

Bariş Çetin
Kıdemli Lider Malzeme ve Özel İşlemler
Mühendisi
cetin.baris@fnss.com.tr

FNSS Sav. Sis. AŞ
Gölbaşı / Ankara

Eren Billur
Dr. Öğretim Üyesi
eren@billur.com.tr

Atılım Üniversitesi
Gölbaşı / Ankara

Besim Baranoğlu
Dr. Öğretim Üyesi
besim.baranoğlu@atilim.edu.tr

Atılım Üniversitesi
Gölbaşı / Ankara

Türkay Muratoğlu
Araştırma Mühendisi
turkay.muratoğlu@atilim.edu.tr

Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme
Mükemmeliyet Merkezi
Gölbaşı / Ankara

Murat Mutlu Yılmaz
Lisans Öğrencisi

Atılım Üniversitesi
Gölbaşı / Ankara

Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Bükümünde Geri Esneme Açısının Görüntü İşleme ile Belirlenmesi

Yüksek dayanımlı çeliklerin büküm işlemlerinde geri esnemenin hassas bir şekilde ölçülebilmesi gereklidir. Elde edilen son geometri, geri esneme miktarına bağlıdır. Geri esnemedeki yanlış bir tahmin, bükme kuvveti hesabında da yanlışlıklara neden olabilecektir. Bu nedenle, özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde, geri esneme açıları deneysel çalışmalarla doğrulanmalıdır. Bir çok deneysel çalışmada, ancak yük kalktıktan sonraki açı ölçülebilmekte, geri yaylanma buna göre hesaplanmaktadır. Bu çalışmada ise, yüksek mukavemetli çeliklerde bükme açılarının yük altında ve yük kalktıktan sonra belirlenmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Deney düzeneğinde bir video kamera ile tüm büküm prosesi boyunca numunenin görüntüleri kaydedilmiştir. Özel bir Matlab kodu ile bu görüntülerden; parçanın, pres alt ölü noktadayken (maksimum yük anı) ve pres tamamen kalktıktan sonraki (geri esneme sonrası) açıları belirlenmiştir. Sonuçlar, hem manuel yöntemlerle, hem de sayısal simülasyonlarla kıyaslanmıştır. Görüntü işleme yönteminin manuel yöntemlerle oldukça yakın sonuçlar verdiği ve simülasyon sonuçlarında %20'ye varan iyileşme sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Dayanımlı çelikler, Geri Esneme, Görüntü İşleme.

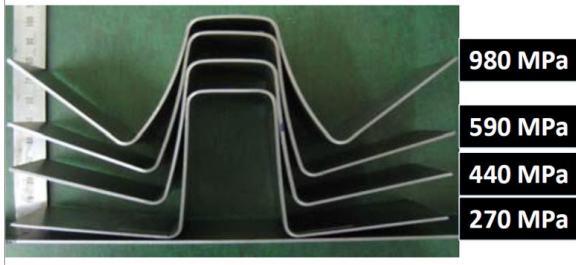
1. GİRİŞ

Zırhlı muharebe araçlarının gövde imalatında, işlem zincirinin üç ana adımı vardır. Bunlar sırasıyla lazerle kesme, bükme ve kaynaklı birleştirmedir. İlk adım olarak, genellikle büyük boyutlu plakalar (örn. 9m x 3m) olarak tedarik edilen gövde malzemesi, istenen boyutlarda lazer ile kesilir. Daha sonra, plakalar teknik çizimlere göre yüksek tonaj kapasiteli (örn. 2000 ton kapasiteli) abkant preslerde bükülür. Büküm sonrası boyutsal toleransların tutturulması için geri esneme açısının doğru tahmin edilebilmesi gerekmektedir. Çoğu zaman, bu durum çok sayıda deneme yanılma yapılmasına neden olmaktadır. Bu süreç hem maliyet artırıcı hem de proje planlamasını aksatıcı bir nitelik taşıyabilmektedir. Fakat geri esnemenin doğru tahmin edilmesiyle birlikte tek

seferde teknik resim toleranslarına uygun olarak bükülmüş olan zırh plakaları, hızlı bir şekilde gövde üretimi için kaynak atölyesine sevk edilebilmektedir.

Otomotiv veya ağır iş makineleri endüstrilerinin aksine, zırhlı muharebe araçlarında kullanılan malzemeler, çok daha kalın ve çok geniş boyutlara sahiptir. Zırhlı muharebe araçlarının imalatında kullanılan ultra yüksek dayanımlı çelik plakaların kalınlıkları bazı durumlarda 35 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca, bükülecek plakaların uzunluğu da 8 metreyi geçebilmektedir [1]. Kolaylıkla tahmin edilebileceği üzere, bu kalınlıkta ve uzunluktaki yüksek dayanımlı çeliklerin bükülmesi için çok yüksek pres kuvvetleri gerektirmektedir. Buna ek olarak, teknik çizimlerde tanımlanan boyutsal toleransların yakalanabilmesi,

dayanım arttıkça artan geri esneme nedeniyle zorlayıcı bir görevdir. Yüksek dayanımlı çeliklerin temel özellikleri yüksek akma gerilmesidir (Yield Stress, $R_{p0.2}$). Bir başka deyişle, yüksek dayanımlı çelikler bükülme işleminde, konvansiyonel yumuşak çeliklere (mild steel) kıyasla daha fazla elastik gerinim (elastic strain) taşımaktadırlar [2]. Bu nedenle yük kaldırıldığında tüm elastik gerinim geri kazanılacağından, yüksek mukavemetli çelikler (özellikle de zırh çelikleri), daha fazla geri esneme göstereceklerdir. Farklı dayanım değerlerine sahip çeliklerin artan geri esneme seviyeleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Malzemenin dayanımı arttıkça geri esneme eğilimi de artar.

Geri esneme eğilimi, gelişmiş yüksek dayanımlı çeliklerin şekillendirilmesi alanında birçok araştırma grubunun odaklandığı bir araştırma alanıdır [3-5]. Otomotiv ve zırhlı personel taşıyıcılar da dahil olmak üzere, birçok sektörde ağırlık azaltma çalışmaları amacıyla kullanılan çeliklerin dayanımları giderek artmaktadır. Çelik üreticilerinin geliştirip pazara sunduğu hem yüksek süneklige, hem de yüksek dayanımına sahip yeni nesil çelikler ile zorlayıcı tasarımlarda da (karmaşık geometrilere) yüksek dayanımlı çelikler kullanılabilir hâle gelmiştir. Bu durum, geri esneme tahminini daha da zorlaştırmaktadır.

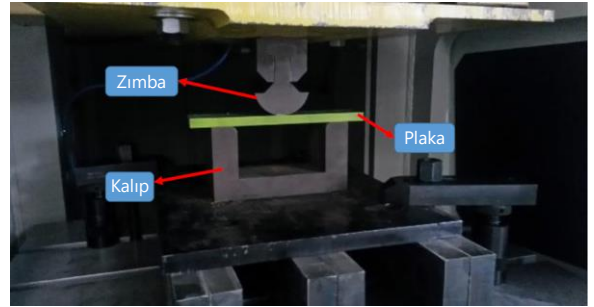
Geri esneme, tanımı gereği, maksimum yük altındaki geometri ile, yük kaldırıldıktan sonraki geometri arasındaki farktır. Geri esneme hesaplarının deneysel doğrulamasında sadece yük kalktıktan sonraki açılar kıyaslanabilmektedir. Pres alt ölü noktadayken (AÖN, bottom dead center, BDC) plakanın açısı, teknik çizime ya da simülasyon sonuçlarına göre tahmin edilmektedir. Bu da geri esneme miktarında büyük bir belirsizliğe neden olmaktadır. Plaka kalınlığındaki (tolerans dahilinde) farklılıklar, kalıp radyuslarındaki aşınmalar ve/veya presin alt ölü nokta tekrarlanabilirliği gibi değişkenler nedeniyle, yük altı büküm açıları hesaplanandan ve deneysel tekrarlarla farklılık gösterebilir. Bu nedenle geri esneme miktarının doğru tahmini için yük altındaki büküm açılarının da ölçülebilmesi gerekmektedir. Bu sayede, yük kalktıktan sonraki

büküm açısı ile aradaki açı farkı kesin ve net olarak ölçülebilir.

Bu çalışmada, modüler bir büküm kalıbında, pres alt ölü noktadayken ve yük kalktıktan sonraki büküm açılarını görüntü işleme yöntemi ile ölçülebilen bir sistem geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, yüksek dayanımlı zırh çeliklerinin farklı kalıp radyusları altındaki bükme açıları incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Büküm deneyleri Atılım Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde bulunan Komatsu marka 80 tonluk servo-mekanik preste yapılmıştır. Zırh çeliğinden üretilmiş deneysel büküm plakaları geleneksel havada bükme (air bending) yöntemiyle bükülmüştür. Geleneksel yöntemde servo pres sürekli aynı hızda kullanılarak tüm kurs boyunca (130 mm) mekanik pres gibi davranması sağlanmıştır. Servo presin veri toplama ünitesi ile, krank açısı, anlık kurs, kuvvet ve hız gibi veriler kaydedilmiştir. Buna ek olarak tüm proses yüksek-çözünürlüklü bir kamera ile de kayda alınmıştır. Şekil 2 ve 3’te deneysel kalıp ve servo presteki kurulumu görülebilir.



Şekil 2: Plaka büküm kalıbının servo prese bağlı hâli.



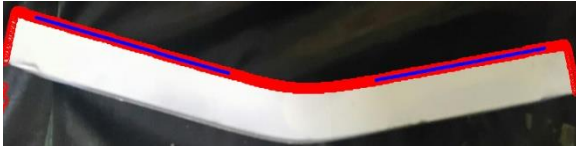
Şekil 3: Yüksek-çözünürlüklü video kayıt sistemi.

Video kamera tarafından saniyede 60 kare fotoğraflama yapıldığından, presin alt ölü noktadayken ve kalıp açıldıktan sonraki anlardaki görüntüler rahatlıkla elde edilebilmektedir. Daha sonra bu anlık görüntü kareleri, MatLab yazılımında

özel olarak geliştirilen bir görüntü işleme kodunda analiz edilmiştir.

MatLab kodunun başarması gereken ilk işlem büküm plakasını, çevresindeki diğer tüm görüntülerden ayırabilmektir. Bu amaçla “eşikleme” tekniği (thresholding) kullanılmıştır. Eşikleme işleminde renkli resimdeki belli kırmızı, mavi ve yeşilin altında ya da üstünde olan yerler 1 ve 0 olarak kodlanır. Bu sayede görüntüde istenen yerler ve istenmeyen arka plan ayrılabilir. İşlem özellikle yüksek kontrast olan görüntülerde daha iyi sonuç verdiğinden [6], plakalar fosforlu renklere (beyaz ya da yeşil) boyanarak arka plandan ayrılmalrı sağlanmıştır.

Plakanın koordinatları arka plandan ayrıldıktan sonra, MatLab kodu plakanın üst yüzeyini hesaplamaktadır. Üst yüzeyin tamamı Şekil 4 ve 5’te kırmızı dairelerle işaretlenmiştir. Büküm plakasının radyusa yakın bölgeleri ve kenarlara yakın olan tarafları dışarıda bırakılacak şekilde, büküm plakasının düz alanları belirlenmektedir. Bu alanlar da, Şekil 4 ve 5’te mavi noktalarla gösterilmiştir. En son olarak mavi noktalara iki adet doğrusal eğri oturma (linear curve fitting) işlemi yapılır. İki eğrinin arasında kalan açı da MatLab kodu tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır (bkz. Şekil 5).

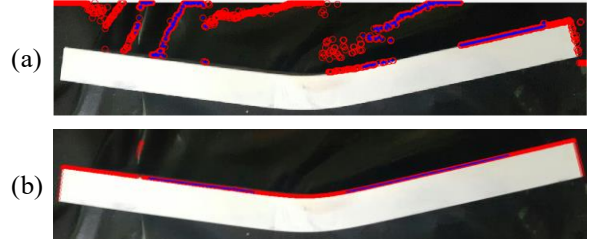


Şekil 4: 20 mm kalınlığındaki plaka için eşikleme yöntemi.



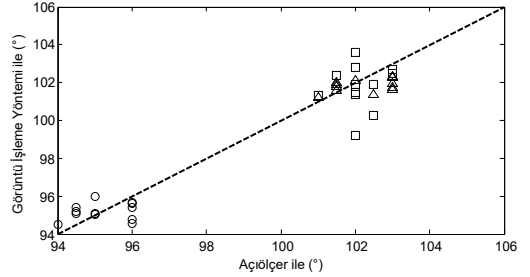
Şekil 5: 12 mm kalınlığındaki plaka için eşikleme yöntemi ile açı hesaplaması.

Görüntü işleme sistemi 1 mm için 4 ila 5 piksel görüntü almaktadır. Bu durumda, Şekil 4 ve 5’te görüldüğü üzere, kenarları boyanmış plakalarda doğru bir eşik değeri seçilebildiğinde MATLAB kodu plakanın üst yüzeyini büyük bir hassasiyetle ($\pm 0,20-0,25$ mm) seçebilmektedir. Mevcut durumda eşik değerleri birkaç deneme yanılma ile belirlenmektedir. Yanlış seçilen eşik değerleri, kenarların doğru hesaplanamamasına ve sonuç olarak da lineer eğrilerin yanlış çıkmasına neden olmaktadır. Aynı görüntünün, farklı eşik değerleri ile çıkarabileceği farklı sonuçlar Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6: Eşikleme yöntemi çıktıları: (a) uygun olmayan eşik değeri ile, (b) uygun eşik değeri ile.

Yöntemin tekrarlanabilirliği ve manuel ölçümlerle kıyaslanması, daha önceki bir çalışmada kanıtlanmıştır, bkz. Şekil 7 [8] Ancak bir önceki çalışmada eşikleme yöntemi ve MATLAB kodu yerine manuel yöntemler kullanılmıştır.



Şekil 7: Görüntü işleme yönteminin açıölçer ile kıyaslanması [8].

3. DENEYLER

Belirtilen test kalıbı ve yöntemle 12 ve 20 mm kalınlıkta ayrı kalitelerdeki zırh plakaları bükülmüştür. Malzemelerin yaklaşık değerleri **Tablo 1**'de verilmiştir.

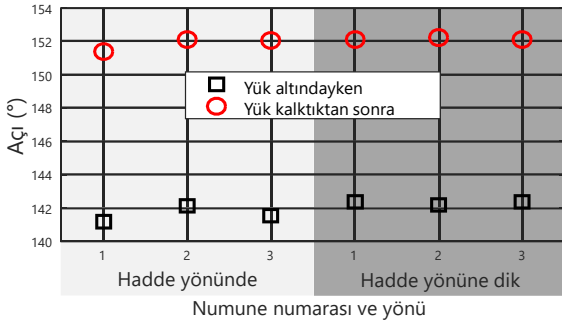
Tablo 1: Kullanılan zırh çeliklerinin mekanik özellikleri.

	Malzeme 1	Malzeme 2
Kalınlık (mm)	20	12
Akma Dayanımı (MPa)	>1100	800-1000
Çekme Dayanımı (MPa)	1250-1550	900-1350
Toplam Uzama A ₅₀ (%)	>12	>12

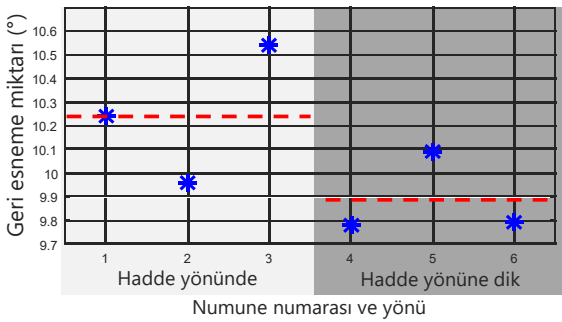
Hem alt ölü noktada (pres tam yük altındayken), hem de yük kaldırıldıktan sonraki açılar hesaplanmıştır, bkz. Şekil 8.

Geri esneme miktarı, iki açının arasındaki farktan hesaplanmış ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Yapılan çalışmadaki 3’er tekrarları dahi, plaka kalınlıklarındaki değişim, ısıl işlemlerinde oluşabilecek farklılıklar ya da prosesteki değişkenlikle açıklanabilecek farklılıklar gözlemlenmiştir. Şekil 9’da kırmızı kesik çizgilerle gösterilen ortalama değerlere göre, hadde yönünde ortalama 10.24°’lik bir geri esneme gözlenirken,

yaklaşık $\pm 2.3^\circ$ 'lük hata payı bulunmuştur. Hadde yönüne dik bükümlerde ise ortalama geri esneme 9.89° , hata payı ise ± 1.85 olarak bulunmuştur.

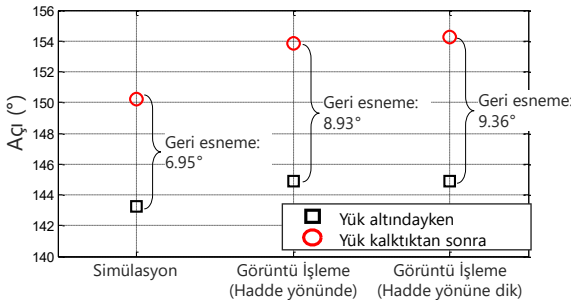


Şekil 8: 20 mm kalınlığındaki zırh plakasının görüntü işleme yöntemi ile hesaplanan büküm açıları.



Şekil 9: MatLab görüntü işleme yöntemi ile hesaplanan geri esneme miktarı (kırmızı çizgiler numune yönlerine göre ortalama geri esnemeyi göstermektedir).

Aynı çalışma 12 mm kalınlıktaki farklı kalitedeki bir zırh çeliği plakasında da yapılmıştır. Şekil 10'da görüleceği üzere, simülasyonla geri esneme miktarı yaklaşık 7° olarak tahmin edilmiştir. Görüntü işleme yöntemi ile farklı yönlerde yaklaşık 9° geri esneme ölçülmüştür. Ayrıca yük altı ve yük sonrası açılarda da 2 ila 4° arasında farklılıklar tespit edilmiştir.



Şekil 10: 12 mm kalınlıkta zırh çeliği plakası bükümünün simülasyon ve görüntü işleme yöntemlerinin kıyaslanması.

Şekil 10 ayrıca görüntü işleme yöntemi kullanılmaması durumunda, simülasyon ile tahmin

edilen yük altı açı ile geri esneme miktarının hata miktarını göstermektedir. Simülasyon datalarının baz alınması halinde gerçekte 9° olan geri esneme $10-11^\circ$ olarak tahmin edilecektir. Bir başka deyişle; geri esneme miktarı yaklaşık %20 hatalı tahmin edilecektir.

4. SONUÇ ve YORUMLAR

- Çeliklerde, dayanım arttıkça geri esnemenin arttığı bilinmektedir. Akma dayanımı 1100 MPa'nın üzerinde olan zırh çeliklerinde 150° 'ye bükümde dahi (düzensellikten 30° 'lik bükümde), yaklaşık 10° geri esneme gözlemlenmiştir.
- Geri esnemeyi hassas bir şekilde hesaplayabilmek için yük altındaki açının da ölçülebilmesi gerekmektedir. Simülasyon ya da ampirik bir yük altı açı hesabına dayandırılan geri esneme hesapları hatalı olmaktadır.
- Yüksek-çözünürlüklü sayısal kamera ile kaydedilen görüntülerden yük altı ve yük sonrası fotoğraflar kolaylıkla elde edilebilmektedir. Geliştirilen MatLab kodu sayesinde, doğru eşik değerleri seçildiğinde açı hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.
- Yöntem, eşik değerine çok bağımlıdır. Yanlış seçilen eşik değerleri, anlamsız sonuçlara neden olmaktadır. Eşik değerinin doğruluğu şu an için manuel olarak yapılabilmektedir. Bunun da otomatik olması için çalışmalar devam etmektedir.
- Çalışma kapsamında, sonlu elemanlar yazılımından da geri esneme hesaplayabilen bir kod tasarlanmaktadır. Bu kod da tamamlandığında, bükme işleminin simülasyonu ve kendisi arasında doğrudan bir kıyas yapılabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Savunma Sanayi Başkanlığı (SSB) FNSS ve Atılım Üniversitesi arasında imzalanan Savunma Sanayi İçin araştırmacı Yetiştirme programı (SAYP) protokolü kapsamında desteklenmiştir. Projeye sağladıkları maddi destekleri için SSB ve FNSS yönetimine teşekkür ederiz. Ayrıca proje kapsamında mevcut altyapısını kullanma imkanını tanıyan Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne de müteşekkirimiz.

Determination of the Spring-Back Angle by Image Processing in Bending of High Strength Steels

Precise determination of the spring-back angle plays an important role in bending of high strength steels (HSS). Since the desired final geometry is totally dependent on the amount of spring-back; any under-estimation would result also in an under-

estimation of the bending force. For that reason, especially in the modelling of HSS bending the spring-back should be verified with experimental studies. This contribution deals with the determination of the spring-back angle in HSS bending operations. To accomplish this, a simple set-up was designed and with the aid of a digital camera the bending process was recorded. A MATLAB script was designed which uses image processing approach for the determination of the angles from the images at the bottom dead center (BDC, i.e., at maximum punch force) and the final position (i.e., after springback). Results were compared with FEA based simulations.

Keywords: High Strength Steels, Springback, Image Processing.

KAYNAKÇA

- [1] Billur, E., Çetin, B., Gürleyik, M., (2016), "New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends and Constraints", International Journal of Scientific and Technology Research, Vol.2 (1), pp 50-62.
- [2] Mulidran, P., Spisak, E., Majernikova, J., Yang S.Y., (2017), "The International Journal of Engineering and Science", Vol.6 (9), pp 49-52.
- [3] Billur, E. And Altan, T., (2012), "Servo-driven presses for AHSS Stamping", Stamping Journal, Nov. Dec. Issue, pp 12-13.
- [4] Zhang, M., Zhang, J., Ning, Y.X., Wang, T., Wan, Z., (2013), "Springback Behavior of Advanced High Strength Steel (AHSS) CP800," Metallic Materials and Manufacturing Technology", Vol.820, pp 45-49.
- [5] Yang, X., Choi, C., Sever, N.K., Altan, T., (2016), "Prediction of Springback in Air-bending of AHSS (DP780) Considering Young's Modulus Variation and with A Piecewise Hardening Function", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.105, pp. 266-272
- [6] Seo, K.Y., Kim, J.H., Lee, H.S., Kim, J., Kim, B.M., (2017), "Effect of Constitutive Equations on Springback Prediction Accuracy in the TRIP1180 Cold Stamping", Metals, Vol. 8, pp.18
- [7] MatLab & Simulink Users' Manual.
- [8] Billur, E., Çetin, B., Yılmaz, M.M., Oğuz, A.G., Atay, A., Ersoy, K., Uğuz, R.O., Kaftanoğlu, B., "Forming of New Generation AHSS Using Servo Presses", Proceedings of 5th International Conference on Accuracy in Forming Technology (ICAFT 2015), pp. 175-192.