

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNELASTİK DEFORMASYONLAR İÇİN
ORTOTROPİK AKMA YÜZEYİ MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif Sıla SELEK KILIÇARSLAN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet FIRAT

Aralık 2020

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Elif Sıla SELEK KILIÇARSLAN

17.02.2020



TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araŐtırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aŐamalarında yardımlarını esirgemeyen, teŐvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danıŐman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet FIRAT'a teŐekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım. Tez çalıŐmam sürecinde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, ayrıca çalışmanın her aŐamasında desteklerini esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Bora ŞENER'e teŐekkürlerimi sunarım. Ve çalıŐmam sırasında küçük veya büyük yardımlarını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve sevgili eŐime, manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eđitim hayatıma katkıda bulunan tüm eğitimcilere ve bilim insanlarına teŐekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
AKMA KRİTERLERİ.....	4
2.1. İzotropik Akma Kriterleri.....	7
2.1.1. Tresca akma kriteri	7
2.1.2. von Mises akma kriteri.....	7
2.2. Anizotropik Akma Kriterleri	8
2.2.1. Hill48	8
2.2.2. Polinom tipi akma kriterleri	10
2.2.2.1. Gotoh kriteri	10
2.2.2.2. Cazacu-Barlat kriteri (CB2001)	11
BÖLÜM 3.	
DÖRDÜNCÜ DERECEDEDEN POLİNOM TİPİ AKMA KRİTERİ	13
3.1. Konvekslik Koşulu.....	13
3.2. Katsayı Tanımlama Prosedürü	14

BÖLÜM 4.	
UYGULAMA ÇALIŞMASI.....	20
4.1. Deneysel Çalışmalar	20
4.1.1. Çekme testi	20
4.1.2. Dikdörtgen kap derin çekimi	22
4.2. Sonlu Eleman Modeli	23
4.2.1. Optimum mesh yapısının belirlenmesi	26
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR	30
5.1. Sonlu Eleman Analiz Sonuçları	32
5.2.1. Kalınlık dağılımlarının tahmini ve deneyle karşılaştırma.....	32
5.2.2. Dikdörtgen kap taban profilinin tahmini ve deneyle karşılaştırma	34
BÖLÜM 6.	
DEĞERLENDİRME	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	42

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AISI	:	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
$a_1, a_2, a_3, a_4,$ a_5, a_6, a_7, a_8, a_9	:	Poly4 fonksiyonunun katsayıları
DÇO	:	Derin çekme oranı
$d\varepsilon_{ij}^P$:	Plastik gerinim artım tensörünü
$d\lambda$:	Plastik gerinim artım vektörünün şiddetini
f	:	Gerilme fonksiyonu
F, G, H, L, M, N	:	Malzemenin Hill48 akma kriterinin katsayıları
H	:	Hessian matrisi
K	:	Malzemenin mukavemet katsayısı
n	:	Pekleşme üstelini
NIP	:	İntegrasyon nokta sayısı
P_4	:	Poly4 fonksiyonu
r	:	Lankford katsayısı (plastik anizotropi katsayısı)
r_0, r_{45} ve r_{90}	:	Üç yöndeki Lankford katsayıları
r_n	:	Ortalama Lankford katsayısı (plastik anizotropi katsayısı)
r_θ	:	Haddeleme doğrultusu ile θ açısı yapan numunedeki anizotropi katsayısı
SIGY	:	Pekleşme anındaki akma gerilmesi
ε_0	:	Akma başladığı andaki plastik gerinim değeri
$\dot{\varepsilon}$:	Gerinim hızı
θ	:	Hadde yönüne göre açı
σ_0	:	Hadde yönüne paralel yöndeki akma gerilmesi

σ_{ij}	: Gerilme tensörü
$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$: Maksimum ve minimum asal gerilmeler
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Asal normal gerilmeler
$\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$: Kayma gerilmeleri
$\sigma_{eş}$: Eşdeğer gerilme
$\bar{\sigma}_X, \bar{\sigma}_Y, \bar{\sigma}_{XY}$: Gerilme oranları
$\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_{45}, \bar{\sigma}_{90}$: Hadde yönüne paralel, diagonal, dik gerilme oranları
$\bar{\sigma}_b$: Eşit iki eksenli akma gerilmesi oranını
$\bar{\sigma}_\theta$: Hadde yönüne göre θ doğrultusundaki akma gerilmesi
∂F	: Akma Fonksiyonu
ψ	: Hata fonksiyonu
$w_1^{(i)}, w_2^{(i)}$: Ağırlık katsayıları

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir akma yüzeyinin şematik gösterimi	4
Şekil 2.2. Tresca ve von Mises akma yüzeyleri	5
Şekil 2.3. Normalite kuralı tanımı	6
Şekil 2.4. Konveks olmayan akma yüzeyi	11
Şekil 3.1. Katsayı tanımlama prosedürü akış şeması	18
Şekil 4.1. Üç yöndeki gerçek gerilme-plastik gerinim eğrileri.....	21
Şekil 4.2. Deney düzeneği ve şekillendirilmiş parça	23
Şekil 4.3. Parçaların 1/4'ünün modellenmesi	24
Şekil 4.4. Proses parametrelerinin gösterimi.....	26
Şekil 4.5. Sacın mesh yapısı	27
Şekil 4.6. Dört durum için penetrasyon kontrolü	28
Şekil 4.7. Maksimum ve minimum kalınlık kıyaslaması	28
Şekil 5.1. Gerilme oranının yöne göre değişimi	31
Şekil 5.2. r'nın yönü göre değişimi	31
Şekil 5.3. Her iki kriter için akma yüzeyleri.....	32
Şekil 5.4. Hadde yönüne paralel yönde kalınlık dağılımı.....	33
Şekil 5.5. Hadde yönüne diagonal yönde kalınlık dağılımı.....	33
Şekil 5.6. Hadde yönüne dik yönde kalınlık dağılımı.....	34
Şekil 5.7. Tahmini ve deneysel kap taban profillerinin karşılaştırılması	35
Şekil 5.8. Taban ölçüleri için hata oranlarının kıyaslanması.....	36

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. AISI-304 malzemesine ait deneysel $\bar{\sigma}$ verileri.....	21
Tablo 4.2. AISI-304 malzemesine ait deneysel r verileri.....	22
Tablo 4.3. Akma eğrisi parametreleri.....	24
Tablo 4.4. Bölgelere düşen eleman sayıları.....	27
Tablo 4.5. Süre kıyaslaması.....	28

ÖZET

Anahtar kelimeler: Polinom tipi akma fonksiyonu, AISI-304 paslanmaz çelik, sonlu eleman analizi, dikdörtgen kap derin çekme

Bu çalışmada, polinom türü akma fonksiyonlarından Soare tarafından geliştirilen dördüncü dereceden polinom türü bir akma fonksiyonu (Poly4) seçilmiş ve bu fonksiyonun AISI (304) ostenitik paslanmaz çelik sacın anizotropik davranışını modelleyebilme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Çalışmada, ilk olarak malzemenin akma gerilmesi oranı ve Lankford (anizotropi) katsayılarının düzlemsel değişimleri tahmin edilmiş ve ardından dikdörtgen bir kabın derin çekme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Kriterin performansının değerlendirilmesinde referans olarak geleneksel kuadratik Hill48 kriteri kullanılmıştır. Hill48 ve Poly4 akma kriterleriyle gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinden parçanın üç yöndeki kalınlık dağılımları (hadde yönüne paralel, diyagonal ve dik) ve taban geometrisi tahmin edilmiş, tahmin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalardan Poly4 akma kriterinin malzeme anizotropisini doğru bir şekilde tanımlayabildiği görülmüştür.

MODELLING OF ORTHOTROPIC YIELD SURFACE FOR INELASTIC DEFORMATION

SUMMARY

Keywords: Polynomial type yield function, AISI-304 steel sheet, finite element simulation, rectangular cup drawing

In this study, the fourth-order polynomial yield criterion (Poly4) developed by Soare was selected from the polynomial yield functions and its modelling capability of anisotropic behavior of AISI (304) stainless steel sheet was examined. Firstly, planar variations of the yield stress ratios and Lankford (anisotropy) coefficients of the material were predicted, and then deep drawing simulations of a rectangular cup were performed by using this criterion. Conventional quadratic Hill48 yield criterion was used as a reference yield criterion in the evaluation of the performance of Poly4 criterion. Thickness distributions of the part in three directions (rolling, diagonal and transverse) and the flange geometry of the cup were predicted from the simulations performed with Hill48 and Poly4 yield criteria and the predicted results were compared with experimental results. It was shown from the comparisons that Poly4 yield criterion can accurately describe the anisotropic behavior of the material.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde oldukça sık kullanılan malzeme olan sac metaller birçok sektörde kullanılmaktadır. Ağırlıklarının düşük ve dayanımlarının yüksek olması sebebiyle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir. Üretim hızının en önemli kriter olduğu seri üretimlerde, malzeme seçmek ve seçilen malzemeye uygun üretim proseslerini tanımlamak oldukça önemlidir. Günümüz imalatında hatasız bir parça elde edilinceye kadar çok sayıda deneme yapılmaktadır. Bu durum imalatın gecikmesine, takımların aşınmasına, yüksek maliyete vb. problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle imalat öncesinde doğru tahminlerin yapılması gereklidir. Bu noktada sonlu elemanlar metodu yaygın kullanılan bir yöntemdir [1].

Sonlu elemanlar analizi ile güvenilir sonuçlar elde edilebilmesinde tahmin hassasiyeti büyük bir önem teşkil etmektedir. Tahmin hassasiyeti ise analiz sonucunda elde edilen sonuçların deneylerden elde edilen sonuçlara benzerliğini ifade etmektedir. Bu sonuçları kıyaslayabilmek için malzeme parametrelerinin doğru bir şekilde tanımlanması gereklidir. Aksi durumlarda, sonlu elemanlar analizlerinden yapılan tahminlerin güvenilirliği azalacak ve bu durum özellikle endüstride karmaşık geometrili parçaların ya da ince sac malzemelerin şekillendirilmesinde karşılaşılan yırtılma, kırılma, kulaklanma ve şekilsel bozuklukların doğru tahmin edilememesine ve maliyetlerin yükselmesine neden olacaktır. Nümerik parametrelerden eleman boyutu, eleman formulasyonu, integrasyon nokta sayısı gibi birçok parametrenin yanında plastisite modeli sonuçları doğrudan etkileyen önemli bir parametredir [2, 3, 4]. Plastik şekil değişimini doğru tanımlayabilmek için malzemenin elasto-plastik davranışını doğru tanımlayabilen malzeme modellerine ihtiyaç vardır [5].

Plastisite modeli içerisinde anizotropinin sac malzemeler için önemi büyüktür. Anizotropi mekanik özelliklerin yöne göre değişmesi anlamına gelmekte olup, derin çekme prosesinde incelmeye karşı direncin bir göstergesidir [3]. Bu parametrenin doğru tanımlanmasının sac şekillendirme simülasyonlarının başarısında önemli bir payı vardır. Sac malzeme anizotropisi düzlem gerilmeli ortotropik akma kriterleri ile tanımlanmaktadır. Literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından çok sayıda anizotropik akma kriteri önerilmiştir. İlki Hill tarafından sunulan Hill48 akma kriteridir [6]. Katsayıları açık formüllerle ifade edilebilmektedir. Basit ve sade olması sebebiyle akademi ve endüstride kullanılsa da akma gerilmesi oranlarını ve anizotropi değerlerini tek adımda aynı doğrulukta tahmin edememektedir. Kriterin bu eksikliğini farkederek Hill, anizotropinin tanımlanmasında polinomların kullanımını önermiştir [7].

Polinom tipi akma fonksiyonunu ilk uygulayan Gotoh, dördüncü dereceden dokuz katsayılı bir polinom önermiştir [8]. Katsayılar için açık formüllü bir denklem sistemi geliştirmiştir [9]. Ancak kriter akma yüzeyinin pozitifliği ve konvekslik şartını dikkate almaması sebebiyle kriterin kullanımı yaygınlaşmamıştır. [10]. Ardından Hill1979 [11] akma fonksiyonunu referans alarak Tong, Gotoh'un akma kriterini pozitiflik ve konvekslik gerekliliğini dikkate alarak yenilemiştir [12]. Cazacu ve Barlat altıncı dereceden bir polinom türü akma fonksiyonu olan CB2001 akma kriterini önermişlerdir, ancak bu akma fonksiyonunun katsayı tanımlama prosedürü karmaşık nonlineer fonksiyonlardan meydana gelmektedir [13]. Hu, düzlem gerilme ve genel üç boyutlu gerilme halleri için iki polinom tipi akma kriteri önermiştir [14, 15].

Literatür araştırmasında görüldüğü üzere özellikle 2000 yılından sonra geliştirilen akma kriterleri ile malzeme anizotropisi başarılı bir şekilde tanımlanmaktadır. Ancak bu modellerin katsayı tanımlama prosedürleri oldukça karmaşık olabilmektedir. Ayrıca bazı modellerin türevlerinin alınmasındaki zorluklar nedeniyle, sonlu eleman programlarında uygulanabilmesinde kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Bu noktada polinom türü akma fonksiyonları genel bir yapıya sahip olmaları ve kolay

türevlenebilmeleri nedeniyle alternatif olarak ortaya çıkmışlardır. polinom türü akma fonksiyonları ile ilgilenen araştırmacıların çoğu polinom türü akma fonksiyonlarının tanımlanmasında akma yüzeyinin konvekslik ve pozitiflik şartlarını dikkate almamışlardır. Literatürdeki bu eksiklik Soare tarafından farkedilmiştir ve Soare bu iki şartı dikkate alan polinom türü akma fonksiyonları önermiştir [16].

Bu çalışmada, Soare tarafından önerilen dördüncü dereceden polinom türü akma kriterinin (Poly4) tahmin kabiliyetinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada malzeme olarak AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik sac seçilmiş ve bu malzemeye ait Poly4 kriteri katsayıları belirlenmiştir. Burada Soare'nin katsayı tanımlama prosedüründen farklı olarak nümerik optimizasyon yöntemlerinden iç nokta (interior point) algoritması kullanılmış ve amaç fonksiyonunun minimizasyonunda farklı ağırlık katsayıları ile ön denemeler gerçekleştirilerek en uygun katsayılar belirlenmiştir. Katsayıların belirlenmesinin ardından kriter sırasıyla malzemenin yöne bağlı özelliklerinin (akma gerilmesi oranları ve Lankford katsayıları) düzlemsel değişimlerinin tahmininde ve bir dikdörtgen kabın derin çekme simülasyonunda uygulanmıştır. Kriterden tahmin edilen sonuçlar geleneksel quadratik Hill48 kriteri ve deneysel sonuçlar (çekme testi ve derin çekme deneyleri) ile karşılaştırılmış ve kriterin tahmin kabiliyeti değerlendirilmiştir.

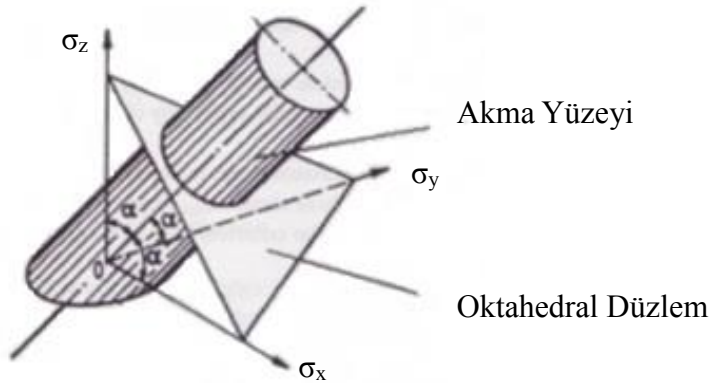
BÖLÜM 2. AKMA KRİTERLERİ

Plastisite teorisini tanımlayan üç yapı taşı akma kriterleri, akma yüzeyi ve akma kuralıdır. Malzemenin plastik şekil değiştirme sınırını tanımlayan akma yüzeyi, plastik bölgede gerilme ve gerinimler arasındaki ilişkiyi tanımlayan akma kuralıdır [17].

Bu kavramlardan akma yüzeyi; çok eksenli gerilme halinde akmanın hangi koşullarda gerçekleşeceğini belirtir. f gerilme bileşenlerinin bir fonksiyonu, σ_{ij} gerilme tensörü ve σ_0 ise malzemenin akma gerilmesi olarak ifade edildiğinde;

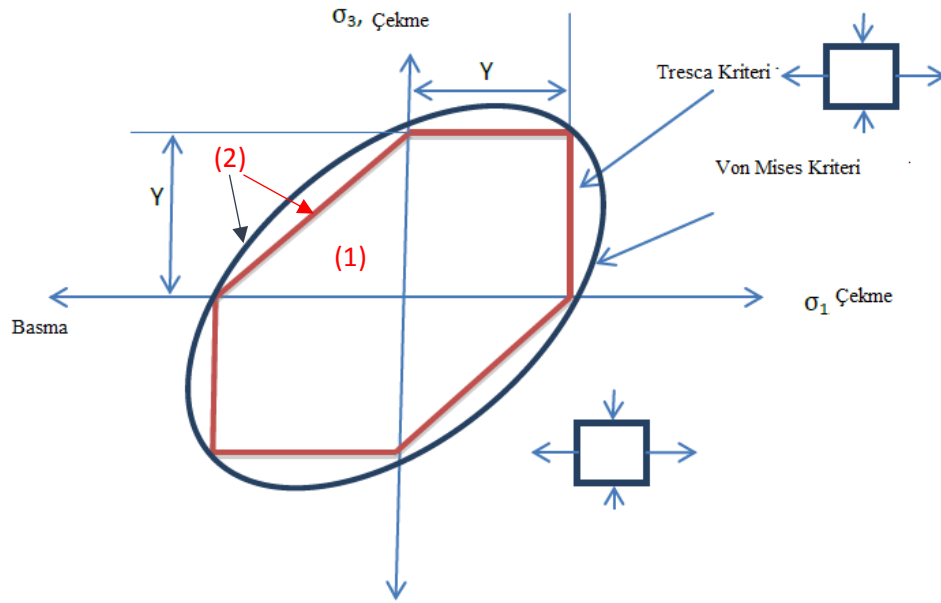
$$F(\sigma_{ij}) = f(\sigma_{ij}) - \sigma_0 = 0 \quad (2.1)$$

Eşitliği 3 boyutlu uzayda bir yüzey oluşturmaktadır [18, 19]. Bu yüzey, malzemenin elastik ve plastik şekil değişimlerini birbirinden ayırmakta olup, gerilme bileşenleri yüzeyin içinde kaldığında malzeme elastik şekil değiştirirken, yüzey üzerindeki her durumda ise malzeme plastik şekil değiştirmektedir. Örnek bir akma yüzeyi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Bir akma yüzeyinin şematik gösterimi [19]

Düzlem gerilme durumunda ($\sigma_z=0$) σ_x ve σ_y asal gerilme düzleminde akma yüzeyi bir eğri halini alır [19]. Herhangi bir gerilme hali için, akma yüzeyi kapalı ve dışbükey olmalıdır [19, 20]. Şekil 2.2.'de düzlem gerilme halinde izotropik malzemeler için yaygın kullanılan von Mises ve Tresca akma yüzeyleri gösterilmiştir [20] ve bu şekilde gösterilen akma yüzeyinde, (1) ile gösterilen ve yüzeyin içinde kalan alan elastik şekil değişiminin olduğu bölgeyi, (2) ile gösterilen yüzeyler ise plastik şekil değişiminin başladığı yerleri göstermektedir [19]. Burada Y harfi hadde yönüne paralel ve dik yönlerdeki akma gerilmelerini ifade etmektedir.

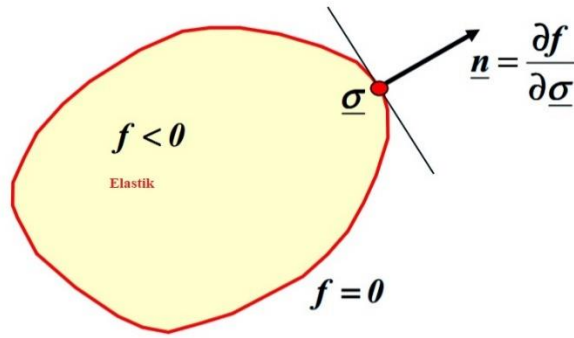


Şekil 2.2. Tresca ve von Mises akma yüzeyleri [21]

Plastisitenin önemli kurallarından biri de akma kuralıdır. Akma kuralı, plastik şekil değişiminde, gerilmeler ve plastik gerinim artımları arasındaki ilişkiyi tanımlar. Elasto-plastik yüklemde toplam gerinim, elastik ve plastik olmak üzere iki grupta incelenmekte olup, elastik gerinim Hooke Kanunu ile belirlenirken, plastik gerinim ise akma kuralı ile tanımlanmaktadır. Drucker, akma kuralını termodinamik koşullarını temel alarak biçimlendirmiştir. Drucker tarafından tanımlanan akma kuralına göre, plastik gerinim artımları akma yüzeyine dik olmak zorundadır [18]. Bu kural literatürde normalite kuralı olarak da geçmektedir [22]. Akma kuralı Denklem 2.2'de verilmektedir.

$$d\varepsilon_{ij}^P = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de $d\varepsilon_{ij}^P$ plastik gerinim artım tensörünü, $d\lambda$ ise plastik çarpanı ifade etmektedir. Bu ifadede, birinci terim plastik gerinim artım vektörünün şiddetini ($d\lambda$), ikinci terim ise $\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}\right)$ plastik gerinim artımının yönünü ifade etmektedir (Şekil 2.3). Denklem 2.2.’nin her koşulda sağlanabilmesi için akma yüzeyinin konveks olması gereklidir.



Şekil 2.3. Normalite kuralı tanımı [22]

Tek eksenli gerilme durumunda, akma gerilmesi malzemenin gerilme-gerinim eğrisinden kolayca elde edilebilir. Ancak çok eksenli bileşik zorlanmalarda ise hangi değerlerde plastik akışın olacağı akma kriterleri ile belirlenmektedir. Plastik deformasyon sırasında malzemenin farklı yönlerdeki asal gerilme bileşenlerinin ilişkisi akma kriteri ile matematiksel olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle akma kriteri, her bir gerilme bileşeninin şekil değişimini nasıl etkilediğini açıklar. Böylece plastik deformasyona neden olan gerilmeyi skaler bir değerle ifade etmek için, gerilme bileşenleri değerlendirilir. Akma kriterlerinde eşdeğer gerilme için farklı hesaplamalar tanımlanmıştır. Eşdeğer gerilme, malzemenin akma gerilmesi değerinden büyük ya da eşit olduğunda akma başlayacaktır. Geliştirilen her kriterde eşdeğer gerilme tanımı farklı olması sebebiyle şekil değişimi tahminleri farklılık göstermektedir. Bu nedenle doğru bir analiz gerçekleştirebilmek için malzemeye uygun bir akma kriterinin seçilmesi gereklidir [20, 23, 24, 25, 26]

2.1. İzotropik Akma Kriterleri

İzotropik akma kriterleri, malzeme davranışının her yönde aynı olduğunu kabul etmektedirler. İzotropik akma kriterlerinden yaygın olarak kullanılan Tresca ve von Mises kriterleri aşağıda anlatılmaktadır.

2.1.1. Tresca akma kriteri

Tresca kriterine göre, maksimum kayma gerilmesi değeri malzemenin akma gerilmesine eşit olduğu anda plastik şekil değişimi başlamaktadır. Denklem 2.3, Tresca'ya göre akmayı tanımlamaktadır [27].

$$|\sigma_{\max} - \sigma_{\min}| = \sigma_0 \quad (2.3)$$

Burada, σ_{\max} maksimum asal gerilmeyi, σ_{\min} minimum asal gerilmeyi, σ_0 ise malzemenin akma gerilmesini ifade eder.

2.1.2. von Mises akma kriteri

Bu kritere göre, plastik akışın başlaması için malzemede depo edilen şekil değiştirme enerjisinin kritik bir değere ulaşması gerekmektedir. Kriter Denklem 2.5'te ifade edilmektedir. Eşitlikten görüleceği üzere von Mises, Tresca'dan farklı olarak sadece maksimum ve minimum asal gerilmeleri değil, tüm gerilme bileşenlerini hesaba katmaktadır. $\sigma_{eş}$ eşdeğer gerilmeyi, σ_0 akma gerilmesini, σ_X , σ_Y ve σ_Z asal gerilmeleri, σ_{XY} , σ_{YZ} ve σ_{XZ} ise kayma gerilmelerini ifade etmektedir.

$$\sigma_{eş} \geq \sigma_0 \quad (2.4)$$

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_X - \sigma_Y)^2 + (\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_X)^2] + 3(\sigma_{XY}^2 + \sigma_{XZ}^2 + \sigma_{YZ}^2)} \quad (2.5)$$

2.2. Anizotropik Akma Kriterleri

Haddeleme prosesi sonrasında meydana gelen tercihli yönlenme sac malzeme özelliklerinde anizotropinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır [28]. Bu nedenle izotropik akma kriterleri sac malzemelerin plastik davranışını tanımlamada yetersiz kalmıştır ve literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından anizotropik akma kriterleri geliştirilmiştir.

2.2.1. Hill48 akma kriteri

Literatürde ilk anizotropik akma kriteri, 1948 yılında Hill tarafından ortaya atılmıştır [6]. Hill'in anizotropik akma kriteri von Mises kriterinin genelleştirilmesine dayanmakta olup, kriterin genel formülü aşağıda verilmiştir.

$$F(\sigma_Y - \sigma_Z)^2 + G(\sigma_Z - \sigma_X)^2 + H(\sigma_X - \sigma_Y)^2 + 2L\sigma_{YZ}^2 + 2M\sigma_{ZX}^2 + 2N\sigma_{XY}^2 = \sigma_0^2 \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte F, G, H, L, M ve N malzeme anizotropisini tanımlayan sabitlerdir. Düzlem gerilme hali için kriter aşağıdaki gibi sadeleştirilir ($\sigma_Z = 0$).

$$F\sigma_Y^2 + G\sigma_X^2 + H(\sigma_X - \sigma_Y)^2 + 2N\sigma_{XY}^2 = \sigma_0^2 \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de her terim σ_0^2 'ye oranlanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$F\bar{\sigma}_Y^2 + G\bar{\sigma}_X^2 + H(\bar{\sigma}_X - \bar{\sigma}_Y)^2 + 2N\bar{\sigma}_{XY}^2 = 1 \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'da $\bar{\sigma}_X$, $\bar{\sigma}_Y$ ve $\bar{\sigma}_{XY}$ gerilme oranlarıdır.

Gerilme oranı hesaplamasında paralel yöndeki gerilmesi referans alınmaktadır ve aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_0} \quad (2.9)$$

Akma yüzeyi ve akma kuralı ifadeleri Hill48 kriteri için uygulandığında akma gerilmesi oranı ve Lankford katsayılarının açığa göre değişimleri sırasıyla Denklem 2.10 ve 2.11'e göre belirlenmektedir.

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{\left[H(\cos 2\theta)^2 + G(\cos \theta)^4 + F(\sin \theta)^4 + \frac{N}{2}(\sin 2\theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.10)$$

$$r_{\theta} = \frac{H + (2N - G - F - 4H) \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{F \sin^2 \theta + G \cos^2 \theta} \quad (2.11)$$

θ hadde yönüne göre açığı gösterirken, σ_{θ} ve r_{θ} sırasıyla gerilmenin ve Lankford katsayılarının hadde yönüne göre açığa bağlı değişimlerini vermektedir. Yukarıdaki eşitliklerde görüldüğü gibi σ_{θ} ve r_{θ} 'nin belirlenebilmesi için F, G, H ve N katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Bu katsayılar akma gerilmesi oranlarına ya da anizotropi katsayılarına göre belirlenebilmektedir. Denklem 2.12 ve 2.13 gerilme oranlarına dayalı, Denklem 2.14 ve 2.15 ise Lankford katsayılarına dayalı tanımlamaları göstermektedir.

$$F_{\sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\bar{\sigma}_{90}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_b^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_0^2} \right], \quad G_{\sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\bar{\sigma}_b^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_0^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{90}^2} \right] \quad (2.12)$$

$$H_{\sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\bar{\sigma}_{90}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_0^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_b^2} \right], \quad N_{\sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{4}{\bar{\sigma}_{45}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_b^2} \right] \quad (2.13)$$

$$F_r = \frac{r_0}{(1+r_0)(1+r_{90})}, \quad G_r = \frac{1}{1+r_0} \quad (2.14)$$

$$H_r = \frac{r_0}{1+r_0}, \quad N_r = \frac{(r_0+r_{90})(2r_{45}+1)}{2(1+r_0)(r_{90})} \quad (2.15)$$

Denklem 2.12, 2.13, 2.14 ve 2.15' de $\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_{45}, \bar{\sigma}_{90}$ ve $\bar{\sigma}_b$ sırasıyla hadde yönüne paralel, diyagonal, dik ve eşit iki eksenli yönlerdeki akma gerilmesi oranlarını, r_0, r_{45} ve r_{90} ise üç yöndeki Lankford katsayılarını ifade etmektedir. Hill48 kriterinin tanımlama prosedürüne göre malzemenin akma gerilmesi oranları ve Lankford katsayılarının açığa göre değişimleri eş zamanlı olarak tahmin edilememektedir.

Ayrıca Hill48 kriterine göre malzemenin ortalama anizotropi katsayısı $r_n < 1$ olduğunda, $\bar{\sigma}_b < \bar{\sigma}_0$ olması gerekmektedir. Ancak Woodthorpe ve Pearce [29] gerçekleştirmiş oldukları deneylerde bazı alüminyum alaşımlarının bu koşullara uymadığını, $\bar{\sigma}_b > \bar{\sigma}_0$ iken, ortalama anizotropi katsayısının ise $0,5 < r_n < 0,6$ arasında olduğunu belirlemişlerdir. Bu durum literatürde anormal davranış olarak ifade edilmektedir ve Hill48 kriteri bu davranışı açıklayamamaktadır.

2.2.2. Polinom tipi akma kriterleri

Hill48 akma kriterinin yukarıda belirtilen eksiklikleri nedeniyle, Hill 1950 yılında genelleştirilmiş, homojen türü polinomların akma kriteri olarak kullanımını önermiştir [7]. Düzlem gerilme hali için polinom türü akma kriteri aşağıdaki formda ifade edilmektedir (Denklemler 2.16).

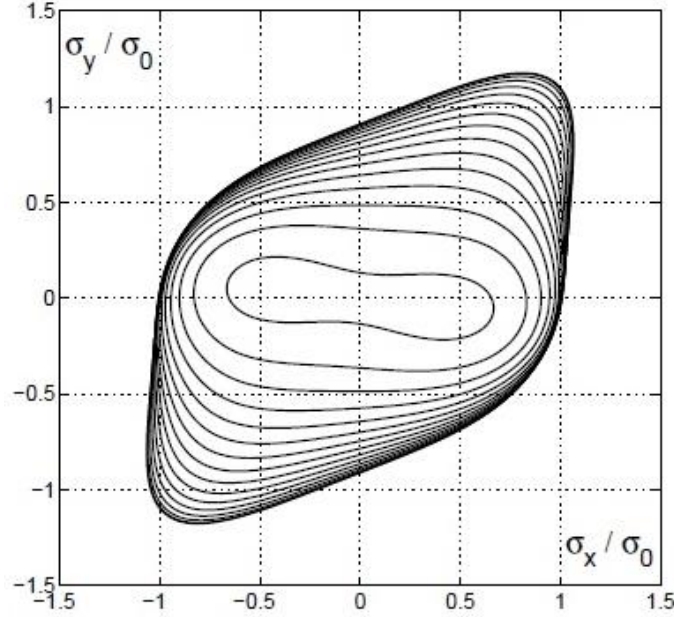
$$P_n^{(2D)}(\sigma) = \sum_{i+j+2k=n} a_{ijk} \sigma_x^i \sigma_y^j \sigma_{xy}^{2k} \quad (2.16)$$

2.2.2.1. Gotoh akma kriteri

Polinom türü akma kriterleri literatürde ilk olarak Gotoh tarafından incelenmiştir. Gotoh, akma fonksiyonu olarak dördüncü derece bir polinom önermiş ve polinom katsayılarını belirleyebilmek için çalışmasında dokuz denklemden oluşan bir lineer denklem sistemi oluşturmuştur. Ardından araştırmacı, kriterini alüminyumla deokside edilmiş bir çelik ve bakır alaşımlı sac malzemelerin anizotropik davranışlarının modellenmesinde kullanmış ve bu malzemelerin yönsel özelliklerinin açığa göre değişimlerini başarılı bir şekilde tahmin etmiştir [8, 9]. Ancak Gotoh katsayı tanımlama prosedüründe akma yüzeyinin pozitifliğini ve konveksliğini dikkate almadığı için kriter sac şekillendirme analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılamamaktadır [10]. Şekil 2.4. Gotoh'un tanımlama prosedürünün AA2090-T3 alüminyum alaşımında uygulanması sonucunda tahmin edilen akma yüzeylerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi Gotoh kriterine göre hesaplanan akma yüzeyleri konveks değildir [16].

$$f(\sigma) = a_1\sigma_X^4 + a_2\sigma_X^3\sigma_Y + a_3\sigma_X^2\sigma_Y^2 + a_4\sigma_X\sigma_Y^3 + a_5\sigma_Y^4 + (a_6\sigma_X^2 + a_7\sigma_X\sigma_Y + a_8\sigma_Y^2)\sigma_{XY}^2 + a_9\sigma_{XY}^4 \quad (2.17)$$

Buradaki $a_1, a_2, a_3, \dots, a_9$ anizotropi katsayılarını, σ_x, σ_y asal normal gerilmeleri ve σ_{xy} ise kayma gerilmesini ifade etmektedir.



Şekil 2.4. Konveks olmayan akma yüzeyi [16]

2.2.2.2. Cazacu-Barlat akma kriteri (CB2001)

Cazacu ve Barlat [13], Drucker'in izotropik akma kriterinin genişletilmesine dayalı altıncı dereceden bir polinom türü akma fonksiyonu önermişlerdir (CB2001). Düzlem gerilme halinde akma fonksiyonu aşağıdaki formda yazılmaktadır:

$$f_2 = \left[\frac{1}{6}(a_1 + a_3)\sigma_x^2 - \frac{a_1}{3}\sigma_x\sigma_y + \frac{1}{6}(a_1 + a_2)\sigma_y^2 + a_4\sigma_{xy}^2 \right]^3 - c \left\{ \frac{1}{27}(b_1 + b_2)\sigma_x^3 + \frac{1}{27}(b_3 + b_4)\sigma_y^3 - \frac{1}{9}(b_1\sigma_x + b_4\sigma_y)\sigma_x\sigma_y - \frac{1}{3}\sigma_{xy}^2[(b_5 - 2b_{10})\sigma_x - b_5\sigma_y] \right\}^2 = k^2 \quad (2.18)$$

Burada a_1 - a_4 ve b_1 - b_5 ve b_{10} katsayıları anizotropiyi tanımlamaktadır, c bir sabit olup, k ise aşağıdaki eşitlikle belirlenmektedir.

$$k^2 = 18 \left(\frac{\sigma_0}{3} \right)^6 \quad (2.19)$$

Kriterin katsayı tanımlama prosedürü karmaşık olup, ikinci ve üçüncü invaryantların (J_2 ve J_3) katsayıları üzerinde karmaşık nonlinear formülasyonlara dayalıdır. Bunlar kriterin dezavantajlı yönlerini oluşturmaktadır.

Polinom tipi akma kriterleri arasında Soare'nin 2007 yılında sunduğu dördüncü derece polinom akma kriteri olan Poly4 akma kriteri de bulunmaktadır. İlgili kriter bu tez çalışması kapsamında kullanılan başlıca plastisite modeli olması dolayısıyla üçüncü bölümde ayrıca detaylı biçimde anlatılmaktadır.

BÖLÜM 3. DÖRDÜNCÜ DERECEDEDEN POLİNOM TİPİ AKMA KRİTERİ

Tez çalışmasında, Soare tarafından geliştirilen dördüncü dereceden polinom türü bir akma kriteri (Poly4) kullanılmıştır. Düzlem gerilme hali için ($\sigma_z = 0$) kriter aşağıdaki gibidir.

$$P_4^{(2D)} = a_1\sigma_X^4 + a_2\sigma_X^3\sigma_Y + a_3\sigma_X^2\sigma_Y^2 + a_4\sigma_X\sigma_Y^3 + a_5\sigma_Y^4 + (a_6\sigma_X^2 + a_7\sigma_X\sigma_Y + a_8\sigma_Y^2)\sigma_{XY}^2 + a_9\sigma_{XY}^4 \quad (3.1)$$

Buradaki $a_1, a_2, a_3, \dots, a_9$ anizotropi katsayılarını, σ_x, σ_y asal normal gerilmeleri ve σ_{xy} ise kayma gerilmesini ifade etmektedir.

Soare tarafından geliştirilen Poly4 akma kriteri iki temel şarta dayanır. Bunlardan biri pozitiflik, diğeri ise konveksliktir. Dokuz katsayının tanımlanmasında bu iki şart dikkate alınmıştır [13].

3.1. Konvekslik Koşulu

Akma kuralına göre gerilmeler ile plastik gerinim artımları arasında her zaman birebir ilişkinin olabilmesi için akma yüzeyinin konveks olması gerekmektedir [30]. Akma yüzeyinin konveks olabilmesi için, fonksiyonun asal gerilmelere göre Hessian matrisinin pozitif ve yarı tanımlı olması gerekmektedir [31] ve gerekli şart aşağıda verilmektedir.

$$H'' + H \geq 0 \quad (3.2)$$

$$Hf = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 f}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.2. Katsayı Tanımlama Prosedürü

Aşağıda Poly4 kriterinin katsayı tanımlama prosedürü anlatılmaktadır.

a. a_1, a_2, a_4 ve a_5 katsayılarının tanımlanması

a_1, a_2, a_4 ve a_5 katsayıları açık formüllerle aşağıdaki eşitliklerle tanımlanmaktadır.

$$a_1 = 1 \quad (3.4)$$

$$a_5 = \frac{1}{\bar{\sigma}_{90}^4} \quad (3.5)$$

$$a_2 = \frac{-4r_0}{(1+r_0)} \quad (3.6)$$

$$a_4 = \frac{-4a_5 r_{90}}{(1+r_{90})} \quad (3.7)$$

b. σ_b için pozitiflik kontrolü

Bu adımda ilk olarak aşağıdaki eşitsizliğe göre σ_b için pozitiflik kontrolü yapılır:

$$\frac{1}{\bar{\sigma}_b^4} > Q + a_1 + a_2 + a_4 + a_5 \quad (3.8)$$

Burada Q aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır;

$$Q = \max_{\omega \in (0, \pi) \setminus \pi/2} \left[- \left(\frac{a_1}{\tan^2(\omega)} + \frac{a_2}{\tan(\omega)} + a_4 \tan(\omega) + a_5 \tan^2(\omega) \right) \right] \quad (3.9)$$

c. σ_b için konvekslik kontrolü ve a_3 katsayısının hesaplanması

Akma yüzeyinin iki eksenli düzlemde konveks olması için aşağıdaki ikinci dereceden eşitsizliğin sağlanması gereklidir:

$$Aa_3^2 + Ba_3 + C \geq 0, \quad (\forall)\omega \in [0,2\pi) \quad (3.10)$$

Burada A, B ve C katsayılarının her $\omega \in [0,2\pi)$ için belli bir değeri bulunmaktadır ve bu katsayıların hesaplanması ile ilgili detaylı bilgi Soare'nin çalışmasında verilmektedir. Eşitsizlik 3.10, sabit bir ω değeri için iki gerçel çözüme sahiptir $x_1(\omega) \leq x_2(\omega)$ ve iki eksenli düzlemde konvekslik şartının sağlanabilmesi için, aşağıdaki eşitsizliklerin sağlanması gereklidir:

$$M_1 = \max_{\omega \in [0, \pi/2)} x_1 \leq a_3 \leq \min_{\omega \in [0, \pi/2)} x_2 = M_2 \quad (3.11)$$

$$(M_2 + a_1 + a_2 + a_4 + a_5)^{-1/4} \leq \bar{\sigma}_b \leq (M_1 + a_1 + a_2 + a_4 + a_5)^{-1/4} \quad (3.12)$$

$\bar{\sigma}_b$ için Eşitsizlik 3.11 ve 3.12 sağlandıktan sonra a_3 katsayısı aşağıdaki ifade ile belirlenmektedir.

$$a_3 = \frac{1}{\bar{\sigma}_b^4} - (a_1 + a_2 + a_4 + a_5) \quad (3.13)$$

d. r_{45} için konvekslik kontrolü ve a_9 katsayısının hesaplanması

$\sigma_X = \sigma_Y$ durumunda akma yüzeyinin pozitif ve konveks olması için aşağıdaki eşitsizliğin sağlanması gereklidir.

$$\frac{-(5t+8)+(3/2)t(t+8)^{1/2}}{9t+8} \leq r_{45} \leq \left(\frac{t}{2}\right) - 1 \quad (3.14)$$

Burada t aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

$$t = \left(\frac{2\bar{\sigma}_b}{\bar{\sigma}_{45}} \right)^4 \quad (3.15)$$

Eşitsizlik 3.14'ün sağlanmasının ardından a_9 katsayısı aşağıdaki ifadeye göre belirlenmektedir:

$$a_9 = \frac{\left(\frac{2}{\bar{\sigma}_{45}} \right)^4 r_{45}}{1+r_{45}} + \frac{1}{\bar{\sigma}_b^4} \quad (3.16)$$

e. Hata fonksiyonunun optimizasyonu ve a_6 , a_8 katsayılarının belirlenmesi

a_6 ve a_8 katsayıları hata fonksiyonun (ψ) minimizasyonu ile belirlenmekte olup, fonksiyon aşağıda verilmektedir:

$$\psi = \frac{1}{2} \sum_{i=1,2} \left\{ w_1^{(i)} [(c_i^2 - c_i s_i) a_6 + (s_i^2 - c_i s_i) a_8 - (B_6(\theta_i) - B_5 c_i s_i)]^2 + w_2^{(i)} [(g_1(\theta_i) - g_3(\theta_i)) a_6 + (g_2(\theta_i) - g_3(\theta_i)) a_8 - (B_7(\theta_i) - B_5 g_3(\theta_i))]^2 \right\} \quad (3.17)$$

Burada $w_1^{(i)}$, $w_2^{(i)}$ sırasıyla $\bar{\sigma}_\theta$ ve r_θ için ağırlık katsayılarını ifade etmektedir ve fonksiyondaki B_5 , B_6 ve B_7 'nin belirlenmesinde aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır.

$$B_5 = \frac{\left(\frac{2}{\bar{\sigma}_{45}} \right)^4 r_{45}}{1+r_{45}} - \frac{2}{\bar{\sigma}_b^4} \quad (3.18)$$

$$B_6 = \frac{\frac{1}{\bar{\sigma}_\theta^4} - B_2 - a_9 c^2 s^2}{cs} \quad (3.19)$$

$$B_7 = \frac{4a_9 c^2 s^2 - r_\theta B_3 - B_4}{cs} \quad (3.20)$$

Bu eşitliklerdeki B_2 , B_3 ve B_4 ise aşağıdaki eşitliklerle belirlenmektedir.

$$B_2 = a_1 c^4 + a_2 c^3 s + a_3 c^2 s^2 + a_4 c s^3 + a_5 s^4 \quad (3.21)$$

$$B_3 = 4a_1 c^3 + a_2 c^2 (3s + c) + 2a_3 c s + a_4 s^2 (s + 3c) + 4a_5 s^3 \quad (3.22)$$

$$B_4 = 4a_1 c^3 s + a_2 c^2 (3s^2 + c^2) + 2a_3 c s (s^2 + c^2) + a_4 s^2 (s^2 + 4c^2) + 4a_5 c s^3 \quad (3.23)$$

g_1, g_2 ve g_3 ise aşağıda belirtilmektedir.

$$g_1 = 2c(r_\theta - c + s); \quad g_2 = 2s(r_\theta + c - s); \quad g_3 = r_\theta + (c - s)^2 \quad (3.24)$$

Bu eşitliklerde $c=\cos^2\theta$, $s=\sin^2\theta$ 'yi ifade etmektedir.

Burada $i=1$ ve $i=2$ için $\theta_1=15^\circ$ ve $\theta_2=75^\circ$ olarak alınmıştır ve bu açılardaki akma gerilmeleri ve Lankford katsayıları aşağıdaki eşitliklere göre belirlenmiştir.

$$\bar{\sigma}_{30} = \frac{\bar{\sigma}_0 + \bar{\sigma}_{45}}{2}, \quad \bar{\sigma}_{15} = \frac{\bar{\sigma}_0 + \bar{\sigma}_{30}}{2}, \quad \bar{\sigma}_{60} = \frac{\bar{\sigma}_{30} + \bar{\sigma}_{90}}{2} \quad (3.25)$$

$$r_{30} = \frac{r_0 + r_{45}}{2}, \quad r_{15} = \frac{r_0 + r_{30}}{2}, \quad r_{60} = \frac{r_{30} + r_{90}}{2} \quad (3.26)$$

Çalışmada Soare'nin tanımlama prosedüründen farklı olarak, hata fonksiyonunun minimizasyonunda iç nokta algoritması kullanılmıştır. [32].

f. a_6 ve a_8 katsayıları için aralık kontrolü

Hata fonksiyonunun minimizasyonu sırasında konvekslik ve pozitiflik şartlarının sağlanabilmesi için a_6 ve a_8 katsayılarının aşağıdaki sınırları sağlanması gereklidir.

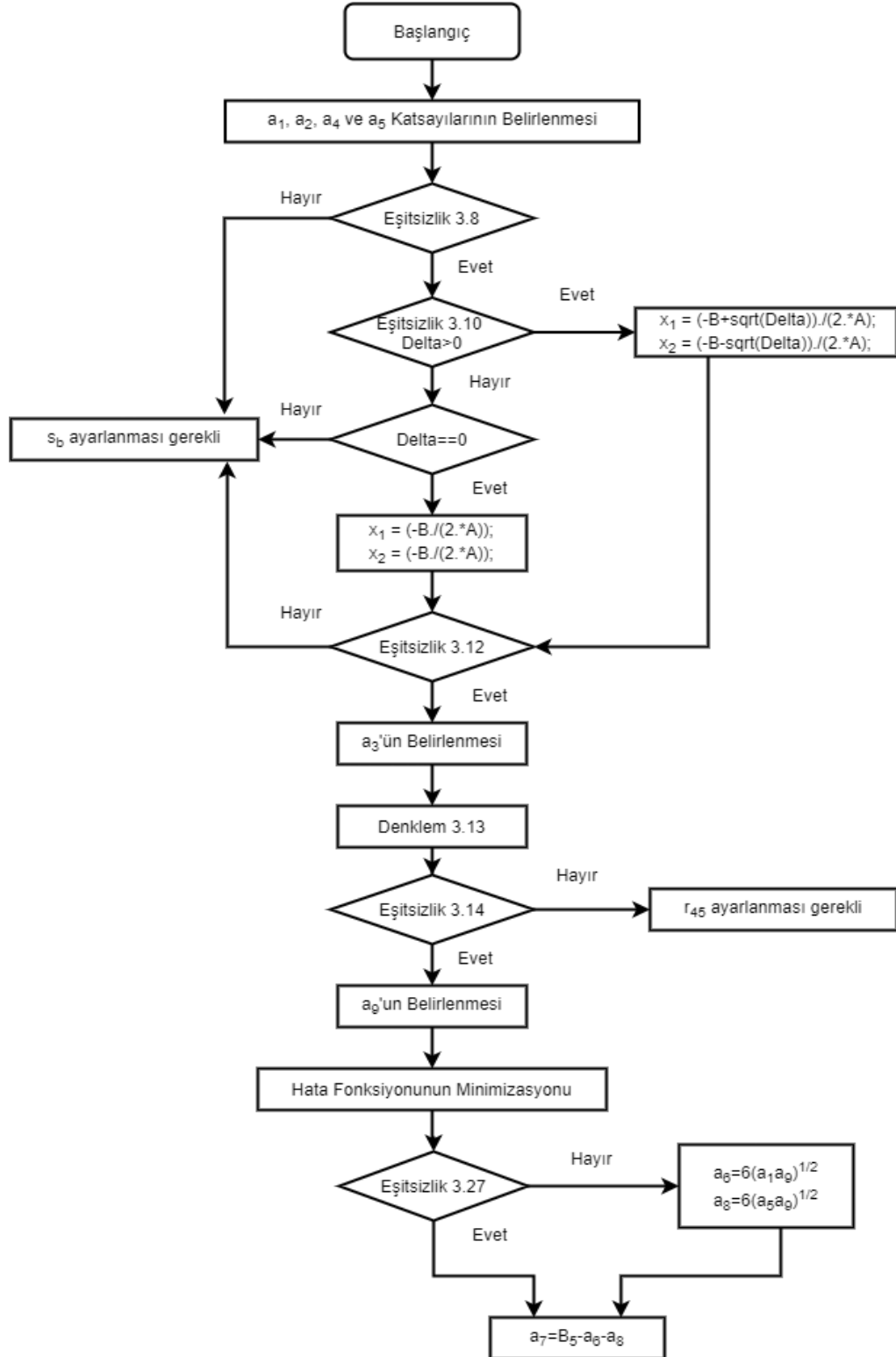
$$0 \leq a_6 \leq 6\sqrt{a_1 a_9} \quad \text{ve} \quad 0 \leq a_8 \leq 6\sqrt{a_5 a_9} \quad (3.27)$$

g. a_7 katsayısının belirlenmesi

a_6 ve a_8 katsayılarının belirlenmesinin ardından aşağıdaki eşitliğe göre a_7 katsayısı hesaplanmaktadır.

$$a_7 = B_5 - (a_6 + a_8) \quad (3.28)$$

Yukarıda anlatılan katsayı tanımlama prosedürü Şekil 3.1.'de gösterilen akış şemasında özetlenmektedir.



Şekil 3.1. Katsayı tanımlama prosedürü akış şeması

Akma kriterine ait katsayıların belirlenmesinden sonra Poly4 kriterine göre akma gerilmesi oranı ve Lankford katsayılarının açılmal değişimini veren eşitlikler sırasıyla Denklem 3.28 ve 3.29 de verilmektedir.

$$\bar{\sigma}_\theta = \left(\frac{1}{B_2 + B_6 \cos\theta \sin\theta + a_9 c s} \right)^{1/4} \quad (3.28)$$

$$r_\theta = - \frac{\frac{\partial P_4}{\partial \sigma_{11}} s + \frac{\partial P_4}{\partial \sigma_{22}} c - \frac{\partial P_4}{\partial \sigma_{12}} \cos\theta \sin\theta}{\frac{\partial P_4}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial P_4}{\partial \sigma_{22}}} \quad (3.29)$$

BÖLÜM 4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Tez kapsamında Poly4 akma kriterinin tahmin kabiliyetinin değerlendirilebilmesi için tek eksenli çekme testi ve dikdörtgen kap derin çekme deneyleri referans olarak alınmıştır ve kriterden tahmin edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.1. Deneysel Çalışmalar

4.1.1. Çekme testi

Referans olarak seçilen tek eksenli çekme deneyleri ile ilgili veriler literatürden alınmıştır [20]. Deneylerde 0,8 mm kalınlığında, AISI-304 ostenitik paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Testler ASTM E8-M standardına göre malzemenin hadde yönüne paralel, diyagonal ve dik olmak üzere üç yönde gerçekleştirilmiş ve her yön için deneyler üç defa tekrar edilmiştir. Testlerde gerinim hızı $\dot{\epsilon} = 0,008 \text{ s}^{-1}$ olarak alınmış olup, toplanan verilere göre malzemenin mühendislik gerilmesi-mühendislik gerinim eğrileri belirlenmiş ve buradan üç yöndeki akma gerilmeleri ve gerilme oranları hesaplanmıştır. Malzemenin iki eksenli akma gerilmesi oranı ise literatürden alınmıştır [33]. Mühendislik gerilmesi-mühendislik gerinim eğrilerinin belirlenmesinden sonra öncelikle gerçek gerilme-gerçek gerinim ve ardından gerçek gerilme-plastik gerinim eğrileri aşağıdaki eşitliklere göre elde edilmiştir.

$$\sigma_m = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_m = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + \epsilon_m) \quad (4.3)$$

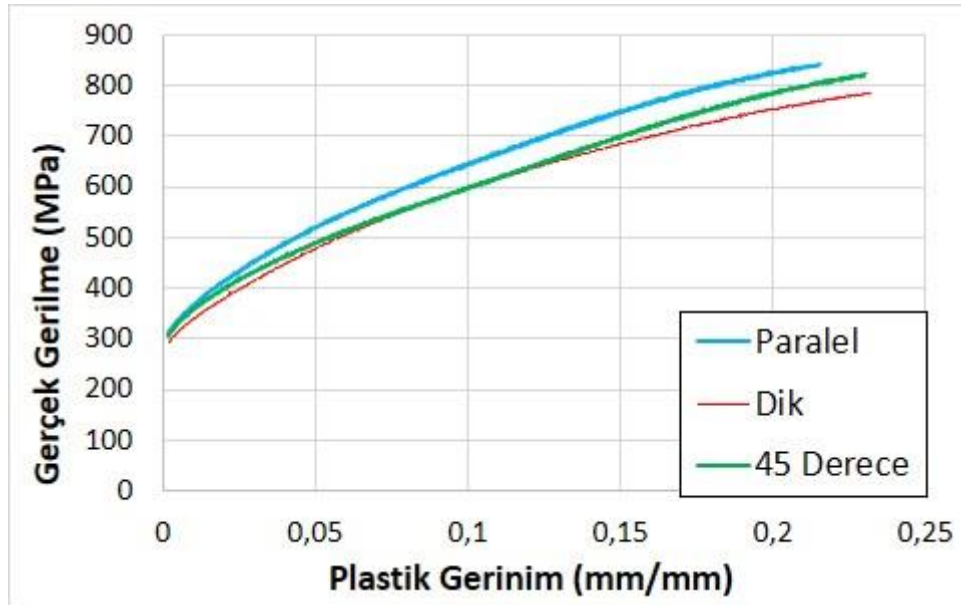
$$\epsilon_g = \ln(1 + \epsilon_m) \quad (4.4)$$

Burada; çekme deneyi esnasında ölçülen çekme kuvveti (F), ilk boy (L_0), ilk kesit alanı (A_0), referans çizgilerinin yer değiştirme miktarı ($\Delta L = L - L_0$), malzemeye ait mühendislik gerilmesi (σ_m), gerçek gerilme (σ_g), mühendislik gerinimi (ϵ_m) ve gerçek gerinim (ϵ_g) ile ifade edilmiştir.

Belirlenen akma gerilmeleri ve üç yön için elde edilen gerçek gerilme-plastik gerinim eğrileri sırasıyla Tablo 4.1. ve Şekil 4.1.'de gösterilmektedir. Malzemenin hadde yönüne paralel yöndeki akma gerilmesi değeri 309,86 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.1. AISI-304 malzemesine ait deneysel $\bar{\sigma}$ verileri [20]

$\bar{\sigma}_0$	$\bar{\sigma}_{45}$	$\bar{\sigma}_{90}$	$\bar{\sigma}_b$
1,0000	0,9468	0,9796	0,9611



Şekil 4.1. Üç yöndeki gerçek gerilme-plastik gerinim eğrileri [20]

Malzemenin üç yöndeki akma eğrilerinin belirlenmesinden sonra anizotropi deneylerine geçilmiştir. Deneyler %15'lik uzama değerinde durdurulmuş ve numunelerin genişlik ve kalınlıkları ölçülerek Lankford katsayıları belirlenmiştir.

Çekme testlerinden elde edilen farklı yönlerdeki Lankford katsayıları tablo 4.2.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. AISI-304 malzemesine ait deneysel r verileri [20]

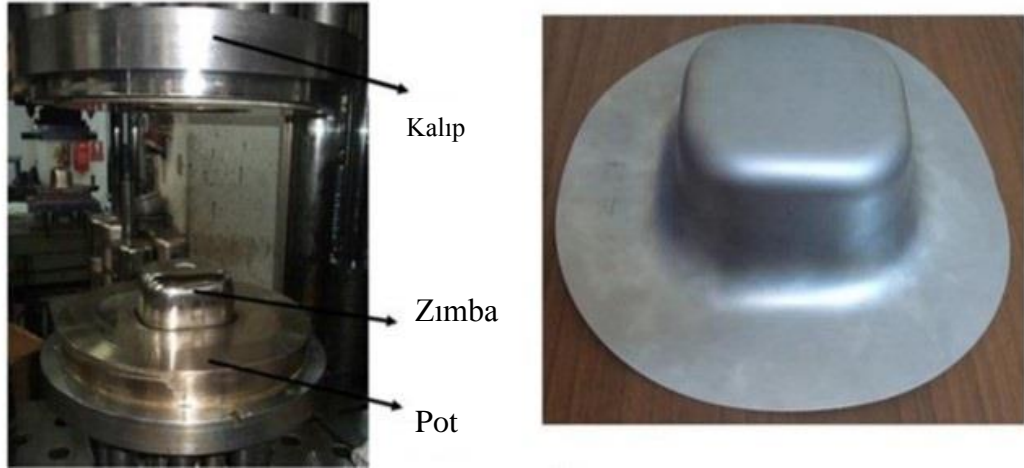
r ₀	r ₄₅	r ₉₀
0,82	1,10	0,8

$$\bar{\sigma}_{30} = \frac{\bar{\sigma}_0 + \bar{\sigma}_{45}}{2}, \quad \bar{\sigma}_{15} = \frac{\bar{\sigma}_0 + \bar{\sigma}_{30}}{2}, \quad \bar{\sigma}_{60} = \frac{\bar{\sigma}_{30} + \bar{\sigma}_{90}}{2} \quad (4.5)$$

$$r_{30} = \frac{r_0 + r_{45}}{2}, \quad r_{15} = \frac{r_0 + r_{30}}{2}, \quad r_{60} = \frac{r_{30} + r_{90}}{2} \quad (4.6)$$

4.1.2. Dikdörtgen kap derin çekimi

Dikdörtgen kap derin çekim deneyleri 160 ton kapasiteli çift etkili hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Proste sac parça öncelikle kalıp ve pot çemberi arasında sıkıştırılmakta, ardından kalıp ve pot çemberi birlikte aşağı inerek parçayı sabit duran zımbaya karşı şekillendirmektedir. Deneylerde sac- kalıp, sac-pot çemberi arayüzeylerinde yağlayıcı olarak mineral yağ kullanılırken, sac ile zımba arayüzeylerine ise herhangi bir yağlayıcı kullanılmamıştır. 340 kN değerinde pot çemberi kuvveti, 20 mm/s kalıp hızıyla deneyler gerçekleştirilmiş ve 80 mm derinliğindeki parça başarılı bir şekilde şekillendirilmiştir. Derin çekme oranı (DÇO) bu parça için 1,25 olarak belirlenmiştir. Derin çekme oranının belirlenmesinde Denklem 4.17 kullanılmıştır. Deneysel kurulum ve şekillendirilmiş parça Şekil 4.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Deney düzeneği ve şekillendirilmiş parça

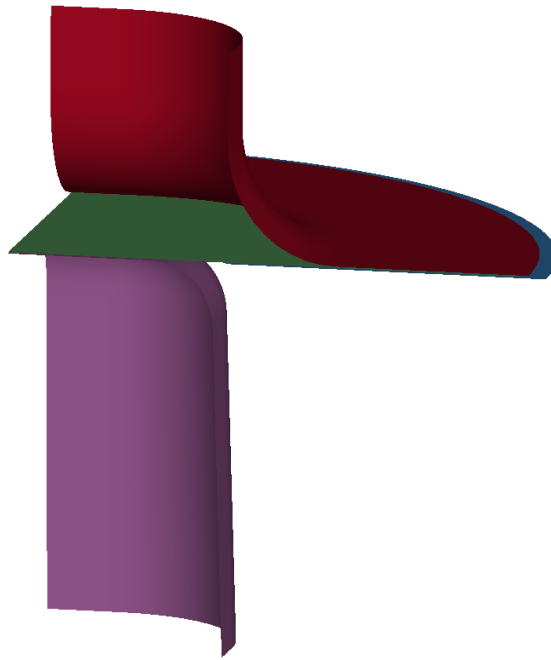
$$D\check{C}O = \frac{\text{İlk Sac Çapı}}{\text{Şekillendirilen Kab Çapı}} \quad (4.7)$$

4.2. Sonlu Eleman Modeli

Dikdörtgen kap derin çekme prosesi açık çözüm (eksplisit) yöntemini kullanan sonlu eleman programı LS-Dyna'da modellenmiştir. Polinom tipi akma kriteri olan Poly4 akma fonksiyonu kullanıcı tabanlı malzeme modeli (UMAT) kullanılarak LS-Dyna yazılımına entegre edilmiştir. Aşağıda modelleme aşamaları anlatılmaktadır.

a. Parçaların tanımlanması

Proseste kullanılan parça ve takımların simetrik olması nedeniyle, geometrinin sadece $\frac{1}{4}$ 'ü modellenmiştir. Sac parça ile takımlar arasındaki temasın tanımlanabilmesi için parçalar arasında sac kalınlığının yarısı kadar mesafe bırakılmıştır. Ardından program içerisinde parçalar tanımlanmış ve hareket yönü z yönü olacak şekilde programda ayarlanmıştır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Parçaların 1/4'ünün modellenmesi

b. Akma eğrisinin tanımlanması

Malzemenin akma eğrisi Swift denklemine göre tanımlanmıştır. Akma eğrisinin tanımlanmasında hadde yönüne paralel yöndeki deneysel veri dikkate alınmış ve eğri uydurma ile en uygun Swift parametreleri belirlenmiştir. Eğri uydurmada nonlinear en küçük kareler ve güvenilir bölge algoritması kullanılmıştır.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (4.8)$$

Denklemden K malzemenin mukavemet katsayısını, ε_0 akma başladığı andaki plastik gerinim değerini, n ise pekleşme üstelini ifade etmektedir.

Tablo 4.3. Akma eğrisi parametreleri [20]

K	n	ε_0
1349 MPa	0,316	0,001783

c. Eleman formulasyonunun tanımlanması

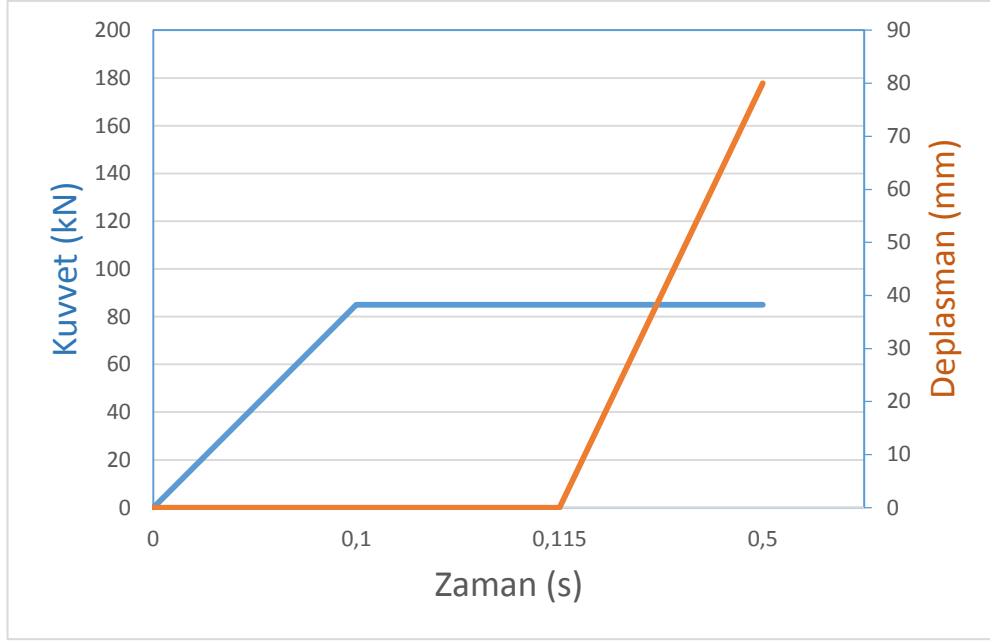
Sac ve takımlar kabuk elemanlarla modellenmiştir. Burada sac parça için Fully Integrated (ELFORM=16), takımlar içinse Belytschko-Tsay kabuk eleman formülasyonları kullanılmıştır. Gerilmelerin hesaplanabilmesi için sac kalınlığı boyunca integrasyon nokta sayısı (NIP) 5 alınmıştır.

d. Temas ve sürtünme koşullarının tanımlanması

Sac parça ile takımlar arasındaki temas ayrı ayrı tanımlanmış ve tüm parçalar için bir yön şekillendirme yüzey-yüzey (forming_one_Surface to surface) temas algoritması kullanılmıştır. Sürtünme katsayılarının tanımlanmasında deney şartları dikkate alınmıştır. Deneylerde sac-kalıp, sac-pot çemberi ara yüzeylerinde yağlayıcı olarak mineral yağ kullanılmış ve takımlara sürülmüştür bu nedenle bu bölgelerde sürtünme katsayısı 0,05, sac-zımba arasında herhangi bir yağlayıcı olmadığı için sürtünme katsayısı 0,125 olarak alınmıştır.

e. Proses parametrelerinin tanımlanması

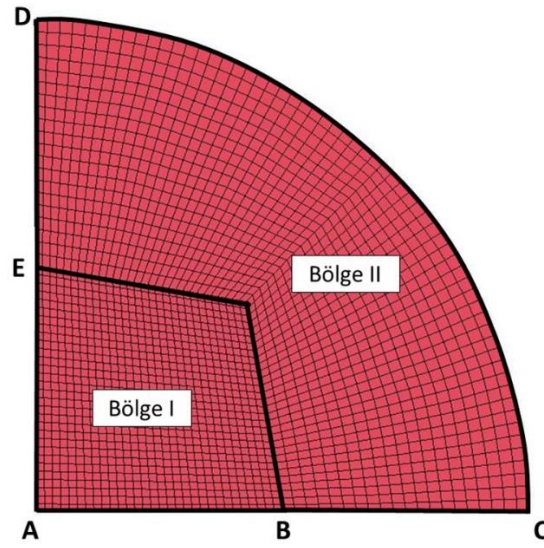
Prosesse uygun olarak kalıba -z yönünde deplasman kontrollü hareket verilmiştir. Pot çemberine ise kuvvet uygulanmıştır. Proseste öncelikle kalıp -z yönünde hareket etmekte ardından pot kuvveti uygulanmaktadır. Pot kuvveti 0,1 saniyede deneysel değerin $\frac{1}{4}$ 'ü olan 85 kN'a ulaşmış ve işlem sonuna kadar sabit tutulmuştur. Şekillendirme sırasında, sac parçanın düğüm noktalarındaki titreşimleri ve buna bağlı olarak sistemin kinetik enerjisini azaltabilmek için sonlu eleman modelinde pot kuvveti sabit hale geldikten 0,015 saniye sonra kalıba hareket verilmiştir. Bu süre farkı hem proses koşullarına benzemesi hem de açık çözümde kinetik enerjinin minimize edilmesi için uygundur. Modelde toplam analiz süresi 0,5 saniye olarak alınmıştır. Tanımlanan kalıp-zaman ve pot kuvveti-zaman grafikleri Şekil 4.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Proses parametrelerinin gösterimi

4.2.1.2. Optimum mesh yapısının belirlenmesi

Sac için optimum mesh boyutunu belirleyebilmek için mesh hassasiyet çalışması gerçekleştirilmiştir. Sac Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi iki bölgeye bölünmüş ve dört farklı mesh yoğunluğu dikkate alınmıştır. Mesh hassasiyet çalışması için gerçekleştirilen analizlerde von Mises akma kriteri (MAT18) kullanılmıştır. Şekil 4.5.'de gösterilen bölgelere karşılık mesh yoğunlukları Tablo 4.4.'de verilmiştir.

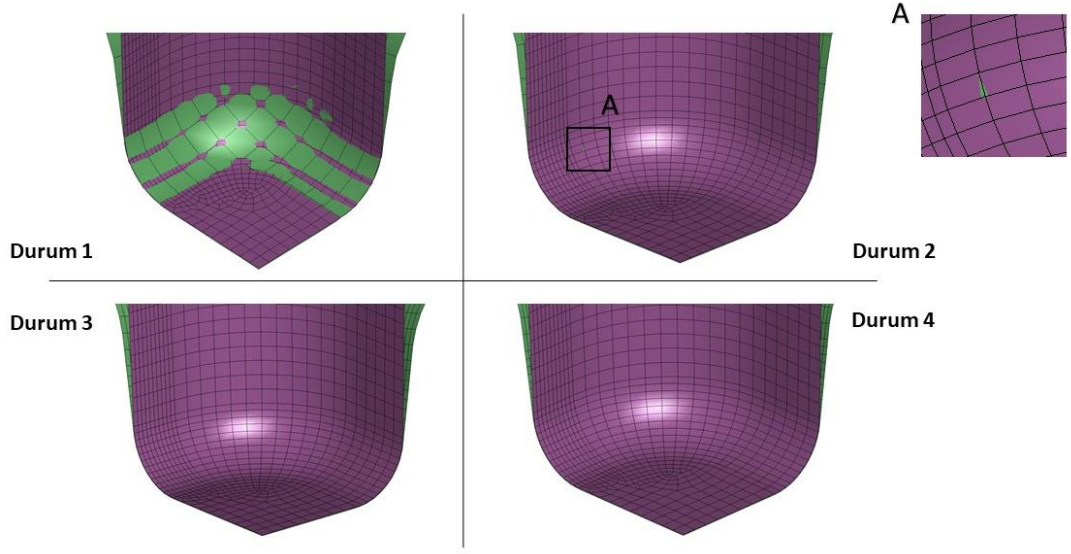


Şekil 4.5. Sacın mesh yapısı

Tablo 4.4. Bölgelere düşen eleman sayıları

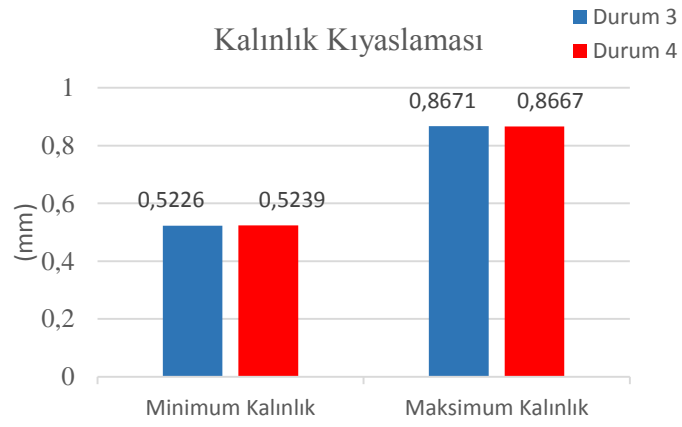
	AB ve AE	BC ve DE	CD
Durum 1	10	10	20
Durum 2	20	10	40
Durum 3	30	20	60
Durum 4	40	20	80

Tabloda verilen her durum için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında ilk iki simülasyonda sacın mesh yapısının zimbaya göre daha kaba olması nedeniyle penetrasyon gözlemlenmiştir (Şekil 4.6.). Bu nedenle çalışmada 1. ve 2. durumdaki eleman boyutları dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.6. Dört durum için penetrasyon kontrolü

Durum 3 ve 4'ün seçiminde ise maksimum ve minimum kalınlık değerleri ile çözüm süreleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.7. Maksimum ve minimum kalınlık kıyaslaması

Tablo 4.5. Süre Kıyaslaması

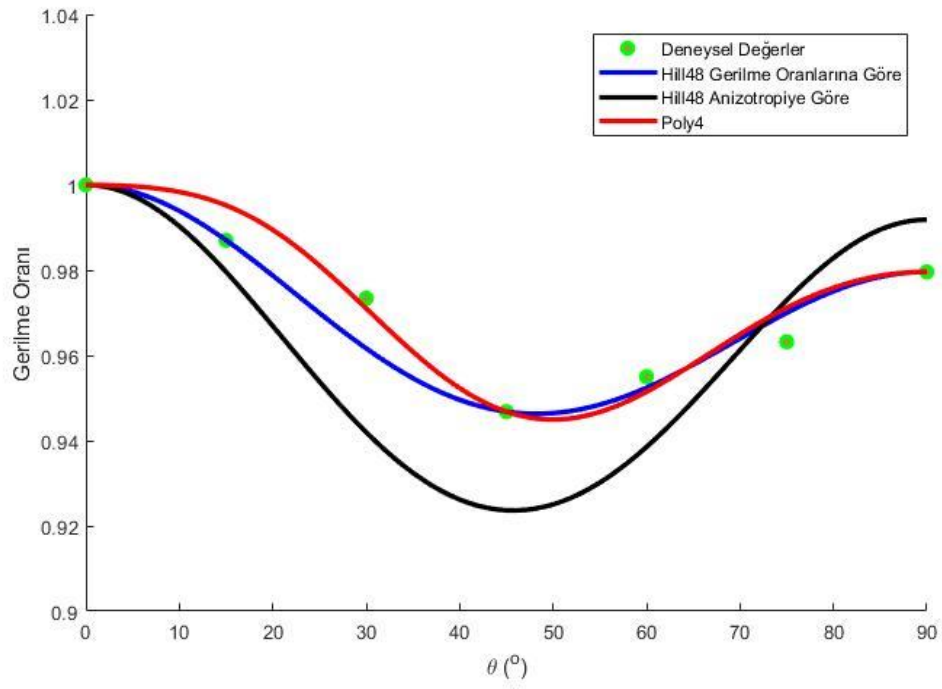
	Süre (s)
Durum 3	4080
Durum 4	5293

Şekil 4.7. ve Tablo 4.5.'de görüldüğü gibi her iki durum için minimum ve maksimum kalınlık değerleri arasında önemli bir farkın olmaması ve analiz süreleri açısından Durum 3'ün daha kısa sürede sonuca ulaşması sebebiyle tez çalışması kapsamında Durum 3'teki mesh yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

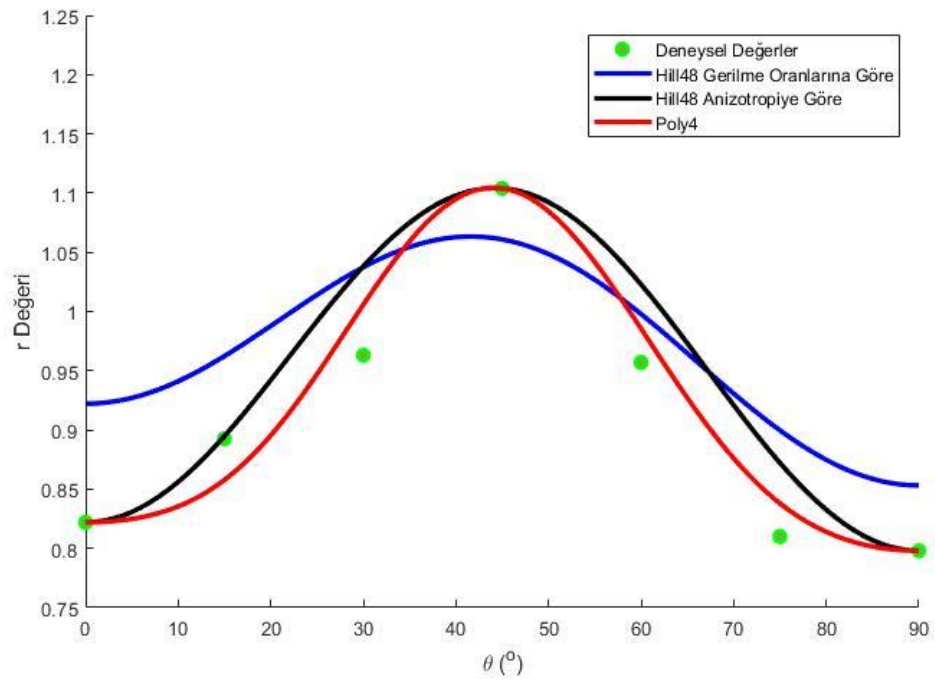
BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında sac malzemenin anizotropik davranışının tanımlanmasında Soare tarafından geliştirilen dördüncü dereceden akma kriteri (Poly4) seçilmiştir. Bu bölümde polinom akma kriterinin modelleme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Değerlendirme iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, malzemenin akma gerilmesi oranlarının ve Lankford katsayılarının sac düzlemi içindeki değişimleri tahmin edilmiş, ikinci aşamada ise dikdörtgen bir kabın derin çekim prosesi göz önüne alınmış ve analizlerden çıkan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Poly4 akma kriteri bir kullanıcı tanımlı alt program aracılığıyla Ls-Dyna sonlu eleman programına uygulanmıştır. Poly4 kriterinin tahmin kabiliyetinin değerlendirilmesinde quadratik Hill48 kriteri referans olarak alınmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Hill48 ve Poly4 akma kriterlerine göre Eşitlik 2.9, 2.10, 3.28 ve 3.29 kullanılarak gerilme oranının ve r 'ın yöne göre değişimleri tahmin edilmiş ve tahmin sonuçları çekme testinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada, Hill48 kriteri için gerilme oranlarına ve Lankford katsayılarına göre yapılan tanımlamaların ikisi de dikkate alınmıştır. Hill48 ve Poly4 için gerilme oranının ve r 'ın yöne göre değişimini veren sonuçlar Şekil 5.1. ve 5.2.'de sunulmaktadır.

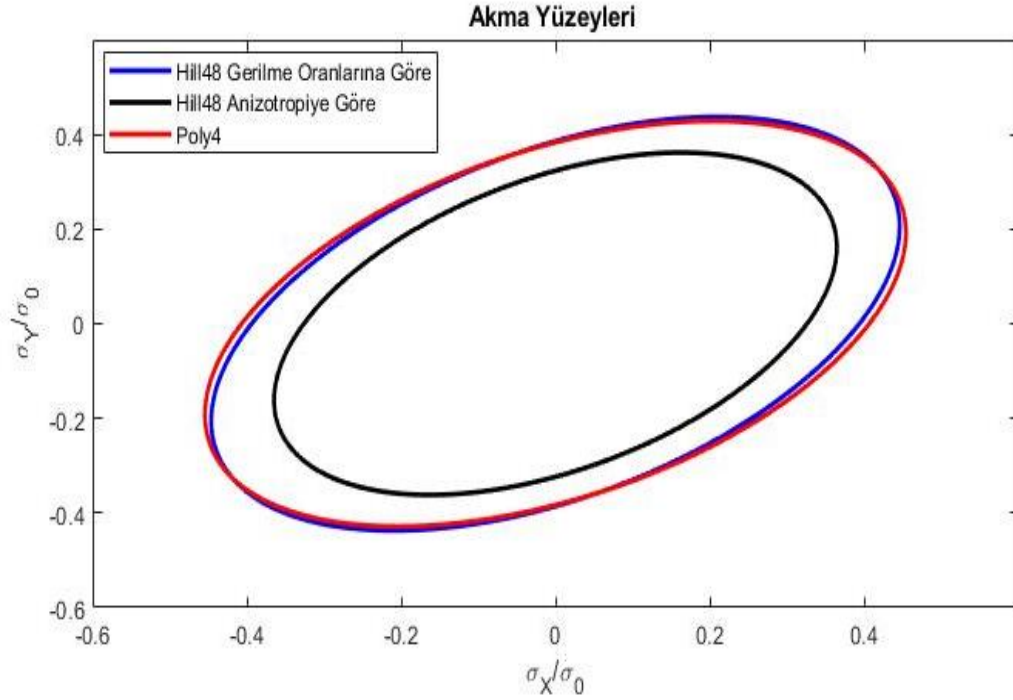


Şekil 5.1. Gerilme oranının yöne göre değişimi



Şekil 5.2. r'nin yöne göre değişimi

Gerilme oranlarının ve r değerlerinin yöne göre değişimlerinin belirlenmesinden sonra, her iki kritere göre malzemenin akma yüzeyleri tahmin edilmiş ve yüzeyler şekilde görüldüğü gibi birbirleriyle kıyaslanmıştır. Karşılaştırmada, akma yüzeyleri $\bar{\sigma}_{XY}=0,5$ için çizilmiştir.



Şekil 5.3. Her iki kriter için akma yüzeyleri

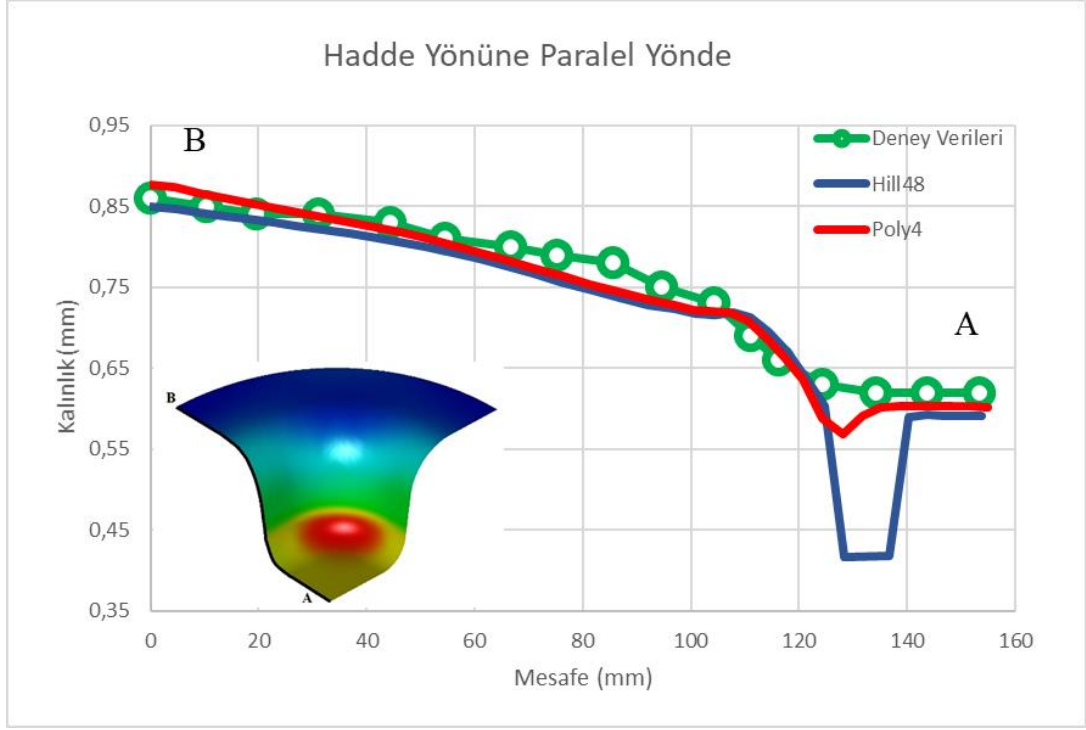
5.1. Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

Bu bölümde her iki kritere göre dikdörtgen kap derin çekme prosesinin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve analizlerden tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada parçanın üç yöndeki kalınlık dağılımı ve taban geometrisi dikkate alınmıştır.

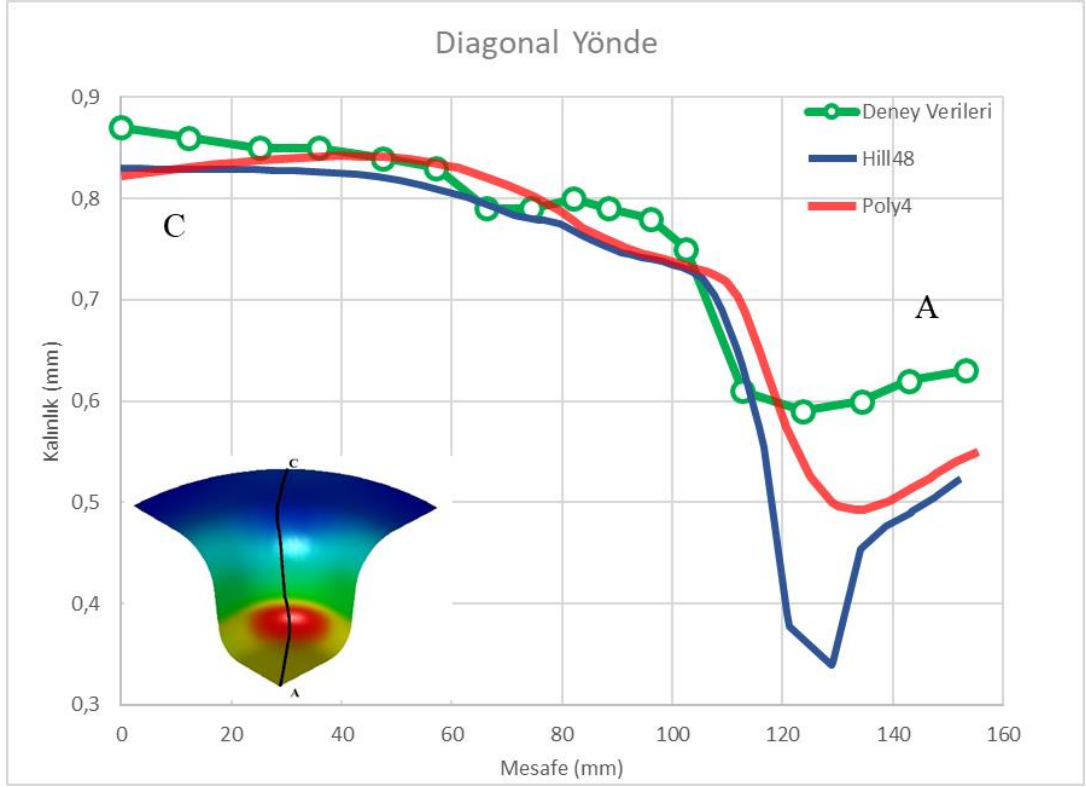
5.1.1. Kalınlık dağılımlarının tahmini ve deneyle karşılaştırma

Şekillendirilmiş parça lazerle üç yönde kesilmiştir ve kesilen bölgelerden noktasal mikrometre ile kalınlıklar ölçülerek deneysel kalınlık dağılımları belirlenmiştir. Ardından her iki kritere göre gerçekleştirilmiş analizlerden tahmin edilen kalınlık

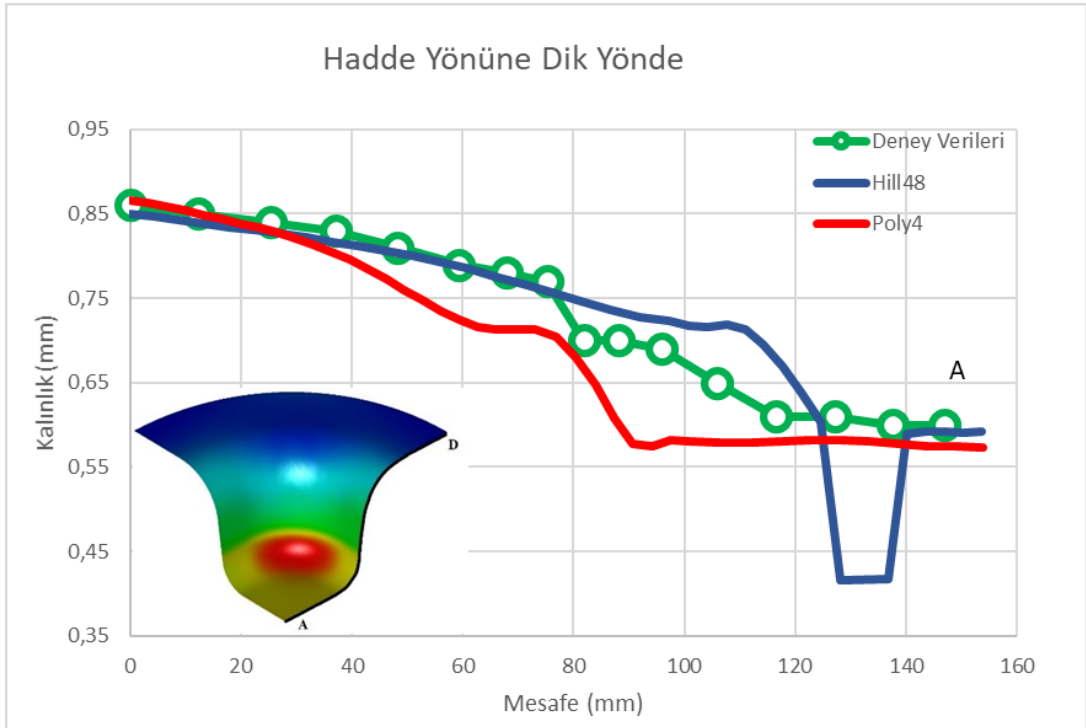
dağılımları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve üç yön (hadde yönüne paralel, diyagonal ve dik) için sonuçlar Şekil 5.4., 5.5. ve 5.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Hadde yönüne paralel yönde kalınlık dağılımı



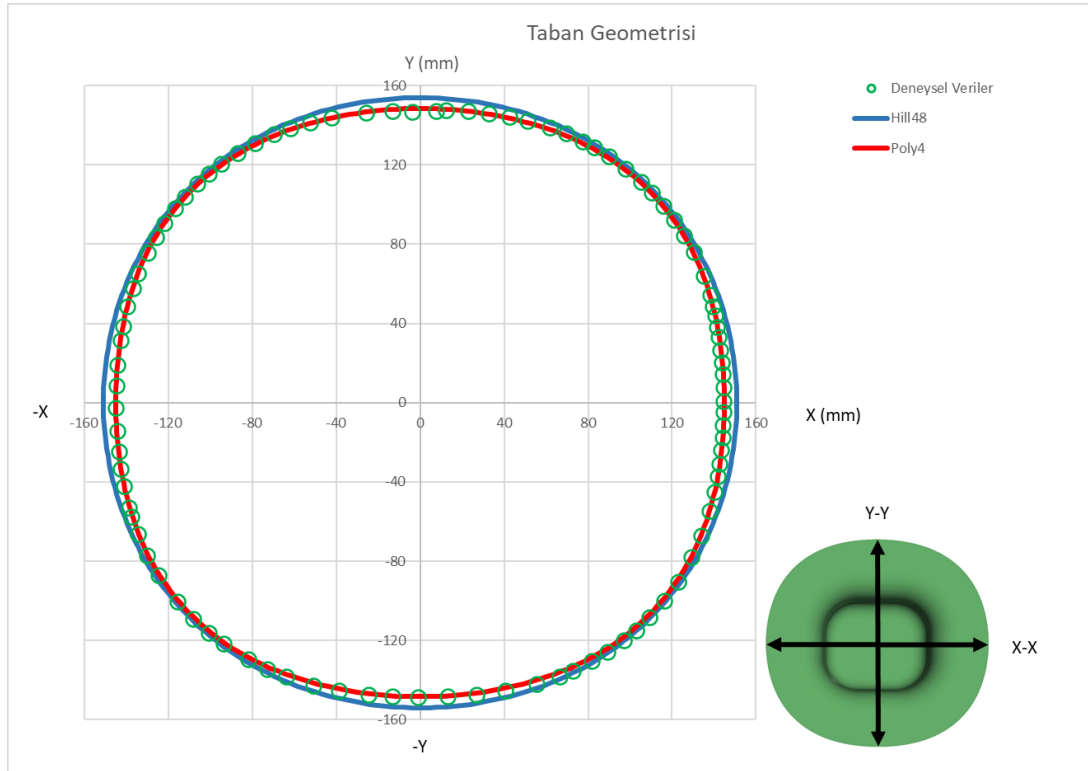
Şekil 5.5. Hadde yönüne diagonal yönde kalınlık dağılımı



Şekil 5.6. Hadde yönüne dik yönde kalınlık dağılımı

5.1.2. Dikdörtgen kap taban profilinin tahmini ve deneyle karşılaştırılması

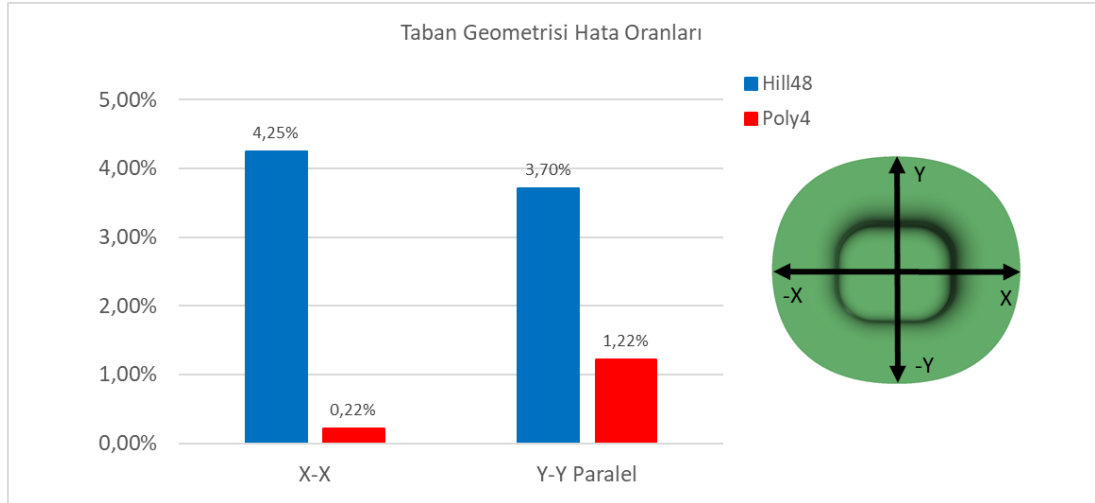
Şekillendirilmiş parçalar taranmış ve parçaların taban profilleri deneysel olarak elde edilmiştir. Kriterin değerlendirilmesinin ikinci kısmında analizlerden tahmin edilen taban profil geometrileri dikkate alınmış ve her iki kritere göre tahmin edilen taban profilleri deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Deneysel ve tahmini taban profilleri Şekil 5.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Tahmini ve deneysel kap taban profillerinin karşılaştırılması

Deney ve tahmin sonuçlarından her iki kriter için hadde yönüne paralel (X-X) ve dik (Y-Y) yönlerindeki hata oranları belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 5.8.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Hata oranları Denklem 5.1'e göre belirlenmiştir.

$$\%Hata = \frac{|Deneysel\ de\u011fer - Teorik\ de\u011fer|}{Deneysel\ de\u011fer} \quad (5.1)$$



Şekil 5.8. Taban ölçüleri için hata oranlarının karşılaştırılması

BÖLÜM 6. DEĞERLENDİRME

Bu bölümde sonuçlar incelenmiş ve Poly4 kriterinin tahmin yeteneği değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelere göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- a. Akma gerilmesi oranları ve Lankford katsayılarının sac düzlemindeki değişim sonuçlarından, Hill48 kriterine ait tahminlerin, Poly4 kriterine kıyasla deneysel sonuçlardan daha uzak olduğu görülmüştür. Bu sonuç, Hill48 kriterinin katsayı tanımlama prosedürünün yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Bölüm 2’de belirtildiği gibi Hill48 kriterine ait katsayılar ya gerilme oranlarına göre ya da r değerlerine göre hesaplanmakta, her iki parametreyi de aynı anda göz önüne almamaktadır. Bu nedenle kriter gerilme oranlarının değişimini doğru tahmin edebilirken, r değişimini tahmin edememekte, ya da r değişimini tahmin edebilirken gerilme oranları değişimini doğru tahmin edememektedir. Ayrıca Hill48 kriteri düzlem gerilme durumunda dört katsayı ile tanımlanırken, Poly4 kriteri dokuz katsayı ile ifade edilmektedir. Parametre sayısının az olması da Hill48 kriterinin tahmin yeteneğini düşürmektedir.
- b. Kriterlere göre tahmin edilen akma yüzeyi şekillerinden, gerilme tabanlı Hill48 kriteri ve Poly4 kriterine ait akma yüzeyleri arasında önemli bir farkın olmadığı, r tabanlı Hill48 kriterine ait yüzeyin ise diğerlerine göre daha küçük olduğu görülmektedir. Buradan r tabanlı Hill48 kriterine göre plastik şekil değişiminin daha kolay gerçekleşeceği söylenebilir.
- c. Üç yönde yapılan teorik ve deneysel kalınlık dağılımı karşılaştırmalarından Poly4 akma kriterinin, Hill48 kriterine kıyasla üç yönde de deneysel sonuçlara daha yakın olduğu görülmüştür. İncelmenin en fazla olduğu noktalarda, hadde yönüne

paralel yön için Hill48 kriteri %32 hata oranı ile tahminde bulunurken, Poly4 %8 oranında, diagonal yön için Hill48 kriteri %42, Poly4 %17, dik yönde ise Hill48 %30, Poly4 ise %3,3 hata oranı ile tahminde bulunmuştur.

- d. Taban geometrisi profillerine bakıldığında Poly4 kriterinin deney sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür. Parça tabanının iki eksendeki uzunlukları açısından incelendiğinde, hadde yönüne paralel yönde Hill48 kriteri %1,22 hata oranı ile tahminde bulunurken, Poly4 %3,7 hata oranı ile, hadde yönüne dik yönde ise Hill48 %4,25, Poly4 ise %0,22 hata oranları ile tahminde bulunmuşlardır.

Bu çalışmanın sonucunda Poly4 kriterinin AISI-304 paslanmaz çeliğinin anizotropik davranışını hassas bir şekilde modelleyebildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Wang, C., Zhang, X., Shen, G., Wang, Y., One-step inverse isogeometric analysis for the simulation of sheet metal forming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 349, 458-476, 2019.
- [2] Vatansever, H., Esener, E., Sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin sac metal şekillendirme simülasyon süresi ve hassasiyetine etkisinin tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 92-108, 2019.
- [3] Hosford, W. F., Caddell, R. M., *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge University Press, 2011.
- [4] Hou, Y., Min, J., Lin, J., Liu, Z., Carsley, J. E., Stoughton, T. B., Springback prediction of sheet metals using improved material models. *Procedia Engineering*, 207, 173-178, 2017.
- [5] Esener, E., Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 171-181, 2019.
- [6] 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.
- [7] Hill, R., *The mathematical theory of plasticity*, Clarendon. Oxford, 613, 614, 1950.
- [8] Gotoh, M., A theory of plastic anisotropy based on a yield function of fourth order (plane stress state) —I. *International Journal of Mechanical Sciences*, 19(9), 505-512, 1977.
- [9] Gotoh, M., A theory of plastic anisotropy based on yield function of fourth order (plane stress state) —II. *International Journal of Mechanical Sciences*, 19(9), 513-520, 1977.
- [10] Tong, W., On the certification of positive and convex Gotoh's fourth-order yield function. In *Numisheet Conf Series*, 1063, 1-6, 2018.

- [11] Hill, R., Theoretical plasticity of textured aggregates. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. Cambridge University Press, 85(1), 179-191, 1979.
- [12] Tong, W., Generalized fourth-order Hill's 1979 yield function for modeling sheet metals in plane stress. *Acta Mechanica*, 227(10), 2719-2733, 2016.
- [13] Cazacu, O., Barlat, F., Generalization of Drucker's yield criterion to orthotropy. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 6(6), 613-630, 2001.
- [14] Hu, W., Characterized behaviors and corresponding yield criterion of anisotropic sheet metals. *Materials Science and Engineering: A*, 345(1-2), 139-144, 2003.
- [15] Hu, W., An orthotropic yield criterion in a 3-D general stress state. *International Journal of Plasticity*, 21(9), 1771-1796, 2005.
- [16] Soare, S. C., On the use of homogeneous polynomials to develop anisotropic yield functions with applications to sheet forming. University Of Florida, Doctoral dissertation, 2007.
- [17] Krabbenhoft, K., Basic computational plasticity. Lecture Notes, 2002.
- [18] Ince, A., Development of computational multiaxial fatigue modelling for notched components., Universty of Waterloo, Mechanical Engineering, 2012.
- [19] Banabic, D., Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation. Springer Science & Business Media, 2010.
- [20] Şener, B., Çift gözlü kapların parçalı bastırıcı ile derin çekilmesinde en iyileme amaçlı bir algoritma geliştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, 2017.
- [21] Bakbak, O., Köşe kaynak konstrüksiyonlarının statik dayanımının incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [22] Chaboche, J. L., Nonlinear computational mechanics, Elasto-Plasticity, Course note, 2009.
- [23] Janbakhsh, M., Loghmanian, S. M. R., Djavanroodi, F., Application of different Hill's yield criteria to predict limit strains for aerospace titanium and aluminum sheet alloys. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 7, 35-44, 2014.
- [24] Slota, J., Spisak, E., Comparison of the forming- limit diagram (FLD) models for drawing quality (DQ) steel sheets. *Metalurgija*, 44(4), 249-253, 2005.

- [25] Djavanroodi, F., Derogar, A., Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets. *Materials & Design*, 31(10), 4866-4875, 2010.
- [26] Kılıç, S., Öztürk, F., Toros, S., Çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarında Hu2003 akma kriteri performansının araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 1-18, 2019.
- [27] <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>., Erişim Tarihi: 14.02.2020.
- [28] Çapan, L., *Metallere plastik şekil verme. Çağlayan Kitabevi* 3. Baskı, 1999.
- [29] Woodthorpe J, Pearce R. The anomalous behavior of aluminum sheet under balanced biaxial tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 12, 341-347, 1969.
- [30] Rollett, A., *Plastic anisotropy: Yield surfaces. Carnegie Mellon University Department of Materials Science and Engineering, Course note*, 2011.
- [31] Rockafellar, R. T., *Convex analysis* (28). Princeton University press, 1970.
- [32] <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>., Erişim Tarihi: 14.08.2020.
- [33] Yadav, A. D., *Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming. The Ohio State University, Doctoral dissertation*, 2008.
- [34] Habraken, A. M., *Modelling the plastic anisotropy of metals. Archives of Computational Methods in Engineering*, 11(1), 3-96, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Elif Sıla SELEK KILIÇARSLAN, 31.01.1989'da İstanbul'da doğdu. İlköğretim, ortaöğretim ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2007 yılında Arnavutköy Korkmaz Yiğit YDA Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü'nü 2011 yılında terk etti. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi çift anadal programı olarak Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde de lisans eğitimine başladı. 2015 yılında Makine Mühendisliği Bölümü'nü, 2017 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü bitirdi. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Tasarım ve İmalat'ı Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2019 yılında İstanbul Gedik Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevi yapmaktadır.