BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SACLARIN BÖLGESEL ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞININ DELİK GENİŞLETME TESTİ İLE ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Refiye ARDALI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SACLARIN BÖLGESEL ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞININ DELİK GENİŞLETME TESTİ İLE ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Refiye ARDALI
(19212872017)
ORCID: 0000-0003-3145-290X

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Onur SARAY
ORCID: 0000-0002-9378-3870

ŞUBAT 2021

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 3160912 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Refiye ARDALI

İmzası :

Aileme,

ÖNSÖZ

Lisans eğitimimden bugüne kadarki süreç boyunca kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana her zaman destek olan, tez çalışması süresince de aynı desteğini göstermiş olan göstermiş olan çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Onur SARAY'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, bu çalışmayı 3160912 numaralı projesiyle maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a, deneysel çalışmalarım boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen Borçelik Ar-Ge Test Merkezi'ndeki bütün çalışma arkadaşlarıma, tez çalışmasında kullanılan MSC Simufact Forming - MSC MARC paket programlarına ait lisansların sağlanmasındaki destekleri için Bias Mühendislik firmasına teşekkür ederim.

Bana her zaman benden daha çok güvenen, maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme, minnettarlığımı sunarım.

Şubat 2021 Refiye ARDALI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **vii**
SEMBOLLER ..... **viii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Araştırması 2
1.1.1 DG uygulamasında kullanılan zımba geometrisi, kesme boşluğu, delme metodu, delik çapı gibi parametrelerle ilgili çalışmalar 3
1.1.2 Farklı mekanik özelliklerin DG üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar 10
1.1.3 Kırılma kriteri, akma fonksiyonu, hasar modeliyle ilgili yapılan çalışmalar 13
1.1.4 Mikro yapının DG üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar 17
1.2 Tezin Amacı 18
2. MALZEME VE YÖNTEM **21**
2.1 Kullanılan Çeliğin Kimyasal Bileşenleri, Mekanik Özellikleri ve Mikro Yapısı 21
2.2 Zımba ile Delinmiş Delik Kenarının Karakterizasyonu 22
2.3 Delik Genişletme Testi ve Kullanılan Ekipmanlar 22
2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Modeli 24
3. BULGULAR **29**
3.1 Mekanik Özelliklerin ve Mikro Yapının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular 29
3.2 Zımba ile Delik Delmeden Elde Edilen Bulgular 31
3.3 DG Testinden Elde Edilen Bulgular 34
3.4 DG Testi Sonrası Mikro Yapı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular 37
3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi Modelinin Kalibrasyonundan Elde Edilen Bulgular 42
4. TARTIŞMA **54**
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **59**
KAYNAKLAR **61**
ÖZGEÇMİŞ **65**

KISALTMALAR

AHSS : Advanced High Strenght Steel
ASTM : American Society of Testing and Materials
BSE : Back Scattered Electron
CP : Complex Phase
DG : Delik genişletme
DP : Dual Phase
EDD : Extra Deep Drawing
EDM : Electric Discharge Machine
FLD : Forming Limit Diagram
GTN : Gurson–Tvergaard–Needleman
ISO : International Organization for Standardization
MS : Martensitic
SE : Secondary Electron
SEM : Scanning Electron Microscope
SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
TRIP : Transformation Induced Plasticity
TWIP : Twining Induced Plasticity

SEMBOLLER

D_o	**:** İlk delik çapı
D_h	**:** Son delik çapı
λ	**:** Delik genişletme oranı
Ø	**:** Çap
r	**:** Anizotropi Katsayısı
Δr	**:** Anizotropi Katsayısındaki Değişim
t	**:** Kalınlık
M/A	**:** Martensit-Östenit
F	**:** Kuvvet
x	**:** Zımba stroğu (deplasman)
dF	**:** Kuvvet değişimi
dx	**:** Zımba stroğu (deplasman) değişimi
GPa	**:** GigaPascal
mm	**:** milimetre
kN	**:** KiloNewton

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Farklı kalite ve delme metotları için DG testi sonuçları. **5**
Çizelge 2.1 : Malzemelerin kimyasal bileşenleri. **21**
Çizelge 3.1 : Kullanılan malzemelerin çekme deneyi sonuçları. **29**
Çizelge 3.2 : Delik genişletme testi sonuçları.....**35**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Otomotiv çeliklerinde mukavemet-süneklik diyagramı..... **1**
Şekil 1.2 : Test parçasının boyutu. **2**
Şekil 1.3 : Test öncesi ve test sonrası delik genişletme şematiği [4]. **3**
Şekil 1.4 : Delik genişletme oranının delik hazırlama yöntemiyle varyasyonu..... **5**
Şekil 1.5 : Delme geometrisi ve kenar koşullarının bir fonksiyonu olarak DP 980 ve DP 1180 için delik genişletme oranları. **6**
Şekil 1.6 : Farklı zımba geometrisinde uygulanan testlerde delik genişletme oranları. **7**
Şekil 1.7 : Farklı delik hazırlama yöntemlerinde uygulanan testlerde delik genişletme oranları..... **7**
Şekil 1.8 : Farklı delme boşluklarında elde edilen DG oranlarının deneysel ve sonlu elemanlar analiz karşılaştırması. **8**
Şekil 1.9 : Farklı kesme boşlukları altında keskin Ø10 mm zımba ile delik delme için öngörülen ve ölçülen kenar koşulları arasındaki karşılaştırma..... **8**
Şekil 1.10 : İki farklı kesme boşluğunda (% 6.43-12.86) deneysel delik genişleme oranı ile delik çapı arasındaki ilişki. **9**
Şekil 1.11 : Aşağı ve yukarı çapak oryantasyonu için konik zımba ile delik genişletme simülasyonu..... **10**
Şekil 1.12 : Test edilen numunelerin DG oranı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişki. **10**
Şekil 1.13 : DG oranı ile akma gerilmesi ve maksimum çekme gerilmesi arasındaki korelasyon. **11**
Şekil 1.14 : Delik genişletme oranları. **12**
Şekil 1.15 : Konik zımba kullanılan yapılan DG testinden elde edilen DG oranı ile kırılma tokluğu arasındaki korelasyon. **13**
Şekil 1.16 : Çelik 2 için delik genişletme simülasyonu sırasında temel gerinim geçmişleri..... **14**
Şekil 1.17 : Tek eksenli(sol), düzlemsel(orta) ve iki eksenli(sağ) hasar eşiğini gösteren simüle edilmiş numune. **15**
Şekil 1.18 : Frezelenmiş numune DG oranının deformasyon hızı duyarlılık üssü ve boyun verme bölgesindeki birim uzama ile ilişkisi. **16**
Şekil 1.19 : Çok geçişli haddeleme sonrasında deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması. **17**
Şekil 1.20 : Martenzit hacim fraksiyonunun ve karbon içeriğinin bir fonksiyonu olarak delik genişletme oranı. **18**
Şekil 2.1 : Çekme deneyi numunesi boyutları. **22**
Şekil 2.2 : 10 mm çapındaki deliklerin delindiği eksantrik pres. **23**
Şekil 2.3 : DG testinin yapıldığı test ekipmanı. **23**
Şekil 2.4 : DG testi yapılan numuneler..... **24**
Şekil 2.5 : (a) Çekme deneyi SEY modeli, (b) Ağ yapısı ve eleman boyutu. **26**

Şekil 2.6 : SEY modelindeki elemanların akış eğrisi. **26**
Şekil 2.7 : 1,00 mm kalınlıktaki malzeme için zımba ile kesme prosesi SEY modeli ve ağ yapısı. **27**
Şekil 2.8 : 1,80 mm kalınlıktaki malzeme için zımba ile kesme prosesi SEY modeli ve ağ yapısı. **27**
Şekil 2.9 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki malzeme için DG prosesi SEY modeli ve ağ yapısı, (b) 1,80 mm kalınlıktaki malzeme için DG prosesi SEY modeli ve ağ yapısı. **28**
Şekil 3.1 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için oluşturulan gerçek gerilme-birim uzama grafiği. **30**
Şekil 3.2 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için oluşturulan gerçek gerilme-birim uzama grafiği. **30**
Şekil 3.3 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki malzemenin 50x mikro yapı görüntüsü, (b) 1,00 mm kalınlıktaki malzemenin 1000x mikro yapı görüntüsü, (c) 1,80 mm kalınlıktaki malzemenin 50x mikro yapı görüntüsü, (d) 1,80 mm kalınlıktaki malzemenin 1000x mikro yapı görüntüsü. **31**
Şekil 3.4 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin 50x kayma-kopma bölgesi ölçümü, (b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin 50x kayma-kopma bölgesi ölçümü (Görüntü üzerinde verilen ölçüm değerleri farklı noktalardan alınan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir). **32**
Şekil 3.5 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kesme sonrası karakteristik kesme bölgeleri, (b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kesme sonrası karakteristik kesme bölgeleri. **32**
Şekil 3.6 : (a)-(b) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kayma bölgesi, (c)-(d) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kayma-kopma bölgesi, (e)-(f) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kopma bölgesi. **33**
Şekil 3.7 : (a)-(b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kayma bölgesi, (c)-(d) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kayma-kopma bölgesi, (e)-(f) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kopma bölgesi. **34**
Şekil 3.8 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası görüntüsü, (b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası görüntüsü. **35**
Şekil 3.9 : Delik genişletme testi uygulanan numunelerin F-x eğrileri. **36**
Şekil 3.10 : Delik genişletme testi uygulanan numunelerin dF/dx-x eğriler. **36**
Şekil 3.11 : Delik genişletme testi uygulanan numunelerin kesit görüntüleri. **37**
Şekil 3.12 : (a)-(b) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası kesit görüntüsü, (c)-(d) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası kesit görüntüsü **37**
Şekil 3.13 : 1,00 mm ve 1,80 mm kalınlıktaki numunelerdeki DG testi sonrası tane yönelim görüntüleri: (a)-(b) 1,00 mm numune ucunun tamamı, (c)-(d) 1,00 mm numune ucu orta kısmı, (e)-(f) 1,80 mm numune ucunun tamamı, (g)-(h) 1,80 mm numune ucu orta kısmı. **39**
Şekil 3.14 : Delik genişletme testi uygulanan 1,00 mm kalınlıktaki numunelerin kesit SEM görüntüleri: (a)-(c)-(e)-(g) Numune ucu mikro çatlak SE görüntüleri, (b)-(d)-(f)-(h) Numune ucu mikro çatlak BSE görüntüleri. **40**
Şekil 3.15 : Delik genişletme testi uygulanan 1,80 mm kalınlıktaki numunelerin kesit SEM görüntüleri: (a)-(c)-(e)-(g) Numune ucu mikro çatlak SE görüntüleri, (b)-(d)-(f)-(h) Numune ucu mikro çatlak BSE görüntüleri. **41**
Şekil 3.16 : Çekme deneyi analizi aşamaları: (a) Çekme öncesi, (b) Boyun verme, (c) İlk çatlak oluşumu, (d) Kopma. **42**
Şekil 3.17 : Çekme deneyi F-x diyagramı karşılaştırması. **43**

Şekil 3.18 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası kayma bölgesi ölçümü. **44**
Şekil 3.19 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası kayma bölgesi ölçümü. **44**
Şekil 3.20 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası: (a) Efektif plastik gerinim, (b) Hasar, (c) Üç eksenlilik. **45**
Şekil 3.21 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası: (a) Efektif plastik gerinim, (b) Hasar, (c) Üç eksenlilik. **46**
Şekil 3.22 : Kesme prosesi zımba kuvveti kıyaslaması. **47**
Şekil 3.23 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin SEY modeli eleman numaralandırmaları. **48**
Şekil 3.24 : 1,80 mm kalınlıktaki numunenin SEY modeli eleman numaralandırmaları. **48**
Şekil 3.25 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki eleman durumu. **49**
Şekil 3.26 : 1,80 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki eleman durumu. **49**
Şekil 3.27 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki yarıçap ölçümü. **50**
Şekil 3.28 : 1,80 mm kalınlığındaki numunenin test sonundaki yarıçap ölçümü. **50**
Şekil 3.29 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki kalınlık ölçümü. **51**
Şekil 3.30 : 1,80 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki kalınlık ölçümü. **51**
Şekil 3.31 : DG testi numunelerinin deneysel ve analiz F-x eğrilerinin kıyaslanması. **52**
Şekil 3.32 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için deneysel ve analiz dF/dx-x eğrilerinin kıyaslanması. **53**
Şekil 3.33 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için deneysel ve analiz dF/dx-x eğrilerinin kıyaslanması. **53**
Şekil 4.1 : DG testi malzeme deformasyon adımları. **55**
Şekil 4.2 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için SEY modeli deformasyon adımları: (a) Elastik eğilme, (b) Plastik eğilme, (c) Çatlak ilerlemesi/Tam boya ulaşması. **56**
Şekil 4.3 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için SEY modeli deformasyon adımları: (a) Elastik eğilme, (b) Plastik eğilme, (c) Çatlak ilerlemesi/Tam boya ulaşması. **56**

GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİK SACLARIN BÖLGESEL ŞEKİLLENDİRME DAVRANIŞININ DELİK GENİŞLETME TESTİ İLE ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Otomotiv sektöründe ağırlık hafifletme ve dolayısıyla daha az yakıt tüketen araçların üretilmesi temel tasarım hedeflerinden biri haline gelmiştir. Bu amacın mekanik performanstan ödün verilmeden gerçekleştirilebilmesi, yapısal elemanlarda daha yüksek mukavemete sahip olan gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (AHSS) yaygın kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çelikler benzersiz süneklik ve mukavemet özellik kombinasyonları göstermektedirler. Yüksek özgül mukavemetleri sayesinde otomotiv sektöründe etkili çözüm olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Bununla birlikte, yaygın bir davranış olarak, AHSS'nin artan mukavemet seviyelerine azalan süneklik / şekillendirilebilirlik seviyeleri eşlik etmektedir. Bu davranış, delik delme veya kesme gibi işlemler sonrasında uygulanan ikincil deformasyon sırasında daha da belirgin hale gelerek önemli endüstriyel problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu kavramı incelemek için delik genişletme testi kesme işlemlerinden sonra kenarların lokal şekillenebilirliğini simüle eden bir yöntem olarak yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Diğer yandan, delik genişletme testi çatlak boyunun sac kalınlığına ulaştığı anda operatör inisiyatifiyle sonlandırılmaktadır. Bu uygulama, operatöre bağımlı olduğundan test sonuçlarında saçılımlara neden olmaktadır. Testin yüksek çözünürlüklü kamera ile takip edilmesi ile operatör bazlı saçılımların belli oranda önüne geçilebilmektedir. Ancak bu yöntem nispeten pahalı olmasının yanı sıra farklı kalınlıktaki malzemeler söz konusu olduğunda yeterli hassasiyette performans göstermemektedir. Çoğu durumda, test sistemleri deney sırasında ortaya çıkan şekillendirme kuvveti ve zımba deplasmanını kayıt altına tutmaktadır. Ancak bu veriler genellikle test sonuçları ile hiç ilişkilendirilmemektedir. Benzer şekilde söz konusu verilerin testin sonlandırılması ile ilgili karar mekanizmasında da kullanılmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada delik genişletme testini sonlandırmak için kuvvet-deplasman eğrisinin test sırasındaki değişimi, eğri karakteristiklerinin deformasyon adımlarıyla eşleştirilmesine yönelik bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda son zamanlarda otomotiv sektöründe geniş kullanım alanına sahip olan DP 780 çelik saclara ait ince (1,00 mm) ve kalın (1,80 mm) malzemelerin hem delik delme hem de bu deliklerin test edilmesine yönelik süreçler deneysel ve hesaplamalı yaklaşımlar kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kalınlıktan bağımsız olarak, delik genişletme testleri sırasında numunelerin şekillendirilmesinin hem elastik hem de plastik deformasyon kapsamındaki farklı aşamalarda gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bu aşamalar arasındaki geçiş sırasında deplasmana göre zımba kuvveti değişim hızının (dF/dx) belirgin değişimler sergilediği görülmüştür. Bu değişimin çatlak oluşma ve ilerlemesi sürecinde ise neredeyse sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bu davranışa dayanarak, test sırasında dF/dx değerleri izlenerek çatlağın oluşma sürecinin numuneyi gözlemlemeden belirlenebileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Delik genişletme testi, Kesme prosesi, DP çeliği, Şekillendirmede kenar çatlakları.

INVESTIGATION OF EDGE FLANGEABILITY OF HIGH STRENGTH STEELS BY HOLE EXPANSION TEST

SUMMARY

In the automotive industry, weight reduction and therefore the production of vehicles that consume less fuel has become one of the main design objectives. The realization of this goal without compromising mechanical performance requires the widespread use of advanced high strength steels (AHSS) with higher strength in structural elements. These steels show unique combinations of ductility and strength properties. By means of their high specific strength, they introduced as an effective solution in the automotive industry. However, as a common behavior, increasing strength levels of AHSS accompanied with decreasing ductility/formability levels. This behavior becomes more pronounced during secondary deformation applied after processes such as punching or cutting, lead to important industrial problems. To examine this concept, hole expansion test has been started to be widely used as a method that simulates the local formability of the edges after cutting operations. On the other hand, the hole expansion test is terminated when crack formation occurs throughout the thickness on the initiative of the operatör. However, since this is an operator-dependent process, it causes scattering in test results. However, this approach is an operator-dependent process, Because of that, it causes scattering in test results. Monitoring the test with a high-resolution camera is also a method used to minimize the scattering of the test results. However, this method is relatively expensive also does not perform with sufficient precision when materials of different thickness are concerned. In most cases, test systems record the forming force and punch displacement during the experiment. However, these data are generally not associated with test results at all. Similarly, it was seen that these data were not used in the decision-making mechanism regarding the termination of the test.

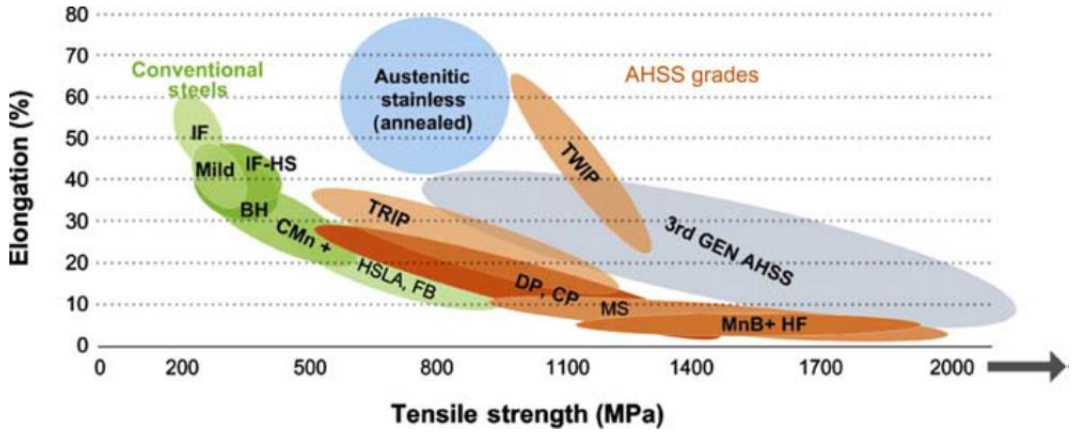
In this study, to terminate the hole expansion test, an approach to change in force-displacement curve during the test and to match the curve characteristics with the deformation steps is presented. Within the scope of this approach, the test was terminated by matching the characteristic features of the force-displacement curves revealed in the DG tests with the deformation state. In this direction, the processes for punching and hole expansion testing of thin (1,00 mm) and thick (1,80 mm) materials belonging to DP 780 steel sheets, which have recently been widely used in the automotive industry, have been comparatively examined using experimental and computational approaches. According to the results, regardless of the thickness, it was understood that the forming of the samples during the hole expansion tests, took place at different stages under both elastic and plastic deformation. It was observed that, during the transition between these stages, the rate of change of punch force (dF / dx) with respect to the displacement exhibits significant changes. It was seen that, this change remained almost constant during the crack formation and propagation process. Based on this behavior, it has been shown that by monitoring dF / dx values during testing, the crack formation process can be determined without observing the sample.

Keywords: Hole expansion test, Cutting process, DP steels, Edge cracks in forming.

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörünün ağırlık hafifletme ve dolayısıyla daha az yakıt tüketen araçların üretilmesi hedefi, yapısal elemanlarda daha yüksek mukavemete sahip olan gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (AHSS) yaygın kullanılmasını gerektirmektedir. DP (Dual Phase) çelikleri, MS (Martensitic) çelikleri, CP (Complex Phase) çelikleri, TRIP (Transformation Induced Plasticity) çelikleri ve TWIP (Twining Induced Plasticity) çelikleri dikkat çeken 3. Nesil gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerdendir. Bu çelikler benzersiz malzeme ve mekanik özellik kombinasyonu göstermektedirler (Şekil 1-1). Yüksek mukavemetlerinin yanı sıra yeterli süneklik özellikleri ile daha yüksek performans beklentilerini karşılayabilmektedirler [1].

Gelişmiş yüksek mukavemetli çelik ailesinde DP çelikleri hem yüksek mukavemet hem de yeterli süneklik özelliklerini sert martenzit fazının çok küçük parçacıklar halinde sünek ferritik matrisine dağılması ile meydana gelmiş bir mikro yapıya sahip olmaları sayesinde göstermektedir. Bu özellikleri, mukavemet ve süneklik davranışlarının belirli bir aralıkta ayarlanabilmesine olanak sağladığından özellikle otomotiv endüstrisinde en sık kullanılan AHSS olmasını sağlamıştır [2].



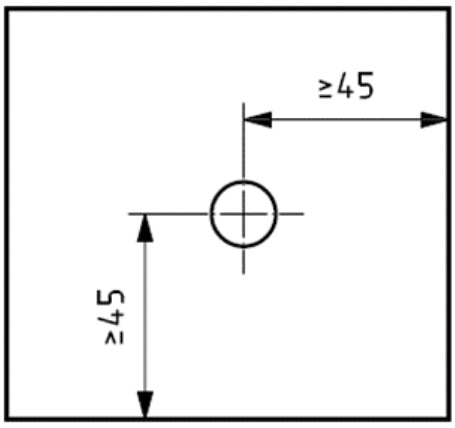
Şekil 1.1 : Otomotiv çeliklerinde mukavemet-süneklik diyagramı.

DP çeliklerinin mukavemet ve süneklik özelliklerinin farklı kombinasyonlar elde edilecek biçimde ayarlanabiliyor olması beraberinde önemli endüstriyel problemleri de getirmektedir. Söz konusu problemlerden özellikle artan mukavemet değerleri ile

daha da belirginleşenler arasında en bilineni, gövde panellerine uygulanan delik delme, kenar kesme gibi işlemler sonrasında uygulanan şekillendirme süreçlerinde karşılaşılmaktadır. Kesme sırasında uygulanan plastik deformasyon nedeniyle meydana gelen hem geometrik hem de yapısal değişiklikler, söz konusu bölgelerin ikincil şekillendirme operasyonları sırasında erken çatlak oluşumuna neden olarak üretilebilirliği kısıtlayan önemli bir kısıt olarak değerlendirilmektedir [3]. Kesme/delme sırasında kenar üzerindeki plastik deformasyon geçmişi ve kalınlık boyunca gelişen yapısal değişimler nedeniyle, şekillendirilebilirliğin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan şekillendirme sınır diyagramının (FLD) özellikle AHSS'lerde önemli oranda değişim sergilemektedir [2]. Delik genişletme (DG) testi ise kesilmiş kenarların şekillendirilebilirliğinin belirlenmesi ve bir anlamda da kırılma kriteri olarak başarı ile kullanılabilmekte olup sac metallerin şekillendirme davranışıyla ilgili bir parametre olarak otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir.

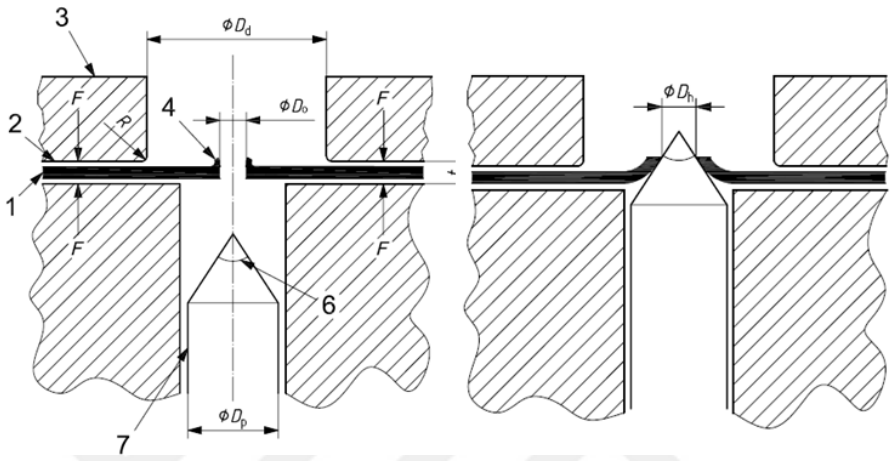
1.1 Literatür Araştırması

Delik genişletme testi, üretim koşullarındaki flanş oluşturma prosesine benzemesi yönüyle sac metalin bu tür flanş oluşturulabilirliğini değerlendirmek için en iyi test yaklaşımlarından biri olup ISO 16630 standardı kapsamında yapılmaktadır [4]. Bu doğrultuda, 100 mm x 100 mm ebatlarında kesilmiş olan sac metalin merkezine kalıp ile zımba arasındaki kesme boşluğu 12 ± 2 olacak şekilde zımba ile 10 mm çapında delik açılmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 : Test parçasının boyutu.

Test parçası, parça üzerindeki deliğin merkezi 60º konik olan genişletme zımbasının ekseniyle çakışacak şekilde kalıba konumlandırılır. Test esnasında parçadan herhangi bir malzeme çekilmesini önlemek için test parçasına yeterince yüksek bir sıkıştırma kuvveti uygulanır (Şekil 1.3). Konik zımba ile genişletme işlemi başlatılır ve test sürecinde delik kenarı gözlem altında tutularak delik kesitinde kalınlık boyunca ilk çatlak görüldüğünde test sonlandırılır.



Şekil 1.3 : Test öncesi ve test sonrası delik genişletme şematiği [4].

Denklem 1.1'e göre parça için yüzde olarak delik genişletme oranı hesaplanır. D_o ve D_h sırasıyla başlangıç ve son delik çaplarıdır.

$$\text{Delik genişletme oranı } (\lambda) = \frac{D_h - D_o}{D_0} \text{x} 100 \qquad (1.1)$$

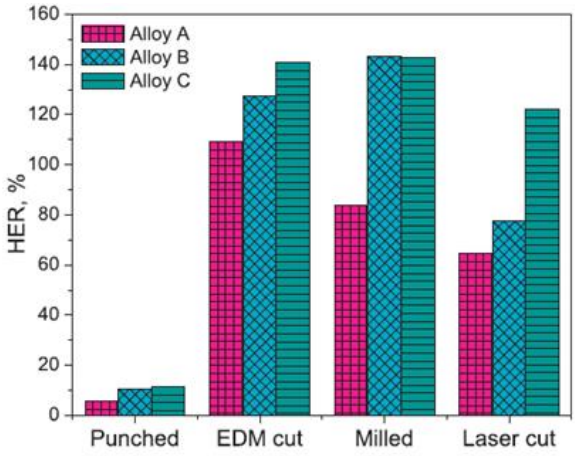
Otomotiv sektöründe delik genişletme testiyle ilgili birçok çalışma mevcuttur. Genel olarak zımba geometrisi, delme metodu, delme boşluğu gibi parametrelerin test sonucuna etkisini incelemeye yönelik olan bu çalışmalar sonlu elemanlar metoduyla da desteklenmektedir. Diğer bir yandan, kullanılmakta olan çeliğin mekanik özelliklerinin yanında, delik kenarında oluşan çatlakların oluşumunda etkisi olduğu bilinen mikro yapı ile ilgili de çalışmalar mevcuttur. Aynı zamanda kırılma kriteri, akma fonksiyonu gibi hasar modeliyle ilgili çalışmalara, farklı geometriler üzerinden gerilme durumlarının belirlenip benzetim yapılması konularına da rastlanmaktadır.

1.1.1 DG uygulamasında kullanılan zımba geometrisi, kesme boşluğu, delme metodu, delik çapı gibi parametrelerle ilgili çalışmalar

DG testi, ISO 16630 standardı gereği 60° konik zımba ile uygulanmaktadır [4]. Ancak farklı zımba geometrileri, farklı kalınlık dağılımları ve zımba ile şekillenen

numune yüzeyi arasındaki temas durumuna göre elde edilen DG oranı farklılık göstermektedir. Diğer bir yandan, oluşan bu delik kenarlarının kalitesi, oluşan kalıntı gerilmeler, çapak ve mikro hasarlar test sonucunu etkileyen önemli faktörlerdendir. Delme işlemi sonrasında delik kenarında oluşan hasar, çatlağın daha küçük birim şekil değişimlerinde başlamasına/ilerlemesin neden olabilmektedir. Bu noktada deliğin hangi yöntemle oluşturulduğu, genişletme prosesinin hangi zımba geometrisiyle yapıldığı önem kazanmış ve test sonucunu olumlu veya olumsuz yönde etkilemeleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır [3, 5-15].

Paul S.K. [3] delme metodu, zımba geometrilerinin, gerilme özellikleri ile korelasyon ve mikro yapının etkisi dahil olmak üzere delik genişletme değeri üzerinde etkili olan parametreleri kapsamlı bir şekilde elde almıştır. Yapılan çalışmaların hemen hemen tümünde delik genişletme testinde delik kenarlarındaki gerilme durumunun tek eksenli gerilme olduğu belirtilmiştir. Çevresel birim şekil değiştirme delik merkezinin kenarında maksimum iken merkezden uzaklaştıkça azalmakta olup alt ve üst kalıbın numuneyi tuttuğu yerde sıfır olduğu görülmüştür. Test boyunca elde edilen birim şekil değiştirmelere bakıldığında ise neredeyse saf tek eksenli gerilme deformasyon yolu olduğu saptanmıştır. Bütün bu veriler değerlendirildiğinde delik genişletme ile tek eksenli çekme testi arasındaki önemli farkın deformasyon gradyanı olduğu yorumu yapılmıştır. Delik genişletme testinde açık olarak deformasyon halinin değişimi görülürken tek eksenli çekme testinde boyun vermeden önceki deformasyon homojendir. Farklı zımbalar ile yapılan test sonuçlarına bakıldığında ise konik zımbanın genellikle silindirik zımbadan daha yüksek delik genişletme değerine sahip olduğu dikkat çekmiştir. Ayrıca her bir zımba için birim şekil değiştirme yolları farklı olup hasar olan yeri silindirik ve yarı küresel zımbalar için delik merkezinin kenarından biraz uzakta olduğundan, delik kenarı durumunun bu zımba geometrileri için oran üzerinde çok az etkisi olduğu belirtilmiştir. Farklı delme metotlarıyla yapılan çalışmalarda ise EDM ile delinen numunelerde zımba ile delinenlere göre daha yüksek delik genişletme oranının olduğu saptanmıştır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 : Delik genişletme oranının delik hazırlama yöntemiyle varyasyonu.

Hance B.M. ve diğ. de [8] benzer şekilde delik oluşturma yönteminin delik genişletme performansı üzerindeki etkisi deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Bu doğrultuda farklı kalitedeki saclara zımba, su jeti, talaşlı işleme ve lazer kesim olmak üzere farklı şekilde delik delinip genişletme testi uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre DP 980 ve 204 kalitelerde zımba ile delinmiş numunelerde nispeten düşük DG oranı olduğu ancak farklı kenar hazırlama yöntemleriyle DG oranının her ikisi için de artış sergilediği görülmüştür (Çizelge 1.1).

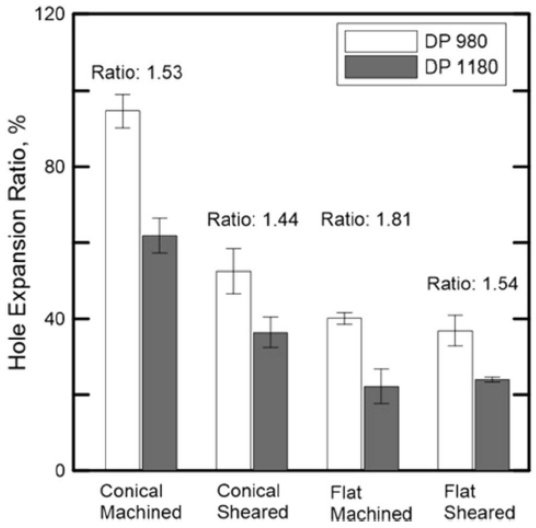
Çizelge 1.1 : Farklı kalite ve delme metotları için DG testi sonuçları.

Hole Fabrication Method	Hole Expansion Ratio (HER), %*				
	IF	DP 980	204	410 AN	429 MOD
Pierced: c = 12%	171	27	46	100	136
Pierced: c = 20%	172	25	50	96	139
Pierced-Avg.	172	26	48	98	138
Machined	337**	82	166	217	177
Water-Jet Cut	298	51	149	195	180
Laser Cut	280	72	194	139	184

Delik genişletme testi öncesi delik hazırlama için uygulanan proseslerden biri de su jetidir. Behrens B.A. ve diğ. [9] aşındırıcı su jeti parametrelerinin delik genişletme testi üzerindeki etkisini görmek için fraksiyonel faktöriyel deneysel dizayn metodunu kullanarak çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca deliklerin yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeler de ölçülerek bunların delik genişletme oranı üzerindeki olası bir ilişki hali araştırılmıştır. Referans olarak 1mm kalınlığındaki derin çekme kalitesinde DC06 çeliği kullanılıp kırılma oluşumu yüksek hızlı kameralarla yakalanmıştır. Yapılan

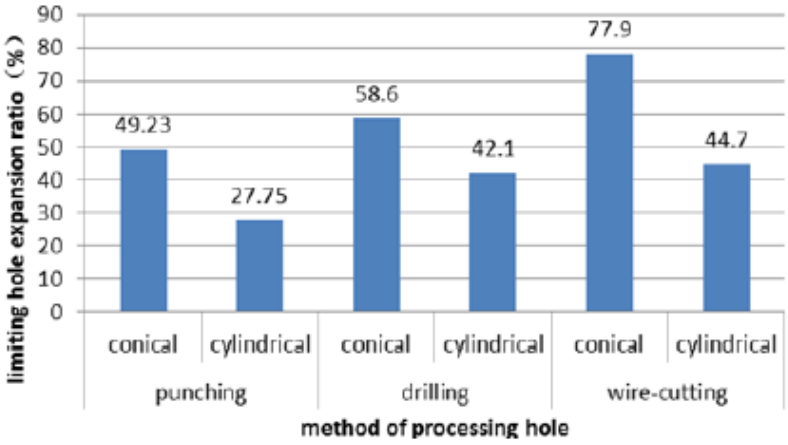
çalışmalar sonucunda küçük uzaklaşma mesafesi, yüksek su basıncı, yavaş hareket hızı ve numuneyi su altında kesmenin delik genişletme operasyonunda kırılmayı geciktirdiği belirtilmiştir.

Madrid M. ve diğ. de [10] farklı test koşullarının test değeri üzerine etkisini anlamak amacıyla zımba geometrisi (konik ve silindirik) ve kenar durumları (kesilmiş ve işlenmiş) için delik genişletme testleri yapmışlardır. Sonuçlar mikro yapı ve mekanik özellikler açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, işlenmiş kenar yüzeyine sahip numunelerde konik zımba ile t6est edildiğinde delik genişletme oranının arttığı, silindirik zımba için ise bu trendin olmadığı görülmüştür. Ayrıca konik zımba bütün test koşulları için silindirik zımbaya göre daha iyi delik genişletme sonuçları vermiştir (Şekil 1.5).

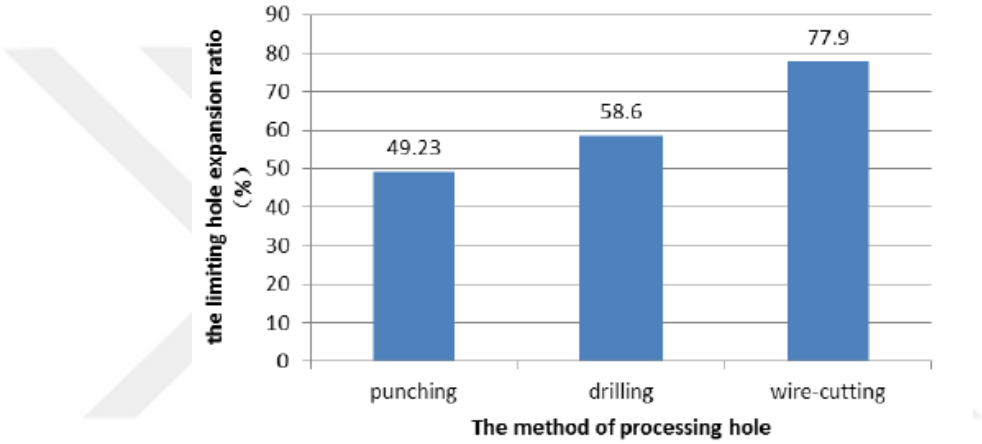


Şekil 1.5 : Delme geometrisi ve kenar koşullarının bir fonksiyonu olarak DP 980 ve DP 1180 için delik genişletme oranları.

Li J. ve diğ. [11] zımba geometrisi ve delik hazırlama yönteminin delik genişletme oranı üzerindeki etkileri üzerine 5754 alüminyum malzeme kullanarak çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan deliği zımba ile hazırlamada en düşük, tel erozyonla ile hazırlamada ise en yüksek DG oranı elde edildiği görülmüştür (Şekil 1.6). Aynı zamanda konik zımbanın silindirik zımbaya göre daha yüksek DG sonucu verdiği saptanmıştır (Şekil 1.7).

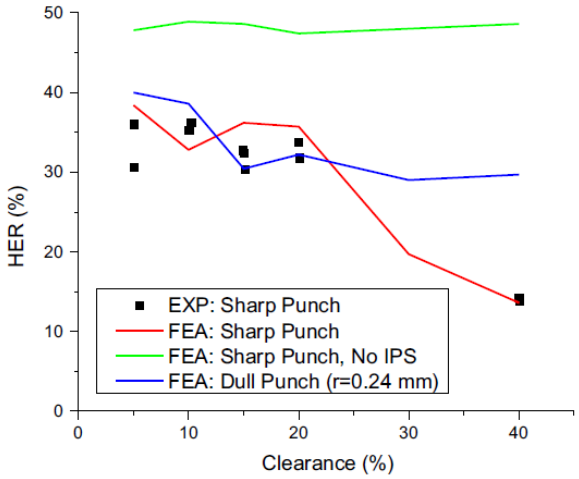


Şekil 1.6 : Farklı zımba geometrisinde uygulanan testlerde delik genişletme oranları.

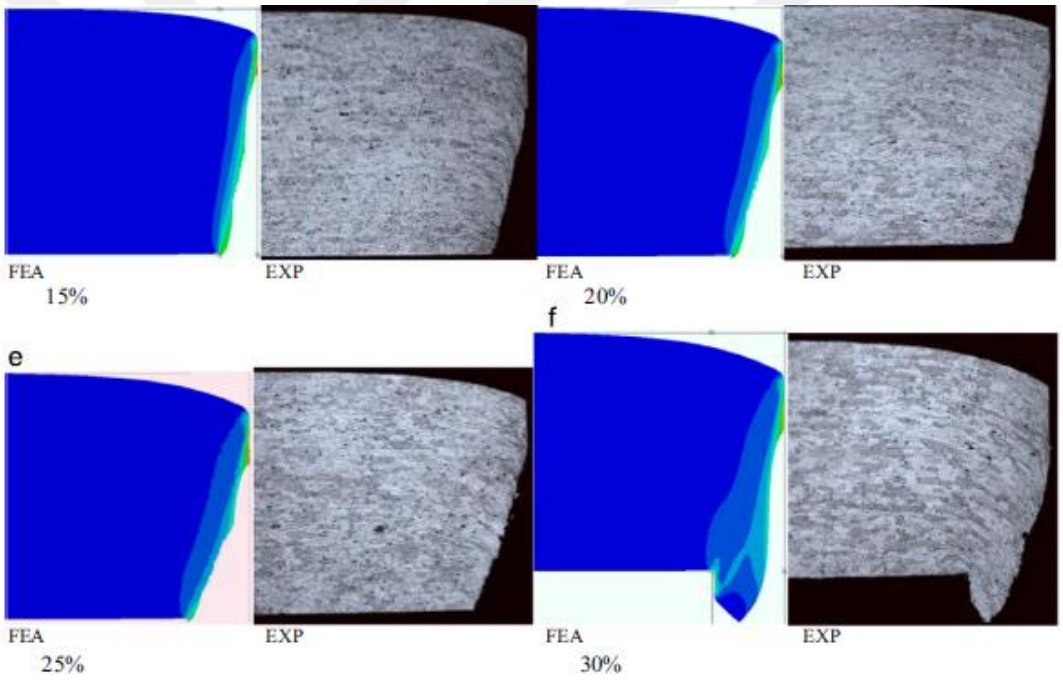


Şekil 1.7 : Farklı delik hazırlama yöntemlerinde uygulanan testlerde delik genişletme oranları.

X.H. Hu ve diğ. [12] tarafından yapılan bir çalışmada, delme işleminden kaynaklı olarak delik kenarında oluşan hasarlar göz önünde tutularak AA6111-T4 levhada delik genişletme oranını tahmin etmek amacıyla entegre edilmiş sonlu eleman model yapısı geliştirmişlerdir. Delik delme prosesi, sonlu eleman modelinde sac kalınlığı 0,9 mm ve delinecek delik çapı 10 mm olarak belirlenerek ABAQUS yazılımında modellenmiştir (Şekil 1.8). Daha önceki çalışmalardan kalibre edilen malzeme ve hasar özellikleri kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda %20'nin altındaki delme boşluğu değerlerinde kesilmiş yüzeylerde çapak oluşmadığı belirlenmiştir. Delme boşluğu %30-40'dan fazla olduğunda ise delik genişletme oranlarının deneysel ölçümlerle de tutarlı olarak bir hayli az olduğu saptanmıştır (Şekil 1.9).



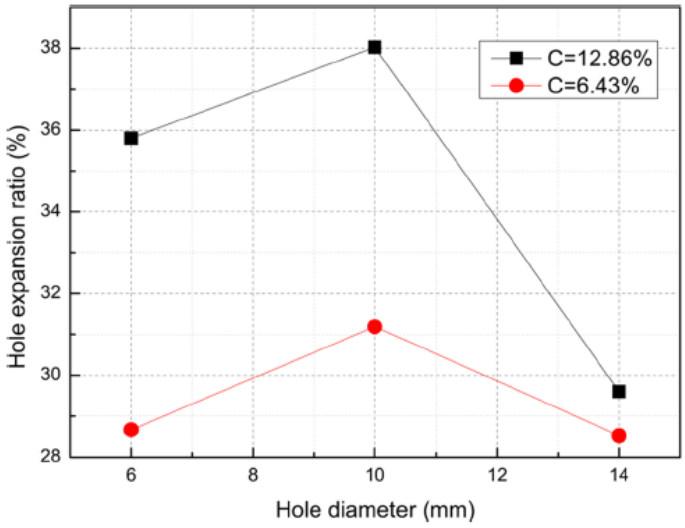
Şekil 1.8 : Farklı delme boşluklarında elde edilen DG oranlarının deneysel ve sonlu elemanlar analiz karşılaştırması.



Şekil 1.9 : Farklı kesme boşlukları altında keskin Ø10 mm zımba ile delik delme için öngörülen ve ölçülen kenar koşulları arasındaki karşılaştırma.

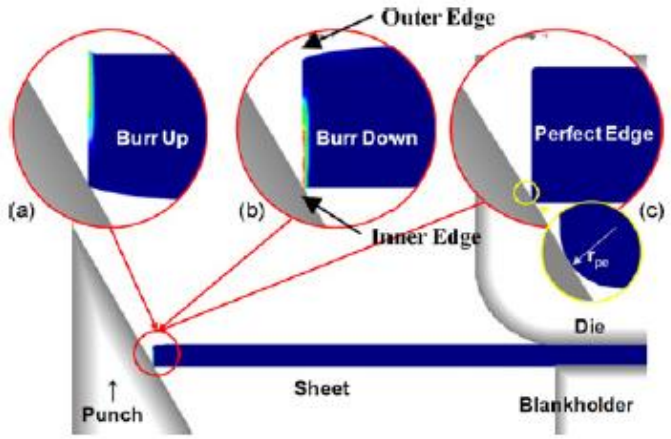
C. Ye ve diğ. [13] delik delme işlemindeki kenar flanş oluşturulabilirliğinden kaynaklanan bükülme ve ön hasar etkisini araştırmak amacıyla üç farklı delik çapı ve iki farklı delme boşluğunda DP 780 malzemede delik genişletme testleri yapmışlardır. Aynı koşullarda, Marciniak ve Kuczynski'nin modeli ve Hill'in lokalize boyun verme teorisinden kenar sınır şekil değişimini tahmin etme konseptine sahip modeli baz alınarak yeni modeller ile benzetimler uygulanmıştır.

Bu doğrultuda 1,4 mm kalınlıktaki DP saclara % 6,43 e % 12,86 farklı kesme boşluklarında 6 mm, 10 mm ve 14 mm olmak üzere 3 farklı çapta delik delinip 60°'lik konik zımba ile DG testi yapılmıştır (Şekil 1.10). Elde edilen sonuçlara göre delik genişletme benzetiminde kesilen yüzeyde ön hasar dikkate alınmalıdır. Delik kenarının çok iyi olduğu modelde genellikle tahmin edilen delik genişletme oranı başarısız olmaktadır. DP 780 için 6 mm, 10 mm ve 14 mm olan delik çaplarından en yüksek delik genişletme oranı 10mm'de sağlandığı görülmüştür. Diğer taraftan ise hasar ile karşılaştırıldığında bükülmenin kenar flanş oluşturulabilirliği üzerindeki etkisi daha az olduğu saptanmıştır. Ayrıca yeni benzetim modelinin deneysel çalışmalarla tutarlılık gösterip delik genişletme testi sırasında kenar flanş oluşturulabilirliğinin tahmininde efektif olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1.10 : İki farklı kesme boşluğunda (% 6,43-12,86) deneysel delik genişleme oranı ile delik çapı arasındaki ilişki.

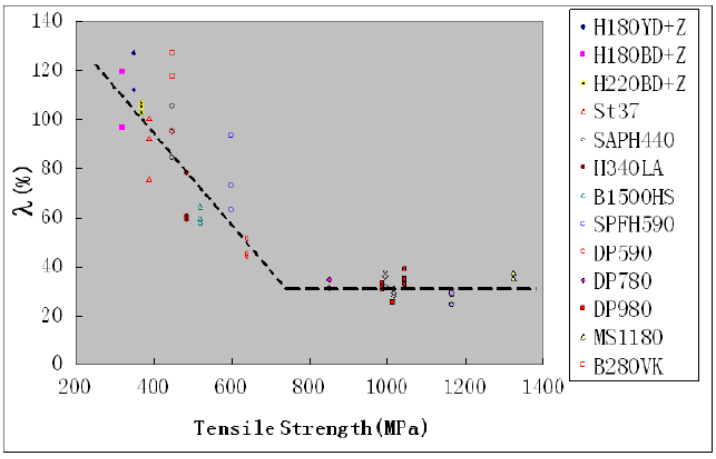
DG testinin uygulanması esnasında, deliğin zımba ile delinmesi sonucu oluşan çapağın yönü de test sonucunu etkilediği gösterilmiştir. Li J. ve diğ. [11] deneysel çalışmalarda, çapağın şişirme zımbası yüzeyine temas etmesi durumunda, etmemesi durumuna göre daha yüksek DG oranı elde edildiği görülmüştür. Sartkulvanich P. ve diğ, yaptığı [14] çalışmada ise konik zımba için dış kenarın her zaman daha büyük germeye sahip olduğu, yukarı yönde çapak durumunda kırılma bölgesinin dış çapta ve aşağı yönde çapağa göre daha erken olduğu saptanmıştır (Şekil 1.11). Küresel zımbada, kesilmiş kenarlar boyunca hasar değerlerinin daha düzgün dağılımı sağlanmış olup bu nedenle bu zımba geometrisinin DG oranı üzerindeki çapak etkisinin daha az önemli olduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.11 : Aşağı ve yukarı çapak oryantasyonu için konik zımba ile delik genişletme simülasyonu.

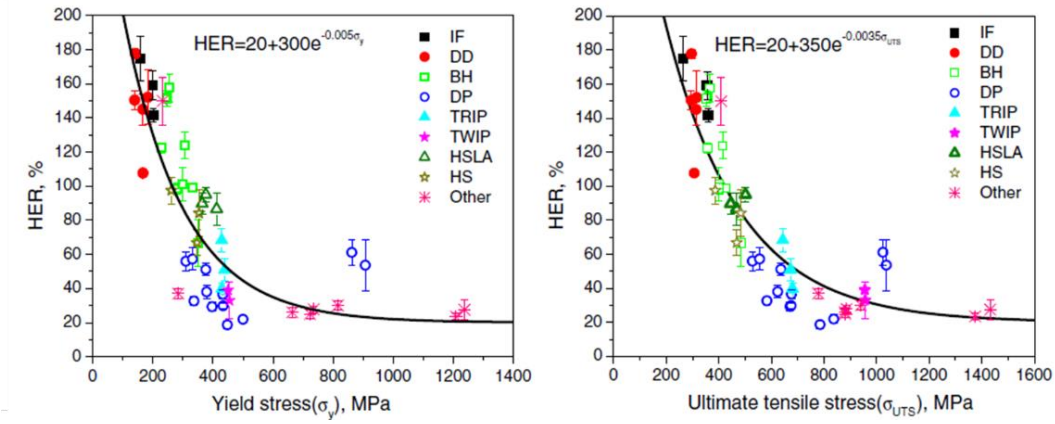
1.1.2 Farklı mekanik özelliklerin DG üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar

X, Chen ve diğ. [16] kenar çatlak eğilimini değerlendirmek amacıyla farklı kalınlık ve mekanik özelliklere sahip sıcak veya soğuk haddelenmiş 15 çelik türü için ISO 16630-2009 standartlarına göre DG testi yapmışlardır. Stereo mikroskop ile delik kenar morfolojileri incelenerek çatlak oluşumu değerlendirilerek her bir kalitedeki numuneler için validasyon testleri yapılarak ortalama çap değerlerinden delik genişletme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 640 MPa'nın altındaki çekme mukavemeti değerlerinde delik genişletme oranı, çekme mukavemetinin artmasıyla doğrusal olarak azaldığı, 840 MPa'nın üstündeki çekme mukavemeti değerlerinde ise bu oranların mukavemet artmasıyla birlikte % 30-40 civarlarında sabit olduğu görülmüştür (Şekil 1.12).



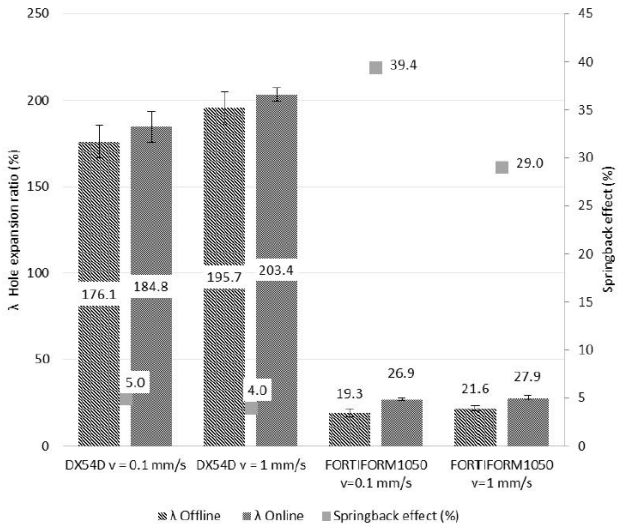
Şekil 1.12 : Test edilen numunelerin DG oranı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişki.

Benzer şekilde mekanik değerlerin test sonucu üzerindeki etkisini görmek amacıyla Paul S.K. da [17] mevcut deneysel ve yayınlanan çalışmalardan toplanan veriler ile farklı çekme özelliklerinin DG oranı üzerindeki etkisi incelemiştir. Ekstra derin çekilebilir (EDD) çelik üzerinde gerçekleştirilen sonlu eleman simülasyon çalışmaları, delik genişletme sırasında deliğin kenarında tek eksenli çekme deformasyonun olduğunu doğrulamaktadır. DG oranının akma gerilmesi, maksimum çekme gerilmesi, anizotropi katsayısı, toplam uzama ve boyun verme bölgesindeki birim uzama ile iyi korelasyona sahip olduğu, ancak pekleşme üssü, uniform uzama, maksimum çekme gerilmesi / akma gerilmesi oranı ve ortalama plastik modül ile belirgin bir korelasyonunun olmadığı görülmüştür (Şekil 1.13). Maksimum çekme gerilmesi, normal anizotropi katsayısı ve toplam uzama için doğrusal olmayan regresyon denklemi oluşturulmuştur.



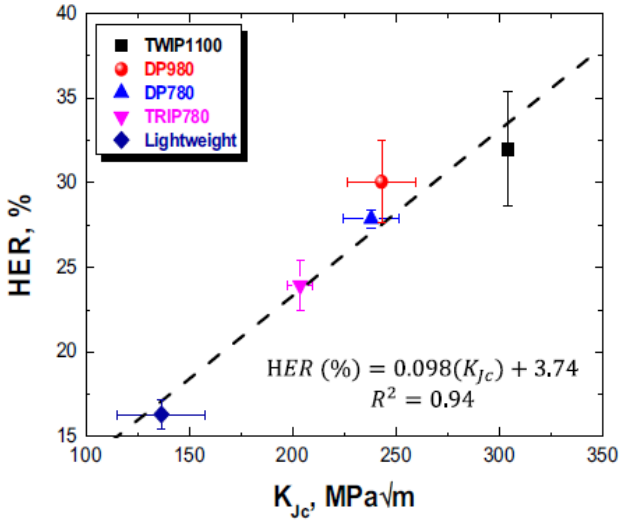
Şekil 1.13 : DG oranı ile akma gerilmesi ve maksimum çekme gerilmesi arasındaki korelasyon.

Zubia B. ve diğ. [18] düşük karbonlu DX54 ile 3. Nesil Fortiform1050 çeliklerinde geri yaylanmanın delik genişletme oranı üzerine etkisini yeni bir ölçüm tekniği ile analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar geri yaylanmanın delik genişletme oranının karakterizasyonunda kritik bir etkisi olduğunu, özellikle 3.nesil çelikte DG oranında % 40 mertebelerinde farklılığa neden olabileceğini göstermiştir (Şekil 1.14).



Şekil 1.14 : Delik genişletme oranları.

Yoon J.I. ve diğ. [19] AHSS çeliklerde kırılma tokluğunun delik genişletme oranını yöneten bir faktör olduğunu göstermek için çalışmalar yapmışlardır. Çok çeşitli AHSS'lerin mekanik özellikleri ile flanş oluşturulabilirliği arasındaki korelasyon, DG, çekme ve kırılma tokluğu testleri kullanılarak araştırılmıştır. Çekme testi sonuçları, çeşitli AHSS numunelerinde her bir parametrenin birincil olarak DG oranı ile ilişkili olmadığını göstermektedir. Bunun nedeni muhtemelen güçlü çatlak başlatma yerleri olarak hareket eden mikro çatlakların bir delme işleminden sonra oluşmasıdır. Böylece kırılma tokluğunun artmasıyla delik kenarındaki çatlak başlangıçları gecikebilir ve bu da kalınlık yönü boyunca çatlak yayılmasını geciktirerek artan DG oranı değerlerine yol açar. Yapılan çalışma ile ilk defa DG oranı ile kırılma tokluğu ilişkilendirilip doğrulanmıştır (Şekil 1.15).

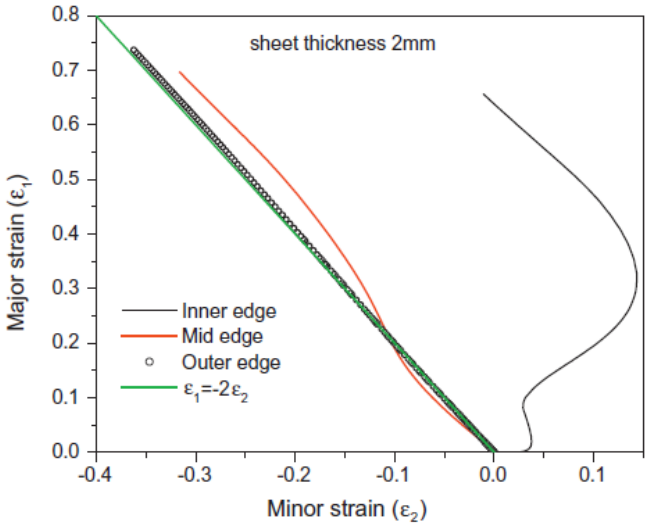


Şekil 1.15 : Konik zımba kullanılan yapılan DG testinden elde edilen DG oranı ile kırılma tokluğu arasındaki korelasyon.

1.1.3 Kırılma kriteri, akma fonksiyonu, hasar modeliyle ilgili yapılan çalışmalar

DG testi ile benzetim yapmak, malzeme modelinin etkisi ortaya koymak ve test malzemesi için uygun anizotropik akma fonksiyonunu belirlemek için birtakım farklı geometrilerde deneysel testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analiziyle desteklenerek sonuçlar arasında korelasyon kurulmuştur [20-36].

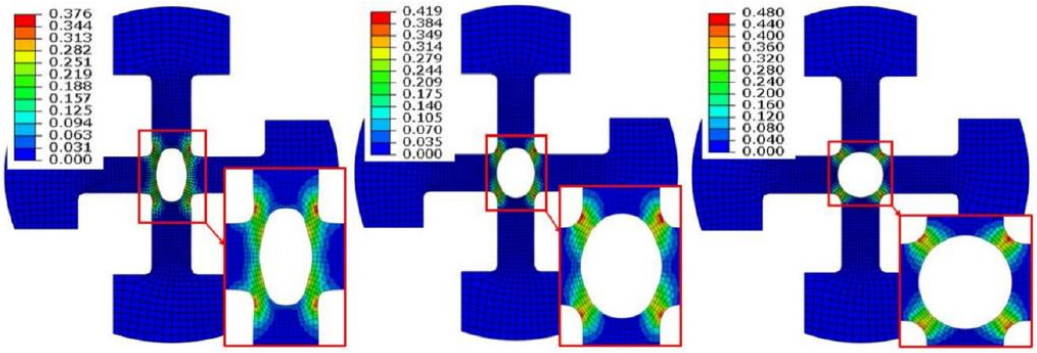
S. K. Paul ve diğ. [20] tek eksenli çekme özelliklerinden, çelik sacların delik genişletme oranlarını deneysel olarak karakterize edip analitik olarak tahmin etmek amacıyla 6 farklı çelik türünde çalışmalar yapmışlardır. Bu doğrultuda 10 mm çapındaki deliğe genişletme işlemi yapılmış ve delik genişletme oranını tahmin etmek amacıyla kırılma kriteri uygulanıp sac kalınlığı boyunca çatlak oluşumuyla test durdurulmuştur. Ayrıca konik zımbayla genişletme sırasında delik kenarlarında oluşan deformasyon modlarını anlamak için dört nodlu elemanlar kullanarak ABAQUS yazılımı ile sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre deneysel ve analitik testlerin sonuçları arasında bir korelasyon kurulmuştur. Deformasyonun delik kenarlarında yoğunlaştığı görülüp delik kalınlığının orta ve dış kenar bölgelerindeki deformasyon alanının saf tek eksenli gerilmeler içerdiği saptanmıştır (Şekil 1.16). Ayrıca analiz sonuçlarından delik iç kenarındaki çevresel şekil değişimi ile delik çapındaki artış arasında direk bir korelasyon olduğu görülmüştür.



Şekil 1.16 : Çelik 2 için delik genişletme simülasyonu sırasında temel gerinim geçmişleri.

K. Hashimoto ve diğ. [21] yüksek mukavemetli sac çeliklerin delik genişletme sonlu elemanlar benzetiminde malzeme modelinin etkisini ortaya koymak amacıyla test sırasındaki deformasyon davranışı üzerine 780 MPa çekme mukavemetine sahip çift fazlı malzeme kullanarak deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Malzeme için uygun anizotropik akma fonksiyonunu belirlemek amacıyla malzeme elastik-plastik deformasyon davranışı ıstavroz tip (cruciform) numuneden çift eksenli çekme testi ile ölçülmüştür. Seçilen Yld2000-2d fonksiyonu kullanılarak şekillendirme benzetimleri yapılmıştır. Yapılan deneysel ve analiz sonuçları ile bunların karşılaştırılmasından elde edilen verilere göre Yld2000-2d akma fonksiyonunun 780 MPa çekme mukavemetine sahip çift fazlı sac çeliklerde plastik iş sınırları ve plastik deformasyon hızı oranlarının yönlerinin tekrar üretilmesi için doğru seçim olduğu saptanmıştır. Bu akma fonksiyonu genişleyen delik boyunca gözlemlenen kalınlık dağılımı ile de tutarlılık göstermektedir.

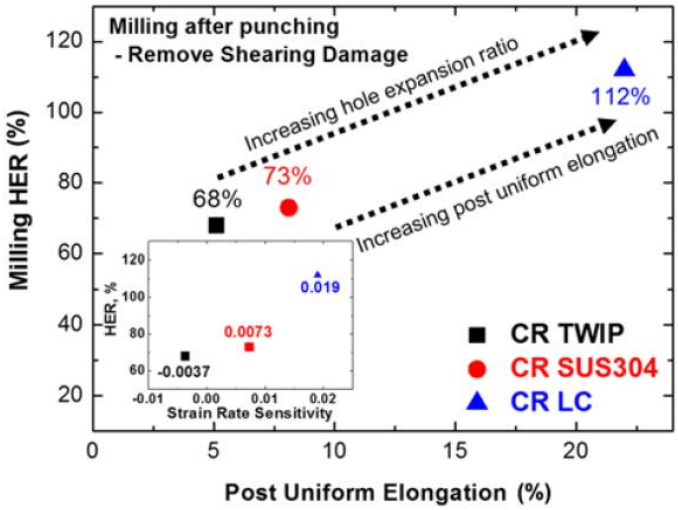
Nikhare C.P. de [22] malzeme limitlerini gözlemlemek için delik olan ıstavroz tip numune kullanarak delik genişletme testini araştırmıştır. Üç deformasyon modu (tek eksenli, iki eksenli, düzlem gerinim) sağlamak için numune kollarından çekilmiştir. Üç deformasyon modu için de kritik elemanlardaki gerinim gelişimi için analizler yapılmış ve bütün proses için delik genişlemesi de izlenmiştir (Şekil 1.17). Sonuçlardan kritik elementin şekillendirme sınırını, delik genişletmenin ise malzeme kırılma davranışını öngördüğü gözlemlenmiş ve bir adet kırılma limit tahmini için araç bulunmuştur.



Şekil 1.17 : Tek eksenli(sol), düzlemsel(orta) ve iki eksenli(sağ) hasar eşiğini gösteren simüle edilmiş numune.

Paul S.K. [23] sac metalin flanşlama prosesi esnasındaki kenar çatlaklarını incelemek için DG ve çekme testi yaparak her iki test içinde sonlu elemanlar analizi yaparak karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda delik genişletme testinde merkezdeki delik kenarında oluşan gerilme tek eksenli olduğu görülmüştür. Bir çekme testi numunesinde gerinim/deformasyon oranı numune genişliği boyunca boyun vermeye başlamadan önce uniformdur. Ancak sonlu eleman araştırmaları sonucunda delik genişletme testi numunesinde bu oranın belirgin olarak değiştiği saptanmıştır. Delik genişletme test numunesinde merkezdeki delik kenarı olmak üzere sadece bir adet serbest kenar bulunmaktadır. Bu iki etki sebebiyle delik genişletme oranı tek eksenli çekme toplam uzamasından daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Yoon J.I. ve diğ. [25] deliğin genişleme oranını yöneten faktörler çekme ve delik genişletme testleri vasıtasıyla araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda delik genişletme testi sırasında delik kenarında oluşan gerilme durumunun neredeyse tek eksenli çekme testiyle aynı olduğu görülmüş ve bu nedenle çelik sac numunelerinin gerçek bir delik genişletme oranını değerlendirmek için, delik genişletme numunesi örneğinin ilk deliği delme işleminden sonra frezeleme işleminden geçirilerek mevcut delik kenarı bölgesinde biriken kesme hasarı ve mikro boşluklar bertaraf edilmiştir. Çalışma sonucunda esas delik genişletme oranının uniform uzama ve deformasyon hızı duyarlılık üstü ile orantılı olduğu saptanmıştır (Şekil 1.18).

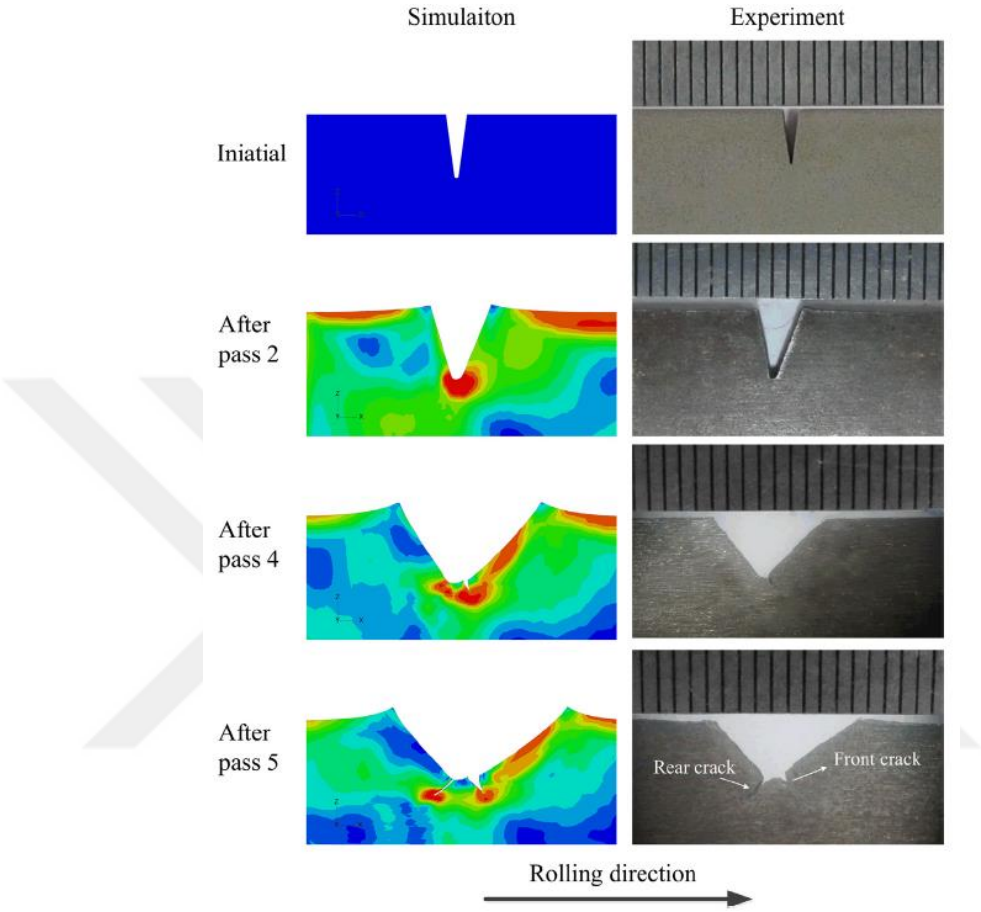


Şekil 1.18 : Frezelenmiş numune DG oranının deformasyon hızı duyarlılık üssü ve boyun verme bölgesindeki birim uzama ile ilişkisi.

Yu X. ve diğ. [32] bu çalışmada sac metalin delinmesinin, kenar flanş oluşturulabilirliğinin bozulması üzerindeki etkilerini değerlendirmek için nicel bir yöntem (Etkili hasar gerinim oranı) sunmuşlardır. Etkili hasar gerinim oranının büyüklüğü zımba ile delme prosesinin neden olduğu kenar kusuruna karşılık gelen M-K modelindeki kusurluluk değerine bağlıdır. Bu yönteme dayalı olarak, çatlak ve anizotropinin kenar flanş oluşturulabilirliğinin bozulmasına etkisini araştırmak için sayısal çalışmalar yapılmıştır. Farklı r (anizotropi katsayısı) and Δr (anizotropi katsayısındaki değişim) anizotropi aralıkları altındaki simülasyon sonuçları, daha düşük anizotropi katsayılı malzemelerin kenar flanş oluşturulabilirliğinin bozulmasının kenar ön hasarına daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca enine anizotropik malzemelerde, çatlakların sac levha içinde en düşük r değerine sahip yön boyunca oluşmaya meyilli olduğu görülmüştür. DP çeliklerde yapılan testler ile sonuçlar doğrulanmış ve ilk çatlak oluşum yerleri simülasyon sonuçları ile örtüşmüştür.

Q. Sun ve diğ. [33] Nahshon ve Hutchinson tarafından önerilen kesme hasar mekanizması ile birleştirilmiş GTN hasar modelini, çok geçişli soğuk haddeleme altında kenar kusurlu çelik sacın sünek hasar ve kırılma davranışını analiz etmek için kullanmışlardır. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile tutarlılığının doğrulamak için kenar çentikli silisyum ile alaşımlandırılmış çeliğin soğuk haddeleme deneyleri deneysel bir haddehanede gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, beş geçişten sonra çentik ucunda iki çatlak bulunduğunu ve deneysel veriyle iyi bir şekilde

uyuşan yuvarlanma yönüne 45° ve 135° civarında bir açı ile uzandığını göstermektedir (Şekil 1.19). Çentik şeklinin ve boyutunun, çentik ucu etrafındaki çatlakların başlangıcı üzerindeki etkileri araştırılmış ve bazı önemli sonuçlar çıkarılmıştır.



Şekil 1.19 : Çok geçişli haddeleme sonrasında deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

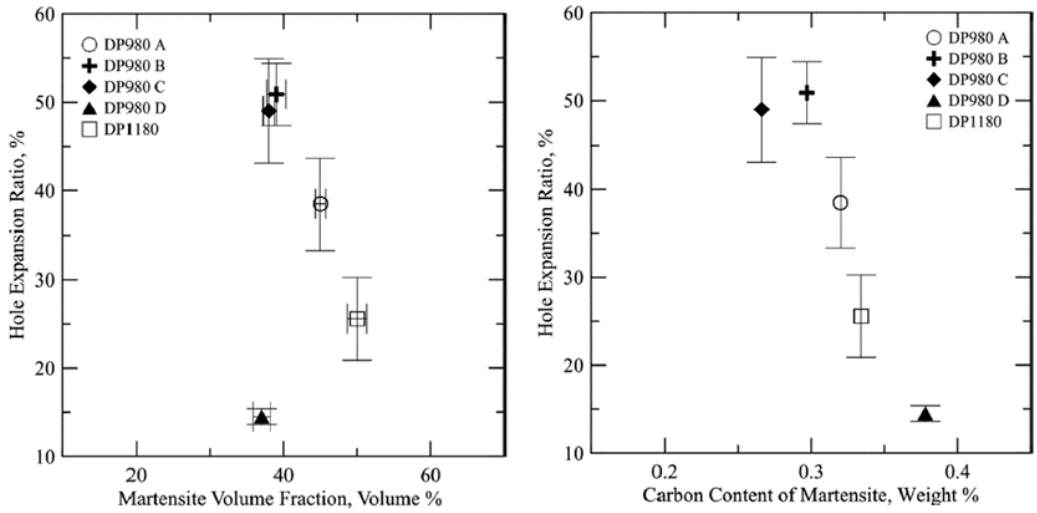
1.1.4 Mikro yapının DG üzerine etkisi ile ilgili çalışmalar

Günümüzde kullanmakta olan çeliklerin mikro yapılarının, tane yapısına göre çatlak oluşumu ve ilerlemesinin değişik nitelik göstermesinden dolayı delik genişletme oranı üzerinde de etkisi olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda mikro yapısında farklı özellikte ve hacimsel yoğunlukta tanecik içeren çeliklerle ilgili deneysel çalışmalar da yapılmıştır [37-42].

Yang K.C. ve diğ. [37] bu çalışmada mikro yapısı neredeyse tamamen beynit, az miktarda ferrit ve martenzit-östenit taneler içeren çelik üzerine çalışıp delik genişletme testi yapmışlardır. Modifiye edilen bu tek fazlı çelik, çift fazlı DP 980 ile

karşılaştırıldığında aynı çekme mukavemetine sahip olduğu ancak daha yüksek akma mukavemeti ve delik genişletme oranı elde edildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar, mikro yapıdaki ferrit miktarının azaltılmasının delik genişletme oranını arttırmak için matris homojenitesini arttırdığı; ayrıca daha düşük beynit dönüşüm sıcaklığı ve düşük karbon içeriğinin daha düşük M/A (martenzit-östenit) bileşeninden dolayı delik genişletme oranını arttırdığı saptanmıştır.

Bir diğer çalışmada Terrazas O.R. ve diğ. [39] kesilmiş kenar şekillendirilebilirliğine mikro yapının etkilerini delik genişletme testi yaparak incelemişlerdir. Eşit çekme mukavemetli ancak 5 farklı mikro yapı konfigürasyonunda ticari DP çelikler kullanılmıştır. Martenzit boyutu, ortalama serbest mesafe, birim alandaki koloni sayıları kantitatif stereolojik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarına bakıldığında DG oranının martenzit koloni sayısı arttıkça arttığı, çelik karbon içeriği arttıkça ise azaldığı görülmüştür (Şekil 1.20). Ayrıca DG oranı ince, eşit dağılmış martenzit dağılımı ile de artmaktadır.



Şekil 1.20 : Martenzit hacim fraksiyonunun ve karbon içeriğinin bir fonksiyonu olarak delik genişletme oranı.

1.2 Tezin Amacı

Literatürde yer alan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde DG test sonuçları üzerinde, malzemenin mekanik ve yapısal özellikleri ile delme boşluğu, delme metodu, zımba geometrisi gibi proses/test parametrelerinin etkili olduğu anlaşılmaktadır. Test sürecinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesine yönelik çalışmalarda da akma fonksiyonu, kırılma kriteri gibi

kavramlar irdelenmiş, kesilmiş delik kenarının deformasyon davranışlarına yönelik çeşitli çıkarımlar ortaya atılmıştır. Bu çıkarımlar, malzemenin mekanik özellikleri ile %DG oranı arasında direkt bir korelasyon bulunmadığı ve deney sırasında uygulanan deformasyon halinin "tek eksenli çekme" ile benzeştiği noktasında mutabıktır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, DG testlerinden kalıpta kesilmiş veya delinmiş kenarların ikincil şekillendirme süreçlerinde sergiledikleri performansın karşılaştırılmasına yönelik nitelikli bir veri elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Bu sayede gerek malzemelerin ve gerekse kesme veya delme sürecinde kullanılan proses parametrelerinin şekillendirme üzerindeki etkilerinin araştırılması ve en-iyilenmesi mümkün gözükmektedir. Diğer taraftan DG testlerinin uygulanmasında kullanılan ISO 16630 standardı bir operatörün çatlağın gelişimini izleyerek çatlak boyunun sac malzeme kalınlığına ulaştığında testi durdurmasını ve delik çapının ölçülmesini önermektedir. Bu yaklaşım temelde, basit ve kolay uygulanabilir bir yöntem gibi görülse de, testin farklı kişiler, test makineleri tarafından uygulanması sırasında belirgin bir saçılımın ortaya çıkmasına neden olduğu görülmektedir. Bu problemin çözümlenmesine yönelik olarak geliştirilen, dijital görme yaklaşımları deneylerin tekrar edilebilirliğinin iyileştirilmesinde belirgin bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Ancak, dijital görme yaklaşımları kalın ve delik genişletme oranı yüksek malzemelerin test edilmesi sırasında ve ince malzemelerin çatlak oluşturma yakınlıklarının yüksek olması durumunda kullanılması durumunda önemli oranda hata yapma potansiyeline sahiptir. Bu problem kalın saclarda, kalınlık boyunca oluşan çatlakların birden fazla ve kesit boyunca farklı bölgelerde oluşuyor olmasında kaynaklanmaktadır. İnce sac malzemelerde ise, çatlağın ilerlediği kesme yüzeyi kameranın görüş açısında girmeden (flanş oluşumu tam gerçekleşmeden) çatlak boyunun sac malzeme kalınlığına ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, DG testlerinin durdurulmasında kullanılan yaklaşımın geliştirilmesinin gerekli olduğunu göstermektedir.

Yukarıda ifade edilen eksikliklere istinaden bu tez çalışmasının temel amacı delik genişletme testlerinin durdurulması için kuvvet deplasman eğrisinin test sırasındaki değişimlerinin izlenmesi ve eğri karakteristiğinin deformasyon sürecindeki değişimler ile eşleştirilmesidir. Bu hedefin sağlanması halinde de delik genişletme testlerinin numunenin izlenmesine gerek kalmadan durdurulmasına yönelik bir yaklaşımın ortaya konulması amaçlanmıştır. Bunun çerçevede, yüksek mukavemetli

çelik sac malzemelerinden temin edilen ince ve kalın numunelerin hem kesilmesi hem de test edilmesi sürecinde uygulanan bütün deformasyon adımları deneysel ve hesaplamalı yöntemler kullanılarak sistematik olarak incelenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Yapılan deneysel çalışmalarda izlenen deneysel yöntemler aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir.

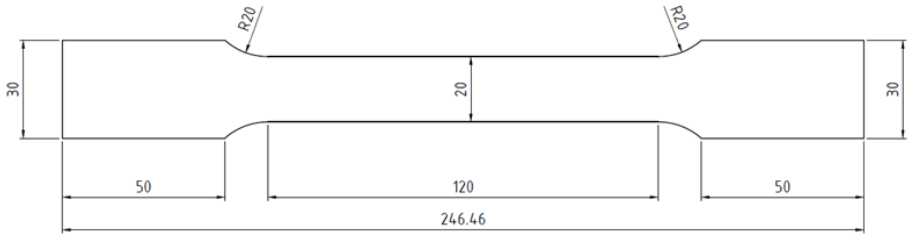
2.1 Kullanılan Çeliğin Kimyasal Bileşenleri, Mekanik Özellikleri ve Mikro Yapısı

Tez çalışması kapsamında, otomotiv sektöründeki geniş uygulama alanına sahip olan çift fazlı DP 780 çelik kullanıldı. Bu çelikten soğuk haddeleme yöntemi ile 1,00 mm ve 1,80 mm kalınlıkta üretilmiş malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Malzemelerin kimyasal bileşenleri.

Malzeme	C	Si	S	P	Mn	Al	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti
DP 780 / t: 1.00 mm	0.135	0.199	0.001	0.018	2.093	0.022	0.013	0.234	0.013	0.017	0.003
DP 780 / t: 1.80 mm	0.132	0.194	0.002	0.017	2.051	0.023	0.013	0.240	0.012	0.017	0.002

1,00 mm ve 1,80 mm kalınlığındaki sacların temel mekanik özellikleri, akış diyagramları ve düzlemsel anizotropi değerlerinin belirlenmesinde Zwick Z250 cihazında çekme deneyleri yapıldı. Oda sıcaklığında ve 0,004 s^{-1} deformasyon hızında uygulanan deneyler, hadde yönüne göre 0º - 45º - 90º doğrultularında kalıpta kesildikten sonra kenarları zımparalanıp ISO 6892-1 standardına uygun numuneler kullanılarak uygulandı (Şekil 2.1). Çekme deneylerinden elde edilen verilerden, iki farklı kalınlıktaki DP 780 çeliğin gerçek gerilme- gerçek birim uzama eğrileri ile temel mukavemet değerleri belirlendi. Sonuçların tekrar edilebilirliğinin anlaşılması için her durum için en az 3 test yapılıp elde edilen sonuçların ortalaması ve standart sapması hesaplandı.



Şekil 2.1 : Çekme deneyi numunesi boyutları.

Mikro yapısal incelemeler, hadde doğrultusuna paralel yönde çıkarılan numunelerin standart metalografik numune hazırlama prosedürlerinden geçirildikten sonra % 2'lik Nital çözeltisinde dağlanıp Leica DMRX model optik mikroskop ile görüntülenmesi ile yapıldı.

2.2 Zımba ile Delinmiş Delik Kenarının Karakterizasyonu

Delik delme işlemi sırasında numunenin maruz kaldığı deformasyon nedeniyle meydana gelen mikroyapısal değişimlerin incelenmesi için delinmiş numunelerden alınan kesitler metalografik hazırlık işlemlerinden geçirildikten sonra %2 Nital çözeltisinde dağlandıktan sonra AXIO Imager M2m mikroskobu kullanılarak görüntülendi. Alınan görüntüler üzerinden kayma-kopma bölgelerine ait karakteristik büyüklükler ölçüldü.

2.3 Delik Genişletme Testi ve Kullanılan Ekipmanlar

Delik genişletme testinde kullanılacak olan farklı kalınlıktaki iki malzemeden ilk olarak 100 mm x 100 mm ebatlarında 3'er adet numune giyotin makas ile kesildi. Kesilen numunelerin merkezine ISO 16630 delik genişletme testi standardında belirtilen kesme boşluğu aralığında (%12±1) 10 mm çapındaki delik, 60 ton kapasiteli eksantrik pres ile delindi (Şekil 2.2). Buna göre, 1,00 mm kalınlığındaki malzemeler için 10,24 mm, 1,80 mm kalınlığındaki malzemeler için ise 10,40 mm çapındaki kesme matrisi kullanıldı.



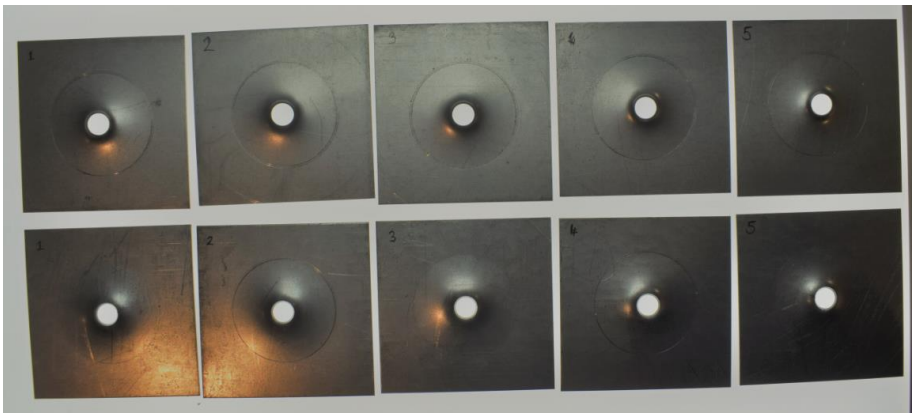
Şekil 2.2 : 10 mm çapındaki deliklerin delindiği eksantrik pres.

Merkezlerinde 10 mm çapında delik bulunan numunelerde, 600 kN kuvvet kapasitesinde, hassas strok sensörlerine sahip servo-hidrolik test ekipmanı kullanılarak delik genişletme testi gerçekleştirildi (Şekil 2.3). Testler ISO 16630 standardı gereği 60º konik zımba ile 0,75 mm/s hızda, yağlama işlemi olmadan yapıldı (Şekil 2.4).



Şekil 2.3 : DG testinin yapıldığı test ekipmanı.

Yapılan testler, genişletme zımbasıyla aynı eksende olup ekipman üzerinden genişletme bölgesine dik olarak konumlandırılmış olan yüksek çözünürlüklü kamera ile takip edildi ve aynı zamanda her bir numunenin test sürecinin video görüntüsü kaydedildi.



Şekil 2.4 : DG testi yapılan numuneler.

Her bir test sırasında zımbaya etki eden kuvvet (F) ve zımba stroğu verileri (x) kaydedildi. Testler, ISO 16630'a göre, malzeme kalınlığı boyunca çatlak oluşumunun gerçekleştiği anda durduruldu. Test sonrası her bir numune için delik çapları dijital kumpas ile ölçülerek Denklem 1.1'e göre delik genişletme (%) oranı hesaplandı. Elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğinin değerlendirilmesi için aynı koşuldaki testler en az üç kez tekrarlanarak elde edilen sonuçların ortalaması ve standart sapması hesaplandı.

Delik genişletme testi yapılmış olan numuneler, genişletme testi sonunda numune kalınlığındaki değişimi saptamak ve tane yönelimlerini görmek amacıyla AXIO Imager M2m mikroskobu kullanılarak incelendi. Kesildikten sonra bakalite alınan numunelere metalografik numune hazırlama prosedürü uygulanarak kalınlık ölçümü yapıldı. Hazırlanmış olan bakalit %2 Nital çözeltisinde dağlandıktan sonra şekillendirme sonrası gerçekleşen tane yönelim ve uzamaları, çatlak oluşumları ZEISS EVO50 SEM cihazı kullanılarak görüntülendi.

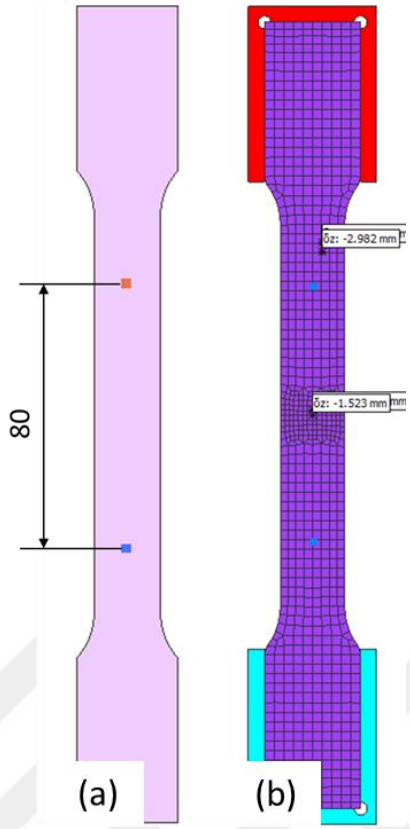
2.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Modeli

Çalışma kapsamında yapılan deneysel testlerin simülasyonlarını içeren SEY modelleri oluşturuldu. Söz konusu modellerin oluşturulmasında MSC Simufact yazılımı, çözdürülmesinde MSC Marc yazılımı kullanıldı. İncelenen konulardan çekme deneyi, zımba ile kesme prosesi ve DG testi olmak üzere her biri için ayrı modeller kullanıldı. Çekme deneyi ve zımba ile kesme prosesinden elde edilen veriler DG testi modeline girdi olarak aktarıldı.

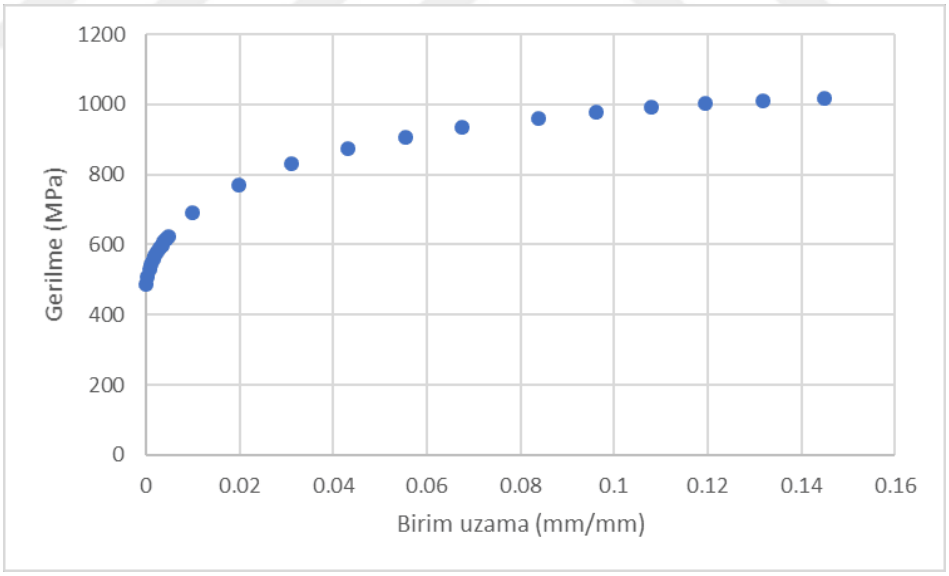
Çekme deneyi için oluşturulan iki boyutlu SEY modeli ve ağ yapısı Şekil 2.5'te verilmiştir. SEY modelinde numunenin her iki ucu için yapışmış temas (glued contact) tanımlandı. Köşelerin üst üste binmesinden dolayı oluşabilecek tekilliklerin önüne geçmek için köşe bölgelerde boşaltmalar yapıldı. Numune üzerinde Şekil 2.5' de görüldüğü gibi aralarındaki mesafe 80 mm olan iki nokta tanımlandı. Test sırasında numunenin üst tarafı yukarı doğru çekilmekte olduğu için tanımlanan iki noktanın deformasyon hızları birbirinden farklı olmaktadır. Bu doğrultuda eğrideki kuvvet değerleri direkt olarak alınırken deplasman değerleri tanımlanmış olan iki nokta arasındaki mesafenin değişiminden hesaplandı. Malzeme modeli olarak DP 780 malzemenin mekanik karakterizasyonundan elde edilen gerçek akış eğrisi oluşturulan modelde tanımlandı (Şekil 2.6). Malzemeye ait elastisite modülü 216 GPa olarak deneysel çekme test sonucundan hesaplandı. Poisson oranı 0,3, malzeme yoğunluğu ise 7,85 gr/cm³ olarak programda tanımlandı. Analizler 20ºC ortam sıcaklığında gerçekleştirildi. Eğrinin çekmeden sonraki davranışını belirleyebilmek için hasar mekanizması kurgulandı ve Cockroft-Latham yaklaşımıyla Denklem 2.1'de verilen formül kullanılarak hasar eşiği 0,5, eleman silme eşiği ise 0,45 olarak belirlendi.

$$\int \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} \dot{\bar{\varepsilon}}\, dt \geq C \qquad (2.1)$$

SEY modellerinde 3,0 mm boyutlarında düzlem gerilme elemanları kullanıldı. Quad (dörtgen) elemanlardan oluşan bir ağ yapısı örüldü. Deformasyon sırasında ortaya çıkabilecek çarpılmaların engellenmesi için Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi numune kenar bölgelerinde 3,0 mm olan eleman boyutu kırılmanın olması öngörülen numunenin orta kısmındaki incelme bölgesinde 1,5'e düşürüldü. Ayrıca, kırılma anının daha yüksek doğrulukla yakalanabilmesi için artan gerinim değişimi değeri 0,05 olarak tanımlandı. Bu sayede, çatlarken bir elemandaki gerinimin 0,05'den büyük olması durumunda bir sonraki zaman adımına geçilerek elemanların çatlama anında kararlı kalabilmesi sağlandı. Bileşenler arasında herhangi bir sürtünme söz konusu olmadığı için sürtünme katsayısı tanımlanmadı.



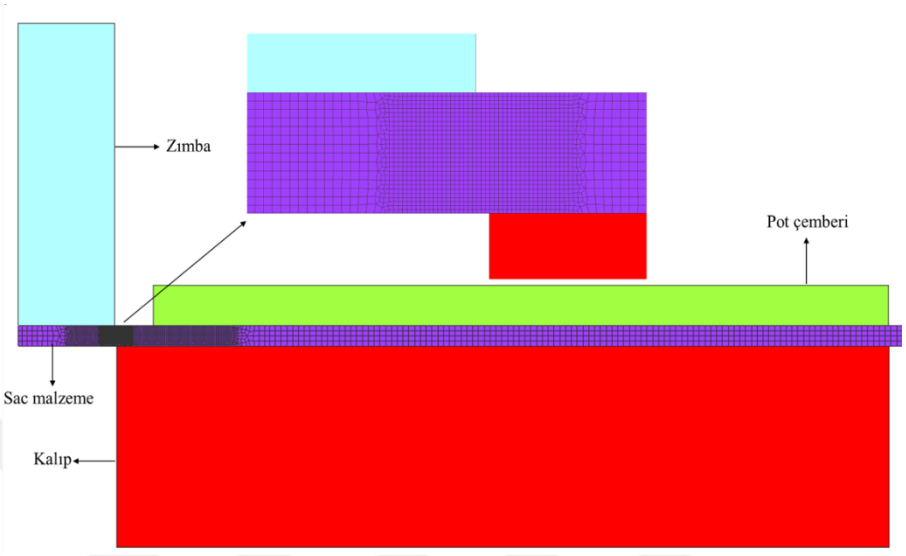
Şekil 2.5 : (a) Çekme deneyi SEY modeli, (b) Ağ yapısı ve eleman boyutu.



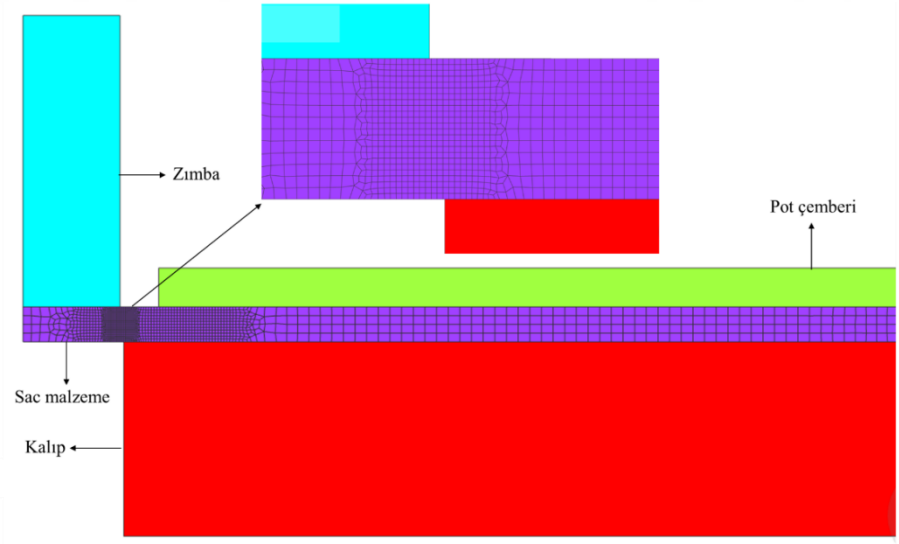
Şekil 2.6 : SEY modelindeki elemanların akış eğrisi.

Zımba ile kesme prosesi için iki boyutlu eksenel simetrik bir model oluşturuldu. Element tipi olarak Quad (dörtgen) kullanıldı. 0,3 mm olan eleman boyutu, ağ yapısında meydana gelebilecek olan çarpılmaların önlenmesi için bölgesel ağ inceltmeleri uygulanarak kesme bölgesine doğru sırasıyla 2^{-1} ve 2^{-2}oranlarında

azaltıldı. Ayrıca proses sırasında oluşabilecek olan bu çarpılmaların daha sonraki zaman adımlarında neden olabileceği problemlere dair yeniden ağ örme algoritması uygulandı. Buna göre kesme prosesi için gerinim değeri 0,1'i aştığında yeniden ağ örme yapıldı. Kesme 1 mm/s hızda ve sürtünme katsayısı 0,15 olarak kabul edilerek gerçekleştirildi.

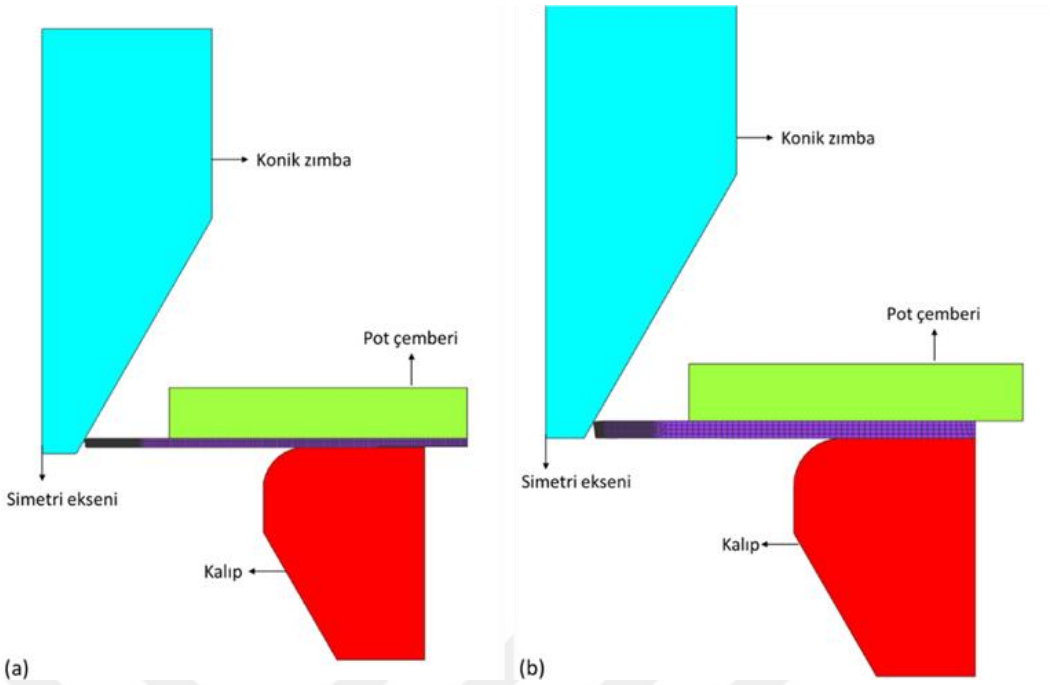


Şekil 2.7 : 1,00 mm kalınlıktaki malzeme için zımba ile kesme prosesi SEY modeli ve ağ yapısı.



Şekil 2.8 : 1,80 mm kalınlıktaki malzeme için zımba ile kesme prosesi SEY modeli ve ağ yapısı.

Delik genişleme testinin SEY modeli de aynı malzeme model ve parametreleri kullanılarak yapıldı. Test hızı 0,75 mm/s alınarak deneysel test ile aynı hızda gerçekleştirildi.



Şekil 2.9 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki malzeme için DG prosesi SEY modeli ve ağ yapısı, (b) 1,80 mm kalınlıktaki malzeme için DG prosesi SEY modeli ve ağ yapısı.

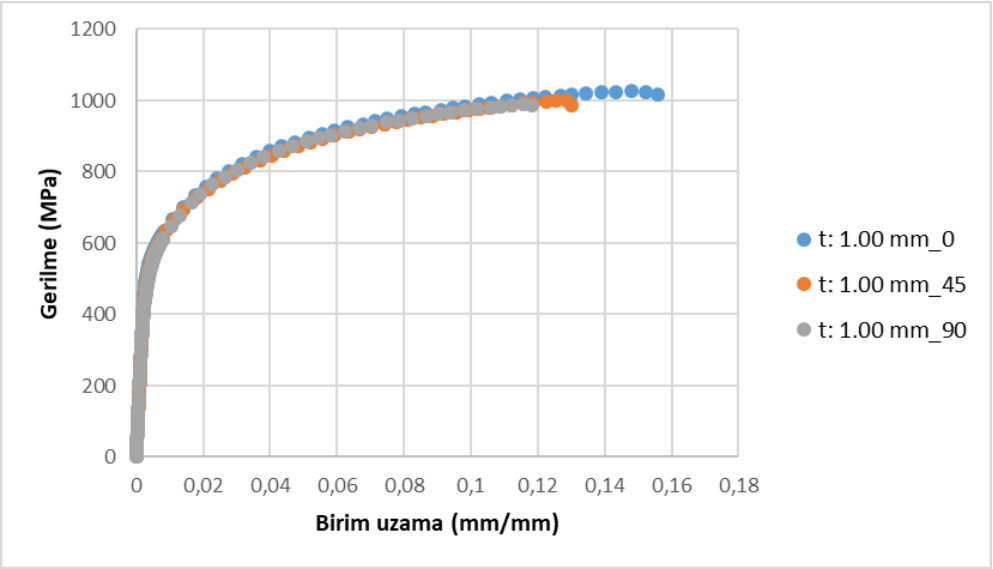
3. BULGULAR

3.1 Mekanik Özelliklerin ve Mikro Yapının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

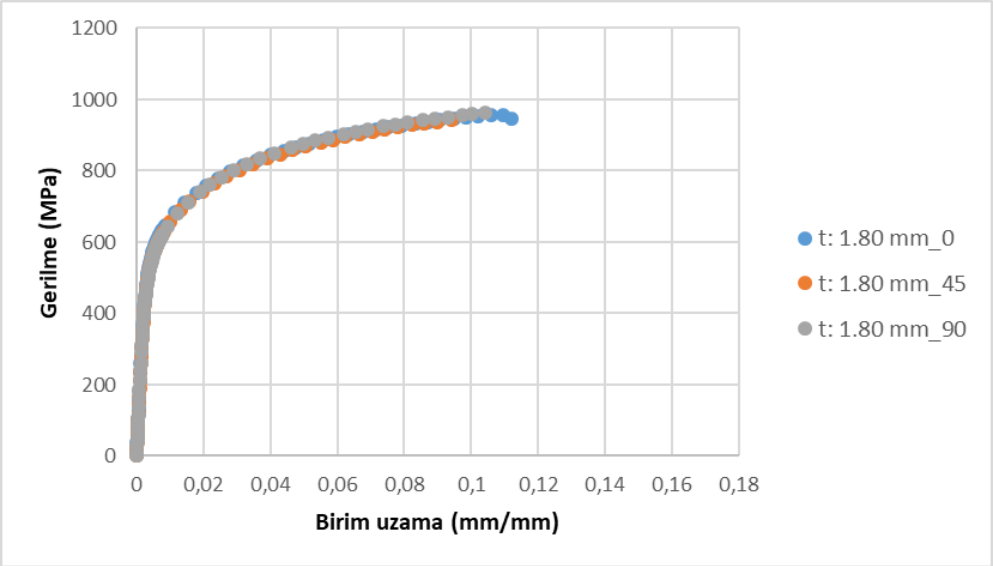
İki farklı kalınlıktaki malzemenin hadde yönüne göre 0º - 45º - 90º doğrultularındaki çekme deneyi sonuçlarının ortalaması ve standart sapmaları Çizelge 3.1'de, 1,00 mm kalınlığındaki malzemeye ait gerçek gerilme-birim uzama eğrisi Şekil 3.1'te, 1,80 mm kalınlığındaki malzemeye ait gerçek gerilme-birim uzama eğrisi ise Şekil 3.2'da verilmiştir. İki farklı kalınlıktaki malzemeye ait mekanik özellikler incelendiğinde, çekme ve akma dayanımları ile n değerlerinde önemli bir farklılığın olmadığı, kalınlığı 1,00 olan malzemenin uniform uzamasının kalınlığı 1,80 mm olan malzemeye oranla daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan malzemelerin çekme deneyi sonuçları.

Malzeme	Test açısı	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uniform uzama (%)	r	n
DP 780 / t: 1.00 mm	0	984±10.6	618±6.0	17	0,72	0,12
DP 780 / t: 1.00 mm	45	992±4.4	620±4.1	15	0,97	0,13
DP 780 / t: 1.00 mm	90	1007±4.7	611±2.7	12	0,88	0,12
DP 780 / t: 1.80 mm	0	993±2.4	651±2.0	11	0,72	0,11
DP 780 / t: 1.80 mm	45	992±1.7	649	11	0,90	0,12
DP 780 / t: 1.80 mm	90	998±7.5	639±4.8	10	0,83	0,11

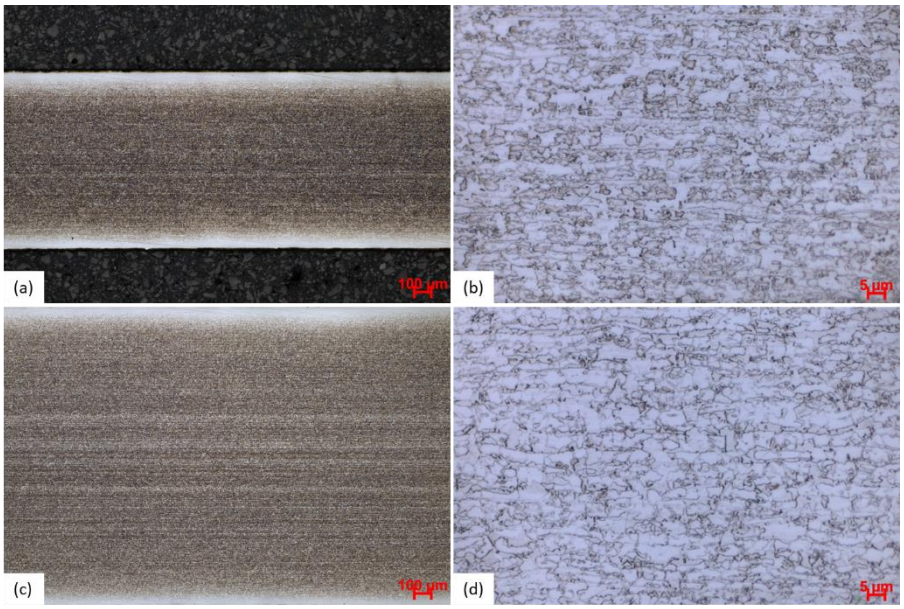


Şekil 3.1 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için oluşturulan gerçek gerilme-birim uzama grafiği.



Şekil 3.2 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için oluşturulan gerçek gerilme-birim uzama grafiği.

Şekil 3.3 iki faklı kalınlıktaki DP 780 malzemelere ait mikro yapıları göstermektedir. Şekil 3.3 incelendiğinde, malzemenin mikro yapının, ferritik matris (açık renkli) ve matris içerisinde dağılmış olan martenzit adalarından (koyu renkli) oluştuğu gözlenmiştir. Malzeme kalınlıklarındaki farklılığın mikro yapıda gözle görülebilir herhangi bir değişikliğe neden olmadığı görülmektedir.

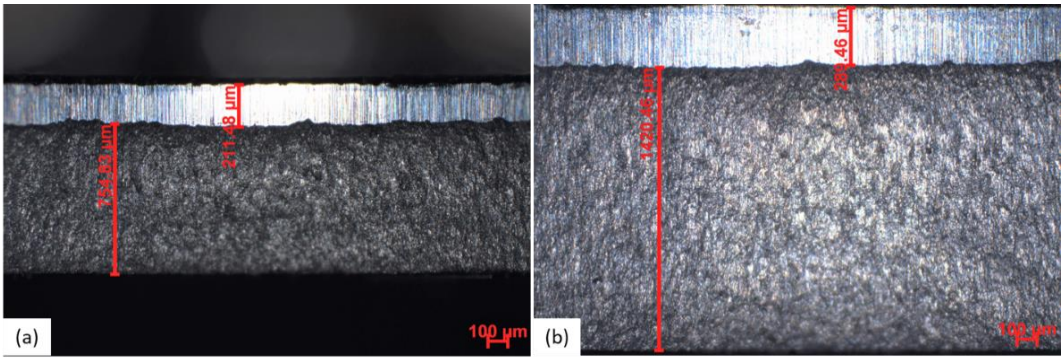


Şekil 3.3 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki malzemenin 50x mikro yapı görüntüsü, (b) 1,00 mm kalınlıktaki malzemenin 1000x mikro yapı görüntüsü, (c) 1,80 mm kalınlıktaki malzemenin 50x mikro yapı görüntüsü, (d) 1,80 mm kalınlıktaki malzemenin 1000x mikro yapı görüntüsü.

3.2 Zımba ile Delik Delmeden Elde Edilen Bulgular

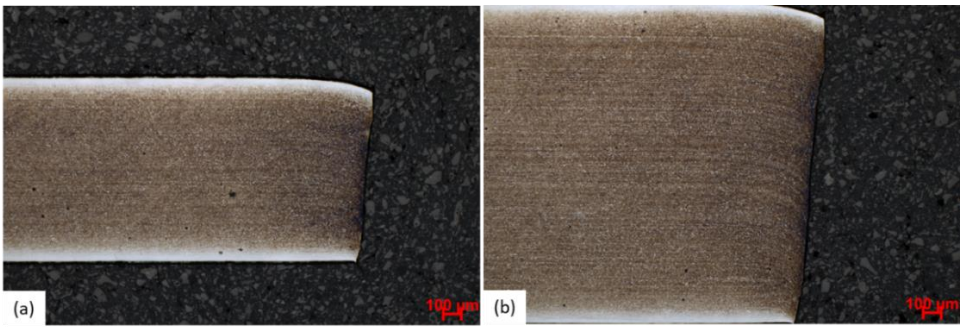
Delik genişletme testi yapılmak üzere numuneler zımba ile delinerek 10 mm çapındaki delikler elde edilmiştir. Delinen delik yüzeylerinin görüntülenmesi ve yapılan ölçümler Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4 incelendiğinde, kesme yüzeylerinin karakterize edilmesinde kullanılan yuvarlanma, kayma ve kopma bölgelerinin geliştiği anlaşılmaktadır. Kesme prosesi genel olarak incelendiğinde, ilk aşamasında zımba tarafından uygulanan kuvvet altında belirli oranda bir batma ile birlikte yuvarlanma bölgesi ortaya çıkmıştır. Bu bölge kalıp-zımba mesafesinin azalmasına bağlı olarak kesme boşluğu boyunca kayma gerilmeleri oluşturarak, sac malzemenin uniform olarak kayma bölgesi ile devam etmektedir. Kayma deformasyonu sonrasında ortaya çıkan plastik deformasyonun kritik bir büyüklüğe ulaşması ile ani bir kopma ile süreç nihayete ermektedir. Farklı kalınlıktaki DP 780 çeliğinin kesme bölgeleri karşılaştırıldığında kayma ve kopma bölgelerinin yükseklikleri 1,00 mm kalınlıktaki malzemede sırasıyla 0,2114 mm, 0,7548 mm olarak ölçülmüştür. Söz konusu değerler 1,80 mm kalınlığındaki sac malzemede ise sırasıyla 0,2894 mm, 1,4204 mm değerlerini almıştır. Bu değerler toplam sac kalınlığının yaklaşık olarak 1,00 mm kalınlığındaki sac malzeme için %21,14,

%75,48 ve 1,80 mm kalınlık sac malzeme için %16,07, %78,91 oranına tekabül etmektedir. Söz konusu oranlar karşılaştırıldığında, 1,00 mm kalınlığındaki numunedeki kayma bölgesinin yüzde olarak 1,80 mm kalınlığındaki numuneden fazla, kopma bölgesinin ise bunun aksine az olduğu anlaşılmaktadır.



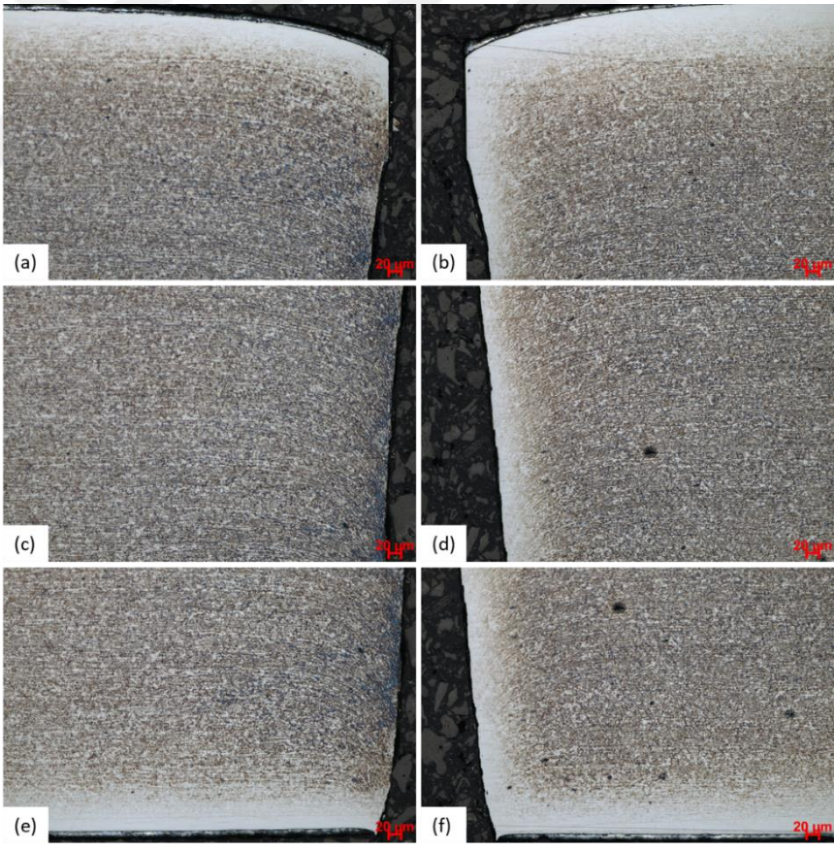
Şekil 3.4 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin 50x kayma-kopma bölgesi ölçümü, (b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin 50x kayma-kopma bölgesi ölçümü (Görüntü üzerinde verilen ölçüm değerleri farklı noktalardan alınan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir).

Zımba ile delinmiş yüzeyde farklı karakteristik kesme bölgeleri oluşmaktadır. Bunlar; zımbanın malzemeye ilk temasıyla ile oluşan plastik deformasyonun olduğu yuvarlanma bölgesi, zımba ağzının malzemeyi dik yönde deldiği kayma bölgesi, çatlak başlatıp malzeme kalınlığı boyunca yayıldığı kopma bölgesi ve çoğu zaman oluşan çapaktır. İki farklı kalınlıktaki numuneye ait kesme işlemi sonrası oluşan karakteristik kesme bölgeleri Şekil 3.5'de verilmiştir. Delik kesitleri incelendiğinde; kesit boyunca oluşan yuvarlanma, kayma ve kopma bölgeleri görülmektedir. Kullanılan kesme boşluğunda çapak oluşumunun her iki numune için de çok azdır.

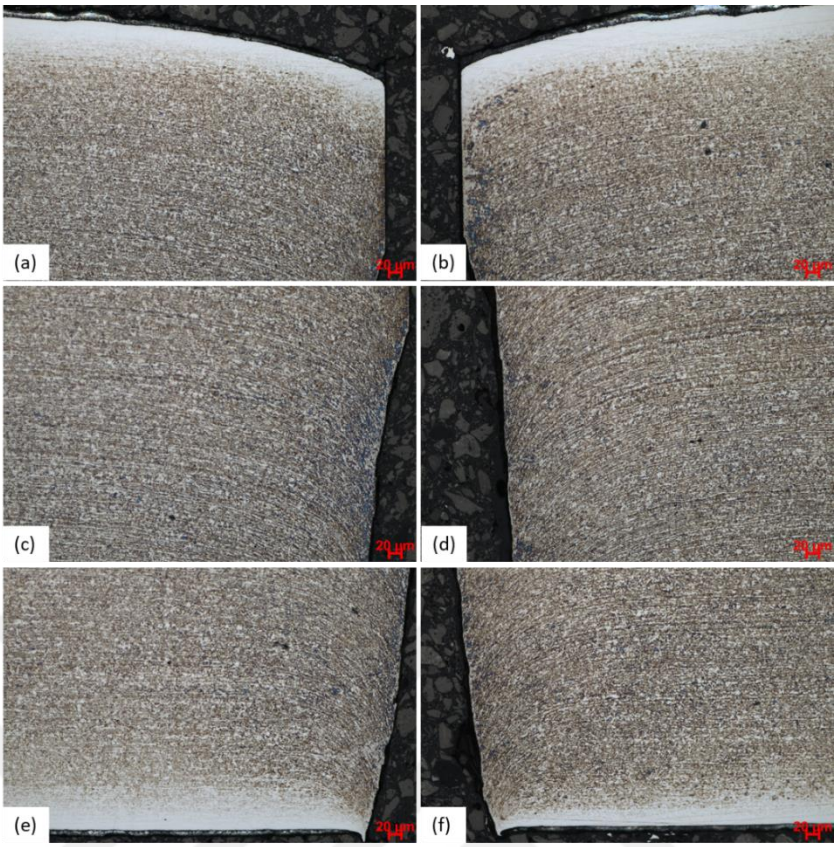


Şekil 3.5 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kesme sonrası karakteristik kesme bölgeleri, (b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kesme sonrası karakteristik kesme bölgeleri.

Karakteristik kesme bölgelerine dair ayrıntılı mikroskop görüntüleri Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 incelendiğinde, kesme prosesiyle birlikte ortaya çıkan deformasyona bağlı olarak tane yönelimlerinin gerçekleştiği görülmektedir. Zımbanın ile temas sonrasına uygulanan kuvvet altındaki batma etkisi ile oluşan deformasyon sonucunda oluşan yuvarlanma, kayma, kopma ve çapak bölgelerinin oluşumu ve bu bölgelerde tane uzamaları söz konusudur. Ayrıca her iki kalınlıktaki numune için de kopma bölgesindeki yönelim ve uzamaların kayma bölgesinden daha fazla olduğu söylenebilir. Diğer bir yandan, 1,80 kalınlığındaki numunede meydana gelen deformasyon ve tane uzamaları 1,00 mm olan numunedekine oranla çok daha belirgin olduğu görülmektedir. Yuvarlanma ve kayma bölgeleri göreceli olarak kopmaya göre daha az deformasyona ve gerilme yığılmasına maruz kalmıştır. Her iki numune için çapak oluşumları incelendiğinde ise 1,80 mm kalınlıktaki numunede çapağın diğerine oranla bir miktar daha fazla olduğu görülmektedir.



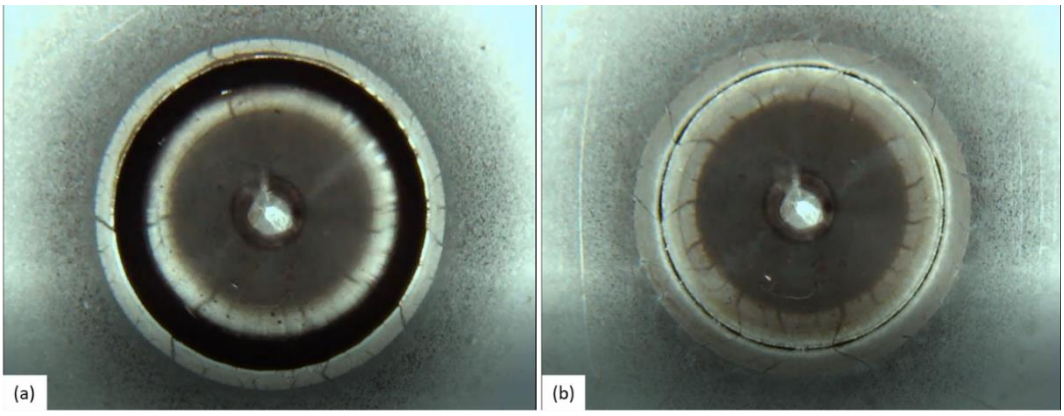
Şekil 3.6 : (a)-(b) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kayma bölgesi, (c)-(d) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kayma-kopma bölgesi, (e)-(f) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin kopma bölgesi.



Şekil 3.7 : (a)-(b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kayma bölgesi, (c)-(d) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kayma-kopma bölgesi, (e)-(f) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin kopma bölgesi.

3.3 DG Testinden Elde Edilen Bulgular

Kaydedilen test videolarından alınan test edilmiş numune görüntüleri Şekil 3.8'da verilmiştir. ISO 16330 gereği, delik genişletme testinde numune kalınlığı boyunca çatlak oluşumunun görüldüğü anda testin sonlandırılması gerekmektedir. Kesit boyunca tamamen ilerlememiş olan mikro çatlak seviyesi veya kesit boyunca oluşmuş çatlağın fazla açılması durumlarının olduğu testler başarısız olarak nitelendirilmektedir. Şekil 3.8'ya bakıldığında her iki görselde de kesit boyunca oluşmuş birden fazla çatlağın varlığı görülmektedir.



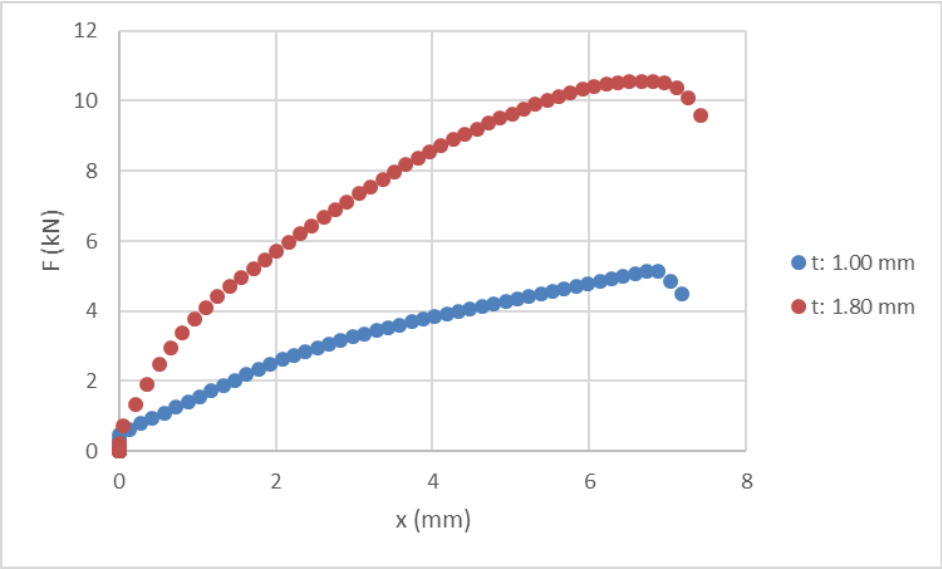
Şekil 3.8 : (a) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası görüntüsü, (b) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası görüntüsü.

İki farklı kalınlıktaki numunelerden yapılan 5'er tekrarlı test sonuçlarının ortalamaları ve standart sapmaları Çizelge 3.2'te verilmiştir. Test sonuçlarına bakıldığında numune kalınlığının artmasıyla beraber DG oranının azaldığı görülmektedir.

Çizelge 3.2 : Delik genişletme testi sonuçları.

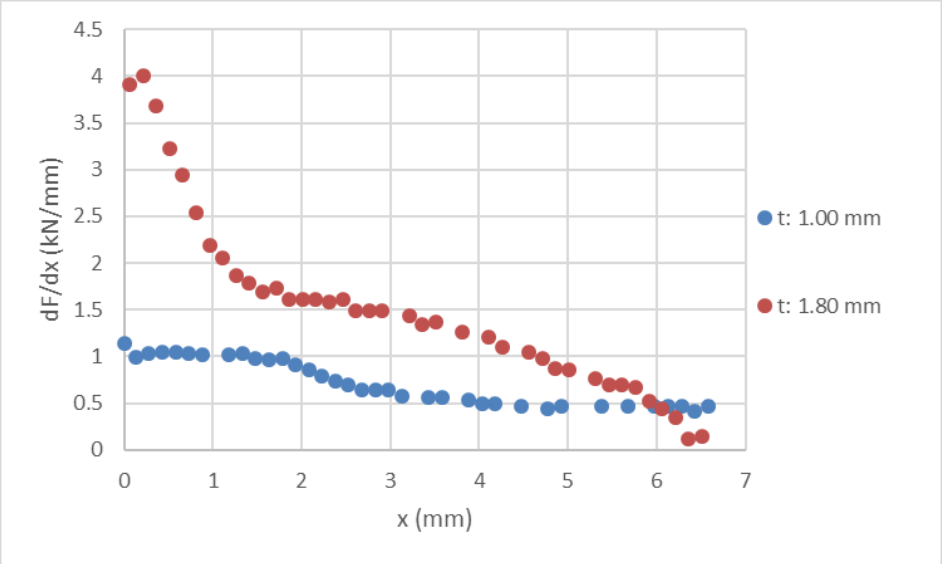
Malzeme	Kalınlık (mm)	İlk çap (mm)	Son çap (mm)	DG oranı (%)
t: 1.00 mm	1.00	10.00	12.16	21.6±1.49
t: 1.80 mm	1.80	10.00	11.40	14.0±0.84

İki farklı kalınlıktaki numuneye ait DG test sonucundan elde edilen F-x eğrileri Şekil 3.9'de gösterildiği gibidir. F-x eğrilerinin genel özellikleri incelendiğinde her ikisinde de aynı deformasyon eğiliminin sergilediği söylenebilir. Testlerin ilk aşamalarında doğrusal bir F-x ilişkisi belirgindir. Bu, deformasyonun başlangıcında numunenin elastik eğilmesinden kaynaklanıyor olabilir. Test boyunca plastik deformasyonun hâkim olduğu safhalarda F-x eğrileri sürekli artan bir özellik göstermektedirler. Ancak bu artış eğilimlerinin, numune kalınlığı söz konusu olduğunda bir ayrıma gittiği söylenebilir. 1,80 mm kalınlığındaki numuneyi plastik deformasyona uğratmak için gerekli olan kuvvet değerinin kalınlığı 1,00 mm olan numuneye oranla fazla olduğu belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 3.9 : Delik genişletme testi uygulanan numunelerin F-x eğrileri.

Bununla birlikte, zımba kuvveti değerlerindeki artışın plastik deformasyonun farklı kademelerinde farklı büyüklükte olduğu eğrilerin eğimindeki değişimden anlaşılmaktadır. Bu deformasyon seviyelerini ayırt etmek için, dF/dx-x eğrileri hesaplanarak Şekil 3.10'da verilmiştir. Eğrilere bakıldığında testin ilk aşamasında her iki numuneyi elastik deformasyona uğratmak için gerekli zımba kuvvetinin farklı olduğu, kalın numunede kuvvet değerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Zımba yer değiştirmesinin artmasıyla beraber dF/dx sürekli bir düşüş göstermekte ve bir alt değere ulaşmaktadır. Bu düşüşün eğimi, kalınlığı 1,80 mm olan numunede, kalınlığı 1,00 mm olan numuneye oranla daha belirgindir.



Şekil 3.10 : Delik genişletme testi uygulanan numunelerin dF/dx-x eğriler.

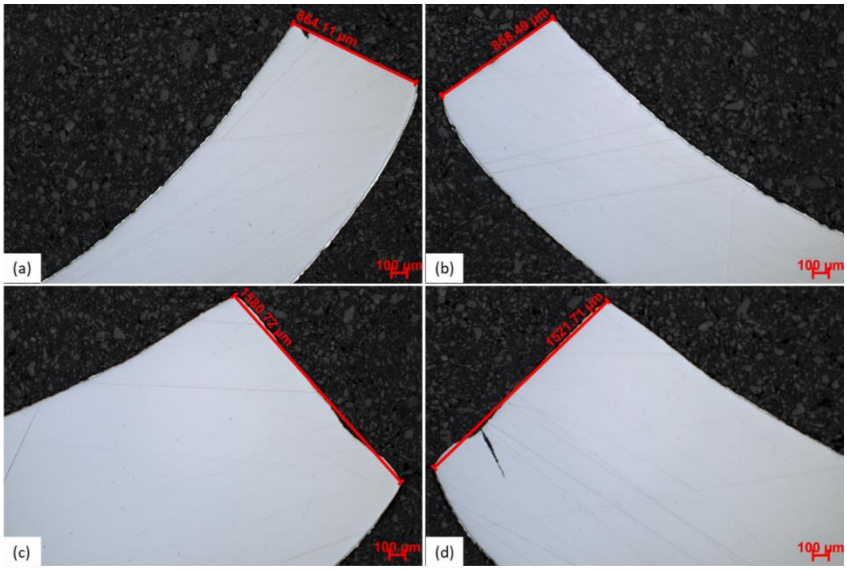
3.4 DG Testi Sonrası Mikro Yapı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

Tez çalışması kapsamında yapılan delik genişletme testi numunelerinin detaylı kesit incelemeleri için hazırlanan metalografi numuneleri Şekil 3.11'da verilmiştir. Numunelere ait kesit ucundan yapılan kalınlık ölçümleri Şekil 3.12, genişletme prosesi sonrası delik kesitindeki tane yönelimleri ise Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.11 : Delik genişletme testi uygulanan numunelerin kesit görüntüleri.

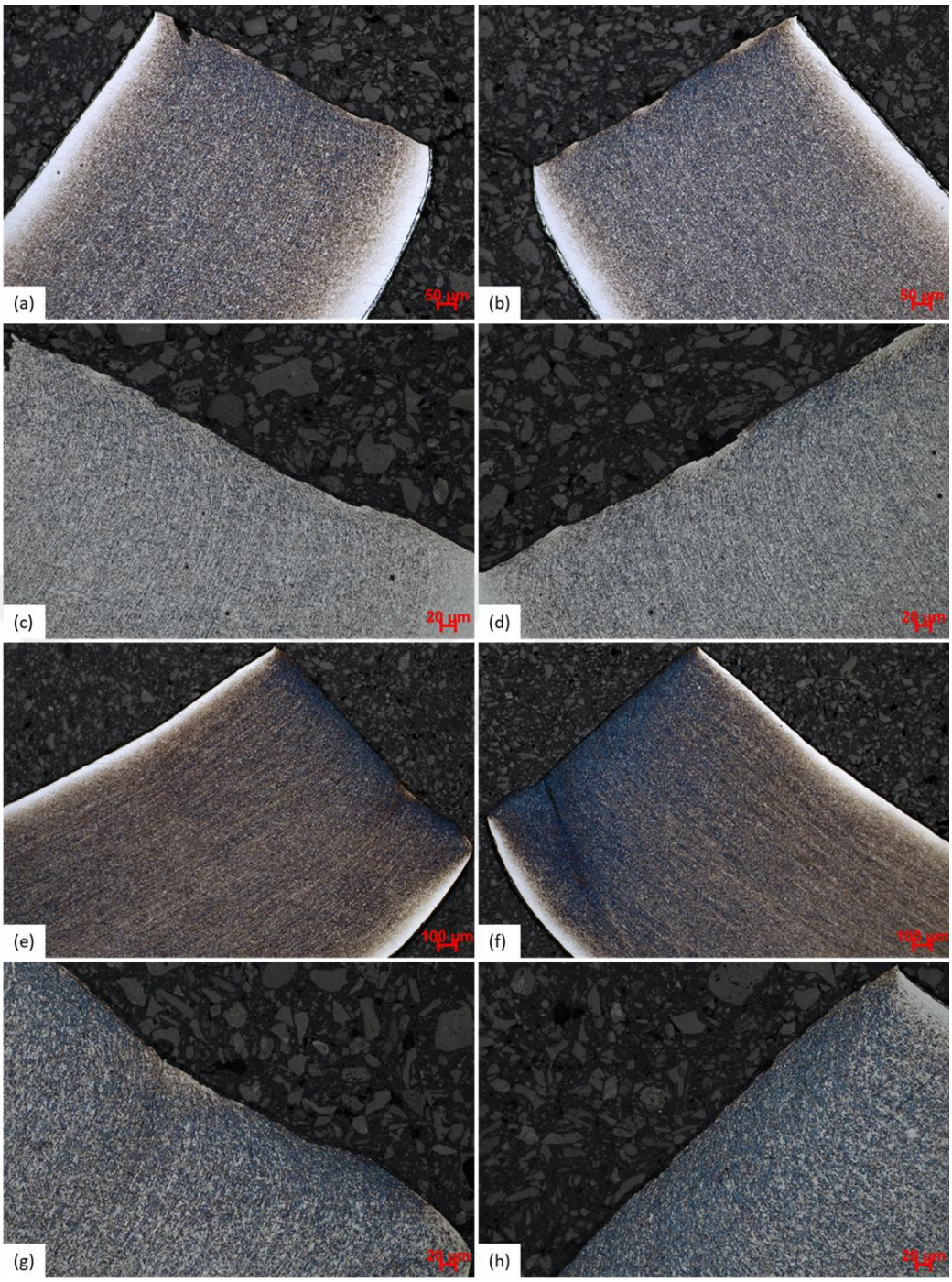
Şekil 3.12 incelendiğinde numune kalınlığındaki incelmenin delik merkezine yakınlaştıkça arttığı ve en fazla uç kısımlarda olduğu görülmektedir. Her iki kalınlıktaki numunede test sonucunda meydana gelen incelme miktarının yaklaşık olarak %14 civarında olduğu söylenebilir.



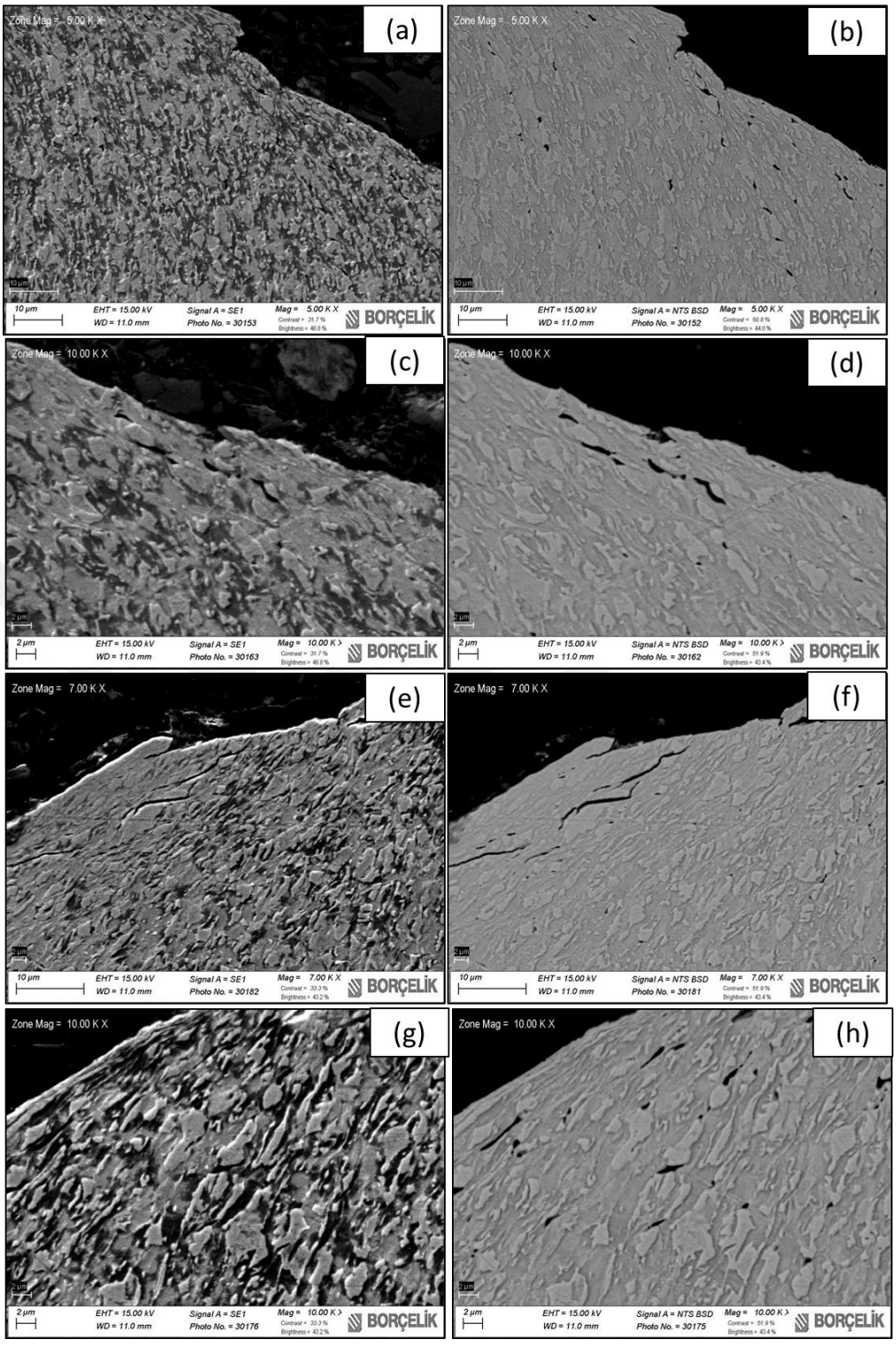
Şekil 3.12 : (a)-(b) 1,00 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası kesit görüntüsü, (c)-(d) 1,80 mm kalınlıktaki numunenin DG testi sonrası kesit görüntüsü .

DG testi sonrası numune kesitlerindeki tane yönelimlerini gösteren Şekil 3.13 incelendiğinde numunelerin deformasyonla beraber yönlendiği görülmektedir. Bu yönlenmeler kesme prosesindeki tane yönelimleriyle aynı eğilimi göstermekte olup karakteristik kesme bölgelerinden olan kaymada, kopma bölgesine oranla daha azdır. Diğer bir yandan, delik genişletme testi sırasında oluştuğu gözlemlenen kesme doğrultusuna dik çatlakların (Şekil 3.13(a)-Şekil 3.13(f)) kesme prosesi sırasında başlayıp DG testi ile açıldığı düşünülmektedir [2]. Bu çatlakları hangi karakteristik kesme bölgesinde oluşmuş olduklarına göre test sonrasında fazla ilerlemeden kaldığı (Şekil 3.13(a)) veya ilerlemesini sürdürerek kesit içine doğru genişlediği söylenebilir (Şekil 3.13(f)). Şekil 3.13(f)'deki çatlağın kayma bölgesinin bitip kopma bölgesine geçiş noktasında meydana geldiği görülmektedir.

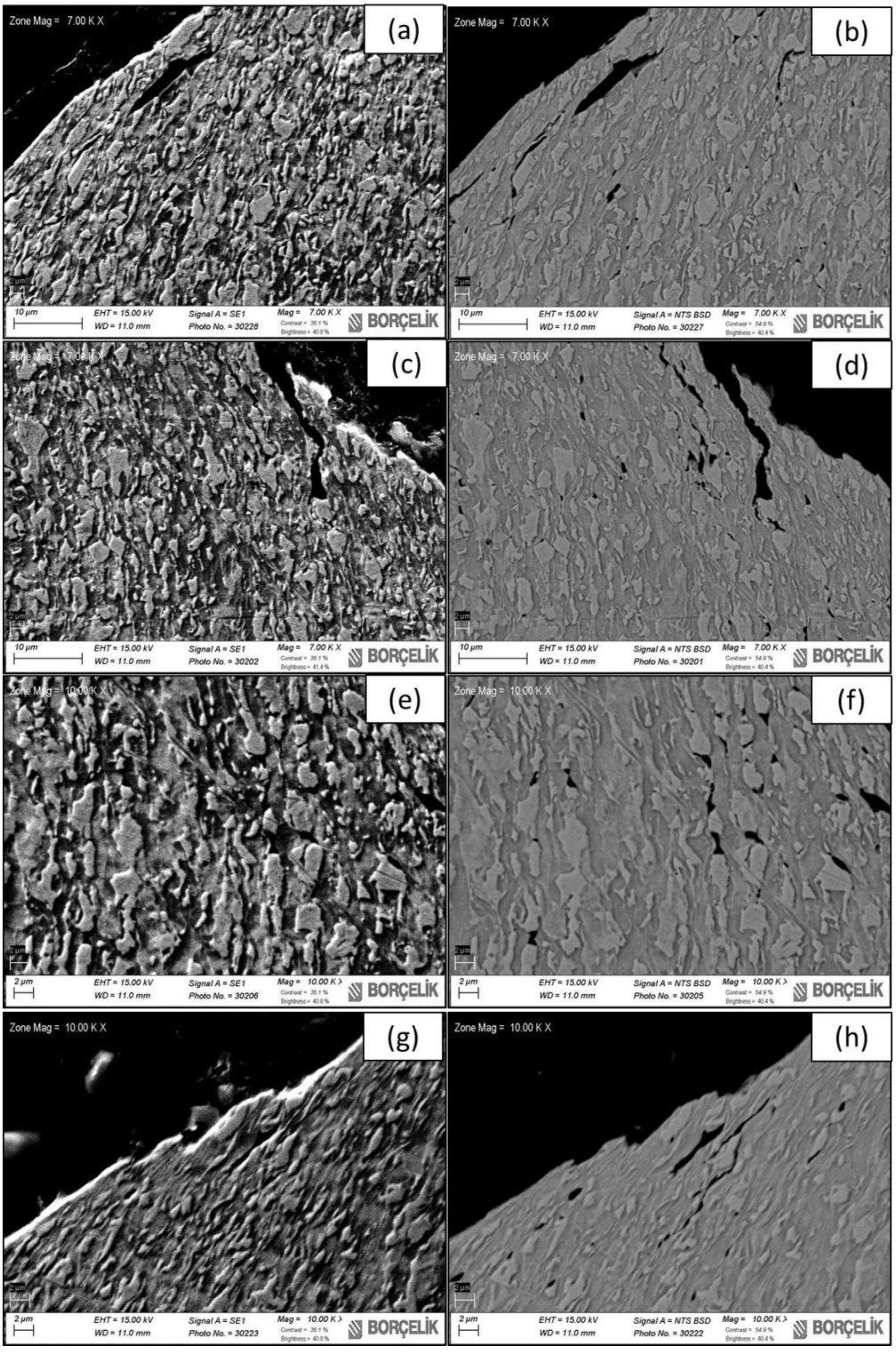
DG testi sonrası numune kesitinden yapılan SEM analizleri Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te verilmiştir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 incelendiğinde, delik genişletme testi sonrasında mikro boşluklar ve çatlaklar içeren bir tane yapısının olduğu görülmektedir. Çatlağın ilk oluştuğu delik kenarlarına yakın bölgelerden itibaren numune içerisinde birçok mikro çatlağın varlığı dikkat çekmektedir. Çatlakların yoğunluğu deformasyon süreci boyunca en çok deformasyona maruz kalan numune uç kısmında ve kesme prosesi sonrasında tane yönelimlerinin en fazla olduğu kopma bölgesinde daha da yoğunlaşmaktadır. Bu bölgelerde oluşan çatlaklara bakıldığında, çatlakların bir kısmının yumuşak olan ferrit taneleri ile sert olan martenzit taneleri arasındaki sınırda başladığı ve martenzit-ferrit tane sınırı boyunca yayılma eğiliminde olduğu görülmektedir. Martenzit-ferrit tane sınırından ilerleyen çatlaklar Şekil 3.14(f) ve Şekil 3.15(h)'de net olarak görülmektedir. Bazı çatlakların ise Şekil 3.15(d)'deki gibi ince martenzit tanesi boyunca ilerlediği söylenebilir. Çatlak ilerleme doğrultularının deformasyona yönüyle aynı olduğu da dikkat çekmektedir.



Şekil 3.13 : 1,00 mm ve 1,80 mm kalınlıktaki numunelerdeki DG testi sonrası tane yönelim görüntüleri: (a)-(b) 1,00 mm numune ucunun tamamı, (c)-(d) 1,00 mm numune ucu orta kısmı, (e)-(f) 1,80 mm numune ucunun tamamı, (g)-(h) 1,80 mm numune ucu orta kısmı.



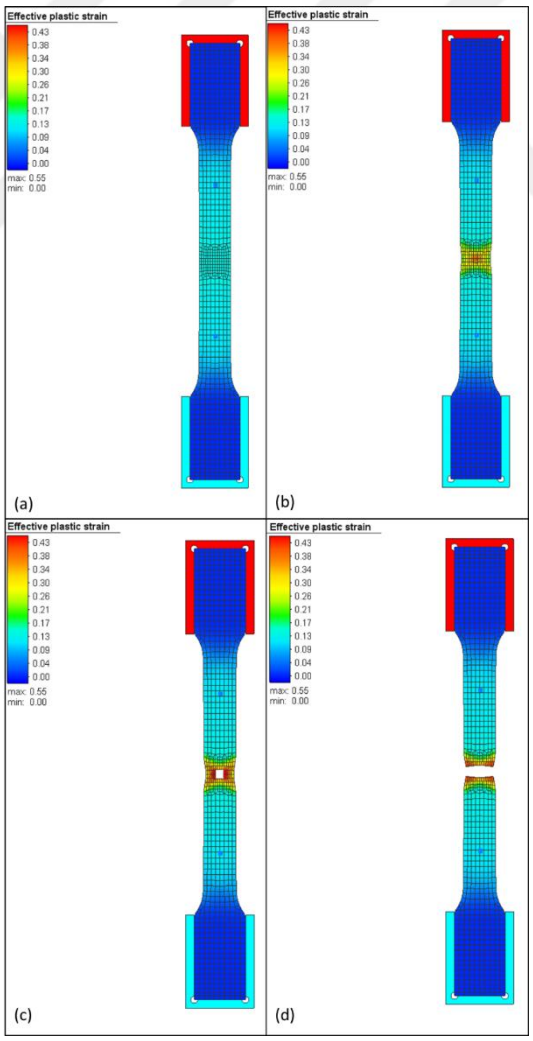
Şekil 3.14 : Delik genişletme testi uygulanan 1,00 mm kalınlıktaki numunelerin kesit SEM görüntüleri: (a)-(c)-(e)-(g) Numune ucu mikro çatlak SE görüntüleri, (b)-(d)-(f)-(h) Numune ucu mikro çatlak BSE görüntüleri.



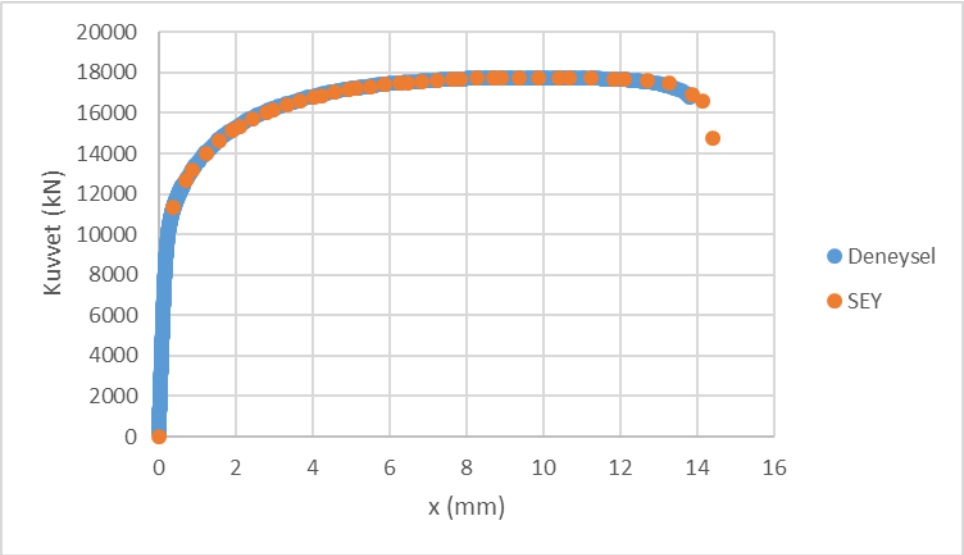
Şekil 3.15 : Delik genişletme testi uygulanan 1,80 mm kalınlıktaki numunelerin kesit SEM görüntüleri: (a)-(c)-(e)-(g) Numune ucu mikro çatlak SE görüntüleri, (b)-(d)-(f)-(h) Numune ucu mikro çatlak BSE görüntüleri.

3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi Modelinin Kalibrasyonundan Elde Edilen Bulgular

İki boyutlu SEY modeli oluşturulan çekme deneyinin analiz aşamaları Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.16(a) çekme deneyi başlamadan hemen önceki numune ağ yapısını, Şekil 3.16(b) boyun verme anındaki ağ yapısı ve efektif plastik gerinim değerindeki değişimi, Şekil 3.16(c) ise numune iç yapısında bulunan mikro çatlaklardan ilk çatlamanın olduğu andaki ağ yapısı ve efektif plastik gerinim değerindeki değişimi, Şekil 3.16(d) ise kopma anındaki ağ yapısı ve efektif plastik gerinim değerindeki değişimi göstermektedir. Test sonunda kopma F-x diyagramı ve deneysel karşılaştırması Şekil 3.17'de verilmiştir. Numune üzerinde tanımlanmış olan iki noktanın deformasyon hızlarının farklı olmasından dolayı deplasman değerleri bu noktalar arasındaki değişimden hesaplanmıştır.



Şekil 3.16 : Çekme deneyi analizi aşamaları: (a) Çekme öncesi, (b) Boyun verme, (c) İlk çatlak oluşumu, (d) Kopma.

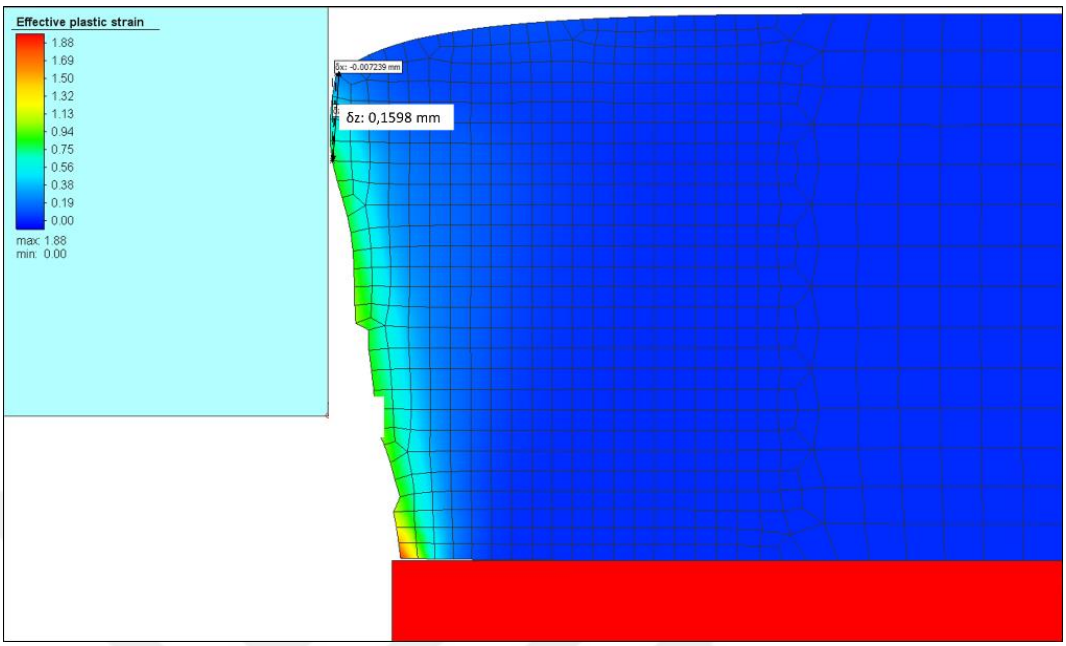


Şekil 3.17 : Çekme deneyi F-x diyagramı karşılaştırması.

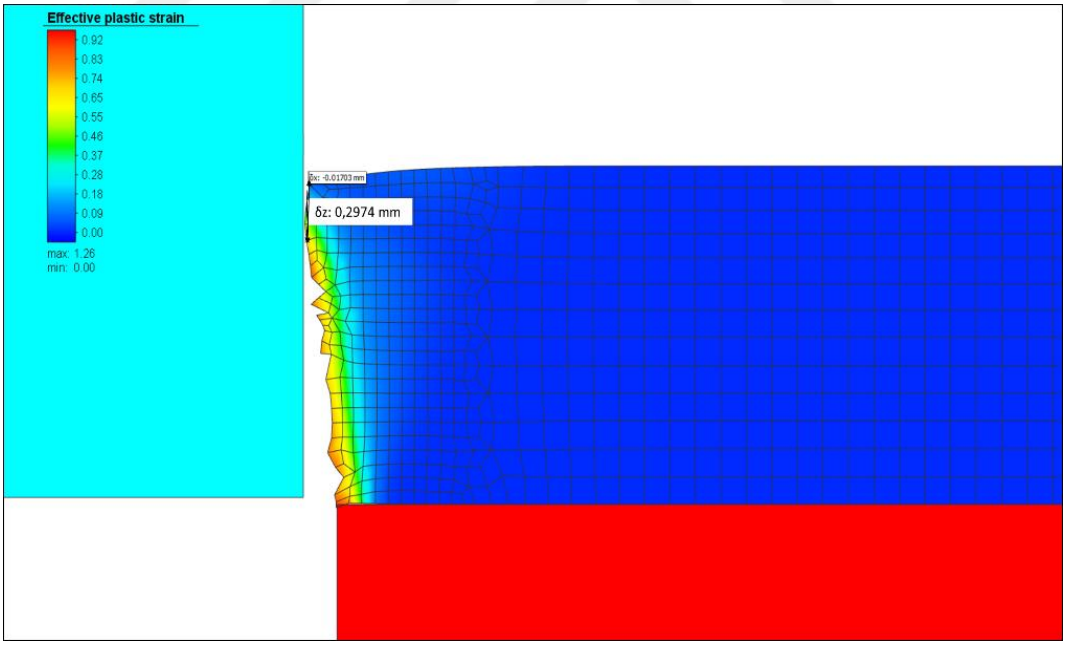
Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'de iki farklı kalınlıktaki numune için 2 boyutlu modeli oluşturulmuş olan zımba ile kesme prosesi sonunda yapılan kesme bölgesi ölçümleri verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında 1,00 mm kalınlığındaki numune için kayma bölgesinin 0,1598 mm, 1,80 mm kalınlığındaki numune için ise 0,2974 mm olduğu görülmektedir. Bu değerler Şekil 3.4'te verilen deneysel çalışmalar sonucunda alınan ölçümlerle karşılaştırıldığında 1,80 mm kalınlıktaki numune için birebir uyum sağladığı, 1,00 mm kalınlıktaki numune için ise bir miktar farklılık içerdiği görülmektedir.

Analiz sonrası oluşan efektif plastik gerinim, hasar ve gerilme üç eksenliliği değerlerinin kesme bölgesindeki dağılımı sırasıyla Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de verilmiştir. 1,00 kalınlığındaki numune için Şekil 3.20(a)'ya bakıldığında efektif plastik gerinimin kayma bölgesinde en az olduğu ve genel olarak kenar boyunca homojen bir yapı sergilediği söylenebilir. 1,80 mm kalınlığındaki numune için Şekil 3.21(a)'ya bakıldığında ise kayma bölgesinin diğer numunedeki gibi düşük gerinime sahip olup bölgesel yoğunlukların olduğu görülmektedir. Şekil 3.20(b) ve Şekil 3.21(b)'den hasar parametreleri incelendiğinde, her iki numunenin de benzer hasar trendine sahip olduğu göze çarpmaktadır. Kayma bölgelerinde hasar parametresi düşük değerlerdeyken kopma bölgelerinde ve özellikle kopma bölgesinin sonunda daha yüksek değerlere çıktığı dikkat çekmektedir. Üç eksenlilik durumlarının değerlendirildiği Şekil 3.20(c) ve Şekil 3.21(c)'ye göre, 1,00 mm kalınlıktaki

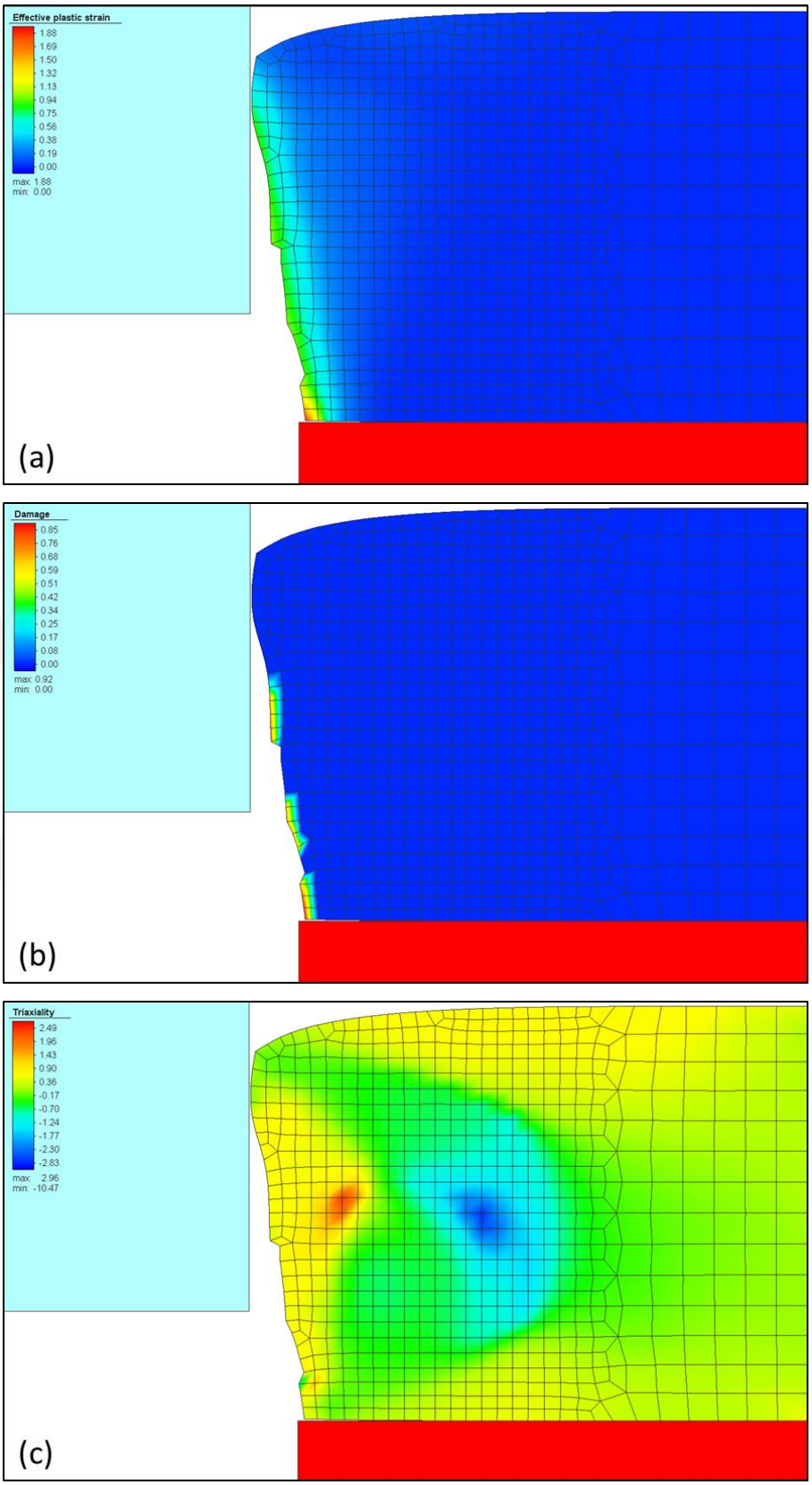
numunede kritik değere, 1,80 mm kalınlıktaki numuneye göre kesit kenarından daha iç bölgelerde ulaşılmaktadır.



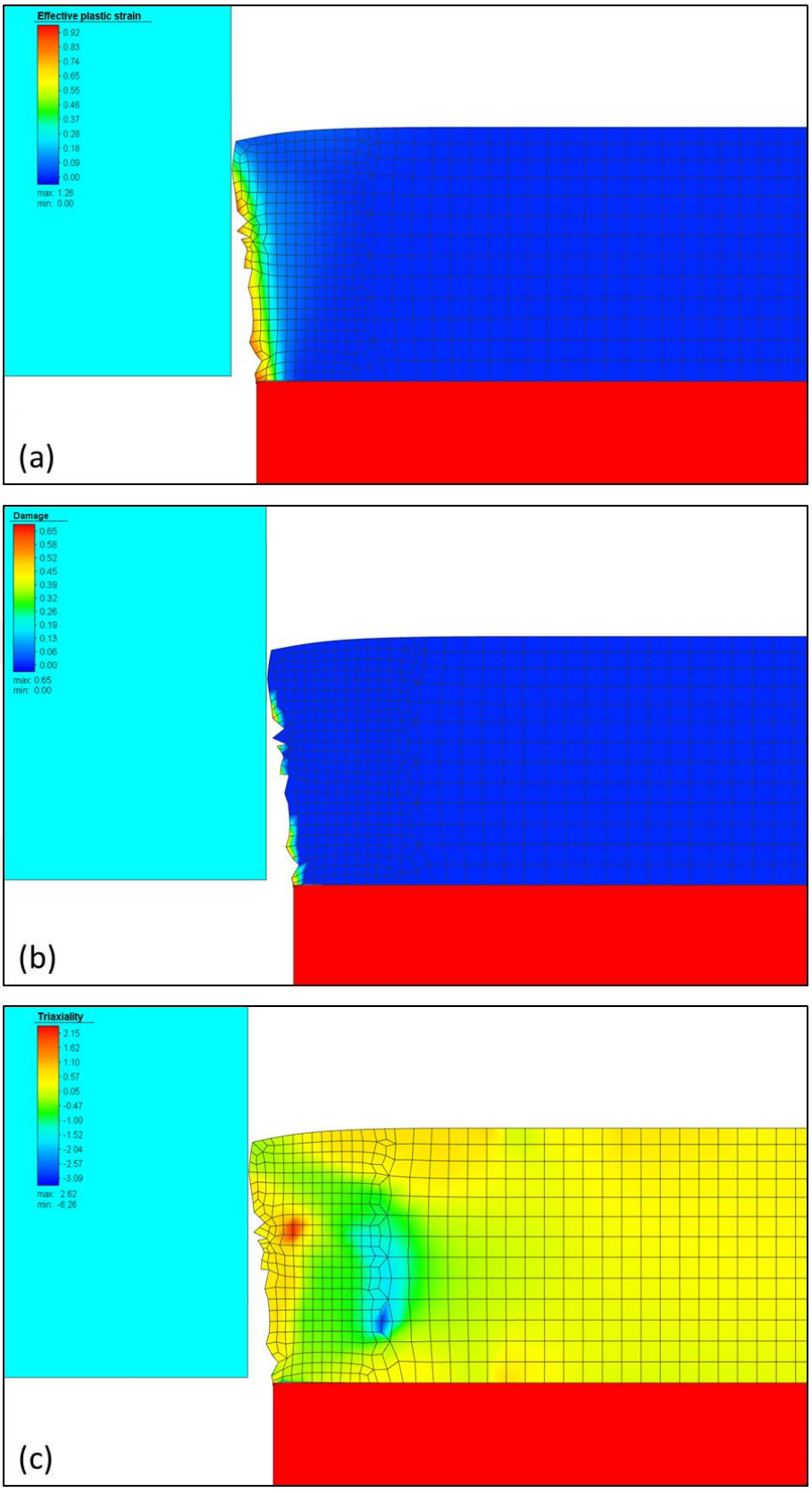
Şekil 3.18 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası kayma bölgesi ölçümü.



Şekil 3.19 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası kayma bölgesi ölçümü.

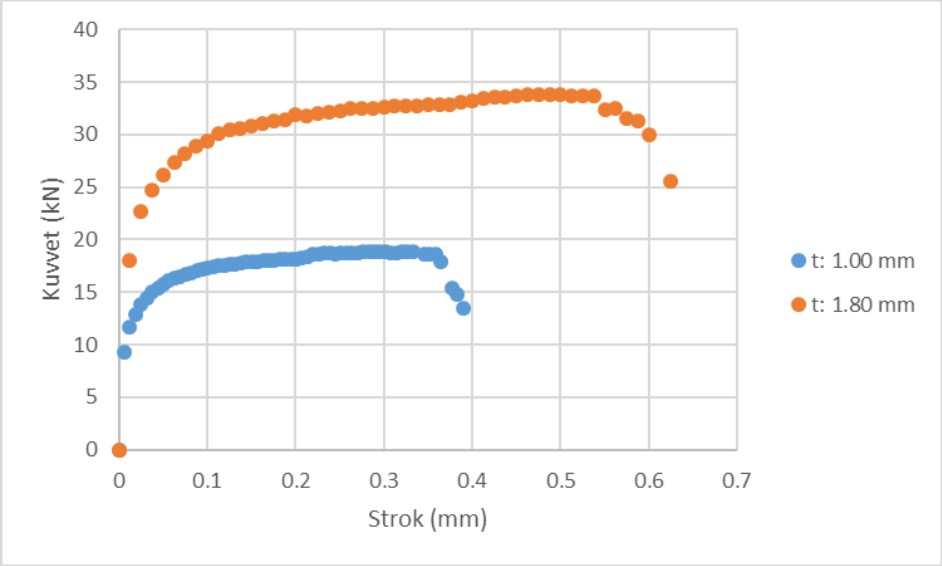


Şekil 3.20 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası: (a) Efektif plastik gerinim, (b) Hasar, (c) Üç eksenlilik.



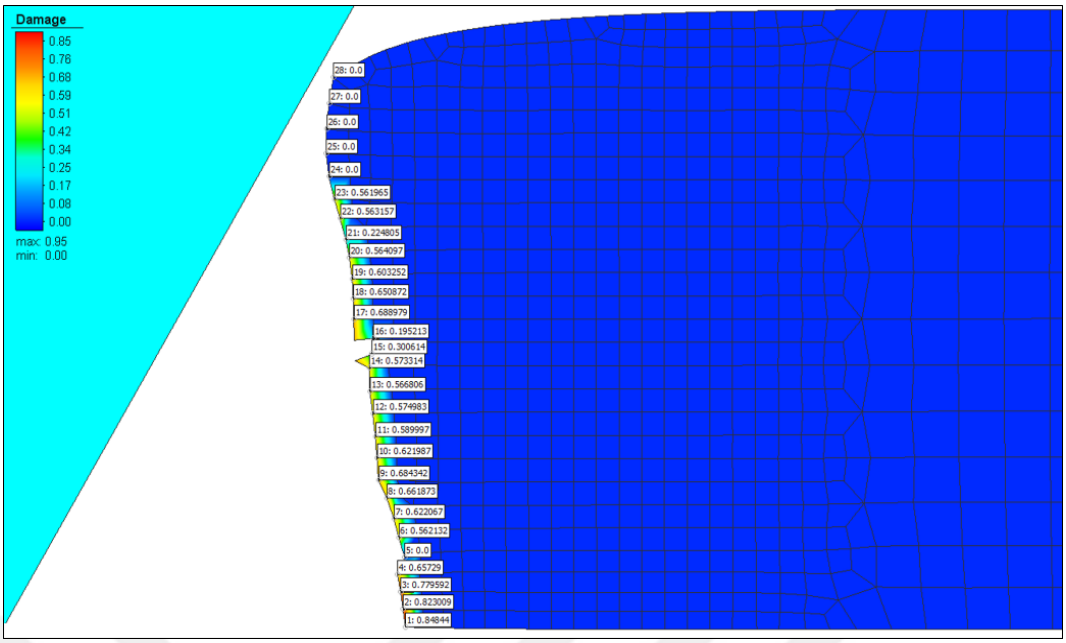
Şekil 3.21 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için analiz sonrası: (a) Efektif plastik gerinim, (b) Hasar, (c) Üç eksenlilik.

İki farklı kalınlıktaki numunede, kesme prosesi için uygulanan zımba kuvvetlerinin karşılaştırma diyagramı Şekil 3.22'deki gibidir. Kuvvet değerlerine bakıldığında numune kalınlığının artmasıyla beraber kesme için numuneye uygulanması gereken zımba kuvvetinin de arttığı görülmektedir.

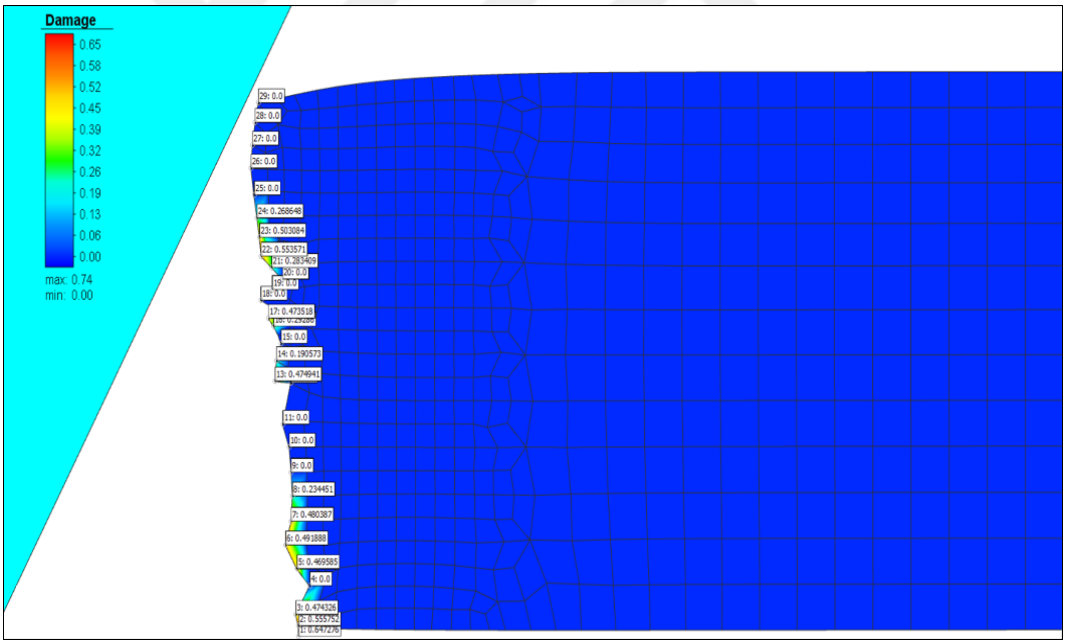


Şekil 3.22 : Kesme prosesi zımba kuvveti kıyaslaması.

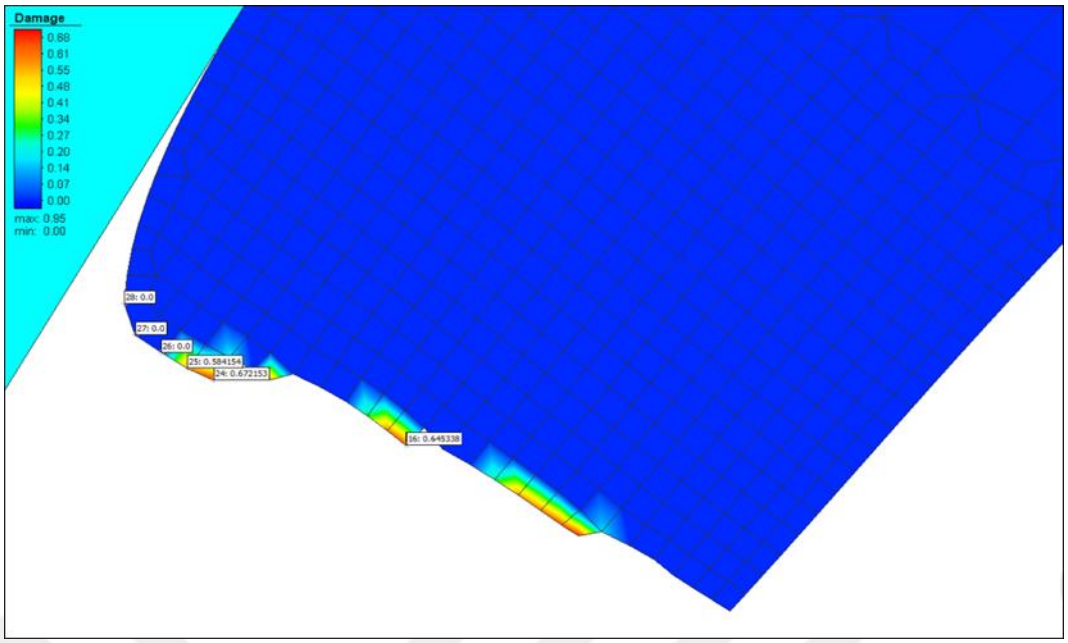
DG testi, Şekil 2.9'da verilmiş olan SEY modeli doğrultusunda 0,75 mm/s hızında gerçekleştirilmiştir. Testin ne zaman durdurulacağına dair yaklaşımı belirleyebilmek için test öncesinde kesit kenarında bulunan elemanlar numaralandırılmıştır. Şekil 3.23'de 1,00 mm kalınlığındaki numunenin, Şekil 3.24'te de 1,80 mm kalınlığındaki numunenin SEY modeli üzerindeki eleman numaralandırmaları verilmiştir. Test, kesit üzerindeki elemanların kayma bölgesinin sonuna ulaştığı anda sonlandırılmıştır. Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'te testin sonlandırıldığı andaki eleman durumu verilmiştir. Şekil 3.25 incelendiğinde, test sonlandırıldığında kopma bölgesindeki elemanların hemen hemen hepsinin silindiği, sadece kayma bölgesi üzerinde beş adet elemanın olduğu görülmektedir. Şekil 3.26'te ise kopma bölgesindeki yüksek deformasyona bağlı olarak oluşan kritik bölgelerde eleman varlığının bir miktar daha devam ettiği görülmektedir.



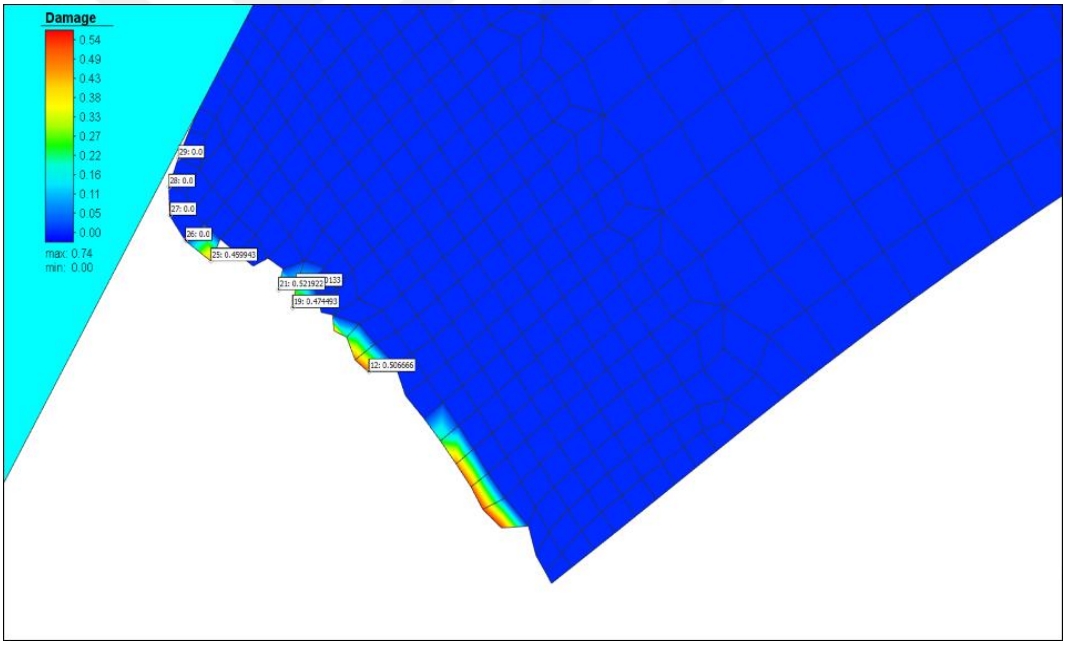
Şekil 3.23 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin SEY modeli eleman numaralandırmaları.



Şekil 3.24 : 1,80 mm kalınlıktaki numunenin SEY modeli eleman numaralandırmaları.



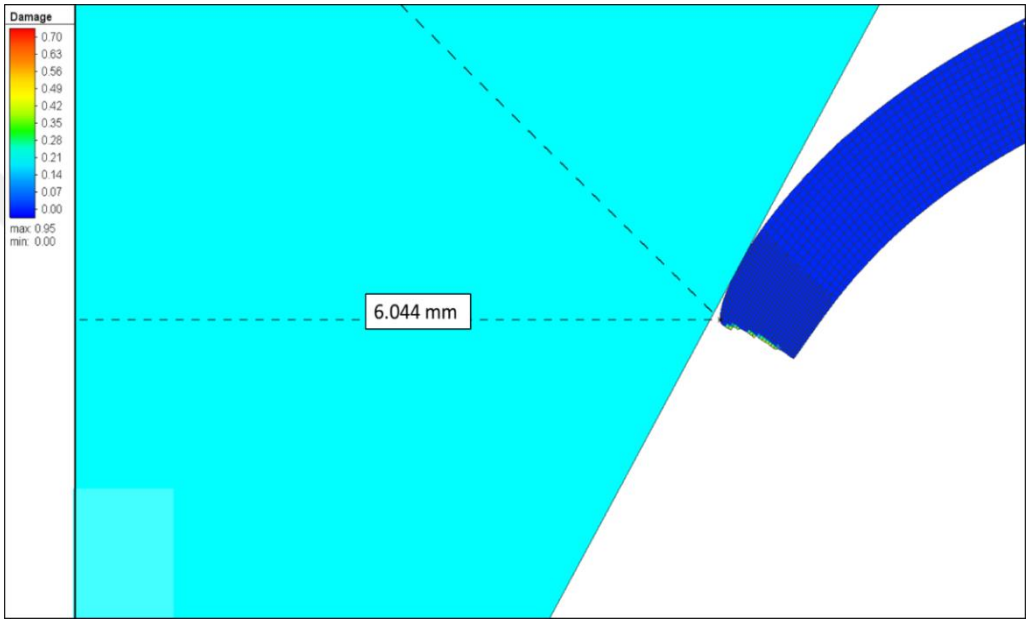
Şekil 3.25 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki eleman durumu.



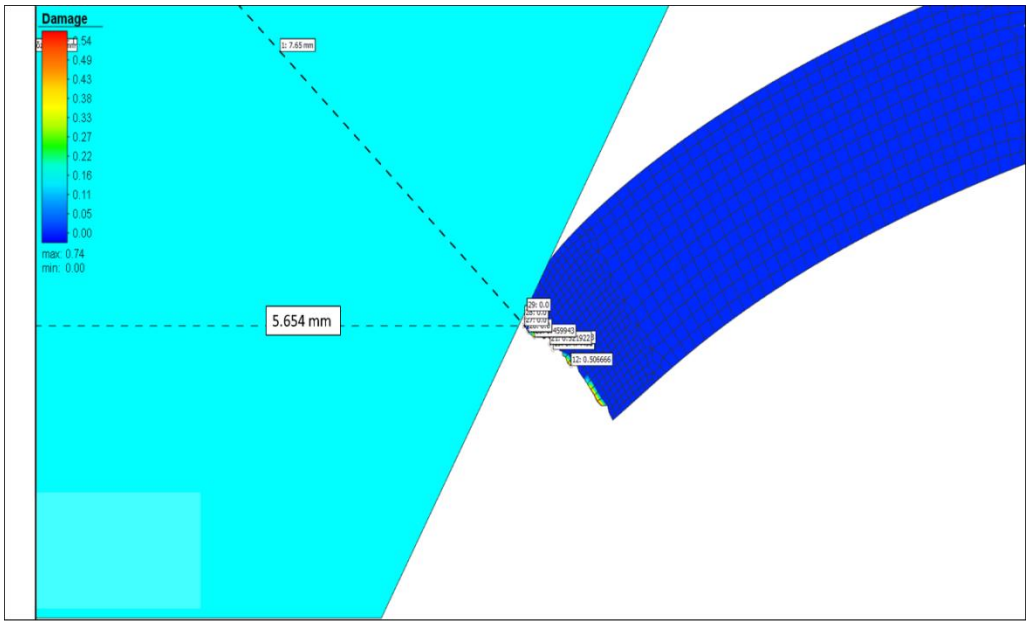
Şekil 3.26 : 1,80 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki eleman durumu.

Testi sonlandırmada kullanılan bu varsayım sonucu elde edilen numune yarıçap ölçümleri Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de, test sonucunda numune ucundan yapılan kalınlık ölçümleri ise Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da verilmiştir. Şekil 3.27 incelendiğinde, 1,00 mm kalınlığındaki numune yarıçapının 6,044 mm, çapının ise 12,088 mm olduğu görülmektedir. Numunenin DG oranı ise Denklem 1.1'e göre %20,88 olmaktadır. Aynı şekilde Şekil 3.28'ye göre 1,80 mm kalınlığındaki numune çapının 11,308 mm, DG oranın ise aynı denklemden %13,08 olduğu saptanmıştır.

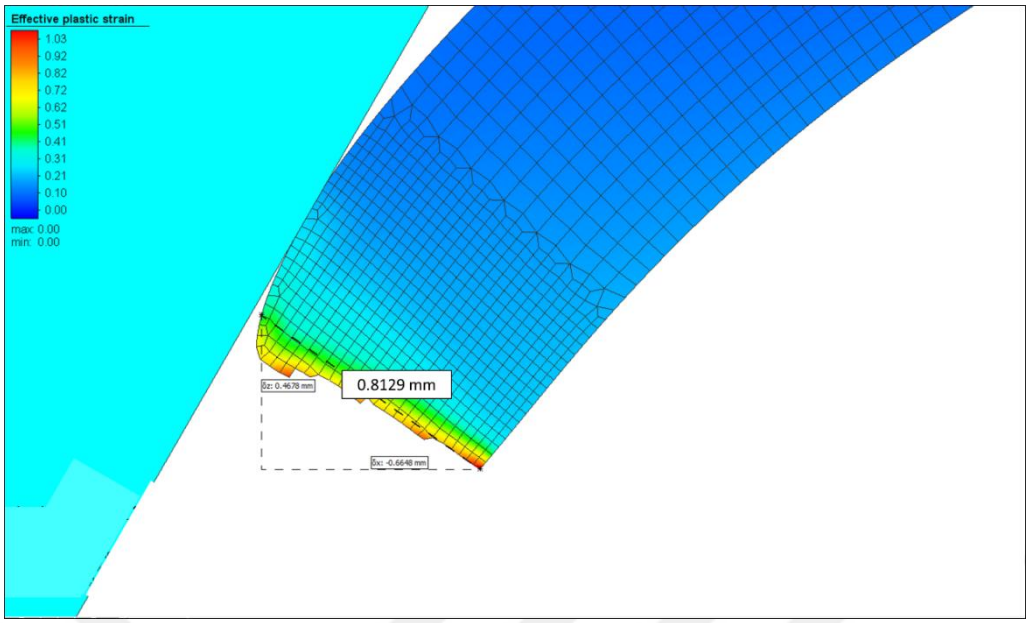
SEY analizi sonucu elde edilen bu DG oranlarının Çizelge 3.2'de verilmiş olan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen DG oranlarıyla örtüştüğü söylenebilir. DG testinin sonlandırıldığı andaki kalınlık ölçümleri incelendiğinde, 1,00 mm kalınlığındaki numunede 0,8129 mm ile yaklaşık olarak % 18,71, 1,80 mm kalınlığındaki numunede ise 1,515 mm ile yaklaşık olarak % 15,83 incelme olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarından elde edilen bu incelme oranları, Şekil 3.12'de irdelenmiş olan deneysel çalışma sonucu elde edilen incelme oranlarıyla karşılaştırıldığında (%14) birbirlerine yakın oldukları saptanmıştır.



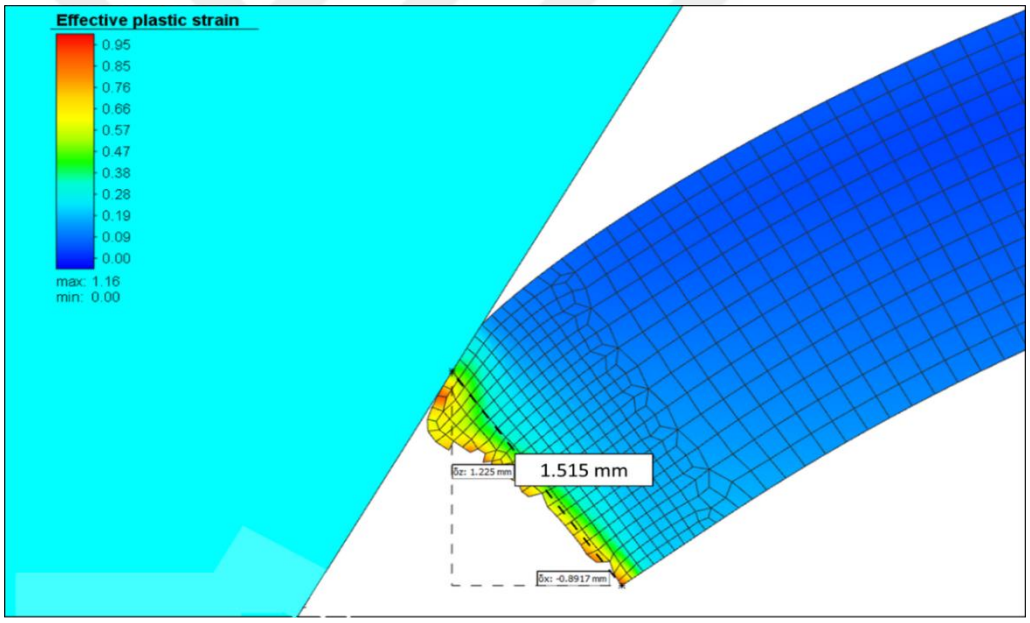
Şekil 3.27 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki yarıçap ölçümü.



Şekil 3.28 : 1,80 mm kalınlığındaki numunenin test sonundaki yarıçap ölçümü.



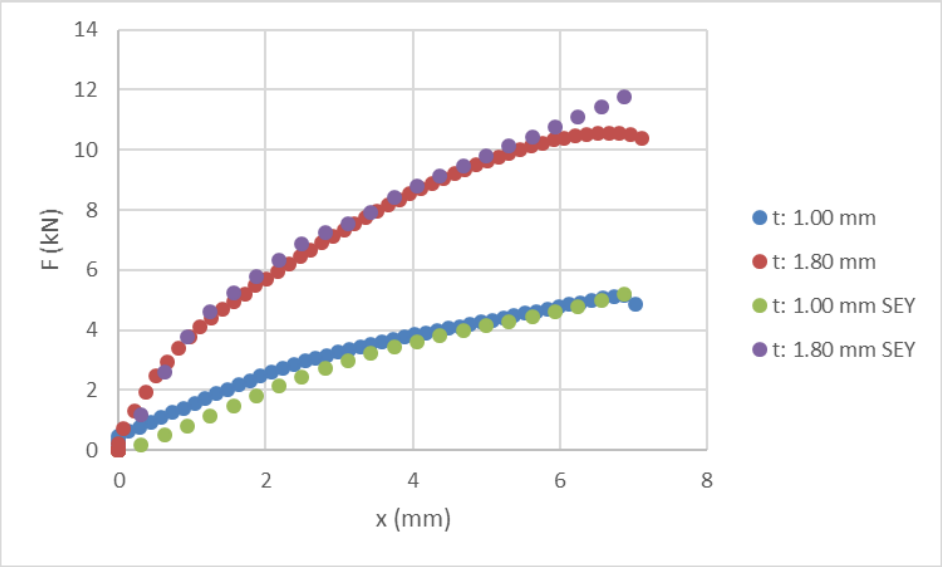
Şekil 3.29 : 1,00 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki kalınlık ölçümü.



Şekil 3.30 : 1,80 mm kalınlıktaki numunenin test sonundaki kalınlık ölçümü.

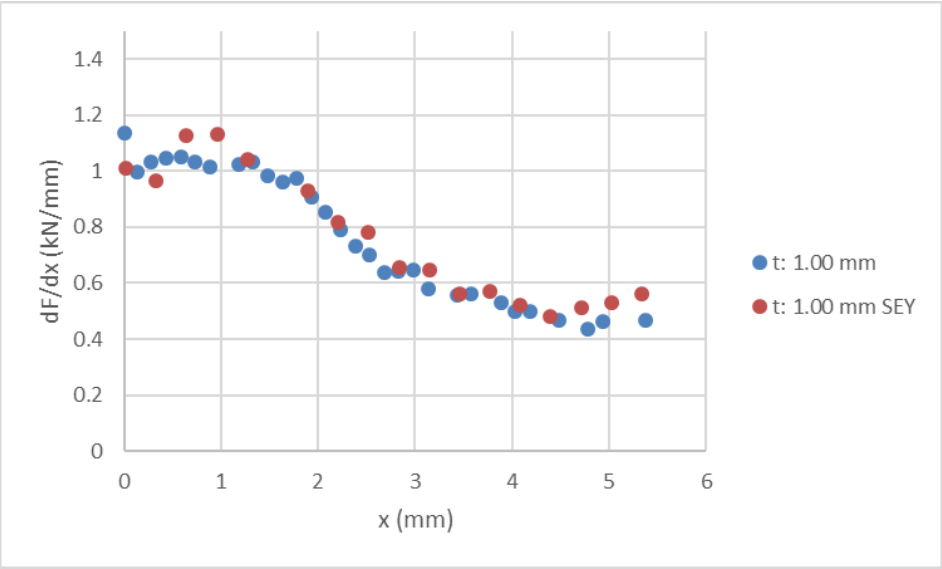
Modeli oluşturulmuş olan DG testi sırasında elde edilen zımba kuvveti-zımba stroğu (F-x) eğrileri ile deneysel çalışmalar sonucu elde edilen F-x eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 3.31'da verilmiştir. Her iki kalınlıktaki numuneye ait eğriler incelendiğinde, deneysel ve analiz sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde, Şekil 3.9'da saptandığı gibi testin ilk aşamalarında elastik eğilmeyi temsil eden doğrusal bir F-x ilişkisi mevcuttur. Plastik deformasyonun gerçekleştiği safhalarda ise eğri sürekli artış göstermektedir. Ancak

numune kalınlığının artmasıyla beraber plastik deformasyon için gerekli kuvvet değerinin de arttığı söylenebilir. Bu niteliği ile, SEY modelinden elde edilen eğri karakterisitiğinin temel deformasyon adımlarını başarıyla sergileyebildiği söylenebilir.

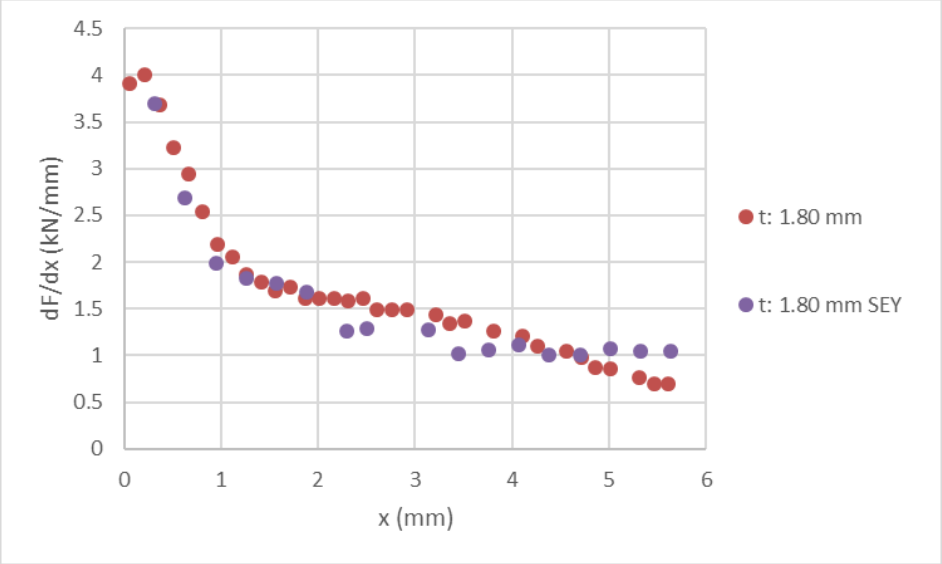


Şekil 3.31 : DG testi numunelerinin deneysel ve analiz F-x eğrilerinin kıyaslanması.

Bununla birlikte, numune analiz sonuçlarına ait dF/dx-x eğrileri 1,00 mm kalınlıktaki numune için Şekil 3.32'de, 1,80 mm kalınlıktaki numune için ise Şekil 3.33'de verilmiştir. Elde edilen dF/dx-x eğrileri incelendiğinde deneysel eğrilerle benzer olarak eğri eğimlerinin farklı deformasyon bölgelerini temsil ettiği söylenebilir. Şekil 3.32 yorumlandığında, x=1,33 mm değerine kadar eğimin sabit kalıp elastik eğilme bölgesinin olduğu görülmektedir. x=1,33 mm'den x=3,13 mm'ye kadar ise eğri sürekli bir düşüş sergilemekte ve bu aralık boyunca kenar üzerinde ezilme gerçekleşmektedir. x=3,13 mm noktası çatlağın oluşmaya başladığı nokta olup x=5,33 mm ise çatlağın kalınlık boyunca oluştuğu değerdir. Benzer şekilde Şekil 3.33 yorumladığında, x=0,21 mm değerine kadarki bölge elastik eğilme bölgesi, bu noktadan x=1,86 mm'ye kadar olan bölge kenar ezilmesinin olduğu bölgedir. Çatlak x=1,86 mm'de oluşmaya başlayıp x=5,61 mm'de kalınlık boyunca oluşmuştur. DG testinin benzetimi için hazırlanan SEY modelinde yukarıda açıklanan deformasyon bölgelerinin meydana geldiği dikkati çekmektedir. Bu çerçevede değerlendirildiğinde, oluşturulan SEY modelinin şekillendirmedeki genel deformasyon davranışını önemli oranda yansıttığı söylenebilir.



Şekil 3.32 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için deneysel ve analiz dF/dx-x eğrilerinin kıyaslanması.

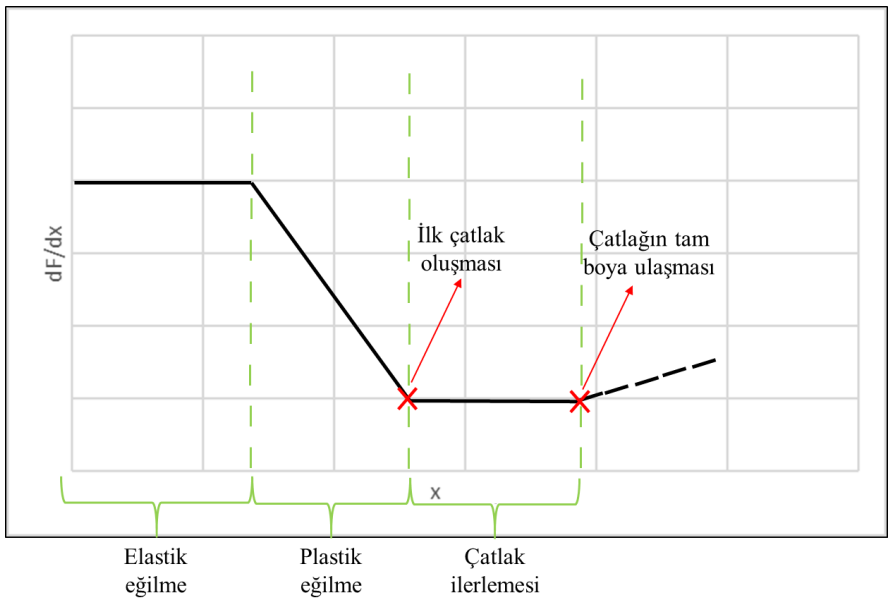


Şekil 3.33 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için deneysel ve analiz dF/dx-x eğrilerinin kıyaslanması.

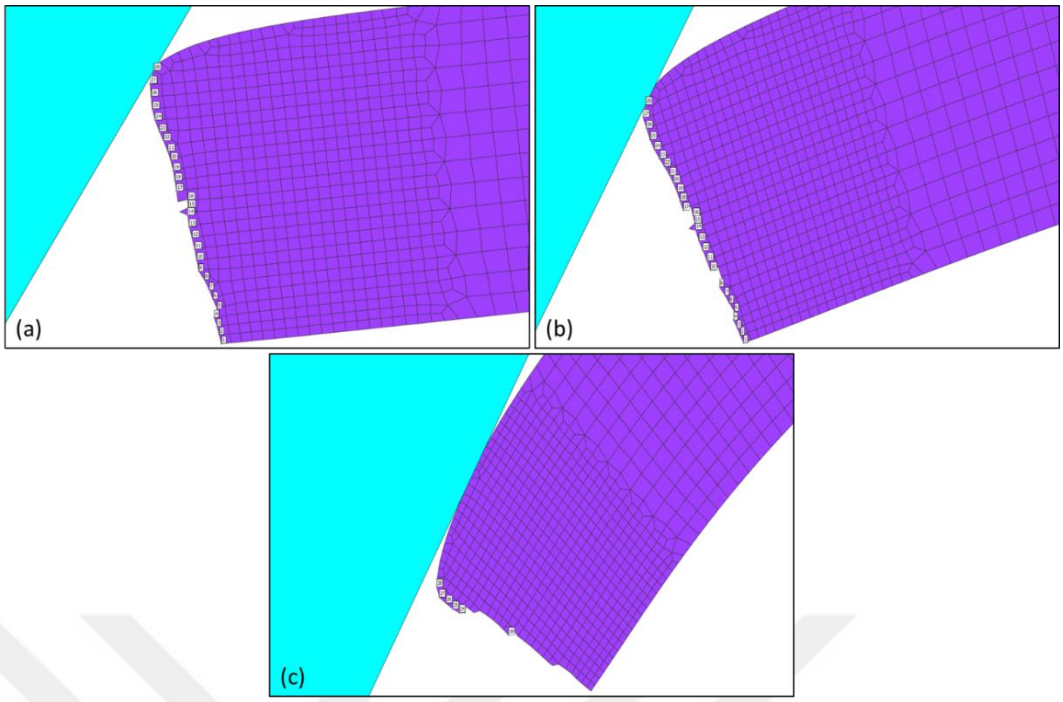
4. TARTIŞMA

Delik genişletme testi mevcut durumda ISO 16630 standardında önerildiği üzere operatörün çatlağı takip ederek çatlak malzeme kalınlığına ulaştığı anda durdurulur [4]. Ancak bu yöntem testi farklı kişilerin yapması durumunda test sonucunda saçılımlara neden olabilmektedir. Bu durumu önlemek amacıyla kullanılan dijital görüntüleme ekipmanları da test edilen malzemenin ince veya kalın olması durumlarında testin takip edilmesinde yeterli hassasiyeti gösterememektedir. Bu doğrultuda, tez kapsamında yapılan çalışmaların en önemli kısmı pahalı dijital görüntüleme ekipman kullanımına gerek kalmadan ve testi yapan kişiden bağımsız olarak delik genişletme testinin sonlandırılmasına dair bir yaklaşımda bulunabilmektir. Bu yaklaşımda bulunabilmek için, tez çalışması kapsamında yapılan DG testleri sırasında ortaya çıkan F-x eğrilerinin hem ince hem de kalın malzeme için nasıl kullanılabileceği araştırılmıştır. F-x eğrilerinden yola çıkarak dF/dx-x eğrileri elde edilerek test süreci boyunca malzemenin deformasyon seviyeleri yorumlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, iki farklı kalınlıktaki malzemeye ait deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen dF/dx-x eğrileri Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de verildiği gibi kıyaslanmıştır. Eğrilerin kalınlıktan bağımsız olarak genel karakteristiklerine bakıldığında aynı trende sahip oldukları dikkat çekmektedir. Kalınlık bazında deneysel ve analiz sonuçları incelendiğinde ise eğrilerin birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Bu kapsamda hem deneysel hem de analiz sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda malzeme deformasyonunun Şekil 4.1'de verildiği gibi elastik eğilme, plastik eğilme, çatlak başlangıcı ve çatlağın tam boya ulaşması adımlarımdan oluştuğu varsayımı yapılmıştır. Farklı kalınlıktaki iki malzeme için DG testi SEY modeli deformasyon adımları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3, Şekil 4.1'de verilen varsayıma göre incelendiğinde, malzemenin Şekil 4.2(a) ve Şekil 4.3(a)'da zımba ile ilk temasının gerçekleştiği ve elastik eğilmenin olduğu görülmektedir. Şekil 4.2(b) ve Şekil 4.3(b) incelendiğinde malzemeler sürekli düşen dF/dx değeriyle beraber plastik deformasyona uğramakta ve plastik eğilme sürmektedir. Bu süreçte, numunede meydana gelen deformasyonun büyük oranda plastik karakteristiğe büründüğü dikkati çekmektedir. Deformasyonun

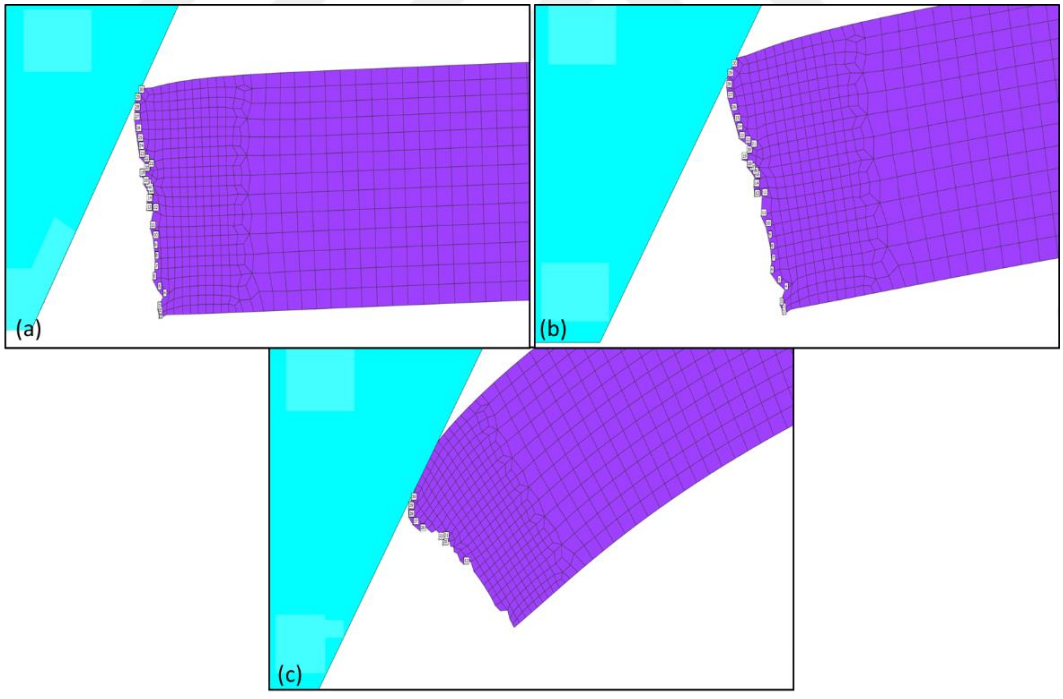
bu kademesine kadar, zımba tarafından uygulanan çökmenin delik kenarı üzerindeki germe etkisi de düşük mertebelerde gerçekleşmektedir. Bu noktadan sonra ise, zımba yüzeyi ile delik kenarı arasında belirgin bir geometrik uyum sağlanmaktadır. Bu uyum, takip eden zımba hareketlerinin büyük oranda deliğin gerilmesine neden olduğu söylenebilir. Deformasyonun bu şekilde evrilmesi ile deliğin kayma bölgesinde biriken plastik gerinim artarak hasar gelişmesi (çatlak oluşumu) meydana gelmektedir. Çatlak oluşumu ile silinen elemanların neden olduğu geometrik değişikliğe bağlı olarak kalan elemanların deformasyon hali de etkilenmektedir. Bu durum, silinen elemanın yakın komşuluğundaki diğer elemanların da kritik hasar oranına yaklaşarak seri bir şekilde silinmesine neden olmaktadır. Bu etki, çatlağın kesit doğrultusunda ilerlemesini temsil etmektedir. Nihayetinde, Şekil 4.2(c) ve Şekil 4.3(c) görüldüğü gibi delik kenarındaki elemanlar silinerek testin durdurulmasının gerekli olduğu bir zımba deplasmanına ulaşılmaktadır. Bu noktada eş zamanlı olarak, delik kenarının zımba ile teması da kesilmektedir (Şekil 4.2(c) ve Şekil 4.3(c)). Dolayısı ile zımbanın takip eden hareketlerinin deliğin gerilmesi üzerindeki etkisi de belirgin şekilde azalmaktadır. Başka bir deyiş ile, çatlağın ilerlemesinin kesme bölgesinde sürmesi yerine radyal doğrultuda ilerlemesinin daha olası olduğu bir tablo gelişmektedir. Bu durum, fiziksel testler de aynı fiziksel temeller üzerinden sürmektedir.



Şekil 4.1 : DG testi malzeme deformasyon adımları.



Şekil 4.2 : 1,00 mm kalınlıktaki numune için SEY modeli deformasyon adımları: (a) Elastik eğilme, (b) Plastik eğilme, (c) Çatlak ilerlemesi/Tam boya ulaşması.



Şekil 4.3 : 1,80 mm kalınlıktaki numune için SEY modeli deformasyon adımları: (a) Elastik eğilme, (b) Plastik eğilme, (c) Çatlak ilerlemesi/Tam boya ulaşması.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen %DG oranı (Çizelge 3.2) ve numune kalınlık ölçüm sonuçları (Şekil 3.12) ile analiz sonucunda elde edilen aynı verilerin

(Şekil 3.27-Şekil 3.30) birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Deneysel olarak 1,00 mm kalınlığındaki numune için %21,6 hesaplanan DG oranı analizler sonucunda %20,88 bulunmuştur. Benzer yönelim deneysel %14,0 ve %13,08 analiz sonucu olmak üzere 1,80 mm kalınlıktaki numune için de mevcuttur. Elde edilen verilerin tutarlılığı, analizin doğru zamanda sonlandırıldığının göstergesi olarak nitelendirilebilmektedir. Bu doğrultuda, analizlerin kesit üzerindeki elemanların kayma bölgesinin sonuna ulaştığı anda durdurulması varsayımı doğru bir yaklaşım olarak kabul edilebilir. Ancak bu noktada, 1,80 mm kalınlığındaki numune için kesit üzerindeki elemanların kayma bölgesinin sonuna ulaştığı anda, kopma bölgesindeki bazı elemanların silinmemiş olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, kalın numuneler için DG testini durdurma anında farklı hasar parametrelerinin irdelenmesini gerektirmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Şekil 3.12(a) ve Şekil 3.12(d)'de, DG testi sonrasında yapılan analizlerde kesit üzerinde çatlakların olduğu görülmektedir. Mikro yapısında martenzit bulunan çelik malzemelerde, haddeleme prosesinde martenzit taneleri birbirine yaklaşır ve kolay çatlak oluşturabilecek bir hat meydana getirirler. Bu malzemeler kesme prosesine maruz kaldıklarında ise kesme kenarında oluşan karakteristik kesme bölgelerinde, özellikle kopma bölgesinde çatlağın dallanarak ayrılmasına ve laminasyon bölgeleri arasında ilerlemesine neden olabilmektedir. Yapılan DG testi sonrasında ise bu çatlakların görünür olması beklenen bir durumdur. Diğer bir yandan 1,00 mm kalınlığındaki numuneye ait Şekil 3.12(a)'daki çatlak boyu ile 1,80 mm kalınlığındaki numuneye ait Şekil 3.12(d)'deki çatlak boyunun farklı olduğu görülmektedir. Bu durum, haddeleme prosesinde malzemeye uygulanan redüksiyon oranına ve malzeme mikro yapısında bulunan martenzit tanelerinin yoğunluğuna bağlı olarak değişim gösteriyor olabilir.

DG testi sonrası numunelerin kesit SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 3.14 Ve Şekil3.15), delik delme sırasında oluşan plastik deformasyondan kaynaklı oluşabilecek olan mikro boşluk ve hasarların genişletme prosesinde maruz kaldıkları deformasyon ve kuvvetin etkisiyle büyüdükleri görülmektedir [2]. Bu hasar ve boşlukların varlığı, yoğunluğu ve ilerleme hızları DG oranını etkilemektedir. Kesit geneline bakıldığında çatlak yoğunluğunun özellikle kopma bölgelerinde daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Diğer bir yandan, yumuşak ferrit ve sert martenzit tanelerinden oluşmakta olan çift fazlı çeliklerde deformasyon sırasında, sert faz genellikle başlangıçta elastik olarak deforme olurken, yumuşak faz plastik olarak

deforme olur. Yumuşak ve sert fazlar arasındaki arayüzde oluşan çatlaklar, farklı sertlikteki fazlar arasındaki yüzey alanı arttıkça arayüz boyunca kolayca yayılan çatlaklara dönüşmektedirler. Bu doğrultuda, Şekil 3.14 Ve Şekil3.15'te görülmekte olan çatlakların çoğunluğunun martenzit tane sınırlarından ilerlemesi beklenen bir durum olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 3.32 ve Şekil3. 33'de verilen dF/dx-x eğrilerinin genel özelliklerinde çatlağın tam boya ulaşması sonrasında deneysel eğriler azalma seyrine girerken, hesaplamalı eğriler hafif bir artış yönelimi izlemektedir. Bu farklılık DP malzemeler için yukarıda tartışılan çatlak oluşturma ve çatlak ilerleme davranışlarına dayandırılarak açıklanabilir. Hesaplamalı modellerde, malzemenin hasar davranışı bütünsel olarak temsil edilmektedir. Başka bir değişle, malzeme içerisinde yer alan ve gerilme halini lokal bölgelerde belirgin şekilde arttıran martenzit-ferrit etkileşimlerini dikkate alınmamaktadır. Söz konusu etkileşim, delik çevresinde birden fazla çatlağın eş zamanlı olarak gelişmesini sağlayan önemli bir etkiye sahiptir. Halbuki, hesaplamalı çalışmalarda 2 boyutlu olarak kurgulanan modelin bu tip bir fiziksel durumu temsil etme yeteneği bulunmamaktadır. Nitekim, gerçekte kesit içerisinde fazla sayıda meydana gelen çatlağın neden olduğu gerilme yığılmaları hesaplamalı modelde dikkate alınmamaktadır. Bu durum modelin durdurma noktası sonrasındaki mekanik davranışının fiziksel duruma kıyasla yetersiz olmasına neden olmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

DG testini sonlandırmak için ISO standardında operatörün çatlağı takip etmesi ve çatlağın malzeme kalınlığına ulaştığı anda testin sonlandırılması önerilmektedir. Bu tez kapsamında, testi sonlandırma sürecinden kaynaklı olarak test sonuçlarında ortaya çıkan saçılımların önüne geçebilmek amacıyla bir yaklaşımda bulunulmuştur. Bu yaklaşım doğrultusunda DG testi sırasında ortaya çıkan F-x ve dF/dx-x eğrileri irdelenmiştir. Bu çerçevede yapılan araştırma çalışmalarından aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Zımba ile delme prosesinde, delinmiş kenar üzerinde karakteristik kesme bölgeleri oluşmaktadır. Bu kesme bölgelerinden olan kopmada, deformasyon ve tane yönelimlerinin daha fazla olması, DG testindeki çatlakların bu bölgede başlayan mikro çatlakların ilerlemesiyle oluşma ihtimalinin artmasına neden olmaktadır.
2. DG testleri sırasında ortaya çıkan F-x ve dF/dx-x eğrileri her iki kalınlıktaki numune için aynı karakteristik özelliği göstermektedir.
3. F-x eğrilerinde numune kalınlığının artması numuneyi plastik deformasyona uğratmak için gerekli olan kuvvet değerini de arttırmaktadır.
4. dF/dx-x eğrileri elastik eğilme, plastik eğilme ve çatlak ilerlemesi olmak üzere DG testindeki farklı deformasyon adımlarını başarıyla temsil etmektedir.
5. dF/dx-x eğrisinin ilk kısmındaki eğimin 0 olduğu kısımda numune elastik olarak eğilmekte, eğimin düşüş gösterdiği kısımda plastik eğilme ile birlikte plastik deformasyon gerçekleşmektedir. Eğimin azalarak en düşük değerini aldığı ulaştığı noktada çatlağın ilk oluşumu gerçekleşmekte ve 0 eğim ile çatlak ilerlemesinin bittiği noktada ise çatlak tam boyuna ulaşmaktadır.
6. Yapılan SEY analizlerinde DG testi kesit üzerindeki elemanların kayma bölgesinin sonuna ulaştığı anda sonlandırılmıştır. Bahsedilen test sonlandırma yönteminin kullanıldığı analiz sonuçlarından elde edilen DG oranları ile numune kalınlık ölçümleri, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile ince numuneler için büyük oranda örtüşmektedir. Bu durum testi sonlandırmada kullanılan yöntemin, doğru sonuçları elde etmek için farklı kalınlık

varyasyonlarında hasar parametrelerinin geliştirilmesiyle kullanılabilecek bir yöntem olduğunu göstermektedir.

7. DG testi sonunda deforme olan kesitte genellikle martenzit ve ferrit tane sınırları boyunca ilerleyen çatlaklar meydana gelmektedir. Çatlakların bu sınır boyunca ilerlemesi, ferrit ve martenzit taneleri arasındaki sertlik ve deformasyon davranışı farkı olmasıdır.
8. Kesme prosesi sonrasında 1,00 mm kalınlıktaki numune kritik üç eksenlilik değerine, 1,80 mm kalınlıktaki numuneye göre kesit kenarından daha iç bölgelerde ulaşmaktadır.
9. Kesme prosesi sonrasında karakteristik kesme bölgelerinde hasar parametresi düşük değerlerdeyken kopma bölgelerinde ve özellikle kopma bölgesinin sonunda daha yüksek değerlere çıkmaktadır.
10. Kesme prosesi sonrasında efektif plastik gerinimi ince numunede kayma bölgesinde en az olduğu ve genel olarak kenar boyunca homojen bir yapı sergilemektedir. Kalın numune ise kayma bölgesinde diğer numunedeki gibi düşük gerinime sahip olup bölgesel yoğunluklar görülmektedir.
11. Numune kalınlığının artması kesme prosesi için numuneye uygulanması gereken zımba kuvvetini de arttırmaktadır.
12. Deneysel ve analiz sonuçlarına bakıldığında numunelerin %DG oranları kalınlık arttıkça azalmaktadır.
13. Çekme deneyi, kesme prosesi ve DG testi kapsamındaki çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulmuş benzetim modellerinin deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları yüksek doğrulukta temsil edebildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] **Tamarelli, C.M.** (2011). AHSS 101: The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications, *Steel Market Development Institute*. Southfield, Michigan.

[2] **Terrazas, O. R.** (2016). *Correlation of Microstructure, Tensile Properties and Hole Expansion Ratio in Cold Rolled Advanced High Strength Steels.* (Yüksek Lisans tezi). Colorado School of Mines, Golden, CO.

[3] **Paul, S.K.** (2020). A critical review on hole expansion ratio, *Materialia.*

[4] **ISO** (2009). *Metallic Materials-Sheet and Strip- Hole Expanding Test***.**

[5] **Fracz, W., Stachowicz, F., Trzepiecinski, T.** (2012). Investigation of Thickness Distribution in Hole Expanding of Thin Steel Sheets, *Archives of Civil and Mechanical Engineering,* (12), 279-283.

[6] **Thipprakmas, S., Phanitwong, W.** (2012). Finite Element Analysis of Flange-Forming Direction in the Hole Flanging Process, *Int J Adv Manuf Technol*, (61), 609-620.

[7] **Hyun, D.I., Oak, S.M., Kang, S.S., Moon, Y.H.** (2002). Estimation of Hole Flangeability for High Strength Steel Plates, *Journal of Materials Processing Technology,* (130-131), 9-13.

[8] **Hance, B.M., Comstock, R.J., Scherrer D.K.** (2013). The Influence of Edge Preparation Method on the Hole Expansion Performance of Automotive Sheet Steels, *SAE Technical Papers*.

[9] **Behrens, B.A., Diaz-Infante, D., Altan, T., Yilkiran, D., Wölki, K., Hübner, S.** (2018). Improving Hole Expansion Ratio by Parameter Adjustment in Abrasive Water Jet Operations for DP800, *SAE International*.

[10] **Madrid, M., Van Tyne, C.J., Sdagopan, S., Pavlina, E.J., Hu, J., Clarke, K.D.** (2018). Effects of Testing Method on Stretch-Flangeability of Dual-Phase 980/1180 Steel Grades, *Metals & Materials Society.*

[11] **Li, J., Wang, H., Yan, D., Mendiguren, J.** (2016). Influence of Experiment Methods on Limit Hole Expansion Ratio, *International Conference on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application.*

[12] **HU, X.H., Sun, X., Golovashchenko, S.F.** (2015). An Integrated Finite Element-Based Simulation Framework: From Hole Piercing to hole expansion, *Finite Elements in Analysis and Design,* (109), 1-13.

[13] **Ye, C., Chen, J., Xia, C., Yu, X.** (2014). Study of Curvature and Pre-Damage Effect on the Edge Stretchability of Advanced High strength Steel Based on a New Simulation Model, *Int J Mater Form.*

[14] **Sartkulvanich, P., Kroenauer, B., Golle, R., Konieczny, A., Altan, T.** (2010). Finite Element Analysis of the Effect of Blanked Edge Quality Upon Stretch Flanging of AHSS, *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 279-282.

[15] **Krempaszky, C., Larour, P., Freudenthaler, J., Werner, E.** (2014). Towards More Efficient Hole Expansion Testing, *IDDRG Conference.*

[16] **Chen, X., Jiang, H., Cui, Z., Lian, C., Lu, C.** (2014). Hole Expansion Characteristics of Ultra High Strength Steels, *Procedia Engineering*, (81), 718-723.

[17] **Paul, S.K.** (2014). Non-Linear Coreelation Between Uniaxial Tensile Properties and Shear-Edge Hole Expansion Ratio, *Journal of Materials Engineering and Performance.*

[18] **Zubia, B., Agirre, J., Argandona, E.S., Galdos, L., Mendiguren, J.** (2018). Study on the Influence of the Springback on the Hole Expansion Ratio Characterization, *Materials Science: Materials Review.*

[19] **Yoon, J.I., Jung, J., joo, S.H., Song, T.J., Chin, K.G., Seo, M.H., Kim, S.J., Lee, S., Kim, H.S.** (2016). Correlation Between Fracture Toughness and Stretch-Flangeability of Advanced High Strenght Steels, *Materials Letters*, 322-326.

[20] **Paul S.K., Mukherjee, M., Kundu, S., Chandra, S.** (2014). Prediction of Hole Expansion Ratio for Automotive Grade Steel, *Computational Material Science*, (89), 189-197.

[21] **Hashimoto, K., Kuwabara, T., Iizuka, E., Yoon, J.W.** (2010). Hole Expansion Simulation of High Strength Steel Sheet, *Int J Mater Form*, (1), 259-262.

[22] **Nikhare, C.P.** (2018). Analysis of Hole Expansion Limit Through Biaxial Test, *Materials Today Proceedings*, 44-50.

[23] **Paul, S.K.** (2019). The Effect of Deformation Gradient on Necking and Failure in Hole Expansion Test, *Manufacturing Letters*, 50-55.

[24] **Fedorko, M., Urbanek, M., Machalek, J.** (2019). Determination of Edge Strain in DP Steel Sheet for Predicting Edge Cracking, *Materials Science and Engineering.*

[25] **Yoon, J.I., Jung, J., Lee, H.H., Kim, G., Kim, H.S.** (2016). Factors Governing Hole Expansion Ratio of Steel Sheets with Smooth Sheared Edge, *Metals and Materials International*, 1009-1014.

[26] **Paul, S.K.** (2019). Correlation Between Hole Expansion Ratio (HER) and Notch Tensile Test, *Manufacturing Letters*, 1-4.

[27] **Iizuka, E., Hashimoto, K., Kuwabara, T.** (2014). Effects of Anisotropic Yield Functions on the Accuracy of Forming, *Procedia Engineering*, 2433-2438.

[28] **Lee, J.Y., Lee, K.J., Lee, M.G., Kuwabara, T., Barlat, F.** (2019). Numerical Modeling for Accurate Prediction of Strain Localization in Hole Expansion of a Steel Sheet, *International Journal of Solids and Structures*, 107-118.

[29] **Suzuki, T., Okamura, K., Capilla, G. Hamasaki, H., Yoshida, F.** (2018). Effect of Anisotropy Evolution on Circular and Oval Hole Expansion Behavior of High-Strength Steel Sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, 556-570.

[30] **Tsutamori, H., Amaishi, T., Chorman, R.R., Eder M., Vitzthum, S., Volk, W.** (2020). Evaluation of Prediction Accuracy for Anisotropic Yield Functions Using Cruciform Hole Expansion Test, *Journal of Manufacturing and Materials Processing.*

[31] **Amaishi, T., Tsutamori, H., Nishiwaki, T. Kimoto, T.** (2020). Description of Anisotropic Properties of Sheet Metal Based on Spline Curves and Hole Expansion Test Simulation of High-Strength Steel, *International Journal of Solids and Structures*, 672-684.

[32] **Yu, X., Chen, J. Chen, J.** (2016). Interaction Effect of Cracks and Anisotropic Influence on Degradation of Edge Stretchability in Hole-Expansion of Advanced High Strength Steel, *International Journal of Mechanical Sciences*, 348-359.

[33] **Sun, Q., Zan, D., Chen, J., Pan, H.** (2015). Analysis of Edge Crack Behavior of Steel Sheet in Multi-Pass Cold Rolling Based on a Shear Modified GTN Damage Model, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 259–266.

[34] **Chen, Y., Zhang, C., Varé, C.** (2017). An Extended GTN Model for Indentation- Induced Damage, *Computational Material Science*, 229–235.

[35] **Guzmán, C. F., Yuan, S., Duchêne, L., Flores, E. S., Habraken, A. M.** (2017). Damage Prediction in Single Point Incremental Forming Using an Extended Gurson Model, *International Journal of Solids and Structures*, 1–12.

[36] **Fesich, T.M., Mohan, P., Marzougui, D., Kan, C.** (2008). A Study of the Gurson Damage Model and Numerical Simulation of Ductile Failure in LS-DYNA, 7. *LS-DYNA Anwenderforum Bamberg 2008*.

[37] **Yang, K.C., Wang, T.H., Tu, J.F., Chiang, L.J., Cheng, W.J., Huang, C.Y.** (2018). The Development of High- Strenght Steel of 980Mpa Grade with Higher Hole Expansibility, *China Steel Technical Report*, 1-6.

[38] **Hasegawa, K., Kawamur, K., Urabe, T., Hosoya, Y.** (2003). Effects of Microstructure on Stretch-Flange-Formability of 980 MPa Grade Cold-Rolled Ultra High Strength Steel Sheets, *ISIJ International*, 603-609.

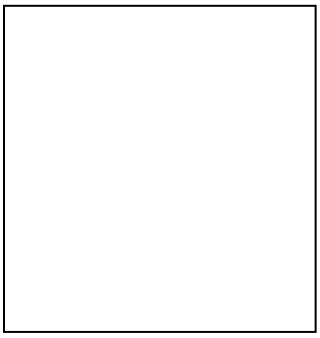
[39] **Terrazas, O.R., Findley, K.O., Van Tyne, C.J.** (2016). Influence of Martensite Morphology on Sheared-Edge Formability of Dual-Phase Steels, *ISIJ International.*

[40] **Xu, X., Xu, B.Y., Chen, P., Liu, R.D., Wang, G.D., Yi, H.L.** (2020). Effect of Austenite Stability on the Hole Expansion Behavior of δ-TRIP Steels, *Materials Today Communications*.

[41] **Choi, S.H., Kim, E.Y., Kim, S.I.** (2014). The Micromechanical Deformation Behaviors of Hot-Rolled 590FB Steel During Hole-Expansion Test, *International Journal of Plasticity*, 184-200.

[42] **Kim, J.H., Lee, M.G., Kim, D., Matlock, D.K., Wagoner, R.H.** (2010). Hole-Expansion Formability of Dual-Phase Steels Using Representative Volume Element Approach with Boundary-Smoothing Technique, *Materials Science and Engineering A*, 7353-7363.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Refiye Ardalı

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 17.06.1993 – Gebze/KOCAELİ

E-posta **:** ardalirefiye@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2016, Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- The Relationship Between F-X Diagram and Visual Inspection on the Edge Cracking Tendency of Dual Phase Steels (METAL2018)