



## Kademeli Kayar Artımlı Şekillendirme Yöntemi ile Parça Üretiminin Optimizasyonu

### Optimization of Part Manufacturing by Multistage Rolling Blankholder Incremental Forming Method

Ümit Önal <sup>1</sup>, Ömer Seçgin <sup>2\*</sup>, İbrahim Özsert <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Piri Reis Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul, TÜRKİYE(\*\*)

<sup>3</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Sakarya, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [osecgin@gmail.com](mailto:osecgin@gmail.com)(\*\*)

Geliş Tarihi / Received: 29.10.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 15.01.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI: 10.21205/deufmd.2020226522

*Atıf şekli/How to cite: ÖNAL, Ü., SEÇGIN, Ö., ÖZSERT, İ.(2020). Kademeli Kayar Artımlı Şekillendirme Yöntemi ile Parça Üretiminin Optimizasyonu. DEÜFMD 22(65), 561-568.*

#### Öz

Bu çalışmada kayar artımlı şekillendirme metodu kullanılarak, farklı açı artımlarıyla, kademeli şekillendirme yapılarak duvar açısı dik olan parçanın üretim optimizasyonu yapılmıştır. Çalışma kapsamında sinyal/gürültü analizi yapılarak şekillendirme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve et kalınlığı için ayrı ayrı optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra gri ilişkisel analiz yapılarak bu üç bağımlı değişkeni birlikte optimize eden parametre seviyeleri belirlenmiştir. Gri ilişkisel analize göre üç bağımlı değişkeni birlikte optimize eden parametre seviyeleri 9 bar sıkma basıncı, 10° açı artımı, 3000 mm/dak ilerleme ve 0,25 mm artım miktarıdır. Şekillendirme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için en önemli parametrenin artım miktarı, et kalınlığı için ise en önemli parametrenin sıkma basıncı olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Artımlı Şekillendirme, Kayar Artımlı Şekillendirme, Taguchi, Gri İlişkisel Analiz, Şekillendirme

#### Abstract

In this study, production optimization of the perpendicular part was made by using multistage forming with different angle increments by using rolling blankholder incremental forming method. Within the scope of the study, optimum parameter levels were determined separately for forming force, surface roughness and wall thickness by signal/noise analysis. Then, gray relational analysis was performed to determine the parameter levels that optimize these three dependent variables together. According to the gray relational analysis, the parameter levels that optimize the three dependent variables together are 9 bar clamping pressure, 10° angular increment, 3000 mm/min feedrate and 0.25 mm increment.

**Keywords:** Incremental Forming, Rolling Blankholder Incremental Forming, Taguchi, Grey Relational Analysis, Forming

#### Kısaltmalar

A: Açı artımı

F: İlerleme

Fz: Düşey ekseninde oluşan şekillendirme kuvveti  
 I: Artım miktarı  
 N: Deney numarası  
 P: Sıkma basıncı  
 Ra: Yüzey pürüzlülüğü  
 S/N: sinyal/gürültü  
 T: Et kalınlığı

## 1. Giriş

Dik kenarlı sac parçalar otomotivden beyaz eşya endüstrisine, havacılıktan makine imalat endüstrisine birçok alanda kullanılmaktadır. Artımlı şekillendirme yöntemi ile dik kenarlı parça üretimi için sac farklı açılarla kademeli olarak şekillendirilir [1]. Liu ve arkadaşları kademeli artımlı şekillendirme yönteminin hem deneysel hem de analitik analizini yapmışlardır [2]. Suresh ve arkadaşları ekstra derin çekme sacını kademeli olarak şekillendirerek dik kenarlı parça üretmişlerdir [3]. 60° açı ile şekillendirmeye başlayıp 70°, 80°, 85° ve 90° kademelerle şekillendirme yapmışlardır. Shi ve arkadaşları AA1060-O sacını 20°den başlayarak kademeli olarak şekillendirmişlerdir [4]. 40°den küçük açılarda şekillendirme yapmanın herhangi bir avantaj sağlamadığını belirlemişlerdir. Li ve arkadaşları 30°den başlayarak farklı kademelerle 60° açılı parça üretmek kademe sayısının artışının et kalınlığını arttırdığını belirlemişlerdir [5].

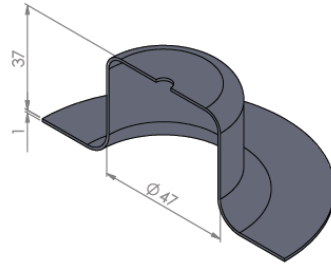
Geleneksel artımlı şekillendirme metodu ile sac metal prototip üretimi yapılabilmektedir. Anılan yöntemde sac civatalarla iş bağlama aparatına sabitlenir. Bu da et kalınlığında büyük değişikliklere neden olmaktadır. Artımlı şekillendirme yöntemi ile elde edilen parçaların et kalınlığını iyileştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri de Seçgin ve Özsert tarafından geliştirilen kayar artımlı şekillendirme metodudur [6, 7]. Kayar artımlı şekillendirme metodunda sac civatalarla sabitlenmez. Sac belli bir sıkma kuvveti ile sıkılır. Bu kuvvet hem gerginliği sağlayacak hem de sacın akışına izin verecek kadardır. Kayar artımlı şekillendirme metodunda sac iş bağlama aparatı üzerinde bulunan model üzerine sıvanarak şekillendirilir.

Bu çalışmada yeni bir yöntem olan kayar artımlı şekillendirme metodu kullanılarak 90° açılı parça üretimi başarı ile yapılmıştır. Sinyal gürültü analizi yapılarak şekillendirme kuvveti,

yüzey pürüzlülüğü ve et kalınlığı için ayrı ayrı parametre optimizasyonu yapılmıştır. Daha sonra gri ilişkisel analiz yapılarak her üç bağımlı değişkeni birlikte optimize eden parametre seviyeleri belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 1 mm kalınlığındaki DC01 sacı kayar artımlı şekillendirme metodu ile kademeli olarak şekillendirilmiştir. Dış çapı 47 mm, yüksekliği 37 mm olan dik kenarlı aksel simetrik parça üretimi yapılmıştır. Üretilen parçanın tam kesit görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Üretilen parçanın tam kesit görünüşü.

Deneysel çalışma için dört farklı parametre belirlenmiştir. Bu parametreler: sacın iş bağlama aparatına tutturulması için kullanılan pnömatik klemp sıkma basıncı (P), her bir kademede şekillendirilecek şekillendirme açısı için açı artımı (A), takımın ilerleme hızı (F) ve takımın her bir turda aşağı iniş seviyesini tanımlayan artım miktarıdır (I). Tablo 1'de deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri.

Faktör	Seviyeler			Birim
	1	2	3	
Sıkma basıncı (P)	2	5,5	9	bar
Açı artımı (A)	5	7,5	10	derece
İlerleme (F)	2000	3000	5000	mm/dak
Artım miktarı (I)	0,25	0,5	0,75	mm

İş bağlama aparatına bağlanan sac önce 50° açı ile şekillendirilmiştir. Daha sonra iş bağlama aparatından sökülmeden açı artım miktarı kadar daha büyük açı ile tekrar şekillendirilmiştir. 90° açığa ulaşılan kadar her bir kademedeki açı artımı (A) kadar büyük açı ile tekrar tekrar şekillendirilerek istenilen geometriye ulaşılmıştır.

Şekillendirme deneyleri sırasında oluşan şekillendirme kuvvetleri kaydedilmiştir. Kuvvet ölçümü için Sakarya üniversitesinde geliştirilmiş olan üç eksenli kuvvet ölçme sistemi kullanılmıştır [8]. Yüzey pürüzlülüklerinin (Ra) belirlenmesinde MarSurf PS1 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde "ortalama yüzey pürüzlülüğü" olan Ra değerleri dikkate alınmıştır. Et kalınlıkları ise 0,01 mm hassasiyetli mekanik mikrometre yardımı ile ölçülmüştür. Şekillendirilmiş olan saclar önce ortadan kesilmiş, daha sonra parça merkezinden başlanılarak beşer milimetre aralıklarla işaretlenmiştir. İşaretlenen bu noktalardan parça kalınlıkları ölçülmüştür.

L9 ortogonal dizini kullanılarak Taguchi metodu ile deney tasarımı yapılmıştır. Daha sonra sinyal/gürültü (S/N) analizi yapılarak her bir parametrenin optimum seviyesi belirlenmiştir. Şekillendirme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için Eşitlik 1'de verilen daha küçük daha iyi eşitliği kullanılırken, et kalınlığı için Eşitlik 2'de verilen daha büyük daha iyi eşitliği kullanılmıştır [9-12]. Deney tasarımı ve sinyal/gürültü analizi için Minitab programı kullanılmıştır.

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de n deney sayısını,  $Y_i$  ise i indisiyle tanımlanan deneyde gözlenen veriyi temsil etmektedir. Her üç bağımlı değişken için (Şekillendirme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve et kalınlığı) parametrelerin optimum seviyeleri ayrı ayrı belirlendikten sonra gri ilişkisel analiz yapılarak bu üç bağımlı değişkeni aynı anda optimize eden parametre seviyeleri de belirlenmiştir.

Şekillendirme deneyinden bir görüntü Şekil 2.A'da verilmiştir. Deneylerde uç radyüsü 7,5 mm olan, küre uçlu form takımı kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan form takımı Şekil 2.B'de verilmiştir. Şekil 2.C'de ise şekillendirilmiş parça verilmiştir.

A)



B)



C)



**Şekil 2.** Şekillendirme deneyi. **A:** Şekillendirme anından bir görüntü. **B:** Deneylerde kullanılan küre uçlu form takımı. **C:** Şekillendirilmiş parça.

### 3. Bulgular

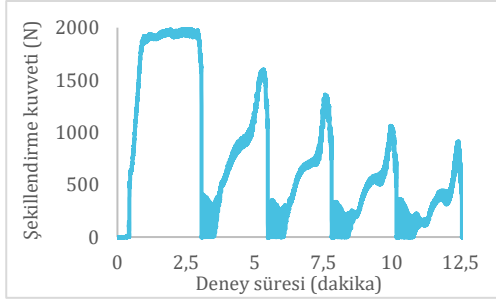
#### 3.1. Şekillendirme kuvveti

Şekillendirme deneyleri sırasında düşey eksende oluşan kuvvetler ( $F_z$ ) Tablo 2'de verilmiştir. Tabloya göre en büyük şekillendirme kuvveti 2113,61 N'dur.

**Tablo 2.** Deney parametreleri, ölçülen en büyük şekillendirme kuvvetleri ( $F_z$ ) ve S/N oranları.

N	Deney parametreleri				Fz (N)	S/N oranı
	P (bar)	A (°)	F (mm/dak)	I (mm)		
1	2	5	2000	0,25	1629,25	-64,24
2	2	7,5	3000	0,5	1768,80	-64,95
3	2	10	5000	0,75	1993,33	-65,99
4	5,5	5	3000	0,75	1753,44	-64,88
5	5,5	7,5	5000	0,25	1546,23	-63,79
6	5,5	10	2000	0,5	1684,81	-64,53
7	9	5	5000	0,5	2060,66	-66,28
8	9	7,5	2000	0,75	2113,61	-66,50
9	9	10	3000	0,25	1628,92	-64,24

Şekil 3'de 3 numaralı deneyde oluşan şekillendirme kuvvetleri grafik olarak verilmiştir. Sac ilk önce yatayla 50° açıda şekillendirilmiştir. 3 numaralı deneyde açılı artımı 10° olduğu için daha sonra sac yatayla 60° açıda şekillendirilmiştir. Sonra 70°, 80° ve 90° açıda şekillendirilmiştir. Şekil 3'de de görüldüğü gibi en büyük şekillendirme kuvveti ilk şekillendirme adımında oluşmuştur. Sonraki adımlarda şekillendirme kuvveti tedrici olarak azalmıştır.



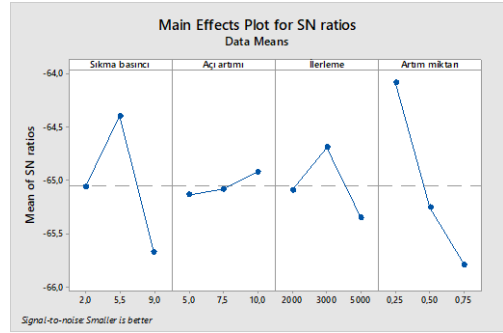
**Şekil 3.** 3 numaralı deneyde oluşan şekillendirme kuvvetleri.

Eşitlik 1'de verilen daha küçük daha iyi eşitliği kullanılarak yapılan S/N analiz sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Bu tabloda her bir parametre seviyesinin S/N oranları verilmiştir. Tablonun "Delta" satırında her bir parametrenin en büyük S/N oranı ile en küçük S/N oranı arasındaki fark verilmiştir. "Sıra" satırında ise deltalar büyükten küçüğe sıralanmıştır. Delta değeri en büyük olan parametreye 1 numarası verilmiştir. Delta değeri en büyük olan parametre şekillendirme kuvveti için en etkili parametreyi göstermektedir. Buna göre şekillendirme kuvveti için en önemli parametre artım miktarıdır.

**Tablo 3.** Şekillendirme kuvveti için S/N analizi.

Seviye	P	A	F	I
1	-65,06	-65,13	-65,09	<b>-64,09</b>
2	<b>-64,40</b>	-65,08	<b>-64,69</b>	-65,25
3	-65,67	<b>-64,92</b>	-65,35	-65,79
Delta	1,27	0,21	0,66	1,70
Sıra	2	4	3	<b>1</b>

Şekil 4'de şekillendirme kuvveti için S/N analizi grafiği verilmiştir. Bu şekle göre şekillendirme kuvveti için optimum parametre seviyeleri 5,5 bar sıkma basıncı, 10° açılı artımı, 3000 mm/dak ilerleme ve 0,25 mm artım miktarıdır.



**Şekil 4.** Şekillendirme kuvveti için S/N analizi grafiği.

Artım miktarı şekillendirme takımının parça etrafında bir tam turunda düşey yönde aldığı yoldur. Artım miktarının büyümesi ile şekillendirilmeye zorlanan sac miktarı da büyümektedir. Bu da şekillendirme kuvvetini arttırmaktadır. Artım miktarının azalması şekillendirme kuvvetini azaltıcı etki göstermektedir.

### 3.2. Yüzey pürüzlülüğü

Parçaların yüzey pürüzlülükleri (Ra) üçer defa ölçülüp ortalamaları alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen değerler ve standart sapmaları Tablo 4'de verilmiştir. Her bir deneyden elde edilen parçaların yüzey pürüzlülükleri Tablo 5'de verilmiştir. Tabloya göre en küçük yüzey pürüzlülüğü 5. deneyde elde edilmiştir.

**Tablo 4.** Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin standart sapmaları

Deney No	1inci ölçüm (µm)	2inci ölçüm (µm)	3üncü ölçüm (µm)	Standart sapma
1	0,476	0,406	0,404	0,041
2	0,400	0,505	0,601	0,101
3	0,648	0,718	0,707	0,038
4	0,388	0,472	0,377	0,052
5	0,229	0,219	0,259	0,021
6	0,674	0,562	0,647	0,058
7	0,351	0,363	0,519	0,094
8	0,640	0,867	0,441	0,213
9	0,316	0,385	0,335	0,036

**Tablo 5.** Yüzey pürüzlülükleri ve S/N oranları.

N	Deney parametreleri				Ra ( $\mu\text{m}$ )	S/N oranı
	P (bar)	A ( $^{\circ}$ )	F (mm/dak)	I (mm)		
1	2	5	2000	0,25	0,429	7,36
2	2	7,5	3000	0,5	0,502	5,99
3	2	10	5000	0,75	0,691	3,21
4	5,5	5	3000	0,75	0,412	7,70
5	5,5	7,5	5000	0,25	0,236	12,55
6	5,5	10	2000	0,5	0,628	4,05
7	9	5	5000	0,5	0,411	7,72
8	9	7,5	2000	0,75	0,649	3,75
9	9	10	3000	0,25	0,345	9,24

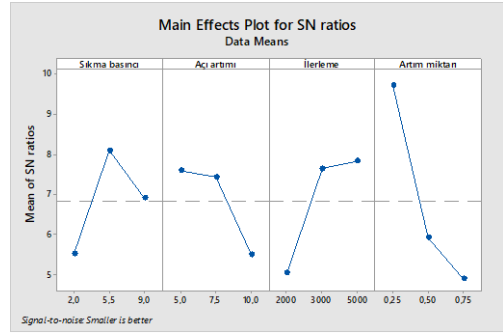
Yüzey pürüzlülüğü için yapılan S/N analizi Tablo 6'da verilmiştir. Tabloya göre yüzey pürüzlülüğü için de en önemli parametre artım miktarıdır.

**Tablo 6.** Yüzey pürüzlülüğü kuvveti için S/N analizi.

Seviye	P	A	F	I
1	5,518	<b>7,592</b>	5,051	<b>9,716</b>
2	<b>8,098</b>	7,430	7,639	5,918
3	6,903	5,497	<b>7,829</b>	4,885
Delta	2,580	2,095	2,778	4,830
Sıra	3	4	2	<b>1</b>

Şekil 5'de yüzey pürüzlülüğü için yapılmış olan S/N analizinin grafiği verilmiştir. Şekle göre yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre seviyeleri 5,5 bar sıkma basıncı, 5° açı artımı, 5000 mm/dak ilerleme ve 0,25 mm artım miktarıdır. Bu grafikten 7,5° açı artımının da iyi sonuçlar verdiği görülebilmektedir. Açı artımı olarak 5° yerine 7,5°nin kullanılması işlem süresini önemli oranda azaltmaktadır.

Artım miktarının (I) büyümesi ile şekillendirme takımının parça etrafındaki hareketinin bir tam turunda aşağı iniş miktarı da büyümektedir. Bu da yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Artım miktarının küçük olması ile şekillendirme takımının düşey yöndeki hareketi de azalmakta bu da daha iyi bir yüzey elde edilmesine yol açmaktadır.

**Şekil 5.** Yüzey pürüzlülüğü için S/N analizi grafiği.

### 3.3. Et kalınlığı

Şekillendirme deneylerinden elde edilen parçaların et kalınlıkları (t) ölçülerek kalınlık dağılımları elde edilmiştir. Daha sonra her bir parçanın en küçük et kalınlık değeri alınarak Tablo 7 oluşturulmuştur. Şekillendirme esnasında et kalınlığındaki değişimin mümkün olduğunca az olması istenmektedir. Tablo 7'de verilen et kalınlıkları listesinde bulunan en büyük et kalınlığı değeri deneylerden elde edilen en iyi et kalınlığı olarak tanımlanmıştır. Tabloya göre en iyi et kalınlığı 2 bar sıkma basıncının kullanıldığı birinci ve üçüncü deneylerde elde edilmiştir.

**Tablo 7.** En küçük et kalınlıkları ve S/N oranları.

N	Deney parametreleri				t (mm)	S/N oranı
	P (bar)	A ( $^{\circ}$ )	F (mm/dak)	I (mm)		
1	2	5	2000	0,25	0,39	-8,18
2	2	7,5	3000	0,5	0,38	-8,40
3	2	10	5000	0,75	0,39	-8,18
4	5,5	5	3000	0,75	0,37	-8,64
5	5,5	7,5	5000	0,25	0,29	-10,75
6	5,5	10	2000	0,5	0,3	-10,46
7	9	5	5000	0,5	0,37	-8,64
8	9	7,5	2000	0,75	0,27	-11,37
9	9	10	3000	0,25	0,31	-10,17

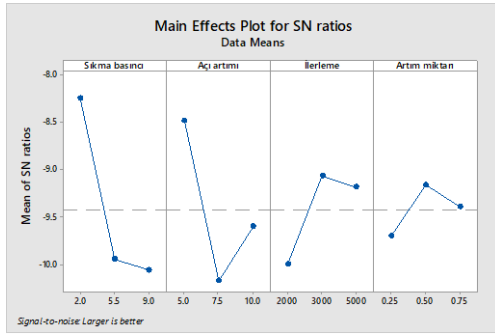
Tablo 7'ye göre en iyi (en büyük) et kalınlığı 2 bar sıkma basıncının kullanıldığı birinci ve üçüncü deneylerde elde edilmiştir. Tablo 8'de et kalınlığı için S/N analizi verilmiştir. Bu tabloya göre et kalınlığı üzerinde en etkili parametre

sıkma basıncıdır. Sıkma basıncının azalması ile daha iyi et kalınlığı elde edilmektedir.

**Tablo 8.** Et kalınlığı için S/N analizi.

Seviye	P	A	F	I
1	<b>-8,254</b>	<b>-8,484</b>	-10,003	-9,701
2	-9,949	-10,176	<b>-9,071</b>	<b>-9,166</b>
3	-10,06	-9,603	-9,189	-9,396
Delta	1,807	1,693	0,932	0,535
Sıra	1	2	3	4

Şekil 6'da et kalınlığı için yapılmış olan S/N analizinin grafiği verilmiştir. Şekle göre et kalınlığı için optimum parametre seviyeleri 2 bar sıkma basıncı, 5° açı artımı, 3000 mm/dak ilerleme ve 0,5 mm artım miktarıdır. Bu grafikten 5000 mm/dak ilerlemenin de iyi sonuçlar verdiği görülebilmektedir. İlerleme olarak 3000 mm/dak yerine 5000 mm/dak kullanılması işlem süresini önemli oranda azaltmaktadır.



**Şekil 6.** Et kalınlığı için S/N analizi grafiği.

Sacı iş bağlama aparatına tutturulan pnömatik klemlere uygulanan basıncın azaltılması ile şekillendirme işlemi esnasında sac klemp ile iş bağlama aparatı arasından kayabilmektedir. Böylece şekillendirme esnasında sacda oluşan gerilme azalmaktadır. bu da et kalınlığının daha az incelmesini sağlamaktadır.

### 3.4. Gri ilişkisel analiz

Gri ilişkisel analiz yöntemi iki ve daha fazla bağımlı değişkenin parametre optimizasyonunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada şekillendirme kuvveti, et kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü olmak üzere üç bağımlı değişkeni birlikte optimize etmek amacıyla gri ilişkisel analiz yapılmıştır. İlk önce şekillendirme kuvveti, et kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü verileri normalize edilmiştir. Normalizasyon işlemi

deney sonuçları 0 ile 1 arasına alınmaktadır. 0 en kötü sonuç, 1 ise en iyi sonucu vermektedir [13]. Bir bağımlı değişken için yüksek sonuç isteniyorsa (büyük değer daha iyi ise) Eşitlik 3'de verilen denklem ile normalizasyon yapılır [14]. Et kalınlığının büyük olması istendiğinden normalizasyon işlemi Eşitlik 1 kullanılmıştır. Eğer küçük sonuç isteniyorsa (küçük değer daha iyi ise) Eşitlik 4'de verilen denklem ile normalizasyon yapılır. Şekillendirme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün az olması istendiğinden yüzey pürüzlülüğünün normalizasyonunda Eşitlik 4 kullanılmıştır. Normalizasyon işleminden sonra gri ilişki katsayısı Eşitlik 5 ile hesaplanır.

$$x_i(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad (3)$$

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad (4)$$

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{min} + \delta \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \delta \Delta_{max}} \quad (5)$$

3ncü ve 4ncü eşitliklerde her bir deney için normalizasyon işlemi sonrasında elde edilen değer  $x_i(k)$  ile gösterilmiştir. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'de i indisli deney için ölçüm sonucunu  $x_i^{(0)}(k)$  gösterirken, tüm deneylerden elde edilen ölçüm sonuçlarından en küçüğünü  $\min x_i^{(0)}(k)$  ve tüm deneylerden elde edilen ölçüm sonuçlarından en büyüğünü  $\max x_i^{(0)}(k)$  göstermektedir. 5nci eşitlikte bulunan  $(x_0(k), x_i(k))$  ifadesinde ilk deneyden başlamak üzere i indisli deneye kadar geçerli olan gri ilişki katsayısını temsil etmektedir. Eşitlik 5'te, genellikle  $\delta \Delta_{max} = 0,5$  olarak kabul edilir. Bu eşitlikte  $\Delta_{min}$  en küçük sapma sırasıdır.  $\Delta_{0i}(k)$  ise hesaplaması yapılan deneyin sapma sırasıdır. Gri ilişkisel katsayıları hesaplandıktan sonra gri ilişkisel dereceler belirlenir. Gri ilişki derecesi, Eşitlik 6'da gösterildiği gibi her bir deneyin gri ilişkisel katsayılarının ortalamasıyla hesaplanır [13].

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (6)$$

Eşitlik 6'da n cevap değişkeni sayısıdır. Gri ilişki derecesi 1'e en yakın olan deney optimum sonucu vermektedir. Tablo 9 incelendiğinde diğer deneylerle kıyaslandığında 9 numaralı deneyin gri ilişki derecesinin 1'e en yakın deney olduğu görülebilmektedir. Yapılan bu çalışma

için her üç bağımlı değişkeni birlikte optimize eden parametre değerleri: 9 bar basınç, 3000 mm/dak ilerleme, 0,25 mm artım ve 10° açı artımıdır.

**Tablo 9.** Gri ilişkisel analiz tablosu

Deney Sonuçları				Normalizasyon			Gri İlişki Katsayısı			Gri ilişki derecesi	Sıra
Deney No	(Fz) (N)	Ra (µm)	T (mm)	(Fz)	Ra	t	(Fz)	Ra	t		
1	1629,2	0,429	0,26	0,854	0,576	0,444	0,774	0,541	0,474	0,596	3
2	1768,8	0,502	0,24	0,608	0,415	0,222	0,560	0,461	0,391	0,471	7
3	1993,3	0,691	0,29	0,212	0,000	0,778	0,388	0,333	0,692	0,471	6
4	1753,4	0,412	0,24	0,635	0,612	0,222	0,578	0,563	0,391	0,511	5
5	1546,2	0,236	0,25	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000	0,429	0,810	2
6	1684,8	0,628	0,28	0,756	0,139	0,667	0,672	0,367	0,600	0,546	4
7	2060,7	0,411	0,24	0,093	0,615	0,222	0,355	0,565	0,391	0,437	8
8	2113,6	0,649	0,22	0,000	0,092	0,000	0,333	0,355	0,333	0,341	9
<b>9</b>	<b>1628,9</b>	<b>0,345</b>	<b>0,31</b>	<b>0,854</b>	<b>0,759</b>	<b>1,000</b>	<b>0,774</b>	<b>0,675</b>	<b>1,000</b>	<b>0,816</b>	<b>1</b>

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada yeni bir yöntem olan kayar artımlı şekillendirme metodu kullanılarak farklı açı artımları ile kademeli sac şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıkma basıncı, açı artımı, ilerleme ve artım miktarı olmak üzere dört farklı parametrenin şekillendirme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve et kalınlığına etkileri araştırılarak ayrı ayrı optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca gri ilişkisel analiz yapılarak anılan üç bağımlı değişkeni aynı anda optimize eden parametre seviyeleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Kademeli kayar artımlı şekillendirme metodunda en büyük kuvvet ilk adımda oluşmaktadır. Sonraki adımlarda şekillendirme kuvveti tedrici olarak azalmaktadır.
- Şekillendirme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için en önemli parametre artım miktarıdır.
- Et kalınlığı için en önemli parametre sıkma basıncıdır.
- Sıkma basıncının azalması et kalınlığını artırmaktadır.
- Şekillendirme kuvveti için optimum parametre seviyeleri:
  - 5,5 bar sıkma basıncı, 10° açı artımı, 3000 mm/dak ilerleme ve 0,25 mm artım miktarıdır.

- Yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre seviyeleri:
  - 5,5 bar sıkma basıncı, 5° açı artımı, 5000 mm/dak ilerleme ve 0,25 mm artım miktarıdır.
- Et kalınlığı için optimum parametre seviyeleri:
  - 2 bar sıkma basıncı, 5° açı artımı, 3000 mm/dak ilerleme ve 0,5 mm artım miktarıdır.
- Gri ilişkisel analize göre üç bağımlı değişkeni birlikte optimize eden parametre seviyeleri:
  - 9 bar sıkma basıncı, 10° açı artımı, 3000 mm/dak ilerleme ve 0,25 mm artım miktarıdır.

#### Kaynakça

- [1] Xu D, Malhotra R, Reddy NV, et al. (2012) Analytical prediction of stepped feature generation in multi-pass single point incremental forming. Journal of Manufacturing Processes 14:487–494. doi: 10.1016/j.jmapro.2012.08.003
- [2] Liu Z, Daniel WJT, Li Y, et al. (2014) Multi-pass deformation design for incremental sheet forming: Analytical modeling, finite element analysis and experimental validation. Journal of Materials Processing Technology 214:620–634. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.11.010
- [3] Suresh K, Prakash Regalla S, Kotkunda N (2018) Finite Element Simulations of Multi Stage Incremental Forming Process. Materials

- Today: Proceedings 5:3802-3810. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.633
- [4] 4. Shi X, Hussain G, Zha G, et al. (2014) Study on formability of vertical parts formed by multi-stage incremental forming. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 75:1049-1053. doi: 10.1007/s00170-014-6192-x
- [5] 5. Li JC, Yang FF, Zhou ZQ (2015) Thickness distribution of multi-stage incremental forming with different forming stages and angle intervals. Journal of Central South University 22:842-848. doi: 10.1007/s11771-015-2591-x
- [6] 6. Seçgin Ö, Özsert İ (2019) Experimental investigation of new blank holder approach for incremental forming method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 101:357-365. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2880-2>
- [7] 7. Seçgin Ö, Özsert İ (2019) DKP37 Sheet's Rolling Incremental Forming (TPIF\_RL) Process Optimization by Taguchi and Response Surface Method. Duzce University Journal of Science and Technology 7:201-2014.
- [8] 8. Seçgin Ö, Boru B, Özsert İ (2017) Yayınlanmamış Araştırma.
- [9] 9. Ayhan V, Çangal Ç, Cesur İ, et al. (2020) Optimization of the factors affecting performance and emissions in a diesel engine using biodiesel and EGR with Taguchi method. Fuel. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116371
- [10] 10. Altug M, Erdem M, Ozay C (2015) Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 78:1573-1583. doi: 10.1007/s00170-014-6702-x
- [11] 11. Kalyon A (2019) Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü ve İş Parçası İşleme Hızının Alüminyum Alaşımı İçin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 21:595-605. doi: 10.21205/deufmd.2019216223
- [12] 12. Yılmaz CE, Aslani MAA, Aslani CK (2019) Helianthus Annuus Çekirdeği Kabuklarında Toryum Sorpsiyonunun Taguchi Metodu Kullanılarak İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 21:741-747. doi: 10.21205/deufmd.2019216306
- [13] 13. Korucuk S (2018) Soğuk Zincir Taşımacılığı Yapan İşletmelerde 3PL Firma Seçimi : İstanbul Örneği. İğd Üniv Sos Bil Der 16:341-366.
- [14] 14. Ceviz E, Erden C (2015) Growth rate factor analysis of Turkey using Grey system theory.