T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAC METAL MALZEMELERE ERİCHSEN DENEYİNİN UYGULANMASI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİMÜLASYONU

UMUT BEKAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gürkan İRSEL

EDİRNE-2025

UMUT BEKAR'ın hazırladığı "**SAC METAL MALZEMELERE ERİCHSEN DENEYİNİN UYGULANMASI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SİMÜLASYONU**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Doç. Dr. Gürkan İRSEL

Doç. Dr. Önder AYER

Doç. Dr. Ümit HÜNER

Tez Savunma Tarihi: 13/01/2025

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Doç. Dr. Gürkan İRSEL
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Doç. Dr. Filiz UMAROĞULLARI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

13/01/2025

Umut BEKAR

Yüksek Lisans Tezi

Sac Metal Malzemelere Erichsen Deneyinin Uygulanması Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Simülasyonu

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu tez çalışmasında 1050 serisi alüminyum, 304 çeliği, galvaniz çeliği ve S235JR metalleri üzerine gerçekleştirilen Erichsen deneyi sonuçlarının, sonlu elemanlar metodu temelli numerik analiz çalışması ile doğrulanması üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Metal malzemelerin çeşitli süreçlerden geçirilerek tasarlanan şekillere getirilmesi için sürece uygun malzeme seçimi kritik bir öneme sahiptir. Metal malzemelerin plastik şekil değiştirme bölgelerini kullanarak istenen tasarımın kalıcı olarak sac metaller üzerinde oluşturulmasında şekillendirilebilirlik kapasitesi metal malzeme için değerlendirilmesi gereken bir özelliktir.

Bu çalışmada metal sacların şekillendirilebilirlik değerlerinin ölçülmesi için geliştirilen EN ISO 20482:13 standardı ile tanımlanan Erichsen Deneyi 1 mm. kalınlığında 4 farklı metal malzeme üzerine her numune üzerinden 3 farklı deney sonucu alınarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda 1050 alüminyum malzeme numunesi için ölçülen ortalama Erichsen deneyi sonucu 8,3 mm olarak gerçekleşmiştir. Galvaniz çeliği için gerçekleştirilen deney sonuçlarında ortalama Erichsen deneyi sonucu 11,5 mm olarak gerçekleşmiştir. S235JR malzeme numunesi için gerçekleştirilen Erichsen deneyi ortalama sonucu sonucu 9,2 mm olarak gerçekleşmiştir. 304 çeliği için gerçekleştirilen test sonucunda i-alınan iki Erichsen deneyi sonucuna göre 12,6 mm ve 12,7 mm değerleri alınmış falan iki değer noktasında da malzeme üzerinde çatlak oluşmadığı ve deney cihazının zımba hızının en yüksek değerine ulaştığı için

deformasyona devam edemeyen test cihazından 304 çeliği için kullanılabilir bir Erichsen deney sonucu elde edilmemiştir.

Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar metodu temelli eksplisit çözüm yöntemi kullanılan bir analiz programı desteği ile Erichsen testi analiz programı üzerinden modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar Erichsen deneyinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analiz programında malzeme özellikleri girdisi olarak ilgili malzemeler için literatürden bulunan çekme testi sonuçları ile belirlenen özellikler tanımlanmıştır.

Tez çalışması Erichsen deneyi gibi yüksek deformasyon miktarı içeren doğrusal olmayan bir sürecin, bir analiz programı aracılığı ile çekme testlerinden elde edilebilen temel malzeme özellikleri kullanılarak deney sonuçlarının hesaplanabileceğini öngörmektedir. Erichsen deneyinden çıkacak sonuçların analiz çalışmasında malzemenin kritik akma gerilmesi noktasında çatlamanın oluşacağı varsayılarak kritik akma gerilmesinin oluştuğu noktadaki deformasyonun Erichsen deneyi sonucunu doğrulayabileceği varsayımından yola çıkarak sonuca ulaşmayı hedeflemiştir.

Analiz çalışması sonucunda Erichsen deneyi sonucu ortalama 8,3 mm olan 1050 alüminyum malzemenin tahmini çatlak oluşum değeri % 10,8 sapma ile 9,2 mm bulunmuştur. S235JR için gerçekleşen Erichsen deneyi sonucu 9,2 mm olurken analiz sonucunda % 6,5 sapma ile 9,8 mm sonucuna ulaşılmıştır. Galvaniz çelik için Erichsen testinde okunan 11,5 mm değerine karşılık analiz sonucunda % 5,2 sapma ile 12,1 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yöntem ile karşılaştırılan sonuçlar sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ile tasarım sürecinde malzeme seçimi sürecinde ihtiyaç duyulan testlerin muhtemel sonuçlarının bilgisayar destekli analiz programları ile hesaplanabildiğini ispatlayarak, maliyet anlamında süreçler için bu yöntemin potansiyelini göstermiştir.

Yıl : 2025
Sayfa Sayısı : 111
Anahtar Kelimeler : Sac metal, Erichsen deneyi, Sonlu elemanlar metodu, Sac metal şekillendirme, LS-DYNA

Master of Science Thesis
Application of Erichsen Test to Sheet Metal Materials and Simulation Using Finite Element Method
Trakya University Institute of Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this thesis study, a study was carried out on the verification of the Erichsen test results performed on 1050 series aluminum, 304 steel, galvanized steel and S235JR steel metals with a numerical analysis study based on the finite element method. Choosing the appropriate material for the process is of critical importance in order to bring metal materials into the designed shapes by passing them through various processes. Formability capacity is a feature that should be evaluated for metal materials in creating the desired design permanently on sheet metals by using the plastic deformation regions of metal materials.

In this study, the Erichsen Test defined by the EN ISO 20482:13 standard developed to measure the formability values of metal sheets is 1mm. It was carried out on 4 different metal materials and 3 different test results were obtained from each sample. As a result of the experiments carried out, the average Erichsen test result measured for 1050 aluminum material samples was 8,3 mm was realized as. In the test results carried out for galvanized steel, the average Erichsen test result is 11,5 mm was realized as. The average result of the Erichsen test conducted for the S235JR material sample is 9,2 mm was realized as. As a result of the test carried out for 304 steel, according to the results of two Erichsen tests, 12,6 mm and 12,7 mm. No usable Erichsen test results were obtained for 304 steel from the test device, which could not continue deformation because no

cracks occurred on the material at two value points and the punch displacement of the test device reached its highest value.

In this thesis study, the Erichsen test was modeled through the analysis program with the support of an analysis program using the finite element method-based explicity solution method. The results obtained were compared with the results obtained from the Erichsen experiment. The properties determined by the tensile test results found in the literature for the relevant materials were defined as material properties input in the analysis program.

The thesis predicts that the test results of a non-linear process involving a high amount of deformation, such as the Erichsen experiment, can be calculated using the basic material properties obtained from tensile tests through an analysis program. In the analysis study of the results of the Erichsen test, it was aimed to reach the conclusion based on the assumption that cracking will occur at the critical yield stress point of the material and that the deformation at the point where the critical yield stress occurs can confirm the result of the Erichsen test.

As a result of the analysis study, the average Erichsen test result was 8,3 mm. The estimated crack formation value of 1050 aluminum material is 9,2 mm with a deviation of % 10,8 has been found. The Erichsen test result for S235JR is 9,2 mm. As a result of the analysis, a result of 9,8 was reached with a deviation of % 6,5. 11,5 mm reading in Erichsen test for galvanized steel. As a result of the analysis, the value is 12,1 mm with a deviation of % 5,2. It was calculated as . The results compared with this method showed the potential of this method for processes in terms of cost by proving that the possible results of the tests needed in the material selection process in the design process can be calculated with computer-aided analysis programs by using the finite element method.

Year : 2025
Number of Pages : 111
Keywords : Sheet Metal, Erichsen test, Finite element method, Sheet metal forming, LS-DYNA

ÖNSÖZ

Yaşadığımız evreni anlamak için geliştirdiğimiz formüller geleceği tahmin edebilmemizdeki en iyi yöntemimiz. Numerik analiz çalışmaları ile sonlu elemanlar metodu gün geçtikçe hayatımızdaki zorlu problemleri daha kolay çözmemize yardımcı oluyor. Bu tezde farklı metal malzemelerin karşılaştırmalı olarak Erichsen deneyinin simülasyon sonuçları ile doğrulandığı bir çalışmayı ortaya çıkarmak amacı literatüre katkı açısından hedeflerden biridir. Bu çalışma çekme testleri ile belirlenmiş malzeme mekanik özelliklerinin kullanılarak Erichsen deneyinin nümerik analiz temelli eksplisit bir sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sonucunun deney yapmadan bulunabileceğini kanıtlamak için gerçekleştirilmiş bir çalışmadır.

Tez çalışmamın tüm süreçlerinde bilgi, öneri ve tecrübeleriyle bana fikir veren, yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Doç. Dr. Gürkan İRSEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarına başladığım süreçteki tavsiyeleri ve desteklerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Vedat TAŞKIN'a, lisans bitirme tezimde birlikte çalıştığım sonlu elemanlar metoduyla ilgili çalışmalara başlamamda vesile olan ve yüksek lisans tez çalışmamda akademik kaynaklarıyla yardımcı olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tolga AKSENCER'e, fikir ve görüşleriyle akademik bakış açımı genişleten Sayın Prof. Dr. Metin AYDOĞDU'ya, son olarak yüksek lisans sürecinde katkılarından dolayı Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ve Makine Mühendisliği Anabilim Dalı paydaşlarına teşekkür ederim.

Koşulsuz sevgi, sabır ve anlayışları ile her zaman yanımda olan başta sevgili anneme ve aileme her zaman varlıklarını hissettirdikleri için minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
ÖNSÖZ viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ xvii
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 3
BÖLÜM 2 5
LİTERATÜR İNCELEMESİ 5
2.1. Benzer Çalışmalar 5
2.2. Sac Metallerin Şekillendirilmesi Süreçlerinde Simülasyon 8
BÖLÜM 3 10
KAVRAMSAL BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER 10
3.1. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri 10
3.1.1. Delme ve Boşaltma 10
3.1.2. Bükme 11
3.1.3. Kesit(Profil) Bükme 13
3.1.4. Germe 14
3.1.5. Boşluk Ekstrüzyonu 15
3.1.6. Kalıp ile Şekillendirme 15
3.1.7. Derin Çekme 16
3.1.8. Tüp Şekillendirme 17
3.1.9. Sıvı ile Şekillendirme 18
3.1.10. Ezerek Dövme 18
3.2. Şekillendirilebilirlikte Kullanılan Testleri 19

3.2.1. Erichsen Test 19
3.2.2. Swift Derin Çekme Testi 20
3.2.3. Hidrolik Şişirme Testi 21
3.2.4. Fukui Konik Kap Testi 22
3.3. Çalışma Malzemeleri Genel Bilgiler 23
3.3.1. Paslanmaz Çelik 23
3.3.2. S235JR Çeliği 24
3.3.3. Alüminyum 24
3.3.4. Galvanizli Çelik 25
3.4. Sonlu Elemanlar Metodunun İncelenmesi ve Temel Kavramlar 26
3.4.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Zorlukları 28
3.4.2. Sonlu Elemanlar Metodu ve İmplisit-Eksplisit Yaklaşımı 29
3.4.2.1. İmplisit Yöntemi 30
3.4.2.2. Eksplisit Yaklaşımı 32
3.4.3. İmplisit ve Eksplisit Zaman İntegrasyonu Metotlarının İncelenmesi 33
3.4.3.1. İmplisit Zaman İntegrasyonu 35
3.4.3.2. Eksplisit Zaman İntegrasyonu 36
3.5. LS-DYNA Analiz Programı 38
3.6. Malzeme Mekanik Özellikleri 40
3.6.1. Mekanik Özellikler Temel Tanımlar 40
BÖLÜM 4 .....
MATERYAL VE METOT 44
4.1. Erichsen Testi 44
4.1.1. Genel Koşullar 44
4.1.2. Test Cihazı Koşulları 46
4.1.3. Test Numune Koşulları 47
4.1.4. Test Koşulları 47
4.1.5. Testin Uygulanması 47
4.2. Erichsen Test Çalışması 48
4.2.1. Test Cihazı 48
4.2.2. Test Numuneleri 49

4.2.3. Erichsen Test Sonuçları 52
4.2.3.1. Alüminyum 1050, 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları 52
4.2.3.2. ST37 Çeliği 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları 52
4.2.3.3. Galvaniz Çelik 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları 53
4.2.3.4. 304 Çeliği 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları 54
4.3. Bilgisayar Destekli Analiz Çalışması 55
4.3.1. Analiz Geometrisinin Hazırlanması 56
4.3.1.1. Numune Parçası 56
4.3.1.2. Üst Tutucu 57
4.3.1.3. Alt Tutucu 59
4.3.1.4. Zımba 60
4.3.2. CAD Modelinin Montajı ve Analiz Çalışması İçin Düzenlenmesi 61
4.3.3. Analiz Yapısının Kurulması ve Malzeme Tanımlanması 64
4.3.4. Ağ Yapısının Örülmesi (Mesh) 67
4.3.5. Analiz Sınır Şartları 71
4.3.6. Gerilme ve Deformasyon Analizleri 73
4.3.6.1. Alüminyum Malzeme Analizleri 73
4.3.6.2. ST37 Çeliği Malzeme Analizleri 76
4.3.6.3. Galvaniz Çelik Malzeme Analizleri 78
4.3.6.4. 304 Çelik Malzeme Analizleri 81
4.4. Erichsen Test Sonuçları ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması 84
BÖLÜM 5 88
SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR 87
KAYNAKLAR 89
ÖZGEÇMİŞ 94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al:	Alüminyum
mm:	milimetre
µm:	mikrometre
1d:	tek boyut
2d:	çift boyut
3d:	üç boyut
F:	kuvvet
m:	kütle
a:	ivme
ü:	ivme
u̇:	hız
$\boldsymbol{u}$**:**	yer değiştirme
$\boldsymbol{t}$**:**	zaman
$\boldsymbol{R}$**:**	fonksiyon operatörü
c:	sönümleme
k:	sertlik
d:	türev operatörü
Δ:	birim zamanda değişim
$\boldsymbol{u''}$**:**	yer değişiminin ikinci mertebeden türevi
$\boldsymbol{u'}$**:**	yer değişiminin birinci mertebeden türevi
$\boldsymbol{L_{min}}$**:**	ağ yapısındaki en küçük eleman boyutu
$\boldsymbol{c_d}$**:**	dalga genişleme hızı
$\boldsymbol{E}$**:**	young modülü
$\boldsymbol{p}$**:**	malzemenin yoğunluğu
kg:	kilogram
$\boldsymbol{m^3}$**:**	hacim birimi
$\boldsymbol{\sigma}$**:**	gerilme

$\boldsymbol{\varepsilon}$**:**	gerinim
$\boldsymbol{v}$**:**	poisson oranı
HV:	vickers sertlik birimi
$\boldsymbol{R_a}$**:**	ortalama pürüzlülük değeri
Kn:	kilonewton
°C:	celcius derece
dak:	dakika
Hz:	hertz
AC:	alternating current
Kva:	kilovolt-amper
Bar:	basınç birimi
Gpa:	gigapascal
Mpa:	megapascal

Kısaltmalar

DIN:	Deutsches Institut für Normung
ISO:	International Standart of Organization
CAD:	Computer Aided Design
LDR:	limiting drawing ratio test
CFL:	Courant-Friedrichs-Lewy
LSTC:	Livermore Software Technology Corporation
EN:	Europeane Norm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Sac Metal Üzerinde Kesme ve Delme İşlemi 11
Şekil 3.2. Sac Metal Bükme İşlemi 11
Şekil 3.3. (a) Bükme Makinesi ile Sacın Katlanması (b) V Kalıp ile Sacın Bükülmesi (c) Yuvarlama Formu ile Saca Büküm Verilmesi (d) Flanş Bükümü 12
Şekil 3.4. (a) Olası Burkulmayı Gösteren Büzülme Flanşı (b) Gerilmiş Flanşın Köşe Kırığı Oluşumu (c) Kavisli Bir Levhanın Flanşlanması 13
Şekil 3.5. Kesit Bükme İşlemi 14
Şekil 3.6. (a) Sac Gerdirme Yüzeyi (b) Sac Gerdirme İşlemi Kalıp-Punch 14
Şekil 3.7. Boşluk Ekstrüzyonu Yöntemi 15
Şekil 3.8. (a) Tipik Bir Kalıplama Yöntemine Ait İş Düzeneği (b) Kalıp ile Şekil Verme Yöntemine Düzeneğinin Kesit Görünümü 16
Şekil 3.9. Silindirik Kap Derin Çekme İşlemi Düzeneği (b) Tek İşlemde Derin Çekilmiş Kap 17
Şekil 3.10. Boru Genişletme İşlemi (b) Boru çapının Tüp Şekillendirme Yöntemi ile Şekillendirilmesi 17
Şekil 3.11. Sıvı Basıncı Kullanılarak Şekillendirme İşlemi 18
Şekil 3.12. Ezme Yöntemi ile Lokal Olarak Sac Parçanın İnceltilmesi 19
Şekil 3.13. Erichsen Testi Standart Ölçüleri 20
Şekil 3.14. Swift Derin Çekme Testi 21
Şekil 3.15. Hidrolik Şişirme Testi 22
Şekil 3.16. Fukui Konik Kap Testi 23
Şekil 3.17. Boyutlara Göre Farklılık Kazanan Ağ Yapıları 27
Şekil 3.18. Düğüm Noktasına Ait Serbestlik Dereceleri 28
Şekil 3.19. İmplisit-Eksplisit Yaklaşımları 29
Şekil 3.20. Zaman integrasyonunda zamanın adımlara bölünmesi 34
Şekil 3.21. X Doğrultusundaki ve Y doğrultusundaki yer değişimi 42
Şekil 4.1. Erichsen Testi Şematik Gösterimi 45

Şekil 4.2. Test Cihazı 48
Şekil 4.3. Test Cihazı Numune Gözlem Havuzu 49
Şekil 4.4. Test Cihazı Bölümleri(1.Test silindiri, 2.Numune ekleme açıklığı, 3.Zımba hızı regülatörü, 4.Dengeleme ayağı, 5.Ana şalter,.6 Dokunmatik panel) 50
Şekil 4.5. Test Noktalarının Numune Üzerindeki Konumları 51
Şekil 4.6. Test Noktaları İşaretlenmiş Test Numuneleri (a. 304 çeliği, b. S235JR, c. 1050 alüminyum, d. Galvaniz çeliği) 51
Şekil 4.7. Alüminyum 1050 Erichsen Testi Sonuçları 52
Şekil 4.8. S235JR Çeliği Erichsen Testi Sonuçları 53
Şekil 4.9. Galvaniz Çelik Erichsen Testi Sonuçları 54
Şekil 4.10. 304 Çeliği Erichsen Testi Sonuçları 55
Şekil 4.11. Numune Parçası Genişlik ve Yükseklik Ölçüsü 56
Şekil 4.12. Numune Parçası Kalınlık Ölçüsü 57
Şekil 4.13. Numune Parçasının Genel Görünümü 57
Şekil 4.14. Üst Tutucu Çap Ölçüleri 58
Şekil 4.15. Üst Tutucunun Draft Açısı ile Katılaştırma Yüksekliği Verilmesi 58
Şekil 4.16. Üst Tutucu Genel Görünümü 59
Şekil 4.17. Alt Tutucu Çap Ölçüleri 59
Şekil 4.18. Alt Tutucu Yükseklik Ölçüsü 60
Şekil 4.19. Alt Tutucu Genel Görünüm 60
Şekil 4.20. Zımba Parçası Ölçüleri-Genel Görünümü 61
Şekil 4.21. Yan Görünüş Analiz Geometrisi 61
Şekil 4.22. Analiz Montaj Geometrisinin Kesit Görünümü 62
Şekil 4.23. Orta Yüzey Çıkarma Komutunun Kullanılması 62
Şekil 4.24. Geometrinin 2 Boyutlu Yüzeylere Dönüştürülmesi 63
Şekil 4.25. Parçaların Kalınlıkları(midsurface2-üst tutucu, midsurface4-alt tutucu, midsurface1-zımba, midsurface3-numune parçası) 64
Şekil 4.26. ANSYS Analiz dosyasının workbench yapısı 65
Şekil 4.27. Malzeme Bilgilerinin Eklenmesi 66
Şekil 4.28. Ağ Örgüsü Ayarları 68
Şekil 4.29. Parçalara Ait Ağ Yapıları 68
Şekil 4.30. Ağ Örgüsünün Genel Görünümü 69

Şekil 4.31. Eleman Kalite Değerleri 69
Şekil 4.32. CFL Time Step Değerleri 71
Şekil 4.33. Yüzey Etkileşimi Tanımlaması..... 72
Şekil 4.34. Yüzey Sabitlemeleri 72
Şekil 4.35. Zımbanın Yer Değiştirme Tanımlaması 73
Şekil 4.36. 8,3 mm Zımba Yer Değişimi Sonuçları..... 74
Şekil 4.37. 8,3 mm Zımba Yer Değişim Noktasındaki Eşdeğer Gerilmeler..... 74
Şekil 4.38. Alüminyum Malzemenin Yüzey Üzerindeki Gerilme Yayılımı 75
Şekil 4.39. Alüminyum Malzeme Kritik Çekme Akma Dayanımı Gerilme Değerleri .. 75
Şekil 4.40. Alüminyum Malzeme Kritik Gerilme Değerindeki Deformasyon..... 76
Şekil 4.41. S235JR 9,2 mm Zımba Yer Değişimi Sonuçları 76
Şekil 4.42. S235JR 9,2 mm Zımba Yer Değişim Noktasındaki Eşdeğer Gerilmeler 77
Şekil 4.43. S235JR Çelik Malzemenin Yüzey Üzerindeki Gerilme Yayılımı..... 77
Şekil 4.44. S235JR Çelik Malzeme Kritik Çekme Akma Dayanımı
Gerilme Değerleri..... 78
Şekil 4.45. S235JR Çelik Malzeme Kritik Gerilme Değerindeki Deformasyon 78
Şekil 4.46. 11,5 mm Zımba Yer Değişimi Sonuçları..... 79
Şekil 4.47. 11,5 mm Zımba Yer Değişim Noktasındaki Eşdeğer Gerilmeler..... 79
Şekil 4.48. Galvaniz Çelik Malzemenin Yüzey Üzerindeki Gerilme Yayılımı..... 80
Şekil 4.49. Galvaniz Çelik Malzeme Kritik Çekme Akma Dayanımı
Gerilme Değerleri..... 80
Şekil 4.50. Galvaniz Çelik Malzeme Kritik Gerilme Değerindeki Deformasyon 81
Şekil 4.51. 304 Çelik Kritik Çekme Akma Dayanımı Gerilme Sonuçları..... 81
Şekil 4.52. 304 Çelik Kritik Çekme Akma Dayanımı Deformasyon Sonuçları 82
Şekil 4.53. 304 Çeliği % 10,8 Deformasyon Sapma Durumunda Gerilme Sonuçları 82
Şekil 4.54. 304 Çeliği % 10,8 Deformasyon Sapma Durumunda Deformasyon
Sonuçları 83
Şekil 4.55. 304 Çeliği % 5,2 Deformasyon Sapma Durumunda Gerilme Sonuçları 83
Şekil 4.56. 304 Çeliği % 5,2 Deformasyon Sapma Durumunda Deformasyon
Sonuçları 84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması 25
Çizelge 3.2. Çinko kaplamaların değişik ortamlardaki ömürleri 26
Çizelge 3.3. İmplisit Yöntemi Hesaplama Adımları 31
Çizelge 3.4. Eksplisit Yöntemi Hesaplama Adımları 33
Çizelge 3.5. Zaman integrasyonu zaman-yer değiştirme grafiği 35
Çizelge 3.6. İmplisit ve eksplisit metotlarının farkları 38
Çizelge 3.7. Çalışmada Kullanılan Programların Gösterimi 39
Çizelge 3.8. Gerilme-Gerinim Grafiği 41
Çizelge 3.9. Bilineer Von Mises Plastisite Davranışı Gerilme-Gerinme Eğrisi 42
Çizelge 3.10. Gerilme-Gerinim Grafiği Kritik Değerler 43
Çizelge 4.1. Erichsen Testi Düzeneği Ölçüleri 45
Çizelge 4.2. Malzeme Özellikleri 67
Çizelge 4.3. Eleman metrik kalitesi yığın tablosu 70
Çizelge 4.4. Erichsen Testi Zımba Yer Değiştirme Değerleri(mm biriminden) 85
Çizelge 4.5. Analiz Çalışması Okunun Deformasyon ve Gerilme Sonuçları 86

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Sac metal (yassı ürünler sektörü) piyasasında küresel talep 2023 yılında 316 milyar dolar değerine ulaşmıştır. Küresel marketin değeri 2033 yılına kadar yıllık % 4 bileşik büyüme oranı ile büyümeye devam edeceği tahmin edilmektedir. Sac metal pazarında otomotiv ve havacılık endüstrilerinde hafif malzemelere olan talepteki artış ve sürdürülebilir inşaat malzemelerinin artan kullanımı gibi faktörler nedeniyle talep hızlı bir artış yaşamaktadır (Future Market Insights, 2023).

Farklı üretim sektörlerinde yoğun kullanım ürünlerinden metal sac malzemeler sıvama, derin çekme, basınçla şekillendirme, bükme vb. birçok farklı yöntem kullanılarak istenen şekillere getirilerek kullanılır (Marciniak vd., 2002). Bu tasarlanan şekillendirme sürecinde farklı hatalar oluşabilmekte ve süreç kesintiye uğrayarak maliyet/zaman kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu hataların tasarım süreçlerinde tahmin edilmesi ve öncül aksiyonların alınması açısından işlenen malzemenin şekillendirilebilme kapasitesinin bilinerek buna uygun imalat sürecinin tasarlanması, kalıp tasarım ve parametrelerin malzemeye göre düzenlenmesi gerekmektedir (Akrout vd., 2008).

Sac metallerin şekillendirilebilirlikleri iş parçasının yırtılmadan ve boyun vermeden istenilen şekil yönünde plastik deformasyona uğrayabilme yeteneği olarak tanımlanır. Sac metallerin şekillendirilebilirliklerini belirlemek için sınırlayıcı yükseklik testi, swift derin çekme testi, hidrolik şişirme testi ve Erichsen şişirme testi gibi farklı yöntemler mevcuttur (Civelek ve Özdemir, 2024).

Sac metallerin şekillendirilmesi farklı mekaniklerin dahil olması ile karmaşık bir sürece yol açabilir. Aynı işlemde bükme, gererek şekillendirme, derin çekme işlemleri aynı anda iş parçalını etkileyebilir. Malzemeye ait mekanik özelliklerin(akma dayanımı, çekme dayanımı, şekil değiştirme sertleşmesi üssü, anizotropi) elde edildiği çekme deneyi tek başına şekillendirme özelliklerini belirleme konusunda yetersiz kalır. Sac, levha gibi ürünlerin özelliklerini şekillendirme süreçleri için daha iyi tespit etmek için gererek şekillendirme işlemine benzerliğinden dolayı Erichsen deneyi yaygın olarak kullanılır. Erichsen testi sac metallerin şekillendirme yetenekleri için kullanılan testlerden biri olarak temelinde sac üzerindeki deformasyona bağlı oluşan tümsek yüksekliğini ölçü alarak gerçekleştirilir (Anket, Koruvatan ve Ay, 2011).

Simülasyon ve analiz çalışmalarının geldiği seviye itibariyle günümüzdeki birçok mühendislik problemi analiz programları yardımıyla çözülebilmektedir. Farklı sektörlerde kullanımı ağı genişleyen çalışmalar test, prototipleme, malzeme karakterizasyonu, üretim aşamaları gibi konularda süreçlere dâhil durumdadır. Test süreçlerinde numune maliyeti, test süresinde harcanan zaman ve test için harcanan iş gücü bakımından testin analiz çalışmalarının öncesinde gerçekleştirilmesi mühendislik açısından kazanımlar oluşturur (Nawawi, 2009).

Sonlu elemanlar metodu temelli bilgisayar destekli simülasyon programları gelişen donanım kapasiteleri ve güvenilir formülasyon temelli paket programlar bu metodun kullanım oranını arttırmıştır. Multifizik çözücülerin fazla değişkenli problemler üzerine çözüm yetenekleri, malzeme şekillendirme süreçlerindeki yüksek deformasyon içeren analiz çalışmalarında sonlu elemanlar metodunun kullanılmasına hizmet etmektedir (ANSYS, 2024).

Gerçekleştirilen çalışmada DIN 50101, ISO 20482 standartlarına göre sac ve levha malzememeler üzerine şekillendirilebilirlik ölçümü için gerçekleştirilen Erichsen (Olsen) deneyi farklı çelik ve alüminyum temelli malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Burada malzemelerin yırtılmaya uğramadan ne kadar deforme olabileceğine dair ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci etabında ilgili deney malzemeleri üzerine literatürden alınan çekme testi sonuçlarına bağlı olarak oluşturulmuş mekanik özelliklerin kullanıldığı bir analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Erichsen testi bilgisayar ortamında modellenerek

analiz programı aracılığı ile gerçek test şartları oluşturulmuş simülasyon modelinde analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz çalışmasında test sonuçları ile karşılaştırmak için malzemenin maksimum deformasyona dayanabileceği maksimum çekme dayanımı değeri yırtılma noktasının gerçekleştirdiği kuvvet olarak kabul edilmiştir. Bu stres değerine ulaşan simülasyon numunelerinin o noktadaki deformasyon değeri alınarak test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma ile çekme testinden gelen değerler ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile gerçek Erichsen testi deneyi sonuçları arasında karşılaştırma sonucu güvenilir bir analiz çalışması ile test sonuçlarının önceden hesaplanabilineceği ve malzemelerin şekillendirilebilirlikleri ile ilgili testlerin bilgisayar ortamında güvenli sonuçlar verip veremeyeceği bulunmak istenmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında ANSYS paket yazılımına dahil LS-Dyna uygulaması kullanılmıştır. Erichsen test deneyi için Erichsen marka Sac şekillendirme test cihazı kullanılmıştır.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma Erichsen testi ile şekil verilebilirliği ölçülen sac metallerin şekillendirilebilirliklerinin simülasyon çalışması ile bulunabileceğini göstermek ve deney sonuçlarını nümerik bir analizle doğrulamak için gerçekleştirilmiştir. Simülasyon yazılımlarının farklı kullanım alanlarına açık ve esnek olmasının farklı malzeme testlerinde kullanılabileceğinin gösterilmesi ana hedeflerden biri olarak belirlenmiştir. Dört farklı malzeme seçilerek deney ve simülasyon çalışması arasında oluşabilecek hata payı değişen malzeme özelliklerine göre de incelenmiştir. Sac malzemeler üzerine şekillendirilebilirlikle ilgili testler ve sac metaller üzerine gerçekleştirilen nümerik analiz çalışmaları literatürde yapılmış çalışmalar olarak paylaşılmıştır. Analiz çalışmaları ile ilgili malzeme testleri üzerine gerçekleştirilen simülasyonların kullanımlarının artabileceği ve süreçlere maliyet/zaman anlamında faydalı olabileceği ile ilgili Oleksik ve arkadaşlarının 2009, Ablat ve Qattawi 2017 ve Şen 2018 yıllarında gerçekleştirdikleri çalışmalarda önerilerde bulunulmuştur.

Tez çalışmasının birinci bölümünde tez konusu ile ilgili giriş bilgileri, çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde literatürde sac metal şekillendirilebilirliğinin ölçülmesi ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalar ve sac metallerin şekillendirilmesi ile ilgili gerçekleştirilmiş simülasyon çalışmalarına ait literatür araştırması paylaşılmıştır. Çalışmanın üçüncü kısmında çalışmanın kavramsal bilgi ve kuramsal temelleri ile ilgili sac metal şekillendirme yöntemleri, sonlu elemanlar metodu ve çalışmada kullanılan multifizik çözücü ile ilgili paylaşım yapılmıştır. Dördüncü bölümde ilk olarak Erichsen deneyi uygulanan malzemelerin deney ve sonuçları paylaşılmış ve devamında deney için modellenen simülasyon çalışmasının gerçekleştirilip sonuçlarının değerlendirilmesi paylaşılmıştır. Çalışmanın sonuçlar ve tartışmalar kısmında deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması, çalışmanın çıktıları ve ilgili tartışmalar paylaşılmıştır.

Sac metallerin şekillendirilmesi işlemlerinde deformasyon limitlerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar metodu temelli programların gelecekte yaygınlaşması, bu süreçlere simülasyon çalışmalarınım entegre edilmesinin yolları ve literatüre katkı sağlanması ön plana çıkarılması çalışmanın hazırlanması yönündeki motivasyonlardır.

Çalışma özgünlük açısından Akrout ve arkadaşlarının 2008, Gavrus ve arkadaşlarının 2010, Nawawi'nin 2009, Oleksik ve arkadaşlarının 2009 yıllarındaki çalışmalarının incelenmesi sonucunda Erichsen deneyi için farklı sac malzemelerde gerçekleştirilen çalışmalar mevcut olmakla beraber Erichsen deney sürecine ait simülasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği görülmekte ve bu çalışma özelinde belirlenen 4 malzeme için ayrı deney ve simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesiyle bu malzemeler için karşılaştırmalı deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması açısından özgünlük taşımaktadır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Benzer Çalışmalar

Hongmei vd. (2022) alüminyum alaşım 5052 sacın potansiyel şekillendirilebilirliğinin arttırılmasını amaçlayarak, sac test numunelerinin gerilme ve şişkinlik özellikleri Erichsen testi ile test edilmiştir. Test koşullarında kuvvet, yağlama koşulları ve zımba hızı gibi test değişkenleri üzerine testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre test zımba kuvveti ve hızının artması sac çukurlaşma değerlerinin daha yukarı çıktığı ve daha düşük sürtünme kuvveti altında test sonuçlarına yağlamanın etkini ölçmek için gerçekleştirilen testlerde yağlamanın sac üzerinde şekillendirilebilme kapasitesini arttığı ispatlanmıştır.

Çakış (2022) gerçekleştirdiği çalışmasında Erichsen testi donanımlarının tasarımsal olarak parametrik değişikliklere göre sonuçlar üzerindeki değişikliği inceleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmada Al5757, Ck75 ve DP600 çelik sac malzemeler kullanılmıştır. Test donanımı değişkenleri olarak farklı çekme hızları, farklı küresel zımba uçları ve farklı zımba kuvvetleri kullanılmıştır. Bu değişkenlerin test sonuçları üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Erichsen testi sonuçlarına göre numune genişliği, zımba kesitinin ve zımba çapının 1,5 katından sonra Erichsen sabiti artmaya başlamış, malzeme genişliği zımba çapına eşit olduğunda ise zımba yükünün düştüğü tespit edilmiştir.

Amar vd. (2008) çalışmalarında Erichsen testine ait sonuçları ve testin farklı parametrelerini kontrol etmek için sonlu elemanlar yazılımı ile sonuçların elde edilmesi üzerine çalışmıştırlar. Farklı malzeme ve kalınlıktaki sacların üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar analiz sonuçları ile doğrulanmıştır.

Gavrus vd. (2010) Erichsen deformasyon testinin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesini içeren bir çalışma ortaya koymuştur. Sac alaşımları yapısal denklemlerin kullanılması ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. OPTAR adındaki sayısal ters analiz yazılımı ile sanal olarak üretilen malzeme özellikleri testlere yönelik tersine geri bildirim verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Sanal bir çelik alaşımı örnek alınarak yazılım ile test sonuçları hesaplanmış ardından test ile doğrulanmıştır. AA5182 alüminyum alamı ve DC03 çelik alaşımları üzerine bu çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Nawawi (2009) gerçekleştirdiği çalışmasında sonlu elemanlar metodu kullanarak Erichsen - Olsen testlerinde metal sacın kırılmadan plastik deformasyona dayanma özelliklerini ve şekillendirilebilirliklerini değerlendirmiştir. Erichsen - Olsen testinin metal levhalar üzerinde daha çok kullanılan daha popüler bir test olmasından dolayı çalışmada kullanılan test olarak seçilmiştir. Testlerde ve analiz çalışmalarında farklı malzemeler üzerine çalışmalar yapılmış, alüminyum, magnezyum, pirinç temelli alaşımlar kullanılmıştır. Gerçekleştirdikleri çalışmada değişken olarak testlerinde sadece ölçü farklılıkları mevcuttur. Algor yazılımı için gerekli malzeme ve simülasyonu için veriler toplandıktan sonra analiz gerçekleştirmiştir. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması için test sonuçları kullanılmıştır.

Talapatra vd. (2013) çalışmalarında metal şekillendirme süreçlerinde kullanılan Erichsen çukurlaşma testini kullanarak farklı kalınlıktaki farklı metal levhaların çukurlaşma testlerine ait indekslerini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmalarında numuneyi üzerinde ilk çatlak oluşan noktaya kadar testi sürdürmüşlerdir. Çatlağın ilk oluşumuyla beraber hesaplanan indekse göre sac üzerindeki deformasyon miktarı mm cinsinden ölçüsü sonuçlar ölçümde kullanılmıştır.

Oleksik vd. (2009) makalelerindeki çalışmada metal levhaların plastik şekil değiştirmelerini incelemek için sonlu elemanlar metodunu kullandılar. Ls-Dyna üzerinden gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmalarında. İlk olarak çekme testiyle belirledikleri DC02 ve DC04 çeliklerine ait mekanik özellikleri simülasyon çalışmasında

veri olarak kullanıldı. Yine aynı malzemeler ile gerçekleştirilen erichsen testi deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve simülasyonu gerçekleştirilen erichsen testi numerik analiz çalışması ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Ablat ve Qattawi (2016) çalışmalarında sac metallerin şekillendirilmesi işleminde sayısal analiz üzerinden incelemeye yönelik bir inceleme gerçekleştirmiş ve sayısal analizle bu simülasyon çalışmalarının avantajları ve dezavantajları üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında ana simülasyon çalışmalarında sonlu elemanlar metodunun çözüm yöntemleri ve formülasyonun geliştirilmesinin yanı sıra eleman seçimleri konusundaki çalışmaların literatürde yer aldığını vurgulamışlardır. Sayısal çözümlerin temelini oluşturan anizotropi ve verim kriterlerinin çalışmalardaki önemi verilmiştir.

Şen (2018) çalışmasında yüksek mukavemete sahip DP600 malzemesi için sonlu elemanlar metodunu kullanarak ilgili malzemenin şekillendirilebilirlik özelliklerinin analizini gerçekleştirmiştir. 1 mm sac kalınlığı üzerinde gerçekleştirdiği testlerde sabit ve değişken baskı plakası kuvvetlerinin çekme işlemi üzerindeki etkisini bulmak için sınır çekme oranlarını belirlemiştir. Çalışmasında stampack analiz programı kullanmıştır. Sacın şekillendirilebilirlik simülasyonlarını yürütmüştür. Gerçekleştirdiği çalışma sonunda malzemenin şekillendirme işlemlerinde yırtık ve kırışık oluşumlarını önlemek için öncesinde mutlaka simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi gerektiğini sonuçların karşılaştırılması sonucunda öneri olarak paylaşmıştır.

Özdilli (2018) çalışmasında polimer kaplamalı ve kaplamasız metal sacların derin çekme davranışlarını incelemiştir. Sac numuneler derin çekme işleminde değişken olarak kabul edilen çekme hızı ve baskı plakasının basıncına göre testleri gerçekleştirmiştir. Polimer kaplamalı numunelerin derin çekilmesinde kaplamasız metal saclara kıyasla ortalama kalıplama kuvvetinde azalma görüldüğü ve derin çekme işlemi ile şekillendirilmiş bir ürünün, işlem sonrası boyama zorlukları ortadan kalktığını sonuç olarak paylaşmıştır.

Kocanda ve Jasinski (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada DC04 çeliği üzerindeki çalışmalarında farklı kalınlıklardaki numuneler üzerinde Erichsen deneyi uygulamışlar ve 0,8 mm kalınlıktaki DC04 için 11,1 mm, kalınlığı 1 mm olan numune için 11,35 mm ve kalınlığı 2 mm olan numune üzerinden 12,95 mm çatlama deformasyonu ölçmüşlerdir.

Reddy vd. (2013) çalışmalarında paslanmaz çelik üzerine farklı kalınlıklardaki numunelere Erichsen Testi uygulamıştır ve 0,8 mm kalınlık için 12,14 mm, kalınlığı 1 mm olan numunede 12,28 mm ve kalınlığı 1,2 mm olan numunede 12,66 mm deformasyon miktarı ölçmüştür.

2.2. Sac Metallerin Şekillendirilmesi Süreçlerinde Simülasyon

Sac metal şekillendirme süreçlerinin simülasyonları yüksek doğrusal olmayan modeller içerdiği için karmaşık süreçlere ihtiyaç duyar. Deformasyon miktarının yüksek olması ağ örme işlemlerinin ara işlemler ile tekrardan oluşturulması gereklilikleri çözüm alma sürelerini uzatmaktadır. Zaman kritik süreçlerde bu simülasyonların gerçekleştirilmesi zaman kaybına sebep olabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi temelli çözümlerde verimin yüksek olması ve hassasiyetin yükseltilmesinin ve bu parametreleri geliştirirken çözüm süresinin de en kısa sürede tamamlanması gerekmektedir (Carson ve Maria, 1997).

Sac metallerin şekillendirilmesi süreçlerinde karmaşık yüzey yapıları ve ince malzemelerle çalışılmadan dolayı hata ihtimali yüksek bir süreç olarak görülmektedir. Yırtılma, kırışma ve şekil bozuklukları gibi hatalarla sonuçlanabilen şekillendirme işlemindeki bu hataların temel sebepleri kalıp hızı, kalıp geometrisi, sürtünme şartları ve tutucu kuvveti olarak gösterilebilir. Sac metalin bu şekillendirme hatalarına uğramadan üretilmesini malzemenin şekillendirilebilirlik kabiliyeti belirler. Bu şekillendirilebilirlik özelliklerinin kalıp ve üretim süreci düzeneğinin hazırlanması öncesinde CAD ortamında hazırlanan kalıp yüzeyleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak sürecin nasıl gelişeceği ile ilgili simülasyon çalışması gerçekleştirilir (Zhang, Caı, Zhang ve Lı, 2013).

Sac malzeme optimizasyonu, derin çekme ve gererek form verme gibi işlemlerde sıklıkla kullanılan simülasyon çalışmaları havacılık, otomotiv, beyaz eşya gibi sektörlerde süreçlerde aktif olarak kullanılmaktadır. Kalıp tasarım aşamalarında, süreç planlaması, şekillendirme işlemlerindeki parametrelerin optimizasyonu (kalıp tasarımı, çekme geometrileri, yağlama, pot kuvveti), malzeme alternatiflerinin belirlenmesi, malzeme kalınlık ve miktarının belirlenmesi, kalıp teknolojilerinin geliştirilmesi süreçleri simülasyon çalışmalarının bu alanda kullanıldığı alanlardır (Alıcı, 2001).

Gerçekleştirilen literatür incelemesi sonucunda örnek çalışmalardan yola çıkarak farklı sonlu elemanlar paket analiz programlarının eksplisit analiz temelli çözümlerden faydalanılarak, fiziksel deneylerin analiz çalışması ile yakın sonçların hesaplanabildiği görülmüştür.

Hyun C. ve arkadaşlarının (2018) gerçekleştirdiği çalışmada Ericsen testi sırasında saf magnezyum üzerindeki kaplamanın zorlanmalarını görmek için Abaqus paket programı kullanarak eksplisit bir sonlu elemanlar analizi ile testi simüle etmişlerdir. Ekpilisit çözümün gerçekleştirilmesinde 2 boyutlu geometriler kullanılmıştır. Ağ yapısı boyutları 0,5 mm olarak girilmiş ve dört düğüm noktasına bağlı dörtgen elemanlar oluşturulmuştur.

Jurendic S. Ve Gaiani S. Çalışmalarında titanyum alaşım malzemenin derin çekilme işleminin simülasyonunu eksplisit temelli bir çözücü olan LS-DYNA ile gerçekleştirmiştir. Kapsamlı ve detaylı derin çekme kalıplarının oluşturulmadan bu denemelerin gerçekleştirilmesi için bir eksplisit simülasyon modeli gerçekleştirmiştirler. Çalışmalarında malzeme plastik tepkisini modellemek için Barlat (1989) malzeme modelini temel aldıkları çalışmalarında, çekme testinden elde ettikleri verileri malzeme girdisi olarak simülasyon çalışmasında kullanılmıştır.

Oleksik V., Gavrus A. ve arkadaşlarının Erichsen testinin deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile sac metalik malzemelerin metalik özellikleri ile ilgili gerçekleştirdikleri çalışmalarında LS-DYNA üzerinden gerçekleştirdikleri eksplisit sonlu elemanlar metodu temelli çözümün gerilme ve gerinimlerin hesaplanmasına olanak tanıdığını belirtmişlerdir. Elemanlar üzerindeki distorsiyonları ve hourglass enerjisindeki yüksek değerlerin önüne geçmek için ağ yapısında iyi eleman kalitesini sağladıklarını belirtmişlerdir. Sonuçların okunmasında farklı sac tipleri ve kalınlıklarındaki gerçekleştirdikleri çalışmalarında numunenin durumunu “Von Mises” kriterine bağlı bir şekilde oluşturulmuş gerilme değerleri üzerinden değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında simülasyon çalışmalarında bulduk.

Eksplisit analizler zamana bağlı kırılma, malzeme kopması gibi parçada büyük deformasyonlara neden olan fiziksel problemlerin simüle edilmesinde tercih edilen bir metottur. Zamana bağlı şekilde doğrusal olmayan problemlerin çözümünde bu yöntem gerçeğe yakın sonuçlar vererek çözüme ulaştırmaktadır (Balaban vd., 2012).

BÖLÜM 3

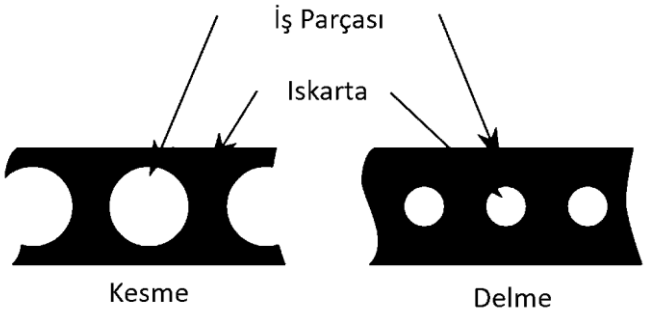
KAVRAMSAL BİLGİLER VE TEMEL KURAMLAR

3.1. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri

Günümüzde büyük miktarda düşük maliyetler ile ince metal saclar üretilebilmektedir. Bu metallerin tamamı sıcak şerit haddeleme veya soğuk haddeleme yöntemleri ile üretilmektedir. Sonrasında ikinci aşama form verme sürecinin ardından bu metal saclar ev aletleri, otomotiv, inşaat yapıları, havacılık ve uzay sanayii, yiyecek-içecek ve benzeri metal sac kullanılan sektörlerdeki ürünler ve yapılarda kullanılmaktadır. Sac metaller yüksek akma dayanımları, yüksek elastiklik modülü gibi mekanik avantajlarından dolayı iyi bir ağırlık-dayanım oranına sahiptirler (Marciniak, Hu ve Duncan, 2002).

3.1.1. Delme ve Boşaltma

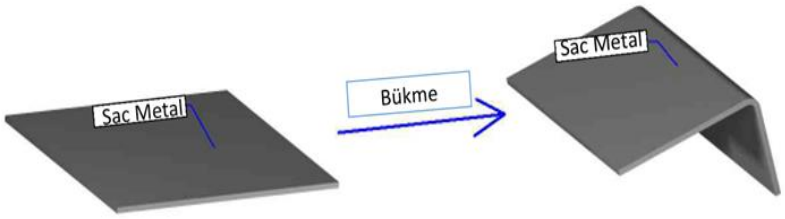
Sac metaller çoğunlukla büyük rulolar halinde üreticilere teslim edildiğinden dolayı ilk işlem genellikle preslere beslenecek sacların hazırlanması için delme işlemidir. Daha sonrasında farklı şekillendirme işlemleri uygulanabilir sac metalin fazla malzeme kısımlarını boşaltmak ve delikler açmak için bu yöntem kullanılmaktadır. Delme ve kesme işleminin gösterildiği Şekil 3.1'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.1. Sac Metal Üzerinde Kesme ve Delme İşlemi

3.1.2. Bükme

En basit şekliyle bükme Şekil 3.2.'de gösterildiği üzere düz bir sac levhayı bükme yüzeyi üzerinden bir açı oluşturacak şekilde kalıcı deformasyona zorlamaktır. Plastik deformasyon sadece bükülme bölgesinde ve devamında gerçekleşmektedir.

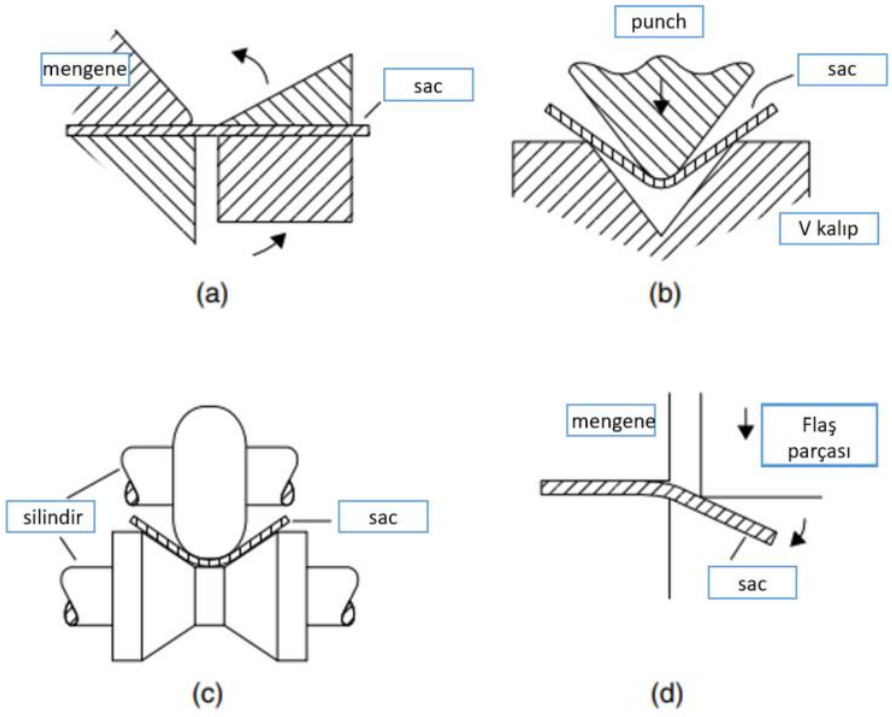


Şekil 3.2. Sac Metal Bükme İşlemi

Eğer malzeme sünek değilse dış bükülme yüzeylerinde çatlaklar oluşabilir ve bükme işlemi istenen sonuçları vermeyebilir. Bükme işleminde en büyük zorluk genellikle doğru ve tekrarlanabilir bükme açısını bulmaktır. Elastik geri yaylanma yine malzemeni mekanik özelliklerine bağlı olarak işlem için önemli bir göstergedir.

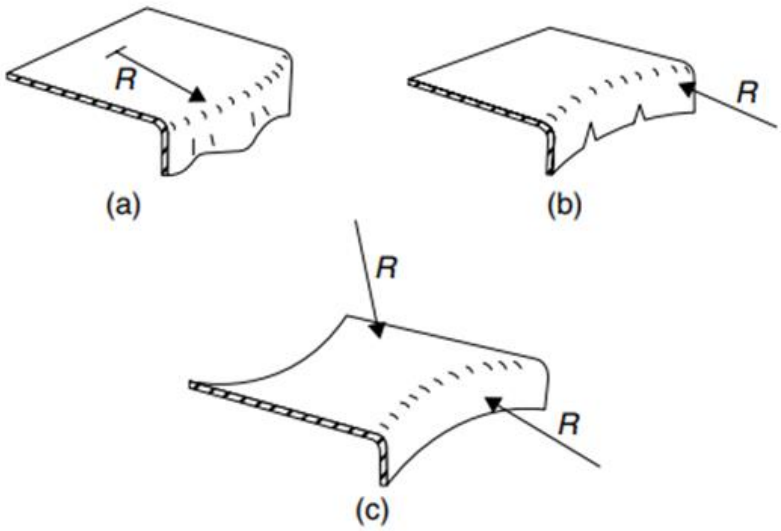
Düz bir şerit sacın bükülmesi için kullanılan yöntemler Şekil 3.3.'te paylaşılmaktadır. Katlama(a) yönteminde parça sol taraftan mengeneyle sabit tutulur ve kenar dönen karşılık tarafından şekillendirilir. Abkant bükümde(b) pres şekillendirmede bir punch aşağı doğru hareket ederek sacı bir V kalıbına doğru zorlanır. Silindirik şekillendirmede(c) ile uzun sac şeritlerinde sürekli bükümler oluşturulabilir. Silindir şekillendirmede düzeneğinde, sac levha kademeli olarak çok sayıda silindir tarafından bükülür ve bu bükülen sac şeritler çatı kaplama sacı veya karmaşık kanal bölmelerine sahip paneller bu yöntemle şekillendirilebilir.

Flanş (silme) ile şekil verme yöntemi(d) Şekil 3.3.'te gösterilmektedir (Marciniak vd., 2002). Parça sol tarafından mengene ile sıkıştırılır ve flanşlama takımı bükümü oluşturmak için aşağı doğru hareket eder. Benzer makineler bir kenar oluşturmak için sac levhayı kendi üzerine bükmek için ardışık işlemlerde kullanılır.



Şekil 3.3. (a) Bükme Makinesi ile Sacın Katlanması (b) V Kalıpla Sacın Bükülmesi (c) Yuvarlama Formu ile Saca Büküm Verilmesi (d) Flanş Büküm

Eğer sac düz bir çizgi boyunca uzanan bir levha şeklinde değilse yalnızca büküm bölgesinde değil levhada da plastik deformasyonlar meydana gelebilir. Örnek olarak görselde farklı istenmeyen deformasyon hatalarına ait görünümler Şekil 3.4.'te verilmiştir (Marciniak vd., 2002).



Şekil 3.4. (a) Olası Burkulmayı Gösteren Büzülme Flanşı (b) Gerilmiş Flanşın Köşe Kırığı Oluşumu (c) Kavisli Levhanın Flanşlanması

3.1.3. Kesit (Profil) Bükme

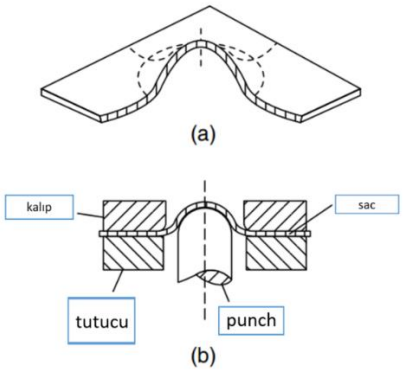
Daha karışık bir bükme yöntemi olan kesit bükme, çok dar yarıçaplı bükümlerin veya dirseklerin olmadığı yapısal olarak boru, tüp, flanş gibi parçaları eğmek için uygun bir tekniktir. Genellikle üç silindirin arasından geçirilen metale istenen şekil sürekli olarak verilmiş olur. Şekil 3.5.'te kesit büküm işlemi verilmiştir (Yıldız, 2010).



Şekil 3.5. Kesit Bükme İşlemi

3.1.4. Germe

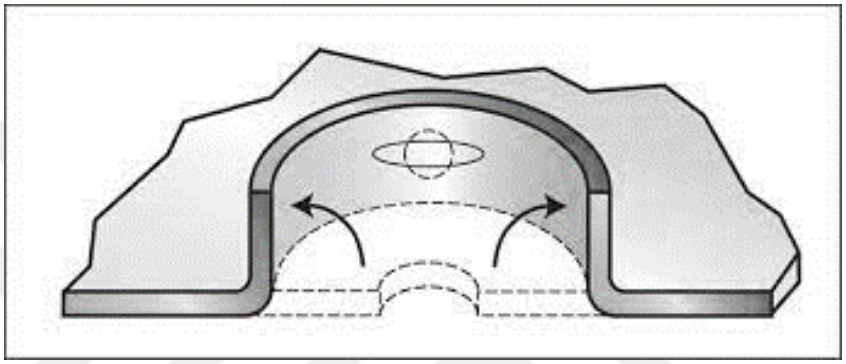
Germe ile sac şekillendirme işleminde, zımba levhaya itildiğinde merkezde çekme kuvvetleri oluşur. Bunlar deformasyona neden olan kuvvetlerdir ve punch ile levha arasındaki temas gerilme levhanın akma gerilmesinden daha düşüktür. Çekme kuvvetlerine levhanın kenarındaki malzeme karşı koyar ve bu bölgede basma gerilmeleri oluşur. Dış bölgede bir bükülme eğilimi oluşur ve tutucu tarafından tutulur. Birçok sac parçada ortak görülen bir özellik olarak şekillendirme doğrudan temas gerilmelerinden değil, sac boyunca iletilen kuvvetlerden kaynaklanır ve punch üzerinde çekme kuvvetleri ile dış profil malzemesindeki sıkıştırma kuvvetleri arasında bir denge oluşmuş olur. Germe işleminin şeması Şekil 3.6.'da paylaşılmıştır (Marciniak vd., 2002).



Şekil 3.6. (a) Sac Gerdirme Yüzeyi (b) Sac Gerdirme İşlemi Kalıp-Punch

3.1.5. Boşluk Ekstrüzyonu

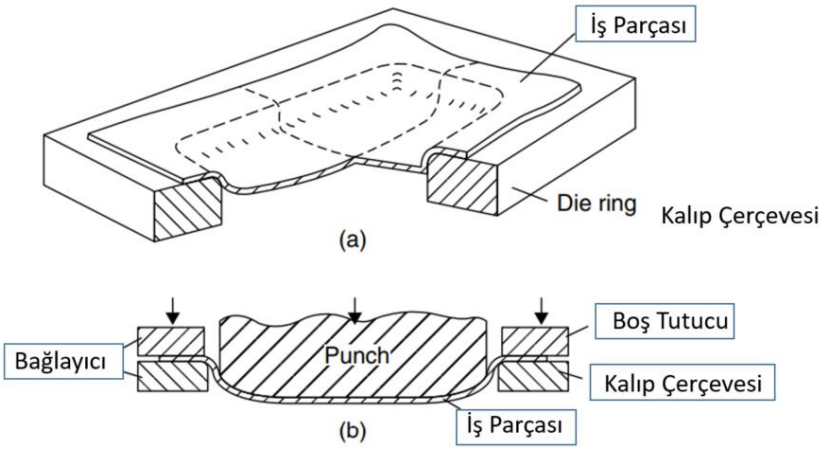
Eğer levhaya punch çapından daha küçük bir delik delinir ve delik ekstrüzyonunun gerçekleşmesi için levhanın delik çevresinin yükseltilmesi için içine punch vasıtası ile itilirse istenen form elde edilmiş olur. Delik kenarının gerilmesinden ve yarığın ekstrüzyon yükseleceği göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 3.7.'de boşluk ekstrüzyonu işlemi gösterilmiştir (Marciniak vd., 2002).



Şekil 3.7. Boşluk Ekstrüzyonu Yöntemi

3.1.6. Kalıp ile Şekillendirme

Karmaşık yüzey şekillerinin sac metal üzerine işlenmesinde kullanılmaktadır. Sac parça kalıp üzerine oturtulur ve sacın plastik şekil değişimini sağlayabilecek kuvvete sahip kalıbın tersi geometrideki punch vasıtası ile şekillendirme işlemi gerçekleşir. Sistem punch, kalıp ve bağlayıcıdan oluşur. Parçanın punch kuvveti ile bastırılarak kalıbın verdiği sınırlar içinde genişleyerek iş parçasının kalıbın şeklini alması beklenir. Şekillendirme işlemi sonrasında dışarıda kalan flanşın bir kısmı kesilir bu sebeple çok verimli bir işlem olmamasına rağmen iyi tasarlanmış kalıplar ile büyük miktarlarda, hızlı bir şekilde üretim sağlanabilir.



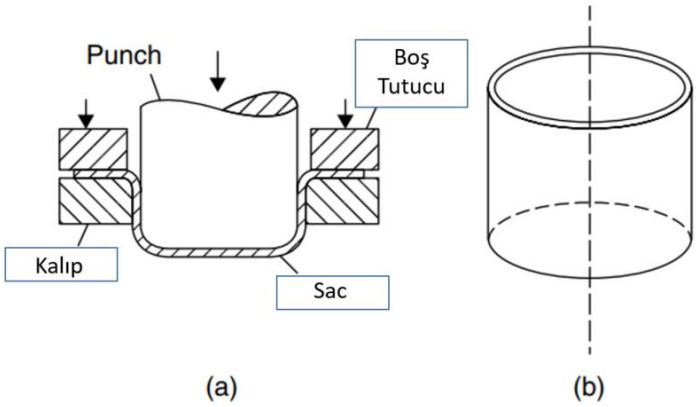
Şekil 3.8. (a) Tipik Bir Kalıplama Yöntemine Ait İş Düzeneği (b) Kalıp ile Şekil Verme Yöntemine Düzeneğinin Kesit Görünümü

Yaygın bir şekillendirme yöntemi olarak çoğu endüstride süreç olarak görmek mümkündür. Kalıp tasarım süreçleri yüksek tecrübeye ve bilgisayar destekli mühendislik sistemlerinin bütünleşik olarak kapsamlı bir şekilde kullanılmasını gerektirir. Şekil 3.8.'de kalıp ile şekillendirme işlemi gösterilmiştir (Marciniak vd., 2002).

3.1.7. Derin Çekme

Kalıplama işlemi parçanın büyük bir kısmı punch üzerine gerdirilerek oluşur. İş parçasının yırtılmaması için bir esneme payı vardır. Damgalanmış parçalar genellikler fazla derin değildir. Derin çekme işleminde ise daha derin parçalar üretebilmek için içeriye doğru daha fazla malzemenin çekilmesi gerekmektedir.

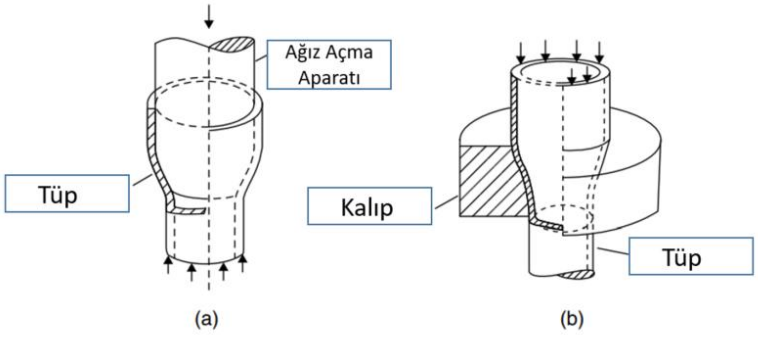
Basit bir silindirik kabın derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesi Şekil 3.9.'da gösterilmiştir (Marciniak vd., 2002). Flanşın bükülmesinin önüne geçilmek için tutucu kullanılır Yağlama bu işlemede şekillendirebilmenin kritik etmenlerindendir. Parça yağlanarak kalıp ile tutucu arasındaki gerekli kaymayı kolaylaştırır.



Şekil 3.9. Silindirik Kap Derin Çekme İşlemi Düzeneği (b) Tek İşlemde Derin Çekilmiş Kap

3.1.8. Tüp Şekillendirme

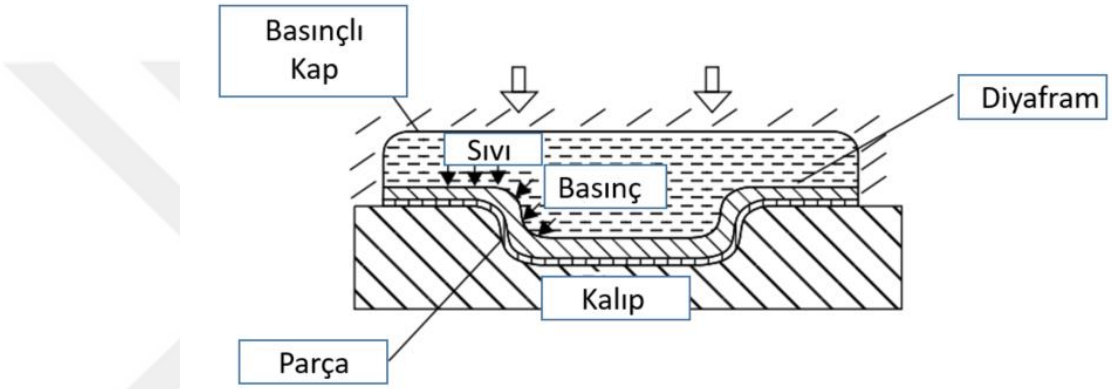
Boruların şekillendirilmesinde genişletme veya daraltma için kullanılan bir yöntemdir. Boru çapından daha büyük çapta bir ağız açma aparatının borunun ağız kısmına ittirilmesi ile ağız kısmında borunun devamına göre daha geniş bir boru girişi şekillendirmesi için kullanılan bir yöntemdir. Yine aynı yöntemle ağız kısmının daha aşağısında daraltma işlemi için kullanılan bir yöntemdir. Şekil 3.10.'da tüp şekillendirme işlemine ait görsel paylaşılmıştır (Marciniak vd., 2002).



Şekil 3.10. Boru Genişletme İşlemi (b) Boru çapının Tüp Şekillendirme Yöntemi ile Şekillendirilmesi

3.1.9. Sıvı ile Şekillendirme

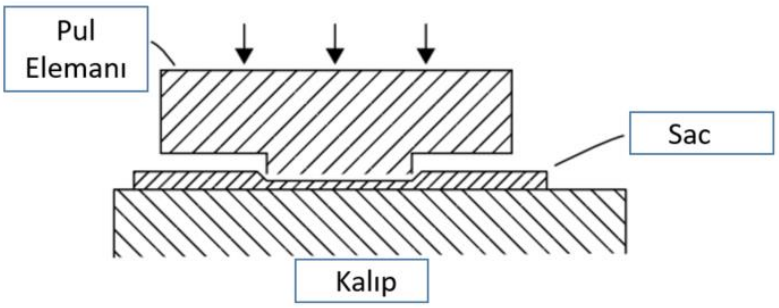
Bazı sac parçalar rijit aletler yerine sıvı basıncıyla da üretilebilir. Şekillendirme için gerekli olan yüksek basınç seviyeleri gereklidir bu sebepten dolayı pahalı bir şekil verme yöntemidir. Genellikle sınırlı sayıda parça üretilmesinin gerekli olduğu durumlarda uygun bir üretim yöntemidir. Tesisat bağlantı elemanları ve bisiklet şasi braketleri gibi karmaşık boru şeklindeki parçaları sıvı basıncı kuvveti ile şekillendirilmektedir. Şekil 3.11.'de sıvı ile şekillendirme işlemi gösterilmiştir (Marciniak vd., 2002).



Şekil 3.11. Sıvı Basıncı Kullanılarak Şekillendirme İşlemi

3.1.10. Ezerek Dövme

Bir levhanın küçük bir alanında inceltme işlemi yapmak için kullanılan ezerek dövme yönteminin içecek kutusunun kapağına bir oluk açmak gibi işlemlerde kullanılır. Sürekli bir işlem olmakla beraber çoğunlukla derin çekme işleminden sonra uygulanmaktadır. Birden fazla kalıp kullanılarak sac kalınlığı yarıdan fazla azaltılabilmektedir. Ezerek dövme işlemi Şekil 3.12.'de verilmiştir (Marciniak vd., 2002).



Şekil 3.12. Ezme ile Lokal Olarak Sac Parçanın İnceltilmesi

3.2. Malzemelerin Şekillendirilebilirlik Ölçümünde Kullanılan Testleri

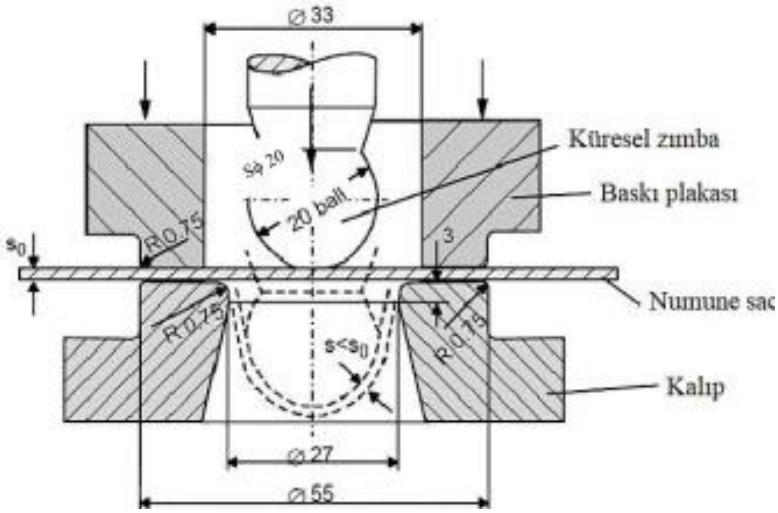
Metal sacların şekillendirilebilirlikleri ile ilgili uygulanan birçok test metodu bulunmaktadır. Bunlardan sıklıkla kullanılanlar şunlardır (Akay, 2012);

- Erichsen Test
- Swift Derin Çekme Testi
- Hidrolik Şişirme Testi
- Fukui Konik Kap Testi

3.2.1. Erichsen Test

Erichsen testi pres ve derin çekme ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar veren popüler bir testtir. Metal sacların sünekliğinin belirlenmesinde kullanılan test şerit halindeki farklı malzemelerdeki numunelere uygulanabilir. Diğer bir adlandırma olarak germe şekillendirme ve şişirme deneyi olarak kullanımları mevcuttur (Gavrus vd., 2008).

Sabit bir hızda ilerleyen zımbanın sac üzerine kararlı bir kuvvet ile itilmesiyle sabitlenen sacın deformasyonunun çatlama oluşumuna kadar devam ettirilmesi ile gerçekleşen bir testtir (Gavrus vd., 2008). Şekil 3.13.'te Erichsen testi düzeneği paylaşılmıştır (Gavrus vd., 2008).



Şekil 3.13. Erichsen Testi Standart Ölçüleri

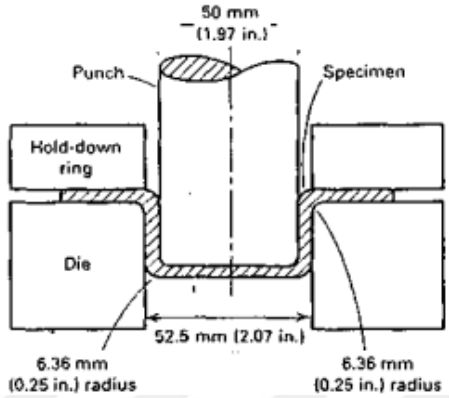
ISO 20482 standardında erichsen çukurlaşma testine ait standart değerleri belirlenmiştir. Test aynı zamanda ASTM E643 standardında Olsen çukurlaşma testi olarak standardize edilmiştir (Gavrus vd., 2008).

Erichsen testinde yarı küresel zımba sac parçada kırılma olana kadar bastırılır ve test kırılmanın yaşandığı anda durdurulur sac üzerindeki deformasyon ve zımbanın yer değiştirme değerleri ölçülür. Oluşan deformasyon değeri levhanın sünekliğinin ölçüsünü verir. Standarda bağlı test düzeneğinde sac şerit tamamen sıkıştırılır ve zımba tarafından deformasyon bu şekilde uygulanır. Sacların karşılaştırılmasında kullanılan Erichsen testinde zımba kuvvetinin değişiminin deneysel ölçümü veri noktaları olarak ölçülebilir ve değerlendirme kriteri olarak kullanılabilir (Gavrus vd., 2008).

3.2.2. Swift Derin Çekme Testi

Derin çekme yöntemi ile şekillendirme metodunu temel alan swift derin çekme testi alt kenarı kavisli zımbanın iş numune üzerine ittirilmesi ile gerçekleştirilir. Farklı çapta ve derinlikteki silindirik parçaların derin çekme için bir sınır belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şener, 2012).

Bu yöntemde zımbanın tek hidrolik pres kullanılmakla beraber basınç çubuğu tarafından kontrol edilen kuvvetin etkisi ile yuvarlak silindirik zımba sacın alt kısmında kırışma oluşturur (Şener, 2012). Şekil 3.14.'te Swift derin çekme testi görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 3.14. Swift Derin Çekme Testi

Swift derin çekme testi aynı zamanda derin çekme sınır oran testi olarak LDR (limiting drawing ratio test) olarak adlandırıldığı çalışmalar mevcuttur (Şener, 2012).

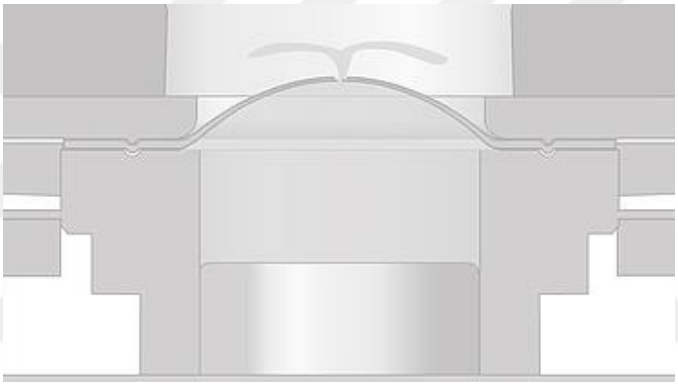
3.2.3. Hidrolik Şişirme Testi

Hidrolik şişirme testi yüksek derecede deformasyona sebep olmadan saclar üzerinde mekanik özelliklerin belirlenmesi için kullanılan iki eksenli bir testtir. İki eksenli testler tek eksenli testlere bir alternatif olarak iki eksenli gerilme eğrilerinin elde edildiği ve deney sonuçları ile daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiş bir yöntemdir (Şükür, 2014).

Test düzeneğinde sac levha iki kalıp arasında sıkıştırılarak sabitlenir. Stampa tarafından akışkan basıncının etkisi ile kalıbın ortasından boşlu kısmından tek taraflı olarak şişirilir. Hidrolik şişirme olarak adlandırılmasının sebebi basılan bir akışkan tarafından sağlanan hidrolik basınç ile gerçekleştirilmesidir (Şükür, 2014).

Şişirme testlerinin ortak avantajlarının başında akma eğrilerinin ekstrapolasyona ihtiyaç duyulmadan analizlerde kullanılabilmesidir. Test çıktıları olarak sacın kesit daralması, deformasyon hızı, kırılma tokluğu, elastisite modülü, gerilme değerleri, poisson oranı gibi değerler elde edilebilir (Şener, 2012).

ISO 16808ISO 16808 standardında standardize edilmiş bir test yöntemi olarak hidrolik şişirme testi malzeme test yöntemleri altında değerlendirilir. İlgili testin değerlendirilme kriterlerinde sacdaki eğriliğin optik ölçümü, sac kalınlığının durumu ve yağ basıncı ölçüm olarak alınır. Hidrolik şişirme testi Şekil 3.15.'te gösterilmiştir (Zwick/Roell, Bulge Test, 2020).

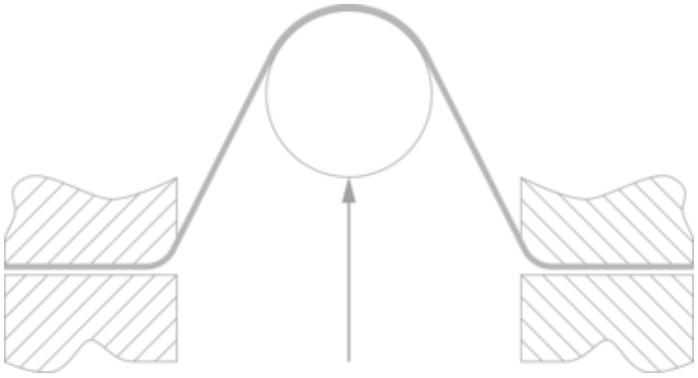


Şekil 3.15. Hidrolik Şişirme Testi

3.2.4. Fukui Konik Kap Testi

Fukui konik kap testinde sacın deforme edilmesi işlemi çapı sac kalınlığına göre değişiklik gösteren bir küresel bir ıstampa ucu kullanılır. Teste ait küresel ucun yarıçapı 6,25 ile 13,5 mm arasında değişiklik göstermektedir. Testin uygulanmasında yağlayıcılar kullanılmaktadır özellikle viskozitesi yüksek yağlar tercih edilmektedir (Akay, 2012).

Test sonucu olarak sacın boyun oluşturduğu noktadaki yükün ani düşümünün gerçekleştiği andaki yük değeri, sacın deformasyon derinliği veya konik kısımdaki tabanın ortalama çapı testin çıktıları olarak değerlendirilebilmektedir (Akay, 2012). Şekil 3.16.'da Fukui konik kap testi paylaşılmıştır



Şekil 3.16. Fukui Konik Kap Testi

3.3. Çalışma Malzemeleri Genel Bilgiler

3.3.1. Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelikler genel tanımlanmaları itibariyle nikel eklenmiş veya eklenmemiş % 12 krom içeren alaşımlı çeliklerdir. Paslanmaz kalabilme özellikleri ve korozyona karşı direnci yüzeyde oluşan pasif filme dayandırılmaktadır. Bu pasiflik metalin yüzeyi boyunca ince bir koruyucu oksit filminin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Estetik olarak tercih edilirlik, kolay şekillendirilebilirlik, geniş bir sıcaklık aralığında hizmet sağlayabilmesi avantajlı olduğu kısımlarken, maliyet açısından dezavantajlı bir konumdadır (Dutta, 2018).

5 farklı paslanmaz çelik türü mevcuttur;

- Ferritik Paslanmaz Çelikler
- Martenzitik Paslanmaz Çelikler
- Östenitik Paslanmaz Çelikler
- Çift Fazlı (Dubleks) Paslanmaz Çelikler
- Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

3.3.2. S235JR Çeliği

Yapı çeliği olarakta bilinen S235JR çeliği karbon, manganez, fosfor, kükürt, azot gibi elementleri içeren bir yumuşak çeliktir. Direk ısıl işlem görmeden kullanılabilme özelliğine sahiptir.

Yaygın kullanımlarından bir sebebi darbe emici özelliğiyle şok emici olarak kullanılmasıdır. Araçlarda kinetik enerjiyi absorbe etmek amacıyla ince duvarlı yapılar olarak kullanılarak plastik deformasyon mekanizmasından faydalanılır. Gerinim hızına duyarlı bir malzemedir. Gerinim hızı hassasiyeti malzemenin dislokasyonlarının çeşitli gerinim hızlarında nasıl hareket ettiğine göre değiştiğinden akma dayanımı açısından malzeme daha yüksek akma dayanımına dayanır (Perkasa, Gunawan ve Santaso, 2023).

3.3.3. Alüminyum

Alüminyum yumuşak, mat metalik renkte, hafif bir metaldir. En önemli özelliklerinden biri korozyona karşı dayanıklılığı olmakla beraber kolay şekillendirilebilmesi ve maliyet açısından ulaşılabilir olmasıdır. Sürdürülebilirlik açsından tercih edilebilir bir malzeme olarak geri dönüşüme uygun ve çevreye dosttur. Farklı endüstrilerde kullanılan alüminyum demir ve çeliğin ardından en çok kullanılan üçüncü metaldir. Dayanım özellikleri soğuk işlem ile kayda değer derecede yükseltilebilmektedir (Yağcı T. vd., 2021).

Alüminyum alaşımlarda manganez, bakır, magnezyum, çinko, silisyum gibi elementler kullanılmaktadır. Ana alaşım elementine göre alüminyum alaşımlar sınıflandırılmıştır (Güler, 2023). Çizelge 3.1.'de alüminyum alaşımların sınıflandırma tablosu paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1. Alüminyum Alaşımların Sınıflandırılması

Ana Alaşım Elementi	AA Sistemindeki Gösterimi
Alüminyum ≥% 99	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum ve silisyum	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer elementler	8XXX
Kullanılmayan Seriler	9XXX

3.3.4. Galvaniz Çelik

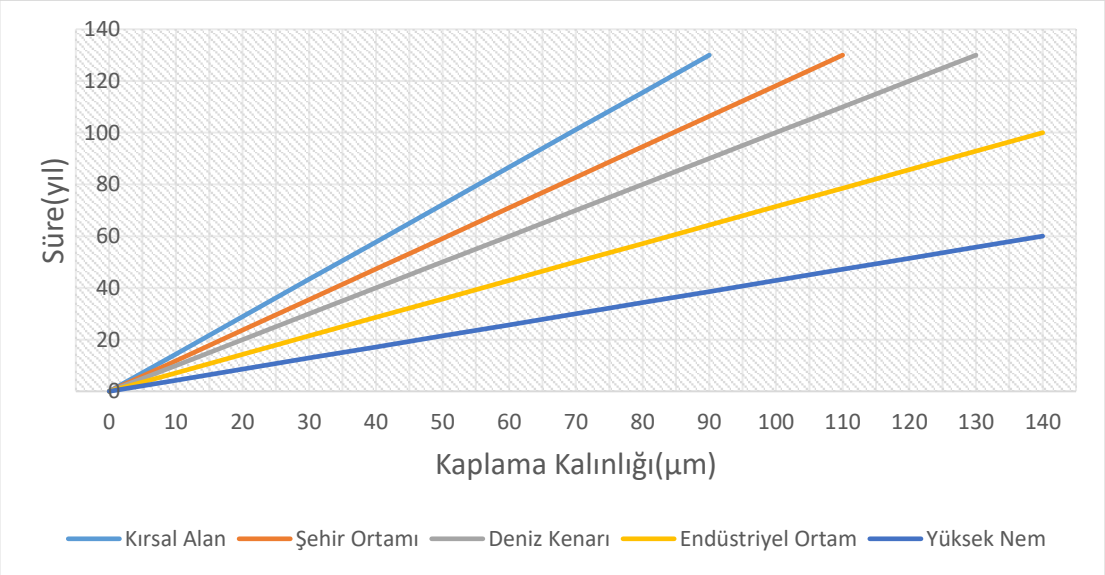
Korozyona karşı dayanıklılık başta demir ve çelik olmak üzere tüm metaller için göz ardı edilemez sorunlardan biridir. Korozyonu en aza indirmek için kullanılan yöntemlerden biride metalleri korozyona dayanıklı metallerle kaplayarak koruyucu bir tabaka vasıtası ile metali korumaktır. Hava ile açık temas halinde bulunacak metaller için ömrünün uzatılması için kritik öneme sahip bir işlemdir (Ispartalı, 2017).

Galvanizli çeliklerde çinko kaplama ile korozyona karşı koruma sağlanır. Nemli ortamda çinko çeliğe göre daha anodik veya aktif olduğundan dolayı çinko çeliği korumaktadır (Ispartalı, 2017).

Çinko kaplama ile çelik aynı zamanda kaynak yapılabilme ve malzemenin boyanabilmesine imkân verir. Korozyon performansını yükseltmek için bazı elementler alaşıma demir (Fe), kobalt (Co), nikel (Ni) ve çinko (Zn) gibi eklenebilir. Bu alaşım kompozisyonları istenen metal özelliklerine (aşınma direnci, homojenlik, korozyon, sertlik) göre düzenlenerek endüstrinin gereksinimler karşılanır (Ispartalı, 2017).

Galvanizli çeliğin kaplama ömrü yüzeyindeki kaplama miktarına ve bulunduğu ortama göre değişkenlik gösterebilmektedir. Kaplama miktarındaki artışın doğru orantılı olarak kaplamanın ömrünü arttıracağı söylenebilir. Çizelge 3.2.'de çinko kaplamaların bulundukları ortama göre ömür değerleri verilmiştir (Ispartalı, 2017).

Çizelge 3.2. Çinko kaplamaların değişik ortamlardaki ömürleri



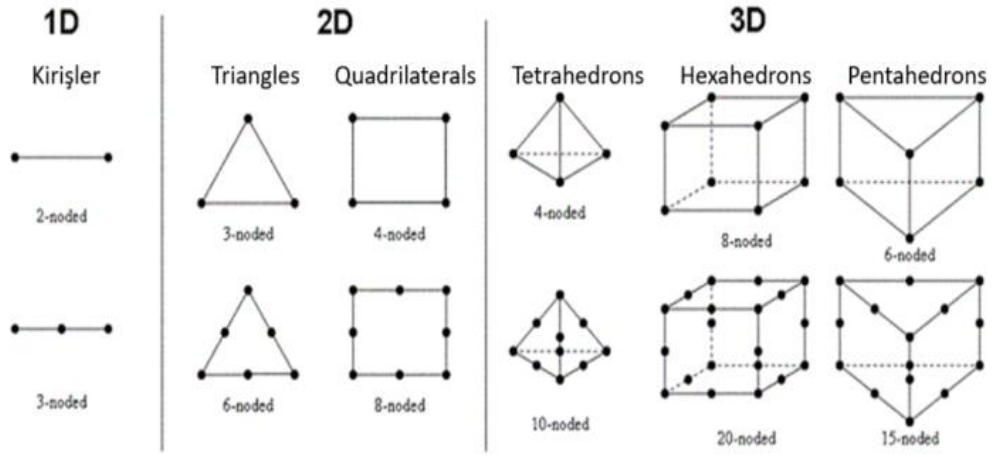
3.4. Sonlu Elemanlar Metodunun İncelenmesi ve Temel Kavramlar

Sonlu elemanlar metodu mühendislik problemlerini çözebilmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden sayısal yöntemlerden biridir. Yöntem temelinde karmaşık ve çözmesi analitik olarak zor problemleri parçalara ayırarak bütünden elemanlara elemanlardan bütün çözüme ulaştıran bir altyapı kullanır (Lai ve Bathe, 2016).

Sonlu elemanlar metodu, katılar, sıvılar ve gazlar gibi sürekliliği olan yapıların alt parçalara ayrılarak bir yapının bütününü oluşturacak elemanlar oluşturulması temeline dayanır. Bu elemanlar düğümler ve düğüm noktaları ile belirlenmiş çoklu bağlantılar aracılığı ile bağlı hale getirilir. Düğümlerin genellikle eleman sınırlarının bitişiği boyunca uzanacak şekilde konumlandırılır.

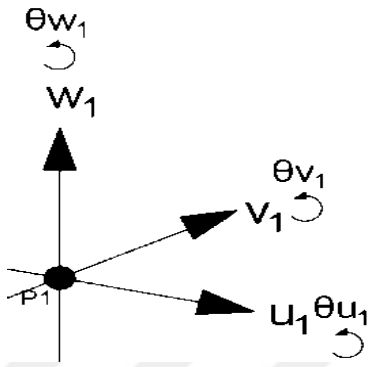
Yapı üzerindeki sürekli değişkenlerin (yer değiştirmeler, gerilmeler, sıcaklık, basınç, hız, vb.) değişimleri tam olarak bilinmediğinden dolayı bu değişkenler basit bir fonksiyon ile hesaplanabileceğinin kabulü sonlu elemanlar yönteminde yapılmaktadır. Bu yaklaşım fonksiyonları (interpolasyon modelleri olarak adlandırılanlar da) düğümlerdeki değişken değerleri açısından tanımlanır. Denklemde yazılan tüm değişkenler yeni bilinmeyenler oluşturarak düğüm değerlerini oluşturur. Sonlu elemanlar metodunda hesaplanacak değişken düğüm değerleri genellikle matris formundaki denklemler aracılığı ile çözülür (Lai ve Bathe, 2016).

Geometriyi en iyi şekilde analiz üzerindeki hesaplamalarda temsil edilebilmesi için oluşturan ağ örgüsünde düğüm noktaları sistematik bir şekilde birleşerek elemanları oluşturur elemanlarda analiz edilecek yapıyı oluşturmaktadır. Bu ağ örgüleri 1d, 2d ve 3d modeller için farklı yapılar oluşturur (Lai ve Bathe, 2016). Farklı mesh yapılarının gösterimi Şekil 3.17.'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.17. Boyutlara Göre Farklılık Ağ Yapıları

Bu düğüm noktalarının her birinin 6 serbestlik derecesi bulunur ve işlemler tüm bu serbestlik derecelerinin hesaplanması ile gerçekleşir. Bu serbestlik dereceleri üç doğrusal ve üç dairesel olacak Şekil 3.18.'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.18. Düğüm Noktasına Ait Serbestlik Dereceleri

Gerçek koşullarda sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip yapı bu metot sayesinde formüle edilebilmek için kabuller ile 6 serbestlik derecesinde kabul edilir. Bu noktaların davranışını ön veriler ile analiz metotları ile bulunmaya çalışılır.

3.4.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Zorlukları

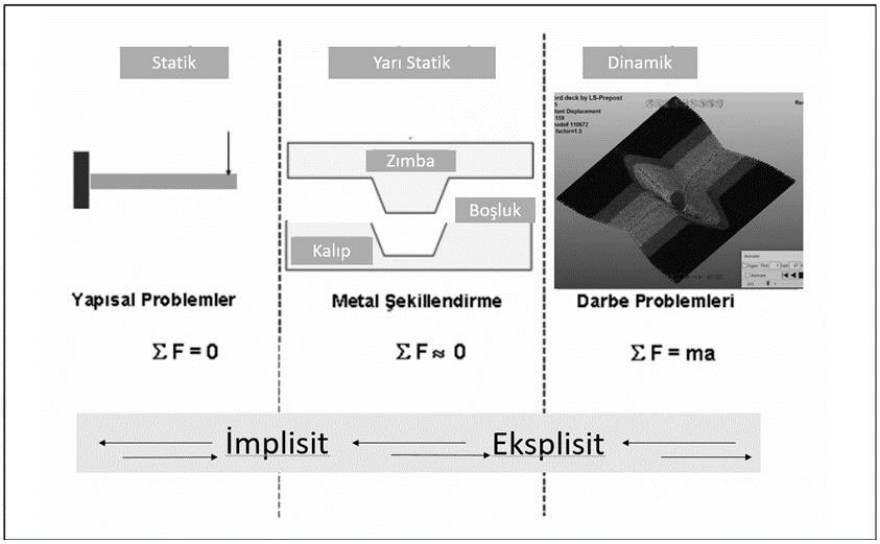
Sonlu elemanlar metodu, probleme dahil olan alanın birbiri üzerinde örtüşmeyecek biçimde bir düzen dahilinde elemanlara ayrıştırılmasını gerektiren bir yöntemdir. Bu ayrıştırılma işlemindeki zorlukların başında karmaşık üç boyutlu veya iki boyutlu alanların oluşması örnek gösterilebilir. Elemanların ayrıştırılması işleminde ağ örgüsünün oluşturulması zaman alıcı bir işlem olmakla beraber otomatik olarak ağ örme yazılımları da iyi bir ağ kalitesi oluşturmakta zorlanabilir bu gibi zorluklar karşısında analiz için ağ kalitesini bozan yapılar üzerinde detaylı çalışma ile yapıdan kalite olarak arttırılır veya yapıdaki bozuk elemanların çıkarılmasına dikkat edilir. Örnek olarak, analiz sonuçlarının kesinliği açısından olası bir kayıp olmaması için oluşturulan ağ yapısına ait elemanlar belirli boy oranları ve açı kriterleri içerisinde olması gerekir (Özçelik, 2008).

Gerekli değerlendirme kriterleri altında kalan ağ yapılarında eleman eleman distorsiyon etkilerinden dolayı polinom olmayan fonksiyonların entegregrasyonunda yanlışlıklara sebebiyet verir. Kötü bir ağ yapısına sahip sonlu elemanlar modelinde elemanlar kararlı zaman adımlarını düşürür ve bozuk öğeler hesaplama süresinde yükselme ve doğru çözümün elde edilmesinde önemli bir kayıp ortaya çıkarır.

Ağ yapısının oluşturulmasındaki zorlukların yanı sıra doğrusal olmayan ve büyük deformasyonların bulunduğu analizler veya tekillikler içeren süreksizlikler gibi problemlerin modellenmesi gerçekleştirilen analizdeki doğru sonuçlara ulaşma konusundaki zorlayıcı etmenlerdir.

3.4.2. Sonlu Elemanlar Metodu ve İmplisit - Eksplisit Yaklaşımı

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan implisit ve eksplisit metodları bazı temel farklılıklara sahiptir. İmplisit çözüm yöntemi zaman dilimlerinin daha uzun olduğu ve yakınsayarak çözüm alınan bir formülasyona sahipken eksplisit tarafa doğru zaman dilimleri küçülür ve deformasyon boyutları artar (Hüner, 2025). İmplisit ve eksplisit arasındaki temel fark Şekil 3.19.'da verilmiştir.



Şekil 3.19. İmplisit-Eksplisit Yaklaşımları

Daha genel bir tanımlama ile implisit yöntemde zamandan bağımsızlık söz konusu (modal, statik, harmonik) olan analizlerde kullanılmaktadır. Eksplisit yöntemi ise zamana bağlı deformasyonu yüksek (darbe, düşme, şok, plastik deformasyon) problemlerin çözümünde kullanılır. İki yöntem arası temel farklılık formüllerindeki hız ve ivmedir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = R(t) \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de gösterilen temel hareket denkleminin farklı düzenlemelerinin kullanılmasıyla farklı mühendislik problemleri çözülebilmektedir. Verilen denklemdeki temsil edilen değerler şu şekildedir; kütle (m), sönümleme (c), sertlik (k), hareket sonucu oluşan yer değiştirme (u), hareket sonucu oluşan hız (u̇), hareket sonucu oluşan ivme (ü), dışarıdan yapıya etkiyen koşul (R(t)).

3.4.2.1. İmplisit Yöntemi

Yönteme göre yer değişimi zamana göre bir fonksiyon değildir. Bu kabulün sonucu olarak zamana bağlı olan yer değişimi türevlerinin sıfıra eş olduğu varsayılır ve sönümleme ve kütleye bağlı değerler sıfır alınarak ihmal edilir. İmplisit yaklaşımına göre temel hareket denkleminin düzenlenmesi formül 3.2'de paylaşılmıştır.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + \boxed{ku = R(t)} \tag{3.2}$$

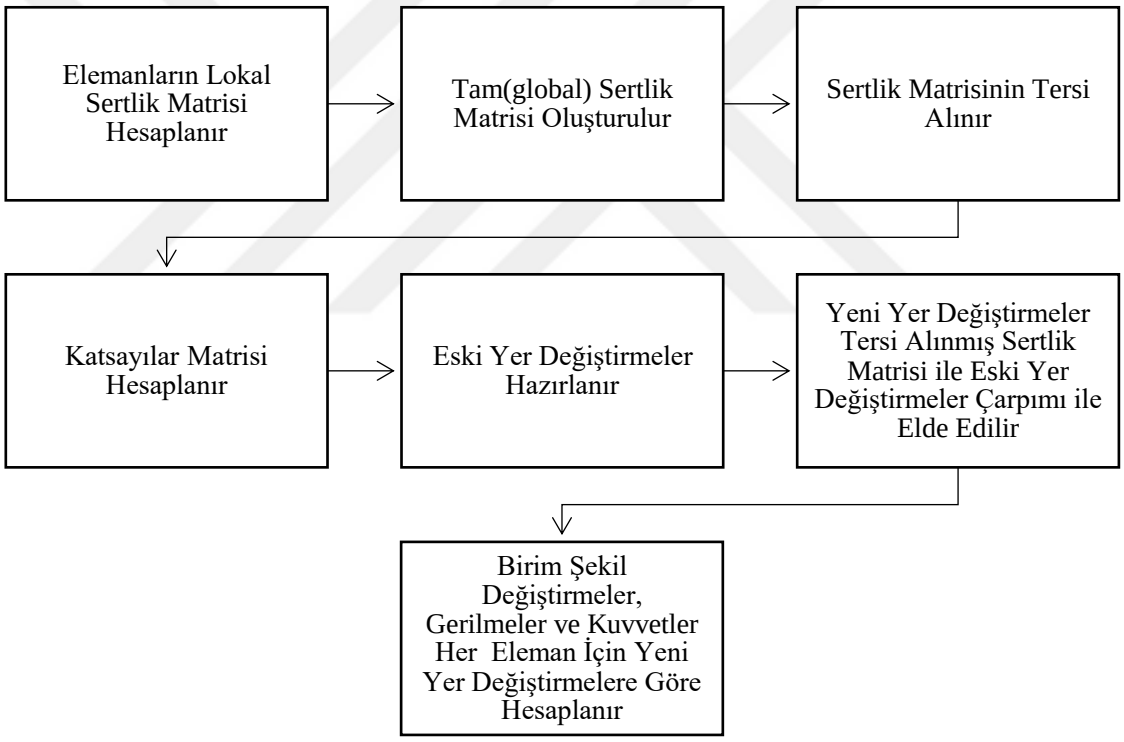
Formül 3.2'deki düzenlemeleri ardından denklem 3.3 elde edilir.

$$ku = R(t) \tag{3.3}$$

Deformasyon miktarı yüksek problemlerde yüksek sayıda serbestlik derecesine bağlı olarak k(sertlik) matrisi sayısını arttırmaktadır. Sertlik matrisindeki yüksek çözüm ihtiyacı bu matrisin tersine çözüme ihtiyaç duyduğu da düşünüldüğünde yüksek çözüm sürelerine ihtiyaç duyulmasına bağlı bilgisayar kapasitesi ihtiyacı doğurur.

İmplisit yöntem bu tersine alma işlemiyle hesaplanırken eksplisit yöntemde tersine almaya ihtiyaç olmadığı için, implisit çözüm yüksek deformasyon problemlerinde tercih edilmez. İmplisit yöntemli çözümlerde en çok süreyi denklemlerin çözümü almaktadır ve genel süreç Çizelge 3.3'te paylaşılmıştır.

Çizelge 3.3. İmplisit Yöntemi Hesaplama Adımları



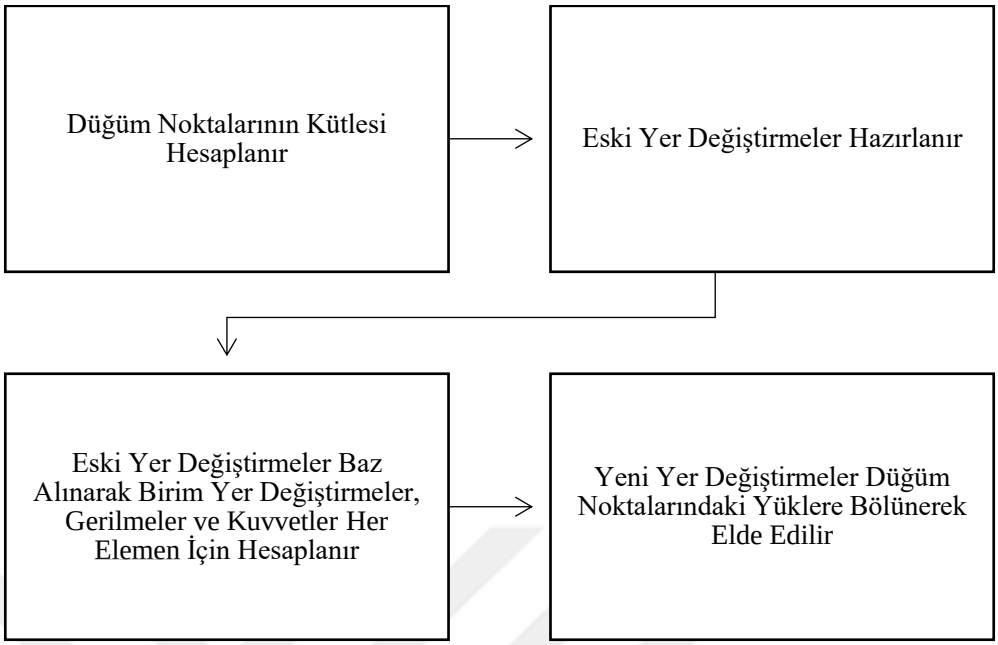
3.4.2.2. Eksplisit Yaklaşımı

Eksplisit yönteminde yer değiştirme zamanın bir fonksiyonu olmasından dolayı implisit yöntemden ayrışan en büyük farkı oluşturur. Temel hareket denkleminin tüm elemanları işlemde hesaplamaya dahil olur. Kütle, sönümleme, hız ve ivme hesaplamada ihmal edilmez. Doğrusal olmayan problemlerinde çözülmesi için kullanılan eksplisit yöntem kütle yığın matrisinin tersini alarak problemi çözme yaklaşımını kullanır. Düğümlere ait ivmeler doğrudan çözülür ve yenileme gerektirmez. Çok daha hızlı bir çözüm sunan yöntem iterasyon yöntemi ile çözüme giderek yakınsama gibi problemlerden arındırılmış olur. Çok fazla elemanın yer aldığı modellerde, sık zaman aralıklarına sahip ve doğrusal olmayan problemlerde kullanılır. Kabullere göre sonuçların güvenilirliği değişmekle beraber yer değiştirme sonuçları üzerinde güvenilir sonuçlar alınabilir.

Yer değişimi zaman bağlı olarak hesaplanmasıyla ilk zaman aralığında bulunan sonuçlar ikinci zaman aralığının başlangıcında giriş değeri olarak kullanılır ve sonraki zaman adımını çözer. Katılık matrisinin üretilmesine ihtiyaç duyulmaması, denklem sistemlerine çözüm için gerek duymaması, daha az bellek kullanılması ve doğrusal-doğrusal olmayan problemleri çözebilmesi yöntemin avantajlarındandır.

Eksplisit metodun kullanıldığı yazılımlara örnek olarak LS-Dyna, Abaqus ve Pamcrash vb. uygulamalar gösterilebilir. Gerçekleştirilen çalışmada Erichsen testindeki deformasyon süreçlerini hesaplamak için LS-Dyna uygulaması kullanılmıştır. ANSYS paket programı içerisinde kullanım imkanı bulunan uygulama deformasyonun yüksek olduğu bir problem için kullanılması mümkün olduğu için tercih edilmiştir. Eksplisit çözümler için genellikle uygulanan adımlar Çizelge 3.4.'te paylaşılmıştır.

Çizelge 3.4. Eksplisit Yöntemi Hesaplama Adımları



3.4.3. İmplisit ve Eksplisit Zaman İntegrasyonu Metotlarının İncelenmesi

Sonlu elemanlar metotlarında zamanın hesaba katılması mühendislik ve fiziksel sistemin belirlenmesinde büyük bir rol oynar. Sonlu elemanlar metodu zaman integrasyonu kavramının eksplisit ve implisit yöntemlerindeki kullanım farkı bu bölümde incelenmiştir.

Bilinen bir fiziksel sistemin hareketi, hareket denklemi ile temsil edilebilir ve genel formu denklem 3.4'te paylaşılmıştır.

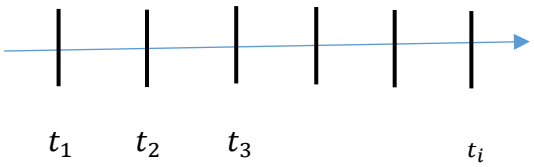
$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{f(t)\} \tag{3.4}$$

Kütle (M) ve ivmenin $(\ddot{u})$ çarpımları, sönümleme (C) ve hızın $(\dot{u})$ çarpımları, sertlik (k) ve yer değiştirmenin (u) çarpımlarının toplamları zaman fonksiyonuna eşittir. Bu sistemde ivme, hız ve yer değiştirmeler zamana göre bilinmemektedir.

İvme, hız ve yer değiştirme denklem 3.5'teki gibi ifade edilebilir:

$$\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2} \text{ , } \dot{u} = \frac{du}{dt} \tag{3.5}$$

Hareket denklemi zamana göre ikinci dereceden bir diferansiyel denklemdir. Bu dinamik denklem frekans alanında veya zaman alanında çözülebilir. Frekans alanında bilinmeyenlerin harmonik olduğu ve sinüzodial forma sahip oldukları varsayılmaktadır. Zaman alanında böyle bir varsayım yapılamaz ve hareket denklemi doğrudan bilinmeyenlerin gerçek değerleri için çözülür. Zaman tanım kümesinde bilinmeyen parametrelerin sürekli fonksiyonlarını bulmak her zaman mümkün değildir, bu nedenle zamanı sınırlı sayıda zaman adımına bölmek ve bu belirli zaman noktalarındaki bilinmeyenlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu tekniğe zaman integrasyonu adı verilir ve zaman adımlarının bölünmesi Şekil 3.20.'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.20. Zaman integrasyonunda zamanın adımlara bölünmesi

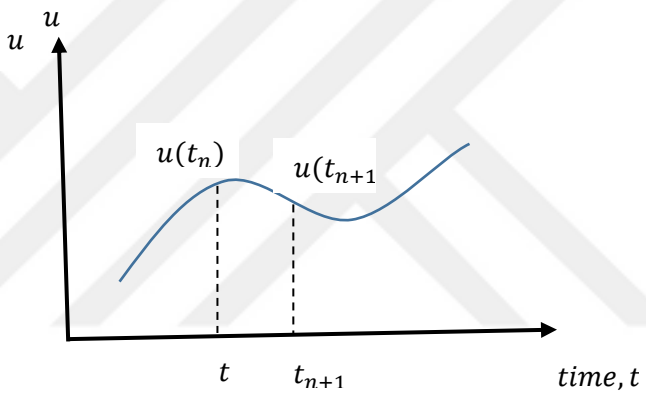
Zaman integrasyonu tekniğinde, mevcut zaman adımındaki bilinmeyen değerler, bir önceki zaman adımındaki bilinen değerler temel alınarak hesaplanır. Hesaplama süreçlerinde uygulamalara dayalı olarak iki zaman integrasyon yöntemi vardır. İmplisit ve eksplisit teknikleri zaman integrasyonuna olanak sağlar. İki yöntem arasındaki fark yer değiştirme (u) ve hız (u̇) üzerinden zaman adımında (t_{n+1}) için Çizelge 3.5 üzerinden anlatılmıştır.

$$u(t_{n+1}) = u(t_n) + \Delta t u' \tag{3.6}$$

$$u'(t_{n+1}) = u'(t_n) + \Delta t u'' \tag{3.7}$$

Aşağıdaki grafikte u'nun t zamanına göre değişimi gösterilmiştir. t_n ve t_{n+1} zaman aralığı Δt ile ayrılmış iki ardışık zaman adımıdır. Eğrinin eğimi u' zamanla (t) sürekli olarak değişir.

Çizelge 3.5. Zaman integrasyonu zaman-yer değiştirme grafiği



İmplisit Zaman İntegrasyonu Yöntemi

İmplisit zaman integrasyonu yönteminde bilinmeyen zaman adımındaki değişkenler, bilinmeyen zaman adımındaki (t_{n+1}) eğimler (u', u'')kullanılarak hesaplanır. t_{n+1} zaman adımında yer değiştirme, hız ve ivme bilinmediğinden denklemler doğrudan çözülemez.

$$u(t_{n+1}) = u(t_n) + \Delta t u'(t_{n+1}) \tag{3.8}$$

Denklem 3.8'de $u(t_n)$ bilinen ve $\Delta t u'(t_{n+1})$ bilinmeyendir.

İmplisit yöntemde farklı zaman adımlarında bilinmeyen değişkenlere sahip ve aynı anda çözülmesi gereken bir dizi denklem elde edilir. Genel olarak bu denklemler doğrusal değildir. Yakınsayan bilinmeyenlerin çözülmesi için Newton-Raphson, sekant yöntemi, ters enterpolasyon vb. gibi sayısal kullanmak zorunludur. Bu sayısal yöntemler hesaplama açısından çok pahalıdır. Ancak implisit yöntem zaman adımından bağımsız olarak kararlı bir çözüm sağlar ve koşulsuz kararlı kabul edilir.

Eksplisit Zaman İntegrasyonu Metodu

Eksplisit yöntemde, bilinmeyen zaman adımında (t_{n+1}) değişkenleri hesaplamak için bilinen zaman adımındaki eğimleri (u', u'') kullanılır. Yer değiştiem, hız ve ivme (t_n) zaman adımında bilindiğinden denklemler doğrudan çözülür.

$$u(t_{n+1}) = u(t_n) + \Delta t u'(t_n) \tag{3.9}$$

Denklem 3.9'da bilinmeyen $u(t_{n+1})$, bilinen $u(t_n)$ ve $\Delta t u'(t_n)$ değerler olarak kabul edilir.

Bilinmeyen değerler doğrudan hesaplandığından eksplisit işlemlerde sayısal yöntemlere ihtiyaç duyulmaz. Eksplisit yöntemin ileriye doğru hareket eden doğası nedeni ile küçük zaman artışları gerektirir.

Zaman adımı boyutu, genişleme dalgasının elemanın en küçük karakteristik uzunluğundan daha fazla hareket edemeyeceği şekilde belirlenir. Buna Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) denir. Bu matematiksel ifade aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Delta t \leq \frac{L_{min}}{c_d} \tag{3.10}$$

Bu eşitlikte (denklem 3.10) L_{min} ağ yapısındaki en küçük eleman boyutu ve c_d dalga genişleme hızıdır (malzemenin ses dalgası geçirme hızına bağlıdır). Eksplisit yöntemde zaman adımı boyutunu belirleyen en küçük öğe boyutu olduğundan, bir veya birkaç küçük ögeden kaynaklanan küçük zaman adımlarını önlemek için modelde tekdüze basit ögelerin bulunması önerilir.

Genişleme dalga hızı bilinmiyorsa malzeme özellikleri kullanılarak denklem 3.11'deki gibi bulunabilir.

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{p}} \tag{3.11}$$

Denklem 3.11.'de young modülü (E), malzemenin yoğunluğu (p) olarak alınır.

Hesaplanan zaman adımı, büyük sonlu elemanlar metodu modellerinde çok küçük olabilir ve simülasyonun tamamlanması çok uzun sürebilir. Yukarıdaki denklemden gördüğümüz üzere zaman adımı boyutu dalga hızıyla ters orantılıdır. Bu, dalga hızını yapay olarak azaltırsak zaman adımı boyutunu da arttırabileceğimiz anlamına gelir. Malzemenin yoğunluğu yapay olarak arttırılarak dalga hızı azaltılabilir. Malzemenin yoğunluğu arttırılarak adım boyutunun yapay olarak arttırılması için uygulanan yönteme kütle ölçeklendirme yöntemi denir. Ancak bu yöntemin uygulandığından sonuçların genel doğruluğunu korumak için kütle ölçeklendirmenin sadece modeldeki en küçük ögeler kümesine uygulanmasına dikkat edilmelidir. Çizelge 3.6.'te implisit ve eksplisit arasındaki farklar paylaşılmıştır.

Çizelge 3.6. İmplisit ve eksplisit metotlarının farkları

İmplisit	**Eksplisit**
Zaman adımlarından bağımsızdır, koşulsuz kararlıdır	Zaman adımlarına bağlıdır
Her zaman adımı yakınsamaya ihtiyaç duyar	Çözüm bir zaman adımında zaman adımın parçalara bölünmesi ile çözülür
Çözüm hızı her yakınsama için yavaştır	Çözüm hızı her parçanın çözümünde hızlı gerçekleşir
Statik, yorulma, yarı statik problemlerde kullanılır	Dinamik, çarpma, düşme gibi problemlerde kullanılır

3.5. LS-DYNA Analiz Programı

LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation(LSTC) tarafından geliştirilerek 2019 yılında Ansys tarafından satın alınan çoklu fizik simülasyonu çözüm paketi olarak gelişmiş bir yazılımdır. Temelini sonlu elemanlar metoduna dayandıran yazılım gerçek dünyada oluşan karmaşık problemleri çözmek için geliştirilmiş, sürekli doğrusallık olmayan problemleri dinamik olarak çözebilmektedir. Farklı sektörlerde kullanım alanı oluşturmuş bir yazılım olarak savunma, havacılık, otomotiv, beyaz eşya, imalat, inşaat ve biyomühendislik gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (Benson, 2009).

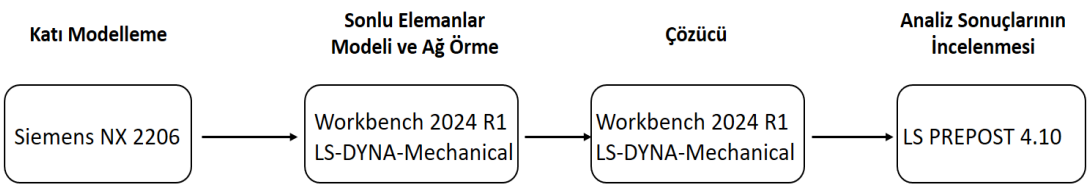
Çoklu fizik çözücüsü sayesinde tüm zaman dilimlerindeki problemleri çözebilen yazılım patlama, penetrasyon, düşme testleri, kuş çarpması, etki analizi, airbag simülasyonları, kırılma, yorulma, büyük plastisite mekanizması, sıkıştırılabilir sıvılar, pres kalıp/şekillendirme/derin çekme, üretim prosesleri, biyomekanik cihazların simülasyonu, araç çarpışma simülasyonları gibi çok geniş bir yelpazede analiz desteği verebilen bir paket yazılımdır (ANSYS, Ansys LS-DYNA Crash Simulation Software, 2024).

Yazılım altyapısı sayesinde LS-DYNA potansiyel olarak birçok farklı alana adapte edilebilir ve kombine olarak farklı uygulamalar gerçekleştirilebilir. Farklı fiziksel problemleri bir model içinde analiz edilmesi mümkün bir yazılımdır (ANSYS, Ansys LS-DYNA Crash Simulation Software, 2024).

LS-DYNA içerisindeki yazılımlarıyla simülasyon kapasitesi 2d ve 3d modeller, doğrusal olmayan dinamikler, katı cisim dinamiği, yarı statik simülasyonlar, normal modlar, doğrusal statik, ısı analizi, sıvı analizi, eureian çözümleri, lagrange-eulerian çözümleri, akışkan-yapı etkileşimi, navier-stokes sıvıları, sıkıştırılabilir akışkan çözücü, rijit çok gövdeli dinamik bağlantı, sualtı şoku, hata analizi, çatlak yayılımı, gerçek zamanlı akustik, geri yaylanma, çoklu fizik bağlantısı, yapısal-termal bağlantı, parçacık, hidrodinamiği, ayrık elemanlar yöntemi, elementsiz galerkin, radyasyon taşınması, elektromanyetizma gibi problemler için kullanılabilir (ANSYS, Ansys LS-DYNA Crash Simulation Software, 2024).

Gerçekleştirilen çalışma içerisinde LS-DYNA paket programının kullanılma nedenleri için yazılımın güvenilirliğini sektörde kanıtlamış olması, ANSYS yazılımı içerisinde aynı ara yüz ile kullanılabilme imkânı olması, çoklu fizik çözücüsünün yüksek plastik şekil değişimi altında gerçekleşen erichsen testinde çözüme ulaşabilecek olması, sonuçların etkin bir şekilde detaylı raporlandırma ile incelenebilme olanağı ve saclar üzerine gerçekleştirilen deformasyon analizleri özelinde etkin kullanım alanına sahip olması gibi kritik belirleme etmenleri olarak gösterilebilir. Çalışma içerisinde bilgisayar destekli modelleme ve analiz işlemleri için kullanılan programların akışı Çizelge 3.7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Çalışmada Kullanılan Programların Gösterimi



3.6. Malzeme Mekanik Özelliklerinin Tanımlanması

Çalışmada gerçekleştirilen deney ve simülasyon çalışmalarında 4 farklı malzemeye ait sonuçlar incelenmiştir. Karbon çeliği S235JR, galvaniz kaplama çelik ve paslanmaz çelik 304 ve alüminyum 1050 malzeme olarak kullanılmıştır. Malzeme özellikleri için ANSYS tarafından sağlanan Granta malzeme kütüphanesi kullanılarak tespit edilmiştir. Bu malzemelere ait kütüphaneden çekilen mekanik özellikler bu bölümde incelenecektir.

3.6.1. Mekanik Özellikler Temel Tanımlar

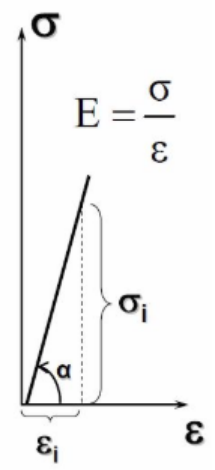
Yoğunluk: Birim hacimde yer alan maddenin miktarıdır. Kübik metre başına kilogram olarak ifade edilebilir (Beer vd., 2014).

$$\frac{kg}{m^3} = d \tag{3.12}$$

Young Modülü: Kuvvete maruz kalan bir katının uzamasını veya sıkışmasını tahmin etmede kullanılan bir sertlik ölçme birimidir. Elastisite modülü olarakta adlandırılır. Değer ne kadar yüksekse plastik şekil değişimine karşı dayanım artar. Hooke kanunu eşitliğinde E ile temsil edilir (Beer vd., 2014). Çizelge 3.8.'de gerilme-gerinim temsili grafiği paylaşılmıştır.

$$E = \sigma / \varepsilon \tag{3.13}$$

Çizelge 3.8. Gerilme-Gerinim Grafiği



E = young modülü(GPa), elastisite modülü

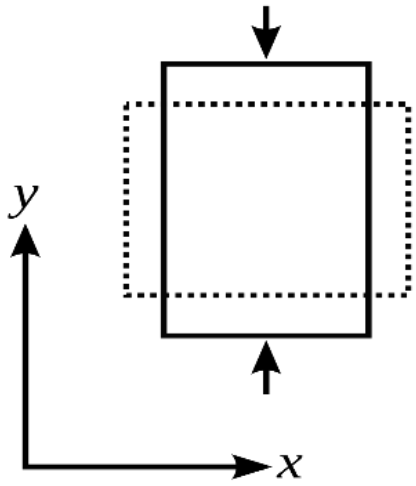
σ = stres(MPa), gerilme, kuvvetin alana oranı

ε = strain(mm/mm), gerinim, kuvvete karşı uzunluk değişiminin başlangıç boyuna oranı

Poisson Oranı: Malzemenin elastik bölgedeki yanal ve eksenel elastik birim şekil değişimlerinin oranı ile elde edilen bir sabittir. Tanım itiabariyle malzemenin enine geriniminin boyuna gerinimine oranının negatif değeridir (Lakes ve Wojcıechowskı, 2008). Poisson oranının hesaplanmasında kullanılan değerlerin gösterimi Şekil 3.21.'de gösterilmiştir (Lakes ve Wojcıechowskı, 2008).

$$v = -\frac{d\varepsilon_{enine}}{d\varepsilon_{boyuna}} = -\frac{d\varepsilon_y}{d\varepsilon_x} \tag{3.14}$$

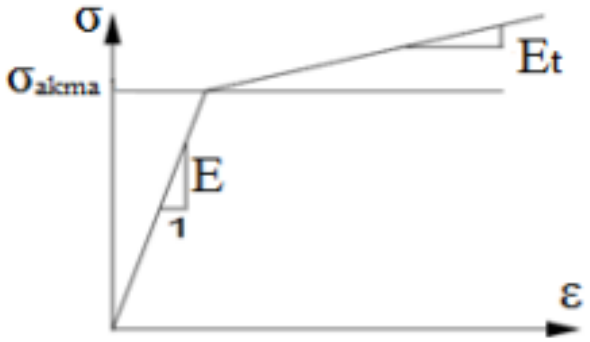
Denklemde v poisson oranını verir.



Şekil 3.21. X Doğrultusundaki ve Y doğrultusundaki yer değişimi

Bilineer İzotropik Pekleşme: Çizelge 3.9.'da gösterildiği üzere bilineer izotropi bölgesindeki plastisitesinin kullanılarak hesaplanan modelin elastisite ve plastisite bölgeleri görülmektedir (Gül, 2010). Viskozite etkisi bu modelde tanımlı olmadığı için plastisite bölgesinde bilinear etkiyi gösterecek şekilde eğimi malzeme parametresi olan ikinci bir doğru plastisitedeki fiziksel davranışı belirlemektedir (Gül, 2010).

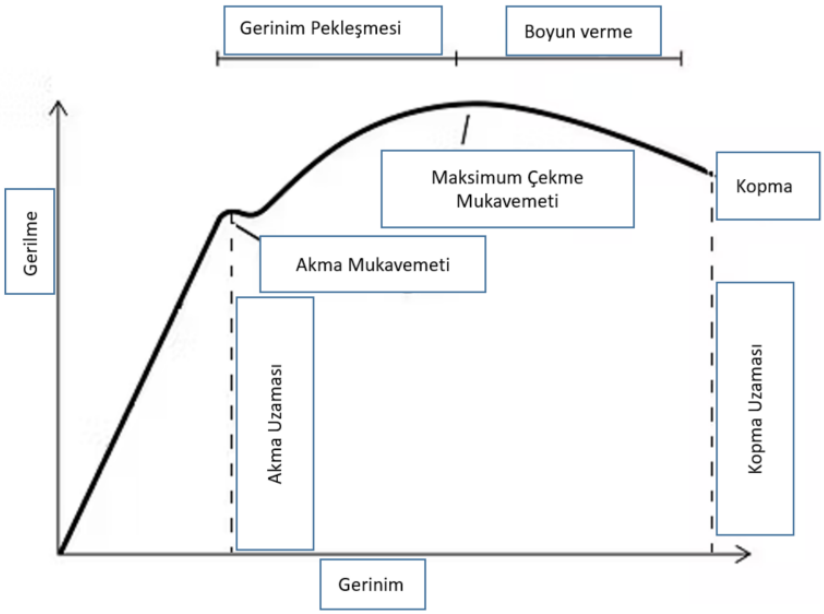
Çizelge 3.9. Bilineer Von Mises Plastisite Davranışı Gerilme-Gerinme Eğrisi



Mukavemet Değerleri: Akma mukavemeti gerilme-gerinim grafiğine göre plastik olarak şekil değişiminin başladığı noktayı temsil eder. Maksimum çekme mukavemeti

numunenin boyun vermeye başladığı kopmaya uzanan yolu başlatan nokta olarak değerlendirilir (Gül, 2010). Kritik malzeme özelliklerinin çekme testi gerilme-gerinim grafiği üzerinden incelenmesi Çizelge 3.10.'da paylaşılmıştır.

Çizelge 3.10. Gerilme-Gerinim Grafiği Kritik Değerler



BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

Gerdirilmiş sac numune üzerine küresel uçlu bir zımbayla itme kuvvetinin oluşturulduğu ve numune üzerindeki çatlak oluşumunun gözlemlenmesi yöntemiyle malzemenin şekillendirilebilirliğinin ölçüldüğü bir yöntem olarak Erichsen testi çalışmanın test bölümünde standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Yöntem detaylı olarak standart sabitleri ile beraber bu bölümde incelenmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan testlerde elde edilen veriler ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz çalışmasında test bilgisayar ortamında modellenerek malzeme özelliklerine bağlı olarak numune üzerindeki test esnasında gerçekleşen gerilme ve deformasyon değerleri incelenmiştir.

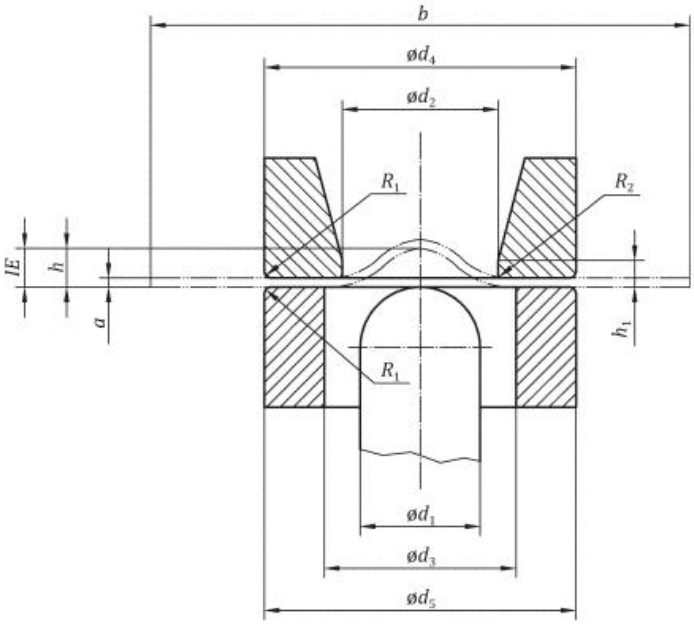
4.1. Erichsen Testi

4.1.1. Genel Koşullar

Erichsen testi EN ISO 20482:13 standardına göre yöntem bakımından şu şartları içerir:

Test 0,1 mm ile 2 mm ve genişliği en az 90 mm veya daha fazla olan metalik levha ve şeritlerin çekilebilirliğini (çukurlaşma kabiliyetini) belirlemek için gerçekleştirilir. Daha kalın malzemeler için ve yalnızca daha dar şeritler mevcut olduğunda, belirtilen ölçülerdeki test düzeneği ile test edilmelidir. Test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil

4.1.’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1.’de Erichsen testinin standartlarına bağlı düzenek ölçüleri paylaşılmıştır.



Şekil 4.1. Erichsen Testi Şematik Gösterimi

Çizelge 4.1. Erichsen Testi Düzeneği Ölçüleri

α	Test Numunesinin Kalınlığı	0,1 mm ≤ α ≤ 2 mm
b	Test Numunesi Genişliği veya Çapı	≥ 90 mm
d_1	Zımba Ucunun Çapı	20 ± 0,05 mm
d_2	Kalıbın Delik Çapı	27 ± 0,05 mm
d_3	Üst Numune Tutucunun Delik Çapı	33 ± 0,1 mm
d_4	Kalıbın Dış Çapı	55 ± 0,1 mm
d_5	Alt Numune Tutucunun Delik Çapı	55 ± 0,1 mm
R_1	Kalıbın Dış Kenarlarının ve Tutucularının Kenar Radyusu	0,75 ± 0,1 mm
R_2	Kalıpların İç Kenarlarının Radyusu	0,75 ± 0,05 mm
h_1	Kalıbın Yuvarlatılmış İç Kısmının Yüksekliği	3,0 ±0,1 mm
h	Test Esnasında Oluşan Zımba Çukurunun Derinliği	-
IE^a	Erichsen Çukurluğu	IE

Küresel başlıklı zımba, metal levha tutucu ile kalıp arasına sıkıştırılan test numunesine sürekli bir çatlak görünene kadar bastırılır. Çatlak oluşumuna kadar zımba yoluna karşılık gelen çöküntünün ölçülen derinliği testin sonucudur.

4.1.2. Test Cihazı Koşulları

- Test cihazı toleranslarıyla verilen tablo ölçülerine sahip bir kalıp, zımba ve bir tutucuya sahip bir cihaz ile yapılmalıdır.
- Cihaz, sürekli çatlağın ortaya çıkma anını gözlemleyebilmek için test sırasında test numunesinin dışının gözlemlenebileceği şekilde tasarlanmalıdır.
- Görsel değerlendirmenin yanı sıra yırtılma başlangıcında numune dayanım kuvvetinde bir azalma ve gürültü oluşabilir bunlarda değerlendirilmelidir.
- Test cihazı zımbanın penetrasyonunu 0,1 mm'lik ölçek derecesi ile ölçüm yapabilmelidir.
- Kalıp, tutucu ve zımba test sırasında deforme olmayacak bir sertlik seviyesine sahip olmalıdır. Kalıbın, tutucunun ve zımbanın çalışma yüzeyleri Vickers sertliği en az 750HV olmalıdır.
- Zımba test esnasında dönmemelidir.
- Zımbanın çalışma yüzeyi küresel ve cilalı olmalıdır. ISO4287'ye göre ortalama pürüzlülük değeri $R_a \leq$ 0,4 µm olmalıdır.
- Kalıp ekseninden zımbanın küresel kısmının merkezine olan mesafe, zımba hareketinin tüm alanı boyunca 0,1 mm'den az olmalıdır.
- Test numunesi ile temas halinde olan boş tutucu ve kalıbın yüzeyleri düz ve zımbanın hareket eksenine dik olmalıdır. Kalıp ve tutucu aynı hizada olmalıdır.
- Test cihazı, test numunesinin yaklaşık 10Kn bir sabit tutma kuvveti ile yerinde tutulmasını sağlamalıdır.
- Zımba yolunun ölçümü zımbanın test numunesi yüzeyine ilk temas ettiği noktadan itibaren ölçülür.
- Zımba yerine sertleştirilmiş çelik bilyalar da kullanılabilir.

4.1.3. Test Numune Koşulları

- Test numunesi düz olmalıdır. Dar numuneler için deformasyon merkezi numunenin genişliğinin merkezinde olmalı.
- Test numuneleri üretilirken, test numunesinin test cihazına sıkıştırılması ve testin gerçekleştirilmesi sırasında engel oluşturabilecek kenarlar çapak veya bükülme oluşmamalıdır.
- Testten önce test numunesi dövülmemeli, sıcak veya soğuk şekillendirme yapılmamalıdır.

4.1.4. Test Koşulları

- Test 10°C ile 35°C arasındaki bir sıcaklıkta yapılmalıdır. Bir kişi için kontrollü koşullar altında test yapılması gerekiyorsa (23±5)°C'lik bir sıcaklık korunmalıdır.

4.1.5. Testin Uygulanması

- Test numunesinin kalınlığı belirlenir.
- Test makinesi çalıştırılmadan önce, test numunesinin zımba ve kalıpla temas eden yüzeyleri gresle ince bir şekilde yağlanmalıdır.
- Test numunesi metal levha tutucu ile kalıp arasına sıkıştırılmalıdır. Sac tutma kuvveti 10 kN civarında olmalıdır.
- Zımba, test numunesi ile darbesiz olarak temas ettirilmelidir. Ölçüm temas noktasından başlamalıdır.
- Teste başlamadan önce zımbanın üst kısmı, boş tutucunun üst yüzeyi (kalibrasyon kontrol noktası) ile aynı seviyede olmalıdır.
- Test sırasında 5 mm/dak. ile 20 mm/dak. arasında bir hızda düzgün bir hareketle yapılması gereken çökme oluşturulmasına devam edilmeli.
- Manuel olarak kontrol edilen test makinelerinde hız, testin sonuna doğru alt sınıra yakın bir seviyeye düşürülür, böylece sürekli bir çatlağın görünür hale geldiği anın daha kesin olarak belirlenmesi sağlanır.

- Bilgisayar destekli test makineleri kullanıldığında, test sonucu doğrudan kuvvet/zımba yolu diyagramı kullanılarak görülebildiğinden, testin sonunda hızın azaltılmasına gerek yoktur.
- Çatlak test numunesinin tüm kalınlığı boyunca görünür hale geldiği anda zımba durdurulmalıdır.

4.2. Erichsen Test Çalışması

4.2.1. Test Cihazı

Çalışmada kullanılan cihaz elektro hidrolik tahrikli ve elektronik kontrollü 45 kN maksimum çekme kuvvetine sahip bir Erichsen test cihazıdır. Yuvaya yerleştirilen sac numune parçaları çatlama yüzeyi kullanıcının görüş yönünde olacak şekilde elektro hidrolik tahrikli küresel şekildeki zımbası ile düzenli rejimli hızlarda test numune üzerinde çatlama görülünceye kadar deforme etme esasına dayanır. Kullanılan test cihazı çalışma için gerek duyulan ISO20482 standardına uygun ve bununla beraber ISO 8490, EN 14-58, EN 14-67, ASTM 643-84, JIS Z-2247 standartlarına uygun testleri gerçekleştirme onayına sahiptir. İlgili tüm Erichsen ve Olsen testleri için kullanılabilmektedir. Kullanılan test cihazına ait görsel Şekil 4.2'de paylaşılmıştır. Çizelge 4.2.'de cihazın teknik özellikleri paylaşılmıştır.

Kullanılan test cihazı Erichsen markasına ait "Sheet and Strip Metal Testing Machine Model 111" 2023 Almanya üretimli bir cihazdır.

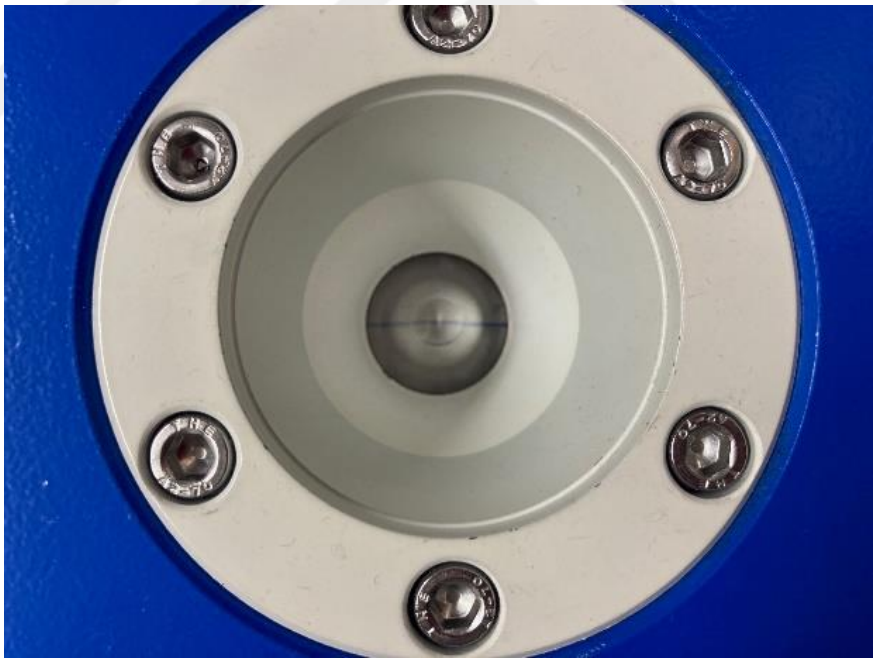


Şekil 4.2. Test Cihazı

Çizelge 4.2. Test Cihazı Teknik Özellik Tablosu

Boyutlar	620 x 370 x 700 mm
Ağırlık	135 kg
Şebeke Beslemesi	AC 230 V 50 Hz
Güç Tüketimi	1,5 kVA
Çekme Kuvveti(maksimum)	45 kN / 100 bar
Sac Tutucu Kuvveti	10 kN ± 1,5 kN

Numune üzerindeki çatlak gözlemlenebilmesi için dışa dönük olarak şişirilecek şekilde cihaz tasarlanmıştır. Açık alan üzerinden göz kontörlü ile cihaz çatlak oluştuğu noktada zımba hareketi durdurulmaktadır. Numunenin gözlemi için kullanılan gözlem havuzu Şekil 4.3'te paylaşılmıştır.



Şekil 4.3. Test Cihazı Numune Gözlem Havuzu

Test cihazı 6 bölüm üzerinden incelenebilir. Cihaz farklı modellere sahip olmakla beraber bu çalışmada kullanılan modelde Şekil 4.4.'te gösterilen 3 numaralı zımba hızı regülatörü bulunmamakta, zımba mesafesi sabit hızda hareket ederek sadece durdurma, geri gelme ve itme komutları cihaz tarafından çalıştırılabilmektedir.

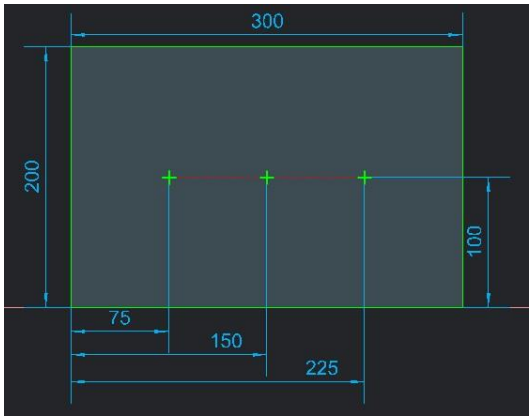


Şekil 4.4. Test Cihazı Bölümleri(1.Test silindiri, 2.Numune ekleme açıklığı, 3.Zımba hızı regülatörü, 4.Dengeleme ayağı, 5.Ana şalter,.6 Dokunmatik panel)

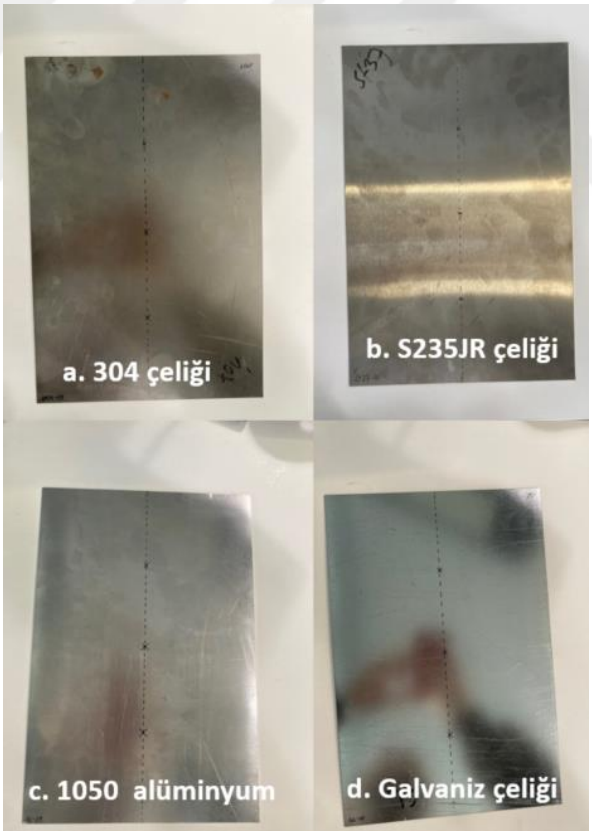
4.2.2. Test Numuneleri

Test Numuneleri S235JR çeliği, 304 çelik, galvaniz çelik ve 1050 alüminyum olmak üzere 4 farklı 1 mm. kalınlıkta sac malzemeden oluşmaktadır. Numune boyutları tüm saclar için 200 mm genişlik 300 mm yükseklik ve 1 mm sac kalınlığı ölçülerinde hazırlanmıştır.

Numuneler üzerinden 3 noktadan test geçekleştirilmiştir. 300 mm yükseklik 75 mm mesafelerle dizilmiş 3 test noktası 200 mm genişliğin orta çizgisinden olmak üzere işaretlenmiştir. Her işaretli nokta için test gerçekleştirilmiştir. Test noktalarının belirlenme ölçüleri Şekil 4.5.'te gösterilmiştir. Şekil 4.6.'da hazırlanan numuneler paylaşılmıştır.



Şekil 4.5. Test Noktalarının Numune Üzerindeki Konumları



Şekil 4.6. Test Noktaları İşaretlenmiş Test Numuneleri (a. 304 çeliği, b. S235JR, c. 1050 alüminyum, d. Galvaniz çeliği)

4.2.3. Erichsen Test Sonuçları

4.2.3.1. Alüminyum 1050, 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları

Erichsen testinin sonucunda alüminyum 1050 malzemeden kesilen saca ait çatlamanın gerçekleştiği zımba yer değişimi sonuçları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Test Sonuçlarına ait görseller Şekil 4.7.'de verilmiştir.

Test Noktası 1: 8,2 mm

Test Noktası 2: 8,5 mm

Test Noktası 3: 8,2 mm

Alüminyum 1050 Erichsen Testi Sonucu Ortalaması: 8,3 mm



Şekil 4.7. Alüminyum 1050 Erichsen Testi Sonuçları

4.2.3.2. S235JR Çeliği 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları

Erichsen testinin sonucunda S235JR çeliği malzemeden kesilen saca ait çatlamanın gerçekleştiği zımba yer değişimi sonuçları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Test Sonuçlarına ait görseller Şekil 4.8.'de verilmiştir.

Test Noktası 1: 9,1 mm

Test Noktası 2: 9,2 mm

Test Noktası 3: 9,3 mm

S235JR çeliği Erichsen Testi Sonucu Ortalaması: 9,2 mm



Şekil 4.8. S235JR Çeliği Erichsen Testi Sonuçları

4.2.3.3. Galvaniz Çelik 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları

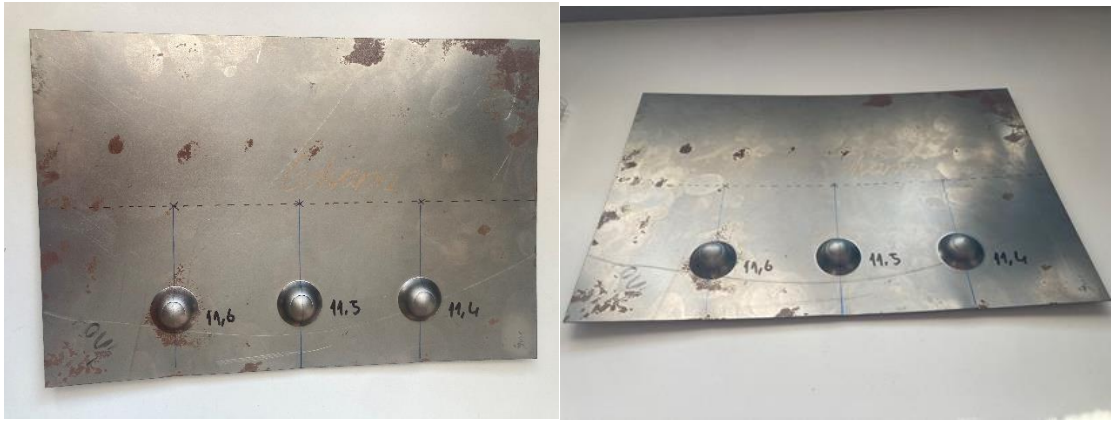
Erichsen testinin sonucunda galvaniz çelik malzemeden kesilen saca ait çatlamanın gerçekleştiği zımba yer değişimi sonuçları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Test Sonuçlarına ait görseller Şekil 4.9.'da verilmiştir.

Test Noktası 1: 11,6 mm

Test Noktası 2: 11,5 mm

Test Noktası 3: 11,4 mm

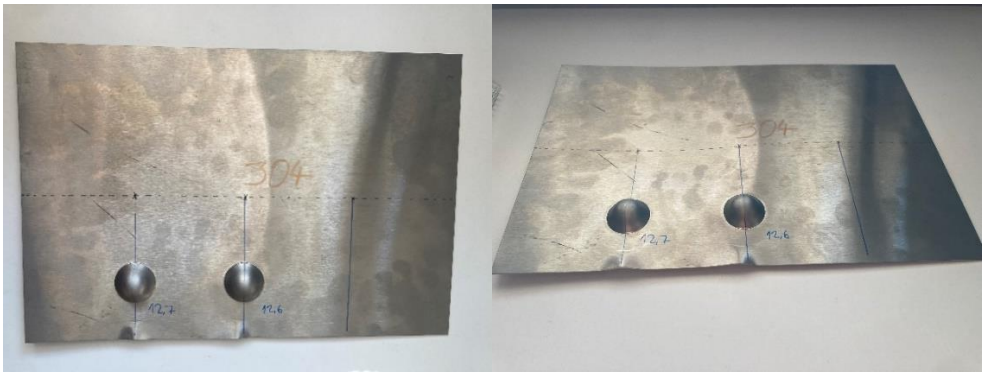
Galvaniz çelik Erichsen Testi Sonucu Ortalaması: 11,5 mm



Şekil 4.9. Galvaniz Çelik Erichsen Testi Sonuçları

4.2.3.4. 304 Çeliği 1 mm Sac Erichsen Testi Sonuçları

304 çeliği için gerçekleştirilen testlerde çatlama test cihazının zımbasının maksimum yer değiştirme limitine ulaşmasına rağmen numune üzerinde bir çatlama oluşmaması ile sonuçlanmıştır. Ölçülen iki değerde 12,7 mm ve 12,6 mm zımba yer değiştirmesi sonrasında numune çatlağı gözlenmemiş, çatlak oluşumunun Erichsen testi için minimum 12,7 mm'den daha fazla olacağı tespit edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında ilgili malzemeden üretilen numune için önceki test ve analiz çözümlerinden yola çıkarak muhtemel çatlama derinliği tespit edilmiştir. Test sonuçlarına ait görseller Şekil 4.10.'da verilmiştir.



Şekil 4.10. 304 Çeliği Erichsen Testi Sonuçları

4.3. Bilgisayar Destekli Analiz Çalışması

Erichsen testi gerçekleştirilen numuneler aynı koşul ve şartlar oluşturularak Ansys LS-Dyna programı kullanılarak deformasyon süreçleri analiz edilmiştir. Numuneler üzerine etki eden zımba ile deformasyona uğrayarak gerilme oluşturmaktadır. Belirli bir hız ile numuneye etki eden zımba temas halinde bulunduğu numune üzerinde kırılma noktasına kadar çekme kuvvetleri oluşturur. Numune parçası alt ve üst tutucular sayesinde iki boyutta kısıtlanarak üçüncü boyutta serbest deformasyona uğramaktadır. Yönlendirilerek deforme olan numune gerilme değerleri oluşturarak akma noktasına kadar deformasyonuna devam eder. Deformasyona bağlı gerilme değerleri malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir ve test edilecek numunenin muhtemel kırılma noktası bu özelliklerden yola çıkılarak sayısal analiz yöntemleri ile bulunabilir.

Numune süreçleri, test süreçleri gibi maliyet oluşturan süreçler bir tasarım için gerçekleştirilen malzeme seçimi sürecinde sayısal analiz yöntemleri ile düşürülebilir. Optimum malzemenin seçilmesi için bilgisayar destekli analiz çalışmaları malzeme şekillendirilebilirliğinin öneme sahip olduğu tasarımların süreçlerinde aktif olarak kullanılır.

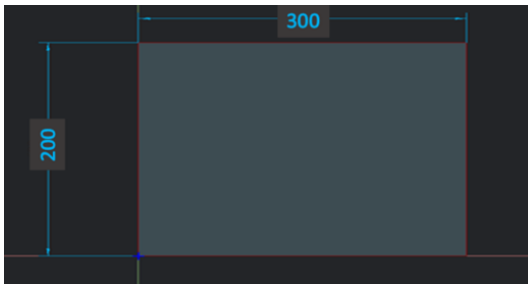
Malzeme seçimi ve karakterizasyon etkisi konularında rekabet şartlarında en kısa ve düşük maliyet koşullarında sonuca gidilmek istenilen geliştirme süreçlerinde sonlu elemanlar temelli hesaplayıcılar deneylerle desteklenerek doğrulandıktan sonra ileri adımların öngörülmesi için son derece faydalı veriler sunar. Ansys yazılım paketi sonlu elemanlar metodu için geliştirilmiş içerisinde çoklu fizik çözücüleri dahil çözüm imkanı veren ara yüzleri sayesinde birçok mühendislik probleminin çözümüne imkan tanıyan bir yazılım olarak eksplisit çözücü desteği nedeniyle tercih edilmiş ve ara yüzündeki LS-Dyna çözücü ile çalışma gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Analiz Geometrisinin Hazırlanması

Test koşullarının simüle edildiği bilgisayar ortamında çizimlerde bu test yapısı için alt tutucu, üst, tutucu, zımba ve numune parçası olmak üzere 4 parçadan oluşan bir modelleme yapılmıştır. Parça ölçüleri test standardındaki ölçülerle aynı olacak şekilde ölçülendirilmiştir.

4.3.1.1. Numune Parçası

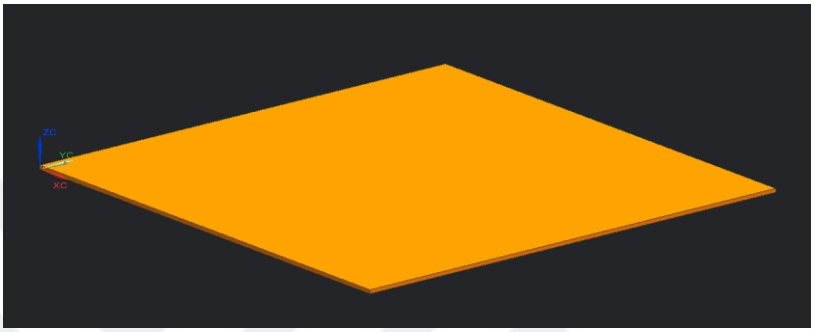
Numune parçası 200 mm genişlik, 300 mm yükseklik uzunluğuna sahip olacak şekilde 1 mm kalınlığa sahip sac boyutlarında ölçülendirilerek modellenmiştir. Şekil 4.11.'de numune parçasının ölçüleri, Şekil 4.12.'de sac parça kalınlığı ve parçanın genel görünümü Şekil 4.13.'te verilmiştir.



Şekil 4.11. Numune Parçası Genişlik ve Yükseklik Ölçüsü



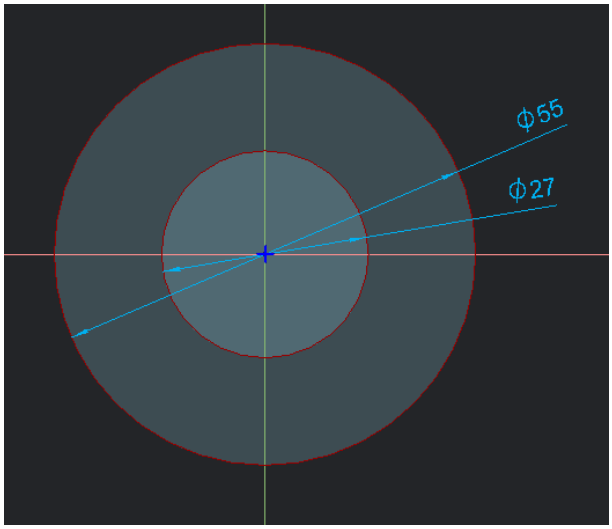
Şekil 4.12. Numune Parçası Kalınlık Ölçüsü



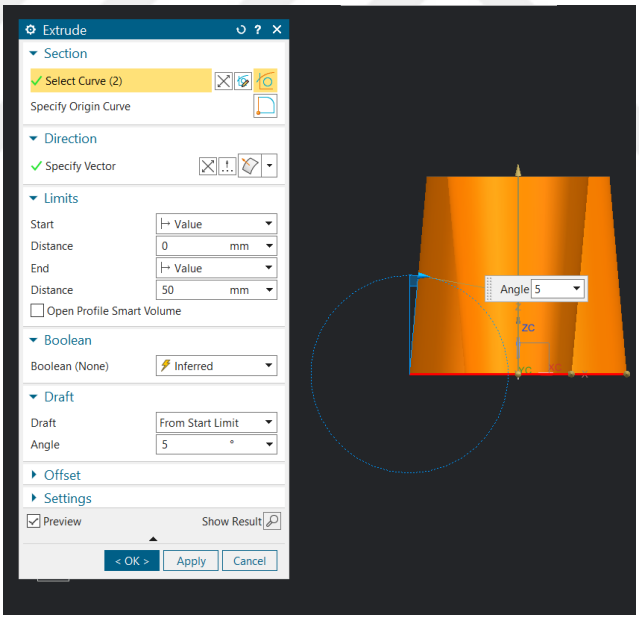
Şekil 4.13. Numune Parçasının Genel Görünümü

4.3.1.2. Üst Tutucu

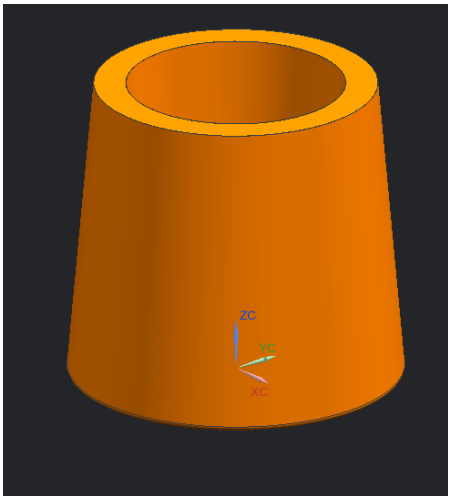
Alt tutucu parçası 27 mm iç çap, 55 mm dış çap olmak üzere 50 mm yükseklikte % 5 draft açısı katılaştırma yönünde verilerek oluşturulmuş bir silindirik yapıdır. Şekil 4.14.'te üst tutucu parçaya ait ölçüler, Şekil 4.15.'te draft açısı verilerek gerçekleştirilen katılaştırma işlemi ve Şekil 4.16.'da genel görünümü paylaşılmıştır.



Şekil 4.14. Üst Tutucu Çap Ölçüleri



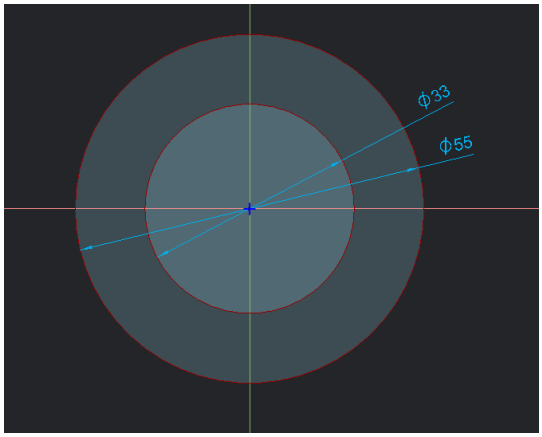
Şekil 4.15. Üst Tutucunun Draft Açısı ile Katılaştırma Yüksekliği Verilmesi



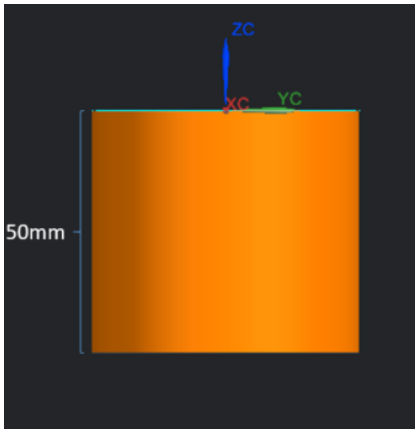
Şekil 4.16. Üst Tutucu Genel Görünümü

4.3.1.3. Alt Tutucu

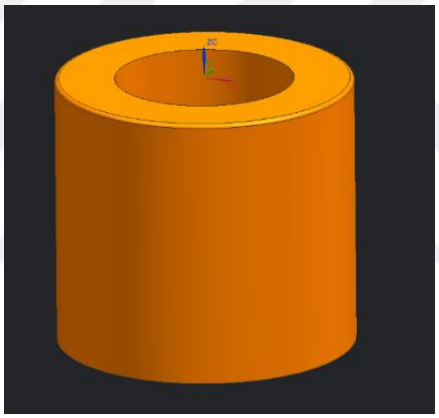
Alt tutucu Parça 33 mm iç çap, 55 mm dış çap olacak şekilde ölçülendirilmiş 50 mm yüksekliğinde içi boş bir silindir olarak modellenmiştir. Şekil 4.17'de alt tutucunun taban çap ölçüleri, Şekil 4.18.'de yükseklik ölçüsü ve Şekil 4.19.'da parçanın genel görünümü verilmiştir.



Şekil 4.17. Alt Tutucu Çap Ölçüleri



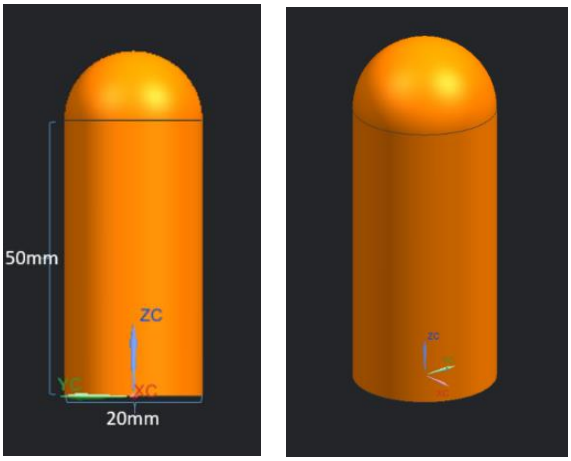
Şekil 4.18. Alt Tutucu Yükseklik Ölçüsü



Şekil 4.19. Alt Tutucu Genel Görünüm

4.3.1.4. Zımba

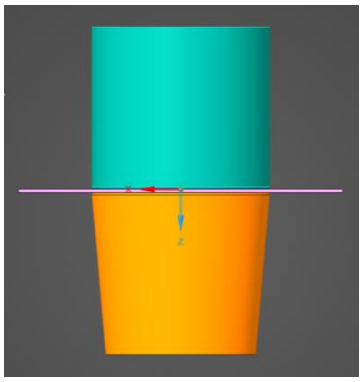
Zımba parçası uç noktası 20 mm çapa sahip yuvarlatılmış bir bölüme sahip olan içi dolu 50 mm yüksekliğinde silindirik bir yapı olarak modellenmiştir. Şekil 4.20.'de zımbanın ölçüleri ve genel görünümü verilmiştir.



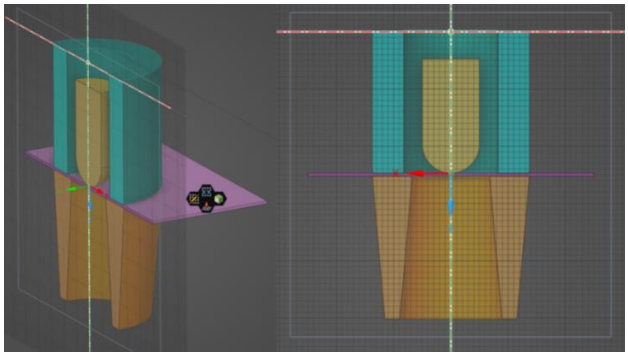
Şekil 4.20. Zımba Parçası Ölçüleri-Genel Görünümü

4.3.2. CAD Modelinin Montajı ve Analiz Çalışması İçin Düzenlenmesi

Analiz geometrisinin montajı için tasarlanan 4 parça test şartlarını sağlayacak şekilde monte edilmiştir. Alt ve üst tutucu temas halinde numune parçasının alt ve üst yüzeyine yerleştirilmiştir. Üst tutucunun iç kısmında yer alacak şekilde zımba numune parçasının üst yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Montaj geometrisinin yan görünüşü Şekil 4.21'de verilmiştir. İki kesite ait test düzeneğinin bilgisayar ortamındaki görünümü Şekil 4.22.'de paylaşılmıştır.



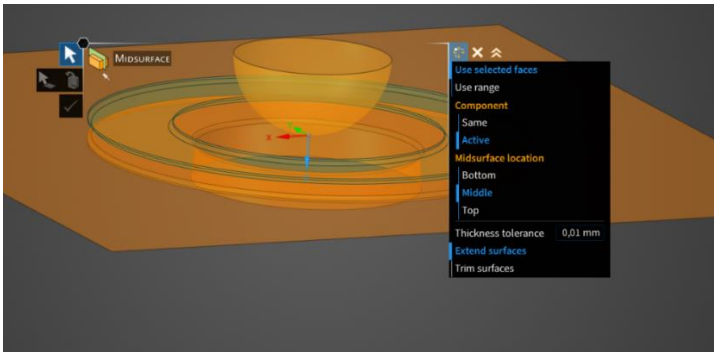
Şekil 4.21. Yan Görünüş Analiz Geometrisi



Şekil 4.22. Analiz Montaj Geometrisinin Kesit Görünümü

Montaj verisi üzerinde analiz işleminde pasif konumda olan ve mesh işleminde daha az düğüm noktası ve eleman içeren bir analiz oluşturulması için bazı yüzey ve katı geometrilerde değişikliğe gidilmiştir. Yüksek sayıda düğüm noktası ve eleman içeren analiz dosyaları daha fazla kaynak tüketir. Düşük düğüm noktası ve eleman içeren analiz çalışmaları sonlu elemanlar metodunun çözümünde daha az donanımsal ihtiyaç ve zamanla sonuçların hesaplanmasına olanak sağlar.

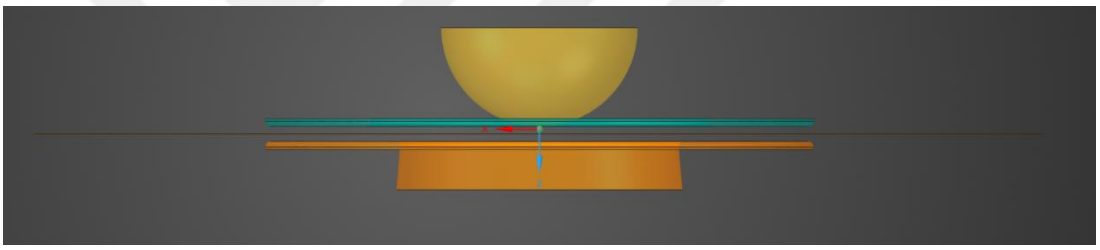
4 katı parça üzerinde gerçekleştirilen revizyonlarda numune parçası 1 mm kalınlıkta bir katıdan orta yüzey komutu ile 2 boyutlu bir yapıya dönüştürülmüştür. Ota yüzey çıkartma komutu ile 2 boyutlu yüzeylerin oluşturulması Şekil 4.23.'te paylaşılmıştır.



Şekil 4.23. Orta Yüzey Çıkarma Komutunun Kullanılması

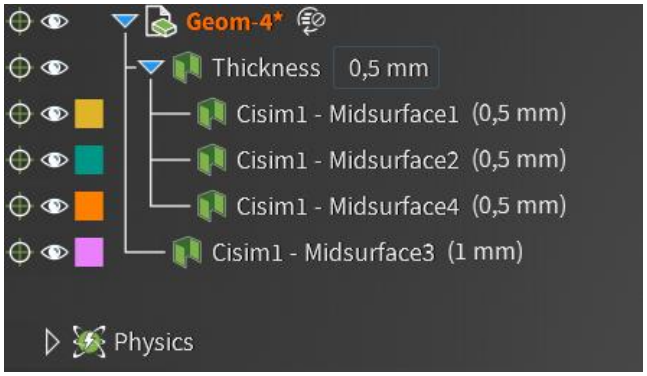
3 boyutlu katılardan 2 boyutlu yapılara dönüşüm mesh açısından daha kaliteli mesh yapılarının örülmesine ve daha düşük eleman ile geometrinin oluşturulabilmesine imkân sağlamıştır.

Analiz geometrisinde tüm katı parçalar 2 boyutlu yapılara çevrilmiştir. Üst tutucu, alt tutucu ve zımba pasif konumdaki yüzeyleri daraltılarak sadece numune parçası ile temas halinde işlemin gerçekleştiği yüzeylerin kullanımda kalacağı şekilde şekil düzenlenmiştir ve bu temas yüzeyleri iki boyutlu yüzeylere dönüştürülmüştür. Alt tutucu, üst tutucu ve zımba 0,5 mm kalınlıkta, numune parçası 1 mm kalınlıkta olacak şekilde Ansys Discovery geometri düzenleme uygulaması kullanılarak düzenlenmiştir. Düzenlenmiş geometriye ait görsel Şekil 4.24.'te verilmiştir. Oluşturulan 4 yüzeye ait sac kalınlıkları Şekil 4.25.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Geometrinin 2 Boyutlu Yüzeylere Dönüştürülmesi

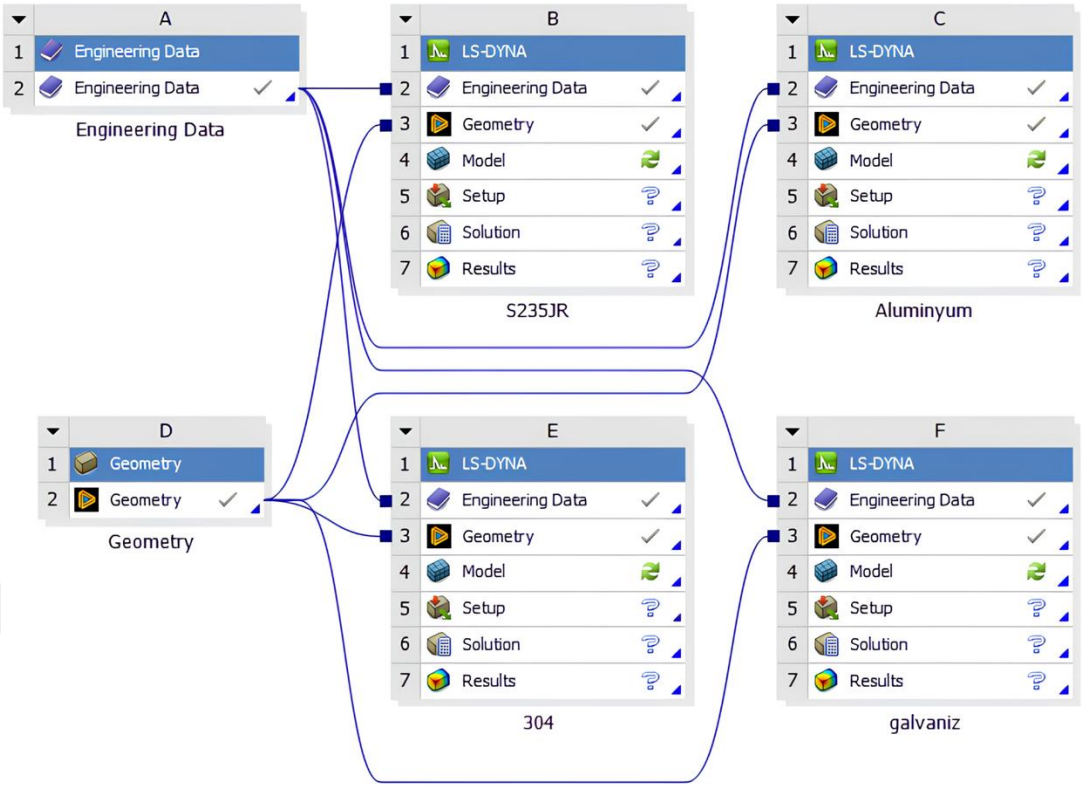
Gerçekleştirilen boyut değişiminin sebebi oluşturulacak analiz modelinde oluşturulacak eleman ve düğüm noktası oluşturularak analiz süresini düşürmek ile beraber eksplisit çözüm için gerekli olan daha tekdüze ve basit geometri gereksinimi karşılanmıştır. 3 boyutlu elamanlar yerine 2 boyutlu elemanların kullanılması açıklanan CFL zaman adımı değerlerinde daha yüksek değerlere ulaşılan dörtgen yapılı ağ örgüsünü oluşturarak kabul edilen başlangıç zaman adımının yükseltilmiş daha kısa sürede çözülecek daha düşük maliyetli bir simülasyon modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4.25. Parçaların Kalınlıkları(midsurface2-üst tutucu, midsurface4-alt tutucu, midsurface1-zımba, midsurface3-numune parçası)

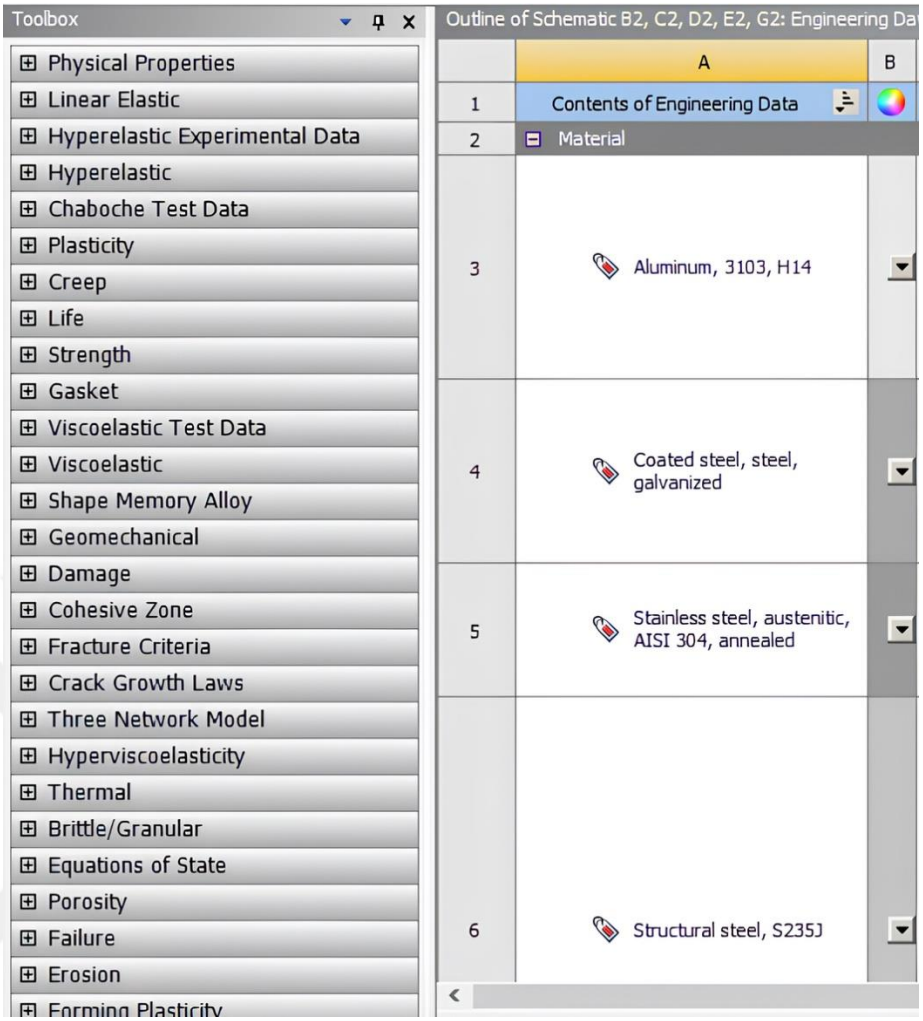
4.3.3. Analiz Yapısının Kurulması ve Malzeme Tanımlanması

Ansys workbench üzerinden geometri olarak eklenen test montaj geometrisine ek olarak mühendislik veri seti eklenerek buradan iki pencere eklenen LS-Dyna penceresine bağlanarak analiz yapısı tamamlandı. İlgili workbench analiz şeması Şekil 4.26.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. ANSYS Analiz dosyasının workbench yapısı

Malzeme tanımlamaları veri girişleri Şekil 4.27.'te gösterildiği şekilde engineering data bölümü üzerinden programa girilmiştir.



Şekil 4.27. Malzeme Bilgilerinin Eklenmesi

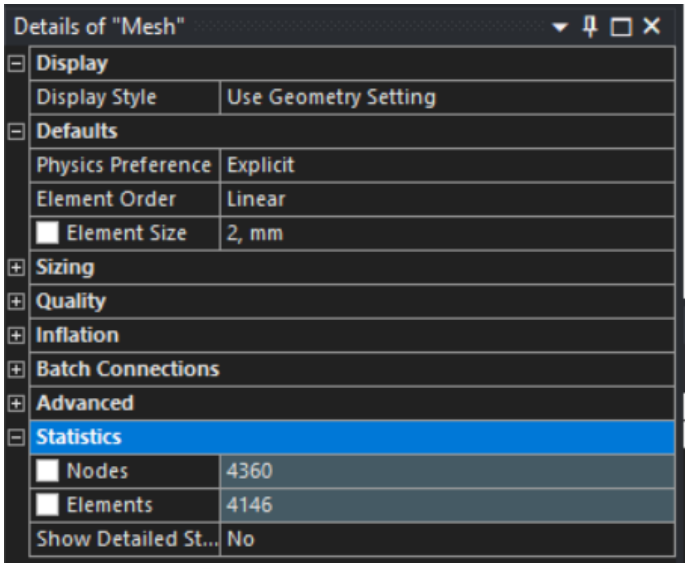
Çalışmada 4 farklı numune malzemesi kullanıldığından bu malzemelere ait veriler programa girilmiştir. Malzeme bilgileri ilgili malzemelerin kartları üzerinden Ansys Granta Kütüphanesi kullanılarak belirlenmiştir. Aşağıdaki tabloda malzemelere ait mekanik özellikler paylaşılmıştır. İdeal sıcaklık olarak 23C°'de kabul edilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bilgisayar destekli analiz çalışmasında kullanılan malzeme mekanik özellikleri Çizelge 4.2.'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Malzeme Özellikleri

	S235JR	Galvaniz Çelik	304 Çeliği	Alüminyum 1050
Yoğunluk(kg/m^3)	7849,9	7849,8	7954,3	2729,8
Young Modülü(Gpa)	209,94	207,36	195,05	71,229
Poisson Oranı	0,3	0,28	0,26	0,32
Çekme Akma Dayanımı(Mpa)	253,75	314,24	264,77	139,83
Kritik Çekme Akma Dayanımı(Mpa)	428,49	502	509,18	154,79
Plastik Bölge Tanjant Modülü(Mpa)	1180	989	1220	317

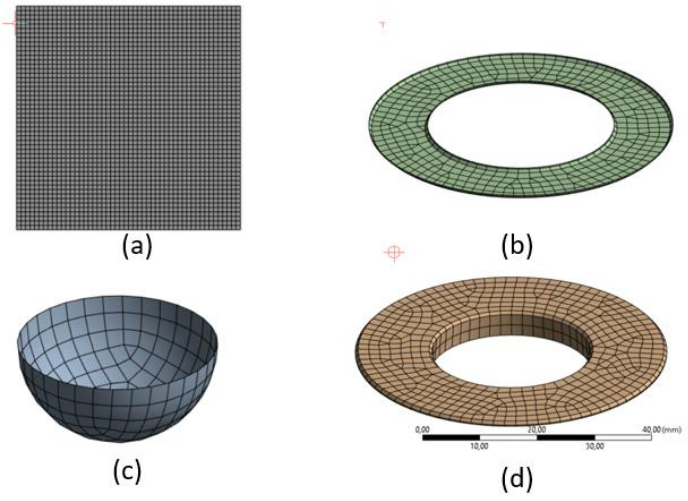
4.3.4. Ağ Yapısının Örülmesi (Mesh)

Geometrinin düğüm noktalarının ve elemanlarının oluşturulması için Ansys uygulamasına ait eksplisit ağ örücü kullanılmıştır. Tüm geometri için 2 mm eleman boyutu kısıtlaması ile beraberinde tüm parçalar için toplamda 4360 düğüm noktası ve 4146 eleman oluşturulmuştur. Ağ örgüsüne ait temel ayar bilgileri Şekil 4.28.'de paylaşılmıştır.

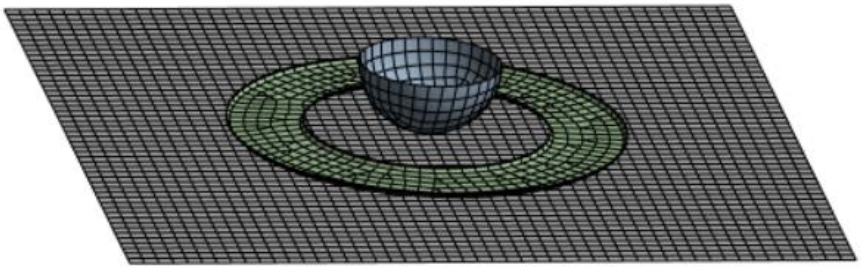


Şekil 4.28. Ağ Örgüsü Ayarları

Analiz çalışması için modellenen 4 parçaya ait ağ örgüsü yapıları Şekil 4.29.'da ve ağ örgü yapısına bağlı montaj yapısı Şekil 4.30.'da paylaşılmıştır.

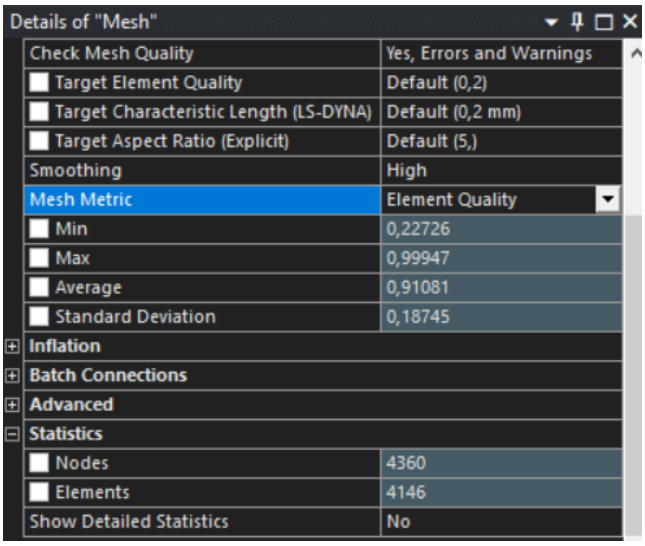


Şekil 4.29. Parçalara Ait Ağ Yapıları



Şekil 4.30. Ağ Örgüsünün Genel Görünümü

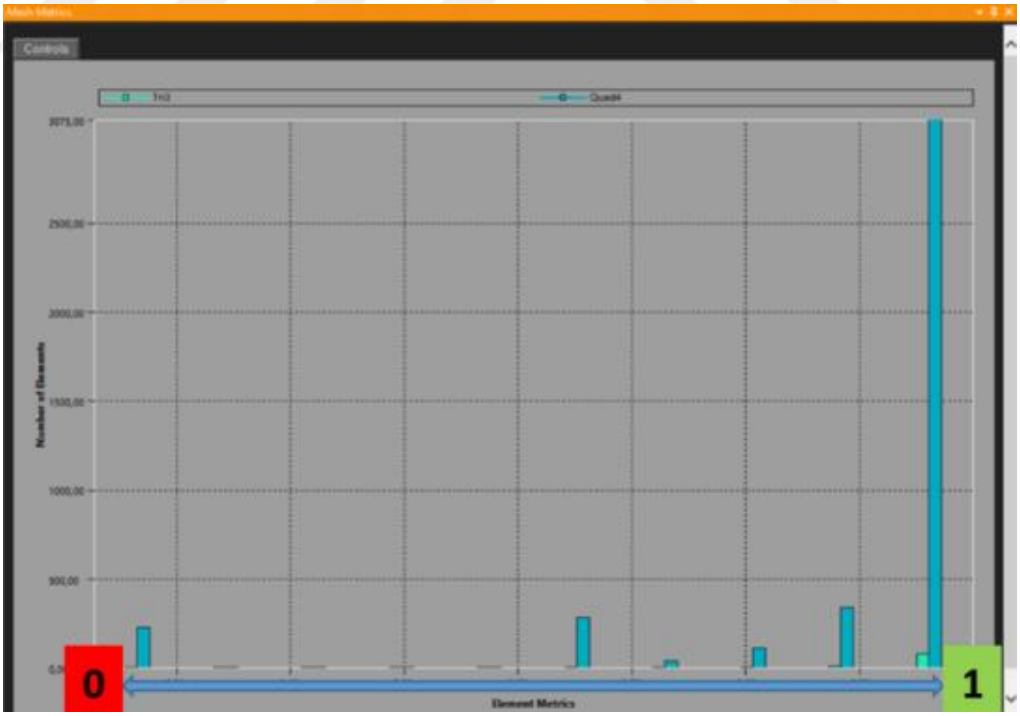
Ağ yapısının eleman kalitesi ortalama olarak 1 üzerinden gerçekleşen değerlendirmede 0,91 değerine sahip. Deformasyon düzeyi yüksek bölümlerde yüksek doğru sonuçlara ulaşılması açısından yüksek eleman kalitelerine ihtiyaç duyulduğundan numune parçasın yüksek bir eleman kalitesine sahip olduğu eleman metrik tablosundaki 0,9 üzerindeki quad eleman yoğunluğundan anlaşılmaktadır. Şekil 4.31.'de ağ yapısı eleman kalite ortalamaları verilmiştir.



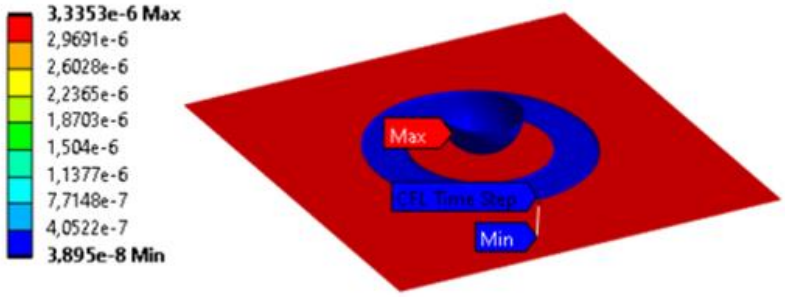
Şekil 4.31. Eleman Kalite Değerleri

Eksplisit temelli çözücülerde düşük eleman sayılarının yapıyı en iyi temsil edecek en az şekilde olması istenmektedir. Kabul edilebilir ağ yapısı için bakılacak iki önemli ölçüt olarak CFL zaman adım değeri ve ağ yapısı eleman kalitesi değerleri değerlendirilebilir. Eleman Kalitesi, 2B dörtlü/üçlü elemanlar için hacmin kenar uzunluklarının kareleri toplamına oranına veya 3B elemanlar için kenar uzunluklarının kareleri toplamının küpünün kareköküne dayanır. Bu hesaplamalara göre eleman kalitesi ortalaması tüm elemanlardan alınarak yapının ağ yapısı kalitesi bulunur. Bu değer 0 ve 1 arasında gerçekleşir. Analiz kabulüne göre ağ yapısı kalitesi 0,7-0,95 aralığında çok iyi ve 0,95-1 aralığında mükemmel olarak kabul edilir. Gerçekleştirilen çalışmada bu değer 0,91 olarak gerçekleşmiş ve gerekli ağ yapısı kalitesine ulaşılmıştır. Tüm yapı için uygulanan 2 mm eleman boyutu kriteri görselde de yapıyı iyi bir şekilde temsil eder bir ağ yapısı oluşumunu sağlamış ve yeterli eleman kalitesi değerine ulaştırmıştır. Eleman kalitesi yığın tablosu Çizelge 4.3.'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.3. Eleman metrik kalitesi yığın tablosu



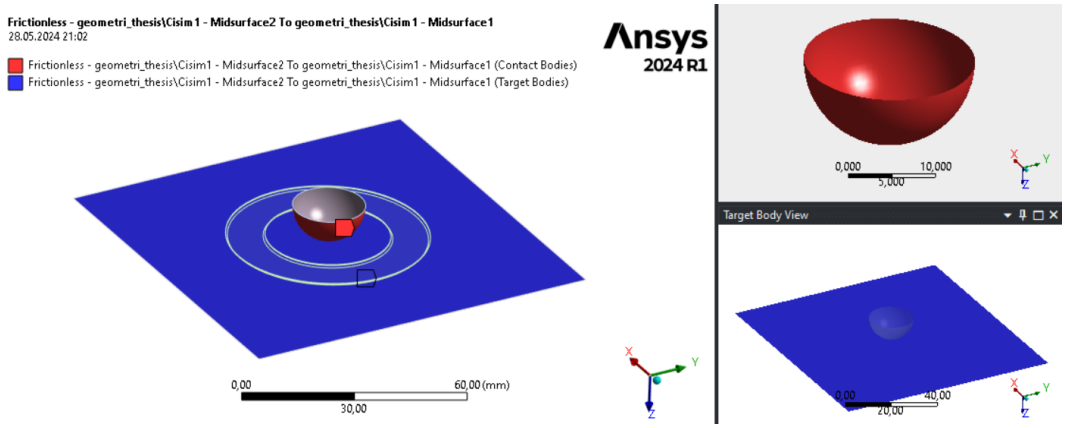
Eksplisit temelli analizlerde analiz süresinin ve analiz güvenilirliği aşından kritik öneme sahip CFL time step değerleri tüm parça elemanları için hesaplanmış deformasyona uğrayacak numune parçası kritik parça olarak belirlenerek time step değeri en yüksek değere deformasyonun gerçekleşeceği parça için yeterli bir düzeydedir. CFL time step dağılımı Şekil 4.32.'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.32. CFL Time Step Değerleri

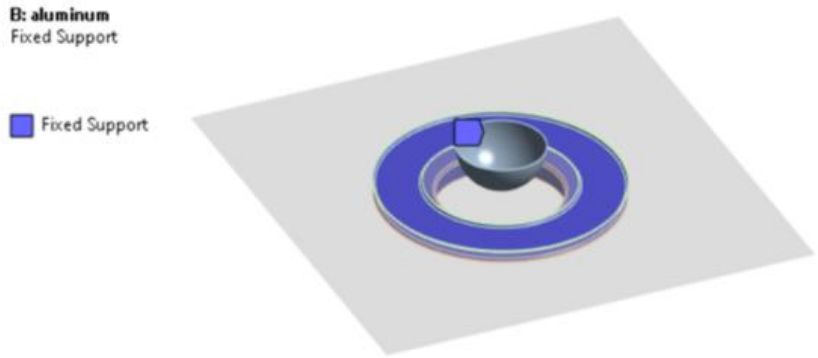
4.3.5. Analiz Sınır Şartları

LS-Dyna programının desteklediği tüm yüzeyler için otomatik body interaction komutu ile tüm yüzeyler için sürtünmeli yüzey etkileşimi tanımlanmıştır. Yüzey etkileşim tanımlaması otomatik tanımlama dışında sadece zımba ve numune parçası arasında sürtünmeli yüzey olarak tanımlanması Şekil 4.33.'te gösterilmiştir.



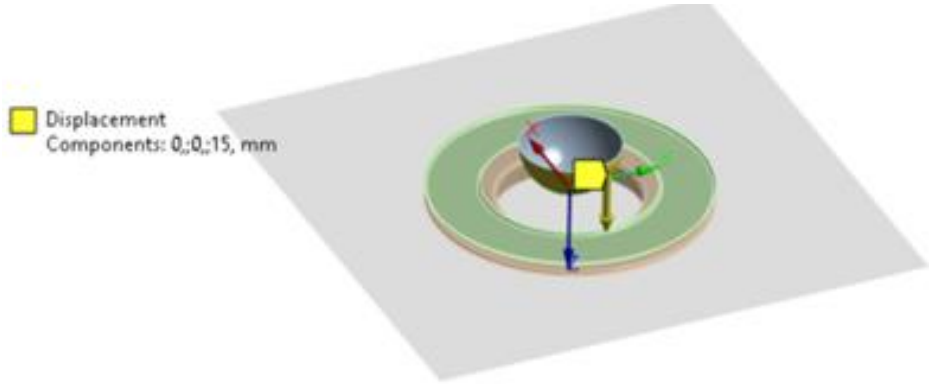
Şekil 4.33. Yüzey Etkileşimi Tanımlaması

Sabitlenmiş yüzeyler olarak alt ve üst tutucu yüzeyleri seçilmiştir test koşullarında hareketsiz olarak numuneyi kısıtlayıcı alanları oluşturan bu tutucu yüzeylere fixed support tanımlanmıştır. Sabitlenen yüzeyler Şekil 4.34.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Yüzey Sabitlemeleri

Zımba yüzeyine yer değiştirme komutu ile x ve y doğrularında 0 mm, z(hareket yönü) doğrultusunda 15 mm yer değiştirme tanımlanması Şekil 4.35.'teki gibidir.



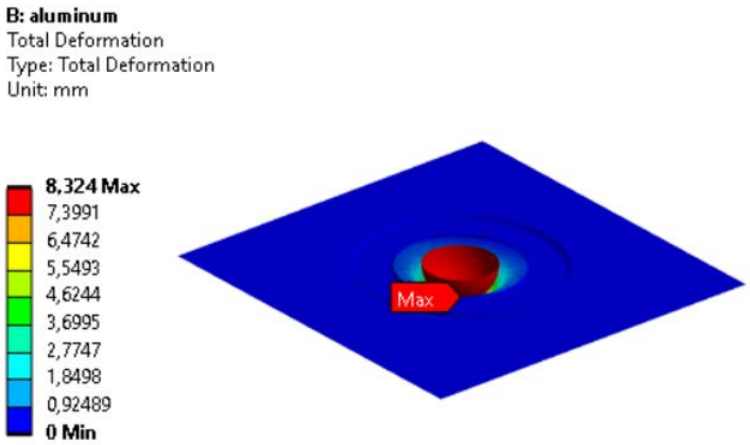
Şekil 4.35. Zımbanın Yer Değiştirme Tanımlaması

4.3.6. Gerilme ve Deformasyon Analizleri

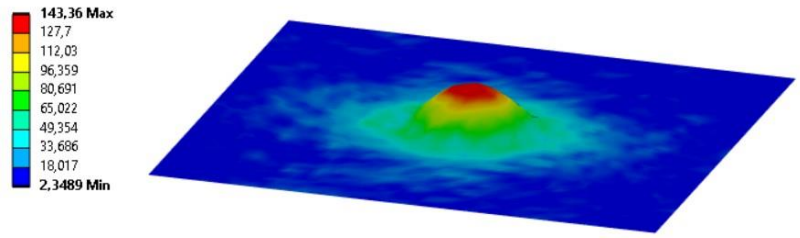
Analizlerin yürütülmesiyle elde edilen sonuçlar deformasyon miktarı stres değerleri açısından karşılaştırılarak test sonuçları ile kritik çekme akma sınırı üzerinde kırılma noktası değerlendirilmiştir.

4.3.6.1. Alüminyum Malzeme Analizleri

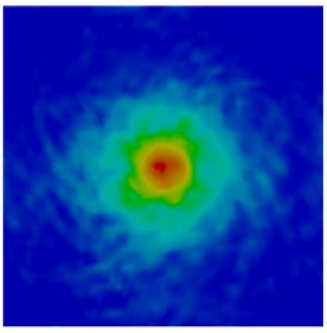
Deneyden elde edilen sonuçlara göre 8,3 mm zımba hareketinde oluşan kopmanın, analiz üzerindeki aynı değerdeki deformasyon ve stres değerleri Şekil 4.36. ve Şekil 4.37.'de paylaşılmıştır. Analiz çalışmasında oluşan gerilme dağılımı Şekil 4.38.'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.36. 8,3 mm Zımba Yer Değişimi Sonuçları

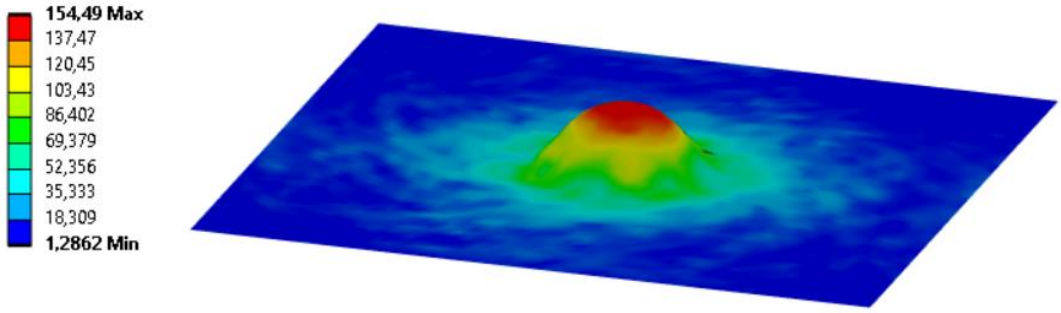


Şekil 4.37. 8,3 mm Zımba Yer Değişim Noktasındaki Eşdeğer Gerilmeler

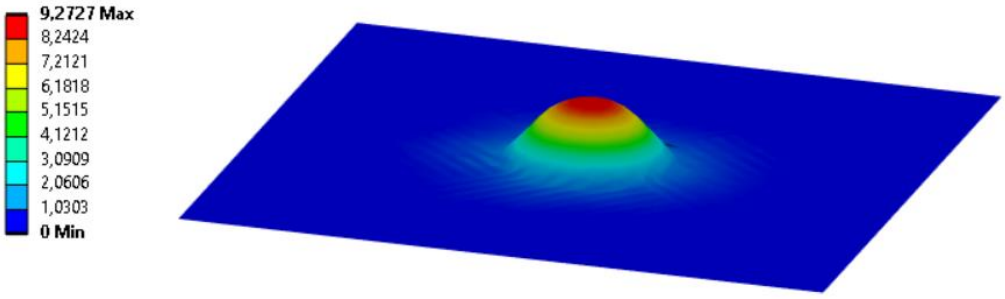


Şekil 4.38. Alüminyum Malzemenin Yüzey Üzerindeki Gerilme Yayılımı

Parçanın malzeme özelliklerinde yer alan kritik çekme akma değerine ulaşılan noktadaki zımbanın yer değişimi ve parçanın gerilme değerleri analiz sonuçları Şekil 4.39. ve Şekil 4.40.'taki gibidir.



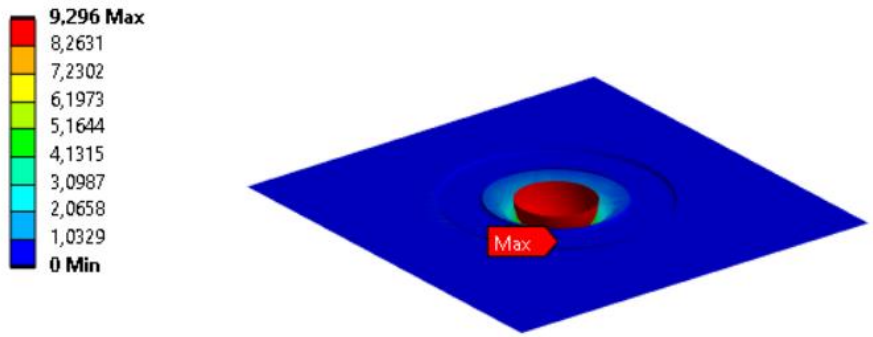
Şekil 4.39. Alüminyum Malzeme Kritik Çekme Akma Dayanımı Gerilme Değerleri



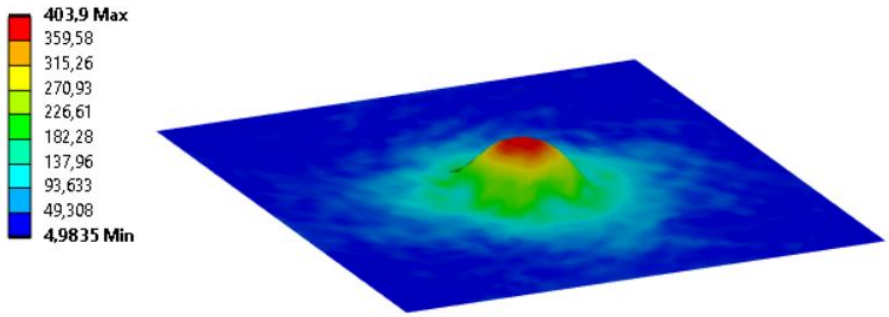
Şekil 4.40. Alüminyum Malzeme Kritik Gerilme Değerindeki Deformasyon

4.3.6.2. S235JR Çeliği Malzeme Analizleri

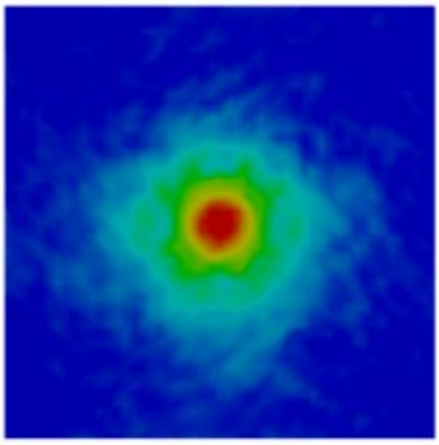
Deneyden elde edilen sonuçlara göre 9,2 mm zımba hareketinde oluşan kopmanın, analiz üzerindeki aynı değerdeki deformasyon ve stres değerleri Şekil 4.41. ve Şekil 4.42.'de paylaşılmıştır. Şekil 4.43.'te gerilme dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.41. S235JR 9,2 mm Zımba Yer Değişimi Sonuçları

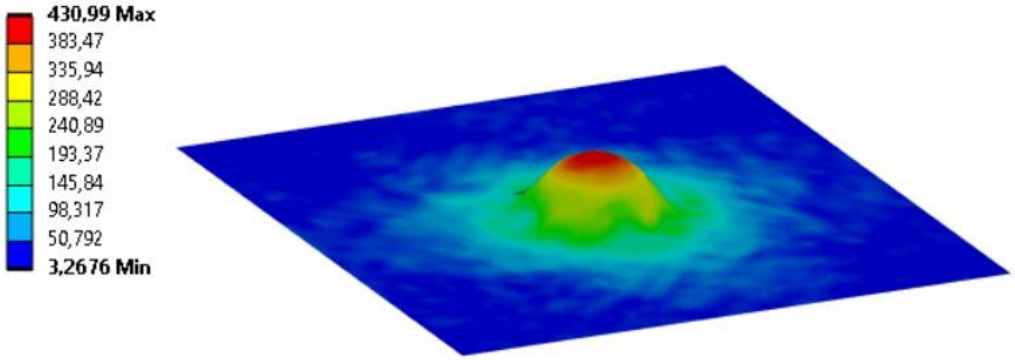


Şekil 4.42. S235JR 9,2 mm Zımba Yer Değişim Noktasındaki Eşdeğer Gerilmeler

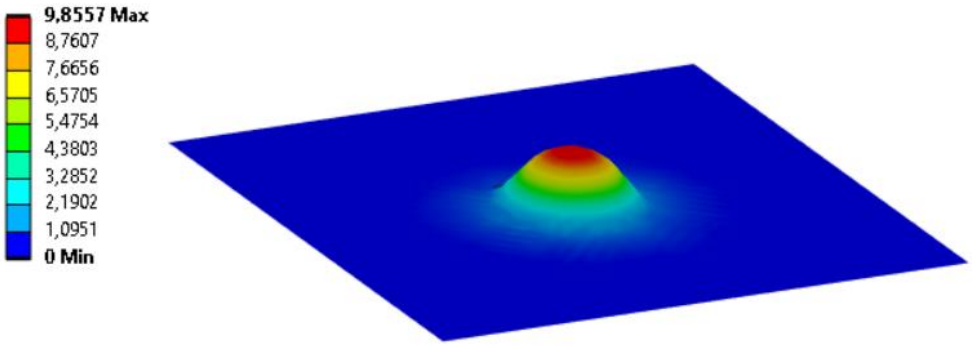


Şekil 4.43. S235JR Çelik Malzemenin Yüzey Üzerindeki Gerilme Yayılımı

Parçanın malzeme özelliklerinde yer alan kritik çekme akma değerine ulaşılan noktadaki zımbanın yer değişimi ve parçanın gerilme değerleri analiz sonuçları Şekil 4.44. ve Şekil 4.45.'teki gibidir.



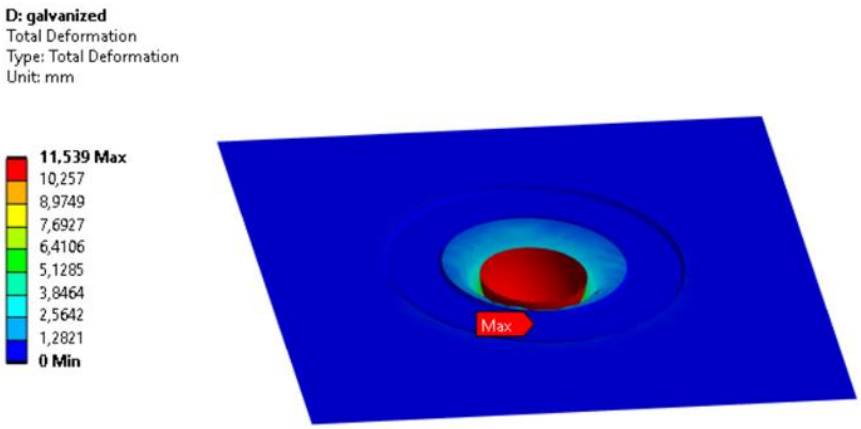
Şekil 4.44. S235JR Çelik Malzeme Kritik Çekme Akma Dayanımı Gerilme Değerleri



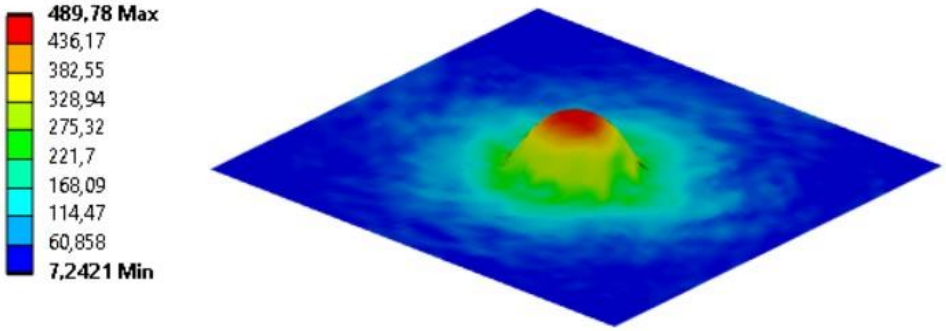
Şekil 4.45. S235JR Çelik Malzeme Kritik Gerilme Değerindeki Deformasyon

4.3.6.3. Galvaniz Çelik Malzeme Analizleri

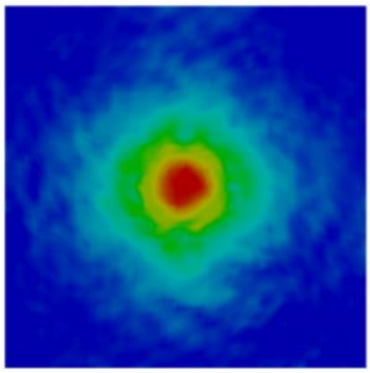
Deneyden elde edilen sonuçlara göre 11,5 mm zımba hareketinde oluşan kopmanın, analiz üzerindeki aynı değerdeki deformasyon ve stres değerleri Şekil 4.46. ve Şekil 4.47.'de paylaşılmıştır. Numune parçası üzerindeki gerilme değeri Şekil 4.48.'deki gibidir.



Şekil 4.46. 11,5 mm Zımba Yer Değişimi Sonuçları

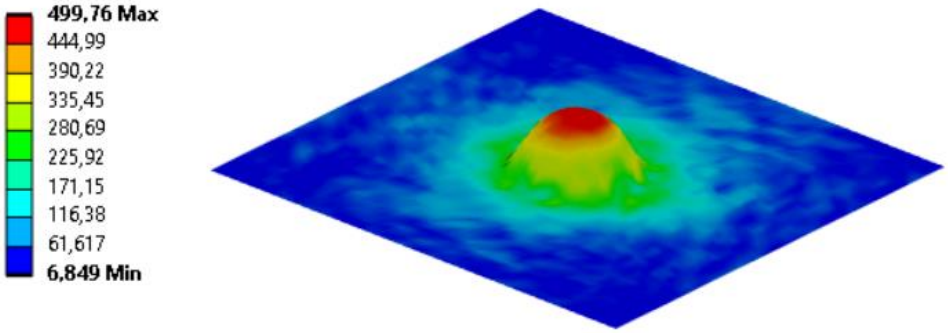


Şekil 4.47. 11,5 mm Zımba Yer Değişim Noktasındaki Eşdeğer Gerilmeler

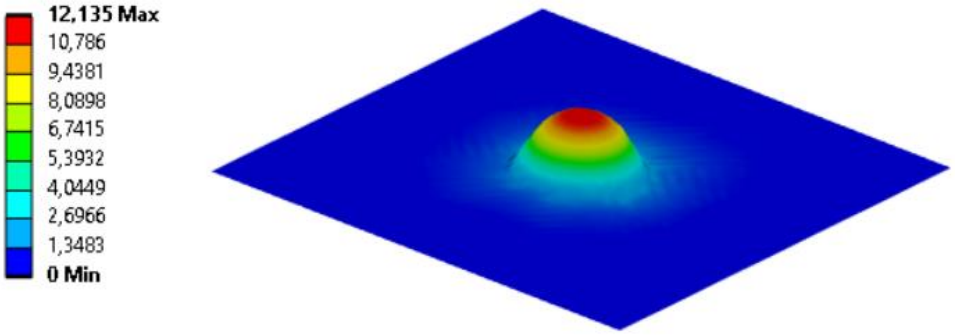


Şekil 4.48. Galvaniz Çelik Malzemenin Yüzey Üzerindeki Gerilme Yayılımı

Parçanın malzeme özelliklerinde yer alan kritik çekme akma değerine ulaşılan noktadaki zımbanın yer değişimi ve parçanın gerilme değerleri analiz sonuçları Şekil 4.49. ve Şekil 4.50.'deki gibidir.



Şekil 4.49. Galvaniz Çelik Malzeme Kritik Çekme Akma Dayanımı Gerilme Değerleri

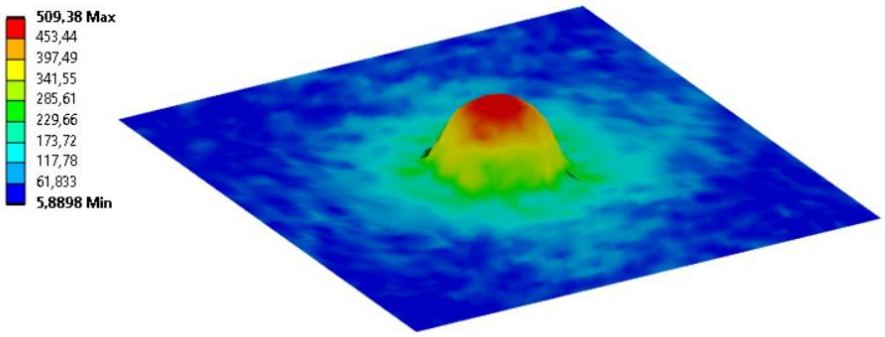


Şekil 4.50. Galvaniz Çelik Malzeme Kritik Gerilme Değerindeki Deformasyon

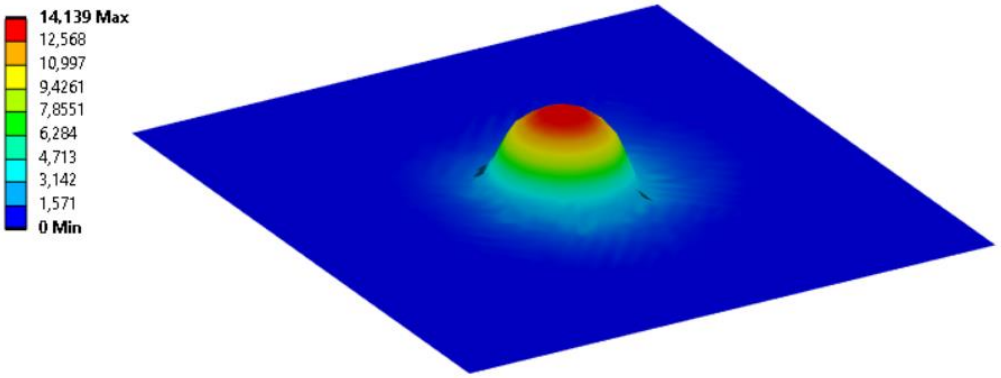
4.3.6.4. 304 Çelik Malzeme Analizleri

Deneyden elde edilen sonuçlara göre test cihazının maksimum ilerleme düzeyine gelindiği ve parça üzerinde bir çatlak gözlemlenmemiştir. En yüksek ilerleme mesafesi olarak 12,7 mm kadar ilerleyen zımba daha ileri noktaya ulaşamadığı için 304 paslanmaz çelik için Erichsen testi kopma değeri bulunamamıştır. İlgili malzeme için kopma noktasına ait değer analiz çalışması ile bulunmak istenmiştir. Önceki analiz

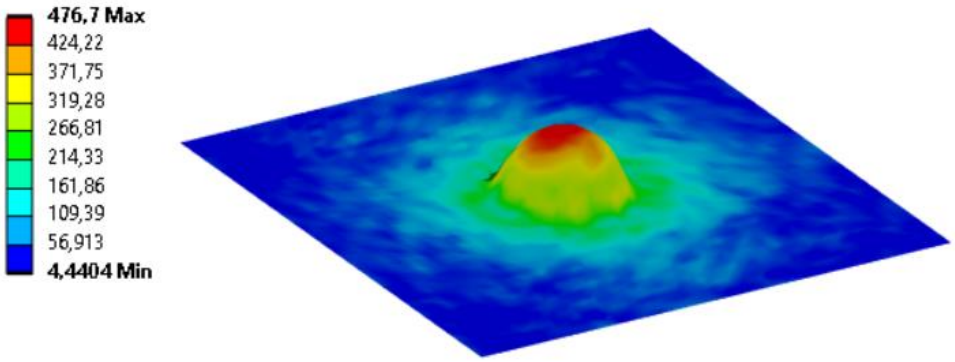
çalışmalarından yola çıkarak % 5,2 ve % 10,8 arasında deformasyon sapmaları oluştuğu gözlemlenmiştir. 304 çelik malzeme kritik çekme akma gerilme değerindeki gerilme ve deformasyon değerleri Şekil 4.51. ve 4.52.'de paylaşılmıştır. % 10,8 deformasyon sapmasına ait gerilme ve deformasyon sonuçları Şekil 4.53. ve Şekil 4.54.'te paylaşılmıştır.



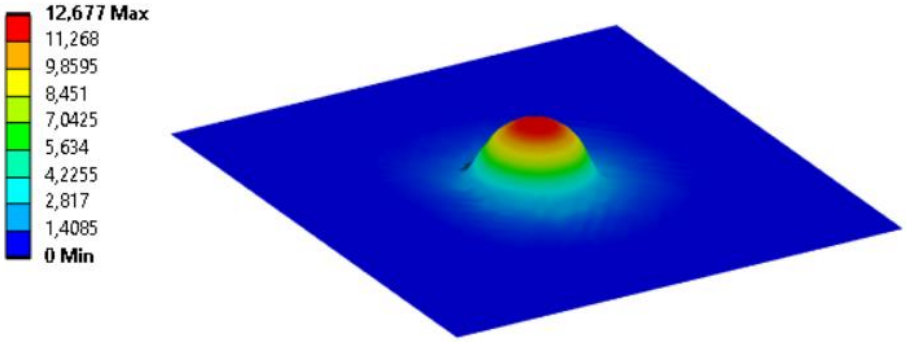
Şekil 4.51. 304 Çelik Kritik Çekme Akma Dayanımı Gerilme Sonuçları



Şekil 4.52. 304 Çelik Kritik Çekme Akma Dayanımı Deformasyon Sonuçları

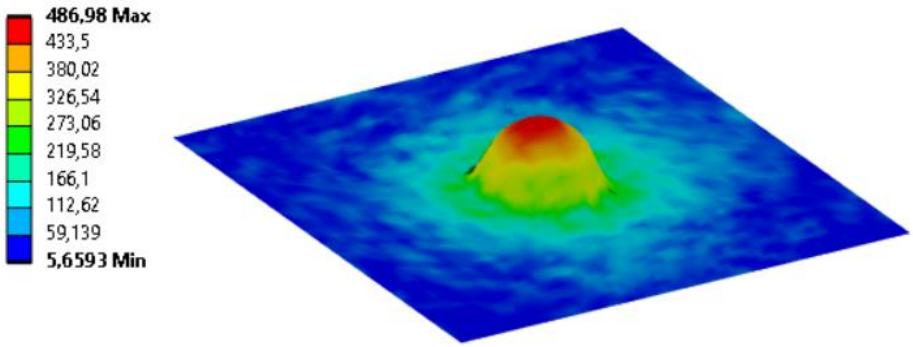


Şekil 4.53. 304 Çeliği % 10,8 Deformasyon Sapma Durumunda Gerilme Sonuçları

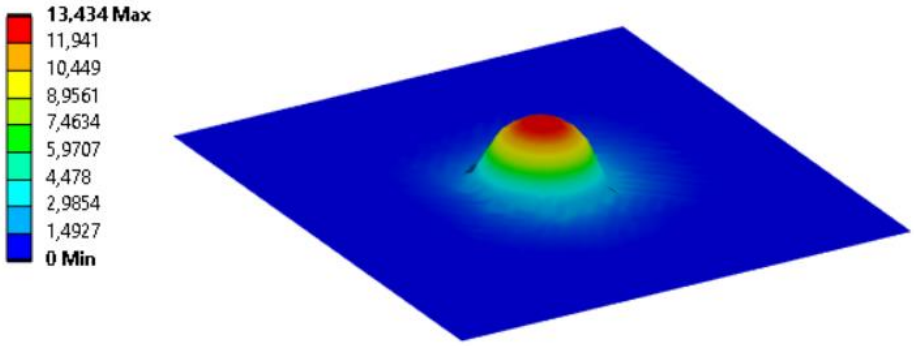


Şekil 4.54. 304 Çeliği % 10,8 Deformasyon Sapma Durumunda Deformasyon Sonuçları

% 5,2 deformasyon sapmasına ait gerilme ve deformasyon sonuçları Şekil 4.55. ve Şekil 4.56.'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.55. 304 Çeliği % 5,2 Deformasyon Sapma Durumunda Gerilme Sonuçları

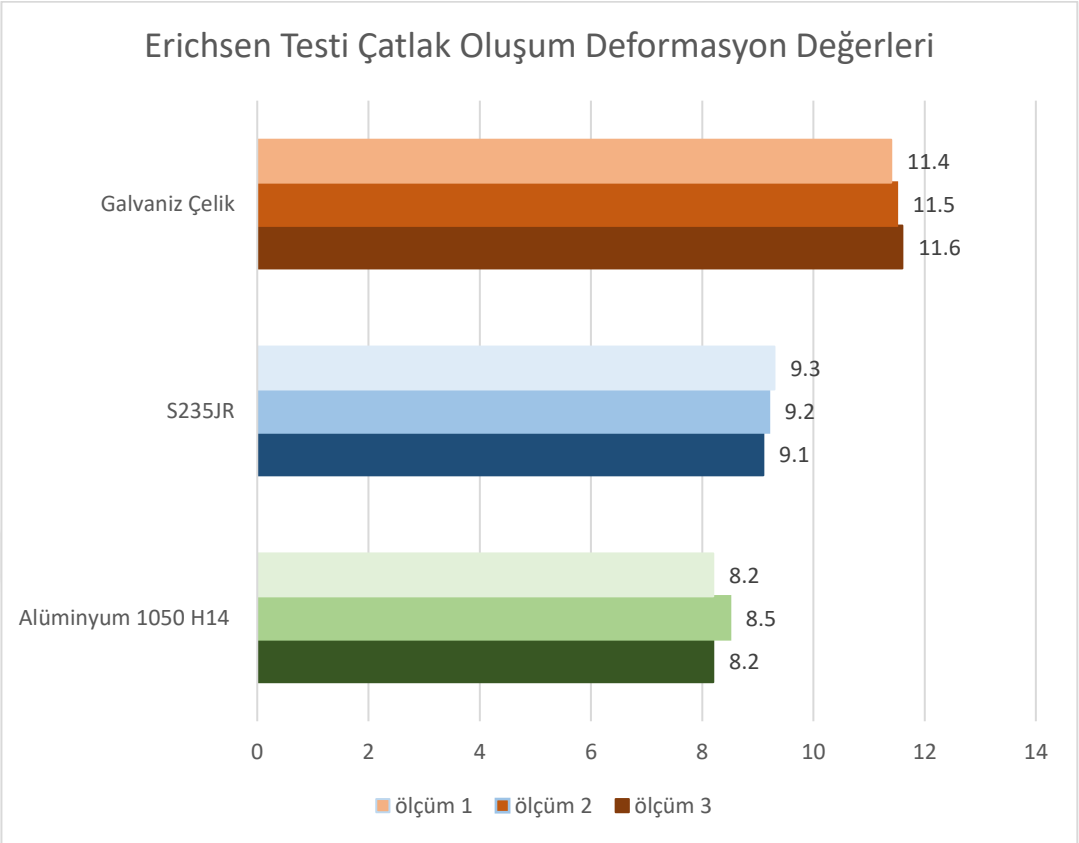


Şekil 4.56. 304 Çeliği % 5,2 Deformasyon Sapma Durumunda Deformasyon Sonuçları

4.4. Erichsen Test Sonuçları ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Gerçekleştirilen test ve bilgisayar destekli sonlu elemanlar metodu analizi sonuçları bu bölümde karşılaştırılacaktır. Test sonuçları Çizelge 4.4.'te paylaşılmıştır. 304 çeliği için gerçekleştirilen test sonuçları test cihazı zımba maksimum yer değiştirme miktarından fazla olduğu için bu bölümde sonuçların karşılaştırılması için değerlendirilebilir sonuçlara ulaşılamadığı için paylaşılmamıştır.

Çizelge 4.4. Erichsen Testi Zımba Yer Değiştirme Değerleri(mm biriminden)



Erichsen testinde her numuneden okunan 3 test sonucu için bulunan değerlerde çatlak oluşumunun oluştuğu deformasyon değeri galvaniz çelik için üç test değeri için 11,4 mm, 11,5 mm, 11,6 mm olarak okunmuş ve ortalama Erichsen deformasyon değeri 11,5 mm olarak gerçekleşmiştir. S235JR çeliği için okunun değerler 9,3 mm, 9,2 mm, 9,1 mm olarak gerçekleşmiş ve ortalama Erichsen deformasyon değeri 9,2 mm olarak hesaplanmıştır. Alüminyum 1050 için okunan Erichsen deformasyon değeri 8,2 mm, 8,5 mm, 8,2 mm olarak, ortalama 8,3 mm olarak gerçekleşmiştir.

Analiz çalışmasından elde edilen değerler Çizelge 4.5'te paylaşılmıştır. Analiz çalışmasından okunan ilk deformasyon değeri test çalışmalarında numunelerin çatlama noktasına ulaştığı değerlerin ortalaması alınarak analiz çalışmasında aynı deformasyon miktarındaki gerilme değerinin bulunması ile tabloda bulunan analizde ölçülen kopma gerilmesi ve analizde kopma gerilmesindeki zımba hareketi değerleri elde edilmiştir. Tabloda yer alan deney sonuçları ve analizde kopma gerilmesindeki zımba hareket mesafesi yüzde farkları son sütunda verilmiştir.

Çizelge 4.5. Analiz Sonucu Okunun Değerler ve Deney Sonuçları Karşılaştırması

	Analizde Ölçülen Kopma Gerilmesi (MPa)	Analizde Kopma Gerilmesindeki Zımba Hareketi (mm)	Deney Sonuçları (mm)	Analiz-Deney Fark (%)
Alüminyum 1050	154,49	9,27	8,32	10,8
S235JR	430,99	9,85	9,29	6,5
Galvaniz Çelik	499,76	12,13	11,53	5,2

Testlerde çatlak oluşumunun görüldüğü maksimum deformasyon ve analiz çalışması üzerinden okunan değerlere göre test öncesinde çatlak oluşumunun başlamasının beklendiği değerlerin karşılaştırma Çizelge 4.6.'da paylaşılmıştır.

Gerçekleştirilen test çalışması ve analiz çalışmasında elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında 3 farklı malzeme için test ve analiz arasında maksimum % 10,8, minimum % 5,2'lik fark oluşmuştur. Bu farklardan yola çıkarak test sonuçlarında değerlendirilebilir değerlere ulaşılamayan 304 çeliği için % 10,8 hata oranında 12,6 mm değerinde çatlak göstereceği ve % 5,2 sapma oranında 13,4 değerinde çatlama göstereceği hesaplanmıştır. 304 çeliği için analiz çalışmaları çıktısı olarak 12,6 mm-13,4 mm aralığındaki bir değerde çatlama göstereceği hesaplanmıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Erichsen yöntemi ile gerçekleştirilen testlerden ve bu testin bilgisayar destekli sonlu elemanlar metodu yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerden elde edilen analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1) Test sonuçlarından görüldüğü üzere numune malzemelerine ait akma dayanım değerlerine uygun olarak Erichsen testinde çatlak oluşumu deformasyon değerleri beklendiği gibi küçükten büyüğe alüminyum, S235JR, galvaniz çeliği ve 304 çeliği olarak gerçekleşmiştir.
2) Gerçekleştirilen çalışma sonucunda ekspilist çözüm yönteminin sacların hasar analizlerinde basarılı bir biçimde uygulanabileceği tespit edilmiştir.
3) Analiz çalışması ile sonlu elemanlar metodu temelli eksplisit bir çözüm yönteminin gerçek koşulların modellendiği bir simülasyonda maksimum % 10,8 hata payı ile hesaplanabildiği ve bu yöntemle Erichsen testinin sonuçlarının doğrulanabildiği ispatlanmıştır.
4) Eksplisit çözücülerin yüksek malzeme deformasyonuna sahip test yöntemlerinde kullanımının testin gerçekleştirilmeden önce analiz çalışmasının gerçekleştirilerek zaman, test, numune gibi maliyet kalemlerinde azalma gerçekleştirebilecek potansiyelde olduğu kanıtlanmıştır.
5) Aynı numune üzerinden alınan farklı ölçümler sayesinde makul tolerans aralığı içerisinde bulunan test sonuçları testin tutarlılığını kanıtlamıştır.
6) Çekme testi üzerinden okunan çekme akma değeri, kritik çekme akma değeri gibi malzemenin mekanik özelliklerini tanımlayan veriler doğrultusunda hazırlanan

sonlu elemanlar modelinin test verilerini doğrulayabilir sonuçlar verebildiği gösterilmiştir.

7) Özellikle metal şekillendirme yöntemlerinden kalıp ile metal şekillendirme yönteminde şekillendirilecek parçanın tasarım aşamasında maksimum deformasyon bölgelerinin belirlenmesi çatlak, yırtılma, kopma ve istenmeyen bozulmaların oluşmaması için üretilebilirliğin karar verilmesi aşamasında ihtiyaç duyulan ön verilerin oluşturulmasında kullanılabilir bir analiz modeli çalışma ile ortaya konmuştur.
8) Metal malzemelerin şekillendirilebilirlik açsından değerlendirilmesinde kullanılabilir bir analiz modeli olarak bu sonuçlar 4 farklı metal malzemenin ihtiyaç duyulan deformasyon kapasitesini gösteren değerler bulunmuştur.

Bu çalışmanın geliştirilmesi ve ilerletilmesi için öneriler;

1) Farklı metal malzemeler üzerine yapılacak Erichsen testleri ile gerçekleştirilen doğrulama analizleri gerçekleştirilerek malzemelerin şekillendirilebilirlikleri ile veri setleri oluşturulabilir.
2) Kalıp ile şekil verme yöntemi için kalıp tasarımları ve parçanın modellenmesi ile oluşturulacak kalıplama sürecinin simüle edilmesiyle parça üzerindeki yüksek gerilme değerlerinin sebep olabileceği hataların önceden analiz ile tespit edilmesi ve Erichsen test sonuçları ile karşılaştırılarak tasarım süreçlerindeki kararların alınabilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
3) Daha ileri seviye bir modelleme gerçekleştirmek ve Erichsen testinde muhtemel oluşabilecek kırılmanın başlangıç bölgesinin tespiti için hata bölgeleri tanımlanabilir, malzemeler için Johson-Cook modelleri çalışılarak hata bölgesi ile ilgili analiz modelleri oluşturulabilir.
4) Erichsen testi açısından farklı zımba hızları, yüzey yağlayıcılarının etkisi, farklı numune ölçülerinin sonuçlara etkisi, farklı zımba çapları ve numune kalınlıklarının ilgili testin sonuçlarını nasıl etkileyeceği üzerine çalışmalar gerçekleştirilebilir.

5) Simülasyon modeli farklı ağ yapıları, yüzey modellemeleri, sınır şartları arasındaki farklı kombinasyonlar ile tekrarlanarak sonuçlardaki sapma oranı düşürülebilir.

KAYNAKLAR

Ablat, M., & Qattawi, A. (2017). Numerical simulation of sheet metal forming: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, (1-4).

Akay, A. (2012). Cu ve Ti alaşımlandırılmış çinko levhalarda iç yapının şekillendirilebilirlik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Akrout, M., Amar, M., Chaker, C., & Dammak, F. (2008). Numerical and experimental study of the erichsen test for metal stamping. *Advences in Production Engineering&Management*, 2, 81-92.

Alıcı, İ. (2001). Derin çekme saclarının deformasyon davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Anket, O., Koruvatan, T., & Ay, İ. (2011). Sac malzemelerin şekillendirilmesinde şekillendirme sınır diyagramlarının kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.

Ansys LS-DYNA Crash Simulation Software. (2024, July 14). ANSYS. Erişim tarihi 15 Kasım 1994, https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna/

Balaban, G. (2012). A newton's method finite element algorithm for fluid-structure interaction. Yüksek Lisans Tezi, University of Oslo, Oslo.

Beer, F., Dewolf, J., Mazurek, D., & Russell, E. (2014). Mechanics of Materials. New York: McGraw-Hill Education.

Benson, J. (2009). The History of LS-DYNA. Lecture Notes Online Web Site. Erişim tarihi 2 Nisan 2006, https://www.d3view.com/wp-content/uploads/2007/06/benson.pdf

Bulge Test to ISO 16808. (2020, 5 Haziran). Zwick/Roell. Erişim tarihi 24 Temmuz 2001, https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/sheet-metal/forming/cupping-test/bulge-test-iso-16808/

Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: methods and applications. *In Proceedings of the 29th conference on Winter simulation*(pp. 118-126), IEEE Computer Society.

Civelek, F., & Özdemir, A. (2024). Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik kriterlerinin değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 27(4), 1617-1631.

Dutta, K. (2018). Different types and new applications of stainless steel. *Stainless Steel*, Vol. 62, No. 5, 86-91.

Gavrus, A., Banu, M., Ragneau, E., & Majer, C. (2010). An inverse analysis of the Erichsen test applied for the automatic identification of sheet materials behavior. *Engineering*, Vol.2, No.7, 471-476.

Gavrus, A., Banu, M., Ragneau, E., Maier, C., & Oleksik, V. (2008). An inverse analysis approach of the Erichsen test starting from a finite element model. *International Journal of Material Forming*, 1:5-8.

Gül, K. (2010). Nanoindentasyon deneyi ile malzeme davranışlarını inceleme sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu ve tersinir davranış tanımlama. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Güler, Ş. (2023). Elektrik ark sprey tekniği ile alüminyum kaplanmış 7020 alüminyum alaşımının darbeli aşınma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

Hongmeı, H., Yang, T., Ren, Y., Peng, Y., Xue, S., & Zheng, L. (2022). Experimental investigation on the formability of Al-Mg alloy 5052 sheet by tensile and cupping test. *Journals Materials,* Volume:15.

Hüner, Ü., İrsel, G., Bekar, U., & Szala, M. (2025). A comprehensive case study to the implicit and explicit approach in finite element analysis. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(2):407-417

Hyun, C., Kim, M., Choi, S., & Shin, S. (2018). Crystal plasticity FEM study of twinning and slip in a Mg single crystal by Erichsen test. *Acta Materialia*, Volume 156, 342-355.

Ispartalı, H. (2017). AISI 4140 çeliğinin sıcak daldırma galvaniz çinko lamelli ve elektro galvaniz kaplama uygulaması sonrasında mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Jurendic, S., & Silvia, S. (2011). Deep drawing simulation of α-titanium alloys using LS-Dyna. *8th European ls-dyna Conference*, Session:14/Paper:5.

Kocanda, A., & Jasinski, C. (2016). Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(2):211-216

Lai, B., & Bathe, K. (2016). The method of finite spheres in three-dimensional linear static analysis. *Computers and Structure*, 173, 161-173.

Lakes, R., & Wojciechowski, K. (2008). Negative compressibility, negative Poisson's ratio, and stability. *Physica Status Solidi*, 3 (245): 545-551.

Marciniak, J., Hu, S., & Duncan, Z. (2002). Mechanics of Sheet Metal Forming. London: Butterworth-Heinemann.

Nawawi, I. (2009). Finite element modeling of Erichsen Olsen sheet metal formability test. Yüksek Lisans Tezi, University Malaysia, Pahang.

Nuri, Ş. N. (2018). Malzemenin şekillendirilmesinde değişken baskı plakası kuvveti etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 1295-1304.

Oleksik, V., Gavrus, A., Paunoiu, V., & Bologa, O. (2009). Experimental and finite element analysis of Erichsen test application to identification of sheet metallic material behaviour. *Technologies In Machine Building*, ISSN 1221- 4566.

Özçelik, G. (2008). Derin çekme işleminin simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

Özdilli, Ö. (2018). Polimer kaplı metal sacların derin çekme davranışının incelenmesi. Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi, Çorum.

Perkasa, R., Gunawan, L., & Santaso, S. (2023). Mechanical anisotropy of cold-rolled st-37 steel plate under high strain rates loadings. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, 4(2):198-211.

Pothina, H., Kallur, N., & Chandan, K. (2022). Finite element method-based artificial neural network. *ICT Analysis and Applications*, 755-768.

Reddy, M., Theja, M., & Tilak, G. (2013). Modified Erichsen cupping test for copper, brass, aluminium and stainless steel. *The SIJ Transactions on Industrial*, 1(2) : 52-57.

Sheet metal market outlook (2023 to 2033). (2012, 5 Aralık). Future Market Insight. Erişim tarihi 4 Nisan 2012, https://www.futuremarketinsights.com/reports/editor-app-market

Şener, B. (2012). Otomotiv sektöründe kullanılan derin çekme saclarının şekillendirilebilirliğinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Şükür, F. (2014). AL 5754 sac malzemenin ılık sıcaklıklardaki akma eğrilerinin şişirme deneyiyle belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Talapatra, A., Choudhary, V., Malhotra, K., Vyas, M., Jamal, A., & Singhi, M. (2013). Formability characteristics of different sheet metals by Erichsen cuppıng testing with Ndt method. *I-manager's Journal on Material Science*, 1(1):14-18.

Time integration methods for implicit and explicit FEA. (2022, 10 Şubat). Fidelis Engineering Associates. Erişim tarihi 1 Ekim 2019, https://www.fidelisfea.com/post/time-integration-methods-for-implicit-and-explicit-fea-what-are-they-and-how-do-they-work

What is Explicit Dynamics in Ansys ?. (2019, 9 Temmuz). Mechead. Erişim Tarihi 11 Kasım 2017, *https://www.mechead.com/what-is-explicit-dynamics-in-ansys/*

Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., & Korkmaz, A. (2021). Alüminyum döküm alaşımlarına dair son yıllardaki akademik ve endüstriyel gelişmelere genel bakış ve değerlendirme. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 26, Sayı 3.

Yıldız, H. (2010). Isı değiştiricilerinde kullanmak için genişletilmiş yüzeyli oval (slot) formunda helis boru imalatı. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Yılmaz, Ç. (2022). Tam otomasyonlu Erichsen şişirme testi donanımının tasarımı imalatı ve farklı koşullar için denenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Zhang, F., Cai, Y., Zhang, Y., & Li, M. (2013). Springback compensation method for doubly curved plate in multi-point forming. *Materials and Design*, 47, 377-385.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Lüleburgaz/Kırklareli'de tamamlamıştır. 2018 yılında Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne başlamıştır ve 2022 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2023 yılında Bosch Siemens Ev Aletleri Çerkezköy/Tekirdağ fabrikasında çalışmaya başlamıştır.