

#### Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25-02-2020

Kabul: 14-08-2020

\*Sorumlu Yazar: Bora Şener

Email: borasen@yildiz.edu.tr

# Genelleştirilmiş Plastik Deformasyon İş Kriterinin Hasar Tahmin Kabiliyeti

*Bu çalışmada genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriterinin hasar tahmin kabiliyeti değerlendirilmiştir. Geliştirilmiş bir yüksek mukavemetli çelik sacın şekillendirme sınırlarını tahmin edebilmek için, kriter sırasıyla tek eksenli çekme ve Nakazima gererek şekillendirme testlerine uygulanmıştır. Öncelikle malzemenin kritik hasar değeri iki farklı durum için hesaplanmış olup, ilk durumda uniform uzama noktasına kadarki enerji değeri, ikinci durumda ise toplam enerji değeri göz önüne alınmıştır. Her iki durum için de tek eksenli çekme ve Nakazima testlerinin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında, tek eksenli çekme testindeki kopma gerinimi ve Nakazima numunelerinin sınır gerinimleri tahmin edilmiş ve tahmin sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, tek eksenli çekme testinde yaygın boyun verme başlangıcı ve kopma geriniminin başarılı bir şekilde tahmin edilebildiğini, ancak Nakazima testinde ise şekillendirme sınır diyagramının (SSD) sol tarafındaki sınır gerinimlerin doğru tahmin edilebilirken, sağ tarafında ise doğru tahmin edilemediğini göstermiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Genelleştirilmiş Plastik Deformasyon İş, Tek Eksenli Çekme Testi, Nakazima Gererek Şekillendirme Testi, Sonlu Eleman Analizi, Sınır Gerinim*

## GİRİŞ

Taşıtların ağırlığını azaltabilmek ve yakıt verimliliği ile birlikte çarpma güvenliğini iyileştirebilmek için otomotiv endüstrisinde geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Genelde, bu çeliklerin şekillendirilebilirliği sünek kırılma ile sınırlıdır. Bu yüzden, sünek kırılmanın tahmini mühendisler için önemli bir görev haline gelmektedir. Literatürde sünek kırılmanın tahmini için önerilen modeller iki gruba ayrılmaktadır: ilk grup malzeme içerisinde boşlukların çekirdeklenmesi ve biraraya gelerek büyümesine dayalıdır. Boşluk büyümesine dayalı modeller ilk olarak McClintock [2], Rice ve Tracey [3] tarafından geliştirilmiştir. Bu modeller, malzemenin silindirik ve küresel şekle sahip boşluklar içerdiğini ve bu boşlukların yük altında büyüyerek birleştiklerini varsaymaktadırlar. Gurson [4] gözenekli bir plastisite modeli önermiş ve modelde malzeme bünyesinde boşluk hacim oranı ( $f_v$ ) olarak ifade edilen bir parametre göz önüne almıştır. Bu modele göre,  $f_v$  kritik bir değere ulaştığında malzemede sünek kırılma meydana gelmektedir. Tvergaard ve Needleman [5]

Gurson modeli üzerinde değişiklik yapmışlar ve yük taşıma kapasitesinin kaybını da göz önüne almışlardır. İkinci grup sünek kırılma modelleri deneysel ya da yarı deneysel kurallara dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu modeller, skaler bir fonksiyonun kritik bir değere ulaştığında malzeme içerisindeki bir noktada hasarın ortaya çıkacağını varsaymaktadırlar. Genel olarak skaler fonksiyon gerilme tensörünün ve efektif plastik gerinimin bileşenlerini içermektedir. Literatürde konu ile ilgili farklı hasar fonksiyonları önerilmiştir. Cockroft ve Latham [6] çekme gerilmesi ve plastik gerinim artımına dayalı bir fonksiyon tanımlamışlardır. Brozzo ve arkadaşları [7] Cockroft ve Latham kriteri üzerinde değişiklik yapmışlar ve hidrostatik gerilme etkisini de göz önüne almışlardır. Clift ve arkadaşları [8], Cockroft ve Latham kriterinden farklı bir model önermişler ve çekme gerilmesi yerine efektif gerilmeyi göz önüne almışlardır. Oyane ve arkadaşları [9], Atkins ve arkadaşları [10] yola bağlı hasar fonksiyonları önermişler ve hidrostatik gerilme ile birlikte anlık gerinim oranı da dahil etmişlerdir.

Bu çalışmada, deneysel modellerden geliştirilmiş plastik deformasyon iş kriterinin hasar tahmin kabiliyeti incelenmiş ve DP600 sacı test malzemesi olarak seçilmiştir. Makale altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, geliştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri kısaca anlatılmış, üçüncü bölümde kriterin uygulaması ve sonuçlar detaylı olarak açıklanmış ve son bölümde ise ana sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır.

## GENELLEŞTİRİLMİŞ PLASTİK DEFORMASYON İŞ KRİTERİ

Genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri, gerinim enerjisine dayalı bir sünek kırılma kriteridir. Kritere göre, malzeme içerisindeki gerinim enerjisi kritik bir değere ulaştığı anda, malzemede hasar başlamaktadır. Kriter aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir:

$$\int_0^{\varepsilon_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C \quad (1)$$

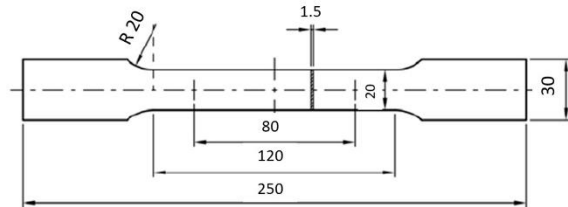
$\bar{\sigma}$  efektif gerilmeyi,  $\bar{\varepsilon}$  efektif gerinimi ve  $\bar{\varepsilon}_f$  ise kopma gerinimini ifade etmektedir.  $C$  kritik hasar parametresi olarak ifade edilmektedir ve değeri gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisi altında kalan alana eşittir.

## UYGULAMA

Genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri ilk olarak tek eksenli çekme testine, ardından Nakazima testine uygulanmıştır. Her iki test için kriterden tahmin edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

### Tek Eksenli Çekme Testinde Boyun Verme ve Kopmanın Tahmini

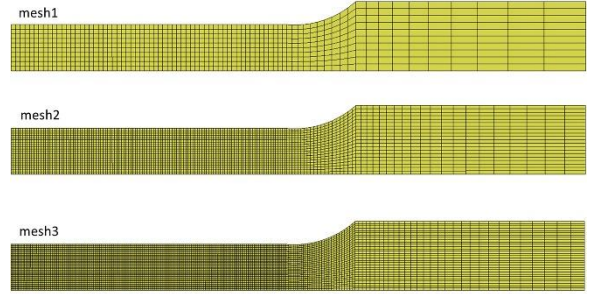
Çalışmada, köpek kemiği olarak adlandırılan geometriye sahip çekme testi numunesi göz önüne alınmıştır. Numune geometrisi Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çekme testi numune geometrisi [11]

Çekme testi numunesinin sonlu eleman modeli Marc programında oluşturulmuştur. Geometrideki simetri nedeniyle numunenin sadece dörtte biri modellenmiştir. Deney koşullarının benzetimini tam

olarak yapabilmek için sonlu eleman modelinde 8 düğümlü full integrasyon eleman formulasyonuna sahip katı elemanlar kullanılmıştır. Simetri sınır koşulları iki eksen boyunca tanımlanmış ve numunenin serbest ucuna üniform deplasman uygulanmıştır. Hasar gerinimi üzerinde eleman boyutunun etkisini inceleyebilmek için, farklı eleman boyutlarında üç sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Numunenin ölçüm boyu daha küçük elemanlarla modellenmiştir. Çekme numunesinin sonlu eleman modelleri Şekil 2'de ve buna karşı gelen eleman boyutları ise Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 2. Farklı eleman boyutlarına sahip sonlu eleman modelleri

Tablo 1. Sonlu eleman model bilgisi ve eleman boyutları

Sonlu eleman modeli	Mesh1	Mesh2	Mesh3
Eleman boyutu	1x1x0.75	0.5x0.5x0.375	0.33x0.33x0.25
Kalınlık boyunca eleman sayısı	2	4	6
Toplam eleman sayısı	1600	12800	43200

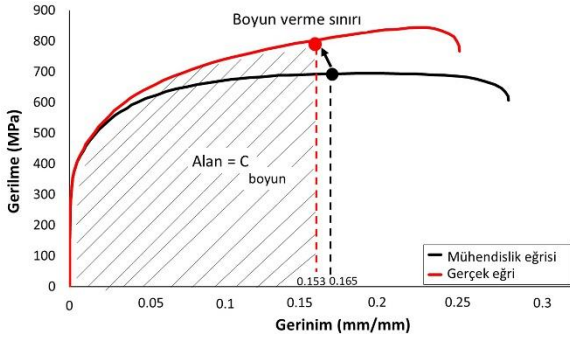
Analizlerde J2 plastisite modeli kullanılmıştır. Üniform plastik deformasyon bölgesinde gerçek gerilme-plastik gerinim eğrisi Swift denklemi ile tanımlanmıştır ve deneysel dataya en iyi uyan Swift parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Swift parametreleri

Malzeme	$\varepsilon_0$	K(MPa)	n
DP600	0.003	1243	0.2157

Çalışmada üniform uzama noktasına kadarki gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisi altında kalan alan yaygın boyun verme için kritik hasar parametresi olarak tanımlanmıştır. İlk olarak, mühendislik

gerilme-gerinim eğrisinden maksimum yükteki mühendislik gerinim değeri belirlenmiş, ardından gerçek gerilme-gerinim eşitlikleri kullanılarak bu noktaya karşı gelen gerçek gerinim değeri tespit edilmiştir (boyun verme noktası). Boyun verme noktasının belirlenmesinin ardından, trapez kurallı kullanılarak bu noktaya kadar olan alan değeri hesaplanmış ve yaygın boyun verme için kritik hasar parametresi belirlenmiştir ( $C_{boyun} = 102.724$ ). Boyun verme noktası ve hesaplanan alan Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Boyun verme noktası ve hesaplanan alan

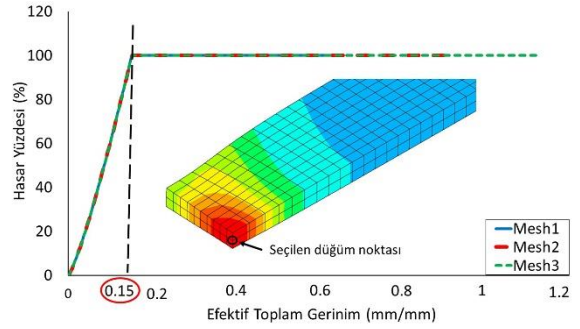
Boyun verme noktasının tanımlanmasının ardından genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriteri Marc sonlu eleman programına kullanıcı tanımlı alt program aracılığıyla uygulanmış ve her bir model için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yaygın boyun vermenin başladığı andaki sınır gerinim değerini belirleyebilmek için, analiz sonrası numunenin boyun vermiş bölgesi üzerinde bir düğüm noktası seçilmiş ve seçilen düğüm noktasında hasar yüzdesine karşı efektif toplam gerinim verileri alınmıştır. Kullanıcı tanımlı alt program aracılığıyla her bir eleman için hasar yüzdesi eşitlik 2’ye göre hesaplanmıştır.

$$\%Hasar = (Plastikiş / Kritikhasarparametresi) \times 100 \quad (2)$$

Her bir modelden belirlenen hasar yüzdesi-efektif toplam gerinim grafikleri ve yaygın boyun verme gerinim değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Tablo 3’de verilmektedir.

Şekil 4 ve Tablo 3 de görüldüğü gibi hasar yüzdesi - toplam gerinim grafikleri ve yaygın boyun verme noktasında hesaplanan gerçek gerinim değerleri üç model için de birbirine oldukça yakındır. Bu yüzden, çalışmada mesh1 optimum eleman boyutu olarak göz önüne alınmıştır. Hasar kriterinin tahmin kabiliyetini değerlendirebilmek için, optimum eleman boyutunda hesaplanan yaygın boyun verme anındaki gerçek gerinim değeri deney değeri ile karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Tablo 4’de sunulmaktadır.



Şekil 4. Hasar yüzdesi-efektif toplam gerinim grafikleri

Tablo 3. Yaygın boyun verme anında hesaplanan gerçek gerinim değerleri

Model	Mesh1	Mesh2	Mesh3
Gerçek gerinim	0.153	0.153	0.153

Tablo 4. Yaygın boyun verme anında deneysel ve tahmini gerçek gerinim değerleri

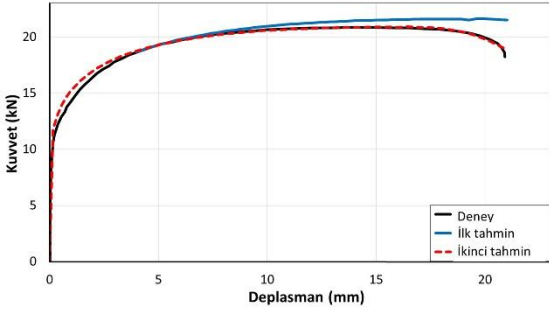
Deneysel ( $\epsilon_{boyun}$ )	Tahmini ( $\epsilon_{boyun}$ )	Hata (%)
0.15272	0.15305	0.216

Yaygın boyun verme noktasının tanımlanmasından sonra, çalışmada kopma gerinimi tahmin edilmiştir. Kopma gerinimini hassas bir şekilde tahmin edebilmek için, gerçek gerilme-plastik gerinim eğrisinin boyun verme sonrasındaki kısmının düzeltilmesi gerekmektedir. Çünkü, boyun verme noktasından sonra numunede üç eksenli bir gerilme hali ortaya çıkmaktadır ve numunenin ölçüm uzunluğu boyunca üniform olmayan bir gerinim dağılımı meydana gelmektedir [12-13].

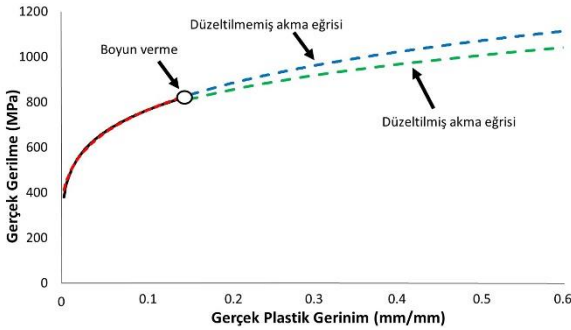
Bu çalışmada, boyun verme sonrasında akma eğrisinin tanımlanmasında tersinir metod uygulanmıştır. Ardışık sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve gerçek gerilme-plastik gerinim eğrisinin boyun verme sonrasındaki kısmı deneysel ve tahmini kuvvet-deplasman eğrileri arasındaki farka göre ayarlanmıştır. Metotta, tahmini ve deneysel eğrilerin boyun verme noktasından kopmaya kadar olan uzunlukları dördüncü-derece polinom fonksiyonlarıyla tanımlanmış ve kuvvet-deplasman eğrileri arasındaki farka göre gerçek gerilme-gerinim eğrisinin boyun verme sonrasındaki kısmı düzeltilmiştir. Bu prosedür deney ve tahmin arasında tatmin edici bir uyum sağlanana kadar sürdürülmüştür. Ardışık iki sonlu eleman analizi sonrasında, tahmini ve deneysel kuvvet-deplasman eğrileri arasında iyi bir uyum elde edilmiş ve gerçek gerilme-gerinim

eğrisinin boyun verme sonrasındaki bölümü düzeltilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6).

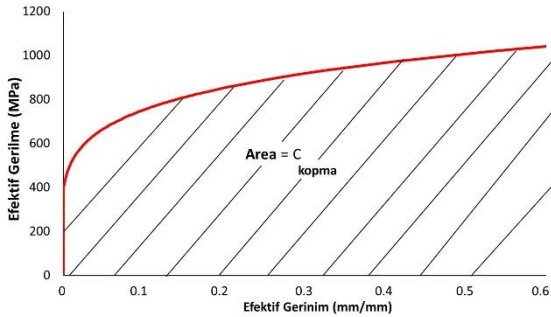
Akma eğrisinin düzeltilmesinden sonra, kopma gerinim değerine kadarki gerçek gerilme-gerçek gerinim eğrisinin altında kalan alan hesaplanmış ve kopma için kritik hasar parametresi belirlenmiştir ( $C_{kopma} = 539.476$ ) (Şekil 7). Kritik hasar parametresinin belirlenmesinin ardından, düzeltilmiş akma eğrisi ile sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve kopma gerinimi tahmin edilmiştir.



Şekil 5. Deneysel ve tahmini kuvvet-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması

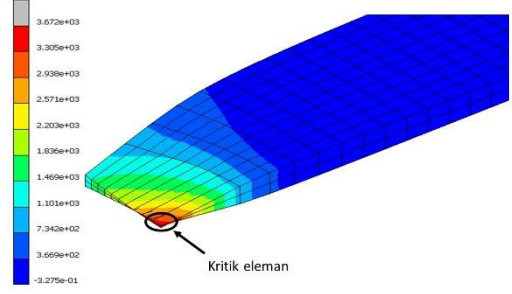


Şekil 6. Düzeltilmemiş ve düzeltilmiş akma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 7. Kopma için kritik hasar parametresinin belirlendiği alan

Analiz sonrasında, numunede hesaplanan toplam hasar dağılımı, nümerik ve deneysel kopma gerinim değerlerinin karşılaştırılması sırasında Şekil 8 ve Tablo 5'de verilmektedir.



Şekil 8. Numunedeki toplam hasar dağılımı

Tablo 5. Deneysel ve tahmini kopma gerinim değerleri

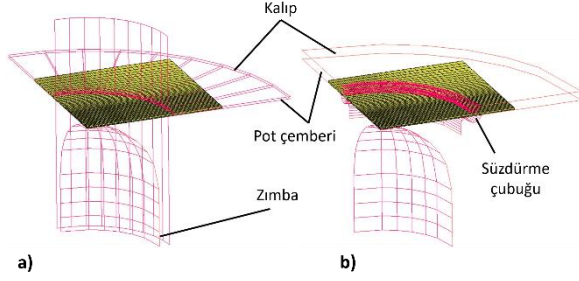
Deneysel ( $\epsilon_{kopma}$ )	Tahmini ( $\epsilon_{kopma}$ )	Hata (%)
0.2263	0.22570	0.283

Tablo 4 ve 5'deki sonuçlar, kriterin tek eksenli çekme testinde hem yaygın boyun verme hem de kopma noktalarını başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir.

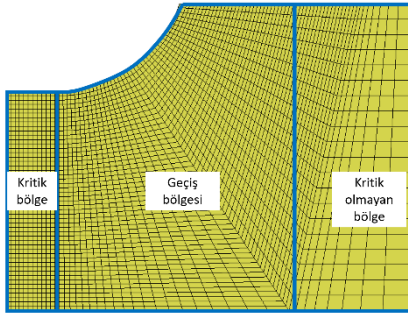
#### Nakazima Testinde Boyun Verme ve Kopmanın Tahmini

Önceden belirtildiği gibi, çalışmada ikinci uygulama olarak Nakazima testi seçilmiştir. Nakazima testinin deney verisi Lian tarafından RWTH Aachen Üniversitesinde gerçekleştirilmiş olan "A generalized hybrid damage mechanics model for steel sheets and heavy plates" başlıklı doktora tezinden alınmıştır [11]. Testler DIN EN ISO 12004-2 standardına göre gerçekleştirilmiş ve tek eksenli çekmeden iki eksenli germeye kadar olan tüm gerinim yollarını oluşturabilmek için 190 mm uzunluğunda olmak üzere 20, 40, 80, 90, 100, 130, 140, 150, 160 ve 190 genişliklerinde toplam 10 numune kullanılmıştır. Numuneler 2 mm ölçülerinde kare gridler ile markalanmıştır. Deneylerde 200 kN değerinde pot çemberi kuvveti uygulanmış ve test sırasında yağlayıcı olarak gres kullanılmıştır. Ölçme yöntemlerinden optik ölçüm sistemi kullanılmış olup, numune üzerindeki major ve minor gerinimler görsel ve pozisyon tabanlı metotlarla ölçülmüştür. Görsel metotta, boyun verme öncesindeki son görüntü dikkate alınırken, pozisyon tabanlı metotta ise yırtılma görünür hale geldiğinde son resimdeki yırtık yörüngesi dikkate alınmaktadır [11]. Bu çalışmada nümerik hesaplamalar, süzdürme çubuğunun olduğu ve olmadığı durum olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Model simetrik olduğu için, çözüm süresini kısaltmak amacıyla modelin sadece çeyrek bölümü oluşturulmuştur. Kalıp, pot çemberi ve zımba rijit yüzeyler olarak modellenmiştir. Nümerik çözümlerde düğüm-segman temas algoritması kullanılmıştır. Temas eden parçalar arasındaki sürtünme katsayıları Lian'ın doktora tezinden

alınmıştır [11]. Dörtte bir model hazırlandığı için sonlu elemanlar analizlerinde pot çemberi kuvveti 50 kN olarak uygulanmıştır. Sac malzemenin ağ yapısı, hasarın beklendiği tehlikeli bölge, geçiş bölgesi ve güvenli bölge olmak üzere üç bölgeye bölünmüştür. Hasarın beklendiği tehlikeli bölgenin ağ yapısı daha yoğun tutulmuş olup eleman boyutu 1 mm olarak alınmıştır. Sac malzemenin ağ yapısı tamamen katı elemanlardan oluşturulmuştur. Süzdürme çubuğu kullanılarak ve kullanılmadan oluşturulmuş sonlu eleman modelleri Şekil 9'da, sac malzemenin ağ yapısı ise Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Nakajima testlerinin sonlu eleman modelleri.  
a) Süzdürme çubuğu kullanılmadan b) süzdürme çubuğu mevcut iken



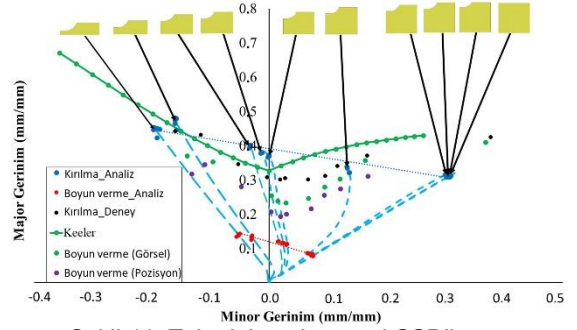
Şekil 10. Sac malzemenin ağ yapısı

Bütün Nakajima test numuneleri için sonlu elemanlar çözümleri gerçekleştirilmiş ve bütün numunelerin gerinim yolları elde edilmiştir. Boyun verme ve kırılma durumlarına göre şekillendirme sınır eğrileri iki model için de tahmin edilmiştir. Tahmin edilen eğriler, literatürdeki deneysel sonuçlarla ve analitik olarak Keeler eğrisiyle karşılaştırılmıştır (Şekil 11). Keeler modeline göre şekillendirme sınır gerinimleri Eşitlik 3, 4 ve 5'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\varepsilon_0 = \ln \left[ (23.3 + 14.13t) \frac{n}{0.21} \right] \quad (3)$$

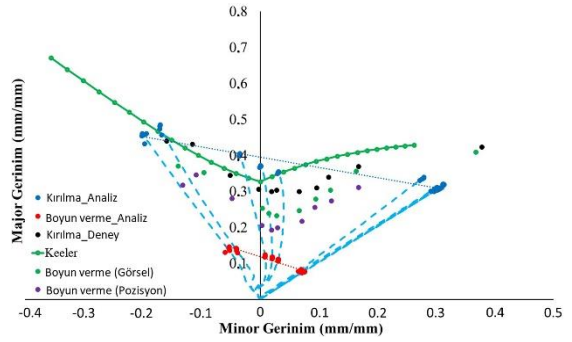
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 (0.027254\varepsilon_2 - 1.1965), (\varepsilon_2 < 0) \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 * (-0.008565\varepsilon_2 + 0.784854), (\varepsilon_2 > 0) \quad (5)$$



Şekil 11. Tahmini ve deneysel ŞSD'larının karşılaştırılması (Süzdürme çubuğu kullanılmayan model)

Şekil 11'de görüldüğü gibi, genişliği az olan numunelerden tahmin edilen sınır gerinimler, deneysel ve analitik sınır gerinim değerlerine yakın sonuçlar verirken, ŞSD'nin sağ tarafında tahmin edilen sınır gerinim değerleri, deneysel ve analitik değerlerin altında kalmıştır. Süzdürme çubuğu kullanılarak gerçekleştirilen nümerik çözümlerde de benzer sonuçlar elde edilmiş olup, sonuçlar Şekil 12'de gösterilmektedir.



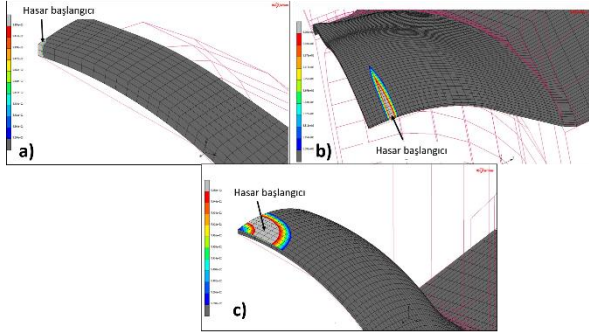
Şekil 12. Tahmini ve deneysel ŞSD'larının karşılaştırılması (süzdürme çubuğunun kullanıldığı model)

Numunelerde, hasarın meydana geldiği bölgeler incelenmiş olup, tek eksenli çekme, iki eksenli çekme ve dengelenmiş iki eksenli çekme şartları altında hasarın meydana geldiği bölgeler Şekil 13'de gösterilmiştir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, genelleştirilmiş plastik deformasyon iş kriterinin hasar tahmin kabiliyeti incelenmiştir. Kriter Marc programına bir alt program kullanılarak dahil edilmiştir. İlk olarak tek eksenli çekme testinde, yaygın boyun verme ve kopma gerinimleri için kritik hasar parametreleri belirlenmiş, ardından her iki durum için elde edilen hasar parametreleri kullanılarak, tek eksenli çekme testinde yaygın boyun verme ve kopma gerinim değerleri başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Çalışmada ikinci uygulama olarak Nakajima testi seçilmiş ve

gerçekleştirilen simülasyonlar sonrasında plastik deformasyon iş kriteri ŞSD'nin sol tarafında sınır gerinim değerlerini başarılı bir şekilde tahmin edebilirken, diyagramın sağ tarafında ise isabetli sonuçlar elde edememiştir. Bu sonuçlardan, kritik hasar parametresinin gerinim yoluna bağlı olduğu ortaya çıkmış, ayrıca süzdürme çubuğu kullanılarak ve kullanılmadan elde edilen ŞSD'lerde önemli bir farklılık olmadığı görülmüştür.



Şekil. 13. Numunelerde, şekillendirme işlemi sonrası hasar dağılımları a) Tek eksenli çekme, b) İki eksenli çekme, c) Dengelenmiş iki eksenli çekme

## FAILURE PREDICTION CAPABILITY OF GENERALIZED PLASTIC DEFORMATION WORK CRITERION

In this study, failure prediction capability of the generalized plastic deformation work criterion was evaluated. Criterion was applied to the uniaxial tensile and Nakajima stretch forming tests to predict the forming limits of an advanced high strength steel sheet. Firstly, critical damage value of the material was calculated for two different cases. Energy value till uniform elongation range was considered for in the first case, while total energy value was considered in the second case. Finite element simulations of the uniaxial tensile and Nakajima stretch forming tests were performed for both cases. The fracture strain in the uniaxial tensile test and limit strains of each Nakajima sample were predicted and the predicted results were compared with the experimental results. Comparisons showed that the onset of the diffuse necking and the fracture strain were predicted successfully in the uniaxial tensile test. However, it was observed from Nakajima tests that limit strains at the left side of the forming limit diagram (FLD) were predicted successfully by the criterion, while they weren't accurately predicted at the right side of the FLD.

**Keywords:** Generalized Plastic Deformation Work, Uniaxial Tensile Test, Nakajima Stretch Forming Test, Finite Element Simulation, Limit Strain

## KAYNAKÇA

1. Demeri, M., Y.: Advanced High-Strength Steels, ASM International Materials Park, Ohio, 2013.
2. McClintock, F., A., "A Criterion of Ductile Fracture by Growth of Holes", J. Appl. Mech, 1968, vol. 35, pp. 363-71.
3. Rice, J., R., Tracey, D., M., "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields", J. Mech. Phys. Solids, 1969, vol. 17, pp. 201-17.
4. Gurson, A., L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth. Part I: Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media", J. Eng. Mater. Technol, 1977, vol. 99, pp. 2-15.
5. Tvergaard, V., Needleman, A., "Analysis of the Cup-cone Fracture in a Round Tensile Bar", Acta Metall, 1984, vol. 32, pp. 157-69.
6. Cockcroft, M., G., Latham DJ., "Ductility and the Workability of Metals", J. I. Met., 1968, vol. 96, pp. 33-39.
7. Brozzo, P., Deluca, B., Rendina, R., "A New Method for the Prediction of Formability in Metal Sheet, Sheet Metal Forming and Formability", In Proceedings of the 7th Biennial Conference of the International Deep Drawing Research Group (IDDRG), 1972.
8. Clift, S., E., Hartley, P., Sturgess, C., E., N., Rowe, G., W., "Fracture Prediction in Plastic Deformation Processes", Int. J. Mech. Sci., 1990, vol. 32, pp. 1-17.
9. Oyane, M., Sato, T., Okimoto, K., Shima, S., "Criteria for Ductile Fracture and Their Applications", J. Mech. Work Technol, 1980, vol. 4, pp. 65-81.
10. Atkins, A., G., "Possible Explanation for Unexpected Departures in Hydrostatic Tension-Fracture Strain Relations", Metal Science, 1981, vol. 15, pp. 81-83.
11. Lian, J., "A Generalized Hybrid Damage Mechanics Model for Steel Sheets and Heavy Plates", Doktora Tezi, RWTH Aachen University, 2015.
12. Dieter, G., E.: Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
13. Ling, Y., "Uniaxial True Stress-Strain After Necking", AMP Journal of Technology, 1996, vol. 5, pp. 37-48.
14. Kumlu, C., Esener, E., Firat, M., "Predictive Modeling of TRIP600 Steel Formability Performance Using Analytical and Numerical Methods", Eng. Res. Express, 2019, vol. 1, pp. 1-9.