

AKÜ İJETAS Cilt 6(2) (2023) Aralık (95-109 s)  
DOI:10.53448/akuumbd.1289128

AKU İJETAS Vol 6(2) (2023) December (95-109 pp)

Araştırma Makalesi / Research Article  
e-ISSN 2667-4165 (<https://dergipark.org.tr/akuumbd>)

## HDPE Boruların Alın Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Birleşme Mukavemetine Etkisinin Yüzey Cevap Metodu ile Optimizasyonu

Muhammet DAĞLI<sup>1\*</sup>, Ahmet DEMİRER<sup>2</sup>, Esra YUMAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Türkiye

<sup>3</sup>Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Türkiye

e-posta\*: muhammetdagli@gmail.com  
e-posta: ademirer@subu.edu.tr  
e-posta: yumatesra@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1336-903X>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1252-9203>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7662-9142>

Geliş Tarihi: 05.05. 2023 ; Kabul Tarihi: 07.07. 2023

### Öz

**Anahtar Kelimeler**  
Alın kaynak; PE100;  
Yüzey Cevap  
Metodu.

Yapılan çalışmada HDPE malzeme sınıfından olan ve yeraltı su ve gaz naklinde yoğun olarak kullanılan PE100 malzemenin deneysel olarak alın kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç farklı kaynak sıcaklığı, üç farklı birleştirme basıncında ve üç farklı ısıtma süresi kullanılarak kaynaklı bağlantı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler istatistiksel veri analiz programında (Design Expert 12®) değerlendirilerek ele alınmıştır. Çalışmada değişken seçimimiz ve parametrelerimiz farklı olup "Yüzey cevap metodu" (RSM) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen optimum parametreler ile üretilmiş olan numuneler hem çekme testi hem de hidrostatik mukavemet testlerine tabi tutularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Alın kaynağı sonucunda optimum parametreler (223°C, 15 bar, 120 sn) belirlenmiş ve maksimum çekme dayanımı değerinin, 19,50 MPa olduğu tespit edilmiştir.

## Optimization of the Effect of Welding Parameters on Joint Strength in Butt Welding of HDPE Pipes by Surface Response Method

### Abstract

**Keywords**  
Butt welding;  
PE100; Response  
Surface Method  
(RSM).

In the study, butt welding process of PE100 material, which is of HDPE material class and is used extensively in underground water and gas transportation, has been carried out experimentally. In the study, welded joints were performed using three different welding temperatures, three different joint pressures and three different heating times. The data obtained were evaluated and handled in the statistical data analysis program (Design Expert 12®). In the study, our variable selection and parameters are different, and optimization was carried out with the "Response Surface Methodology" (RSM). The samples produced with the optimum parameters obtained were subjected to both tensile test and hydrostatic strength tests and the results were evaluated. As a result of butt welding, optimum parameters (223°C, 15 bar, 120 sec) were determined and the maximum tensile strength value was determined to be 19.50 MPa.

## 1. Giriş

Günümüzde çeşitli sıvıların (petrol, doğalgaz ve içme suyu vb.) dağıtım hatlarında, polietilen borular yüksek dayanıklılık, korozyon direnci, esneklik ve hafiflik gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Walsh, 2017). Ek olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) hammaddesi, alçak yoğunluklu polietilene kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu için yüksek basınca maruz bırakılacak uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Frederick ve diğerleri, 2009). Boruların birbirine eklenmesi amacı ile elektro ve alın olmak üzere iki tür füzyon çeşidi kullanılmaktadır (Chen ve diğerleri, 1997). Sıcak alın kaynak füzyon işlemi, birbiri ile birleştirilecek her iki borunun da temas yüzeylerinde yumuşama noktasına ulaşılan kadar ısıtılmasını içeren bir termo-füzyon yöntemidir (Doaei, 2018). Ek olarak, farklı et kalınlığındaki boruların birleştirilmesi için elektrofüzyon metodu kullanılırken, aynı et kalınlığındaki borular için ise, sıcak eleman alın kaynağı kullanılmaktadır (Akkurt, 2013).

Bu konuda yapılmış makale çalışmaları literatürde taranarak aşağıda verilmiştir.

Sheng ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, alın kaynak işlemi ile birleştirilmiş olan polietilen boruların bağlantı bölgelerinde oluşan soruna yönelik kaynak işlemi kusurlarının etkisi araştırılmıştır. Orta yoğunlukta polietilen (MDPE) hammaddesi ile üretilmiş borular kullanılmıştır. MDPE hammaddeli alın kaynak yöntemi ile birleştirilmiş olan boruların, boru bağlantılarının kalitesi kaynak hatalarından önemli derecede etkilenmektedir. Bu makalede yanlış kaynak işlemi sonucunun, MDPE boru bağlantıları üzerindeki etkisini göstermek amacı ile, çekme, eğme, ezilme ve yorulma testleri uygulanıp yorumlanmıştır. Üç farklı çapta ( $\emptyset$  110-225-315) SDR11, MDPE borular kullanılmıştır. Çekme testi,  $\emptyset$ 110 ve 315 mm boruların alın kaynak işlemi sonrası elde edilen numunelere uygulanmıştır. Her bir çap için ayrı ayrı üçer numune alınıp çekme testine tabi tutulmuştur. Birinci numunede, kaynak işlemi sorunsuz yapılmıştır. İkinci numunede ise, yapılan kusurlu kaynak işlemi sonrası küresel hata oluşmuştur.

Üçüncü numune, yanlış kaynak işlemi sonucu oluşan çizgisel kusura sahip numunedir. Eğme ve ezilme testleri de bu şekilde yapılarak sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen verilerden, sadece bir tane oluşan kaynak hatasının bile uzun süreli kullanımda boruların bağlantı bölgelerinde arızalanmaları hızlandırdığı sonucuna ulaşılmıştır (Sheng ve diğerleri, 2016).

Tarek ve arkadaşlarının yapmış olduğu bilimsel çalışmada ise, polietilen boru malzemeleri için uygulanan gerinim oranı (%birim şekil değiştirme), kalınlık ve kaynağın kırılma tokluğu (J-R) eğrisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Makalenin amacı, alın kaynak metodu ile bağlantı işlemleri gerçekleştirilmiş olan HDPE (SDR11,  $\emptyset$ 315 mm) boruların gerinim oranı, numune kalınlığı ve kaynağın kırılma tokluğu üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Çekme testi alın kaynak işlemli numunelere ve kaynak olmamış numunelere uygulanıp karşılaştırılmıştır. Çekme testi numuneleri, farklı vida hızları (10-500 mm/dk) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan alın kaynak işlemi parametreleri şu şekildedir: kaynak sıcaklığı 220°C, ısıtma basıncı 13 bar, dengeleme süresi 13sn, ısıtma süresi 286 sn, basınç oluşturma süresi 15 sn, soğuma süresi 2100 sn ve füzyon süresi 2115 sn olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, çekme cihazı vida hızının hem kaynaklı hem kaynaklı olmayan numunelerin kırılma tokluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir (Tarek ve diğerleri, 2014).

Bir başka deneysel çalışmada ise, Chai Z. ve arkadaşları spor havuzunda su temini için kullanılacak HDPE boru hattının sıcaklık alan dağılımı simülasyonu üzerine inceleme yapmışlardır.  $\emptyset$ 200 mm HDPE (SDR17), boru malzemeleri kullanılmıştır. Kaynak basıncı (0,2 MPa), ısıtma süresi (70-120 sn), ısıtıcı çıkarma süresi (6-8 sn), soğutma süresi (10-16 dk) ve farklı kaynak sıcaklık değerleri (190-240°C) kullanılarak alın kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. En iyi kaynak kalitesi için çalışılması gereken parametreler, 0,2 MPa kaynak basıncı, 210-230°C

kaynak sıcaklığı aralığı olarak belirlemişlerdir (Chai ve diğerleri, 2018).

Uzun ve Kocamanın yapmış olduğu başka bir literatür çalışmasında ise, HDPE 100 boruların sıcak eleman alın kaynağıyla birleştirilmesinde kaynak sıcaklığı parametresinin birleştirme mukavemetine etkisi incelenmiştir. Malzeme olarak dış çapı  $\varnothing 120$  mm olan SDR12 HDPE 100 borular kullanılmıştır. Sadece kaynak sıcaklıkları değiştirilerek ( $200^{\circ}\text{C}$ ,  $225^{\circ}\text{C}$  ve  $250^{\circ}\text{C}$ ), diğer kaynak parametreleri sabit tutulup, sıcak plaka kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir (yanaştırma ve birleştirme basıncı 6 bar, yanaştırma süresi 25 sn, ısıtma süresi 120 sn, ısıtıcı çıkartma ve birleştirme süresi 6 sn ve soğutma süresi 12 sn). Farklı kaynak sıcaklık parametreleri ile alın kaynak işlemine tabi tutulan borulardan standarda uygun olarak hazırlanmış olan deney numunelerine çekme testi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonuçlarına göre, kaynak sıcaklığı  $225^{\circ}\text{C}$  olarak seçilen birleştirmede, diğerlerine göre daha yüksek çekme mukavemeti (18 MPa) değeri elde edilmiştir (Uzun & Kocaman, 2018).

Cocard ve arkadaşları istatistiksel veri analiz programı (minitab) kullanarak, yüzey cevap metodu ile Polietilen (HDPE-PE100) boru hatları için optimum kaynak prosedürünün oluşturulması üzerine çalışma yapmışlardır.  $\varnothing 110$  mm SDR 11 HDPE boru kullanılmıştır. Değişken parametreleri olarak, (yanaştırma basıncı ( $P_1$ ) 0,6-2 MPa, yanaştırma süresi ( $t_1$ ) 10-30 sn, ısıtma süresi ( $t_2$ ) 80-140 sn, birleştirme süresi ( $t_3$ ) 10-780 sn ve kaynak sıcaklığı  $200$ - $230^{\circ}\text{C}$ ) kullanılarak, toplamda 32 adet deney gerçekleştirilmiştir. Ek olarak numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucu optimum çalışma parametreleri,  $P_1$ : 1,55 MPa,  $t_1$ : 30sn,  $t_2$ : 140 sn,  $t_3$  : 212sn ve kaynak sıcaklığı : $200^{\circ}\text{C}$  olarak bulunmuştur (Cocard ve diğerleri, 2009).

Akkurt ve arkadaşı sıcak alın kaynak yöntemi ile farklı sıcaklıklarda birleştirilen PE doğalgaz transfer hatlarının güvenilirliklerinin araştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. 125 mm çaplı PE100 boruların birleştirme işlemleri farklı ortam sıcaklıklarında ( $-25^{\circ}\text{C}$  ile  $+60^{\circ}\text{C}$  arasında) gerçekleştirilmiştir. Ortam

sıcaklığı hariç tüm parametreler sabit olarak seçilmiştir. Ortam sıcaklık farklarının kaynak kalitesine etkisi araştırılmıştır. Numuneler hem çekme hem de hidrostatik iç basınç testine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucu, ortam sıcaklığının kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yapılan çekme testlerinde  $-15^{\circ}\text{C}$  ve altındaki ortam sıcaklıklarında yapılan kaynak işlemlerinde kaynak bölgesinde kopmalar meydana gelirken, diğer tüm ortam sıcaklıklarında kaynak bölgesi dışında kopmalar meydana gelmektedir (boru üzerinde). En iyi kaynak işlemi  $45^{\circ}\text{C}$  civarındaki ortam sıcaklığında bulunmuştur. Maksimum çekme kuvveti 8000 N, kopma kuvveti ise 4000 N olarak bulunmuştur. Hidrostatik iç basınç testlerinde ise,  $-15$ ,  $-20$  ve  $-25^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında kaynak işlemi gerçekleştirilen numunelerin iç basınç testi sonucunda kaynak bölgesi kısımlarında kopmalar meydana gelirken,  $-10^{\circ}\text{C}$  üzerindeki sıcaklık ile gerçekleştirilen kaynak işlemi sonrası iç basınç testi uygulanan numunelerde ise kopma kaynak kısmı dışında (boru kısmında) gerçekleşmiştir (Akkurt & Saraç, 2015). Pathak ve arkadaşları ise HDPE boru ( $\varnothing 82$  mm, 8 mm kalınlık) elektrofüzyon ve alın kaynak proseslerinin denenmesi ve optimizasyonu üzerinde çalışma yapmıştır. Deneysel çalışmalar istatistiksel veri analiz programı olan minitab kullanılarak, elektrofüzyon ve alın kaynak içinde ayrı ayrı 9 deney gerçekleştirilmiştir. Elektrofüzyon kaynak için değişken parametreler, kaynak voltajı (38,5-40,5V), temas süresi (140-160 sn), soğuma süresi (8-12 dk) olarak belirlenmiş ve sıcaklık dağılımına olan etkileri incelenmiştir. Alın kaynak işlemi için ise, değişken parametreler olarak kaynak sıcaklığı ( $210$ - $220^{\circ}\text{C}$ ), yaklaşma basıncı (18-22 bar) ve kaynak basıncı (20-30 bar) olarak belirlenmiş, sıcaklık dağılımı ve gerilme direncine olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elektrofüzyon ( $39,5$ - $150^{\circ}\text{C}$  -12 dk) ve alın kaynak ( $215^{\circ}\text{C}$  – 18 bar- 20 bar) yöntemleri için, optimum parametreler belirlenmiştir (Pathak & Pradhan, 2020).

Design Expert programının kullanıldığı literatür taramaları ise aşağıda açıklanmaktadır;

Ergül ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir başka çalışmada ise, üç farklı akım değeri (4, 8 ve 12 A), akım uygulama süresi (3, 6 ve 9 saat) ve ortam sıcaklığında (20, 25 ve 30 °C) Box-Behnken tasarımı dikkate alınarak yapılmıştır. Deneylerden elde edilen yanıtlar Design Expert 11.0.5 programında analiz edilerek HST (sargı en sıcak nokta sıcaklığı) için matematiksel bir tahmin modeli geliştirilmiş ve parametrelerin optimum değerleri elde edilerek maksimum HST tahmin edilmiştir (Ergül ve diğerleri, 2019).

Hilmioğlu'nun yapmış olduğu bir başka çalışmada ise, sıcaklık (60, 70, 80 °C), katalizör miktarı (0.1-0.55-1 %) ve reaktan başlangıç molar oranının (1:1, 3:1, 5:1) asit dönüşümü üzerindeki etkileri Design Expert programı kullanılarak incelenmiştir. Etil asetat sentezi Design Expert program ile optimize edilmiştir. Deneysel veriler ile model verilerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür (Hilmioğlu, 2022).

Bu makalede yapılan çalışmada HDPE malzeme sınıfından olan ve yeraltı su ve gaz naklinde yoğun olarak kullanılan PE100 malzemenin deneysel olarak alın kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada üç farklı kaynak sıcaklığı, üç farklı birleştirme basıncı ve üç farklı ısıtma süresi kullanılarak HDPE 100 boruların kaynaklı bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler istatistiksel veri analiz programında (Design Expert 12®) değerlendirilerek ele alınmıştır. Çalışmada değişken seçimimiz ve parametrelerimiz farklı olup "Yüzey cevap metodu" (RSM: Response Surface Metot) ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen optimum parametreler ile üretilmiş olan numuneler hem çekme testi hem de hidrostatik mukavemet testlerine tabi tutularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın literatürden özgünlüğü ise, deneysel verilerin cevap (çekme dayanımı) üzerindeki etkisinin Design Expert programı kullanılarak incelenmesidir. Ek olarak yapılan çekme ve hidrostatik basınç testi öncesi ve sonrası numunelerin verisel karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Malzeme

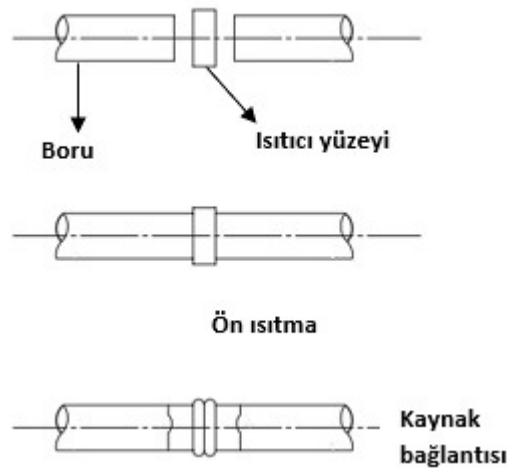
Sıcak elaman alın kaynak yöntemiyle birleştirilen HDPE (PE100) borunun özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Birleştirilecek borunun et kalınlığı 10 mm, dış çapı Ø110 mm (SDR11) ve boyu 100 mm olarak seçilmiştir.

**Tablo 1.** HDPE (PE100) boru malzemesinin mekanik özellikleri

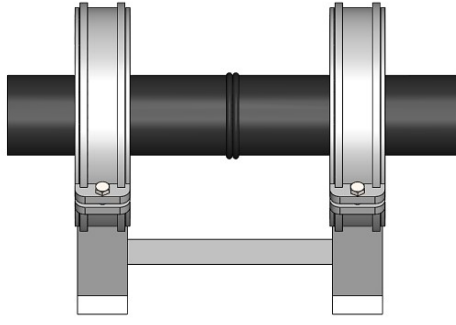
Teknik Özellikler	PE 100	Birim	Standart
Yoğunluk	0,957	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Viskozite değeri	360	cm <sup>3</sup> /g	ISO 1628-3
Erime Akış Hızı (MFR) 190°C/5 KG	0,20-0,60	g/10dak	ISO 1133
Karbon siyahı oranı	2-2,3	%	ISO 6964
Karbon siyah dağılımı	3		ISO 18553

### 2.2. Yöntem

İlk aşamada kaynak ile birleştirilecek olan PE100 malzemeden boru numuneler elektrikli testere yardımı ile 200 cm boyunda kesilmiştir. Alın kaynak işlemi için numuneler kaynak makinasına Şekil 1'de ki gibi konumlandırılarak yapılmaktadır. Şekil 2'de bu konumlama işleminin bir fikstür yardımı ile boruların aynı eksene nasıl getirildiği gösterilmektedir. Alın kaynak işleminde kullanılan kaynak makinesinin özellikleri de Tablo 2'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Plastik alın kaynak işlemi aşamaları görseli (Shapheek & Shrivastava, 2020)

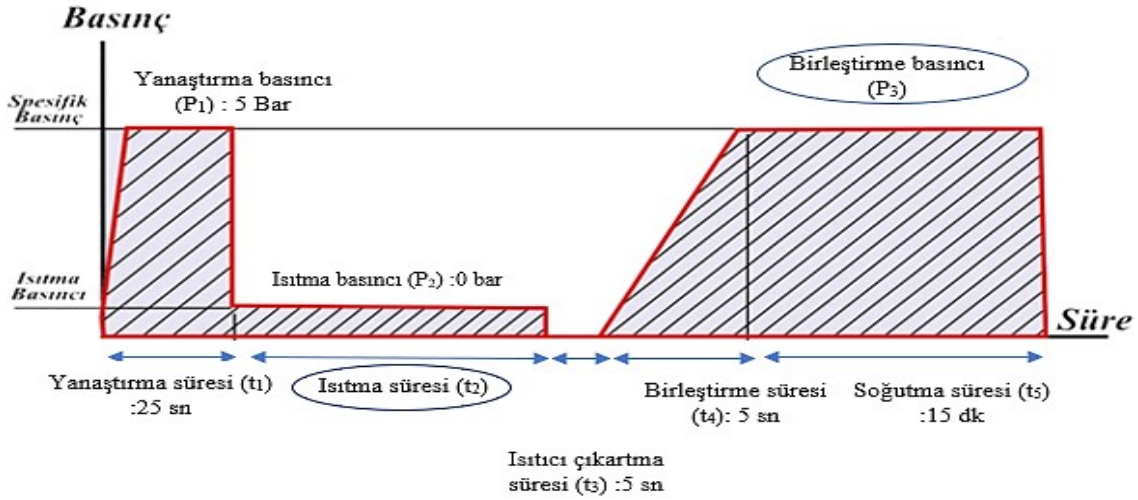


**Şekil 2.** PE100 boruların alın kaynak işlemi için fiyestüre alınması görseli

**Tablo 2.** Plastik Alın Kaynak Makinesi Özellikleri

<b>Kaynatabileceği Maksimum Et Kalınlığı (Basınç Grubu)</b>	PN 16
<b>Isıtıcı Elektrik Gücü</b>	230 V – 1,5 kW
<b>Tıraşlayıcı Elektrik Gücü</b>	230 V – 0,81kW
<b>Toplam Elektrik Sarfiyatı</b>	2,3 kW

Alın kaynak işlemi kısaca tarif edersek üç adımda gerçekleşir. İlk adımda birleştirilecek boru yüzeylerinin paralellığı için tıraşlanması, ikinci adımda ısıtıcı disk formundaki elemanın birleştirilecek boruların arasına yerleştirilmesi ile



**Şekil 3.** Sıcak eleman alın kaynak işleminin basınç-süreye bağlı uygulama aşaması

Deneysel çalışmamızda istatistiksel veri analiz programı olarak Design Expert12® yazılım programı kullanılmıştır. Yüzey Cevap Yöntemi olan istatistiksel veri analiz programı ile sistemin cevabını etkileyen çok sayıda değişken bir arada ve eşzamanlı olarak incelenebilmekte ve prosesin işlem parametrelerindeki değişime verdiği cevap-yanıt en az sayıda deneme yapılarak en iyi şekilde

ergime noktasına getirilmesi işlemi ve sonrasında ise ısıtıcı diskin aradan çıkarılarak boruların basınçla birbirine eksen boyunca itilerek katılma süresince bekletilmesi işlemidir. İlk adımdaki tıraşlama işlemi sonrasında Şekil 3'te görüldüğü üzere ısıtıcı disk araya girerek bir yanıştırma işlemi,  $P_1$  basıncı altında ve  $t_1$  süresi boyunca yapılmaktadır. Daha sonra ise, ikinci aşama olan basınçsız ( $P:0$ ) ısıtma bölümünde ise, basınç uygulanmadan Tablo 3'te verilen değişken ısıtma süreleri ile ısıtma işlemi yapılmıştır.

Basınçsız ısıtma işleminden sonra,  $t_3$  süresince hızlı bir şekilde ısıtıcı çıkarılmakta ve daha sonra borular birbirlerine yanıştırılarak  $t_4$  süresi boyunca birleştirilmektedir. Son kademede ise, cihaz Tablo 3'te belirlenen değişken  $P_3$  basınç değerine ayarlanarak, bu basınçta ve  $t_5$  süresince alın kaynak işlemi soğumaya (katılasmaya) bırakılmıştır.

**Tablo 3.** Değişken deney parametreleri ve seviyeleri

Değişkenler	Semboller	Seviye		
		-1 (Minimum değer)	0 (Orta değer)	+1 (Maksimum değer )
Kaynak sıcaklığı (°C)	A	200	225	250
Birleştirme basıncı (bar)	B	5	10	15
Isıtma süresi (sn)	C	40	80	120

### 2.2.1. İstatistiksel Veri Analizi

Bu çalışmada, Ø110 SDR 11, (Standart boyut oranı, borunun basınca karşı dayanıklılığının derecelendirilme yöntemi) HDPE (PE100) boruların; kaynak sıcaklığı, birleştirme basıncı ve ısıtma süresi gibi (değişken) parametrelerinin maksimum çekme dayanımına (MPa) olan etkisi Varyans Analizi (ANOVA), Yüzey Cevap Metodu (RSM) kullanılarak değerlendirilmiştir. RSM, bağımsız değişkenler ve bu değişkenlere bağlı olarak tasarlanan deney sisteminin verdiği cevaplar arasındaki ilişkiye göre sistemin değişken-cevap profilinin belirlendiği bir optimizasyon tekniğidir (Nigiz, 2019). Yüzey cevap metodu ile çok değişkenli parametrelerin kullanıldığı sistemlerde, zaman ve malzeme tasarrufu sağlanarak optimum çalışılması gereken şartlar sistem tarafından belirlenmektedir.

Çalışmamızda kullanılan istatistiksel veri analiz programı olan yüzey cevap metodunun amacı,

proses boyunca belirlenen noktalar arasında değişimlerin proses cevabına-yanıtına etkisini belirlemektir. Böylece belirlenen aralıklarda olası değişkenlerin cevabını deney yapmaya gerek kalmadan öngörmek mümkündür. Çalışma sonunda öngörülen optimum parametreler doğrulama deneyleri ile kontrol edilmiştir.

Bu çalışmamızda, üç değişken faktör; kaynak sıcaklığı, birleştirme basıncı ve ısıtma süresi olup cevap ise maksimum çekme dayanımı değeridir.

Bu çalışmadaki deney tasarımı için, RSM ile oluşturulan deney sistemlerinde en az deney sayısını oluşturan Box-Behnken tasarımı tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılacak deneysel tasarım belirlendikten sonra maksimum çekme dayanımına etki eden parametreler, seviyeler belirlenmiş ve Tablo 3'te; sabit tutulan deney parametreleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Sabit tutulan deney parametreleri

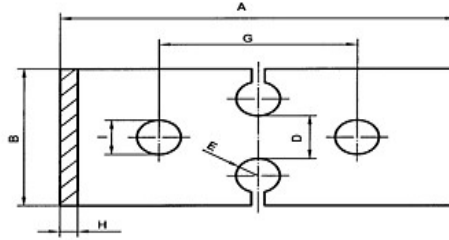
Sabit Parametreler	Birimler	Değerler	Semboller
Yanaştırma Süresi	(sn)	25	t <sub>1</sub>
Yanaştırma Basıncı	(bar)	5	P <sub>1</sub>
Isıtıcı Çıkarma Süresi	(sn)	5	t <sub>3</sub>
Birleştirme Süresi	(sn)	5	t <sub>4</sub>
Soğutma Süresi	(dk)	15	t <sub>5</sub>
Yürüme Basıncı*	(bar)	10	-

\* Yürüme basıncı: Her iki boruyu karşı karşıya getirirken oluşan basınçtır.

### 2.2.2. Çekme Testi

PE100 plastik borular Sıcak Alın Kaynak Makinesi ile Tablo 6'da belirtilen parametreler kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirilerek elde edilen kaynaklı boruların üzerinden standartlarda belirlenmiş olan ölçülerde hazırlanmış olan numuneler her bir test için oda sıcaklığında (23°C) ve %50 nem ortamında çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme deney numuneleri TS ISO 13953/ ISO 11414 standardına göre hazırlanmıştır (Şekil 4).

Numunelerin et kalınlığı 25 mm'den küçük olduğu için, Tip A testi uygulanmıştır (Şekil 5). Çekme cihazı teknik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. Numunelere çekme cihazında  $5 \pm 1$  mm/min. çekme hızı uygulanmıştır. Deney numunelerinin test sonucunda maksimum çekme dayanımı (MPa) değerleri bulunmuştur (Tablo 6). Ayrıca çekme testi ile deney numunelerinin sünek veya gevrek kırılmalarına bakılarak, kaynak prosesi hakkında bilgi edinilmiştir.



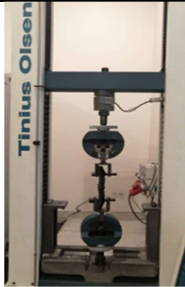

A	Toplam uzunluk (en az)	180
B	Uçlardaki genişlik	$60 \pm 3$
C	Kenarı paralel olan dar kısmın uzunluğu	Uygulanmaz
D	Dar kısmın genişliği	$25 \pm 1$
E	Yarıçap	$5 \pm 0,5$
G	Tutma yerleri arasındaki ilk mesafe	$90 \pm 5$
H	Kalınlık	Tam et kalınlığı
I	Çekme deliklerinin çapı	$20 \pm 5$

Şekil 4. Makine ile işlenmiş Tip A çekme deney numunelerinin boyutları (Ölçüler mm'dir.)



Şekil 5. Çekme testine tabi tutulacak numune görselleri

Tablo 5. Çekme Cihazı ve Teknik Özellikleri

	Çekme kapasitesi (kN)	2000 kN PLC Kontrollü
	Çekme hızı (mm/min)	$5 \pm 1$
	Marka /Model	TINIUS OLSEN



### 2.2.3. Hidrostatik İç Basınç Testi

Boruların zaman içinde basınç karşısındaki davranışlarının kısaltılmış ortam şartlarında incelendiği testtir. Borulara yüksek basınç şartları uygulanarak 50 yıllık bir sürede borudaki oluşabilecek değişimler gözlemlenmektedir. Kaynak parametreleri verilen optimum ve optimuma yakın toplamda 3 deney numunesi, TS EN ISO 1167-2 standardına göre hazırlanarak, 165 saat 80°C'de sıcak su havuzunda teste tabi tutulmuştur. Standartlara uygun seçilen numuneler iki ucundan kapama başlıkları ile sızdırmayacak şekilde kapatılmıştır. İçinde hava kalmayınca kadar şartlandırıcı yardımıyla istenilen sıcaklığa getirilmiş su ile doldurulur. Ardından ağırlık sebebiyle ovalleşmemesi için basınç test başlıkları ile desteklenerek şartlandırılmış ortama tamamen daldırılarak numune teste hazır hale getirilerek işlem gerçekleştirilmiştir. Şekil 6 ve 7'de iç basınç öncesi ve sonrası numune görseli verilmektedir.



Şekil 6. Hidrostatik iç basınç testi hazırlık görseli



Şekil 7. Hidrostatik iç basınç testi sonrası numune görseli

### 3. RSM Analizi ve Sonuçların İrdelenmesi

Bu çalışmada yapılan deneylerin tamamı, istatistiksel veri analiz programıyla belirlenen parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Program tarafından beşi tekrarlı olmak üzere toplam 17 adet farklı değişken parametrede deneyler yapılmıştır. Farklı değişken parametreler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen numunelere uygulanan çekme testi sonucu bulunan maksimum çekme dayanım değerleri programa aktarılmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. RSM ile belirlenen değişkenler ve deney sonuçları

Deney Numarası	Faktör 1 Kaynak Sıcaklığı (°C)	Faktör 2 Birleştirme Basıncı (bar)	Faktör 3 Isıtma Süresi (sn)	Cevap Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
1	200	15	80	18,67
2	250	15	80	17,96
3	250	5	80	17,50
4	250	10	40	17,60
5	225	15	40	19,03
6	225	10	80	19,00
7	225	10	80	19,01
8	225	10	80	19,00
9	225	10	80	19,02
10	200	10	120	18,70
11	225	5	120	18,96
12	225	5	40	18,77
13	200	5	80	18,30
14	225	10	80	19,00
15	250	10	120	18,00
16	200	10	40	18,49
17	225	15	120	19,50



Program tarafından belirlenen regresyon modeli Denklem (1)'deki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Max. Çekme Dayanımı} = & +19,01 - (0,3875 * A) + (0,2038 * B) + (0,1588 * C) + \\ & (0,0225 * AB) + (0,0475 * AC) + (0,0700 * BC) - \\ & (0,8830 * A^2) - (0,0155 * B^2) + (0,0745 * C^2) \end{aligned} \quad (1)$$

Bu denkleme göre, A faktörü yani kaynak sıcaklığı en etkin faktör olarak görülmektedir. Kaynak sıcaklığı değerindeki artış, çekme dayanım değeri üzerinde negatif yönde bir etki oluşturmaktadır.

Fakat B (birleştirme basıncı) ve C (ısıtma süresi) faktörleri ise çekme dayanımı üzerinde pozitif bir

etkiye sahiptir. Bu faktörlerin sayısal oranlarındaki artış, çekme dayanım değerleri üzerinde de doğru orantılı bir artışa sebep olmaktadır. Elde edilen modelin denklemini ANOVA analizinde kontrol edildiğinde Kuadratik Model'in (Tablo 7) bu tasarım için uygun olduğu görülmüştür. Önerilen model için, "F" anlamlılık değeri daha yüksek, hata değeri olasılığı ise 0,05'ten daha düşük bulunmuştur. Bu verilerde, modelimizin deneysel çalışmamız için uygun olduğunu göstermektedir (Yılmaz&Ertürk, 2021).

**Tablo 7.** Anova analizi ile model belirleme görseli

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestleşme Derecesi (df)	Kareler Ortalaması	F Değeri	p Değeri
Lineer	1,73	3	0,5783	2,26	0,1304
2FI	0,0306	3	0,0102	0,0309	0,9922
<b>Kuadratik</b>	<b>3,30</b>	<b>3</b>	<b>1,10</b>	<b>4986,35</b>	<b>&lt;0,0001</b>
Kübik	0,00123	3	0,0004	5,10	0,0746

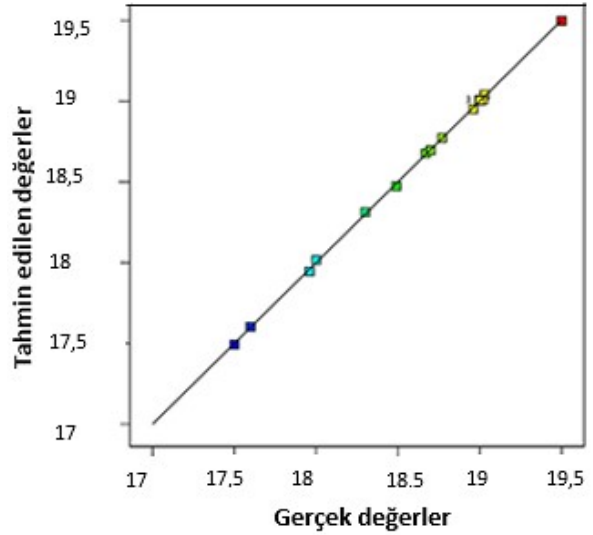
**Tablo 8.** Kuadratik model için ANOVA tablosu

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestleşme Derecesi (df)	Kareler Ortalaması	F Değeri	p Değeri	
Model	5,07	9	0,5630	2550,96	<0,0001	Anlamlı
Kaynak Sıcaklığı (A)	1,20	1	1,20	5442,56	<0,0001	
Birleştirme Basıncı (B)	0,3321	1	0,3321	1504,72	<0,0001	
Isıtma Süresi (C)	0,2016	1	0,2016	913,45	<0,0001	
AB	0,0020	1	0,0020	9,17	0,0191	
AC	0,0090	1	0,0090	40,89	0,0004	
BC	0,0196	1	0,0196	88,80	<0,0001	
A <sup>2</sup>	3,28	1	3,28	14873,99	<0,0001	
B <sup>2</sup>	0,0010	1	0,0010	4,58	0,0695	
C <sup>2</sup>	0,0234	1	0,0234	105,88	<0,0001	
Artan	0,0015	7	0,0002			
Model uygunsuzluğu	0,0012	3	0,0004	5,10	0,0746	Anlamlı Değil
Hata	0,0003	4	0,0001			
Toplam	5,07	16				
<b>Standart Sapma</b>		0,0149		R <sup>2</sup>	0,9997	
<b>Ortalama</b>		18,62		Ayarlanmış R <sup>2</sup>	0,9993	
<b>Varyasyon katsayısı (%)</b>		0,0798		Tahmin Edilen	0,9960	
				Yeterli Hassasiyet	175,8542	

Elde edilen modelin ve modeldeki katsayıların doğruluğunu belirleyen F testi ve parametrelerin maksimum çekme dayanımına katkısını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmış sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Anova analizi sonucu elde edilen Tablo 8’de değişkenlerin cevap üzerindeki etkisinin önem derecesi ‘F-değeri’ ve ‘Kareler toplamı’ değerleri ile kıyaslanır. ‘F-değeri’ ve ‘Kareler toplamı’ değerleri sayısal olarak büyük olan faktör cevap üzerindeki en etkili faktördür. F değeri ne kadar artarsa model doğruluğu da aynı oranda artmaktadır (Nigiz, 2018). P değerinin (hata değeri olasılığı) 0,05’ten küçük olması önemlidir.  $p < 0,05$  ise, program tarafından Numunelere çekme cihazında  $5 \pm 1$  mm/min. çekme hızı uygulanmıştır. önerilen deneylerin laboratuvar şartlarında elde edilen sonuçların %95’inin program tarafından elde edilen model ile açıklanabileceğini göstermektedir (Myers&Montgomery,1995).Tablo 8 incelendiğinde 2550,96 F değeri ile modelin ve A (Kaynak Sıcaklığı), B (Birleştirme basıncı), C (Isıtma süresi), model parametrelerinin anlamlı olduğu ( $p < 0.0001$ ) görülmektedir.  $R^2$  (ayarlanmış) = 0,9997 değeri de deneysel cevaptaki varyansın %99,97’sinin ikinci dereceden modelle açıklanabileceğini ifade etmektedir.

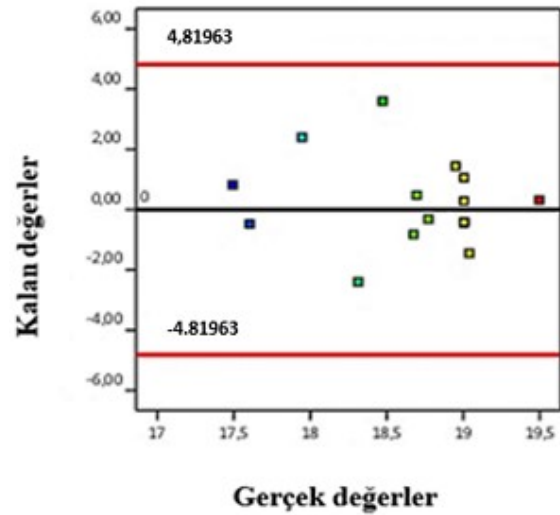
Ek olarak, yüksek regresyon katsayısı ( $R^2$ )’nin 1’e yakın olması model tarafından öngörülen değerlerin deneysel veriler ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir (Nigiz, 2018).

Deneysel ve RSM denklemleri kullanılarak elde edilen tahmini maksimum çekme dayanımı değerlerinin Şekil 8’de görüleceği gibi uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu, modelde kullanılan kuadratik regresyon modelinin deney tasarımındaki herhangi bir değişkendeki cevap faktörlerini hesaplamak için uygun olabileceğini göstermektedir. Şekil 8’deki modele göre gerçek ve tahmin edilen dönüşümlerin uyumlu olduğu görülmektedir. Tahmin edilen değer ile gerçek dönüşüm değerlerinin dağılımına bakıldığında normallik koşulunun sağlandığı görülmektedir. Grafikte bulunan çizgiden herhangi bir sapma görülmemektedir (Yılmaz & Ertürk, 2021).



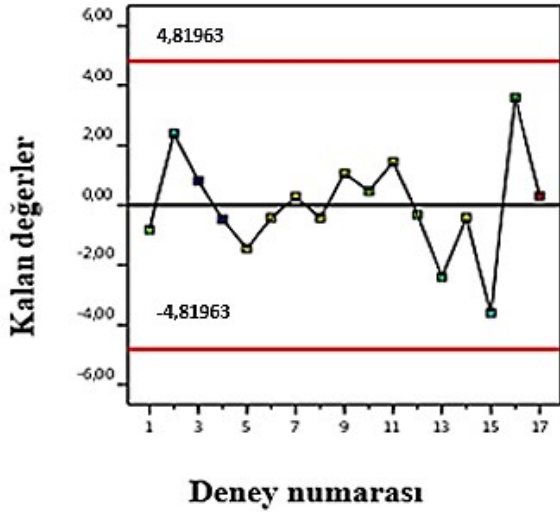
Şekil 8. Deneysel ve RSM maksimum çekme dayanımı değerleri kıyaslaması

Şekil 9’da gerçek değerler ile kalan değerlerin uyumluluğu gösterilmektedir. Verilerimizin grafik üzerindeki kırmızı limit değerleri arasında olması uygun olduğu anlamına gelmektedir. Grafiğin dağılımı da limit değerlerinin dışına taşmamıştır, sonuç olarak uygun bulunmuştur (Uzunoğulları, 2010; Shapheek & Shrivasta, 2020).



Şekil 9. Gerçek ve kalan değerler grafiği

Şekil 10’da tüm deneyler kırmızı sınır çizgileri arasında ve herhangi bir sınır aşımı bulunmamaktadır. Bu sebeple program tarafından tekrar edilmesi gereken bir deney ön görülmemiştir.

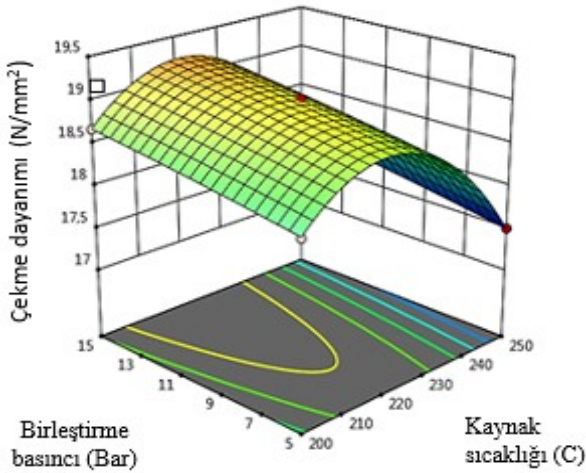


Şekil 10. Deney numarası ve kalan değerler grafiği

### 3.1. Proses değişkenlerinin RSM'ye etkisi

#### 3.1.1 Kaynak sıcaklığı ve birleştirme basıncının çekme dayanımına etkisi

Şekil 11'de 3D yüzey grafiği ile ısıtma süresi 80 sn'de sabit tutulup, birleşme basıncı ve kaynak sıcaklığı değişkenlerinin maksimum çekme dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 11. Sabit ısıtma süresinde (80 sn), kaynak sıcaklığı ve birleşme basıncının maksimum çekme dayanımı üzerindeki eş zamanlı etkisi

Üç boyutlu grafikte kaynak sıcaklığı değerinin artması ile maksimum çekme dayanımı değerleri başlangıçta artış göstermiş fakat 230°C 'nin üzerine çıkıldığında ise, cevap değerleri giderek azalmıştır.

230°C'ye kadar olan uygulamalarda, yapı içerisinde kristal olarak bulunan zincirlerin çoğu ısı etkisi ile amorf forma dönüşmektedir. Böylece zincirler birbirleri üzerinden kolayca akarak iyi bir yapışma mukavemeti sergilemekte ve homojen bir yapı oluşmaktadır.

Daha sonra uygulanan soğutma işlemi ile zincirlerin çoğu kristal forma dönüşmüş olup üzerlerine uygulanan çekme kuvvetine dayanımları daha fazla olmaktadır. PE100 malzeme, yüksek molekül ağırlığına sahip yarı kristal yapıda ve mekanik özellikleri diğer polietilen malzemelere göre yüksek bir polimer malzemedir.

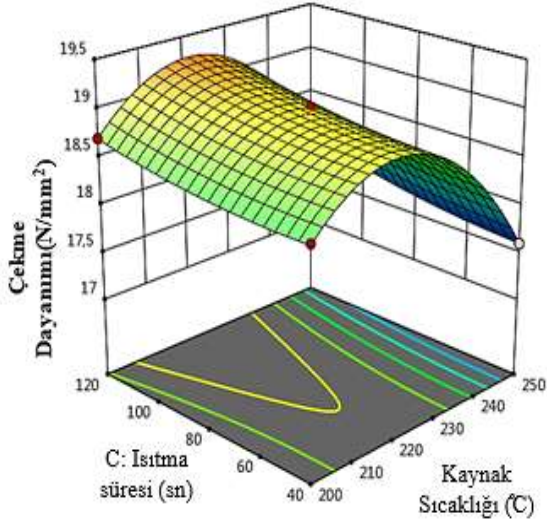
Fakat 230°C'nin üzerinde kaynak sıcaklığı uygulandığında, Tablo 6'daki veriler ışığında maksimum çekme dayanımı değerlerinde düşme eğilimi görülmektedir.

Bunun sebebi ise, yüksek sıcaklık artışı ile yapı içerisindeki zincirlerde konformasyonel bozulmalar meydana geldiği düşünülmektedir. Bu durumda çekme dayanım değerlerini düşürmektedir.

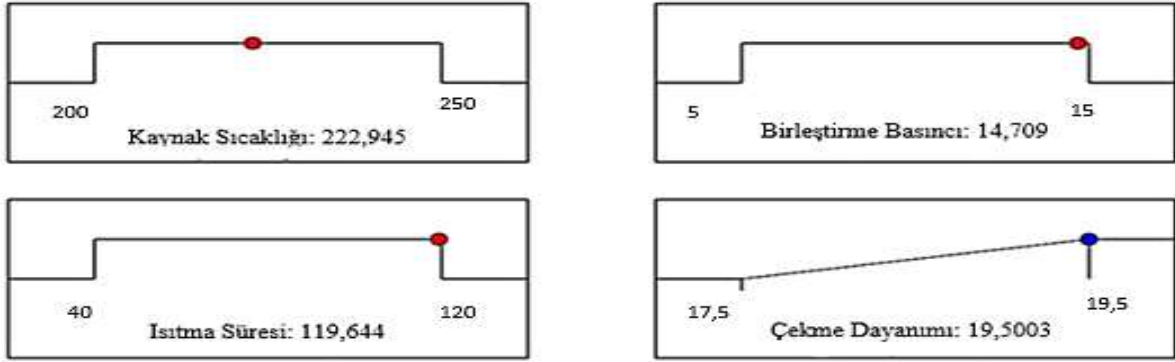
Birleştirme basıncı değerlerindeki artış ile maksimum çekme dayanımı verilerinde doğru orantılı bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebi ise, uygulanan basınç kuvveti ile eriyik halde bulunan polimer zincirlerine daha iyi yönlendirme yapılarak, yapı içerisinde düzgün bir form almasının sağlandığı düşünülmektedir. Böylece yapı içerisinde kristal (düzenli) bölge oranı artış gösterecek ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde artış olacaktır.

#### 3.1.2. Kaynak sıcaklığı ve ısıtma süresinin çekme dayanımına etkisi

Şekil 12'de ısıtma süresi değişiminin cevap üzerinde çok büyük bir etki oluşturmadığı tespit edilmiş olup bu sürenin gereğinden uzun tutulması durumunda, alın kaynak bölgesinin aşırı erimesi ile polimer zincirinde bozulmalar meydana gelebilecektir.



**Şekil 12.** Sabit birleşme basıncında (10 bar), kaynak sıcaklığı ve ısıtma süresinin max. çekme dayanımı üzerindeki eş zamanlı etkisi



**Şekil 13.** Optimum parametreler ve en yüksek çekme dayanımı değeri

Bütün faktörler birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek çekme dayanımı elde etmek amacı ile program tarafından değişkenler için önerilen değerler Şekil 13'te gösterilmektedir. 19,50MPa'lık çekme dayanım değeri elde etmek amacı ile optimum deney koşullarında, kaynak sıcaklığı, 223°C, birleştirme basıncı 15 bar ve ısıtma süresi 120 sn olarak öngörülmüştür.

Ek olarak, program tarafından farklı parametrelerde toplam 100 deney tasarlanmıştır. Tasarlanan 100 deney arasından optimum ve optimuma yakın toplam 3 deney parametresi (deney no :1, 2 ve 3) belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerde alın kaynak işlemi yapılmış olup, numuneler çekme ve hidrostatik iç basınç testine tabi tutulmuştur.

### 3.1.3. Optimum deney koşullarının belirlenmesi

Değişken parametrelerin maksimum çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelendikten sonra, optimum parametre değerleri Design Expert 12 programında elde edilmiştir.

Elde edilen optimum parametre değerleri ve bu değerlere karşılık gelen maksimum çekme dayanımı Şekil 13'te verilmiştir.

## 4. Çekme Testi Sonuçları

İlk olarak, Design Expert programı tarafından belirlenmiş olan farklı değişken parametreler ile gerçekleştirilen (Tablo 6) alın kaynak işlemi yapılan 17 adet numunenin çekme testi sonrası görselleri Şekil 14 'de verilmiştir.



**Şekil 14.** Çekme testi sonrası kopan numune görselleri

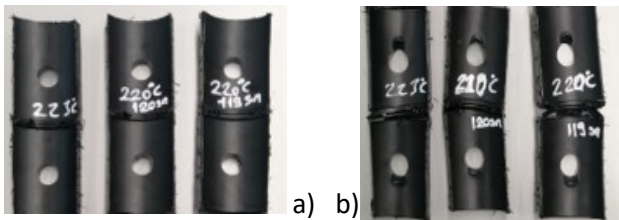
Çekme testi aşamasında numunelerin kaynak birleşim bölgesinden gevrek veya sünek ayrılmalarına bakılarak kaynağın sağlıklı olup olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yüksek kaynak sıcaklığı kullanılan numunelerde (deney 2, 15 gibi) daha gevrek bir kopma gözlemlenirken daha düşük kaynak sıcaklığının kullanıldığı numunelerde (deney 11) ise sünek bir kopma meydana gelmiştir. Uzun ve arkadaşının yapmış olduğu çalışmada, PE100 boruların üç farklı (200, 225 ve 250°C) kaynak sıcaklığındaki çekme testi sonucunda 250°C deki numunelerde kopma uzama değerlerini daha düşük tespit etmişlerdir. Bu sonuç çalışmamızı destekler niteliktedir (Uzun & Kocaman, 2018).

**4.1. Optimum deney numunelerinin Çekme Testi**

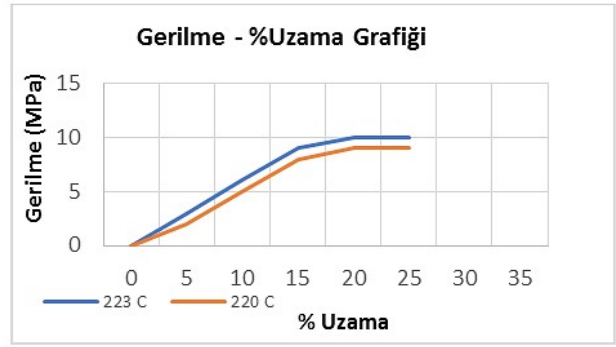
Deneysel parametreler sonucu analiz programının belirlemiş olduğu optimum ve optimuma yakın deney verileri (Tablo 9) ile ayrıca doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu veriler ışığında kaynak işlemi yapılmış olan numuneler çekme testine tabi tutulmuş (Şekil 15) ve çekme gerilme (N/mm<sup>2</sup>) değerlerine karşılık % uzama grafiği Şekil 16’da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Optimum ve optimuma yakın deneylerin alın kaynak işlemi parametreleri

Deney Numarası	Kaynak Sıcaklığı (°C)	Birleştirme Basıncı (bar)	Isıtma Süresi (sn)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
1	222,945	14,709	119,644	19,500
2	220,446	14,547	119,617	19,501
3	219,989	14,739	118,867	19,503



**Şekil 15.** Çekme testi öncesi (a) ve sonrası (b) numune görselleri



223°C optimum parametrelerin kullanıldığı deney numunesi, 220°C: Optimuma yakın parametrelerin kullanıldığı deney numuneleri ortalaması

**Şekil 16.** Optimum ve optimuma yakın deney numunelerinin Gerilme-% Uzama grafiği

Çekme testi grafik sonuçlarına göre optimum deneysel parametreler kullanılarak gerçekleştirilen alın kaynaklı numunelerin 223°C’de çekme dayanım değeri 21MPa olup diğer numunelere kıyasla (20 MPa) daha yüksek tespit edilmiştir. Ayrıca %kopma uzama değeri de diğer numunelere kıyasla daha yüksektir. Akkurt ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise, çekme dayanım değerleri, 21-27 MPa arasında bulunmaktadır (Akkurt & Saraç, 2015). Zhigiang ve arkadaşlarının yapmış olduğu diğer bir çalışmada ise en iyi kaynak kalitesinin 210-230°C aralığında olduğu belirtilmiştir (Cai ve diğerleri, 2018).

Sonuç olarak, program tarafından optimum deneysel parametreler için (223°C) hesaplanan (teorik) maksimum çekme dayanım değeri, 19,50 MPa iken, deneysel olarak bulunan maksimum çekme dayanım değeri, 21 MPa’dır. Bu değerler ile deneysel veriler ve teorik veriler arasındaki % hata payı aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanmıştır.

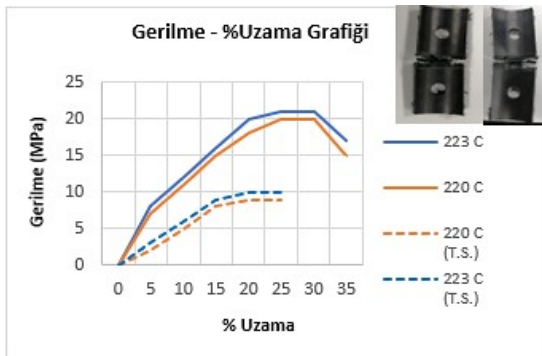
$$\% \text{ Hata} = \frac{[\text{deneysel değer} - \text{teorik değer}]}{\text{teorik değer}} \times 100$$

$\% \text{ Hata} = \frac{[21 - 19,50]}{19,50} \times 100 = \%7,69$  olarak bulunmuştur. Bu sonuç bize, deneysel veriler ile teorik veriler arasındaki tutarsızlığın %7,69; doğruluk oranının da %92,31 olduğunu göstermektedir.



#### 4.2. Hidrostatik iç basınç testi ve Çekme testi

Optimum ve optimuma yakın toplamda üç adet deney parametreleri ile gerçekleştirilen alın kaynak işlemlerinden sonra numuneler hidrostatik iç basınç testine tabi tutulmuştur. Bu test sonrası standartlara uygun şekilde hazırlanan deney numunelerine çekme testi uygulanmıştır. Böylece numunelerin alın kaynak prosesinin kalitesi tahribatlı muayene testi sonrasında da analiz edilmiş ve kesit alana uygulanan maksimum çekme dayanımı ( $N/mm^2$ ) gözlemlenmiştir. Hidrostatik iç basınç test süresi boyunca deney numunelerinde herhangi bir sızma ve patlama hasarı oluşmamıştır. Dolayısı ile test sonucu hasarsız olarak kaydedilmiştir. Hidrostatik iç basınç testi sonrası (T.S.) çekme deneyine tabi tutulan numunelerin, Gerilme-%Uzama grafiği ortalama değeri Şekil 17’de verilmiştir. 223°C kaynak sıcaklığı kullanılarak gerçekleştirilen deney numunelerinin çekme dayanımında %52 oranında azalma gözlemlenirken, 220°C kaynak sıcaklığında ise, %55 oranında azalma tespit edilmiştir. % Kopmada uzama değerlerine bakıldığında hidrostatik iç basınç testi öncesine kıyasla %31 oranında azalma göstermiştir. Beklenildiği üzere tahribatlı muayene sonrası numunelerin mekanik özelliklerinde azalmalar meydana gelmektedir. Fakat, Şekil 17’de deney numunelerinin çekme testindeki kopma davranışları sünektir. Ek olarak, deney numunelerinin alın kaynak bölgesinde ayrılma meydana gelmemiştir. Kopma daha çok boru bölgesinde (kaynak bölgesi dışında) gerçekleşmiştir. Bu sonuç bize kaynak kalitesinin ve kaynak parametrelerinin optimum olduğunu göstermektedir.



Şekil 17. Hidrostatik iç basınç öncesi ve sonrası Gerilme-% uzama grafiği ve numuneleri

#### 5. Sonuçlar

PE100 boru malzemesiyle yapılan alın kaynağı işleminde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- RSM'nin optimum tavsiye edilen proses şartlarının proses sıcaklığı 223°C, birleştirme basıncı 15 bar ve ısıtma süresi 120 sn olduğu, kaynak sıcaklığı da en etkin faktör olarak öngörülmüştür. Bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilen doğrulama deneyleri ile alın kaynaklı numunelerin deneysel sonuçlarda en yüksek çekme dayanım değerinin (21MPa) olduğu tespit edilmiştir.
- Yüzey Cevap Metodu ile deneysel veriler arasındaki doğruluk oranının da %92,31 olduğunu belirlenmiştir. Program tarafından analiz edilerek tahmin edilen veriler ile deney sonucu bulunan (gerçek) verilerin uyumlu olduğu görülmüştür.
- Sıcaklık arttıkça (250°C) çekme testi sonucunda numunelerde %kopma uzama değerlerinde %17 oranında azalma tespit edilmiştir.
- Hidrostatik iç basınç testi sonrası 223°C kaynak sıcaklığındaki numunelerde çekme dayanımı değerinde %52; 220°C kaynak sıcaklığında ise %55 oranında azalma tespit edilmiştir.
- Hidrostatik iç basınç testi sonrası 223°C kaynak sıcaklığındaki numunelerde %kopma uzama değerinde % 31.25, 220°C kaynak sıcaklığında ise %30.20 oranında azalma tespit edilmiştir.

#### 6. Kaynaklar

- Akkurt, A, Saraç, E, 2015. Sıcak Alın Kaynak Yöntemi ile Farklı Sıcaklıklarında Birleştirilen Pe Doğalgaz Transfer Hatlarının Güvenirliklerinin Araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **21**(1), 15-23.
- Akkurt, A., 2013. An Analysis of Electro-Melting and Hot Element Welding Methods' Safety Used to Join PE Natural Gas Pipes. *International Journal of Mechanical Mechatronics Engineering*. **3**, 2493-504.

- Akkurt, A., Ertürk, İ., 2010. Sıcak Eleman Alın Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen PE Doğalgaz Borularının Güvenirliklerinin Araştırılması. *Pamukkale Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **16**(2), 221-233.
- Benkreira, H., Shillitoe, S., Day, A.J., 1991. Modelling of the Butt Fusion Welding Process. *Chemical Engineering Science*, **46**(1), 135-142.
- Cai, Z., Dai, H., ve Fu, X., 2018. Investigation on the Hot Melting Temperature Field Simulation of HDPE Water Supply Pipeline in Gymnasium Pool, *Results in Physics*, **9**, 1050-1056.
- Chen, H., Scavuzzo, R.J, T.S, Srivatsan.,1997. Influence of Joining on The Fatigue And Fracture Behavior of High Density Polyethylene Pipe. *J. Mater. Eng. Perform.* **6** (4) 473–480.
- Cocard, M., Grozav, I., Iacob, M. ve Caneparu, A., 2009. Establishing the Optimum Welding Procedure for PE 100 Polyethylene Pipelines Using the Response Surface Design, *Materiale Plastice*, **46** (4), 452-457.
- Doaei, M., Tavallali, M.S., 2018. Intelligent Screening of Electro-Fusionpolyethylene Joints Based on a Thermal NDT Method. *Infrared Physics Technology*. **90**, 1–7.
- Ergül, E., Gezegin, C. ve Yıldız, A., 2019. Yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma kullanılarak transformatör sargı en sıcak nokta sıcaklığının modellenmesi ve optimizasyonu, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, **10** (2), 467-480.
- Frederick, C., Porter, A., ve Zimmerman, D., 2009. High-Density Polyethylene Piping Butt-Fusion Joint Examination Using Ultrasonic Phased Array. *Material Sciences*, **132**(5), 8.
- Hilmioğlu, N., 2022. Optimization of Synthesis of Ethyl Acetate by Response Surface Method and Investigation of Reactive Sorption Effect of Hydrogel in Synthesis, *European Journal of Science and Technology*, (35), 94-101.
- Myers, R.H., ve Montgomery, D.C., 1995. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, *4,Wiley*, 856.
- Nigiz, F.U, 2018.Yüzey Yanıt Metodu ile Optimize Edilen Metil Laurat Üretiminin Membran Reaktörde Uygulaması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **6**(1), 47-55.
- Pathak, S., Pradhan, S., 2020. Experimentation and Optimization of HDPE Pipe Electro Fusion and Butt Fusion Welding Processes, *Materials Today: Proceedings*, **27**, 2925-2929.
- Shapheek, M., Shrivastava, N., 2020. Optimization of cooling time for polyethylene fusion joints, *Materials Today: Proceedings*, **28**, 1267-1272.
- Sheng, L. H., Ni, T. N., Bong Y. K. ve Hee, K. S., 2016. Effects of defects on failure of butt fusion welded polyethylene pipe, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **139**, 117-122.
- Takehiko, W, & Hiyasa, S, 1998. Eutectic Bonding of Al Pipe to Cu Pipe. *Journal of The Japan Welding Society*, **16**(1), 35-44.
- Tarek, M.A.A., Sallam, H., ve Younan M, 2014. Effect of strain rate, thickness, welding on the J–R curve for polyethylene pipe materials, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **74**, 164-180.
- Uzun, H., Kocaman, A., HDPE 100 Boruların Sıcak Eleman Alın Kaynağıyla Birleştirilmesinde Kaynak Sıcaklığı Parametresinin Birleştirme Mukavemetine Etkisi, 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Alanya, Türkiye, 9-11 Aralık 2018.
- Uzunoğulları, P., 2010. Patates Atığında Aureobasidium Pullulans ile Pullulan Üretimi ve Cevap Yüzey Yöntemi ile Proses Koşullarının Optimizasyonu, Yüksek Lisans, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yılmaz, O, Ertürk, M, 2021.Etil Asetat Üretiminin Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.