

## V Bükmede Geri Esneme Davranışları

Yunus ASLAN<sup>1</sup>, İbrahim KARAAĞAÇ<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Gazi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru: 24/07/2014 Düzeltme:28/08/2014 Kabul: 01/09/2014

---

### ÖZET

Geri esneme, ürüne kalıplama sırasında verilen şekil ile kalıplama sonrası elde edilen şekil arasındaki fark olup, genellikle sac metal bükme işlemlerinde karşılaşılan önemli bir şekil verme problemidir. V Bükmede, malzeme parametreleri (malzeme türü, kalınlık, anizotropi, akma dayanımı, Young modülü, pekleşme vb.), proses parametreleri (ütüleme süresi, bükme sıcaklığı, sürtünme, bükme kuvveti vb.) ve kalıp parametreleri (bükme açısı, bükme radyüsü vb.) gibi çok sayıda parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle; malzeme, proses ve kalıp parametrelerinin göz önünde bulundurulduğu çok sayıda deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle bilgisayar destekli sayısal analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada, V bükme sonrası şekillendirilen parçalarda meydana gelen geri esneme davranışları ile ilgili yapılmış olan çalışmalar derlenmiş ve değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geri esneme, V bükme, bükme kalıpları

### ABSTRACT

The springback is difference between the die geometry and bended sheet geometry. This phenomena is a general shaping problem in sheet metal forming. In V bending, the numerous factors such as material (material type, thickness, anisotropy, yield strength, Young's modulus, strain hardening etc.), process (holding time, bending temperature, friction, bending force etc.) and die geometry (bending angle, bending radius etc.) must be considered. Therefore, numerous empirical and finite element analysis studies have been carried out by many researchers. In this study, the related studies with V bending operation has been compiled and revived.

**Keywords:** Springback, V bending, bending dies

---

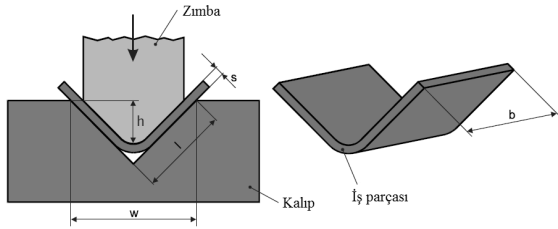
\*Corresponding author, e-mail: ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr

## 1. GİRİŞ

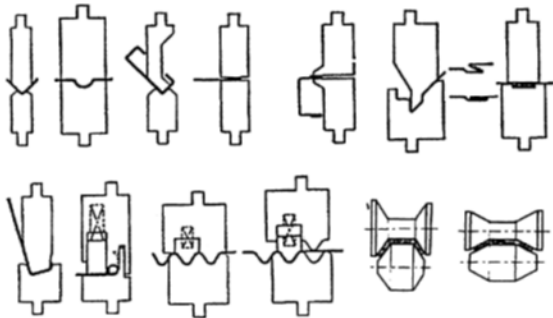
Sac metal ürünlerin büyük bir çoğunluğu, ya doğrudan bükme yöntemi ile ya da sac metal ürün üzerindeki bükülecek bir unsur kalıplamanın bir adımı olarak bükme istasyonunda şekillendirilerek üretilmektedir. Bükülerek şekillendirilen ürünler; başlıca otomotiv sektörü olmak üzere, savunma sanayi, gıda, enerji, medikal, inşaat, makine sanayi, uzay ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Malzemeleri ısıtarak veya ısıtmadan ve talaş kaldırmadan, malzemenin belli bir eksen etrafında döndürülerek şekillendirilmesi bükme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bükme kalıpları ise; istenilen parça şekline uygun olarak yapılmış, dışı kalıp ve zimbadan oluşan, sac malzeme üzerinde kalıcı şekil değişikliği meydana getiren düzeneklerdir [1].

Bükme işlemi, DIN 8580 standardına göre doğrusal kalıp hareketiyle bükme ve dairesel kalıp hareketiyle bükme işlemi olarak iki ana grupta sınıflandırılmıştır. Doğrusal kalıpla bükme işlemi V bükme ve U bükme işlemi olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır [2]. V bükme işleminin görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Ürün şekline göre bükme işlemi ise; şekillendirme, oluklama, kenarlama, ezme, birleştirme, kıvrıma, buruşturma ve dairesel şekillendirme olarak 8 ana grupta sınıflandırılmıştır. Bu gruplama yöntemi Şekil 2'de şematik olarak verilmiştir [3].



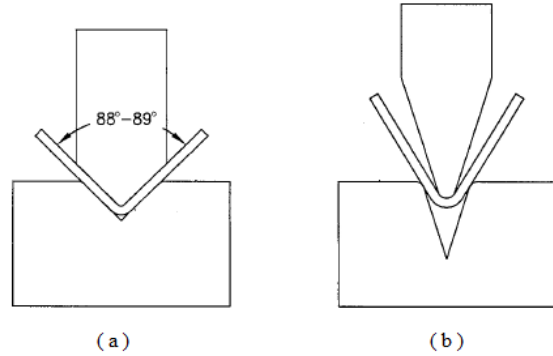
Şekil 1. V kalıpta bükme işlemi görüntüsü [2]



Şekil 2. Klasik Abkant bükme ve şekillendirme kalıpları [3]

V bükme işlemi, altta bükme ve serbest (yukarıda) bükme yöntemleri olarak iki gruba ayrılmaktadır. Altta bükme yönteminde, kalıp ve zimba arasındaki boşluğu doldurmak için sac malzemeye zimba tarafından kuvvet uygulanmakta ve sac malzeme şekillendirilmektedir. Ancak, altta bükme işleminde sac malzeme, hiçbir zaman kalıp kavisini doldurmamaktadır. Serbest bükme

yönteminde ise, kalıp zımbası presin en alt strok noktasına ulaşmadan yukarıda bükme işlemini gerçekleştirmektedir. V bükme yöntemlerinin görüntüsü Şekil 3'de gösterilmiştir [4].



Şekil 3. V bükme yöntemleri (a-Altta bükme, b- Serbest bükme) [4]

Geri esneme, şekil verme işlemi takiben yük boşaltımı sırasında bir metal levhanın şeklinin elastik olarak değişime uğraması olarak tanımlanmaktadır [2]. Geri esneme, bitmiş parçalarda, sonraki şekillendirme operasyonlarında değişkenliğe ve artan toleransa neden olmaktadır. Bu etkiler, genellikle üretilen ürünlerin kalite ve görünüşünde bozulmaya yol açmaktadır [5]. Geri esneme; malzeme kalınlığı, malzeme ve işlem parametreleri (sıcaklık vb.), malzeme üzerinde zımba yükünün beklediği zaman aralığı (ütüleme süresi), kalıp ölçüleri ve uygulanan yük parametreleri etkilemektedir [6].

Bu çalışmada; V bükme ile kalıplama işlemi sonrası oluşan geri esneme problemleri ile ilgili olarak; geri esnemenin tespiti ve telafisine yönelik deneysel araştırma çalışmaları, analitik modeller ve sonlu elemanlar analiz çalışmalarının genel bir bakışla değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

## 2. GERİ ESNEMENİN TESPİTİ VE TELAFİSİNE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Geri esnemenin tespitine ve telafisine yönelik, farklı yöntem ve malzeme türlerinin kullanıldığı çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalar derlenmiştir.

Geri esnemeye etki eden faktörlerin başında ütüleme süresi gelmektedir. Bakır sac malzemenin; elektronik ve tıbbi cihazlarda, gıda, otomobil ve beyaz eşya sektörlerinde yaygın olarak kullanılması nedeni ile bakır sac malzemelerin şekillendirilmesinde oluşan geri esneme problemlerine, ütülemenin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Tekaslan ve diğerleri, yapmış oldukları bir çalışmada bakır sac malzemedeki geri esneme miktarlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Ütülemenin ve ütüleme süresinin etkisini değerlendirmek için deneysel çalışmalarında 4 farklı yöntem kullanılmışlardır. 1. Yöntemde zimba ile kalıp arasında sac malzeme kalınlığı kadar boşluk verilmiş ve bu sayede malzemenin bükme kesitinde ezilerek geri esnemeyi etkilemesi önlenmiş ve 20 s. ütüleme süresi kullanılmıştır. 2. Yöntemde kalıp ve zimba arasında sac malzeme kalınlığı kadar boşluk

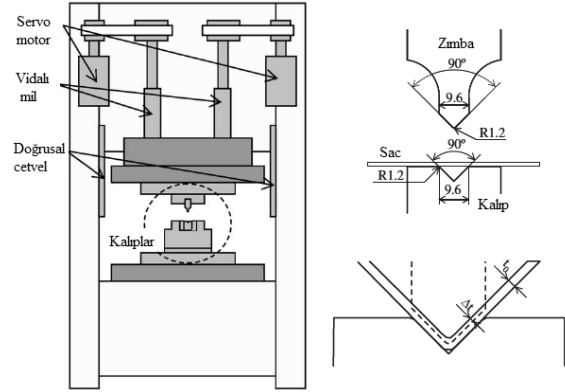
bırakılmış ancak ütüleme süresi kullanılmamıştır. 3. Yöntemde zımba sac malzemeyle preslemiş ve 20 s. ütüleme süresi kullanılmıştır. 4. Yöntemde ise sac malzeme kalınlığı ihmal edilerek zımba ile kalıbın teması sağlanmış ve sac malzemenin üzerinde zımba hiç bekletilmemiştir. Çalışma sonucunda, sac malzeme kalınlığının artması ile geri esneme miktarının arttığı ve yine aynı şekilde bükme açısının artması ile de geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiş ve ütüleme süresinin de geri esneme için önemli faktör olduğu ve ütüleme süresinin artması ile geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir [1].

Ütüleme süresi ve basıncının etkisi DKP sac malzeme türü için de incelenmiştir. Yine daha önce kullanılan 4 farklı bükme yöntemi kullanılarak, DKP çelik sac malzemenin 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 derece açılarında bükülmesi sonrası oluşan geri esneme miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Geri esneme miktarının malzeme ve kalıp fonksiyonlarının her ikisine göre değiştiği tespit edilmiş olup, ütüleme süresindeki artışın geri esneme değerini oransal olarak azalttığı gözlemlenmiş ve ütüleme süresinin 20 s. olması durumunda DKP sac malzemede geri esneme değerinde 1-3 derece arasında azalma olduğu tespit edilmiştir [6].

Geri esnemenin proses değişkenlerine bağlı olarak değişimi ve laboratuvar şartları altında ölçülmesine yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. Sürtünmenin sac metal şekillendirme uygulamalarında geri esnemeye çok az etkisinin olmasına rağmen, 6022 T4 malzeme için çok düşük şartların geri esnemenin arttığı tespit edilmiştir [7].

Genetik algoritma (GA) ve yapay sinir ağlarının da (ANN) geri esneme problemi için kullanıldığı görülmüştür. Yapay sinir ağları ve genetik algoritmaya bağlı bir teknik geliştirilerek geri esneme problemi çözülmeye çalışılmıştır. Genetik algoritma, yapay ağların ağırlığını optimize etme aşamasında kullanılmıştır. Geri esnemenin, GA-ANN modeller ile regresyon modellerine göre daha doğru yapılabileceği ve bu modellerin sac metal şekillendirme ve takım tasarımı için bir referans olarak alınabileceği belirlenmiştir [8].

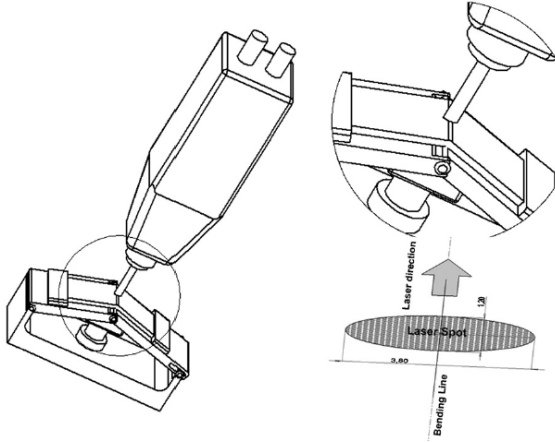
Ultra yüksek dayanımlı çelik sacların geri esneme davranışlarının da deneysel olarak incelendiği gözlemlenmiştir. Bu sac malzemeler otomotiv endüstrisinde ağırlık azaltmasında yaygın olarak kullanılmalarına rağmen, yüksek gerilimlerinden dolayı geri esneme miktarları yüksektir. Bu sac malzemelerin geri esneme davranışları, CNC servo presler kullanarak kontrollü şartlar altında incelenmiştir. Çalışma sonucunda, CNC servo preslerin kalınlık kontrollü bükme için kullanışlı olduğu ve ayrıca geri esneme miktarına şekillendirme hızı ve kalıp alt ölü noktasındaki ütüleme zamanının etkilerinin çok küçük olduğu tespit edilmiştir [9]. Çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. CNC Servo pres ve V bükme kalıp detayı [9]

V bükme kalıplarında katı takım ve kalıplamanın yanı sıra deforme edilebilir zımbalar kullanılarak şekillendirme üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada; katı kalıp ve deforme edilebilir kalıp tarafından V sac şekillendirmenin deformasyon mekanizmasını deneysel araştırmışlardır. Malzeme özellikleri, sac kalınlığı, katı kalıp geometrisi ve deforme edilebilir zımbanın geometri ve özellikleri açısından geri esnemenin iyileştirilmesi üzerinde durmuşlardır. Presleme esnasında zımba malzemesinin deformasyonunun, sac malzemenin deformasyon mekanizmasını değiştirdiği ve geri esneme oranını esas olarak negatif yaptığı tespit edilmiştir [10].

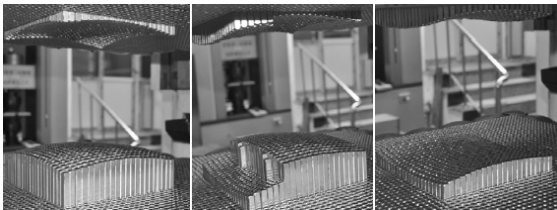
Yapılan çalışmalarda geri esnemeyi telafi etmek için çok sayıda yöntem kullanılmış olup iş parçasının fazla bükülmesi endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yaygın çözüm yöntemidir. Diğer alternatifler, gerdirerek bükme ve yüksek basınçla ezme yöntemleridir. Diğer yaygın alternatif çözümler; ön ısıtılmış kalıp ve takımları veya alternatif olarak yüksek sıcaklıkta bükme işlemlerini veya şekillendirilen parçalarda gerilim dağılımlarının düzenlenmesini içermektedir. Şekillendirilen alaşımın sıcaklığındaki artış, şekillendirilebilirliği artırabilmekte ve malzemenin dayanımını da azaltılabilmektedir. Böylelikle bükme işlemleri için ihtiyaç duyulan maksimum güçte azalma ile bükme işlemi basitleştirilebilmektedir. Özellikle alüminyum alaşımlarında, sıcaklıklardaki çok küçük artış bile dayanımlarında kayda değer bir azalmaya neden olabilmektedir. Diğer bir yandan, bükme işlemi esnasında kullanılan ısıtılmış kalıp ve malzemeler zaman ve maliyet tüketici olabilmektedir. Ayrıca ısıtma işlemleri, şekillendirilen parçanın özelliklerini de değiştirebilmekte ve bu durum iş parçasının performansını tümüyle riske atabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, iş parçasının tümünü ısıtmak yerine lazer desteği ile sadece büküm bölgesinin ısıtılması konusunda da çalışmalar yapılmıştır. Yüksek güç diyot ile ışınlama kullanarak, bükme alanı, seçilen bir sıcaklık ile desteklenerek V bükme işleminde geri esnemenin kontrolü sağlanmaya çalışılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [11]. Lazer destekli bükme işleminin görüntüsü Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Lazer destekli bükme işlemi [11]

Geri esnemenin telafisi için yapılan çalışmalar genellikle kalıp takımlarının şeklinin modifiye edilmesi ile yapılmaktadır. Takım tasarım aşamasında, geri esnemenin tahmini çok önemli olmaktadır. Çünkü bitmiş kalıp takımları üzerindeki geometri düzeltmeleri çok pahalı ve zaman alıcı olmaktadır [12]. Ancak yine de geri esnemenin telafisine yönelik yapılan yaklaşımlar genellikle takım şeklinin ayarlanmasına eğilimlidir. Kalıp yüzeyinin modifikasyonu ile şekillendirilen ürünün şekli, istenilen ürün şekline yaklaşık olarak elde edilebilmektedir [13].

Sac metal şekillendirme yöntemleri; gemi inşası, hava araçları üretimi, araç gövdeleri ve basınçlı kaplar gibi üç boyutlu yüzeylerin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok noktalı şekillendirme yöntemi bu tür parçaların şekillendirilmesinde son zamanlarda yaygın olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Bu özel parçaların üretimi için çok noktalı şekillendirme yöntemi ideal bir yöntem olmaktadır. Ancak klasik şekillendirmede olduğu gibi çok noktalı şekillendirme yönteminde de geri esneme probleminin kaçınılmaz bir olgudur. Bu problemin çözümü için sayısal simülasyonlar ve şekillendirme deneylerinin bileşimi olan algoritmalar geliştirilerek, geri esnemenin sebep olduğu hatalar etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir [14]. Çok noktalı şekillendirme prosesi görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çok noktalı şekillendirme prosesi görüntüleri [14]

Gerdirek çekme-bükme prosesleri otomobil ve uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geri esneme probleminin, bu yöntemde de önemli bir problem olarak ortaya çıktığı ve bu problemin aşılmasına yönelik deneysel çalışmalar yapılmaktadır [15].

Geri esnemenin dolayı parça şeklindeki hata, sac metal şekillendirme proseslerinde genellikle üretim kusuru

olarak kabul edilmektedir. Bu problem, aktif proses kontrolü ve/veya takım şeklinin uygun şekle ayarlanması ile düzeltilebilmektedir. Geleneksel deneme yanılma yöntemleri, karmaşık geometri kalıplar için etkili bir yöntem olmayıp zaman alıcı ve malzeme israfına yol açmaktadır. Son zamanlarda geri esnemenin telafisine yönelik birçok analitik yöntem önerilmiş olup, önerilen bu yöntemlerin her biri çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Tüm bu yöntemler, şekillendirme takımı istenilen şekline dönüşmeden önce birkaç iterasyon gerektirmektedir. Cheng ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada, takımın şekil tasarımına odaklanılmışlardır. Çalışmalarında, bu önerilen tüm yöntemleri aynı çerçevede içerisine yerleştirmişler ve var olan metotlar üzerine temel geometrik analizler ile saf geometri düzeltmesi birleştirilerek yeni bir yöntem inşa etmişler ve en ideal takım şeklinin bulunması daha hızlı ve kesin olmuştur [16].

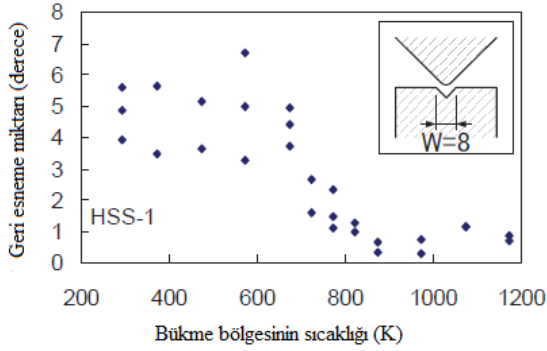
Paslanmaz çelik sac malzemelerin, yukarıda V bükme yöntemiyle bükülerek şekillendirilmesinde de, geri esneme ve yırtılma gibi şekillendirme problemleri ortaya çıkmaktadır. Asnafi yapmış olduğu çalışmada, kalın paslanmaz çelik sac malzemelerden oluşan bu şekillendirme hatalarının giderilmesine yönelik çalışma yapmıştır. Bu çalışmasında, yük boşladıktan sonrasında geri esnemeyi tahmin etmek için analitik bir model geliştirmiştir. Geliştirilen analitik model tarafından hesaplanan geri esneme, her durumda deneysel olarak elde edilen geri esnemenin daha küçük bulunmuştur. Teorik analizlerde, sac malzemedeki incelenen ve doğal eksen konumundaki kaymanın ihmal edilmesine rağmen, teori ve pratik arasında iyi bir uyum olduğunu tespit etmiştir [17].

Bükülen sac malzemelerde oluşan geri esneme davranışı, zamana bağlı olarak da incelenmiştir. Sac malzemelerde bu davranış, kalıcı gerilmelere ve daha yüksek sürtünme hızlarına dayandırılmakta ve daha çok bu durum, Alüminyum alaşımlarında gözlemlenmektedir. Yüksek gerilimli çelik (AHSS) sac malzemelerde de zamana bağlı olarak geri esneme davranışları incelenmiştir. DP 600, DP 800, DP 980, TRIP 780, DQSK, AKDQ ve HSLA sac malzemelerde geri esneme testleri yapılmıştır. AHSS alaşımlarının oda sıcaklığında zamana bağlı geri esneme gösterdiği, ilk şekil değişiminin ilk birkaç günde günlük süreyle orantılı olduğunu, fakat haftalar geçtikçe değişim oranının azaldığı tespit edilmiştir. Ancak AHSS'nin zamana bağlı şekil değişiminin, aynı koşullar altındaki Alüminyum alaşımlarda gözlenen değişimin yaklaşık 1/3 kadar olduğu da belirlenmiştir [18].

### 3. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN GERİ ESNEMEYE ETKİSİNİN ARAŞTIRILDIĞI ÇALIŞMALAR

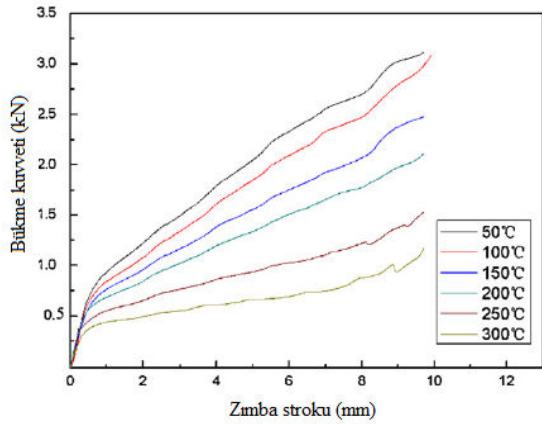
Yüksek gerilimli çeliklerin kullanım alanlarının artması ile birlikte, şekillendirilebilirliğin geliştirilmesi ve ortaya çıkan şekillendirme hatalarının giderilmesine yönelik çalışmaların da arttığı gözlenmektedir. Özellikle otomobil endüstrisinden emisyon miktarını azaltmak için hafif ağırlıklı sac malzemelere ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu yüzden yüksek gerilimli çelikler, sac metal şekillendirme endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilimli çeliklerin ılık şekillendirme şartları altında bükümü sonrasında oluşan geri esneme mekanizmaları da

deneysel olarak araştırılmıştır. Yaklaşık 750 K den daha yüksek sıcaklıklarda, bükme modundaki değişikliklerin bir sonucu olarak, geri esneme ani bir azalmanın olduğu tespit edilmiş ve bu şekillendirmenin sıcak şekillendirmeden kayda değer şekilde düşük olduğu görülmüştür. Geri esneme miktarı ve bükme bölgesindeki sıcaklık arasındaki ilişki Şekil 7’de verilmiştir [19].



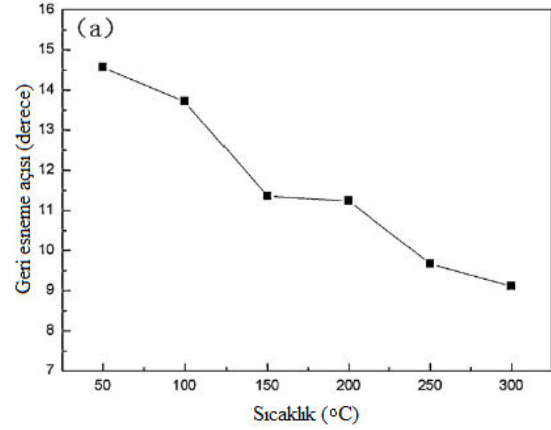
Şekil 7. Geri esneme bölgesinin sıcaklığı ve geri esneme miktarı arasındaki ilişki [19]

Ilık şekillendirme ile geri esnemenin telafisi konusunda yapılan bir diğer çalışmada da, ılık şartlar altında farklı zımba radüsleri ile geri esneme analiz edilmiştir. Magnezyum alaşımlarının oda sıcaklıklarında zayıf şekillendirilebilirliklerinden dolayı, magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde ortaya çıkan geri esneme davranışları incelenmiştir. Şekillendirme sıcaklığının artışı ve zımba radüsünün azalışı ile birlikte geri esneme miktarı da azalmaktadır. Sıcaklığın bükme kuvvetine ve geri esnemeye etkisi Şekil 8’de verilmiştir [20].



(a)

Şekil 8(a). Sıcaklığın bükme kuvvetine ve geri esnemeye etkisi, a-Farklı sıcaklıklarda kuvvet – zımba eğrileri, b-Geri esneme açısına sıcaklığın etkisi [20]



(b)

Şekil 8(b). Sıcaklığın bükme kuvvetine ve geri esnemeye etkisi, a-Farklı sıcaklıklarda kuvvet – zımba eğrileri, b-Geri esneme açısına sıcaklığın etkisi [20]

Gerri esnemenin hassas tahmini için, deformasyon sonrası sac metalde iç gerilim dağılımını tam belirlemede Bauschinger etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Gau ve Kinzel, geri esnemenin tahmini için Bauschinger etkisinin göz önünde bulundurulduğu yeni bir model geliştirmişlerdir. Alüminyum sac malzemelerin, simülasyonun en zor sac metal malzemelerden birisi olduğu bilinmektedir. Ancak önerilen bu modelin, çoklu bükme işlemlerine maruz kalan Alüminyum sac için deney sonuçları ile uyum sağladığı görülmüştür [21].

Gerri esnemenin tahmini için malzeme oluşturma modellerinin geliştirilmesi ve uygulanması alanında da çalışmalar yapılmaktadır. Geliştirilen modeller, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan yazılımlarda kullanılarak geri esneme tahminlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan analiz çalışmalarında, Hill 1948, Barlat 1989 ve geliştirilmiş Armstrong-Frederic ve Chaboche modellerinin hala en hakim uygulama olduğu görülmüş ancak malzeme oluşturma modellerinin uygun olmadığı tespit edilmiştir. Yaygın olarak kullanılan malzeme oluşturma modellerinin geri esnemeyi tahmin etmesi zor olmaktadır. Bu durum malzeme tanımlamada değişken elastik çarpan etkisi, malzeme anizotropisi ve doğrusal olmayan sertleşmenin de birlikte düşünülmesi gerektiğinden kaynaklanmaktadır [22].

Dik anizotropik (R) değerinin ve pekleşme üstelinin (n) bükmeye etkileri de yapılan çalışmalarda incelenmiştir. Leu yaptığı çalışmada, bükümdeki geri esnemeyi, bükülebilirliği ve maksimum bükme momentini incelemek amacıyla, dik anizotropik R değeri, sac kalınlığı (t) ve pekleşme üstelini (n) birleştiren bir yaklaşım geliştirmiştir. Dik anizotropik R değerindeki artışın bükülebilirliği geliştirdiği tespit edilmiştir. Gerri esneme oranının, büyük dik anizotropik R değeri veya küçük sac kalınlığı ve pekleşme üsteli olan malzemelerde daha yüksek olduğu ve maksimum bükme momentinin de esas olarak sac kalınlığının etkisine bağlı olduğu belirlenmiştir [23].

Otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan yüksek gerilimli bazı çeliklerin şekillendirilebilirliği düşük ve geri esneme miktarı ise yüksek olmaktadır. Bu nedenle şekillendirilebilirliği arttırmak için dik anizotropi arttırılmaktadır. Geri esnemeye dik anizotropinin etkisi bir diğer çalışmada da Verma ve Haldar tarafından incelenmiştir. Anizotropinin geri esnemeye etkisi sonlu eleman analizleri kullanarak tahmin edilmiş ve yüksek anizotropinin daha büyük geri esneme verdiği ancak izotropik malzemeler için geri esnemenin minimum olduğu tespit edilmiştir [24].

#### 4. GERİ ESNEME İLGİLİ ANALİTİK MODELLEME VE SONLU ELEMANLARLA ANALİZ ÇALIŞMALARI

Ampirik formüller kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar ve deneme yanılma süreçleri zaman, para ve malzeme israfına yol açmaktadır. Son zamanlarda sonlu elemanlarla analiz yöntemleri birçok mühendislik problemlerinin analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bükme ve geri esnemenin tahminine yönelik çalışmalarda da sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çok sayıda araştırma yapılmıştır. İncelenen çalışmalarda deneysel çalışma sonuçları ile analiz çalışması sonuçlarının birbirleri ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Analiz çalışmalarında çoğunlukla, ABAQUS, Marc-Mentat yazılımları ve Hill 48, Barlat 89, Barlat 96, Yld-2000 malzeme modelleri kullanıldığı belirlenmiştir.

Karmaşık şekilli sac metal parçaların şekillendirilmesi için takım şeklinin belirlenmesinde sonlu elemanlarla (FE) simülasyonlarının yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. FE geri esneme simülasyonları aracılığı ile deneysel çalışmalarda geçen deneme yanılma süreleri en aza indirilebilmektedir. Geri esnemenin dolayısıyla şekillendirilen parçalardaki hatalar takım yüzeylerinin ötelenmesi ile telafi edilebilmektedir. Lan ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada; orijinal CAD sac metal parçası ve FE ile şekillendirilmiş parça arasındaki hatayı değerlendirmek, geri esneme telafisinde takım yüzeyini ötelemek, düzgün bir takım yüzeyi elde etmek ve diğer FE simülasyon için takım yüzey tanımlarını girmek için bir sistem geliştirmişlerdir. Bu teknik, FE geri esneme simülasyonlarından elde edilen veri noktalarının yaklaşık ötelenerek düzgün bir takım yüzeyi elde etmek ve geri esnemenin telafisinde takımın yeni bir şeklini tanımlamak için başarılı bir şekilde kullanılmıştır [25].

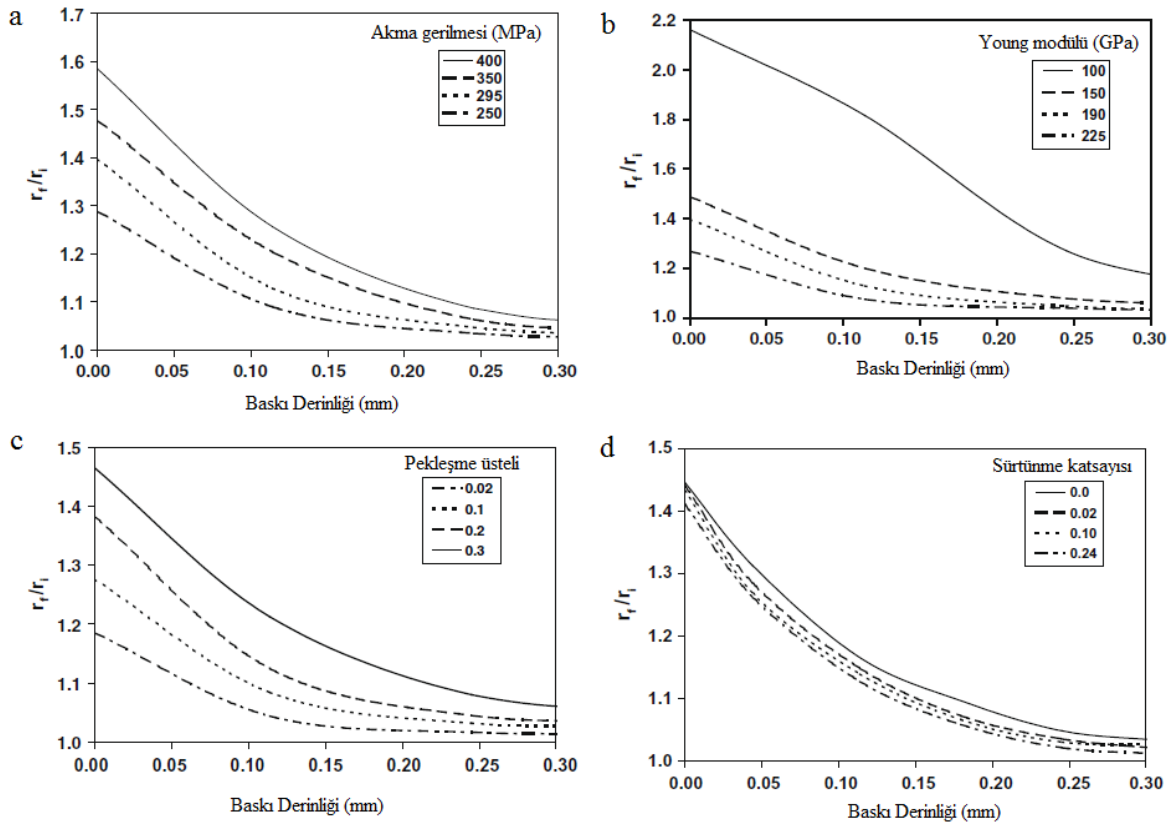
Malzeme sertlik modelinin geri esnemeye etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Malzeme sertlik

modelinin, doğrudan geri esneme hesaplamalarının doğruluğunu etkilediği ve doğruluğun ne kadar fazlaysa geri esneme doğruluğunun da o kadar fazla olduğu yapılan çalışmalardan tespit edilmiştir. Ayrıca, Young modülünün geri esneme simülasyonunun doğruluğu üzerinde büyük etkisi olmakta ve plastik deformasyonla birlikte Young modülünde oluşan değişim kullanılarak geri esneme simülasyonunun doğruluğu arttırılabilmektedir [26].

Sonlu elemanlar yöntemi ile geri esneme davranışının analizlerinde, düğüm sayısının arttırılmasının elde edilen sonuçlardaki hassasiyeti arttırabileceği ancak buna karşılık işlem süresinin de artacağı yapılan simülasyon çalışmalarıyla belirlenmiştir. Genelde analiz çalışmalarında kullanılan 4 nodlu/düğümlü eleman simülasyonun sac sertliğini olduğundan biraz fazla göstereceği için bir hata kaynağı olduğu ancak 9 nodlu/düğümlü eleman simülasyonunun daha iyi hassasiyet sağladığı belirlenmiştir [27].

Bükme işlemi, alüminyum parçaların üretimi esnasında sıklıkla kullanılan işlemlerden birisidir. Malzemelerin mekanik özellikleri de geri esnemeyi etkileyen faktörlerden birisi olarak ortaya çıkmaktadır. Yapılan sonlu elemanlarla analiz çalışmalarında, Alüminyum malzemelerin mekanik özelliklerinin geri esneme davranışına olan etkileri incelenmiştir. Akma dayanımındaki artışın geri esneme miktarını arttırdığı, simülasyon çalışmaları ile de doğrulanmıştır [28].

Bükme kalıplarında, gerek malzeme özelliklerinin gerekse de kalıp geometrisinin geri esnemeye etkileri yaygın olarak yapılan çalışmalarla bilinmektedir. Ancak, baskı derinliği ve baskı yükünün değişimine göre, bu parametrelerin etkisinin değişmekte olduğu Panthi ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışma ile belirlenmiştir. Geri esnemenin; minimum yükte büyük oranda akma gerilmesi, Young modülü ve pekleşme gibi malzeme özelliklerine ve sac kalınlığı, kalıp radyüsü ve kalıp açıklığı açısı gibi geometrik parametrelere bağlı olduğu deneysel olarak belirlenmiştir. Ancak belirli bir baskı yük/derinliğinden sonra, malzeme ve yük kombinasyonunun anlamsız kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sürtünmenin etkisinin de göz ardı edilebilir bir seviyede olduğu ve akma gerilmesi ile pekleşmedeki artışın geri esnemeyi arttırdığı yapılan bu çalışma ile de doğrulanmıştır [29]. Akma gerilmesinin, Young modülünün, pekleşme üstelinin ve yağlamanın baskı derinliğine göre geri esnemeye etkileri Şekil 9'da verilmiştir.



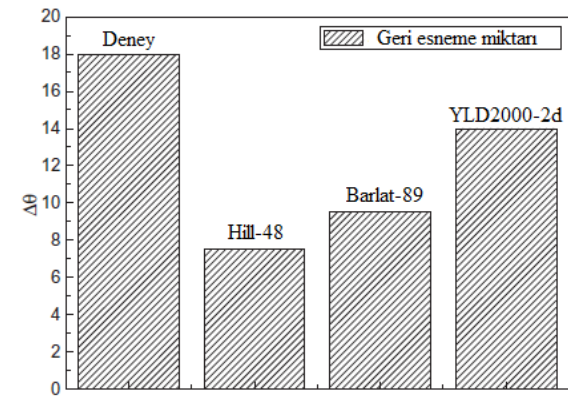
Şekil 9. Baskı derinliğine göre geri esnemeye etki eden faktörler [29]

Uygulanan bükme kuvvetinin geri esnemeye etkisi de sayısal simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir. Geri esnemenin, minimum bükme kuvveti durumunda yüksek olduğu ve bükme kuvvetinin artırılması ile geri esnemenin önemli derecede azaltıldığı gözlemlenmiştir. Bükme kuvvetinin etkisinin çok önemli olduğu ve bükme kuvvetinin etkisinin, eğrilik yarıçapının artması ile arttığı ve sac kalınlığının azalması ile de arttığı belirlenmiştir [30].

Bükme kuvvetinin V bükme işlemindeki geri esnemeye etkileri konusunda bir diğer çalışmada Forcellese ve diğerleri tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmada, bükme kuvvetinin yanı sıra, zımba uç radyüsünün de geri esnemeye olan etkileri incelenmiştir. Zımba uç radyüsünün büyük olması durumunda geri esnemenin arttığı ve zımba uç radyüsünün azalması durumunda da geri esneme oranının azaldığı gözlemlenmiştir [31].

Malzeme modelinin doğru seçimi; bir sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan yazılımlarda, yapılan analiz sonucunda elde edilen sonucun doğruluğunu etkileyen en önemli parametrelerden birisi olmaktadır. TRIP ileri yüksek gerilimli sac malzemeleri, dayanım ve şekillendirilebilirlik açısından eşsiz bir kombinasyona sahip malzemelerdir. TRIP çelik sac malzemelerin geri esneme davranışları sonlu elemanlar analizleri ile de incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde, Hill-48, Barlat 89 ve YLD 2000 malzeme modelleri tanımlanmıştır. Geri esneme analizlerinde, YLD 2000-2d malzeme modelinin en iyi tahmin yapan

malzeme modeli olduğu belirlenmiştir [32]. Farklı malzeme modellerinden elde edilen deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Farklı malzeme modellerinden elde edilen deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması [32]

TRIP çelik sac malzemelerdeki geri esnemeye etki eden faktörlerle ilgili bir diğer çalışmada Fei ve Hodgson tarafından yapılmıştır. Geri esnemenin sac kalınlığı ve kalıp açıklığına bağlı olduğu buna karşın zımba hızı ve zımba radyüsünün etkisinin ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir. TRIP çelikler için Young modülündeki değişimin de göz önünde bulundurulması gerektiği tavsiye edilmekle birlikte, sürtünme kuvvetinin zımba

kuvvetini etkilediği ancak geri esnemeyi etkilemediği tespit edilmiştir [33].

## 5. SONUÇLAR

Geri esneme, bükme kalıplarında şekillendirme işlemleri sonucu malzeme içerisinde kalan, kalıntı gerilmelerden dolayı oluşan bir şekil verme problemi olup şekillendirilen ürünlerde ölçü ve görünüş bozukluklarına yol açmaktadır. Bu problemin telafisi için; malzeme özellikleri, geometri ve proses parametreleri gibi çok sayıda parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Geri esnemenin telafisine yönelik, farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan malzeme türleri, malzeme özellikleri ve proses parametreleri için çok sayıda deneysel ve sonlu elemanlarla analiz çalışmaları yapılmıştır.

Sonlu elemanlarla analiz çalışmalarında sınır şartlarının ve malzeme modellerinin doğru tanımlanmasıyla, geri esneme tahminlerinde başarılı sonuçların elde edildiği ve bu sayede de deneme ve yanılma sürelerini elimine ederek, malzeme ve enerji israfını önlediği yapılan çalışmalardan tespit edilmiştir.

Gerek deneysel, gerekse de sonlu elemanlar yöntemiyle analiz çalışmalarından elde edilen geri esnemeye etki eden faktörler aşağıda verilmiştir. Bu faktörlerin, kalıp tasarımı esnasında ve proses şartlarının tanımlanmasında dikkate alınması, geri esneme açısından başarılı sonuçların elde edilmesine imkan sağlayacaktır.

- Sac malzeme kalınlığının ve bükme açısının artışının geri esneme miktarını arttırdığı,
- Zımbanın sac üzerinde bekleme süresinin (ütüleme süresinin) geri esnemeyi azalttığı,
- Sürtünmenin geri esnemeye etkisinin çok az olmasına rağmen, 6022 T4 malzeme için geri esnemeyi arttırdığı,
- Otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan yüksek gerilimli sac malzemelerin yüksek gerilmelerinden dolayı geri esneme miktarlarının yüksek olduğu,
- Yüksek gerilimli sac malzemelerde ılık şekillendirme şartları altında, bükme modundaki değişikliklerden dolayı geri esnemenin azaldığı ve sıcaklık artışı ile geri esnemenin azaldığı,
- Bükme radyüsündeki azalmanın geri esnemeyi azalttığı,
- Dik anizotropik R değerindeki artışın bükülebilirliği geliştirdiği ancak, büyük dik anizotropik değeri R'nin geri esneme oranını arttırdığı,
- Akma dayanımındaki ve pekleşmedeki artışın geri esneme miktarını arttırdığı,
- Bükme kuvvetinin artması ile geri esnemenin azaldığı, yapılan çalışmalardan elde edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı, 07/2013-09 kod numaralı Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) ile destekleyen Gazi Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- [1] Tekaslan, Ö., Gerger, N. ve Şeker, U., “V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme

Miktarlarının Tespiti”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 23, 231-238, 2008.

- [2] Metal Forming Handbook Schuler, Const. Edit.: Altan, T., *Springer*, Berlin, 1998.
- [3] Tekiner, Z., “An Experimental Study on the Examination of Springback of Sheet Metals With Several Thicknesses and Properties in Bending Dies”, *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 109-117, 2004.
- [4] Suchy, I., Handbook of Die Design, *McGraw-Hill*, New York, 2006.
- [5] Wagoner, R.H., Lim, H. and Lee, M.G., “Advanced Issues in Springback”, *International Journal of Plasticity*, 45, 3-20, 2013.
- [6] Tekaslan, Ö., Şeker, U., ve Özdemir, A., “Determining Springback Amount of Steel Sheet Metal Has 0.5 mm Thickness in Bending Dies”, *Materials and Design*, 27, 251-258, 2006.
- [7] Carden, W.D., Geng, L.M., Matlock, D.K. and Wagoner, R.H., “Measurement of Springback”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 79-101, 2002.
- [8] Liu, W., Liu, Q., Ruan, F., Liang, Z. and Qiu, H., “Springback Prediction For Sheet Metal Forming Based on GA-ANN Technology”, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 227-231, 2007.
- [9] Mori, K., Akita, K. and Abe, Y., “Springback Behaviour in Bending of Ultra-High-Strength Steel Sheets Using CNC Servo Press”, *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 47, 321-325, 2007.
- [10] Zhang, L.C., Lu, G. and Leong, S.C., “V-shaped Sheet Forming by Deformable Punches”, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 134-139, 1997.
- [11] Gisario, A., Barletta, M., Conti, C. and Guarino, S., “Springback Control in Sheet Metal Bending by Laser-Assisted Bending: Experimental Analysis, Empirical and Neural Network Modelling”, *Optics and Lasers in Engineering*, 49, 1372-1383, 2011.
- [12] Naceur, H., Guo, Y.Q. and Ben-Elechi, S., “Response Surface Methodology for Design of sheet Forming Parameters to Control Springback Effects”, *Computers and Structures*, 84, 1651-1663, 2006.
- [13] Yang, X.A. and Ruan, F., “A Die Design Method For Springback Compensation Based on Displacement Adjustment”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 53, 399-406, 2011.
- [14] Zhang, Q.F., Cai, Z.Y., Zhang, Y. and Li, M.Z., “Springback Compensation Method For Doubly



- Curved Plate in Multi-Point Forming”, *Materials and Design*, 47, 377–385, 2013.
- [15] Zhao, J., Zhai, R., Qian, Z. and Ma, R., “A Study on Springback of Profile Planestretch–Bending in the Loading Method of Pretension and Moment”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 75, 45–54, 2013.
- [16] Chenga, H.S., Caoa, J. and Xia, Z.C., “An Accelerated Springback Compensation Method”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 49, 267–279, 2007.
- [17] Asnafi, N., “Springback and Fracture in V-Die Air Bending of Thick Stainlesssteel Sheets”, *Materials and Design*, 21, 217–236, 2000.
- [18] Lim, H., Lee, M.G., Sung, J.H., Kim, J.H. and Wagoner, R.H., “Time-Dependent Springback of Advanced High Strength Steels”, *International Journal of Plasticity*, 29, 42–59, 2012.
- [19] Yanagimoto, J. and Oyamada, K., “Mechanism of Springback-Free Bending of High-Strength Steel Sheets under Warm Forming Conditions”, *Institute of Industrial Science*, 56, 265–268, 2007.
- [20] Wanga, L., Huang, G., Zhanga, H., Wanga, Y. and Yina, L., “Evolution of Springback and Neutral Layer of AZ31B Magnesium Alloy V-Bending Under Warm Forming Conditions”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 844–850, 2013.
- [21] Gau, J.T. and Kinzel, G.L., “A New Model For Springback Prediction in Which the Bauschinger Effect is Considered”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, 1813–1832, 2001.
- [22] Zhu, Y.X., Liu, Y.L., Yang, H. and Li, H.P., “Development and Application of the Material Constitutive Model in Springback Prediction of Cold-Bending”, *Materials and Design*, 42, 245–258, 2012.
- [23] Leu, D.K., “A Simplified Approach for Evaluating Bendability and Springback in Plastic Bending of Anisotropic Sheet Metals”, *Journal of Materials Processing Technology*, 66, 9–17, 1997.
- [24] Verma, R.K. and Haldar, A., “Effect of Normal Anisotropy on Springback”, *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 300–304, 2007.
- [25] Lana, F., Chena, J. and Linb, J., “A Method of Constructing Smooth Tool Surfaces for FE Prediction of Springback in Sheet Metal Forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 177, 382–385, 2006.
- [26] Lia, X., Yanga, Y., Wanga, Y., Baoa, J. and Li, S., “Effect of the Material-Hardening Mode on the Springback Simulation Accuracy of V-Free Bending”, *Journal of Materials Processing Technology*, 123, 209–211, 2002.
- [27] Nilsson, A., Melin, L. and Magnusson, C., “Finite-Element Simulation of V-Die Bending: A Comparison With Experimental Results”, *Journal of Materials Processing Technology*, 65, 52–58, 1997.
- [28] Esat, V. Darendeliler, H. ve Gokler, M.İ., “Finite Element Analysis of Springback in Bending of Aluminium Sheets”, *Materials and Design*, 23, 223–229, 2002.
- [29] Panthi, S.K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S.S. and Goel, M.D., “Finite Element Analysis of Sheet Metal Bending Process to Predict the Springback”, *Materials and Design*, 31, 657–662, 2010.
- [30] Panthi, S.K., Ramakrishnan, N., Pathak, K.K. and Chouhan, J.S., “An Analysis of Springback in Sheet Metal Bending Using Finite Element Method (FEM)”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 120–124, 2007.
- [31] Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F. and Micari, F., “The Evaluation of Springback in 3D Stamping and Coining Processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 80–81, 108–112, 1998.
- [32] Toros, S., Polat, A. ve Ozturk, F., “Formability and Springback Characterization of TRIP800 Advanced High Strength Steel”, *Materials and Design*, 41, 298–305, 2012.
- [33] Fei, F., Hodgson, P., “Experimental and Numerical Studies of Springback in Air V-Bending Process for Cold Rolled TRIP Steels”, *Nuclear Engineering and Design*, 236, 1847–1851, 2006.