



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**PLASTİSİTE MODELLERİNİN SAC METAL
FORMLAMA SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ
ÜZERİNE ETKİLERİNİN TESPİTİ**

**Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER**

**BİLECİK, 2019
Ref. No: 10275091**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

BİLECİK

ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**PLASTİSİTE MODELLERİNİN SAC METAL
FORMLAMA SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ
ÜZERİNE ETKİLERİNİN TESPİTİ**

**Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

BİLECİK

SEYH EDEBALI UNIVERSITY

**Graduate School of Sciences
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

**DETERMINING PLASTICITY MODEL EFFECTS ON
FINITE ELEMENT ANALYSIS IN SHEET METAL
FORMING PROCESSES**

**Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Asst. Prof. Dr. Emre ESENER**

BİLECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 10/07/2019 tarih ve 36/02 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 25/07/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY'un "Plastisite Modellerinin Sac Metal Formlama Sonlu Elemanlar Analizleri Üzerine Etkilerinin Tespiti" başlıklı tez çalışması Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Osman Hamdi METE

ÜYE : Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİR

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
..... tarih ve sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini eksiksiz bir şekilde paylaşarak bana her zaman destek veren, beni her konuda yönlendiren, tez çalışmam süresince büyük bir sabırla beni motive eden değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca sonsuz bir sabır ile bana destek olan değerli eşim Mehmet GÜRSOY'a, hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

.../.../2019

Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY

PLASTİSİTE MODELLERİNİN SAC METAL FORMLAMA SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN TESPİTİ

ÖZET

Sac metaller ağırlık/dayanım oranlarından ötürü başta otomotiv olmak üzere pek çok sektörde tercih edilmektedirler. İnce malzemelerle çalışıldığından ve karmaşık ürün formları hedeflendiğinden sac metal şekillendirme prosesleri genelde karmaşık prosesler olarak bilinmektedir. Çoğunlukla seri üretim ürünü olarak tercih edilmelerinden dolayı sac metal kalıp takımları oldukça pahalıdır. Bu nedenle kalıp takımlarının tasarım aşamasında telafi edilme zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu amaçla en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizidir. Sonlu elemanlar analizlerinin ise tahmin hassasiyetlerinin yüksek olması gerekmektedir. Hassasiyete etki eden en baskın parametre ise malzemelerin plastik davranışının tanımlandığı malzeme modelleridir. Yapılan tez çalışmasında sonlu elemanlar malzeme modellerinin tahmin performansına etkisi incelenmiş olup bu amaçla derin çekme, kare kutu çekme ve V-kalıpta eğme prosesleri 4 farklı malzeme (DP600, DP980, DC05, AA5754) için incelenmiştir. Çalışmada izotropik malzeme-izotropik pekleşme kabulü yapan (Power Law), anizotropik malzeme-izotropik pekleşme kabullü yapan (Hill-48, Barlat-89) ve anizotropik malzeme - kinematik pekleşme kabullü yapan (Yoshida - Uemori) dört farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon sonrasında sonuçlar deneysel veriler ile kıyaslanarak sonlu elemanlar tahmin performansları ortaya konulmuştur. En hassas tahminlerin tüm modellerde kinematik pekleşme kabullü yapan malzeme modeli ile elde edildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme; Sonlu Elemanlar Analizi; Plastisite Modelleme; Mekanik Özellik.

DETERMINING PLASTICITY MODEL EFFECTS ON FINITE ELEMENT ANALYSIS IN SHEET METAL FORMING PROCESSES

ABSTRACT

Sheet metals have a wide usage area due to their weight to strength ratios especially in automotive industry. Sheet metal forming processes can be described as complex manufacturing processes for working with thin materials by complex product forms, and die tools are expensive since sheet metal forming processes are in use at mass production. Therefore, sheet metal die tools must be compensate in design stages. Today, finite element analysis (FEA) are in use widely for this purpose. However, prediction performance of FEAs must be accurate. Material models which defines the plastic behavior of the materials effects the accuracy significantly. In this study, the effect of material models on finite element analysis prediction performance was investigated for this purpose deep drawing, square cup drawing, and V-die bending processes were studied using 4 different materials (DP600, DP980, DC05, AA5854). In the study, material models are used as isotropic material-isotropic hardening assumption (Power Law), anisotropic material-isotropic hardening assumption (Hill-48, Barlat-89), and anisotropic material-kinematic hardening assumption (Yoshida-Uemori). Each process was simulated using 4 different material models, than simulation results were compared with experimental studies. The most accurate results were obtained with kinematic hardening material model for all processes.

Key Words: Sheet Metal Forming; Finite Element Analysis; Plasticity Modelling; Mechanical Property.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR	
BEYANNAME	
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	IVII
SİMGELER ve KISALTMALAR	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	4
2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME	5
2.1. Derin Çekme	17
2.2. V Kalıpta Eğme	19
2.3. Kare Kutu Çekme.....	20
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	22
4. PLASTİSİTE MODELLEME.....	28
5. UYGULAMA ÇALIŞMALARI	39
5.1. Malzeme Karakterizasyonu	39
5.2. Literatür Uygulamaları	41
6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR	54
ÖZ GEÇMİŞ.....	

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Plastik şekil verme yöntemlerinin sınıflandırılması.....	1
Şekil 1.2. Bir otomobilde aranan özellikler	2
Şekil 1.3. Otomotiv sektöründe kullanılan çelik malzemelerin dayanım-uzama açısından karşılaştırılması	3
Şekil 1.4. Aynı aracın farklı yıllarda üretilen modellerine ait malzeme dağılımı: (a) 2002 model, (b) 2014 model.	3
Şekil 2.1. Sac metal şekillendirmeyi etkileyen parametreler	5
Şekil 2.2. Kesme kenarları arasındaki sac metalin kesilme aşamaları.	6
Şekil 2.3. (a) Sac metalin bükülmesi, (b) Bükme esnasında sac metalde meydana gelen gerilmeler	6
Şekil 2.4. (a) Germe, (b) Derin çekme	6
Şekil 2.5. Mekanik pres ve ana elemanları.....	7
Şekil 2.6. Mekanik ve hidrolik presler, (a) 200 ton mekanik pres, (b) 80 ton hidrolik pres 8	
Şekil 2.7. Sac metal şekillendirmede kullanılan örnek bir çekme kalıp takımı	9
Şekil 2.8. Şekillendirme sonrası sac metalde meydana gelen yırtılma örneği	11
Şekil 2.9. Çamaşır makinesine ait bir sacda meydana gelen kırışıklık	12
Şekil 2.10. Derin çekme sonrası paslanmaz çelikte meydana gelen kulaklanma.....	12
Şekil 2.11. Şekillendirme sonrası sac metalde meydana gelen geri esneme.....	13
Şekil 2.12. Şekillendirme sonrası elde edilen nihai ürün ve geri esneme miktarı.....	13
Şekil 2.13. Otomobile ait çamurluk sacının üretiminde karşılaşılan şekil bozukluğu sonrası elde edilen ürün.....	14
Şekil 2.14. Pozitif ve negatif minor uzama bölgeleri	14
Şekil 2.15. Şekillendirme sınır diyagramında güvenli bölge sınırları	15
Şekil 2.16. Şekillendirme sınır diyagram örneği.....	16
Şekil 2.17. Derin çekme yöntemi ile üretilmiş örnek parçalar	17
Şekil 2.18. (a) Sac açınımı, (b) Derin çekme ile elde edilen ürün.....	17
Şekil 2.19. Derin çekme işleminin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.20. (a) 3 boyutlu V kalıpta eğme kalıbı, (b) V kalıpta eğme işleminde kullanılan örnek kalıp resmi	19

Şekil 2.21. Hidrolik abkantta kullanılan V eğme kalıbı	20
Şekil 2.22. Kare kutu çekme kalıp takımları.	20
Şekil 2.23. Kare kutu çekmede kullanılan örnek kalıp takımları.	21
Şekil 3.1. (a) Örnek model, (b) Elemanlara ayrılmış sonlu elemanlar modeli.....	22
Şekil 3.2. Sonlu elemanlar analizi yapılmış araç gövdeleri.....	23
Şekil 3.3. Otomotiv parçalarına uygulanan sonlu elemanlar analizi.....	23
Şekil 3.4. Örnek sonlu elemanlar akış diyagramı.....	26
Şekil 4.1. Çekme deneyi ve deney sonrası elde edilen kuvvet-uzama grafiğine göre çekme eğrisinin şematik görünümü.....	28
Şekil 4.2. Örnek gerilme-gerinim grafiği	29
Şekil 4.3. İzotropik pekleşme durumu şematik gösterimi	32
Şekil 4.4. Kinematik pekleşme durumu şematik gösterimi.....	32
Şekil 4.5. Asal gerilme düzleminde Tresca ve von Mises akma kriterlerine ait akma yüzeyleri.....	34
Şekil 4.6. Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modelinin şematik gösterimi	36
Şekil 4.7. Sınır yüzeyinin şekil ve konum değiştirme durumunun şematik gösterimi.	37
Şekil 4.8. Yoshida nonlinear kinematik pekleşme modeli ile malzeme davranışının tahmini.....	37
Şekil 5.1. Tek eksenli çekme cihazı	40
Şekil 5.2. Derin çekme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı.....	43
Şekil 5.3. DP600 ve DP980 malzemelerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen LÇO değerlerinin karşılaştırılması.	44
Şekil 5.4. DP600 malzemesinde Yoshida-Uemori plastisite modeli uygulandıktan sonra meydana gelen von Mises gerilme dağılımı.....	44
Şekil 5.5. DP980 malzemesinde Yoshida-Uemori plastisite modeli uygulandıktan sonra meydana gelen von Mises gerilme dağılımı.....	45
Şekil 5.6. Kare kutu çekme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı.....	46
Şekil 5.7. Kare kutu çekme prosesi için sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliğinin tespiti.	47
Şekil 5.8. AA5754 malzemesinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırılması.....	47

Şekil 5.9. V-kalıpta eğme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı.....	49
Şekil 5.10. DP600 ve DC05 malzemesinin deneysel ve sonlu elemanlar sonucu elde edilen geri esneme açılarının karşılaştırılması.	50
Şekil 5.11. Barlat-89 modelinin DC05 malzemesi için gerçekleştirdiği başarısız tahminde gözlemlenen form hataları.....	50

ÇİZELGELER DİZİNİ**Sayfa No**

Çizelge 2.1. Mekanik ve hidrolik preslerin karşılaştırılması.	8
Çizelge 2.2. Derin çekme işlemi için gerekli temel faktörler.	19
Çizelge 5.1. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin malzeme modellerine göre mekanik özellikleri	41
Çizelge 5.2. Derin çekme simülasyonu hesaplama parametreleri.	43
Çizelge 5.3. Kare kutu çekme simülasyonu hesaplama parametreleri.....	46
Çizelge 5.4. V-kalıpta eğme simülasyonu hesaplama parametreleri.	49

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

a,c,h: Anizotropi katsayısına bağlı parametreler

α : Geri esneme açısı

α_b : Bükme esnasındaki açı

α_s : Bükme kuvveti ortadan kaldırıldığında meydana gelen açı

α' : Bükme açısı

B, c, R_{sat} , K, b, h: Yoshida-Uemori malzeme model parametreleri

D_b : Sac açınım çapı

D_p : Derin çekilen parça çapı

D_s : Sac açınım çapı

D_z : Zımba çapı

ϵ_1 : Majör birim şekil değiştirme oranı

ϵ_2 : Minör birim şekil değiştirme oranı

ϵ_{ij} : Deviatorik gerilme tensörü

ϵ_p : Plastik gerinim

F: Çekme kuvveti

σ : Gerilme

σ_y : Akma gerilmesi

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal gerilmeler

$\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$: Kayma akma gerilmesi

K: Mukavemet katsayısı

m: Kristal yapı üsteli

n: Pekleşme üsteli

O: Akma yüzeyi merkez noktası

R: Bükme yarıçapı

R_b : Bükme esnasındaki yarıçap

R_s : Bükme kuvveti ortadan kaldırıldığında meydana gelen bükme yarıçapı

ΔR : Düzlemsel anizotropi

w: Bükme işleminde kullanılan sacın genişliği

t: Bükme işleminde kullanılan sacın kalınlığı

Kısaltmalar

AHSS: Gelişmiş yüksek mukavemetli çelik

CO₂: Karbondioksit

DC: Konvansiyonel çelikler

DP: Çift fazlı çelik

HSS: Yüksek mukavemetli çelik

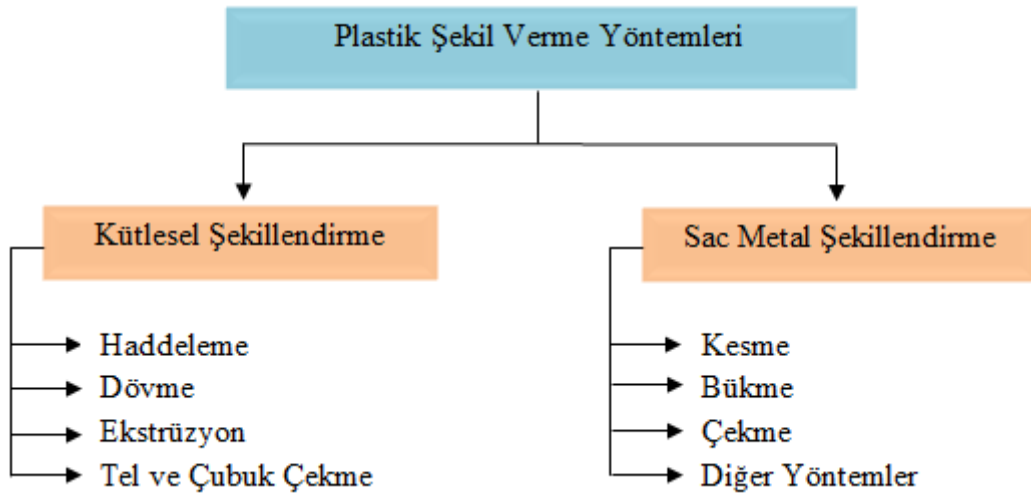
LÇO: Limit çekme oranı

ŞSD: Şekillendirme sınır diyagramı

1. GİRİŞ

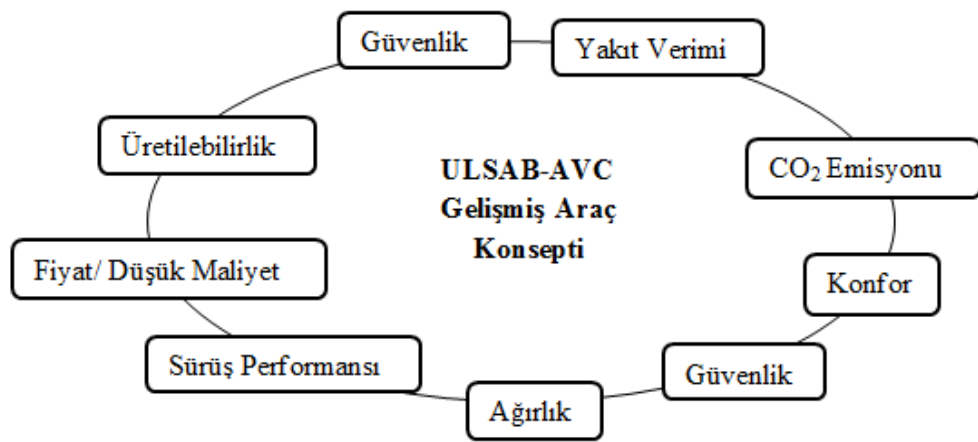
Plastik şekil verme yöntemi, metal malzemelere katı formda ve hacimleri değişmeyecek şekilde uygulanan bir kalıcı şekillendirme prosesidir. Bu süreçte metallerin kristal yapı özellikleri aynen korunmalı ve kırılma kopma gibi deformasyonlar olmadan kalıcı şekillendirme esas alınmalıdır. Plastik şekil verme yöntemlerinde kalıplardan yararlanılmaktadır. Parça geometrisi oldukça karmaşık olan ürünlerin kalıpları da karmaşık olmaktadır. İstenilen formun süreksizlik yaratmadan saca verilebilmesi için malzeme özelliklerine ek olarak ne kadar kuvvet ve enerji gerektiğinin de belirlenmesi gerekmektedir.

Plastik şekil verme yöntemleri, kütleli ve sac şekillendirme olarak iki ayrı bölümde incelenmektedir. Kütleli şekillendirmede malzeme, üç yönde de çalışma uzayında şekil değişimine uğramaktadır. Kütleli şekillendirme yöntemlerinde “yüzey alanı / hacim” oranı düşüktür. Sac şekillendirmede ise şekillendirme genellikle 5 mm’den daha ince malzemeler olarak tanımlanan saclara verilmektedir. Sac malzemelerde boyutsal olarak genişlik ve boy değerleri kalınlığa göre daha baskın olduğundan kalınlık yönündeki gerilmeler sac metal şekillendirmede genellikle ihmal edilmektedir. Bu durumda proses, bir düzlem gerilme problemine dönüşmüş olur. Sac şekillendirme işlemlerini belirleyen diğer ölçüt ise oldukça yüksek olan parçanın yüzey alanı/ hacim oranıdır. Plastik şekil verme yöntemleri Şekil 1.1’deki gibi gruplandırılmıştır (Demirkol, 2010).



Şekil 1.1. Plastik şekil verme yöntemlerinin sınıflandırılması.

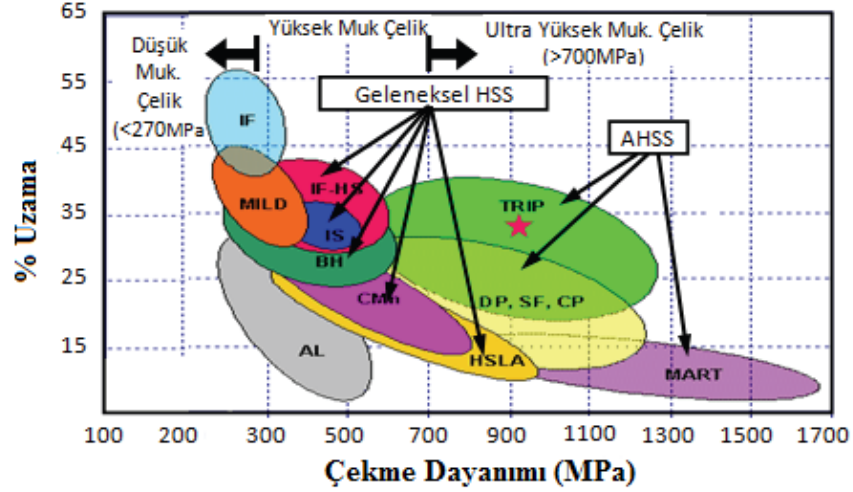
Sac metal malzemeler ağırlık / dayanım oranı iyi malzemeler olmasından dolayı başta havacılık ve otomotiv endüstrileri olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Otomotiv sektörü incelendiğinde aracın gövde parçalarında ve ana taşıyıcı elemanlarında kullanılan sac metal sayısının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu sektörde taşıt ağırlığının azaltılması ile yakıt tüketimi ve egzoz emisyonu düşmektedir. Otomotiv endüstrisi için üretimde gelişmiş araç konsepti çerçevesinde en önemli unsurlar Şekil 1.2’de verilmiştir (Hayat, 2010).



Şekil 1.2. Bir otomobilde aranan özellikler (Hayat, 2010).

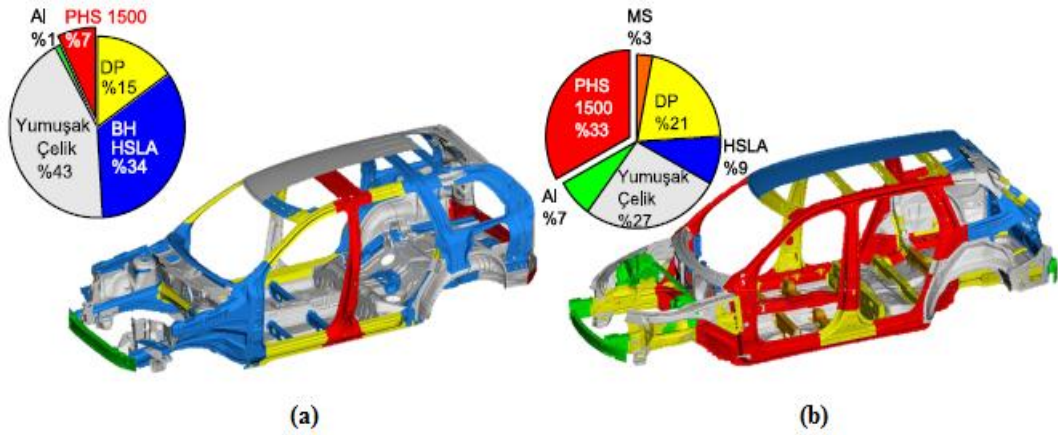
Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere bir araçtan öncelikle beklenenler güvenli olması, yakıt tüketiminin az olması, yakıt verimliliğinin yüksek olması ve ekonomik olmasıdır. Beklenen bu ana isteklerin yanında CO₂ emisyonu, otomobilin ağırlığı, sürüş performansı, konfor, maliyet/ fiyat ilişkisi büyük önem taşımaktadır. Yolcu güvenlik standartlarının artması, çevreye zararlı gaz salınımının azalmasının istenilmesi (emisyon oranları), sektörü hem hafif hem de istenilen yolcu güvenlik standartlarını sağlayabilecek malzeme arayışına itmiştir. Bu istekler gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (Advanced High Strength Steels/ AHSS) konusunun daha çok araştırılmasına ve geliştirilmesine yol açmıştır. Yeni nesil çelikler, otomotiv sanayisinde 1990’ların sonundan itibaren yaygın bir şekilde kullanılması ile malzeme kalınlıkları ve araç ağırlıkları azaltılmaktadır (Sezgin, 2017). Yeni nesil çelikler yüksek mukavemetli ve şekil alabilirliği düşük olmalarından dolayı bu çeliklerle çalışmak oldukça zordur.

Otomotiv endüstrisinde farklı çelik türleri kullanılmaktadır. Otomobil sektöründe kullanılan çeliklerin çekme dayanımı ve % uzama oranları Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Otomotiv sektöründe kullanılan çelik malzemelerin dayanım-uzama açısından karşılaştırılması (Hayat, 2010).

Bir aracın farklı yıllarda üretilen modellerinde kullanılan yeni nesil çeliklerin, konvansiyonel çeliklerin ve demir dışı malzemelerin kullanıldığı parçaların dağılımı Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Aynı aracın farklı yıllarda üretilen modellerine ait malzeme dağılımı: (a) 2002 model, (b) 2014 model (Billur vd., 2016).

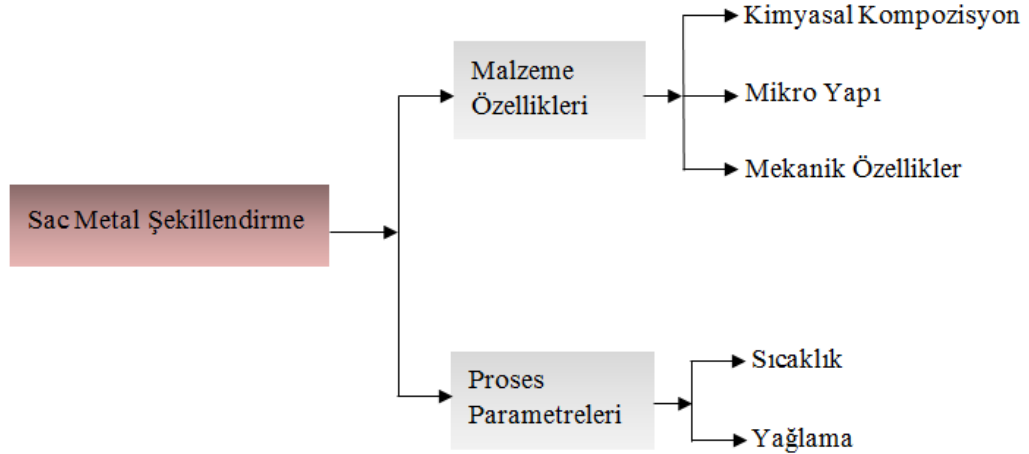
1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, sac metal şekillendirme proseslerinde sonlu elemanlar analizi tahmin performansına plastisite modellerinin etkisini tespit etmektir. Bu doğrultuda yüksek mukavemetli çelik grubundan DP600 ve DP980, konvansiyonel çeliklerden DC05 ve demir dışı metal grubundan AA5754 alaşımı malzeme olarak kullanılmıştır. Proses olarak ise sac metal benzetim testlerinden derin çekme, kare kutu çekme ve V kalıpta eğme yöntemleri kullanılmıştır. Belirtilen malzemeler ve proseslere ait sonlu elemanlar modelleri dört farklı plastisite modeli ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori plastisite modelleri kullanılmıştır. Her bir proses, malzemeler ve plastisite modelleri açısından değerlendirilmiş ve en hassas sonucun elde edildiği plastisite modeli tespit edilmiştir.

2. SAC METAL ŞEKİLLENDİRME

Sac metaller genel olarak metallerin haddeleme işlemi sonrasında kalınlığı 0,2 mm ile 5 mm arasında olan malzemeler olarak adlandırılır. Sac metal şekillendirme işlemleri genellikle soğuk şekil verme işlemi olarak gerçekleşmektedir (Karataş, 2009). Sac metal şekillendirme işlemlerinin ticari açıdan önemi büyüktür. Beyaz eşya, otomotiv, havacılık sektörlerinde kullanılan birçok parça yassı yarı mamullerin (sac veya levha) şekillendirilmesi sonucunda imal edilmektedir. Kalınlığı 0,15 mm'yi geçmeyen çok ince metal levhalar folyo, 0,2 – 5 mm arasındaki ürünler sac metal, 5 mm'den büyük malzemeler ise levha olarak adlandırılmaktadır (Demirkol, 2010).

Sac metaller ince malzemelerdir ve ürün geometrileri oldukça karmaşıktır. Bu sebepten dolayı sac metallere şekil vermek oldukça zordur ve çeşitli problemlerle karşılaşmaktadır. Karşılaşılan problemlerde şekillendirmeyi etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Sac metal şekillendirmeyi etkileyen parametreler Şekil 2.1'de verilmiştir.

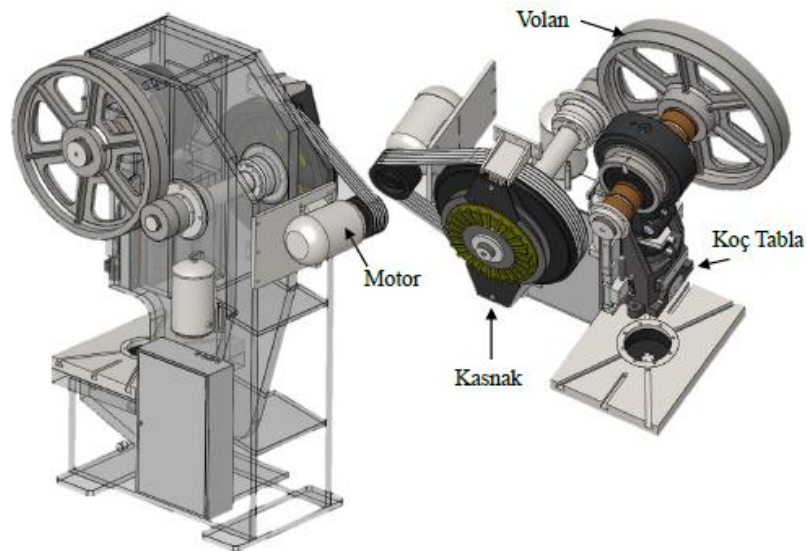


Şekil 2.1. Sac metal şekillendirmeyi etkileyen parametreler (Ulu, 2008).

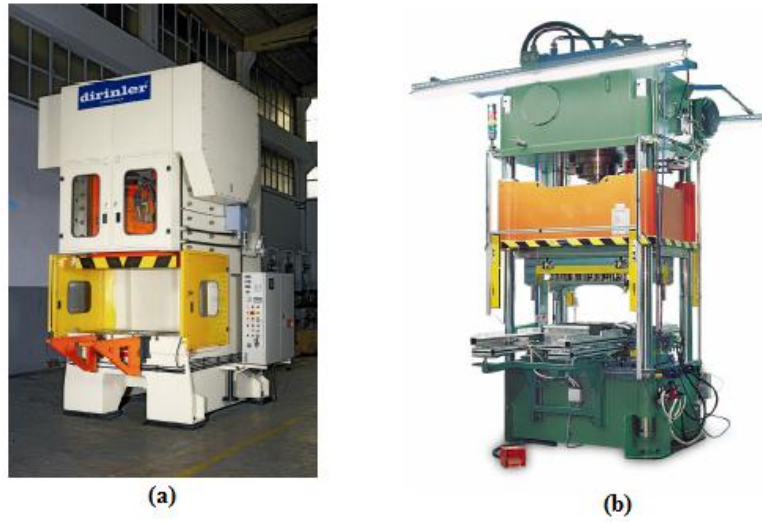
Sac metal şekillendirme yöntemleri temel olarak kesme, bükme, çekme işlemlerinden oluşmaktadır. Kesme işlemi, sacın iki keskin kenar arasında makaslanması işlemidir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi sac metallerde kesme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Sac metal şekillendirme yöntemleri yukarıda anlatılan bu üç temel prosesin kombinasyonları şeklindedir. Sık kullanılan diğer sac metal şekillendirme yöntemleri ise sıvama, derin çekme, preste formlama ve merdanelerle şekil verme v.b. olarak sınıflandırılmaktadır.

Sac metal şekillendirme yöntemleri preslerde gerçekleştirilmektedir. Sac metalden talaş kaldırmadan delme, kesme, bükme ve çekme işlemlerinin yapıldığı makinelere pres denilmektedir. Çalışma prensibine göre presler hidrolik ve mekanik pres olmak üzere ikiye ayrılır. Hidrolik preslerde, elektrik motoru ile yağ basan pompalar döndürülerek sisteme basınçlı yağ basılmaktadır. Farklı yön denetim valfleri ve basınç ayar regülatörleri ile bu basılan yağ denetlenerek silindirlere etki ettirilir ve silindirlerin ileri geri (doğrusal) hareket etmesi sağlanmaktadır. Silindirlere bağlı olan tabla aşağı yukarı hareket eder ve imal edilecek parçanın kesme ya da delme işlemi gerçekleştirilir. Mekanik preslerde ise elektrik motorundan elde edilen dönme hareketi kayış kassak mekanizmasına, oradan da volan görevi üstlenen dişli mekanizmasına iletilmektedir. Hareket buradan krank miline (eksantrik mile) aktarılır. Eksantrik milinin dönme hareketi biyel üzerinden kalıbın bağlandığı tablanın doğrusal hareketine çevrilmektedir. Mekanik presler genel olarak kavrama ve fren grubu, eksantrik dişli grubu, biyel kolu, slayt ayar vidası, tablalar, denge silindiri, hava yastıkları, aşırı yük sistemi vb. unsurlardan meydana gelmektedir (Yıldız, 2013). Mekanik ve hidrolik preslere örnekler Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.5. Mekanik pres ve ana elemanları (Yıldız, 2013).



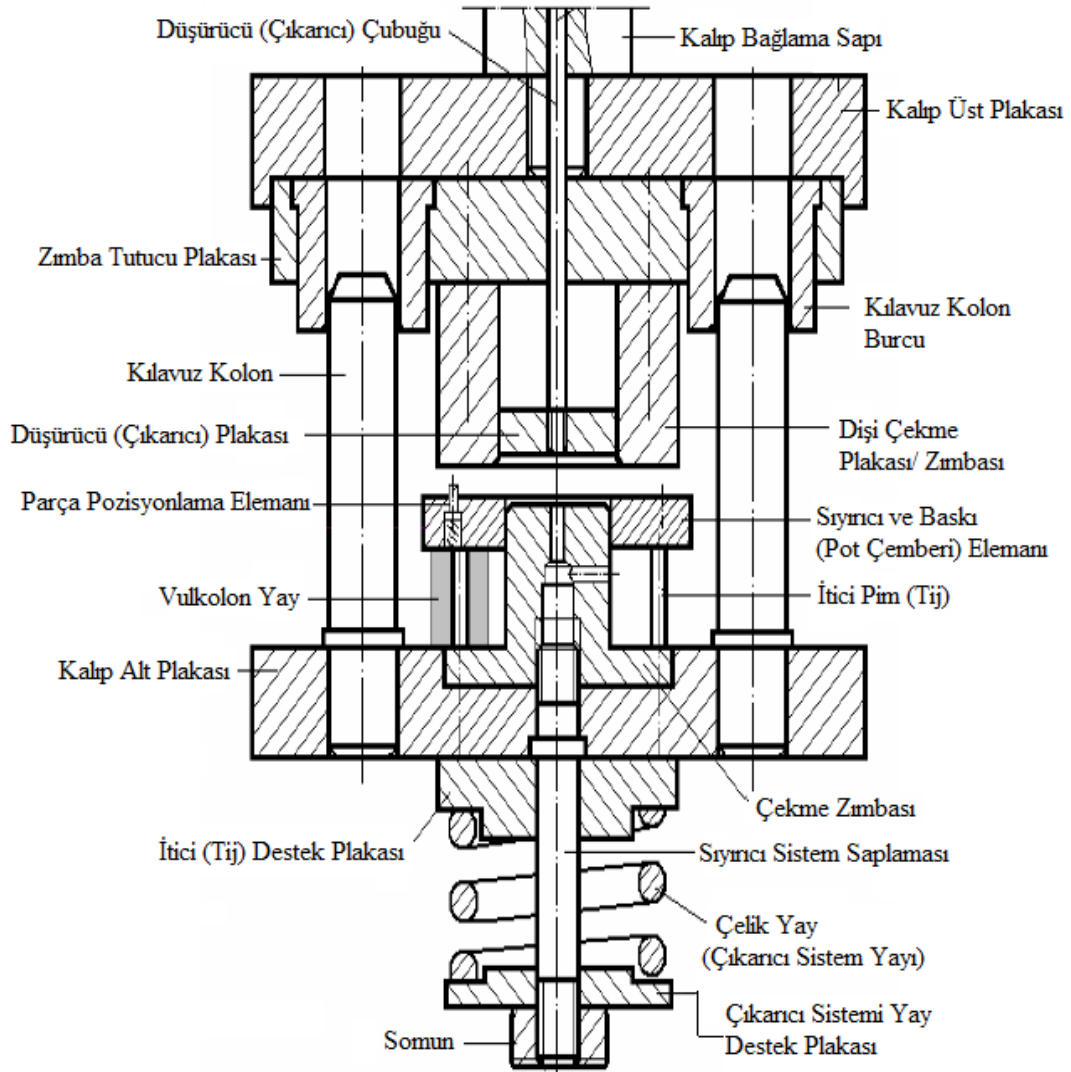
Şekil 2.6. Mekanik ve hidrolik presler, (a) 200 ton mekanik pres, (b) 80 ton hidrolik pres (Babacan, 2007).

Mekanik ve hidrolik preslerin birbirinden farklı özellikleri mevcuttur. Bu özelliklerden bazıları Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Mekanik ve hidrolik preslerin karşılaştırılması (Yıldız, 2013).

	Mekanik Pres	Hidrolik Pres
Hız	Ayarlanamaz.	Ayarlanabilir.
Kurs (strok) Yüksekliği	Krank ve eksantrik dönüşüyle sınırlıdır.	Ayarlanabilir.
Kuvvet	Slayt pozisyonuna göre kuvvet değişir.	Vuruş boyunca kuvvet sabit tutulabilir.
Aşırı Yük	Aşırı yüke girer ve koruyucu sistem yoksa prese ve kalıba zarar verir.	Aşırı yüke giremez, önceden ayarlanmış bir kuvvete ulaşıncaya slayt hareketini sona erdirir.
Üretim Hızı	Çok hızlıdır, seri üretime uygundur.	Yavaş.
Motor Gücü	Volanda depolanan kinetik enerji kullanıldığından daha küçük motor kullanılır.	Eşdeğer bir mekanik prese oranla 2-2,5 kat daha güçlü bir motor kullanılır.

Sac metallere üzerinden talaş kaldırmadan kesme, bükme ve çekme gibi şekil verilmesini sağlayan, farklı şekil ve boyutlardaki preslere bağlanan, genellikle dökme demir veya çelik malzemelerden oluşan aparatlara sac metal kalıpları denilmektedir. Ürün geometrileri karmaşık olan sac metallere mümkün olduğu kadar hatasız üretilmesinde kalıp takımlarının tasarımı oldukça önemlidir. Kalıp üzerinde birçok kalıp elemanı bulunmaktadır. Preslerde kullanılan kalıp takımlarına örnek Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Sac metal şekillendirmede kullanılan örnek bir çekme kalıp takımı (MEB, 2006).

Sac metal şekillendirme yönteminde preslerde kullanılan kalıp takım elemanları aşağıdaki gibidir:

- Kalıp Bağlama Sapı: Kalıp takımının prese göre merkezlenmesini ve zımba tutucusunun pres başlığına bağlanmasını sağlamaktadır.
- Kalıp Üst Plakası: Zımba tutucu plakasını ve kalıp bağlama sapını taşıyan kalıp elemanıdır.
- Zımba Tutucu Plakası: Dişi çekme zımbasının monte edildiği kalıp elemanıdır.
- Dişi Çekme Zımbası: Sac metalin kesme, bükme, çekme işlemlerinin yapılmasını sağlamaktadır.
- Sıyırıcı ve Baskı (Pot Çemberi) Elemanı: Sac metale uygulanan zımba kuvveti neticesinde sac metalin dişi çekme zımbasının içerisine kontrollü bir şekilde akışını sağlayan kalıp elemanıdır.
- Kılavuz Kolonlar: Kalıbın aşırı yüke maruz kaldığı durumlarda zımbanın ve kalıbın zarar görmesini önleyerek kalıbın aynı ekseninde çalışmasını sağlamaktadır.
- Kılavuz Kolon Burçları: Çalışma sırasında üst kalıbın zarar görmesini önlemek için çekme zımbası ve dişi çekme zımbalarının aynı doğrultuda çalışmasını sağlayan kılavuz kolonları ile üst kalıp arasında kullanılan kalıp elemanıdır. Asıl tercih sebebi, maliyet olarak üst kalıbın maliyetine göre ucuz ve imal edilebilirliği daha yüksek olmasıdır.
- Çıkarıcı Sistem ve Elemanları: Elde edilen ürünün dişi çekme plakasının içerisinde kalma ihtimaline karşı kalıbın alt grubunda bulunan yay, pim, saplama, çıkarma vidası vb. elemanları barındıran sistemdir. İstenilen ölçü ve toleransta imal edilen ürünün kalıptan çıkarılması için kullanılmaktadır.
- Kalıp Alt Plakası: Kalıp takımını prese bağlamak için kullanılmaktadır.
- Civatalar: Kalıp elemanlarının montajında kullanılmaktadır.
- Dayamalar: Sac metalin kalıp içerisinde istenilen konumda durdurulmasını sağlayan kalıp elemanıdır.

Sac metaller genellikle seri üretimde kullanılır. Bu nedenle gerek tasarım aşamasında gerekse de üretimde hız önem arz etmektedir. Gerek yeni malzemelerin geliştirilmesi gerekse de ürün formlamada yapılan değişiklik sonrasında kalıp takımlarının da güncellenmesi gerekmektedir. Seri üretim sırasındaki bu güncellemeler de hassas ve hızlı olmalıdır. Bu nedenle kalıp tasarım aşaması daha da kritik hale

gelmektedir. Bu aşamada kullanılan ve üretim hızına büyük katkı sağlayan sonlu elemanlar yöntemi önemli bir araçtır. Fakat bu yöntemin tahmin oranının yüksek olması gerekmektedir. Bu amaçla sonlu elemanlar analizinin sağlanması genellikle karmaşık formların basit geometrilerle ifade edilmesi ile gerçekleştirilir. Çünkü karmaşık geometrilerde birçok faktör şekillendirmeye etki etmektedir. Bunun sonucunda hata kaynağının tespiti zorlaşmaktadır. Karmaşık formların basit geometrilerle elde edildiği proseslere benzetim testleri denilmektedir. Derin çekme, kare kutu çekme, V kalıpta eğme gibi testler benzetim testleri arasındadır. Ürün geometrilerinin karmaşıklığından dolayı proses esnasında ve sonrasında birçok problem ile karşılaşmaktadır. Bu problemler genellikle yırtılma, kırılma, kulaklanma, şekil bozukluğu vb. olarak ortaya çıkmaktadır.

Sac metale uygulanan germe ve derin çekme kuvvetlerinin malzeme için belirlenmiş olan kırılma sınırını aşması durumunda yırtılma meydana gelmektedir. Deformasyon yoğunlaşması sonucu malzemede boyun verme başlar ve yırtılma oluşur. Boyun verme olayı gözle görülür bir kusur olması ve sac metalde yapısal bir zayıflığa sebep olması sonucunda yırtılma durumu genellikle hasar olarak kabul edilmektedir. Sac metalde meydana gelen yırtılma olayına örnek Şekil 2.8’de verilmiştir (Doğu, 2014).



Şekil 2.8. Şekillendirme sonrası sac metalde meydana gelen yırtılma örneği (Doğu, 2014).

Bir sac metal şekillendirme işleminde zımba sac metali sıkıştırma kalıbı içerisine doğru iter. Giderek daralan bir bölge içerisinde sac metalde dairesel bir basma gerilmesi oluşmaktadır. Bu gerilmeler kritik bir değere ulaşırsa buruşukluk denilen hafif engebeler oluşmaktadır. Sıkıştırma kalıbı basıncı yeterli olmadığı zamanlarda

buruşukluklar kırışıklık olarak adlandırılan daha büyük engebeler halinde olmaktadır. Kırışıklığa örnek malzeme Şekil 2.9’da verilmiştir. Genellikle sıkıştırma kalıbının basıncı artırılarak bu sorun önlenmektedir (Doğu, 2014).



Şekil 2.9. Çamaşır makinesine ait bir sacda meydana gelen kırışıklık (Doğu, 2014).

Düzlemsel anizotropinin artması ile derin çekme sonucu malzeme kenarlarında dalgalanmalara sebep olan kulaklanma olayı meydana gelmektedir. Oluşan kulaklar derin çekme sonrası kabın çevresi boyunca kesilmektedir. Bu olay hem malzeme kaybına hem de ek bir işe sebep olduğundan dolayı istenmeyen bir durumdur. Sabit pot çemberi kuvveti yerine değişken pot çemberi kuvveti kullanılarak kulak oluşumunun azaltılabileceği deneysel olarak görülmektedir (Doğan, 2015). Derin çekme işlem sonrası meydana gelen paslanmaz çelikteki kulaklanma Şekil 2.10’da gösterilmiştir.



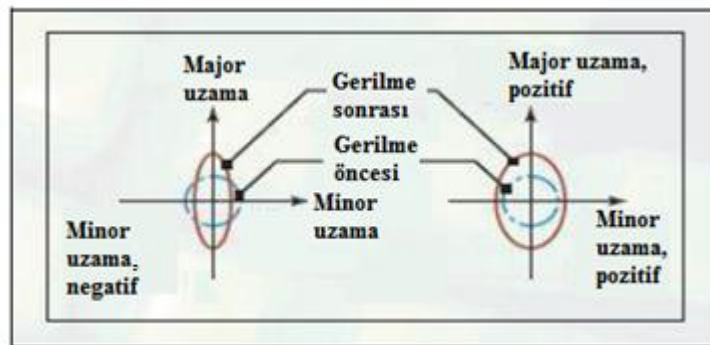
Şekil 2.10. Derin çekme sonrası paslanmaz çelikte meydana gelen kulaklanma (Doğan, 2015).

Sac metal şekillendirme işleminde, kalıbın sac metal üzerinden kalkması sonucu elastik toparlanmadan dolayı sac metalin eski haline dönme isteği neticesinde bükme açısı ve bükme yarıçapının büyümesi ile şekil bozukluğu veya geri esneme olarak bilinen parça ölçülerindeki değişime sebep olmaktadır. Şekil bozukluğu sonrasında elde



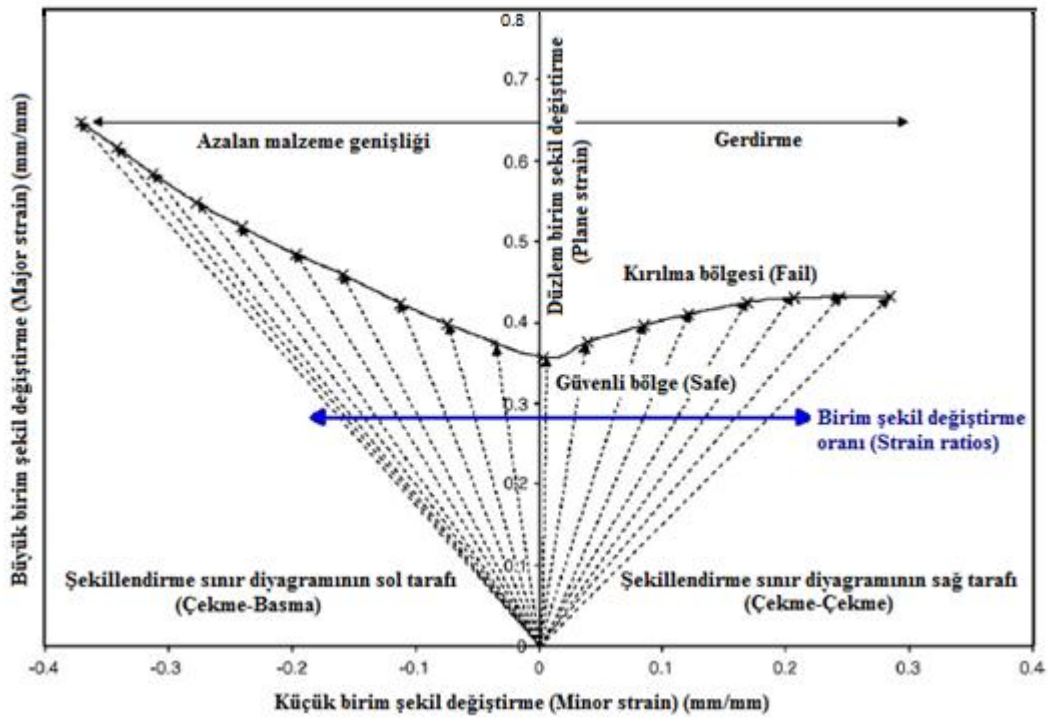
Şekil 2.13. Otomobile ait çamurluk sacının üretiminde karşılaşılan şekil bozukluğu sonrası elde edilen ürün (Durgun vd., 2016).

Benzetim testlerinin ana amacı, bir malzemenin yukarıda belirtilen problemlerin elemine edilmesi sonucunda doğru ürün geometrisinin elde edilmesidir. Bir sac metalin hatasız olarak şekillendirilme limitine şekillendirilebilirlik denir. Bir malzemenin şekillendirilebilirliği şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) ile gösterilmektedir. Şekillendirme sınır diyagramı basit çekme deneyinden başlayarak, düzlem birim şekil değiştirme ve iki eksenli çekme durumlarının hepsini içermektedir. Bir malzemenin şekillendirme sınır diyagramı, farklı geometrilerde hazırlanmış sac metal numunelerin üzerine özel gridler (ızgara) uygulanarak ve şekil değiştirdikten sonraki bu gridlerin ölçüleri değerlendirilerek elde edilmektedir. Oluşan her geometri bir şekil değiştirme durumunu ifade etmektedir. Şekillendirme sınır diyagramı ilk defa 1963 yılında Keeler ve Backofen ve 1968 yılında Goodwin tarafından ortaya atılmıştır (Uysal vd., 2010). Keeler ve Backofen, büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının pozitif olan kısmını geliştirmiştir (Keeler vd., 1963). Goodwin ise büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının negatif olan kısmını geliştirmiştir (Goodwin, 1968). Sac metal üzerine uygulanan gridlerin gerilme öncesi ve sonrası oluşan şekilleri ile pozitif ve negatif minor uzama bölgeleri Şekil 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.14. Pozitif ve negatif minor uzama bölgeleri (Kulkarni vd., 2015).

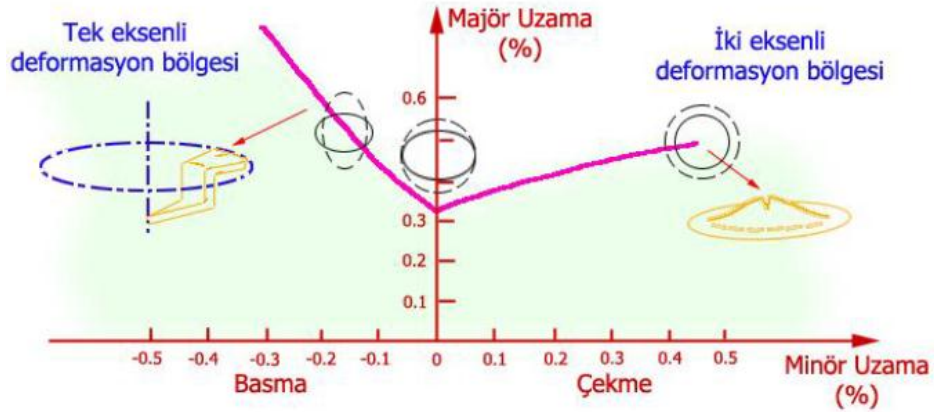
Oluşan gerilmeler ve yönleri, dairelerin çaplarının ve eksenlerinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Şekillendirme ilerledikçe, bazı bölgelerde boyun verme oluşur ve gerilme oranları bu bölgede belirlenir. Bu nokta güvenli ve güvenli olmayan bölgeleri ayıran şekillendirme sınır diyagramı üzerinde bir noktadır. Şekillendirme sınır diyagramı altındaki bölge şekillendirme için güvenli, üstündeki bölge ise güvenli değildir (Kulkarni vd., 2015). Şekillendirme sınır diyagramında güvenli olan ve güvenli olmayan bölgeler Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Şekillendirme sınır diyagramında güvenli bölge sınırları (Öztürk vd., 2005).

Şekillendirme sınır diyagramı, sac metallere uygulanan şekil verme yönteminin değerlendirilmesinde ve bu esnada ortaya çıkan problemlerin analizi ve çözümünde oldukça fazla kullanılmaktadır. Genellikle sac metal malzemelerin boyun vermeye başladığı noktaya göre şekillendirilebilirliğin sınırları belirlenmektedir. Boyun verme sonrasında malzeme hemen kırılmayabilir; fakat bu noktadan sonra sac metaldeki davranışlar tahmin edilememektedir. Bu sebepten dolayı boyun vermenin tespit edildiği birim şekil değiştirme değerleri sınır değer olarak kabul edilmektedir. Malzemenin farklı şekil değiştirme durumlarında şekillendirme sınır diyagramında şekillendirilebilirlik sınırları büyük (majör) (ϵ_1) ve küçük (minör) (ϵ_2) birim şekil

değiştirme oranları cinsinden ifade edilir. Şekillendirme sınır diyagramı, ince sac ve levhaların boyun verme, yırtılma veya kırılma şeklinde hasara uğradığı çeşitli deformasyon durumlarındaki birim şekil değişimi değerlerinin ($\epsilon_{maj}-\epsilon_{min}$) analitik olarak bir düzlem üzerinde gösterilmesiyle oluşturulmaktadır (Özcan, 2015). Örnek bir şekillendirme sınır diyagramı Şekil 2.16’da verilmiştir.



Şekil 2.16. Şekillendirme sınır diyagramı örneği (Özcan, 2015).

Şekillendirme sınır diyagramını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Kulkarni vd., 2015):

- Malzeme özellikleri, pekleştirme ve gerinim hız üsteli.
- Sac kalınlığı, daha kalın sac için şekillendirme sınır diyagramında çok az değişiklik olan veya hiç olmayan daha ince bir sacdan daha yükseğe yerleştirilmektedir.
- Aynı alaşımdaki ve aynı kalınlıktaki yumuşatılmış sacın şekillendirme limit eğrisi sert saca göre daha yüksek konumlandırılmıştır.
- Sacdaki anizotropi.
- Sacdaki kaplamanın türü.
- Test öncesinde ön gerilme türü. Şekillendirme sınır diyagramı şekil değiştirme yolu değiştirilerek modife edilebilir. Uygun şekil değiştirme yolu seçilerek daha yükseğe yerleştirilebilir.
- Test numunesinin haddelme yönüne göre oryantasyonu.

Benzetim testleri neticesinde karmaşık formlar daha basit geometrilerle elde edildiği için hatayı görmek daha kolay olmaktadır. Her bir benzetim testinin amacı farklıdır. Örneğin; şekillendirilebilirlik kavramının incelenmesinde derin çekme, kare

kutu çekme vb. gibi benzetim testleri kullanılır iken şekil bozukluğu tespitinde ise V kalıpta eğme, U kanal çekme vb. gibi benzetim testleri kullanılmaktadır. Yapılan benzetim testleri sonucunda elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılarak sonlu elemanların sağlaması yapılmaktadır.

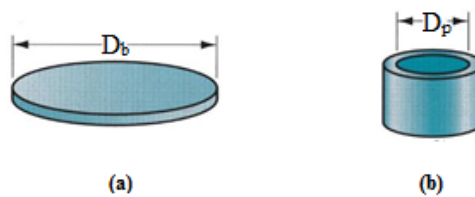
2.1. Derin Çekme

Derin çekme işlemi, düz saclardan silindirik, kare veya konkav şeklindeki karmaşık parçaların üretilmesinde kullanılan bir sac metal şekillendirme işlemidir. Derin çekme yöntemi ile üretilmiş örnek parçalar Şekil 2.17’de verilmiştir. Metal şekillendirme yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olan derin çekme ile şekillendirme işlemi, metallerin yaklaşık %50’sinin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır (Grote vd., 2011). Derin çekme işleminde; kalıp boşluğu üzerine yerleştirilen sac metal üzerine zımba tarafından basınç uygulanması sonucu oluşan gerilmenin akma mukavemeti üzerine çıkması ile malzeme plastik deformasyon bölgesine geçerek altındaki kalıbın şeklini almaya başlamaktadır (İlhan, 2018).



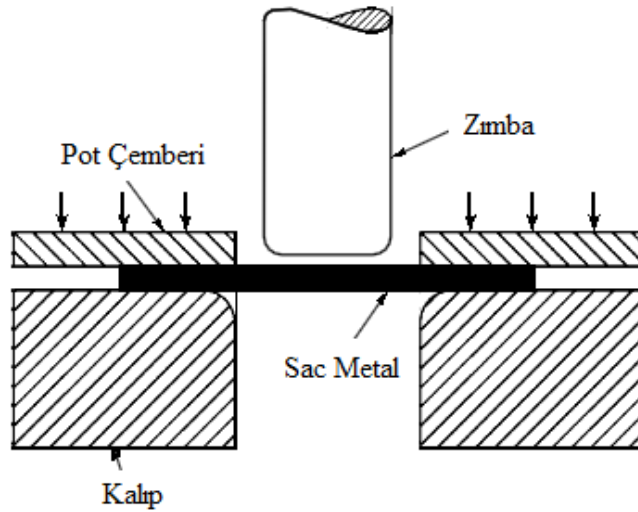
Şekil 2.17. Derin çekme yöntemi ile üretilmiş örnek parçalar (Yıldız, 2017).

Sac metalin işlem görmemiş ilk haline sac açınımlı denir. Şekil 2.18’de sac açınımlı ve derin çekme işlem sonrası elde edilen nihai ürün örneği verilmiştir.



Şekil 2.18. (a) Sac açınımlı, (b) Derin çekme ile elde edilen ürün (İlhan, 2018).

Derin çekme işleminde sac metalin kalıp içerisine kontrollü akışını sağlamak ve çekme sırasında meydana gelebilecek kırışıklıkları önlemek amacı ile kullanılan parça pot çemberidir. Derin çekme işleminin şematik gösterimi ve pot çemberi Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Derin çekme işleminin şematik gösterimi (Yıldız, 2017).

Derin çekme işleminde nihai ürünün istenilen ölçü ve toleransta olması için kullanılacak olan sac açınımları hazırlanır ve kalıba konulur. Zimba tarafından belirlenen basınç sac metale uygulanır ve sac metali kalıbın içerisine doğru iter. Sac metalin kalıp içerisine kontrollü bir şekilde akışının sağlanması için yeterli miktarda pot çemberi kuvveti sac metale etki ettirilmektedir. İstenilen nihai ürün elde edilene kadar sac metal üzerinde derin çekme işlemine devam edilmektedir.

Derin çekme, parçanın derinliğini artırmak ve kesit ölçülerini küçültmek için yapılan tekrar çekme işlemi olarak da bilinmektedir (Mutlu, 2012). Derin çekme işleminde sac metalin eksik mekanik özellikleri, çekme parçasının hatalı olmasına sebep olmaktadır. Sadece malzeme seçimi olumlu sonuçlar için garanti değildir, başarılı parça uygun işlem parametrelerine ve optimize edilmiş geometriye bağlıdır. Başarılı bir derin çekme işlemi için gerekli temel faktörler Çizelge 2.2’de verilmiştir. Derin çekme sonucu elde edilen nihai üründe kulaklanma, çizilme, yırtılma, buruşma, renk değişimi vb. gibi bazı hatalar meydana gelmektedir.

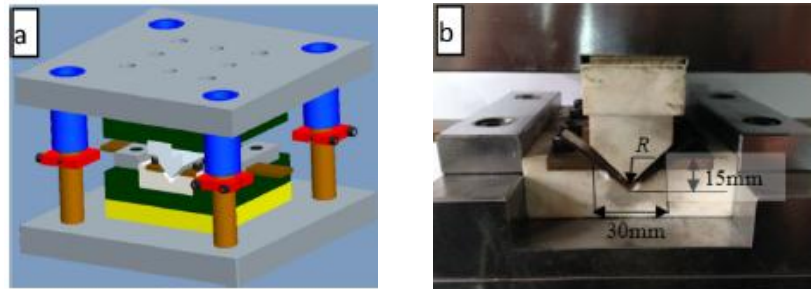
Çizelge 2.2. Derin çekme işlemi için gerekli temel faktörler (Dwivedi vd., 2017).

Özellikler	Parametreler	
	Proses	Geometri
Sacın yoğunluğu	Sıcaklık	Kalıbın şekli
Mukavemet	Parça tutucu kuvveti	Kalıp malzemesi
Kırılma tokluğu	Zimba basıncı	Çekme süreç türleri
Metal sürtünme	Yağlama	
Sıkıştırma dayanımı		

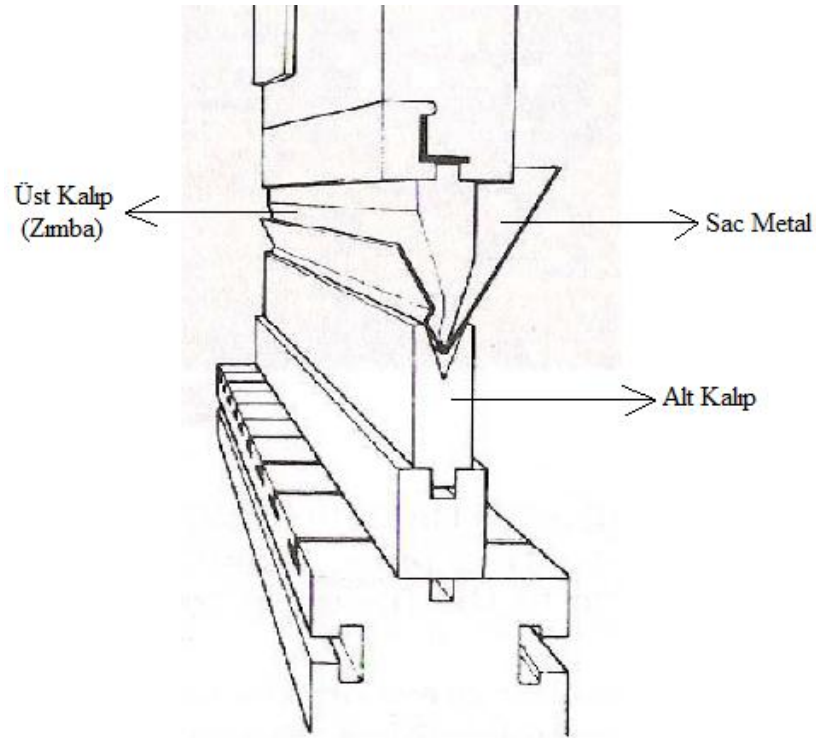
Benzetim testleri malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin yanı sıra form verme işlemi sonrasında şekil bozukluklarını da tespit edebilmektedir. Bu anlamda en sık kullanılan benzetim testlerinin başında V kalıpta eğme testi gelmektedir.

2.2. V Kalıpta Eğme

V kalıpta eğme işlemi, belirli bir basınç altında V şeklindeki kalıp ve zimba arasında sac metal malzemeye verilen formlama işlemidir. Genel olarak kalıp maliyeti ucuzdur ve az sayıda imalat için uygundur. Şekil 2.20’de yapılan başka bir çalışmaya ait V kalıpta eğme düzeneği ve 3 boyutlu kalıp resmi gösterilmiştir. V kalıpta eğme yöntemi yaygın olarak hidrolik abkantlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.21’de örnek olarak hidrolik abkantta kullanılan V eğme kalıbı gösterilmiştir. V kalıpta eğme yöntemi ile şekillendirilen sac malzemelerde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi formlama işlemi bittikten sonra sac metale uygulanan basınç ortadan kaldırıldığında sac metalde meydana gelen geri esnemedir.



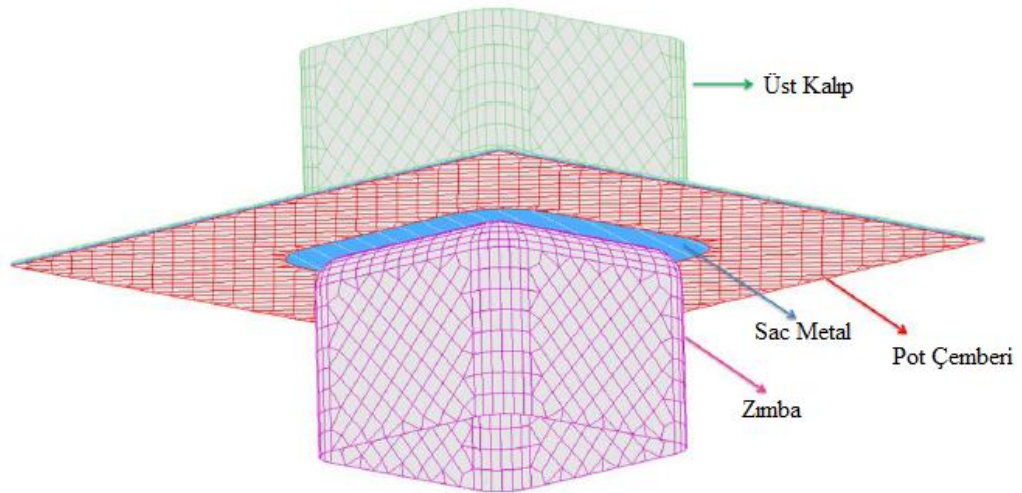
Şekil 2.20. (a) 3 boyutlu V kalıpta eğme kalıbı, (b) V kalıpta eğme işleminde kullanılan örnek kalıp resmi (Xie vd., 2015).



Şekil 2.21. Hidrolik abkantta kullanılan V eğme kalıbı (Karataş, 2009).

2.3. Kare Kutu Çekme

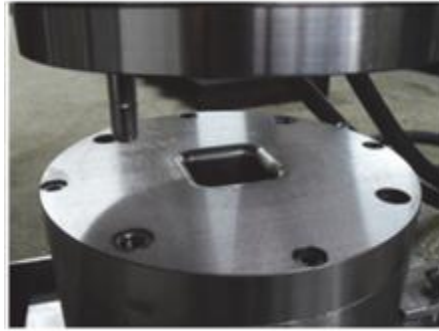
Sac metallerin şekillendirilebilirliklerinin en efektif tespit edilebildiği proseslerin başında kare kutu çekme işlemi gelmektedir. Gerek yırtılma yüksekliği gerekse de kırışma ve kulaklanma durumları etkin bir şekilde gözlemlenmektedir. Örnek bir kare kutu çekme kalıp takım elemanları Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Kare kutu çekme kalıp takımları (Esener vd., 2018).

Kare geometrili parçaların klasik sac metal şekillendirme yöntemi ile üretilmesi için çok sayıda kalıp ve işlem gerekmektedir. Bunun sonucunda üretim zamanı ve maliyeti artmaktadır. Kare kutu çekme işleminde kullanılan sac metalin yan duvarlarında tek eksenli gerilme, kulaklarda ise iki eksenli gerilme meydana gelmektedir. Sac metalin kalıp içerisine farklı oranlarda akması ve teğetsel baskı sebebi ile nihai ürünün köşelerinde yığılma meydana gelmektedir ve bu yığılmalar köşelerde yırtılmaya sebep olmaktadır (Karaağaç vd., 2013).

Karaağaç ve Özdemir (2013) yapmış oldukları çalışmada kare geometrili bir parçanın hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilebilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanmış oldukları derin çekmeye ait kalıp takımları örnek olarak Şekil 2.23'te verilmiştir.

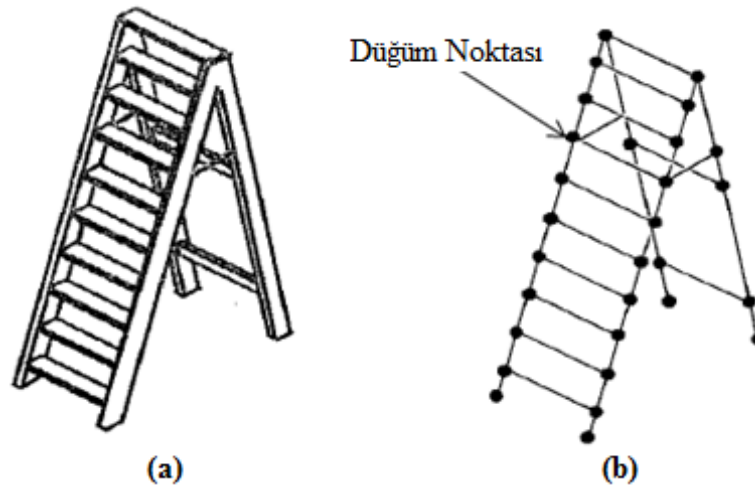


Şekil 2.23. Kare kutu çekmede kullanılan örnek kalıp takımları (Karaağaç vd., 2013).

Benzetim testleri sonrasında karmaşık geometriye sahip sac metallerde meydana gelen hataların tespiti kalıp tasarımını da doğrudan ilgilendirdiği için hatalara sebep olan etkenlerin tespiti ve bu hataların giderilmesi tasarım aşamasında yapılmalıdır. Aksi durumda hatalar üretim aşamasında olduğu takdirde bu durum maliyet artışına, hurda malzemenin artışına, zaman kaybına ve üretimin aksamasına sebep olmaktadır. Bu aşamada sonlu elemanlar analizi en sık kullanılan yöntemdir ve üretim hızına büyük katkı sağlamaktadır. Yapılan benzetim testleri sonucunda elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırılarak sonlu elemanların sağlanması yapılmaktadır.

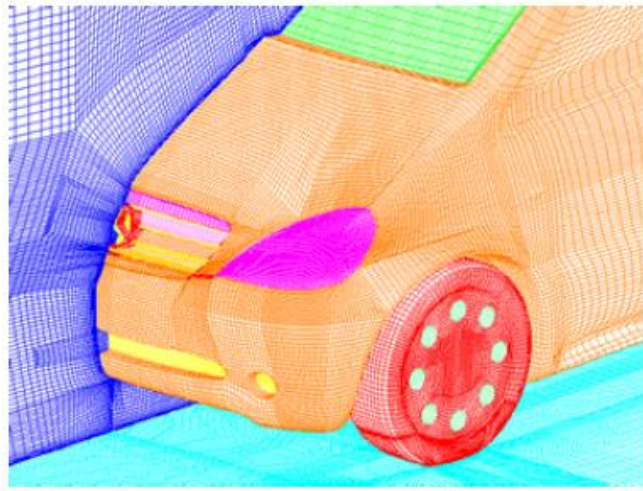
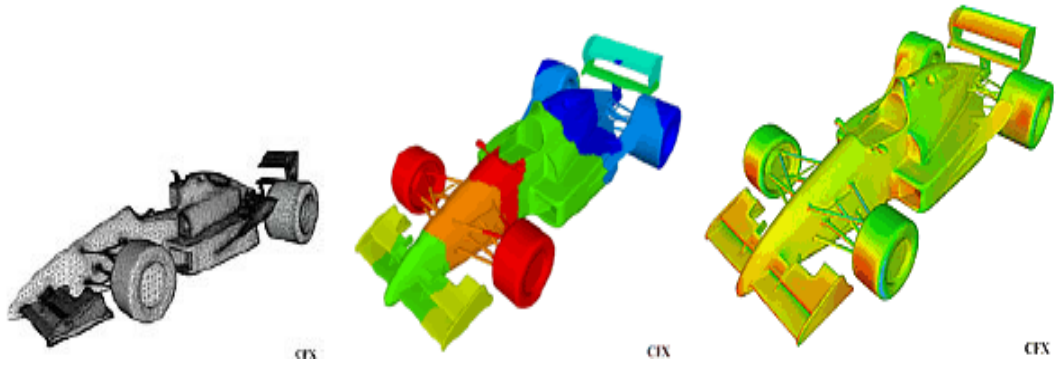
3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Parçanın üretim aşamasında deneme-yanılma yöntemleri ile gereksiz malzeme israfına sebep olmaması ve imalat aşamasının uzamaması için sac metal şekillendirme yöntemleri genellikle bilgisayar destekli tasarımlarda yapılmaktadır. Bilgisayar destekli tasarımda en çok kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizidir. Sonlu elemanlar analizi, çeşitli karmaşık mühendislik problemlerini tek seferde çözmek yerine daha basit bölümlere ayırıp belirli yük ve şartlarda simülasyonlarının yapıldıktan sonra tam çözümün bulunduğu bir çözüm yöntemidir. Simülasyonun modellenmesi, geometrilerin eleman adı verilen daha küçük sonlu parçalarına ayrılması ile yapılmaktadır. Elemanların birbirine bağlandığı noktaya düğüm noktası ve tüm bu sisteme ise ağ yapısı denilmektedir. Şekil 3.1’de örnek bir sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.1. (a) Örnek model, (b) Elemanlara ayrılmış sonlu elemanlar modeli (Çetin, 2007).

Sonlu elemanlar analizindeki temel düşünce, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüm bulmaktır. Bu sebepten dolayı sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar deneysel sonuca yakın sonuçlardır. Sonlu elemanlar analizlerine bazı örnekler Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sonlu elemanlar analizi yapılmış araç gövdeleri (Çetin, 2007).



Şekil 3.3. Otomotiv parçalarına uygulanan sonlu elemanlar analizi (Sonlu Elemanlar Analizi, 2019).

Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan bazı özellikleri vardır. Başlıca özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Çetin, 2007):

- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- Bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.
- Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

Sonlu elemanlar analizini oluşturan elemanlar boyutlarına göre tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve dönel elemanlar olmak üzere dörde ayrılır (Topçu vd., 1998).

Tek Boyutlu Elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.

İki Boyutlu Elemanlar: İki boyutlu (düzlem) problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır.

Üç Boyutlu Elemanlar: Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyli elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.

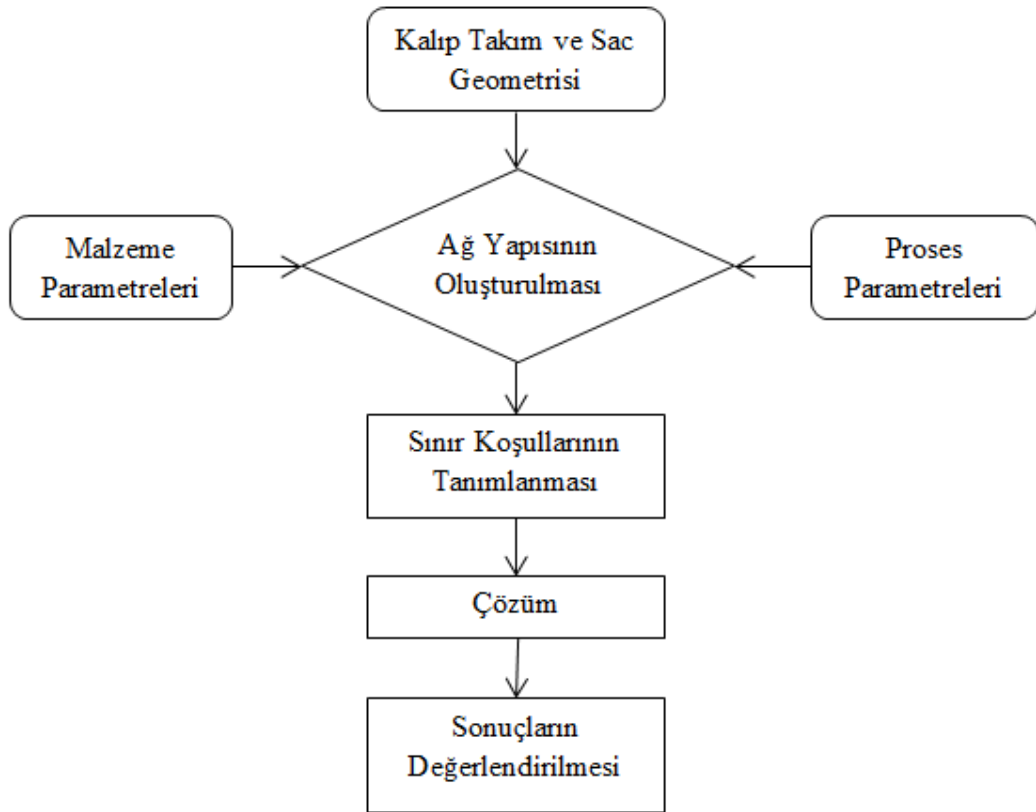
Dönel Elemanlar: Eksensel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri ekseninde etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksensel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözmeye olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.

Sac metal şekillendirme işleminin sonlu elemanlar analizinde genellikle kabuk elemanlar kullanılmakta ve sac açınımının ağ yapısı kalıp elemanlarına göre daha hassas şekilde modellenmektedir. Sonlu elemanlar analizinde sac metal şekillendirme için açık (eksplicit) ve kapalı (implicit) yöntem olmak üzere temelde 2 farklı iteratif yöntem mevcuttur. Açık yöntemler sistemin durumundan hareketle bir sonraki durumu hesaplarken, kapalı yöntemler sistemin hem şimdiki hem de hesaplanan bir sonraki durumunu kullanarak denklemleri çözüp sistemin durumunu hesaplamaktadır (Şen, 2015).

Sonlu elemanlar analizinde önemli olan tahmin doğruluğunun yüksek seviyede olmasıdır. Bu amaçla literatürde tahmin doğruluğunun artırılması üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Andersson (2005), yapmış olduğu çalışmada yumuşak çelik grubu, rephos çeliği ve trip çelik malzemeye sahip bir otomobil parçası üzerinden şekillendirme prosesi uygulamış ve sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmiştir. Trip çeliğinin diğer çeliklere göre daha fazla geri esnediğini tespit etmiştir. Alıcı (2001), yapmış olduğu çalışmada üretilen çamurluk ve panel saclarıyla Autoform simülasyon program sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda simülasyon programı çıktıları ile gerçek sonuçların oldukça benzer olduğu ve form kalıplarında geliştirme yüzeylerinin nihai ürün için yapılan kalıp imalatı öncesi simülasyon programı ile denenmesinin gerçeğe yakın sonuçlar vereceği görülmektedir. Xu ve arkadaşları (2004), yapmış olduğu çalışmada U bükme prosesinde sac parçaların şekillendirilmesi sonucu meydana gelen geri esnemeyi etkileyen faktörler sonlu elemanlar analizi ile incelenmiş ve makul değerler önerilmiştir. Verma ve Haldar (2007), yapmış olduğu çalışmada anizotropinin geri esneme üzerindeki etkisi sonlu elemanlar analizi kullanılarak tahmin edilmektedir. Sonlu elemanlar analizinden tahmin edilen eğilimleri çapraz kontrol etmek için analitik bir model geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizindeki problemin izotropik bir malzemede geri esnemenin minimum olduğunu göstermektedir.

Sonlu elemanlar analizinde en temel parametreler sonlu elemanlar modeli ve ağ yapısının oluşturulması, malzeme davranışının tanımlanması ve modellenmesi ve temas ara yüzünün belirlenmesidir. Gerçeğe en yakın sonucu alabilmek için sonlu elemanlar analizlerinde bu parametrelere ek olarak eleman tipinin ve boyutunun belirlenmesi ve malzeme modelinin tespiti sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir (Esener, 2015).

Genellikle en etken parametrenin malzemenin plastisite modelleri olduğu görülmektedir. Farklı kabullere sahip birçok malzeme modeli bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı denenecek proses koşulları ve kullanılacak malzeme dikkate alınarak gerçeğe en yakın sonucu verecek malzeme modeli tercih edilmesi gerekmektedir. Sac metal şekillendirme prosesi için örnek bir sonlu elemanlar akış diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Örnek sonlu elemanlar akış diyagramı.

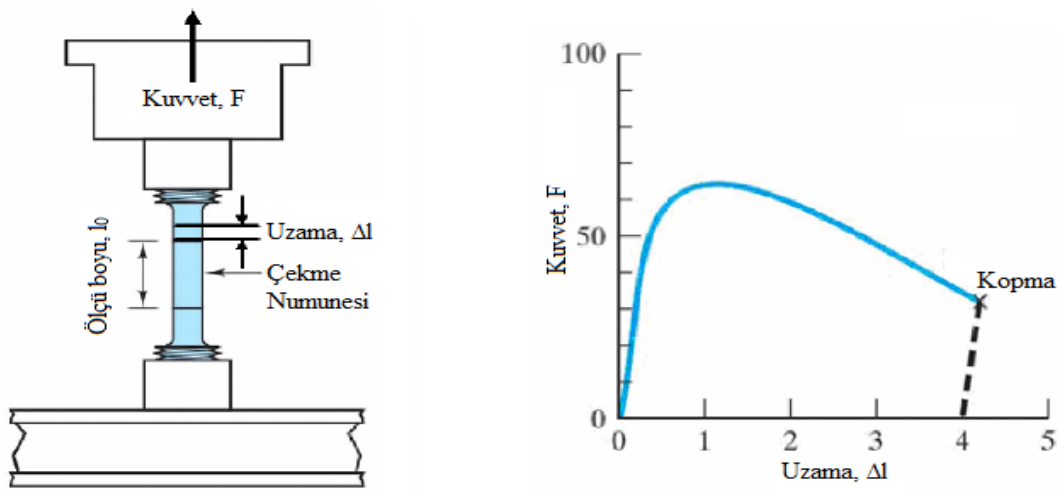
Toros ve arkadaşları (2012), yapmış olduğu çalışmada yüksek mukavemetli bir çelik olan TRIP800 için Hill-48, Barlat-89 ve Yld2000 malzeme modelleri kullanılarak V kalıpta bükme sonrasında oluşan geri esneme simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Hill-48 ve Barlat-89 malzeme modelinde öngörülen akma gerilmesi ve anizotropi değerlerinin haddeleme yönüne göre değişimi Lankford parametreleri ve ErrMin yaklaşımları gibi farklı yöntemler için incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde V kalıpta bükme işlemlerinde geri esneme için sonlu elemanlar simülasyonuna göre en iyi tahmini Yld2000-2d vermektedir.

Özetle, yapılan çalışmalar incelendiğinde şekillendirme öncesinde benzetim testleri sonucu ortaya çıkan hataların tahmini açısından sonlu elemanlar analizinde ve malzemenin plastisite modellemesinde kullanılan parametreler seçilirken özellikle dikkat edilmelidir. Çünkü plastisite modelleri her malzeme için aynı seviyede tahmin yapamamaktadır. Dikkatli ve hassas bir şekilde yapılan benzetim testleri ile deneme yanılma zamanı da ortadan kaldırılarak kalıpların imalatı ve elde edilecek nihai ürünlerdeki oluşabilecek hataların kısa sürede ve düşük maliyetle tahmin edilmesi, gereken değişikliklerin tasarım aşamasında yapılması sağlanmaktadır.

4. PLASTİSİTE MODELLEME

Sac metal şekillendirme işlemlerinin sorunsuz bir şekilde gerçekleşebilmesi için sonlu elemanlar analizinde malzeme davranışının doğru ve eksiksiz bir şekilde tanımlanması tahmin sonuçları açısından oldukça önemlidir. Şekillendirme işlemlerinde, malzemede oluşan plastik deformasyonların modellenmesi için malzeme davranışını tanımlayan plastisite modellerinin kullanımı ve bu plastisite modellerini kullanırken gerekli olan parametrelerin hassas bir şekilde belirlenmesi metot mühendisliği açısından oldukça kritiktir (Esener, 2015). Çünkü her plastisite modeli bütün malzemeler için iyi tahmin yapamamaktadır.

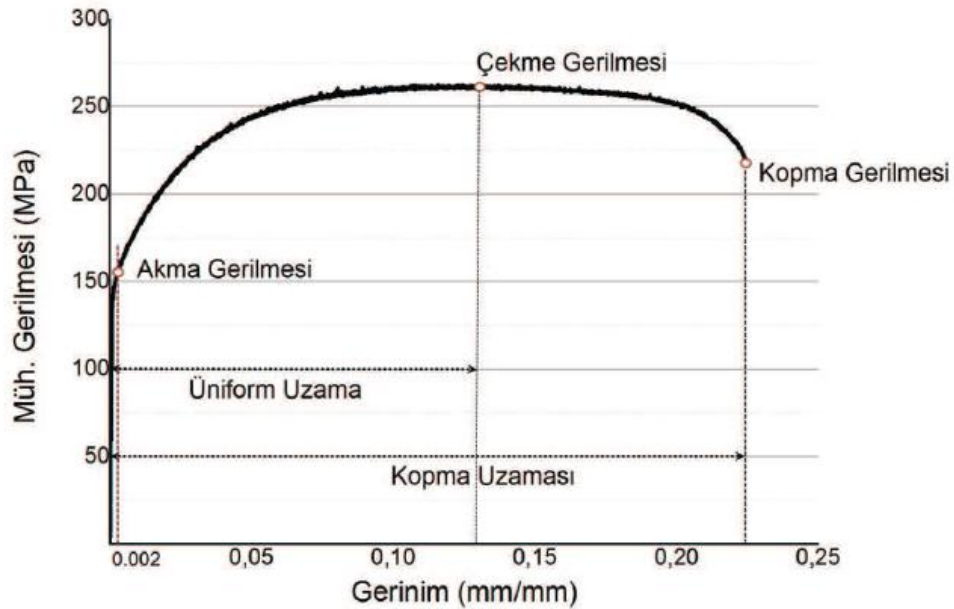
Sac metallerin şekillendirilebilme kabiliyeti ve dayanıklılığı tasarım açısından oldukça önemlidir. Sac metallerin şekillendirilebilirliğini etkileyen parametreler arasında akma gerilmesi, akma uzaması, çekme gerilmesi, pekleşme üsteli, toplam uzama miktarı, plastik deformasyon oranı, yöne bağlı anizotropi, şekillendirme hızı, kopma gerilmesi, uygulanan haddeleme yöntemi vb. örnek olarak gösterilmektedir. Sac metallerin bu özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan en yaygın test çekme deneyidir. Çekme deneyinde, standartlara göre hazırlanan test numunesinin çekme makinesine bağlandıktan sonra zamanla artan çekme kuvveti uygulanmaktadır. Uygulanan bu kuvvet sac metal kopana kadar artırılır ve bu sırada etki eden çekme kuvveti ile test numunesinde meydana gelen uzama sistem tarafından kayıt altına alınmaktadır. Şekil 4.1’de çekme deneyi sonrası elde edilen örnek kuvvet-uzama grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme deneyi ve deney sonrası elde edilen kuvvet-uzama grafiğine göre çekme eğrisinin şematik görünümü (Doğan, 2015).

Çekme deneyi sonrası elde edilen kuvvet-uzama grafiği gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine dönüştürülmektedir. Çekme deneyi sonucu sac metalin elastik özelliklerinden olan elastisite modülü, elastiklik sınırı, rezilyans vb. elde edilirken plastik özelliklerinden olan akma mukavemeti, çekme mukavemeti, kopma uzaması, % kesit daralması, tokluk vb. tespit edilmektedir. Bunlara ek olarak şekil değiştirme sırasında gerilme-gerinim eğrilerinin genel görüntüsü bize sac metallerin şekil değiştirme özellikleri hakkında bilgi vermektedir (Kayalı vd., 1986).

Sac metallerin modellenmesinde kullanılan mekanik özellikleri akma gerilmesi (σ) ve gerinimin (ϵ) deneysel eğrileri ile ifade edilmektedir (Arslan, 2004). Şekil 4.2’de örnek bir gerilme-gerinim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Örnek gerilme-gerinim grafiği (Sönmez, 2015).

Sac metaller şekil değişimi sırasında önce elastik sonra plastik şekil değişimine uğramaktadır. Elastik şekil değişiminde sac metal üzerine uygulanan yük ortadan kaldırıldığı zaman malzeme tekrar eski haline dönmektedir. Plastik şekil değişiminde ise sac metal kalıcı şekil değişimine uğradığı için eski haline dönememektedir. Yukarıdaki grafikte de görüldüğü üzere akma gerilmesinin başladığı noktaya kadar gerilme ve gerinim arasında lineer bir ilişki mevcuttur. Bu kısımda malzeme elastik şekil değişimine uğramaktadır. Hooke kanununa göre elastik bölgede aralarında lineer

bir bağlantı olan gerilme ve gerinim değerleri arasındaki ilişki Denklem (4.1)'de gösterilmiştir.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4.1)$$

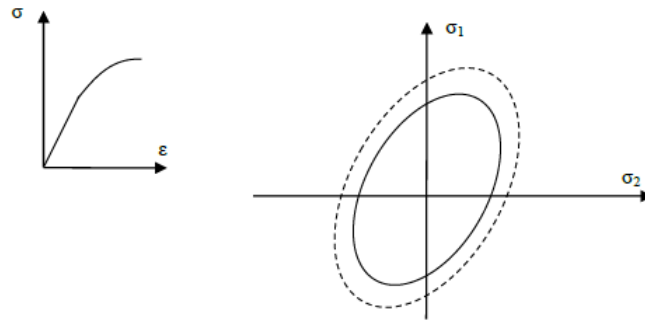
Buradaki denklemde E, elastisite modülünü temsil etmektedir. Sac metalde bir noktadan sonra akma gerçekleşir ve bu nokta akma gerilmesi olarak kabul edilmektedir. Akma gerilmesine ulaşan sac metal plastik şekil değişimine başlamıştır ve gerilme-gerinim eğrisi bu noktadan sonra lineerliğini kaybederek parabolik bir şekilde ilerlemeye devam etmektedir. Sac metal maksimum gerilme değerine ulaştıktan sonra boyun vermeye başlar ve bu gerilme değeri çekme gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Çekme gerilmesinden sonra kuvvet gittikçe düşer ve sac metal bir süre sonra kopar. Sac metalin kopmaya başladığı bu nokta ise bize kopma gerilmesi ve kopma uzaması değerlerini vermektedir. Malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direnç anizotropi olarak isimlendirilmektedir. Haddelenerek üretilmiş sac metallerin plastik davranışları genellikle hadde yönüne göre değişiklik göstermektedir. Çeliklerde normal anizotropi ve düzlemsel anizotropi olmak üzere iki tür anizotropi vardır. Normal anizotropi (R), sac metalin derin çekilebilirliğinin bir ölçüsüdür ve şekillendirme sırasında sac metalin incelmeye karşı direncini belirlemektedir. Düzlemsel anizotropi (ΔR), derin çekme ve benzeri silindirik çekme işlemlerinde kulaklanma olarak bilinen kenar hatalarının bir ölçüsüdür ve derin çekme işleminde düzlemsel anizotropi kritik bir parametredir (Erdin, 2003).

Tasarım aşamasında akma gerilmesi ve elastisite modülü dışında, akma eğrisi ile malzeme davranışının tanımlanmasında kullanılan parametreler elde edilmektedir. Akma eğrisi malzemenin gerçek gerilme ve gerçek gerinim değerlerinden elde edilmektedir ve tek eksenli çekme deneyinde malzemenin plastik davranışını modellemektedir (Esener, 2015). Bir malzemenin elastik malzeme davranışı lineer olduğundan dolayı bu davranışı matematiksel olarak modellemek oldukça kolay bir işlemdir. Malzemelerin plastik davranışı non-lineerlik barındırdığından ve akma gerilmesinin gelişimi pekleşme ile temsil edildiğinden plastik davranışı modellemek elastik davranışta olduğu gibi kolay olmamaktadır. Plastik gerinimler, tüm yükleme geçmişine ve gerilme durumuna nasıl ulaşıldığına bağlıdır. Bir malzemenin genel gerilme durumunda plastik davranışlarını modelleyebilmek için, akmanın oluştuğu

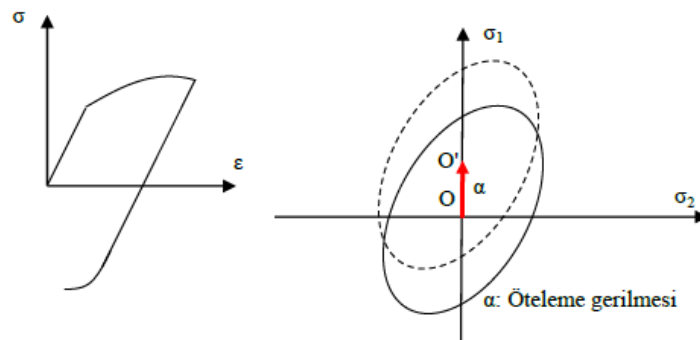
andaki gerilme bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir akma kriterine, gerilme ve gerinim oranı bileşenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir akma kuralına ve şekillendirme prosesi süresince başlangıç akma gerilmesinin gelişimini tanımlayan pekleşme kuralına ihtiyaç vardır (Slater, 1977).

Plastik bölgedeki gerilme dağılımı hesaplanırken akma şartının belirlenmesinde kullanılan akma yüzeyinin geometrisi oldukça önemlidir. Elastik gerinimler ile gerilmeler arasındaki lineer ilişkiyi tanımlarken Hooke kanunu, plastik gerinimler ile gerilmeler arasındaki ilişkiyi tanımlarken ise akma kuralları kullanılmaktadır.

Sac metalin elastik limit sınırını geçecek şekilde yüklendikten sonra uygulanan yük ortadan kaldırıldığı zaman sac metalin mukavemet özelliklerinde değişiklik olması durumuna pekleşme denir. Pekleşme durumundan dolayı plastik deformasyon sırasında sac metalin akma yüzeyi boyutsal ya da şekilsel olarak değişim göstermektedir. Plastisite modelleri sac metallerdeki pekleşme kurallarını izotropik ve kinematik olmak üzere temelde iki farklı şekilde tanımlamaktadır. Ayrıca hem izotropik hem de kinematik pekleşme modelini içeren karma model de kullanılmaktadır. İzotropik pekleşme durumunda akma yüzeyinin asal gerilme uzayında yer değiştirmeden orantısız olarak büyüdüğü, kinematik pekleşme durumunda ise akma yüzeyinin boyut değiştirmedeği yalnızca asal gerilme uzayında öteleme gerilmesi miktarında konum değiştirdiği kabul edilmektedir. Şekil 4.3'te izotropik pekleşme davranışının şematik gösterimi, Şekil 4.4'te ise kinematik pekleşme davranışının şematik gösterimi verilmiştir. İzotropik pekleşme durumu sergileyen sac metallerde çekme durumundaki akma gerilmesi basma durumundaki akma gerilmesine eşittir. Bu durum tüm malzemeler için aynı hassasiyeti vermemektedir. Gerçek hayatta malzemeler, çevrimsel yüklemenin olduğu her adımda pekleşmeye uğramaktadırlar. Sonuç olarak çekme durumundaki akma gerilmesi ile basma durumundaki akma gerilmesi birbirinden farklı olmaktadır. Kinematik pekleşme durumu sergileyen sac metallerde çekmedeki akma gerilmesi basma durumundaki akma gerilmesinden yüksektir (Doğan, 2015).



Şekil 4.3. İzotropik pekleşme durumu şematik gösterimi (Esener, 2015).



Şekil 4.4. Kinematik pekleşme durumu şematik gösterimi (Esener, 2015).

Sac metallerin şekillendirilebilirliğini incelerken kullanılan, malzemede oluşan plastik davranışı modelleyen plastisite modellerinin doğruluğu ve kesinliği genel olarak kabul edilen sınır şartlarına, kullanılacak malzeme modeline ve benzetim testleri sonucu elde edilen hatalara, sebeplerine ve çözüm yöntemlerine bağlıdır. Plastisite modellerini tanımlarken kullanılacak olan parametrelerin hassas bir şekilde belirlenmesi metod mühendisliği açısından oldukça kritiktir. Her plastisite modelinde farklı özellikler ele alınarak inceleme yapılmaktadır. Her sac metal için hassas sonuç verecek plastisite modeli aynı değildir. Plastik davranışı modelleyen plastisite modelleri bünyesinde birçok kabul barındırmaktadır. Plastisite modelleri genellikle kabullere göre kategorize edilmektedir. Bu tez kapsamında plastisite modelleri izotropik malzeme-izotropik pekleşme, anizotropik malzeme-izotropik pekleşme ve anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kabulü yapan modeller olmak üzere üç ana grupta incelenmiştir. Bu modellerden izotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralı kabulü yapan plastisite modelleri (Power Law) genellikle basit modellerdir ve günümüzde Holloman ifadesi ile temsil edilmektedir (Holloman, 1945). Holloman ifadesinde gerilme ve plastik gerinim arasındaki ilişki Denklem (4.2)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n \quad (4.2)$$

Burada K sac metalin mukavemet katsayısı ve n ise pekleşme üstelidir. İzotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralı kabulü yapan en eski akma kriteri Tresca (1864) akma kriteridir. Maksimum kayma gerilmesi kriteri olarak da bilinen Tresca akma kriterinde akma, kayma gerilmesinin kritik bir değere ulaşması ile başlamaktadır. Bu kriter Denklem (4.3)'teki gibi ifade edilmektedir (Doğan, 2015).

$$\max \{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3| \} = \sigma_y \quad (4.3)$$

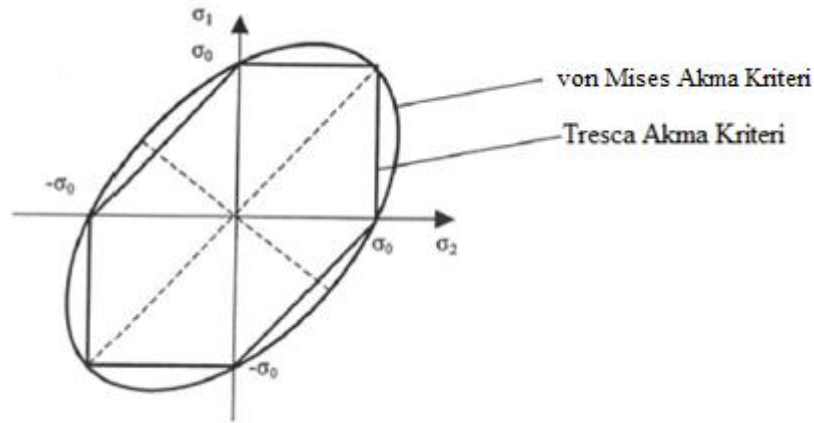
Bu denklemde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeler ve σ_y ise akma gerilmesidir. İzotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralı kabulü yapan önemli bir başka kriter de J_2 kriteri olarak da bilinen von Mises akma kriterinde ise üç eksenli yükleme durumundaki eşdeğer gerilme, sac metalin akma gerilmesini geçtiği zaman akma olayının meydana geleceğini belirtmektedir ve akma yüzeyi daire olarak ifade edilmektedir. Bu akma kriterinde akma olayının sadece J_2 'ye bağlı olduğunu kabul etmektedir ve izotropi kabulü yapılmaktadır. von Mises akma kriteri Denklem (4.4)'teki gibi ifade edilmektedir (Doğan, 2015).

$$J_2 = S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_y^2 \quad (4.4)$$

Bu denklemde S_{ij} deviatorik gerime tensörü ve σ_y akma gerilmesidir. von Mises akma kriterinde düzlem gerilme durumu için Denklem (4.5)'teki gibi ifade edilmektedir (Esener, 2015).

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 = 2 \sigma_0^2 \quad (4.5)$$

Buradaki denklemde $\sigma_1 - \sigma_2$ asal gerilme düzleminde bir elipsi temsil etmektedir. Tresca ve von Mises akma kriterlerine ait akma yüzeyleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. İki eksenli gerilme durumlarında Tresca ve von Mises akma kriterlerinin farkları ortaya çıkmaktadır. İki eksenli gerilme durumunda Tresca akma kriterinde akma daha erken başlamaktadır ve daha az risk almaktadır (Kılıç vd., 2019).



Şekil 4.5. Asal gerilme düzleminde Tresca ve von Mises akma kriterlerine ait akma yüzeyleri (Esener, 2015).

Yukarıdaki modellerden farklı olarak anizotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralı kabulü yapan ve en sık kullanılan malzeme modelleri Barlat-89 ve Hill-48 modelleridir. Bu modellerden Barlat-89 modeli Barlat ve Lian tarafından 1989 yılında geliştirilmiştir ve akma yüzeyi malzemenin anizotropik parametrelerine bağlı olarak elde edilmektedir. Düzlem gerilme problemleri için Barlat-89 modeli en genel formuyla Denklem (4.6)'daki gibi ifade edilmektedir (Kılıç vd., 2019).

$$2\sigma_y^m = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|K_2|^m \quad (4.6)$$

Burada σ_y akma gerilmesidir. K_1 ve K_2 farklı yönlerdeki akma gerilmelerine bağlı parametrelerdir. Bu denklemde bulunan m üsteli ise malzemenin kristal kafes yapısı ilgilidir. Barlat-89 modeline göre yüzey merkezli kübik malzemeler için m değeri 8, hacim merkezli kübik malzemeler için ise m değeri 6 olarak kullanılması önerilmektedir (Worswick vd., 2000). Barlat-89 modeline ait denklemdeki K_1 ve K_2 değerleri Denklem (4.7)'deki gibi hesaplanmaktadır (Kılıç vd., 2019).

$$K_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2}, K_2 = \left[\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2\sigma_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

a , c ve h ise anizotropi katsayılarına bağlı parametrelerdir ve deneysel olarak elde edilen anizotropi (r_0 , r_{90}) değerleri kullanılarak Denklem (4.8)'deki gibi hesaplanmaktadır (Kılıç vd., 2019).

$$a = 2 - c = 2 - 2 \sqrt{\frac{r_0}{(1+r_0)} \frac{r_{90}}{(1+r_{90})}}, h = \sqrt{\frac{r_0}{(1+r_0)} \frac{(1+r_{90})}{r_{90}}} \quad (4.8)$$

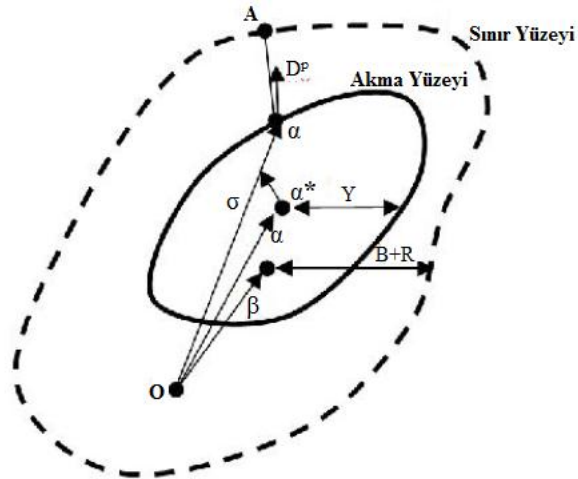
Barlat dışında malzemeyi anizotropik olarak kabul eden Hill-48 modeli, Von Mises akma kriterini geliştirerek 1948 yılında R. Hill tarafından ortaya atılmıştır. Sac metal üç yönde de (r_0, r_{45}, r_{90}) anizotropi değerlerine sahip olması gerekmektedir. Hill-48 modeli en genel olarak Denklem (4.9)'da verilmiştir (Hill, 1948).

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 - 1 = 0 \quad (4.9)$$

Bu denklemde σ_{11} , σ_{22} ve σ_{33} asal gerilmeler ve σ_{12} , σ_{23} ve σ_{31} ise kayma akma gerilmeleridir. F, G, H, L, M ve N sabitleri ise malzemenin anizotropi katsayılarına veya akma gerilmelerine bağlı parametrelerdir. Hill-48 akma kriteri düzlem gerilme koşulu halinde denklemde F, G, H, N parametreleri kalmaktadır ve bu parametreler Denklem (4.10)'daki gibi hesaplanmaktadır (Kılıç vd., 2019).

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_0)}, G = \frac{1}{(1+r_0)}, H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, N = \frac{(r_0+r_{90})(2r_{45}+1)}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (4.10)$$

Pekleşme kuralları arasında üçüncü olarak yazdığımız anizotropik malzeme-kinematik pekleşme kuralı kabulü yapan modellerden ise günümüzde en sık kullanılan Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modelidir (Yoshida vd., 2002). Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modeli akma yüzeyi ve sınır yüzeyi olmak üzere iki yüzey kullanmaktadır. Akma yüzeyi, gerilme uzayındaki malzemenin elastik bölgesini belirler (Ghaei vd., 2010). Şekillendirme prosesinde, akma yüzeyi boyut olarak değişmez fakat deformasyonla akma yüzeyinin merkez noktası hareket etmektedir ve sınır yüzeyi ise hem şekil olarak hem de konum olarak değişmektedir. Şekil 4.6'da iki yüzeyden oluşan Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modelinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.6. Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modelinin şematik gösterimi (Ls-Dyna, 1998).

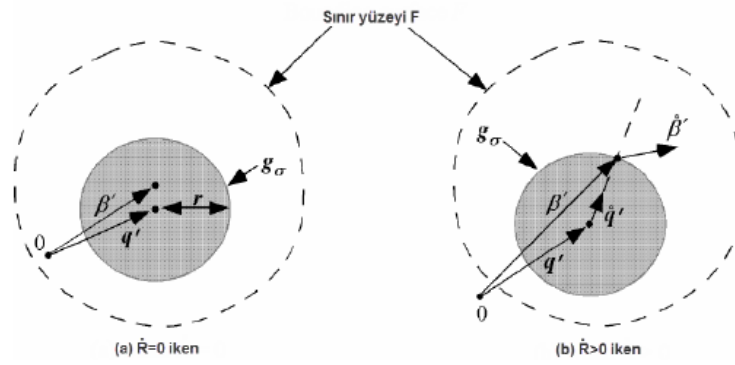
Burada, “O” akma yüzeyinin merkez noktasını, α^* , akma yüzeyinin mevcut durumdaki merkezini, α ise sınır yüzeyin merkezini, β ise iki yüzeyin merkez noktaları arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Y , akma yüzeyinin boyutudur ve deformasyon süresince değişmemektedir. $B+R$, sınır yüzeyinin boyutunu temsil etmektedir, R izotropik pekleşme ile ilişkilidir. Bu değerler Denklem (4.11)’deki gibi hesaplanmaktadır (Ls-Dyna, 1998).

$$\alpha^* = \alpha - \beta$$

$$\alpha^* = c \left[\left(\frac{\alpha}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha^*}} \alpha^* \right] \varepsilon^{-P} \quad (4.11)$$

$$a = B + R - Y$$

Şekillendirme sırasında şekil ve konum değiştiren sınır yüzeyinin şematik gösterimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Sınır yüzeyinin şekil ve konum değiştirme durumunun şematik gösterimi (Esener, 2015).

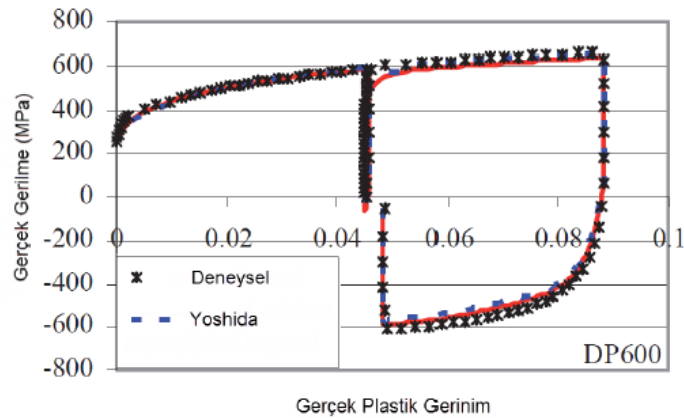
Şekil 4.7'deki sınır yüzeyinin şekil ve konum değiştirme hali Denklem (4.12)'deki gibi hesaplanmaktadır (Esener, 2015).

$$\dot{R} = k(R_{\text{sat}} - R) \frac{p}{\varepsilon}$$

$$(\dot{\beta}') = k \left(\frac{2}{3} B d - \beta' \frac{p}{\varepsilon} \right) \quad (4.12)$$

$$\sigma_{\text{sınır}} = B + R + \beta$$

Yoshida-Uemori nonlinear pekleşme modeli Bauschinger etkisini ve sac metal şekillendirme proseslerindeki malzeme davranışını başarılı bir şekilde tanımlamaktadır. Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modeli ile tahmin edilen bir malzeme davranışı Şekil 4.8'de gerilme-gerinim eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Yoshida nonlinear kinematik pekleşme modeli ile malzeme davranışının tahmini (Shi vd., 2008).

Elastisite modülü Bauschinger etkisi ile değişim göstermektedir. Bu durum Yoshida modeli ile Denklem (4.13)'teki gibi tanımlanmaktadır (Esener, 2015).

$$E = E_o - (E_o - E_A)[1 - \exp(-\zeta\bar{\epsilon})] \quad (4.13)$$

Bu bölümde anlatılanlardan özetle, benzetim testleri sonucu elde edilen hataları ve sebeplerini gerek deneysel olarak gerekse sonlu elemanlar analizi ile inceledikten sonra mümkün olduğunca ortam ve şekillendirme koşullarını iyileştirerek yapılan işlemler sonucu elde edilecek olan nihai üründeki hata minimuma inmektedir. Nihai üründe oluşabilecek hata ve kusurları mümkün olduğunca minimum düzeyde tutmak için sadece bunları yapmak yeterli olmamaktadır. Sac metaller kimyasal yapıları, kafes yapıları, mekanik özellikleri, uygulanan haddeleme yöntemleri vb. gibi birbirinden farklı özellik sergilemektedir. Bütün bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda her plastisite modeli bütün sac metaller için aynı hassasiyeti vermemektedir ve her plastisite modeli farklı kabuller barındırmaktadır. Sac metallerde şekillendirme esnasında oluşan plastik deformasyonları modelleyen plastisite modellerini tanımlarken kullanılacak parametrelerin ve kabullerin de hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Böylelikle minimum hata ile kaliteli ve etkili bir sac metal şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir.

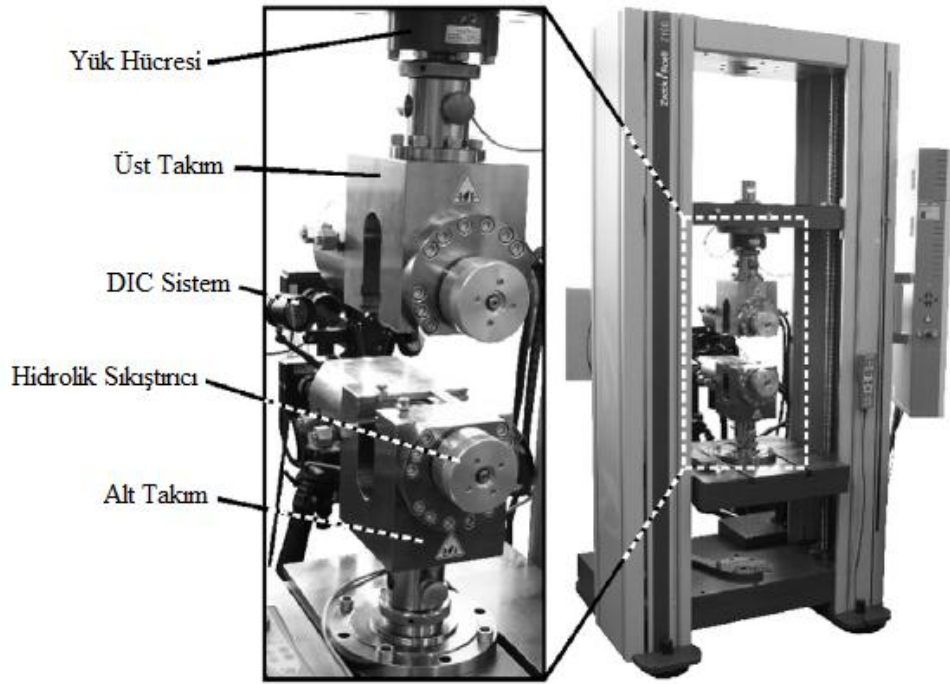
Tez çalışmasında Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori plastisite modellerinde DP600, DP980, DC05 ve AA5754 alaşımı için gerekli tüm mekanik özellikler belirlenmiş, malzemeler ve plastisite modelleri açısından değerlendirme yapılmıştır.

5. UYGULAMA ÇALIŞMALARI

Bu tez kapsamında önceki bölümlerde anlatılanlar doğrultusunda plastisite modellerinden Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori plastisite modellerinin sac metal şekillendirme sonlu elemanlar analizleri tahmin performansı üzerindeki etkileri incelendi. Bu kapsamda sac metal şekillendirme işlemlerinden derin çekme, kare kutu çekme ve V-kalıpta eğme prosesleri kullanıldı. Bu proseslerin tercih nedeni her bir prosesin farklı bir karakterizasyona sahip olmasıdır. Bu proseslerde DP600, DP980, DC05 ve AA5754 malzemeleri kullanılmıştır. Plastisite modellerinin ihtiyaç duyduğu mekanik özellikler mekanik testler vasıtası ile elde edilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde Dynaform ticari yazılımı tercih edilmiştir. Her proses malzemeler ve plastisite modelleri açısından değerlendirilmiş ve en hassas sonucun elde edildiği plastisite modeli tespit edilmiştir.

5.1. Malzeme Karakterizasyonu

Sac metal şekillendirme işlemleri sonucu malzemede meydana gelen yırtılma, kırışma, kulaklanma, şekil bozukluğu gibi kusurların yanı sıra zamanla kalıp ve kullanılan malzeme özellikleri gibi faktörlerden kaynaklanan kalıplardaki aşınmalar sonucunda nihai üründe istenilen toleranslar elde edilememektedir. Karşılaşılan bu kusurlardan dolayı imalatta montaj hattında sorunlar yaşanmaktadır. Kusurların nihai ürün üzerinden düzeltilmeye çalışılması maliyeti oldukça artırmaktadır. Bu kusurlara sebep olan etkenler tasarım aşamasında iken dikkat edilmeli ve imalata geçilmeden önlenmelidir. Sac metal şekillendirme işlemlerinin sorunsuz bir şekilde gerçekleşebilmesi için kullanılacak olan sac metallerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve plastisite modellerini uygulamak için gereken parametrelerin de dikkatli bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir. Malzemelerin mekanik özellikleri malzeme karakterizasyon testleri ile belirlenmektedir. Bu testler sonucunda elde edilen mekanik özellikler ışığında belirlenen uygun plastisite modelleri sonlu elemanlar analizinde uygulanarak hassas sonuçlar elde edilmektedir. Mekanik özelliklerin bulunabilmesi için en çok kullanılan deneyler yorulma, çekme ve kayma deneyleridir. Bu deneyler arasında en sık kullanılan yöntem çekme deneyidir. Örnek tek eksenli bir çekme cihazı ve kısımları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Tek eksenli çekme cihazı (Suttner ve Merklein, 2017).

Çekme deneyinde ASTM standartlarına uygun çekme numunesi hazırlanır. Hazırlanan bu numune çekme cihazının çeneleri arasında ortalayacak şekilde düzgünce sıkıştırılır ve çekme numunesi gittikçe artan bir yükte kopuncaya kadar çekilir. Bu esnada malzemeye uygulanan kuvvet ve uzama miktarı cihaz tarafından kaydedilmektedir. Deney sonucunda zamana bağlı kuvvet ve uzama verileri elde edilmektedir. Elde edilen bu veriler kullanılarak incelenen sac metale ait mekanik özellikler elde edilmektedir. Bu tez kapsamında Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori plastisite modellerinin tez çalışması kapsamında kullanılan malzemelere ait plastisite parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin malzeme modellerine göre mekanik özellikleri (Aryanpour vd., 2012; Toros 2016; Pipard vd., 2013).

	DP600	DP980	DC05	AA5754
POWER LAW MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
Mukavemet katsayısı (MPa)	1080,7	1142	538,5	425
Pekleşme üsteli	0,15	0,12	0,25	0,29
HILL-48 MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
Akma gerilmesi (MPa)	420	652	171	142,5
Elastisite modülü (GPa)	206	207	191	69
Mukavemet katsayısı (MPa)	1080,7	1142	538,5	425
Pekleşme üsteli	0,15	0,12	0,25	0,29
Ortalama anizotropi	0,89	0,74	1,57	0,61
BARLAT-89 MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
Akma gerilmesi (MPa)	420	652	171	142,5
Elastisite modülü (GPa)	206	207	191	69
Hadde yönündeki anizotropi	0,82	0,85	1,96	0,5
Hadde yönüne 45 ⁰ 'deki anizotropi	0,92	0,70	1,35	0,66
Hadde yönüne dik anizotropi	0,91	0,72	1,62	0,61
Kristal yapı üsteli (m)	6	6	6	8
YOSHIDA-UEMORI MALZEME MODEL PARAMETRELERİ				
B (MPa)	555	775,2	168	159,4
c	200	239,2	100	75,08
R _{sat} (MPa)	190	109,8	200	160
K (MPa)	1080,7	1142	538,5	425
b (MPa)	110	74	13	81,25
h	0,9	0,82	1,6	0,6

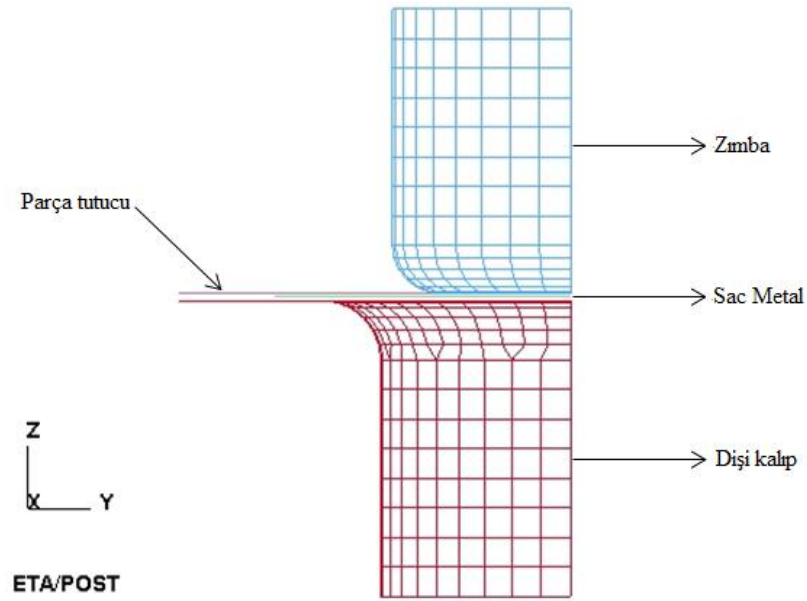
5.2. Literatür Uygulamaları

Tez çalışması kapsamında derin çekme prosesi için kalıp geometrisi ve limit çekme oranlarının (LÇO) karşılaştırıldığı literatürde yayınlanmış olan Bandyopadhyay ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma (2015) esas alınmıştır. Örnek alınan bu çalışmada 1,2 mm kalınlığında DP600, DP980 ve IFHS çelikleri kullanılmıştır. Tüm bu malzemelere Barlat-89 ve Hill-48 plastisite modeli uygulanarak LÇO karşılaştırılmıştır

(Bandyopadhyay vd., 2015). Bu tez çalışmasında ise çift fazlı çelik grubundan olan DP600 ve DP980 malzemelerine ait bir derin çekme prosesinin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir ve farklı malzeme modellerinin seçilen çalışmada bulunan deneysel sonuca yakınsama performansları incelenmiştir. Bu kapsamda incelenen çalışmadaki deneysel sonuçlardan elde edilen LÇO ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen LÇO karşılaştırılmıştır. Limit çekme oranı derin çekilebilirliğin maksimum olduğu sac açınım çapının zımba çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Limit çekme oranı Denklem (5.2.1)'deki gibi yazılmaktadır.

$$L\text{ÇO} = \frac{D_s}{D_z} \quad (5.2.1)$$

Yukarıdaki denklemde D_s sac açınım çapını, D_z zımba çapını ifade etmektedir. Limit çekme oranı büyüdükçe sac metale uygulanacak olan zımba kuvveti de artmaktadır. Bu durum derin çekme prosesinde meydana gelen gerilmelerin artmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı derin çekme prosesi sırasında artan gerilmelere dayanıklılık gösteremeyen sac metalde yırtılmalar oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında Power Law, Hill-48, Barlat-89 ve Yoshida-Uemori plastisite modelleri ile DP600 ve DP980 malzemeleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş, malzeme modellerine göre LÇO hesaplanmış ve deneysel sonuç ile kıyaslanmıştır. Tezde kullanılan derin çekme prosesinde aksel simetriden dolayı 1/4 model kullanılmıştır ve bu prosese ait kalıp takım ağ yapısı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

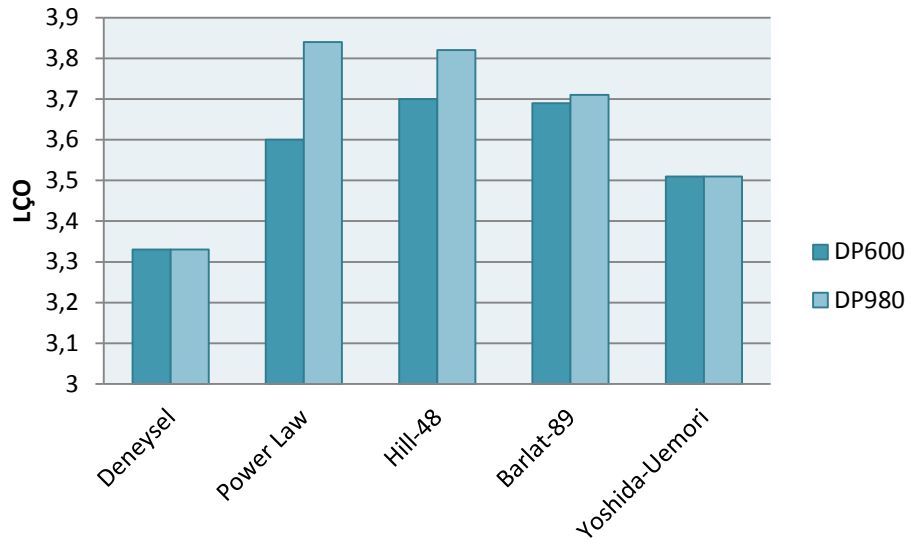


Şekil 5.2. Derin çekme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı.

Proses parametresi olarak parça tutucu kuvvet deneysel çalışma referans alınarak DP600 için 23 kN ve DP980 için 30 kN olarak kullanılmıştır (Bandyopadhyay vd., 2015). Bunun dışında sac metal kalınlıkları her iki malzeme için de 1,2 mm, sürtünme katsayısı 0,125 ve kalıp hızı 2000 mm/s'dir. Sonlu elemanlar hesaplama parametreleri ise Çizelge 5.2'de verilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonrasında LÇO'lar her model için tespit edilmiştir. DP600 ve DP980 malzemelerine ait deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen LÇO sonuçları Şekil 5.3'teki gibi karşılaştırılmıştır. Grafikten görüldüğü üzere her model derin çekilebilirliği yakın tahmin etse de kinematik pekleşme davranışını modelleyen Yoshida-Uemori modeli her iki malzeme için de en yakın sonucu elde etmiştir.

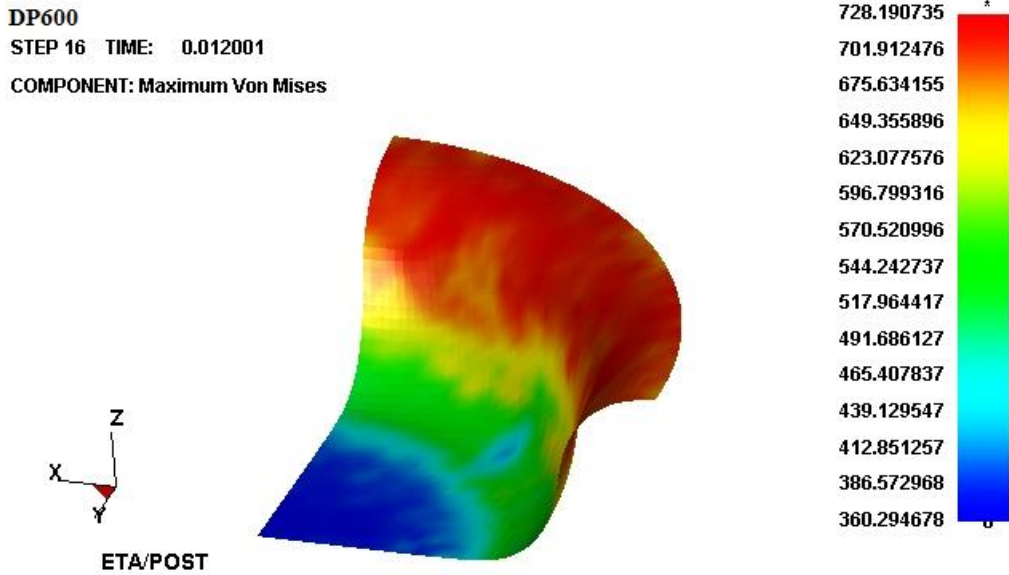
Çizelge 5.2. Derin çekme simülasyonu hesaplama parametreleri.

Parametre	Değer
Sac eleman boyutu	1 mm
Sac eleman sayısı	1943
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

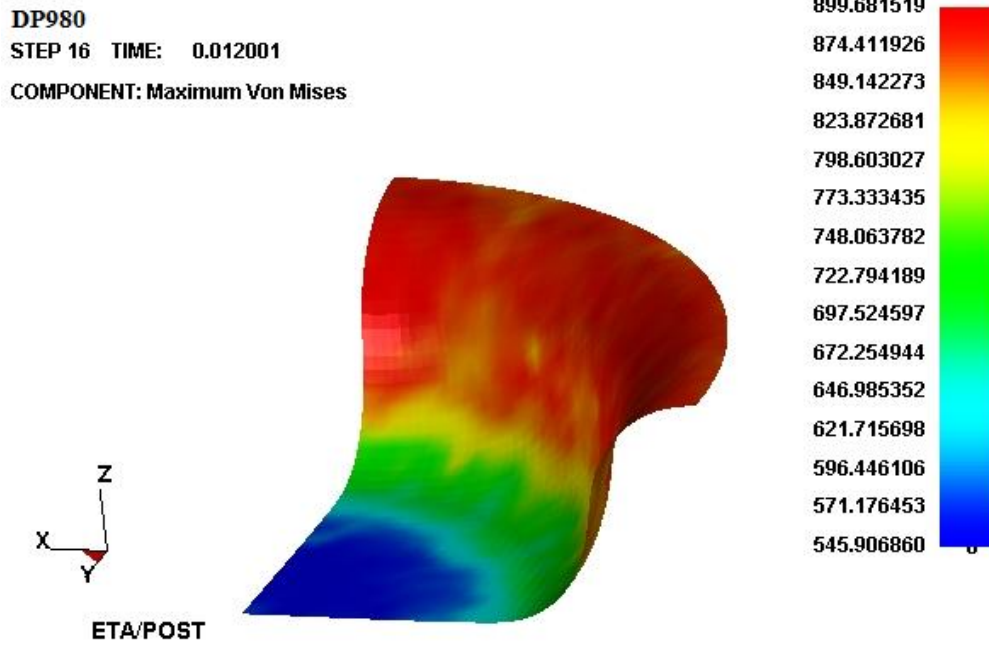


Şekil 5.3. DP600 ve DP980 malzemelerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen LÇÖ değerlerinin karşılaştırılması.

DP600 ve DP980 malzemelerine sonlu elemanlar analizinde Yoshida-Uemori plastisite modeli uygulandıktan sonra malzemelerde meydana gelen von Mises gerilmeleri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

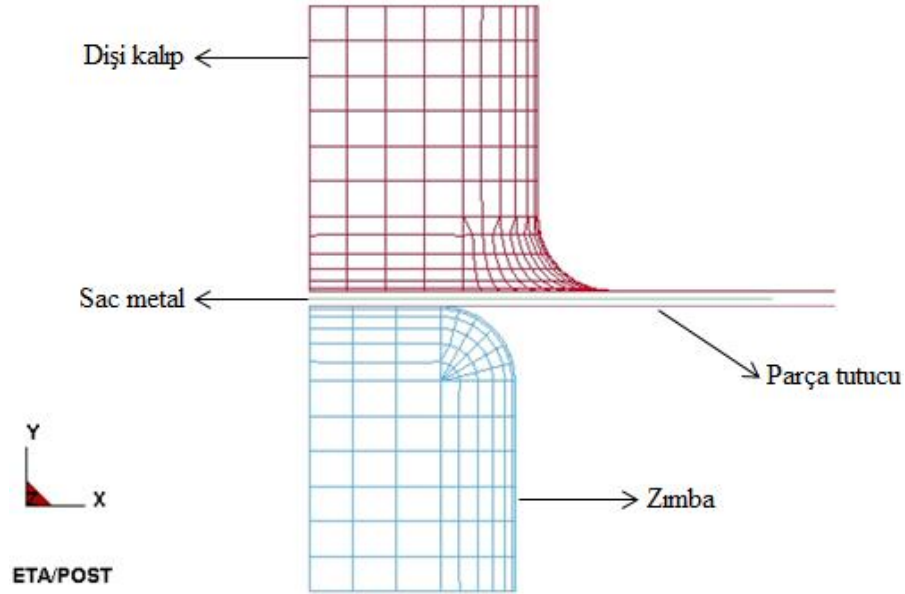


Şekil 5.4. DP600 malzemesinde Yoshida-Uemori plastisite modeli uygulandıktan sonra meydana gelen von Mises gerilme dağılımı.



Şekil 5.5. DP980 malzemesinde Yoshida-Uemori plastisite modeli uygulandıktan sonra meydana gelen von Mises gerilme dağılımı.

Kare kutu çekme prosesinde gerek yırtılma yüksekliği gerekse de kırışma ve kulaklanma durumları etkin bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle malzeme modellerinin etkisinin araştırılması adına çalışmada ikinci proses olarak kare kutu çekme prosesi seçilmiştir. Tez çalışması kapsamında kare kutu çekme prosesi için kalıp geometrisi örnek alınarak yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırıldığı literatürde yayınlanmış olan Demirci ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma (2008) esas alınmıştır. Örnek alınan bu çalışmada 2 mm kalınlığında AA5754-O alaşımına farklı parça tutucu kuvvetler uygulanarak sac metalin yırtılmadan sağlıklı bir şekilde çekilebileceği maksimum çekme miktarı için deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen değerler karşılaştırılarak en makul olan parça tutucu kuvvet değeri tespit edilmektedir (Demirci vd., 2008). Bu değer üzerinde uygulanan parça tutucu kuvvet sonrasında sac metalde yırtılmalar görülmektedir. Bu tez çalışmasında ise malzeme olarak 2 mm kalınlığında AA5754 alüminyum alaşımı kullanılarak bir kare kutu çekme işlemine ait sonlu elemanlar analizleri farklı malzeme modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Eksenel simetriden dolayı 1/4 model kullanılmıştır ve kare kutu çekme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Proses parametresi olarak 55 kN parça tutucu kuvvet, 0,125 sürtünme katsayısı ve 2000 mm/s kalıp hızı uygulanmıştır. Kullanılan sonlu elemanlar hesaplama parametreleri ise Çizelge 5.3'te verilmiştir.

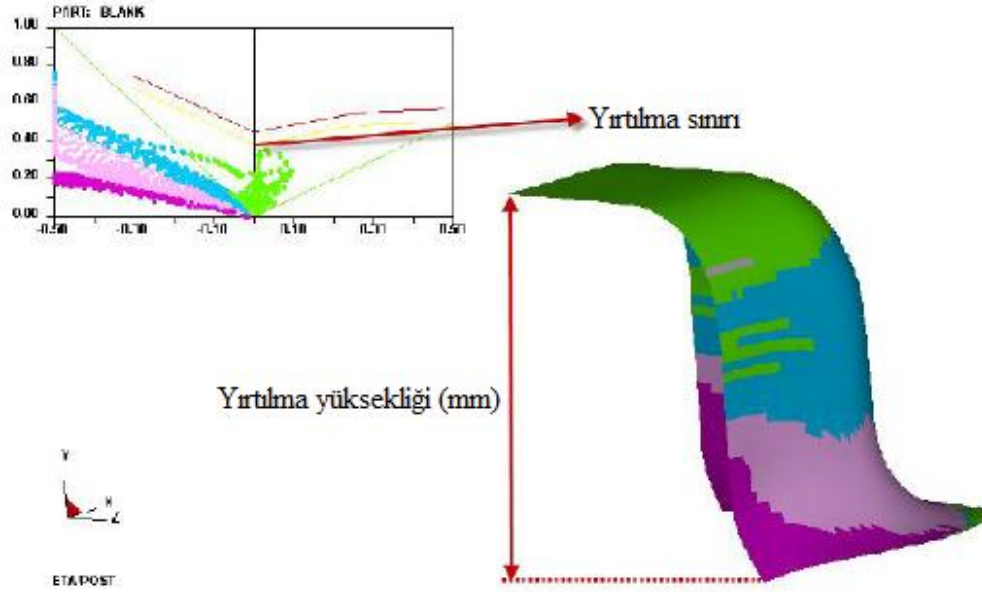


Şekil 5.6. Kare kutu çekme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı.

Çizelge 5.3. Kare kutu çekme simülasyonu hesaplama parametreleri.

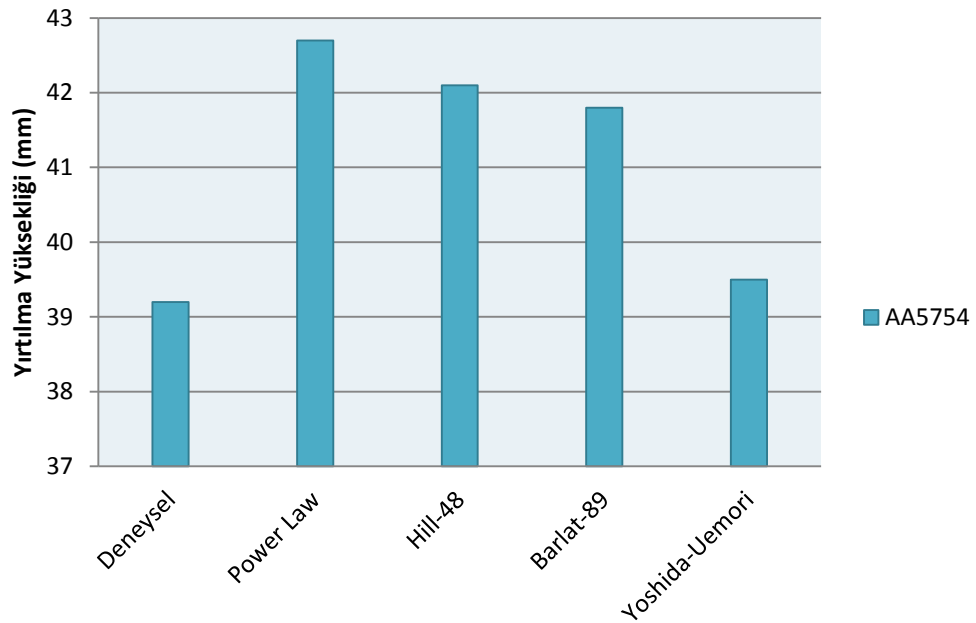
Parametre	Değer
Sac eleman boyutu	1 mm
Sac eleman sayısı	3042
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Karşılaştırma yapmak adına seçilen çalışmadan deneysel referans olarak yırtılma yüksekliği alınmıştır ve kare kutu çekme prosesi için yapılan sonlu elemanlar analizlerinden de ayrı ayrı yırtılma yükseklikleri tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliği Şekil 5.7’de gösterildiği gibi şekillendirme sınır diyagramında yırtılma sınırındaki kalıp ilerleme mesafesi olarak alınmıştır.



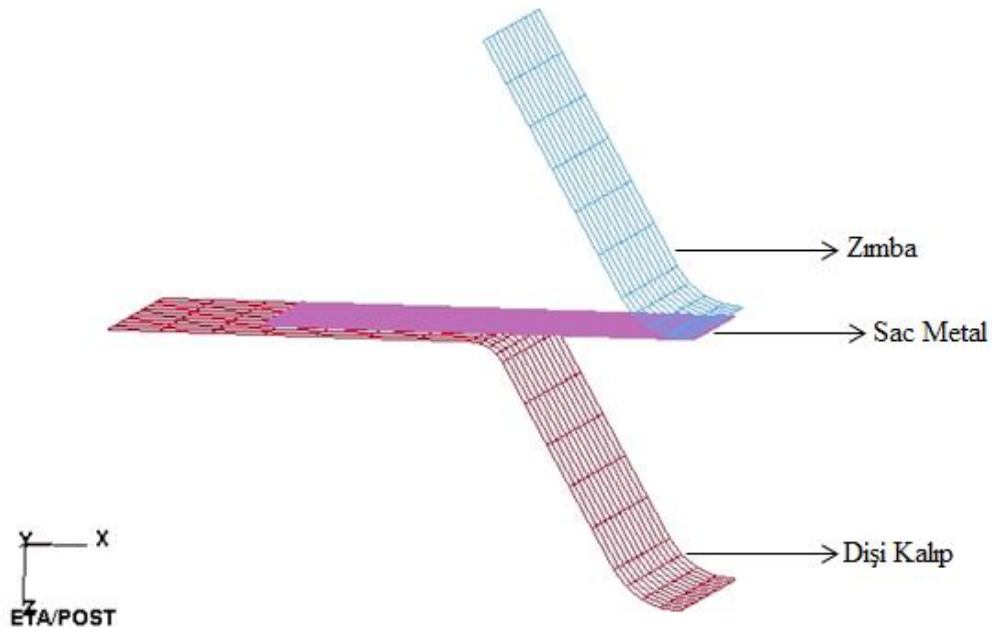
Şekil 5.7. Kare kutu çekme prosesi için sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliğinin tespiti.

Yapılan simülasyonlar sonrasında her malzeme modeli ile elde edilen yırtılma yüksekliklerinin deneysel sonuç ile kıyaslanması Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. AA5754 malzemesinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen yırtılma yüksekliklerinin karşılaştırılması.

Benzetim testleri malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin yanı sıra form verme işlemi sonrasında şekil bozukluklarını da tespit edebilmektedir. Bu anlamda en sık kullanılan benzetim testlerinin başında gelen V kalıpta eğme testi çalışmanın üçüncü prosesi olarak seçilmiştir. Bu adımda malzeme modellerinin şekil bozukluğu üzerine etkileri tespit edilecektir. Tez çalışması kapsamında V kalıpta eğme prosesi için 60° açıya sahip V kalıp geometrisi ve deneysel geri esneme değerlerinin örnek olarak alındığı literatürde yayınlanmış olan Uslu'nun yapmış olduğu çalışma (2014) esas alınmıştır. Örnek alınan bu çalışmada 1, 1,5 ve 2 mm kalınlıklarındaki DP600, DP800, DC01, DC04 ve DC05 malzemelerine 60°, 90° ve 120° kalıp açılarında sahip kalıp takımlarında hadde yönünde ve hadde yönüne dik olacak şekilde V büküm uygulanmıştır. Gerçekte uygulanan bu işlemlerin sonlu elemanlar analizi Autoform yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda 1, 1,5 ve 2 mm kalınlıklarındaki kullanılmış olduğu tüm malzemeler için hadde yönünde ve hadde yönüne dik olacak şekilde geri esneme değerleri deneysel ve sayısal olarak ayrı ayrı hesaplanmış ve bu sonuçlar karşılaştırılmıştır (Uslu, 2014). Burada geri esneme açısı, form verme işlemi sonrasında çıkan ürünün ara açısı ile kalıp açısının farkı olarak tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasında malzeme olarak 1 mm kalınlığında DP600 ve DC05 çelikleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda prosese ait sonlu elemanlar modeli simetri koşulundan dolayı 1/2 model olarak oluşturulmuş ve farklı malzeme modelleri ile simülasyonlar gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar deneysel sonuç ile kıyaslanmıştır. V kalıpta eğme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan sonlu elemanlar hesaplama parametreleri Çizelge 5.4'te verilmiş olup proses parametresi olarak sürtünme katsayısı 0,125 ve kalıp hızı 2000 mm/s olarak kullanılmıştır. Bu proses bir serbest bükme işlemi olduğundan dolayı kalıp takımları arasında parça tutucu yer almamaktadır.

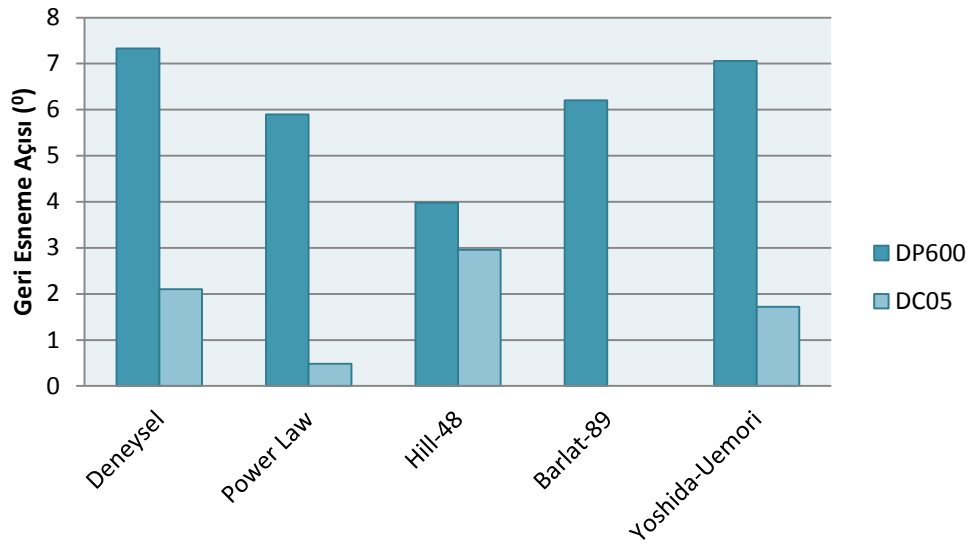


Şekil 5.9. V-kalıpta eğme prosesine ait kalıp takım ağ yapısı.

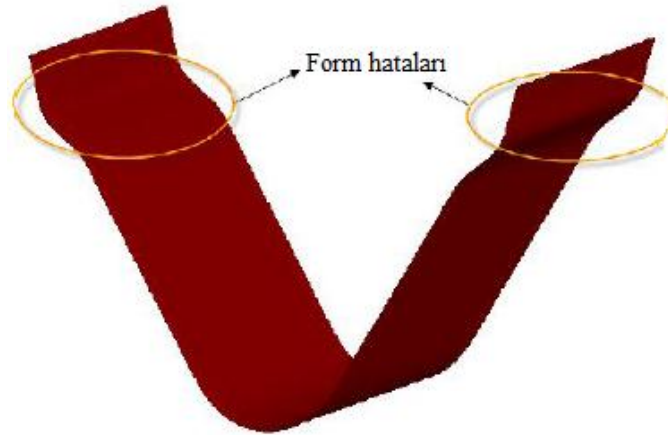
Çizelge 5.4. V-kalıpta eğme simülasyonu hesaplama parametreleri.

Parametre	Değer
Sac eleman boyutu	1 mm
Sac eleman sayısı	2025
Eleman formülasyonu	Tam integrasyonlu kabuk eleman
İntegrasyon nokta sayısı	7

Simülasyon sonuçlarından elde edilen geri esneme değerleri ile referans alınan deneysel sonuçtaki geri esneme değerleri Şekil 5.10'da gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Tahmin performansı olarak en yakın sonucu Yoshida-Uemori plastisite modeli vermektedir. Bu proste Şekil 5.11'de gösterildiği üzere DC05 malzemesi için Barlat-89 plastisite modelinde başarılı bir şekillendirme işlemi gerçekleştirilememiştir.



Şekil 5.10. DP600 ve DC05 malzemesinin deneysel ve sonlu elemanlar sonucu elde edilen geri esneme açılarının karşılaştırılması.



Şekil 5.11. Barlat-89 modelinin DC05 malzemesi için gerçekleştirdiği başarısız tahminde gözlemlenen form hataları.

6. DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Yapılan çalışmada sac metal sonlu elemanlar tahmin performansına malzemelerin plastik davranışını modelleyen malzeme modellerinin etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda malzeme olarak yeni nesil yüksek mukavemetli çelik grubundan olan DP600 ve DP980, düşük karbonlu çelik grubundan olan DC05 ve demir dışı malzeme grubundan olan AA5754 alaşımı seçilmiştir. Literatürde incelenen çalışmalardaki deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak plastisite modellerinin sac metal şekillendirmeye etkisi irdelenmiştir. Proses olarak temelinde şekillendirilebilirlik kavramının incelenmesini amaçlayan derin çekme ve kare kutu çekme, şekil bozukluğunu incelemesini amaçlayan V-kalıpta eğme prosesleri kullanılmıştır. Her malzeme ve her proses için dört farklı plastisite modeli kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Malzeme modelleri temelde izotropik malzeme-izotropik pekleşme kabullü (Power Law), anizotropik malzeme - izotropik pekleşme kabullü (Hill-48, Barlat-89) ve anizotropik malzeme - kinematik pekleşme kabullü (Yoshida-Uemori) olarak gruplandırılmıştır. Tezde kullanılan proseslerden derin çekme ve kare kutu çekmeye ait modellerin aksel simetriden dolayı 1/4 olarak modellenmesi ve V kalıpta eğmeye ait modelin ise simetriden dolayı 1/2 olarak modellenmesindeki amaç uygulanan sonlu elemanlar analizlerinin çözüm sürelerini kısaltmak amaçlı yapılmıştır. Tez çalışmasında sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek için Ls-Dyna yazılımı kullanılmıştır. Simülasyonlar sonrasında elde edilen sonuçlar ilgili proseslerin deneysel verileri ile karşılaştırılarak modellerin tahmin performansları irdelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar tartışıldığında şu bulgulara varılmaktadır:

a. Nihai ürünün kusursuz bir şekilde elde edilebilmesi için sonlu elemanlar analizinde gerçeğe en yakın sonucu verecek olan analizin yapılması gerekmektedir. Bunun için sonlu elemanlar analizinde kullanılacak olan modelin ve ağ yapısının dikkatli bir şekilde oluşturulması, gerekli olan tüm malzeme parametrelerinin belirlenmesi, eleman tipinin ve boyutunun belirlenmesi, en hassas sonucu verecek olan plastisite modelinin seçilmesi vb. gibi parametrelere oldukça dikkat edilmelidir.

b. Plastisite modelleri, ihtiyaç duydukları parametreler bakımından incelendiğinde kinematik pekleşme modelini uygulamak için daha fazla parametreye ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu modeli sonlu elemanlar analizinde kullanabilmek

için gerekli olan parametrelerin eksiksiz bir şekilde elde edilebilmesi adına daha fazla test ya da optimizasyon adımları gerçekleştirilmelidir. Bu açıdan kinematik pekleşme modelleri diğer modellere göre daha fazla kullanım zorluğuna sahiptirler.

c. Derin çekme prosesinde aynı koşullar altında şekillendirilen çift fazlı çeliklerin sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde DP980 çeliğinin limit çekme oranı DP600 çeliğinin limit çekme oranına göre yüksek elde edilmiştir. Bu durum her iki çeliğin iç yapısı ile ilgilidir.

d. Derin çekme prosesinde uygulanan her plastisite modelinde deneysel modele yakın sonuçlar elde edilmiştir. Fakat bu plastisite modellerinin içinde en yakın sonuçlar kinematik pekleşme modeli olan Yoshida-Uemori modeli ile elde edilmiştir. Her iki çift fazlı çelik için de başarılı tahminler gerçekleştirilmiştir.

e. Kare kutu çekme prosesinde en uzak tahmin sonucu izotropik pekleşme modeli olan Power Law modeli ile elde edilmiştir. Uygulamada kare kutu çekme prosesinde bu model ile elde edilecek olan AA5754 alaşım ürünü en çok kusur içeren ürün olacaktır. Bu proseste en yakın tahmin sonucu ise neredeyse deneysel yırtılma yüksekliğini yakalayabilen Yoshida-Uemori modeli ile elde edilmiştir. Diğer modellerin deneysel yırtılma yüksekliği ile farkları 2,5-3,5 mm mertebelerinde iken Yoshida-Uemori modelinin deneysel modelle farkı 0,2 mm'dir. Bu proseste kinematik malzeme modelinin alüminyum alaşımları için de doğru tahmin verebildiği tespit edilmiştir.

f. V-kalıpta eğme prosesi için incelemiş olduğumuz çalışmadaki DP600 ve DC05 çeliklerine ait deneysel verilerdeki şekil bozukluğu değerleri karşılaştırıldığında DP600 çeliğinin geri esneme miktarı DC05 çeliğine oranla daha yüksek elde edilmiştir. DP600 çeliği yüksek mukavemetli bir çelik olmasından dolayı kalıcı olarak şekil verebilmek için gerekli olan kuvvet aynı koşullarda incelenen düşük karbonlu DC05 çeliğine göre daha yüksektir. Bu sebepten dolayı aynı koşullarda ve yüklerde incelenen DP600 ve DC05 çeliklerindeki geri esneme miktarları arasındaki fark fazladır.

g. V-kalıpta eğme prosesi açısından deneysel ve simülasyon sonuçları incelendiğinde yine şekil bozukluğunu Yoshida-Uemori modeli deneysel sonuca en yakın tahmini vermiştir. Şekil bozukluğunda kinematik pekleşmenin etkisi daha fazla gözlemlenmiş olup modeller arasındaki en büyük farkın bu proseste ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak Barlat-89 modelinde bu prosesin şekillendirme adımı dahi tahmin edilememiştir. Barlat-89 modelinin alüminyum alaşımları için daha uygun bir

model olduğu literatürdeki çalışma ile doğrulanmıştır (Tang vd., 2010). Bu durum yapılan çalışmada da gözlemlenmiş olup çelik malzemelerde Barlat-89 modeli özellikle şekil bozukluğu açısından başarısız olmuştur.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özetlendiğinde, imalatı yapılacak olan ürünün ilk önce tasarımı ve analizi bilgisayar ortamında kullanılan sonlu elemanlar analizlerinde büyük bir titizlikle yapılmalıdır. İmalatta oluşabilecek ve kusurlara sebep olan tüm etkenler, tasarım aşamasında düzeltilerek deneme-yanılma olayı ortadan kaldırılmaktadır. Böylelikle hem zamandan hem de maliyet açısından kar sağlanmış olunur. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan kinematik pekleşme kabulü yapan plastisite modellerinin daha hassas tahminler yapabildikleri tespit edilmiştir. Bu durum, kinematik pekleşme modellerinin Bauschinger etkisini dikkate alabilme kabiliyetlerinin bulunmasının ve sac metal şekillendirme işlemlerinde büküm bölgelerinde de bu durumun etkin olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Tahmin hassasiyetinde plastisite modellerinin şekil bozukluğu üzerinde daha baskın bir etkiye sahip oldukları tespit edilmiştir. Her plastisite modeli bütün sac metaller için aynı hassasiyeti vermemektedir ve her plastisite modeli farklı kabuller barındırmaktadır. Bu sebepten dolayı denenecek proses koşulları ve kullanılacak malzemeler dikkate alınarak gerçeğe en yakın sonucu verecek olan plastisite modeli tercih edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak sac metal sonlu elemanlar analizlerinde plastisite modelinin tespiti özellikle şekil bozukluğu tahminlerinde büyük rol oynamaktadır.

Gelecekte bu alanda yapılması planlanan çalışmalara fikir olması adına öneri açısından endüstriyel imalatta kullanılan bir parçanın kalıp takımları tasarlanarak bu çalışmada incelenen malzeme ve plastisite modelleri kullanılarak uygun plastisite modeli tespit edilebilir. Uygun olarak tespit edilen plastisite modeline rağmen hatalar oluşuyorsa bunların sebepleri ve nasıl önlenebileceği üzerine çalışılabilir. Ayrıca sunulan tez çalışmasındaki malzemeler ve kalıp takımları kullanılarak tez çalışmasında kullanılan plastisite modellerinden farklı plastisite modellerinin incelemesi yapıldıktan sonra sağlıklı bir şekillendirme için daha uygun bir plastisite modelinin tespiti sorgulanabilir.

KAYNAKLAR

- Alıcı, İ. (2001). *Derin çekme saclarının deformasyon davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Andersson, A. (2005). Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member. *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 352-356.
- Arslan, B. (2004). *Geri esnemenin sac parçalarının biçim tamlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları ile değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aryanpour A., & Green D. E. (2012). Evaluation of LS-DYNA® Material Models for the Analysis of Sidewall Curl in Advanced High Strength Steels. *12th International LS-DYNA® Users Conference*, 3-5 June, Canada.
- Babacan, K. (2007). *Mekanik preslerde şekillendirme hassasiyetini etkileyen faktörlerin incelenmesi ve pres elemanları üzerinde uygulanacak mukavemet analizleri ile konstrüktif iyileştirmelerin sağlanması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., & Padmanabham, G. (2015). Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 48–64.
- Billur, E., Çetin, B., & Gurleyik, M. (2016). New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends and Constraints. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 2(1).
- Çetin, M. S. (2007). *Derin çekme ile soğuk şekillendirmenin sonlu elemanlar metodu yardımıyla analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Demirci, H. İ., Esner, C., & Yaşar, M. (2008). Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: Theoretical and experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 152-160.
- Demirkol M. (2010). *Plastik Şekil Verme Teknolojisi*. İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, İmal Usulleri II Ders Notları.
- Doğan, U. (2015). *Progresif kalıpla derin çekme süreçlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğu, M. (2014). *Çamaşır makinesi imalatında kullanılan çelik sacların şekil alma kabiliyetinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Durgun, İ., & Sakin, A. (2016). Artımlı sac şekillendirme tekniği ile otomobil sac parça üretimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(1), 8-16.
- Dwivedi, R., & Agnihotri, G. (2017). Study of deep drawing process parameters. *Materials Today: Proceedings*, 4, 820-826.
- Erdin, M. E. (2003). *Sünek Olmayan/ Yüksek Mukavemetli Metal Sacların Isıtılarak Şekillendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Esener, E. (2015). *Plastik Şekil Verme Proseslerinde Form ve Şekillendirme Hatalarının Telif Edilmesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Esener, E., Sönmez, E., & Fırat, M. (2018). Metal Şekillendirme Proseslerinde Sac Açınım Geometrisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 79-89.
- Ghaei, A., Green, D. D., & Taherizadeh, A. (2010). Semi-implicit numerical integration of Yoshida–Uemori two-surface plasticity model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, 531–540.
- Goodwin, G., M. (1968). Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *Society of Automotive Engineers Transactions*, Paper 680093, 77, 380-387.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems, 4th edition*. Lehigh University, United States of America, 1025.
- Grote, K. H., & Antonsson, E. K. (2011). *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. İngiltere, 1231.
- Hayat, F. (2010). Trip çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanımının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(4), 701-712.
- Hill, R. (1948). A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London*, 281-297.
- Holloman, J. H. (1945). *Tensile Deformation*. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 162:268-290.
- İlhan, A. (2018). *Sac metal şekillendirmede mukavemet artırıcı parametrelerin optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Karaağaç, İ., & Özdemir, A. (2013). Kare geometrinin hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilebilirliğinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 33-41.
- Karataş, E. (2009). *Sonlu elemanlar yöntemi ile sac metalin büküm şekillerine göre deformasyonunun incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Kayalı, S., & Ensari, C. (1986). *Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları*. İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Keeler, S.P., & Backofen, W. A. (1963). Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. *Transactions of American Society for Metals*, 56(1), 25-48.
- Kılıç, S., Öztürk, F., & Toros, S. (2019). Çelik, Alüminyum ve Titanyum Alaşımlarında Hu2003 Akma Kriteri Performansının Araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 1-18.
- Kulkarni, M. S., & Gajjal, S. Y. (2015). Review of sheet metal forming analysis. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 2(1).
- Ls-Dyna Theoretical Manual. (1998). Livermore Software Technology Corporation.
- Milli Eğitim Bakanlığı. (2006). *Çekme kalıpları 3*. Makine Teknolojisi, Ankara.
- Mutlu, S. (2012). *Progresif kalıplarla derin çekme otomasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Özcan, E. (2015). *Çelik sacların biçimlendirme özelliklerini etkileyen parametrelerin araştırılması ve biçimlendirme sınır diyagramlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, F., & Lee, D. (2005). Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test. *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 247-253.
- Pipard, J. M., Balan, T., Abed, Meraim, F., & Lemoine, X. (2013). Elasto-viscoplastic modeling of mild steels for sheet forming applications over a large range of strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 2691-2700.
- Sezgin, C. T. (2017). Otomotiv endüstrisinde yeni nesil çelik kullanımının önemi. *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(3), 205-210.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Shi, M. F., Zhu, X., Xia, C., & Stoughton, T. (2008). Determination of nonlinear isotropic/kinematic hardening constitutive parameters for AHSS using tension and compression tests. *In Numisheet Conference*, Sept 1-5, Interlaken, Switzerland.
- Slater, R. C. (1977). *Engineering and Plasticity: Theory and Application to Metal Forming Processes*. Macmillan International Higher Education, London, UK, 419.
- Suttner, S., & Merklein, M. (2017). A new approach for the determination of the linear elastic modulus from uniaxial tensile tests of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 241, 64-72.
- Şen, H. (2015). *Levhaların bükülmesinde geri yaylanma davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sönmez, E. (2015). *Metal şekillendirme işleminde geri esneme tahmininin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Tang, B., Lu, X., Wang, Z., & Zhao, Z. (2010). Springback investigation of anisotropic aluminum alloy sheet with a mixed hardening rule and Barlat yield criteria in sheet metal forming. *Materials & Design*, 31(4), 2043-2050.
- Tekaslan, Ö., Şeker, U., & Özdemir, A. (2006). Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies. *Materials and Design*, 27, 251-258.
- Topçu, M., & Taşgetiren, S. (1998). *Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayın No:007, Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli, 296.
- Toros, S., Polat, A., & Ozturk, F. (2012). Formability and springback characterization of TRIP800 advanced high strength steel. *Materials and Design*, 41, 298-305.
- Toros, S. (2016). Parameters Determination of Yoshida Uemori Model Through Optimization Process of Cyclic Tension-Compression Test and V-Bending Springback. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(10), 1893-1911.
- Ulu, D. (2008). *Derin çekme prosesi ile üretilen alüminyum sac metal parçalarına ait veri tabanı oluşturulması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Uslu, E. (2014). *Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Uysal, E., & Öztürk, F. (2010). Örnek Bir Uygulama İle Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Elde Edilmesi. 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 11-12 Kasım, Balıkesir.
- Verma, R. K., & Haldar, A. (2007). Effect of normal anisotropy on springback. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 300-304.
- Yıldız, A. (2013). *Mekanik preslerde kullanılmaya uygun bir sürekli değişken aktarma organının tasarımı ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yıldız, B. (2017). *Derin çekme işleminde kalıp tasarımının sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Yoshida, F., & Uemori, T. (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Baushinger effect and workhardening stagnation. *International Journal of Plasticity*, 18(5-6), 661-686.
- Worswick, M. J., & Fin, M. J. (2000). The numerical simulation of stretch flange forming. *International Journal of Plasticity*, 16, 701-720.
- Xie, H., Wang, Q., Liu, K., Peng, F., Dong, X., & Wang, J. (2015). Investigation of influence of direct-current pulses on springback during V-bending of AZ31B magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 321-327.
- Xu, W. L., Ma, C. H., Li, C. H., & Feng, W. J. (2004). Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151, 217-222.
- <http://www.sonluelemanlaranalizi.com/mekanik-tasarim-ve-prototip-imalati/sonlu-elemanlar-analizi-fea-3-boyutlu-tasarim-modelleme-muhendislik-hizmetleri-3/>, (23.03.2019).

ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Özlem KÖLEOĞLU GÜRSOY
Doğum Yeri ve Tarihi : Bakırköy/ 25.01.1993



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 2015.
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Stajlar : Kurtsan Tarım (İmalat Stajı), Nova Kalıp (Yönetim Stajı)
Projeler : Katsu Ves.20 Traktör Tasarımı
Çalıştığı Kurumlar : Tulsan Tarım, Agrives (İstanbul, TÜRKİYE)

İletişim

E-Posta Adresi : okoleoglu@gmail.com

Akademik Çalışmaları

- O. Köleoğlu Gürsoy, E. Esener. (2019). Malzeme Modellerinin Sac Metal Sonlu Elemanlar Analizi Tahmin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 6 (1), 1-11.

Tarih: 25/07/2019