



Titanyum Grade 1 Sac Malzemede Geri Esnemenin Deneysel Araştırılması Ve Bulanık Mantık İle Tahmini

Tahsin ÖNEL¹, İbrahim KARAAĞAÇ^{2,*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 06500, Teknikokullar/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

Özet

Bu çalışmada, Titanyum Grade 1 sac malzemenin oda sıcaklığında V geometrisinde bükülmesi sonrasında sac malzemede gözlemlenen geri esneme davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Bükme açısı (15, 30, 45, 60 ve 75 derece), zımba uç radyüsü (0, 2 ve 4 mm) ve ütüleme süresi (0, 10 ve 20 saniye) deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada ara deney parametreleri için geri esneme açıları bulanık mantık sistemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneysel çalışmalardan, kalıp açısındaki 15 derecelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,62 derece, zımba uç radyüsündeki 2 mm artışın da ortalama 0,14 derece artırdığı tespit edilmiştir. Ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın da geri esneme açısını ortalama 0,12 derece azalttığı tespit edilmiştir. Bulanık mantık sistemi kullanılarak yapılan tahminlerin de geri esnemeyi % 93,3 oranında doğrulukla tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Bulanık mantık sisteminin geri esneme tahmininde başarıyla kullanılabilceği gözlemlenmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 27/07/2017

Düzeltilme: 07/09/2017

Kabul: 0709/2017

Anahtar Kelimeler

Titanyum Grade 1

Geri esneme

Bulanık mantık

Keywords

Titanium Grade 1

Springback

Fuzzy logic

The Experimental Investigation of Springback in Titanium Grade 1 Sheet Material and Prediction by Fuzzy Logic

Abstract

In this study, the springback phenomenon of Titanium Grade 1 sheet metal which is observed after V bending operations in room temperature was investigated experimentally. Bending angle, punch radius and holding time are determined as experimental study parameters. Also, the springback angles were predicted by using fuzzy logic system for non-performed experiment parameters. It was observed that a 15 degree increase in die's angle increased the springback by an average 0.62 degree, a 2 mm increase in punch's radius increased the springback by an average 0.14 degree, and a 10 second increase in holding time decreased the springback by an average 0.12 degree. A 93.3 % similarity was found when the results from the actual experiment and the estimations made with the fuzzy logic method were compared. It is observed that the fuzzy logic method can be used successfully for springback estimations.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ticari saf titanyum malzemeler; çekme yöntemi ile derin çekilerek şekillendirilebilirlik, yüksek uzama, yüksek korozyon dayanımı ve yüksek özgül dayanımı özelliklerinden dolayı, hava araçları, otomobil ve biyomedikal de dahil olmak üzere çok sayıda sektörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1]. Ayrıca; yüksek dayanım ve korozyon dayanımının yanı sıra, yanma dayanımı ve biyolojik uyumundan dolayı saf titanyum malzemeler kimya tesisleri, tüketici ürünleri ve ısı eşanjörlerinde de kullanılmakta olup, diğer başka yeni uygulamalarda da kullanımları yaygınlaşmaktadır [2]. Ticari saf titanyum malzemeler

*İletişim yazarı, e-mail: ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr

anizotropik deformasyon davranışı göstermekte olup bu durum sıkı paket hegzagonal yapısından kaynaklanmaktadır. Ticari saf titanyum çelikler oksijen ve demirin katkı miktarına bağlı olarak çok sayıda çeşitli sınıflarda sınıflandırılmakta olup bu katkı miktarları Grade 1 saclarda minimum olmaktadır. Titanyum malzemelerde katkı miktarının artışı dayanımı arttırırken buna karşılık uzamayı da azaltmaktadır [1]. Grade 1 titanyum malzemeler de biyo-uyumluluk, mekanik özellikler ve korozyon dayanımının mükemmel uyumluluğundan dolayı uçak gövdeleri, gemicilik sektöründe ve kimya endüstrisinde kolay şekillendirilebilirlik gerektiren yerlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [3]. Yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde, Titanyum sac malzemelerin şekillendirilmesine yönelik çalışmaların genellikle titanyum alaşımları üzerine yoğunlaştığı belirlenmiştir. Titanyum alaşımları, düşük ağırlık ve yüksek mekanik dayanım kombinasyonu açısından neredeyse tüm metallerden üstün olup ayrıca paslanmaya karşı direnç göstermekte ve düşük elastik modül özelliği göstermektedirler [4-5]. Titanyum alaşımları α ve β fazından oluşan çift fazlı çelikler olup plastik deformasyonun çoğunluğunun çok dolu hegzagonal α fazı barındırmasına rağmen, doku gelişimi β fazındaki kaymadan kayda değer bir şekilde etkilenmemektedir. Bu yüzden titanyum alaşımlarında deformasyon davranışına sınırlanmış kayma sistemli α fazı hakim olmaktadır [6]. Titanyum Grade 1 sac malzemeler de hegzagonal α fazlı malzemeler grubundandır [7]. Ancak; Titanyum, Alüminyum gibi plastik malzemelerin ve diğer metallerin bükümü genellikle geri esnemenen ciddi bir şekilde etkilenmekte ve kontrolü de zor olmaktadır. Geri esneme davranışını, sıcaklık, zımba uç radyüsü, sac malzemenin kalınlığı ve genişliği, baskı yastığı kuvveti, elastik modülü, pekleşme üsteli, sac ve zımba arasındaki sürtünme, baskı yastığı kuvveti ve akma dayanımından etkilenmektedir [8-10].

Hama ve diğerleri yaptıkları çalışmada, farklı gerilme yolları üzerine ticari saf titanyum grade 1 sac malzemenin deformasyon davranışlarını araştırmışlardır. Deformasyon davranışını çalışmak için kristal plastisite sonlu elemanlar yöntemini kullanılmıştır. Aktif her bir deformasyon modunu dikkate alınarak malzeme parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışmalarında belirlenen doku değerlendirmesi, plastik iş hatları, gerilme-gerinim eğrileri, Lankford değerinin değerlendirilmesinde deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir [2]. Hama ve diğerleri yapmış olduğu bir diğer çalışmada da ticari saf titanyum Grade 1 ve Grade 2 malzemelerde deformasyon davranışını değişik gerinim yollarında araştırmışlardır. Mekanik testler; hadde yönü, enlemesine yön ve 45 derece hadde yönlerinde hazırlanan test numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, gerilme-gerinim durumuna bağlı olarak ikizlenme aktivitesinin de etkisi incelenmiştir. Aktif ikizlenme modunun tipinin yük yönüne bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Mekanik özelliklerdeki anizotropinin ve ikizlenmenin Grade 1'de Grade 2'den daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir [1]. Elektrolit akışkanla doldurulmuş tıbbi cihaz parçaları için ticari saf grade 1 den imal edilen kapsüller yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerde sızdırmazlık çok önemli bir parametre olmaktadır. Lazer ile mikrokaynak yöntemi de, yüksek hassasiyet, küçük ısıdan etkilenen bölge, kaynak metalin sınırlı oranda kirliliği vb. özelliklerinden dolayı Titanyum Grade 1 sac malzemelerden üretilen bu kapsüllerde sızdırmazlığın sağlanması için kullanılmaktadır. Pequegnat ve diğerleri yaptıkları çalışmada, ticari saf titanyum grade 1 malzemenin lazerle mikro kaynak delik sızdırmazlığının sağlanmasında kaynak bölgesindeki sertleşmeye elektrolitin etkilerini deneysel araştırmışlardır. Çalışmalarında, kaynak işleminde elektrolitin Titanyum Grade 1'in özelliklerine önemli bir şekilde etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Elektrolitin farklı bileşenleriyle kaynak metal etkileşime girmekte ve Titanyum metal kaynağın kompozisyonun ve mikro yapısının değişmekte olduğunu gözlemlemişlerdir [3]. Titanyum sac malzemelerde geri esneme davranışının genellikle titanyum alaşımlarında ve saf titanyumlarda ise Titanyum Grade 2 malzemelerde araştırıldığı tespit edilmiştir [9-12].

Titanyum Grade 1 sac malzemelerin V bükme ile soğuk şekillendirilmesinde geri esneme davranışı ve proses parametrelerinin geri esneme davranışına etkileri yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışmada; Titanyum sac malzemenin oda sıcaklığında V bükme kalıplarıyla bükülmesi sonucu oluşan geri esneme davranışına; kalıp açısı, ütüleme süresi ve zımba uç radyüsünün etkileri deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca her bir deney parametresi için geri esneme açılarının deneysel olarak belirlenmesi zaman alıcı ve maliyetli bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmanın ikinci aşamasında da deneysel çalışmada kullanılan deney parametrelerinin aralarında kalan değerler için de geri esneme değerleri bulanık mantık kullanılarak tahmin edilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Çalışma Ortamı (Experimental Study Environment)

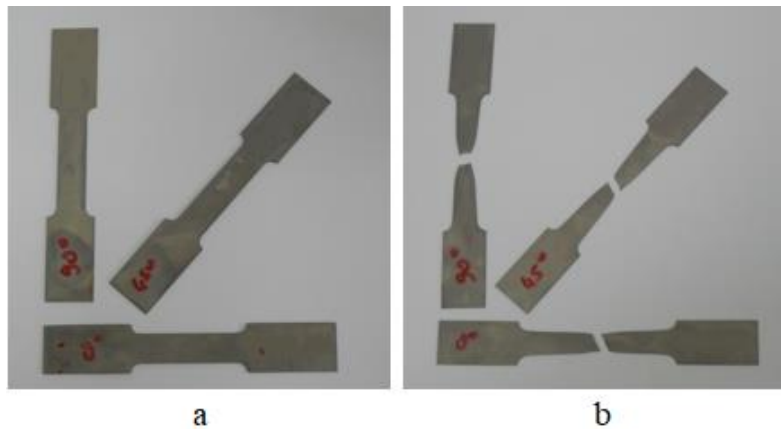
Deneysel çalışmalar, elektronik ve bilgisayar kontrollü deney düzeneğinde yapılmıştır. Deney düzeneği; hidrolik grup, mekanik grup, elektrik grubu ve elektronik kontrol ve veri okuma grubundan oluşmaktadır. Deney cihazının kontrolü bükme için hazırlanan özel bir yazılımla yapılmaktadır. Bükme kuvveti, ütüleme süresi, bükme hızı bilgisayar ortamında tasarlanan programa girilen verilerle ayarlanmakta ve kontrol edilmektedir. Deneysel çalışma esnasında şekillendirme zımbasına bağlı olan yük hücresi proses esnasında kuvvetleri anlık olarak ölçmekte ve ayarlanan bükme kuvveti değerine ulaşınca girilen ütüleme süresince bu kuvvet değerinde tutmaktadır. Prosesin tamamlanmasıyla birlikte bükme zımbası başlangıç konumuna giderek yeni bir deney için hazırlanmaktadır. Deneysel çalışma ortamı ve deney cihazının genel bir görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin genel görüntüsü (General view of the experimental setup)

2.2. Deney Malzemesinin Karakterizasyonu (The Characterization of Experiment Material)

Deney malzemesinin karakterizasyonu için çekme testi, sertlik ölçme testi ve kimyasal spektrometre testleri yapılmıştır. Kimyasal spektrometre ile analiz sonucunda malzemenin ağırlıkça % 99,99 oranında Titanyum içerdiği tespit edilmiştir. Çekme testi için deney numuneleri ASTM E8M standardına göre 0, 45 ve 90 derece hadde yönlerinde tel erozyon tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Titanyum sac malzeme için çekme test numunesi ve test sonrasında ait görüntüler Şekil 2’de ve çekme testi ile sertlik ölçme testleri sonucu elde edilen mekanik özellikler de Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası (Tensile test specimens a) Before test b) After test)

Tablo 1. *Titanyum Grade 1 sac malzeme mekanik özellikleri (The mechanical properties of Titanium Grade 1 sheet material)*

Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Uzaması (%)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Sertlik (Vickers)
310,06	190,997	24,064	104,295	118,66

2.3. Deney Parametreleri (Experiment Parameters)

Deneyisel çalışmalarda; proses parametrelerinin geri esnemeye etkisini gözlemlemek amacıyla, kalıp açısı, ütüleme süresi ve zımba uç radyüsü deney parametresi olarak belirlenmiştir. Her bir deney iki defa tekrar edilerek toplamda 90 adet deney yapılmıştır. Deney parametrelerinin değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneyisel çalışmalarda bükme kuvvetinin hesaplanmasında Eş.1 kullanılmıştır [13]. Hesaplanan bükme kuvveti değerleri tasarlanan yazılımda programa girilmiş ve deneyisel çalışmalar hesaplanan kuvvet değerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. *Deney parametreleri ve parametre değerleri (Experiment parameters and values of parameters)*

Deney parametresi	Parametre değeri
Kalıp açısı (derece)	15, 30, 45, 60 ve 75
Ütüleme süresi (saniye)	0, 10 ve 20
Zımba uç radyüsü (mm)	0, 2 ve 4

$$L = \frac{l.t^2.k.S}{s} \quad 1$$

Eş.1’de; L bükme kuvvetini, l bükme uzunluğunu, k kalıp açıklık faktörünü, t sac kalınlığını, S çekme gerilmesini, s kalıp açıklığının genişliğini ifade etmektedir.

2.4. Geri Esnemenin Ölçümü (The Measurement of Springback)

V bükme ile şekillendirilen deney numunelerinde geri esneme ölçümü bilgisayarlı koordinat ölçme (CMM) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, şekillendirilen deney numuneleri bir sac malzeme üzerinde deforme edilmeden hassas bir şekilde yapıştırılmıştır. Daha sonraki adımda, bükülen parçanın bir yüzüne üç noktadan CMM cihazının probu ile dokunularak bir düzlem elde edilmiştir. Devamındaki adımda da aynı işlem şekillendirilen parçanın diğer yüzeyi için uygulanarak ikinci düzlem elde edilmiştir. Elde edilen bu iki düzlem arasındaki açıdan büküm açısı çıkartılarak geri esneme açısı elde edilmiştir. Geri esneme açısının ölçümüne ait çalışma ortamı Şekil 3’de verilmiştir.

**Şekil 3.** *CMM’de geri esneme ölçümü (The measurement of springback by CMM)*

3. DENEYSSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI (EXPERIMENTAL STUDY RESULTS)

DeneySEL çalışma sonuçları; kalıp açısı, ütüleme süresi ve zımba uç radyüsünün geri esnemeye etkisi açısından değerlendirilmiştir. Yapılan deneySEL çalışmaya ait şablon Tablo 3’de verilmiştir. DeneySEL çalışmalardan elde edilen kalıp açısı, ütüleme süresi ve zımba uç radyüsü parametreleri ile geri esneme açısındaki ilişki Şekil 4-6’da verilmiştir.

Tablo 3. DeneySEL çalışma şablonu (Experimental study template)

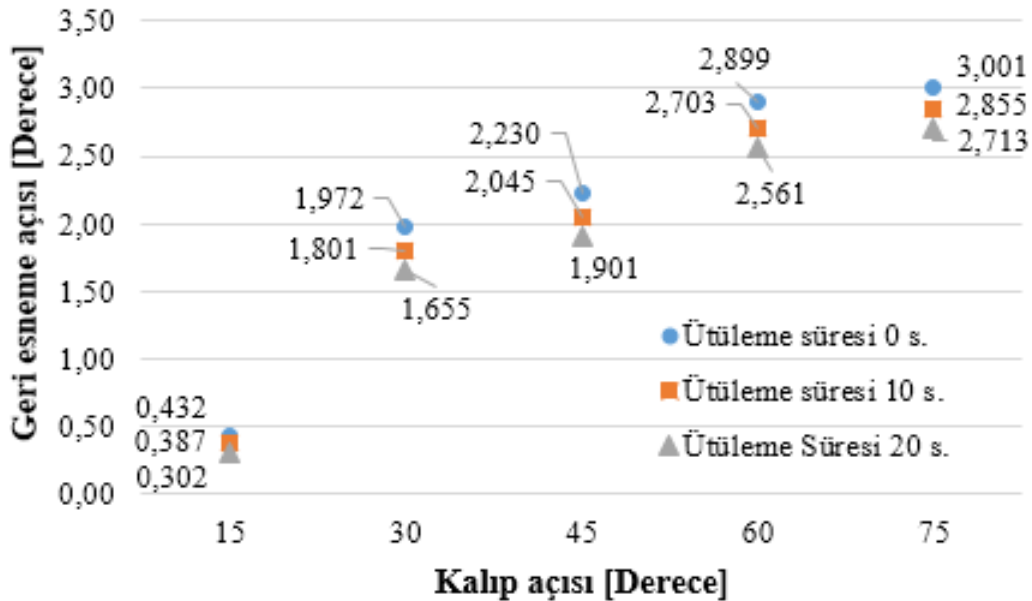
Deney No	Kalıp Açısı	Zımba Radyüsü	Ütüleme Süresi	Deney No	Kalıp Açısı	Zımba Radyüsü	Ütüleme Süresi
1	15	0	0	24	45	2	20
2	15	0	10	25	45	4	0
3	15	0	20	26	45	4	10
4	15	2	0	27	45	4	20
5	15	2	10	28	60	0	0
6	15	2	20	29	60	0	10
7	15	4	0	30	60	0	20
8	15	4	10	31	60	2	0
9	15	4	20	32	60	2	10
10	30	0	0	33	60	2	20
11	30	0	10	34	60	4	0
12	30	0	20	35	60	4	10
13	30	2	0	36	60	4	20
14	30	2	10	37	75	0	0
15	30	2	20	38	75	0	10
16	30	4	0	39	75	0	20
17	30	4	10	40	75	2	0
18	30	4	20	41	75	2	10
19	45	0	0	42	75	2	20
20	45	0	10	43	75	4	0
21	45	0	20	44	75	4	10
22	45	2	0	45	75	4	20
23	45	2	10				

Geri esneme açısı ile kalıp açısı arasındaki ilişki incelendiğinde, şekillendirilen parçalardaki geri esneme açısının kalıp açısındaki artışa bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum büküm bölgesindeki maksimum gerilmelerin artmasından dolayı kaynaklanmaktadır [14]. Ayrıca, kalıp açısının artmasıyla birlikte zımba stroku da artmaktadır. Bükme bölgesindeki maksimum bükme ve çekme gerilmelerinin değeri kalıp strokuna bağlı olmaktadır [15]. Sac malzemenin kalıpta bükülmeye başlamasıyla birlikte büküm bölgesinde sacın iç yüzeyinde basma, dış yüzeyinde de çekme gerilmeleri oluşmaya başlamaktadır. Bu gerilmeler, stroka bağlı olarak zımbanın sac malzemeyi deforme etmeye devam etmesiyle birlikte

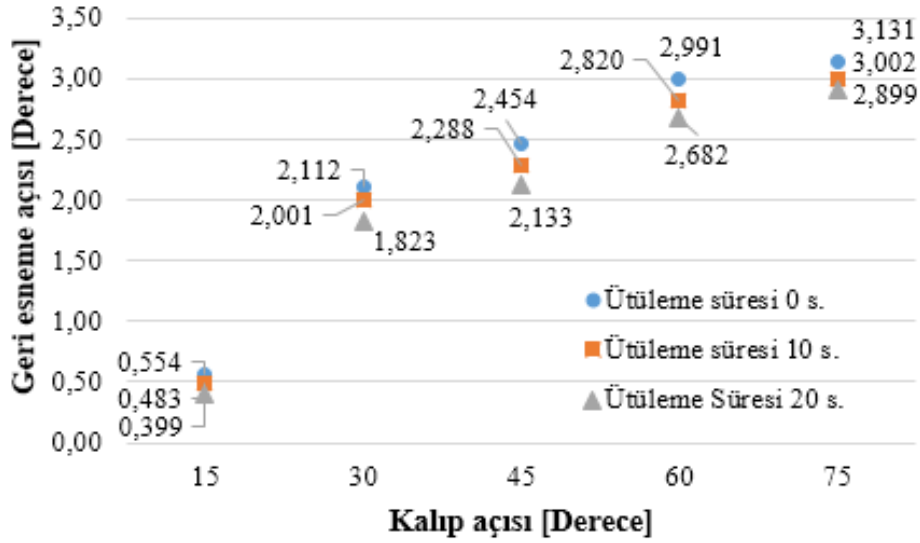
artmaktadır. Bu gerilmelerin sahip olduğu elastik gerilmeler de geri esneme açısının artmasına sebep olmaktadır. Deneysel çalışmalarda, Titanyum Grade 1 sac malzeme için kalıp açısındaki 15 derecelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,62 derece arttığı tespit edilmiştir.

Şekillendirme işleminde zımbanın sac malzeme üzerinde bekleme süresi olarak tanımlanan ütüleme süresinin de geri esnemeyi etkileyen diğer önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Şekillendirme sırasında, ütüleme süresinin artması durumunda parçanın şekli sınırlanmakta ve iç gerilmeler rahatlamaktadır. İç gerilmelerdeki rahatlama, elastik gerinimlerin azalmasına ve kalıcı gerinimlerin artmasına neden olmaktadır. Bu durum da şekillendirilen parçalarda geri esneme açısının azalmasına sebep olmaktadır [8, 11]. Deneysel çalışmalarda, Titanyum sac malzeme için ütüleme süresindeki 10 saniyelik artışın geri esneme açısını ortalama 0,12 derece azalttığı ancak buna karşın proses süresini arttırdığı tespit edilmiştir.

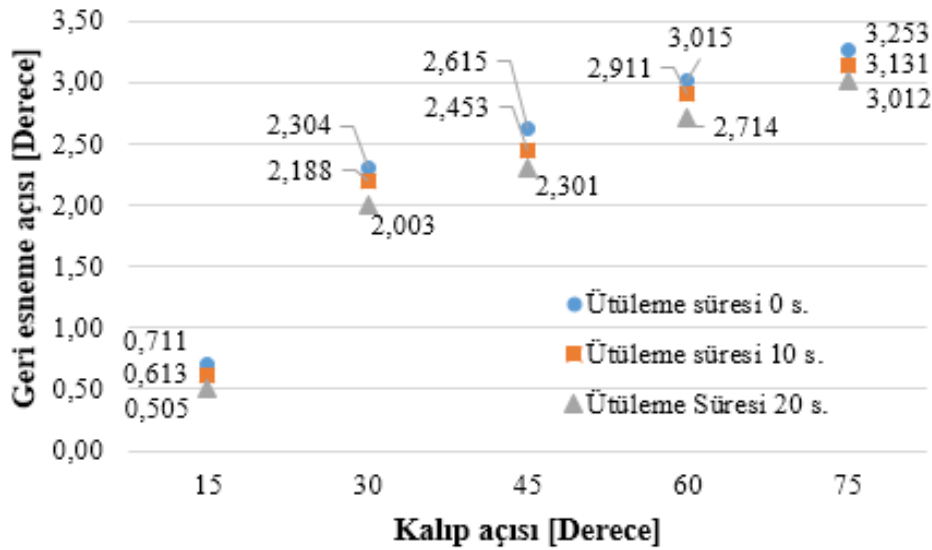
V bükmede kullanılan zımbanın uç radyüsü de geri esnemeyi etkilemektedir. Zımba uç radyüsündeki artışa bağlı olarak geri esneme açısı da artmaktadır [16]. Geri esneme açısının büyüklüğü şekillendirilen plastik bölgenin büyüklüğüne bağlı olmaktadır. Küçük zımba radyüsü şekillendirme kuvvetini dar bir alanda yoğunlaştırmaktadır. Zımba radyüsü arttıkça, bu kuvvet daha geniş bir plastik bölge boyunca yayılmaktadır. Artan bu plastik bölge şekillendirilen sac malzemede geri esneme açısının artmasına neden olmaktadır [17]. Deneysel çalışmalarda Titanyum sac malzeme için zımba uç radyüsünün 2 mm artışına bağlı olarak geri esneme açısında da ortalama 0,14 derece artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, Zımba uç radyüsü 0 mm (The die angle-springback relationship, Punch radius 0 mm)



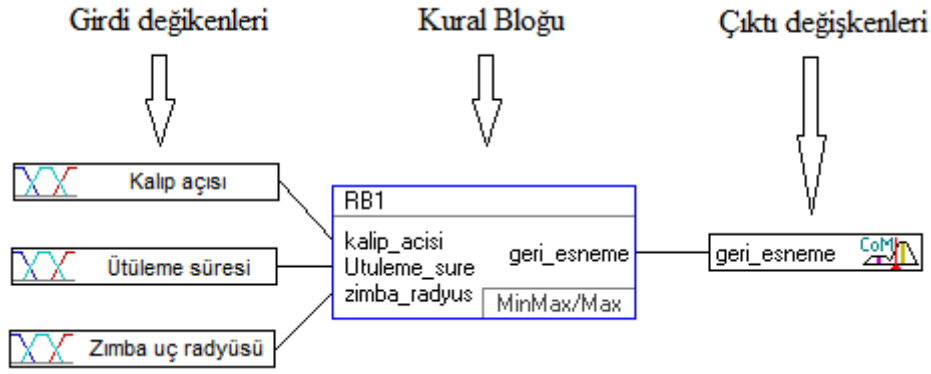
Şekil 5. Kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, Zimba uç radyüsü 2 mm (The die angle-springback relationship, Punch radius 2 mm)



Şekil 6. Kalıp açısı-geri esneme ilişkisi, zimba uç radyüsü 4 mm (The die angle-springback relationship, Punch radius 4 mm)

4. BULANIK MANTIK İLE GERİ ESNEMENİN TAHMİNİ (THE PREDICTION OF SPRINGBACK BY FUZZY LOGIC)

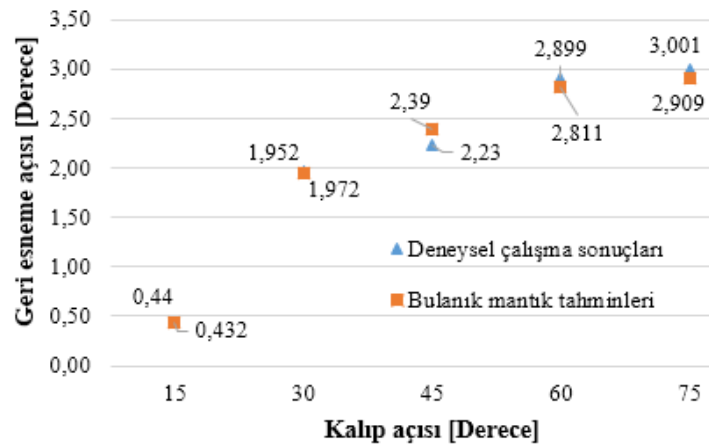
Bulanık mantık sistemi, girdi ve çıktı değişkenleri arasında çalışan bulanık mantık kuralları ile oluşturulmaktadır. Bulanık mantık sisteminde bulanıklaştırma işlemi, girdide tanımlanan sayısal değerler bulanık değişkenlere dönüştürülmektedir. Bulanık ara yüzü dilsel kontrol kurallarını içeren kurallar tablosuna girilmektedir. Bu kural tablosunun sonuçlarını da dilsel değişkenler oluşturmaktadır. Durulama aşamasında da bu dilsel değişkenler sayısal değişkenlere dönüştürülmektedir [18]. Bu çalışmada, bulanık mantık sistemi kullanılarak yapılmayan ara deney parametre değerlerine göre geri esnemenin tahmin edilmiştir. Bulanık mantık sisteminin tanımlanmasında; kalıp açısı, zimba uç radyüsü ve ütuleme süresi girdi değişkenleri olarak geri esneme de çıktı değişkeni olarak tanımlanmıştır. Bulanık mantık sisteminin şematik gösterimi Şekil 7'de verilmiştir.



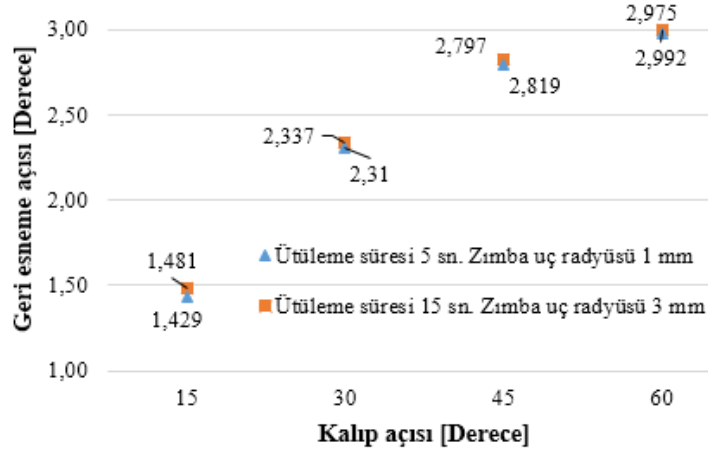
Şekil 7. Bulanık mantık sisteminin şematik gösterimi (Schematic presentation of the fuzzy logic system)

Bulanık mantık sisteminde verilerin bulanıklaştırılması aşamasında Compute MBF yöntemi kullanılmıştır. Bulanıklaştırma aşamasında her bir sayısal değişken bulanık değişkene dönüştürülmektedir. Bu aşamada, kalıp açısı için 15, 30, 60 ve 75 derece için dört adet terim (low, medium_low, medium_high, high) belirlenmiştir. Zimba uç radyüsünün 0, 2 ve 4 mm zimba uç radyüsü değerleri için üç adet terim (low, medium_high) tanımlanmıştır. Ütuleme süresinin 0, 10 ve 20 saniye değerleri için de üç adet terim (low, medium_high) kullanılmıştır. Geri esneme çıktısının tanımlanmasında ise dört adet terim (low, medium_low, medium_high, high) tanımlanmıştır. Daha sonraki aşamada dilsel değişkenleri içeren bir 72 kuraldan oluşan kural bloğu oluşturulmaktadır. Bu kural bloğunun çıktıları dilsel değişkenler oluşturmaktadır. Durulama aşamasında da bu dilsel değişkenler 0-1 aralığında sayısal değişkenlere dönüştürülmektedir. Durulama işlemi için maksimum üyelik fonksiyonu durulama yöntemi olarak seçilmiştir.

Bulanık mantık sisteminin tanımlanmasında 45 derece kalıp açısına ait yapılmış deney sonuçları bulanık mantık sistemine dahil edilmemiştir. Bu açıya ait deney sonuçları ile bulanık mantık sistemi ile yapılan tahmin sonuçlarının karşılaştırılarak bulanık mantık sisteminin tahmin performansı belirlenmiştir. Gerçek yapılan deney sonuçları ile tahmin sonuçları arasındaki en fazla sapma oranı yaklaşık % 6,7 olarak hesaplanmıştır. Farklı kalıp açıları, 0 saniye ütuleme süresi ve 0 mm zimba uç radyüsü deney parametreleri için gerçek deney sonuçları ve bulanık mantık ile yapılan tahmin sonuçları Şekil 8’de verilmiştir. Yaklaşık % 93,3 oranında doğrulukla geri esnemenin tahmin edilebildiği bulanık mantık sistemi kullanılarak yapılmayan deney parametreleri için de geri esneme açıları tahmin edilmiştir. 20, 35, 50 ve 65 derece kalıp açısı, 5 ve 15 saniye ütuleme süresi ve 1 ve 3 mm zimba uç radyüsü için tahmin edilen geri esneme değerleri Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. DeneySEL çalışma sonuçları ile bulanık mantık sonuçlarının karşılaştırılması (The comparison of experimental study results and fuzzy logic prediction results)



Şekil 9. Bulanık mantık ile yapılmayan deney parametrelerine göre geri esneme tahmini (The Prediction of springback by fuzzy logic for unexecuted experiment parameters)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Titanyum Grade 1 sac malzemelerin V bükme kalıplarıyla oda sıcaklığında bükülmesi sonucu oluşan geri esneme davranışına etki eden proses parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca, bulanık mantık sistemi kullanılarak yapılmayan ara deney parametreleri için geri esneme açıları tahmin edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan Titanyum Grade 1 sac malzeme için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kalıp açısındaki artışın geri esneme açısını arttıran önemli bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Şekillendirme esnasında kalıp açısının artması ile birlikte kalıp stroku artmakta ve strokun atışına bağlı olarak da büküm bölgesinde gerilmeler artmaktadır. Şekillendirme işlemi sonrası serbest kalan bu gerilmeler sac malzemede geri esnemeye sebep olmaktadır. Kalıp açısındaki ortalama 15 derecelik artışın, Titanyum Grade 1 sac malzemede geri esneme açısını ortalama 0,62 derece arttırdığı tespit edilmiştir.
- Zımba uç radyüsündeki artışın geri esneme değerini arttıran bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Zımba uç radyüsündeki artışa bağlı olarak büküm bölgesindeki gerilmeler daha geniş bir alana yayılmakta bu durum da geri esneme açısının artmasına sebep olmaktadır. Deneysel çalışmalardan, zımba uç radyüsündeki 2 mm'lik artışa bağlı olarak geri esneme açısının Titanyum Grade 1 sac malzeme için ortalama 0,14 derece arttığı gözlemlenmiştir.
- Ütuleme süresindeki artışın elastik gerinimlerin azalmasına kalıcı gerinimlerin artmasına sebep olmaktadır. Bu durumun da kalıcı şeklin oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda da Titanyum Grade 1 sac malzeme için ütuleme süresindeki 10 saniyelik artışa bağlı olarak geri esneme açısının ortalama 0,12 derece azaldığı gözlemlenmiştir.
- Yapılmayan ara deney parametreleri için geri esneme değerinin tahmininde bulanık mantık sistemi kullanılarak gerçek deney sonuçlarına göre % 93,3 oranında hassasiyetle tahmin edilebildiği gözlemlenmiştir. Çok sayıda deney içeren çalışmalar için geri esneme tahmininde bulanık mantık sistemi kullanılarak zaman ve maliyetten tasarruf sağlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma 07/20115-12 kod numarası ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmayı destekleyen Gazi Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] N. Yi, T. Hama, A. Kobuki, H. Fujimoto, H. Takuda, Anisotropic deformation behavior under various strain paths in commercially pure titanium Grade1 and Grade2 sheets, *Materials Science & Engineering A*, 655 (2016) 70–85.
- [2] T. Hama, A. Kobuki, H. Takuda, Crystal-plasticity finite-element analysis of anisotropic deformation behavior in a commercially pure titanium Grade 1 sheet, *International Journal of Plasticity*, 91 (2017) 77-108.
- [3] A. Pequegnata, Y.D. Huang, M.I. Khana, Y. Zhou, Effects of electrolyte on hardening in laser hole sealing of commercially pure grade 1 titanium, *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (2012) 2012– 2019.
- [4] J. Adamus, P. Lacki, Forming of the titanium elements by bending, *Computational Materials Science*, 50(2011) 1305–1309.
- [5] Y. Hu, M. Luo, Z. Yao, Increasing the capability of laser peen forming to bend titanium alloy sheets with laser-assisted local heating, *Materials and Design*, 90 (2016) 364–372.
- [6] L. Yang, Y. Yang, Deformed microstructure and texture of Ti6Al4V alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24 (2014) 3103-3110.
- [7] G. Lütjering, J.C. Williams, *Titanium*, Springer, Germany, 2007.
- [8] İ. Karaağaç, The Experimental investigation of springback in v-bending using the flexforming process, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42:5 (2017)1853–1864.
- [9] A. Gisario, M. Barletta, S. Venettacci, Improvements in springback control by external force laser assisted sheet bending of titanium and aluminium alloys, *Optics & Laser Technology*, (2016) 46–53.
- [10] A. Gisario, M. Mehrpouya, S. Venettacci, M. Barletta, Laser-assisted bending of Titanium Grade-2 sheets: Experimental analysis and numerical simulation, *Optics and Lasers in Engineering*, 92 (2017) 110–119.
- [11] Y. Zong, P. Liu, B. Guo, D. Shan, Springback evaluation in hot v-bending of Ti-6Al-4V alloy sheets, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76 (2015) 577–585.
- [12] H. De-hua, L. Dong-sheng, L. Xiao-qiang, J. Chao-hai, Optimization on springback reduction in cold stretch forming of titanium-alloy aircraft skin, *Trans Nonferrous Met. Soc. China*, (2010) 2350-2357.
- [13] International Handbook Committee A, *Forming and Forging*, vol. 14, ASME, USA, 1993.
- [14] G.M.S. Ahmed, H. Ahmed, M.V. Mohiuddin, S.S. Sajid, Experimental evaluation of springback in mild steel and its validation using LS-DYNA, *Procedia Materials Science*, 6 (2014) 1376 – 1385.
- [15] A. Ivanišević, M. Milutinović, B. Štrbac, P. Skakun, Stress state and spring back in V bending operations, *Journal for Technology of Plasticity*, 39(2) (2013) 157-167.
- [16] N. Sae-Eaw, C. Thanadngarn, K. Sirivedin, V. Buakaew, Y. Neamsup, The study of the springback effect in the UHSS by U-bending Process, *AIJSTPME*, 6(1) (2013) 19-25.
- [17] M.S. Buang, S.A. Abdullah, J. Saedon, Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air v-die bending process, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8 (2015) 1322-1331.
- [18] O. Çavuşoğlu, H. Gürün, Investigation and fuzzy logic prediction of the effects of clearance on the banking process of CuZn30 sheet metal, *Kovove Material*, 54 (2016) 125–131.