



Anizotropi ve gerilme tabanlı hibrit Hill48 denklem önerisi ve katsayı optimizasyonu

Anisotropy and stress-based hybrid Hill48 equation proposal and coefficient optimization

Süleyman Kılıç^{1*}

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye.
suleymankilic@ahievran.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.06.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 03.07.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 23.01.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.58534
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Sonlu elemanlar analizlerinde sıklıkla kullanılan Hill48 akma kriteri hata oranı yüksek bir modeldir. Bu çalışmada, Hill48 akma kriterindeki model parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir hibrit denklem önerisi sunulmaktadır. Önerilen yeni denklem, anizotropi ve gerilme değerlerini birleştirerek model katsayılarını optimize eden bir fonksiyon oluşturmaktadır. Deneyel verilerle uyumlu hale getirmek amacıyla, iki farklı optimizasyon algoritması (Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu) kullanılarak karşılaştırması yapılmıştır. Bu algoritmalar, deneyel ve teorik değerler arasındaki farkların karesinin toplamını minimize eden bir hata fonksiyonunu optimize ederek en uygun model katsayılarını belirlemektedir. Elde edilen sonuçlara göre yeni denklem önerisi, geleneksel Hill48 denkleminin göre hata payını düşürmektedir. Bu çalışma, Hill48 akma kriterinin daha hassas ve doğru bir şekilde uygulanmasını sağlamayı hedeflemekte olup, mühendislik uygulamalarında önemli katkılar sunacaktır.

Anahtar kelimeler: Hill48 akma kriteri, Optimizasyon teknikleri, Genetik algoritma, Parçacık sürü optimizasyonu

Abstract

Hill48 yield criterion, which is frequently used in finite element analyses, is a model with a high error margin. In this study, a new hybrid equation proposal is presented to determine the model parameters in the Hill48 yield criterion. The proposed new equation combines the values of anisotropy and stress values to form a function that optimizes the model coefficients. In order to be compatible with experimental data, a comparison was made using two different optimization algorithms (Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization). These algorithms determine the optimal model coefficients by optimizing an error function that minimizes the sum of the squares of the differences between experimental and theoretical values. According to the results obtained, the new equation proposal reduces the margin of error compared to the traditional Hill48 equation. This study aims to ensure a more precise and accurate application of the Hill48 yield criterion and will make significant contributions to engineering applications.

Keywords: Hill48 yield criterion, Optimization techniques, Genetic algorithm, Particle swarm optimization

1 Giriş

Malzemelerin anizotropik davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesi, özellikle alüminyum alaşımları gibi metallerin farklı yüklem koşulları altındaki performansını öngörmek açısından kritik öneme sahiptir. Hill48 akma kriteri [1], metallerdeki anizotropik etkileri hesaba kattığı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar hata oranı çok düşük olan çok parametrelili modeller geliştirilse de sonlu elemanlar analiz programlarında Hill48 akma kriteri halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kriterin en büyük avantajı az sayıda deneyel parametre ile tahmin yapabilmesidir. Model parametrelerinin sayısının artması, deneyel işlemlerin sayısının artması ve dolayısıyla maliyetlerin yükselmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, çok parametrelili modeller önemli çözüm zorlukları içermektedir.

Geleneksel akma kriterlerinde, anizotropi ve gerilme değerleri ayrı ayrı ele alınmakta ve bu da malzeme davranışının daha az doğru öngörülmesine yol açabilmektedir [2]-[4]. Son yıllarda, bu sorunu ele almak ve Hill48 akma kriterinin doğruluğunu artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bandyopadhyay ve arkadaşları [3], genetik algoritma kullanılarak akma fonksiyonu katsayılarının belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Hill48, Barlat89 ve Yld2000-2d gibi üç yaygın akma fonksiyonunu incelemişlerdir. Akma gerilmeleri ve anizotropi (r) değerleri kullanılarak deneyel

verilerin optimizasyonunu yapmışlardır. Deneyel sonuçlarla karşılaştırıldığında, genetik algoritma ile optimize edilen katsayıların deformasyon davranışlarını daha doğru tahmin ettiğini göstermişlerdir. Ayrıca, Sonlu elemanlar simülasyonları ile yapılan testlerde, genetik algoritma bazlı katsayıların daha iyi tahmin yeteneğine sahip olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada sadece geleneksel denklemlerin çözümü için genetik algoritma kullanılmıştır. Mu ve arkadaşları [4], geleneksel Hill48 modeline akış kuralı ekleyerek geliştirmişler ve geliştirdikleri modelin daha doğru tahminler yaptığını göstermişlerdir. Panich ve Chongbunwatana [5], alüminyum alaşımında Hill48 ve 18 parametre ile çalışan Yld2004 akma kriterinin tahmin performanslarını incelemişlerdir. Simülasyon sonuçları, deneyel verilerle karşılaştırılmış ve 18 parametre ile çalışan Yld2004 modelinin genel olarak daha iyi uyum sağladığı gösterilmiştir. Fakat, Yld2004 modelinin tahmin yapabilmesi için çok fazla sayıda deneyel işlemin yapılması gerekmektedir. Ghoo ve arkadaşları [6], beş farklı akma kriterinin (Barlat89, BBC2005, Hill48, Vegter2017 ve YSD6) tahmin performansını deneyel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hill48 gibi eski modellerin deneyel verileri yakalama konusunda eksik kaldığını vurgulamışlardır. Geleneksel Hill48 modelinde, anizotropi değerinin birden küçük olan malzemelerle kullanımının uygun olmadığı söylenmiştir. Esener ve Ünlü [7], TBF1050 çeliği ve 5XXX serisi alüminyum alaşımları üzerinde Hill48, Barlat89, Hu2003 ve 6. dereceden polinomial (Poly6)

*Yazışılan yazar/Corresponding author

akma kriteri modellerini analitik olarak incelemişlerdir. Geleneksel Hill48 modelinde, anizotropi tabanlı ve gerilme tabanlı olarak model performansı incelenmiş, gerilme-tabanlı versiyonun deneysel verilerle daha iyi uyum gösterdiği vurgulanmıştır. Ünlü ve arkadaşları [8], DP800 çeliğinin anizotropik davranışını tanımlamak için Hill48 akma kriterini kullanarak açılma varyasyonları analitik ve sayısal olarak incelemişlerdir. Hill48 akma kriterinde, anizotropi tabanlı ve gerilme-tabanlı olmak üzere iki farklı versiyon kullanmışlardır. Gerilme tabanlı Hill48 modelinin, deneysel verilerle uyumlu sonuçlar verdiğini vurgulamışlardır. Anizotropi tabanlı model, anizotropi katsayılarını doğru tahmin ederken, gerilme tabanlı model akma gerilimi oranlarının yönelmiş varyasyonlarını daha doğru tahmin ettiği gösterilmiştir. Mu ve arkadaşları [9], DC04, DP600 ve AA3104 gibi üç farklı malzeme üzerinde Hill48 akma kriterinin, akma gerilmeleri ve anizotropi değerleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hill48 modelinin, belirli malzemelerin anizotropik davranışlarını tahmin etmede sınırlamalarının olduğu ve tahmin doğruluğunun malzemenin anizotropik özelliklerine bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Geliştirilmiş Hill48 yöntemlerinin, geleneksel Hill48 modeline göre daha yüksek tahmin doğruluğu sağladığı gösterilmiştir. Yaptıkları diğer çalışmalarında [10], Çelik (DC04 ve DP980) ve alüminyum alaşımı (AA5754) malzemelerinde Hill48 akma kriterinin, akma gerilmeleri ve anizotropi değerlerini tahmin etmede sınırlamalarını detaylı olarak analiz etmişlerdir. Hill48 akma kriterine bazı parametreler ekleyerek modifiye etmişlerdir. Hill48 akma kriterinin, bazı alüminyum alaşımlarının simetrik çift eksenli gerilmelerini doğru bir şekilde tahmin edemediği vurgulanmıştır. Modifiye edilmiş Hill48 modelinin, sac metal şekillendirme işlemlerinde daha doğru tahminler sağladığı gösterilmiştir. Yan ve arkadaşları [11], AA2090-T3 alüminyum alaşımı ve DP600 çelik malzemesinde Hill48 akma kriterini incelemişlerdir. Hill48 akma kriteri için farklı çözüm yöntemlerini araştırmışlardır. Kriterin dış bükümlük sağlamadığı durumlarda malzemenin deformasyon davranışını doğru bir şekilde modelleyemeyeceğini vurgulamışlardır. Şener [12], AA2090-T3 ve AA5182-O alüminyum alaşımlarının Hill48 akma kriteri ile modellenmesini incelemiştir. Hill48 model parametrelerini 6, 8, 14 ve 16 veri girdisi olacak şekilde dört farklı deneysel veri seti ile belirlemiştir. Hill48-14p ve Hill48-16p modelleri, AA2090-T3 alaşımı için akma gerilmesi oranlı ve anizotropi katsayısının açılma varyasyonlarını başarılı bir şekilde tahmin ettiği gösterilmiştir. AA5182-O alaşımı için, Hill48-8p ve Hill48-16p modelleri akma gerilmesi oranının düzlemsel varyasyonunu daha doğru tahmin ederken, Hill48-6p ve Hill48-14p modelleri anizotropi katsayısının varyasyonunu daha doğru tahmin ettiği vurgulanmıştır. Du ve arkadaşları [13], 5182-O alüminyum alaşımı üzerinde Hill48, Barlat89 ve BBC2005 akma kriterlerinin tahminlerini incelemişlerdir. Hill48 akma kriterleri, anizotropi ve gerilme değerleri verilerini kullanarak malzeme parametrelerinin tanımlanmasında farklı tahmin doğrulukları oluşturduğunu göstermişlerdir. Kilic ve arkadaşları [14], TWIP900 çeliğinde Hill48, Barlat89, YLD2000-2d ve BBC2000 akma kriterleri incelenmiş ve karşılaştırılmışlardır. TWIP900 çeliğinin akma gerilimi ve anizotropik davranışlarını tahmin etmede Hill48 ve Barlat89 akma kriterlerinin sınırlı kaldığını vurgulamışlardır. Özellikle, Hill48 ve Barlat89 modellerinin artan açılma değerlerde akma gerilmelerini fazla tahmin ettiği gösterilmiştir. Shahid ve arkadaşları [15], polimerlerin anizotropik davranışlarının modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Hill48, Yld91 ve Yld2004-18P gibi üç farklı anizotropik akma kriteri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri yapmışlardır. Hill48 akma kriterinin,

anizotropik akma gerilmelerini ve deformasyonları tahmin etmede sınırlı kaldığı vurgulanmıştır. Chen ve arkadaşları [16], QP1180 çelik sacının anizotropik sertleşme davranışını tanımlamak için Hill48 ve üç farklı anizotropik sertleşme modelinin (S-Y 2009, CQN ve yeni önerilen model) doğruluğunu incelemişlerdir. Hill48 modeli, izotropik sertleşme varsayımı ile sadece başlangıç akma yüzeyini tanımlayabileceği ve plastik deformasyon arttıkça tahmin hataları artacağını vurgulamışlardır. Yan ve arkadaşları [17], Hill48 akma kriteri parametrelerini belirlemek için ters parametre tanımlama yöntemini incelemişlerdir. Çalışmalarında hem anizotropi hem de gerilme tabanlı parametreler kullanılarak Hill48 akma kriteri için parametre tanımlamaları yapılmıştır. Parametrelerin belirlenmesi için gereken testlerin oldukça zaman alıcı olduğu vurgulanmıştır. Optimizasyon algoritmaları ve ortogonal deney tasarımı kullanılarak parametreler tahmin etmeye çalışmışlardır. Abspoel ve arkadaşları [18], yaptıkları çalışmada akma kriterlerinin kullanımı için gerekli parametrelerin basit mekanik testler (çekme testleri) ile tahmin edilmesini amaçlamışlardır. Hill48 akma kriterinin kullanım kolaylığı ve az sayıda test gerektirmesi nedeniyle yaygın olduğu ancak bu model tüm gerilme durumlarını doğru tanımlamakta yetersiz kaldığını vurgulamışlardır. Daha ileri akma kriterlerinin daha fazla test verisi gerektirdiği ve bu nedenle daha karmaşık olduğu söylenmiştir. Yalnızca çekme test verileri (çekme mukavemeti, düzgün uzama ve 0°, 45° ve 90° yönlerinde anizotropi değeri) kullanılarak gerilme faktörlerinin doğrudan tahmin edilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemin geniş bir malzeme yelpazesinde yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini göstermişlerdir. Akşen ve arkadaşları [19], AA6016-T4 alüminyum alaşımının derin çekme işlemini incelemişlerdir. Yaptıkları simülasyonlarda Hill48 akma kriterini kullanmışlardır. Chen ve arkadaşları [20], malzeme ve anizotropi parametrelerin doğru belirlenmesi ile sonlu elemanlar simülasyonlarında yüksek doğruluk elde edildiğini ifade etmişlerdir. Modelleme ve simülasyonlarda, optimizasyon yönteminin sonuçlar üzerinde etkili olduğu bilinmektedir [21]-[24]. Bu çalışmalar, Hill48 akma kriterinin optimizasyonu ve geliştirilmesi için yeni yaklaşımlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, Hill48 akma kriterindeki model parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir denklem önerisi sunulmaktadır. Önerilen yeni denklem, anizotropi ve gerilme değerlerini birleştirerek model katsayılarını optimize eden bir fonksiyon oluşturmaktadır. Bu özgün yaklaşım, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak hem anizotropi hem de gerilme değerlerini aynı anda dikkate alarak daha kapsamlı ve doğru bir modelleme sunmayı amaçlamaktadır. Deneysel ve teorik değerler arasındaki farkları minimize etmek için Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO) gibi optimizasyon algoritmalarından yararlanılmıştır [25]-[27]. Bu yaklaşımın gerekliliği, malzeme davranışının karmaşıklığından kaynaklanmakta ve anizotropi ile gerilmenin bağımsız olarak ele alınması durumunda tam olarak yakalanamamaktadır. Metallerdeki anizotropi, özellikle haddelenmiş alüminyum alaşımlarında, akma yüzeyini ve ardından gelen plastik deformasyonu önemli ölçüde etkilemektedir. Anizotropi ve gerilme değerlerini birleştirerek oluşturulan bu yeni denklem önerisi, parametre belirleme sürecini hızlandırmakta ve kapsamlı deneysel test ihtiyacını azaltmaktadır. Bu yöntemin etkinliği, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmede iyi bilinen GA ve PSO algoritmalarının uygulanmasıyla gösterilmektedir.

2 Malzeme ve yöntem

Bu kapsamda, iki farklı optimizasyon algoritması kullanılarak model katsayılarının belirlenmesi ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan deneysel veriler, literatürde yayımlanmış güvenilir kaynaklardan alınmıştır [28],[29]. Tablo 1’de verilen bu veriler, çeşitli mekanik testler sonucunda çelik ve alüminyum alaşımlarının farklı açılardaki anizotropik davranışlarını ve gerilme değerlerini içermektedir.

2.1 Optimizasyon algoritmaları

Optimizasyon problemleri, mühendislik ve bilimsel araştırmalarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Algoritmalar yardımıyla, problemlerin en uygun çözümünün bulunması sağlanmaktadır. Bu bağlamda, evrimsel algoritmalar arasında yer alan GA ve doğadan esinlenen meta-sezgisel yöntemlerden biri olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), önemli iki optimizasyon tekniğidir. Genetik Algoritma (GA), John Holland tarafından 1970’lerde geliştirilmiş olup, biyolojik evrim süreçlerinden esinlenmiştir [30]. GA, doğal seçim ve genetik mekanizmaları taklit ederek optimizasyon problemlerine çözüm aramaktadır. Algoritmanın temel bileşenleri genellikle kromozomlar, popülasyon, seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden oluşmaktadır [25]. Kromozomlar ve Popülasyon, olası çözümleri kromozom adı verilen bit dizileri olarak temsil etmektedirler. Bu kromozomlar, gen adı verilen küçük birimlerden, popülasyon ise belirli sayıda kromozomun bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Popülasyon, başlangıçta rastgele seçilen kromozomlarla oluşturulmakta ve her bir kromozomun uygunluk değeri, çözüm kalitesini temsil etmektedir. Uygunluk fonksiyonu ile değerlendirilen kromozomlar arasından, en iyi çözümleri üretebilecek olanlar seçilmektedir. Bu seçim süreci, doğal seçilimi taklit etmekte ve genellikle rulet tekerleği veya turnuva seçim yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Eşitlik 1 ile ifade edilmektedir.

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (1)$$

Burada P_i , kromozom i ’nin seçilme olasılığını, f_i , kromozom i ’nin uygunluk değerini ve N , toplam kromozom sayısını temsil etmektedir. Seçilen kromozom çiftleri, belirli bir çaprazlama oranına göre genetik materyallerini değiştirmektedir. Bu işlem, yeni nesil kromozomların oluşumunu sağlamakta ve popülasyonun çeşitliliğini artırmaktadır. Çaprazlama sonrası oluşan yeni kromozomların genlerinde küçük değişiklikler yapılmaktadır. Mutasyon işlemi, popülasyonun lokal maksimuma sıkışmasını engelleyerek, daha geniş bir çözüm uzayında arama yapılmasını sağlamaktadır.

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), James Kennedy ve Russell Eberhart tarafından geliştirilmiştir [26]. PSO, kuş sürüleri gibi

doğal sistemlerin toplu davranışlarını modelleyerek, optimizasyon problemlerine çözüm bulmaktadır. PSO’nun temel bileşenleri parçacıklar, hız, pozisyon ve topluluk zekâsıdır. PSO, çözüm uzayında hareket eden bir grup parçacık kullanılmaktadır. Her parçacık, potansiyel bir çözümü temsil etmektedir. Başlangıçta rastgele pozisyon ve hızlarla yerleştirilen parçacıklar, sürekli olarak en iyi çözüme doğru hareket etmektedirler. Her parçacık, kendi en iyi konumunu ($pBest$) ve sürünün en iyi konumunu ($gBest$) dikkate alarak hızını güncellemektedir. Hız güncelleme formülü Eşitlik 2 de ki gibi ifade edilmektedir.

$$u_i(t) = wu_i(t) + c_1r_1(pBest_i - x_i(t)) \dots + c_2r_2(gBest - x_i(t)) \quad (2)$$

Burada, $u_i(t)$ parçacık i ’nin t anındaki hızını, $x_i(t)$ parçacığın pozisyonunu, w ataleti, c_1 ve c_2 öğrenme katsayılarını, r_1 ve r_2 ise rastgele sayıları temsil etmektedir. Parçacıkların yeni pozisyonları, hız güncellemesinden sonra Eşitlik 3 ile belirlenmektedir.

$$x_i(t) = x_i(t) + u_i(t) \quad (3)$$

GA ve PSO, çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. GA, genetik operatörlerin kullanımıyla geniş bir çözüm uzayında etkili arama yapabilme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, çaprazlama ve mutasyon işlemleri zaman zaman hesaplama maliyetlerini artırabilmektedir. PSO ise, hız ve pozisyon güncellemeleri ile daha hızlı bir yakınsama sağlarken, lokal minimumlara takılma riski taşımaktadır. GA, genellikle daha karmaşık ve büyük ölçekli problemlerde başarılı sonuçlar vermektedir. PSO ise, daha az parametre ayarına ihtiyaç duymakta ve hızlı çözüm bulma yeteneği ile bilinmektedir. Ancak, PSO’nun performansı başlangıç koşullarına ve parametre ayarlarına oldukça bağlıdır [31].

GA ve PSO teknikleri kullanılarak yapılan analizlerde, algoritmaların performansını etkileyen parametreler belirli değerlerle sınırlandırılmıştır. Genetik Algoritma için popülasyon büyüklüğü 2000, maksimum nesil sayısı 3000, çaprazlama oranı 0.9 ve mutationadaptfeasible mutasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, çözüm uzayını daha etkili bir şekilde arayarak algoritmanın erken yakınsama sorununu azaltmakta ve daha geniş bir çözüm yelpazesini keşfetmesini sağlamaktadır. Parçacık Sürü Optimizasyonu için ise sürü büyüklüğü 1500 ve maksimum iterasyon sayısı 2500 olarak belirlenmiştir. Bu parametre değerleri, ön denemeler sonucunda elde edilen başarılı sonuçlara göre seçilmiş olup, bu çalışmada ayrıca değerlendirilmemiştir.

Tablo 1. Farklı malzemelere ait mekanik özellikler.

Table 1. Mechanical properties of different materials.

Malzeme	σ_0/σ_0	σ_{45}/σ_0	σ_{90}/σ_0	σ_b/σ_0	r_0	r_{45}	r_{90}
DP600	1	0.9456	0.9397	0.8414	0.86	0.96	1.02
AA2008-T4	1	0.9456	0.9041	0.8753	0.878	0.498	0.534

2.2 Model katsayılarının belirlenmesi

Malzemelere ait mekanik testler yapıldıktan sonra Eşitlik 4 ve 5 'de ki denklemlerde yerlerine yazılarak model katsayıları elde edilebilmektedir. Eşitliklerde yer alan F , G , H ve N katsayıları hem anizotropi hem de akma gerilmelerine bağlı olarak elde edilebilmektedir. Eşitlik 4.'te ki denklemlerde deneysel olarak belirlenen anizotropi değerleri (r_0 , r_{45} , r_{90}) kullanılarak katsayılar elde edilebilmekte ve çözüm sağlanabilmektedir.

$$\begin{aligned} F &= \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)} \\ G &= \frac{1}{(1+r_0)} \\ H &= \frac{r_0}{(1+r_0)} \\ N &= \frac{(r_0+r_{90})+(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

Akma gerilmesi (σ_0 , σ_{45} , σ_{90} , σ_b) kullanılarak yapılan çözümler için ise Eşitlik 5.'de ki denklemler kullanılmaktadır [11],[32]. Bu denklemler kullanılarak anizotropi deneyleri yapılmadan sadece akma gerilmeleri ile çözüm elde edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - 1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \\ G &= \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \\ H &= \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \\ N &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2\sigma_0}{\sigma_{45}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 Yeni denklem önerisi

Hill48 akma kriterinin katsayılarının belirlenmesinde, literatürde genellikle ya 4 numaralı ya da 5 numaralı denklemler kullanılmaktadır. Ancak bu denklemler incelendiğinde, yalnızca anizotropiye veya yalnızca gerilmeye bağlı oldukları görülmektedir. Bu durum, hesaplamalarda hatalı sonuçların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Önerilen hibrit denklem sistemi ise anizotropi ve gerilme değerlerini birleştirerek bu hataları azaltmakta ve daha doğru tahminler yapmaktadır. Bu kapsamda hem anizotropi oranlarını hem de gerilme değerlerini birleştirerek katsayıları optimize eden yeni bir denklem sistemi geliştirilmiştir. Önerilen bu fonksiyon, deneysel verilerle uyumlu hale getirmek için optimize edilmekte ve çözüm sonuçları elde edilmektedir. Yeni yaklaşımda F , G , H , N katsayılarının belirlenmesi için kullanılan denklemler aşağıdaki şekilde kullanılarak çözüm elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} F &= a_1 \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)} + a_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} + a_3 \\ G &= b_1 \frac{1}{(1+r_0)} + b_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_b} + b_3 \\ H &= c_1 \frac{r_0}{(1+r_0)} + c_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} + c_3 \\ N &= d_1 \frac{(r_0+r_{90})+(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} + d_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_{45}} + d_3 \end{aligned} \quad (6)$$

a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 , c_3 , d_1 , d_2 , d_3 terimleri optimize edilecek katsayıları ifade etmektedir. Bu katsayılar, anizotropi oranları ve gerilme değerlerinin F , G , H ve N katsayılarına etkisini kontrol etmektedir. Örneğin, F katsayısının hesaplandığı denklemde, $a_1(r_0/(r_{90}(1+r_0)))$ terimi anizotropi oranlarının, $a_2(\sigma_0/\sigma_{90})$ terimi gerilme değerlerinin ve a_3 terimi ise sabit bir etkinin etkisini temsil etmektedir. a_1 , a_2 ve a_3 katsayıları, bu etkilerin ağırlığını belirleyerek modelin deneysel verilere en iyi uyumunu sağlamaktadır. Diğer katsayılar (b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 , c_3 , d_1 , d_2 , d_3) da benzer şekilde, ilgili katsayıların hesaplanmasında anizotropi oranları ve gerilme değerlerinin etkisini kontrol ederek, akma davranışı üzerindeki karmaşık etkileşimin daha iyi yakalanmasını ve modelin doğruluğunun artırılmasını amaçlamaktadır. Bu amaçla, deneysel verilerle teorik değerler arasındaki farkların karesinin toplamını minimize eden bir hata fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu hata fonksiyonunu minimize eden bir optimizasyon algoritması kullanılarak, model katsayıları optimize edilmekte ve deneysel verilerle uyumlu hale getirilmektedir.

Literatürde genellikle anizotropi ve gerilme değerleri ayrı ayrı ele alınırken, bu çalışmada her iki parametre birleştirilerek daha bütüncül bir yaklaşım sunulmuştur. Ayrıca, Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu gibi iki farklı optimizasyon yönteminin karşılaştırılması, yöntemlerin etkinliğini değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürdeki yöntemlerden farklılık göstermekte ve daha hassas ve doğru sonuçlar elde etmeyi amaçlamaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

Hill48 akma kriterine dayalı olarak önerilen yeni denklemin katsayıları her iki malzeme için iki farklı optimizasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan GA ve PSO yöntemlerinin performansları analiz edilmiştir. Bu çalışmada, algoritmaların performansı yakınsama hızı, hata oranı ve model uyumu gibi kriterlere göre değerlendirilmiştir. Yakınsama hızı, optimizasyon sürecinde hata fonksiyonunun minimum değere ne kadar hızlı ulaştığını ifade etmektedir. Hata oranı, deneysel ve teorik değerler arasındaki farkların karesinin toplamı ile ölçülmüştür. Model uyumu ise optimize edilen katsayılarla elde edilen teorik sonuçların deneysel verilerle ne derece örtüştüğüne dayanarak belirlenmiştir. Yapılan analizler, PSO'nun yakınsama hızının GA'ya kıyasla daha yüksek olduğunu ve daha kararlı sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Bununla birlikte, her iki yöntemin de benzer hata oranları ile deneysel verilere yüksek uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Algoritmaların çalışma süreleri, kullanılan donanım ve yazılım ortamına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, Intel i7 işlemci ve 64 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılarak test edilmiş ve her iki algoritma da en fazla 1 dakika içinde sonuç üretmiştir. Bu süreler, algoritmaların yüksek işlem hızını ve optimizasyon süreçlerinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Tablo 2.'de yeni denklemle elde edilen Hill48 model katsayıları verilmiştir.

Tablo 2. Denklem katsayıları.

Table 2. Equation coefficients.

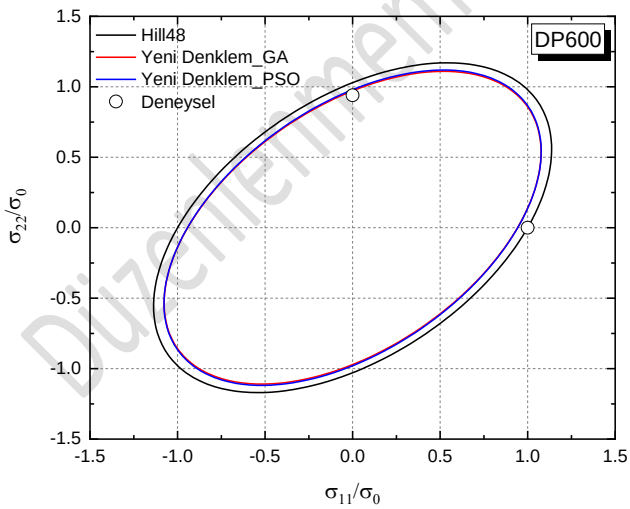
Malzeme	Çözüm Yöntemi	Yeni denklem katsayıları					
DP600	Genetik Algoritma	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
		0.5963	0.0465	0.2113	0.0009	0.2957	0.2461
		c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
		0.9978	0.0039	0.0625	0.0001	0.0019	1.6493
		F	G	H	N		
	Parçacık sürü optimizasyonu	0.53154	0.59805	0.52804	1.6514		
		Yeni denklem katsayıları					
		a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
		0.9182	0.0383	0.0622	0.0154	0.0515	0.5311
		c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
Malzeme AA2008	Genetik Algoritma	0.0178	0.0685	0.4415	0.0031	0.0938	1.5352
		F	G	H	N		
		0.5193	0.6006	0.5226	1.6376		
		Yeni denklem katsayıları					
		a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
	Parçacık sürü optimizasyonu	0.0201	0.7223	0.0447	0.2691	0.3188	0.0256
		c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
		0.4107	0.0552	0.2082	0.1562	1.1429	0.0034
		F	G	H	N		
		0.8613	0.5332	0.4613	1.3996		
		Yeni denklem katsayıları					
		a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
	Parçacık sürü optimizasyonu	0.0039	0.0001	0.8608	4.7e-05	0.4639	0.0005
		c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
		8.83e-6	0.4178	0.0002	1.163	1.5e-05	8.42e-6
		F	G	H	N		
		0.8644	0.53065	0.46238	1.3962		

Tablo 3'te deneysel veriler ile yeni denklem önerisi kullanılarak tahmin edilen akma mukavemeti ve anizotropi değerleri karşılaştırılmıştır. Her iki optimizasyon yöntemiyle de deneysel ve teorik değerler arasında oldukça iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, AA2008 alaşımındaki hata oranının DP600 çeliğinden düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Önerilen denklem tahminleri ile deneysel sonuçların karşılaştırması.
Table 3. Comparison of predicted and experimental results for the proposed equation.

Malzeme	Çözüm Yöntemi	Açı	Deneysel akma mukavemeti oranları	Tahmin edilen akma mukavemeti oranları	Deneysel anizotropi	Tahmin edilen anizotropi
DP600	Genetik Algoritma	0	1	0.94236	0.86	0.88293
		45	0.9456	0.94998	0.96	0.96194
		90	0.93	0.97148	1.02	0.99341
	Parçacık sürü optimizasyonu	0	1	0.94351	0.86	0.87007
		45	0.9456	0.95399	0.96	0.9621
		90	0.9397	0.97966	1.02	1.0064
AA2008	Genetik Algoritma	0	1	1.0027	0.878	0.86512
		45	0.9456	0.97662	0.498	0.50361
		90	0.9041	0.86951	0.534	0.53558
	Parçacık sürü optimizasyonu	0	1	1.0035	0.878	0.87133
		45	0.9456	0.97735	0.498	0.50085
		90	0.9041	0.86816	0.534	0.53491

Şekil 1.'de DP600 çeliği için deneysel veriler ve yeni denklem önerisi ile elde edilen akma yüzeyleri gösterilmektedir. Geleneksel Hill48 denkleminde kıyasla yeni denklem önerisinin deneysel verilerle daha iyi uyum sağladığı görülmektedir. Akma yüzeyinin şekli, malzemenin anizotropik özelliklerini yansıtmaktadır. Özellikle, akma yüzeyinin simetrik olmaması, malzemenin farklı yönlerde farklı mukavemetlere sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumludur [33],[34].

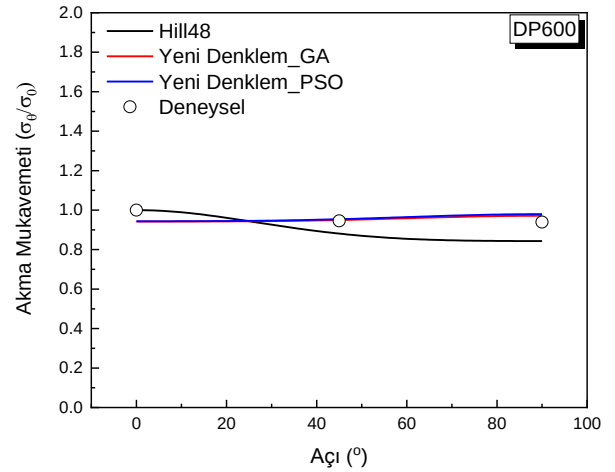


Şekil 1. DP600 çeliğinde akma yüzeylerinin karşılaştırması.

Figure 1. Comparison of yield surfaces in DP600 steel.

Şekil 2, DP600 çeliği için akma gerilmesi oranının açıya bağlı değişimini göstermektedir. Genetik Algoritma ve Parçacık

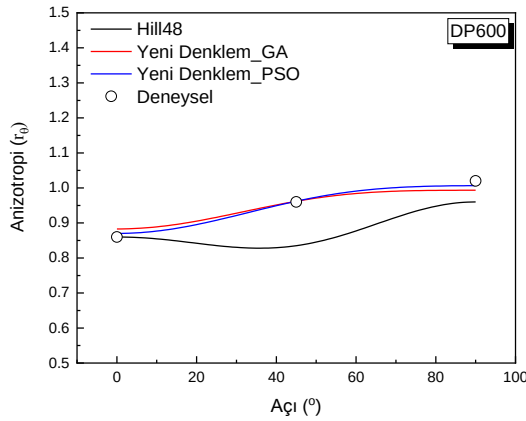
Sürü Optimizasyonu yöntemleri ile elde edilen değerler, deneysel verilerle karşılaştırıldığında oldukça uyumludur. Geleneksel Hill48 akma kriteri modelinden daha az hatayla sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2. DP600 çeliğinde akma gerilmesi oranının açıyla değişimi

Figure 2. Variation of yield stress ratio with angle in DP600 steel.

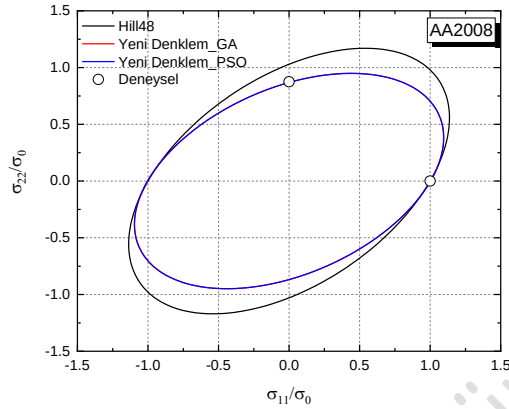
Şekil 3'te, DP600 çeliğinde anizotropi katsayısının açıyla değişimi gösterilmektedir. Yeni denklem önerisi ile elde edilen değerler, deneysel verilerle büyük ölçüde uyumludur ve geleneksel Hill48 denkleminde göre daha düşük hata payına sahiptir.



Şekil 3. DP600 çeliğinde anizotropinin açıyla değişimi.

Figure 3. Variation of anisotropy with angle in DP600 steel.

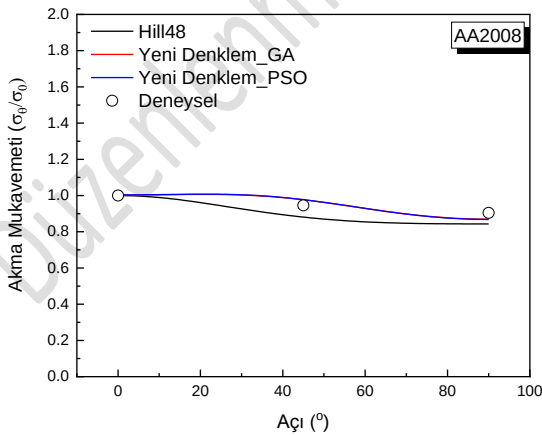
Şekil 4, AA2008 alaşımı için akma yüzeylerini karşılaştırmaktadır. Yeni denklem önerisi, deneysel verilerle daha iyi uyum göstermektedir.



Şekil 4. AA2008 alaşımında akma yüzeylerinin karşılaştırması.

Figure 4. Comparison of yield surfaces in AA2008 alloy.

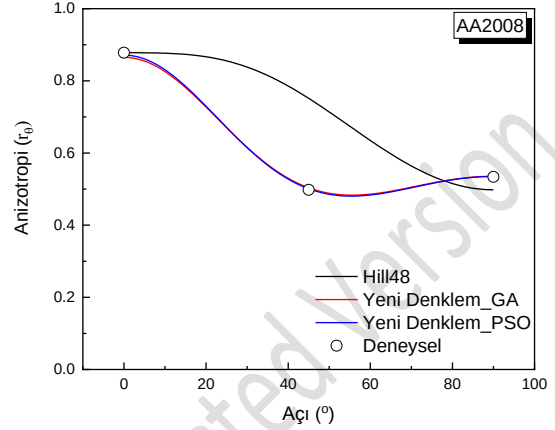
Şekil 5'te, AA2008 alaşımı için akma gerilmesinin açıya bağlı değişimi gösterilmektedir. Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemleri ile elde edilen değerler, deneysel verilerle oldukça uyumludur.



Şekil 5. AA2008 alaşımında akma gerilmesi oranının açıyla değişimi

Figure 5. Variation of yield stress ratio with angle in AA2008 alloy.

Şekil 6, AA2008 alaşımında anizotropi katsayısının açıyla değişimini göstermektedir. Yeni denklem önerisi ile elde edilen değerler, deneysel verilerle büyük ölçüde uyumludur ve geleneksel Hill48 denkleminde göre daha düşük hata payına sahiptir.



Şekil 6. AA2008 alaşımında anizotropinin açıyla değişimi.

Figure 6. Variation of anisotropy with angle in AA2008 alloy.

Sonuçlar, yeni denklem önerisinin geleneksel Hill48 denkleminde göre daha düşük hata payı ile deneysel verilere uyum sağladığını göstermektedir. Hem GA hem de PSO yöntemleri, model parametrelerinin belirlenmesinde etkili olmuş ve deneysel verilerle büyük ölçüde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu da yeni denklem önerisinin, mühendislik uygulamalarında Hill48 akma kriterinin daha hassas ve doğru bir şekilde uygulanmasını sağladığını göstermektedir.

Deneysel verilerle uyumlu hale getirilmiş model parametrelerinin belirlenmesi, Hill48 akma kriterinin doğruluğunu ve uygulama alanını genişletmektedir. Kullanılan modellerde, akma yüzeylerinin deneysel ve teorik hesaplamalarla karşılaştırılmasının ve doğrulama yapılmasının gerekli olduğu bilinmektedir [35]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda, deneysel verilerle uyumlu model parametrelerinin belirlenmesinin önemini göstermektedir. Tardif ve Kyriakides [36], alüminyum sac metallerinin anizotropik özelliklerinin ve malzeme sertleşmesinin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, benzer şekilde deneysel verilerle teorik modellerin karşılaştırılmasının gerekliliğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemleri, anizotropi ve gerilme değerleri üzerine odaklanarak daha doğru model parametreleri elde edilmesini sağlamaktadır. Bron ve Besson [37] yaptıkları çalışmalarında, yeni denklem önermişlerdir. Önerdikleri yeni denkleme, anizotropi ve gerilme değerlerini dikkate almışlardır. Hariharan ve arkadaşları [38], genetik algoritma kullanılarak anizotropik akma katsayılarının belirlenmesi üzerine odaklanmışlardır. Bu çalışmada da benzer şekilde genetik algoritma kullanılarak model parametreleri optimize edilmiş ve PSO yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Bandyopadhyay ve arkadaşları [3], anizotropik akma fonksiyon katsayılarının çok amaçlı optimizasyonunu ele almışlar ve optimizasyonun etkili olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada da iki farklı optimizasyon yöntemi detaylı olarak incelenerek sonuç üzerindeki etkisine değinilmiştir.

Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farklılıkların birkaç faktöre bağlı olduğu değerlendirilmektedir. İlk olarak, Hill48 akma kriteri malzemenin anizotropik davranışını basitleştirilmiş bir şekilde temsil etmekte olup, gerçek

malzeme davranışını tam olarak yansıtamamaktadır. Gerçek malzeme davranışı, modelde dikkate alınmayan mikroyapısal özellikler, dislokasyon hareketleri ve gerinim sertleşmesi gibi karmaşık faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca, deneysel verilerin elde edilmesi sırasında kullanılan yöntemler ve ölçüm cihazları belirli bir hata payı içermektedir. Bunun yanı sıra, optimizasyon algoritmalarının çözüm uzayında global minimumu garanti edememesi ve lokal minimumlara takılma potansiyeli de sonuçlar arasındaki farklılıkların bir diğer nedeni olabilmektedir. Bu faktörlerin etkisiyle deneysel ve teorik sonuçlar arasında gözlemlenen küçük farklılıklar genellikle kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır. Modelin doğruluğunu artırmak amacıyla daha gelişmiş malzeme modelleri, yüksek hassasiyetli ölçüm teknikleri ve farklı optimizasyon algoritmalarının kullanımı önerilmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Hill48 akma kriterindeki model parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir denklem önerisi sunulmuş ve deneysel verilerle uyumlu hale getirilmesi amacıyla iki farklı optimizasyon yöntemiyle sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önerilen yeni denklem, anizotropi ve gerilme değerlerini birleştirerek model katsayılarını optimize eden bir fonksiyon oluşturmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen model katsayılarının, geleneksel Hill48 denklemine göre daha düşük hata payı ile uyum sağladığı görülmüştür. Anizotropi ve akma mukavemetinin açığa bağlı değişimleri, deneysel verilerle uyumlu hale getirilmiş ve teorik hesaplamalarla karşılaştırıldığında daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, önerilen denklemin malzeme davranışını daha doğru bir şekilde yansıttığını göstermektedir.

Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemleri, model katsayılarının belirlenmesinde etkili olmuş ve her iki yöntem de benzer hata payları ile başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemi, daha hızlı ve daha kararlı çözümler sunmuştur. Bu bulgu, Parçacık Sürü Optimizasyonunun, Hill48 akma kriterindeki model parametrelerinin belirlenmesi için daha uygun bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, Hill48 akma kriterinin daha hassas ve doğru bir şekilde uygulanmasını sağlamayı hedeflemekte olup, mühendislik uygulamalarında önemli katkılar sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada önerilen yeni denklem ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak, model parametrelerinin belirlenmesinde daha düşük hata payı elde edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, anizotropik malzemelerin mekanik davranışlarının daha doğru bir şekilde modellenmesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Özellikle, önerilen model ve optimizasyon algoritmaları, otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılan ince levha malzemelerin deformasyon analizlerinde uygulanabilir. Örneğin, otomotiv sektöründe taşıt gövdesinde kullanılan anizotropik sac malzemelerin şekillendirme süreçlerinin optimizasyonunda, önerilen modelin etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir. Havacılık sektöründe, hafif ancak dayanıklı malzeme tasarımlarının doğrulanmasında önerilen yöntem faydalı olacağı düşünülmektedir.

5 Conclusions

In this study, a new equation proposal for determining the model parameters in the Hill48 yield criterion was presented, and the results were compared using two different optimization methods to align with experimental data. The proposed new equation combines anisotropy and stress values to form a function that optimizes the model coefficients. The analyses showed that the model coefficients obtained using optimization methods provided a lower margin of error compared to the traditional Hill48 equation. The angle-dependent variations of anisotropy and yield strength were aligned with experimental data, and more precise results were obtained when compared with theoretical calculations. This indicates that the proposed equation reflects the material behavior more accurately.

The Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization methods were effective in determining the model coefficients, and both methods yielded successful results with similar error margins. However, the Particle Swarm Optimization method provided faster and more stable solutions. This finding suggests that Particle Swarm Optimization might be a more suitable method for determining the model parameters in the Hill48 yield criterion.

This study aims to ensure a more precise and accurate application of the Hill48 yield criterion, offering significant contributions to engineering applications. Unlike studies in the literature, this study obtained a lower margin of error in determining model parameters by using the proposed new equation and optimization methods.

The results obtained in this study provide a significant contribution to the more accurate modelling of the mechanical behaviour of anisotropic materials. Specifically, the proposed model and optimisation algorithms can be applied in the deformation analysis of thin sheet materials used in the automotive and aerospace industries. For instance, in the automotive industry, the proposed model is expected to be effectively used in the optimisation of forming processes for anisotropic sheet materials used in vehicle bodies. In the aerospace industry, the proposed method is considered to be beneficial for validating the designs of lightweight yet durable materials.

6 Yazar katkı beyanı

Bu çalışmanın tüm aşamaları yazar tarafından gerçekleştirilmiştir. Fikrin oluşturulması, tasarımın yapılması, kaynak ve malzemelerin temini, veri toplama, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, yazım ve eleştirel inceleme gibi makalenin hazırlanmasında gerekli olan tüm kriterler yazar tarafından yerine getirilmiştir. Bu çalışmaya yazar dışında herhangi bir kişi veya kurum katkı sunmamıştır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] Hill R, "A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193 (1033), 281-297, 1948.
- [2] Yoshida F, Hamasaki H, Uemori T, "A user-friendly 3D yield function to describe anisotropy of steel sheets". *International Journal of Plasticity*, 45 119-139, 2013.
- [3] Bandyopadhyay K, Hariharan K, Lee M-G, Zhang Q, "Robust multi objective optimization of anisotropic yield function coefficients". *Materials & Design*, 156 184-197, 2018.
- [4] Mu Z, Zhao J, Meng Q, Sun H, Yu G, "Anisotropic hardening and evolution of r-values for sheet metal based on evolving non-associated Hill48 model". *Thin-Walled Structures*, 171 108791, 2022.
- [5] Panich S, Chongbunwatana K, "Influence of anisotropic yield criteria on simulation accuracy of the hole-expansion test". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 967 (1), 012037, 2020.
- [6] Ghoo B, Ichijo N, Selig M, Manopulo N, Carleer B, Suzuki W, Takizawa H, "Performance Evaluation of Planar Anisotropy Yield Criteria for Aluminum Sheet Forming Analysis". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1157 (1), 012063, 2021.
- [7] Esener E, Ünlü A, "Analytical evaluation of plasticity models for anisotropic materials with experimental validation". *Research on Engineering Structures and Materials*, 8 (1), 2022.
- [8] Unlu A, Aksen T, Esener E, Firat M, "Predictive modeling based on angular variations of yield stress ratios and lankford parameters for DP800 steel", *Proceedings of the 10th International Automotive Technologies Congress, OTEKON*, 2020.
- [9] Mu Z, Zhao J, Meng Q, Huang X, Yu G, "Applicability of Hill48 Yield Model and Effect of Anisotropic Parameter Determination Methods on Anisotropic Prediction". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31 (3), 2023-2042, 2022.
- [10] Mu Z, Zhao J, Meng Q, Zhang Y, Yu G, "Limitation analysis of the Hill48 yield model and establishment of its modified model for planar plastic anisotropy". *Journal of Materials Processing Technology*, 299 117380, 2022.
- [11] Yu Yan, Jie Bao, Xu Xiao, Wang H, "In-depth analysis of convexity of Hill'48 anisotropic yield criterion". *Journal of Plasticity Engineering*, 28 (12), 184-191, 2021.
- [12] Sener B, "Description of Anomalous Behavior of Aluminum Alloys with Hill48 Yield Criterion by Using Different Experimental Inputs and Weight Coefficients". *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7 (3), 1606-1619, 2021.
- [13] Du K, Huang S, Wang H, Yu F, Pan L, Huang H, Zheng W, Yuan X, "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*, 31 (2), 1077-1095, 2022.
- [14] Kilic S, Ozturk F, Toros S, "Analysis of Yield Criteria and Flow Curves on FLC for TWIP900 Steel". *Experimental Techniques*, 44 (5), 597-612, 2020.
- [15] Shahid S, Andreasson E, Petersson V, Gukhool W, Kang Y, Kao-Walter S, "Simplified Characterization of Anisotropic Yield Criteria for an Injection-Molded Polymer Material". *Polymers*, 15 (23), 4520, 2023.
- [16] Chen Z, Lou Y, "Simulations of plastic deformation by anisotropic hardening yield functions for QP1180". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1238 (1), 012088, 2022.
- [17] Yan Y, Wang H, Li Q, "The inverse parameter identification of Hill 48 yield criterion and its verification in press bending and roll forming process simulations". *Journal of Manufacturing Processes*, 20 46-53, 2015.
- [18] Abspoel M, Scholting M E, Lansbergen M, An Y, Vegter H, "A new method for predicting advanced yield criteria input parameters from mechanical properties". *Journal of Materials Processing Technology*, 248 161-177, 2017.
- [19] Akşen T A, Özsoy M, Firat M, "Earing prediction performance of homogeneous polynomial-based yield function coupled with the combined hardening model for anisotropic metallic materials". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (1), 1-9, 2024.
- [20] Chen G, Zhao C, Shi H, Liu S, Chen X, Chen D, "Nonlinear kinematic hardening constitutive model based on Hill48 yield criterion and its application in reverse deep drawing". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44 (10), 471, 2022.
- [21] Ryser M, Steffen J, Berisha B, Bambach M, "Integrating multiple samples into full-field optimization of yield criteria". *International Journal of Mechanical Sciences*, 265 108880, 2024.
- [22] Kılıç S, "Hill48 Akma Kriteri Kullanarak Alüminyum Alaşımlarının Anizotropik Davranışlarının Modellenmesi ve Optimizasyonu". *Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi* 1(1), 2024.
- [23] Sag T, Ihsan A, "Particle Swarm Optimization with a new intensification strategy based on K-Means". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29 (3), 264-273, 2023.
- [24] Bilbay F B, Reis M, Gülçimen Çakan B, Ensarioglu C, Çakır M C, "Improving the load distribution in the automobile front collision zone by adding 'S' shaped curved collision rail". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29 (4), 322-330, 2023.
- [25] De Jong K, "Learning with genetic algorithms: An overview". *Machine learning*, 3 121-138, 1988.
- [26] Kennedy J, Eberhart R, "Particle swarm optimization", *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks, IEEE*, 1995.
- [27] Goldberg D E, Holland J H, "Genetic Algorithms and Machine Learning". *Machine Learning*, 3 (2), 95-99, 1988.
- [28] Firat M, Akşen T A, Şener B, Esener E, "A Numerical Prediction for Hole-Splitting Damage of DP Steels Based on Plastic Work Criterion Using a Polynomial Stress Potential". *Experimental Techniques*, 48 (3), 501-522, 2024.
- [29] Lege D J, Barlat F, Brem J C, "Characterization and modeling of the mechanical behavior and formability of a 2008-T4 sheet sample". *International Journal of Mechanical Sciences*, 31 (7), 549-563, 1989.
- [30] Sampson J R, "Adaptation in natural and artificial systems (John H. Holland)", *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1976.
- [31] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization". *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 8 (3), 256-279, 2004.

- [32] Wang H, Wan M, Yan Y, Wu X, "Effect of the solving method of parameters on the description ability of the yield criterion about the anisotropic behavior". *Journal of Mechanical Engineering*, 49 (24), 45-53, 2013.
- [33] Banabic D, Aretz H, Comsa D, Paraianu L, "An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets". *International Journal of Plasticity*, 21 (3), 493-512, 2005.
- [34] Khalfallah A, Alves J L, Oliveira M C, Menezes L F, "Influence of the characteristics of the experimental data set used to identify anisotropy parameters". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53 15-44, 2015.
- [35] WANG H-b, Min W, WU X-d, Yu Y, "Subsequent yield loci of 57540 aluminum alloy sheet". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (5), 1076-1080, 2009.
- [36] Tardif N, Kyriakides S, "Determination of anisotropy and material hardening for aluminum sheet metal". *International Journal of Solids and Structures*, 49 (25), 3496-3506, 2012.
- [37] Bron F, Besson J, "A yield function for anisotropic materials application to aluminum alloys". *International Journal of Plasticity*, 20 (4-5), 937-963, 2004.
- [38] Hariharan K, Nguyen N-T, Chakraborti N, Barlat F, Lee M-G, "Determination of anisotropic yield coefficients by a data-driven multiobjective evolutionary and genetic algorithm". *Materials and Manufacturing Processes*, 30 (4), 403-413, 2015.