

Yusuf Tansel İç\*   
Başkent Üniversitesi  
Ankara

İbrahim Ülke   
Gazi Üniversitesi  
Ankara

Yusuf Çelik   
Gazi Üniversitesi  
Ankara

Mustafa Yurdakul   
Gazi Üniversitesi  
Ankara

# Diyaframla Sac Şekillendirme İşleminde 15-5PH Malzeme İçin Sayısal ve Deneysel Tasarım Yöntemleri Kullanılarak Geri Esnemenin İncelenmesi

*Diyaframla sac şekillendirme havacılıkta yaygın olarak kullanılan bir şekillendirme yöntemidir. Bu işlemde sac kalıba tutturulur, form makinesine yerleştirilir ve gaz basıncı uygulanır. Gazın etkisiyle şişen diyafram, basıncı sac yüzeyine ileterek kalıbın şeklini almasını sağlar. Bu yöntemde işlem sonunda sac metalde ortaya çıkan davranışlardan biri de geri esnemedir. Kalıp tasarımı bu esneme miktarı dikkate alınarak gerçekleştirilir. Geri esneme miktarında öne çıkan parametrelerden bazıları büküm yarıçapı, büküm açısı, malzeme kalınlığı ve malzeme türüdür. Çalışmamızda havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan 15-5PH paslanmaz çeliğin diyaframla şekillendirilmesinde geri esneme davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için malzeme kalınlığı 0,813 mm, 1,27 mm, 1,6 mm ve 2 mm olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda 15-5PH malzemede proses parametrelerine bağlı olarak geri esneme oranını %90'ın üzerinde doğrulukla veren matematiksel bir ifade elde edilmiştir. Ayrıca çalışma parametrelerinin geri esneme davranışı üzerindeki temel etkileri Taguchi'nin L32 tasarımı temelinde ANOVA ile belirlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Geri esneme, 15-5PH paslanmaz çelik, Deneysel tasarım, Taguchi Metodu.*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 4 Eylül 2024

Kabul: 17 Kasım 2024

\*Sorumlu Yazar: Yusuf Tansel İç

Email: [yustanic@baskent.edu.tr](mailto:yustanic@baskent.edu.tr)

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1543433>

## 1. GİRİŞ

Teknolojideki ilerlemeyle birlikte farklı malzemeler ve bu malzemelere şekil verebilmek için farklı imalat yöntemleri ortaya çıkmıştır. Havacılık, mühendislik ve tasarımın çeşitli alanlarında kullanılan birçok gelişmiş teknikle donatılmış bir sektördür. Bu tekniklerden biri de diyaframla şekil verme yöntemidir. Bu yöntem uçak parçalarının üretiminde, özellikle ince metal levhaların şekillendirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Diyaframla şekil verme, yüksek hassasiyet gerektiren havacılık endüstrisi için ideal bir çözüm sunan gelişmiş bir tekniktir [1]. Havacılık sektöründe alüminyum alaşımlar, kompozitler ve pek çok çelik çeşidi kullanılmaktadır. Bunun yanında özellikle korozyon dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci gibi her geçen gün artan talepleri karşılamak için yeni malzemeler üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu malzemelerden biri de 15-5PH paslanmaz çeliğidir.

15-5PH paslanmaz çeliği alternatifleri olan AISI301 çeliğine göre mukavemet açısından, AISI4140 çeliğine göre ise korozyon dayanımı

açısından ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında AISI 301 çeliği soğuk şekillendirme işlemleri sırasında yüksek sertleşme potansiyeli gösterir; bu durum, elastik deformasyonun kalıcı plastik deformasyona göre daha büyük bir rol oynamasına ve geri esneme miktarının artmasına neden olmaktadır [2]. AISI 4140, orta karbonlu çeliği ise Cr-Mo alaşımı bir çelik olup, yüksek mukavemet ve sertlik değerleriyle bilinmektedir. AISI 4140'ın yüksek akma dayanımı ( $\geq 655$  MPa) şekillendirme işlemleri sırasında elastik deformasyonun ön planda olmasına neden olur.

Özellikle sertleştirilmiş veya temperlenmiş durumlarda, elastik davranış baskın hale gelir ve geri esneme etkisi daha belirgin bir hal alır [3]. Diyaframla şekil vermede de meydana gelen geri esneme temel olarak malzemenin akma dayanımına, kalınlığına ve büküm yarıçapına bağlıdır [4]. Büküm işlemi için kalıp tasarlanırken geri esneme miktarının öngörülerek tasarımın yapılması gerekir. Bu sebepten dolayı büküm parametrelerine bağlı olarak geri esneme miktarının tahmin edilebilmesi kritik öneme sahiptir. Codolini vd. yaptıkları çalışmada diyaframla şekil verme işleminin malzeme kırışması üzerindeki

etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Bunun yanında büküme giren malzemenin kontur yarıçapı ile flanş uzunluğu ve malzeme türünü dikkate alarak potansiyel kırılma ve deforme durumunun bağlı olduğu parametreler araştırılmıştır [5].

Literatürde diyaframla şekil vermede geri esneme davranışı incelenen bir başka malzeme çeşidi ise titanyum alaşımlarıdır. Yanagimoto ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sıcak ve soğuk şekillendirme ile üretilen yüksek dayanımlı çelik için geri esneme analizi yapmıştır. Bu çalışmada şekil verme sıcaklığının geri esneme ile ilişkisi incelenmiş ve 750 °K üzeri sıcaklıklarda geri esnemenin büyük ölçüde azaldığı belirlenmiştir [6]. Bunun yanında yüksek dayanımlı DP780 [7] DP600 [8] çeliği gibi özel amaçlar için geliştirilmiş malzemeler üzerinde de yapılmış çalışmalar literatürde mevcuttur.

Chomienne vd. yapmış oldukları çalışmada, 980 MPa dayanıma sahip çelik sacın V ve U bükülmesinde geri esneme miktarını, oda sıcaklığından 973 °K'e kadar değişen sıcaklıklarda deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonunda hem V hem de U bükümde, geri esneme miktarının sıcaklık artışıyla ve şekillendirme hızının düşürülmesiyle azaldığı tespit edilmiştir [9]. Yüksek dayanımlı çelikler için geri esnemenin incelendiği bir başka çalışmada ise geri esneme etkisinin araştırılması için U-şeklinde şekillendirme testinin hem deneyleri hem de sonlu eleman analizleri yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada farklı dayanımlara sahip JSC590R ve JSC780Y çelikleri ile daha yumuşak bir çelik türü olan JSC270C çeliği incelenmiştir. Simülasyonlarda kullanılmak üzere gerekli olan malzeme parametrelerini belirlemek amacıyla hidrolik şişkinlik testi, disk sıkıştırma testi ve özellikle çekme ve basma yükü altında döngüsel test gibi çeşitli mekanik testler yapılmıştır. Çalışma sonunda yüksek akma ve çekme dayanımına sahip çeliklerin hem geri esneme hem de kıvrılma büyüklüklerinde belirgin bir artış görülmüştür [10].

Wahed vd. yaptıkları çalışmada titanyum alaşımlarının diyaframla form verme işleminden sonra geri esneme miktarlarını incelemiştir. Girdi parametreleri olarak kalınlık, büküm açısı ve büküm yarıçapını kullanmışlardır [11]. Mezeix vd. ise daha farklı bir malzeme türü olarak kompozit malzemelerdeki geri esnemeyi incelemiştir.

Çalışmada farklı boyut ve kalınlıktaki tek yönlü prepreg yerleştirme numunelerinin geri esnemesi deneysel bir bakış açısıyla analiz edilmiştir.

Bununla beraber çalışma kapsamında kat gerilmesi ve takım-laminat arayüz özellikleri gibi geri esnemenin fiziksel mekanizmasını hesaba katan

sayısal bir model hazırlanmıştır. Deneysel veriler ve sayısal sonuçlar arasındaki karşılaştırmalı çalışma, simülasyonun, bu çalışma sırasında test edilen numunenin boyut ve kalınlık aralığı dahilinde geri esneme deformasyonuna dair yeterince güçlü bir öngöründe bulunabildiğini göstermiştir [12]. Wang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise, karbon fiber takviyeli plastik laminatlar otoklavda sertleştirme yoluyla üretilmiştir. Laminatların bükme işlemindeki bozulmalarını ve fiber yönünün, metal kalınlık oranının ve sıcaklığın geri esneme üzerindeki etkilerini incelemek için üç noktalı bükme, damgalamayla bükme ve mikromorfoloji analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, fiber yönünün laminatların bozulmaları ve geri esnemeleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [13]. Hou ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise homojen alüminyum alaşım numuneleri kullanılarak farklı işlem sıcaklıkları, yükleme gerinim oranları ve gerinimler ile tek geçişli izotermal sıcak sıkıştırma ve yük atma testleri gerçekleştirilmiştir. Sıcak şekillendirilmiş alüminyum alaşımlarının gerinim, gerinim hızı ve şekillendirme sıcaklığına bağlı yük atma ve geri esneme davranışları incelenmiştir.

Gerinim sertleşmesinin, dinamik ve statik yumuşamanın alaşımların geri esneme davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir [14]. Liu vd. ise soğuk ultra dayanıklı çeliklerin sonlu elemanlar yöntemiyle geri esneme analizini yapmışlardır.

Young modülü değişimini analiz çalışmalarına dahil ederek geri esneme tahmini yapılan çalışmada geliştirilen model, farklı şekillendirme parametrelerinin malzemenin geri esnemesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için uygulanmıştır. Çalışma sonucunda flanş genişliği, yan duvar yüksekliği, hadde aralığı ve mesafe arttıkça geri esnemenin arttığı, şerit kalınlığı ve yüzey genişliği arttıkça geri esnemenin azaldığı görülmüştür [15].

Diyaframla şekil vermede geri esneme miktarının tahmin edilebilmesinde kullanılan bir başka teknik ise sayısal modeller ve deneysel doğrulama çalışmalarıdır. Thipprakmas ve Phanitwong ANOVA yaklaşımlarını sonlu elemanlar analizi ile birlikte kullanarak V-büküm prosesindeki bükülme açısı, malzeme kalınlığı, aşınma direnci ve baskı kalıp çapı gibi parametrelerin geri esneme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında sayısal analiz simülasyonları deneylerle doğrulamışlardır. Çalışma sonunda malzeme kalınlığının geri esneme miktarı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [16]. Bir diğer çalışmada ise araştırmacılar geri esnemenin etkilediği parametreleri incelemişler, kalınlıkla ters orantılı olduğunu tespit etmişler ve akma geriliminin

elastisite modülüne oranının artmasıyla beraber geri esnemenin azaldığını belirlemişlerdir [17].

Tekaslan vd. yaptıkları çalışmada V büküm yöntemiyle paslanmaz çelik malzeme üzerinde oluşan geri esnemeyi incelemişlerdir. Deneysel ve analitik olarak yürütülen bu çalışmada farklı kalınlık ve büküm açılarında malzemenin geri esneme davranışı incelenmiştir. Çalışmada açıyla beraber geri esnemenin arttığı sonucuna ulaşılmıştır [18]. Esat vd. ise çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile Al2014 ve Al6061 malzemeler için geri esneme analizi yapmışlardır. Matematiksel bir model ortaya konulan çalışmada geri esneme faktörünü ifade eden bir değer türetilerek önceki çalışmalara benzer olarak geri esneme miktarının kalınlık arttıkça azaldığını tespit etmişlerdir [19]. Panthi vd. sonlu elemanlar analizi ile yaptıkları çalışmada büküm açısının artmasıyla geri esnemenin arttığını, sürtünmenin geri esneme üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ve geri esnemenin, akma gerilmesi arttıkça arttığı ancak elastisite modülünün artmasıyla azaldığını belirlemişlerdir [20].

Literatürde 15-5PH malzemelerin diyaframla şekillendirilmesinde geri esneme davranışının incelendiği çalışmalar ise oldukça kısıtlıdır. Bu çalışmalardan birinde araştırmacılar 15-5PH malzemesinin fiziksel özelliklerini, 900-1150 °C sıcaklık aralığında sıcak sıkıştırma testleri ve 0,001 ve 0,5 arasında değişen gerinim oranları kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada malzemenin gerinimi tüm deformasyon koşullarında değerlendirilmiş ve elde edilen değerler, aktivasyon enerjisini hesaplamak için kullanılmıştır [21]. Mevcut çalışmalar tarandığında 15-5PH paslanmaz çeliğin geri esneme davranışının incelendiği çalışmaların genel olarak 90° büküm açısı için yapılmış oldukları tespit edilmiştir. Havacılık alanında son derece önemli olan ve yaygın kullanıma sahip bu malzeme için literatürdeki bu açığın kapatılması açısından sunmuş olduğumuz çalışma büyük öneme sahiptir. Bunun yanında çalışmamız hem analiz ettiği malzeme tipi hem de büküm açısını dikkate alması açısından özgün bir yapıya sahiptir.

## 2. MATERYAL ve METOT

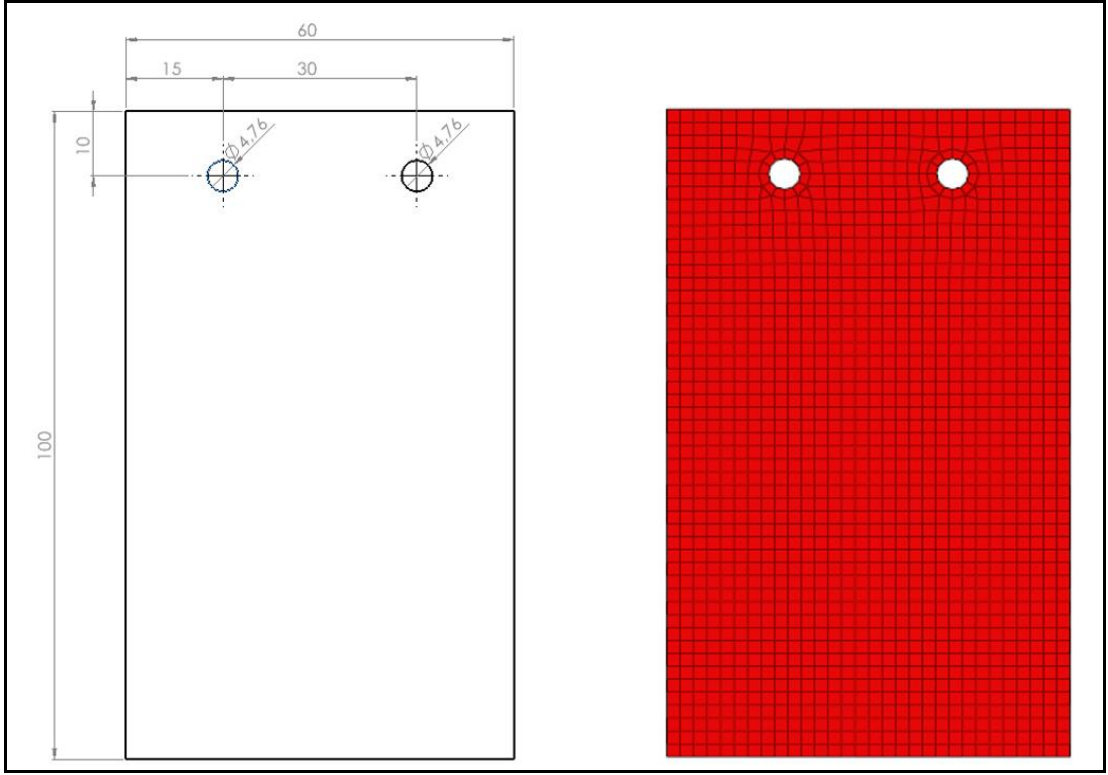
Deneysel çalışmalarda ABB Metallurgy firmasına ait Quintus markalı QFC 1.2X2-1400 model tezgâh kullanılmıştır. Tezgâhta yağ ile 140 MPa değerine kadar basınçlandırma yapılmakta ve 2,54 mm kalınlığa sahip poliüretan kauçuk malzemeli diyafram vasıtasıyla bu basınç kalıbın üzerine yerleştirilmiş olan uçak parçasına iletilmektedir. Bu işlemin sonucunda parça kalıbın üzerine sıvanarak istenilen forma gelmektedir. Kalıp tasarımı ise parçaların geometrilerine göre spesifik olarak yapılmıştır. Çalışmada mevcut koşullara göre parametreler belirlenerek Tablo 1’de sunulmuş ve bu parametreler dikkate alınarak sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan ağ yapısı LS DYNA üzerinden seçilmiş olup standart aralık değeri 2 mm olarak belirlenmiştir. Delik çevresinden tutma işlemi yapıp böyle bir kısıtlama atandığı için bu bölgelerde daha yoğun olarak 1,5 mm düzeylerinde bir ağ yoğunluğu tercih edilmiştir (Şekil 1). Kalıp daha geniş skalada Radyus ve açılar için tasarlanmıştır. Mevcut çalışmamız için gerekli olan kısım orta kısım olduğundan ağ yoğunluğu ve analiz süresi hesaba katılarak modelde kesme yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kalıp ve numuneler CATIA V5 paket programı ile modellenmiş ve LS Prepost programı ile analiz işlemi yapılmıştır. Girdi değeri olarak 650 bar değerinde basınçlandırma işlemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde farklı kalınlıklar için 4 katmanlı kabuk eleman modellenmiştir.

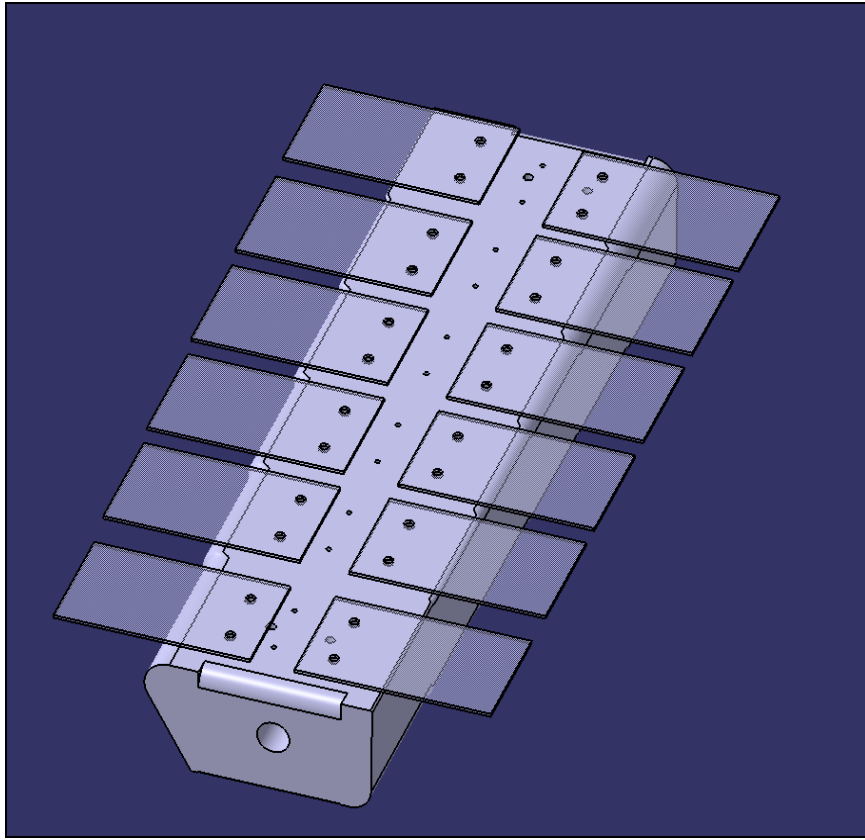
Analiz süreci iki kısımdan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. İlk kısımda basınçla beraber sac numuneler kalıbın şeklini almaktadır. İkinci aşamada ise girdi olarak parçaların sıvanmış pozisyonda bulunduğu ve gerinim yüklediği hali alınıp malzeme özellikleri dahilinde serbest bırakma hareketi tanımlanmıştır. Bu iki aşamanın art arda gerçekleştirilmesi neticesinde geri yaylanma miktarları tespit edilmiştir.

Tablo 1. Sayısal ve deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler

Parametreler	Seviyeler			
Kalınlık	0,813 mm	1,27 mm	1,60 mm	2,00 mm
Büküm radyusu	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm
Büküm açısı	90°		120°	



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numune (solda) ve analizdeki ağ yapısı (sağda)



Şekil 2. Sayısal analiz programında parçaların kalıba bağlanması

### 3. BULGULAR

Çalışma sonunda deneysel ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak Tablo 2’de sunulmuştur. İkili karşılaştırmalar için her biri üç tekrarlı olarak yapılan deneysel çalışmaların aritmetik ortalamaları dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarıyla olan farkların elde edilmesinde bu ortalama değerler kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için deneysel çalışmalarda kullanılan kalıbın birebir ölçülerdeki hali çizilmiş ve Şekil 2’de

sunulmuştur. Sac malzemelerin elastisite modülünün, akma dayanımının ve poisson oranının belirlenebilmesi için beş tekrarlı çekme testleri yapılmış ve bu değerler sırasıyla 161 GPa, 911 MPa ve 0,27 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler sayısal analiz çalışmalarında girdi olarak şekilde program arayüzüne tanımlanmıştır. Deneyleerin yapılması için gerekli olan kalıp 90° ve 120° büküm açılarını içeren, 2,5, 5, 7,5 ve 10 mm büküm radiuslarına sahip olarak tasarlanmıştır.

Tablo 2. Deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

No	Kalınlık (mm)	Radius (mm)	Büküm Açısı (°)	Deney 1. Tekrar (°)	Deney 2. Tekrar (°)	Deney 3. Tekrar (°)	Deney Ortalaması (°)	SEA Sonuç (°)	Deney-SEA Fark (°)
1	0,813	2,50	90	9,7	9,1	9,3	9,37	6,4	2,97
2	0,813	5,00	90	14,3	13,8	13,8	13,97	12,3	1,67
3	0,813	7,50	90	18,9	18,9	18,8	18,87	11,6	7,27
4	0,813	10,00	90	24,8	24,3	23,9	24,33	23,0	1,33
5	1,270	2,50	90	6,2	6,5	6,5	6,40	5,5	0,90
6	1,270	5,00	90	9	9,5	9,6	9,37	9,7	-0,33
7	1,270	7,50	90	13	12,3	12,3	12,53	12,2	0,33
8	1,270	10,00	90	16	16,1	15,6	15,90	15,5	0,40
9	1,600	2,50	90	5,7	5,2	5,2	5,37	4,8	0,57
10	1,600	5,00	90	9	7,9	7,9	8,27	7,6	0,67
11	1,600	7,50	90	9,9	10,2	10,5	10,20	10,3	-0,10
12	1,600	10,00	90	13	13	13	13,00	13,7	-0,70
13*	2,000	2,50	90	5,3	5,2	5	5,17	4,5	0,67
14	2,000	5,00	90	7,6	7,4	7,9	7,63	6,4	1,23
15	2,000	7,50	90	9,7	8,9	10	9,53	10,6	-1,07
16	2,000	10,00	90	10,9	11	10,3	10,73	9,5	1,23
17	0,813	2,50	120	11,3	9,3	9,6	10,07	7,4	2,67
18	0,813	5,00	120	14,9	15,2	15,3	15,13	14,5	0,63
19	0,813	7,50	120	23,8	23,9	23,1	23,60	17,7	5,90
20	0,813	10,00	120	29,5	30,2	29,7	29,80	26,5	3,30
21	1,270	2,50	120	5,8	6,2	7,5	6,50	6,5	0,00
22	1,270	5,00	120	10,6	10,3	10,6	10,50	10,2	0,30
23	1,270	7,50	120	15	14,7	15	14,90	14,6	0,30
24	1,270	10,00	120	17,8	18,7	19,1	18,53	18,1	0,43
25	1,600	2,50	120	7	9,8	4,9	7,23	7,6	-0,37
26	1,600	5,00	120	7,5	8	7,8	7,77	11,0	-3,23
27	1,600	7,50	120	13,9	12,3	12,3	12,83	12,5	0,33
28	1,600	10,00	120	16,8	16,4	16	16,40	14,8	1,60
29	2,000	2,50	120	4,4	5,4	4,1	4,63	5,6	-0,97
30	2,000	5,00	120	7,8	6,5	6	6,77	8,1	-1,33
31	2,000	7,50	120	12,8	11,8	11,6	12,07	10,4	1,67
32	2,000	10,00	120	13,2	12,3	12,5	12,67	12,55	0,12

\* Optimal sonuç

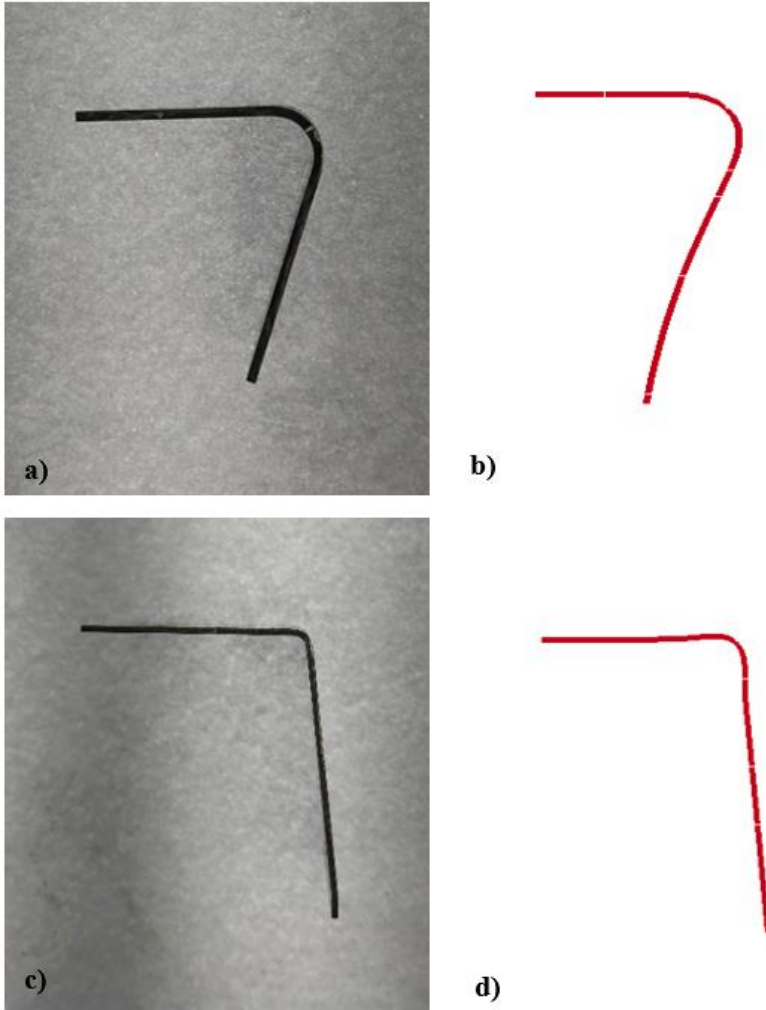
Deneysel çalışma sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçları beraber incelendiğinde açısıl farkların genellikle ihmal edilebilir oranda olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber büküm radyusu arttıkça geri esneme miktarının diğer parametreler ne olursa olsun arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 1'deki veriler ve Şekil 3'te sunulan görsellerden anlaşıldığı gibi 15-5PH malzemede sac kalınlığı azaldıkça geri esneme miktarının arttığı belirlenmiştir. Kalınlık açısından deneysel çalışma sonuçları ve sonlu elemanlar analiz (SEA) sonuçları incelenmiş ve şekil 6'da sunulmuştur. Çalışmada 1,270mm 1,600mm ve 2,000mm sac kalınlıklarında deneysel çalışma sonuçları ile SEA sonuçlarında birbirlerine çok yakın değerler elde edilmişken 0,813mm sac kalınlığında geri esneme değerinde analiz sonuçlarının deneysel değerlerden uzaklaştığı görülmüştür. Büküm açısı ve Radyus değerleri incelendiğinde bu durumun olmayışı sac kalınlığındaki azalmanın SEA çalışmalarında ele alınan eleman sayısının azalması neticesinde ortaya

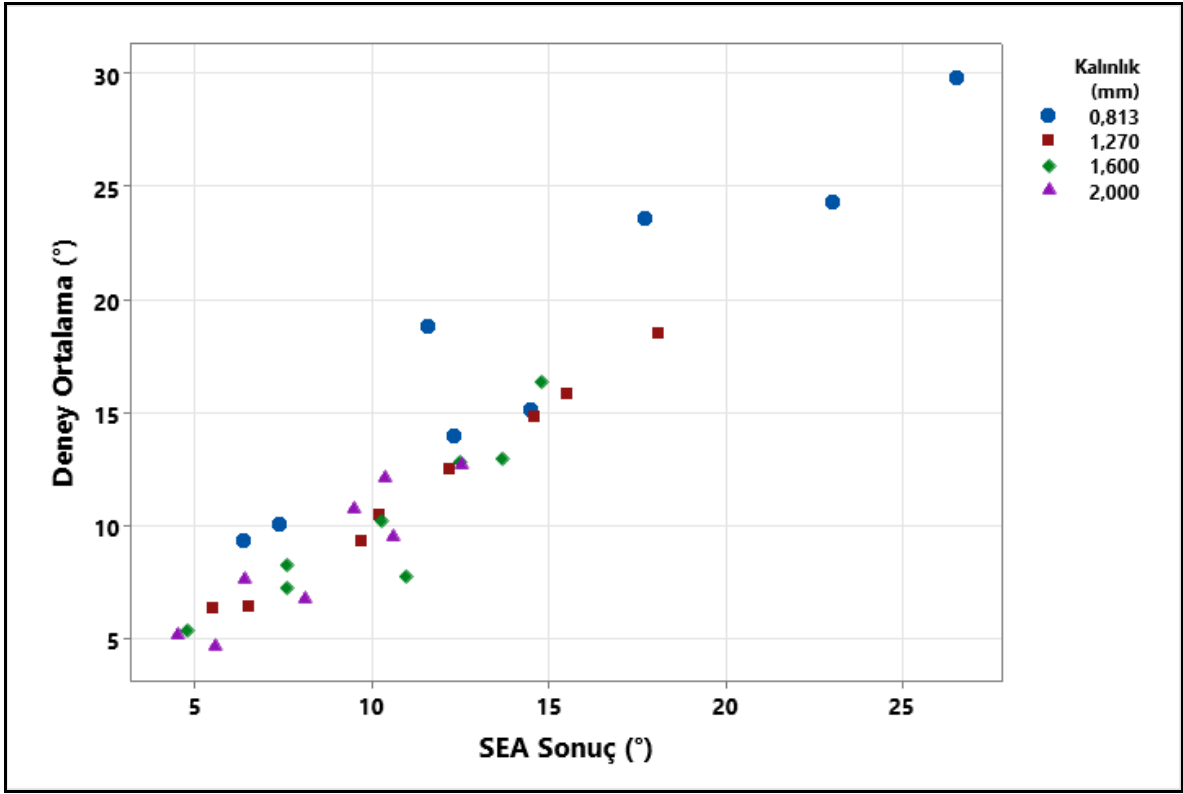
çıktığını düşündürmektedir. Bununla beraber aynı girdi parametreleri altında yapılan analizlerde hacimdeki azalma kaba ağ ile aynı etkiye sahip olduğu için hata miktarının artmasına sebep olmaktadır.

#### 4. TAGUCHİ METODU İLE ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde Taguchi'nin L32 tasarımı baz alınarak bir analiz gerçekleştirilmiş ve çalışmanın üçüncü bölümünde sunulan sonuçlar desteklenmiştir. Taguchi metodu analiz sonuçlarına göre kalınlık ve radyüs birlikte etkileşimlerinde sadece 0,813\*2,5, 0,813\*5, 0,813\*7,5 ile 1,600\*2,5, 1600\*7,5 ikili etkilerinin geri yaylanma üzerinde etkin olduğu görülmektedir (Tablo 3). Diğer taraftan kalınlık ve açı faktörleri açısından durum incelendiğinde sadece 0,813\*90 ikili etkisinin etkin olduğu ve radyus ile açı etkileşiminde tüm kombinasyonların sonuçlar üzerinde etkili olduğu görülmektedir ( $p \leq 0,05$ ).



Şekil 3. Bazı karşılaştırmalı deneysel ve sayısal analiz sonuçları a) 31 numaralı deney b) 31 numaralı analiz c) 5 numaralı deney d) 5 numaralı analiz



Şekil 4. Kalınlık açısından deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 3. Tahminlenen model katsayıları

Terim	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	12,1885	0,1092	111,627	0,000
Kalınlık 0,813	5,9531	0,1891	31,478	0,000
Kalınlık 1,270	-0,3594	0,1891	-1,900	0,090
Kalınlık 1,600	-2,0552	0,1891	-10,867	0,000
Radyus 2,5	-5,3469	0,1891	-28,272	0,000
Radyus 5,0	-2,2635	0,1891	-11,969	0,000
Radyus 7,5	2,1281	0,1891	11,253	0,000
Açı (°) 90	-0,8990	0,1092	-8,233	0,000
Kalınlık*Radyus 0,813 2,5	-3,0781	0,3276	-9,397	0,000
Kalınlık*Radyus 0,813 5,0	-1,3281	0,3276	-4,054	0,003
Kalınlık*Radyus 0,813 7,5	0,9635	0,3276	2,941	0,016
Kalınlık*Radyus 1,270 2,5	-0,0323	0,3276	-0,099	0,924
Kalınlık*Radyus 1,270 5,0	0,3677	0,3276	1,123	0,291
Kalınlık*Radyus 1,270 7,5	-0,2406	0,3276	-0,735	0,481
Kalınlık*Radyus 1,600 2,5	1,5135	0,3276	4,621	0,001
Kalınlık*Radyus 1,600 5,0	0,1469	0,3276	0,448	0,664
Kalınlık*Radyus 1,600 7,5	-0,7448	0,3276	-2,274	0,049
Kalınlık*Açı (°) 0,813 90	-0,6094	0,1891	-3,222	0,010
Kalınlık*Açı (°) 1,270 90	0,1198	0,1891	0,633	0,542
Kalınlık*Açı (°) 1,600 90	-0,0260	0,1891	-0,138	0,894
Radyus*Açı (°) 2,5 90	0,6323	0,1891	3,343	0,009
Radyus*Açı (°) 5,0 90	0,7823	0,1891	4,136	0,003
Radyus*Açı (°) 7,5 90	-0,6344	0,1891	-3,354	0,008
<b>S = 0,6177</b>		<b>R-Sq = %99,7</b>		<b>R-Sq(adj) = %98,9</b>

Yine Tablo 3'te ANOVA tablosundan da izlenebileceği gibi ana ve ikili etkileşimlerin sonuç üzerinde etkin olduğu izlenmektedir. Tablo 4 ise optimal faktör seviyelerini göstermekte olup, kalınlık için 4. Seviye (2mm), Radyus (2,5mm) ve açı (90°) içine birinci seviyelerin optimal olduğu görülmektedir.

Bunun yanında Şekil 4'te sunulan ana etki grafikleri incelendiğinde de bu ilişki görülmektedir.

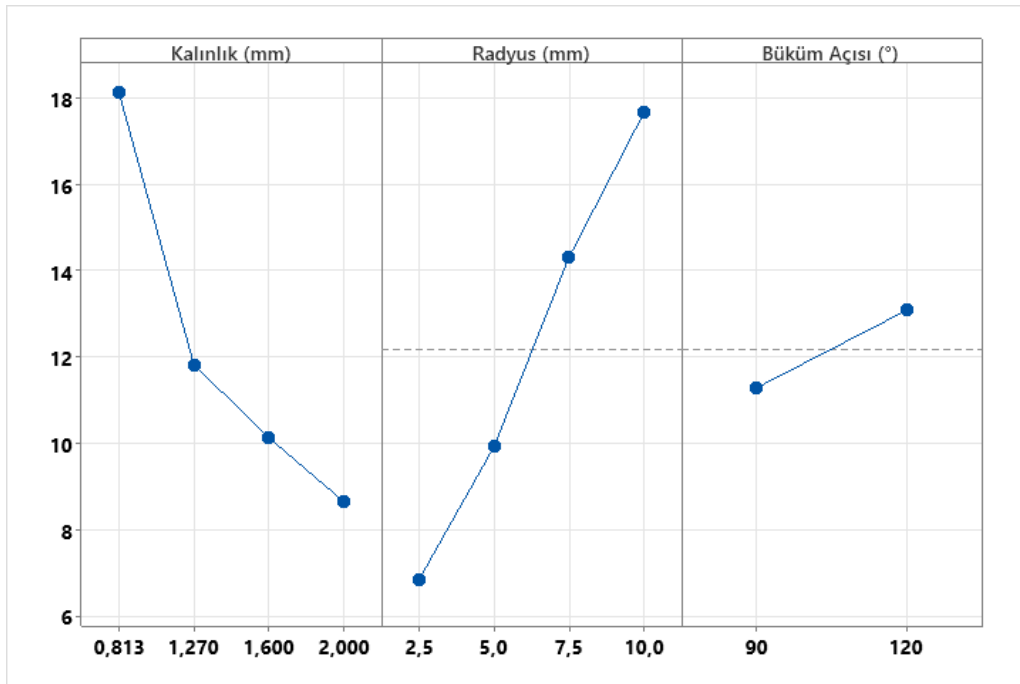
Radyus ile geri esneme arasında kalınlıkla olan ilişkiden tam ters bir durum söz konusudur. Radyus değeri veya büküm açısı arttıkça geri esnemenin de arttığı yapılan analizler sonunda tespit edilmiştir. Şekil 5'te sunulan ikili etki grafiklerinde de ana etkiye benzer ilişkiler görülmektedir. Çalışmada kalınlık, Radyus ve büküm açısı değişkenlerinin geri esneme üzerinde doğrudan artırıcı veya azaltıcı etkiye sahip oldukları görülmüştür.

Tablo 4. ANOVA tablosu

	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Kalınlık (mm)</b>	3	418,51	418,512	139,504	365,66	0,000
<b>Radyus (mm)</b>	3	546,38	546,377	182,126	477,37	0,000
<b>Açı (°)</b>	1	25,86	25,860	25,860	67,78	0,000
<b>Kalınlık (mm)*Radyus (mm)</b>	9	74,11	74,113	8,235	21,58	0,000
<b>Kalınlık (mm)*Açı (°)</b>	3	5,22	5,218	1,739	4,56	0,033
<b>Radyus (mm)*Açı (°)</b>	3	16,18	16,183	5,394	14,14	0,001
<b>Kalıntı Hata</b>	9	3,43	3,434	0,382		
<b>Toplam</b>	31	1089,70				

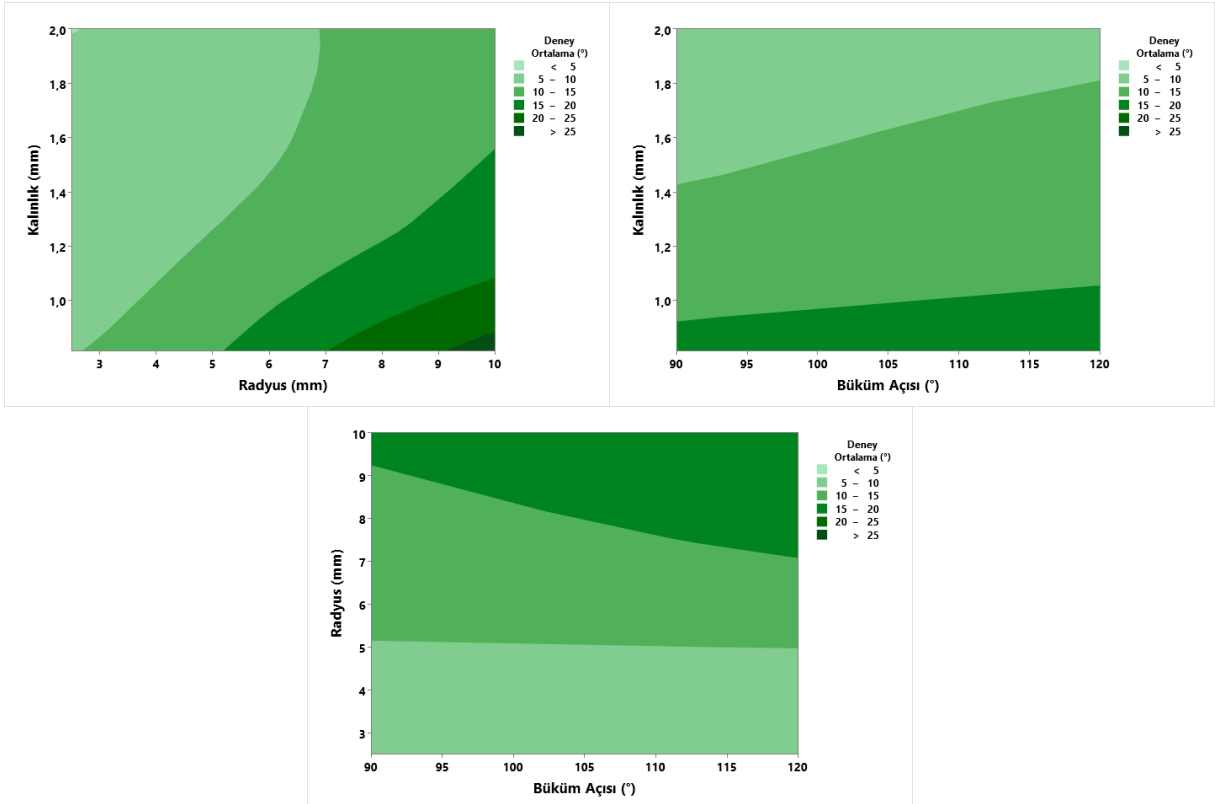
Tablo 5. En iyi parametre seviyeleri

Seviye	Kalınlık (mm)*Radyus (mm)		Açı (°)
	(mm)	(mm)	
<b>1</b>	18,142	<b>6,842</b>	<b>11,290</b>
<b>2</b>	11,829	9,925	13,088
<b>3</b>	10,133	14,317	
<b>4</b>	<b>8,650</b>	17,671	
<b>Delta</b>	9,492	10,829	1,798
<b>Rank</b>	2	1	3



Şekil 5. Deney parametrelerinin ortalama geri esnemeye bireysel etkileri





Şekil 6. Ortalama geri esneme ile deney parametrelerinin ikili ilişkileri

Şekil 5'te kalınlık ve Radyus için 3 mm değerinde kalınlığın 1 mm'den az olduğu durumda 5 birimlik geri esnemenin altına düşülebilirken, Radyus değeri 8 mm olduğunda 5 birimlik geri esnemenin altına düşebilmek için 1,8 mm değerinin üzerinde olması gerekmektedir. Diğer yönden büküm açısı için 90 derece değerinde 5 birimlik değerin altında kalmak için kalınlık 1,4 mm üzerinde olması gerekirken, 120 derecede bu değer 1,8 mm olması gerekmektedir. Benzer şekilde tüm büküm açılarında geri esnemenin 5 biriminin altında olabilmesi için radyusun en fazla 5 mm olması gerekir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada 15-5PH malzemenin diyaframları şekillendirilmesinde geri esneme davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda değişken olarak kalınlık, radyus ve büküm açısı değerleri ele alınarak analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde daha doğru sonuçlar elde edebilmek için sac geometrisine uygun ağ yapısı tasarlanmış ve sunulmuştur.

Çalışmada 15-5PH malzemede sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı ancak radyus ve büküm açısı arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Bununla beraber ana etkilerin ikili olarak da geçerli olduğu görülmüştür.

Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla genel itibarıyla uyumlu olduğu ancak

düşük sac kalınlıklarında her iki sonuç arasındaki farkın arttığı belirlenmiş ve olası nedenleri tartışılmıştır.

Taguchi yöntemi uygulama sonucunda optimal faktör seviyeleri kalınlık için 4. Seviye (2 mm), radyus (2.5 mm) ve açı (90°C) olarak belirlenmiştir.

Çalışma bulguları geri esneme davranışının belirli hata sınırları içerisinde deneysel çalışma yapmadan tahmin edilmesinde SEA yazılımlarının yardımcı olabileceğini açıkça ortaya koymuştur.

## Investigation of Springback in Diaphragm Sheet Forming Process for 15-5PH Material Using Numerical and Experimental Design Methods

Diaphragm sheet metal forming is a widely used forming method in aviation. In this process, the sheet metal is attached to the mold, placed in the form machine, and gas pressure is applied. The diaphragm, which swells under the influence of the gas, transmits the pressure to the sheet surface and enables the mold to take its shape. In this method, one of the behaviors that occur in the sheet metal at the end of the process is springback. Mold design is carried out by taking this amount of springback into consideration. Some prominent parameters in the amount of springback are bend radius, bend angle, material thickness, and material type. Our study examined the springback behavior of diaphragm forming of 15-5PH stainless steel, widely used in the

aviation industry. For experimental studies, the material thickness was determined as 0.813 mm, 1.27 mm, 1.6 mm, and 2 mm. At the end of the study, a mathematical expression was obtained that gives the springback rate of 15-5PH material with an accuracy of over 90%, depending on the process parameters. In

#### KAYNAKÇA

1. Yu, F., et al., *Double diaphragm forming simulation using a global-to-local modelling strategy for detailed defect detection in large structures*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021. **147**: p. 106457.
2. Internet: Azo Materials. Stainless Steel - Grade 301. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=960>, Access Date: November 17, 2024.
3. Kumat, S.S. and P.S. Shiakolas, *Design, Prototyping, and Characterization of a Micro-Force Sensor Intended for Tissue Assessment in Confined Spaces*. IEEE Sensors Journal, 2024.
4. Internet: Azo Materials. Editorial Feature AISI 4140 Alloy Steel. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>. Access Date: November 17, 2024.
5. Codolini, A., et al., *Characterisation of process-induced variability in wrinkle defects during double diaphragm forming of non-crimp fabric*. Composites Part B: Engineering, 2024. **281**: p. 111549.
6. Yanagimoto, J., K. Oyamada, and T. Nakagawa, *Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings*. CIRP annals, 2005. **54**(1): p. 213-216.
7. Yang, X., et al., *Prediction of springback in air-bending of Advanced High Strength steel (DP780) considering Young's modulus variation and with a piecewise hardening function*. International Journal of Mechanical Sciences, 2016. **105**: p. 266-272.
8. Hassan, H.U., et al., *Accurate springback prediction in deep drawing using pre-strain based multiple cyclic stress-strain curves in finite element simulation*. International Journal of Mechanical Sciences, 2016. **110**: p. 229-241.
9. Chomienne, V., et al., *Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016. **13**: p. 90-96.
10. Chongthairungruang, B., et al., *Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels*. Materials & Design, 2013. **50**: p. 253-266.
11. Wahed, M., et al., *Parameter optimisation in V-bending process at elevated temperatures to minimise spring back in Ti-6Al-4V alloy*. Advances in Materials and Processing Technologies, 2020. **6**(2): p. 350-364.
12. Mezeix, L., et al., *Spring-back simulation of unidirectional carbon/epoxy flat laminate composite manufactured through autoclave process*. Composite structures, 2015. **124**: p. 196-205.
13. Wang, J., et al., *Study on influencing factors of bending springback for metal fiber laminates*. Composite Structures, 2021. **261**: p. 113558.
14. Hou, H., et al., *Experimental studies and modeling of strain rate-and temperature-dependent springback behavior of hot-deformed aluminum alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2023. **318**: p. 118029.
15. Liu, X., et al., *Investigation of forming parameters on springback for ultra high strength steel considering Young's modulus variation in cold roll forming*. Journal of Manufacturing Processes, 2017. **29**: p. 289-297.
16. Thipprakmas, S. and W. Phanitwong, *Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique*. Materials & Design, 2011. **32**(8-9): p. 4430-4436.
17. Patel, S.K., et al., *Springback Analysis in Sheet Metal Forming Using Modified Ludwik Stress-Strain Relation*. International Scholarly Research Notices, 2013. **2013**(1): p. 640958.
18. Tekaslan, Ö., N. Gerger, and U. Şeker, *Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies*. Materials & design, 2008. **29**(5): p. 1043-1050.
19. Esat, V., H. Darendeliler, and M.I. Gokler, *Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets*. Materials & design, 2002. **23**(2): p. 223-229.
20. Panthi, S., et al., *Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback*. Materials & Design, 2010. **31**(2): p. 657-662.
21. Aghaie-Khafri, M. and F. Adhami, *Hot deformation of 15-5 PH stainless steel*. Materials Science and Engineering: A, 2010. **527**(4-5): p. 1052-1057.

addition, the main effects of the operating parameters on the springback behavior were determined by the Taguchi Method based ANOVA.

**Key Words:** Springback, 15-5PH stainless steel, Experimental design, Taguchi Method.