

Barlat89 Akma Kriterinin Detaylı İncelenmesi ve Model Katsayılarının Belirlenmesi Üzerine Farklı Yöntemlerin Geliştirilmesi

Süleyman Kılıç^{1*} 

¹*Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye*

Geliş: 11.10.2024, Kabul: 10.12.2024, Yayınlanma: 25.12.2024

ÖZ

Bu çalışmada, Barlat89 akma kriteri kullanılarak farklı anizotropik malzemelerin deformasyon davranışlarının modellenmesi üzerine odaklanılmıştır. Söz konusu kriter, ortotropik levhaların plastik davranışlarını öngörmek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir. Sonlu elemanlar analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan Hill48 modeline kıyasla, daha az sayıda parametre ile yüksek doğruluk sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Çalışmada, AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımları ile DP600 çift fazlı çelik malzemeler analiz edilmiştir. Model parametrelerinin belirlenmesinde, sayısal ve analitik yöntemler birlikte kullanılmış ve yeni parametrik uyarlama yöntemleri önerilmiştir. Elde edilen model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bulgular, kullanılan çözüm yöntemlerin deformasyon davranışlarının öngörülmesinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, modelin doğruluğunu artırmak için parametrik uyarlama yöntemlerinin etkili bir araç olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, yalnızca bir parametrenin veya tüm model parametrelerinin optimize edilmesinin tahmin doğruluğu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, önerilen yöntemlerin farklı malzeme türleri ve gerilme koşulları için geçerliliği detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Barlat89 akma kriteri; Model katsayıları; Optimizasyon

Detailed Examination of the Barlat89 Yield Criterion and Development of Various Methods for Determining Model Coefficients

ABSTRACT

In this study, the modeling of deformation behavior of various anisotropic materials using the Barlat89 yield criterion has been focused on. This criterion is a model developed to predict the plastic behavior of orthotropic sheets. Compared to the Hill48 model, which is widely used in finite element analyses, it is preferred due to its higher accuracy with fewer parameters. In the study, AA5754 and AA7075 aluminum alloys and DP600 dual-phase steel materials were analyzed. In determining the model parameters, numerical and analytical methods were used together, and new parametric adaptation methods were proposed. The obtained model results were compared with experimental data. The findings revealed that the solution methods used play a significant role in predicting deformation behavior. Additionally, it has been determined that parametric adaptation methods are an effective tool for improving the accuracy of the model. In the study, the effect of optimizing only one parameter or all model parameters on prediction accuracy was evaluated. In this context, the validity of the proposed methods for different material types and stress conditions was investigated in detail.

Keywords: Barlat89 yield criterion; Model coefficients; Optimization

1. GİRİŞ

Barlat89 akma kriteri, anizotropik metal levhaların plastik davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak kullanılan bir plastik malzeme modelidir. Barlat ve Lian tarafından 1989 yılında geliştirilen bu model, özellikle ortotropik malzemelerin akma yüzeylelerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Barlat & Lian, 1989). Ortotropik malzeme, üç ortogonal yönde farklı mekanik özelliklere sahip anizotropik malzemelere verilen addır. Anizotropi ise metal levhaların imalat sürecindeki haddeleme gibi işlemler sırasında farklı yönlerde farklı mekanik özellikler göstermesi durumunu ifade eden bir terimdir.

Sonlu elemanlar analizlerinde sıklıkla kullanılan Von Mises modeli izotropik malzemeler için uygun olan ve malzemenin her yöndeki gerilme durumunu aynı şekilde ele alan bir kriterdir. Ancak, Barlat89 modeli, malzemenin farklı yönlere olan duyarlılıklarını hesaba katmakta ve böylece malzemenin anizotropik (yöne bağlı) davranışlarını daha iyi modelleyebilmektedir. Bu nedenle metal şekillendirme süreçlerinde yüksek doğruluk sağladığı için otomotiv ve havacılık sektörlerinde geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Model, farklı yüklem koşulları altında malzemenin nasıl akacağını, nereden kırılma veya yırtılma olasılığının olduğunu daha doğru tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Bu sayede kalıp ve zimba tasarımlarına da yardımcı olmakta ve deneme yanılma sürecini ortadan kaldırmaktadır. Örneğin bir otomobil kaportası panelinin şekillendirilmesi sırasında, panelin farklı bölgelerindeki gerilme ve gerinme durumları Barlat89 modeli ile analiz edilerek, bu bölgelerde malzemenin nasıl davranacağını ve hangi alanların zayıf veya risk altında olabileceğini, nerede aşırı incelleme veya kırışıklıkların oluşabileceği konusunda bilgiler sağlamaktadır. Ayrıca süreç parametrelerinin belirlenmesine de yardımcı olmaktadır. Çizelge 1.'de Ticari yazılımlarda kullanılan akma kriterleri verilmiştir (Banabic, 2010).

Çizelge 1: Ticari yazılımlarda kullanılan akma kriterleri (Banabic, 2010).

Ticari Yazılım	Hill48	Barlat89
ABAQUS	X	X
AUTOFORM	X	X
LS-DYNA	X	X
OPTRIS	X	X
PAM STAMP	X	
STAM PACK	X	

Hill48 ve Barlat89 modelleri hem ticari yazılımlarda hem de literatürde sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde birçok model geliştirilmesine rağmen bu eski modellerin popüler olmasının temel sebebi az sayıda deneysel parametre ile tahmin yapabilmeleridir. Çizelge 2.'de akma kriterlerinde ihtiyaç duyulan deneysel veri parametreleri verilmiştir. Tabloda da görüleceği üzere en az sayıda parametre ile çalışan (σ_0, r_0, r_{90}) model Barlat89 modelidir.

Çizelge 2: Akma kriterlerinde deneysel veri ihtiyacı (Banabic, 2010)

Model	σ_0	σ_{30}	σ_{45}	σ_{75}	σ_{90}	σ_b	r_0	r_{30}	r_{45}	r_{75}	r_{90}	r_b
Hill48	X						X		X		X	
Barlat89	X						X				X	
Barlat2004	X		X		X	X	X		X		X	X
Soare2007	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Shrivastava ve Digavalli (Shrivastava & Digavalli, 2023) tarafından yapılan araştırmada, AA5182 alüminyum alaşımının sıcak derin çekme işlemleri sırasında sürtünme özelliklerinin sıcaklık ve basınç gibi işlem parametrelerinden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Barlat89 modeli kullanılarak sayısal modelleme çalışmasını başarıyla uygulamışlardır. Sıcaklık ve temas basıncı gibi değişkenlerin sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkilediğini ve değişken sürtünme koşullarının kullanılmasının simülasyon doğruluğunu artırdığını belirtmişlerdir. Barlat89 modeli, geri esneme tahminlerinde temel modellerle karşılaştırıldığında önemli başarılar göstermesine rağmen, karmaşık gerilme ve deformasyon etkilerinin daha iyi öngörülebilmesi için ilave model parametrelerine ihtiyaç duymaktadır. Conde ve arkadaşları (Conde, Coppieters, & Andrade-Campos, 2024), çalışmalarında model parametrelerinde kalibrasyon yaparak geri esneme tahminlerindeki hata oranları minimize etmişlerdir. Barlat89 modelinin anizotropik davranışların öngörülmesinde etkili bir yöntem olduğunu, ancak geri esneme gibi karmaşık şekil değişimlerinin tahmin edilmesi söz konusu olduğunda daha ileri modellerin (örneğin, Barlat89+Yoshida-Uemori) tercih edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Rickhey ve Hong (Rickhey & Hong, 2023) tarafından yapılan çalışmada, Barlat89 modeli ile genişletilmiş Barlat89 modeli arasındaki farklar incelenmiştir. Çalışmalarında, geri esneme tahminlerinin doğruluğu, hem kuvvet-yer değiştirme (FDL) eğrilerinde hem de farklı gerilme modları için incelenmiş ve geri esneme davranışının hassas bir şekilde tahmin edilebilmesi için r-değerlerinin gerinimle birlikte nasıl değiştiğini detaylandırmışlardır. Barlat89 modelinin doğruluğunun belirli koşullar altında yüksek olduğunu, ancak anizotropik malzemelerde özellikle karmaşık gerilme durumlarında geri esneme etkilerinin doğru tahmin edilmesi için genişletilmiş Barlat89 gibi daha ileri modellerin kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır. Dang ve arkadaşlarının (Dang, Đúc, Lê Quóc, Van Chinh, & Van Hoang, 2023) yaptığı çalışmada, SUS304 paslanmaz çeliğin derin çekme işlemi sırasında oluşan kulaklanma hataları, Barlat89 akma kriteri kullanılarak sayısal simülasyon ile öngörülmüştür. Elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Barlat89 modelinin anizotropik katsayılarının doğru tanımlanmasının, malzemenin farklı yönlere gerilme-şekil değiştirme davranışlarının daha hassas bir şekilde tahmin edilmesini sağladığı gösterilmiştir. Shrivastava ve Kumar (Shrivastava & Kumar, 2024) tarafından yapılan çalışmada, çift fazlı DP600 çeliğinin derin çekme simülasyonları Mises, Barlat89 ve BBC2005 akma kriterleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmalarında, BBC2005 modelinin çift eksenli gerilme koşullarında daha iyi sonuçlar verdiği, Barlat89 modelinin ise yalnızca tek eksenli gerilme

durumlarında geçerli olduğu belirtilmiştir. Barlat89 modelinin çift eksenli gerilme koşullarında akma yüzeyini olduğundan daha yüksek tahmin ettiğini ve bu durumun geri esneme tahminlerini olumsuz etkilediğini ortaya koymuşlardır. Katiyar ve arkadaşlarının (Katiyar, Panicker, & Panda, 2023) yapmış olduğu çalışmada, Barlat89 modeli kullanılarak AA5754 ve AA6082 alüminyum alaşımlarının sıcak çekme işlemi sonrası davranışları analiz edilmiştir. Çalışmalarında, Barlat89 modelinin sıcaklık ve deformasyon hızına duyarlılığını ve bu parametrelerin malzeme performansı üzerindeki etkilerini detaylandırmışlardır. Geri esneme tahminlerinin doğruluğunu artırmak adına, Barlat89 modeline ek olarak, sıcaklık ve hız duyarlılığına sahip daha karmaşık modellerin kullanılması önerilmiştir.

Model katsayılarının doğru belirlenmesi, malzeme davranışlarının öngörülmesinde ve mühendislik uygulamalarında yüksek doğruluk sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, Barlat89 modeli için katsayılarının belirlenmesi üzerine farklı yöntemlerin karşılaştırılmasını yapmak ve önerilen denklemin etkinliğini incelemektir. Çalışma, deneysel veriler kullanılarak önerilen yöntemlerin doğruluğunu değerlendirmeyi hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar, farklı çözüm yöntemlerinin Barlat89 modeli üzerindeki etkilerini açıkça göstermektedir.

2. TEORİK ARKA PLAN

2.1. Barlat89 Akma Kriteri

Barlat89 Modeli, gerilme tensörü ve anizotropi tensörleri arasındaki ilişkiyi kullanarak matematiksel bir akma fonksiyonu oluşturmaktadır. Bu fonksiyon, belirli bir gerilme durumunda malzemenin ne zaman plastik deformasyona uğrayacağını tanımlamaktadır. Model, Eşitlik 1'de verilen k_1 ve k_2 olarak adlandırılan gerilme tensörünün iki sabit değeri ile ifade edilmektedir. Ayrıca M adı verilen bir üs ile formüle edilmektedir. M, malzemenin kristalografik yapısına bağlı olarak seçilen bir sayı olmakla birlikte BCC ve FCC metaller için sırasıyla 6 ve 8 olarak önerilmektedir (Banabic, 2010; Barlat & Lian, 1989). Modelin temel ifadesi Denklem 1 ile gösterilmektedir.

$$f = |k_1 + k_2|^M + |k_1 - k_2|^M + |2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}$$

$$k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \sigma_{12}^2} \quad (2)$$

Bu model, $\sigma_{12} = 0$ olduğunda $\sigma_{11} = \sigma_1$ ve $\sigma_{22} = \sigma_2$ olmakta normal anizotropi durumunda genişletilmiş olmakta ve Denklem 3 ile ifade edilmektedir.

$$f = a|k_1 + k_2|^M + b|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (3)$$

2.2. Model Katsayılarının Belirlenmesi

Denklem 3'te yer alan a , b ve c model katsayıları anizotropi değerine (r) bağlı olup Denklem 4 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$a = b = 2 - c = \frac{2}{1 + r} \quad (4)$$

Düzlemsel anizotropi sergileyen malzemeler için Denklem 5 ile genelleştirmiştir.

$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M$$

$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2} \quad (5)$$

$$k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{12}^2}$$

Bu denklemlerdeki a , c , h , p parametreleri ise Denklem 6 yardımıyla belirlenmektedir. p parametresi ayrıca nümerik yöntemler yardımıyla da belirlenebilmektedir. Denklem 6'da verilen a , c , h parametrelerinin çözümü için sadece r_0 ve r_{90} deneysel anizotropi değerlerine ihtiyaç bulunmaktadır.

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \frac{r_{90}}{1 + r_{90}}}$$

$$h = \sqrt{\frac{r_0}{1 + r_0} \frac{1 + r_{90}}{r_{90}}}$$

$$p = \frac{\sigma_0}{\tau_s} \left(\frac{2}{2a + 2M_c}\right)^{\frac{1}{M}} \quad (6)$$

Denklem 6'da ki τ_s farklı kayma gerilmesi durumundaki akma gerilmesini ifade etmektedir.

Bu katsayılar, malzemenin mekanik testlerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak, deneysel süreçler genellikle karmaşık ve zaman alıcıdır. Model katsayılarının belirlenmesinde kullanılan yaygın yöntemler arasında deneysel verilerin doğrudan kullanımı, sayısal optimizasyon teknikleri ve analitik çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Deneysel verilerin doğrudan kullanımı, malzeme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim verilerinin kullanılması ile gerçekleşir. Örneğin her bir derecelik açı değişimi için numuneler hazırlanıp çekme deneyleri yapılabilir. Bu yöntem, yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, deneysel süreçlerin karmaşıklığı ve maliyeti nedeniyle pratik olmamaktadır. Sayısal optimizasyon teknikleri, geniş veri setleri üzerinde etkili sonuçlar vermektedir. Bu tekniklerden genetik algoritmalar,

parçacık sürü optimizasyonu ve gradyan yöntemleri gibi çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılarak model katsayıları belirlenebilmektedir (Kılıç, 2024). Ancak, bu yöntemlerin hesaplama maliyetleri yüksek olup yüksek bilgisayar işlem kapasitesi gerektirmektedir (David, 1989; Goldberg & Holland, 1988). Akma kriterleri için model katsayılarının belirlenmesinde deneysel veriler büyük önem taşımaktadır. Bu veriler, genellikle gerilme-gerinim testleri, çekme testleri ve üç nokta eğme testleri gibi mekanik testlerden elde edilmektedir. Bu testler sırasında, malzemenin farklı yönlerdeki gerilme ve gerinim davranışları ölçülerek model katsayıları hesaplanmaktadır (Banabic, 2010).

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında iki farklı alüminyum alaşımı ve bir çelik malzeme incelenmiştir. Malzemelere ait mekanik özellikler literatürden alınmış olup Çizelge 3.'de verilmiştir. İncelenen alüminyum alaşımlarından biri AA5754'tür. Bu alaşım, iyi şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci özellikleri sayesinde otomotiv ve denizcilik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Erice, Rolfe, & Mendiguren, 2023; Ozturk, Pekel, & Halkaci, 2011; Toros, Alkan, Ece, & Ozturk, 2011). AA7075 ise yüksek mukavemetli bir alüminyum alaşımıdır. Özellikle havacılık ve uzay sanayinde, ayrıca spor ekipmanları ve askeri uygulamalarda tercih edilmektedir (S. Kilic, 2019; Rajendran, Duraisamy, Rajendran, & Loganathan, 2023). Bu alaşım, yüksek çekme dayanımı ve yorulma direnci ile bilinmektedir. DP600, çift fazlı (dual phase) bir çelik olup, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanım alanı bulunmaktadır (Kacar, Öztürk, Toros, & Kılıç, 2020; Suleyman Kilic & Ozturk, 2016; Saxena, Drotleff, & Mukhopadhyay, 2016). Bu çelik malzeme, mükemmel şekillendirilebilirlik ve yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir.

Çizelge 3: Malzemelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	σ_0/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{90}/σ_0	r_0	r_{45}	r_{90}	Ref.
AA5754	1,000	0,967	0,969	0,723	0,726	0,739	(Erice et al., 2023)
AA7075	1,000	0,956	1,012	0,38	0,69	0,47	(S. Kilic, 2019)
DP600	1,000	1,02	1,04	0,89	0,85	1,12	(Kacar et al., 2020)

Barlat89 akma kriterine dayalı malzeme modellerinde parametrelerin optimizasyonu, malzemenin anizotropik özelliklerini doğru bir şekilde temsil etmek için kritik öneme sahiptir. Bu parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesi için türev temelli olmayan optimizasyon teknikleri sıkça kullanılmaktadır. Nelder-Mead simplex algoritmasına dayalı fminsearch fonksiyonu, bu tür optimizasyonlarda yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Nelder-Mead simplex algoritması, türevlere gerek duymadan bir fonksiyonun minimum değerini bulmaya çalışan bir optimizasyon tekniğidir (Lagarias, Reeds, Wright, & Wright, 1998).

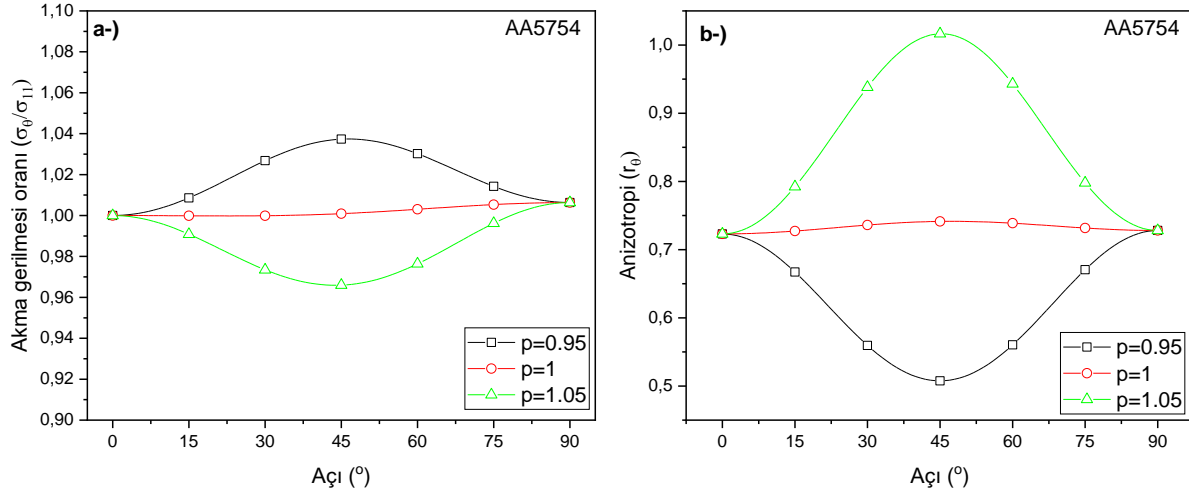
Bu yöntem, çok boyutlu uzayda simplex olarak adlandırılan bir çokgen oluşturmakta ve bu çokgenin köşelerini iteratif olarak güncelleyerek fonksiyonun minimum noktasına yaklaşmaktadır. Fminsearch fonksiyonu, özellikle türevlerin analitik olarak elde edilmesinin zor olduğu durumlarda kullanışlıdır. Bu özellikleri nedeniyle, Barlat89 akma kriterinin parametre optimizasyonunda fminsearch fonksiyonu tercih edilmiştir.

Barlat89 modelinin çözümünde önemli etkileri olan üç parametre a , c ve h parametreleridir. Bu çalışma kapsamında c ve h parametreleri için Denklem 7’de önerilen matematiksel ifadelerin etkisi de incelenmiştir.

$$\begin{aligned} c &= \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \\ a &= 2 - c \\ h &= \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{r_{45} + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, Barlat89 akma kriterinin alüminyum ve çelik alaşımlarının anizotropik davranışlarını modelleme üzerindeki etkinliği incelenmiş ve farklı yöntemlerle belirlenen model katsayılarının doğruluğu karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler ve optimizasyon teknikleri kullanılarak, akma gerilmesi ve anizotropi katsayısı tahminlerindeki hata oranları analiz edilmiştir. Çalışmada ilk olarak p parametresinin etkisi araştırılmıştır. Şekil 1.’de AA5754 malzemesinde yapılan incelemede p değerinin etkisi görülmektedir. 6 numaralı eşitlikte verilen p katsayısının belirlenmesi için kullanılan denklemde kayma gerilmesi katsayısı olduğu için çoğunlukla nümerik yöntemlerle belirlenmektedir. Bu nedenle bu akma kriterinde en önemli model parametresi olarak p değerinin dikkatli belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 1 incelendiğinde akma gerilmesi tahmininde p değerinin artması 45° açı için gerilme tahmini değerini düşürmektedir. Ama anizotropi katsayısının tahmininde p değerinin artması 45° açı için anizotropi değeri tahminini artırmaktadır. Bu nedenle p değerinin doğru belirlenmesi bu model için kritik öneme sahiptir.

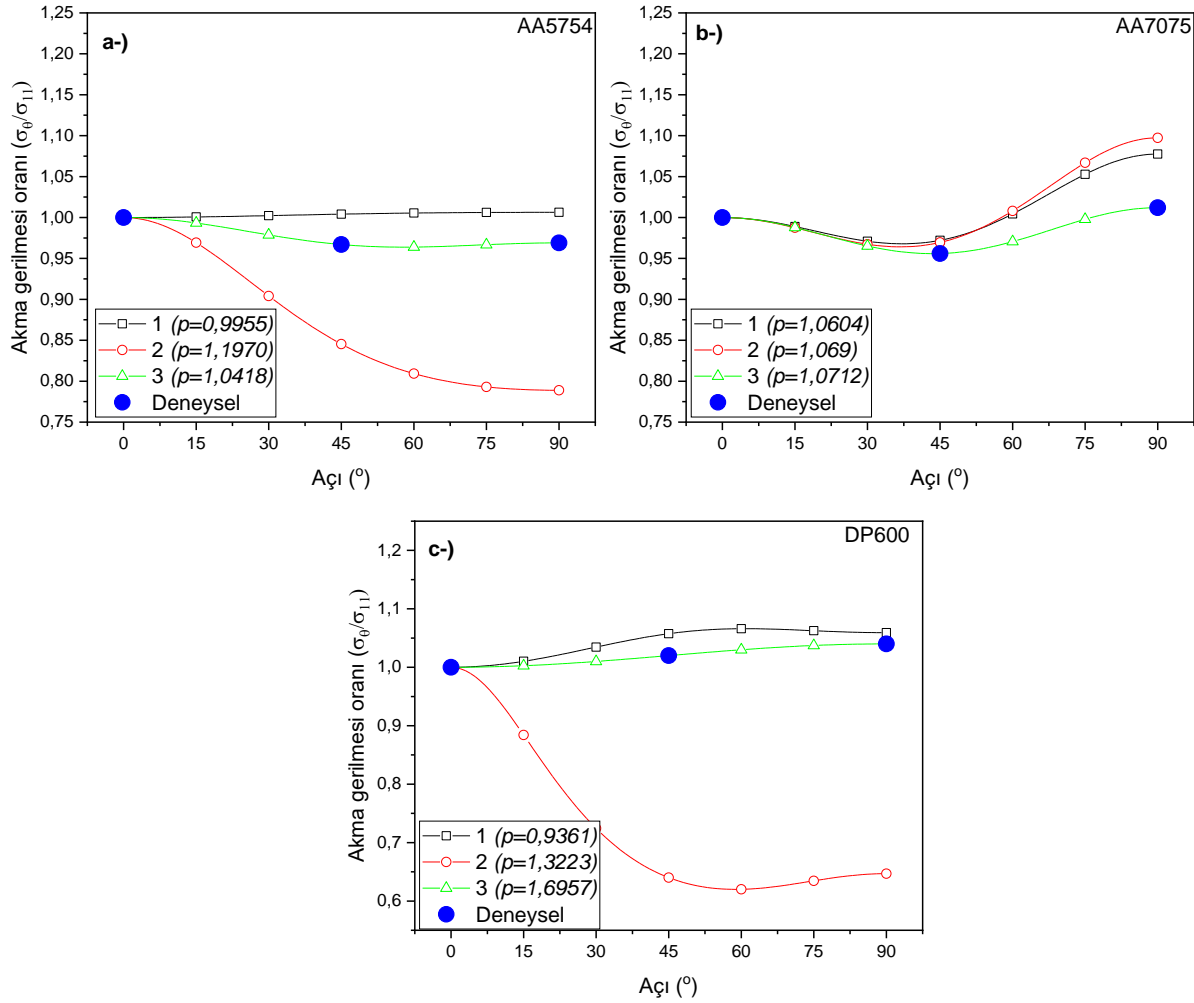


Şekil 1: AA5754 alaşımında farklı p parametrelerinin etkisi, a-) Akma gerilmesi değişimi, b-) Anizotropi değişimi

Çalışma kapsamında üç farklı model parametresi belirleme yöntemi incelenmiştir.

1. Model'de sadece p değeri optimize edilmiş, a, c, h parametreleri için 6 numaralı eşitlik ile analitik olarak çözüm sağlanmıştır.
2. Model'de sadece p değeri optimize edilmiş, a, c, h parametreleri için 7 numaralı eşitlik ile analitik olarak çözüm sağlanmıştır.
3. Model'de ise a, c, h, p parametrelerinin hepsi optimizasyon yöntemi ile elde edilmiştir.

Şekil 2.'de ki grafikler incelendiğinde sadece p değerinin optimize edilerek bulunması (1. Model) tahminler üzerindeki hata miktarının düşürülmesinde etkili olamamıştır. Bu karşılaştırılan üç farklı malzeme türünde de böyle olmuştur. Çalışma kapsamında önerilen 7 numaralı denklem ile de tahmin hatası oldukça fazla çıkmıştır (2. Model). Model parametrelerindeki a, c, h, p parametrelerinin hepsinin optimizasyonla belirlenmesi durumunda ise hata oranı en az olmuştur (3. Model).

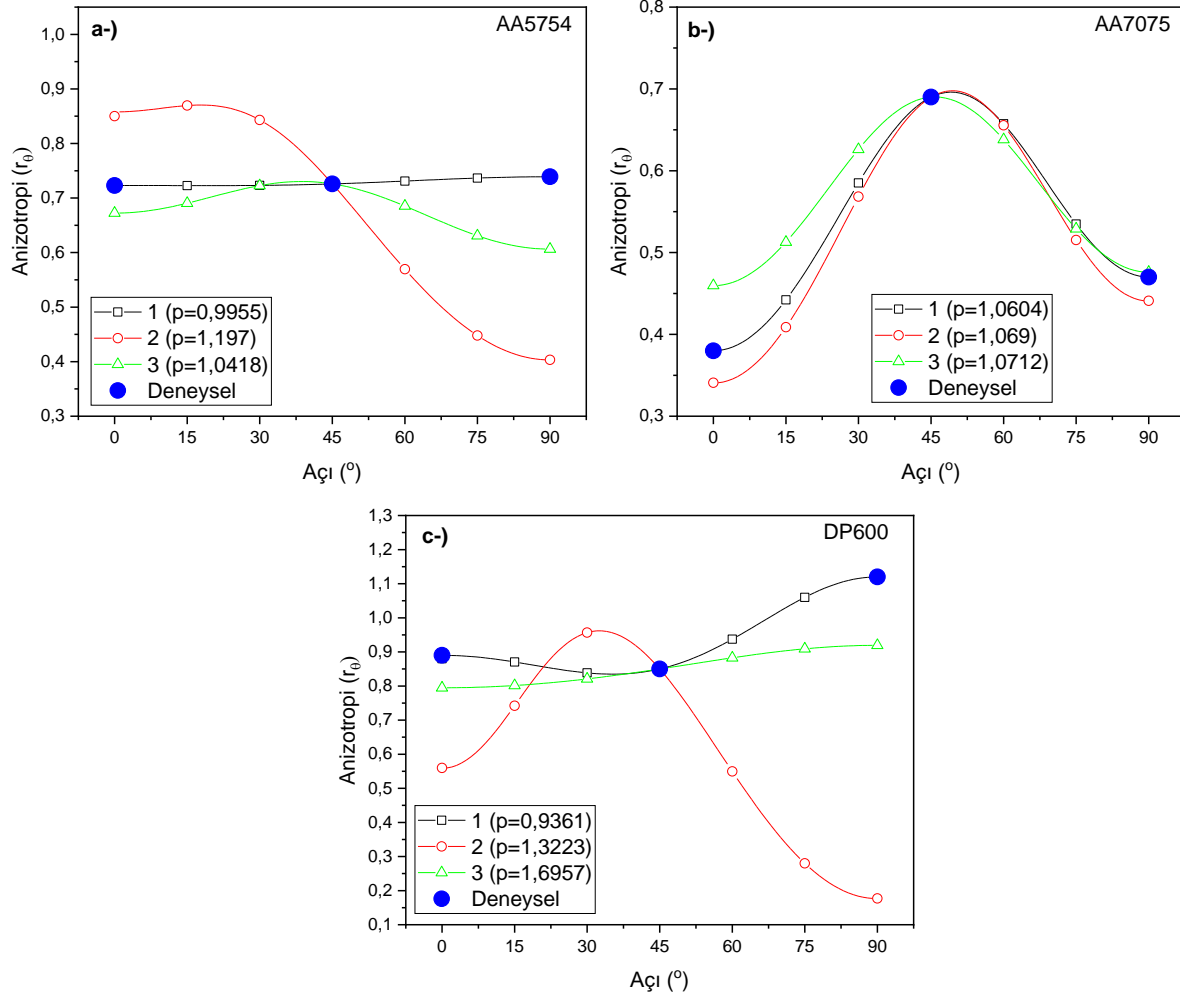


Şekil 2: Farklı modellerin akma gerilmesi tahminine etkisi, a-) AA5754, b-) AA7075, c-) DP600

Şekil 3.'de üç farklı modelin anizotropi değeri tahminleri verilmiştir. Birinci modelin üç farklı malzeme türünde de tahminleri en az hatayla yaptığı görülmektedir. Bunun temel nedeni Barlat89 akma kriterinin anizotropi katsayıları üzerine kurulmasıdır. Ama bu durum yukarıda bahsedildiği gibi akma mukavemetlerinin tahmininde hata oranının yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. İkinci modelin tahminlerinin yine hata oranı yüksek çıkmıştır. Üçüncü modelde ise hata oranı yüksek olmakla birlikte akma gerilmesi tahminleriyle birlikte değerlendirildiğinde yine kullanılabilir bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

Akma gerilmesi ve anizotropi parametrelerinde farklı optimizasyon yaklaşımlarının başarılı olmasının temel nedeni, model parametrelerinin (a, c, h, p) matematiksel ifadelerinin farklı süreçlere dayalı olmasıdır. 6 numaralı denklemde, $a, c,$ ve h parametreleri anizotropi katsayıları olan r_0 ve r_{90} 'ye bağlıdır. Bu durum, bu parametrelerin malzemenin farklı yönlere deformasyon davranışlarını yansıtmasına neden olmaktadır. Buna karşın, p parametresi akma gerilmesi (σ_0) özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, anizotropi

katsayılarının tahmininde r değerlerine odaklanması (1. Model), akma gerilmesi tahmininde ise tüm parametrelerin birlikte optimize edilmesi (3. Model) daha başarılı sonuçlar sağlamaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için, 3 numaralı denklemde verilen akma fonksiyonunun geliştirilmesi ve hem akma gerilmesi hem de anizotropi davranışlarını daha doğru temsil edecek yeni bir matematiksel fonksiyonun üretilmesi önerilmektedir.



Şekil 3: Farklı modellerin anizotropi katsayısı tahminine etkisi, a-) AA5754, b-) AA7075, c-) DP600

Literatürde yapılan çalışmalar, Barlat89 modelinin analitik çözümünün belirli sınırlarının olduğunu ve modelin daha karmaşık gerilme durumlarında doğruluğunu artırmak için geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çeşitli araştırmalar modelin farklı parametrelerle iyileştirilmesine odaklanmıştır. Örneğin, Sanrutsadakorn ve arkadaşları (Sanrutsadakorn, Jhonthong, & Julsri, 2023), Barlat89 ve geliştirilmiş Barlat89+Yoshida-Uemori modellerini karşılaştırarak, temel modelin geri esneme

tahminlerinde yetersiz kaldığını belirtmiştir. Conde ve arkadaşları (Conde et al., 2024), model parametrelerinin kalibrasyonu ile geri esneme tahminlerindeki hata oranlarını minimize etmiş ve daha yüksek doğruluk sağlandığını vurgulamışlardır. Benzer şekilde, Rickhey ve Hong (Rickhey & Hong, 2023), modelin belirli koşullarda doğruluğunun yüksek olduğunu, ancak karmaşık gerilme modlarında geliştirilmiş modellerin tercih edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Yang ve arkadaşları (Yang, Chen, Hong, & Chen, 2023), Barlat89 modelinin geri esneme tahminlerinde sınırlı kaldığını ve karmaşık gerilme koşullarında daha gelişmiş modellerin (örneğin, Yoshida-Uemori veya Armstrong-Frederick modelleri) kullanılmasının önemini göstermiştir. Carvalho (de Carvalho, 2023) çalışması, DP980 çift fazlı çelikte farklı akma kriterlerini incelemiş ve Barlat89'un özellikle karmaşık geometriye sahip parçalar için geri esneme ve buruşma hatalarını öngörmeye yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Du ve arkadaşları (Du et al., 2022), 5182-O alüminyum alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada, farklı akma kriterlerinin doğru parametre tanımlamalarıyla benzer doğrulukta sonuçlar sunduğunu ifade etmişlerdir. Lei ve arkadaşları (Lei et al., 2021), Barlat89 modelinin akma yüzeyi parametrelerinin Marciniak-Kuczynski yöntemiyle elde edilen analitik çözümlerle karşılaştırmasını incelemiş ve sayısal yöntemlerin model doğruluğunu artırdığını belirtmişlerdir. Aydın ve arkadaşları (Aydın, Gerlach, Kessler, & Tekkaya, 2011), akma kriterlerinin doğruluğunu artırmada optimizasyon yöntemlerinin etkili olduğunu vurgulamış ve Chaparro ve arkadaşları (Chaparro, Thuillier, Menezes, Manach, & Fernandes, 2008), hibrit optimizasyon yöntemlerinin daha yüksek doğruluk sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca, Hou ve arkadaşları (Hou et al., 2023), akma kriteri modellerinin doğruluğunu artırmak için parametrik kalibrasyonun önemine dikkat çekmiş ve bu süreçte deneysel verilerle karşılaştırma yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Sonuç olarak, bu çalışma literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Barlat89 modelinin düşük parametre sayısı ile etkili bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır. Ancak, optimizasyon süreçlerinde tek parametre optimizasyonunun anizotropi tahminlerinde etkili olmasına rağmen, çok parametre optimizasyonunun akma gerilmesi gibi kritik özelliklerin tahmininde daha yüksek doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık, deformasyon hızı gibi ek parametrelerin modele dahil edilmesi hem tahmin doğruluğunu artırmak hem de modelin genel uygulanabilirliğini genişletmek açısından önemlidir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, Barlat89 modeli için katsayılarının belirlenmesinde çeşitli analitik ve sayısal yöntemleri kullanarak anizotropik malzemelerin deformasyon davranışlarını daha doğru tahmin etmeyi hedeflemiştir. AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımları ile DP600 çift fazlı çeliğin mekanik davranışları dikkate alınmış

ve önerilen parametrik uyarlama yöntemleriyle elde edilen sonuçlar, deneysel veriler ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, aşağıdaki temel sonuçları ortaya koymuştur:

1. Barlat89 Modelinin Geçerliliği: Model, düşük parametre sayısı ile ortotropik levhaların anizotropik davranışlarını doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir. Bununla birlikte, Barlat89 kriterinin doğruluğunun artırılması için model parametrelerinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.
2. Parametrik Uyarlama Yöntemlerinin Etkinliği: Önerilen parametrik uyarlama yöntemleri, özellikle p katsayısının optimize edilmesi durumunda hata oranını düşürmüştür. Sadece p katsayısının optimize edilmesi, anizotropi tahmininde modelin doğruluğunu artırırken, akma mukavemeti tahmininde sınırlı düzeyde etki etmiştir. Tüm model parametrelerinin (a, c, h, p) optimizasyonu, hem akma gerilmesi hem de anizotropi katsayısı tahminlerindeki hata oranını etkilemiştir.
3. Farklı Malzemeler İçin Uygulama: Yapılan analizler, önerilen yöntemlerin malzeme türlerine göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle AA7075 alaşımında parametrik uyarlama yöntemleri sınırlı düzeyde hata sağlarken, AA5754 ve DP600 malzemelerinde tahmin doğruluğunun nispeten daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, çalışma kapsamında önerilen parametrik uyarlama yöntemleri, modelin doğruluğunu artırmak için etkili bir araç olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bu yöntemlerin farklı malzeme türleri ve karmaşık gerilme durumları için detaylı incelenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Aydın, M. S., Gerlach, J., Kessler, L., & Tekkaya, A. E. (2011). Yield locus evolution and constitutive parameter identification using plane strain tension and tensile tests. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(12), 1957-1964. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.018>
- Banabic, D. (2010). *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*: Springer Science & Business Media.
- Barlat, F., & Lian, K. (1989). Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, 5(1), 51-66.
- Chaparro, B. M., Thuillier, S., Menezes, L. F., Manach, P. Y., & Fernandes, J. V. (2008). Material parameters identification: Gradient-based, genetic and hybrid optimization algorithms. *Computational Materials Science*, 44(2), 339-346. doi:<https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.028>
- Conde, M., Coppieters, S., & Andrade-Campos, A. (2024). Strategies for automatic constitutive model selection and recommendation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 264, 108813.
- Dang, G. L., Đức, H. T., Lê Quốc, D., Van Chinh, N., & Van Hoang, N. (2023). Dự đoán sự tạo thành tai khi dập vuốt chi tiết hình trụ từ thép SUS304 bằng mô phỏng số. *Journal of Military Science and Technology*, 86, 129-136.
- David, E. G. (1989). Genetic algorithms in search. *Optimization and Machine Learning, Reading, Massachusetts*.
- de Carvalho, M. A. C. F. (2023). Industrialization of a dual-phase steel stamped component: Process optimization using AutoForm software.

- Du, K., Huang, S., Wang, H., Yu, F., Pan, L., Huang, H., . . . Yuan, X. (2022). Effect of different yield criteria and material parameter identification methods on the description accuracy of the anisotropic behavior of 5182-O aluminum alloy. *Journal of materials engineering and performance*, 1-19.
- Erice, B., Rolfe, B., & Mendiguren, J. (2023). Anisotropic plasticity and fracture modelling of cold rolled AA5754. *Engineering fracture mechanics*, 289, 109471. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109471>
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99. doi:10.1023/A:1022602019183
- Hou, Y., Myung, D., Park, J. K., Min, J., Lee, H.-R., El-Aty, A. A., & Lee, M.-G. (2023). A Review of Characterization and Modelling Approaches for Sheet Metal Forming of Lightweight Metallic Materials. *Materials*, 16(2), 836. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/2/836>
- Kacar, I., Öztürk, F., Toros, S., & Kılıç, S. (2020). Prediction of strain limits via the Marciniak-Kuczynski model and a novel semi-empirical forming limit diagram model for dual-phase DP600 advanced high strength steel.
- Katiyar, B. S., Panicker, S. S., & Panda, S. K. (2023). Crushing Performance of AA5754 and AA6082 Shells Fabricated by Warm Redrawing Process. *Journal of materials engineering and performance*, 1-11.
- Kilic, S. (2019). Experimental and numerical investigation of the effect of different temperature and deformation speeds on mechanical properties and springback behaviour in Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Mechanika*, 25(5), 406-412. doi:10.5755/j01.mech.25.5.22689
- Kilic, S., & Ozturk, F. (2016). Comparison of performances of commercial TWIP900 and DP600 advanced high strength steels in automotive industry.
- Kılıç, S. (2024). Hill48 akma kriteri kullanarak alüminyum alaşımlarının anizotropik davranışlarının modellenmesi ve optimizasyonu. [Modeling and optimization of the anisotropic behavior of aluminum alloys by using the Hill48 yield criterion]. *International Journal of Engineering Design and Technology*, 6(1), 16-21. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijedt/issue/84209/1496394>
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, 9(1), 112-147.
- Lei, C., Mao, J., Zhang, X., Liu, J., Wang, L., & Chen, D. (2021). A comparison study of the yield surface exponent of the Barlat yield function on the forming limit curve prediction of zirconium alloys with MK method. *International Journal of Material Forming*, 14, 467-484.
- Ozturk, F., Pekel, H., & Halkaci, H. S. (2011). The Effect of Strain-Rate Sensitivity on Formability of AA 5754-O at Cold and Warm Temperatures. *Journal of materials engineering and performance*, 20(1), 77-81. doi:10.1007/s11665-010-9652-y
- Rajendran, P., Duraisamy, V., Rajendran, A. R., & Loganathan, R. V. (2023). Optimization on the electrical discharge machining (EDM) process parameters of aged AA7075/TiC metal matrix composites. *Revista De Metalurgia*, 59(3), e245-e245.
- Rickhey, F., & Hong, S. (2023). Validation of axial and transverse force–displacement responses and principal strain rate ratios in the critical zone as a precursor to anisotropic damage prediction in metal sheets. *International Journal of Material Forming*, 16(1), 10.
- Sanrutsadakorn, A., Jhonthong, N., & Julsi, W. (2023). Finite element modeling for analyzing the production of high-strength steel sheets for automobile parts.
- Saxena, K. K., Drotleff, K., & Mukhopadhyay, J. (2016). Elevated temperature forming limit strain diagrams of automotive alloys Al6014-T4 and DP600: A case study. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(6), 459-470.
- Shrivastava, A., & Digavalli, R. K. (2023). Effect of Process Variables on Interface Friction Characteristics in Strip Drawing of AA 5182 Alloy and Its Formability in Warm Deep Drawing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(5), 175.
- Shrivastava, A., & Kumar, D. R. (2024). *Deep drawing simulation of dual phase steel using hardening curves and anisotropic parameters from uniaxial and biaxial tensile tests*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Toros, S., Alkan, M., Ece, R. E., & Ozturk, F. (2011). Effect of pre-straining on the springback behavior of the AA5754-0 alloy. *Materiali in Tehnologije*, 45(6), 613-618.
- Yang, H., Chen, J., Hong, Q., & Chen, W. (2023). *Development of combined hardening model for spring-back simulation of DP600 in multi-stage sheet metal forming*. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.