

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

**DP VE TRIP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İÇİN SONLU  
ELEMANLAR TABANLI ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK  
TAHMİNİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Can KUMLU**

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

**Haziran 2018**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

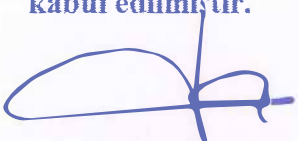
DP VE TRIP YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İÇİN SONLU  
ELEMENLAR TABANLI ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK  
TAHMİNİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can KUMLU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 04.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / ~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Mehmet FIRAT  
Jüri Başkanı



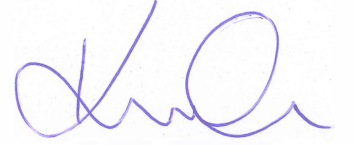
Dr. Öğr. Üyesi  
Osman Hamdi METE  
Üye

Dr. Öğr. Üyesi  
Emre ESENER



## 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.



Can KUMLU

21.05.2018

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni yönlendiren, benim için bir deniz feneri görevi üstlenmiş danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Fırat'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans yapmamda en büyük destekçim olan aileme; anneme ve babama, en derin minnetlerimle, şükranlarımla.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Literatür Özeti .....	2
1.2. Çalışmanın Ana Hatları .....	5
BÖLÜM 2.	
SAC METALLERDE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK .....	7
2.1. Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramları .....	8
2.2. Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrileri ve Kullanılan Teorik Modeller .....	9
2.3. Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrilerinin Deneysel Yöntemlerle Elde Edilmesi .....	11
2.3.1. Izgara deseninin oluşturulması (Gridleme) .....	11
2.3.2. Şekillendirilebilirlik testleri .....	12
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ .....	16
3.1. Sonlu Elemanlar Ağ Yapısının Oluşturulması .....	18
3.2. Malzeme Davranışının Modellenmesi .....	20
3.3. Sınır Şartları .....	20

## BÖLÜM 4.

UYGULAMA ÇALIŞMALARI .....	21
4.1. DP600 ve TRIP600 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri ...	21
4.2. Kubbe Çekme Testi Sonuçları .....	23
4.3. Kare Kutu Çekme Testi Sonuçları .....	25
4.4. Nakajima Testinin Sonlu Elemanlar Analizi .....	26
4.4.1. Nakajima testinde ağ yapısının oluşturulması .....	28
4.4.2. Malzeme davranışının modellenmesi .....	29
4.4.3. Keeler (LS-Dyna) şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin tanımlanması .....	33
4.4.4. Sınır şartlarının tanımlanması .....	34
4.4.5. DP600 çeliği Nakajima testi sonlu elemanlar analizi .....	35
4.4.6. TRIP600 çeliği Nakajima testi sonlu elemanlar analizi .....	39
4.5. Kare Kutu Çekme Testinde Şekillendirilebilirlik Sınırının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi .....	42
4.5.1. Kare kutu çekme testinin modellenmesi ve ağ yapısının oluşturulması .....	46
4.5.2. Malzeme davranışının modellenmesi .....	47
4.5.3. Şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin tanımlanması .....	47
4.5.4. Sınır şartlarının tanımlanması .....	48
4.5.5. DP600 çeliği kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi .....	49
4.5.6. TRIP600 çeliği kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi ...	50

## BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	52
KAYNAKLAR .....	54
EKLER .....	60
ÖZGEÇMİŞ .....	124

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AHSS	: Advanced High Strength Steel
AISI	: American Iron and Steel Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DOE	: Design of Experiment
DP	: Dual Phase
$d_x, d_y, d_z$	: x, y ve z yönünde öteleme
E	: Elastisite Modülü
F	: Kuvvet
FEM	: Finite Element Method
F, G, H	: Hill48 akma fonksiyonu parametreleri
FFLD	: Fracture Forming Limit Diagram
FLC	: Forming Limit Curve
FLD	: Forming Limit Diagram
FLSD	: Forming Limit Stress Diagram
HDG	: Hot Deep Galvanized
K	: Mukavemet katsayısı
m	: Malzemenin kafes yapısı katsayısı
n	: Pekleşme üsteli
NADDRG	: North American Deep Drawing Research Center
R	: Anizotropi katsayısı
$R_0$	: Hadde yönündeki anizotropi katsayısı
$R_{45}$	: Hadde yönüne 45 derecedeki anizotropi katsayısı
$R_{90}$	: Hadde yönüne dik anizotropi katsayısı
$r_x, r_y, r_z$	: x, y ve z yönünde dönme
SE	: Sonlu elemanlar
ŞSE	: Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrisi
ŞSD	: Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramı

$t$	: Sac kalınlığı
TRIP	: Transformation Induced Plasticity
$\nu$	: Poisson oranı
$\varepsilon$	: Gerinim
$\varepsilon_p$	: Plastik gerinim
$\varepsilon_0$	: Dikey eksen üzerindeki majör gerinim değeri
$\varepsilon_1$	: Majör gerinim
$\varepsilon_2$	: Minör gerinim
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_{ij}$	: Gerilme tensörü
$\sigma_y$	: Akma gerilmesi



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Araçlarda kullanılan malzemelerin 2015 yılına ait yüzdeleri .....	2
Şekil 2.1. Tipik bir şekillendirme sınır diyagramı .....	9
Şekil 2.2. Marciniak testinin şematik gösterimi .....	13
Şekil 2.3. Nakajima testinin şematik gösterimi .....	14
Şekil 2.4. ASTM 2218-02 standardına göre Nakajima test numuneleri .....	14
Şekil 2.5. a) Şekillendirme sonrası ölçüm, b) Şekillendirme esnasında ölçüm .....	15
Şekil 3.1. Sonlu elemanlar analizi ile kritik bölgenin tayin edilmesi .....	17
Şekil 3.2. Sonlu elemanlar yönteminde izlenen iş akış şeması .....	18
Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modelinde elemanlar ve düğüm noktaları .....	18
Şekil 3.4. a) Hughes-Liu, b) Belytschko-Tsay, c) Full Integrated kabuk eleman formülasyonu .....	19
Şekil 4.1. TRIP600 ve DP600 çeliklerinin çekme eğrisi.....	23
Şekil 4.2. DP600 çeliğinin deneysel şekillendirilebilirlik sınır diyagramı .....	24
Şekil 4.3. TRIP600 çeliğinin deneysel şekillendirilebilirlik sınır diyagramı .....	25
Şekil 4.4. Kare kutu çekme testinde a) Servohidrolik pres takımı, b) sacın hizalanması .....	25
Şekil 4.5. Kare kutu çekme testinde buruşma ve yırtılma .....	26
Şekil 4.6. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çözüm prosedürünün iş akış şeması	27
Şekil 4.7. Nakajima test takımı a) Tutucu, kalıp, zımba ve sacın izometrik görünüşü, b) Üst görünüşü .....	28
Şekil 4.8. a) 25 mm genişliğinde çentikli numune, b) 200x200 mm boyutlarındaki numune .....	28
Şekil 4.9. Nakajima test takımında oluşturulan ağ yapısı .....	29
Şekil 4.10 Swift pekleşme kuralına göre katsayıların eğrisel olarak elde edilmesi .	32
Şekil 4.11. Nakajima testinde kalıp hızı – zaman grafiği .....	34
Şekil 4.12. Nakajima testinde tutucu kuvveti – zaman grafiği .....	34

Şekil 4.13. DP600 çeliğinin iki farklı malzeme modeliyle elde edilen gerinim yolları .....	35
Şekil 4.14. DP600 çeliğine ait şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin karşılaştırılması .....	36
Şekil 4.15. DP600 çeliğinde malzeme modeli ve sınır eğrilerinin yırtılma yüksekliğine etkisi .....	37
Şekil 4.16. DP600 çeliğinin Nakajima test numunelerinde görülen yırtılma davranışları .....	38
Şekil 4.17. TRIP600 çeliğinin iki farklı malzeme modeliyle elde edilen gerinim yolları .....	39
Şekil 4.18. TRIP600 çeliğine ait şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin karşılaştırılması .....	40
Şekil 4.19. TRIP600 çeliğinde malzeme modeli ve sınır eğrilerinin yırtılma yüksekliğine etkisi .....	41
Şekil 4.20. DP600 çeliğinin Nakajima test numunelerinde görülen yırtılma davranışları .....	42
Şekil 4.21. Kare kutu çekme testinde sac metalin gerinim durumları .....	43
Şekil 4.22. Kare kutu çekme testinde radyüs bölgesine ait gerinim yolu .....	43
Şekil 4.23. Aynı gerinim yoluna sahip bölgelerin yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırılması (DP600).....	44
Şekil 4.24. Aynı gerinim yoluna sahip bölgelerin yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırılması (TRIP600).....	45
Şekil 4.25. Kare kutu çekme testinde a) Kalıp, zımba ve sacın izometrik görünüşü, b) Üstten görünüşü .....	46
Şekil 4.26. a) Sac metalde oluşturulan ağ yapısı, b) Test takımında oluşturulan ağ yapısı .....	47
Şekil 4.27. Kare kutu çekme testinde kalıp hızı – zaman grafiği .....	48
Şekil 4.28. Kare kutu çekme testinde tutucu kuvveti – zaman grafiği .....	48
Şekil 4.29. DP600 çeliğinin Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi .....	49
Şekil 4.30. DP600 çeliğinin deneysel sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi .....	50

Şekil 4.31. TRIP600 çeliğinin Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi .....	50
Şekil 4.32. TRIP600 çeliğinin deneysel sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi .....	51

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Test yöntemlerinin şekillendirilebilirlik üzerine etkisi .....	7
Tablo 4.1. DP600 çeliğinin kimyasal kompozisyonu .....	22
Tablo 4.2. TRIP600 çeliğinin kimyasal kompozisyonu .....	22
Tablo 4.3. TRIP600 ve DP600 çeliklerinin mekanik özellikleri .....	24
Tablo 4.4. Hill48 malzeme modelinde kullanılan parametreler.....	30
Tablo 4.5. Barlat89 malzeme modelinde kullanılan parametreler.....	33

## ÖZET

Anahtar kelimeler: DP600, TRIP600, şekillendirilebilirlik sınır diyagramı, kubbe çekme testi, malzeme modeli, Keeler-Brazier

Bu çalışmada, çift fazlı DP600 ve TRIP600 çeliklerinin şekillendirilebilirlikleri, sonlu elemanlar analizleri üzerinde yapılan hassasiyet çalışması ile incelenmiştir.

Şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin diyagramın her iki tarafında da elde edilmesini sağlayan düzlem dışı gerinim testlerinden Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi, iki farklı yüksek mukavemetli çelik için simüle edilmiştir. ASTM 2218-02 standartlarına göre boyutlandırılan her bir numunede, sonlu elemanlar analiziyle yırtılma yüksekliği ve yırtılma davranışı elde edilmiştir. Bu test üzerindeki hassasiyet çalışması, iki farklı malzeme modeli ve üç farklı sınır eğrisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Böylece sac metalin maruz kalabileceği her bir gerinim durumundaki etkileri incelenebilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen malzeme modelleri Hill48 ve Barlat89'dur. Her iki malzeme modeline göre numunelerin gerinim yolları, yırtılma davranışları ve yırtılma yükseklikleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde, farklı gerinim durumlarını temsil eden numunelerin bir diğer hassasiyet çalışması şekillendirme sınır eğrileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, DP600 ve TRIP600 çeliklerine ait deneysel sınır eğrisi, Ls-Dyna sonlu elemanlar programında tanımlı Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ve orijinal Keeler-Brazier eğrisi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar programında tanımlı Keeler sınır eğrisi ile orijinal Keeler-Brazier eğrisinin farkı belirtilmiş, sınır eğrilerinin malzemenin şekillendirilebilirliğine ve sonlu elemanlar analizinin tahmin performanslarına etkisi incelenmiştir.

Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildikten sonra, kare kutu çekme testinde yırtılmanın görüldüğü ve yüksekliğinin ölçüldüğü köşe radyüsü ile aynı gerinim yolu üzerinden Nakajima test numunesi ile bir korelasyon kurulmuştur. Hassasiyet analizi yapılan malzeme modellerinin ve sınır eğrilerinin tahmin performansı, kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Araştırmada elde edilen sonuçlarda, malzeme modellerinin ve şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin, sonlu elemanlar analizinin hassasiyeti üzerinde önemli bir etkisi olduğu gösterilmiştir.

# EVALUATION OF PREDICTION FINITE ELEMENT BASED FORMABILITY FOR DP AND TRIP HIGH STRENGTH STEELS

## SUMMARY

Keywords: DP600, TRIP600, forming limit diagram, dome test, material model, Keeler-Brazier

In this study, the formability of the dual-phase DP600 and TRIP600 steels were investigated by a sensitivity study based on the finite element analysis.

Finite element analysis of Nakajima test were simulated according to ASTM 2218-02 standard for both steels aforementioned above. The sensitivity study on this test was performed on two different material models and three different forming limit curves. Thus, the effects of different strain state can be observed. In this study, we chose two different materials models which are Hill48 and Barlat89. The effects of material models on strain path, fracture behaviour and failure height were investigated in all Nakajima samples. Other sensitivity study was performed by using 3 different forming limit curves: experimental forming limit curves belong to materials DP600 and TRIP600, Keeler (Ls-Dyna) forming limit curve which is defined in Ls-Dyna for user friendly utilization, and the last one is original Keeler-Brazier equation. By comparing this limit curves, we also clarified the difference between Keeler (Ls-Dyna) and Keeler-Brazier equation and revealed the effect of forming limit curves on finite element prediction performance.

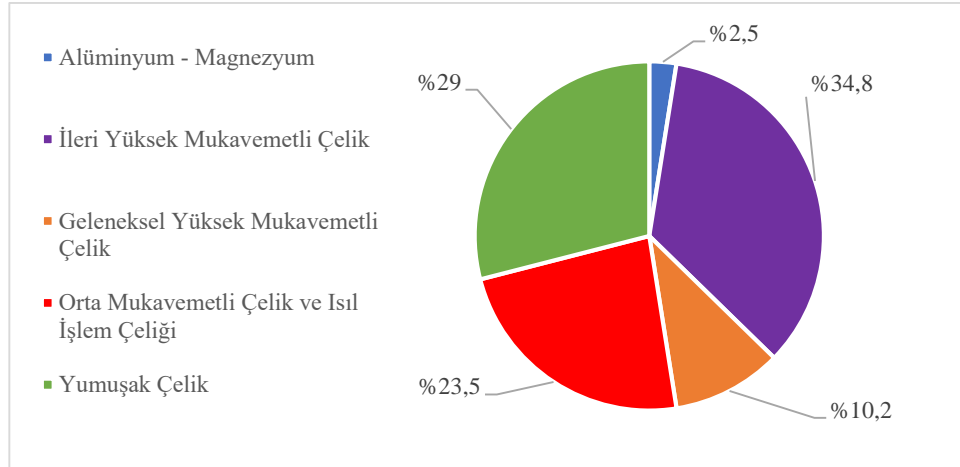
After this stage, a correlation was established between Nakajima test sample and square cup drawing test. We evaluated the prediction performance of finite element technique with different forming limit curves and models in square cup radius, where is counted as a failure height in this test, shares the same strain state with one of the Nakajima samples.

According to the findings obtained in this research, it has been shown that material models and forming limit curves have a significant effect on the precision of the analysis of the finite element prediction performance.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Üretimde pratik ve ekonomik oluşun ön planda tutulduğu günümüz teknolojisinde, sac metallere üretilen parçalar, görece pahalı olan döküm, dövme ve talaşlı imalat yoluyla üretilmiş parçaların yerini almaktadır [1]. Sac metallere, haddeleme milleri aracılığıyla düşük maliyetlerle üretilebilirler ve otomotiv, yapı malzemeleri, havacılık ve ev aletlerine kadar çeşitli alanlarda karşımıza çıkmaktadırlar [2]. Özellikle otomotiv sektöründe, bir aracın gövdesini ve iskeletini oluşturan sac metallere sayısı, bu alana olan ilginin veya başka bir deyişle yatırımın, mühendisliğin ve araştırma-geliştirme çalışmalarının artmasına sebep olmuştur. Çevre dostu yaklaşımların da benimsenmesiyle ortaya çıkan düşük karbon emisyonu bilinci de, bu alandaki bir başka motivasyon kaynağıdır. Gerek üretici, gerekse tüketici tarafından benimsenin bu yaklaşım, tahterevallinin bir ucundaki üretici için, araç ağırlıklarının azaltılması anlamını da taşımaktadır. Bu bağlamda, otomotiv sektörünün dünya çapındaki konumu düşünülürse, sac metallere şekillendirilebilirliği hakkında edinilecek olan bilginin önemi gayet açıktır.

Yukarıda bahsedilen motivasyonla, araç ağırlıklarının azaltılmasında bir başka önemli rolü de otomobillerde kaporta, gövde ve panel parçaları için kullanılan ileri teknoloji ürünü yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) üstlenmiştir [3]. İleri teknoloji ürünü yüksek mukavemetli çelik grubundan çift fazlı DP (Dual Phase) çelikleri ve deformasyonla pekleşme gösteren TRIP (Transformation Induced Plasticity) çelikleri otomotiv sektöründe tercih edilmektedir [4]. Şekil 1.1.'de Kuzey Amerika'da hafif araç tasarımı için kullanılan malzemelerin 2015 yılındaki yüzdeleri verilmiştir [5].



Şekil 1.1. Araçlarda kullanılan malzemelerin 2015 yılına ait yüzdeleri [5]

Otomotiv endüstrisinde üretilmesi planlanan bir sac parçanın üretimi için çoğu zaman birden fazla işlem adımına ve her işlemde farklı bir takım-kalıp ekipmanlarına ihtiyaç duyulur [6]. Bu nedenle, malzemelerin her bir aşamadaki şekillendirilebilirliklerinin deneysel olarak hassas bir şekilde belirlenmesi, zaman ve maliyet açısından dezavantajlıdır. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), en doğru malzeme seçiminden, en düşük maliyetli prosese kadar; en uygun yükleme koşullarının belirlenmesinden, yırtılma davranışına kadar, bu noktada endüstrinin ihtiyacını karşılayan en kullanışlı yöntemlerden birisidir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şekillendirilecek olan sac metal hakkında elde edilecek tüm bu bilgiler, tasarımda ve imalatta harcanan süreleri kısaltacak, en uygun maliyetle tüketiciyi memnun edecek ürünün elde edilmesini sağlayacaktır. Fakat imalat öncesi çalışılan bu evrede, sonlu elemanlar programlarında kullanılan tüm parametrelerin niteliği kesinlikle çok iyi bilinmelidir.

### 1.1. Literatür Özeti

Araçlardaki emniyet standardını daha düşük maliyetle sağlayabilmek için geliştirilen yeni nesil çelikler ve bu çeliklerin araçlardaki kullanım oranının yıllara göre artış gösterdiği bilinmektedir [3-6]. Araç gövdelerinde kullanılan malzemelerin birbirinin yerini alması, malzemelerin şekillendirilebilme yeteneklerinin belirlenmesine yönelik özellikle akademik anlamda olan ilgiyi artırmıştır.



Metallerin şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlenmesi için birçok test düzeneği geliştirilmiştir. Bu deneysel test düzenekleri, farklı gerinim yolları elde edebilmek için, farklı kalıp, zımba ve numune geometrileri kullanmaktadırlar. Tüm bu iş parçalarının üretimi, ömrü, bakımı ve çeşitliliği düşünüldüğünde deneysel çalışmalar yüksek bir maliyete sahiptir [4]. Gerek yüksek maliyet gerekse gelişen teknoloji nedeniyle, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar, literatürde çoğunluğu oluşturmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan benzetim testlerinde, malzemenin davranışının modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Modelleme; malzemenin şekillendirme esnasında düzlem içinde barındırdığı asal gerinim değerlerinden kırılma davranışına kadar, birçok konuda prosesin doğru ve hassas simüle edilebilmesine etki etmektedir. Öztürk ve Lee [7] yaptıkları çalışmada, ABAQUS programını kullanarak Nakajima testini simüle etmiş, elde edilen gerinim yollarını deneysel gerinim yolları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar son derece uyumlu çıkmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şekillendirilebilirlik sınır diyagramının hem sağ hem de sol tarafının elde edilebildiğini göstermişlerdir. Günümüzde kullanılan malzeme modellerinin hepsinde, deneysel testlerden elde edilmesi gereken parametreler bulunmaktadır. Bruschi ve ark. [8], malzeme modellerinin gerek duyduğu deneysel testlerin yeterliliğini ve endüstriyel ihtiyacı ne kadar karşılayabildiğini araştırmışlardır. Günümüzde kullanılan malzeme modellerini, pekleşme kuralı ve akma kriterleri üzerinden de karşılaştırmışlardır.

Bir malzemenin plastisite modellemesinin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için akma yüzeyine, akma kriterine ve pekleşme kuralına ihtiyaç vardır. Öztürk ve ark. [9], DP600 çift fazlı çeliğinin şekillendirilebilirlik sınır diyagramına anizotropik akma kriterlerinin etkisini araştırmışlardır. Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d akma kriterlerini aynı hasar kriteri ile kullanmış ve deneysel şekillendirme sınır diyagramı ile en uygun eğriyi YLD200-2d akma kriterinin verdiğini göstermişlerdir. Fırat [10] yaptığı bir çalışmada, otomotiv sacları için orantısız olmayan gerinim yolları için de kullanılacak bir teorik şekillendirilebilirlik sınır eğrisi önermiştir. Hasar tahminini, Hill'in bölgesel boyun verme ve Swift'in yayılmış boyun verme kriterini kullanarak

yapmış, çalışmasında TRIP600 ve DP980 çeliklerini kullanmıştır. Diyagramın sol tarafı deneysel verilere göre gayet başarılı tahmin edilmişken, sağ tarafında daha emniyetli bir sınır oluşturmuştur. Kılıç ve Öztürk [11], DP600 ve TWIP900 çeliklerinde pekleşme modellerinin şekillendirilebilirlik sınır eğrilerine olan etkisini karşılaştırmışlardır. Swift kuralının TWIP çeliğinde deneysel en yakın eğriyi sonucu verdiğini göstermişlerdir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin deneysel olarak elde edilmesinin uzun süreli ve maliyetli oluşu, nümerik ve teorik şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin oluşturulmasını sağlamıştır. Teorik sınır eğrileri, malzemenin modellenmesinde akma fonksiyonunun dışında bir de hasar kriterine ihtiyaç duyar. Habibi ve ark. [12], DP600 çift fazlı çeliğine farklı hasar kriterlerini farklı gerilme durumları için uygulayarak, kırılma davranışını incelemek istemişlerdir. Önce Nakajima testi gerçekleştirmişler, daha sonra modellerin kalibrasyonunu yapmışlardır. Denedikleri hasar kriterleri arasında sadece Maksimum Kayma Gerilmesi modelinin kırılma başlangıcını tahmin edebilmek için kalibre edilmesini gerektiğini göstermişlerdir. Öztürk ve Lee [13] bir başka çalışmalarında, tüm geleneksel hasar kriterlerinin şekillendirilebilirlik sınır diyagramındaki kullanımını araştırmışlardır. Araştırmalarında, hasar kriterlerindeki parametre seçiminin yapılabileceği optimum kalınlık gerinimlerini bulmuşlar ve Hill48 ve Mises malzeme modellerinde karşılaştırmışlardır. Sadece hasar kriteri kullanarak, tüm şekillendirilebilirlik sınır diyagramının elde edilemeyeceğini, daha çok modifikasyon gerektiğini söylemişlerdir. Peng ve ark. [14], tane boyutunun sünek hasara olan etkilerini, farklı hasar kriterleri kullanarak incelemişlerdir. Artan tane boyutunun şekillendirilebilirlik sınır eğrisini dikey ekseninde daha aşağıya çektiğini göstermişlerdir. Marciniak - Kuczynski ve GTN modelinin tane boyutu etkilerini en iyi yansıtan modeller olduğunu öne sürmüşlerdir.

İleri teknoloji ürünü yüksek mukavemetli çeliklerin şekillendirilebilirliklerine dair yapılan deneysel çalışmalar da bulunmaktadır. Oliver ve ark. [15], TRIP ve DP çeliklerinde düşük ve yüksek gerinim hızlarında mikroyapılarındaki değişiklikleri incelemişlerdir. TRIP çeliklerinin daha kompleks şekillendirme işlemlerini tolere edebileceğini ve DP çeliklerine göre daha çok enerji absorbe ettiğini göstermişlerdir.

Zhang ve ark [16], DP980 çeliği kullanarak Nakajima testinde sürtünmenin etkisini araştırmışlardır. Sac ve zımba arasındaki sürtünmenin, gerinim yolları üzerinde etkisinin az, gerinim hızı üzerinde yüksek bir etkisi olduğunu göstermişlerdir. Ve mevcut sürtünme şiddetinin kırılma noktasını değiştirdiğini belirtmişlerdir. Banabic ve ark. [17], Nakajima testinin yerine yeni bir prosedür önermişlerdir. Hidrolik şişirme yöntemi kullanarak, test numunelerinin üzerine çeşitli boyutlarda delikler açmışlar ve numuneyle zımba arasına taşıyıcı bir sac daha koymuşlardır. Buldukları şekillendirme sınır eğrisi, düzlem gerinim noktasında üst üste otururken, diyagramın sağ ve sol tarafında daha aşağıda çizilmiştir. Avantajlarını tüm gerinim yollarının elde edilmesi, test numunelerinin ve ekipmanların basitliği ve sürtünme kaynaklı etkilerin azaltılması olarak saymışlardır.

Kaynak araştırmasında anlatıldığı gibi, sac metallerin şekillendirilebilirlikleri hakkında elde edilecek bilgide, sonlu elemanlar yöntemi önemli bir rol oynamaktadır. Literatüre bakıldığında, malzemenin plastisite davranışının modellenmesinin; hasar kriterleri ve akma fonksiyonlarında yoğunlaşarak araştırmaların çoğunu oluşturduğu söylenebilir.

## **1.2. Çalışmanın Ana Hatları**

Bu tez çalışmasında, DP600 ve TRIP600 çeliklerinin şekillendirilebilirlikleri, sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Malzemelerin şekillendirilebilirlik yeteneklerinin farklı gerinim yollarını kapsayarak elde edilmesini sağlayan düzlem dışı gerinim testlerinden Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi iki farklı malzeme için gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde, malzeme davranışının modellenmesinin ve şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin hassasiyet çalışması yapılmıştır. Daha sonra, aynı gerinim yoluna sahip kare kutu çekme testi ile Nakajima testi arasında bir korelasyon kurulmuş, deneysel yırtılma yükseklikleri üzerinden tahmin performansı değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde, malzemelerin şekillendirilebilirlik limitlerinin bilinmesinde oldukça kullanışlı olan şekillendirme sınır diyagramları ve şekillendirme sınır eğrilerinden

bahsedilmiştir. Şekillendirme sınır eğrisinin deneysel olarak elde edilmesi ve gridlerin ölçümü anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, sac metal şekillendirme işlemlerinde sonlu elemanlar yönteminde hassasiyet, sonlu elemanlar yönteminin kullanımı ve önemi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde bu tez çalışmasında referans alınan deneysel veriler ve sonlu elemanlar analizi uygulama çalışmaları verilmiştir. Nakajima düzlem dışı gerinim testinin sonlu elemanlar analizinin her iki malzeme için de sonuçları verilmiştir. Sonlu elemanlar analizindeki hassasiyet çalışması, iki farklı malzeme modeli ve üç farklı şekillendirilebilirlik sınır eğrisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet çalışmasının ardından, sonlu elemanlar analiz sonuçları paylaşılmış, kare kutu çekme testi ile aynı gerinim yolu üzerinden kurulan korelasyonla kare kutu çekme testindeki deneysel yırtılma yüksekliğinin tahmin edilip edilemeyeceği araştırılmıştır.

Beşinci bölümde sonuçlar verilmiş, bir sonraki çalışmalar için öneride bulunulmuştur.

## BÖLÜM 2. SAC METALLERDE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK

Şekillendirilebilirlik kavramı, sac metaller bazında, malzemenin hasara uğramaksızın istenilen biçimde formlanabilme yeteneği olarak kullanılmaktadır. Sac metallerde şekillendirme işlemleri; basit bir bükme, derin çekme, gererek şekil verme, kesme veya boşaltma gibi tek adımlı olabileceği gibi, birkaçını kapsayarak çok adımlı da olabilir. Başarılı bir şekillendirme işleminde malzeme; nihai formda istenilen toleranslara sahip olmalı, yüzeyinde hatalar oluşmamalı, aşırı incelmeli ve hasara uğramamalıdır. Malzemenin şekillendirilebilirlik sınırının bilinmesi, bu noktada büyük önem arz etmektedir. Tablo 2.1.'de, malzemelerin şekillendirilebilirliklerini belirlemede kullanılan test yöntemleri, elde edilen çıktılar ve bunları etkileyen faktörler verilmiştir.

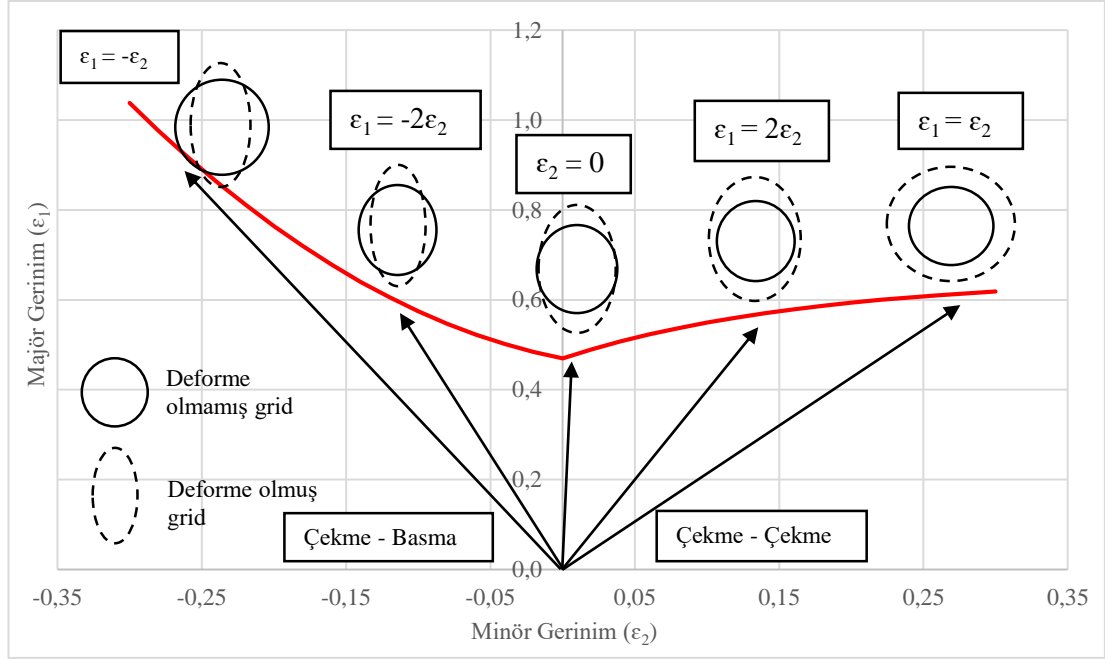
Tablo 2.1. Test yöntemlerinin şekillendirilebilirlik üzerine etkisi [18]

Şekillendirme Davranışı	Test Yöntemi	Tespit Edilen Şekillendirilebilirlik Parametresi	Şekillendirilebilirliği Etkileyen Parametreler
Şekillendirme Limiti	100 mm kubbe çekme testi	Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrisi (ŞSE)	Kalınlık, pekleşme üsteli
Keskin - kenar gerdirme sınırları	Delik genişletme testi	Delik genişleme miktarı (%)	Çekme gerilmesi, ortalama anizotropi değeri
Germe altında bükme sınırları	Açılı – bükme gerdirme testi	Yırtılma yüksekliği, germe altında büküm yeteneği	Çekme gerilmesi, ortalama anizotropi değeri
Geri esneme ve eğrilik	Kanal çekme testi	Geri esneme açısı, yan duvar eğrilik çapı	Akma gerilmesi, kalıp radyüsü, süzdürme çubuğu kuvveti, kalıp boşluğu
Germe şekillendirilebilirliği	Panel çekme testi	Yırtılma yüksekliği	Pekleşme üsteli, kalınlık
Germe çekilebilirliği	Kare çekme testi	Yırtılma yüksekliği, gerinim ölçümü	Homojen uzama, taslak büyüklüğü, yağlama, kaplama, kalınlık

Özellikle otomotiv sektöründe kullanımı da artan yüksek mukavemetli çeliklerin, şekillendirme sınırlarının bilinmesi; üretim öncesi süreçlerini kısaltacak, maliyeti düşürecek ve hatalı parça üretimi düşürülerek çevre kirliliğini de azalacaktır. Sac metallerin şekillendirilebilirliklerinin belirlenmesinde, şekillendirilebilirlik sınır diyagramı (ŞSD) gibi oldukça kullanışlı ve pratik yöntemler geliştirilmiştir. Bu diyagram, malzemenin şekillendirme sırasında yüzeyinde meydana gelen asal gerinimlerden oluşan bir yatay-dikey eksen uzayıdır ve gerinim tabanlıdır. Gerilme tabanlı diyagramlar da bulunmaktadır [19]. Ancak gerilmelerin numune üzerinden direkt olarak ölçülememesi, bu yöntemin kabulünü zorlaştırmıştır.

### 2.1. Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramları

Şekillendirilebilirlik sınır diyagramı (ŞSD), malzeme yüzeyinde yatay ve dikey eksenler boyunca oluşan gerinim kombinasyonlarının gösterildiği diyagramın adıdır ve aynı zamanda Keeler ile Goodwin tarafından geliştirildiği için Keeler-Goodwin diyagramı olarak da anılmaktadır [20]. Diyagram, sac metalin kare veya yuvarlak geometrilerde gridlenmesi ile deneysel olarak elde edilir. Sac metale işlenen bu gridlerin, majör ve minör doğrultudaki şekil değişimleri sırasıyla majör gerinim ( $\epsilon_1$ ) ve minör gerinim ( $\epsilon_2$ ) olarak eksenlere oturtulur. Yatay ekseninde minör, dikey ekseninde majör gerinimler temsil edilir. Majör gerinimler gerdirme sebebiyle her zaman pozitif değerlerdeyken, minör gerinimler sacın genişliğine göre negatif veya pozitif değerlerde olabilirler [21]. Şekillendirilebilirlik sınır diyagramları, parça üzerine işlenmiş olan gridlerde meydana gelen majör ve minör gerinim değerlerinin, şekillendirme işlemi boyunca belirli oranda bir yol izlediği varsayımına dayanır. Şekillendirilebilirlik sınırı diyagramları, orantısal gerinim yolları kabulü yapsalar da, gerçek anlamda malzemedeki meydana gelen deformasyon, özellikle çok adımlı proseslerde orantısal olmayan gerinim yollarına sahiptir [22]. Şekil 2.1.'de tipik bir şekillendirme sınır diyagramı, farklı gerinim yollarıyla bu gerinim yollarındaki grid şekil değişiklikleri ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Tipik bir şekillendirme sınır diyagramı

Şekillendirilebilirlik sınır diyagramları, malzemenin tek eksenli çekme gerinim halinden, dengeli iki eksenli çekme gerinim haline kadar birçok gerinim durumunu içermektedir. Malzemenin bölgesel boyun vermeden şekillendirilebilme sınırını gösteren eğriye ise şekillendirilebilirlik sınır eğrisi (ŞSE) denmektedir.

## 2.2. Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrileri ve Kullanılan Teorik Modeller

Sac metallerin, hasara uğramadan şekillendirilebilme yeteneklerini belirleyen sınır, şekillendirilebilirlik sınırıdır. Eğrinin yukarısında kalan bölge şekillendirme işleminde hasara sebep olacak majör gerinim değerlerini gösterir. Eğrinin altında kalan bölge ise, parçanın hasara uğramadan tolere edebileceği gerinim değerlerini göstermektedir. İyi bir şekillendirme işlemi, hasara uğramadan en yüksek gerinim değerlerine ulaşmalıdır. Şekillendirme sınır eğrisi, dikey eksen üzerinde ne kadar yüksek değerlere sahipse o kadar iyi bir şekillendirilebilirlik yeteneğine sahiptir. Şekillendirme sınır eğrileri; yağlama koşulları veya sürtünme, anizotropi katsayısı, pekleşme üsteli ve şekillendirme hızı gibi birçok faktörden etkilenir [23].

Şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin deneysel olarak elde edilmesi, oldukça uzun ve maliyetli bir işittir. Bu nedenle, teorik olarak çeşitli alternatif modeller geliştirilmiştir.

Bu teorik modeller; fenomenal metot, kararsızlık kriteri, Marciniak-Kuczynski modeli ve hasar teorisi olarak gruplandırılabilir [24].

Fenomenal model; Keeler ve Brazier'in yaptığı deneysel çalışmalar öncülüğünde Kuzey Amerika Derin Çekilebilirlik Araştırma Grubu (NADDRG) tarafından şekillendirme limitlerini belirleyebilmek amacıyla önerilmiştir [24]. Teorik model, gerekli parametre sayısı ve tespit kolaylığı nedeniyle oldukça avantajlıdır. Eğrinin elde edilebilmesi için öncelikle düzlem gerinim durumundaki majör gerinim değeri bulunmalıdır. Keeler - Brazier sınır eğrisindeki düzlem gerinim noktası, Denklem 2.1 ile elde edilmektedir [25].

$$\varepsilon_0 = \ln \left[ 1 + (23,3 + 14,13t) \cdot \frac{n}{0,21} \right] \quad (n < 0,21) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 - \varepsilon_2 \quad (\varepsilon_2 < 0) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_1 = \ln[0,6(\exp(\varepsilon_2) - 1)] + \exp(\varepsilon_0) \quad (\varepsilon_2 > 0) \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\varepsilon_0$ ; dikey eksen üzerindeki majör gerinim değerini,  $t$ ; milimetre cinsinden sacın kalınlığını ve  $n$  ise malzemenin pekleşme üstelini ifade etmektedir.  $\varepsilon_1$  malzeme yüzeyindeki majör gerinim,  $\varepsilon_2$  ise minör gerinim değeridir. Denklem 2.2 ve Denklem 2.3, minör gerinim değerlerine göre eğri noktalarını belirlemektedir.

Kararsızlık (instability) kriterinde, malzemenin şekillendirilebilirlik limitleri boyun verme olarak sınırlandırılır. Hill'in [26] bölgesel boyun verme ve Swift'in yayılmış boyun verme kriterleri bu grupta sayılabilir [24]. Hill, çalışmasında bölgesel boyun verme hareketinin gerinimin sıfır olduğu doğrultuda meydana geleceğini söylemiş ve dolayısıyla düzlem gerinim şartları altında çalışmıştır [27]. Hill'in kriteri, şekillendirilebilirlik sınır diyagramının sadece sol tarafında kullanılabilir. Swift'in yayılmış boyun verme kriteriyse maksimum kuvvet prensibine dayanır ve orantısal yüklemelerde sac metalin düzlemine etkileyen çekme kuvvetlerinden biri maksimum olduğu anda yayılmış boyun vermenin gerçekleşeceğini söylemektedir [28].

Marciniak – Kuczynski (M-K) modeli, malzemede meydana gelen hasarın, geometrik veya içyapıdan kaynaklı bir homojensizliğine dayandırmaktadır. Plastik akışın gelişip



değiştirdiği bir bölgesel kusura sahip numune geometrisi sayesinde, hasar tahmini yapan ilk matematiksel modeli sunmuşlardır [29]. Bu model, kusurlu bölge ile kusursuz bölge arasında cebirsel bir ilişki kurmaktadır.

Hasar teorileri ise, şekillendirme esnasında hasarın, önceden belirlenmiş olan hasar parametresinin kritik bir değere ulaşmasıyla gerçekleşeceği varsayımına dayanır. Sünek kırılma kriterleri, iki farklı yaklaşım üzerinden gruplandırılabilir: İlki, mikroboşlukların oluşması, büyümesi ve birleşmesi üzerine kuruluyken, bir diğeri deneysel kurallara dayanmaktadır [21]. Mikroboşluk tabanlı birçok hasar modeli geliştirilmiştir [30]. Üç eksenli gerilme hali ve Lode açısına göre üretilmiş çeşitli hasar modelleri de mevcuttur [31,32]. Deneysel kurallara dayanan kırılma kriterlerinde ise model parametreleri ölçülebilen değerler; gerilmeler, gerinimler veya çekme testi verileri olarak sayılabilir. Bu modellerde deformasyon geçmişinin de hesaba katılabilmesi için, gerinim yolundaki hasar fonksiyonunun integrali alınmalıdır [33].

### **2.3. Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrilerinin Deneysel Yöntemlerle Elde Edilmesi**

Şekillendirilebilirlik sınır diyagramı kavramını ilk ortaya atan Keeler ve Beckofen'in [34] yaptıkları deneysel çalışmaları olmuş ve ilk başta çift eksenli gerinim halinde çalışmışlardır; daha sonraları (1968) Goodwin [35] bu diyagramı çekme-basma bölgesi için de genişletmiştir [36]. Keeler, farklı yağlama koşulları ve farklı zımba geometrileri kullanarak diyagramın sağ ( $\epsilon_1 > 0$ ) tarafında çalışmıştır. Daha sonra bu diyagram, Goodwin tarafından sola doğru ( $\epsilon_2 < 0$ ) genişletilmiştir. Deneysel çalışmalarında grid analiz tekniği kullanmışlardır. Sac metallerin şekillendirilebilirlik sınırlarını belirlemek için, malzemenin üzerine şekillendirme işleminden önce, malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyonların ölçülebilmesi için ızgara deseninin (grid) oluşturulması gerekir

#### **2.3.1. Izgara deseninin oluşturulması (Gridleme)**

Grid analiz konsepti, ilk olarak Keeler tarafından önerilmiştir [34]. Gridler, genellikle kare veya daire şeklindedir. Dairesel gridler, şekillendirme esnasında deformasyona

uğrayarak elips formunu alırlar. Sac yüzeyine grid yapıları oluşturmanın birkaç yolu vardır. Serigrafi (ipek baskı), fotokimyasal gridleme, elektrokimyasal dağlama ve lazer ile oyma ile iş parçası üzerine ızgara deseni veya gridler oluşturulabilir [33].

Serigrafi yönteminde, üzerinde ızgara deseni bulunan ipek dolu bir tabla, sac metalin üzerine iyice bastırılır. Bir çekçek yardımıyla tabla üzerindeki ipeğe baskı oluşturulup, gridlerin negatifinin, düzgün ve belirgin bir şekilde sac metal üzerine geçmesi sağlanır. Grid dokusu silinebilir bir hassasiyete sahiptir. Elektrokimyasal damgalama metodunda, bir güç ünitesi sayesinde, şablondan sac metale desen arasından arklar oluşturarak grid dokusunun oluşması sağlanır. Bu metotta grid dokusu kalıcıdır [37].

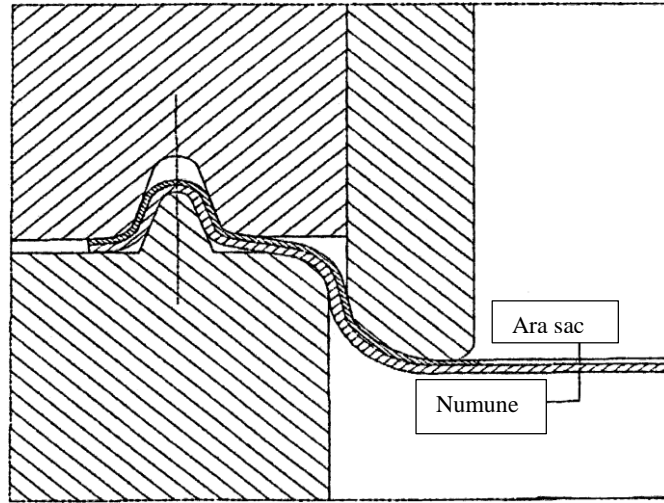
Gridleme metodu seçilirken; malzemeyi plastik deformasyona uğratmaması veya çentik etkisi oluşturmaması, malzemeyle kimyasal etkileşime girmemesi ve şekillendirme sonrasında ölçüm yapılacaksa yüksek çözünürlükte kalması göz önünde bulundurulmalıdır. İpek baskı yöntemi; maliyeti ve malzemeye nüfuz etmemesi sebebiyle diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Sac metal üzerinde oluşturulan gridlerden sonra şekillendirilebilirlik sınırlarının hangi test ile gerçekleştirileceği belirlenmelidir.

### **2.3.2. Şekillendirilebilirlik testleri**

Şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin elde edilmesinde ilk deneysel test yöntemini Keeler önermiştir [34]. Farklı zımba geometrileri kullanarak tutucu ve kalıp arasında sıkıştırılan sabit geometrideki sacın çeşitli gerinim yollarında şekillendirilmesini sağlamıştır. Daha sonra farklı test yöntemleri geliştirilse de, şekillendirilebilirlik sınır eğrileri genel olarak iki farklı test ile elde edilebilmektedir: düzlem içi gerinim (Marciniak) ve düzlem dışı gerinim (Nakajima) testleri.

Marciniak – Kuczynski tarafından önerilen Marciniak testi, yine kendilerine ait hasar modelinin bir doğrulamasıdır. Marciniak testinin arkasındaki fikir; dikey şekillendirme kuvvetini, yatay düzlem içerisinde çift eksenli bir kuvvete dönüştürmektir [38]. Bu testte zımba, tepesi düz bir silindirik kesite sahiptir. Düzlem

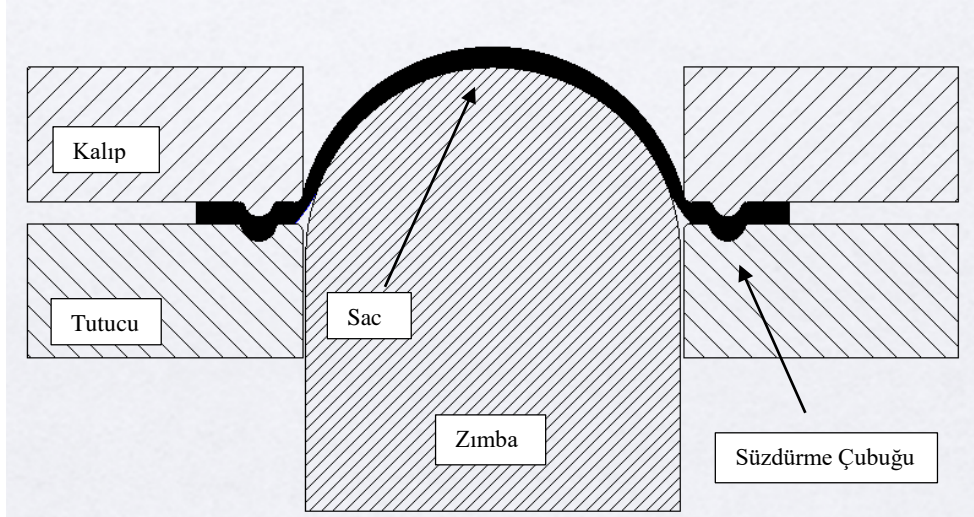
içi gerinim şartlarını sağlamak için, zımbayla numune arasına ortası delik bir ara sac konur. Böylece şekillendirilecek numune ile zımba arasındaki sürtünme neredeyse sıfırlanır, yırtılma zımba radyüsünün temas ettiği bölgede gözlenmez. Zımba stroğu ile birlikte ara sac da genişler ve deliğin olduğu bölgede dengeli iki eksenli bir gerinim hali ortaya çıkar. Hasarın bu bölgede olması istenir. Marciniak testi ile sadece minör gerinimin pozitif olduğu ( $\epsilon_1 > 0$ ), gerinim yollarını elde edebilmektedir. Raghavan [39], bu testte elde edilen gerinim yollarının sayısını artırmak için teste değişken ara sac ve numune geometrileri eklemiştir. Marciniak testinin şematik bir görseli, Şekil 2.2.'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Marciniak testinin şematik gösterimi [40]

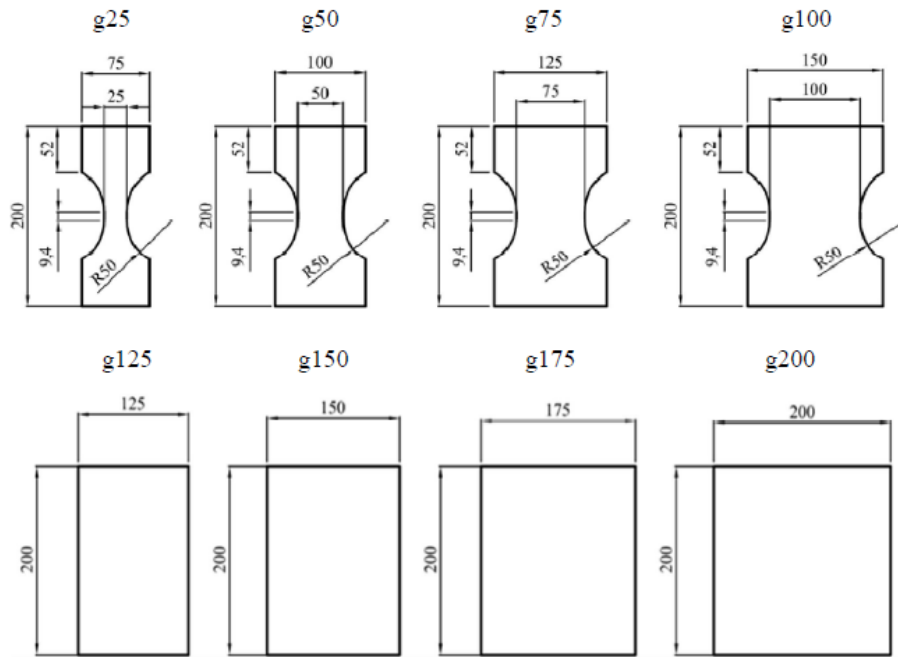
Marciniak testinin, ara sac malzemesinin seçimi ve daha yüksek maliyet gibi dezavantajları ve Nakajima testinde eğilme gerilmelerinin de bulunması, Marciniak testine göre Nakajima testinin daha çok kabul görmesine sebep olmuştur.

Nakajima düzlem dışı gerinim testiye, bir yarı küresel zımba ile farklı geometrilere sahip sacların şekillendirilmesi ve böylece farklı gerinim yollarının elde edilmesi prensibine dayanır. Sac malzeme süzdürme çubuklarının kilitleyici özelliği ile kalıp ve tutucu arasında sıkıştırılır. Bu testte, Marciniak testindeki gibi bir ekstra ara sac kullanılmaz ve zımba ile sac direkt temas halindedir. Pratik uygulamalarda karşılaşılan eğilme gerilmelerini bu sayede içerir. Şekil 2.3.'te düzlem dışı gerinim testi olan Nakajima testinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. Nakajima testinin şematik gösterimi

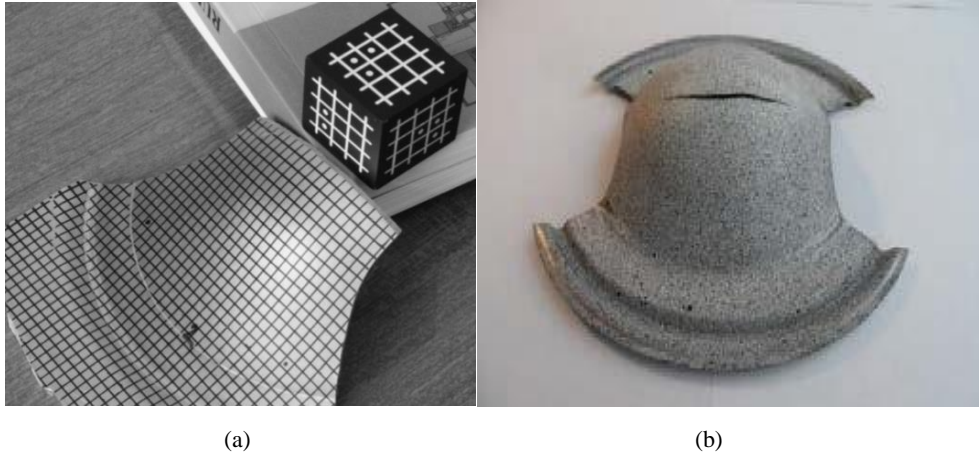
Nakajima testinde numuneler, iki farklı standarda göre boyutlandırılabilirler [41]. Bu standartlardan ASTM 2218-02 standardının [42] tez kapsamında da kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 2.4.'te bu standarda ait numunelerin gösterimi verilmiştir. Üst sıradaki numuneler ŞSE'nin sol tarafındaki, alt sıradaki numuneler ise sağ tarafındaki gerinim yollarını çizmektedir. Numune isimlerinin başındaki g harfi, genişliği ifade etmektedir. Genişlik, yatay doğrultudaki numune belinin uzunluğudur.



Şekil 2.4. ASTM 2218-02 standardına göre Nakajima test numuneleri [42]

Sac metallerin üzerine işlenmiş gridlerdeki gerinim değerlerini deneysel olarak ölçmek; şekillendirmeyle eş zamanlı ölçüm ve şekillendirme sonrası ölçüm olmak üzere iki farklı yolla mümkündür. Eş zamanlı ölçümlerde sac malzemenin üzerine gridleme veya püskürtme yöntemiyle işaretleme yapılması gerekmektedir. Kameralar, gridlerdeki şekil değişimini hasar oluşuncaya kadar takip eder. Bu sırada piksellerin milimetrik ölçülere dönüştürülmesiyle çıktı sağlanır. Grid kullanılmadan, püskürtme yöntemiyle ölçüm yapan yazılımlar da mevcuttur [33]. Bu sistem, sac metalin üzerine rastgele püskürtülmüş binlerce noktanın birbirlerine göre olan uzaklık değişimlerini ölçer. Piyasadan satın alınması mümkün bir sistemdir.

Şekillendirme sonrası ölçüm yapan, hassasiyeti doğrulanmış yazılımlar da bulunmaktadır [21,33,42]. Bu yöntemde gridlenen sac metal, hasara uğrayana kadar şekillendirilir. Şekillendirme işleminden sonra bir referans küpü sayesinde, malzemenin ve küpün çeşitli resimleri çekilerek ölçüm yapılır. Şekil 2.5.'te şekillendirme sonrası ölçüm ve şekillendirme esnasında ölçüm yöntemleriyle şekillendirilmiş sac metallerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.5. a) Şekillendirme sonrası ölçüm, b) Şekillendirme esnasında ölçüm [33,43]

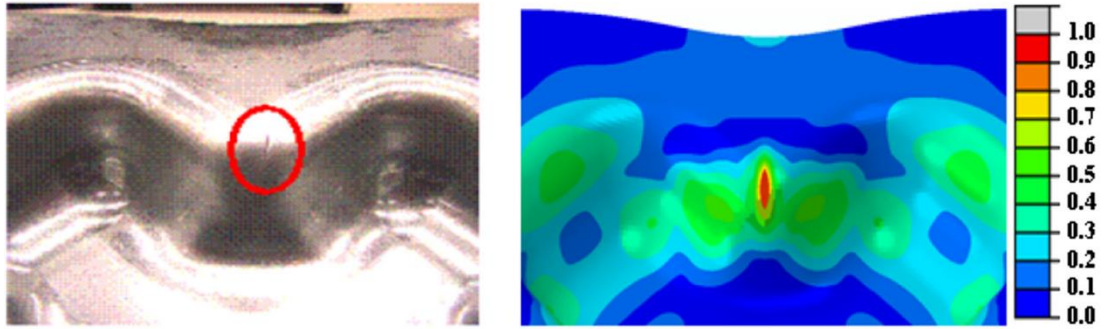
## BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Mühendislik uygulamalarında istenilen çözümün en hassas şekilde ve en kısa zamanda elde edilebilmesi için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Analitik yöntemlerin yanı sıra, özellikle sac metal şekillendirme işlemlerinde en sık kullanılan nümerik yöntem sonlu elemanlar (SE) yöntemidir [4]. Sonlu elemanlar yöntemi, adından da anlaşılacağı gibi, belirli bir mühendislik probleminin, tüm iş takımı ve incelemesi yapılacak olan iş parçasını da kapsayarak, sınırlı sayıda elemanlara bölünmesiyle çözümün elde edilmesi prensibine dayanır. Oluşturulan elemanlar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanır ve bu düğüm noktaları, belirli kabuller yapan fonksiyonların sahip olduğu değişkenlerin hesaplandığı noktalardır. Yöntem, bir bakıma; karmaşık bir problemin basit, küçük ve temsili elemanlara dönüştürülmesini, her bir elemandaki düğüm noktalarında istenilen değişken değerinin hesaplanmasını ve böylece nihai çözüme ulaşılmasını sağlar. Özellikle sac metal şekillendirme işlemlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanıldığında, prosesin sürtünme kaynaklı barındırdığı non-lineerlik, bir iterasyon kullanılmasını da zorunlu kılmaktadır [44].

Sonlu elemanlar yöntemi; termal, mekanik, yapısal, manyetik vb. birçok mühendislik uygulamalarında kullanılabilir. Bu yöntemle yapılacak olan simülasyonlarda, öncelikli olarak belirlenmesi gereken çözüm adımlarında hangi zaman integrasyon algoritmasının kullanılması gerektiğidir [45]. Sonlu elemanlar yönteminde bu çözüm adımları, açık zamana bağlı (explicit) ve kapalı adımlı (implicit) olarak gerçekleştirilebilirler. Kapalı adımlı çözümlerde zaman basamağı, açık zamana bağlı çözümlere daha büyük olmasına rağmen her bir adımdaki rijitlik matrisinin yeniden hesaplanması ve bir takım matris işlemleri sonucunda gerilme ile deformasyonların yeniden elde edilmesi, çözüm süresini açık zamana bağlı yöntemlere göre uzatmaktadır [46]. Literatürde yapılan çalışmalar, açık zamana bağlı yöntemlerin, kapalı adımlı yöntemlere göre formülasyon adımı için daha iyi sonuçlar verdiğini ancak geri esnemenin

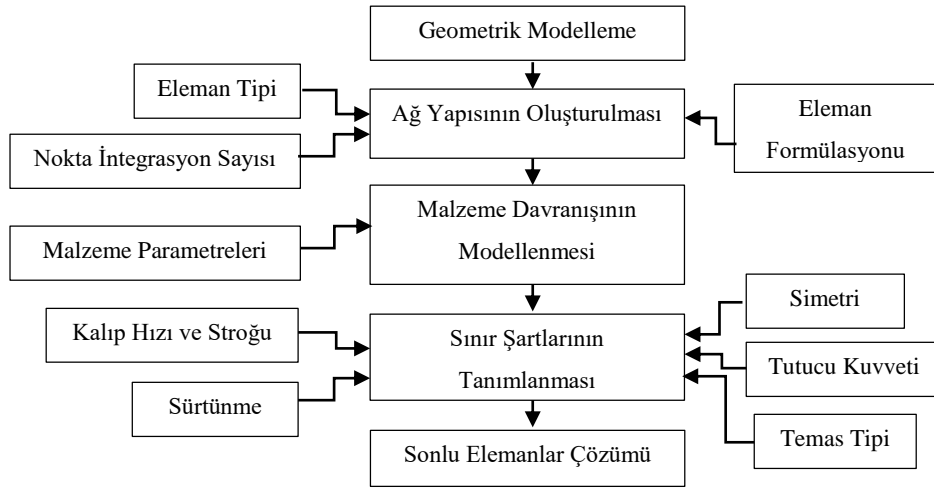
dikkate alınacağı durumlarda kapalı adımlı çözüm yönteminin daha iyi olduğunu göstermektedir [4,6,46-48].

Sonlu elemanlar yönteminin sac metallerin şekillendirilmesinde kullanımı 1970’li yıllara denk gelmektedir [4]. Sac metal şekillendirmede sonlu elemanlar yönteminin kullanımı, imalat öncesinde ve sonrasında büyük avantajlar sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir prototip veya parça üretimi olmadan, şekillendirilebilirlik analizlerinin yapılmasını mümkün kılar. Yöntem, şekillendirilecek parçada kritik bölge tayininde, yırtılma veya hasar davranışında imalat öncesindeki tasarım aşamasında müdahale edebilme seçeneği sunar. Böylece ürünün tasarımdan satışına kadar olan yaşam döngüsünde zamandan tasarruf sağlanır ve hatalı parça üretiminin önüne geçilebilir. Şekil 3.1.’de sac parçanın kritik bölgesinin sonlu elemanlar yöntemi ile belirlendiği görseli verilmiştir.



Şekil 3.1. Sonlu elemanlar analizi ile kritik bölgenin tayin edilmesi [12]

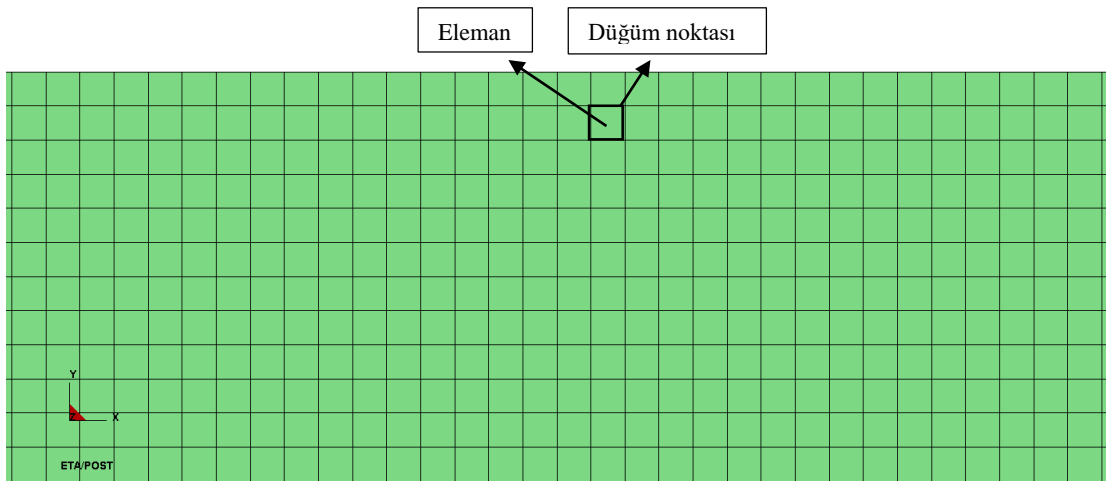
Benzetim testleriyle, şekillendirilecek olan parçanın optimizasyonunu da mümkündür. Optimum sac açınımı araştırılarak artık malzeme miktarı ve hammadde ihtiyacı azaltılabilmektedir. Bu sayede daha çevre dostu bir üretim de sağlanabilmektedir. Sac açınımının yanında, kalıp yüzeylerinde iyileştirmeler yapılabilmekte ve kalıp maliyeti de düşürülebilmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi sayesinde, imalat sonrası karşılaşılan ve genellikle istenmeyen bir durum olan geri esneme telafisi de tasarım aşamasına taşınabilir ve bütün bir prosesin zamanı düşürülebilir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasında izlenmesi gereken iş akış şeması, Şekil 3.2.’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Sonlu elemanlar yönteminde izlenen iş akış şeması

### 3.1. Sonlu Elemanlar Ağ Yapısının Oluşturulması

Sonlu elemanlar yönteminde ağ yapıları, sınırlı sayıdaki elemandan ve elemanları köşelerinden birbirine bağlayan düğüm noktalarından oluşurlar. Eleman sayısı ne kadar yüksek olursa, düğüm sayısı da o kadar artacak, dolayısıyla işlem süresi uzayacaktır. Şekil 3.3.'de örnek bir sonlu elemanlar modeli, eleman ve düğüm noktasının konumsal temsili ile gösterilmiştir.

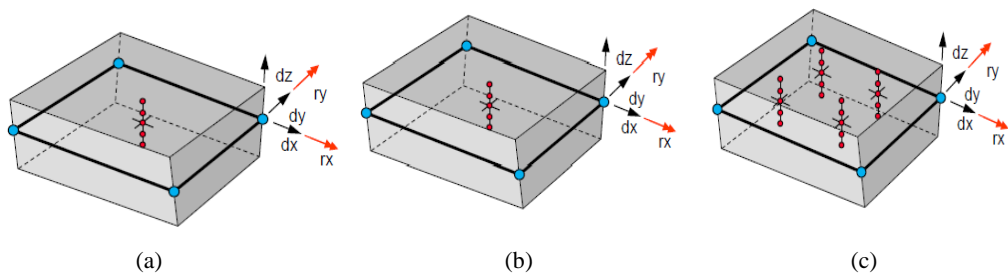


Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modelinde elemanlar ve düğüm noktaları



Sonlu elemanlar yönteminde, çeşitli eleman tipleri kullanılabilir. Ancak sac metal şekillendirme işlemlerinde, yüzey alanı/kalınlık oranının yüksek olması ve sac düzlemine dik olan gerilmelerin, düzlemdaki gerilmelere göre çok daha düşük olması, düzlem gerilme kabulünün yapılmasını sağlamaktadır. Bu sebeple sac metal şekillendirme işlemlerinde kabuk elemanlar daha sık tercih edilmiştir [4,6,49]. Eleman tipinin seçilmesinden sonra, bu elemanlar arasındaki ilişkiyi ifade edecek olan formülasyon belirlenmelidir. Kabuk eleman formülasyonlarından, sac metal şekillendirme işlemlerinde en sık kullanılanları; Full Integrated (tam entegre), Hughes-Liu ve Belytschko-Tsay'dir [4].

Hughes-Liu kabuk elemanlar, rijit parçaların hareketlerinde gerinim üretmedikleri için hesaplaması kolay ve pratik uygulamalara yakın bir formülasyon sunarlar. Tuğla (brick) tipi eleman formülasyonundan türetilmişlerdir. En büyük dezavantajları, hesaplama süresinin Belytschko-Tsay formülasyonlu elemanlara göre çok daha uzun olmasıdır [4,49,50]. Belytschko-Tsay kabuk elemanlar, çarpma testi simülasyonlarında daha çok tercih edilmiştir. Düzlemsel olmayan geometrilere sapma kurallarını içermediğinden hatalı sonuçlar alınabilmektedir [50]. Tam entegre kabuk eleman tipinde lokal koordinat sistemi kullanılmakta ve eğilme davranışları iyileştirilmektedir. Elemanlar arasındaki ilişkilerin korunması ve rijit cisim hareketini sağlayabilmek için koordinat sistemi malzemeye birlikte dönmektedir [51]. Şekil 3.4.'te sayılan kabuk eleman formülasyonlarına ait görseller verilmiştir.



Şekil 3.4. a) Hughes-Liu, b) Belytschko-Tsay, c) Full Integrated kabuk eleman formülasyonu [52]

Burada  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$  sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki ötelemeyi göstermektedir.  $r_x$  ve  $r_y$  ise alt indislerde gösterilen eksenlerdeki (x,y) dönme hareketini temsil etmektedir. Üç eleman formülasyonu da 5 serbestlik derecesine sahiptir.

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra, sonlu elemanlar yönteminde çözüm hassasiyetine etki eden ve kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken parametrelerden biri de sacın kalınlık yönündeki nokta integrasyon sayısıdır. Kabuk elemanlar, sac metali, kalınlık yönünde katmanlara ayırıp hesaplama yaparlar. Burada iki farklı çözüm metodu mevcuttur. İlki, katman düzlemlerinin merkezinde alınacak olan integrasyon noktası düzlemi temsil ederek sadeleştirilmiş bir hesaplama metodu sunar ve hesaplama süresi kısadır. İkinci yöntem, katman köşelerindeki dört nokta alınarak hesaplama yapılır ve katman temsili sağlanır [4,6]. Literatürde kalınlık doğrultusundaki integrasyon nokta sayısının 5-9 arasında bir rakam olarak alınabileceği belirtilmektedir [49]. İntegrasyon nokta sayısındaki artış, sonlu elemanlar analizinin çözüm süresini de uzatmaktadır.

### **3.2. Malzeme Davranışının Modellenmesi**

İmalat öncesi tasarım aşamasında sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasının, belki de en büyük kazanımı malzeme davranışının modellenbilmesini sağlamasıdır. Çünkü pratikte sac metal şekillendirme işlemleri, çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Yöntem, sac metallerin şekillendirilebilirlik kapasitelerinin çeşitli teorilerle araştırılmasına, mikroyapılarının da hesaba katılarak incelenmesine olanak vermiştir. Malzemelerin sonlu elemanlar yönteminde plastik davranışının modellenbilmesi için, bir akma kuralına, bir pekleşme kuralına ve bir de akma fonksiyonuna ihtiyaç vardır [4].

### **3.3. Sınır Şartları**

Sonlu elemanlar yöntemi ile benzetim testlerinde, deneysel verilere en yakın sonucu elde edebilmek için sınır şartlarının da dikkatli bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Kalıp hızı, kalıp stroğu, geri esneme sabitleri, tutucu kuvveti, sürtünme katsayısı, temas şekli ve varsa simetrik geometri, sac metal şekillendirme işleminde tanımlanması gereken sınır şartlarını oluştururlar. Bir diğer sınır şartı, eğer varsa simetrik geometrinin tanımlanmasıdır. Tüm iş takımının  $\frac{1}{2}$  veya  $\frac{1}{4}$  oranında modellenmesi, düğüm noktalarının ve elemanların sayısı azaltacak, dolayısıyla çözüm süresinin kısılmasını sağlayacaktır.

## **BÖLÜM 4. UYGULAMA ÇALIŞMALARI**

Sac metallerin şekillendirilebilirlik kabiliyetini ölçmek için çeşitli testler yapılmaktadır. Bu testler, Marciniak testi gibi tek başına sınır eğrisinin bir tarafını verebileceği gibi, bütün bir eğrinin elde edilmesini de sağlayabilir. Kubbe çekme testi, sınır eğrisinin hem negatif hem pozitif minör gerinim değerlerinde elde edilmesini sağlamaktadır. Bu bölümde, tez kapsamında kullanılacak olan DP600 ve TRIP600 yüksek mukavemetli çeliklerinin, Amerikan Demir Çelik Enstitüsü ve Otomotiv Çelik Ortaklığı'nın hazırladığı ortak rapor [25] doğrultusunda edinilmiş deneysel ŞSE'leri ile yine aynı çalışmada bulunan kare kutu çekme testinin deneysel sonuçları verilmiştir. Daha sonra kubbe çekme testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde hassasiyet çalışması, sınır eğrileri ve malzeme modeli üzerinden yapılmıştır. Aynı gerinim yolları üzerinden kare kutu çekme testi ile ilişki kurulmuş ve bir de hasar modeli önerilmiştir.

### **4.1. DP600 ve TRIP600 Çeliklerinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri**

İleri teknoloji ürünü yüksek mukavemetli çelikler; şekillendirilebilirlik, darbe absorbe yeteneği, uzama ve ince kesitlerle yüksek mukavemet gibi avantajlara sahiptir. Bu tez çalışmasında yüksek mukavemetli çeliklerden DP600 ve TRIP600 çelikleri kullanılmıştır. DP600 çeliğinde, kısaltma olarak gösterilen ismin yanındaki sayı, malzemenin yaklaşık olarak verilmiş çekme mukavemetini ifade etmektedir. DP600 çift fazlı çeliği, genellikle yumuşak ferrit matriksinde, adalar halinde dağılmış olarak sert martenzit fazı barındırır. Bu martenzit faz sayesinde çeliğin mukavemeti artar. Çok yüksek enerji absorbe etme yeteneğine sahip olup, yüksek mukavemet değerlerinde iyi izotropik özellik gösterirler. Mikroyapısı sayesinde kaynak

edilebilirlik yeteneği de yüksektir [3]. Tablo 4.1.’de DP600 eliğinin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo 4.1. DP600 eliğinin kimyasal kompozisyonu [53]

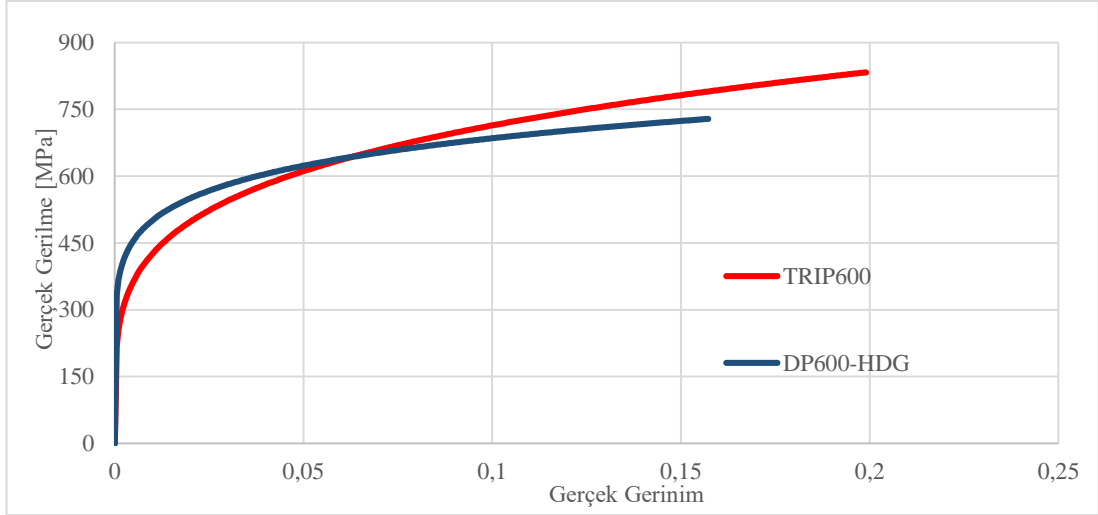
Malzeme (%)	C	Mn	Si	P	Al	Cr	S	Cu
DP600	0,072	1.58	0,246	0,015	0,031	0,553	0,001	0,010

TRIP eliği, adını “TRansformation Induced Plasticity” ismindeki kelimelerin baş harflerinden almaktadır. Yanında bulunan sayı, çekme mukavemetinin yaklaşık değerini ifade etmektedir. TRIP eliklerinin genel mikroyapısı, yumuşak ferrit matrisi içinde bulunan beynit ve kalıntı östenit tanelerinden oluşmaktadır [3]. İçerdikleri kalıntı östenit fazı, şekillendirme esnasında martenzite dönüşür. Faz dağılımı, fazların birbirine oranı, fazın yerleşimi ve kalıntı östenitin kararlılığı, TRIP600 eliklerinin mekanik ve kırılma davranışını etkileyen faktörlerdir [53]. Pekleşme, şekillendirilebilme ve uzama kabiliyetleri yüksektir. TRIP elikleri, aynı çekme gerilmesinde DP ift fazlı çeliklerine göre iki kat daha fazla uzayabilmektedir [18]. Tablo 4.2.’de TRIP600 eliğine ait kimyasal kompozisyon verilmiştir.

Tablo 4.2. TRIP600 eliğinin yüzde kimyasal kompozisyonu [53]

Malzeme (%)	C	Mn	Si	P	Al	Cr	S	Cu
TRIP600	0,217	1,20	0,042	0,012	1,440	0,023	0,001	0,018

DP600 ve TRIP600 eliklerinin mekanik özellikleri tek eksenli çekme testi verileri (şekil 4.1.) kullanılarak elde edilmiştir. Bu mekanik özellikler, malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan plastisite modellemelerinde girdileri oluşturmaktadır. Malzemelerin mekanik zellikleri Tablo 4.2.’de verilmiştir.



Şekil 4.1. TRIP600 ve DP600 çeliklerinin çekme eğrisi

Tablo 4.3. TRIP600 ve DP600 çeliklerinin mekanik özellikleri [25,54]

Malzeme	Akma mukavemeti	Elastisite modülü (E)	Mukavemet katsayısı (K)	Pekleşme üsteli (n)	Ortalama anizotropi (R)
TRIP600	439 MPa	208711 MPa	1196,18 MPa	0,2242	0,93
DP600	491,3 MPa	207000 MPa	936,9 MPa	0,136	1,125

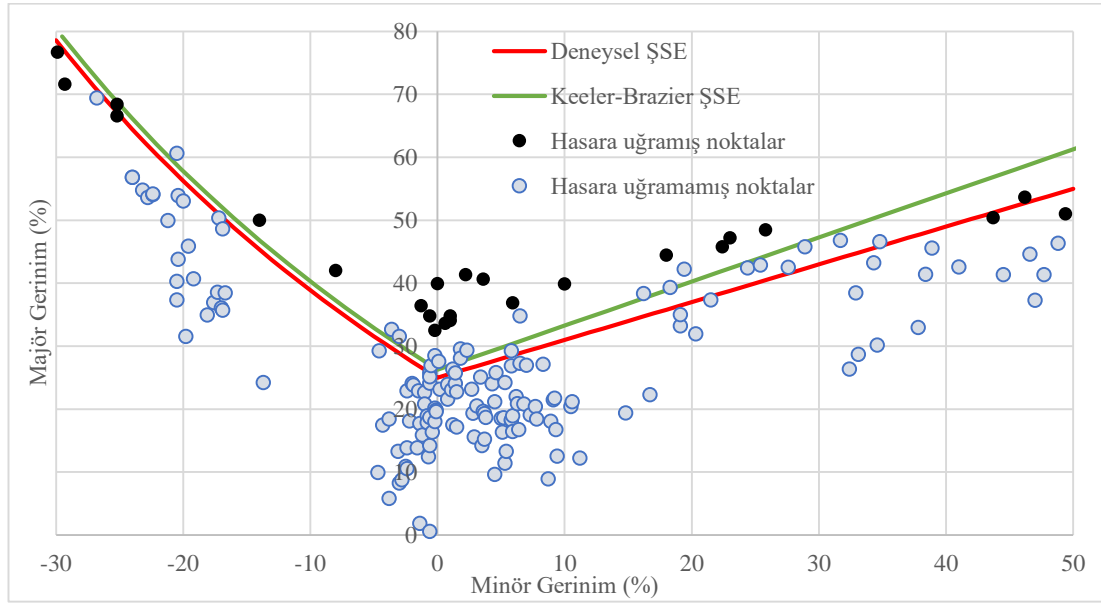
## 4.2. Kubbe Çekme Testi Sonuçları

Kubbe çekme testi, sac metallerin şekillendirilebilirlik sınırının deneysel olarak belirlenmesini sağlar. Farklı yağlama koşulları ve numune geometrileri sayesinde, bütün bir şekillendirilebilirlik sınır eğrisi elde edilebilmektedir. Kubbe çekme testi, bir düzlem dışı gerinim testidir ve kalıp, tutucu, süzdürme çubuğu ve zımbadan oluşmaktadır. Sac metal, kalıp ve tutucu arasında süzdürme çubukları ile kilitlenerek sacın yarı küresel zımba ile şekillendirilmesi sağlanır.

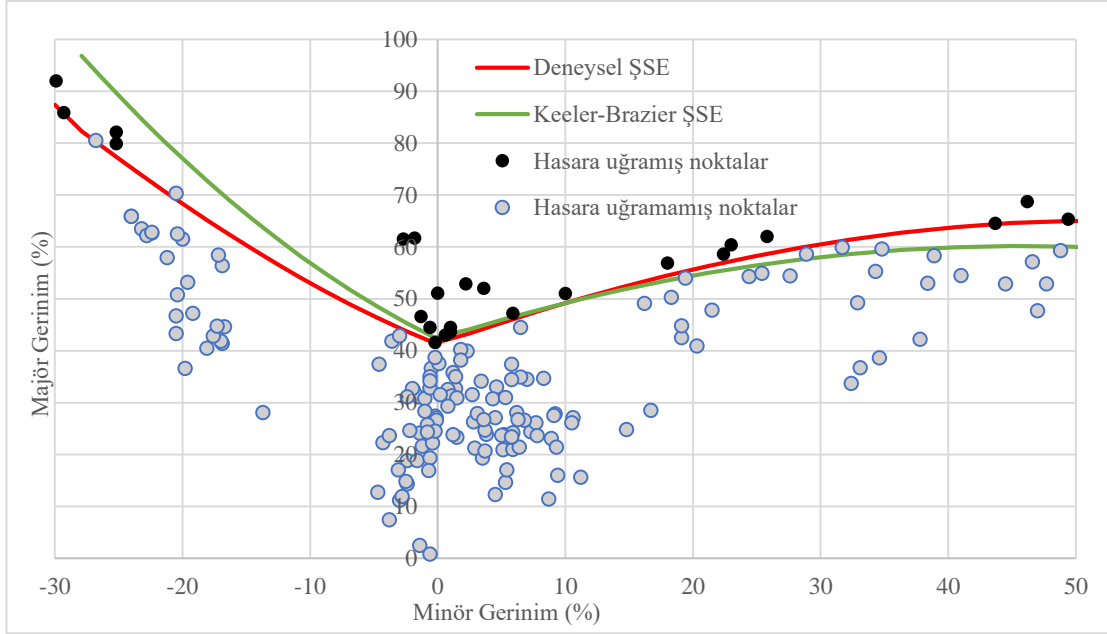
Bu tez çalışması için referans alınan test prosedüründe [25] zımba 101,6 mm çapa, numuneler 25,4 mm ile 177,8 mm arasında değişen genişliklere sahiptir ve 6 farklı numune kullanılmıştır. Zımbanın yüzeyi, her bir numunenin şekillendirilmesinden sonra aseton ile silinmiş, zımba ile sac metal arasında yağlayıcı olarak gemi yağı kullanılmıştır. Numunelerde boyun verme başlangıcının hassas bir şekilde tespiti için, deneyler tekrarlanmıştır. Boyun verme davranışı yakalandıktan sonra, gerinim ölçüm

cihazı ile gerinim ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde hassasiyet olabildiğince korunmuştur [25]. Kubbe çekme testinde tutucu kuvveti 400 kN olarak alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılacak olan deneysel şekillendirme sınır eğrilerinin ve hasarlı-hasarsız gerinim noktalarının bilgisi, Amerikan Demir Çelik Enstitüsü ve Otomotiv Çelik Ortaklığı'nın hazırladığı ortak rapor [25] doğrultusunda edinilmiş; hasarlı ve hasarsız noktalar, deneysel eğriye göre değerlendirilmiştir. Aynı çalışmada, deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrileri belirlenen malzemelerin kare çekme testi de deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve yırtılma yükseklikleri tespit edilmiştir. Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'te sırasıyla DP600 ve TRIP600 çeliklerinin deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrileri, Keeler – Brazier sınır eğrileriyle birlikte verilmiştir.



Şekil 4.2. DP600 çeliğinin deneysel şekillendirilebilirlik sınır diyagramı [25]



Şekil 4.3. TRIP600 çeliğinin deneysel şekillendirilebilirlik sınır diyagramı [25]

### 4.3. Kare Kutu Çekme Testi Sonuçları

Kare kutu çekme testi, malzemelerin şekillendirilebilirlikleri hakkında yırtılma yüksekliği üzerinden bilgi vermektedir. Malzeme, tutucu ile kalıp arasında gerdirilerek şekillendirilir. Kare kesite sahip bir zımba aracılığıyla şekillendirme sağlanır. Şekil 4.4.'te referans olarak alınan test prosedürünün [25] kare kutu çekme test takımının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Kare kutu çekme testinde a) servohidrolik pres takımı, b) sacın hizalanması [25]

Bu testte zımbanın bir kenarı 88,9 mm, şekillendirilecek numunenin bir kenarı ise 203,2 mm uzunluğa sahiptir. Sacın hizalanması dirsekler aracılığıyla sağlanmış, yağlayıcı olarak Ferracote 61 MAL HCL 1 kullanılmıştır. Testte tutucu kuvveti 94 kN olarak alınmıştır [25]. Tutucu kuvveti çok düşük alınırsa sac metalin buruşmasına, çok yüksek alınırsa yırtılmasına sebep olabilir. Şekil 4.5.'te farklı tutucu kuvvetlerindeki malzeme davranışının görselleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Kare kutu çekme testinde buruşma ve yırtılma [25]

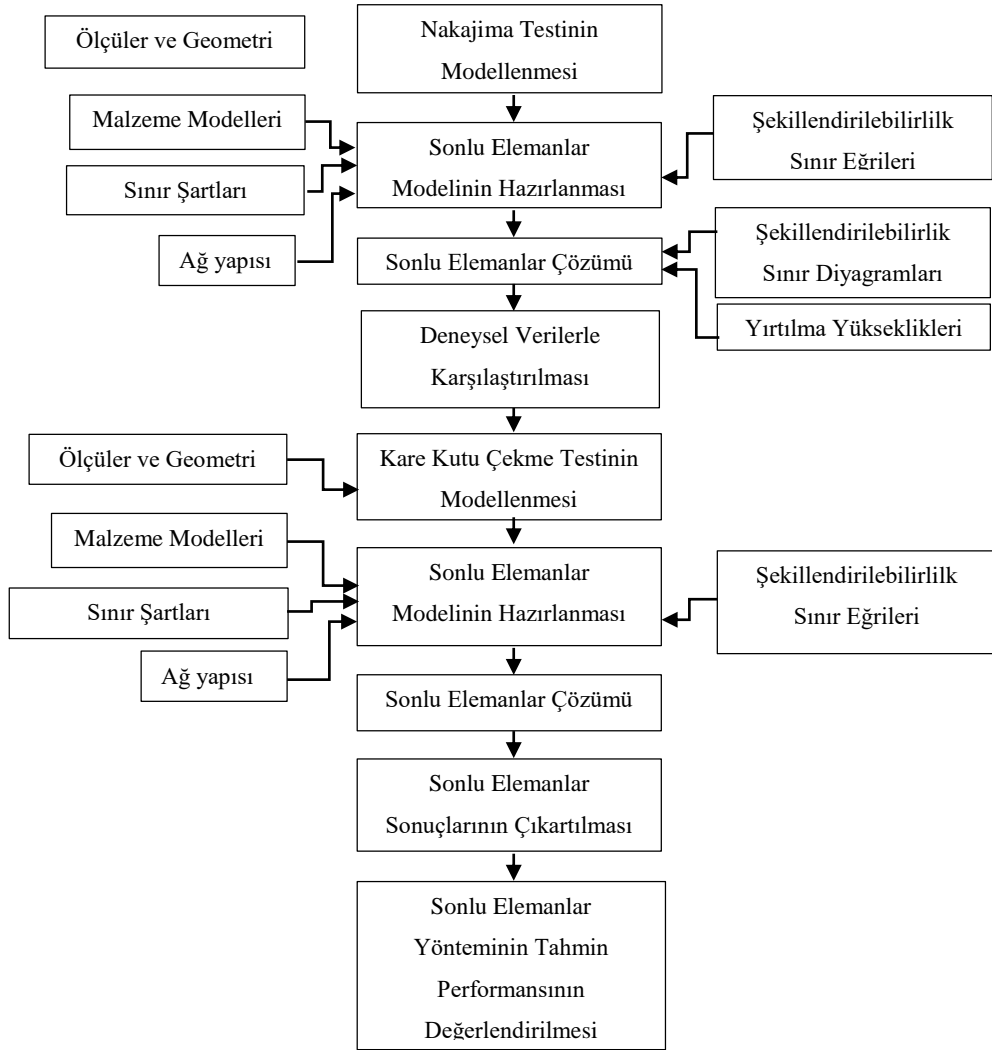
Kalıp ve zımba arasındaki boşluk için de optimum koşullar sağlandıysa, yırtılmanın zımba radyüslerinde görülmesi beklenmektedir. Bu bölge, bütün bir şekillendirme işlemi boyunca çift eksenli gerinim haline sahiptir ve gerinim yığılması bu bölgede meydana gelmektedir [28]. Kare kutu çekme testi için, DP600 ve TRIP600 çeliklerinin 203,2 mm genişliğindeki kare kesitli sac için deneysel yırtılma yükseklikleri sırasıyla 38,84 mm ve 49,02 mm'dir [25].

#### 4.4. Nakajima Testinin Sonlu Elemanlar Analizi

Bu bölümde, DP600 ve TRIP600 çeliklerinin şekillendirilebilirliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin performanslarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Malzemenin farklı gerinim yolları altında şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin elde edilmesini sağlayan düzlem dışı gerinim testlerinden Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında iki farklı malzeme modeli (Barlat89 ve Hill48) kullanılmış, en hassas şekillendirilebilirlik çözümünü veren malzeme modeli belirlenmiştir. Malzeme modellerinin karşılaştırılması, Nakajima test numunelerinin yırtılma yükseklikleri üzerinden yapılmıştır. Malzeme modellerinin yanısıra, 3 farklı şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin, aynı malzeme modeli ile sonlu

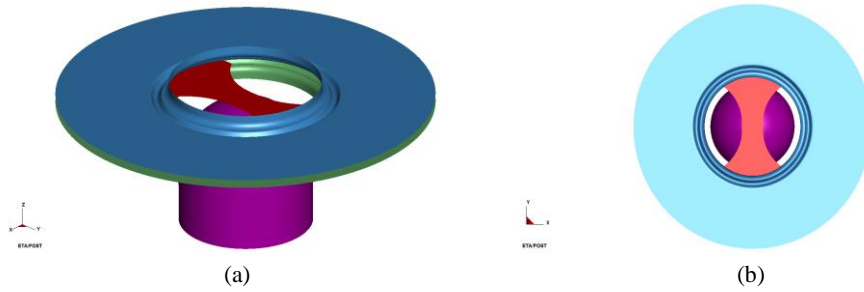


elemanlar analizi de gerçekleştirilmiş, tahmin performansına etkisi incelenmiştir. Bu eğriler, Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, deneysel sınır eğrisi ve orijinal Keeler-Brazier şekillendirilebilirlik sınır eğrisidir. Son olarak, hassasiyet çalışması yapılan malzeme modeli ve şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin, aynı çeliklerin kare kutu çekme testindeki deneysel yırtılma yüksekliklerini tahmin edip edemeyeceği araştırılmıştır. Kare kutu çekme testinde yırtılmanın görüldüğü köşe radyüsüne ait gerinim yolu, Nakajima test numunesinde de elde edilebilmektedir. Aynı gerinim yoluna sahip, iki farklı test numunelerinin yırtılma yükseklikleri karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar yönteminin kare kutu çekme testindeki tahmin performansları değerlendirilmiştir. Şekil 4.6.'da tez çalışması kapsamında izlenen prosedürün iş akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.6. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözüm prosedürünün iş akış şeması

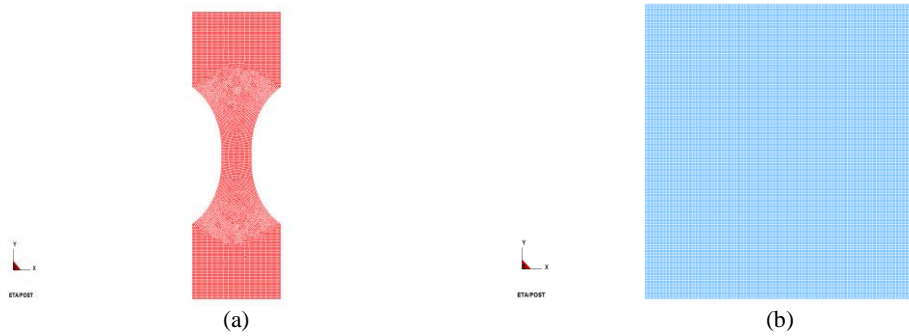
Sonlu elemanlar yöntemi, sac metallerin şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlenmesinden, en kritik bölgelerin tayinine kadar, imalat öncesi ve sonrasındaki birçok aşamada önemli bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Test takımı ve numuneler, yüzey olarak modellenmiştir. 8 farklı numunenin boyutlandırması ASTM 2218-02 standardına [42] göre yapılmıştır. Sonlu elemanlar ağının oluşturulması ve sınır şartlarının tanımlanması için Dynaform programına aktarılmıştır. Çözücü olarak Ls-Dyna programı kullanılmıştır. Şekil 4.7.'de modellenen Nakajima testinin sonlu elemanlar görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.7. Nakajima test takımı. a) Tutucu, kalıp, zimba ve sacın izometrik görünüşü, b) Üst görünüşü.

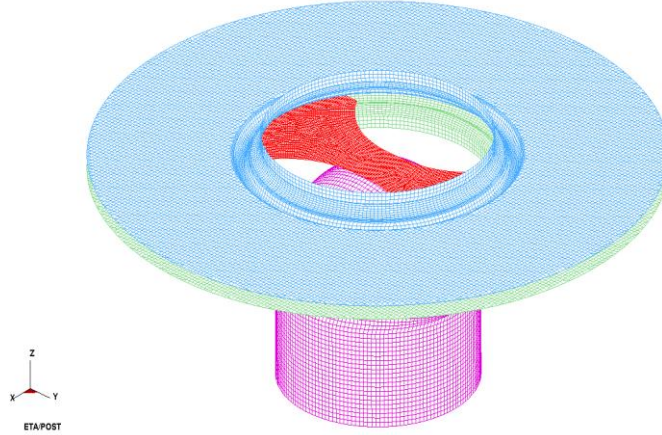
#### 4.4.1. Nakajima testinde ağ yapısının oluşturulması

Numunelerde eleman büyüklüğü 1 mm olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Tam entegre (Fully Integrated) kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kalınlık yönündeki integrasyon nokta sayısı 7 alınmıştır. Çentikli numunelerde çentik bölgesinde kare elemanlar kullanılmasına özen gösterilmiştir. Şekil 4.8.'de çentikli numunelere ve dikdörtgen numunelere işlenen ağ yapıları temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. a) 25 mm genişliğinde çentikli numune, b) 200 x 200 mm boyutlarındaki numune

Kalıp ve tutucunun radyüs bölgelerinde hassasiyeti artırmak için en büyük 1 mm, en düşük 0,5 mm boyutlarında elemanlar kullanılmıştır. Şekil 4.9.'da test takımında oluşturulmuş ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 4.9. Nakajima test takımında oluşturulan ağ yapısı

Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi, hem DP600 hem de TRIP600 çelikleri için gerçekleştirilmiştir. Her iki çeliğe ait analiz için de sonlu elemanlar parametreleri sabit tutulmuştur.

#### 4.4.2. Malzeme davranışının modellenmesi

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra, analizi yapılacak olan malzemenin plastik davranışın modellenmesi gerekmektedir. Ls-Dyna sonlu elemanlar programında, malzeme modelleri, “Malzeme kartı” olarak tanımlanmaktadır. Malzeme kartlarının içinde, modele ait tanımlanacak parametreler bulunmaktadır. Ls-Dyna sonlu elemanlar programında yaklaşık 200 adet malzeme modeli bulunmaktadır [4].

Nakajima testinin sonlu elemanlar analizinde 2 farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Böylece farklı malzeme modellerinin şekillendirilebilirliğe, yırtılma yüksekliğine ve gerinim yollarına olan etkisi araştırılmıştır. Seçilen ilk malzeme modeli, Hill'in [26] önerdiği Hill48 akma kriterini baz almaktadır. Sadece anizotropik malzemeler için kullanılabilen malzeme modeli, anizotropik malzeme ve izotropik pekleşme kabulü yapmaktadır. Hill48 akma kriterine göre, ortogonal düzlemdeki anizotropi

davranışının, kartezyen koordinat sistemin referans eksenlerine paralel olması gerekmektedir [46]. Bu durumda akma fonksiyonu en genel haliyle aşağıdaki eşitlikteki (Denklem 4.1) gibi yazılabilir.

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{32}^2 + 2N\sigma_{12}^2 - 1 = 0 \quad (4.1)$$

Burada  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  çekme gerilmelerini ifade etmektedir.  $\sigma_{23}$ ,  $\sigma_{32}$  ve  $\sigma_{12}$  ise kayma gerilmeleridir. F, G, H, L, M ve N malzeme parametreleridir. Düzlem gerinim durumunda  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_Y$  olduğunu kabul eder ve K katsayısı üretilirse,

$$K = \frac{\sigma_Y}{\sigma_3} \quad (4.2)$$

olmaktadır. Bu eşitlik (Denklem 4.2) kullanılarak, Hill48 malzeme modelinde kullanılan akma fonksiyonu aşağıdaki eşitlikteki (Denklem 4.3) gibi elde edilir [46].

$$\sqrt{F(\sigma)} = \left[ \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + K^2\sigma_{33}^2 - K^2\sigma_{33}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) - (2 - K^2)\sigma_{11}\sigma_{22} + 2L\sigma_Y^2(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) + 2(2 - \frac{1}{2}K^2)\sigma_{12}^2 \right] \quad (4.3)$$

Tablo 4.4.'te, Hill48 malzeme modeli için DP600 ve TRIP600 çeliklerinde tanımlanan parametreler verilmiştir.

Tablo 4.4. Hill48 malzeme modelinde kullanılan parametreler [25,54]									
	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Mukavemet Katsayısı (MPa)	Anizotropi Katsayısı	Pekleşme Üsteli	Kalınlık (mm)	Akma Eğrisi
DP600	7850	207000	0,28	491,3	936,9	1,125	0,136	1,2	Şekil (4.1)
TRIP600	7850	208711	0,28	439	1196,18	0,93	0,2242	1,4	Şekil (4.1)

Sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilecek olan bir diğer malzeme malzeme modeli Barlat89'dur. Bu model, Barlat ve Lian [55] tarafından düzlem gerinim şartları altındaki anizotropik malzeme davranışları için geliştirilmiştir [46]. Sadece 3 parametre kullanılarak malzeme modelinin basitleştirilmesi sağlanmıştır. Anizotropi

davranışının sağlanması için Lankford parametreleri tanımlanmalıdır. Düzlem gerilme hali için bu akma kriteri aşağıdaki eşitlikte (Denklem 4.4) verilmiştir.

$$f = a |K_1 + K_2| + a|K_1 - K_2| + c|2K_2| = 2\sigma_Y^m \quad (4.4)$$

Eşitlikte  $\sigma_Y$ , akma gerilmesini verir.  $m$  katsayısı, malzemenin kafes yapısını tanımlayan katsayı olup, hacim merkezli kübik kafes sisteminde 6, yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip malzemelerde 8 değerini almaktadır. Bu tez kapsamında seçilen çelikler, hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip olduğu için  $m$  katsayısı 6 olarak alınmıştır.  $K_1$  ve  $K_2$  parametreleri ise, aşağıdaki eşitliklerden elde edilmektedir.

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2} \quad (4.5)$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + \rho^2 \tau_{xy}^2} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde (Denklem 4.5 ve Denklem 4.6)  $\sigma_x$ , 1 yönündeki gerilmeyi,  $\sigma_y$  ise 2 iki yönündeki gerilmeyi göstermektedir.  $a$ ,  $c$ ,  $h$  ve  $p$  malzeme sabitleridir ve Lankford parametrelerine bağlıdır.  $R_0$ ,  $R_{45}$  ve  $R_{90}$ 'a göre bu katsayılar, aşağıdaki eşitliklerle (Denklem 4.7, Denklem 4.8 ve Denklem 4.9) ile elde edilebilirler.

$$a = 2 - 2 \sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{R_{90}}{1+R_{90}}}, \quad (4.7)$$

$$c = 2 - a \quad (4.8)$$

$$h = \sqrt{\frac{R_0}{1+R_0} \frac{1+R_{90}}{R_{90}}} \quad (4.9)$$

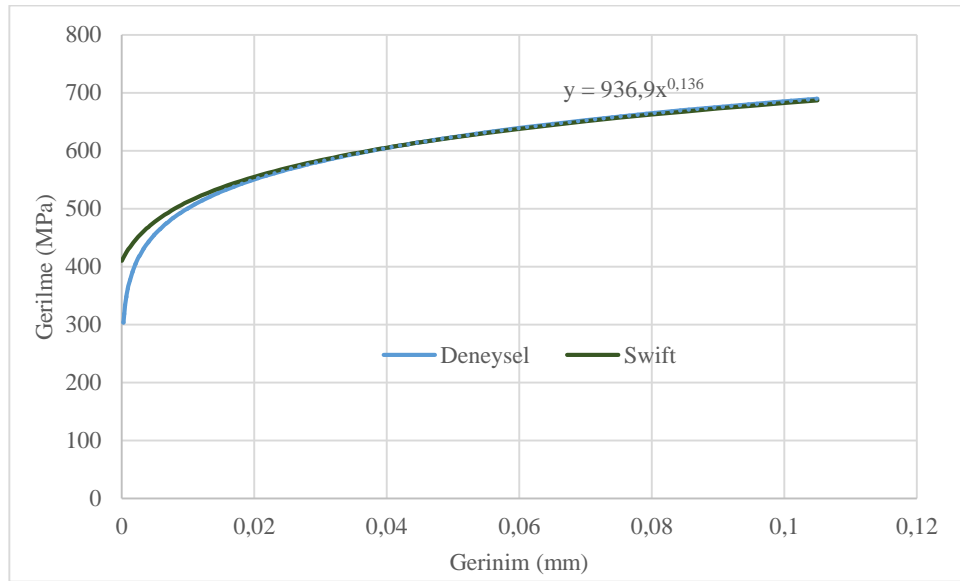
Yukarıdaki eşitliklerde;  $R_0$  malzemenin sac metalin haddeleme yönündeki anizotropi katsayısını,  $R_{45}$ , haddeleme yönüyle arasında 45 derece olan doğrultudaki anizotropi katsayısını ve  $R_{90}$  ise haddeleme yönüyle arasında 90 derece olan doğrultunun anizotropi katsayısını ifade etmektedir.

Barlat89 malzeme modeli, çeşitli pekleşme kurallarının kullanımını mümkün kılmaktadır [42]. Hill48 malzeme modelinde akma eğrisi Holloman denklemine göre

tanımlanırken (Şekil 3.1), bu malzeme modelinde Swift [56] pekleşme kuralı kullanılmıştır. Tez kapsamında Swift pekleşme kuralına ait katsayılar, eğri uydurma yöntemiyle bulunmuştur. Eğri uydurmada; Swift kuralına göre çizilmiş akma eğrisinin katsayılarını deneme yanılma yoluyla değiştirerek, deneysel eğriye göre en yakın konumu bulunmaya çalışılmıştır. Swift pekleşme kuralı, %0,2 plastik uzama değeri için aşağıdaki eşitlikteki (Denklemler 4.10) gibidir [57]:

$$\sigma(\varepsilon) = k(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (4.10)$$

Swift eşitliğinde k, mukavemet katsayısını, n pekleşme üstelini ifade etmektedir.  $\varepsilon_0$  ve  $\varepsilon$  ise sırasıyla elastik ve plastik gerinim değerleridir. Elastik gerinim, malzemede kalıcı olmayan birim şekil değiştirme miktarını tanımlarken, plastik gerinim ise kalıcı şekil değiştirme miktarını tanımlamaktadır. Bu çalışmada elastik gerinim değeri 0,002 alınarak eğri uydurma yapılmıştır. Şekil 4.10.'da eğri uydurma işleminin grafiksel gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.10. Swift pekleşme kuralına göre katsayıların eğrisel olarak elde edilmesi

Tablo 4.5.'te, Barlat89 malzeme modelinde her iki çelik için tanımlanan parametreler gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Barlat89 malzeme modelinde kullanılan parametreler [25,54]

	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	R <sub>0</sub>	R <sub>45</sub>	R <sub>90</sub>	m	k (Swift katsayısı)	n (Swift katsayısı)
DP600	7850	207000	0,28	1,04	1,058	1,344	6	919	0,132
TRIP600	7850	208711	0,28	0,908	0,873	1,066	6	1190	0,23

#### 4.4.3. Keeler (Ls-Dyna) şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin tanımlanması

Malzeme davranışı tanımlandıktan sonra, malzemenin hasara uğrayacağı gerinim sınırlarını çizen bir şekillendirilebilirlik sınır eğrisi tanımlanmalıdır. Sınır eğrisi, her bir majör ve minör gerinim değerlerinin sonlu elemanlar programına tek tek girilmesi ile tanımlanabilir. Bunun dışında orijinal Keeler-Brazier eğrisinin, kullanım kolaylığı adına güncellenmiş bir modeli de Ls-Dyna programında tanımlı bulunmaktadır [50]. Nakajima testinin sonlu elemanlar analizinde bu şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanılmış ve model tezin bundan sonraki bölümlerinde Keeler (Ls-Dyna) olarak gösterilmiştir. Eğri, düzlem gerinim noktası ile her bir minör gerinime karşılık gelen majör gerinim değerlerini aşağıdaki eşitliklerle elde edilebilmektedir.

$$\varepsilon_0 = [(23,3 + 14,134 * t) * (n/0,21)] \quad (0 < t < 2,54 \text{ mm}) \quad (4.11)$$

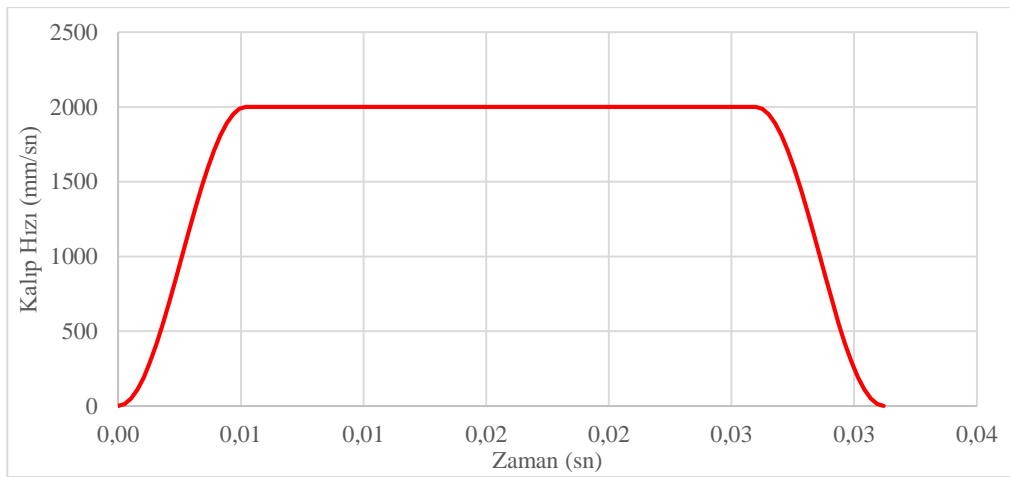
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 * (0,027254 * \varepsilon_2 - 1,1965) \quad (\varepsilon_2 < 0) \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 * (-0,008565 * \varepsilon_2 + 0,784854) \quad (\varepsilon_2 > 0) \quad (4.13)$$

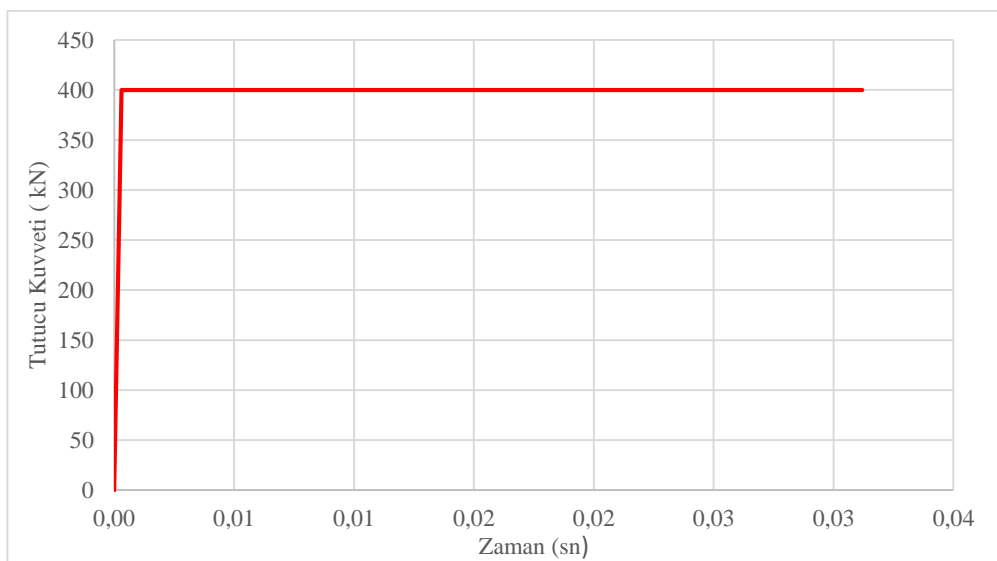
Denklem 4.11 sac kalınlığının 2.54 mm'ye kadar olduğu durumlarda diyagramın dikey eksenini üzerindeki düzlem gerinim noktasını ( $\varepsilon_0$ ) vermektedir. Minör gerinimin aldığı pozitif veya negatif değerlere göre; Denklem 4.12 şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin sol tarafını, Denklem 4.13 ise sınır eğrisinin sağ tarafını çizmektedir. Kullanıcı tarafından tanımlanması istenen parametrelerden t, sac metalin kalınlığını, n ise pekleşme üstelini ifade etmektedir [58]. Tez kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri için bu değerler Tablo 4.1'den alınmıştır.

#### 4.4.4. Sınır şartlarının tanımlanması

Nakajima testinde, seçilen her iki malzeme için de kalıp hızları ve tutucu kuvvetleri aynı alınmıştır. Kalıbın hızı 2000 mm/sn olarak girilmiştir. Kalıbın şekillendirme eksenindeki hareketi, pratikte karşılaşılan durum da göz önünde bulundurularak sinüs eğrisi olarak karakterize edilmiştir (Şekil 4.11.). Kalıbın strok değerinin tanımlanması için öncelikle her bir numunenin yırtılma yükseklikleri tespit edilmiş, daha sonra tüm bu yırtılma yükseklikleri kapsayacak bir değerde, 52 mm olarak tanımlanmıştır. Analizlerde tutucu kuvveti 400 kN alınmıştır (Şekil 4.12.)



Şekil 4.11. Nakajima testinde kalıp hızı - zaman grafiği

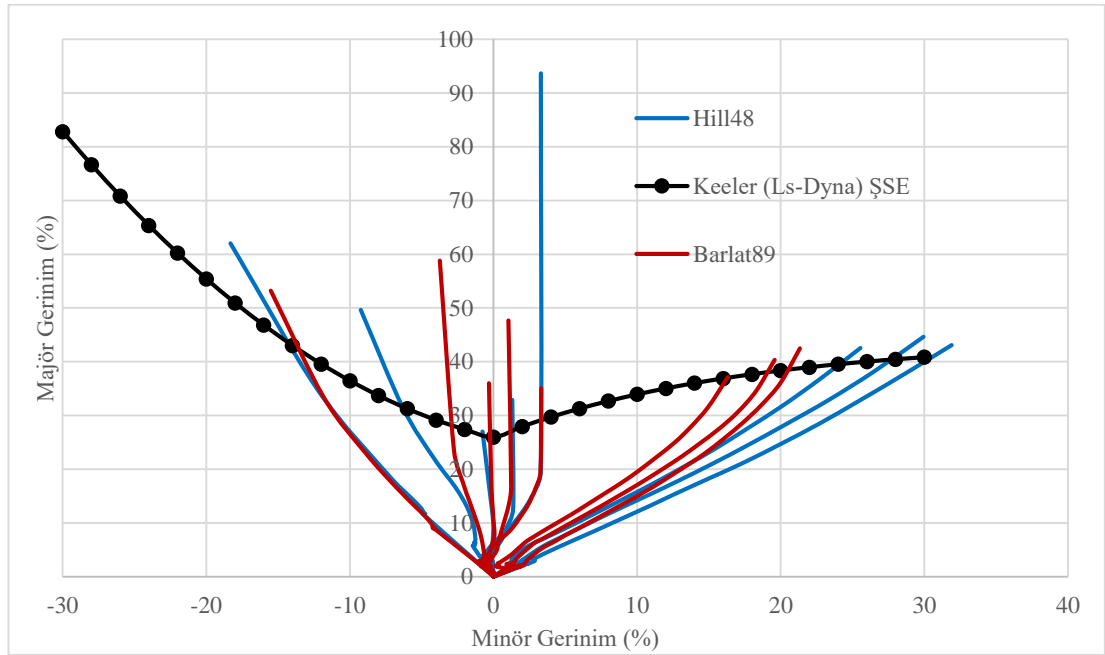


Şekil 4.12. Nakajima testinde tutucu kuvveti - zaman grafiği



#### 4.4.5. DP600 çeliği Nakajima testi sonlu elemanlar analizi

Bu bölümde DP600 çeliği için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinin sonuçları verilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde hassasiyeti artırmak amacıyla iki farklı malzeme modeli (Barlat89 ve Hill48) ve üç farklı şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanılmıştır. Malzeme modelleri için tanımlanan parametreler Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.'ten alınmıştır. Malzeme modellerinin karşılaştırılması numunelerin yırtılma yükseklikleri üzerinden yapılmış, ayrıca her bir malzeme modelinde 8 farklı numuneye ait gerinim yolları da çıkarılmıştır. Böylece kullanılan malzeme modelinin şekillendirilebilirlik sınır eğrisininin oluşturulmasına ve gerinim yollarına olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.13.'te, Barlat89 ve Hill48 malzeme modellerinin her bir numuneye ait elde ettikleri gerinim yolları gösterilmektedir.

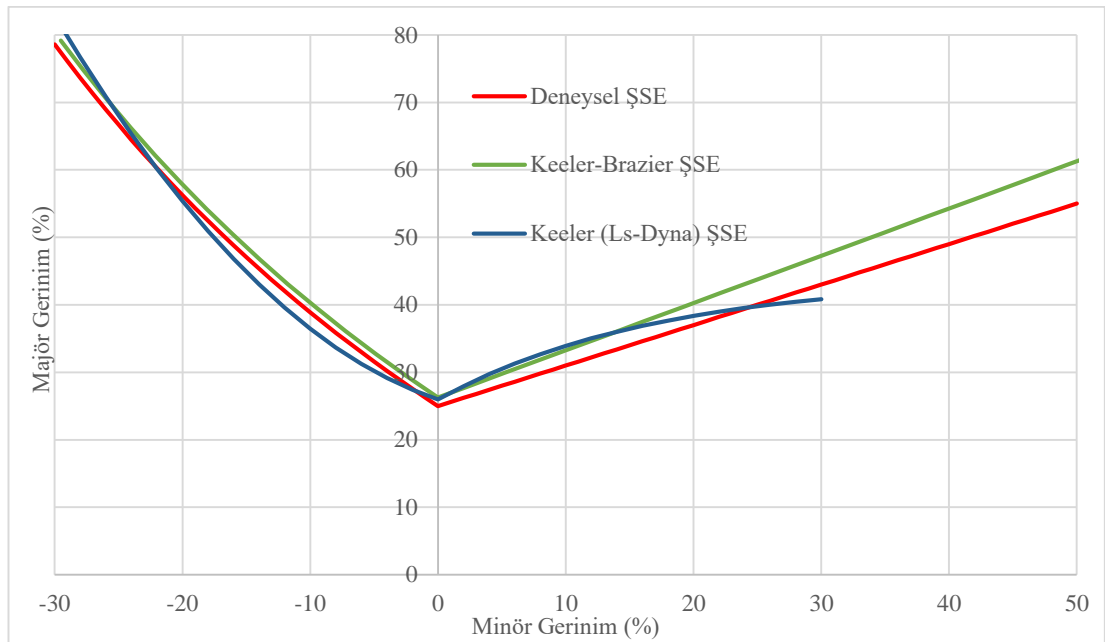


Şekil 4.13. DP600 çeliğinin iki farklı malzeme modeliyle elde edilen gerinim yolları

Elde edilen gerinim yollarına bakıldığında, iki malzeme modeli de tek eksenli çekme hali için yaklaşık aynı gerinim yolunu çizerken; 50, 150, 175 ve 200 mm genişliğe sahip numunelerde farklı gerinim yolları çizmişlerdir. Belirlenen sınır eğrisine göre, majör gerinim değerlerinde çok büyük farklar yokken, minör gerinim değerlerinde kaydadeğer bir fark bulunmaktadır. Hill48 malzeme modelinin, daha yüksek minör

gerinim değerleri göstermesi nedeniyle Barlat89 modeline göre Şekillendirilebilirlik sınır diyagramında daha geniş bir bölgeyi kapsadığı gözlenmiştir.

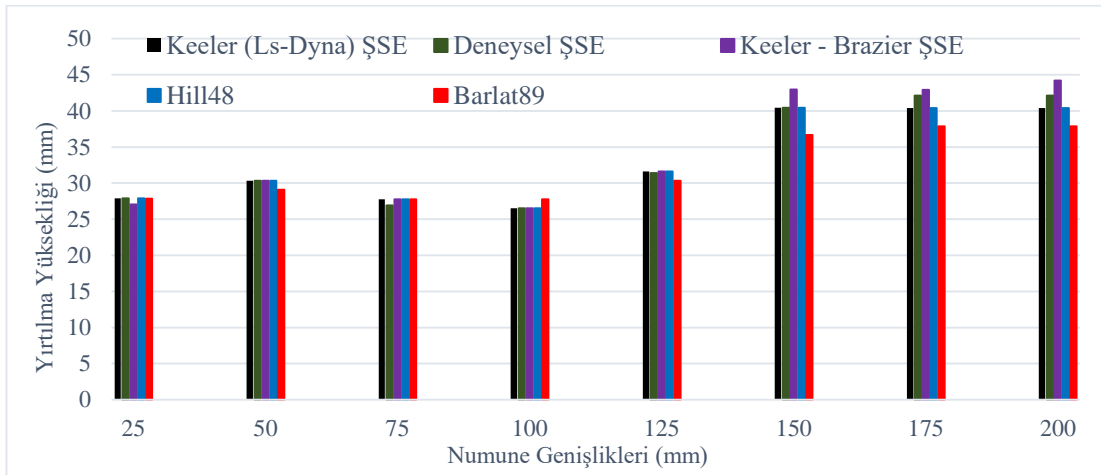
Malzeme modelleri arasındaki gerinim yolları farkı elde edildikten sonra, Şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin, sonlu elemanlar yöntemindeki tahmin performansları da incelenmiştir. DP600 ift fazlı çeliği için 3 farklı Şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14.'te hassasiyet analizi gerçekleştirilen sınır eğrilerinin birbirine göre konumları verilmiştir.



Şekil 4.14. DP600 eliğine ait Şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin karşılaştırılması

Keeler (Ls-Dyna) Şekillendirilebilirlik sınır eğrisi, diyagramın sağ tarafındaki düşük minör gerinim değerlerinde deneysel eğriye göre çok az daha yukarıda bir sınır çizmiŐ, buna karşılık bu minör gerinim değerlerinde orijinal Keeler-Brazier eğrisi ile çakıŐık bir durum göstermektedir. Diyagramın sol tarafında ise tam tersi bir durum söz konusudur. Düşük minör gerinim değerlerinde deneysel ve orijinal Keeler-Brazier eğrisi, Keeler (Ls-Dyna) Şekillendirilebilirlik sınır eğrisinden daha yukarıda bir konumdadır. Orijinal Keeler-Brazier eğrisi, diyagramın her iki tarafında da deneysel eğriden daha yukarıdadır. Diyagramın sağ tarafında bu iki eğri arasındaki fark gittikçe artmaktadır. Konumlar incelendiğinde, Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisinin, hasarı deneysel sınır eğrisi ile yakın bir değerde öngöreceği düŐünülmektedir.

Şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin, sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin performanslarına etkisi, Nakajima test numunelerinin yırtılma yükseklikleri üzerinden incelenmiştir. Ls-Dyna, kullanıcılara, sadece kalınlık ve pekleşme üsteli girilerek çizilen sınır eğrisinin (Keeler Ls-Dyna) yanısıra, majör ve minör gerinim değerlerinin bilindiği sınır eğrilerinin de programa aktarılabilme olanağı vermektedir. Orijinal Keeler-Brazier ve deneysel sınır eğrileri, referans alınan raporda [25] her bir şekillendirilebilirlik sınır eğrisine ait majör ve minör gerinim değerlerinin programa girilmesiyle çizilmiştir. Malzeme modelleri üzerinden yapılan karşılaştırmalarda, aynı malzeme modeli (Hill48) kullanılmış, tek değişkenin sınır eğrisi olması sağlanmıştır. Malzeme modelleri ve şekillendirilebilirlik sınır eğrileri üzerinden yırtılma yüksekliklerinde ölçülen tahmin hassasiyetinin grafiği, Şekil 4.15.'te verilmiştir.

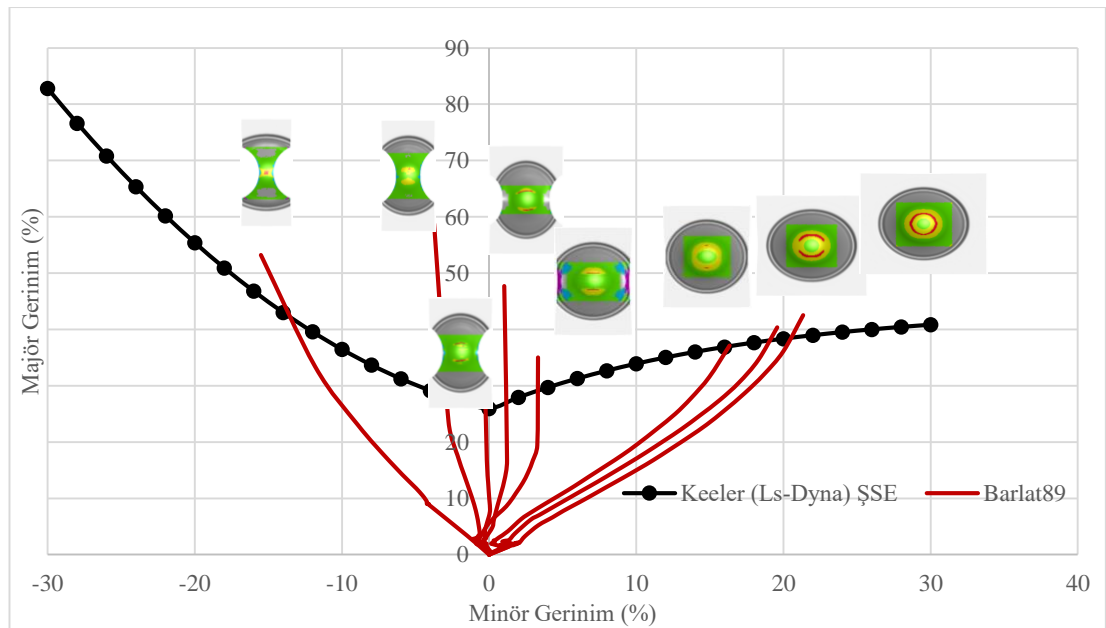


Şekil 4.15. DP600 çeliğinde malzeme modeli ve sınır eğrilerinin yırtılma yüksekliğine etkisi

Yırtılma yükseklikleri malzeme modeline göre incelendiğinde, Barlat89 malzeme modelinin daha emniyetli (conservative) bir şekillendirme işlemi gerçekleştirdiği görülmüştür. Malzeme modellerinin tahmin ettiği yırtılma yükseklikleri arasındaki fark, 3 mm'ye kadar değişebilmektedir. 200 mm genişliğe sahip kare numunede, Hill48 malzeme modeli 40,39 mm'de yırtılma öngörürken, Barlat89 malzeme modeli ise 37,88 mm yüksekliğinde bir yırtılmayı öngörmektedir. Malzeme modellerinin farklı gerinim yolları elde etmesi, özellikle 150, 175 ve 200 mm genişliğe sahip numunelerde böyle bir farkın ortaya çıkmasına sebep olmaktadır.

Yırtılma yüksekliklerindeki değişim, şekillendirilebilirlik sınır eğrileri açısından incelendiğinde; 25, 150, 175 ve 200 mm genişliğe sahip numunelerde Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, hem deneysel hem de orijinal Keeler-Brazier eğrisine göre daha düşük bir yırtılma yüksekliğine sahiptir. 25, 150 ve 175 mm genişliğe sahip numunelerde yaklaşık 2 mm, 200 mm genişliğe sahip numunede ise 4 mm kadar bir fark bulunmaktadır. Orijinal Keeler-Brazier eğrisi, deneysel eğri ile her bir numunede yaklaşık aynı yüksekliği verirken 200 mm genişliğe sahip numunede bulunan fark yaklaşık 2 mm değerindedir.

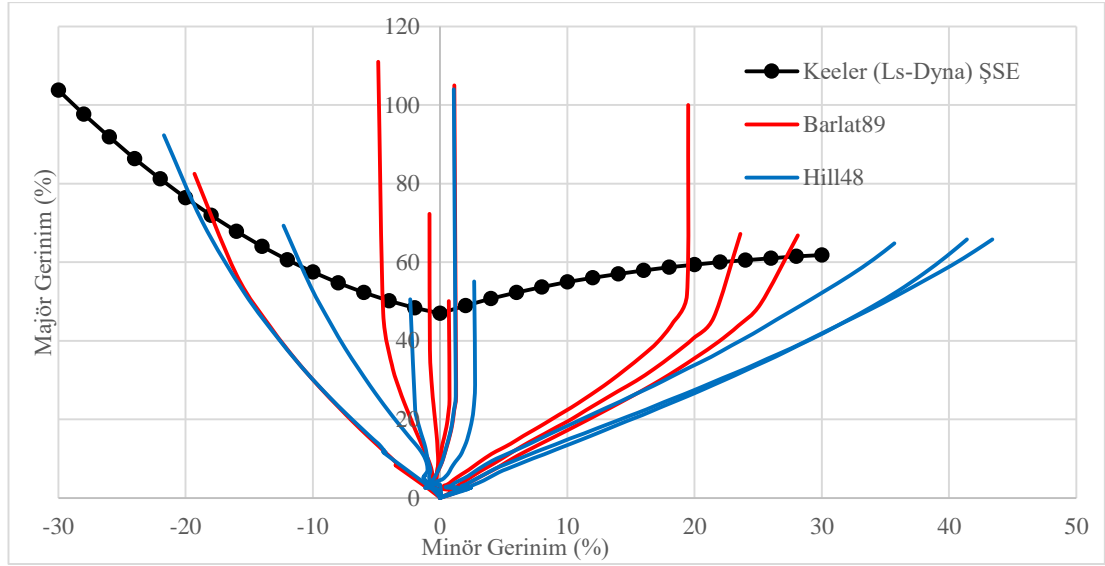
Bu veriler ışığında, sonlu elemanlar programında tanımlanmış olan Keeler (Ls-Dyna) şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin DP600 çift fazlı çeliği için kullanılabilir olduğu görülmektedir. Teorik eğri, deneysel eğriden düzlem gerinim noktasında yaklaşık %1 gibi bir fark ile yukarıdadır. Teorik eğrinin tahmin performansı başarılı olmaktadır. Malzeme modeline göre değişen gerinim yolları, sac metalin şekillendirilebilirlik sınır eğrisinde bulunan majör ve minör gerinim değerlerine daha farklı bir zımba stroğunda ulaşmasına sebep olmuştur. Bu nedenle numunelerin yırtılma yüksekliklerinin tahmininde, özellikle çift eksenli gerinim bölgesinde bir fark ortaya çıkmıştır. Şekil 4.16.'da örnek bir malzeme modeli ve sınır eğrisi ile elde edilen her bir numunenin yırtılma davranışı gösterilmiştir.



Şekil 4.16. DP600 çeliğinin Nakajima test numunelerinde görülen yırtılma davranışları

#### 4.4.6. TRIP600 çeliği Nakajima testi sonlu elemanlar analizi

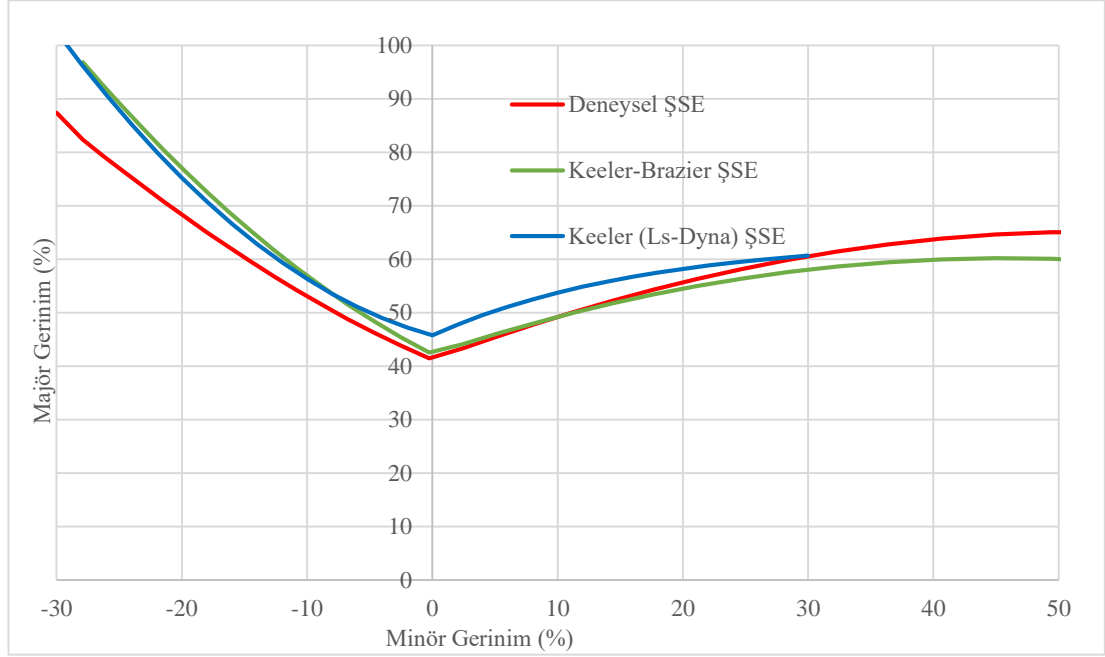
Bu bölümde, sonlu elemanlar analizi ile şekillendirilebilirliği incelenecek olan bir diğer malzeme, TRIP600 çeliğinin analiz sonuçları verilmiştir. TRIP600 çeliği için de DP600 malzemesiyle aynı prosedür izlenmiştir. Simülasyonlarda kullanılacak malzeme modelleri Hill48 ve Barlat89'dur. Bu malzeme modelleri için kullanılan parametreler Tablo 4.4. ve 4.5.'ten alınmıştır. Şekil 4.17.'de belirlenen malzeme modeli ve sonlu elemanlar tabanlı sınır eğrisi ile TRIP600 çeliğinin her bir Nakajima test numunesine ait elde edilen gerinim yolları verilmiştir.



Şekil 4.17. TRIP600 çeliğinin iki farklı malzeme modeliyle elde edilen gerinim yolları

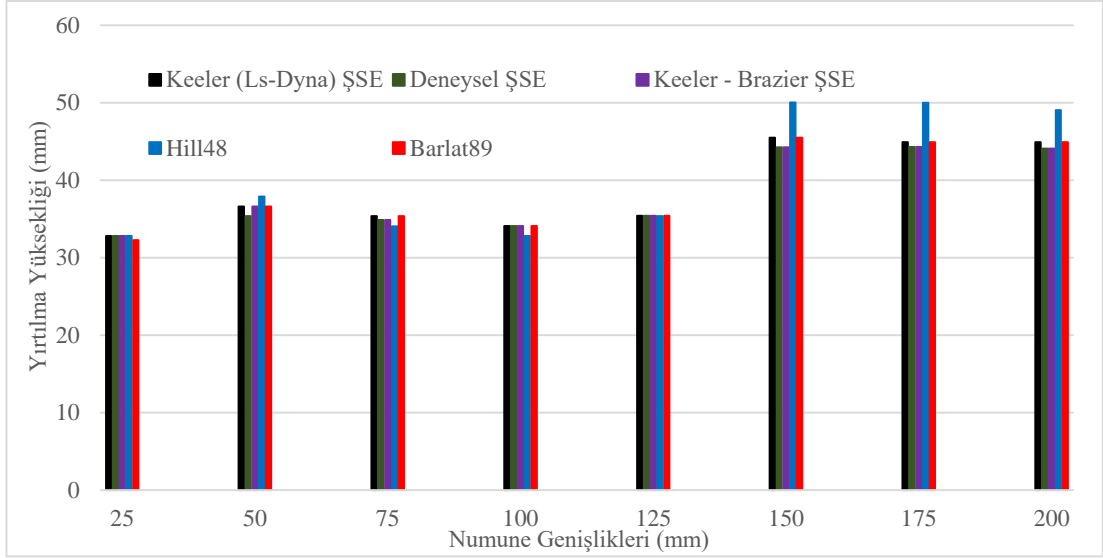
Şekil 4.17.'de görüldüğü gibi, TRIP600 çeliğinde Nakajima testinin sonlu elemanlar analizi ile elde edilen gerinim yollarının düzlem gerinim ve çift eksenli dengeli gerinim durumlarında yığıldığı görülmektedir. Düzlem gerinim durumuna sahip test numunelerinde, şekillendirilebilirlik sınır eğrisine yaklaşan majör gerinim değerlerinde ani bir artış gözlenmiştir. Bu artış, kopma davranışının ani olarak meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Böyle bir yırtılma özelliği, boyun verme limitlerinin deneysel olarak belirlenmesini de zorlaştırmaktadır. Malzeme modeline bakıldığında, 50, 75, 150, 175 ve 200 mm genişliğe sahip numunelerde malzeme modellerinin farklı gerinim yolları tahmin ettiği görülmektedir. Hill48 malzeme modeli, diyagramda daha geniş minör gerinim değerine sahip bölgeyi kapsamıştır.

Nakajima testi sonlu elemanlar analiziyle her iki malzeme modeline ait gerinim yollarının çıkarılmasından sonra, TRIP600 çeliği için hassasiyet analizi yapılacak şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin karşılaştırması yapılmıştır. Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrisi ve orijinal Keeler-Brazier sınır eğrisi ile birlikte Şekil 4.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. TRIP600 çeliğine ait şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin karşılaştırılması

Sınır eğrilerinin konumlarına bakıldığında, Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisinin diyagramın hem sol hem de sağ tarafında deneysel sınır eğrisinden yüksek bir konumda olduğu görülmüştür. Keeler-Brazier eğrisi, diyagramın solunda sonlu elemanlar tabanlı eğri ile çok yakın bir konumdayken, diyagramın sağ tarafında deneysel sınır eğrisine daha yakın bir eğilim göstermiştir. Dikey eksen üzerinde bulunan düzlem gerinim durumunda, Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, deneysel eğriden yaklaşık olarak %5 yukarıdadır. Bu yukarılıkta bir eğrinin, hasarı deneysel eğriden daha yüksek majör gerinim değerlerinde tahmin edeceği öngörülmektedir. İki farklı malzeme modeli ve üç farklı sınır eğrisi ile yapılmış hassasiyet analizi, TRIP600 çeliği için de Nakajima testine ait numunelerin yırtılma yükseklikleri üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.19.).

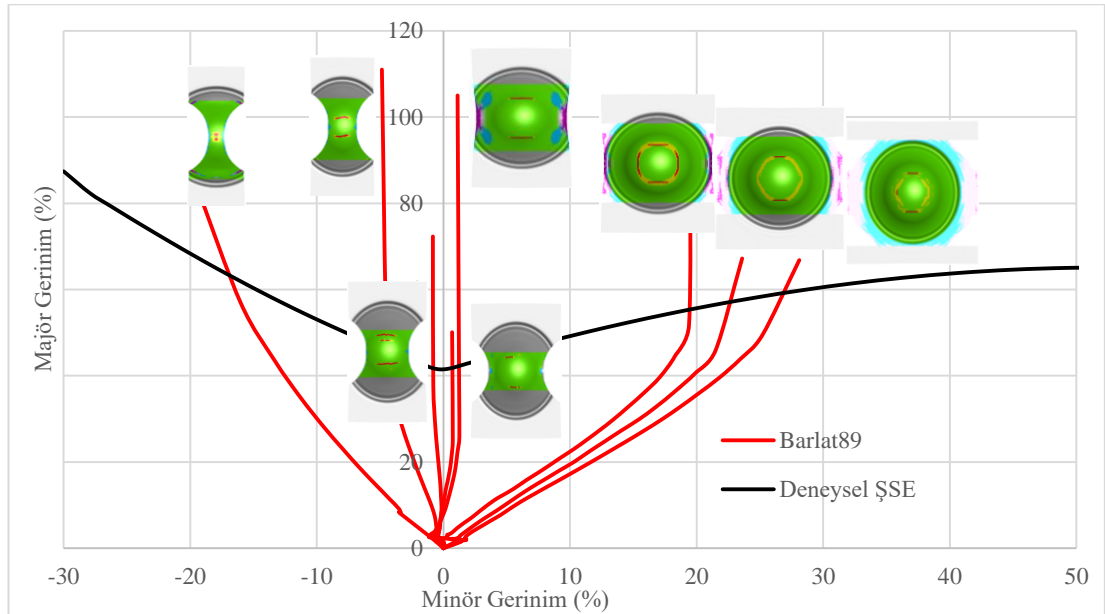


Şekil 4.19. TRIP600 çeliğinde malzeme modeli ve sınır eğrilerinin yırtılma yüksekliğine etkisi

Sınır eğrilerinin yırtılma yüksekliklerine etkisi incelendiğinde, Keeler (Ls-Dyna) şekillendirilebilirlik sınır eğrisi; 25, 100 ve 125 mm genişliğe sahip numunelerde deneysel sınır eğrisi ile aynı yırtılma yüksekliğine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, malzemedeki majör gerinim değerlerinin ani olarak yükselerek sac metalin öngördüğü kopma davranışdır. Diyagramın sağ tarafını temsil eden çift eksenli gerinim durumlarında deneysel sınır eğrisi 1,2 mm'ye yakın farklarda daha düşük yırtılma yüksekliği sonucu vermiştir. Ancak hiçbir durumda Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, deneysel eğriden daha düşük bir yırtılma yüksekliği göstermemiştir. Deneysel eğri ile orijinal Keeler-Brazier eğrisi, 50 mm genişliğe sahip numune hariç aynı yırtılma yüksekliklerini tespit etmişlerdir. 50 mm genişlikli numunede fark, sac kalınlığından daha azdır. 25 mm genişliğe sahip numunede sonlu elemanlar analizinin öngördüğü ani yırtılma davranışı ve buna bağlı olarak ani majör gerinim değerinin artışı, eğriler arasındaki konum farkına rağmen yırtılma yüksekliklerinin aynı kalıp stroklarında görmesine neden olmuştur.

Malzeme modellerinin yırtılma yüksekliklerinin tahminine etkisi incelendiğinde, Hill48 malzeme modelinin 75 ve 100 mm genişliğe sahip numuneler hariç, diğer numunelerde daha yüksek değerlerde bir yırtılmayı öngörmüştür. 150, 175 ve 200 mm genişliğe sahip numunelerde gerinim yollarının etkisiyle yırtılma yükseklikleri arasındaki tahmin farkı artmıştır ve yaklaşık 5 mm'dir. Sac metallerin

şekillendirilebilirlik kapasitelerinin belirlenmesinde kullanılan düzlem dışı gerinim testlerinden Nakajima testinin, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan simülasyonlarında malzeme davranışının modellenmesinin önemi açıkça görülmektedir. Şekil 4.20.'de örnek bir malzeme modeli ve şekillendirilebilirlik sınır eğrisi ile TRIP600 çeliğinin Nakajima test numunelerindeki yırtılma davranışları verilmiştir.

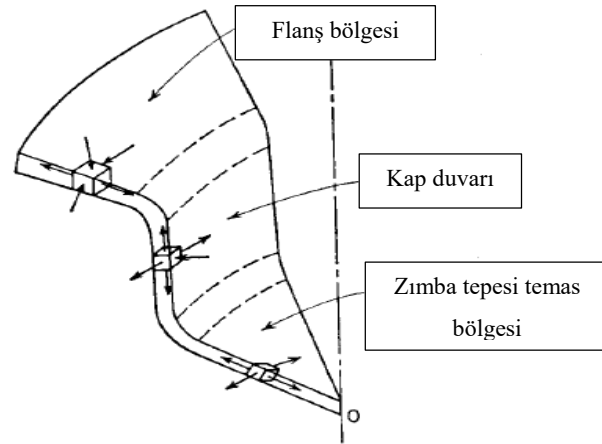


Şekil 4.20. TRIP600 çeliğinin Nakajima test numunelerinde görülen yırtılma davranışları

#### 4.5. Kare Kutu Çekme Testinde Şekillendirilebilirlik Sınırının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi

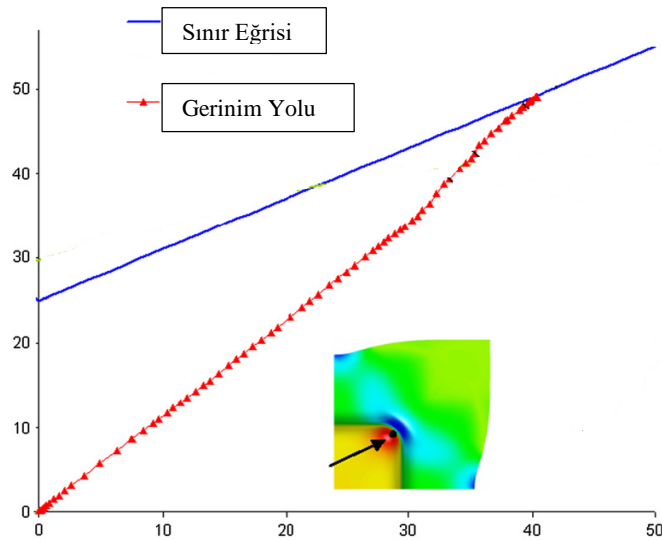
Kare kutu çekme testi, sac metallerin germe şartları altında çekilebilme limitlerini ölçmektedir. Test, yırtılma yüksekliği ve sac metalin maruz kaldığı gerinim durumları ile diğer şekillendirme testleri arasında bir karşılaştırmanın yapılabilmesini sağlar. Kare kutu çekme testinde sac metalin flanş, kap duvarı ve tepe bölgeleri, farklı gerinim yollarına sahiptirler [59]. Şekil 4.21.'de flanş, duvar ve zımba tepe bölgelerindeki gerinim yolları temsili hacim elemanı üzerinden gösterilmiştir.





Şekil 4.21. Kare kutu çekme testinde sac metalin gerinim durumları [59]

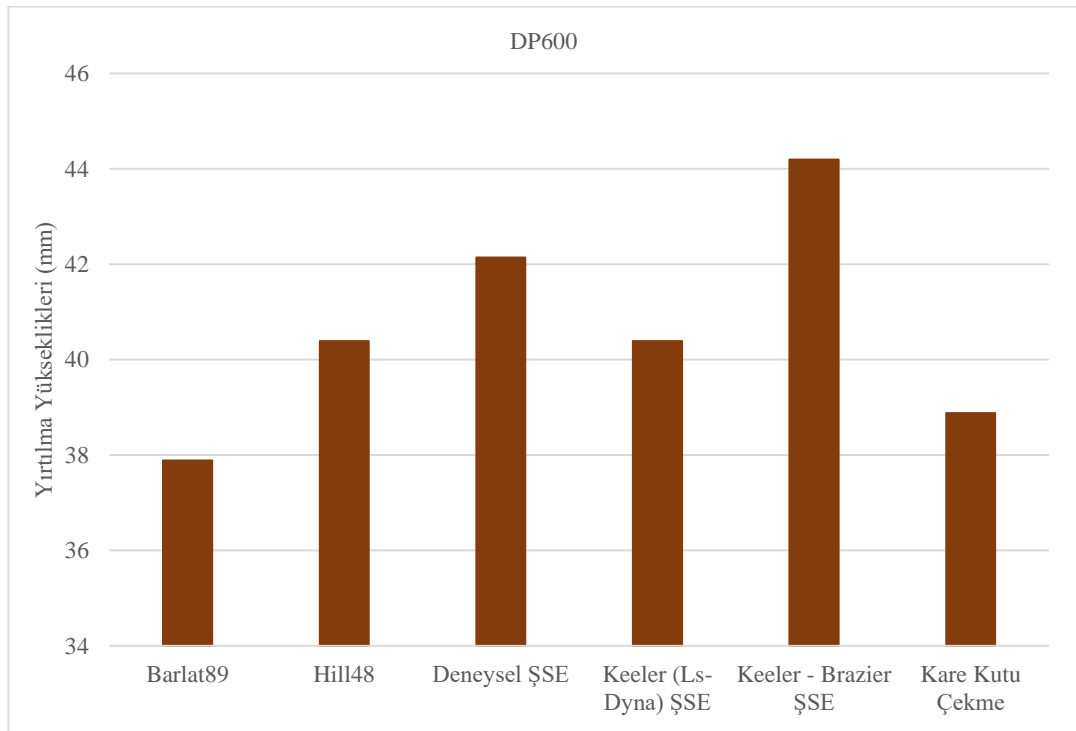
Zımbanın tepe noktasıyla temas eden sac metal bölgesi, çift eksenli gerilme durumundadır ve şekillendirme işlemi boyunca giderek incelir. Burada sürtünmeden kaynaklı bir yapışma davranışı da gözlenir. Flaş bölgesinden kabın içine doğru akan metal, belirli bir genişlikten kalıbın delik genişliğine doğru küçüleceği için, çevresel olarak basma; radyal olarak çekme gerinimine maruz kalır [59]. Flaş bölgesindeki malzeme, radyal olarak kalıbın içine akar. Kare kutu çekme testinde, kap duvarı ve zımba tepe noktasını birbirine bağlayan radyüs bölgesi, bütün bir şekillendirme işlemi boyunca çift eksenli gerinim yoluna sahiptir ve gerinim yığılması dolayısıyla hasarın burada görülmesi beklenir. Şekil 4.22.'de bu gerinim yoluna ait görsel verilmiştir [28].



Şekil 4.22. Kare kutu çekme testinde radyüs bölgesine ait gerinim yolu [28]

Nakajima testinde simülasyonu gerçekleştirilen 200 x 200 mm boyutlarındaki numune de yırtılma görülene kadar aynı gerinim yoluna sahip olmaktadır. Kare kutu çekme testinde, çift eksenli dengeli gerinim durumuna sahip zımba radyüsü temas bölgesi, aynı zamanda kare kutu yırtılma yüksekliği anlamına da gelmektedir. Bu bağlamda iki test numunesi arasında bir korelasyon kurulmuş ve inceleme yapılmıştır. Böylece DP600 ve TRIP600 çeliklerinin aynı gerinim yoluna sahip iki farklı test numunesinin yırtılma yükseklikleri karşılaştırılmış, kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek deneysel yırtılma yüksekliğinin (zımba radyüsünde yırtılma) tahmin edilemeyeceği araştırılmıştır.

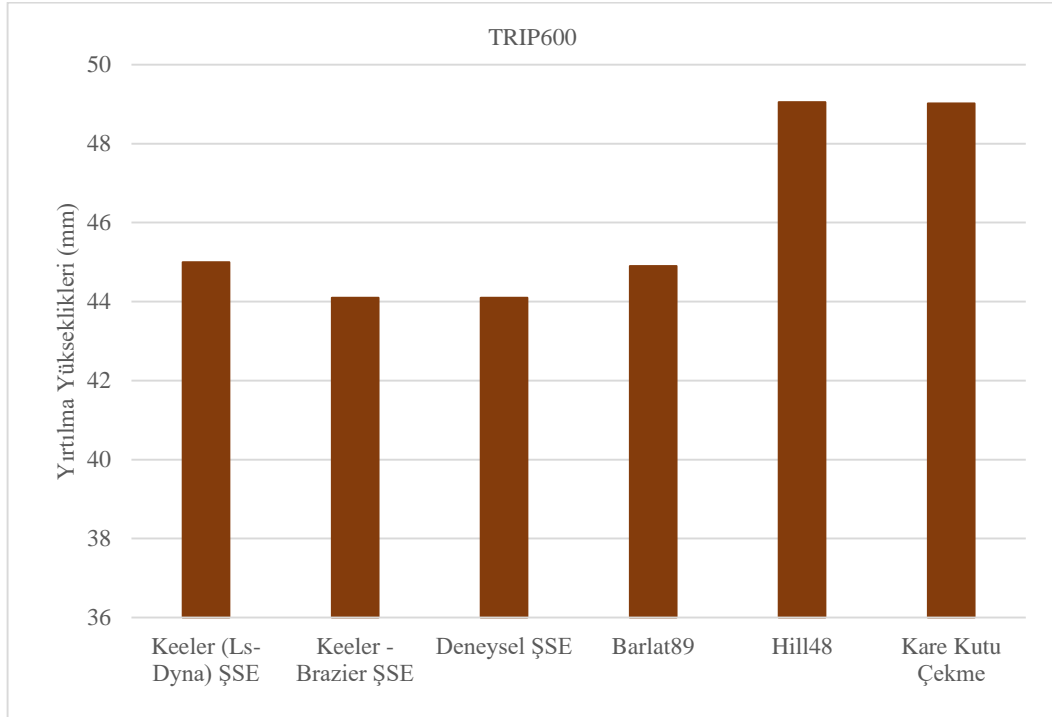
DP600 çeliğinde gerçekleştirilen Nakajima testi sonlu elemanlar analizinde, 200 x 200 mm boyutlarındaki numunenin iki farklı malzeme modeli ve üç farklı şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanılarak çift eksenli dengeli gerinim durumundaki yırtılma yükseklikleri, kare kutu çekme testinin deneysel yırtılma yüksekliği ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.23.).



Şekil 4.23. Aynı gerinim yoluna sahip bölgelerin yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırılması (DP600)

DP600 çeliği için iki farklı malzeme modeli ve üç farklı sınır eğrisi kullanılarak gerçekleştirilen Nakajima testi sonlu elemanlar analizinde, Hill48 akma kriterine sahip olan malzeme kartı çift eksenli gerinim durumuna sahip Nakajima test numunesinde 40,39 mm’de yırtılmıştır. Öte yandan Barlat89 malzeme modeli kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizinde Nakajima testi numunesi 37,88 mm değerinde bir yırtılma yüksekliğini öngörmüştür. DP600 çeliğinin kare kutu çekme testindeki deneysel yırtılma yüksekliği ise 38,84 mm’dir [25]. Hill48 akma kriterine sahip sınır eğrileri arasındaki karşılaştırmaya bakıldığında, Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, deneysel sınır eğrisinden yaklaşık 1,5 mm değerinde daha düşük bir yırtılma yüksekliği tahmin etmiştir. Buna karşılık orijinal Keeler-Brazier eğrisi, deneysel eğriden yaklaşık 1,5 mm daha yukarıda bir yırtılmayı öngörmüştür. Kare kutu çekme testindeki deneysel yırtılma yüksekliğine en yakın sonucu, sonlu elemanlar analizlerinde malzeme modellerinden Barlat89 ve sınır eğrilerinden Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi vermiştir.

Aynı malzeme modeli ve sınır eğrilerinin karşılaştırılması TRIP600 çeliği için de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.24.).



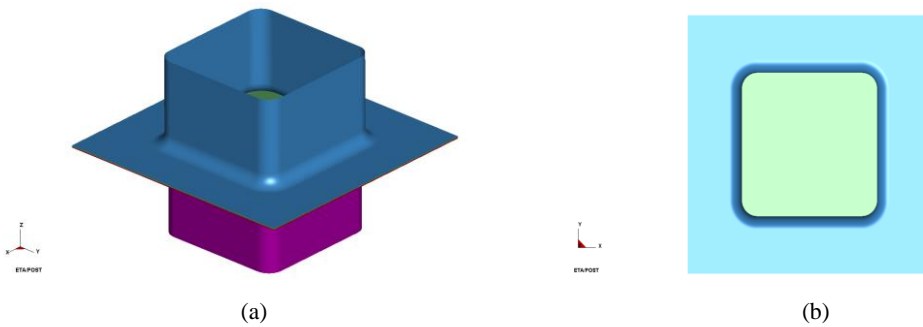
Şekil 4.24. Aynı gerinim yoluna sahip bölgelerin yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırılması (TRIP600)

TRIP600 çeliğinin Nakajima simülasyonu iki farklı şekillendirilebilirlik sınır eğrisi ile gerçekleştirilmiştir. Keeler (LS-Dyna) sınır eğrisi ve Barlat89 malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizde 200 x 200 mm boyutlarındaki numune 45 mm yırtılma yüksekliğine sahipken, deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanıldığında, bu numunenin yırtılma yüksekliği 44,1 mm olmaktadır. TRIP600 çeliğinin kare kutu çekme testi deneysel yırtılma yüksekliği, ki aynı gerinim yoluna sahiptir, 49,02 mm'dir [25].

Şekillendirme işlemi boyunca aynı gerinim yoluna sahip bölgelerin yırtılma yükseklikleri karşılaştırıldığında, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yırtılma yükseklikleri, kare kutu çekme testinin deneysel yırtılma yüksekliklerinden daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlar ışığında, daha hassas sonuç veren malzeme modeli ve sınır eğrisi kullanılarak gerçekleştirilen kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizinin, kare kutu deneysel yırtılma yüksekliğini tahmin etmesi beklenmektedir.

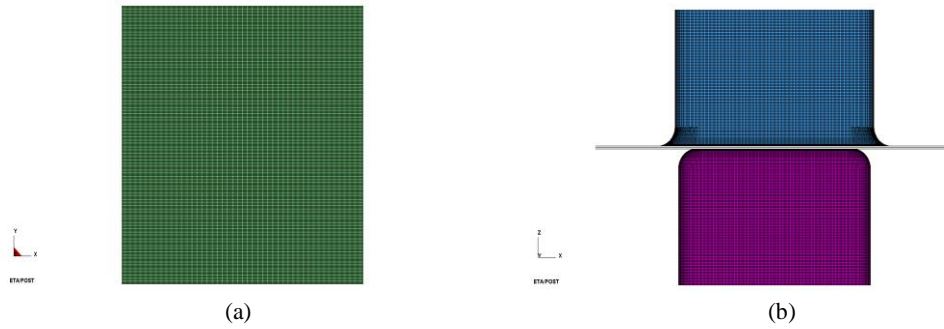
#### 4.5.1. Kare kutu çekme testinin modellenmesi ve ağ yapısının oluşturulması

Kare kutu çekme testinde yüzey modelleme kullanılarak modeli oluşturulan test takımı, daha sonra sonlu elemanlar analiz programına aktarılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Geometrik boyutlandırılması literatürde bulunan deneysel verilerle [25] karşılaştırılabilmesi amacıyla aynı alınmıştır. Parça tutucu, ortası delik kare formda, sac ise 203,2 mm kenar uzunluğuna sahip kare formdadır. Şekil 4.25.'te kare kutu çekme testinin modellenmiş halinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.25. Kare kutu çekme testinde a) Kalıp, zımba ve sacın izometrik görünüşü, b) Üstten görünüşü.

Tüm parçalarda ağ yapısı için tam entegre kabuk elemanlar kullanılmış, kalınlık yönündeki integrasyon nokta sayısı 7 olarak alınmıştır. İş takımında ağ yapısı oluşturulurken radyüs bölgelerinde hassasiyet artırılmıştır. En yüksek 1 mm, en düşük 0,5 mm boyutlara sahip elemanlar kullanılmıştır. Sacın ağ yapısında 1 mm büyüklüğündeki elemanlar kullanılmıştır. Şekil 4.26.'da kare kutu çekme test takımında ve sac metalde oluşturulan ağ yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.26. a) Sac metalde oluşturulan ağ yapısı, b) Test takımında oluşturulan ağ yapısı

#### 4.5.2. Malzeme davranışının modellenmesi

Kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizinde, DP600 çeliği için Hill48 ve Barlat89 malzeme modelleri kullanılmıştır. Böylece kare kutu çekme testinin deneysel yırtılma yüksekliğinin tahmini amaçlanmıştır. TRIP600 çeliği için, yırtılmanın Nakajima test numunesinin sonlu elemanlar analizinde çok daha erken görüldüğü Barlat89 malzeme modelinin kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 4.24.). Tanımlanan malzeme parametreleri Nakajima testindeki ile aynıdır (Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.).

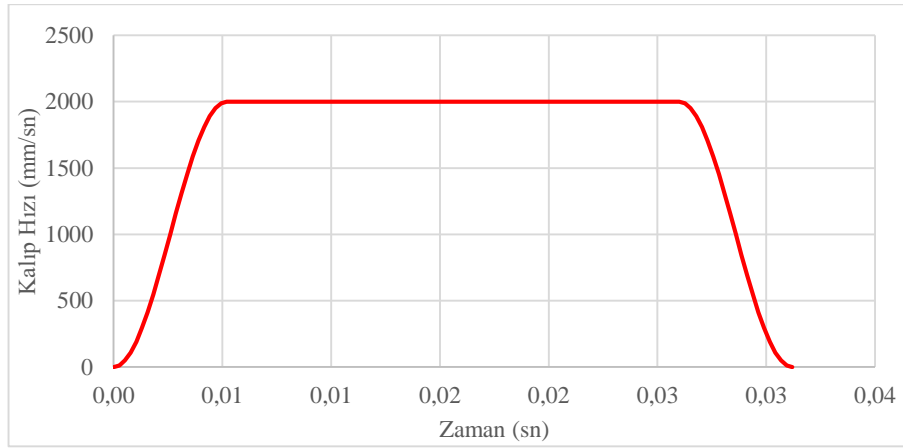
#### 4.5.3. Şekillendirilebilirlik sınır eğrilerinin tanımlanması

DP600 çeliği için Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle deneysel sınır eğrisi arasında kabul edilebilir bir fark olduğundan ve kare kutu çekme testinin deneysel yırtılma yüksekliğine en yakın sonucu veren eğri olduğundan simülasyonlarda Keeler (Ls-Dyna) eğrisi tercih edilmiştir. TRIP600 çeliğinin kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analiziyse, hem Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi hem de deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrisi ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sınır eğrisine ait majör ve minör gerinim

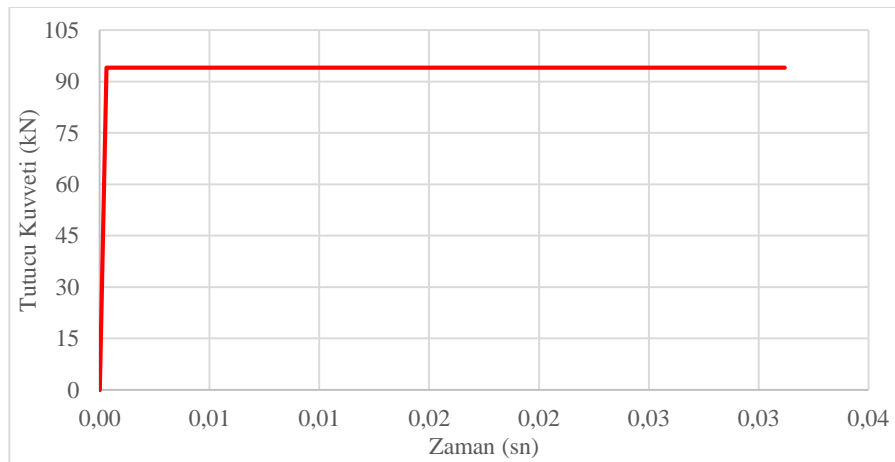
değerleri tek tek girilerek, eğrinin sonlu elemanlar analiz ortamında çizilmesi sağlanmıştır.

#### 4.5.4. Sınır şartlarının tanımlanması

Simülasyonlarda kalıp hızı ve tutucu kuvvetleri aynı alınmıştır. Kalıbın hızı 2000 mm/sn'dir ve sinüs eğrisi olarak karakterize edilmiştir (Şekil 4.27.). Kalıbın strok değeri, her iki çelik malzeme için de kare kutu çekme testinin deneysel yırtılma yükseklikleri de göz önüne alınarak 52 mm olarak alınmıştır. Tutucu kuvveti 94 kN'dur (Şekil 4.28.).



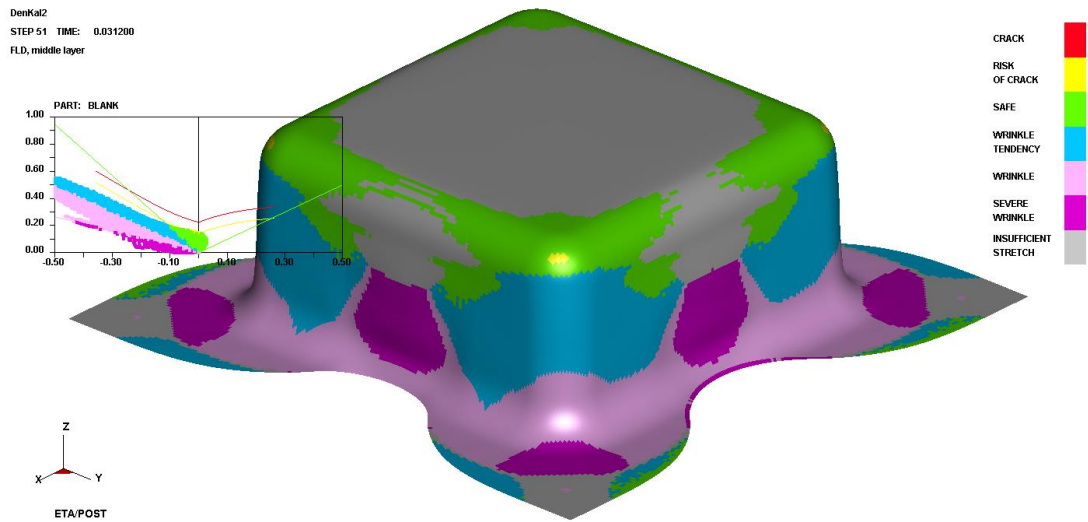
Şekil 4.27. Kare kutu çekme testinde kalıp hızı - zaman grafiği



Şekil 4.28. Kare kutu çekme testinde tutucu kuvveti - zaman grafiği

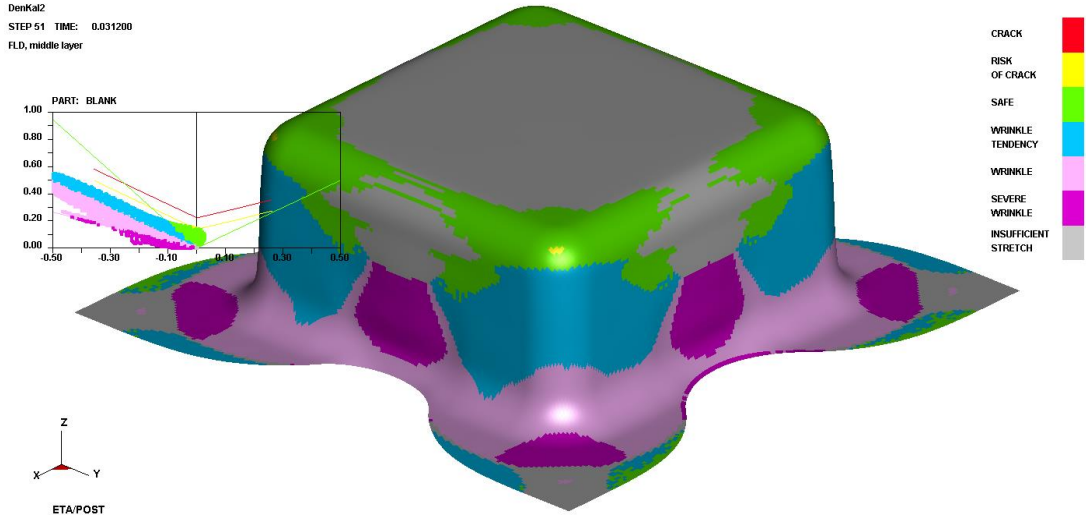
#### 4.5.5. DP600 çeliği kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi

Kare kutu çekme testinde, gerilme yığılmasının görüldüğü ve neticesinde hasarın beklendiği yer zımba radyüsünün temas ettiği sac bölgesidir [28,51]. DP600 çeliği için kabul edilebilirliği gösterilmiş olan Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, Hill48 modeline göre daha hassas çözümler veren Barlat89 malzeme modeli ile birlikte kullanılarak kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece doğrulaması yapılmış sınır eğrisi ve malzeme modeli ile DP600 çeliğinin kare kutu çekme testinde deneysel olarak gözlemlenen 38,84 mm [25] yırtılma yüksekliğini tahmin edip edemeyeceği araştırılmıştır. Şekil 4.29.'da DP600 çeliğinin kare kutu çekme testinin şekillendirilebilirlik sınır diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.29. DP600 çeliğinin Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi

Barlat89 malzeme modeli ve Keeler (Ls-Dyna) şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizi; kare kutu çekme testindeki 38,84 mm değerinde deneysel olarak gözlemlenen yırtılmayı öngörememiştir. Zımba radyüsünün temas halinde olduğu bölgede hasar oluşma riski olduğunu belirtmiştir. Aynı kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizi, iki sınır eğrisi arasında fark olduğu için bir de deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrisi girilerek çözülmüştür (Şekil 4.30.).

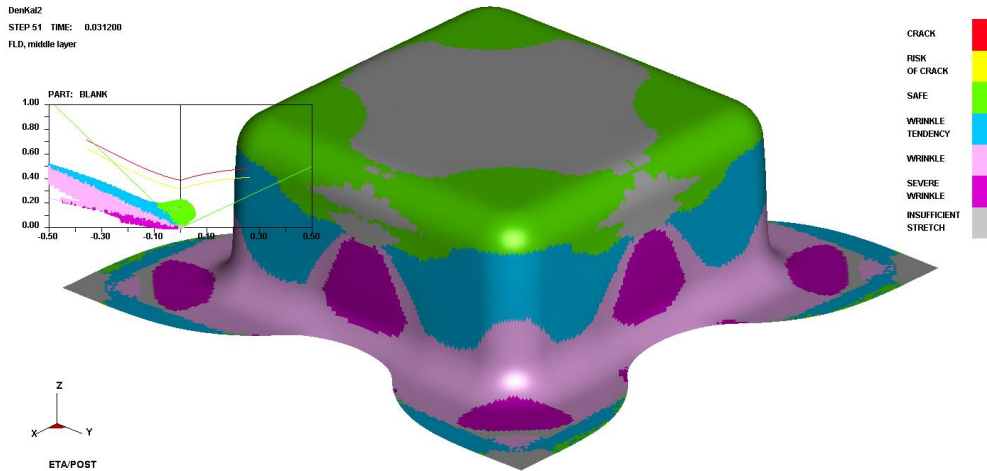


Şekil 4.30. DP600 çeliğinin deneysel sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi

Şekil 4.30.'da da görüldüğü gibi, deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanıldığı zaman da, sonlu elemanlar analizi 38,84 mm deneysel yırtılma yüksekliğini öngörememiştir.

#### 4.5.6. TRIP600 çeliği kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi

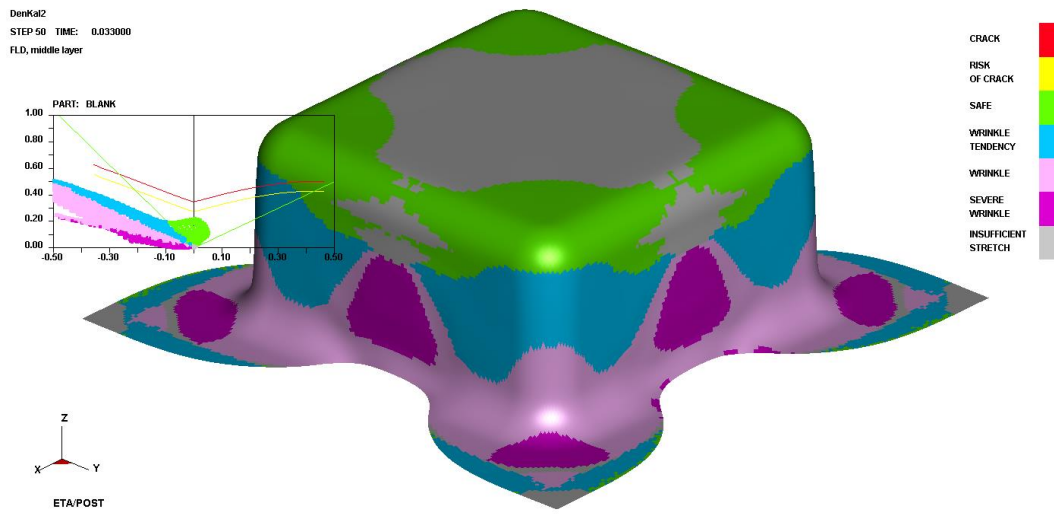
TRIP600 çeliği için sonlu elemanlar analizi, ilk olarak Keeler (Ls-Dyna) şekillendirilebilirlik sınır eğrisi ile gerçekleştirilmiştir. Analizde Barlat89 malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 4.31.).



Şekil 4.31. TRIP600 çeliğinin Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi



Deneysel olarak 49,02 mm'de görülmesi gereken yırtılma, Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ve Barlat89 malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde öngörülememiştir. Simülasyonda kullanılan sınır eğrisi, deneysel sınır eğrisinden daha yukarıda olduğu için bu yırtılmanın öngörülemediği düşünülmüştür. Aralarında sac kalınlığından daha az bir fark bulunmaktadır (Şekil 4.24). Bu nedenle TRIP600 çeliği için kare kutu çekme testinin simülasyonu, bir de deneysel sınır eğrisi kullanılarak çözülmüş ve kare kutu çekme testinin deneysel yırtılma yüksekliğini tahmin edip edemeyeceği araştırılmıştır (Şekil 4.32.).



Şekil 4.32. TRIP600 çeliğinin deneysel sınır eğrisiyle kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi

Şekil 4.32.'de de görülebileceği gibi Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi yerine deneysel şekillendirilebilirlik sınır eğrisi kullanıldığı zaman da, deneysel olarak gözlenen yırtılma yüksekliğinde (49,02 mm) hasar öngörülememiştir.

## BÖLÜM 5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada DP600 ve TRIP600 çeliklerinin şekillendirilebilirlikleri, Nakajima testi sonlu elemanlar analizi ile incelenmiş, malzeme modeli ve sınır eğrisi üzerinden hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece hem malzeme modelinin hem de sınır eğrisinin farklı gerinim durumlarındaki performansı göz önüne alınmıştır. Analizlerde; Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi, malzemelere ait deneysel ŞSE ve orijinal Keeler-Brazier eğrisi kullanılarak ŞSE üzerinden hassasiyet çalışması yapılmıştır. Ayrıca iki farklı malzeme modeli (Hill48 ve Barlat89) belirlenerek, malzeme modellerinin yırtılma davranışlarına ve gerinim yollarına olan etkisi incelenmiş, her bir numuneye ait yırtılma yükseklikleri de elde edilmiştir. Daha sonra kare kutu çekme testinde sac metalde zımbanın temas ettiği radyüs bölgesi ile Nakajima testinde aynı gerinim yoluna sahip bir numune üzerinden korelasyon kurulmuş, hassasiyet çalışması yapılan malzeme modeli ile sınır eğrilerinin kare kutu çekme testi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek tahmin performansları incelenmiştir. Kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizi sonuçları, literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

DP600 çeliğinin Nakajima testi sonlu elemanlar analiz sonuçlarına bakıldığında, Barlat89 malzeme modelinin, Hill48 modeline göre test numunelerinde daha düşük değerlerde bir yırtılma yüksekliği öngördüğü tespit edilmiştir. Malzeme modellerinin yırtılma yüksekliklerini tahmin farkları en fazla 2 mm olurken, sınır eğrilerinin tahmin performansları arasındaki fark yaklaşık 4 mm'ye kadar çıkmıştır.

TRIP600 çeliğinde, malzeme modelleri için Nakajima testi sonlu elemanlar analizi performansına bakıldığında, malzeme modelleri arasında DP600 çeliği ile benzer bir davranış görülmüştür. İki malzeme modelinin Nakajima test numunelerinde öngördüğü yırtılma yükseklikleri arasındaki fark 5 mm'ye kadar çıkmıştır. Farklı sınır eğrilerinin tahmin ettiği yırtılma yükseklikleri arasındaki fark sac kalınlığından (1,4 mm) az olmuş, ancak yine de bir fark oluşmuştur.

DP600 çeliğinin, Barlat89 malzeme modeli ile gerçekleştirilen Nakajima testi sonlu elemanlar analizi, 200x200 mm boyutlarındaki numunede 37,88 mm yüksekliğinde bir yırtılma öngörmektedir. Kare kutu çekme testinde yırtılmanın görüldüğü, sac metal ile zımbanın temas ettiği radyüs bölgesi, bu numune ile aynı gerinim yoluna sahiptir ve deneysel yırtılma yüksekliği 38,84 mm'dir. Bu durumda hassasiyeti belirlenmiş malzeme modeli ile gerçekleştirilecek kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizinde hasarın öngörülmesi beklenmektedir. Ancak kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildiğinde hasar tahmin edilememiştir. Bu başarısız tahmin performansının simülasyonda kullanılan teorik sınır eğrisinden kaynaklandığı düşünülmüş, aynı malzeme modeli ile deneysel ŞSE kullanılarak kare kutu çekme testinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş, fakat deneysel yırtılma yüksekliği yine tahmin edilememiştir.

Aynı prosedür TRIP600 çeliği için de gerçekleştirilmiş, kare kutu çekme testinde deneysel olarak gözlemlenen yırtılma yüksekliğinin (49,02 mm), aynı gerinim yoluna sahip Nakajima test numunesinin daha düşük öngörülen yırtılma yüksekliğine (45 mm) bakılarak tahmin edilebileceği düşünülmüştür. Kare kutu çekme testinin belirlenen malzeme modeli ve sınır eğrisiyle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirildiğinde deneysel yırtılma yüksekliğinde hasar öngörülemediği görülmüştür. Analizde kullanılan teorik sınır eğrisinin yerine deneysel ŞSE girilmiş, ancak deneysel yırtılma yüksekliği yine de tahmin edilememiştir.

Elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar analizinde malzeme modellemesinin ve kullanılan teorik sınır eğrilerinin sonuca etkisini açıkça ortaya koymuştur. Farklı malzeme modelleri ile farklı gerinim yollarının elde edildiği, bu nedenle malzemenin yırtılma davranışına ve sonlu elemanlar analizinin hassasiyetini etkilediği gösterilmiştir. Kullanılan teorik sınır eğrilerinin her bir malzeme için dikkatlice seçilmesi gerektiği, analizin hassasiyetine etkisi olduğu gösterilmiştir. Ayrıca orijinal Keeler-Brazier sınır eğrisi ile Ls-Dyna programında tanımlı Keeler eğrisinin farkı ortaya konulmuştur. Kare kutu çekme testinde yırtılma yüksekliği tahmininin başarısız olması, malzeme davranışının modellenmesi ile ilgilidir.

## KAYNAKLAR

- [1] Gavas, M., Sac Metallerin Şekillendirilmesi, Seçkin Yayıncılık, 27-31, 2017.
- [2] Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., Mechanics of Sheet Metal Forming, Butterworth Heinemann, 1-5, 2002.
- [3] TÜBİTAK Malzeme Enstitüsü, Otomotiv Endüstrisi ve Çelik: Yeni Nesil Çelikler, 56H5501, Proje Sonuç Raporu, 2008.
- [4] Esener, E., Plastik şekil verme proseslerinde form ve şekillendirme hatalarının telafi edilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2015.
- [5] Advanced High Strength Steels Application Guidelines, Version 6.0, World Auto Steel, April, 2017.
- [6] Mete, O.H., Sac levhaların şekillendirilebilirliğine etki eden parametrelerin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2007.
- [7] Öztürk, F., Lee, D., Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test. Journal of Material Processing Technology, 170, 247-253, 2005.
- [8] Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani, P.F., Brosius, A., Cao, J., Ghiotti, A., Khraisheh, M., Merklein, M., Tekkaya, A.E., Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 63, 727-749, 2014.
- [9] Öztürk, F., Toros, S., Kılıç, S., Effects of anisotropic yield functions on prediction of forming limit diagrams of DP600 advanced high strength steel. Procedia Engineering, 81, 760-765, 2014.

- [10] Fırat, M., A numerical analysis of sheet metal formability for automotive stamping applications. *Computational Materials Science*, 43, 802-811, 2008.
- [11] Kılıç, S., Öztürk, F., Ticari TWIP900 ve DP600 yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv endüstrisindeki performanslarının karşılaştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3): 567-578, 2016.
- [12] Habibi, N., Ramazani, A., Sundararaghavan, V., Prahl, U., Failure predictions of DP600 steel sheets using various uncoupled fracture criteria. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, Article In Press.
- [13] Öztürk, F., Lee, D., Analysis of forming limits using ductile fracture criteria. *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 397-404, 2004.
- [14] Peng, L.F., Xu, Z.T., Fu, M.W., Lai, X.M., Forming limit of sheet metals in meso-scale plastic forming by using different failure criteria. *International Journal of Mechanical Sciences*, 120, 190-203, 2017.
- [15] Oliver, S., Jones, T.B., Fourlaris, G., Dual phase versus TRIP steels: comparison of dynamic tensile properties for automotive crash performance. *Materials Science and Technology*, 23(4): 423-431, 2007.
- [16] Zhang, L., Min, J., Carsley, J.E., Stoughton, T.B., Lin, J., Experimental and theoretical investigation on the role of friction in Nakajima testing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 133, 217-226, 2017.
- [17] Banabic, D., Lazarescu, L., Paraianu, L., Ciobanu, I., Nicodim, I., Comsa, D.S., Development of a new procedure for the experimental determination of the forming limit curves. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 62, 255-258, 2013.
- [18] Akpınar, M., Kare çekme işleminde şekillendirilebilirlik sınırının sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilmesi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi*, 2010.
- [19] Stoughton, T.B., A general forming limit criterion for sheet metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42, 1-27, 2000.
- [20] Hosford, F.W., Caddell, R.M., *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Third Edition, Cambridge University Press, 237-255, 2007.

- [21] Öztürk, F. Analysis of forming limits using ductile fracture criteria. Rensselaer Polytechnic Institute, Mechanical Engineering, Doktora Tezi, 2002.
- [22] Stoughton, T.B., Zhu, X., Review of theoretical models of strain-based FLD and their relevance to the stress-based FLD. *International Journal of Plasticity*, 20, 1463-1486, 2004.
- [23] Kim, S.B., Huh, H., Bok, H.H., Moon, M.B., Forming limit diagram for auto-body steel sheets for high speed forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 851-862, 2011.
- [24] Sheng, Z.Q., Mallick, P.K., A ductile failure criterion for predicting sheet metal forming limit. *International Journal of Mechanical Sciences*, 128-129, 345-360, 2017.
- [25] AISI, DOE., Formability characterization of a new generation of high strength steels. 2003.
- [26] Hill, R.T., On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1(1): 19-30, 1952.
- [27] Aretz, H., Numerical Analysis of diffused and localized necking in orthotropic sheet metals. *International Journal of Plasticity*, 23, 798-840, 2007.
- [28] Fırat, M. A finite element modeling and prediction of stamping formability of a dual-phase steel in cup drawing. *Materials and Design*, 34, 32-39, 2012.
- [29] Butuc, M.C., Gracio, J.J., Barata da Rocha, A., A theoretical study on forming limit diagrams prediction. *Journal of Materials Processing Technology*, 12, 714-724, 2003.
- [30] Luo, M., Anisotropic ductile fracture of metal sheets: Experimental investigation and constitutive modeling. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, 2012.
- [31] Bao, Y., Prediction of ductile crack formation in uncracked bodies. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, 2003.

- [32] Xue, L., Ductile fracture modeling – Theory, experimental investigation and numerical verification. Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, 2007.
- [33] Dilmeç, M., 2024-T4 Alüminyum sacların şekillendirme sınır eğrilerinin kalınlığa göre değişimi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, 2012.
- [34] Keeler, S.P., Backofen, W.A., Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches. ASM Transactions Quarterly, 56, 25-48, 1964.
- [35] Goodwin, G.M., Application to strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. Society of Automotive Engineers, Paper No: 680093, 1968.
- [36] Panich, S., Barlat F., Vitoon, U., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S., Experimental and theoretical formability analysis using strain and stress based forming limit diagram for advanced high strength steels. Materials and Design, 51, 756-766, 2013.
- [37] Öztürk, F., Dilmeç, M., Türköz, M., Ece, R., Halkacı, H., Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability. 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Aydın, 1-10, 2009.
- [38] Quaak, G., Biaxial testing of a sheet metal: an experimental - numerical analysis. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Computational and Experimental Mechanics, Master Thesis, 2008.
- [39] Raghavan, K.S., A simple technique to generate in-plane forming limit curves and selected applications. Metallurgical and Materials Transactions, 26(8): 2075-2084, 1995.
- [40] Banabic, D., Sheet Metal Forming Processes, Springer, Berlin, Heidelberg, 141 – 211, 2010.
- [41] Dilmeç, M., Halkacı, H., Öztürk, F., Türköz, M., Detailed investigation of forming limit determination standards for aluminum alloys. Journal of Testing and Evaluation, 41(1): 10-21, 2013.

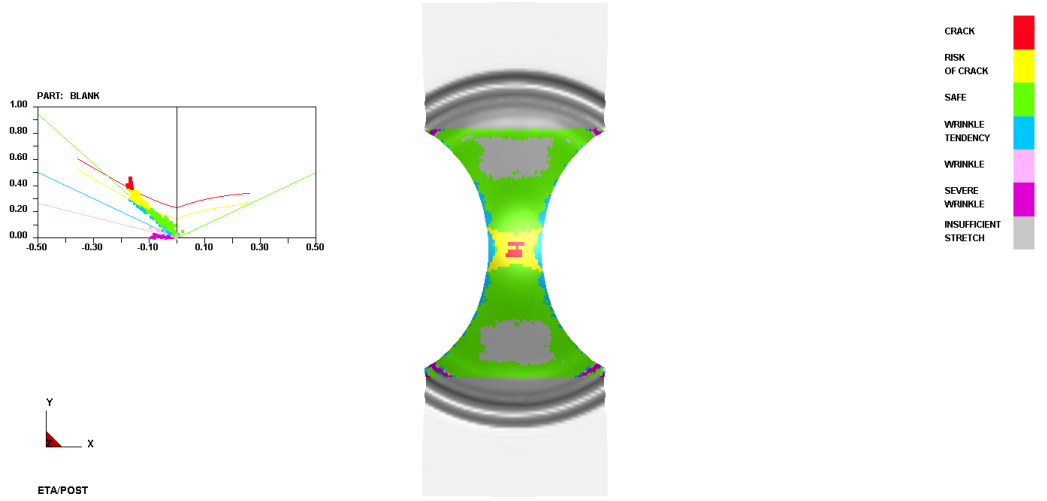
- [42] Toros, S., TRIP800 çeliğinin şekillendirme kabiliyetinin incelenmesi ve modellenmesi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, 2013.
- [43] Lumelskyj, D., Rojek, J., Banabic, D., Lazarescu, L., Detection of strain localization in Nakajima formability test – experimental research and numerical simulation. *Procedia Engineering*, 183, 89-94, 2017.
- [44] Fırat, M., Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts, *Materials and Design*, 28, 1298-1303, 2007.
- [45] Moaveni, S., *Finite Element Analysis. Theory and Application with ANSYS*, Prentice - Hall Inc., 1-45, 1999.
- [46] Noels, L., Stainier, L., Ponthot, J.P., Combined implicit/explicit time-integration algorithms for the numerical simulation of sheet metal forming, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 168, 331-339, 2004.
- [47] Kılıç, S., DP600 çeliğinin geri esneme davranışının incelenmesi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [48] Prior, A.M., Applications of implicit and explicit finite element techniques to metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 45, 649-656, 1994.
- [49] Sönmez, E., Metal şekillendirme geri esneme tahmininin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [50] Galbraith, P.C., Hallquist, J.O., Shell element formulations in LS-DYNA3D: their use in the modelling of sheet-metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 50, 158-167, 1995.
- [51] LS-DYNA, *Keyword User's Manual, Volume II, Material Models*, Livermore Software Technology Corporation, 201-207, 2012.
- [52] Haufe, A., Schweizerhof, K., Dubois, P., Properties and limits: Review of shell element formulations, *Developer Forum*, 2013.



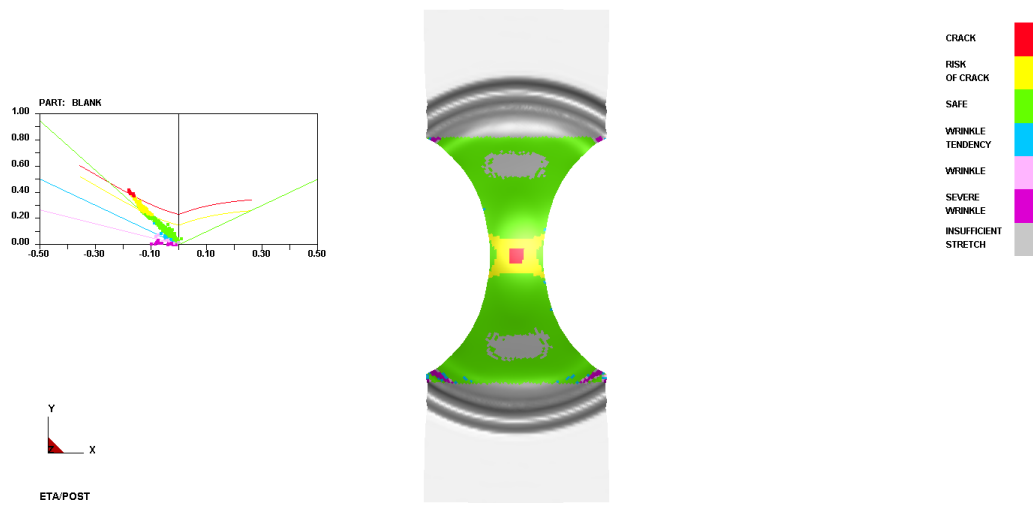
- [53] Uthaisangsuk, V., Prahl, U., Bleck, W., Modeling of damage and failure in multiphase high strength DP and TRIP steels. *Engineering Fracture Mechanics*, 78, 469-486, 2011.
- [54] Tiryaki, A.E., Kozan, R., Çift fazlı çelik sacda kare süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvvetinin kestirimi. *Mühendis ve Makina*, Cilt:51, 609, 2010.
- [55] Barlat, F., Lian, J., Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, 5, 51-56, 1989.
- [56] Swift, H.W., Plastic Instability Under Plane Stress. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1, 1-18, 1952.
- [57] Butuc, M.C., Gracio, J.J., Barata da Rocha, A., A theoretical study on forming limit diagrams prediction. *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 714-724, 2003.
- [58] Eta/Post User's Manual, Version 1.8.1., Engineering Technology Associates Inc., 140-144, 2013.
- [59] Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill Book Company, 666-673, 1988.

## EKLER

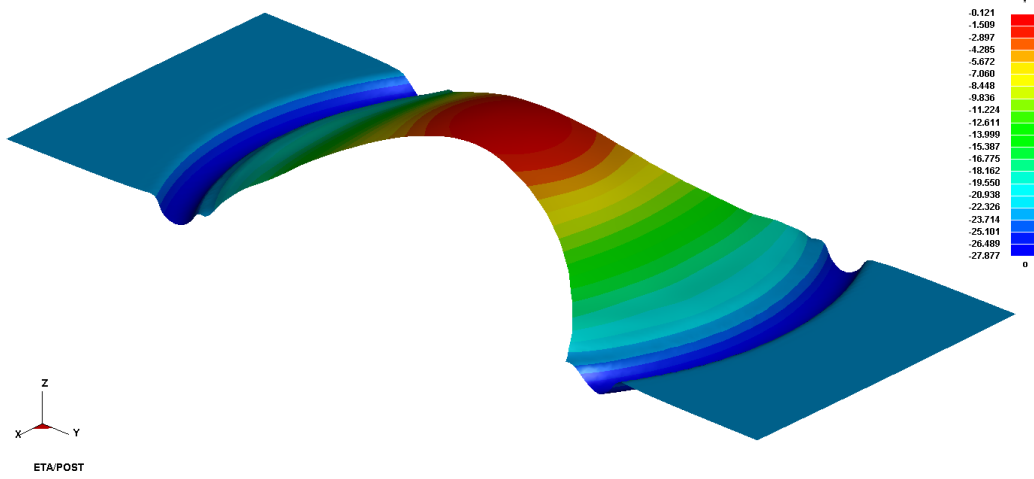
### EK A: DP600 Çeliği Nakajima Testi Sonlu Elemanlar Analizinde Farklı Malzeme Modelleri ve Sınır Eğrilerinin Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramı ve Yırtılma Yüksekliğine Etkisi



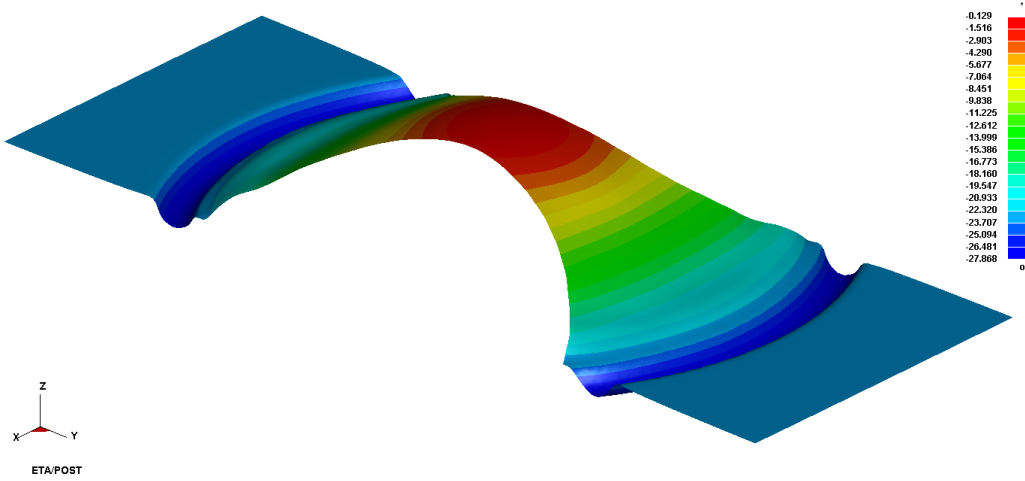
Şekil A.1. 25 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



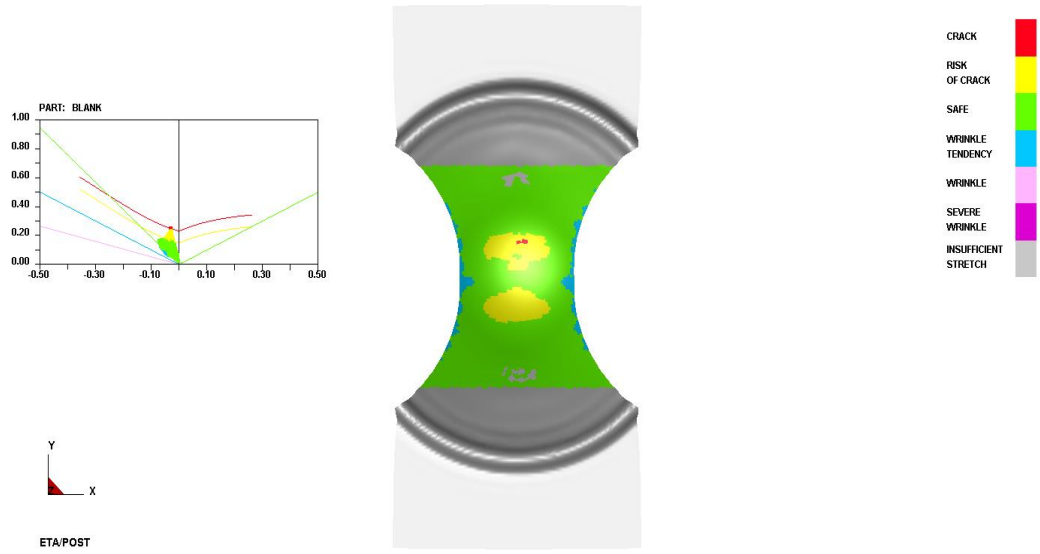
Şekil A.2. 25 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



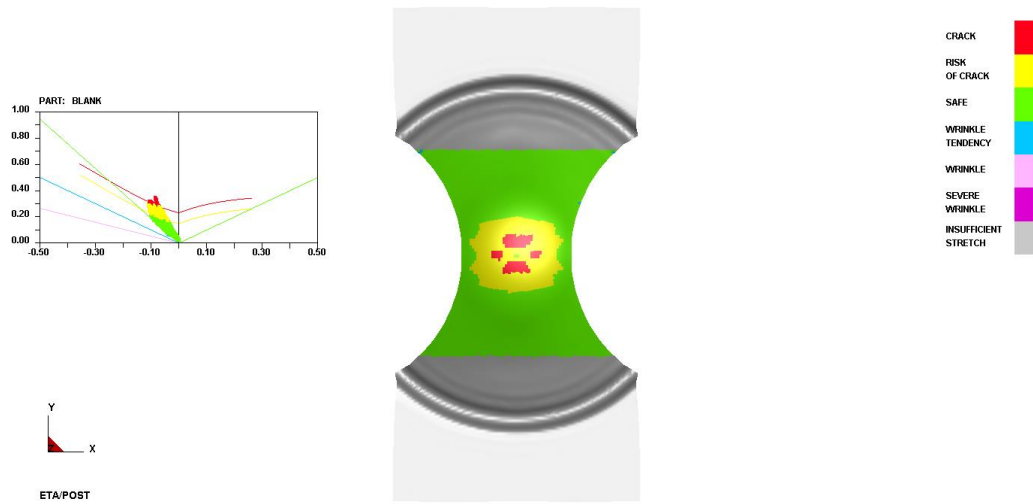
Şekil A.3. 25 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



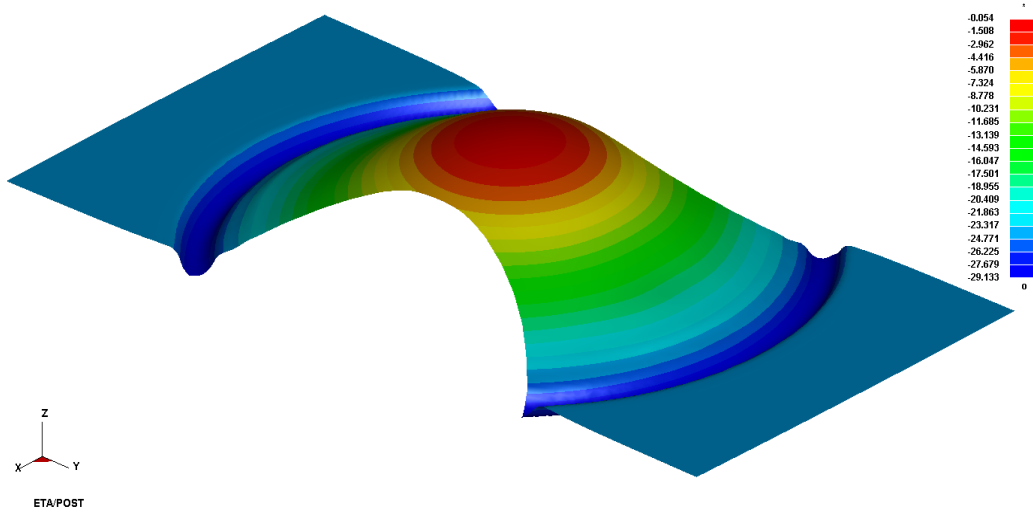
Şekil A.4. 25 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



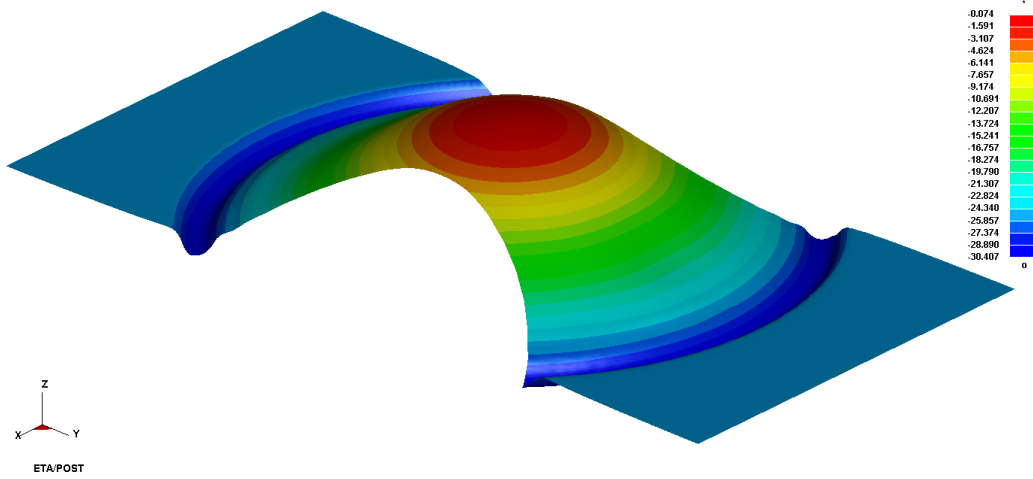
Şekil A.5. 50 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



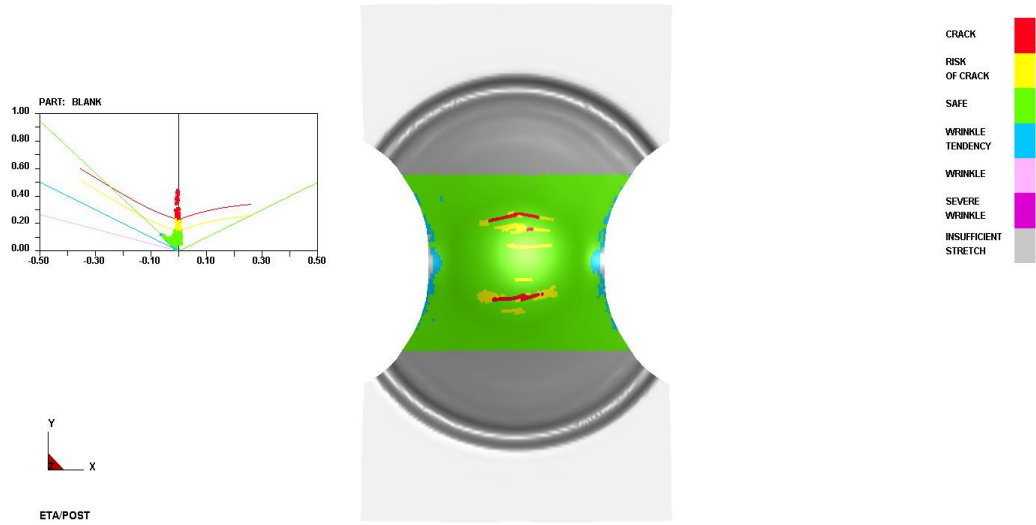
Şekil A.6. 50 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



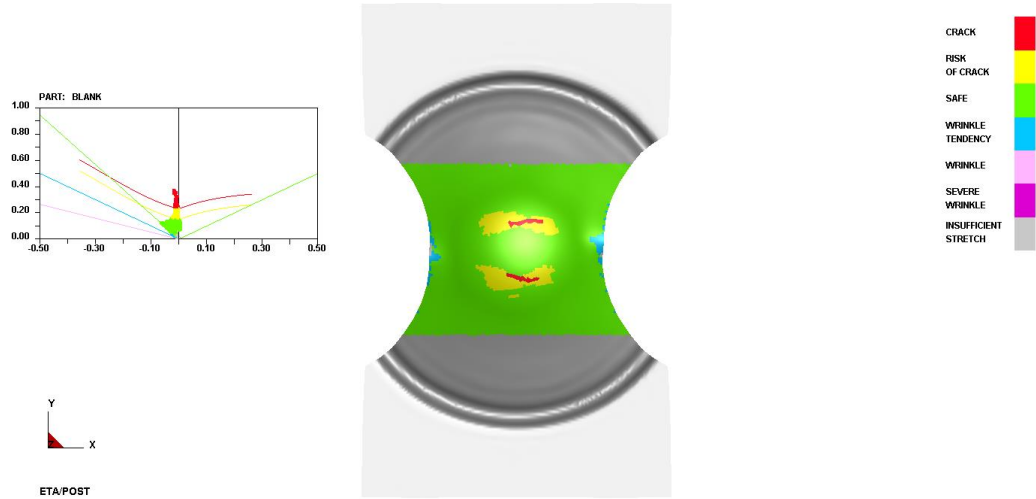
Şekil A.7. 50 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



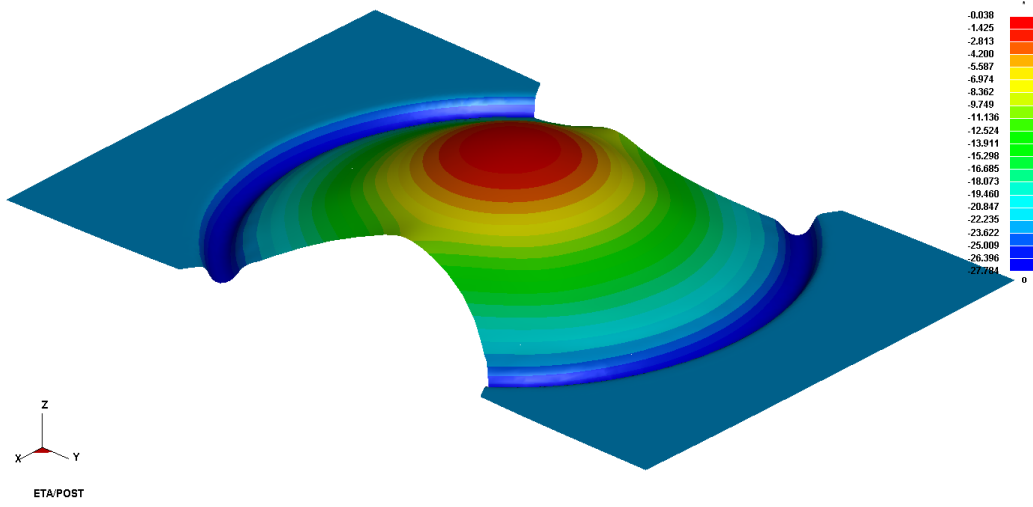
Şekil A.8. 50 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



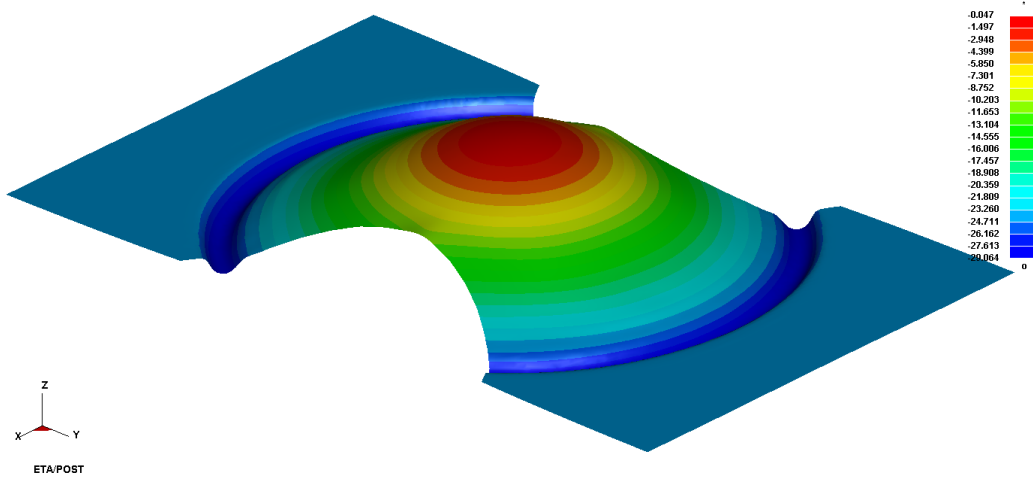
Şekil A.9. 75 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



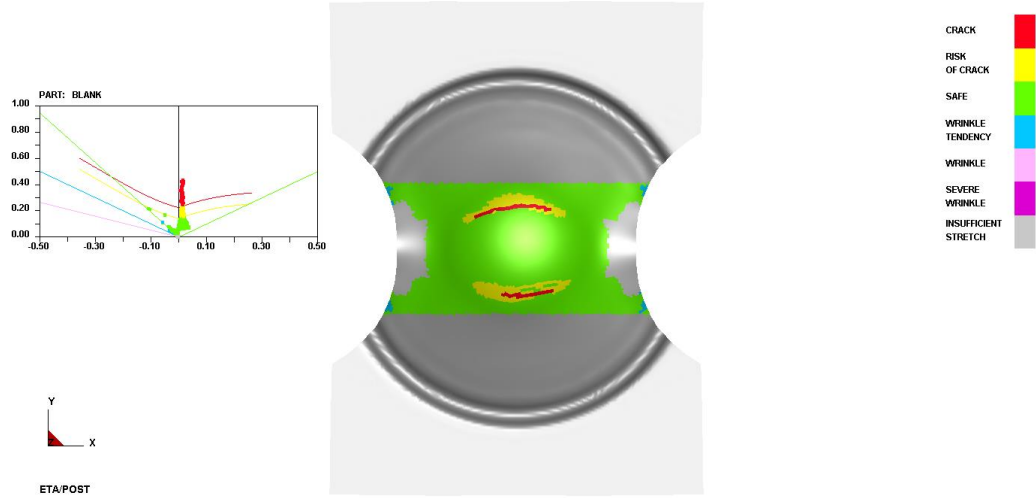
Şekil A.10. 75 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



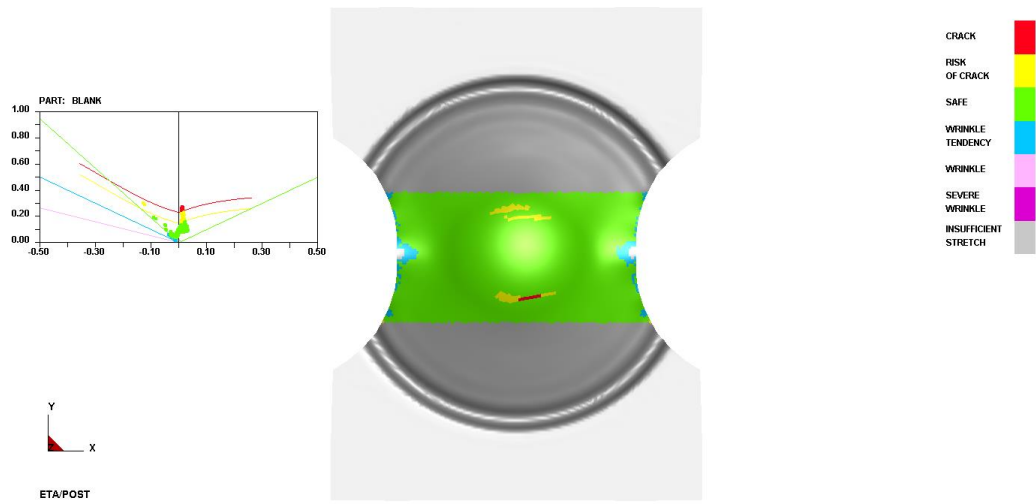
Şekil A.11. 75 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil A.12. 75 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği

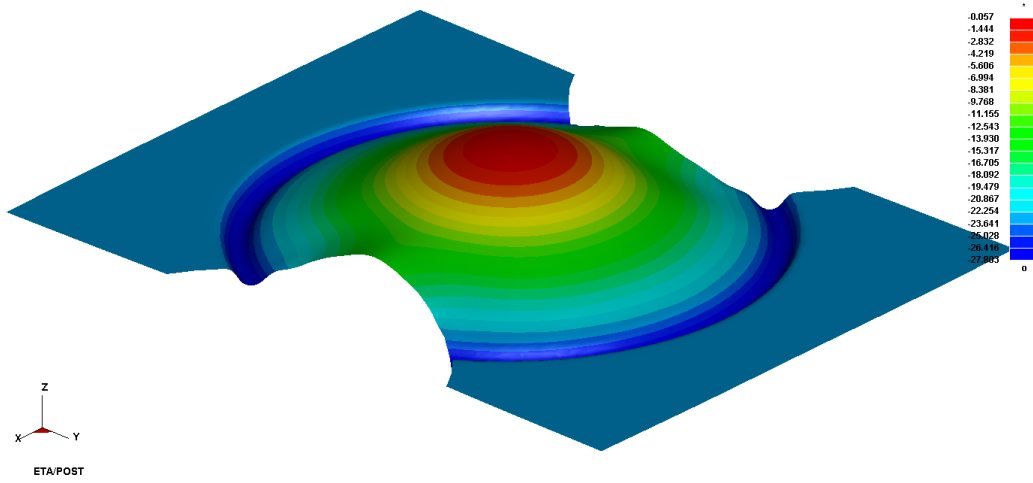


Şekil A.13. 100 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD

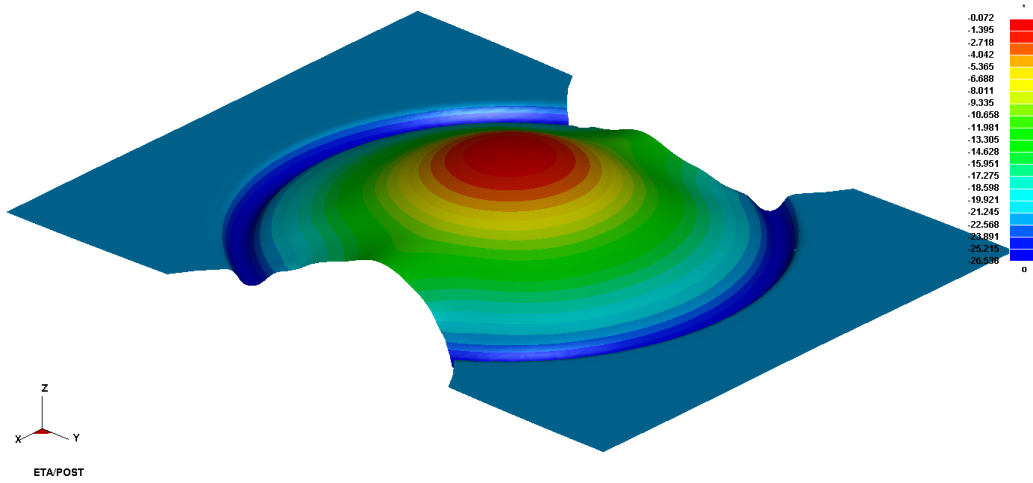


Şekil A.14. 100 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD

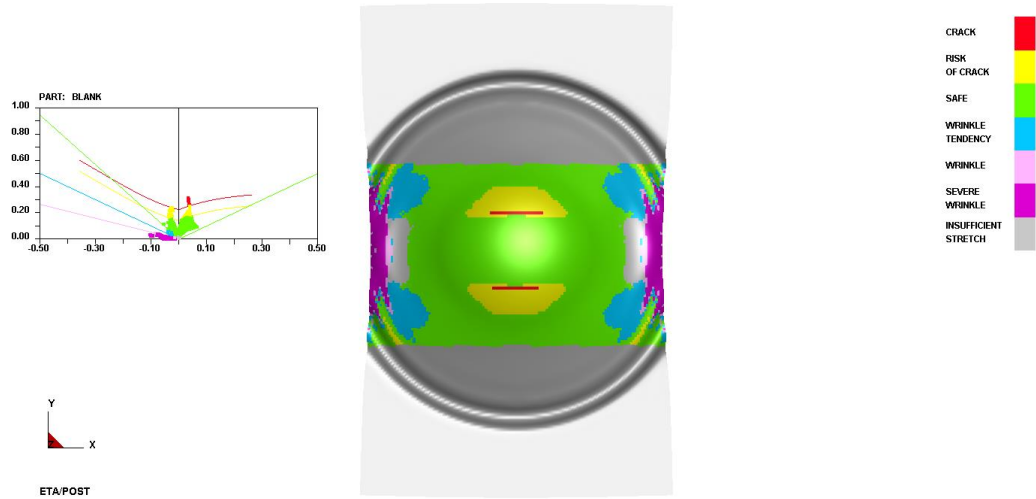




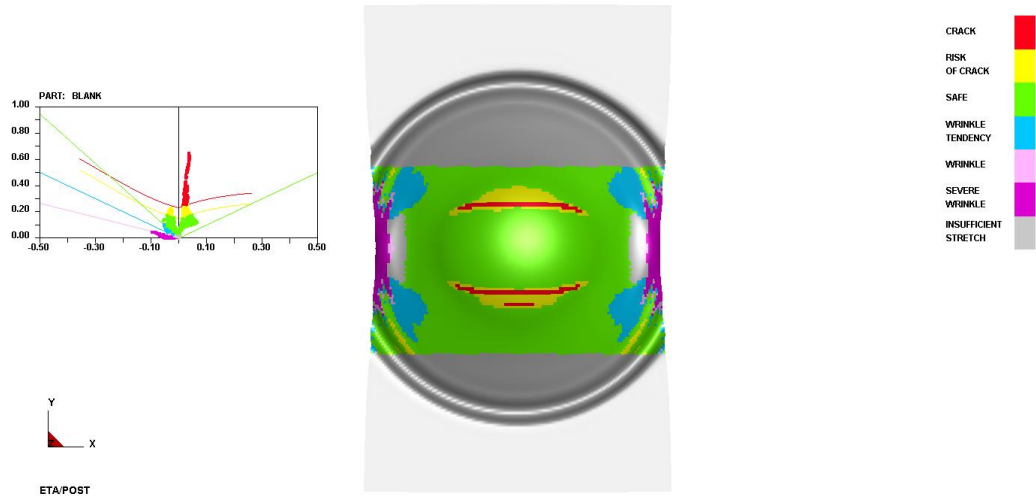
Şekil A.15. 100 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



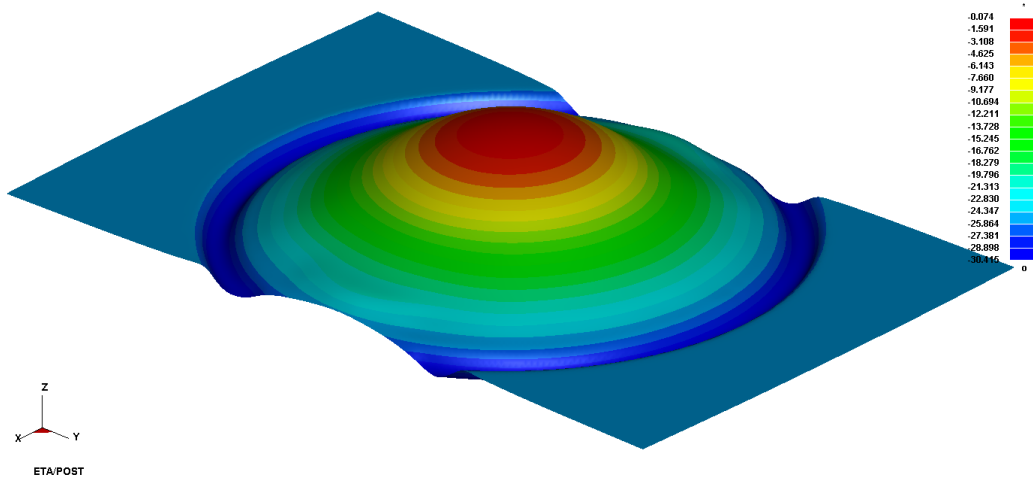
Şekil A.16. 100 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



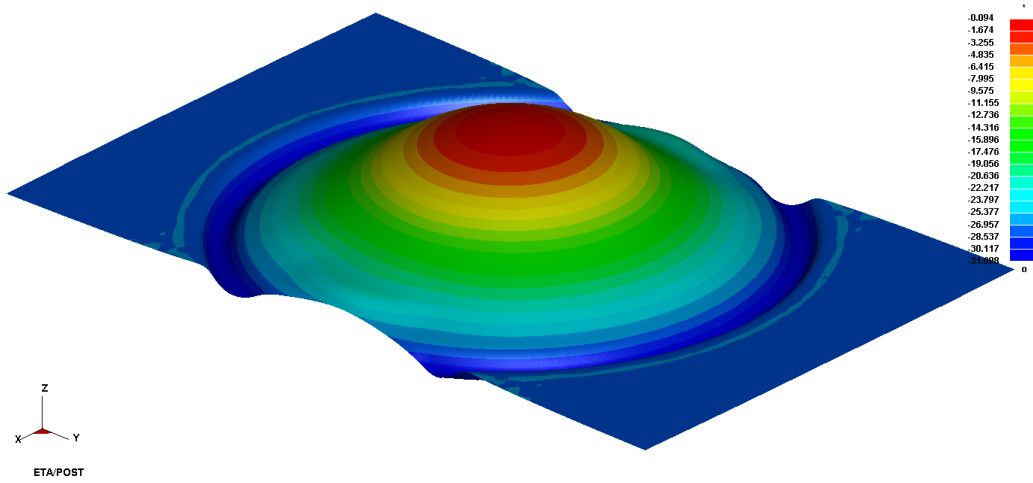
Şekil A.17. 125 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



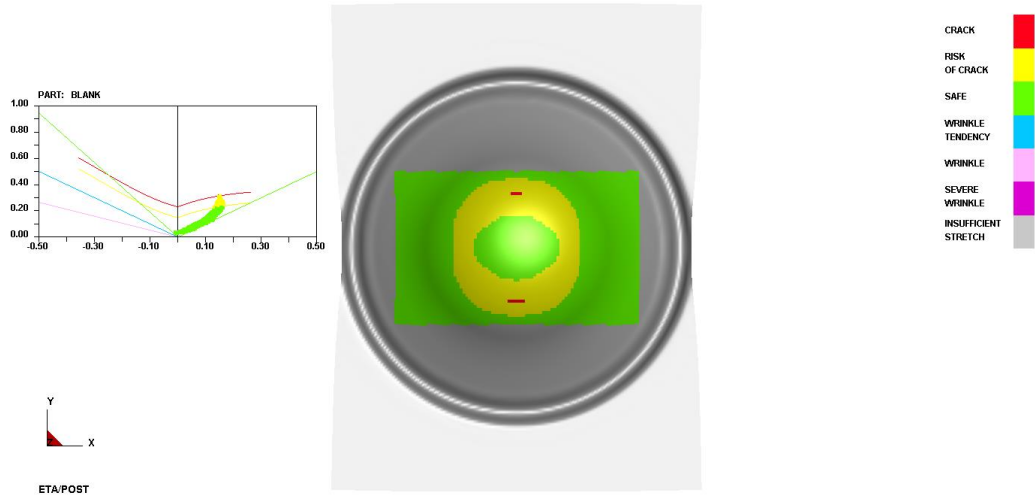
Şekil A.18. 125 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



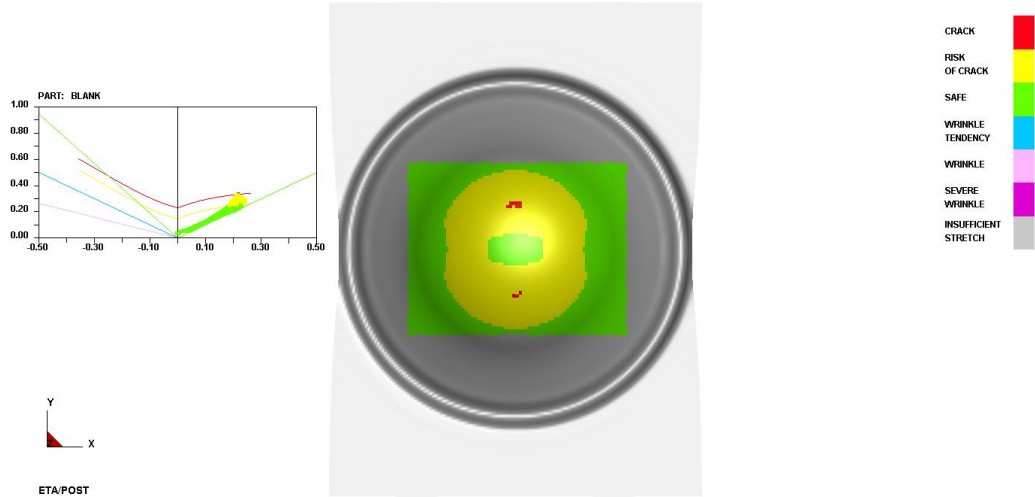
Şekil A.19. 125 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



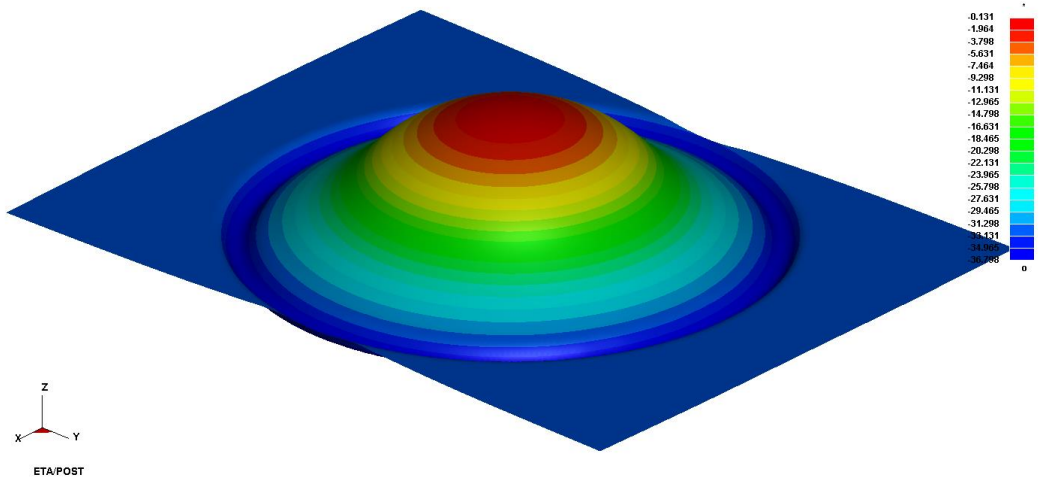
Şekil A.20. 125 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



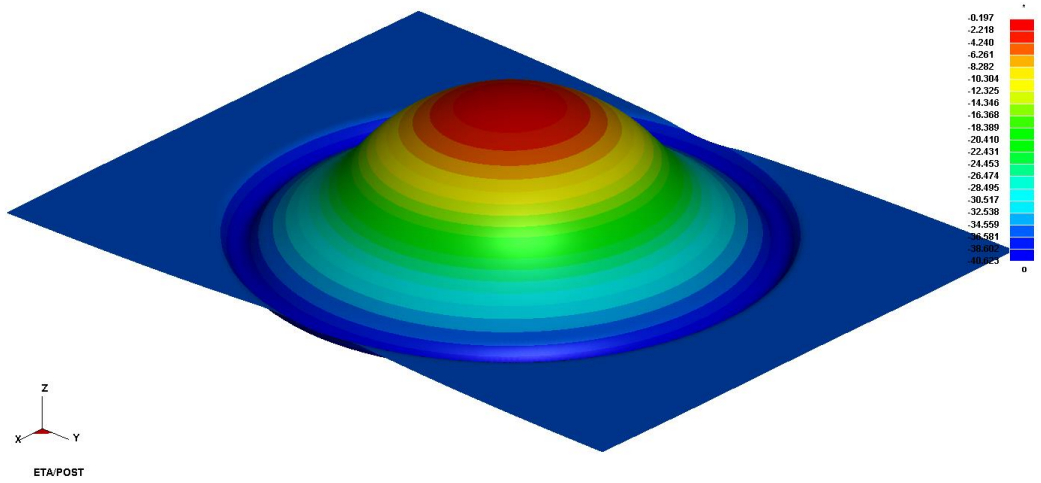
Şekil A.21. 150 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



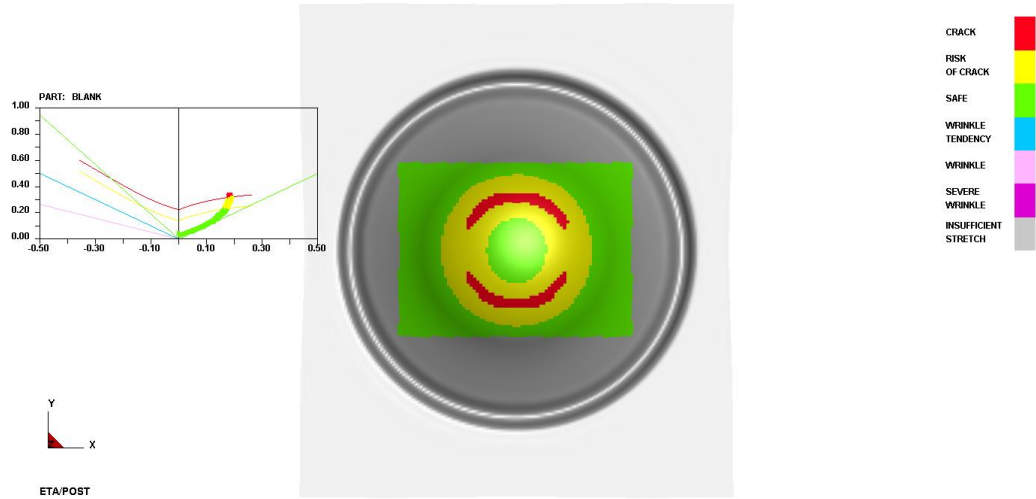
Şekil A.22. 150 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



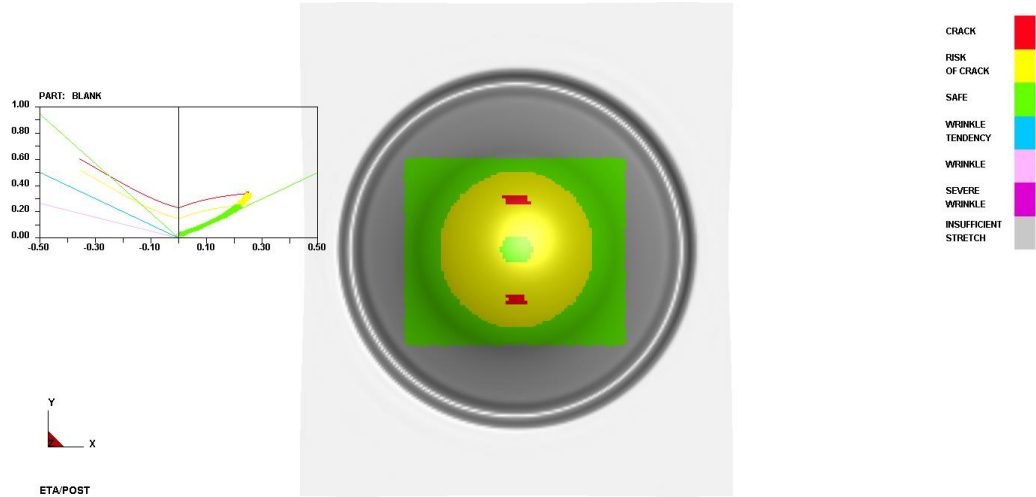
Şekil A.23. 150 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



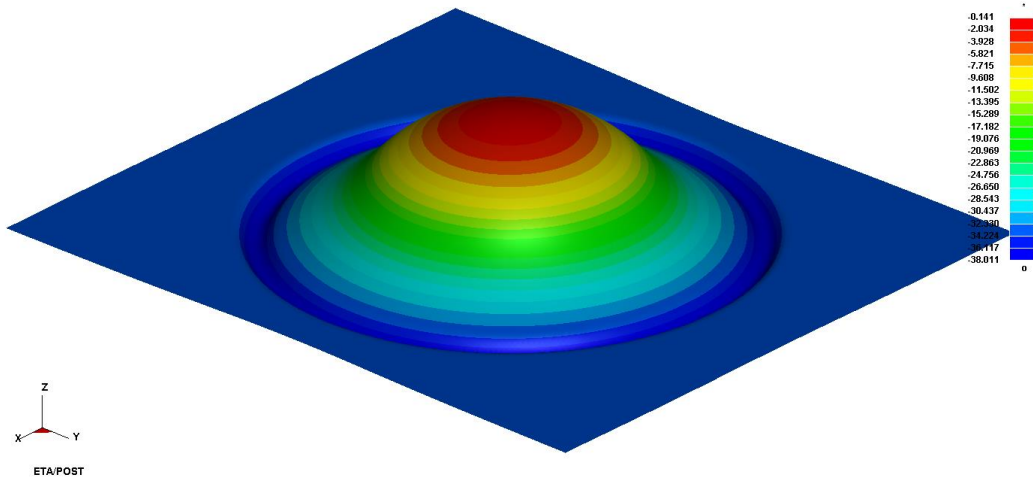
Şekil A.24. 150 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



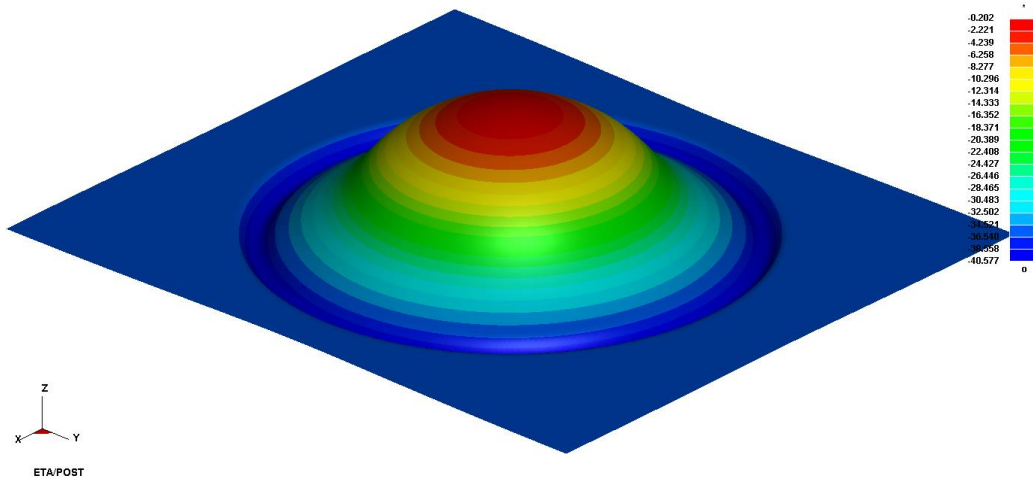
Şekil A.25. 175 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



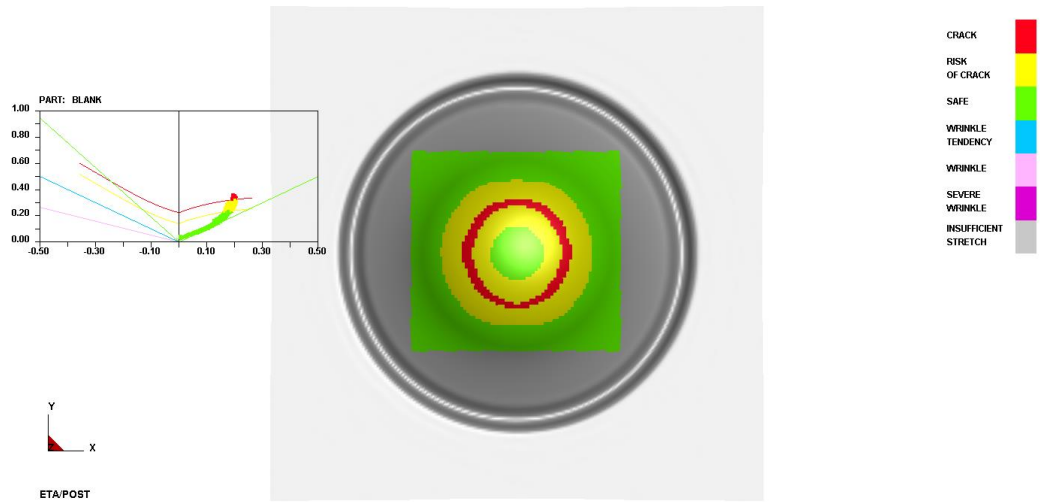
Şekil A.26. 175 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



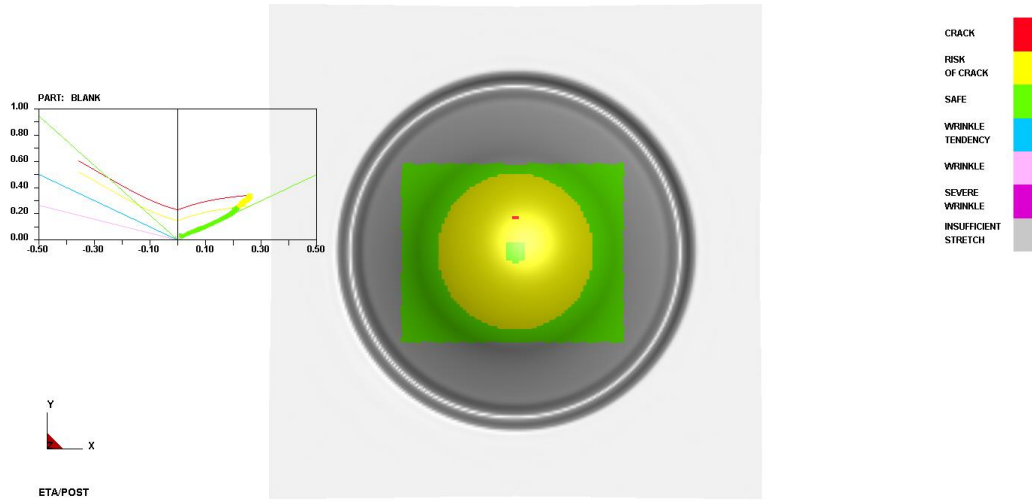
Şekil A.27. 175 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil A.28. 175 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği

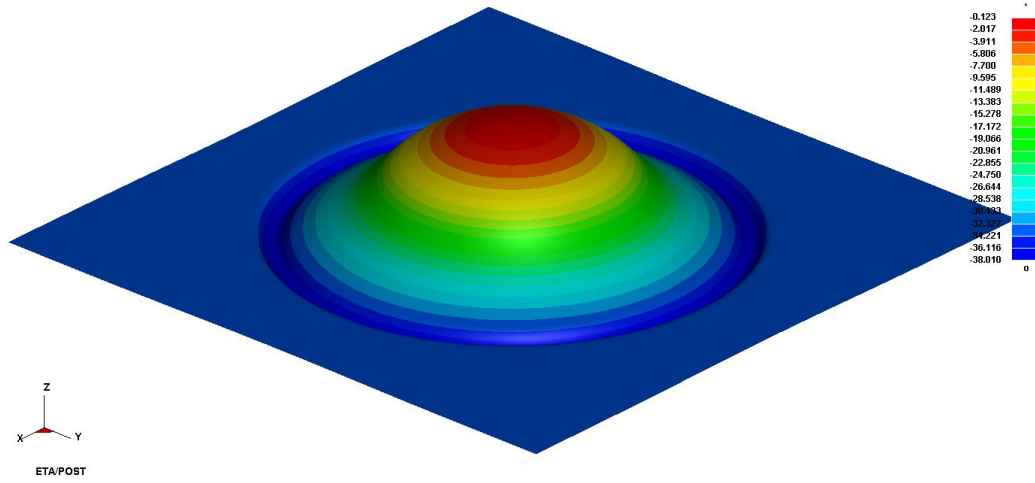


Şekil A.29. 200 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD

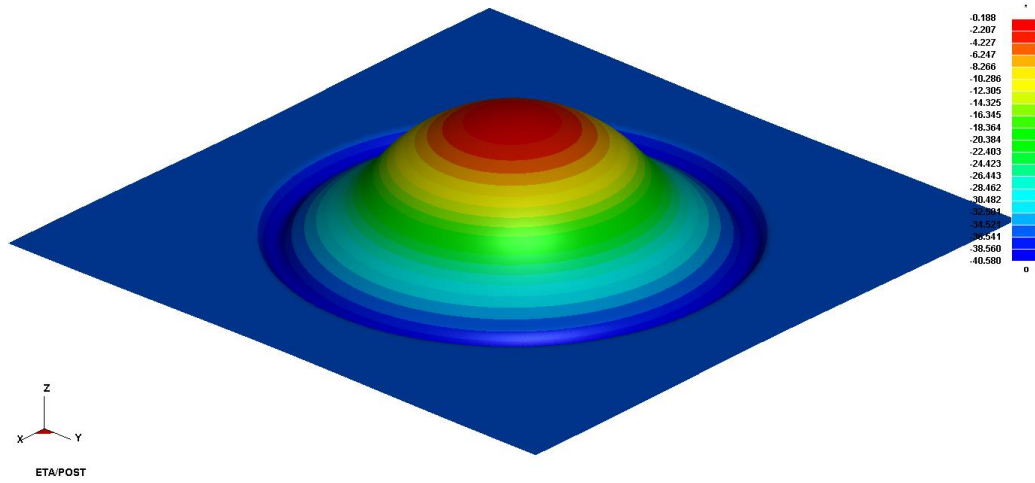


Şekil A.30. 200 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD

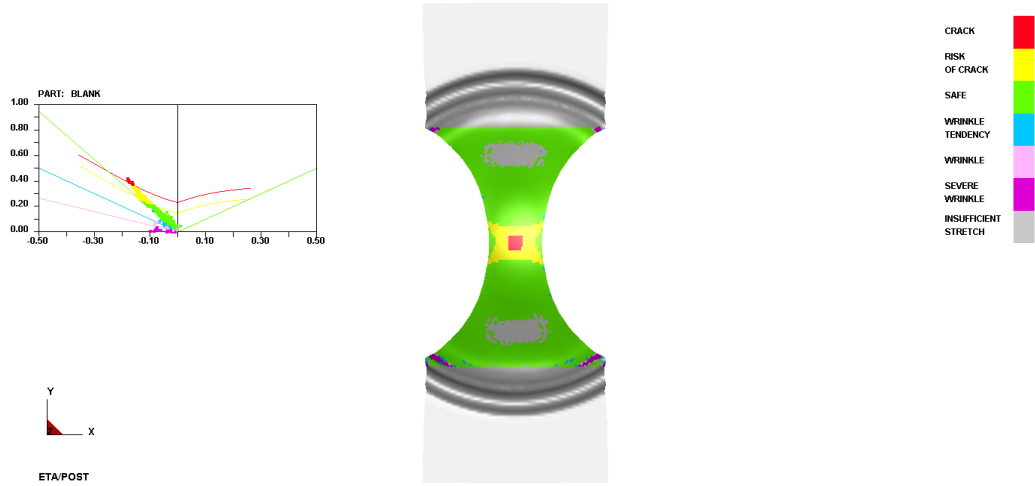




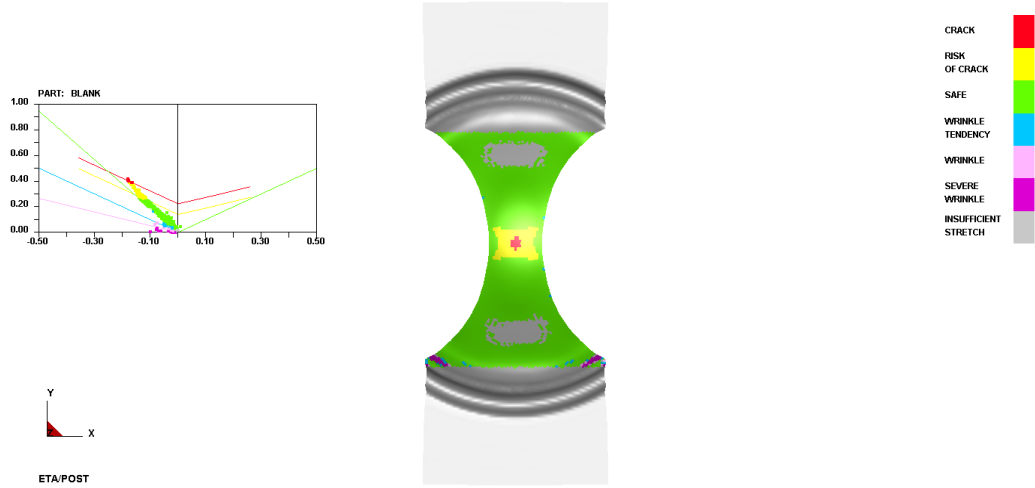
Şekil A.31. 200 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



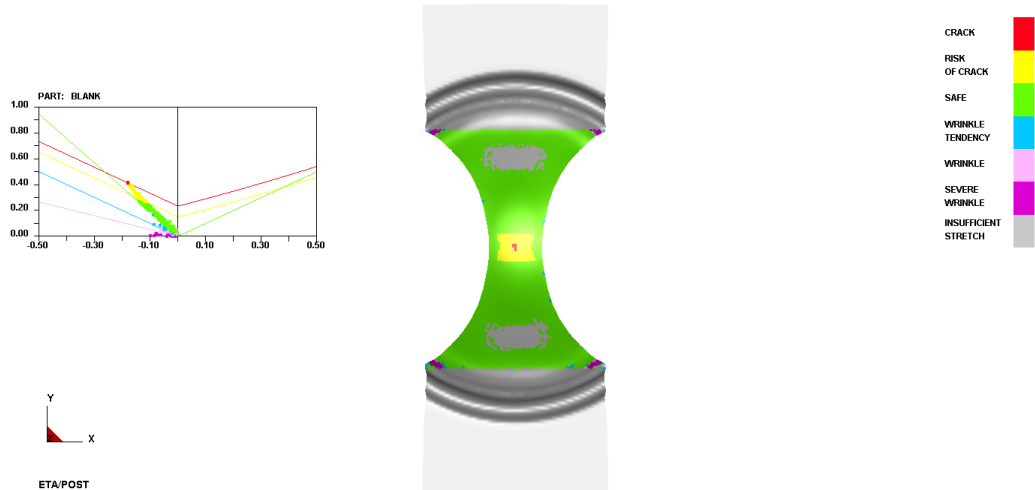
Şekil A.32. 200 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



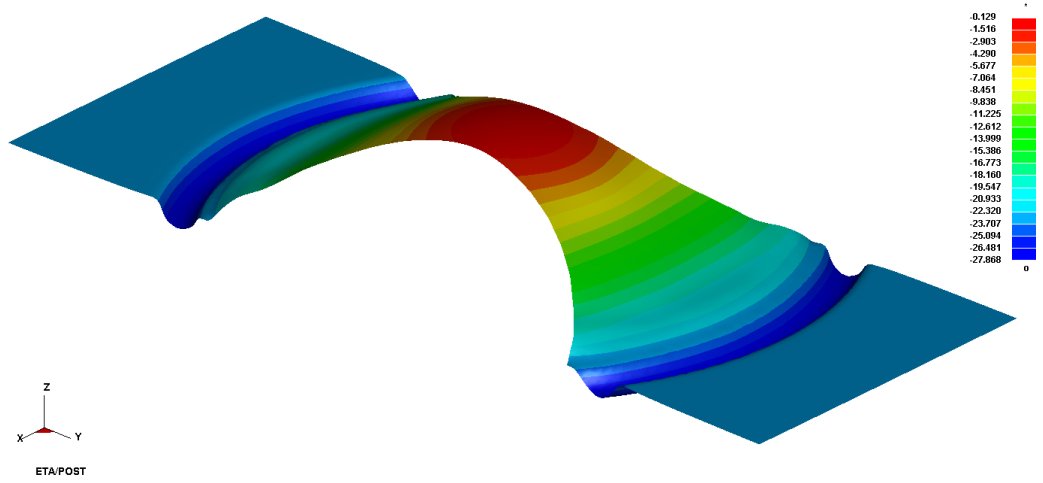
Şekil A.33. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



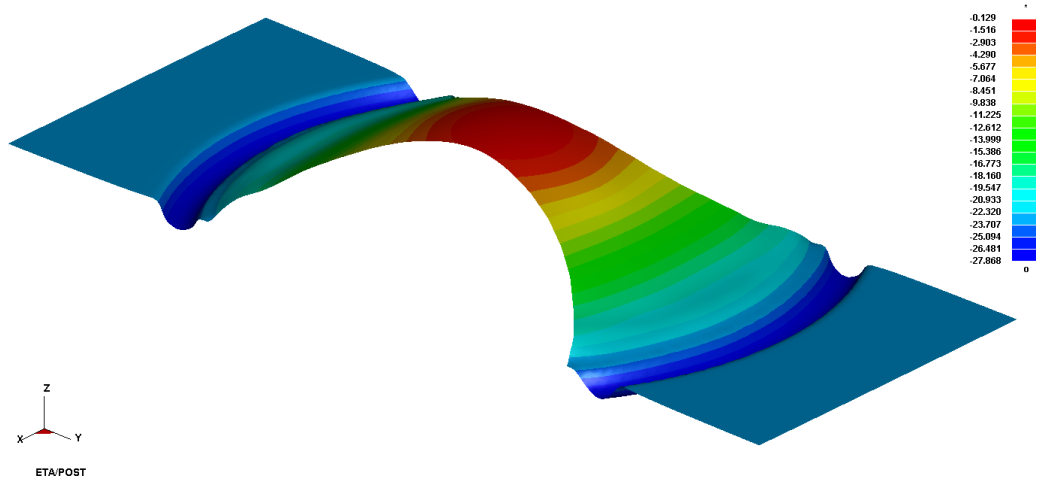
Şekil A.34. 25 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



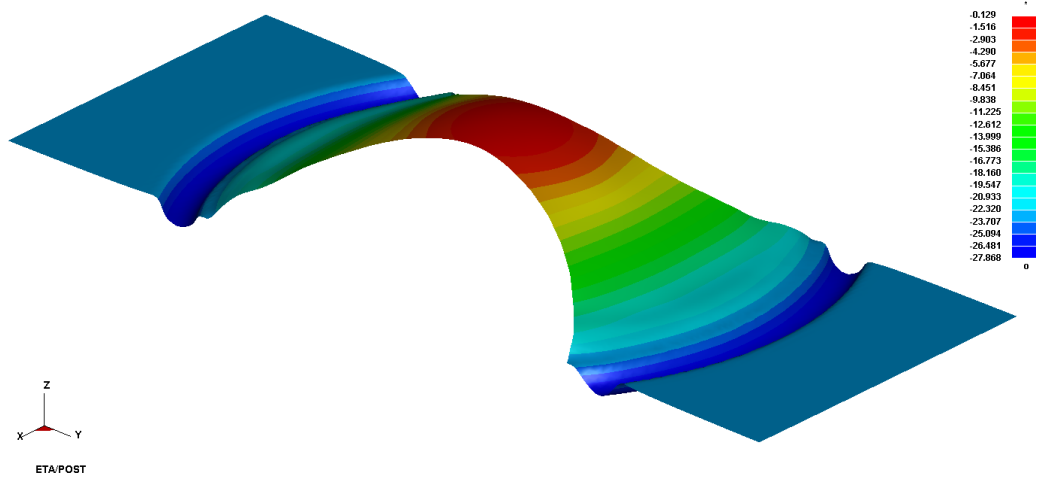
Şekil A.35. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



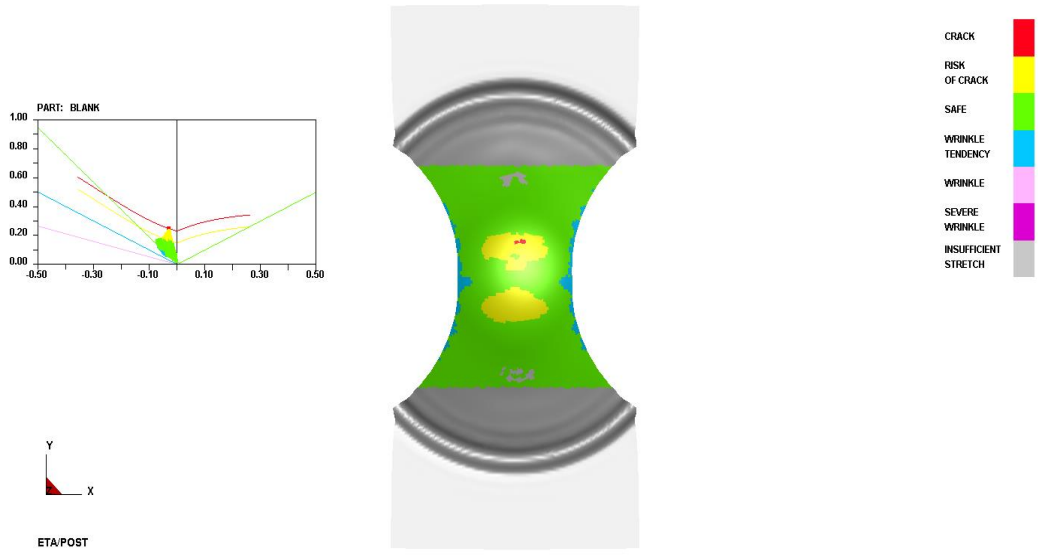
Şekil A.36. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



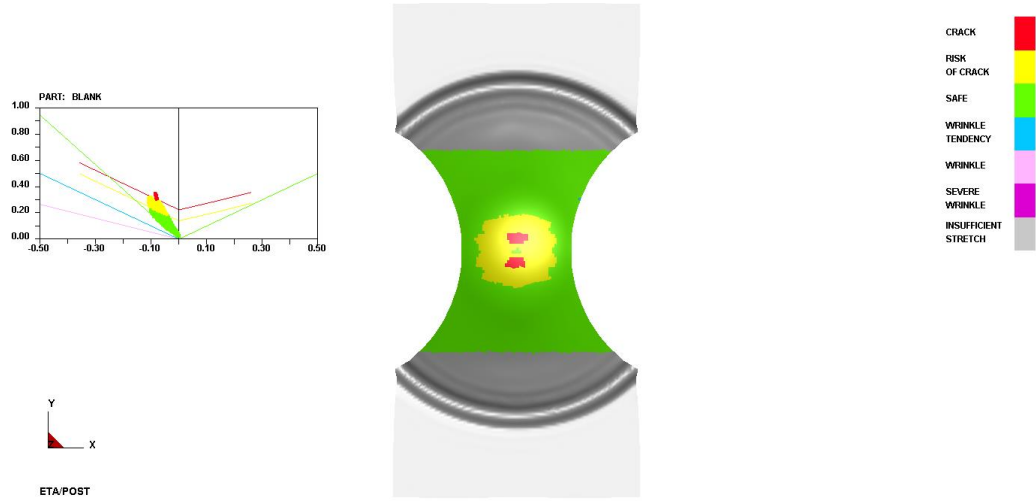
Şekil A.36. 25 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



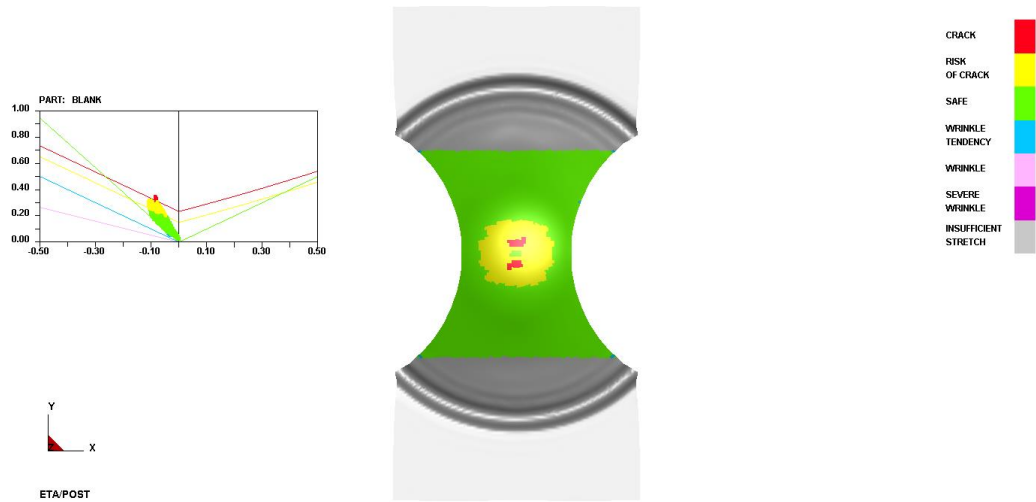
Şekil A.37. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



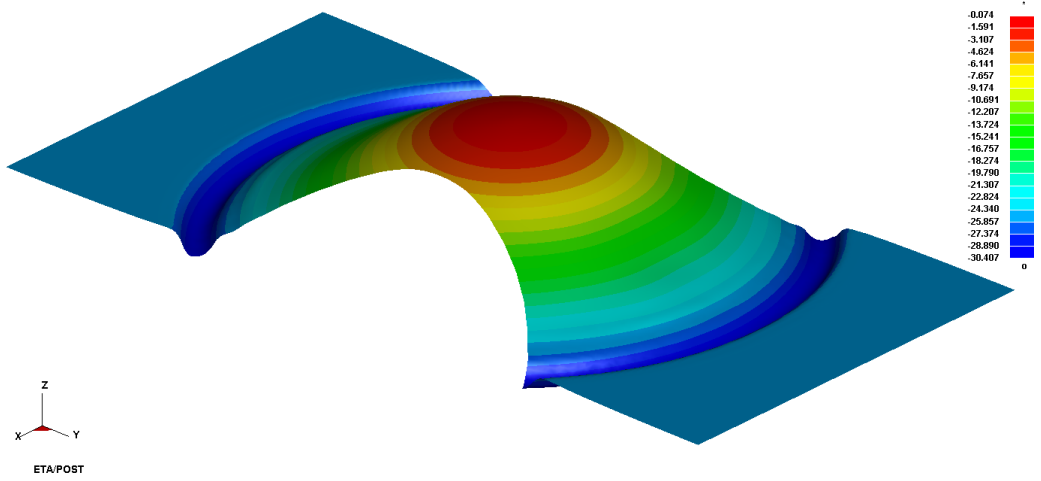
Şekil A.38. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



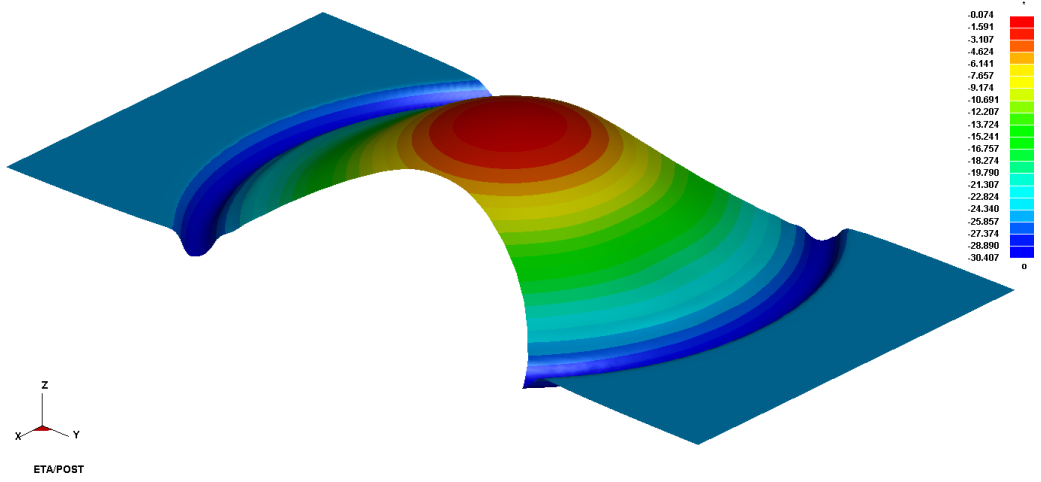
Şekil A.39. 50 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



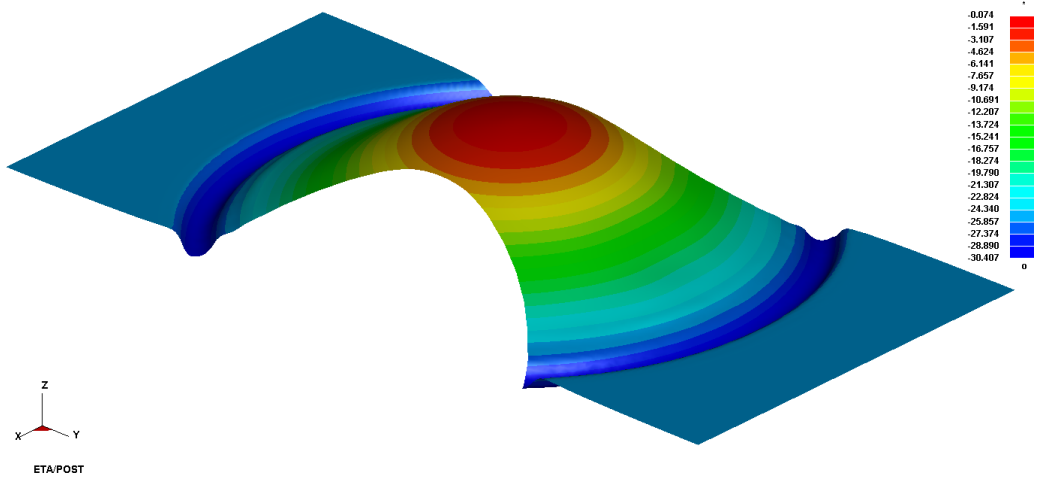
Şekil A.40. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



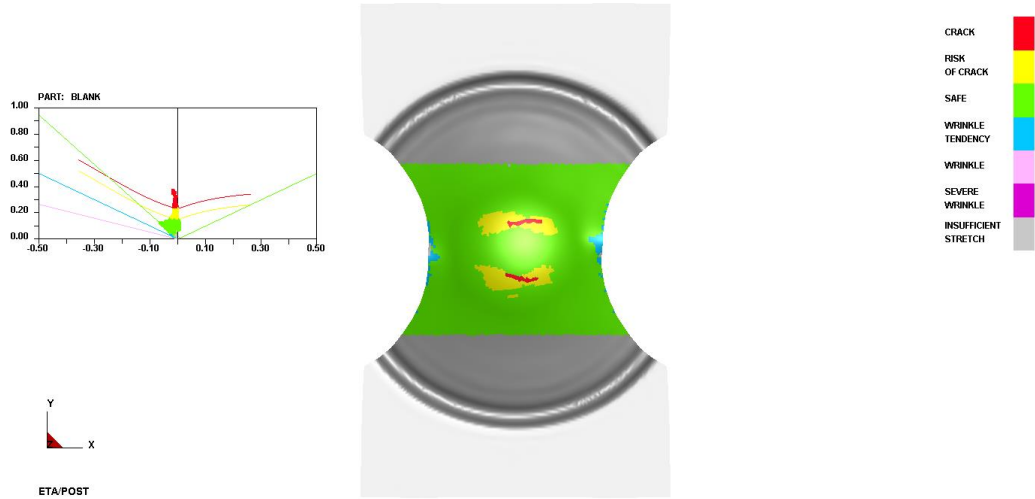
Şekil A.41. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



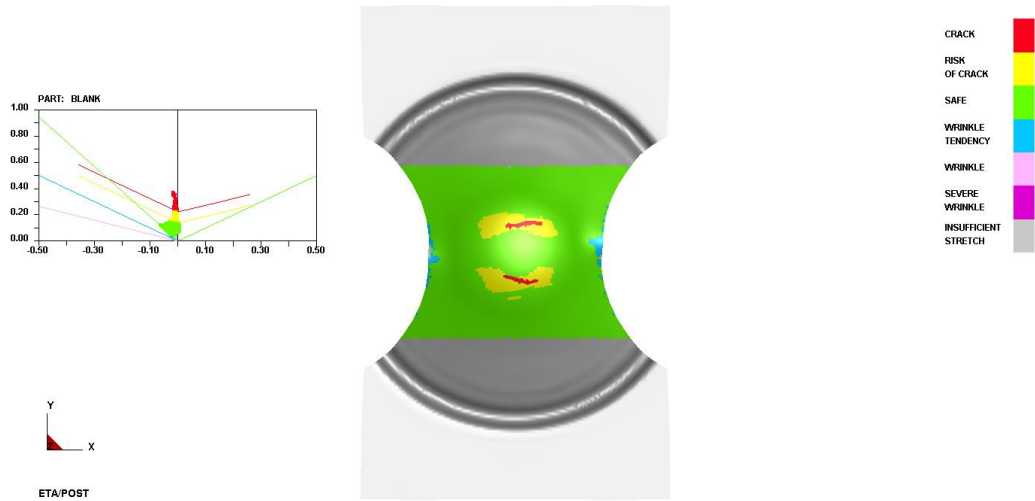
Şekil A.42. 50 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



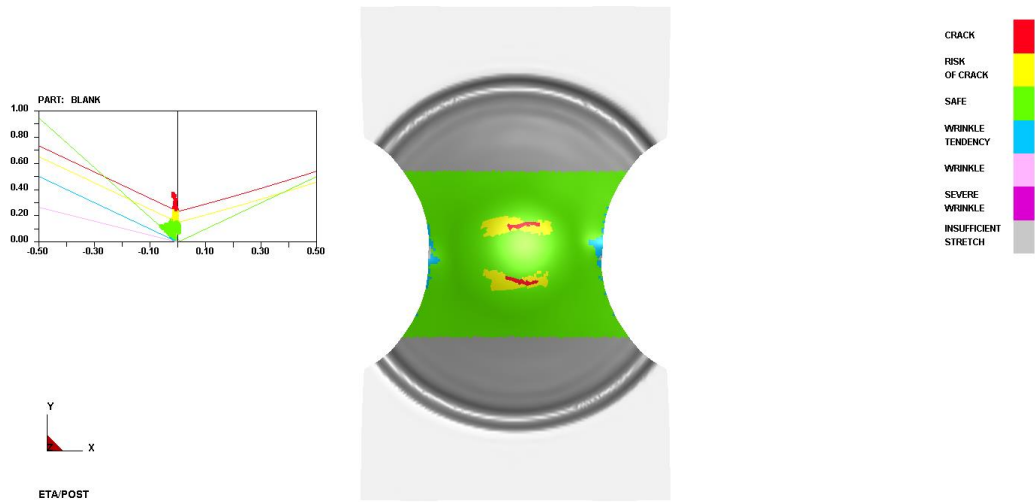
Şekil A.43. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



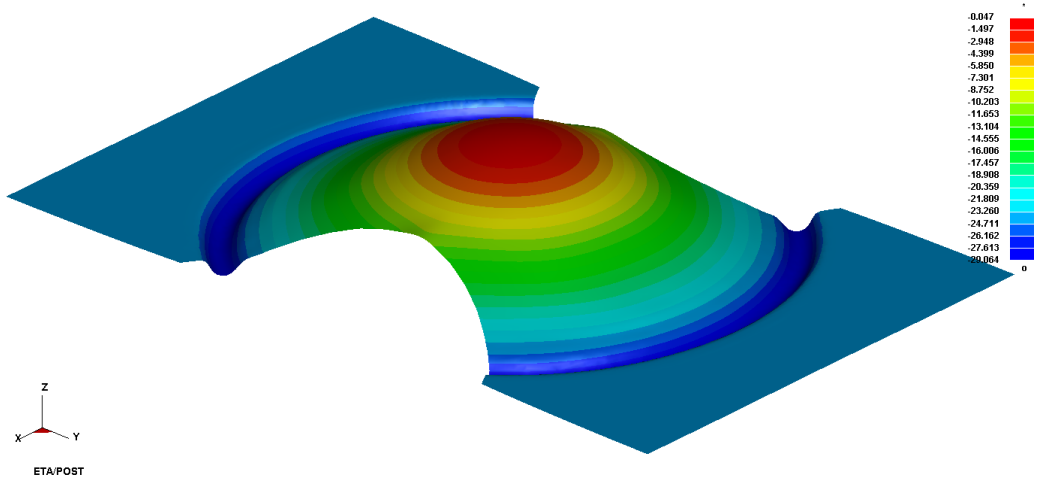
Şekil A.44. 75 mm genişliğindeki numune de Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



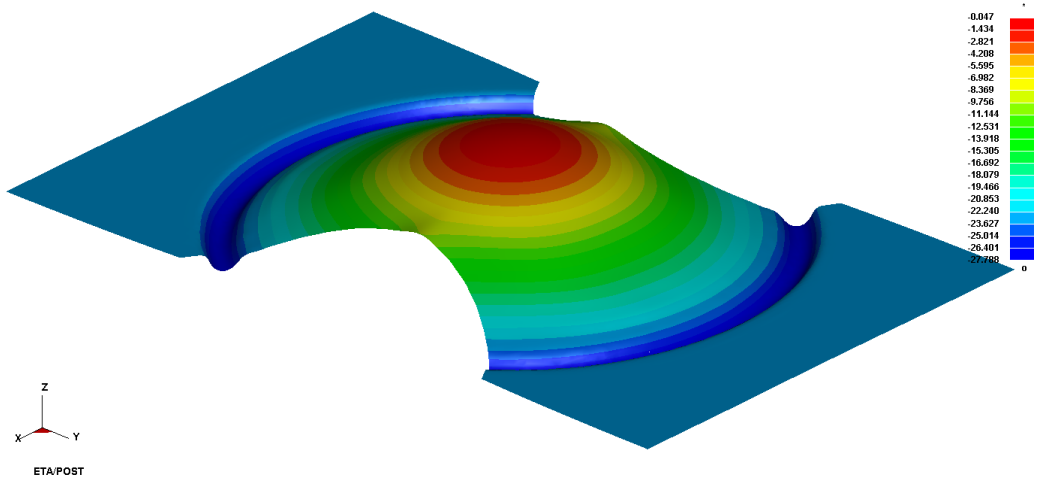
Şekil A.45. 75 mm genişliğindeki numune de deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



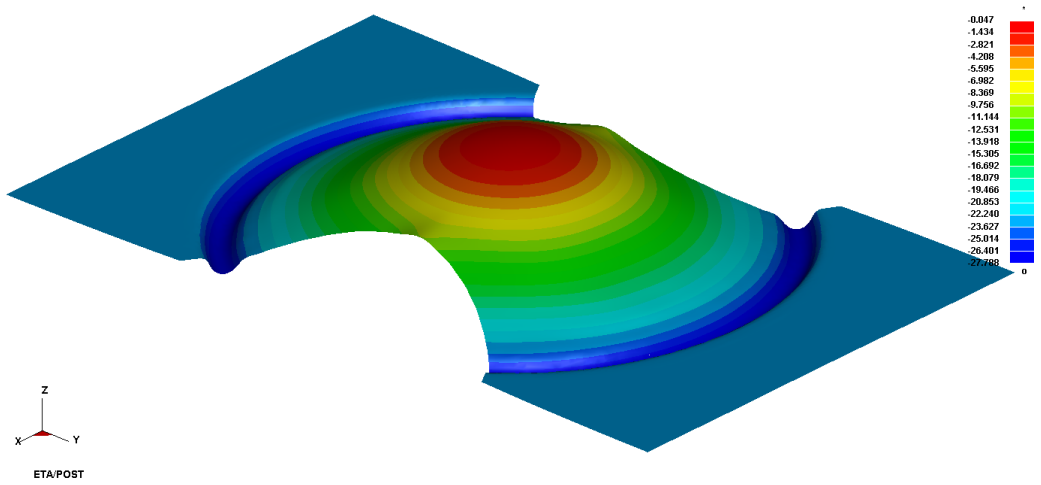
Şekil A.46. 75 mm genişliğindeki numune de Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



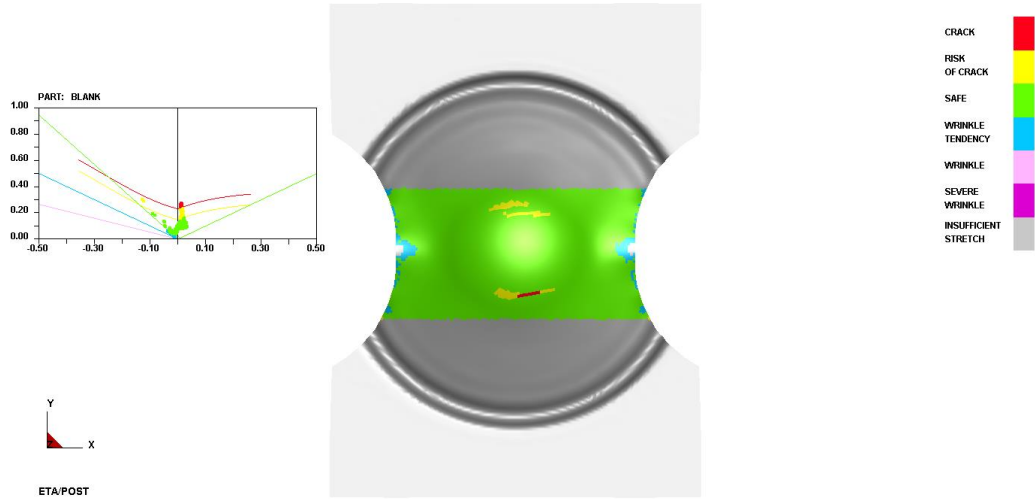
Şekil A.47. 75 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



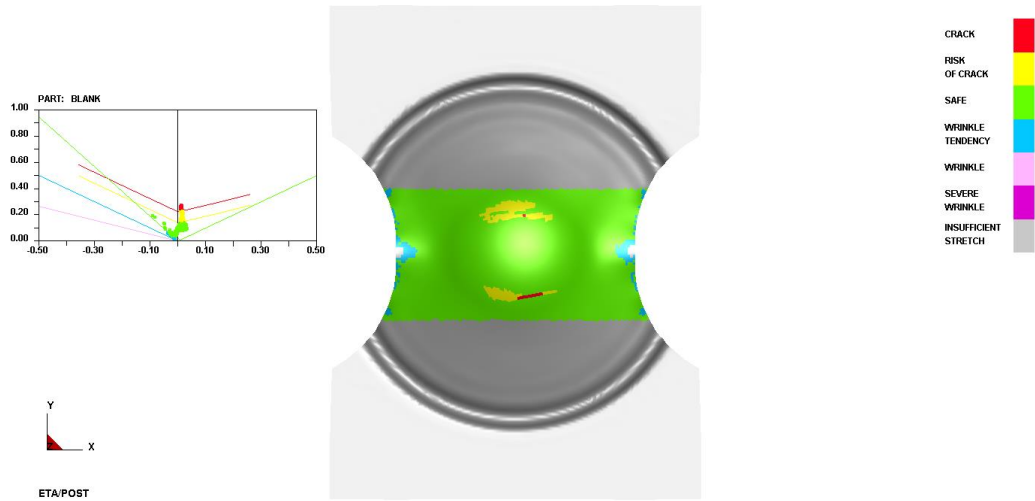
Şekil A.48. 75 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



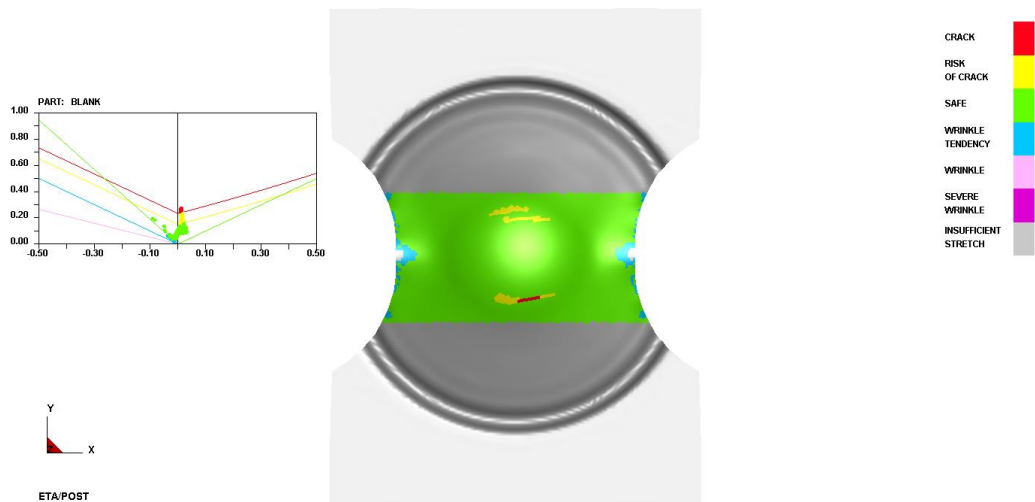
Şekil A.49. 75 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil A.50. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

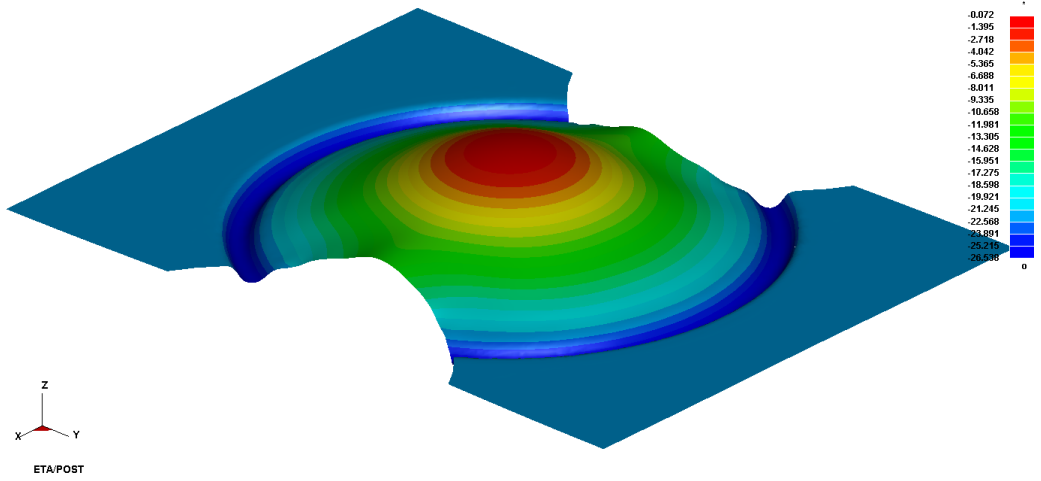


Şekil A.51. 100 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

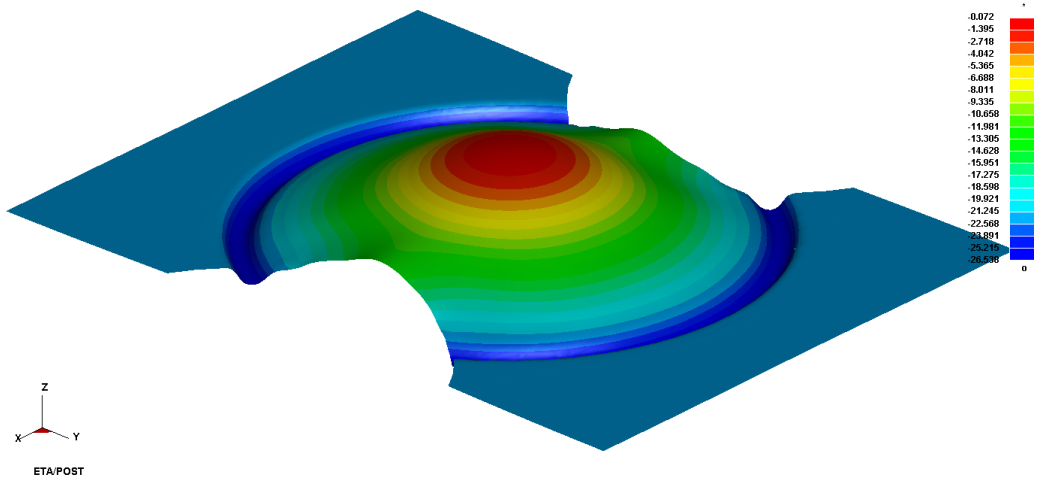


Şekil A.52. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

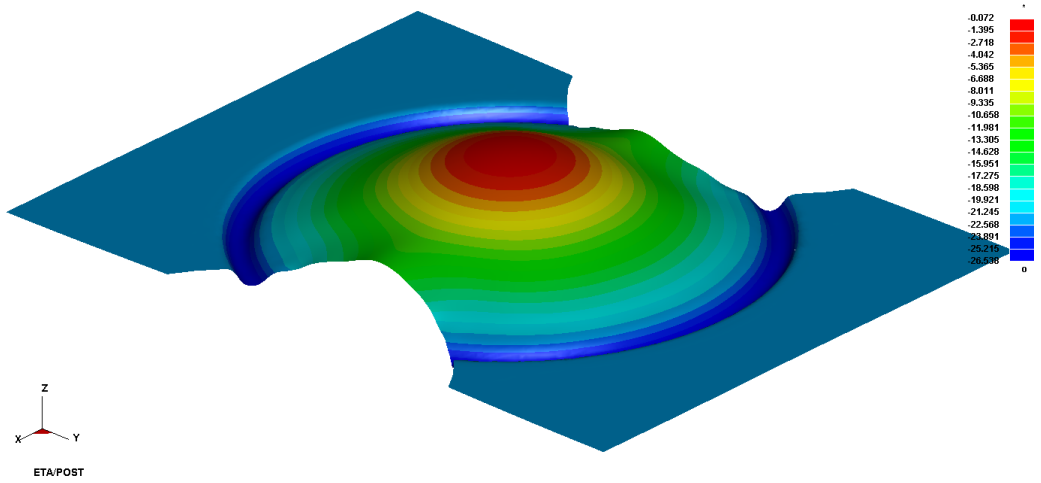




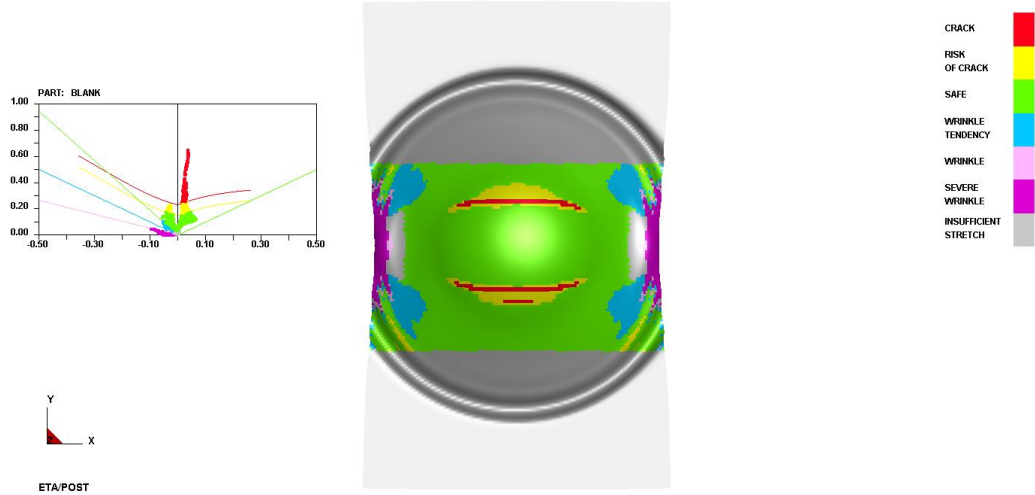
Şekil A.53. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırılma yüksekliği



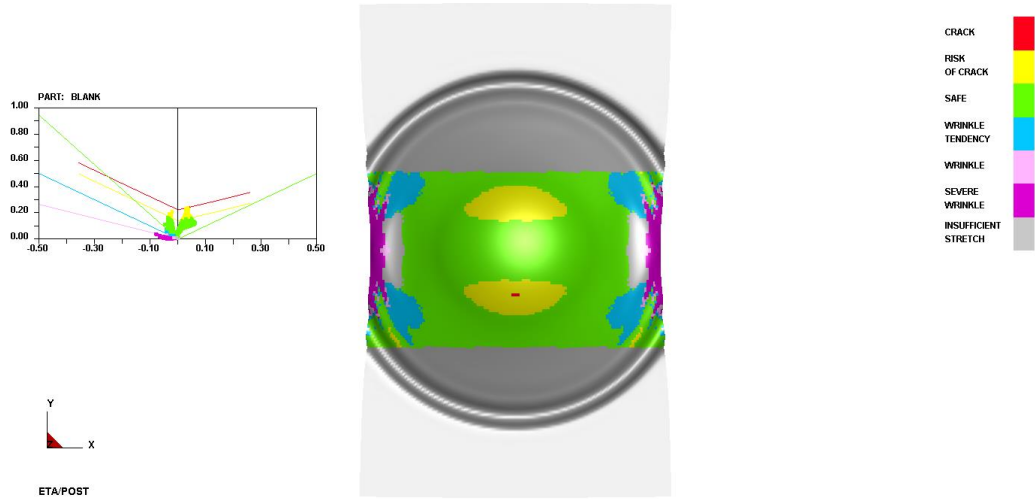
Şekil A.54. 100 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırılma yüksekliği



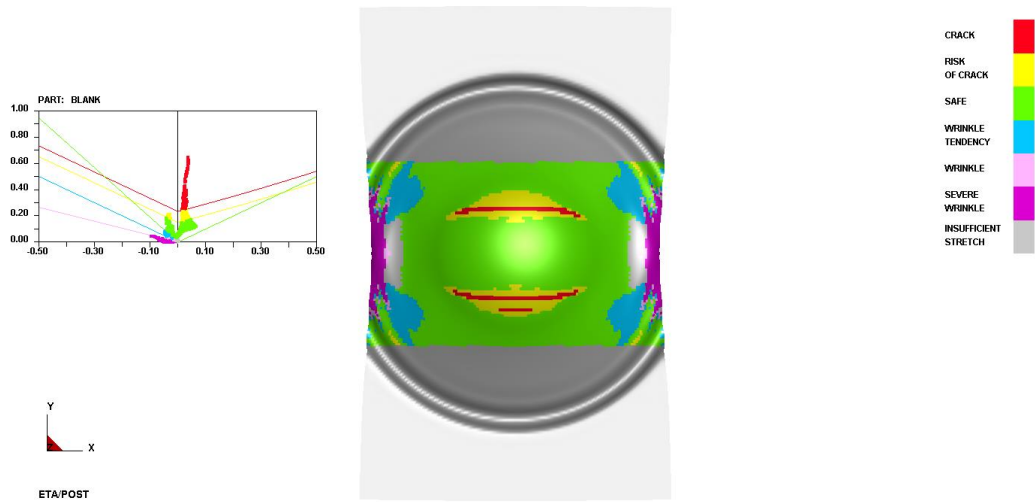
Şekil A.55. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırılma yüksekliği



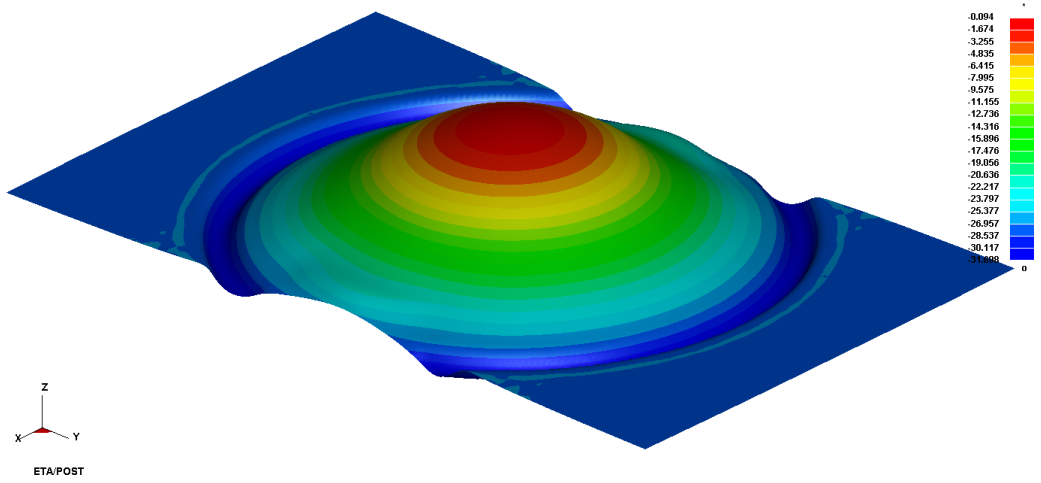
Şekil A.56. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



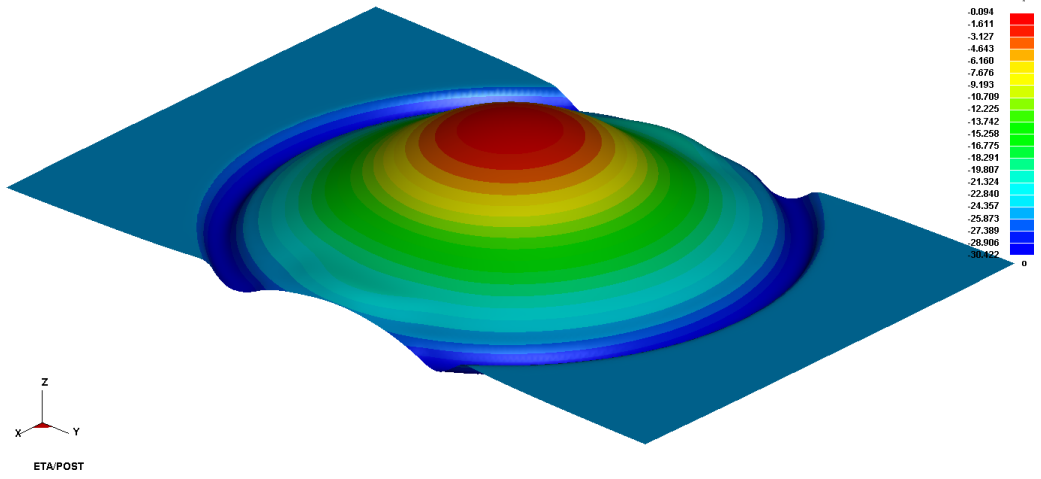
Şekil A.57. 125 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



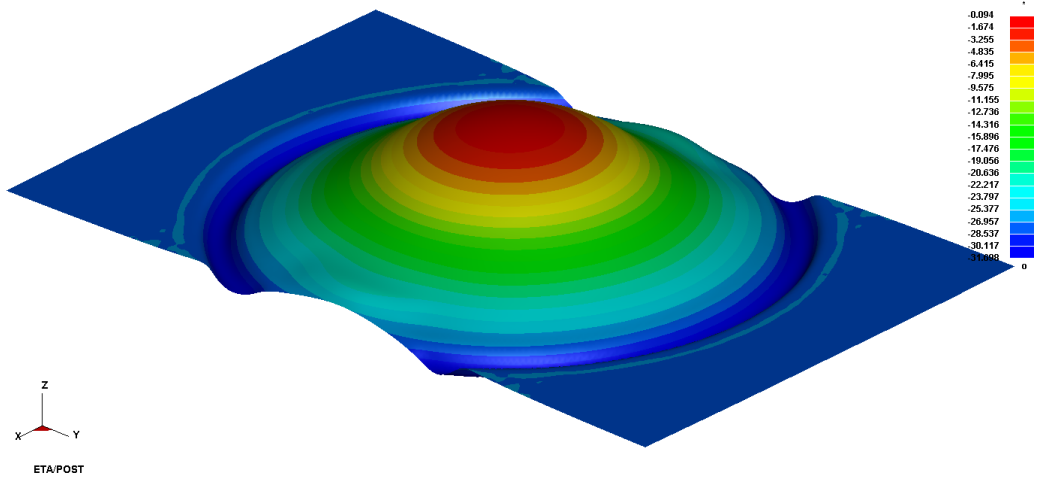
Şekil A.58. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



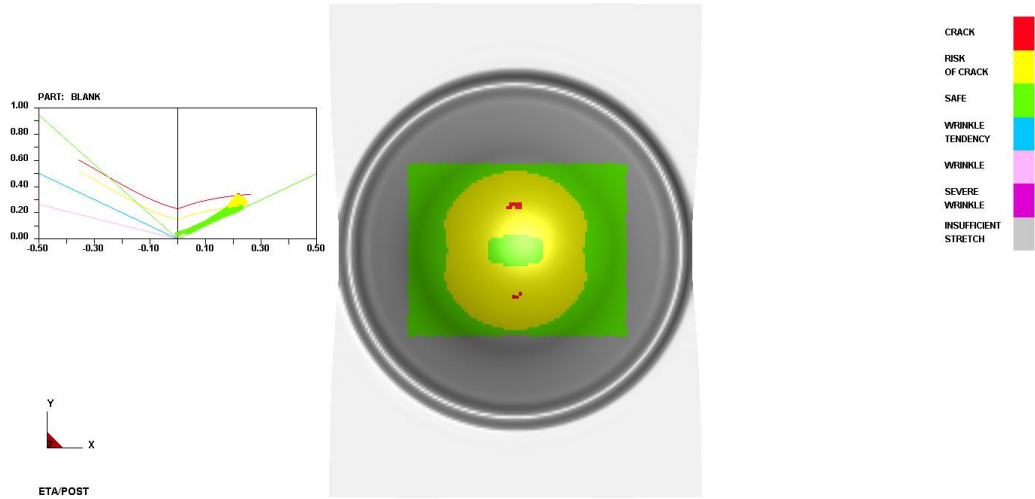
Şekil A.59. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



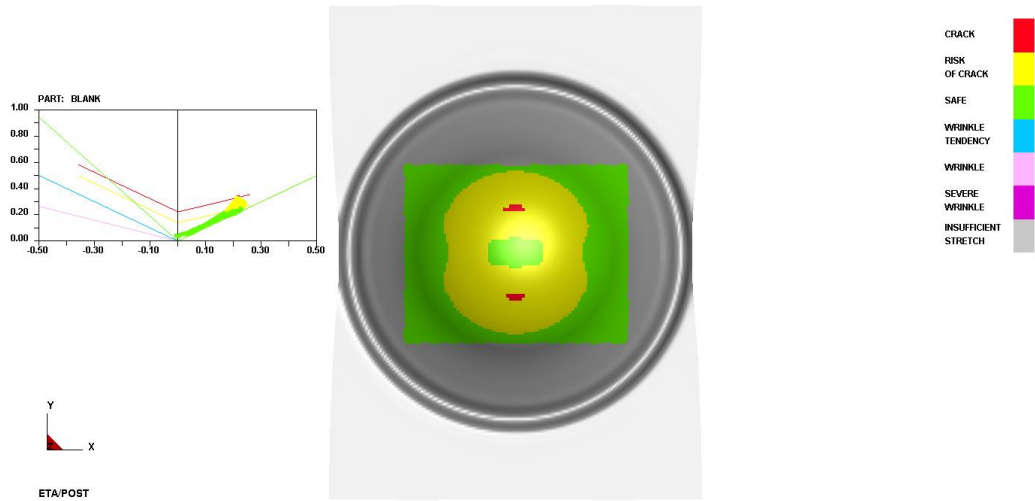
Şekil A.60. 125 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



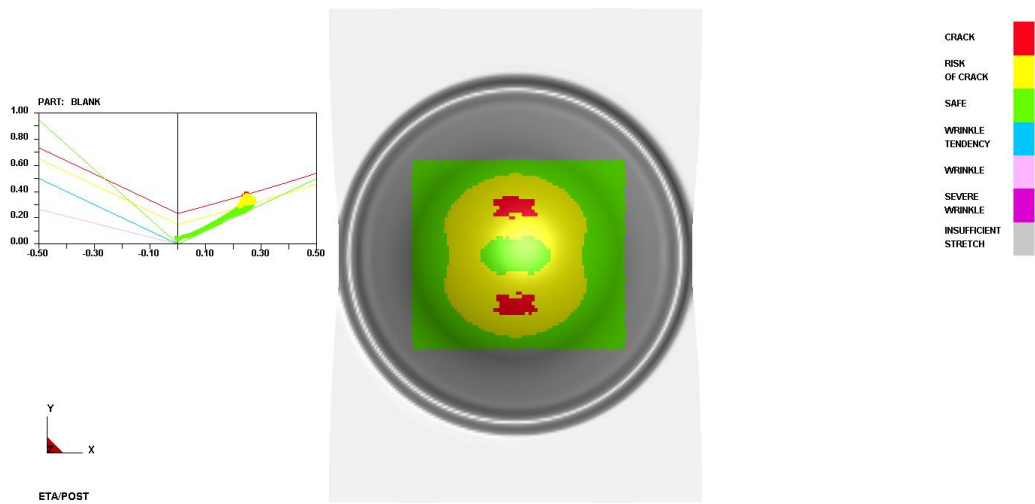
Şekil A.61. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



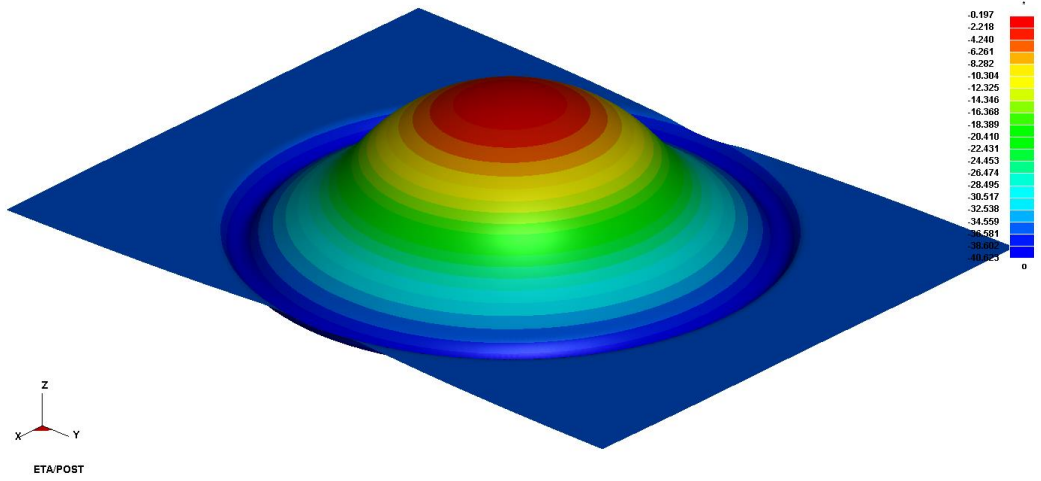
Şekil A.62. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



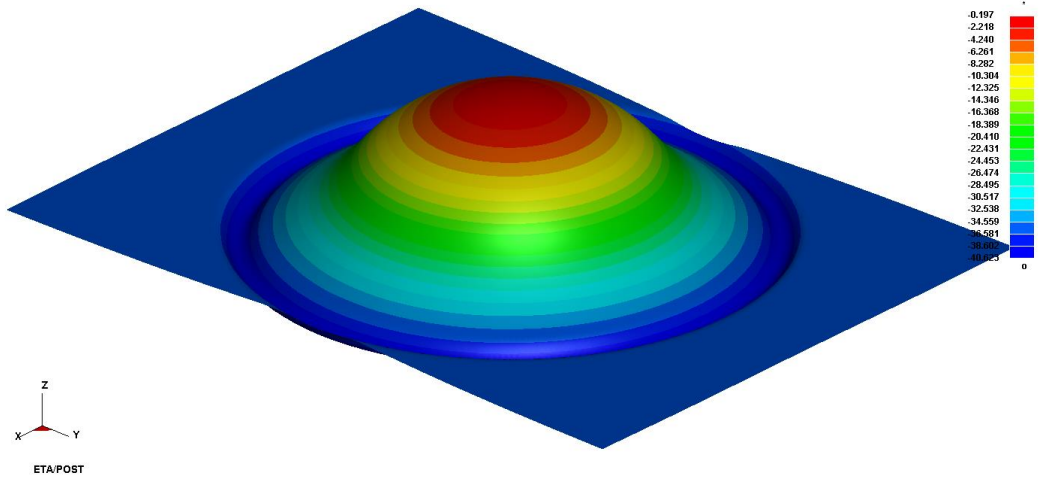
Şekil A.63. 150 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



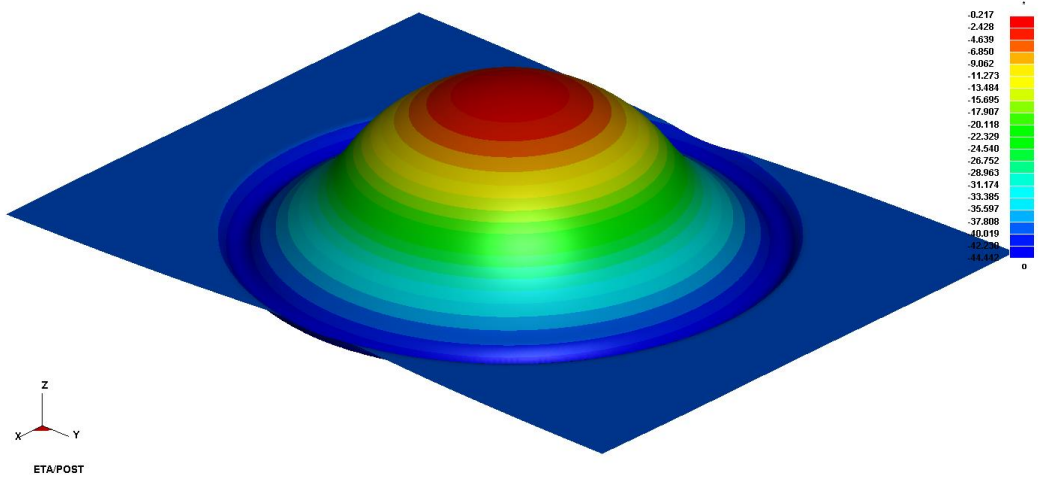
Şekil A.64. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



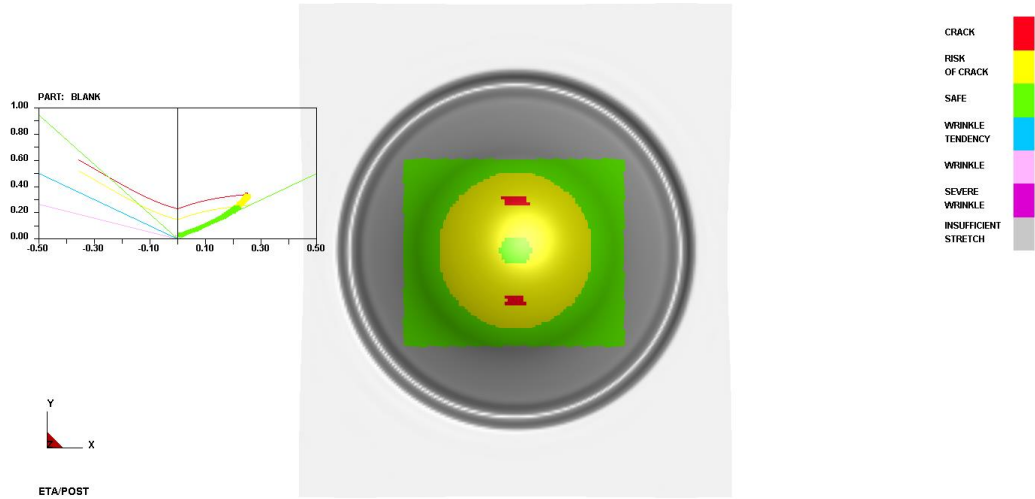
Şekil A.65. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



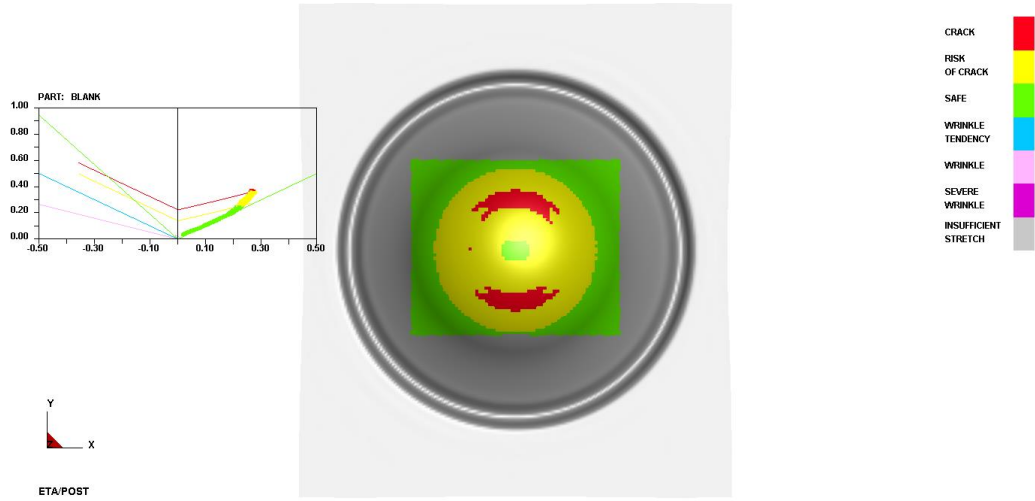
Şekil A.66. 150 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



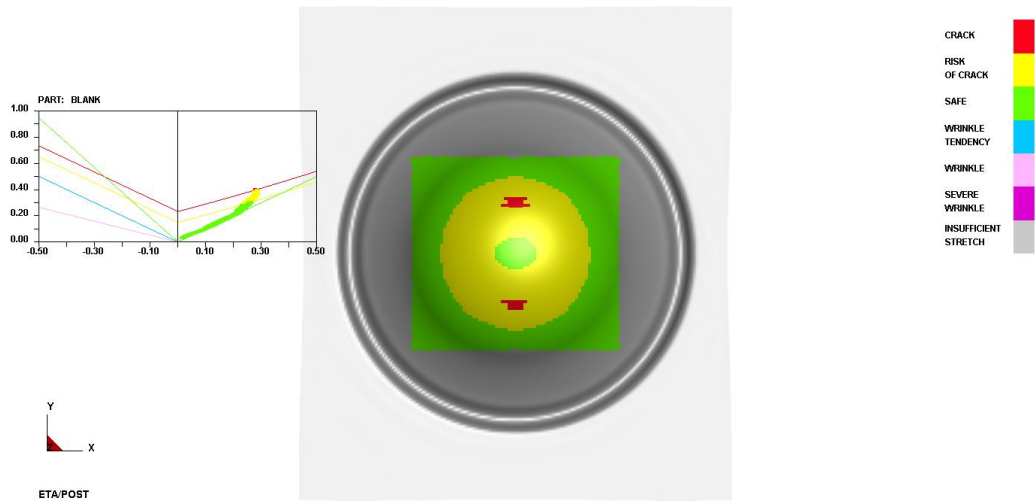
Şekil A.67. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



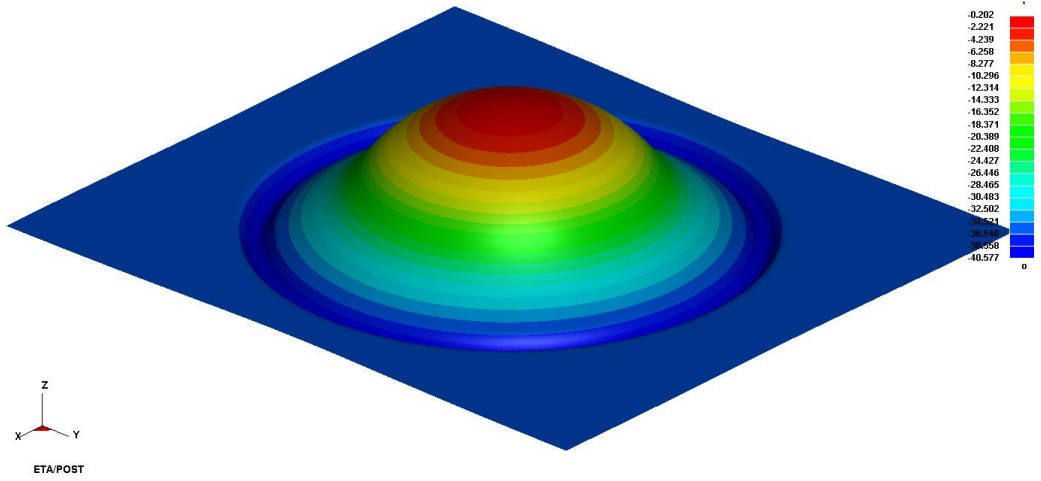
Şekil A.68. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



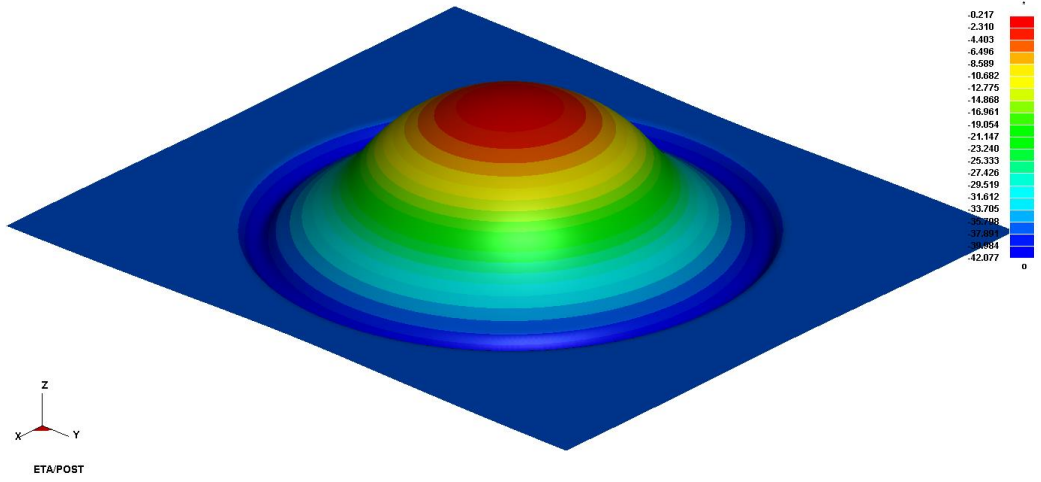
Şekil A.69. 175 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



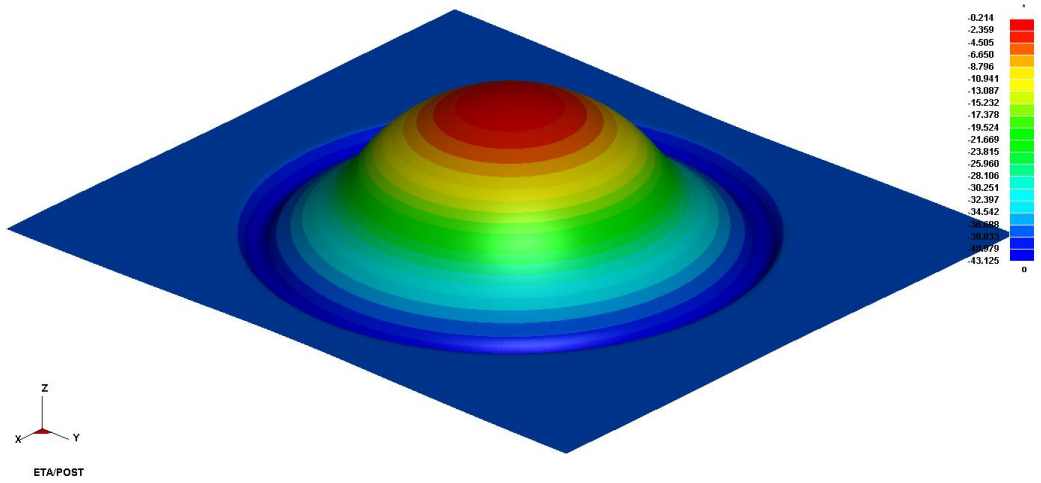
Şekil A.68. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



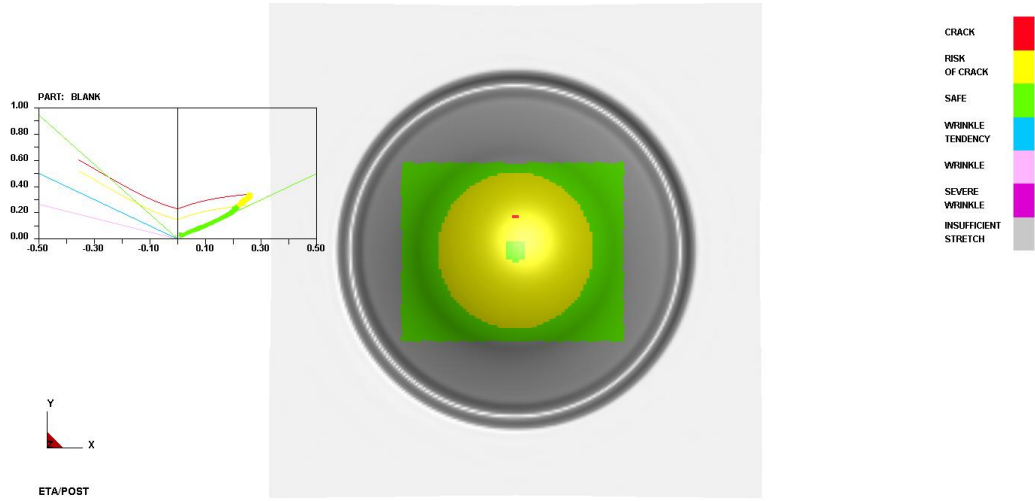
Şekil A.71. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



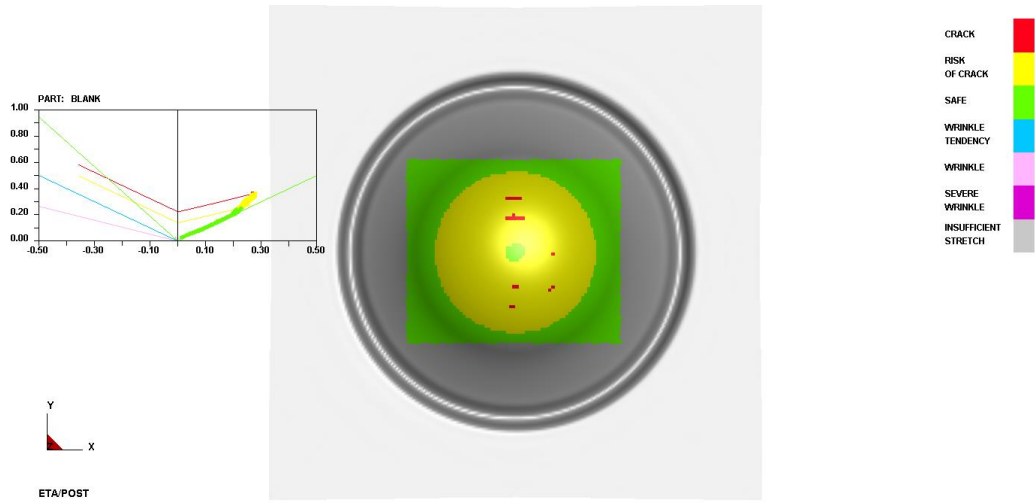
Şekil A.72. 175 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



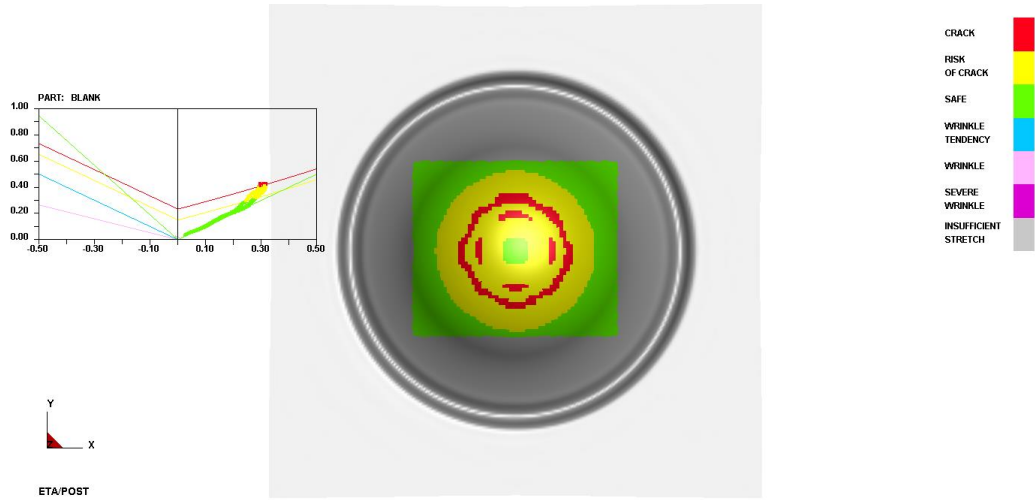
Şekil A.73. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil A.74. 200 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

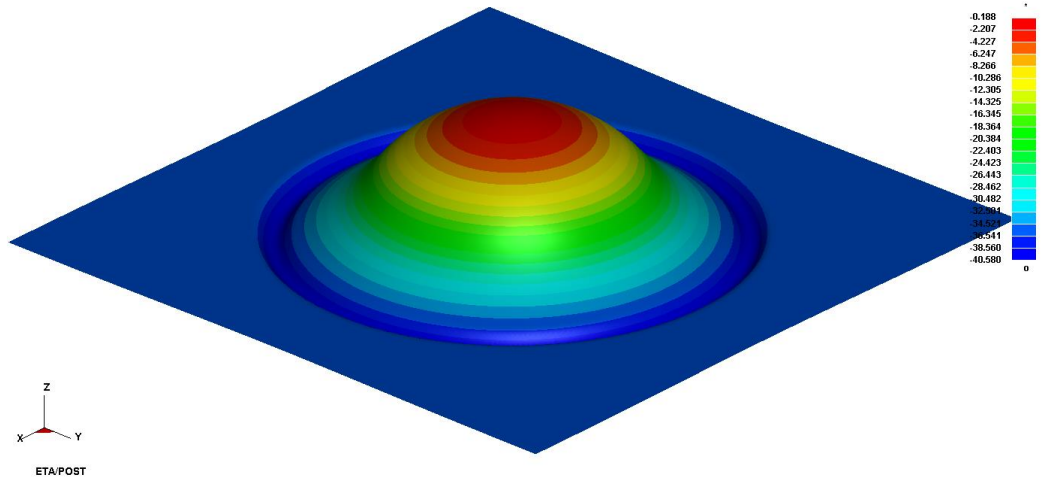


Şekil A.74. 200 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

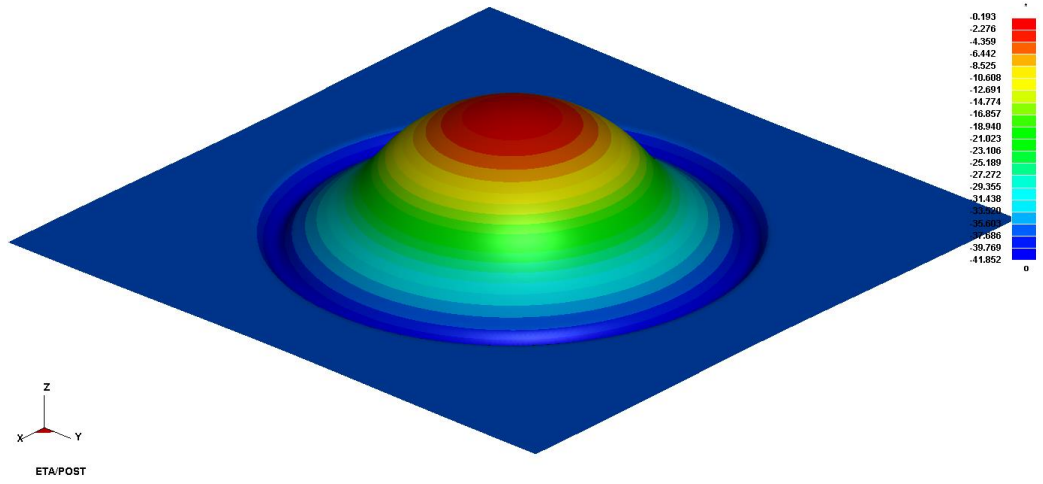


Şekil A.76. 200 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

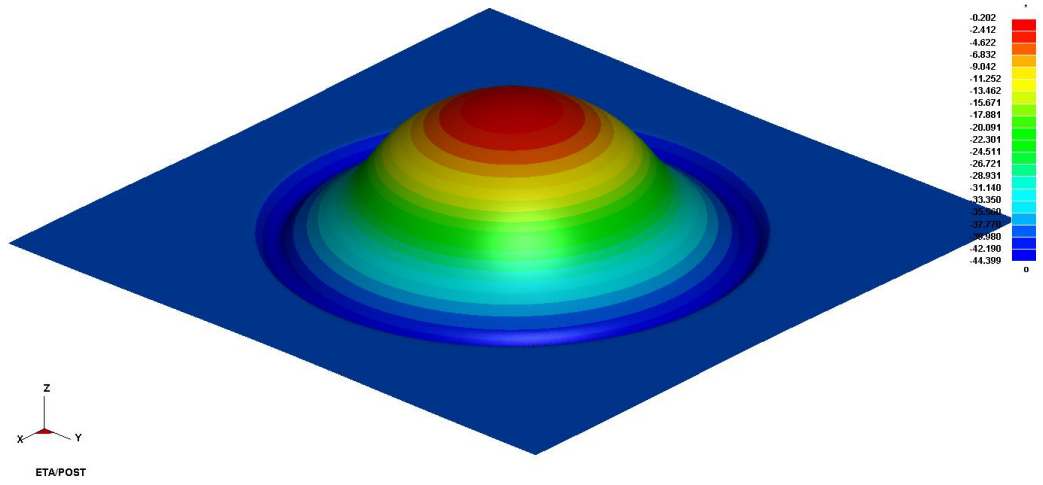




Şekil A.77. 200 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği

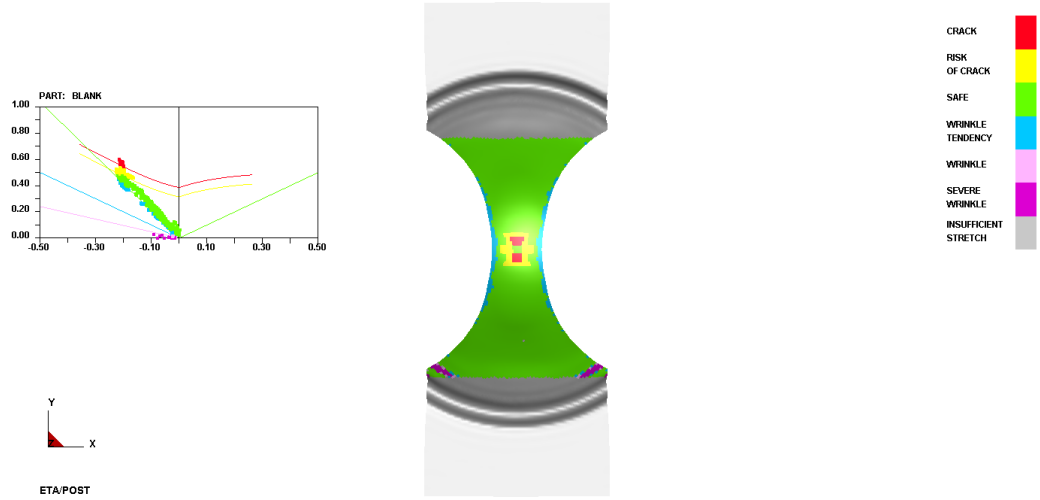


Şekil A.77. 200 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği

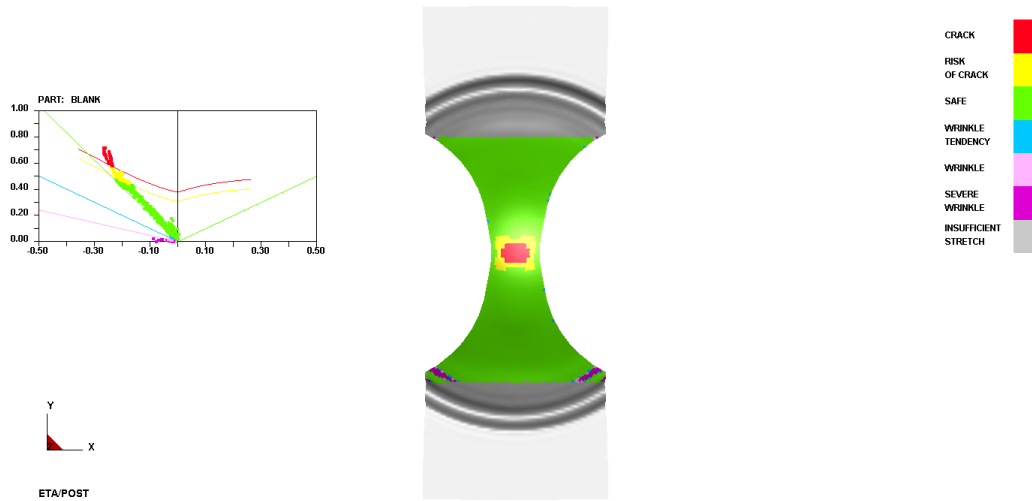


Şekil A.79. 200 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği

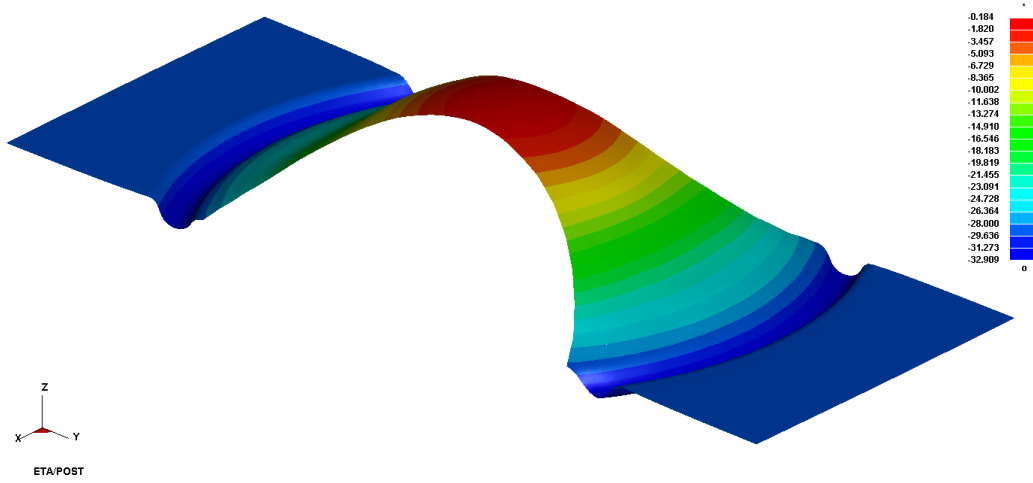
**EK B: TRIP600 Çeliği Nakajima Testi Sonlu Elemanlar Analizinde Farklı Malzeme Modelleri ve Sınır Eğrilerinin Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramı ve Yırtılma Yüksekliğine Etkisi**



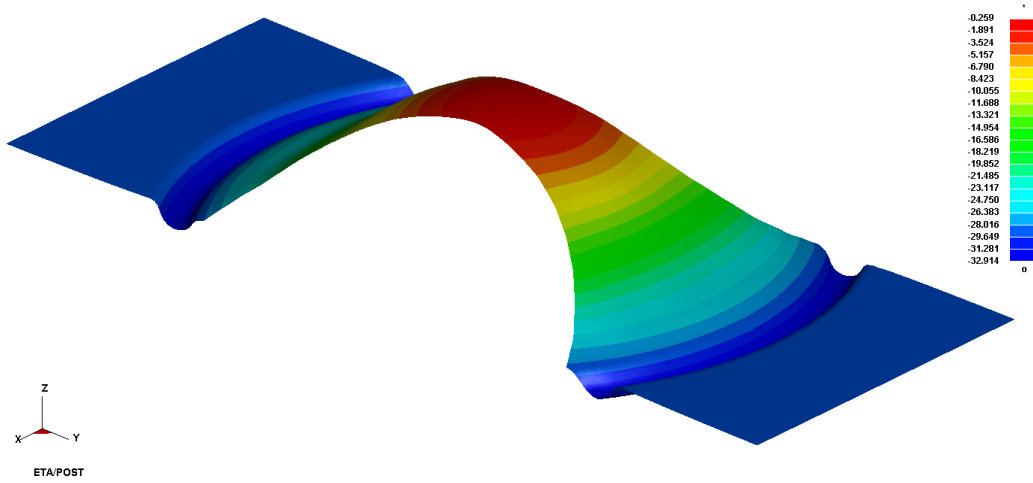
Şekil B.1. 25 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



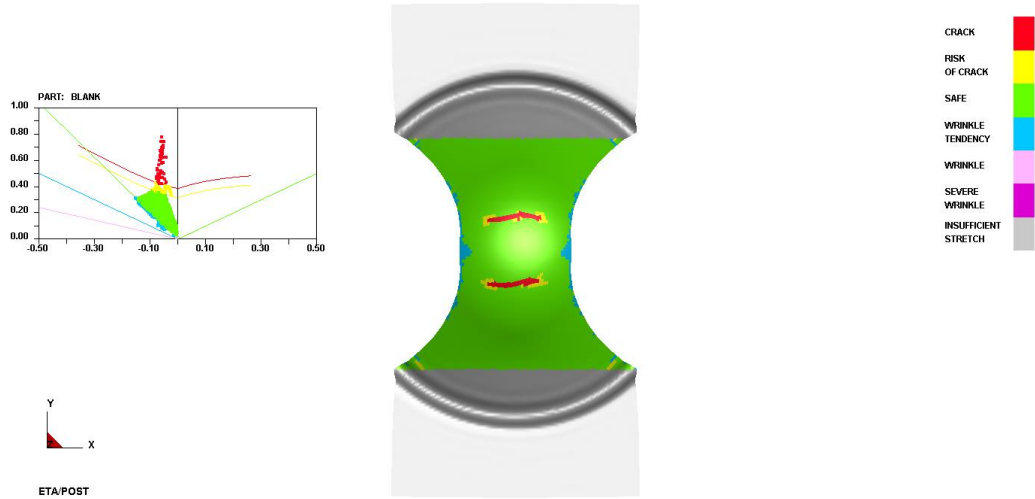
Şekil B.2. 25 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



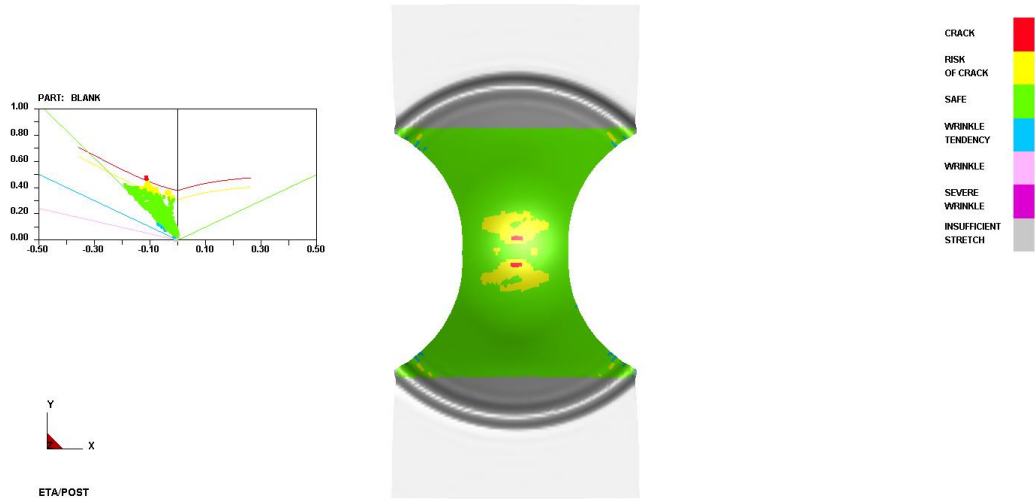
Şekil B.3. 25 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



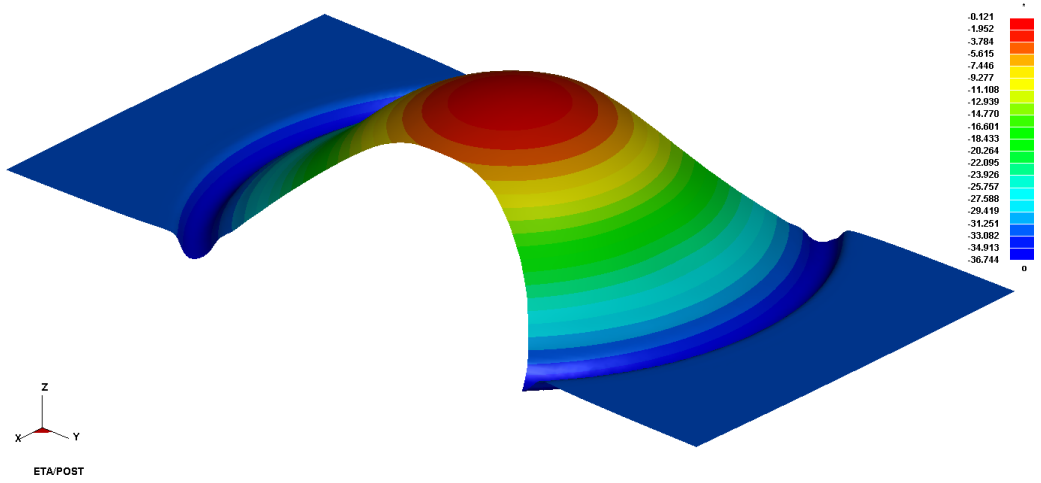
Şekil B.4. 25 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



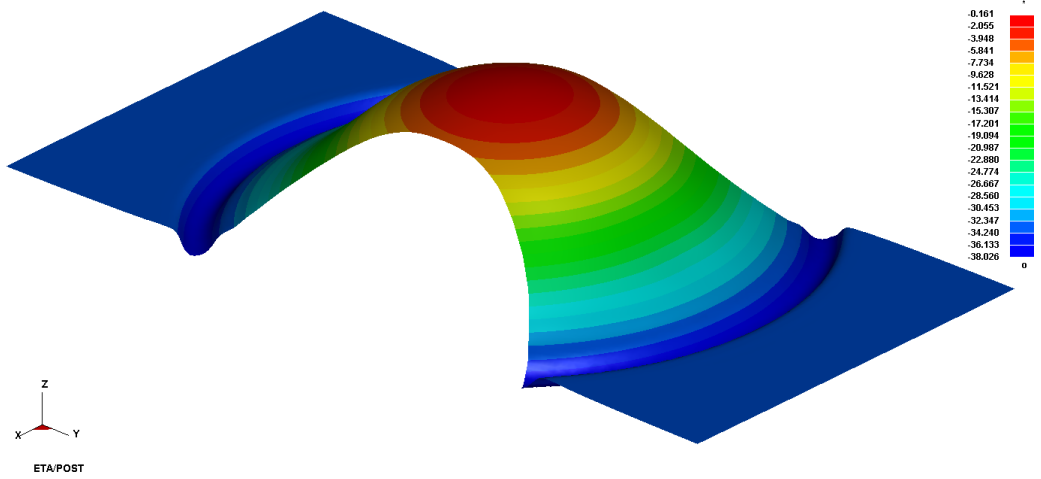
Şekil B.5. 50 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



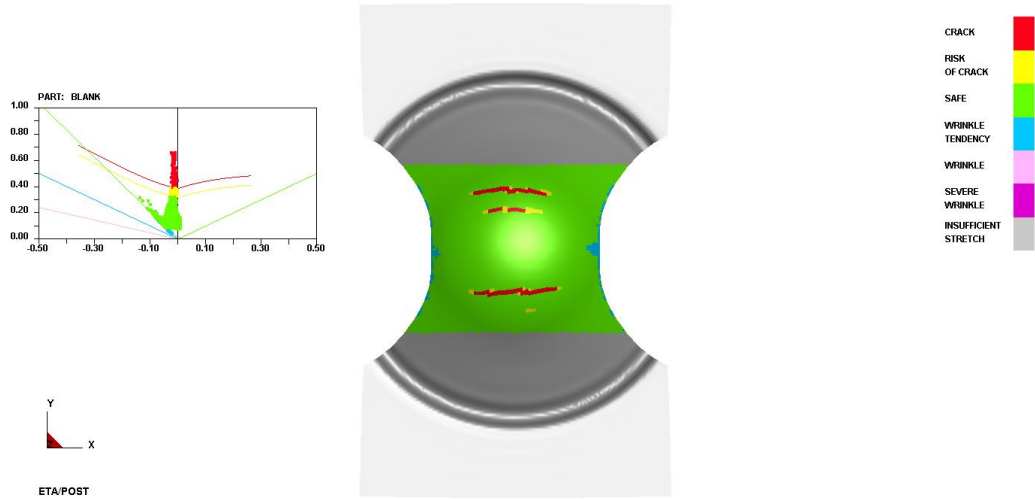
Şekil B.6. 50 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



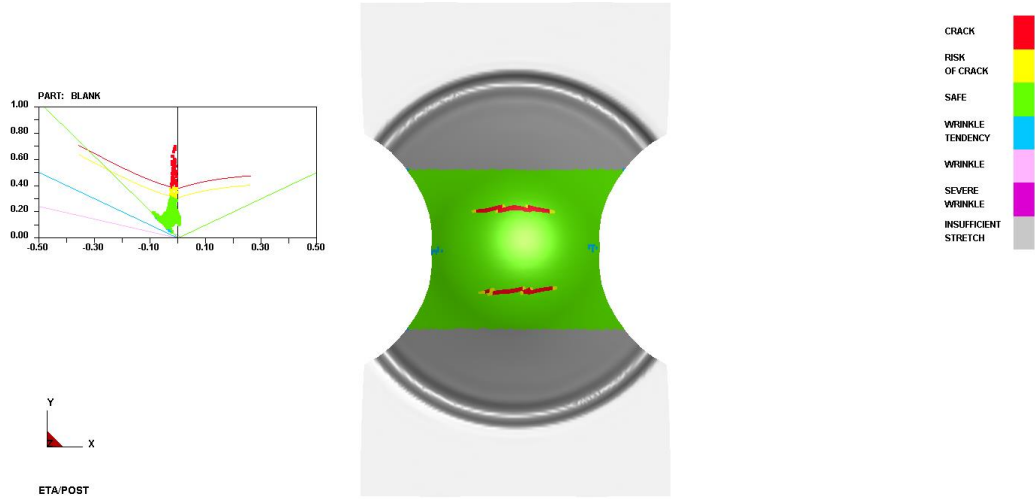
Şekil B.7. 50 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



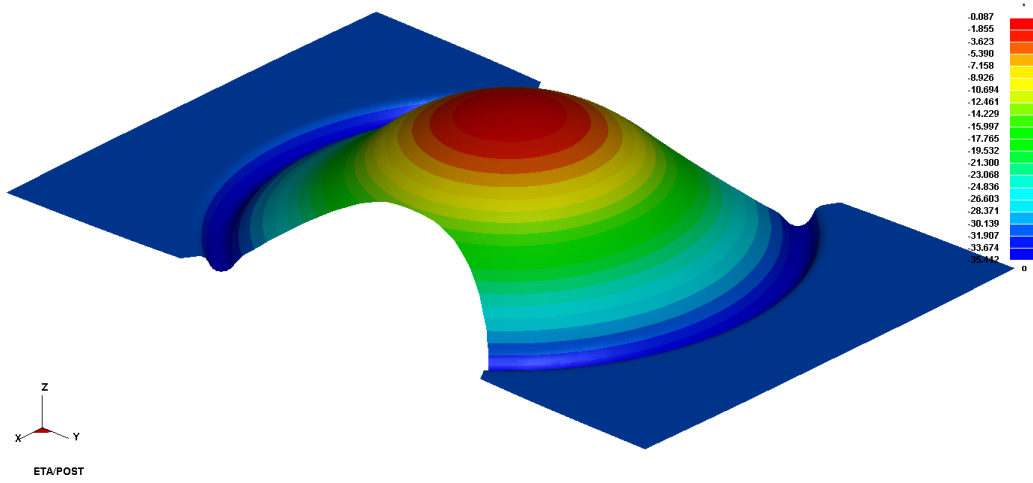
Şekil B.8. 50 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



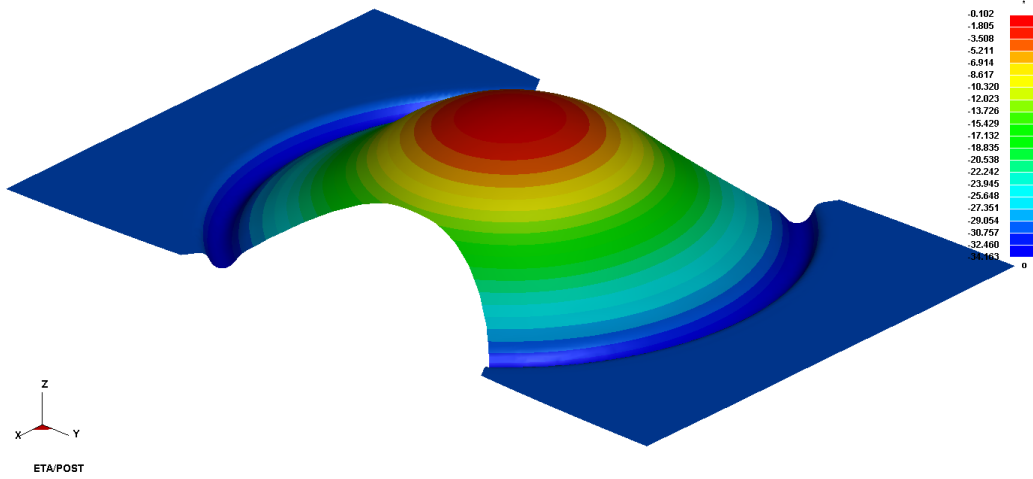
Şekil B.9. 75 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



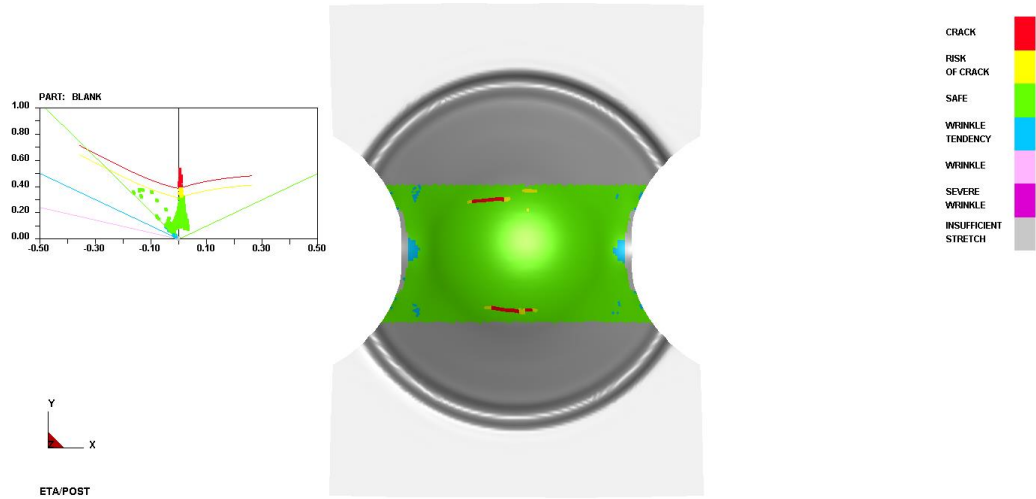
Şekil B.10. 75 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



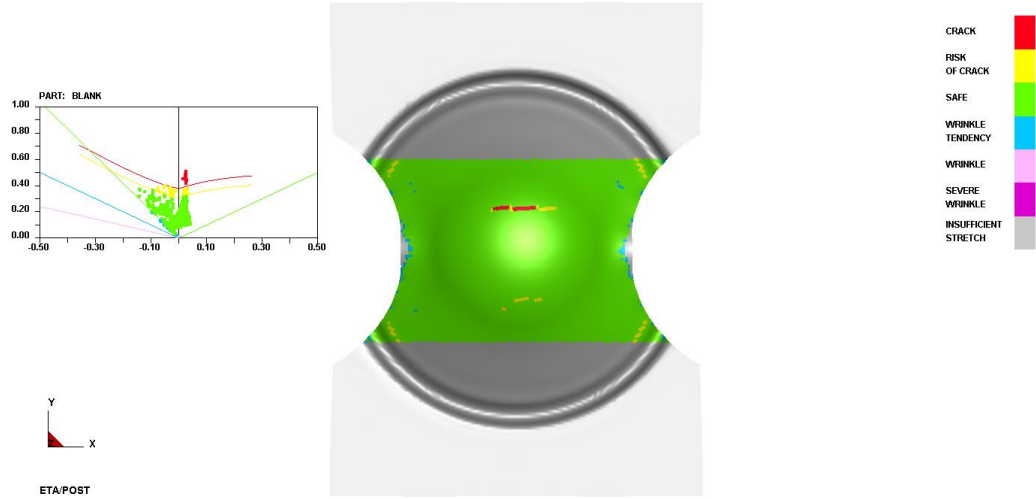
Şekil B.11. 75 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil B.12. 75 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği

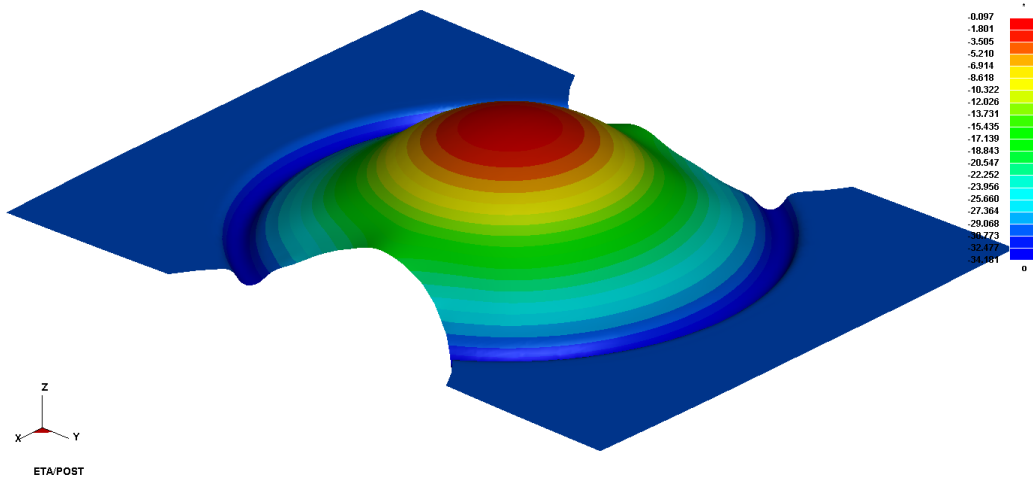


Şekil B.13. 100 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD

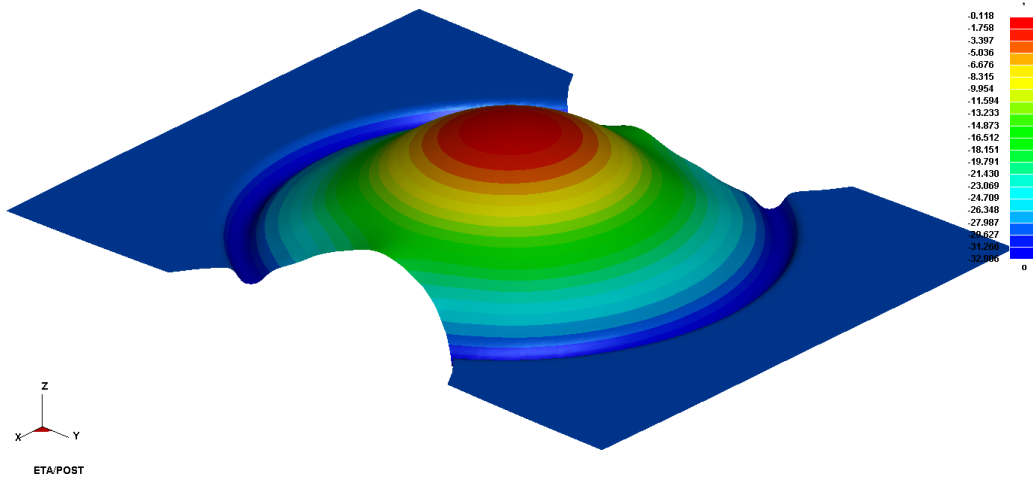


Şekil B.14. 100 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD

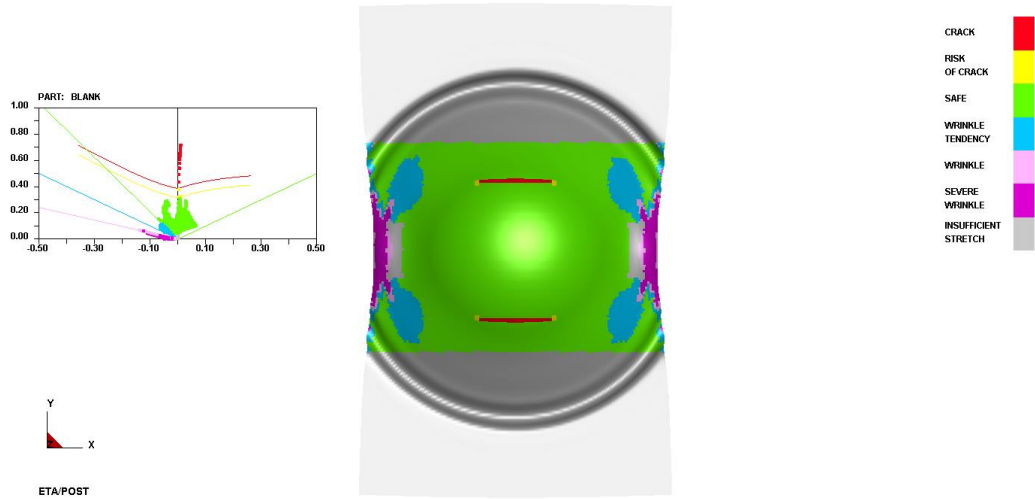




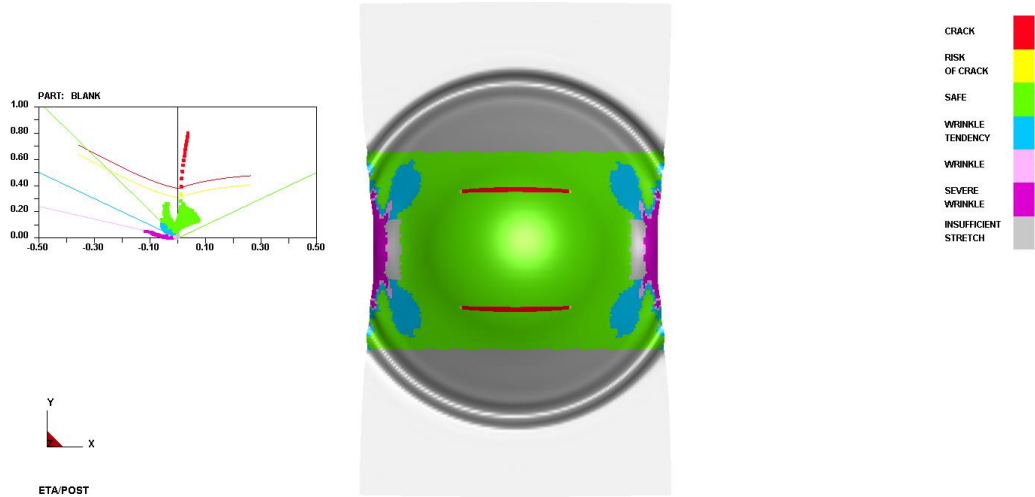
Şekil B.15. 100 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



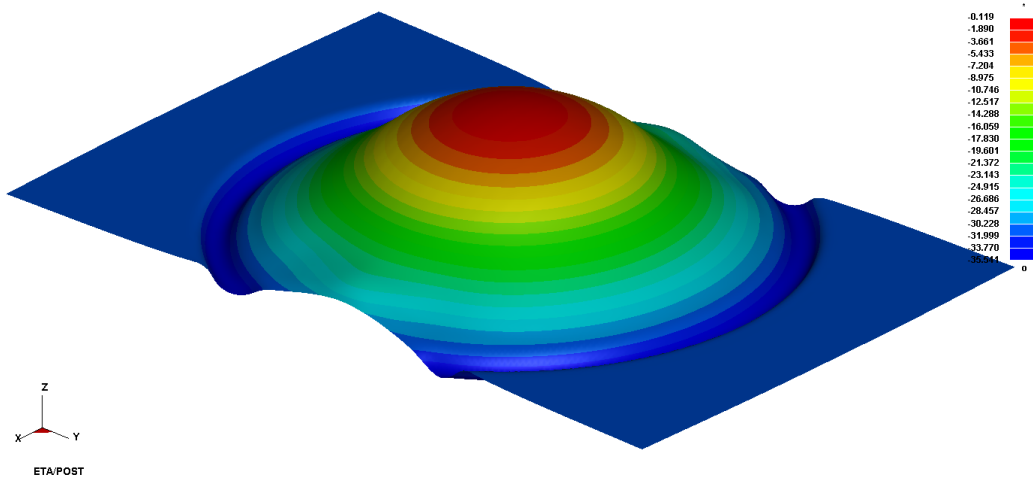
Şekil B.16. 100 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



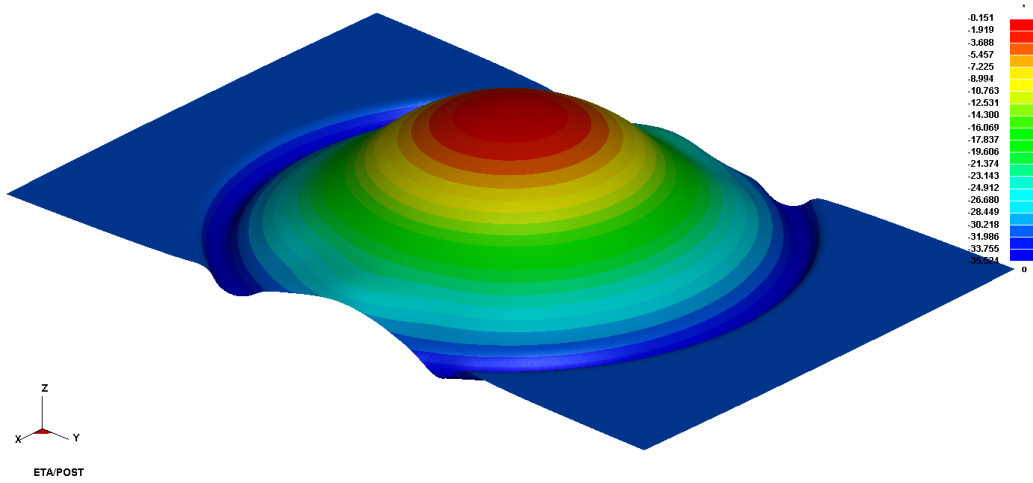
Şekil B.17. 125 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



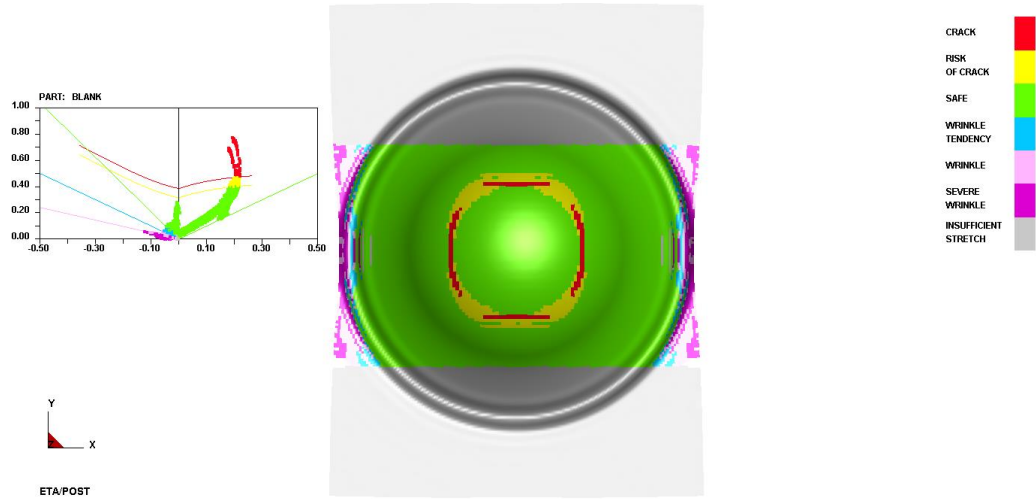
Şekil B.18. 125 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



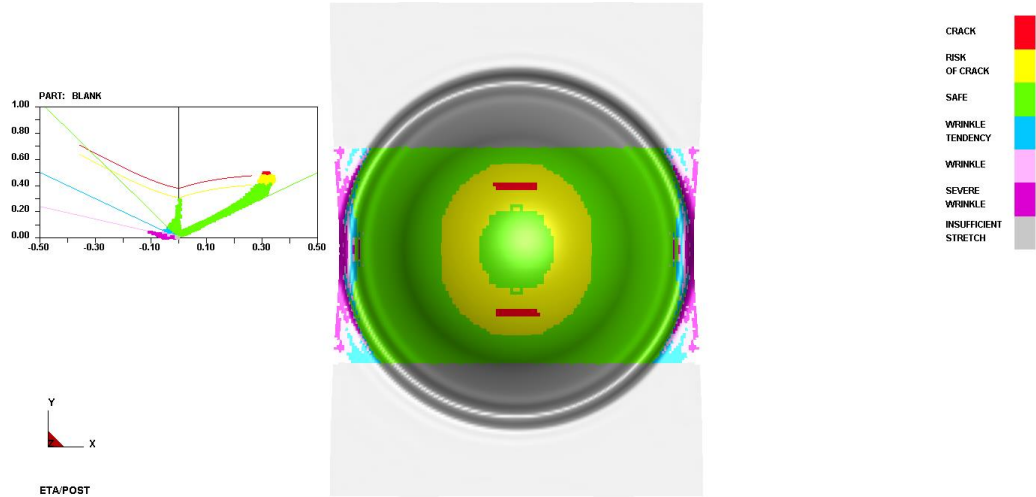
Şekil B.19. 125 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



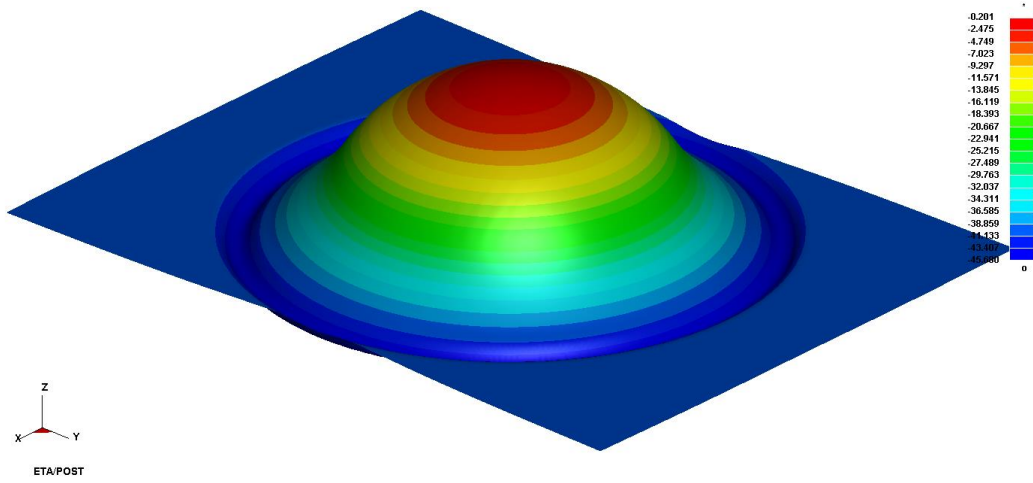
Şekil B.20. 125 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



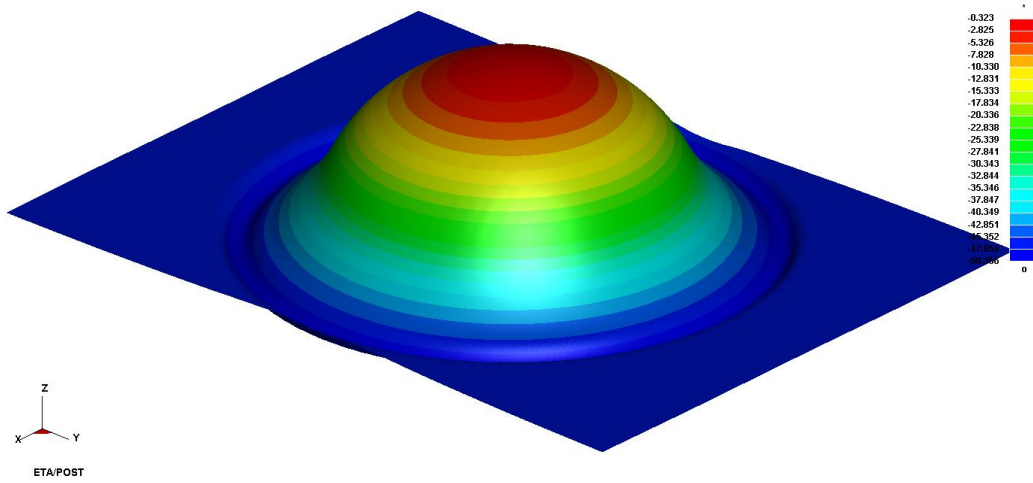
Şekil B.21. 150 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



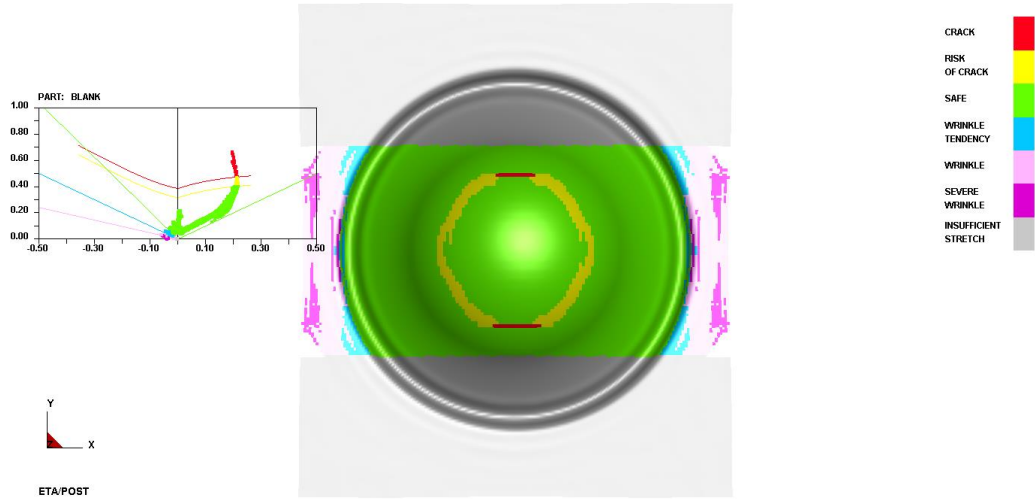
Şekil B.22. 150 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



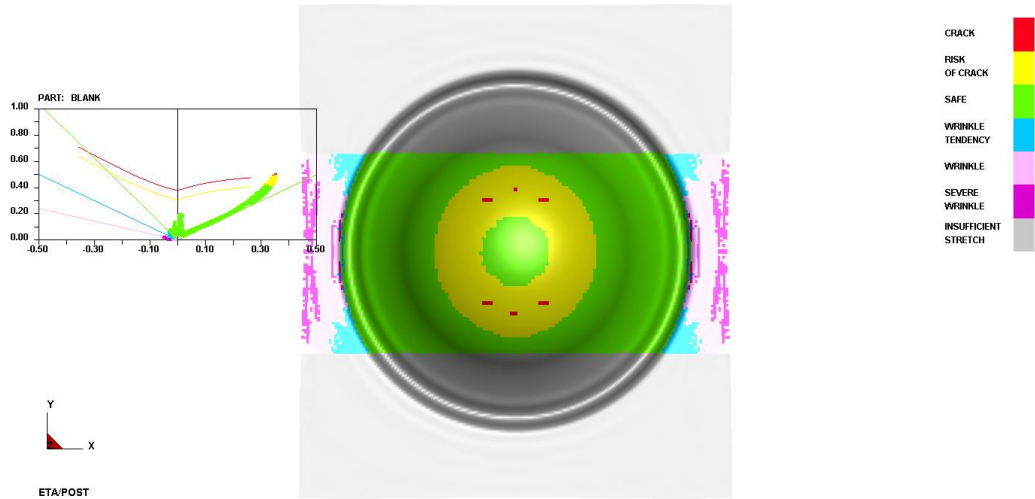
Şekil B.23. 150 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



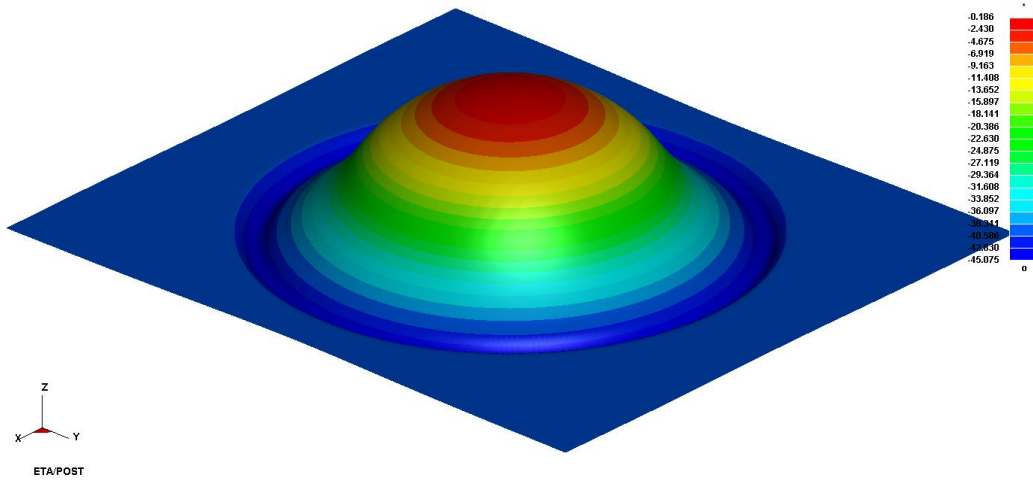
Şekil B.24. 150 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



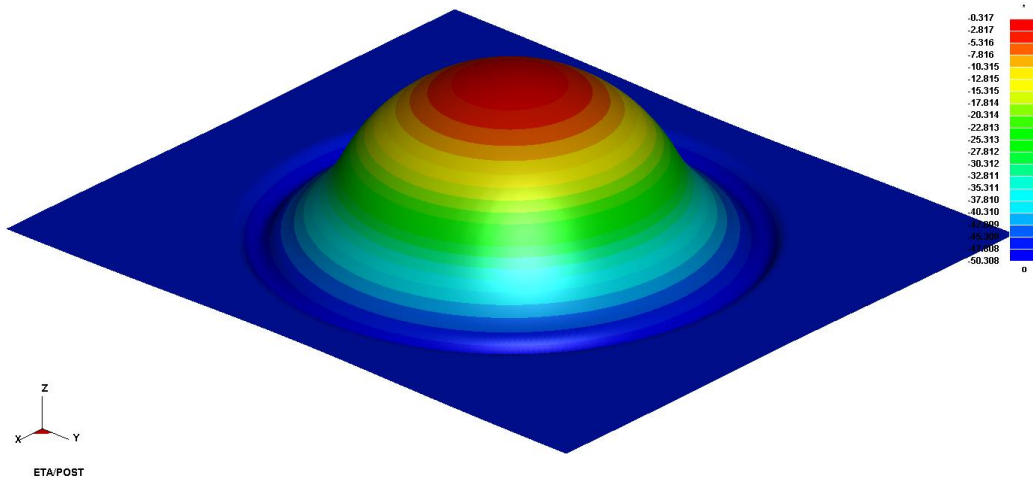
Şekil B.25. 175 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD



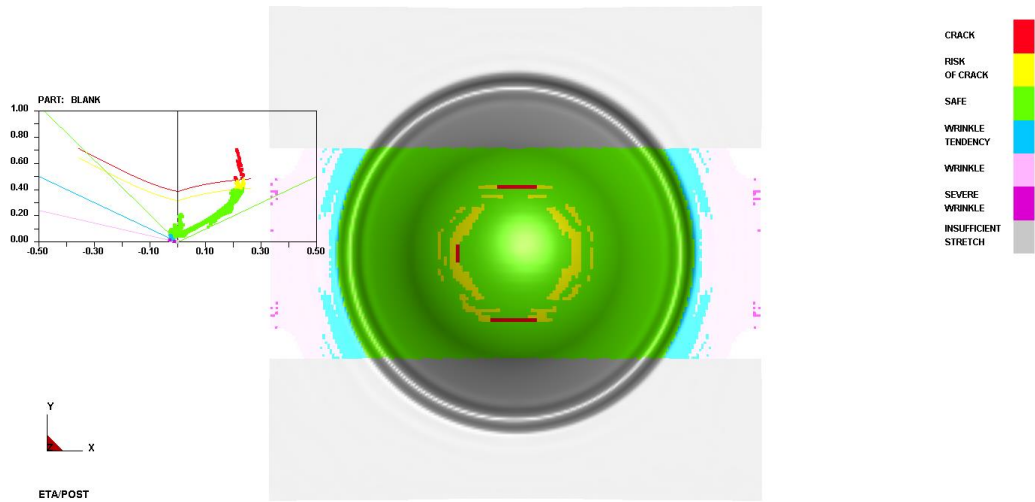
Şekil B.26. 175 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD



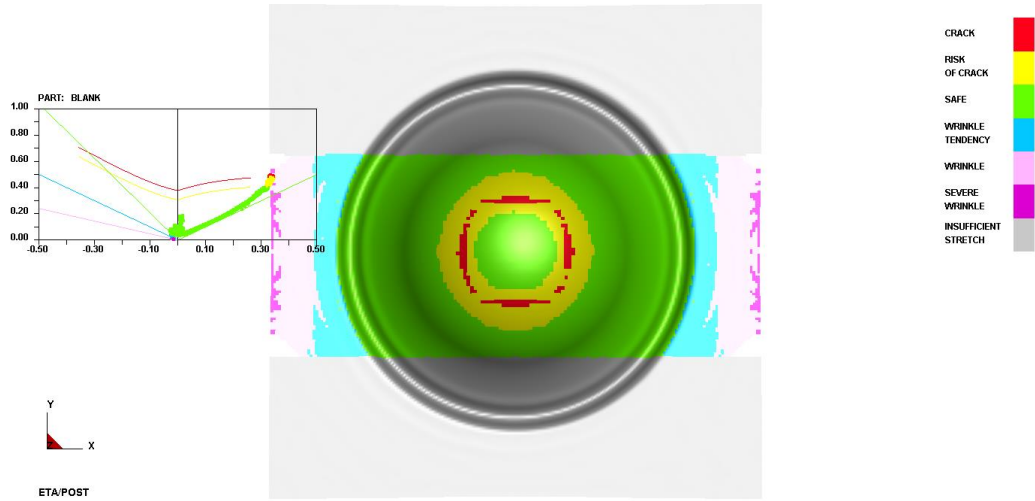
Şekil B.27. 175 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil B.28. 175 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği

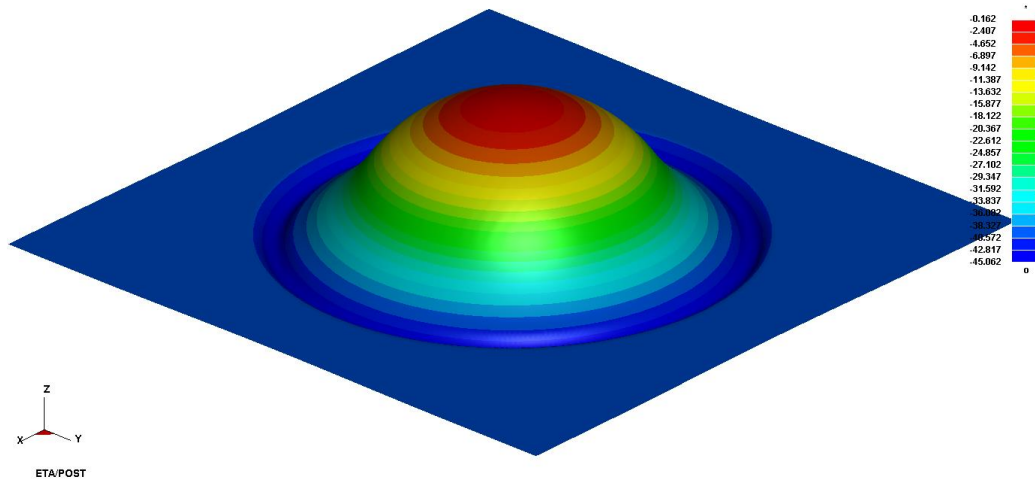


Şekil B.29. 200 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen ŞSD

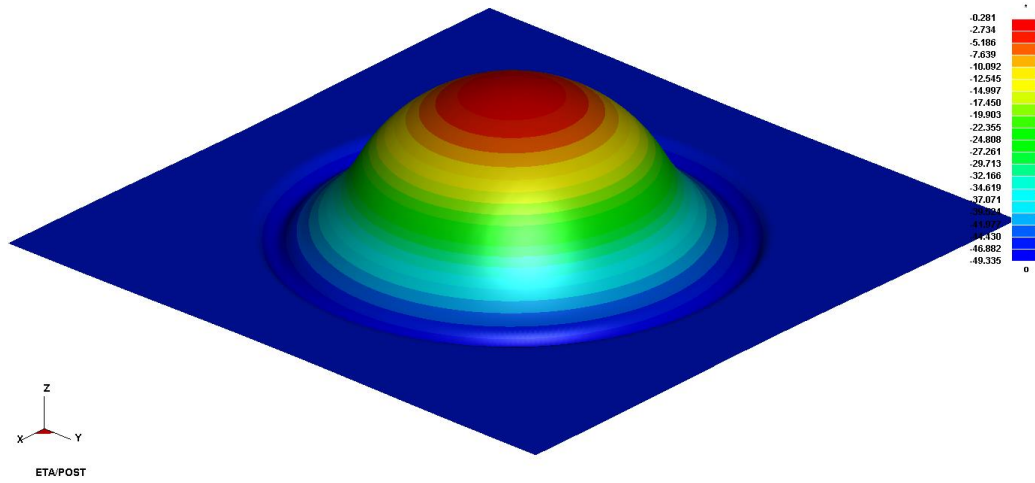


Şekil B.30. 200 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen ŞSD

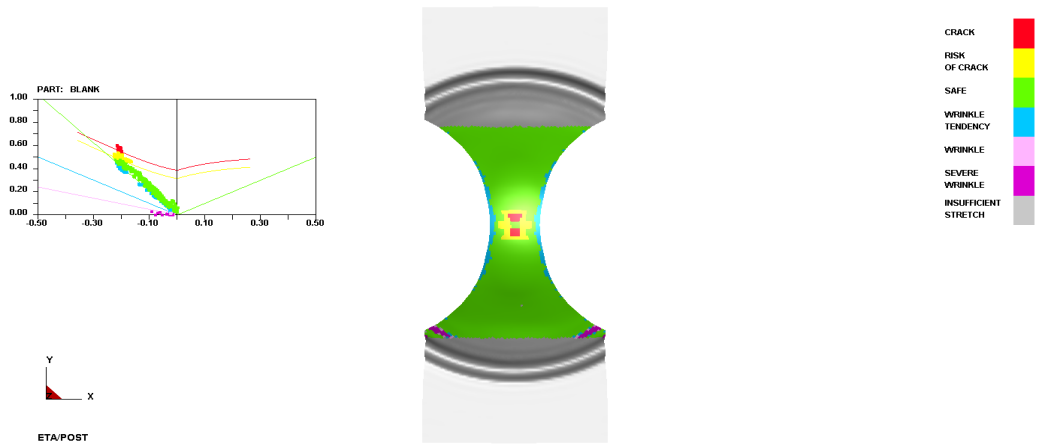




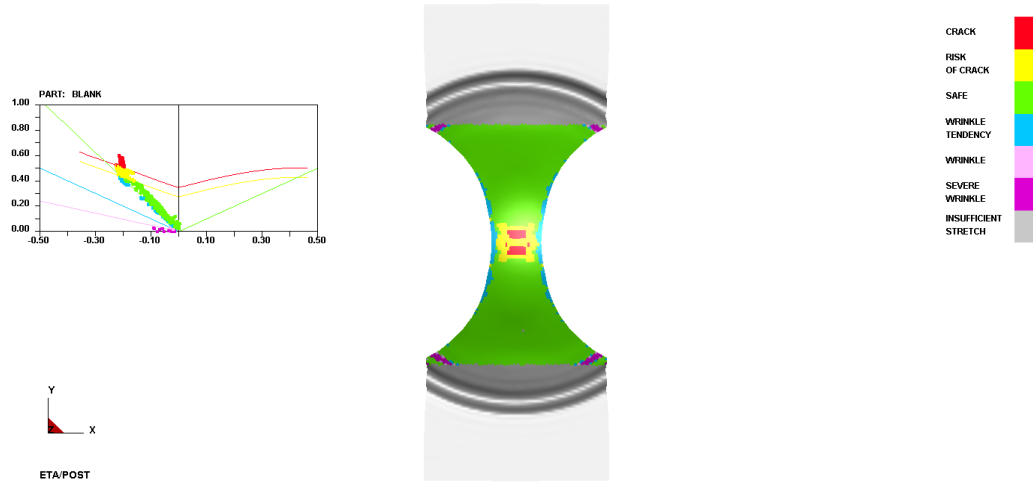
Şekil B.31. 200 mm genişliğindeki numunenin Barlat89 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



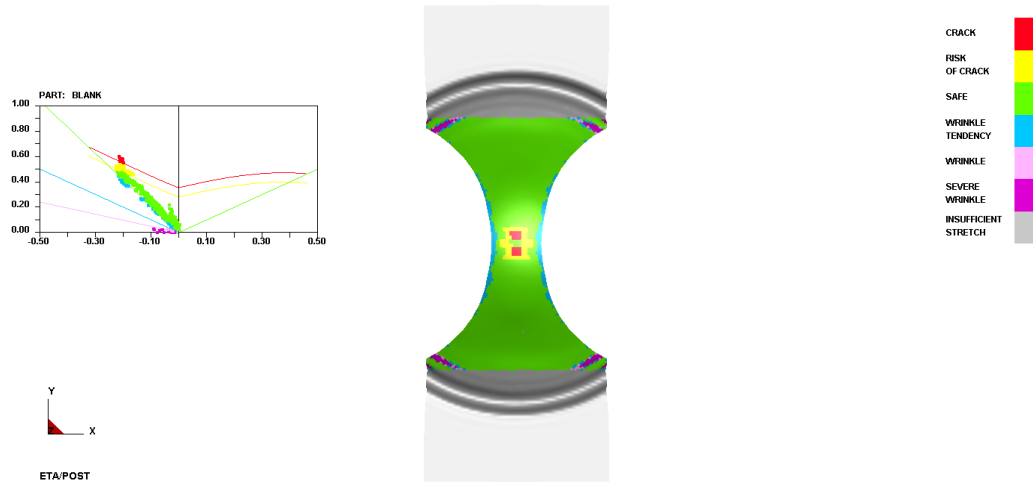
Şekil B.32. 200 mm genişliğindeki numunenin Hill48 modeliyle elde edilen yırtılma yüksekliği



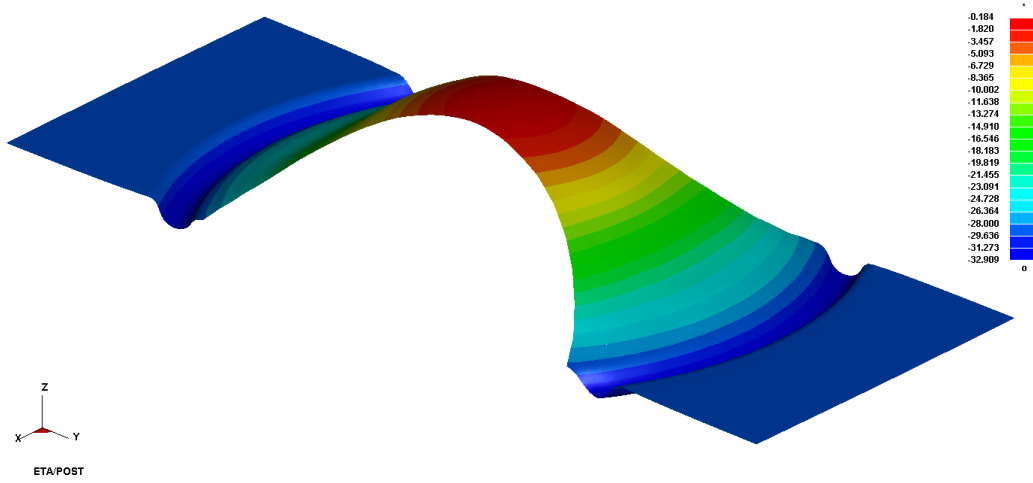
Şekil B.33. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



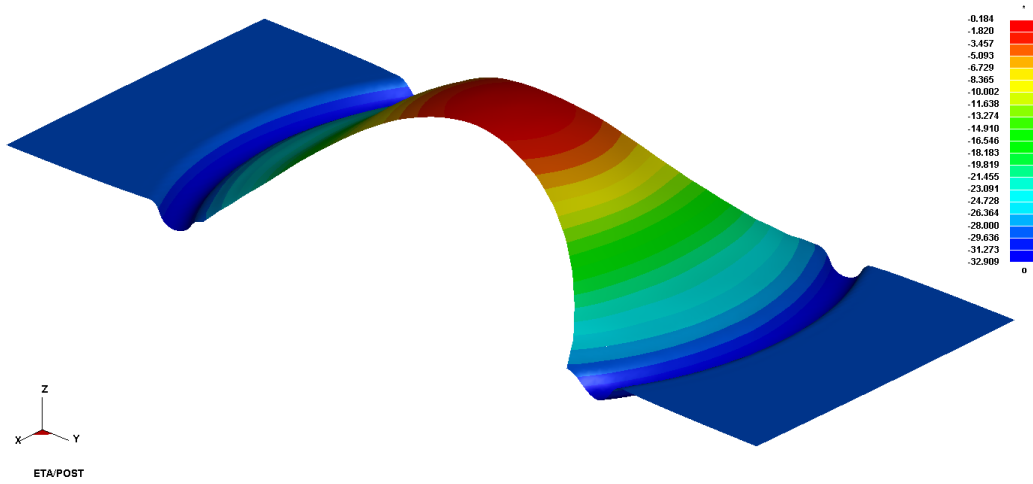
Şekil B.34. 25 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



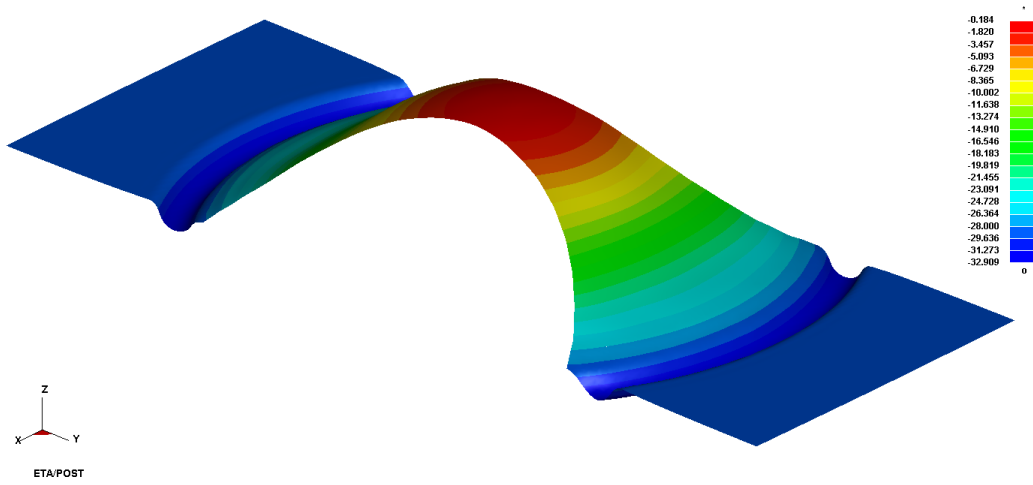
Şekil B.35. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



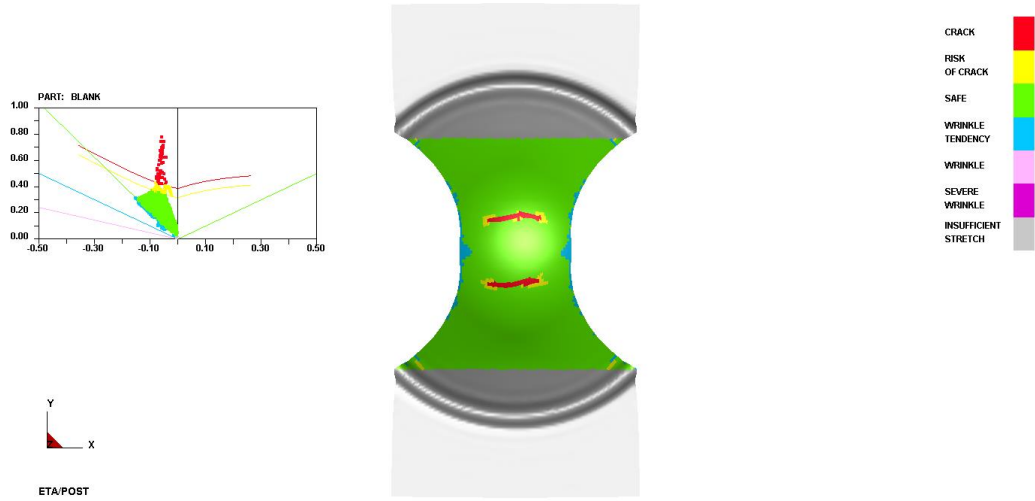
Şekil B.36. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



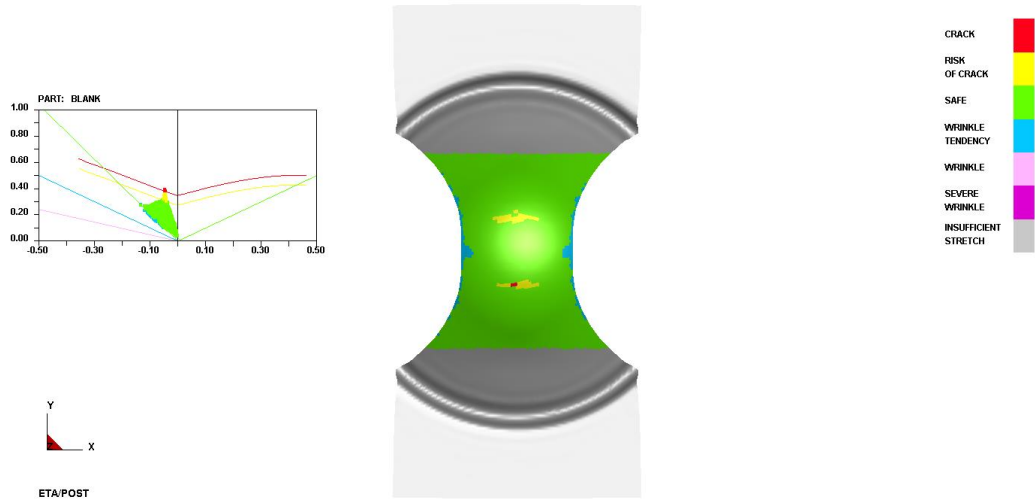
Şekil B.37. 25 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



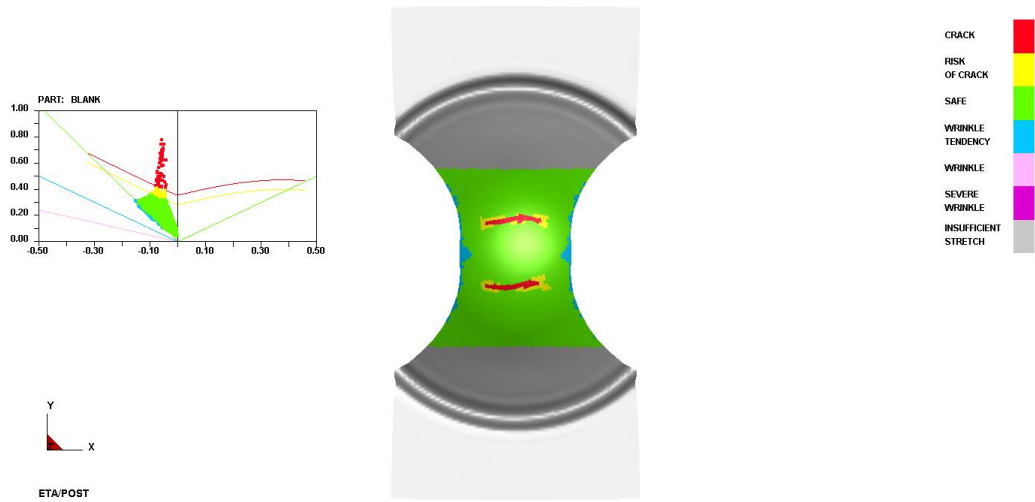
Şekil B.38. 25 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



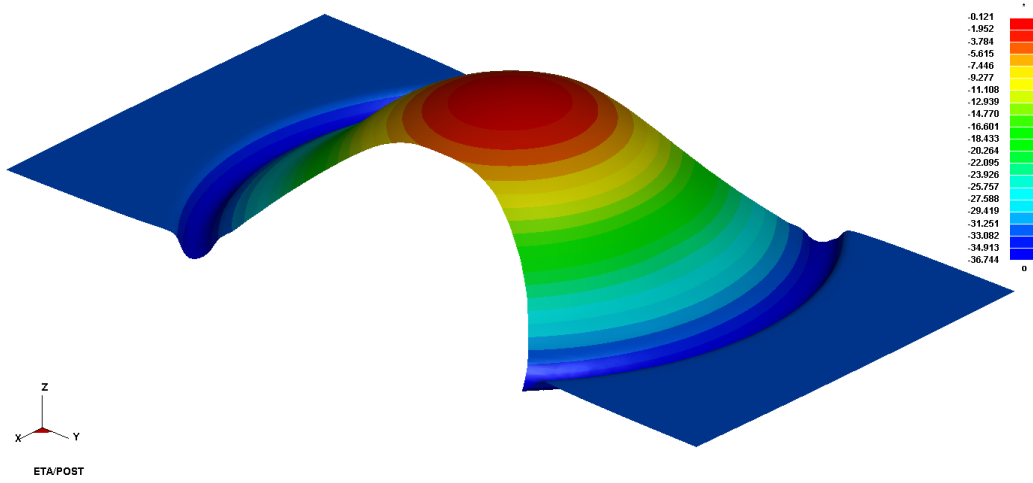
Şekil B.39. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



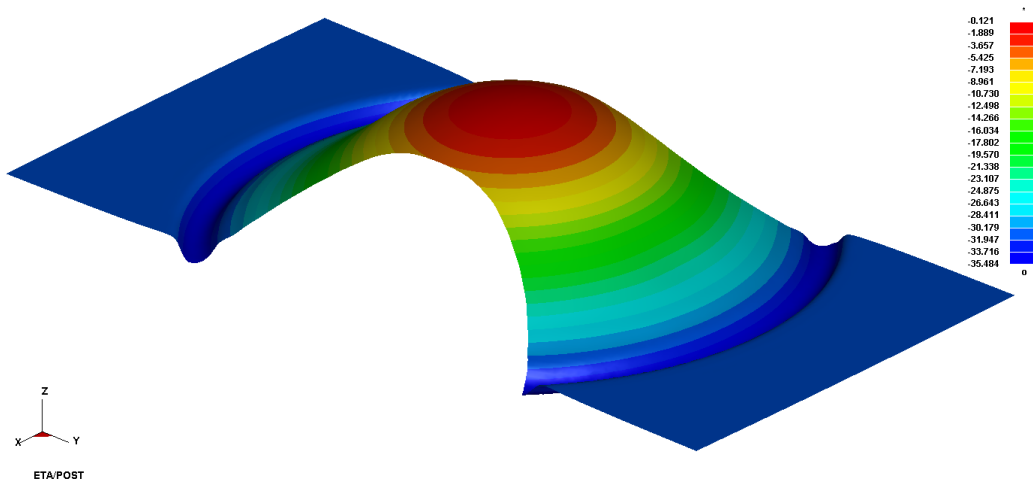
Şekil B.40. 50 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



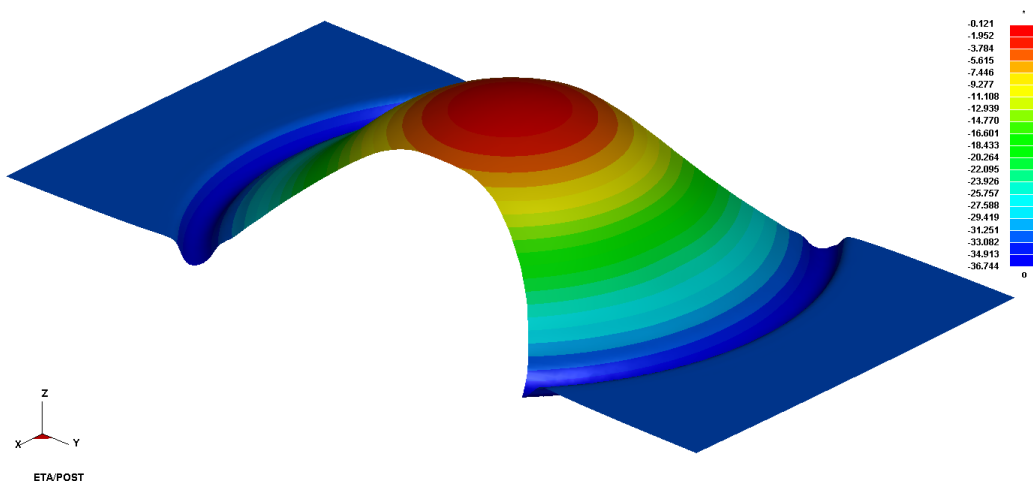
Şekil B.41. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



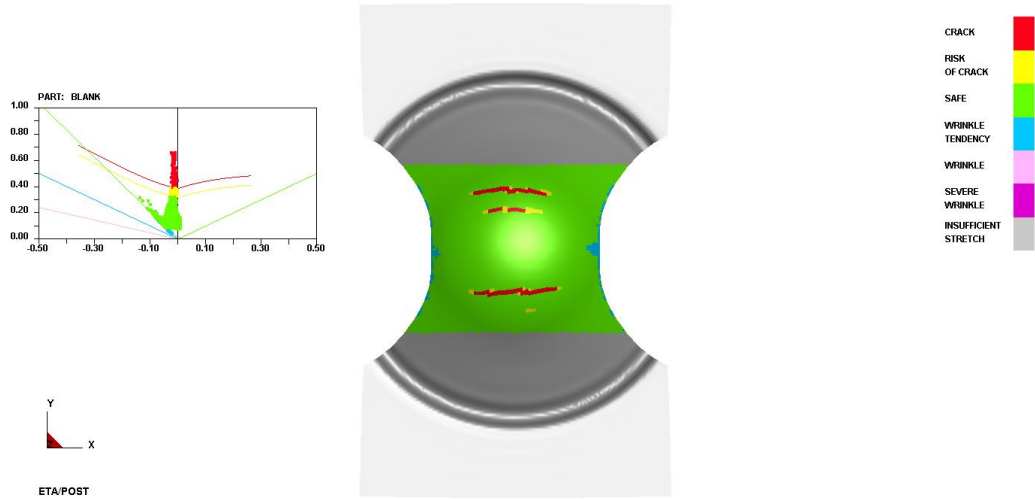
Şekil B.42. 50 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yrtılma yüksekliği



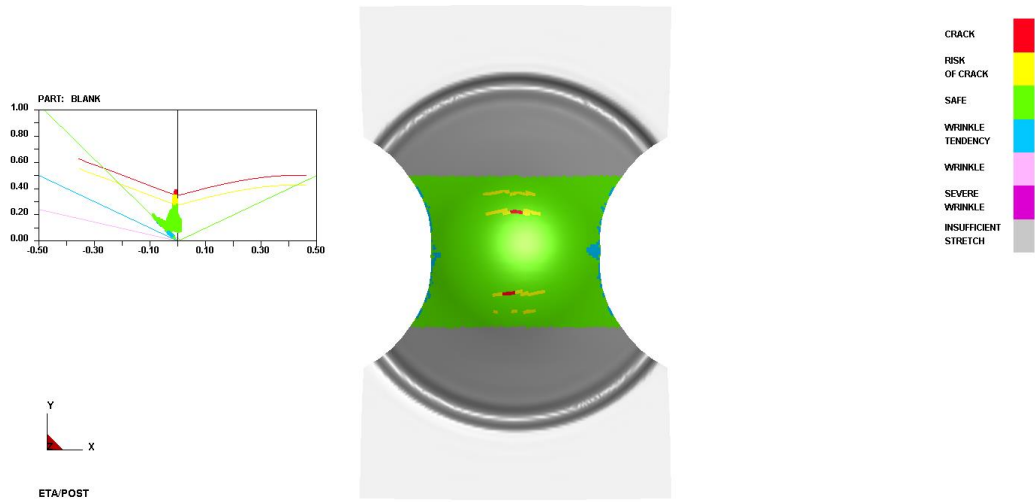
Şekil B.43. 50 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yrtılma yüksekliği



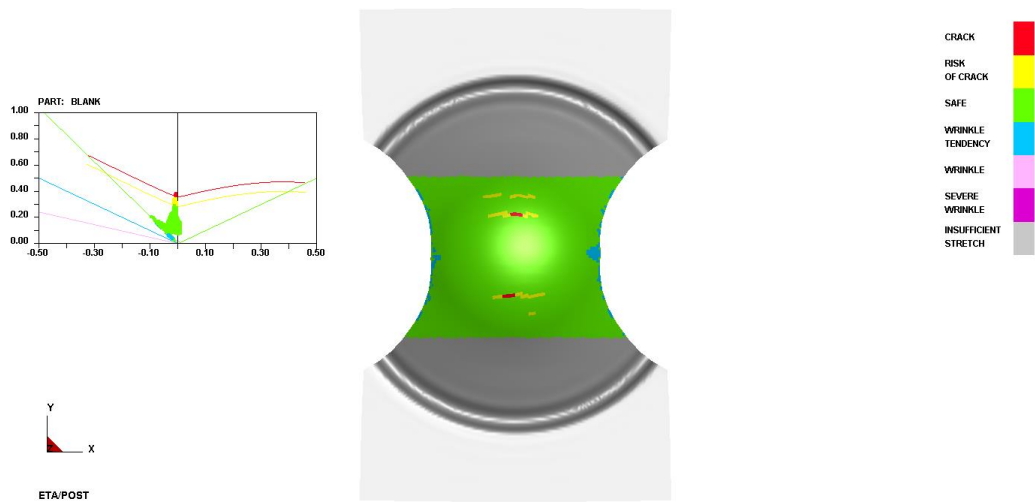
Şekil B.44 50 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yrtılma yüksekliği



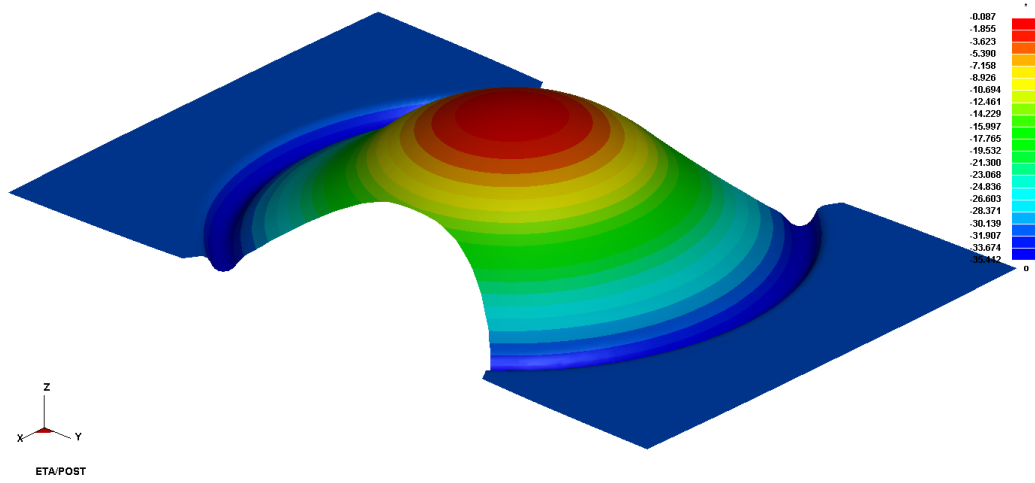
Şekil B.45. 75 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



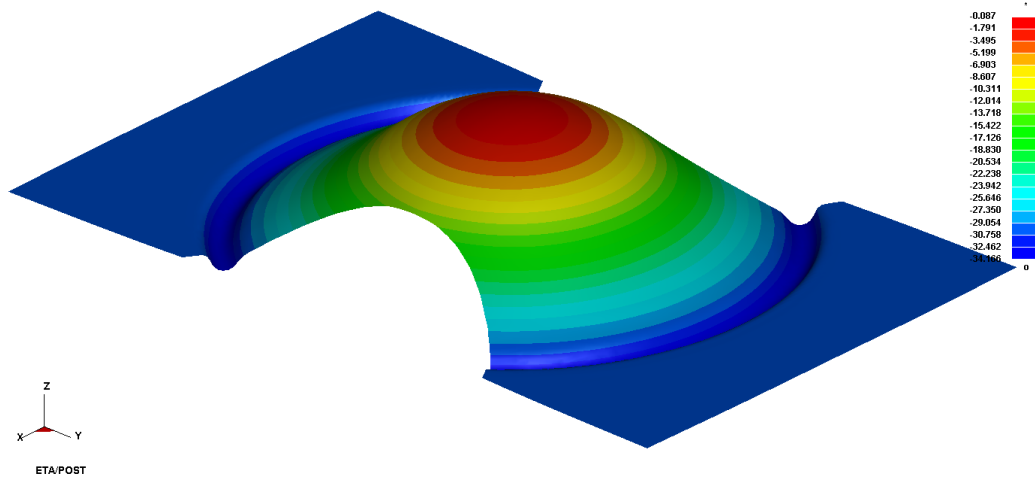
Şekil B.46. 75 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



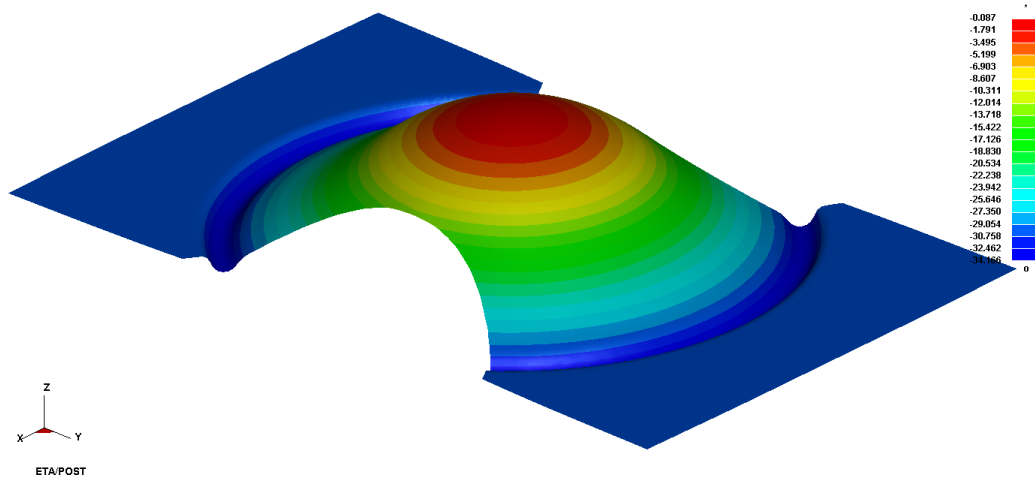
Şekil B.47. 75 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



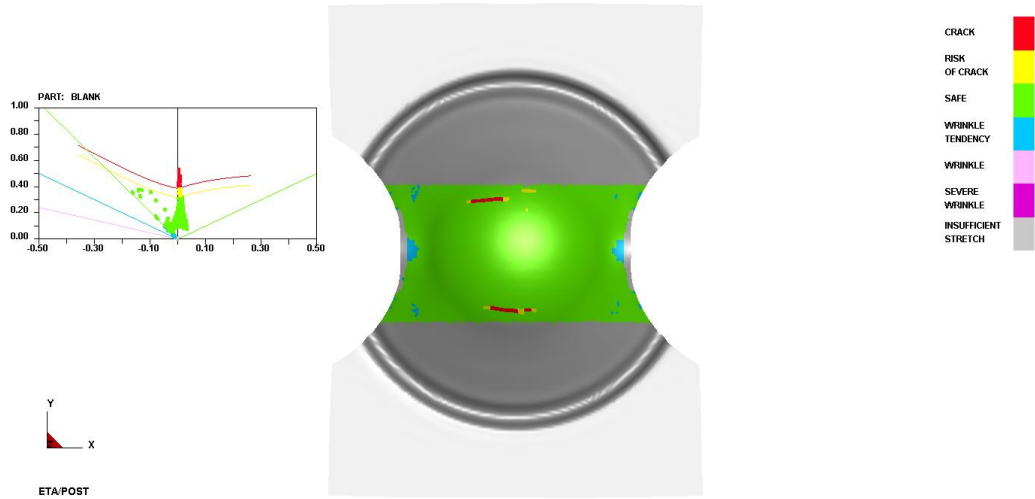
Şekil B.48. 75 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



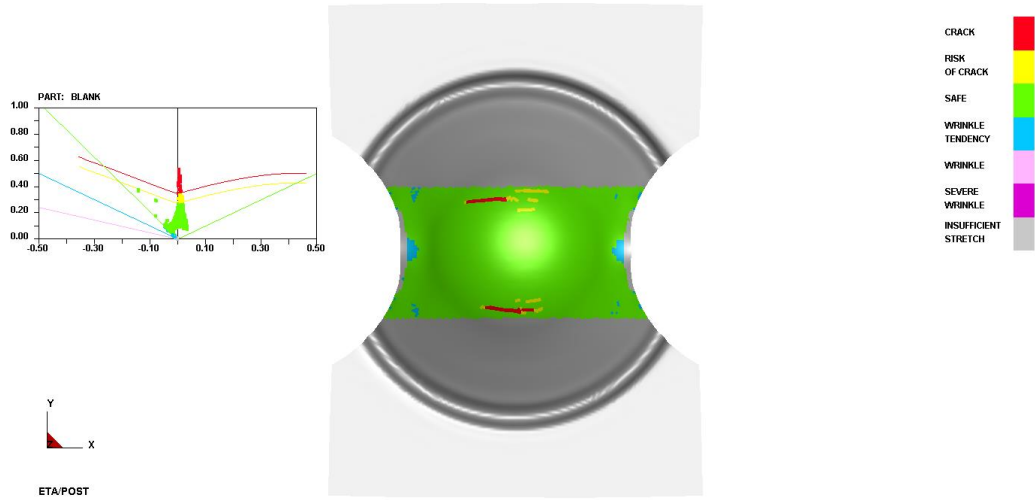
Şekil B.49. 75 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



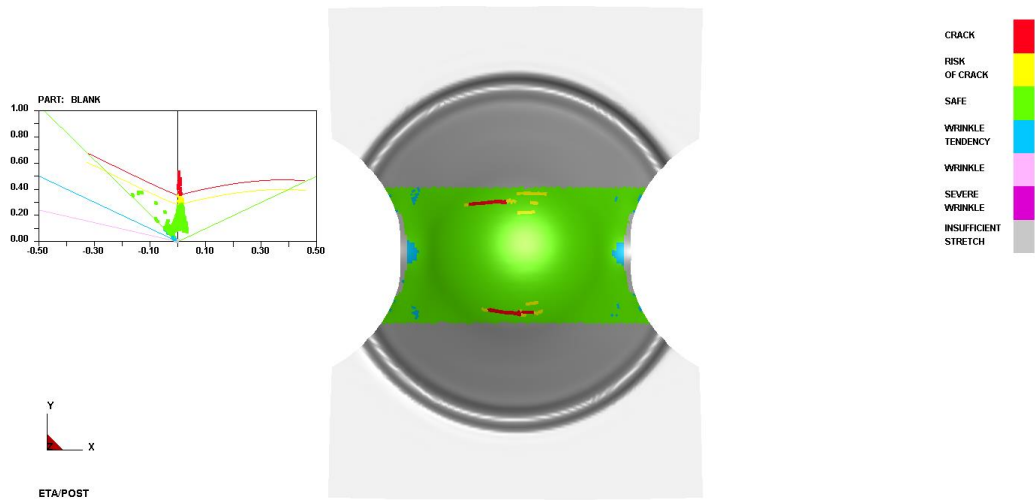
Şekil B.50. 75 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil B.51. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

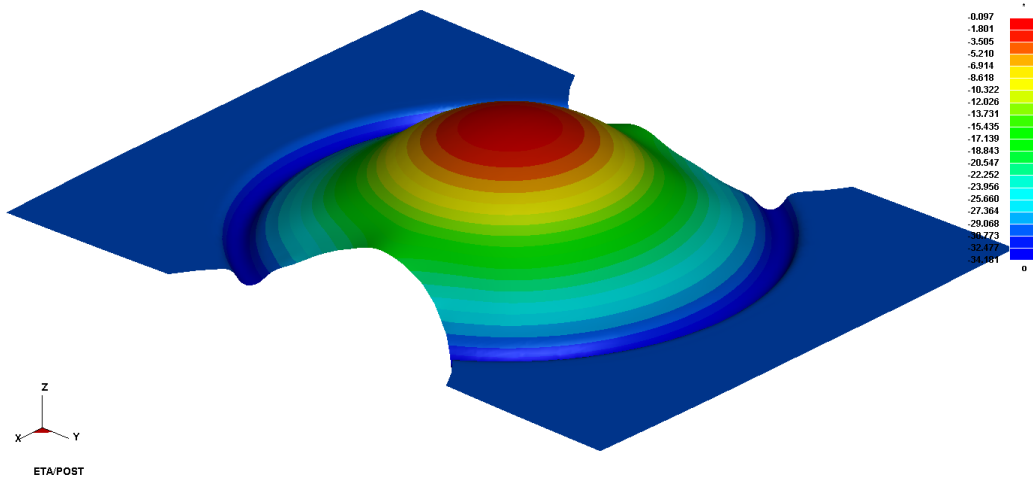


Şekil B.52. 100 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

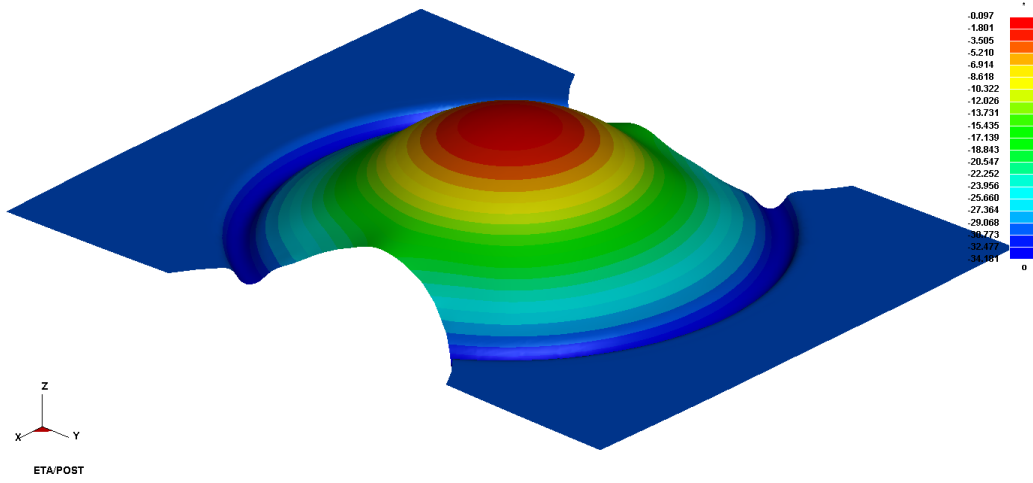


Şekil B.53. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

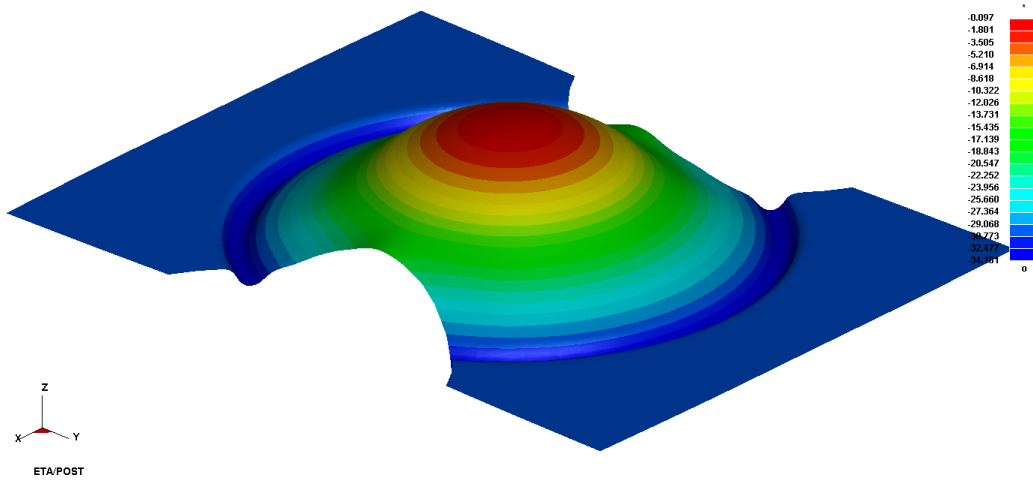




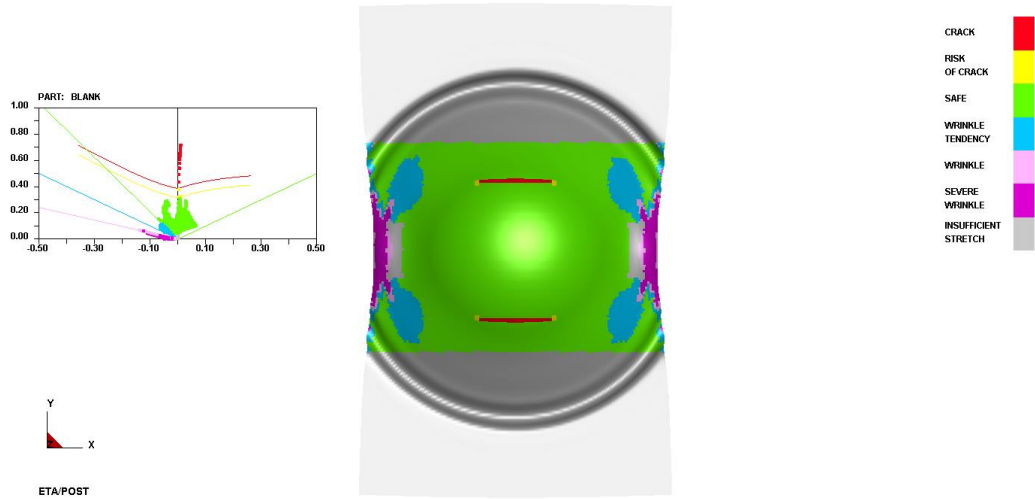
Şekil B.54. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



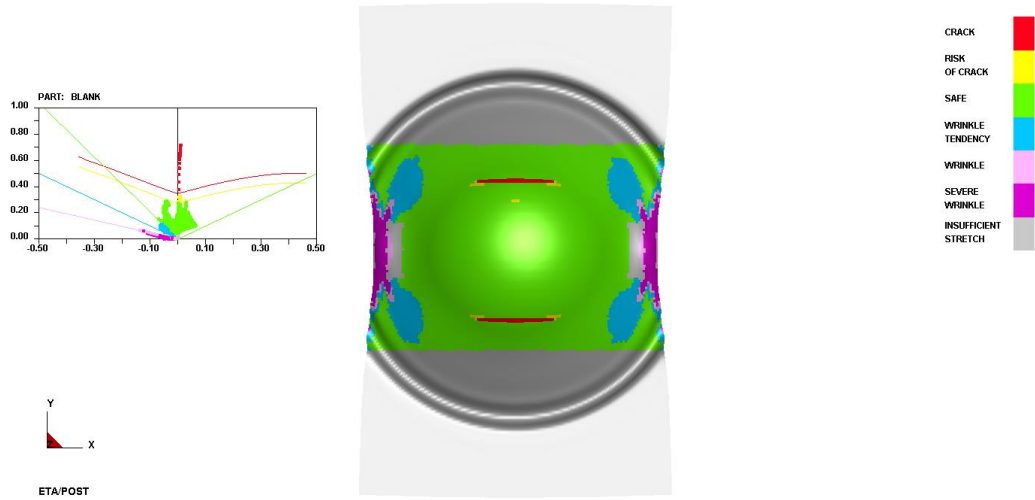
Şekil B.55. 100 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



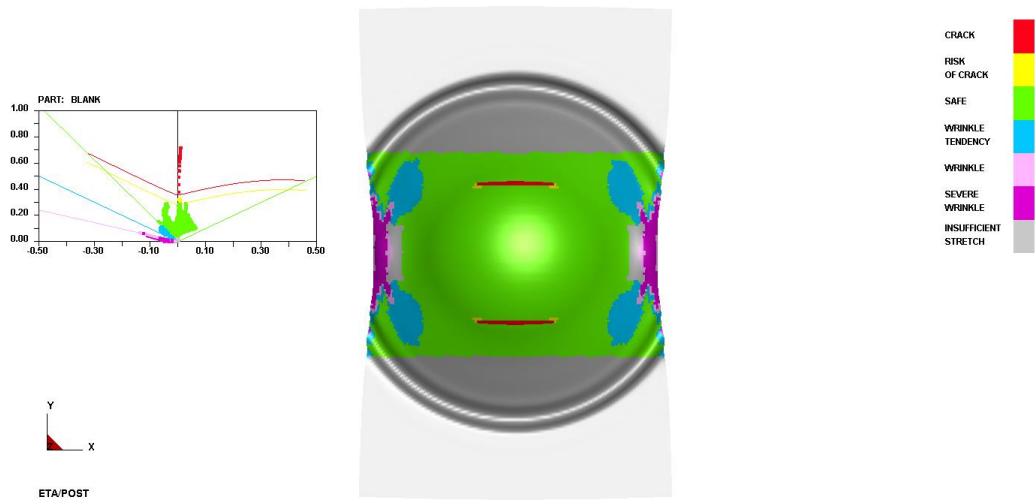
Şekil B.56. 100 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



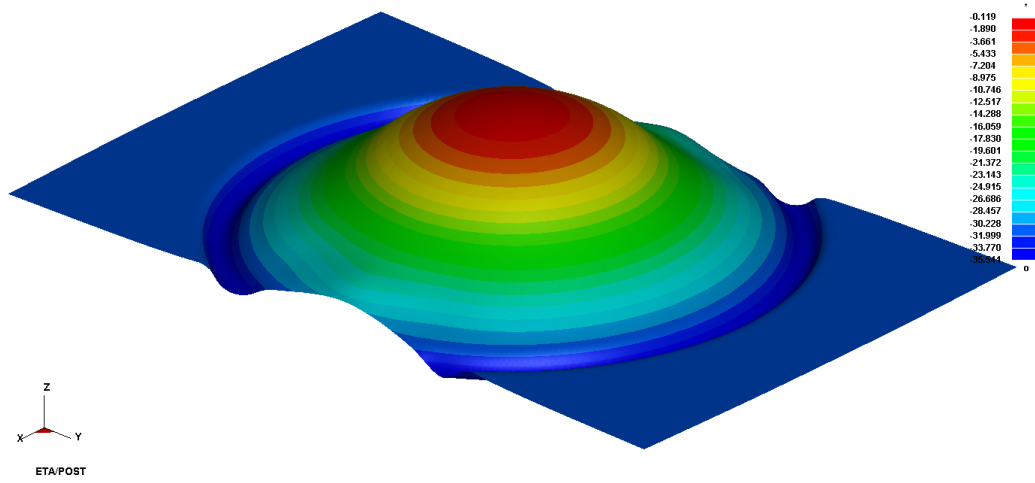
Şekil B.57. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



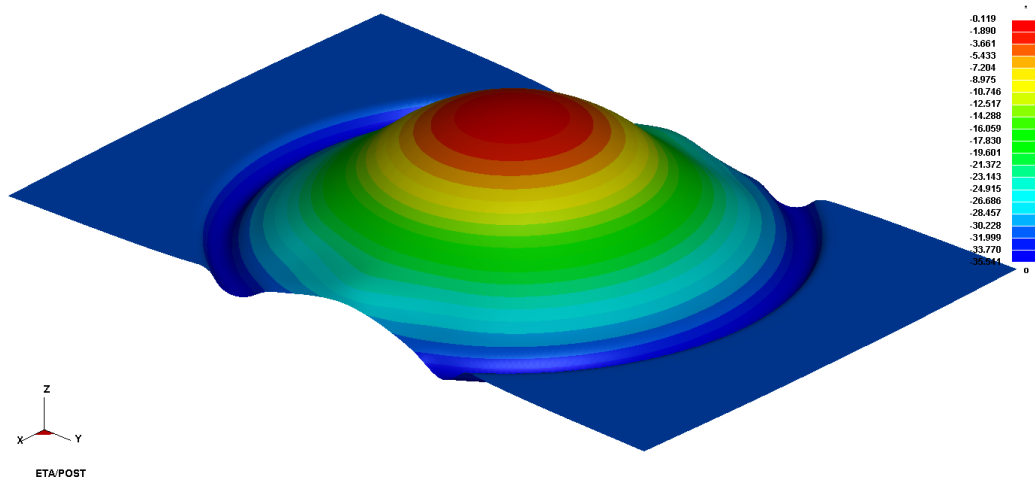
Şekil B.58. 125 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



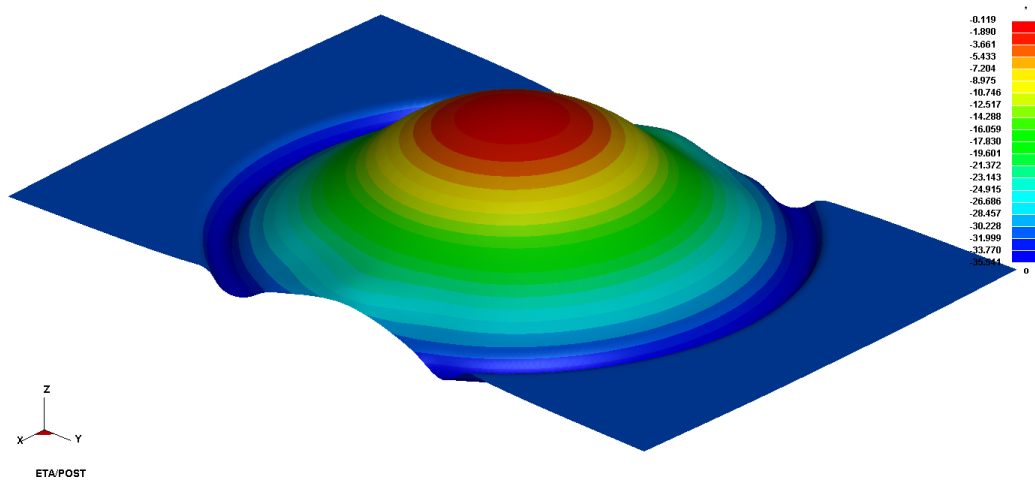
Şekil B.59. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



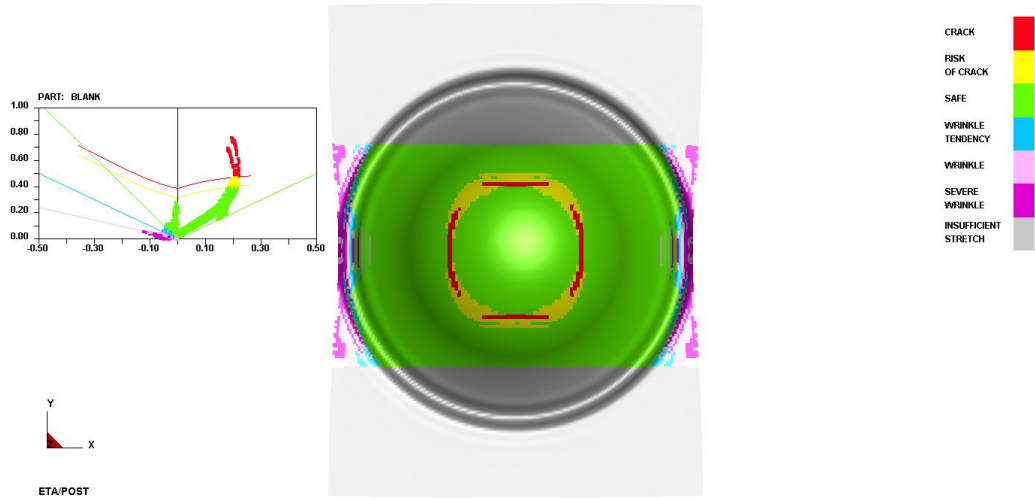
Şekil B.60. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



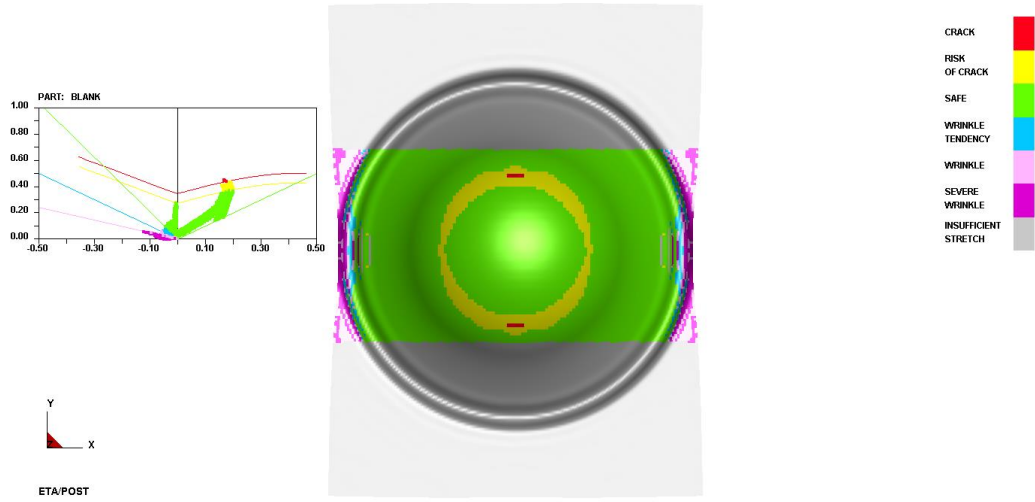
Şekil B.61. 125 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



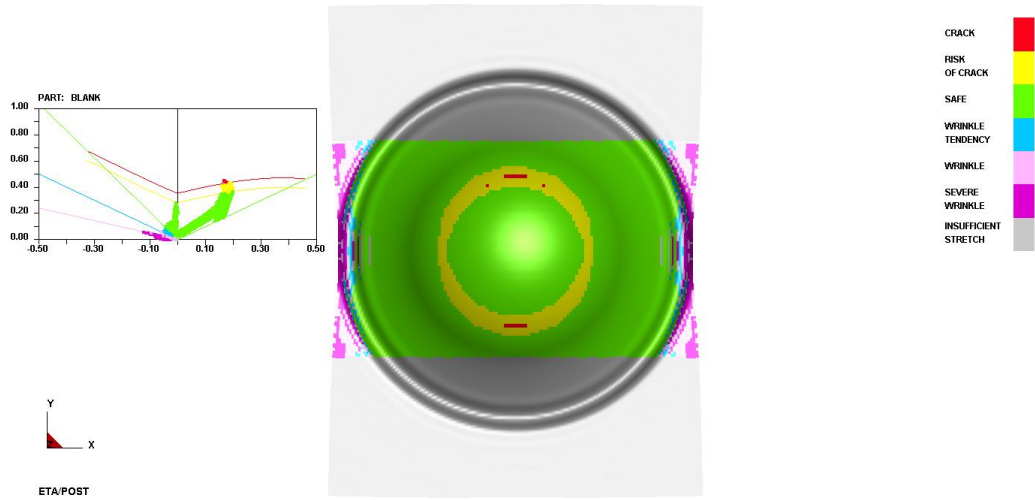
Şekil B.62. 125 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



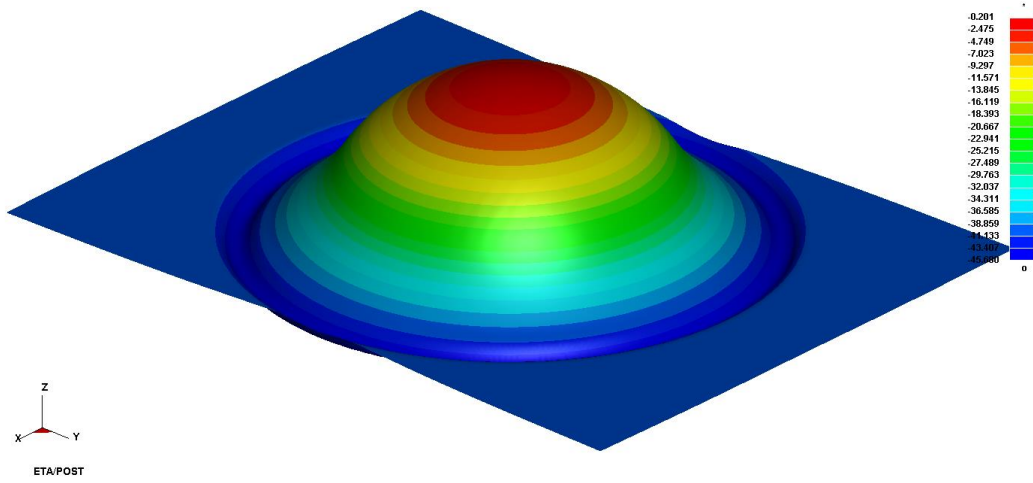
Şekil B.63. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



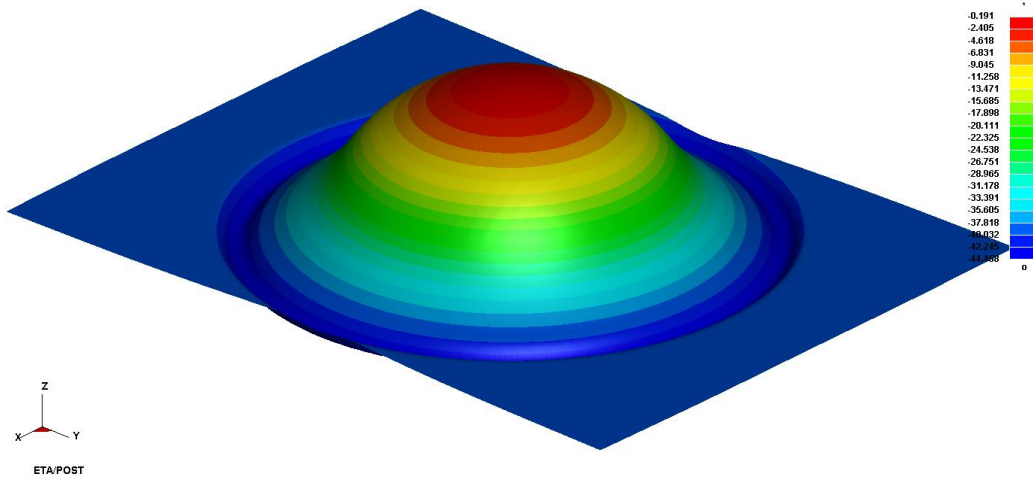
Şekil B.64. 150 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



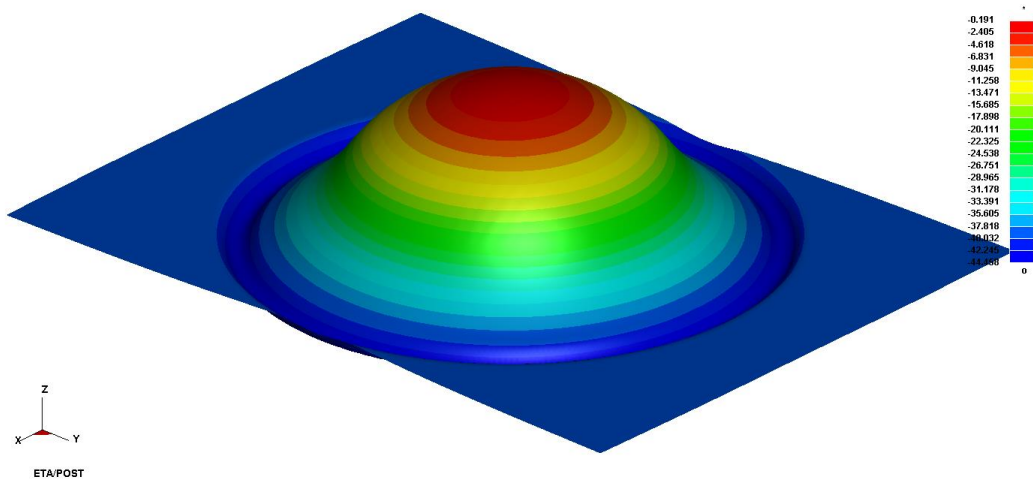
Şekil B.65. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



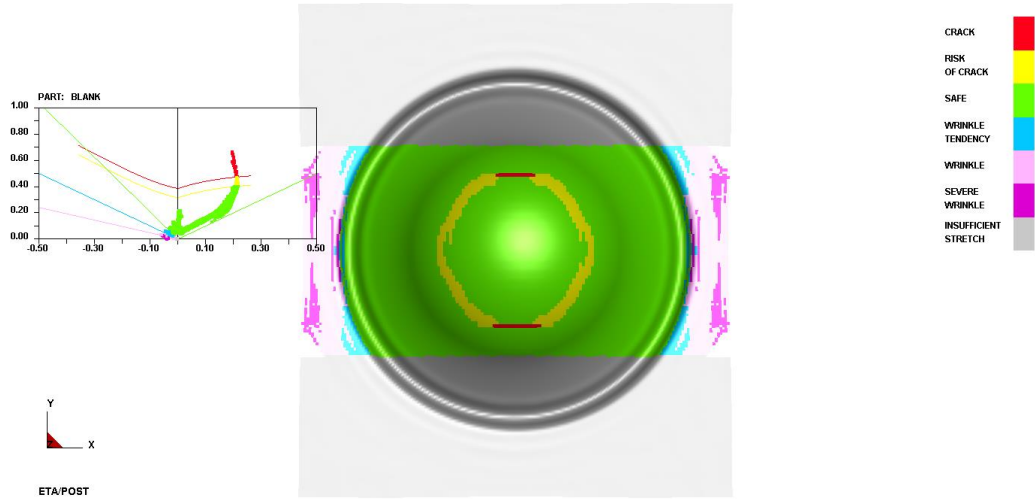
Şekil B.66. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



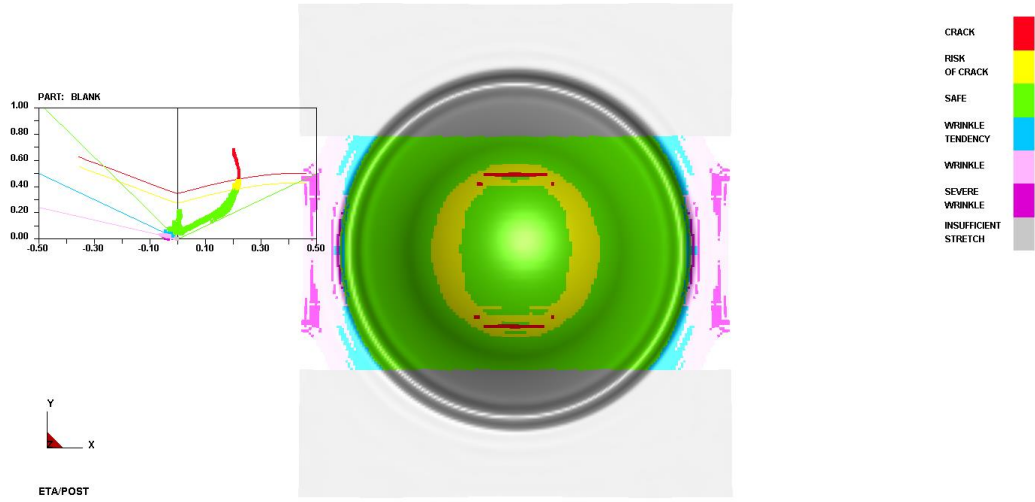
Şekil B.67. 150 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



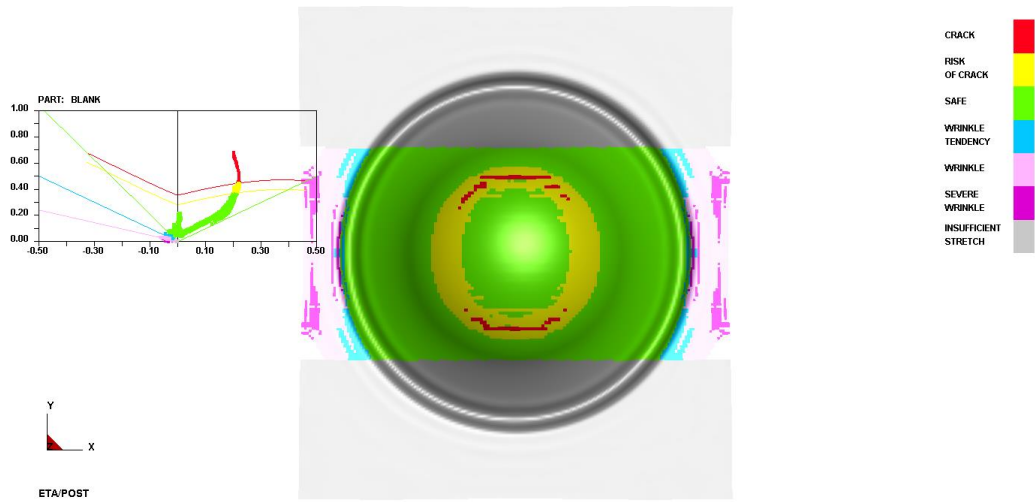
Şekil B.68. 150 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



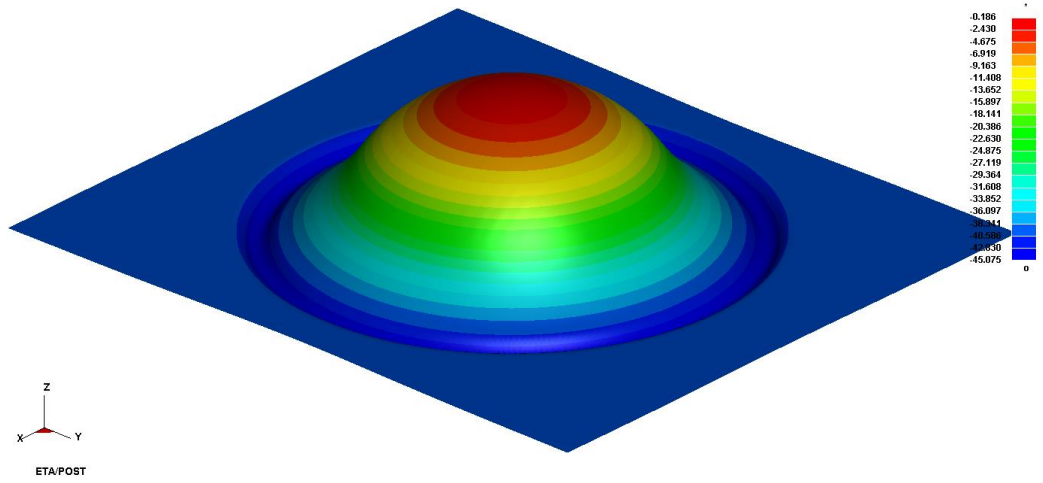
Şekil B.69. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



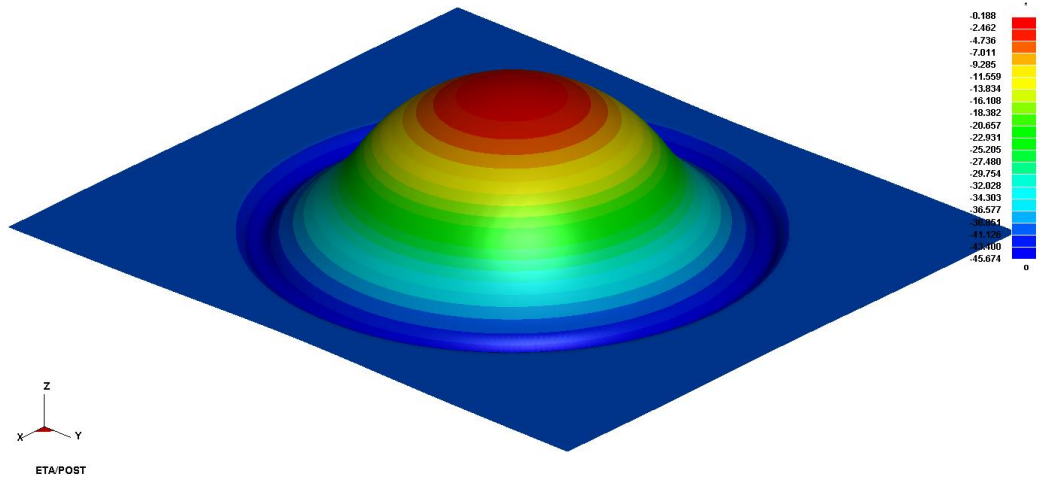
Şekil B.70. 175 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



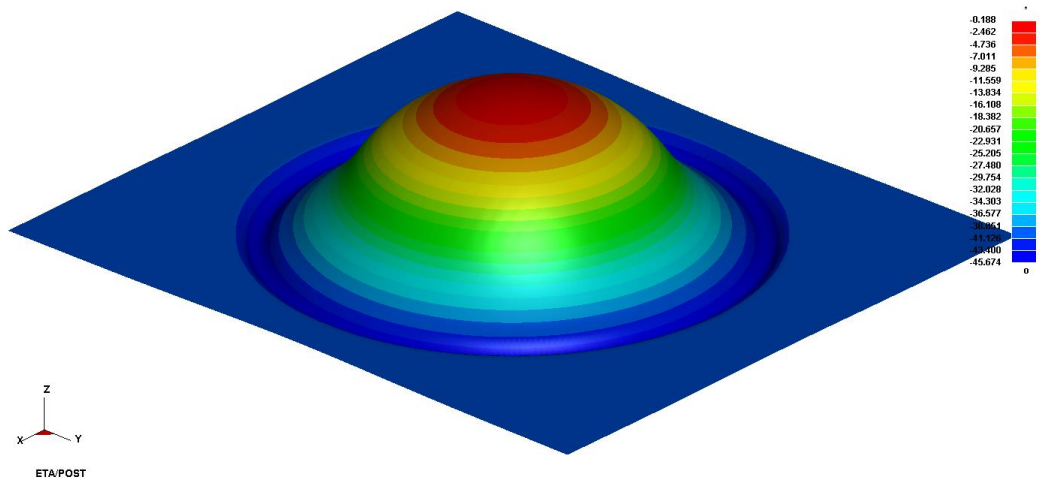
Şekil B.71. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD



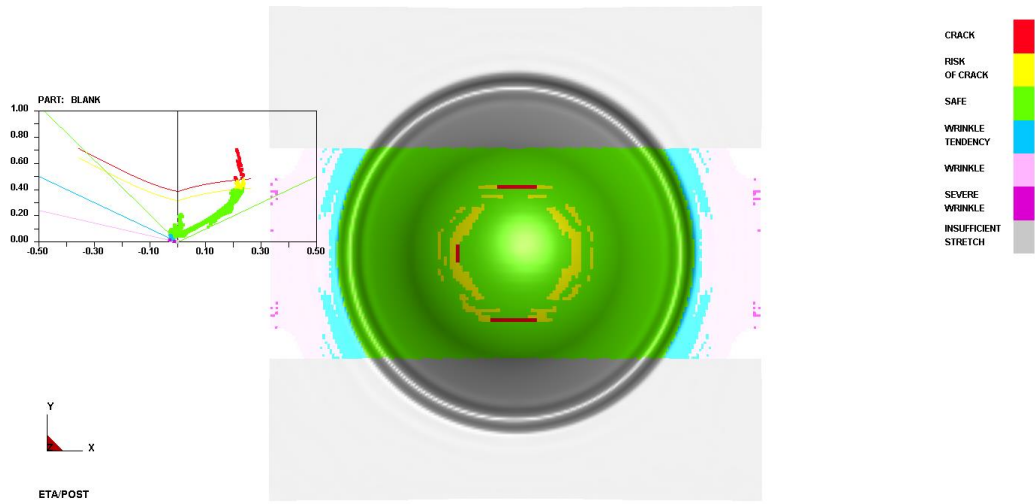
Şekil B.72. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



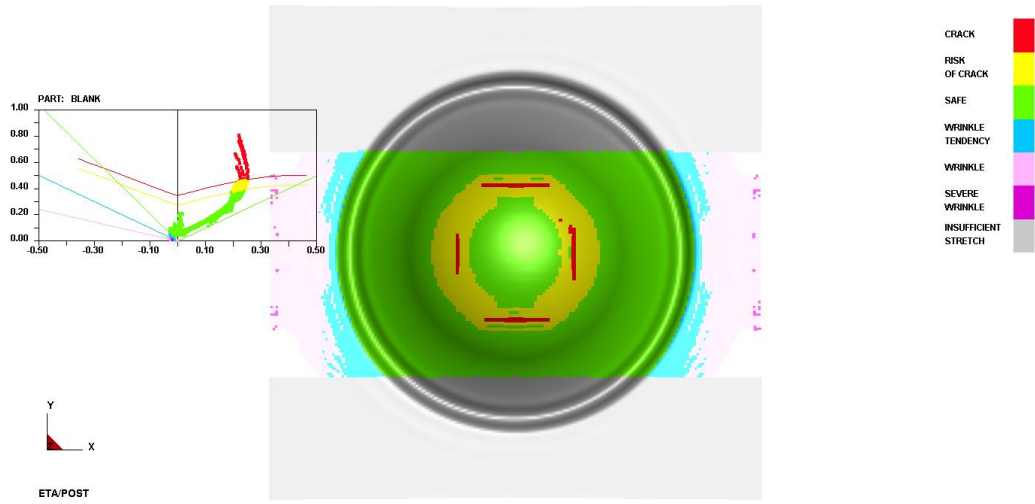
Şekil B.73. 175 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



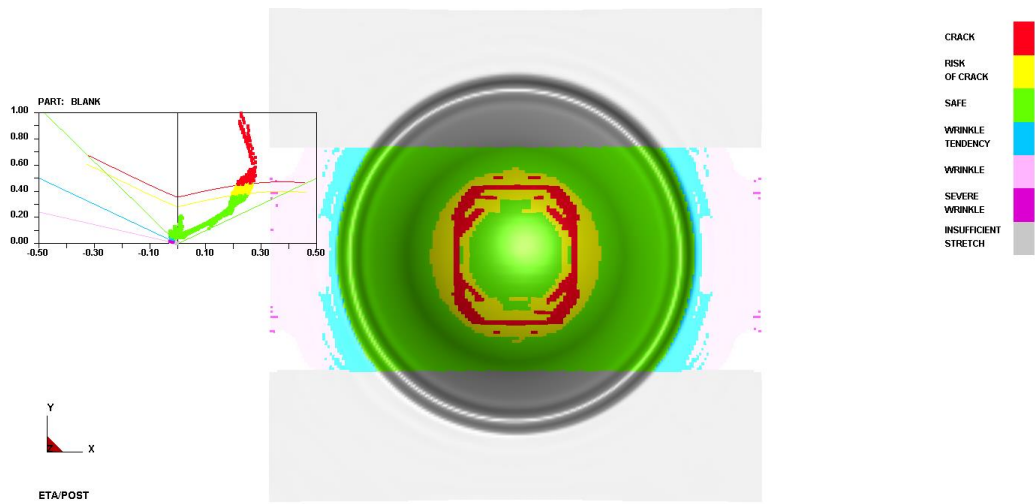
Şekil B.74. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil B.75. 200 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

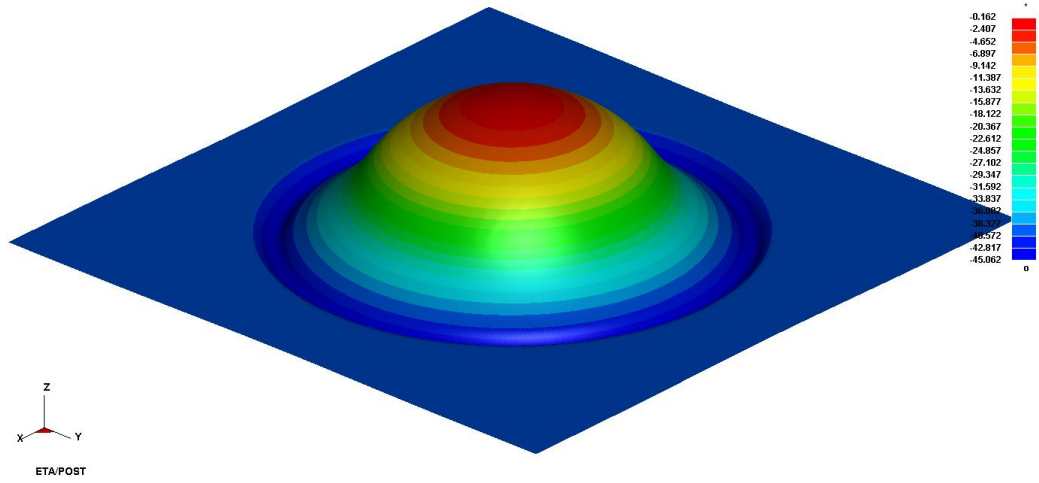


Şekil B.76. 200 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

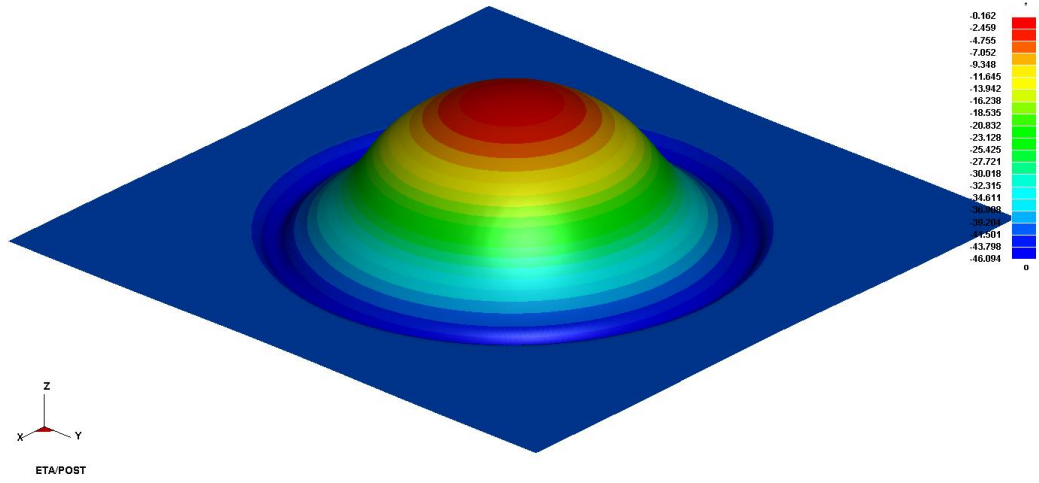


Şekil B.77. 200 mm genişliğindeki numunede Keeler-Brazier sınır eğrisi ile elde edilen ŞSD

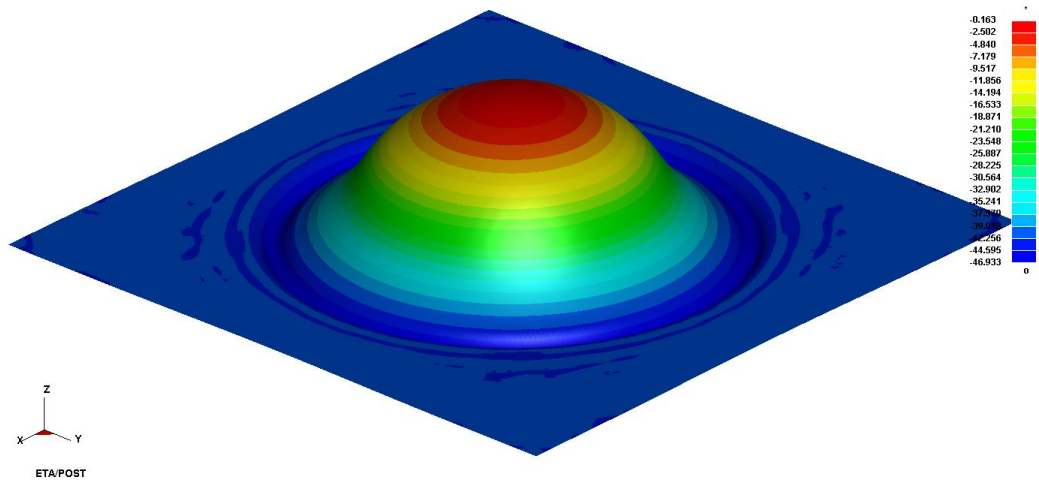




Şekil B.78. 175 mm genişliğindeki numunede Keeler (Ls-Dyna) sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil B.79. 200 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği



Şekil B.80. 200 mm genişliğindeki numunede deneysel sınır eğrisiyle elde edilen yırtılma yüksekliği

## ÖZGEÇMİŞ

Can Kumlu, 09.01.1992'de Kocaeli'nin İzmit ilçesinde doğdu. İlkokul ve ortaokul eğitimini Gölcük Donanma İlköğretim Okulu'nda, lise eğitimini ise Kocaeli Anadolu Lisesi'nde 2010 yılında tamamlayarak mezun oldu. 2010 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği'ni kazanıp, bu bölümden 2015 yılında mezun oldu. Aynı yıl içinde, Anadolu Üniversitesi'nin 2013 yılında girdiği Açıköğretim Fakültesinde İşletme Yönetimi bölümünü bitirdi. 2016 yılının Ocak ayında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği, Makine Tasarım ve İmalat bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmekte ve Anadolu Üniversitesi'nde Uluslararası İlişkiler bölümünde lisans eğitimi almaktadır.