

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DELİK GENİŞLETME DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELA NUR ŞAHİN

TEZ DANIŐMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2022

10475337

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DELİK GENİŞLETME DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELA NUR ŞAHİN

TEZ DANIŐMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ESENER

BİLECİK, 2022

10475337

BEYAN

“Alüminyum Alaşımlarının Delik Geniştirme Davranışının Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

| | |
|---|----------------------------|
| Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir. | |
| DESTEK ALINMIŞTIR | DESTEK ALINMAMIŞTIR |
| Destek alındı ise; | |
| Destekleyen kurum; | |
| Desteğin Türü | Proje Numarası |
| 1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi) | |
| 2- TÜBİTAK | |
| Diğer;..... | |
| ETİK KURUL onayı var ise; | |
| ETİK KURUL karar tarih/sayı: |/..... |

Ela Nur ŞAHİN

.././2022

İmza

ÖN SÖZ

Çalışmamda değerli bilgilerini, tecrübelerini ve geleceğim için çizdiğim yolda önerilerini ve hayat tecrübelerini benimle paylaşan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER hocama, hayatımın her evresinde yanımda olan ve desteğini benden esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ela Nur ŞAHİN

2022

ÖZET

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DELİK GENİŞLETME DAVRANIŞININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Sac metaller birçok avantajlarından dolayı başta otomotiv sektörü olmak üzere endüstride birçok sektörde sıklıkla tercih edilmektedir. Sac metallerin şekillendirilmesiyle genellikle karmaşık malzeme formları elde edilir. Bundan dolayı karmaşık formlama proseslerini basit formlama proseslerine indirgeyen benzetim testleri ortaya çıkmıştır. Benzetim testlerinin kullanımıyla şekillendirme sırasında meydana gelecek hataların önceden tahmin edilip telafi edilmesi zaman ve maliyet açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu amaçla sonlu elemanlar analizleri sıklıkla kullanılmaktadır. Düzlemsel sac açınımlarının yanı sıra açınımda delik formu bulunan sac açınımları da mevcuttur. Bu tarz problemlerin benzetimi için delik genişletme tercih edilmektedir. Bu çalışmada farklı plastisite modelleri temel alınarak 5xxx serisi alüminyum alaşımının delik genişletme prosesinin nümerik ve deneysel değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirme kriteri olarak delik genişletme oranı kullanılmış olup delik genişletme oranına ek olarak eşdeğer gerilme ve yüzde incelme dağılımları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Sonlu Elemanlar Analizi, Benzetim Testleri, Delik Genişletme

ABSTRACT

INVESTIGATING THE BEHAVIOR OF ALUMINUM ALLOYS UNDER HOLE EXPANSION; EXPERIMENTALLY AND NUMERICALLY

Sheet metals are frequently used especially in automotive industry due to its strength/weight ratio. Sheet metal products are generally have complex forms. Therefore, simulative tests have been developed that converts complex forming processes to simple forming operations. By using simulative tests, it is a great advantage in terms of time and cost to predict and compensate the forming defects that will occur during forming process. For this purpose, finite element analysis is frequently used. Sheet blanks may have hole forms in automotive industry especially in structural parts. Hole expansion simulative tests are preferred for these operations. In this study, experimental and numerical investigations are performed for hole expansion behavior of 5XXX aluminum alloy by using different plasticity models. Hole expansion ratio is used for the comparison parameter in addition equivalent stress and thinning distributions are evaluated.

Keywords: Sheet Metal Forming, Finite Element Analysis, Simulation Tests, Hole Expansion

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ..... | i |
| ÖZET | ii |
| ABSTRACT | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | v |
| TABLolar LİSTESİ..... | vii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. DELİK GENİŞLETME PROSESİ..... | 4 |
| 2.1. Bölüm Değerlendirmesi..... | 11 |
| 3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ | 13 |
| 3.1. Barlat-89 Malzeme Modeli..... | 19 |
| 3.2. Hill-48 Malzeme Modeli..... | 19 |
| 3.3. von Mises Malzeme Modeli..... | 20 |
| 3.4. ŞSD Tabanlı Malzeme Modeli | 20 |
| 4. UYGULAMA ÇALIŞMASI | 22 |
| 4.1. Deneysel Çalışmalar | 22 |
| 4.2. Sonlu Elemanlar Analizi | 23 |
| 5. TARTIŞMA | 35 |
| KAYNAKÇA | |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 1.1. Bir Otomobilde Bulunan Sac Malzemeler | 1 |
| Şekil 1.2. Derin Çekme İşlemi Sonrası Geometri Formları a) Sonlu Elemanlar Analizi, b) Deneysel Parça | 2 |
| Şekil 2.1. Delik Genişletme İşleminin Aşamaları | 4 |
| Şekil 2.2. Delik Genişletme Prosesi Sonrası Sac Numune Ve Yırtılma | 5 |
| Şekil 2.3. Plastik Anizotropinin Tek Eksenli Gerilme Yönleri | 5 |
| Şekil 2.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı | 6 |
| Şekil 2.5. ASTM Standartında Nakajima Test Numuneleri | 7 |
| Şekil 2.6. Delik Genişletme Testinin Şeması..... | 8 |
| Şekil 2.7. Delik Genişletme Testi İçin Farklı Zimba Geometrileri | 9 |
| Şekil 2.8. Delik Kenarı Boyunca Bir Elemandaki Gerilim Durumunun Şematik Gösterimi . | 10 |
| Şekil 3.1. Fiziksel Bir Yapının Sonlu Elemanlar Gösterimi | 13 |
| Şekil 3.2. Sonlu Elemanlar Düğüm Noktaları Ve Elemanları | 14 |
| Şekil 3.3. Daireyi Elemanlara Bölmek | 15 |
| Şekil 3.4. 1D, 2D, 3D Geometrisinin Ağ Gösterimi | 17 |
| Şekil 3.5. Sonlu Elemanlar Analizinin İşlem Basamakları | 17 |
| Şekil 4.1. Delik Genişletme Yırtılma Formu | 23 |
| Şekil 4.2. Delik Genişletme ¼ Kalıp Tasarım Modeli | 24 |
| Şekil 4.3. Sac Açınım Ağ Yapısı | 25 |
| Şekil 4.4. Barlat-89 Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği..... | 27 |
| Şekil 4.5. ŞSD Tabanlı Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği | 27 |
| Şekil 4.6. Hill-48 Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği | 28 |
| Şekil 4.7. Von Mises Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği | 28 |
| Şekil 4.8. Deneysel Ve Plastisite Modellerinin Yırtılma Yükselikleri | 29 |
| Şekil 4.9. Barlat-89 Eşdeğer Gerilme Dağılımı | 30 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.10. Hill-48 Eşdeğer Gerilme Dağılımı..... | 30 |
| Şekil 4.11. Von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımı | 31 |
| Şekil 4.12. ŞSD Eşdeğer Gerilme Dağılımı | 31 |
| Şekil 4.13. Barlat-89 Yüzde İncelme Dağılımı..... | 32 |
| Şekil 4.14. Hill-48 Yüzde İncelme Dağılımı | 32 |
| Şekil 4.15. Von Mises Yüzde İncelme Dağılımı | 33 |
| Şekil 4.16. ŞSD Yüzde İncelme Dağılımı..... | 33 |
| Şekil 4.17. Plastisite Modellerin Eşdeğer Gerilme Karşılaştırılması..... | 34 |
| Şekil 4.18. Plastisite Modellerin Yüzde İncelme Karşılaştırılması | 34 |

TABLULAR LİSTESİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Tablo 4.1. Çalışma Kapsamında Kullanılan Malzemenin Malzeme Modellerine Göre Mekanik Özellikleri..... | 28 |

1. GİRİŞ

Plastik şekil verme yöntemi bir malzemeyi akma gerilmesinin üzerinde bir yüküyle şekil değişimine zorlayarak kalıcı bir form elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda dövme gibi kütle şekillendirme yöntemlerinin yanında sac metal şekillendirme gibi düzlem gerilme problemleri de plastik şekil verme başlığı altında yer almaktadır (Köleoğlu, Esener, 2019: 1). Başta otomotiv sektörü olmak birçok sektörde sac metaller yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe çeşitli ürünler üretebilmek için ekonomik bir imalat sistemine ve üretim sürecine sahip olmak gerekir. Üretim süreçleri seri ve iyileştirmeye yönelik olmalıdır. Otomobil üretilmesi ile birlikte daha az enerji tüketimi ve çevre kirliliği gibi konularda iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu çalışmalar yapılması ile otomobil ağırlıklarının azaltılması ve bununla beraber sac metallerin şekillendirilmesi geliştirilmektedir (Özdemir vd., 2017: 1). Şekil 1.1'de gösterildiği gibi otomobilin gövde panellerinde ve yapısal parçaların imal edilmesinde sac metaller kullanılır. Bu kadar yaygın olarak kullanılmasının sebebi otomotiv endüstrisinde ağırlık/dayanım avantajının iyi beklentisidir (Köleoğlu, Esener, 2019: 2).

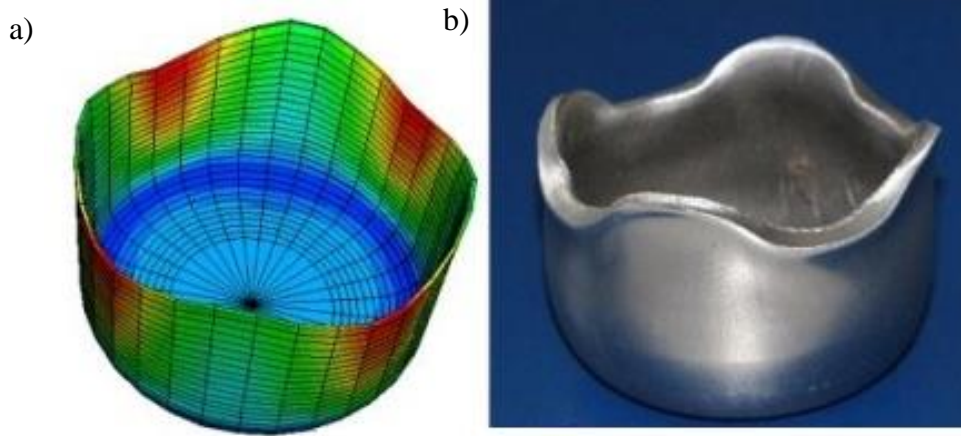


Şekil 1.1. Bir Otomobilde Bulunan Sac Malzemeler

Kaynak: (vdi,2020:1)

Sac metaller, haddeme yöntemi ile rulolar halinde üretilir. Presler kullanılarak gerçekleştirilen sac metal şekillendirme işlemi, günümüzde iyi gelişen, yaygın olarak kullanılan bir imalat prosesidir. Sac metaller yüksek dayanım, yüksek boyutsal doğruluk, iyi yüzey kalitesi, nispeten düşük maliyeti ve seri üretime uygun olduğu için kullanılır (İriç vd., 2013: 1). Sac metallerin kalınlığı genelde; 0,4 mm – 6 mm arasında değişmektedir (Çapan, 2003: 2). Sac metaller kalınlıkları diğer iki boyutlarına (genişlik ve uzunluk) göre ince malzemelerdir ve plastik deformasyona uğratarak şekillendirilmesi sırasında birçok problemle karşılaşılabilir. Kalınlık bölgesinde daha farklı bir değişim olması durumunda sac

malzemede yırtılmalar, kırışmalar, kulaklanmalar gözlenir (Sezgin, 2017; Köse, 2015: 3). Bu problemler önceden tahmin edilebilmesi için teorik yöntemler kullanılır. Teorik yöntemler kullanılarak bu problemler önceden tahmin edilebilir ve endüstriyel uygulamalardaki problemleri çözme, verimlilik artışı ve maliyet azaltma nedeniyle sıklıkla kullanılır. Sac metal parça simülasyonları, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Diğer nümerik yaklaşımlarla karşılaştırıldığında sonlu elemanlar yöntemi, sac metal formlama yöntemlerinde bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları en sık kullanılan yöntemdir (Hekim, 2016: 1). Şekil 1.2’de bir derin çekme işlemi sonrası geometri formunun deneysel ve sonlu elemanlar analizinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sac metallerde üretim sırasında oluşan problemler önceden tahmin edilerek proses parametreleri değerleri veya kalıp eleman geometrisinde geliştirme yapılarak bu problemler engellenebilir.



Şekil 1.2. Derin Çekme İşlemi Sonrası Geometri Formları a) Sonlu Elemanlar Analizi, b) Deneysel Parça

Kaynak: (Dierk, 2020: 1)

Değişen teknoloji ile sürekli gelişim gösteren sonlu eleman analiz yazılımları sayesinde farklı malzeme türleri ile farklı boyutlardaki sac parçalarda şekil verme esnasında meydana gelen gerilme, majör ve minör birim şekil değişimi, incelmeler gibi değerler bulunabilmektedir (Hekim, 2016: 3). Sonlu elemanlar analiz programları, bu tahminleri gerçekleştirirken malzeme modeli, hesaplama parametreleri, proses koşulları gibi bir çok parametreye ihtiyaç duymaktadır. Bunların arasında malzeme modelinin etkisi diğer parametrelere göre baskındır. Günümüzde malzeme modelleri arasında Barlat-89, Hill-48, von Mises sıklıkla tercih edilen modellerdir (Kılıç vd., 2018: 2). Malzemelerin plastik şekillenme davranışını belirlemek adına karmaşık formlama proseslerini temel bükme problemlerine ya da daha basit formlama

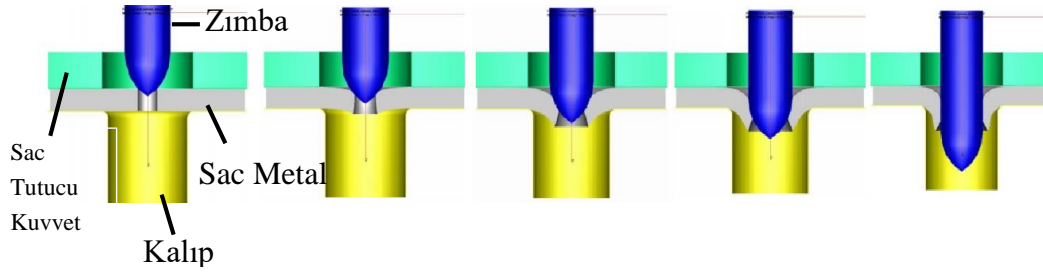
problemlerine indirgeyen geometriler geliştirilmekte ve bu geometrilerle denemeler yapılmaktadır. Benzetim testler olarak adlandırılan bu testler sonrasında malzemenin şekillendirilebilirliği hakkında bilgi edinilir. Benzetim testlerinde proses parametrelerinin de geometri üzerine etkileri tespit edilebilmektedir. Bu testler aynı zamanda deneme-yanılma sürecini ortadan kaldırmak amacı ile bilgisayar ortamında da geliştirilerek süreçteki zaman kayıplarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. V kalıpta serbest bükme, U kanal çekme, kare çekme, derin çekme gibi düzlemsel sac geometrisine sahip testler benzetim testleri grubundadır (Esener vd., 2018: 4). Düzlemsel sac geometrilerinin yanı sıra delik genişletme prosesi gibi açınımında çentik formu bulunan sac geometrileri de benzetim testleri içinde incelenebilir, bu kapsamda delik genişletme yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Delik genişletme, merkezinde delik bulunan düz bir sacın derin çekme işlemidir ve belirli bir sac malzemenin kenar gerilme limitini ölçmede yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir (Zubia vd., 2018: 2). Delik genişletme sac levhaların kenar germe işlemi sırasında sınırlayıcı bir kriter olarak (delik genişletme oranı) yaygın bir şekilde kullanılır (Paul, 2018: 2).

Endüstride delikli sacların şekillendirilmesinde genellikle çelik ve alüminyum alaşımları kullanılmakta olup alüminyumlar çeliklere göre daha çok tercih edilmektedir. Bunun sebebi alüminyumun yoğunluğunun daha düşük ve çeliklere göre daha hafiftir. Alüminyum daha hafif olmasına rağmen, neredeyse çelik kadar mukavemetlidir. Otomotiv sektöründe daha hafif bir araç daha düşük yakıt tüketimi, daha iyi hızlanma, daha iyi frenleme ve daha kolay kullanım anlamına gelir. Alüminyum malzeme çeliklere göre daha ucuzdur. Alüminyumlar otomobilde tekerlekler, kaputlar, gövde paneller, direksiyon bileşenleri, çamurluklar vb. birçok bölümde kullanılmaktadır (Krempaszky vd., 2014: 2).

Yapılan tez çalışmasının amacı; 5xxx alüminyum alaşımlarla delikli şekillendirme operasyonlarla malzeme modellerinin tahmin kabiliyetini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda önce yırtılma yüksekliklerini tespit etmek için deneysel çalışma gerçekleştirildi. Daha sonrasında Hill-48, Barlat-89, von Mises, son olarak şekillendirme sınır diyagramı temelli bir kriter olan malzeme modelleri kullanılarak bu malzeme modellerinin ilgili deneydeki yırtılma yükseklikleri açısından tahmin performansları kıyaslanmıştır. Tez çalışmasının sonucunda bahsi geçen malzeme modellerinin deneysel sonucu delik genişletme oranı açısından tahmin performanslarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

2. DELİK GENİŞLETME PROSESİ

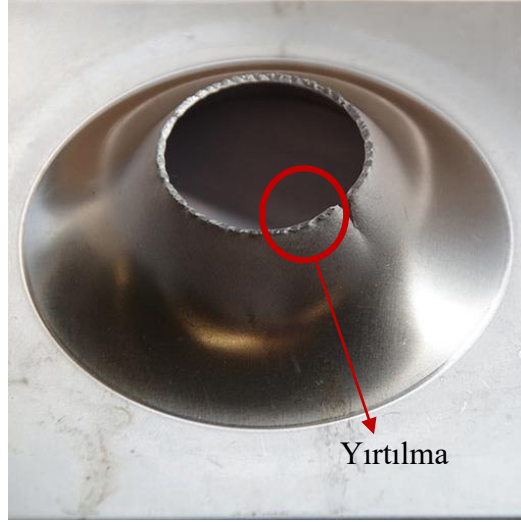
Delik genişletme genelde kesilmiş kenarların gerilebilirliğini incelemek için yapılan simülatif bir testtir (Kreampaszky vd., 2014: 2). Delik genişletme, bir tür derin çekme işlemidir. Şekil 2.1’de delik genişletme prosesinin aşamaları görülmektedir. Bu aşamalarda zımba şekillendirme kuvveti etkisiyle aşağı doğru hareket eder, sac metalin merkez bölgesi zımba kuvveti etkisi altında plastik deformasyon meydana getirir ve merkezdeki deliğin çapı artar (Çınar, 2006: 1). Sacın kenarında herhangi bir kusur meydana gelmeden şekillendirebilme yeteneği delik genişletme ile tespit edilebilir, konik bir zımba genellikle önceden açılmış 10 mm çapındaki deliğe çatlak oluşumu başlayana kadar kuvvet uygular (Thesing vd., 2016: 3).



Şekil 2.1. Delik Genişletme İşleminin Aşamaları

Kaynak: (Tomas vd., 2018: 2)

Delik genişletme testi, sac metallerin şekillendirilebilirliğini ölçmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Delik genişletme testi, ortasında bir delik bulunan bir levhanın derin çekme işlemidir. Testi gerçekleştirmek için genelde ISO 16630 standartlarına göre konik zımba kullanılır. Çekme işlemi sırasında bir ham parçanın iç deliği genişler ve ilk çatlak görünene kadar devam eder. Şekil 2.2’de delik genişletme yapılan bir prosesin deforme olmuş hali görülmektedir. Delik genişletme testinin sonuçları üzerinde malzeme mikroyapısının, testten önceki delik kenarının kalitesi vb. gibi çeşitli faktörlerin etkisi vardır (Zubia vd., 2018: 2). Delik genişletme esnasında çekirdeklenme bölgesi olarak işlev görmesi ve çatlakların gelişmesi için kesilmiş kenarın çevresinde birkaç çentik üretir. Çevresel gerilmeler boyun verme ve deliklerin kenarlarında yırtılma ile çatlama neden olur (Li vd., 2016: 1).

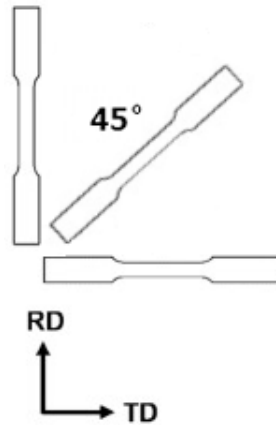


Şekil 2.2. Delik Genişletme Prosesi Sonrası Sac Numune Ve Yırtılma

Kaynak: (Stemmer, 2020: 1)

Delik genişletme testinde deliğin etrafında gerilim durumu tek eksenli gerilim olmasına rağmen, gelişen gerilmelerden kaynaklı delik çevresinde tekdüze olmayan incelmeler gelişmektedir. Bu tekdüze olmayan incelmeler malzemenin plastik anizotropisinden kaynaklanmaktadır (Ha vd., 2020: 3). Plastik anizotropi sac metal malzemelerde haddeleme işleminde ve sonraki ısıl işlemlerden kaynaklanır. Genel olarak, plastik anizotropi bir levha düzleminde kalınlık yönü ve haddeleme yönü oldukça önemlidir.

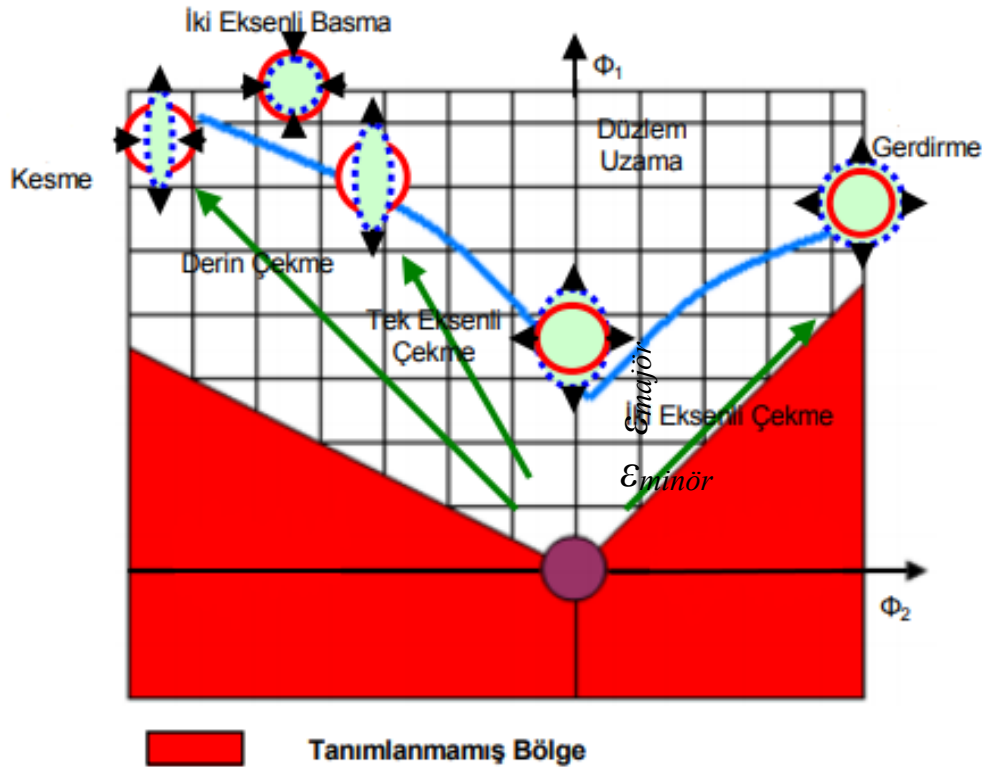
Plastik anizotropisinin gerilme yönleri üç tip deneyle değerlendirilir: Şekil 2.3'de görüldüğü gibi tek eksenli gerilim görülmektedir. Çekme deneyleri genelde hadde yönünde, hadde yönünde 45° ve hadde yönüne dik yönde gerçekleştirilir (Ha vd., 2020: 3).



Şekil 2.3. Plastik anizotropinin tek eksenli gerilme yönleri

Kaynak: (Liu, Lizuka, 2018: 3)

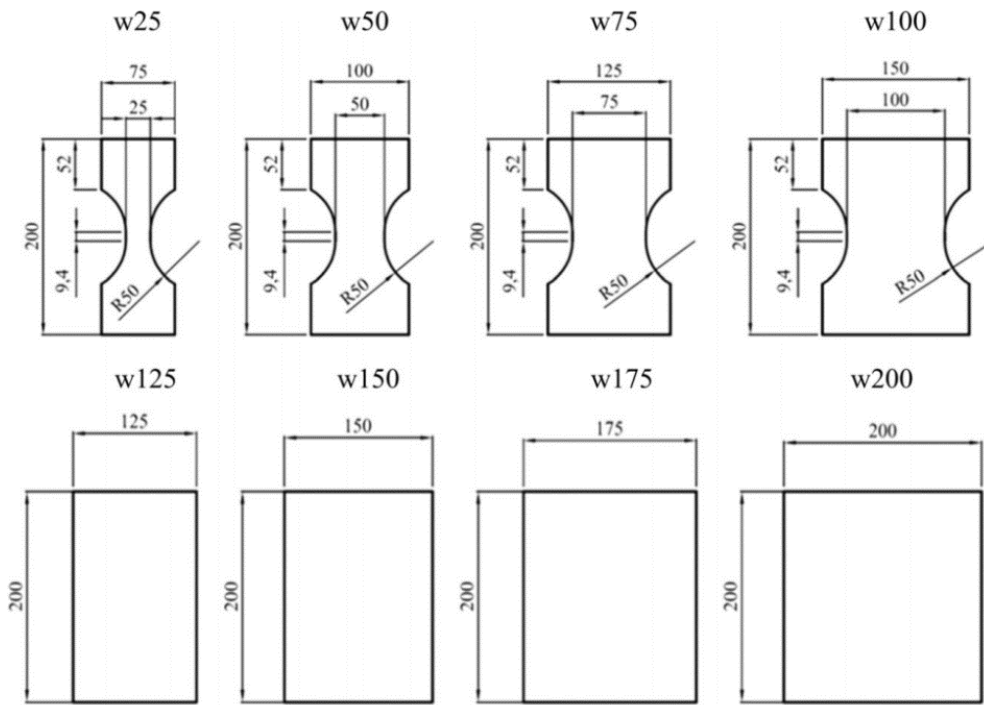
Sac metallerin şekillendirilebilirliğini tanımlamak için iki kusur kriteri şekillendirme eğrisi (ŞE) ve delik genişletme oranı (DGO) yaygın olarak kullanılmaktadır (Thouppis, Merklein, 2018: 2). Sac malzemelerin çeşitli proseslerle hasara uğramadan orijinal şeklinden belirli bir şekle dönüştürülebilme kabiliyetine şekillendirilebilirlik denir (Szumera, 2003: 2). Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biriside Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)'dır. Bu kavram ilk olarak 1960'larda Keeler ve Goodwin tarafından ileri sürülmüştür (Anket vd., 2011: 2). Şekillendirme sınır diyagramı, sac metallerin form alabilme kabiliyetini, malzemenin şekillendirme anında barındırdığı majör ve minör gerinimler üzerinden anlatan kullanışlı bir diyagramdır. Şekillendirilebilirlik sınır diyagramı üzerinde parçanın güvenli bir şekilde kullanılıp form alabileceği sınır gösteren eğriye şekillendirme sınır eğrisi (ŞSE) denir (Kumlu vd., 2018: 3). Şekil 2.4'de örnek bir şekillendirme sınır diyagramı gösterilmiştir. Şekillendirme sınır eğrisinin üstünde kalan bölge emniyetsiz bölge yani sac malzemenin hasara uğrayacağını altında kalan bölge ise emniyetli bölgeyi temsil etmektedir. Diyagram üzerindeki kırmızı alanda şekillendirme tanımı yapılmamaktadır (Anket vd., 2011: 2).



Şekil 2.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı

Kaynak: (Anket vd., 2011: 2)

ŞSD'nın belirlenmesinde en çok bilinen iki deneysel yöntem mevcuttur. Birincisi Marciniak ve diğeri Nakajima test metodudur. Nakajima test metodunda küresel zımba kullanılırken, Marciniak test metodunda düz zımba kullanılır (Koçar vd., 2013: 2). Nakajima testi, kullanılan araçların basit olması, test edilecek malzeme geometrilerinin karmaşık olmaması ve ŞSD'nın tüm alanının belirlenebilir olması nedeniyle Marciniak testine nazaran daha az maliyetli ve daha çok kabul görmüştür (Kumlu vd., 2018; Koçar vd., 2013; Şanay, kaftanoğlu, 2011: 2,2). Nakajima testinde 8 adet test numunesi tek eksenli çekmeden eşit çift eksenli çekme durumuna kadar gerilir (Koçar vd., 2013: 2). Ölçüm stratejisi olarak, malzemeye genellikle dairesel gridler çizilir (Dilmec vb., 2013: 3). Test her numune için gözlemlenebilir bir boyun verme oluşana kadar devam ettirilir. Bu durumda boyun veren bölgenin yanındaki ana gerinimler ölçülür. Her numune için ŞSD oluşturmak amacıyla bir veri noktası elde edilir. Bu prosedür 8 numune için de tekrarlandıktan sonra ŞSD tamamen belirlenmiş olur (Şanay, Kaftanoğlu, 2011: 2). Şekil 2.5'de ASTM standardında nakajima test numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. ASTM Standartında Nakajima Test Numuneleri

Kaynak: (Dilmec vd., 2013: 2)

Sac metallerde şekillendirilebilirlik normalde temel olarak iki şekillendirme özelliği tarafından kontrol edilir bunlar delik genişletme oranı (DGO) ve şekillendirme sınır eğrisidir. Araştırmacılar ŞSE'nin sol tarafı (çekme-basma) ile çeşitli sac metallerin çekme özellikleri arasında doğrudan bir ilişki kurmuşlardır. ŞSE'nin sol tarafı doğrudan çekme testlerinden tespit

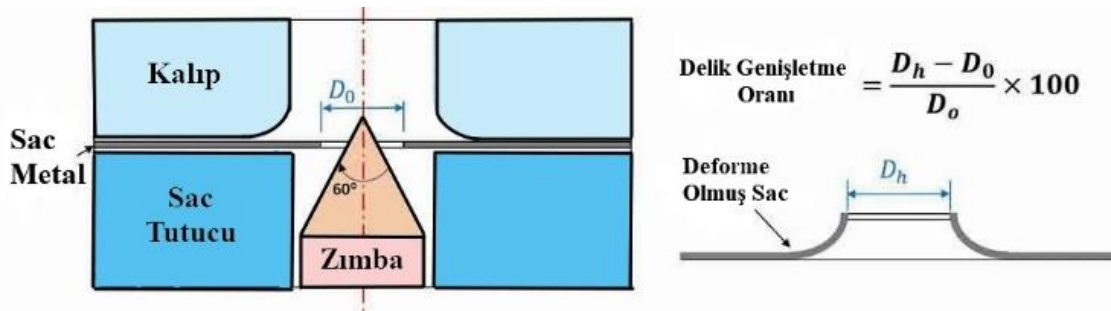
edilebilir. Bununla birlikte DGO doğrudan tek eksenli çekme testinden tespit edilemez, ancak tek eksenli çekme deformasyonu delik genişletme testi esnasında delik kenarında meydana gelir (Paul, 2018: 2). Delik genişletme testi kesilmiş kenarların gerilebilirliğini incelemek için yapılan benzetim bir testtir (Kreampaszky vd., 2014: 1). Delik genişletme testinin genel amacı, bir malzemenin bir deliğin genişlemesi esnasında hasar davranışını belirlemektir (Dünckelmeyer vd., 2009: 2). Sacın kenarında herhangi bir kusur meydana gelmeden şekillendirebilme yeteneği delik genişletme ile ölçülebilir, konik bir zımba genellikle önceden açılmış 10 mm çapındaki deliğe çatlak oluşumu başlayana kadar kuvvet uygular (Thesing vd., 2016: 2).

Delik genişletme testinin doğrudan sonucu delik genişletme oranıdır (DGO) (Goncalves, 2018: 3) ve daha yüksek delik genişletme oranı değeri daha iyi şekillendirilebilirliği temsil eder (Paul, 2014: 2). Delik genişletme testinden hesaplanan delik genişletme oranı (DGO) sac levhanın normal olarak şekillendirilebilirliğini tespit etmek için bir ölçüt olarak kullanılır. Delik genişletme oranı şu şekilde tanımlanabilir:

$$DGO(\%) = \frac{d_f - d_0}{d_0} \times 100, \quad (2.1)$$

Burada d_0 delik genişletme işlemi öncesi çap, d_f ise delik genişletme işlemi sonrası çaptır. (Paul, 2014: 1). Şekil 2.6'da bu oranın nasıl elde edildiği görülmektedir. Ayrıca DGO son çap (d_f) değerinin ilk çap (d_0) değerine oranlanarak normalize edilmiş bir şekilde nominal olarak hesaplanabilir. Nominal DGO şu şekilde tanımlanabilir:

$$Nominal DGO = \frac{d_f}{d_0} \quad (2.2)$$

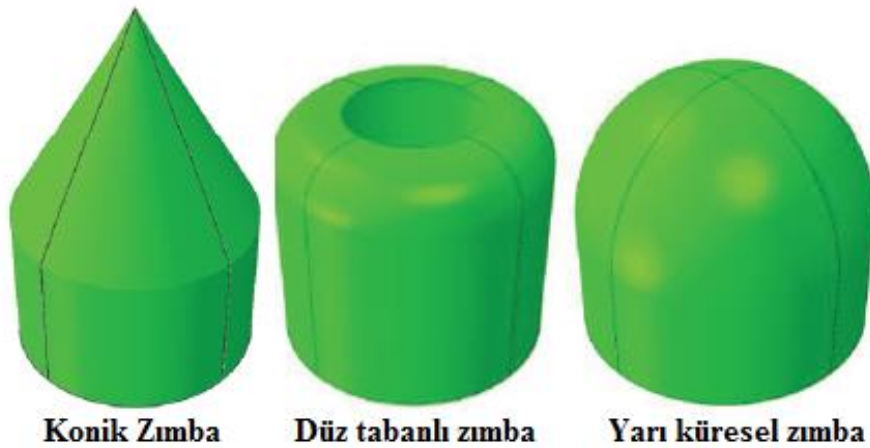


Şekil 2.6. Delik Genişletme Testinin Şeması

Kaynak: (Hashimoto vd., 2010: 2)

Delik genişletme, normal olarak sac metal numunesinin merkezinde bulunan deliğin kenarında kalınlık çatlak gözlemlendikten sonra test durdurulur (Thouppis, Merklein, 2016: 2). Delik açma işleminin delik genişletme oranı üzerinde kötü bir etkisi vardır. Delik etrafındaki

kesilmiş kenarların özellikleri ana malzemeden tamamen farklı olacaktır. Hasara uğrayacak, sertleşecek ve mikro çatlaklar gibi bazı kusurlar görülebilir (Goncalves, 2018: 2). Ayrıca ilk delik çapının, delik genişletme sonuçlarının önemli ölçüde etkilemediği kanıtlanmıştır (Paul, 2018: 2). Delik genişletme oranı üzerinde yapılan araştırmalara göre DGO'nun çeşitli parametrelere bağlı olduğunu göstermiştir bunlar: sac metal malzemesinin mekanik özellikleri, delik köşelerinin yüzey kalitesi veya deliğin üretim süreci, sürtünme/yağlama koşulları, zımba geometrisi ve kalıp boşluğu, sac metal kalınlığı/delik çapı oranı ve kalıp tutucu kuvvetlerdir (Paul, 2014: 2). Benzer şekilde Yoon ve arkadaşları (Zabua vd., 2018: 2) kırılma tokluğunun artırılmasının, delik kenarı yüzeyinde çatlak başlamasının gecikebileceğini bunun da kalınlık doğrultusu boyunca çatlak ilerlemesini geciktirdiğini ve DGO'nun artmasına yol açtığını belirtmiştir. Ek olarak sac metalin kalınlığı artırılması ile DGO artar. Kimyasal bileşim ve mikroyapı etkisinin analiz edilmesi 2009 yılında Narayanasamy ve arkadaşları (Zubia vd., 2018: 1) daha az miktarda bor ve mangenezin daha iyi DGO'na sahip olduğunu ve daha az karbür miktarının DGO'nı arttırdığını göstermiştir. Üretim prosesi ve ilk deliğin yüzey kalitesi DGO'nı etkileyen iki önemli parametre olarak belirlenmiştir. Zımbalanmış delikler, hasarlı yüzeyler ve en düşük DGO'na neden olur. Kesilen kenarların düzeltilmesi DGO'nun iyileştirilmesinde etkilidir. Ayrıca şekillendirme mesafesi DGO'nı etkilemese de zımba geometrisi önemlidir ve DGO'nun artan hızla birlikte önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir (Zubia vd., 2018: 2). Şekil 2.7'de delik genişletme testi için farklı zımba geometrileri görülmektedir.



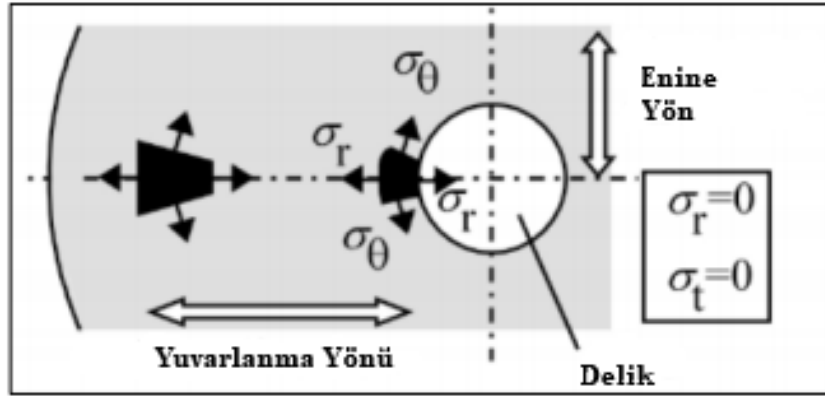
Şekil 2.7. Delik Genişletme Testi İçin Farklı Zımba Geometrileri

Kaynak: (Paul, 2018: 4)

Genel olarak delik genişletme testinde koni açısı 60° olan bir konik zımba kullanılır. Konieczny ve Henderson DGO'nun konik bir zımba için en yüksek, yarım küre şeklinde bir

zımba ile orta ve düz tabanlı bir zımba ile en az değerini aldığını bildirmiştir. Çeşitli araştırmacılar tarafından düz tabanlı zımba ile DGO bildirilmiştir ancak düz tabanlı bir zımba ile test sırasındaki DGO'ndaki azalmadan sorumlu olan mekanizma iyi anlaşılmamıştır. Pathak ve arkadaşları merkezdeki deliğin kenar durumunun, konik zımba ile DGO üzerinde büyük bir etkisi olduğu halde, düz tabanlı bir zımba ile DGO üzerinde daha az etkili olduğunu gözlemlenmiştir (Paul, 2018: 4).

Delik genişletme testinde delik bir serbest kenardır. Basitleştirilmiş bir modelde, serbest kenara yakın deformasyonun test sırasında tek eksenli bir gerilme yolunu izlediğini varsayılmıştır. Çünkü ortaya çıkan ana gerilim Şekil 2.8' de gösterildiği gibi çevre boyunca olur (Liu, Iizuka, 2018: 3).



Şekil 2.8. Delik Kenarı Boyunca Bir Elemandaki Gerilim Durumunun Şematik Gösterimi

Kaynak: (Liu, Iizuka, 2018: 2)

K. Hashimoto ve diğerleri (Hashimoto vd., 2010: 1), deformasyon davranışı tespiti amacıyla 590 MPa çekme mukavemetine sahip yüksek mukavemetli, çift fazlı çelik sac kullanarak delik genişletme üzerindeki etkisini netleştirmek için hem deneysel hem de analitik olarak araştırmışlardır. Uygun malzeme için anizotropik akma fonksiyonu belirlemek amacıyla numuneden çift eksenli çekme testi ile ölçülmüştür. Yld2000-2d, von Mises ve Hill malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu malzeme modelleri kullanılarak simülasyon ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yld2000-2d malzeme modelinin deneysel sonuçlara en yakın uyumu verdiğini görmüşlerdir. Bunun nedeni ise anizotropik akma fonksiyonlarının, delik genişlemesine maruz kalan anizotropik bir sac metalin deformasyon davranışını tahmin doğrulunu önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Çift eksenli çekme testinin, delik genişletme simülasyonunda kullanılacak uygun bir anizotropik akma fonksiyonunu belirlemede etkili olduğu bulunmuştur (Hashimoto vd., 2010: 1).

I. Tsoupris ve diğeri (Tsoupris, Merklein, 2016: 1), DP600 ve AA5182 alüminyum alaşım malzemelerini kullanarak şekillendirme yük durumuna bakarak malzemenin yırtılma hassasiyetinin analizini ele almışlardır. Delik genişletme testi ve üç farklı numune geometrisi ile Nakajima testleri ile gerçekleştirilmiştir. Nakajima testleri için yüzeydeki yerel gerinim dağılımı, optik gerinim ölçüm tekniği ile ölçülmüş ve arıza öncesi yerel deformasyonu değerlendirmek için araştırılmıştır. Malzemenin kesme işlemlerinden frezeleme, delme ve zımbalama işlemlerine bağlı olarak araştırılmıştır. Ek olarak, ortaya çıkan delik genişleme oranı λ belirlenir. İşlenmiş delikler ile önemli ölçüde daha yüksek λ ve yerel gerinim değerleri ε_{max} elde edilmiştir. Bu, her iki malzeme için daha yüksek yerel şekillendirilebilirlik ve gerilebilirlik ile doğrudan bağlantılıdır. Ayrıca, yük durumu malzemenin kenar yırtılma hassasiyeti üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bunun yanında yırtılma hassasiyeti kesme işleminden önemli ölçüde etkilenmektedir. Farklı numune geometrileri kullanılarak değişen stres koşullarıyla ve aynı zamanda ulaşılabilir maksimum kırılma gerilmesini de etkileyen hasar gözlemlenir. Analiz sonuçlarına göre delme ve frezeleme işleme süreçleri, yırtılma hassasiyetine karşı daha karardır. Delme, her iki malzeme için de delik genişleme oranı azaldığından kenarların şekillendirilebilirliğini önemli ölçüde etkiler. Zımbalama durumunda, yırtılma bölgesinden sonraki şekillendirme içindeki konumu, indüklenen ön hasara ve bu bölgedeki daha pürüzlü yüzeye göre şekillendirilebilirliği azaltır. Süneklik ve mukavemet açısından malzeme özelliklerine iyi uyum sağlayan DP800 için daha yüksek kenar yırtılma hassasiyeti gözlemlenmiştir (Tsoupris, Merklein, 2016: 1).

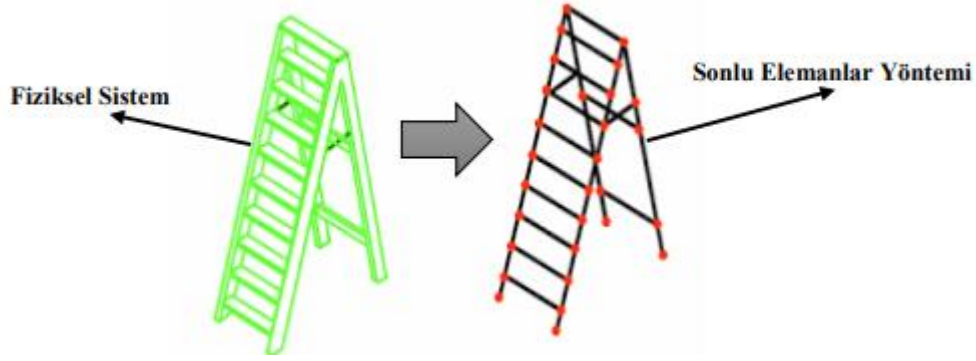
B. Zubia ve diğeri (Zubia vd., 2018: 1), delik genişletme testindeki sürtünme temas koşullarının sayısal analizini yapmışlardır. Malzeme olarak çift fazlı çelik olan DP980 kullanılmıştır. Malzeme modellenirken izotropik Swift yasası ve Hill48 malzeme modelleri kullanılmıştır. Coulomb sürtünme yasası, sabit sürtünme katsayısı için farklı değerler ve basınca bağlı sürtünme katsayısı kullanmışlardır. Sonlu elemanlar analizi ile simülasyonları yapılmıştır ve sonucunda yüksek mukavemetli çelikler büyük temas basıncı değerlerine yol açtığından, basınca bağlı sürtünme katsayısı ile elde edilen sayısal tahmin, sabit bir sürtünme katsayısı dikkate alınarak yapılan tahminle aynı olduğu görülmüştür. Hem zımba kuvveti hem de delik çapı değişimleri, sürtünme katsayısından çok az etkilenir. Sayısal modeldeki sürtünme katsayısının artırılması, boşluğun düz bölgesindeki kalınlık geriniminin küresel bir azalmasına yol açar ve bu da boyun vermenin başlangıcını ertelemektedir. Ancak lokalizasyonun değişmediği görülmüştür (Zubia vd., 2018: 1).

2.1. Bölüm Değerlendirmesi

Yukarıda anlatılanlar özetlenecek olursa literatürdeki çalışmalara göre delik genişletme testinin malzeme modellerine göre malzeme üzerindeki delik genişletme etkisinin incelendiği, çift fazlı çelik, alüminyum vb. malzemelerin kullanılarak sürtünme katsayısı değiştirilerek malzeme üzerindeki etkileri ve yırtılma hassasiyetinin incelendiği görölmektedir. Bu nedenle tez çalışmasında alimünyum alaşımının 5xxx kullanımının farklı plastisite modellerinin bu anlamda delik genişletme üzerine yırtılma yüksekliği tespit etme rolünü incelenecek olması literatüre bu açınsından katkıda bulunacağı ön görölmektedir.

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizi karmaşık tasarım problemlerinin daha basit bölümlerine ayrılıp belirli yük ve şartlarda simüle edilerek yaklaşık çözümünün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Bu yöntem, ilk olarak 1950 yılında uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk kullanıcılar Boeing, Bell Aerospace ve Rolls Royce firmaları olmuştur. Yöntemin ana fikrini oluşturan ilk makale 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır (Turner vd., 1956: 1). Clough 1960 yılında bir çalışmada ise ilk defa “Sonlu Elemanlar” telaffuzu edilmiştir. (Paul, 2019:1). Bu yöntemde karmaşık yapı sonlu elemanlar olarak ifade edilen geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içerir, sonlu elemanlar tabiri buradan gelir (Güler, 2015: 1). Şekil 3.1 de fiziksel bir yapının sonlu elemanlar analizinde gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.1. Fiziksel Bir Yapının Sonlu Elemanlar Gösterimi

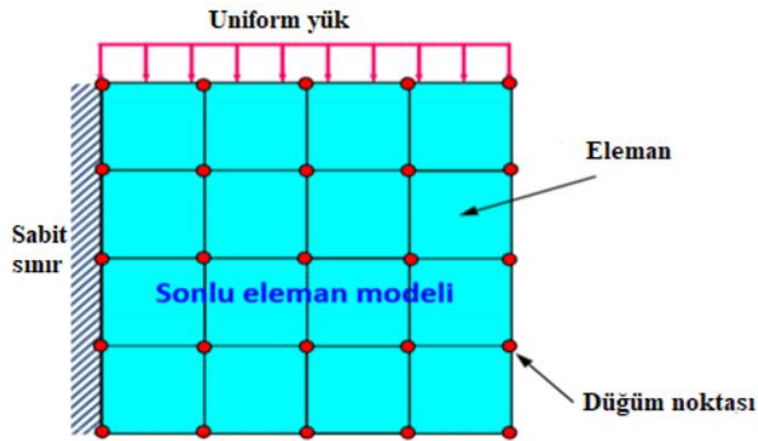
Kaynak: (Yahnioğlu, 2020: 2).

Sonlu elemanlar yönteminde, her eleman içindeki tanım denklemlerinin düğüm noktalarındaki değerlerinin elde edilmesi, problemin çözümünde kullanılır fakat kesin çözüm yöntemi değildir. Birtakım problemler için yaklaşık çözümler verebilir, bazıları tam olarak çözülemez. Hesaplamaların doğruluğu, modeldeki basitleştirmelere ve yaklaşımlara bağlıdır. Ek olarak, bu bölümde, hesaplama aracının (sonlu elemanlar yöntemi) kendisinin bir yaklaşım olduğu basit gerçeğinden hatalar tanıtılmaktadır. Bu tür hatalar, zayıf elemeli eleme veya çok kaba elemeli eleme kullanılarak ortaya çıkar. Ek olarak, yinelemeli hesaplama sürecinin zayıf yakınsaması dengesiz güçler bırakabilir veya hatta hesabın yakınsak kalmamasına neden olabilir. Durumu düzeltmek için bazen hesaplama algoritmaları için kontrol parametrelerini ve kriterlerini değiştirmek gerekebilir (Yahnioğlu, 2020; Hekim, 2016; Abhinav, 2013: 2,3).

Sonlu elemanlar yöntemi, üç temel niteliği vardır. Birincisi, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelerdir. İkincisi, her elemandaki sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir yani, her elemandaki sürekli fonksiyonlar ve parçalı fonksiyonlar bir bütün haline getirilebileceği kabul edilir. Üçüncüsü ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalarındaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır yani belli noktalarda değeri bilinen fonksiyonlara yaklaşılması veya başka bir fonksiyonla yaklaşarak aranan değerlerin elde edilmesidir bu durum yaklaşım fonksiyonu denir. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları, interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen fonksiyonun derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır (Scribd, 2021: 4). Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi denklem 3’de gösterilmiştir.

$$[K] \times [D] = (R) \quad (3.1)$$

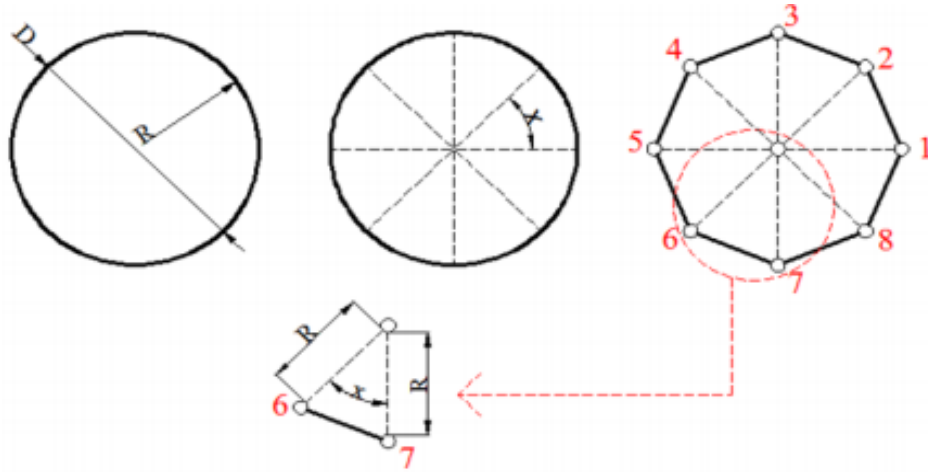
Burada (K) bilinen sabitler matrisi, (D) büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör ve (R) ise bilinen yük vektörüdür. Gerilme analizindeki (K) rijitlik matrisi olarak bilinmektedir. Ayrıca daha basite indirgersek (R) dışarıdan etkiyen yükler, (K) katı, sıvı, gaz gibi özellikler, (D) ise düğüm noktaları üzerindeki gerilme, kuvvet gibi değerlerdir (Ergin vd., 2000: 4). Şekil 3.2’de bir sonlu elemanı modelinin düğüm noktaları ve elemanları görülmektedir.



Şekil 3.2. Sonlu Elemanlar Düğüm Noktaları Ve Elemanları

Kaynak: (Scribd, 2021: 4)

Sonlu elemanlar analizinde geometrideki ağ yapısı ne kadar küçük olursa o kadar gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmektedir. Bir daireyi 8 dilime ve 36 dilime bölerek gerçeğe ne kadar yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi daireyi büyük be küçük parçalara ayrılarak sonuçları karşılaştırılmıştır (Çayıroğlu, 2021: 1).



Şekil 3.3. Daireyi Elemanlara Bölmek

Kaynak: (İbrahimcayıroglu, 2021: 1)

Daireyi parçalara böldüğümüzde üçgenin alanı Denklem 4’de görülmektedir (İbrahimcayıroglu, 2021: 1).

$$A_i = \frac{1}{2} R^2 \sin x \quad (3.2)$$

Dairenin alanını ise Denklem 5’de görülmektedir. Burada N toplam eleman sayısı (üçgenlerin sayısı), A_i üçgen alanı, A_t ise dairenin toplam alanını belirtir (İbrahimcayıroglu, 2021: 1).

$$A_t = \sum_{i=1}^N A_i = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \times N \quad (3.3)$$

Daireyi ilk başta 8 dilime sonra 36 dilime bölmüş olursak ve yarıçapını 12 cm olarak kabul edip nümerik hesaplama ve analitik hesaplama ile karşılaştıralım. Denklem 6’da daire 8 parçaya bölünmüş, denklem 7’de ise dairenin 36 parçaya bölünmüş nümerik hesaplama sonuçları görülmektedir (İbrahimcayıroglu, 2021: 1).

$$A_t = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \times N = \frac{1}{2} \times 12^2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{8}\right) \times 8 = 407,13 \text{ cm}^2 \quad (3.4)$$

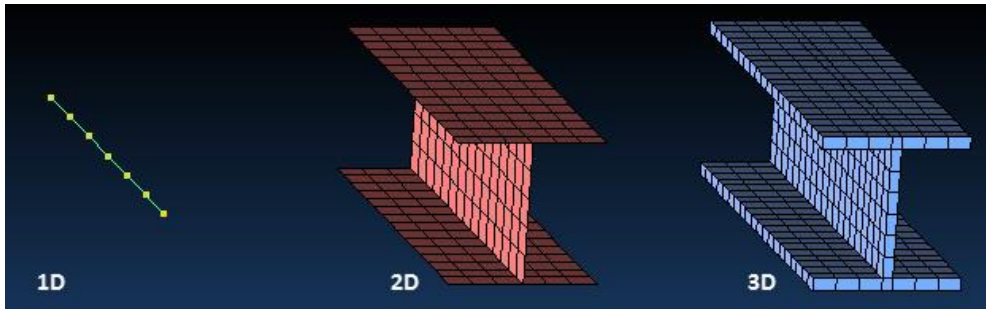
$$A_t = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \times N = \frac{1}{2} \times 12^2 \times \sin\left(\frac{2\pi}{36}\right) \times 36 = 449,87 \text{ cm}^2 \quad (3.5)$$

Denklem 8’de dairenin analitik hesaplama sonuçları görülmektedir (İbrahimcayiroglu, 2021: 1).

$$A_i = R^2 \text{Sin}x = 3,14 \times 12^2 = 452,16 \text{ cm}^2 \quad (3.6)$$

Denklem 6 ve 7’deki sonuçlar denklem 8 ile karşılaştırdığımızda denklem 6’nın %10 hata, denklem 7’nin % 0,5 hata oranına sahip olduğu görülmektedir. Buradaki mantık dairenin gerçek çizimi geometrik modeli temsil eder. Daireyi parçalara bölmek ise geometrideki mesh işlemi olur. Her bir çizgi ise elemanı temsil eder. Elemanların köşelerindeki noktalar ise düğümü gösterir. Bir geometriyi ne kadar küçük parçalara ayırırsak o kadar doğru sonuç elde edilmektedir (İbrahimcayiroglu, 2021: 1).

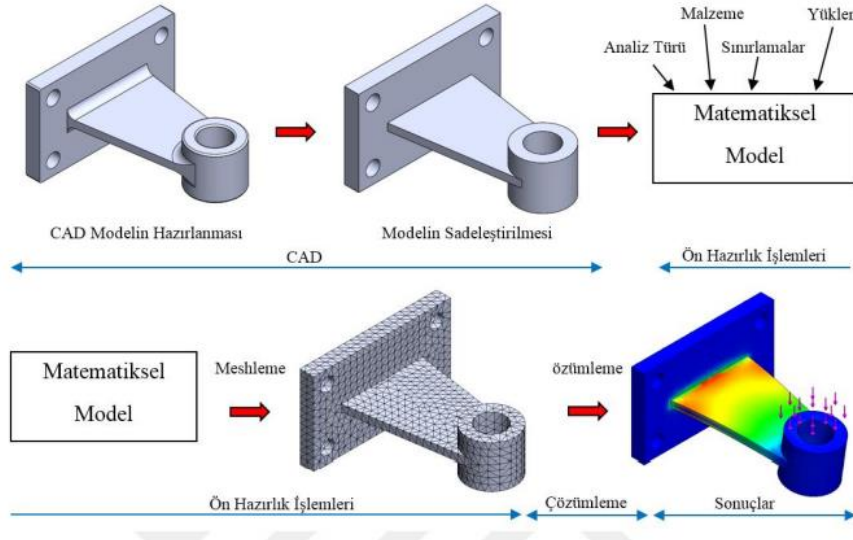
Elemanlar birbirine düğüm adı verilen noktalardan bağlanır. Elemanların ve düğümlerin birleşimi ile ağ dediğimiz mesh oluşturulur. Bu ağ dediğimiz yapı kiriş (1D), kabuk ağ (2D) veya katı ağı (3D) oluşturabilir. 1D çizgi elemanları, çekme, sıkıştırma ve bükülmeyi simüle etme yeteneğine sahiptir. 2D kabuk elemanları, sac levha ve benzeri yapılar analiz etmek için kullanılabilir ve sonlu elemanlar analizinde kullanılan en yaygın eleman türüdür. 3D katı elemanları, düzlem dışı etkilerin analize dahil edilmesi karmaşık yük durumları için kullanılır. Herhangi bir varlığın uzaydaki konumunu ve durumunu tamamen tanımlamak için gereken minimum parametre sayısı (hareket, koordinatlar, sıcaklık vb.) serbestlik derecesi (SD) olarak bilinir. Her bir düğümdeki SD sayısı, kullanılan analiz tipine bağlıdır. 2D analizinde, her düğüm 3 SD’ye (x, y, dönüş) sahiptir. 3D analizde, her düğümün 6 SD’i vardır (x, y, z, x-rot, y-rot, z-rot). Belirli bir ağ modeli için toplam SD’ler, düğüm başına SD sayısı ile çarpılan düğüm sayısına eşittir. Bu ağ oluşturma adımı, geometrideki sonuçların kalitesini yansıtacağı için sonlu elemanlar analizi için çok önemlidir. Aynı zamanda, eleman sayısı (düğüm sayısı) hesaplama süresi etkiler. Çözüm süresinin azaltmak için bazı durumlarda 3D ağ yerine 2D veya 1D ağ tercih edilir (Brancheau, 2019: 5). Şekil 3.4’de 1D, 2D ve 3D ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 3.4. 1D, 2D, 3D Geometrisinin Ağ Gösterimi

Kaynak: (Simulatemore, 2021: 1)

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte veri iletim hızlarının sürekli olarak artmasına bağlı olarak bu yöntemle çözüm yapan paket programların sayısı her geçen gün artmaktadır. Sonlu eleman yazılımının kullanılmasıyla birlikte malzemelerin tasarım aşamasında mukavemet hesaplamaları kolaylıkla ve kısa zamanda yapılarak en uygun tasarım elde edilirken, zaman ve tasarım masraflarından tasarruf elde edilmektedir (Schey, 1987: 6). Şekil 3.5’de sonlu elemanlar analizinin uygulanan işlem basamakları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Sonlu Elemanlar Analizinin İşlem Basamakları

Kaynak: (Brancheau, 2019:3)

1. Problemin 2 veya 3 boyutlu model oluşturulur.
2. Problemdeki modele ağ yapısının eklenir.
3. Problemdeki malzeme özellikler, sınırlamalar, analiz türü ve yükler belirlenir.
4. Problemin çözümünün yapılması ve sonuçların değerlendirilir.
5. Sonuçlar incelenir, elde edilen bilgiler doğrultusunda analizde veya tasarımda geliştirmeler yapılarak optimum sonuçlar bulunur.

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranında elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır (Yıldız, 2021: 2).

Sonlu elemanlar analizinin avantajları ve dezavantajları vardır. Sonlu elemanların avantajları ilk olarak karmaşık geometrileri ve düzensiz şekilleri daha kolay modellenmesini

sağlar. Tasarım sürecinde fiziksel prototiplere olan ihtiyacı azaltmak için doğruluk için belirli spesifikasyonları karşılayacak şekilde uyarlanabilir. Karmaşık bir modeli pratikte modellemek zor olabilirken sonlu elemanlar analizinde oldukça kolaydır. Modelin hangi sınırlı koşullarda yanıt vermesini istiyorsa (sıcaklık, ısı, kuvvet vb.) ona göre tasarlayabilir. Yapılan tasarımı kaydedebilir veya onun üzerinden değişiklik yapabilir. Bu aşamalar nispeten düşük maliyetli ve hızlı hesaplama süresinde yapılabilir. Dezavantajlarına gelecek olursak, yaptığımız analiz sonucunda alınan verilerin yaklaşık bir sonucu olduğudur. Sonuçlardan emin olup gerekli deneylerle desteklenmelidir. Yaptığımız problemin sınır şartları, malzeme özellikleri doğru gerilmesinde, malzeme modellerinin seçimi, akma kriterleri oldukça önemlidir. Bu tanımlamalar doğru girilmez ise problemin sonucunda büyük sapmalara neden olabilir. Yöntemi uygularken bilgisayarın iyi özelliklere sahip olması gerekmektedir. Aksi takdirde problemin çözüm süresi uzun süre alabilir (Brancheau, 2019: 3).

Özet olarak; karmaşık problemleri belli bir aşamalarla basite indirgeme özelliğinden dolayı eski zamanlardan beri kullanılan sonlu elemanlar yöntemi bilgisayarın icadıyla daha çok revaçta olmuştur. Tasarım aşamasında mukavemet hesaplamaları kolaylıkla yapıldığı için zamandan ve paradan tasarruf edilmiştir. Çözümüne çok yakın ve kolay veriler elde edilmesi diğer yöntemlerden daha üstün kılmaktadır. Ayrıca tez çalışmasında kullanılacak olan günümüzde malzeme modelleri arasında Barlat-89, Hill-48, von Mises ve ŞSD tabanlı plastisite modeli sıklıkla tercih edilen modellerdir ve bu kriterler kullanılarak akma kriterinin teorileri bu bölümde yer verilmiştir.

3.1. Barlat-89 Malzeme Modeli

Barlat-89 modeli Barlat ve Lian (1989) tarafından ortaya çıkmıştır (Barlat, Lian, 1989: 3). Bu model akma yüzeyi malzemenin anizotropik parametrelerine bağlı olarak elde etmektedir. Düzlem gerilme problemleri için Barlat-89 modeli Denklem 9'da verilmiştir.

$$2\sigma_y^m = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|K_2|^m \quad (3.7)$$

Burada σ_y akma gerilmesi olup K_1 ve K_2 farklı yönlerdeki akma gerilmelerine, a ve c ise anizotropi katsayılarına bağlı parametrelerdir. Yine bu denklemde yer alan m üsteli ise malzemenin kristal kafes yapısı ile ilişkili olup yüzey merkezli kübik malzemeler için 8, hacim merkezli kübik malzemeler için ise 6 olarak kullanılması tavsiye edilmektedir (Barlat, Lian, 1989: 1).

3.2. Hill-48 Malzeme Modeli

Hill-48 akma kriteri basit, ortotropik, anizotropi durumunu tanımlamaktadır. Buna göre her noktada karşılıklı dik olan üç simetri düzlemi vardır. Bu üç düzlemin kesişimi iki farklı anizotropinin asal eksenleridir. Bu iki farklı asal eksenler farklı yönlerdeki anizotropiyi temsil etmektedir. Bu asal eksenler kartezyen koordinatlarda referans eksenler olarak seçilebilir (Hill, 1948: 4). Kriter bir ikinci dereceden fonksiyon σ tabanlı ve r tabanlı olarak şu şekilde yazılabilir;

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (3.8)$$

$$2f(r_{ij}) = F(r_y - r_z)^2 + G(r_z - r_x)^2 + H(r_x - r_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (3.9)$$

Burada f , akma fonksiyonu, F, G, H, L, M, N malzemenin anizotropi parametrelerine bağlı katsayılar ve x, y, z asal anizotropik eksenlerdir. Sac metallerin kalınlık boyutu genişlik ve boylarına göre çok küçük kaldığından dolayı düzlem gerilme problemi olarak incelenebilir. Düzlem gerilme durumu için ise σ tabanlı Hill-48 akma kriteri şu hali alır (Schey, 1987: 1);

$$(G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (3.10)$$

$$\frac{H}{G} = \sigma_0 \quad \frac{H}{F+G} = \sigma_{45} \quad \frac{H}{F} = \sigma_{90} \quad (3.11)$$

$$F = \frac{\sigma_0}{\sigma_{90}(1+\sigma_0)} \quad G = \frac{1}{1+\sigma_{90}} \quad H = \frac{\sigma_0}{1+\sigma_{90}} \quad N = \frac{(\sigma_0+\sigma_{90})(2\sigma_{45}+1)}{(2\sigma_{90})(1+\sigma_0)} \quad (3.12)$$

Sonlu elemanlar yöntemi sac metal şekillendirme işlemlerinin simülasyonların da zaman ve maliyetten kazanmak, meydana gelebilecek problemlerin önceden tahmini gibi beraberinde getirdiği birçok avantajından dolayı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.

3.3. von Mises Malzeme Modeli

Bu model, kalıcı değişim için plastik deformasyon yani Holloman Denklemi yaygın olarak kullanılır ve malzemeye uygulanan gerilmenin malzeme akma dayanımını aştığında aşağıdaki gibi olduğunu kabul eder:

$$\sigma_y = k\epsilon_p^n \quad (3.13)$$

Burada σ_y kalıcı deformasyon olarak adlandırılan plastik deformasyondur, k malzeme katsayısı, n birim şekil değiştirme oranı parametresi ve ϵ_p birim şekil değiştirme oranıdır (Hollaman, 1945: 7).

3.4. ŞSD Tabanlı Malzeme Modeli

Şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) tabanlı plastisite modeli olup anizotropik malzemeler için sac metal şekillendirme proseslerini tanımlamak için kullanılır. İsteğe bağlı olarak, bir yük eğrisi yoluyla gerilim ve efektif plastik gerinim tanımlanabilir. ŞSD üzerinde şekillendirme sınır eğrisi kullanılarak maksimum gerinim oranı tespit edilebilir. Bu model tamamen iteratif ve yalnızca kabuk elemanları için kullanılabilir. İlk değişken olarak maksimum gerinim oranı Denklem 16'daki gibi tanımlanabilir.

$$\frac{\varepsilon_{major\ i\ parçası}}{\varepsilon_{major\ FLD}} = \varepsilon_{minor\ i\ parçası} \quad (3.14)$$

4. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Tez çalışmasında 5xxx alüminyum alaşımlarla delikli şekillendirme operasyonlarla deneysel olarak yırtılma yükseklikleri tespit edildi. Deneysel olarak yırtılma yükseklikleri tespit edilen 5xxx alüminyum alaşımları sonlu elemanlar analizi kullanılarak malzeme modellerinden Hill-48, Barlat-89, von Mises, son olarak şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) kullanılarak yırtılma yükseklikleri açısından tahmin performansları kıyaslanması hedeflenmiştir.

Alüminyum alaşımlarının elementleri bakır, magnezyum, manganez, silikon, kalay ve çinkodur. Döküm alaşımları ve dövme alaşımları olmak üzere iki ana sınıflandırma vardır ve bunların her ikisi de ısıtılma işlemi uygulanan ve ısıtılma işlemi uygulanmayan kategorilere ayrılır. Dökme alüminyum alaşımları, genellikle dövme alaşımlardan daha düşük çekme dayanımlarına sahip olmalarına rağmen, düşük erime noktası nedeniyle uygun maliyetli ürünler verir. Genellikle alüminyum alaşım serisini, yani 1000 serisi, 2000 serisi, 3000 serisi, 8000 serisine kadar tanımlamak için kullanılan ana alaşım elementini belirtir. Alüminyum 5xxx serisinin birincil alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Alüminyum 5xxx serisi ısıtılma işlemi görmeyen yüksek mukavemetlidir. Yüksek korozyon direncine sahiptir. Diğer alaşımlara göre hafiftir. İyi derecede şekillendirilebilen ve kolayca kaynaklanabilen bir malzemedir. Bu nedenlerle gemi yapımı, nakliye, basınçlı kaplar, köprüler ve binalar gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılır (Zhang vd., 2015: 1).

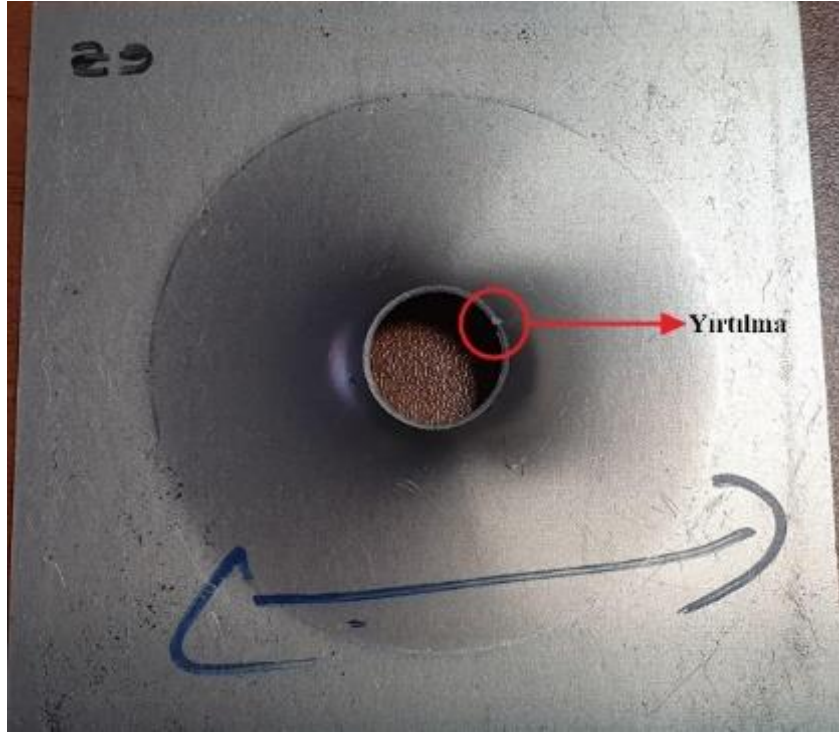
Tez çalışmasında deneysel olarak yırtılma yükseklikleri tespit edilen 5xxx alüminyum alaşımları, sonlu elemanlar analizi kullanılarak malzeme modellerinden Hill-48, Barlat-89, von Mises, son olarak şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) kullanılarak yırtılma yükseklikleri açısından tahmin performansları kıyaslanması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda tez çalışması uygulaması olan ilk olarak deneysel çalışmalar delik genişletme deneyleri yürütülmüştür.

4.1. Deneysel Çalışmalar

Alüminyum 5xxx serisi 1,2 mm kalınlığındaki sac alüminyum alaşımlarının 100x100 mm kare numuneleri ilk olarak Bursa Coşkunöz A.Ş. tarafından hazırlanmıştır. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan laboratuvarında atölye pres entegre edilerek 100x100 mm'lik numunelerin hat merkezine 10 mm'lik kesme kalıbı ile delik açılmıştır ve konik zımba ile delik genişletme kalıbı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin gerçekleştirildiği cihaz atölye tipi pres olduğundan dolayı yırtılma anında deney durdurulmuştur ve yırtılma yüksekliği ölçülmüştür. Hassas bir ölçümün elde edilebilmesi

amacıyla deney 15 kez tekrar edilmiştir. 25 bar parça tutucu kuvvet kullanılmıştır. Bu testler sonucunda alüminyum 5xxx serisinin yırtılma yüksekliği 16.2 mm olarak tespit edilmiştir. Yırtılma formu Şekil 4.1’de görülmektedir.



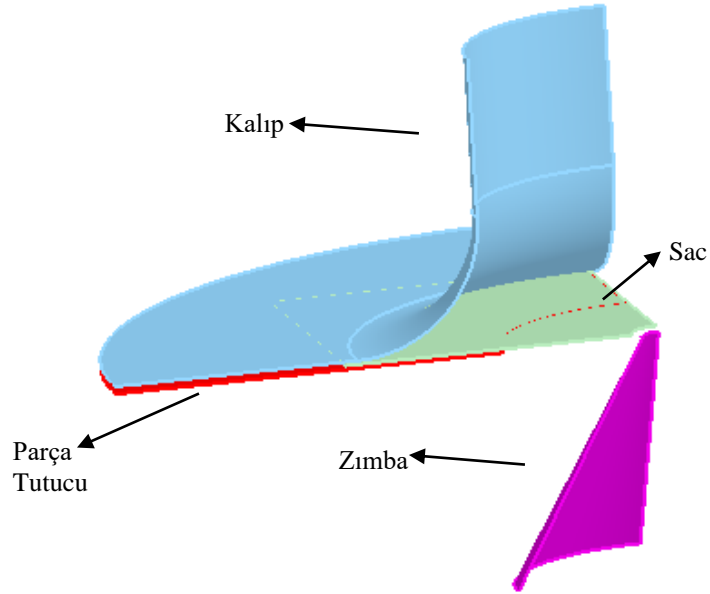
Şekil 4.1. Delik Genişletme Yırtılma Formu

Deneyssel olarak yırtılma yüksekliği tespit edildikten sonra bir sonraki aşaması olan nümerik çalışmalara başlanmıştır.

4.2. Sonlu Elemanlar Analizleri

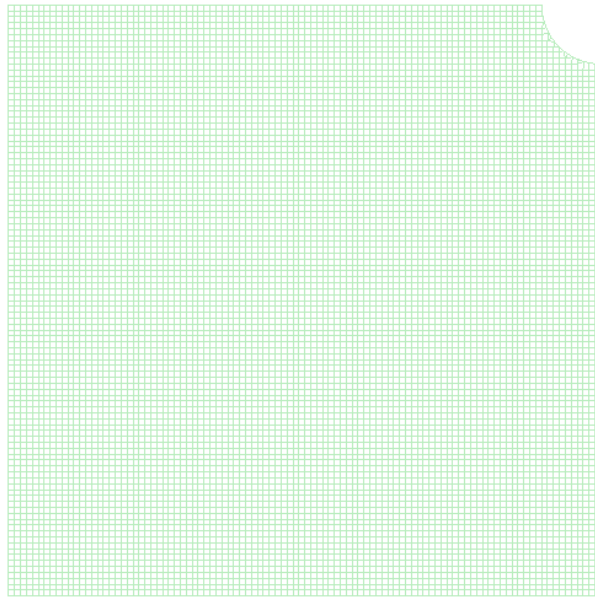
Tez çalışmasında nümerik çalışmalar kısmı kapsamında ETA Dynaform yazılımı kullanılarak deneyssel prosesin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Plastisite etkisini ortaya koymak adına dört farklı plastisite modeli olan Hill-48, Barlat89, von Mises ve ŞSD tabanlı plastisite (şekillendirme sınır diyagramı) modelleri tez çalışmasında kullanılmıştır. Bu doğrultuda kalıp geometrisi CAD ortamında elde edilmiştir. Kalıp takımında aksenal simetri bulunduğundan dolayı çözüm süresini kısaltmak adına $\frac{1}{4}$ model kullanılmıştır. Delik genişletme kalıp tasarımının modeli şekil 4.2’de görülmektedir. Sac malzemeler kalınlık yönü diğer yönlere göre çok küçük kaldığından dolayı düzlem gerilme problemleridir. Bu nedenle kabuk elemanlarla ağırlıkça modellenir. Kalıp takımlarında da kalıp rijitliği yönünde analiz yapılmayıp sadece şekillendirme analizi yapıldığından dolayı kalıpların katı olarak modellenmesi ihtiyaç duyulmamaktadır. İhtiyaç duyulan tek şey şekillendirme yüzeyleridir. Bu

yüzden yüzey modellemesi yapılmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde kalıp takımları rijit gövde olarak tasarlanmıştır. Deforme olan tek ağ yapısı sacın açınıdır.



Şekil 4.2. Delik Genişletme ¼ Kalıp Tasarım Modeli

Burada zımba, kalıp ve parça tutucu rijit olarak modellenip sac eleman üzerinden bütün deformasyonlar gerilme hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sac eleman üzerindeki eleman boyutu 0,5 mm boyutundaki kabuk elemanlar kullanılmıştır. Sac elemana ait ağ yapısı Şekil 4.3’de görülmektedir.



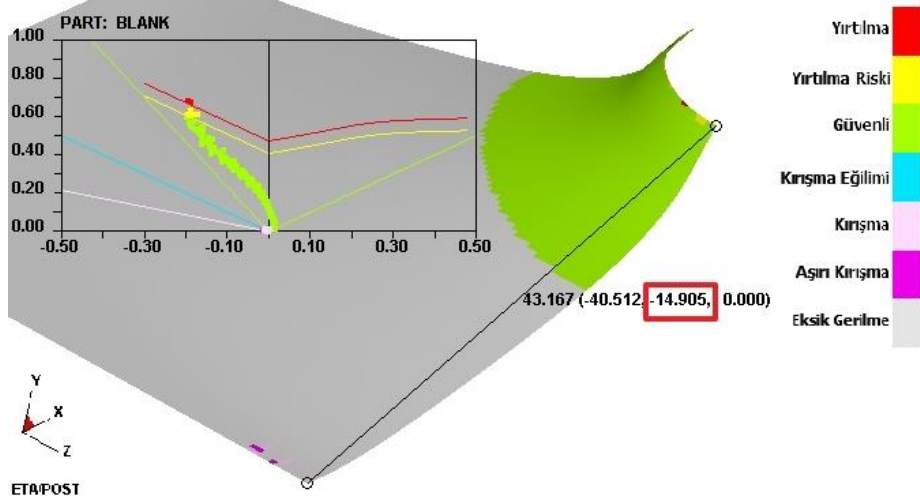
Şekil 4.3. Sac Açınım Ağ Yapısı

Sonlu elemanlar analizinde tam integrasyonlu kabul eleman formülasyonu, 7 integrasyon nokta sayısı kullanılmış olup yırtılmayı yüksekliğini gözlenmek adına 25 mm stroke mesafesi verilmiştir. ¼ modelde sac elemanda 9925 adet eleman kullanılmıştır. Bu tez kapsamında von Mises, Hill-48, Barlat-89 ve ŞSD tabanlı plastisite modelleri kullanılarak malzemelere ait plastisite parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

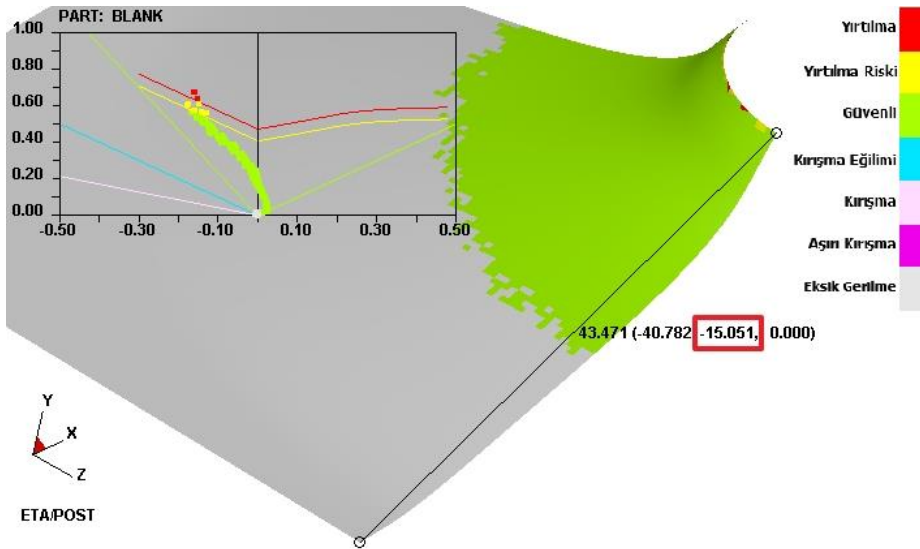
Tablo 4.1. Çalışma Kapsamında Kullanılan Malzemenin Malzeme Modellerine Göre Mekanik Özellikleri

| ALİMÜNYUM 5xxx | |
|--|----------------------|
| Von Mises Malzeme Model Parametreleri | |
| Mukavemet Katsayısı (MPa) | 667,57 |
| Pekleşme Üsteli (n) | 0,314 |
| HILL-48 Malzeme Model Parametreleri | |
| Akma Gerilmesi (MPa) | 137,68 |
| Elastisite Modülü (GPa) | 69,90 |
| Mukavemet Katsayısı (MPa) | 667,57 |
| Pekleşme Üsteli (n) | 0,314 |
| Ortalama Anizotropi (r) | 0,75 |
| Barlat-89 Malzeme Model Parametreleri | |
| Akma Gerilmesi (MPa) | 137,68 |
| Elastisite Modülü (GPa) | 69,90 |
| Hadde yönündeki anizotropi | 0,79 |
| Hadde yönüne 45° deki anizotropi | 0,71 |
| Hadde yönüne dik anizotropi | 0,79 |
| Kristal yapı üsteli (m) | 8 |
| ŞSD Tabanlı Malzeme Model Parametreleri | |
| Yoğunluk (g/mm ³) | 2,7x10 ⁻³ |
| Elastisite Modülü (GPa) | 69,90 |
| Poisson Oranı | 0.33 |
| Akma Gerilmesi (MPa) | 137,68 |
| Mukavemet Katsayısı (MPa) | 667,57 |
| Ortalama Anizotropi (r) | 0,75 |
| Pekleşme Üsteli (n) | 0,314 |

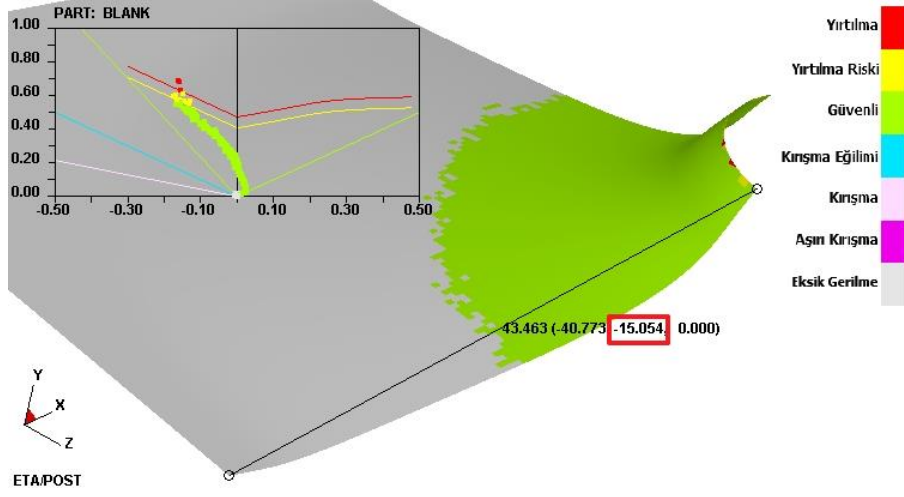
Sonuçları incelemek adına sonlu elemanlar analizinde yırtılma tespiti şekillendirme sınır diyagramı üzerinden yapılmaktadır bu nedenle yırtılmanın başladığı anı görebilmek adına ilk olarak her model için şekillendirme sınır diyagramları kullanılmıştır. Şekil 4.4-Şekil 4.7’de yırtılma yükseklikleri verilmiştir.



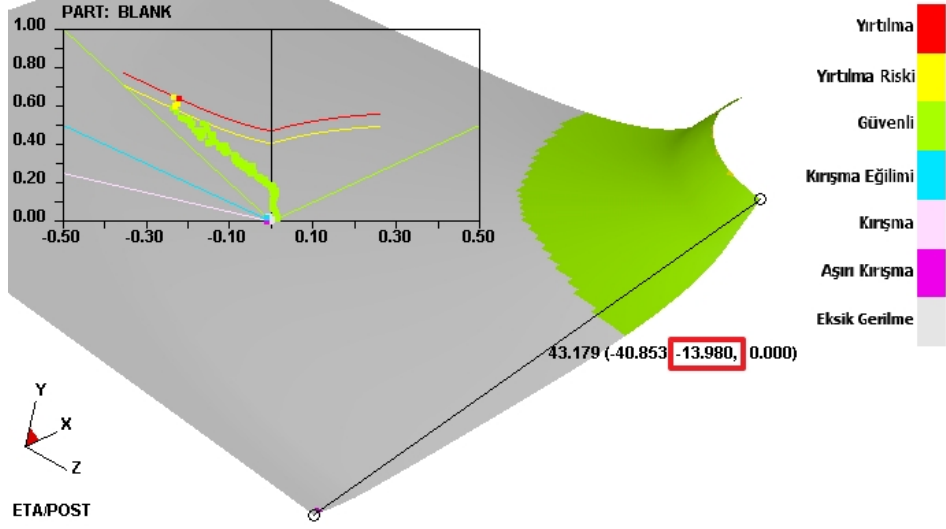
Şekil 4.4. Barlat-89 Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği



Şekil 4.5. ŞSD Tabanlı Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği

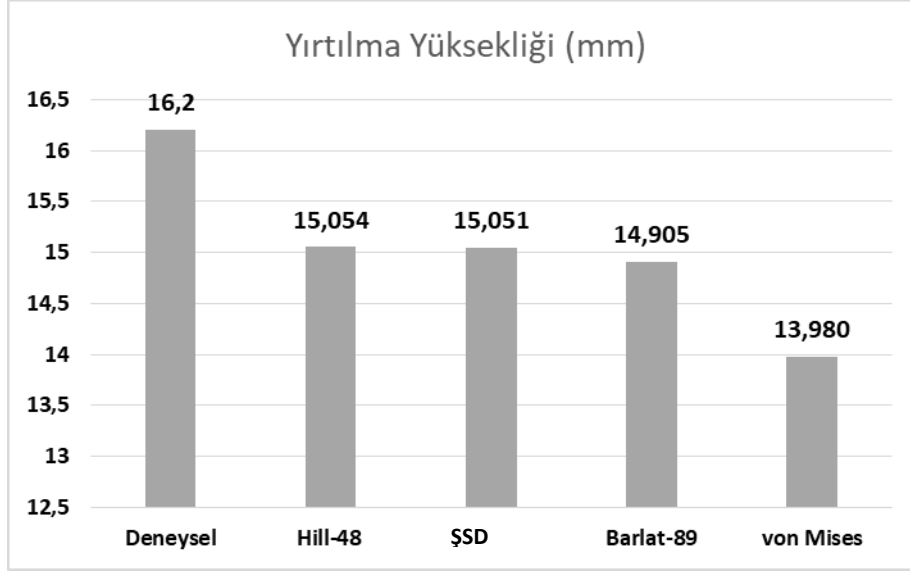


Şekil 4.6. Hill-48 Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği



Şekil 4.7. von Mises Malzeme Modeli Yırtılma Yüksekliği

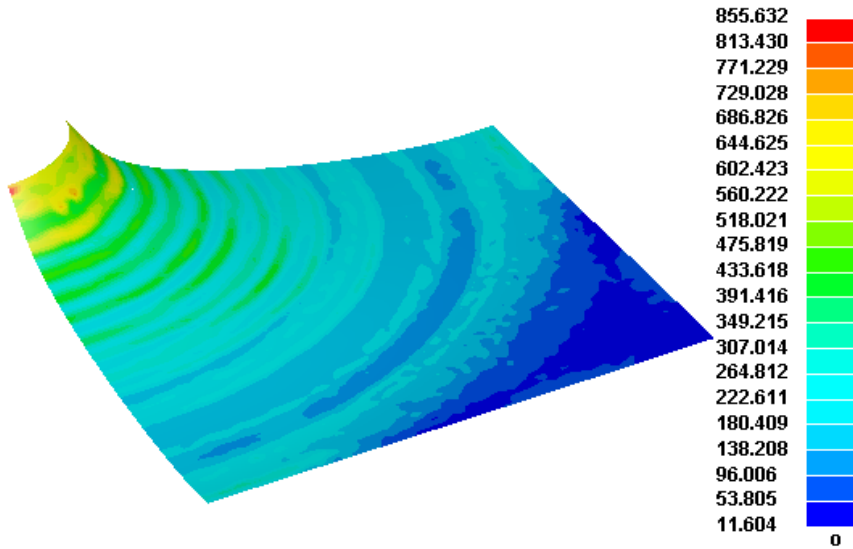
Sonuçların daha anlaşılır olabilmesi adına yırtılma yüksekliklerinin sütun grafik olarak kıyaslanması Şekil 4.8’de görülmektedir.



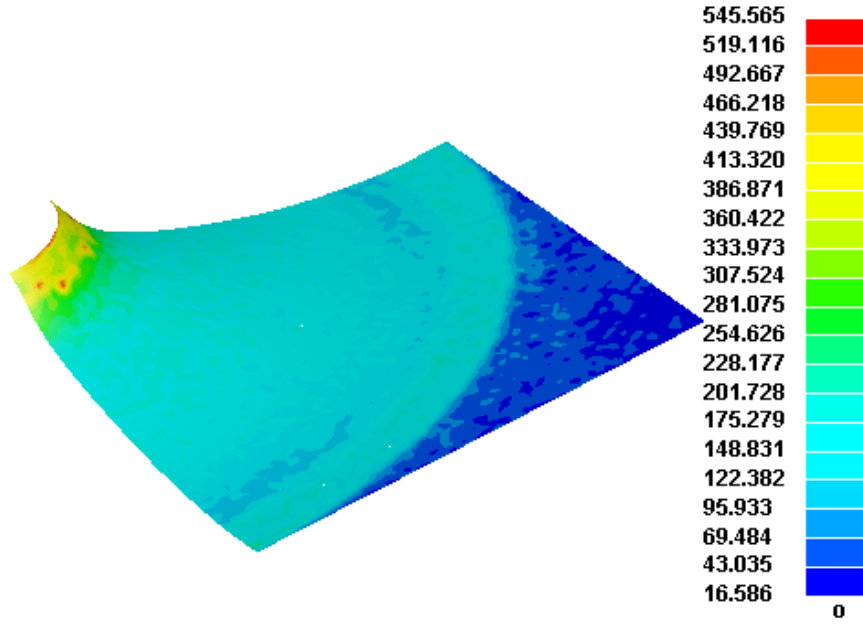
Şekil 4.8. Deneysel ve Plastisite Modellerinin Yırtılma Yükselikleri

Görüldüğü üzere deneysel yırtılma yükseliği 16,2 mm gelmiştir ve tüm koşullar altında Hill-48 plastisite modelinin diğer modellere göre daha başarılı tahmin ettiği görülmüştür. ŞSD ve Barlat-89 plastisite modelleri ise deneysel sonuçları tahmin etmede Hill-48 modeli kadar başarılı olamamıştır. von Mises plastisite modeli ise kullanılan plastisite modelleri arasında en başarısız sonucu vermiştir. von Mises plastisite modeli alüminyum 5xxx malzemesi açısından uygun bir model olmadığı düşünülmüştür.

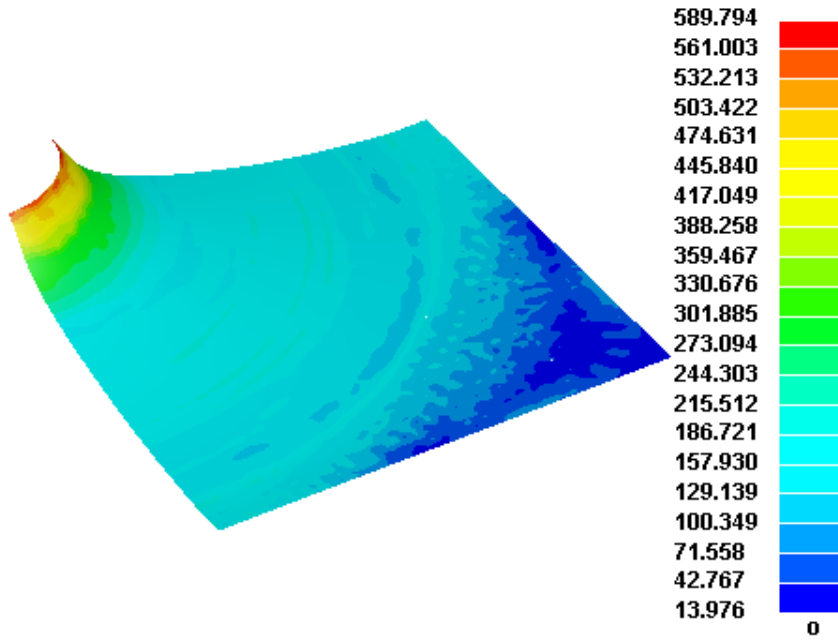
Bu yırtılma yüksekliği dışında eşdeğer gerilme ve yüzde incelleme dağılımları incelenmiştir. Eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.8-Şekil 4.11'de görülmektedir. Yüzde incelleme dağılımı Şekil 4.12-Şekil 4.15'de görülmektedir.



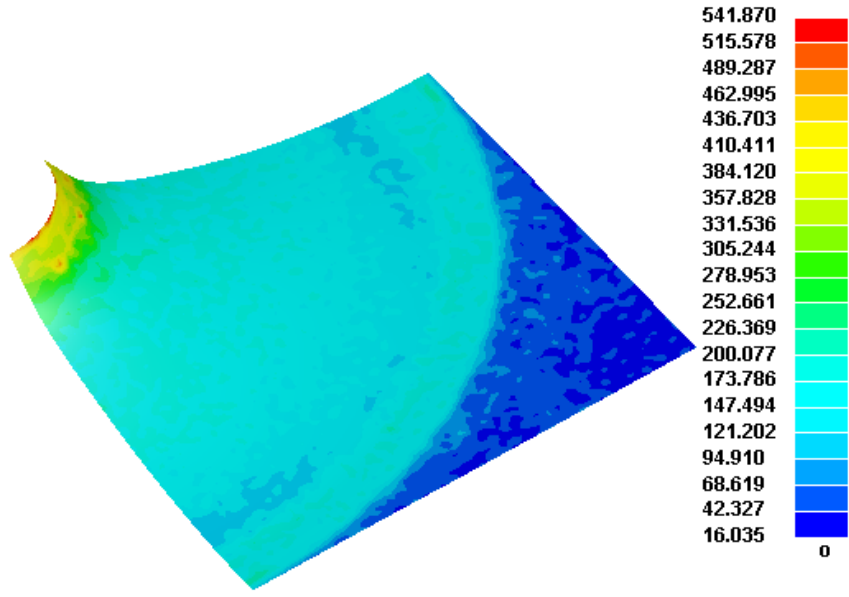
Şekil 4.9. Barlat-89 Eşdeğer Gerilme Dağılımı



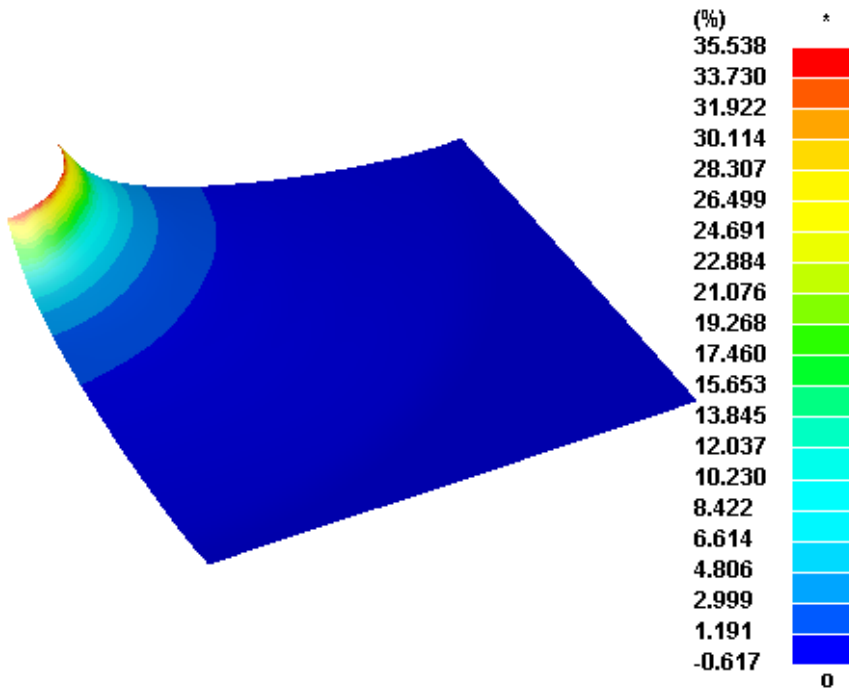
Şekil 4.10. Hill-48 Eşdeğer Gerilme Dağılımı



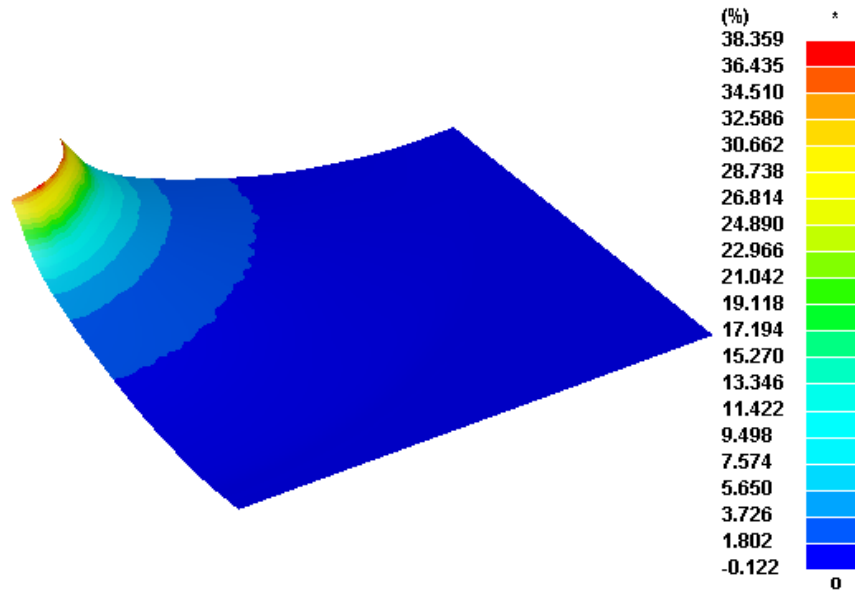
Şekil 4.11. von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımı



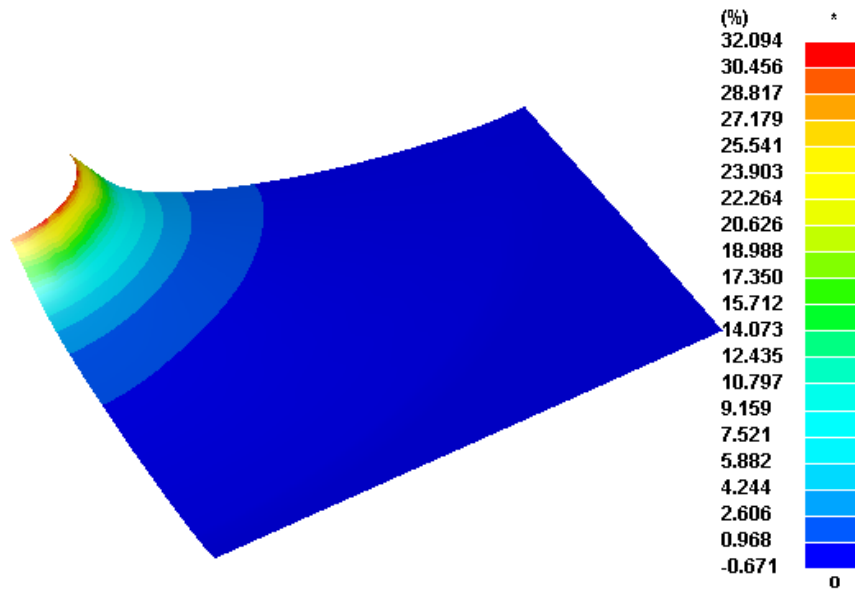
Şekil 4.12. ŞSD Eşdeğer Gerilme Dağılımı



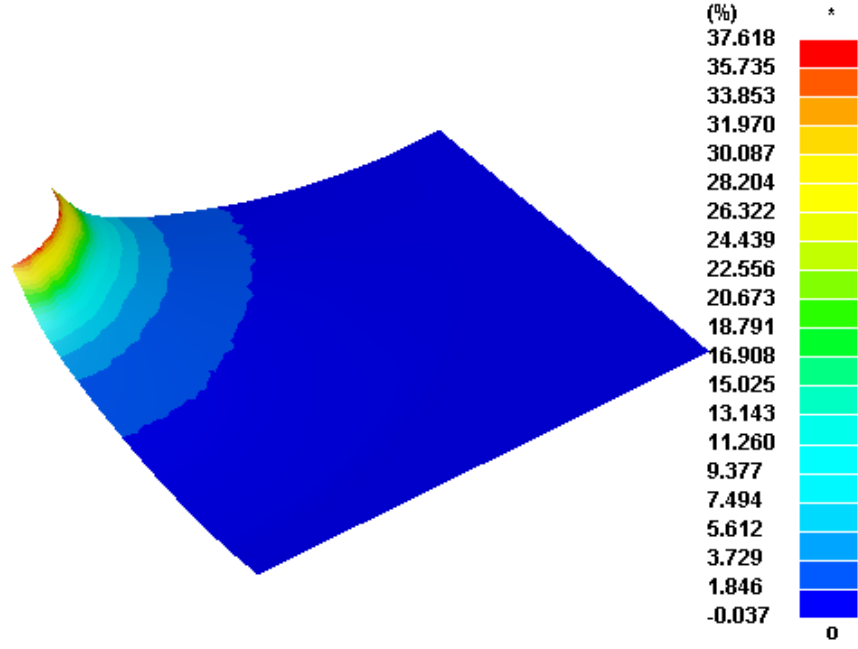
Şekil 4.13. Barlat-89 Yüzde İncelme Dağılımı



Şekil 4.14. Hill-48 Yüzde İncelme Dağılımı

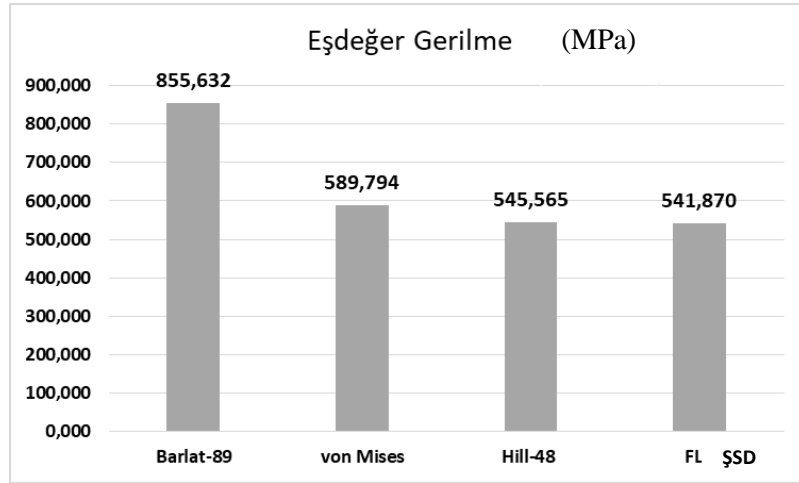


Şekil 4.15. von Mises Yüzde İncelme Dağılımı

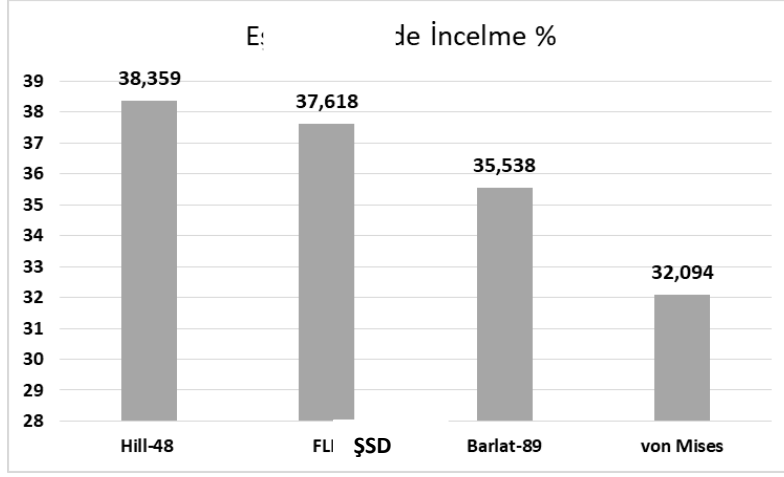


Şekil 4.16. ŞSD Yüzde İncelme Dağılımı

Tüm sonuçların daha anlaşılır olabilmesi adına sonuçların grafiği Şekil 4.16-Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17. Plastisite Modellerin Eşdeğer Gerilme Karşılaştırılması



Şekil 4.18. Plastisite Modellerin Yüzde İncelme Karşılaştırılması

Grafiklerden de görüldüğü üzere eşdeğer gerilmede Barlat-89 plastisite modeli diğer modellere göre yükleme durumunda eşdeğer gerilmesi daha yüksek gelmiştir. ŞSD tabanlı plastisite modeli ise eşdeğer gerilmesi düşük tahmin eden plastisite modeli olmuştur. ŞSD tabanlı plastisite modeline en yakın sonuç Hill-48 plastisite modeli olmuştur.

Yüzde incelme grafiğine bakıldığında ise Hill-48 plastisite modeli diğer malzeme modellerine göre yüzde olarak daha çok incelenmiştir. Hill-48 plastisite modeline göre en yakın sonuç ŞSD tabanlı plastisite modeli olmuştur. Plastisite modelleri arasında eş değer yüzde en az incelmeyi von Mises plastisite modelinde görülmektedir.

5. TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasının amacı, 5xxx alüminyum alaşımlarla delikli şekillendirme operasyonlarla malzeme modellerinin tahmin kabiliyetini ortaya koymaktır. Bu amaç doğrultusunda önce yırtılma yüksekliklerini tespit etmek için deneysel çalışma gerçekleştirildi. Daha sonrasında Hill-48, Barlat-89, von Mises ve son olarak şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) temelli bir kriter olan malzeme modelleri kullanılarak bu malzeme modellerinin ilgili deneydeki yırtılma yükseklikleri açısından tahmin performansları kıyaslanmıştır.

Bu kapsamda Alüminyum 5xxx serisi 1,2 mm kalınlığındaki sac alüminyum alaşımlarının 100x100 mm² numunelerinin 10 mm çapındaki deliğine konik zımba ile delik genişletme kalıbı kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde ¼ model tasarlanarak ağ yapısı oluşturulmuştur. ¼ modellenmiş olan prosesin parametrelerinden pot kuvveti 25 bar, sürtünme katsayısı 0.18, kalıp hızı 2000 mm/s ve 25 mm mesafede bir şekillendirme işlemi yapılmış olup uygulanacak olan Hill-48, Barlat-89, von Mises ve ŞSD tabanlı plastisite modelleri ayrı ayrı analizleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinin incelenmesi aşamasında şekillendirilebilirliğin bir göstergesi olan şekillendirme sınır diyagramı kullanılmış olup, şekillendirme sırasında delikte meydana gelen yırtılma anında yırtılma yükseklikleri her plastisite modeli için hesaplanmıştır. Bunun yanında her plastisite modeli için eşdeğer gerilme ve yüzde incelme dağılımları karşılaştırılmıştır.

Deney sonucunda yırtılma yüksekliği 16,2 mm olarak tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde ise yırtılma yükseklikleri şekillendirme sınır diyagramı ile tespit edilmiştir. Yırtılma yükseklikleri sonlu elemanlar analizinde ölçülmüş ve deney ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise Hill-48 plastisite modeli 15,054 mm, ŞSD tabanlı plastisite modeli 15,051 mm, Barlat-89 plastisite modeli 14,905 mm ve von Mises plastisite modeli 13,980 mm'de yırtıldığı görülmüştür. Tüm koşullar altında Hill-48 modelinin deneysel yırtılma yüksekliğini diğer modellere göre çok daha başarılı tahmin ettiği tespit edilmiştir. ŞSD ve Barlat-89 plastisite modelleri ise deneysel sonuçları tahmin etmede Hill-48 modeli kadar başarılı olamamıştır. von Mises plastisite modeli ise kullanılan plastisite modelleri arasından en başarısız sonucu vermiştir. Sonuçlara bakıldığı zaman von Mises modelinin Alüminyum 5xxx malzemesi açısından uygun bir model olmadığı görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizinde eşdeğer gerilmelere bakıldığı zaman Barlat-89 plastisite modeli 855,632 MPa, von Mises plastisite modeli 589,794 MPa, Hill-48 plastisite modeli 545,565 MPa, ŞSD tabanlı plastisite modeli 541,870 MPa olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara

bakıldığında Barlat-89 plastisite modeli yükleme durumunda eşdeğer gerilmeyi diğer plastisite modellerine göre daha yüksek tahmin ettiği görülmüştür. SSD tabanlı plastisite modeli ise düşük tahmin etmiştir. von Mises ve Hill-48 plastisite modelleri SSD tabanlı plastisite modeline yakın sonuçlar vermiştir.

Yüzde incelmede ise Hill-48 plastisite modeli %38,359, SSD tabanlı plastisite modeli %37,618, Barlat-89 plastisite modeli %35,538, von Mises plastisite modeli %32,094 olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde malzeme Şekil değişikliğine uğradığı zaman Hill-48 plastisite modelinin yüzde incelenmesi diğer modellere göre daha yüksek tahmin etmiştir. von Mises en düşük yüzde incelme değeri vermiştir. SSD tabanlı plastisite modeli Hill-48 plastisite modeli kadar iyi sonuç vermiştir.

Özetle Hill-48 plastisite modeli delik genişletme prosesini en iyi temsil edebilen plastisite modeli olmuştur.

KAYNAKÇA

- Abhinav, K.** (2013). Analysis Of Sheet Metal Bending By Using Finite Element Method, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN: 22778-0181.
- Anket O., Koruvatan T., & Ay İ.** (2011). Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.
- Barlat F., & Lian J.** (1989). Plastic Behaviour And Stretchability Of Sheet Metals (Part I): A Yield Function For Orthotropic Sheet Under Plane Stress Conditions. *International Journal of Plasticity*, 5, 51–56.
- Brancheau, E. J.** (2019). Practical Aspect of Finite Element Simulation. *Altair University*. 5th Edition Released.
- Çapan, L.** (2003). Metallerde Plastik Şekil Verme. *Çağlayan Kitapevi*, İstanbul, 442.
- Çayıroğlu, İ.** (2021). <http://www.ibrahimcayiroglu.com/> (Ziyaret Edilme Tarihi: 29.06.2021)
- Çınar, G.** (2006). Effects of Anisotropy on Formability In Sheet Metal Forming. Istanbul Technical University. *Institute of Science And Technology*.
- Dierk.** (2020). <http://www.dierk-raabe.com/sheet-forming-simulation/>, (Ziyaret Edilme Tarihi: 21.10.2020).
- Dilmec, M., Halkaci, H. S., Ozturk, F., & Turkoz, M.** (2013). Detailed Investigation of Forming Limit Determination Standards for Aluminum Alloys. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(1), 10-21.
- Dünckelmeyer, M., Karellova, A., Krempaszky, C., & Werner E.** (2009). Instrumented Hole Expansion Test. *Proceedings of International Doctoral Seminar*.
- Ergin, A., Bayraktarkatal, E., & Ünsan, Y.** (2000). Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamalar, *Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi. Seminer Kitabı*.
- Esener, E., Sönmez, E., & Fırat, M.** (2018). Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 79-89.
- Goncalves, J.** (2018). Importance of hole punching conditions during Hole Expansion test. *International Deep Drawing Research Group (IDDRG)*, 418(1), 1-8.

- Güler, M.** (2015). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Teknik Dergi*, Ordu Üniversitesi, Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi Ulaştırma İşletme Mühendisliği, Cilt: 5, Sayı: 1, (56-66).
- Ha, J., Coppieters, S., & Korkolis, P. Y.** (2020). On The Expansion of a Circular Hole in an Orthotropic Elastoplastic Thin Sheet. *International Journal of Mechanical Sciences*, 182.
- 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.
- Hekim, A.** (2016). *Sac Bükmede Geri Yaylanmanın Sonlu Eleman Yöntemi ile İncelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Hill R.** (1948). A Theory Of The Yielding And Plastic Flow Of Anisotropic Metals. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 193, pp. 281-297.
- Holloman, J. H.** (1945). Tensile Deformation. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 162:268-290.
- İriç, D., İriç, S., & Kozan, R.** (2013). Sac Şekillendirme Prosesinde Kullanılan Süzdürme Çubuğu Frenleme Kuvvetinin Modellenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 201-205.
- Kılıç, S., Kacar, İ., Öztürk, F., & Toros, S.** (2018). Sonlu Elemanlar Analizlerinde Sac Metal Şekillendirme Parametrelerinin İncelenmesi. *Geleceğin Dünyasında Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar – Mühendislik ve Teknoloji*, 1, 271-291.
- Koçar O., Karayel D., Eldoğan. O., & Özkan S.** (2013). Tersine Mühendislik Yaklaşımı Kullanılarak Sac Metalin Şekillendirme Sınır Diyagramının Belirlenmesi. *Mühendislik ve Bilim Alanında Uluslararası Yenilik Teknikleri Sempozyumu (ISITES)*, 1, 538-547.
- Köleoğlu, Ö., & Esener E.** (2019). Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 1-11.
- Köse, N., C.** (2015). *Bir B Segment Araç İçin Gövde Çarpma Parçalarının Tasarımı*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- Krempaszky, C., Larour, P., Freudenthaler, J., & Werner, E.** (2014). Towards More Efficient Hole Expansion Testing. *International Deep Drawing Research Group (IDDRG)*, 204-209.

Kumlu C., Esener E., & Fırat M. (2018). Şekillendirme Sınır Eğrisinin Teorik Model ile Tahmin Performansının Değerlendirilmesi. *Uluslararası Otomotiv Teknolojileri Kongresi(OTEKON)*, 7-8 Mayıs, Bursa, 269-277.

Liu, W., & Iizuka, T. (2018). Trials to Evaluate Distribution of Lankford Value Using Hole Expansiyon Test. *Procedia Manufacturing*, 15, 1754-1761.

Li, J., Wang, H., & Yan, D. (2016). Influence of Experiment Methods on Limit Hole Expansion Ratio. *International Conferance on Advanced Manufacture Technology and Industrial Application*. 387-8.

Özdemir, O. A., Şirin, H., & Karataş, Ç. (2017). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelik Saclardaki Alaşım Elementlerinin Şekillendirmeye Etkisinin Araştırması. *GU Fen Bilimler Dergisi*, 5(4), 109-119.

Paul, S. K. (2018). Effects of Punch Geometry on Hole Expansion Ratio. *Journal of Engineering Manufacture*, 1-6.

Paul, S. K. (2018). Fundamental Aspect of Strechflangeability of Sheet Metals. *Journal of Engineering Manufacture*, 233(10), 2115-2119.

Paul, S. K. (2014). Non-linear Correlation Between Uniaxial Tensile Properties and Shear-Edge Hole Expansion Ratio. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 3610–3619.

Paul, S. K. (2019). The effect of deformation gradient on necking and failure in hole expansion test. *Manufacturing Letters*, Cilt 21, 50-55, (2019).

Sezgin T., C. (2017). Otomotiv Endüstrisinde Yeni Nesil Çelik Kullanımının Önemi. *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*. 1, 3, pp. 205-210.

Schey, J. E. (1987). Introduction to Manufacturing Processes. *McGraw-Hill*, New York, 13-18.

Scribd. (2021). <https://www.scribd.com/doc/316186081/sonlu-elemanlar> (Ziyaret Edilme Tarihi: 09.04.2021).

Simulatemore. (2021). İnternet, <https://simulatemore.mscsoftware.com/introduction-midsurface-geometry-and-meshing-for-fea-with-msc-apex/> (Ziyaret Tarihi: 28.04.2021).

Stemmer. (2020). <https://www.stemmer-imaging.com/en-be/applications/machine-vision-option-optimizes-sheet-metal-inspection/>, (Ziyaret Edilme Tarihi: 22.10.2020).

- Szumer, J.A.** (2003). The Metal Stamping Process. *Industrial Press Inc.* New York, 96-140.
- Şanay, B., & Kaftanoğlu B.** (2011). Sac Metal Şekillendirmesinde Plastik Kararsızlık ve Şekillendirme Limitlerinin Belirlenmesi. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 12(1), 18-27.
- Thesing, L., Boff, U., & Schaeffer, L.** (2016). Experimental Investigation Of The Hole Expansion Capability Of A Martensitic AHSS Steel With Two Punch Geometries And A Variety Of Hole Diameters. *International Journal of Materials Engineering and Technology*, 15(2-3), 159-170.
- Thoups, I., & Merklein, M.** (2016). Edge Crack Sensitivity of Lightweight Materials Under Different Load Conditions, *Materials Science and Engineering* 159, pp. 1-8.
- Tomas, M., Dzubon, M., Evin, E., & Spisak, E.** (2018). Surface Analysis of Uncoated and PVD Coated Punch at the Hole-Flanging Process. *Metals*. 8(4).
- Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C. & Topp, L.J.** (1956) Stiffness and deflection analysis of complex structures. *J. Aeronaut. Sci.*, 23, 805–23.
- Vdi.** (2020), <https://www.vdi-wissensforum.de/en/event/innovative-blechumformung/>, (Ziyaret Edilme Tarihi: 21.10.2020)
- Yahnioglu, N.** (2020). Sonlu Elemanlar Yöntemi. *Yıldız Teknik Üniversitesi (Ders Notları)*, İstanbul.
- Yıldız.** (2021). http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf (Ziyaret Edilme Tarihi: 29.06.2021).
- Zubia, B., Agirre, J., SaenzdeArgandoña, E., Galdos, L., & Mendiguren., J.** (2018) . Study On The Influence Of The Springback On The Hole Expansion Ratio Characterization. *Materials Science: Materials Review*, 2(1), 1-10.
- Zhang, R., Knight, S.P., Goswami, R., Davies, C.H.J., & Birbilis, N.C.H.J.** (2015). A Survey of Sensitization in 5xxx Series Aluminum Alloys. *Crossion Science: Sensitization*.