrelere Göre Doğrulama Deney Sonucu
Alın Kaynak Sıcaklığı	°C	222
Sertlik	ShoreD	58
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	N/mm ²	16.5
Birleştirme basıncı	bar	1.2
Hidrostatik İç Basınç	bar	Hasarsız Tamamlandı (165h)

Yapılmış farklı bir çalışmada Cevap Yüzey Yöntemi kullanılarak PE100+PE100 boru malzemelerin alın kaynağı ve analizi prosesinde optimum kaynak parametreleri tespit edilmiş alın kaynak sıcaklığı 222°C de ve 1.47 bar birleştirme basıncında 119 sn bekleme-soğuma süresinde en

yüksek çekme dayanımını (19.5 N/mm^2) tespit etmişlerdir. Doğrulama deneyi ile çekme dayanımı %99.5 doğrulukla yakın sonuç vermiştir (Dağlı ve ark., 2023-2).

SONUÇ

Yapılan çalışmada farklı HDPE türü olan PE80 ve PE100 boruların kaynaklanabilirliği üzerine farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. Birleştirme için optimum kaynak parametreleri hem deneysel hem de analiz yoluyla belirlenmeye çalışılmıştır. Parametrelerin alın kaynak bağlantısına olan etkileri mekanik ve hidrostatik iç basınç deneyleriyle gerçekleştirilmiştir. Üç farklı kaynak sıcaklığı ($215, 220, 225^\circ\text{C}$) ve iki farklı birleştirme basıncı (1 ve 2 bar) kullanılarak 6 farklı parametrede PE80+PE100 boru bağlantılarından elde edilen sonuçlar aşağıda çıkarılmıştır.

- Çekme Dayanımı: PE80+PE100 deney kombinasyonunda alın kaynak parametreleri değişimi ile %46.7 oranında çekme dayanımında artış göstermiştir. 225°C ve 2 bar basınçta en yüksek çekme dayanımı (16.55 N/mm^2) elde edilmiştir.

- Sertlik Değerleri: Kaynak sıcaklığı ve birleştirme basıncı arttıkça sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Kaynak bölgesindeki sertlik değerleri, ana malzemeye kıyasla yaklaşık %8 'lik bir düşüş göstermiştir. Kaynak bölgesindeki en yüksek sertlik değeri 225°C ve 2 bar birleştirme basıncıyla elde edilmiştir. PE80+PE100 deney kombinasyonunda %16'lık sertlik artışıyla 57 Shore D değeri ölçülmüş bu değer PE80 sertliğine en yakın değerdir.

- Hidrostatik İç Basınç Testi: PE80+PE100 alın kaynaklı bağlantılar için yapılan hidrostatik iç basınç testlerini tüm numuneler 9.2 ve 10 bar basınç altında başarıyla geçmiştir. PE100 borular için verilen 11bar basınç şartını ise sadece 225°C kaynak sıcaklığındaki 1 ve 2 bar birleştirme basınçlı numuneler hasarsız olarak tamamlamıştır.

- Cevap Yüzey Yöntemi: Cevap Yüzey Yöntemi kullanılarak, PE80+PE100 kombinasyonu için optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Optimum kaynak parametreleri 222°C kaynak sıcaklığı ve 1.2 bar birleştirme basıncında en yüksek çekme dayanımı 16.55 N/mm^2 hesaplanmıştır. Optimum kaynak parametreleriyle yapılan doğrulama deneylerinde, ortalama 16.50 N/mm^2 çekme dayanımı, 58 Shore D sertlik değeri ve hidrostatik iç basınç testini hasarsız başarıyla tamamlamıştır. CYY analizi kaynak parametreleri arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya koyarak, PE80+PE100 kombinasyonunda mekanik dayanımını %99.7 doğrulukla belirlemiştir.

Genel olarak, bu çalışmanın sonuçları, PE80+PE100 borularının alın kaynağı işlemi sonrası mekanik özelliklerinin doğru parametreler kullanıldığında önemli ölçüde iyileştirilebileceğini deneysel ve istatistiksel olarak göstermektedir. Bu bulgular, farklı PE boru birleştirme işlemlerinin kaynak parametrelerinin doğru optimizasyonu ile sağlanabildiğini göstermektedir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

Akkurt A., İ. Ertürk İ., (2010). Sıcak Eleman Alın Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş PE Doğalgaz Borularının Güvenirliklerinin Araştırılması, Pamukkale Üni.Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 16, Sayı 2, s.221-233.

- Bayrakçıl, M. D., Bodur, O., Klein, M., Walcher, E.-M., Poszvek, G., & Jalowiec, M. (2024). Characterization of Polyethylene Pipe Properties Through Advanced Metrology Techniques. In ISPR 2023, LNME. DOI:10.1007/978-3-031-53991-68.
- Cai, S., Yuan, H., Cui, Y., Zhang, Y., & Siddiqui, A. A. (2011). Control System Design of Automatic Butt Fusion Welding Machine for Polyethylene Pipe. IEEE. DOI:10.1109/ICIEA.2012.6361038.
- Dağlı, M., Demirer, A., & Yumat, E. (2023). HDPE Boruların Alın Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Birleşme Mukavemetine Etkisinin Yüzey Cevap Metodu ile Optimizasyonu. AKU İJETAS. Vol.6 (2), pp.95-109, December 2023. DOI:10.53448/akuumubd.1289128
- Dağlı M., Demirer A., Yumat E., (2023-2). Alın Kaynağı Uygulanmış PE100 Borularda Optimum Kaynak Parametresinin Mekanik ve Ömür Testi İncelemesi, 11th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference, s.751-759, December 13-15, Mardin, Türkiye.
- Demchenko V., Iurzhenko M., Shadrin A., Galchun A., (2017). Relaxation behavior of polyethylene welded joints, Nanoscale Research Letters, 12:280, DOI 10.1186/s11671-017-2059-z
- Galchun, A., Korab, N., Kondratenko, V., Demchenko, V., Shadrin, A., Anistratenko, V., & Iurzhenko, M. (2015). Nanostructurization and Thermal Properties of Polyethylenes' Welds. Nanoscale Research Letters, 10:138.
- Guo, W., Shi, J., & Hou, D. (2016). Research on Phased Array Ultrasonic Technique for Testing Butt Fusion Joint in Polyethylene Pipe. Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute. DOI:10.1115/PVP2013-97205.
- Haroon, M., Jia, Y.-F., Lai, H., Jiang, W., & Tu, S.-T. (2019). Welding Residual Stress in HDPE Pipes: Measurement and Numerical Simulation. Journal of Pressure Vessel Technology. DOI:10.1115/1.4043463.
- Hawkeye Industries Inc. (2008). Fabricated Fitting Butt Fusion Procedure, Technical Bulletin: TB-0308-FF, FPR IDC and NIDC Fittings. Kim, J.-S., Oh, Y.-J., Choi, S.-W., & Jang, C. (2019). Investigation on the Thermal Butt Fusion Performance of Buried HDPE Piping in Nuclear Power Plants. Nuclear Engineering and Technology. DOI:10.1016/j.net.2019.02.002.
- Montgomery Douglas C., (2020). Design and Analysis of Experiments, Wiley, 10. Baskı, Bölüm 11-13, ISBN-10 : 1119722101.
- Pathak, S., & Pradhan, S.K. (2020). Experimentation and Optimization of HDPE Pipe Electro Fusion and Butt Fusion-Welding Processes. Materials Today: Proceedings.
- Starostin N. P., Ammosova, O. A. (2009). Thermal Processes in Butt-Welding Polyethylene Pipe at Low Ambient Temperatures, Russian Engineering Research. Vol.29 (1), p.12–16.
- Sun, Y., Jia, Y.-F., Haroon, M., & Tu, S.-T. (2019). Measurement and Analysis of Residual Stress in HDPE Pipe Welds. ASME Journal of Pressure Vessel Technology.
- Tan, N. (2021). Deformation transitions and their effects on the long-term performance of polyethylene and its pressure pipe, Doktora tezi, Alberta Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü
- Uzun H., Kocaman A. G., (2018). HDPE 100 Boruların Sıcak Eleman Alın Kaynağıyla Birleştirilmesinde Kaynak Sıcaklığı Parametresinin Birleştirme Mukavemetine Etkisi, Academic Perspective Procedia , Vol.1, Issue 1, p.168-177, Journal e-ISSN:2667-5862, DOI : 10.33793/acperpro
- Zhang, Y., & Jar, P.-Y. B. (2016). Comparison of Mechanical Properties Between PE80 and PE100 Pipe Materials. Journal of Materials Engineering and Performance. DOI:10.1007/s11665-016-2274-2.