



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

DKP37 Sacının Kayar Artımlı Şekillendirme (TPIF_RL) Yöntemiyle Şekillendirme İşleminin Taguchi ve Cevap Yüzey Metodu ile Optimizasyonu

Ömer SEÇGİN^{a,*}, İbrahim ÖZSERT^b

^a Gemi Makineleri İşletme Bölümü, Denizcilik Meslek Yüksek Okulu, Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

^b Makina Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya,
TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: osecgin@pirireis.edu.tr

ÖZET

Artımlı şekillendirme yöntemi metal endüstrisinde kullanılan hızlı ve ucuz bir prototip üretim yöntemidir. Bu yöntem değişik endüstri alanlarında geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada; DKP37 sacının TPIF_RL metoduyla şekillendirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, şekillendirme esnasında oluşan şekillendirme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Parametrelerin etkileşimleri incelenerek, optimum şekillendirme parametreleri belirlenmiştir. Şekillendirme kuvveti için deney faktörlerinin optimum seviyeleri; Basınç 9 bar, İlerleme 1500 mm/dak, Artım Miktarı 0,25 mm, Form Takımı Çapı 5 mm olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ise deney faktörlerinin optimum seviyeleri; Basınç 2 bar, İlerleme 500 mm/dak, Artım Miktarı 0,25 mm, Form Takımı Çapı 15 mm. Hem şekillendirme kuvveti hem de yüzey pürüzlülüğü için ikinci dereceden tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Form takımı çapının değişimi şekillendirme kuvvetini büyük ölçüde etkilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: DKP 37, Artımlı Şekillendirme, Yüzey Pürüzlülüğü, Şekillendirme Kuvveti

DKP37 Sheet's Rolling Incremental Forming (TPIF_RL) Process Optimization by Taguchi and Response Surface Method

ABSTRACT

The incremental forming method is a rapid and inexpensive prototype manufacturing method which is used in the manufacturing industry. This method has a wide usage potential in various industrial fields. In this study; formability of DKP37 sheet was investigated by the TPIF_RL method. The forming force and surface roughness were investigated. Interactions of the parameters have been researched. Optimum forming parameters have been determined.

The optimum levels of the test factors for the forming force are: Pressure 9 bar, Feedrate 1500 mm/min, Increment 0.25 mm, Forming Tool Diameter 5 mm. For surface roughness, the optimum levels of the test factors are; Pressure 2 bar, Feedrate 500 mm/min, Increment 0.25 mm, Forming Tool Diameter 15 mm. Quadratic estimation equations for both forming force and surface roughness were established. It has been seen that the forming tool diameter greatly influences the forming force.

Keywords: DKP 37, Incremental Forming, Surface roughness, Forming Force

I. GİRİŞ

Artımlı şekillendirme yöntemi metal endüstrisinde kullanılan hızlı ve ucuz bir prototip üretim yöntemidir. Bu yöntem otomotiv, havacılık, beyaz eşya gibi üretim proseslerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Artımlı şekillendirme yönteminde, üretilmek istenen parçanın şekli bir CAD programıyla oluşturulduktan sonra bir CAM programında form takımının hareket edeceği takım yolları oluşturulur. Bu takım yoluna göre hareket eden form takımı ile lokal baskı uygulanarak sac şekillendirilir [1].

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların form takımı çapı, fener mili devri vb. parametrelerin et kalınlığı değişimine ve şekillendirilebilirliğe etkilerini temel alan konular üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür [2]–[4]. Bu çalışmaların yanı sıra Lu ve arkadaşları [5] metal form takımı yerine su jeti kullanarak artımlı şekillendirme işlemi yapmışlardır. Çalışmalarında et kalınlığında geleneksel artımlı şekillendirme yöntemine göre daha iyi bir et kalınlığı dağılımı elde etmişlerdir. Devarajan ve arkadaşları [6] farklı alüminyum sacların (AA2024, 5083 ve 7075) iki noktadan temaslı artımlı şekillendirme yöntemi ile şekillendirilebilirliğini araştırmışlardır. Parça üzerinde dik açılarının olduğu bölgelerde et kalınlığının diğer bölgelere göre çok daha az olduğunu göstermişlerdir. Plastik kararsızlıktan dolayı AA2024 ve AA7075 malzemelerde yırtılmanın daha erken oluştuğunu belirtmişlerdir.

Kara ve Öztürk [7] DIN 1.2738 kalıp çeliğinin optimum işleme parametrelerini belirlemek için Taguchi metodunu kullanmışlardır. Çalışmada L18 ortogonal dizinini kullanmışlardır. İşleme sonrası oluşan yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını inceleyerek bu bağımlı değişkenler için tahmin denklemleri oluşturmuşlardır.

Özek ve Taşdemir [8] AISI 304 çeliğinin şekillendirilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında varyans anali yapmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünü inceleyerek tahmin denklemi oluşturmuşlardır.

Kıvak ve arkadaşları [9] AISI 316 çeliğinin delme işleminin optimizasyonunu yapmışlardır. Çalışma kapsamında Taguchi metodu ile L16 deney tasarımı yapmışlardır. Sinyal/Gürültü analizi ile optimizasyon yapmışlardır.

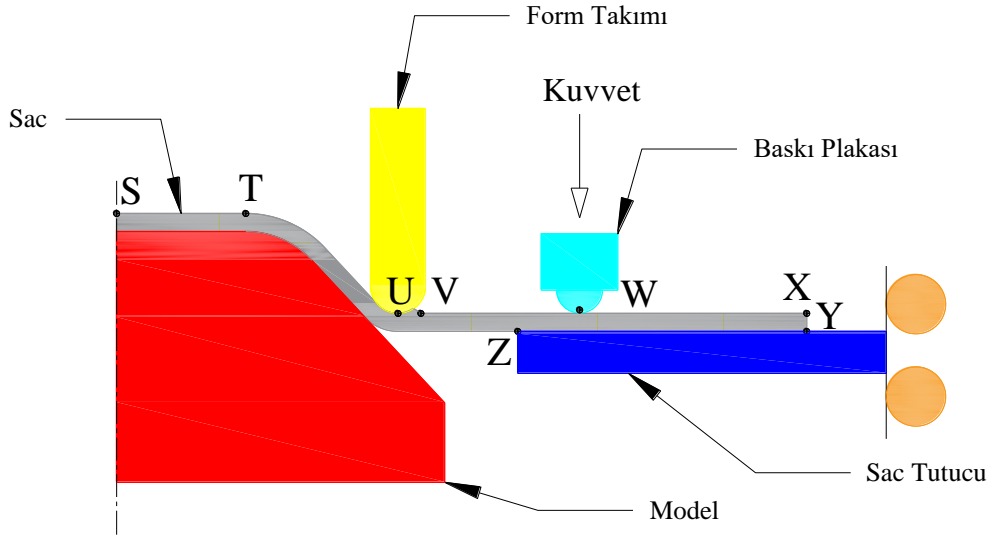
Bu çalışmada; DKP37 sacının yeni bir yöntem olan TPIF_RL metoduyla şekillendirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonucunda optimum şekillendirme parametreleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında ilk önce deneylerde kullanılacak faktörler ve seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra Taguchi yöntemi ile deney tasarımı yapılmıştır. Bu deney tasarımına göre deneyler yapılmıştır. Deneyler

esnasında oluşan şekillendirme kuvvetleri ve deney sonucunda oluşan yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Sinyal/Gürültü analizi yapılarak optimum faktör seviyeleri belirlenmiştir. Daha sonra Cevap Yüzey metodu kullanılarak faktörlerin ve faktör etkileşimlerinin analizi yapılmıştır. Şekillendirme kuvvetinin ve yüzey pürüzlülüğünün öngörüsünde kullanılabilecek ikinci dereceden denklemler oluşturulmuştur.

II. MATERYAL VE METOD

Geleneksel artımlı şekillendirme yönteminde sac, kenarlarından cıvatarla sabitlenmektedir. Bu çalışmada önerilen TPIF-RL yönteminde ise sac, kenarlarından cıvatarla sabitlenmemekte, derin çekme yönteminde olduğu gibi baskı plakası ile saca kuvvet uygulanmaktadır. Derin çekme işleminde baskı plakası kuvveti şekillendirmeyi büyük oranda etkilemektedir. Baskı plakası kuvveti olması gerekenden az geldiğinde kırışıklık, fazla geldiğinde ise yırtılmalar oluşmaktadır [10]. Bu çalışmada pnömatik klemplerle uygulanan kuvvet, sacın model üzerine doğru akmasına izin verecek seviyededir.

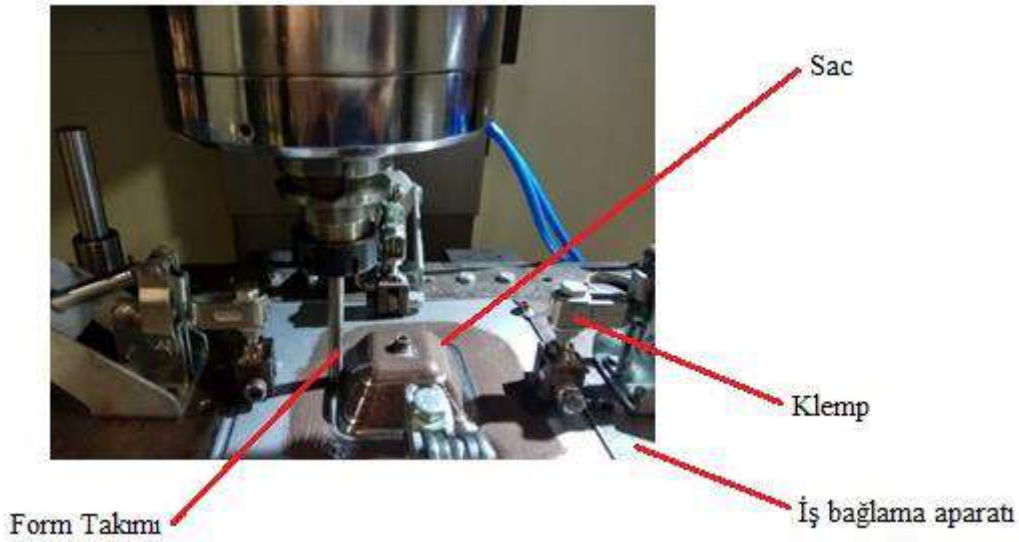
Bu çalışmada geliştirilen kayar artımlı şekillendirme yöntemi (TPIF_RL) Şekil 1’de verilmiştir. Sacın alt tarafında üretilmek istenen geometrinin modeli bulunmaktadır. Sac, form takımının hareketi ile bu model üzerine sıvanmaktadır. İşlem esnasında rijitliği sağlamak için, sac kenarlarına çizgisel kuvvet uygulayan baskı plakaları kullanılmıştır. Baskı plakalarının saca uyguladığı kuvvet pnömatik klemplerle kontrol edilmektedir.



Şekil 1. Kayar artımlı şekillendirme yöntemi

Burada,

- S-T: Form takımının temas etmediği bölge
- T: Şekillendirmeye başlanılan nokta
- T-U: Şekillendirilmiş bölge
- U-V: Yığılma bölgesi
- V-W: Şekillendirilmemiş gergin bölge
- W: Baskı plakası kuvvetinin uygulandığı nokta
- W-X: Şekillendirilmemiş ve gergin olmayan bölge
- Y-Z: Sacın tutucuya temas ettiği bölge



Şekil 2. TPIF_RL yöntemi ile sacın şekillendirilmesi

Baskı plakası kuvvetini oluşturmak için Şekil 2’de verilen pnömatik klemp kullanılmıştır. Sacın akışını kontrol edebilmek için sacın çevresine bir dizi pnömatik klemp yerleştirilmiştir. Bu klemlerle, sacın akmasına izin verebilecek mertebede sıkma kuvveti uygulanmıştır. Böylece şekillendirme esnasında oluşan gerilmeler azaltılmıştır. Klemp 2 bar basınçta 187,28 Newton kuvvet uygulamaktadır. 9 bar basınçta ise 1039,02 Newton kuvvet uygulamaktadır.

Tablo 1’de bu çalışma kapsamında kullanılan deney parametreleri ve seviyeleri verilmiştir.

Tablo 1. Deney parametreleri ve seviyeleri

Faktör	Seviyeler			Birim
	1	2	3	
Basınç	2	9	-	bar
İlerleme	500	1000	1500	mm/dak
Artım miktarı	0,25	0,5	0,75	mm
Form Takımı Çapı	5	10	15	mm

A. TAGUCHI METODU

Taguchi metodu deney sayısı ve maliyetini azaltan avantajlı bir deney tasarım metodudur [11]. Taguchi yöntemi ile işlem parametreleri basit ve hızlı bir şekilde optimize edilebilmektedir. Bu metotta ilk önce deneylerde kullanılacak faktörler ve seviyeleri belirlenir. Bu metotta ortogonal dizinler kullanılarak deney tasarımı yapılmaktadır. Kullanılacak ortogonal dizin, deney faktörleri ve seviyelerine göre belirlenmektedir [12]. Daha sonra deney tasarımında kullanılacak ortogonal dizin seçilir ve bu dizine göre deney tasarımı yapılır.

Bu çalışmada deneysel tasarım yöntemi olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada L18 ortogonal dizini kullanılmıştır. Deney tasarımı için Minitab 18 programı kullanılmıştır. Taguchi yöntemi ile Tablo 1’de verilen parametrelere göre deney tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan deney

tasarımı Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca bu tabloda deneyler esnasında oluşan şekillendirme kuvvetleri (Fz) ve yüzey pürüzlülükleri (Ra)’da verilmiştir.

Tablo 2. Deney tasarımı

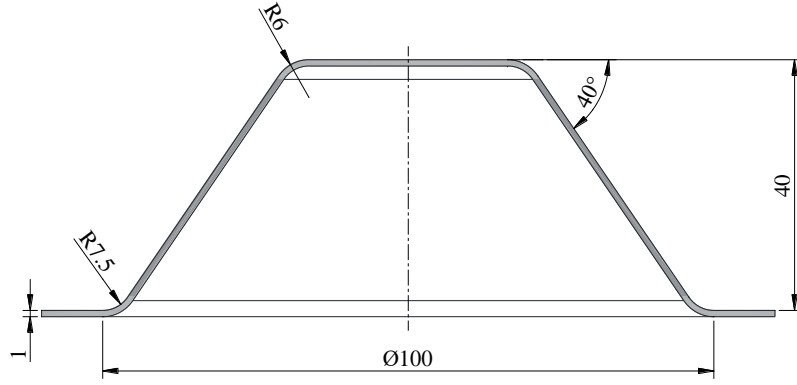
Deney No	Basınç (Bar)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	Form Takımı Çapı (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) (μm)	Şekillendirme Kuvveti (Fz) (N)
1	2	500	0,25	5	0,923	1372,69
2	2	500	0,5	10	2,770	1979,61
3	2	500	0,75	15	0,756	2638,50
4	2	1000	0,25	5	1,044	1368,76
5	2	1000	0,5	10	0,705	2002,81
6	2	1000	0,75	15	0,763	2696,02
7	2	1500	0,25	10	0,476	1731,87
8	2	1500	0,5	15	0,422	2593,39
9	2	1500	0,75	5	3,108	1424,32
10	9	500	0,25	15	0,401	2175,38
11	9	500	0,5	5	0,967	1416,81
12	9	500	0,75	10	1,679	1992,68
13	9	1000	0,25	10	0,530	1675,00
14	9	1000	0,5	15	0,635	2471,16
15	9	1000	0,75	5	8,187	1799,20
16	9	1500	0,25	15	0,654	2159,69
17	9	1500	0,5	5	2,011	1357,98
18	9	1500	0,75	10	1,541	1999,87

Deneyler Taguchi metoduna göre yapıldıktan sonra, numunelerin ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre sinyal/gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. Elde edilen S/N oranları kıyaslanarak optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. S/N oranları hesaplanırken hedeflenen sonucun “en büyük olanı en iyidir” veya “en küçük olanı en iyidir” durumuna göre farklı denklemler kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün ve şekillendirme kuvvetinin küçük olması istenmektedir. O nedenle analizlerde 1 numaralı denklemde verilen “en küçük en iyidir” eşitliği kullanılmıştır [13].

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

burada, " Y " performans karakteristiğidir, “n” ise deney sayısıdır.

Şekillendirme operasyonları DAHLIH MCV860 CNC freze tezgahında yapılmıştır. İş parçasının ölçüleri Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. İş parçası ölçüleri

Yüzey pürüzlülük ölçümleri MAHR MarSurf PS1 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ölçümler form takımının saca temas ettiği bölgeden (Şekil 1de U ile gösterilen noktanın hemen üst tarafından) yapılmıştır. Kuvvet ölçümleri ise Sakarya üniversitesinde geliştirilen 3 eksenli kuvvet ölçüm sistemiyle [14] yapılmıştır. İş bağlama aparatı kuvvet ölçüm sisteminin üzerine bağlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında 1 mm kalınlıktaki DKP37 sacı yatayla 40° açılı kare piramit formunda şekillendirilmiştir. Şekillendirilen parça yüksekliği 40 mm'dir. Şekil 4'te bu çalışma kapsamında şekillendirilen saclar verilmiştir.



Şekil 4. Deneylerde şekillendirilen saclar

B. CEVAP YÜZEY METODU

Cevap yüzey metodu, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini inceleyerek optimize edilmesini amaçlayan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bileşimidir [15]–[17]. Bu metod, performans karakteristikleri ile parametreleri arasındaki ilişkinin analizi, modellenmesi ve optimum parametre seviyesinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır [18], [19]. Öncelikle incelenecek olan parametreleri seçilip deney tasarımı yapılır. Sonuçlara yönelik tahminler ve doğrusal model katsayıları hesaplanır. Daha sonra ikinci-seviye model oluşturulur [15]. Bu çalışmada da S/N analizinden sonra cevap yüzey metodu kullanılarak parametreler arasındaki etkileşimler belirlenmiştir.

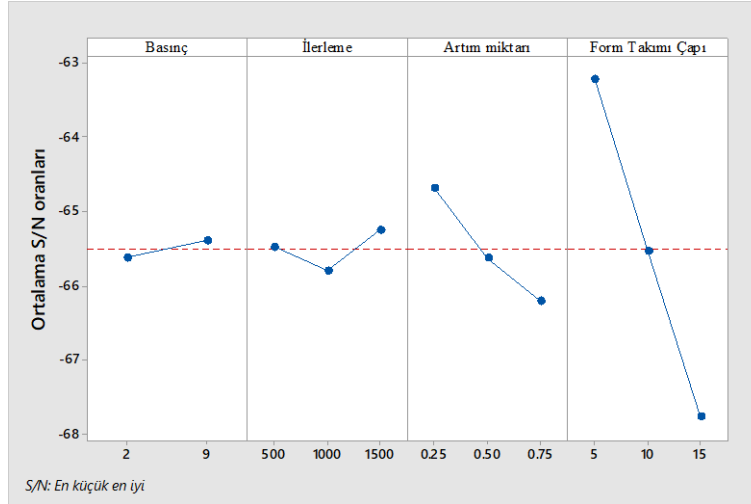
III. BULGULAR

A. ŞEKİLLENDİRME KUVVETİNİN ANALİZİ

Oluşan şekillendirme kuvvetlerinin sinyal/gürültü analizi yapıldığında elde edilen grafik Şekil 5’de verilmiştir. Şekillendirme kuvvetinin S/N oranları için cevap tablosu Tablo 3’de verilmiştir. En büyük S/N oranını veren seviye o parametrenin optimum seviyesidir.

Tablo 3. Şekillendirme kuvvetinin S/N oranları için cevap tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			
	Basınç	İlerleme	Artım miktarı	Form Takımı Çapı
Seviye 1	-65,62	-65,48	-64,69	-63,22
Seviye 2	-65,40	-65,80	-65,63	-65,54
Seviye 3		-65,25	-66,20	-67,77
Delta	0,23	0,55	1,51	4,55
Sıra	4	3	2	1



Şekil 5. Şekillendirme kuvveti S/N oranları için ana etki grafiği

Şekil 5’e göre şekillendirme kuvveti için en etkili parametre form takımı çapıdır. Şekillendirme esnasında saca temas eden takım yüzeyi azaldıkça (şekillendirmeye zorlanan yüzey alanı) şekillendirme kuvveti de azalmaktadır. Büyük çaplı form takımı kullanıldığında ise şekillendirilmeye zorlanan yüzey alanı arttığı için şekillendirme kuvveti de artmaktadır. İlerleme ve sıkma basıncının ise şekillendirme kuvvetini önemli oranda etkilememektedir. Şekillendirme kuvveti için hesaplanan optimum seviyeler Tablo 4’de verilmiştir:

Tablo 4. S/N analizine göre şekillendirme kuvveti için deney faktörlerinin optimum seviyeleri

Basınç (Bar)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	Form Takımı Çapı (mm)
9	1500	0,25	5

Tablo 2'ye göre, deneyler esnasında oluşan en küçük şekillendirme kuvveti 1357.98 N'dur. Tablo 4'te verilen optimum faktör seviyelerine kullanılarak yapılan doğrulama deneyinde ise 1171.36 N'luk şekillendirme kuvveti oluşmuştur. Böylece şekillendirme kuvveti optimize edilmiştir.

Varyans analizi (ANOVA) yapılarak kontrol faktörlerinin şekillendirme kuvvetine ana etkileri belirlenmiştir. Analizler %95 güven ve %5 önem seviyelerine göre yapılmıştır. Tablo 5'te şekillendirme kuvveti için varyans analizi tablosu verilmiştir.

Tablo 5. Şekillendirme kuvveti için varyans analizi tablosu (R-sq:%99,93, R-sq(adj):%99,7)

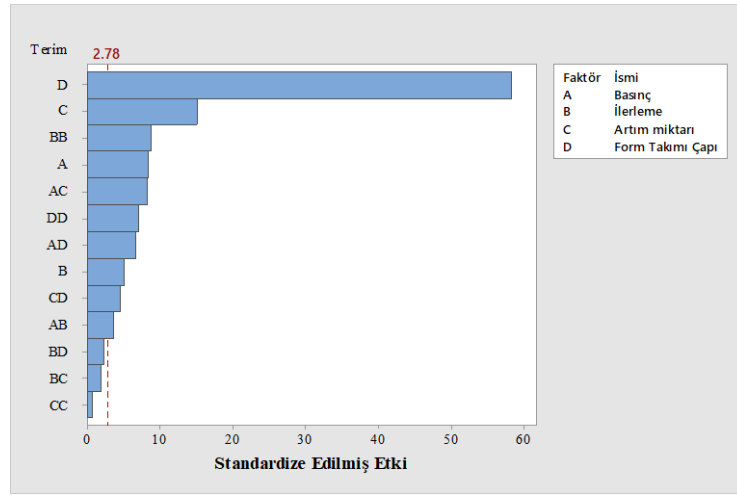
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Model	13	3541264	272405	437,17	0,000
Doğrusal	4	2538695	634674	1018,57	0,000
Basınç	1	44856	44856	71,99	0,001
İlerleme	1	16890	16890	27,11	0,006
Artım miktarı	1	144964	144964	232,65	0,000
Form Takımı Çapı	1	2117666	2117666	3398,57	0,000
Kare	3	78009	26003	41,73	0,002
İlerleme*İlerleme	1	48698	48698	78,15	0,001
Artım miktarı*Artım miktarı	1	318	318	0,51	0,514
Form Takımı Çapı*Form Takımı Çapı	1	31451	31451	50,47	0,002
2'li Etkileşim	6	87514	14586	23,41	0,004
Basınç*İlerleme	1	9010	9010	14,46	0,019
Basınç*Artım miktarı	1	43230	43230	69,38	0,001
Basınç*Form Takımı Çapı	1	28713	28713	46,08	0,002
İlerleme*Artım miktarı	1	2477	2477	3,97	0,117
İlerleme*Form Takımı Çapı	1	3347	3347	5,37	0,081
Artım miktarı*Form Takımı Çapı	1	13163	13163	21,12	0,010
Hata	4	2492	623		
Toplam	17	3543757			

Tablo 5'te P değeri 0,05'ten küçük olan faktörlerin ve etkileşimlerinin sonuçları istatistiksel olarak anlamlıdır. Buna göre İlerleme*Artım miktarı, İlerleme*Form Takımı Çapı ve Artım miktarı*Artım miktarı etkileşimleri istatistiki olarak anlamlı değildir. Diğer faktörler ve etkileşimlerinden anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. ANOVA tablosundaki F değerleri faktörlerin önem derecesini göstermektedir. Buna göre şekillendirme kuvveti üzerinde etkili olan en önemli faktör form takımı çapıdır. Etkisi en düşük olan faktör ise ilerlemedir.

Şekillendirme kuvvetinin tahmini için ikinci dereceden regresyon denklemi oluşturulmuştur. Elde edilen regresyon denklemi Eşitlik 2’de verilmiştir.

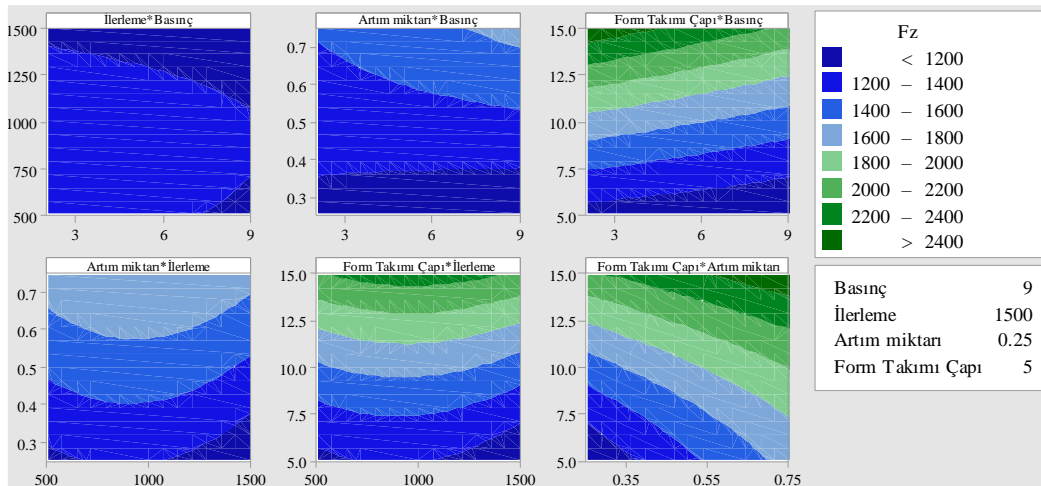
$$F_z = 717 - 44,58 x P + 0,558 x F + 532 x A + 69,8 x D - 0,000458 x F^2 - 156 x A^2 + 3,878 D^2 + 0,01737 x P x F + 98,2 x P x A - 4,001 x P x D + 0,1662 x F x A + 0,00966 x F x D - 50,9 x A x D \quad (2)$$

ANOVA sonucu şekillendirme kuvveti için pareto grafiği Şekil 6’de verilmiştir. Pareto grafiğine göre anlamlılık seviyesi 2,78’dir. Bu seviyenin üzerinde olan parametreler ve ikili etkileşimleri şekillendirme kuvveti üzerinde anlamlı etki sahibidir. 2,78’in altında kalan parametreler ve ikili etkileşimleri şekillendirme kuvveti üzerinde anlamlı etki sahibi değildir. Buna göre şekillendirme kuvveti üzerinde en etkili parametre form takımı çapıdır. İlerleme ile form takımı çapının; İlerleme ile artım miktarının; artım miktarının karesinin şekillendirme kuvveti üzerine herhangi bir etkisi yoktur. Diğer parametre etkileşimleri şekillendirme kuvvetini etkilemektedir.



Şekil 6. Şekillendirme kuvveti için pareto diyagramı

Deney parametrelerinin şekillendirme kuvveti üzerine etkileşimlerinin kontur grafiği Şekil 7’de verilmiştir. Bu grafikten form takımı çapının değişiminin şekillendirme kuvvetini büyük ölçüde değiştirdiği net olarak görülmektedir.



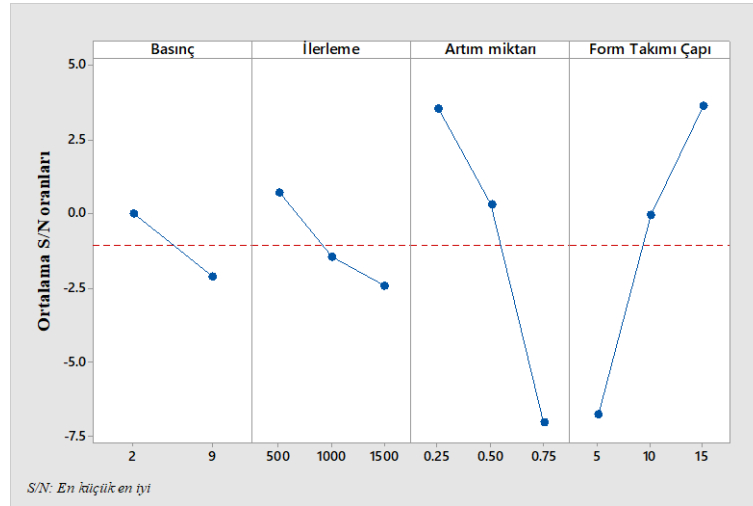
Şekil 7. Şekillendirme kuvveti (F_z) için parametre etkileşimlerinin kontur grafiği.

B. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ANALİZİ

Deneyler neticesinde oluşan yüzey pürüzlülükleri Tablo 2’de verilmiştir. Oluşan yüzey pürüzlülüklerinin S/N analizi yapıldığında elde edilen grafik Şekil 8’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranları için cevap tablosu Tablo 6’da verilmiştir. En büyük S/N oranını veren seviye o parametrenin optimum seviyesidir.

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğünün S/N oranları için cevap tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			
	Basınç	İlerleme	Artım miktarı	Form Takımı Çapı
Seviye 1	-0,00585	0,69903	3,52047	-6,76761
Seviye 2	-2,14009	-1,46804	0,30149	-0,05408
Seviye 3		-2,44989	-7,04085	3,60279
Delta	2,13424	3,14893	10,56132	10,37039
Sıra	4	3	1	2



Şekil 8. Yüzey Pürüzlülüğü S/N oranları için ana etki grafiği

Şekil 8’de görüldüğü gibi form takımı çapının büyümesi ve artım miktarının azalması ile yüzey pürüzlülüğü azaltılır. Bunun aksi durumda ise yüzey pürüzlülüğü büyük oranda artmaktadır. Tablo 2’de de verildiği gibi en küçük form takımı çapı ve en büyük ilerlemenin kullanıldığı 15 numaralı deneyde en büyük yüzey pürüzlülüğü oluşmuştur. Yüzey pürüzlülüğü için hesaplanan optimum seviyeler Tablo 7’te verilmiştir.

Tablo 7. S/N analizine göre yüzey pürüzlülüğü için deney faktörlerinin optimum seviyeleri

Basınç (Bar)	İlerleme (mm/dak)	Artım Miktarı (mm)	Form Takımı Çapı (mm)
2	500	0,25	15

Tablo 2'ye göre, deneyler esnasında oluşan en küçük yüzey pürüzlülüğü (Ra) 0,423 µm'dir. Tablo 7'te verilen optimum faktör seviyelerine kullanılarak yapılan doğrulama deneyinde ise 0,412 µm'lik yüzey pürüzlülüğü (Ra) oluşmuştur. Böylece yüzey pürüzlülüğü (Ra) optimize edilmiştir. Tablo 8'da yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu verilmiştir.

Tablo 8. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi tablosu ($R-sq: \%96,33$, $R-sq(adj): \%84,4$)

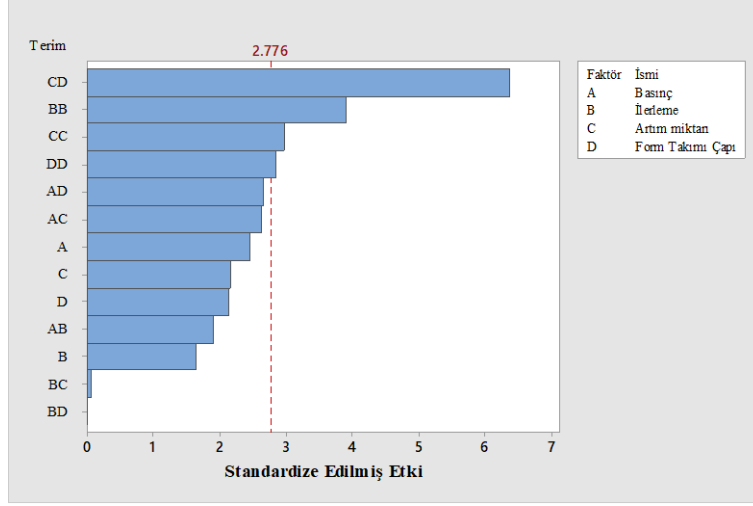
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri
Model	13	152,720	11,7477	8,07	0,029
Doğrusal	4	26,092	6,5230	4,48	0,088
Basınç	1	8,842	8,8424	6,08	0,069
İlerleme	1	3,922	3,9225	2,70	0,176
Artım miktarı	1	6,798	6,7979	4,67	0,097
Form Takımı Çapı	1	6,655	6,6548	4,57	0,099
Kare	3	45,224	15,0748	10,36	0,023
İlerleme*İlerleme	1	22,017	22,0168	15,13	0,018
Artım miktarı*Artım miktarı	1	12,803	12,8025	8,80	0,041
Form Takımı Çapı*Form	1	11,919	11,9187	8,19	0,046
Takımı Çapı					
2'li Etkileşim	6	61,392	10,2321	7,03	0,040
Basınç*İlerleme	1	5,290	5,2903	3,64	0,129
Basınç*Artım miktarı	1	10,173	10,1729	6,99	0,057
Basınç*Form Takımı Çapı	1	10,277	10,2771	7,06	0,057
İlerleme*Artım miktarı	1	0,006	0,0061	0,00	0,952
İlerleme*Form Takımı Çapı	1	0,000	0,0002	0,00	0,992
Artım miktarı*Form Takımı	1	58,961	58,9610	40,52	0,003
Çapı					
Hata	4	5,820	1,4551		
Toplam	17	158,540			

Tablo 8'de verilenlere göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan en önemli faktör sıkma basıncıdır. Etkisi en düşük olan faktör ise yine ilerlemedir.

Yüzey pürüzlülüğünün tahmini için ikinci dereceden regresyon denklemi oluşturulmuştur. Elde edilen regresyon denklemi Eşitlik 3'de verilmiştir.

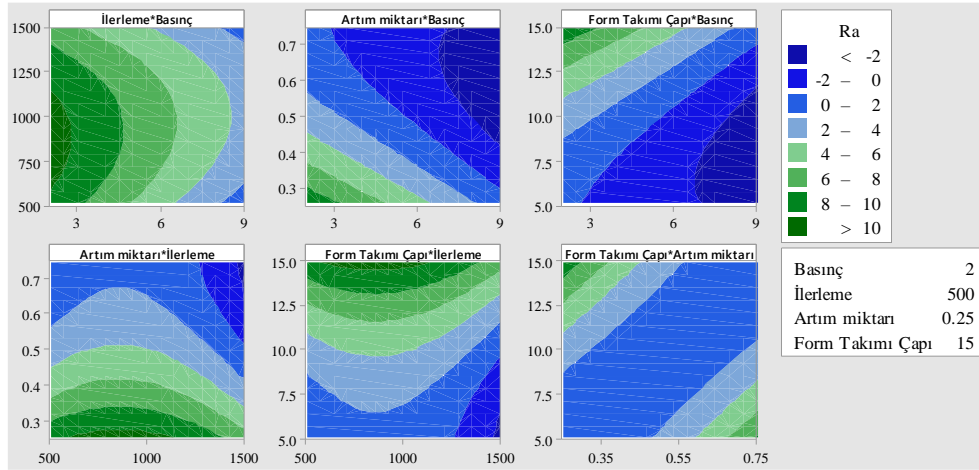
$$R_a = -5,62 - 0,672 x P + 0,016 x F - 1,3 x A + 0,414 x D - 0,00001 x F^2 + 31,3 A^2 + 0,0755 D^2 + 0,000421 x P x F + 1,506 x P x A - 0,0757 x P x D - 0,00026 x F x A + 0,000002 x F x D - 3,407 x A x D \quad (3)$$

ANOVA sonucu yüzey pürüzlülüğü için pareto grafiği Şekil 9'de verilmiştir. Pareto grafiğine göre anlamlılık seviyesi 2,776'dır. Bu seviyenin üzerinde olan parametreler ve ikili etkileşimleri yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı etki sahibidir.



Şekil 9. Yüzey pürüzlülüğü analizi için pareto diyagramı

Deney parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileşimlerinin kontur grafiği Şekil 10'da verilmiştir. Bu grafikten ilerleme değişiminin yüzey pürüzlülüğünü pek fazla etkilemediği görülmektedir.



Şekil 10. Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) için parametre etkileşimlerinin kontur çizimleri.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada; DKP37 sacının TPIF_RL metoduyla şekillendirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, şekillendirme esnasında oluşan şekillendirme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Parametrelerin etkileşimleri incelenerek, optimum şekillendirme parametreleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilenler aşağıda verilmiştir.

- Şekillendirme kuvveti için deney faktörlerinin optimum seviyeleri: Basınç: 9 bar, İlerleme: 1500 mm/dak, Artım Miktarı: 0,25 mm, Form Takımı Çapı: 5 mm.
- Yüzey pürüzlülüğü için deney faktörlerinin optimum seviyeleri: Basınç: 2 bar, İlerleme: 500 mm/dak, Artım Miktarı: 0,25 mm, Form Takımı Çapı: 15 mm.

- Doğrulama deneyleri sonucunda optimizasyonun başarılı olduğu görülmüştür.
- Hem şekillendirme kuvveti hem de yüzey pürüzlülüğü için ikinci dereceden regresyon denklemleri oluşturulmuştur
- Form takımı çapının değişimi şekillendirme kuvvetini büyük ölçüde etkilemektedir.
- İlerlemenin değişimi yüzey pürüzlülüğünü pek fazla etkilememektedir.

Çalışma kapsamında geliştirilen yüzey pürüzlülüğü modeli şekillendirme işlemi sonrasında elde edilen parçanın yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesinde kullanılabilir. Böylece nihai parçanın kullanılabilirliği artırılacaktır. Geliştirilen şekillendirme kuvveti modeli şekillendirme esnasında oluşan kuvvetin hesaplanmasında kullanılabilir. Böylece şekillendirme işlemi için daha küçük makineler kullanılarak enerji verimliliği sağlanabilir. Bu çalışmanın devamı olarak farklı faktörler ve seviyeleri kullanılarak kayar artımlı şekillendirilebilirlik geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmayı 2016-09-06-002 proje numaralı Sakarya Üniversitesi Kapsamlı Bilimsel Araştırma Projesi ile destekleyen Sakarya Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] Ö. Seçgin, E. Ata, ve İ. Özsert, “İmalat Endüstrisinde Kullanılan Artımlı Şekillendirme Yönteminin Sonlu Elemanlar Analizinde Takımyolu Tanımlama İçin Yeni Bir Yaklaşım”, *International Conference on Automotive Technologies (OTEKON 2018), Bursa*, ss. 1219–1225, 2018.
- [2] A. C. Reddy, “Experimental and Numerical Studies on Formability of Stainless Steel 304 in Incremental Sheet Metal Forming of Elliptical Cups”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 8, no. 1, pp. 971–976, 2017.
- [3] E. Malyer, “The Influence of Toolpath Strategy on Geometric Accuracy in Incremental Forming”, *Key Engineering Materials*, vol. 554–557, ss. 1351–1361, 2013.
- [4] M. Sbayti, A. Ghiotti, R. Bahloul, H. Belhadjsalah, and S. Bruschi, “Finite Element Analysis of hot Single Point Incremental forming of hip prostheses”, *MATEC Web of Conferences, NUMIFORM 2016*, 2016.
- [5] B. Lu, J. Cao, and H. Ou, “Theoretical and numerical analysis of incremental sheet forming by using high pressure water jet”, *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2011*, vol. 1, 2011.
- [6] N. Devarajan, G. Sivaswamy, R. Bhattacharya, D. P. Heck, and M. A. Siddiq, “Complex incremental sheet forming using back die support on aluminium 2024, 5083 and 7075 alloys”, *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 2298–2304, 2014.
- [7] F. Kara ve B. Öztürk, “Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel”, *Sensor Review*, 2018.
- [8] C. Özek and V. Taşdemir, “Modelling Of Surface Roughness With Variance Analysis In Turning Of Aisi 304 Austenitic Stainless Steel”, *Technological Applied Sciences*, sayı November 2008, pp. 305–314, 2009.
- [9] T. Kıvak, G. Samtaş, and A. Çiçek, “Taguchi method based optimisation of drilling parameters

in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer”, *Measurement*, vol. 45, pp. 1547–1557, 2012.

[10] N. Şen, “DP600 Malzemenin Şekillendirilmesinde Değişken Baskı Plakası Kuvveti Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, ss. 1295–1304, 2018.

[11] M. Altuğ, M. Erdem, C. Ozay, and O. Bozkır, “Surface roughness of Ti6Al4V after heat treatment evaluated by artificial neural networks”, *Materials Testing*, vol. 58, no 3, pp. 189–199, 2016.

[12] P. B. Uttarwar, S. K. Raini, and D. S. Malwad, “Optimization of process parameter on Surface Roughness (Ra) and Wall Thickness on SPIF using Taguchi method”, *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 781–784, 2015.

[13] T. Kıvak, G. Samtas, and A. Çiçek, “Taguchi method based optimisation of drilling parameters in drilling of AISI 316 steel with PVD monolayer and multilayer coated HSS drills”, *Measurement*, vol. 45, pp. 1547–1557, 2012.

[14] Ö. Seçgin, B. Boru, ve İ. Özsert, “Yayımlanmamış Araştırma”. Sakarya Üniversitesi, 2017.

[15] M. Koyunbakan ve A. Ünüvar, “Frezelemede Sertliğin Kesme Kuvvetlerine Etkisinin İncelenmesi Ve Cevap Yüzey Metodu Kullanılarak Modellenmesi”, 3. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, ss. 456–465, 2012.

[16] E. Kilickap, A. Yardımeden, and Y. H. Çelik, “Mathematical Modelling and Optimization of Cutting Force, Tool Wear and Surface Roughness by Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology in Milling of Ti-6242S”, *Applied Sciences*, vol. 7, no. 10, pp. 1064, 2017.

[17] E. Çiftçi ve S. Aktaş, “Hasta Memnuniyetine Yanıt Yüzeyi Yaklaşımı”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 2, s. 4, ss. 128–135, 2015.

[18] A. İ. Boyacı, K. Baynal, ve Y. Özdin, “Sabun Üretim Prosesinin Cevap Yüzeyi Yöntemi ve İstenebilirlik Fonksiyonu Yaklaşımı ile Optimizasyonu”, *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2017 Baku - Azerbaijan)*, c. 2017, sayı September, 2017.

[19] A. R. Motorcu, E. Ekici, and A. Kuş, “Investigation of the WEDM of Al / B 4 C / Gr reinforced hybrid composites using the Taguchi method and response surface methodology”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 2015.