

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE GERİ
ESNEME TAHMİNİNİN DENEYSEL VE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre SÖNMEZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIMI VE İMALATI
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Murat ÖZSOY

Haziran 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

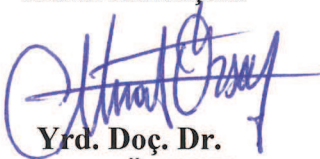
**METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE
GERİ ESNEME TAHMİNİNİN DENEYSEL VE
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

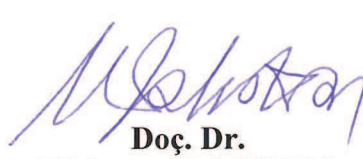
Emre SÖNMEZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIMI VE İMALATI

Bu tez 18 / 06 / 2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr.
Murat ÖZSOY
Jüri Başkanı



Doç. Dr.
Mehmet ÇALIŞKAN
Üye



Yrd. Doç. Dr.
Emin AÇIKKALP
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Emre SÖNMEZ

25.06.2015

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında benden bilgisini ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Murat ÖZSOY'a, lisans öğrenimimden bu yana bana birçok konuda destek veren, mesleki bilgi ve tecrübeleri ile bana her zaman yardımcı olan hocam Dr. Emre ESENER'e, çalışma ile ilgili önerileri ve yardımları için Doç.Dr. Mehmet FIRAT'a çok teşekkür ederim.

Kalıp tasarımında ve deneylerde, dar vakitlerine rağmen ilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Coşkunöz A.Ő. alıőanlarından Sn. Mustafa YENİCE ve Sn. Adem KARŞI 'ya, kalıp imalatında emeği geçen tüm Sönmez Plastik Ltd.Şti. alıőanlarına teşekkür ederim.

Çalıőmam boyunca manevi desteklerinden ötürü bölüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en çok emekleri olan her zaman yanımda olan aileme sonsuz őükranlarımı sunar, ellerinden öperim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	10
1.1. Literatür Çalışması	12
1.2. Tezin Amacı.....	19

BÖLÜM 2.

MATERYAL VE YÖNTEM.....	20
2.1. Geri Esneme	20
2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	21
2.2.1. Ağ yapısı ve eleman tipi	22
2.2.2. Sınır şartları	26
2.3. Çekme Deneyi	27
2.4. Anizotropi.....	31
2.5. Akma Eğrisi.....	32
2.6. Bauschinger Etkisi ve Pekleşme	34
2.7. Akma Kriterleri	36
2.7.1. Tresca akma kriteri	36
2.7.2. Von-Mises akma kriteri.....	37

2.7.3. Hill-48 akma kriteri	38
BÖLÜM 3.	
PROSES VE KALIP TASARIMI	40
3.1. Açılı Kanal Çekme Prosesi	41
3.2. Kalıp Tasarımı	41
3.3. Kalıp İmalatı.....	45
BÖLÜM 4.	
UYGULAMA ÖRNEKLERİ	46
4.1. Deneysel Çalışmalar.....	46
4.2. Sonlu Elemanlar Analizi.....	49
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	57
KAYNAKLAR.....	58
EKLER	62
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: American society for testing and materials
E	: Elastik modül
ε	: Gerinim
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: x,y ve z eksenindeki gerinim
$\varepsilon_{müh}$: Mühendislik gerinimi
ε_0	: Ön gerinim
ε_p	: Plastik gerinim
σ	: Gerilme
σ_a	: Akma gerilmesi
$\sigma_{müh}$: Mühendislik gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: x, y ve z yönündeki asal gerilmeler
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x,y ve z yönündeki gerilmeler
σ_e^{vm}	: Eşdeğer von-Mises gerilmesi
σ_∞	: Maksimum gerilme
K	: Mukavemet katsayısı
n	: Pekleşme üsteli
r	: Anizotropi
r_{bar}	: Ortalama anizotropi
r_0	: Hadde yönünde anizotropi
r_{45}	: Hadde yönüne 45° açıda anizotropi
r_{90}	: Hadde yönüne dik anizotropi
r_0	: Hadde yönünde anizotropi
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: xy, yz ve zx düzlemlerindeki kayma gerilmeleri
u	: Poisson oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Otomobil gövdesinde kullanılan malzemeler	11
Şekil 1.2. Yüksek mukavemetli çelikler	11
Şekil 2.1. Farklı malzemeler ile aynı kalıpta basılmış sac parçalar	20
Şekil 2.2. İki farklı malzeme için açısız ve yan duvar eğrilik değişimleri	21
Şekil 2.3. Sac şekillendirme sonlu elemanlar modeli	23
Şekil 2.4. Sıkça kullanılan eleman tipleri	23
Şekil 2.5. Tam integrasyonlu kabuk elemanın şekilsel gösterimi	25
Şekil 2.6. ASTM E8 standartlarında çekme testi numune ölçüleri	27
Şekil 2.7. Çekme cihazı	28
Şekil 2.8. Örnek bir (σ - ϵ) grafiği	29
Şekil 2.9. Mühendislik ve Gerçek Gerilme Gerinim Eğrileri	30
Şekil 2.10. Farklı hadde yönüne bağlı olarak yapılan çekme testi sonuçları	32
Şekil 2.11. Gerilme-gerinim grafiğinde K ve n parametrelerinin gösterimi	33
Şekil 2.12: Örnek bir akma eğrisi	34
Şekil 2.13. Bauschinger etkisi	35
Şekil 2.14. a) İzotropik pekleşme b) Kinematik pekleşme	36
Şekil 2.15. Tresca ve von Mises akma yüzeyleri	38
Şekil 3.1. (a) Çalışmada kullanılan sac ebatları (b) Ürün geometrisi	40
Şekil 3.2. Kanal çekme prosesinin şematik gösterimi	41
Şekil 3.3. Alt kalıp grubu elemanları	42
Şekil 3.4. Kalıptaki yay dizilimi	43
Şekil 3.5. Üst kalıp takımı	44
Şekil 3.6. Tasarlanan kalıp seti	45
Şekil 3.7. İmalatı gerçekleştirilen kalıp seti	45
Şekil 4.1. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği hidrolik pres	46
Şekil 4.2. Şekillendirilmiş sac	47

Şekil 4.3. Optik tarayıcı ile elde edilen tarama yüzeyleri	47
Şekil 4.4. Her 3 numuneye ait mühendislik gerilme - gerinim eğrileri.....	48
Şekil 4.5. Her üç numuneye ait akma eğrileri	49
Şekil 4.6. Açılı kanal çekme prosesi sonlu elemanlar modeli	50
Şekil 4.7. İterasyon sayısına bağlı olarak yakınsama değerleri	53
Şekil 4.8. Her iki modele ait kalınlık dağılımları	53
Şekil 4.9. Elde edilen yüzeylerin konumlandırılması	54
Şekil 4.10. Geri esneme yüzeylerine ait karşılaştırma	54
Şekil 4.11. Farklı eleman boyutları için simülasyon sonuçları	55
Şekil 4.12. Farklı kalıp hızları için simülasyon sonuçları	56

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. KYS 25x76 sarı renk yay mekanik özellikleri	43
Tablo 4.1. Elde edilen akma mukavemeti ve elastik modül değerleri	48
Tablo 4.2. Elde edilen mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) değerleri...	49
Tablo 4.3. Ağ yapısı tanımlanan parçaların eleman özellikleri	50
Tablo 4.4. Tanımlanan sınır şartları değerleri	51
Tablo 4.5. DC04 çeliğine ait malzeme özellikleri.....	52

ÖZET

Anahtar kelimeler: Geri Esneme Tahmini, Sac Şekillendirme, Sonlu Elemanlar Analizi

Günümüzde sac metaller, başta otomotiv sanayi olmak üzere yaygın kullanıma sahip ürünlerdir. Sac şekillendirme proseslerinde, geri esneme hatası sıklıkla karşılaşılan bir problemdir. Son yıllarda, sonlu elemanlar analizleri ile geri esneme probleminin doğru bir şekilde tahmini mümkün hale gelmiştir. Geri esnemenin doğru bir biçimde tahmin edilebilmesi, kalıp revizyon süreçlerini kısıltacağı için firmalara zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

Bu çalışmada, 0.7 mm kalınlığa sahip DC04 düşük karbonlu çelik sac malzeme için açılı kanal çekme prosesi üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geri esneme davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, açılı kanal çekme prosesi için kalıp yüzeyleri tasarlanmış ve malzemeyi izotrop ve anizotropik olarak ifade eden malzeme modelleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bir kalıp seti tasarlanarak imal edilmiş ve deneysel çalışmalar bu kalıp üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen parçalar optik tarayıcı ile taranarak sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen sonuçlar ile kalınlık dağılımı ve maksimum geri esneme miktarları açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, anizotropinin geri esneme tahmininde etkili olduğu ve çözümdeki tahmin hassasiyetini artırdığı gözlemlenmiştir.

INVESTIGATION OF SPRINGBACK PREDICTION FOR METAL FORMING PROCESS USING EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

Keywords: Springback Prediction, Sheet Metal Forming, Finite Element Analysis

Today, sheet metals have been widely used materials. Springback error is frequently encountered problem in sheet metal forming processes. In recent years, predicting springback amounts with finite element analysis are become possible. With the correct predicting, die revision processes were shortened and it was provided time and cost savings in factories

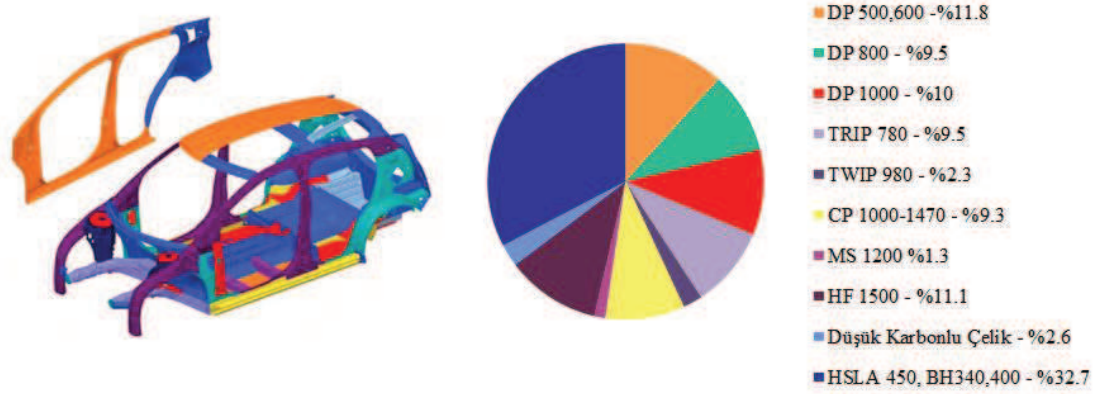
In this study, springback behavior was investigated on angular channel drawing process using finite element analysis for DC04 mild steel with 0.7 mm thickness. For this purpose, angular channel drawing process was designed and finite element analysis were performed using isotropic and anisotropic material models. Also, a die set was designed and produced. Experimental studies were performed using the die. Obtained parts by experimental studies were scanned in optical scanner and compared with the numerical results in terms of thickness deviations and maximum springback amounts. In this context, it was seen that, anisotropy was provided to improve prediction accuracy. It was showed that anisotropy is an effective parameter in springback prediction.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv endüstrisi, içerisinde çok çeşitli mekanik sistemler ve geniş ürün çeşitliliği barındırdığı için teknolojik gelişmelere öncülük etmektedir. Artan rekabet şartları, otomotiv üreticilerini sürekli yeni teknolojiler kullanmaya zorlamış ve bilimsel gelişmelerin uygulanmasında öncülük etmişlerdir. Bununla beraber enerji kaynaklarının azalması ve artan çevre kirliliği nedeniyle uluslararası kurumlar, otomotivlerde yakıt emisyonu ve yakıt tüketimi gibi çeşitli konularda sınırlandırmalar getirmiştir. Bu nedenle otomotivlerin, çevreye minimum zararlı gaz vermesi ve daha az yakıt tüketmesini sağlamaya yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Araçlarda yakıt tüketimini, güç aktarma organları, motor verimi, taşıt aerodinamiği ve araç ağırlığı gibi etmenler etkilemektedir. Bunlar içerisinde sadece araç ağırlığının %50 azaltılması ile %35'e varan yakıt tasarrufunun sağlandığı literatürde belirtilmiştir [1]. Bu nedenle araç ağırlıklarının mümkün olduğunca azaltılması, yakıt tasarrufu açısından oldukça önemlidir.

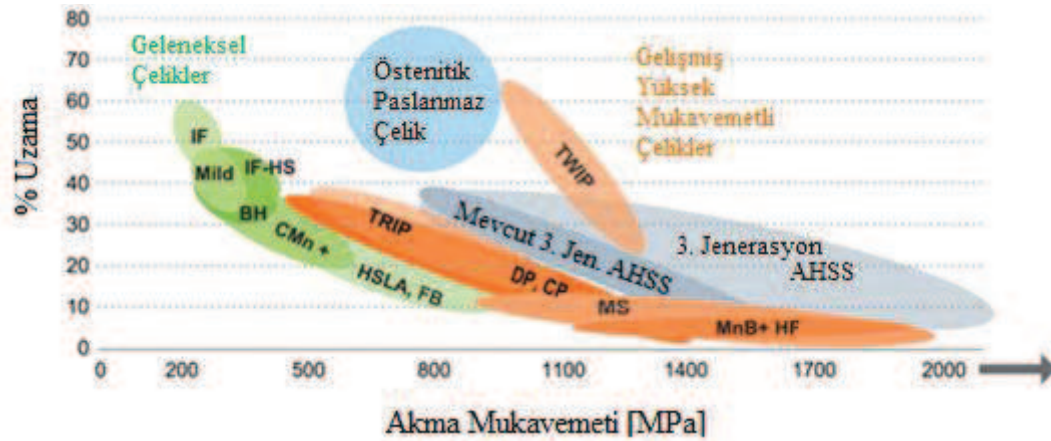
Otomotiv şasilerinde ana taşıyıcı eleman ve gövde ürünü olarak sac metaller kullanılmaktadır. Sac metaller, çok farklı şekillendirilme yöntemlerine sahip, kalıp tasarım ve imalat süreçlerini barındıran, üretim süreci uzun ve maliyetli olan ürünlerdir. Bununla beraber, sac şekillendirme proseslerinde karşılaşılan geri esneme, kulaklanma, kırışıklık, yırtılma gibi sorunlar nedeniyle sürekli yeni geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tip problemlerin giderilebilmesi ve aynı zamanda taşıt ağırlığının da azaltılabilmesi amacıyla daha yüksek dayanıma sahip yeni nesil çelik malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler, gelişmiş yüksek mukavemeli çelikler olarak bilinmektedir. Literatürdeki raporlara göre araçlarda gelişmiş yüksek mukavemetli saclar kullanılarak sac kalınlığı 1,6 mm'den 1,25 mm'ye düşürülerek araç ağırlığından %24 oranında tasarruf edilmiştir [2]. Son yıllarda üretilen bir araçta kullanılan gelişmiş yüksek

mukavemetli çelik ve diğer geleneksel çeliklerin kullanım oranları Şekil 1.1'deki gibidir.



Şekil 1.1. Otomobil gövdesinde kullanılan malzemeler [3]

Otomotivlerde yüksek dayanımın istendiği parçalarda gelişmiş yüksek mukavemetli sacların kullanılırken, dayanım değerinin önemli olmadığı ve yüksek şekillendirme mesafesine sahip ürünlerde ise düşük karbonlu çelik saclar yaygın olarak kullanılmaktadır. Çekme mukavemetleri ve yüzde uzama değerlerine göre otomotiv endüstrisinde kullanılan çelikler Şekil 1.2'deki gibidir.



Şekil 1.2. Yüksek mukavemetli çelikler [3]

Sac şekillendirme işleminde en çok karşılaşılan problemlerden birisi geri esnemedir. Geri esneme, şekillendirilmiş sac parça üzerinden yükün kaldırıldığı anda malzeme içerisindeki mevcut elastik yükün boşalması sonucu parçada

geometrik şekil bozukluğuna sebep olan hatadır. Elde edilen parça, istenilen geometriyi sağlamadığı için montaj esnasında sorunlara yol açmaktadır. Genellikle, geri esneme sorununun giderilebilmesi için, geri esneme sonrası istenilen geometriyi sağlayacak şekilde kalıp tekrar işlenir. Ancak bu işlem tekrarlı ve uzun süreli yapıldığından firmalara ek maliyet ve zaman kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle geri esnemenin doğru tahmini, telafi adımlarını azaltacağı için firmalara zaman ve maliyet tasarrufu sağlayacaktır.

Gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde bilgisayar destekli mühendislik yazılımları ile pek çok alanda olduğu gibi sac şekillendirme uygulamalarının da hesaplanabilmesi mümkün hale gelmiştir. Farklı sayısal yöntemler de bulunmakla beraber yaygın olarak sonlu elemanlar analizleri kullanılarak sac şekillendirme simülasyonları gerçekleştirilmektedir. Literatürde geri esneme tahminlerinin incelendiği pek çok çalışma bulunmaktadır.

1.1. Literatür Çalışması

LEE,S.W. ve YANG, D.Y. yapmış oldukları çalışmada, U kalıpta bükme işleminde geri esnemeyi etkileyen nümerik faktörleri incelemiş ve Taguchi metodu ile uygun parametrelerin belirlenmesini sağlamışlardır. Kalıp geometrisi olarak Numisheet 93 U kalıp modeli, sac malzemesi olarak yumuşak çelik malzeme kullanılmıştır. Sabit pot çemberi kuvvetinde, izotropik pekleşme kabulü yapılarak farklı temas parametreleri, eleman boyutu, köşe elemanları sayısı, zimba hızları kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve geri esneme parametreleri, standart sapma miktarları tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucunda U kanal çekme prosesinde sonlu elemanlar parametrelerinin, Taguchi tabloları kullanılarak belirlenebileceği ifade edilmiştir. Eleman boyutu ve sac köşelerindeki eleman sayısının geri esnemeyi önemli derecede etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca kinematik pekleşmenin ile deneysel verilere daha yakın sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir [4].

PAPELEUX, L. ve PONTHOT, J.P. yapmış oldukları çalışmada, U bükme işlemi simülasyonlarını farklı çözüm algoritmaları, pot çemberi kuvvetleri,

sürtünme katsayısı, zaman integrasyon algoritması, ve pekleşme kriterleri yönünden incelemiştir. Çalışmada Numisheet 93 U kalıp modeli kullanılmış ve yumuşak çelik, yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum olmak üzere 3 farklı malzeme üzerinde simülasyonlar ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, farklı çözüm algoritmaları olan Metafor ve Optris algoritmaları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve Optris algoritmasının deneysel sonuçlara daha uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca zaman integrasyon algoritmalarının etkisi de incelenmiş ve implicit çözümün deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir [5].

LI, K.P. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, kiriş, kabuk ve kübik eleman tipleri için ABAQUS ve SHEET programlarını kullanarak çekme ve bükme içeren bir kalıp üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Tüm simülasyonlarda von Mises akma kriteri kullanılmıştır. Saclar bükme bölgelerine göre 4 ayrı bölgede incelenmiş ve bu dört bölgeye farklı sayılarda mesh atılmıştır. Çalışma sonucunda takım yarıçapının kalınlığa oranının 5'den büyük olması durumunda kabuk eleman, 50'den büyük olması durumunda ise kalıcı dışbükey eğriliği nedeniyle 3 boyutlu eleman kullanılması önerilmiştir. Ayrıca düzlem gerilme ve gerinim uzayında akma eğrilerinin geri esneme tahmininde oldukça önemli yer tuttuğu belirtilmiştir. Ayrıca, Bauschinger etkisinin geri esneme sonuçlarını önemli derecede değiştirdiği ve bu nedenle bükme uygulamalarında dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir [6].

GOMES, C. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, yüksek mukavemetli çeliklerde anizotropinin ve akma kriterlerinin geri esnemeye etkisini incelemiştir. 0°, 45°, 90° hadde yönlerinde saclar, izotropik von-Misses, 3 parametrelili Barlat ve Hill akma kriterleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, hadde yönü açısının artması ile akma gerilmesi arttığı ve bu nedenle de geri esnemenin, hadde yönü açısına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuçlara göre Barlat modelinin deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir [7].

LEE, S.W. ve KIM, Y.T. yapmış oldukları çalışmada, 0,6 mm kalınlığında SUS316L malzemesine ait flanş bükme işleminde zımba ve kalıp köşe radyüsleri, pot çemberi kuvveti ve yağlamanın geri esneme üzerine etkilerini incelemişlerdir. Zımba ve kalıp köşe radyüsü: 3, 6 ve 9 mm ve pot kuvvetleri 50 N, 100 N ve 200 N olarak belirlenmiştir. Zımba hızı simülasyonlarda 1000mm/s, deneyde 0.25 mm/s olarak tanımlanmıştır. Simülasyonlar LS DYNA yazılımında Belytschko-Tsay kabuk eleman ve kalınlık yönünde 7 integrasyon noktası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda geri esnemeyi en çok etkileyen parametrenin zımba radyüsü olduğunu ardından bunu sırasıyla kalıp radyüsü, pot çemberi kuvveti ve yağlamanın takip ettiği belirtilmiştir [8].

TEKASLAN, Ö. ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada paslanmaz çelik saclarda V kalıpta bükme işlemi sonucunda meydana gelen geri esnemeyi incelemişlerdir. Hadde yönüne göre 15° ile 90° arasında altı farklı açıda, 25x50 mm ebatlarında 0.5, 0.75 ve 1 mm kalınlıklarında çelik saclar kullanılmıştır. Deneylerde 4 farklı yöntem kullanılmıştır. 1. ve 2. yöntemde baskı sonrası zımba ile kalıp arasında sac kalınlığı kadar mesafe tanımlanmıştır. 3.ve 4. yöntemlerde ise baskı sonrası zımba ile kalıp arasında mesafe bırakılmamış sac kalınlığı ihmal edilmiştir. Yine 1. ve 3. yöntemlerde zımba 20 sn. sac üzerinde bekletilmiştir. Çalışma sonucunda, zımba yükünün sac üzerinde bekletilmesi ile bükme zamanının artmasına rağmen geri esnemenin azaldığı belirtilmiştir. 20 sn. bekleme ile ortalama 1-3° arasında geri esneme azalma gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda kalınlık ile bükme açısının geri esnemeyi doğru orantıda etkilediği belirtilmiştir [9].

WANG, J. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, V kalıpta serbest bükme işlemi sonucu meydana gelen geri esnemenin kontrolünü sağlamaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Deneylerde 1.15 mm kalınlığındaki A-1008CS çeliği için beş farklı şekillendirme mesafesinde tek ve 3 adımda bükme işlemleri Ls-Dyna yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, zımba şekillendirme mesafesinin artmasıyla geri esnemenin de arttığı belirtilmiştir [10].

FIRAT, M. yapmış olduğu çalışmada, geri esneme tahmininde lineer olmayan kinematik pekleşme içeren plastisite modeli kullanımının geri esneme tahminlerine olan etkisini incelemiştir. Çalışmada Numisheet 93 U kalıp geometrisi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımında impilisit yöntemle çözdürülmüş ve elde edilen geri esneme sonrası yüzeyler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda kinematik pekleşme modelinin, izotropik pekleşme modeline göre daha doğru tahmin yapabildiği belirtilmiştir [11].

PANTHI, S.K. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, FORTRAN programlama dilinde RRL-FEM isimli bir yazılım geliştirilmiş ve bu yazılım vasıtası ile sac bükme işleminde elasto-plastik davranış gösteren farklı malzemeler için kalınlık, kalıp radyüsü, elastik modülü, akma gerilmesi, pekleşme üsteli ve sürtünme katsayısı parametrelerinin geri esneme tahminine etkileri incelenmiştir. Kalıp geometrisi olarak yarım kesitli bir yay eğrisi kullanılmıştır. Sac kalınlığı 20, 30 ve 40 mm olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda yay açısının artması ile geri esnemenin arttığı, sürtünmenin ise geri esnemeye çok düşük etki yarattığı belirtilmiştir. Akma gerilmesinin ve pekleşme üstelinin artmasının geri esnemeyi artırdığı ancak elastik modülünün artmasının geri esnemeyi azalttığı belirtilmiştir [12].

TOROS, S. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, TRIP 800 yüksek mukavemetli çelik için farklı akma kriterleri kullanılarak 60° V Kalıpta geri esneme simülasyonları yapılmıştır. Çalışmada, Hill-48, Barlat 89 ve YLD2000-2d akma kriterleri formülasyonlarında Lankford ve ErrMin parametreleri ayrı ayrı kullanılarak hadde yönüne göre akma gerilmeleri ve anizotropi değerleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda YLD2000-2d akma kriteri ile deneysel sonuçlara en yakın değerler elde edilmiştir [13].

CHONGTHAIRUNGRUANG, B. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, 1.4 mm kalınlığındaki yumuşak çelik JSC270C ve yüksek mukavemetli JSC590R ve JSC780Y DP çelikleri için farklı malzeme modelleri kullanılarak U

kanal şekillendirme sonrası oluşan geri esneme miktarları incelenmiştir. Çalışmada, Hill 1948, YLD2000 ve Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modelleri kullanılmıştır. Simülasyonlar LSDYNA yazılımında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda üç malzeme için de en iyi sonucun Yoshida-Uemori modeli ile elde edildiği belirtilmiştir [14].

DONGJUAN, Z. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, U kalıpta bükme işlemi sonucu oluşan geri esnemenin tahminlerinde Hill 1948 akma kriteri ve düzlem gerilme koşullarında izotropik, kinematik ve her iki pekleşmeyi de içeren karma pekleşme modelleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Numisheet 93 U bükme kalıbı, sac malzemesi olarak 350x35 mm ebatlarında 0,81 mm kalınlığında alüminyum kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, karma pekleşme kullanıldığında geri esnemenin daha doğru biçimde tahmin edilebildiği belirtilmiştir [15].

LEE, J.Y. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, farklı pekleşme modellerinin geri esneme tahminindeki performanslarını U bükme işlemi üzerinde karşılaştırmışlardır. Çalışmada, izotropik pekleşme, izotropik-kinematik pekleşme ve anizotropik ve homojen akma fonksiyonuna sahip (HAH) pekleşme modelleri kullanılarak Numisheet 2011 U bükme kalıbında ABAQUS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizleri yapılarak geri esneme tahminleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada sac kalınlığı 1,4 mm 310 x 30 mm ebatlarında DP780 malzemesi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda geri esneme tahminlerinde HAH pekleşme modelinin öngerilmeli ve öngerilmesiz her iki durumda da deneysel veriler ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir [16].

ÖZTÜRK, F. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada DP600 sacında sıcaklığın çekme özelliklerine ve geri esneme davranışı üzerine etkisini deneysel çalışmalarda incelemişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında farklı hadde yönlerinde kesilmiş olan 1,8 mm kalınlığında çekme numuneleri kullanılarak oda sıcaklığı, 200 °C ve 300 °C sıcaklıklarda çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 300 °C sonrasında toplam uzama değerlerinde keskin bir düşüş

olduğu, ayrıca akma gerilmelerinin sıcaklık arttıkça azaldığı belirtilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise farklı hadde yönlerindeki 2,5 mm kalınlığa sahip numuneler 60° V bükme kalıbında sıcak bükme işlemleri gerçekleştirilmiş ve geri esneme açıları ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda oda sıcaklığından 200 °C ye kadar çıkıldığı aralıkta hadde yönündeki numunede geri esneme artmış ancak diğer numunelerde geri esneme çok az bir miktarda azalmıştır. 300 °C’de ise hadde yönüne dik olan numunede daha az olmak üzere tüm numunelerdeki geri esnemelerde keskin düşüşler meydana geldiği belirtilmiştir [17].

FEI, D. ve HODGSON, P. yapmış oldukları çalışmada, TRIP çeliklerindeki elastik modül değişimini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma, serbest V bükme kalıbında farklı kalıp boşluğu, zımba radyüsü, zımba hızı ve sac kalınlığının parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda sabit ve değişken elastik modül değerlerinin zımba kuvvetlerinde fazla bir etki yaratmadığı, ancak, simülasyonlarda değişken elastik modül değerleri kullanılarak, hesaplanan geri esneme değerlerinin deneysel verilere daha yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir [18].

AZRAQ, S.A. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerden DP ve TRIP çeliklerinin baskı proseslerini ve geri esneme davranışlarını incelenmiştir. Çalışmada 0.8 mm kalınlığa sahip DP 600 ve TRIP 800 çelikleri kullanılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar analizleri Autoform 4.04 programında yapılmıştır. Çalışmada farklı süzdürme çubuğu kuvvetlerinde ve farklı pot çemberi kuvvetlerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda TRIP800 çeliğinin DP600 çeliğine göre açılma yer değiştirme değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir [19].

ANDERSSON, A. yapmış olduğu çalışmada, bir otomotiv ön panel parçasının şekillendirme ve geri esneme simülasyonlarını üç farklı malzeme kullanılarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 1.5 mm kalınlığa sahip yumuşak çelik ve Rephos çeliği ile 1.6 mm kalınlıktaki TRIP 700 malzemeleri kullanılmıştır. Simülasyonlar Ls-Dyna programında gerçekleştirilmiştir. Sacda, dörtgen kabuk

eleman kullanılmış, kalınlık yönünde integrasyon nokta sayısı 5 alınmıştır. Malzeme modeli izotropik pekleşmeli Barlat-Lian modeli kullanılmış ve şekillendirme hızı katsayısı değeri $m=8$ olarak çözümler yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda TRIP700 malzemesinde, diğer yumuşak çelik ve Rephos çeliğine göre nispeten daha fazla geri esneme meydana geldiği ve deneysel ile simülasyon sonuçları arasındaki sapma miktarlarının daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebinin malzeme iç yapısındaki faz dönüşüm mekanizmasından kaynaklandığı belirtilmiştir [20].

ASGARI, S.A. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, endüstriyel bir otomotiv traversi için şekillendirme ve geri esneme simülasyonları Autoform 3.2, 4.0 ve Dynaform programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda SPHD ve TRIP çelikleri kullanılmıştır. Farklı integrasyon nokta sayısı, takım ofseti, elastik modül ve sürtünme katsayısı parametreleri kullanılarak geri esneme miktarları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda integrasyon nokta sayısının artışının tahminin doğruluğunu artırdığı, takım ofsetinin sac kalınlığının %21'inden fazla arttığı durumda gerçekçi olmayan sonuçların meydana geldiği belirtilmiştir. Elastik modülün artışının ise geri esneme değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir. Sürtünme katsayısının etkisinin ise her iki yazılımda da tahmin doğruluğuna olan etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğu belirtilmiştir. Yazılımlar karşılaştırıldığında ise Autoform 3.2 yazılımı daha fazla geri esneme hata oranına sahip olduğu Autoform 4.0 ve Dynaform yazılımlarında ise TRIP çeliklerindeki geri esneme hata oranının SPHD çeliklerine oranla daha fazla olduğu belirtilmiştir [21].

JAN, S. ve MIROSLAV, J. yapmış oldukları çalışmada, ultra yüksek mukavemetli çelik (UHSS), yüksek mukavemetli çelik (HSS) ve yumuşak çelik malzeme için Autoform ve Pamstamp yazılımları kullanılarak farklı zımba şekillendirme mesafeleri ve farklı kalıp boyutları kullanılarak geri esneme tahminleri yapılmıştır. Simülasyonlarda 10 farklı bükme açısı ve 2 farklı kalıp genişliği değerleri kullanılmıştır. Her iki yazılımda da Hill 48 akma kriteri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bükme açısının ve kalıp genişliğinin artması ile geri esnemenin arttığı ayrıca geri esneme sonuçlarında en fazla sapmanın

PAMSTAMP programında UHSS çeliklerinde, en az sapmanın ise HSS çeliklerinde Autoform yazılımında elde edildiği belirtilmiştir [22].

CHONGTHAIRUNGRUANG, B. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada yüksek mukavemetli saclardaki meydana geri esnemenin, elastik modül değişimi ile birlikte ön-deformasyon etkisini incelemiştir. Çalışmada 1.4 mm kalınlığa sahip DP çelik sınıfından JIS SPFC780Y malzemesi kullanılmıştır. Sac malzemelere % 4 ile % 6 değerlerinde ön gerilim kuvveti uygulanmıştır. Çalışmada S-rail formlu kalıp kullanılarak Hill 1948, Barlat–Lian’s 1989 ve Yoshida–Uemori kinematik pekleşme malzeme modelleri için ayrı ayrı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar Ls-Dyna programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda ön deformasyon halinin önemli ölçüde geri esneme değerlerini etkilediği belirtilmiştir. Simülasyonlarda değişken elastik modül kullanımı ile geri esneme tahmininin doğruluğunu arttığı belirtilmiştir. Ayrıca Yoshida-Uemori modelinin en iyi tahmin sonucunu verdiği belirtilmiştir [23].

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada, 0.7 mm kalınlığa sahip DC04 düşük karbonlu çelik sac malzeme için açılı kanal çekme prosesi üzerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak geri esneme davranışı incelendi. Bu amaçla öncelikle, açılı kanal çekme prosesi için kalıp yüzeyleri tasarlanarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirildi. Sonlu elemanlar analizlerinde malzemeyi izotrop ve anizotropik olarak ifade eden malzeme modelleri kullanıldı.

Ayrıca bir kalıp seti tasarlanarak imal edildi ve deneysel çalışmalar bu kalıp üzerinde gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalarda elde edilen parçalar optik tarayıcı ile taranarak sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Elde edilen kalınlık dağılımları ve maksimum geri esneme miktarları incelendi. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlara göre anizotropinin geri esneme tahmininde etkili olduğu ve çözümdeki tahmin hassasiyetini artırdığı gözlemlendi.

BÖLÜM 2. MATERYAL VE YÖNTEM

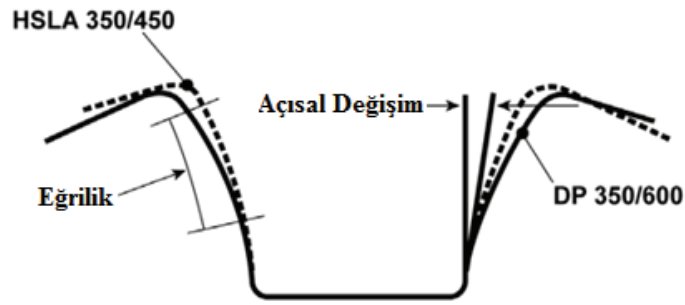
2.1. Geri Esneme

Sac şekillendirme proseslerinde karşılaşılan en büyük problemlerden birisi geri esnemedir. Geri esneme, şekillendirilmiş sac metal üzerinden zımba yükünün kalmasıyla açığa çıkan elastik enerjinin, sacı ilk haline döndürme isteği sonucu şekil bozukluğuna sebep olan hatadır. Oluşan bu şekil bozuklukları, firmalara montaj esnasında sorun yaratmaktadır. Şekil 2.1’de iki farklı yüksek mukavemetli çelik için aynı kalıpta şekillendirilmiş sac lar yer almaktadır.



Şekil 2.1. Farklı malzemeler ile aynı kalıpta basılmış sac parçalar [3]

Şekillendirilmiş sacda meydana gelebilecek 3 tür geri esneme tipi vardır. Bunlar; açılmal değişim, yan duvar bombeleşmesi ve burulmadır. Şekil 2.2’de iki farklı yüksek mukavemetli çelik için açılmal ve yan duvarlardaki geri esneme yer almaktadır.



Şekil 2.2. İki farklı malzeme için açısız ve yan duvar eğrilik değişimleri [3]

Diğer bir geri esneme tipi ise burulmadır. Flanş veya yan duvarlarda burulma momentinin etkisiyle kalıntı gerilmeler oluşmakta bu da parçada burulmaları meydana getirmektedir.

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile beraber, kullanılarak geri esneme davranışının bilgisayar destekli mühendislik yazılımları ile hesaplanması mümkün hale gelmiştir. Çok farklı yöntemler bulunmasına karşın, sonlu elemanlar yöntemi sac metal şekillendirme hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemlerin sonlu sayıda elemanlara bölünerek modellendiği, belirli yük ve sınır şartlarının yazılıma tanımlanması ile çözümün elde edildiği yöntemdir. İlk olarak, prosesi oluşturan tüm parçalar, sonlu elemanlar olarak ifade edilen geometrik olarak basit alt elemanlara ayrılır. Her elemanı oluşturan düğüm noktaları için denklemler çözülürken problem hesaplanır.

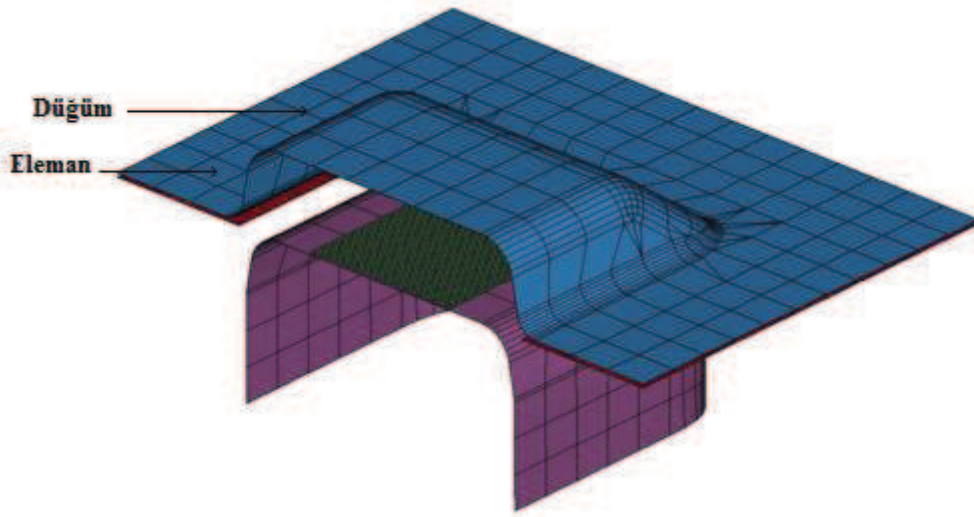
Sonlu elemanlar yöntemi ile, statik, dinamik, termal, akış, titreşim ve şekillendirme gibi pek çok analizler yapılabilmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminin mühendislik problemlerinde kullanım alanı oldukça yaygındır. Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şunlardır [24]:

- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- 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 birbirine 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 analizlerinde girdi parametreleri olarak, ağ yapısı ve eleman tipi, eleman boyutu, sınır şartları ve malzeme özellikleri bulunmaktadır. Doğru bir simülasyonun yapılabilmesi için tüm parametrelerin dikkatlice seçilmesi oldukça önemlidir.

2.2.1. Ağ yapısı ve eleman tipi

Sonlu elemanlar modelleri küçük boyutlardaki elemanlardan ve her bir elemanı oluşturan düğüm noktalarından oluşmaktadır. Modellenen sistemi temsili için ağ yapısı, eleman tipi ve boyutu oldukça önemlidir. Şekil 2.3'de çalışmada kullanılan sac şekillendirme simülasyonu için sonlu elemanlar modeli, Şekil 2.4'de ise sıkça kullanılan eleman tipleri yer almaktadır.



Şekil 2.3. Sac şekillendirme sonlu elemanlar modeli

PROBLEM TİPİ	ELEMAN	
Kiriş Eleman	2 düğüm noktalı	
İki Boyutlu Eleman	8 veya 9 düğüm noktalı	
3 Boyutlu Eleman	20 düğüm noktalı	
3D Kiriş	3 veya 4 düğüm noktalı	
Düzlem	9 düğüm noktalı	
Kabuk Eleman	9 veya 16 düğüm noktalı	

Şekil 2.4. Sıkça kullanılan eleman tipleri [25]

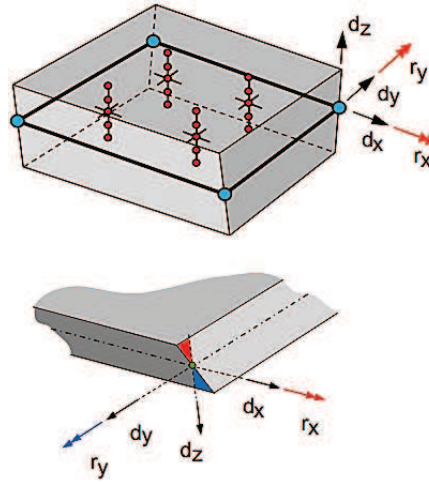
Bu çalışmada sonlu elemanlar yazılımı olarak Dynaform kullanılmıştır. Dynaform 'da eleman tipi olarak; üç boyutlu katı elemanlar, kabuk elemanlar, kiriş elemanlar ve kafes elemanlar kullanılmaktadır. Kullanılacak olan eleman tipi seçilirken şunlar göz önünde bulundurulmalıdır [26]:

1. Seçilen eleman deformasyonun her modu için gerçek malzemenin katılığına yakın olmalıdır. Ne çok katı ne de çok yumuşak bir davranış göstermemelidir.
2. Uygulanan deformasyona uygun davranış gösterebilmelidir. Şekil verme süresince görülen pekleşme durumu ile hassas bir şekilde entegre olmalıdır.
3. Metal şekil verme benzetimi hali hazırda zaman ve bellek açısından zorlayıcı olduğundan, seçilecek olan eleman tipinin hassasiyetten taviz vermeden problemin çözümünün basitleştirici nitelikte olması gerekmektedir.
4. Temas ve sürtünme sac metal şekillendirmede çok önemli bir yere sahiptir. Ağ yapısı ve seçilen eleman tipi gerçek temas durumunu yansıtmalıdır. Aksi takdirde kararsızlık durumu oluşabilir.

Literatürdeki çalışmalarda sac şekillendirme simülasyonlarında en çok tercih edilen eleman tipinin kabuk eleman olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş ilk kabuk eleman Hughes-Liu elemanıdır. Hughes-Liu kabuk eleman tipi literatürde sıkça kullanılmıştır.

Bir diğer eleman tipi ise Belytschko Lin Tsay tarafından geliştirilen Belytschko-Tsay'dir. Belytschko-Tsay eleman tipi, Hughes-Liu elemanına göre daha fazla avantajlar barındırdığı için zaman içinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunun sebebi, kalınlık yönünde 5 katman bulduran Belytschko-Tsay kabuk elemanının hesaplanabilmesi için 725 matematiksel işleme ihtiyaç duyulurken aynı özellikteki Hughes-Liu kabuk elemanının hesaplanabilmesi için 4066 matematiksel işleme ihtiyaç duyulmasıdır. [27]

Bir diğ er eleman tipi ise tam integrasyonlu kabuk elemandır. Tam integrasyonlu kabuk elemanda her elemanda bir dönel koordinat sistemi bulunmaktadır. Eleman merkezinde yüzey üzerinde iki birim vektör bulunmaktadır.  uunc u birim vektör ise eleman yüzeyine dik doğrultudadır. Şekil 2.5'te tam integrasyonlu kabuk elemanın gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.5. Tam integrasyonlu kabuk elemanın Şekilsel gösterimi [28]

Şekil 2.5'te de görüleceği üzere eleman herbiri beş serbestlik derecesine sahip 4 adet d uğum noktasından oluşmaktadır. Burada d_x , d_y ve d_z , x, y ve z yönlerinde ötelemeyi, r_x ve r_y ise x ve y eksenlerinde dönmeyi ifade etmektedir.

Tam integrasyonlu kabuk elemanda, baŐlangıç Őekli sabittir ve kabul edilebilir deformasyon durumları dışında Őeklinde deđiŐme görülmez. Diğer bir ifade ile bu eleman tipi, Belytschko-Tsay eleman tipine kıyasla uygulanan gerinim durumuna uygun bir Şekilde davranış göstermektedir. Bu formülasyonda her bir katmanın dört köŐesi için hesaplama yapılır. Böylece katmalar arasındaki gerilme ve gerinim durumundaki farklılıklar belirlenir. [26]

Hesaplama sırasında kabuk elemanları, sac kalınlığı y onunde katmanlara ayrılarak düzlem gerilme kabulü ile özüm yaparlar. Bu değer sonlu elemanlar analizlerinde integrasyon nokta sayısı olarak ifade edilir. Literatürde integrasyon nokta sayısının 5 ve 9 arasında alınmasının kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir [6].

Eleman tipinin seçilmesinin ardından eleman boyutunun her bir kalıp yüzeyi ve sac için belirlenmesi gerekmektedir. Burada eleman boyutu ne kadar düşük seçilirse, geometri o oranla daha iyi temsil edilir ve çözüm sonuçlarındaki hassasiyet artar. Ancak eleman boyutunun düşürülmesi toplam eleman sayısını artıracığı için simülasyon çözümlerine daha fazla külfet getirecek ve çözüm süresi uzayacaktır.

2.2.2. Sınır şartları

Şekillendirme simülasyonlarının modellenmesinde bir takım sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Bunlar; kuvvet ve deplasman tanımlamaları, temas tipi, sürtünme katsayısı, varsa simetri ekseni, dış yüklemeler ve geri esneme sabitleridir.

Kalıpların elemanlarının hareketini veya uygulayacağı kuvvet miktarlarının simülasyonda tanımlanması gerekmektedir. Sac şekillendirme uygulamalarında pot çemberi saca kuvvet uygularken, zımba veya kalıp hareket ederek şekillendirme işlemini gerçekleştirmektedir.

Kalıp elemanları ve sac malzemenin her biri arasında temas tipinin tanımlanması gerekmektedir. Bununla beraber dinamik ve statik sürtünme katsayılarının tüm kalıp elemanları için tanımlanması gerekmektedir.

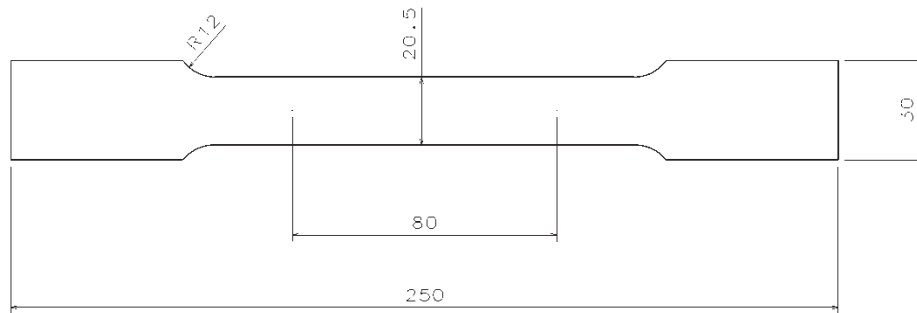
Simetrik geometriye sahip kalıplar, $\frac{1}{2}$ veya $\frac{1}{4}$ kesitte modellenerek orta düzlemlerdeki düğüm noktaları simetri ekseni olarak tanımlanabilir. Bu sayede sonlu elemanlar çözüm süresinde ciddi oranda bir azalma sağlanır.

Diğer bir sınır koşulu da geri esneme sabitleridir. Sonlu elemanlar yöntemi ile geri esnemenin tespit edilebilmesi için, sac bir kaç düğüm noktasında sabit tutularak, bu sabit noktalara göre diğer düğüm noktalarının yer değişimi hesaplanır ve parça üzerindeki geri esneme miktarları elde edilir.

Sonlu elemanlar analizlerinde doğru bir çözüm yapılabilmesi için proses parametrelerinin dışında malzeme davranışının da simülasyona doğru bir biçimde tanımlanması gerekmektedir. Malzeme davranışını ifade eden parametreler malzeme mekanik özellikleri, akma eğrisi ve akma kuralıdır. Bu nedenle çalışmada kullanılacak malzemeye ait mekanik özelliklerin ve akma eğrisinin tespiti için çekme deneyi yapılması gereklidir.

2.3. Çekme Deneyi

Geri esnemeyi etkileyen ana faktörlerden birisi malzeme özellikleridir. Bu nedenle, malzeme mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir. Malzemenin akma gerilmesi, çekme gerilmesi, elastik modül, poisson oranı gibi mekanik özelliklerinin tespiti için çekme deneyleri yapılmaktadır. Bunun için proste kullanılacak olan malzemedan standart ölçülerde belirlenmiş numuneler kesilir ve çekme cihazında testler gerçekleştirilir. Bu çalışmada ASTM E8 standartlarında [28] kesilen numuneler ile çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.5’de ASTM E8 standartlarına ait numune ölçüleri, şekil 2.6’de ise çekme testlerinin gerçekleştirildiği çekme cihazı yer almaktadır.



Şekil 2.6. ASTM E8 standartlarında çekme testi numune ölçüleri [29]



Şekil 2.7. Çekme cihazı

Çekme deneyleri ile malzemenin akma, çekme ve kopma gerilmelerinin tespit edilebilmesi için gerilme – gerinim eğrisinin çizdirilmesi gerekmektedir. Numunelerin çekme esnasında maruz kaldığı çekme kuvvetinin (F) numunenin ilk kesit alanına bölünmesi (A) ile mühendislik gerilmesi değerleri elde edilir. Mühendislik gerilmesi ($\sigma_{müh}$) şu şekilde ifade edilir (Denklem 2.1).

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

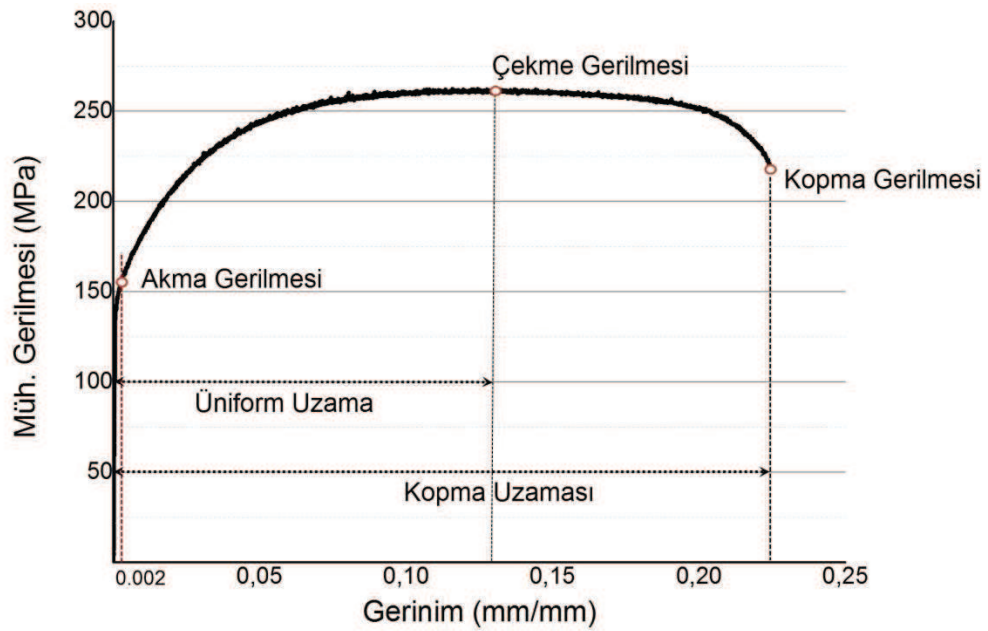
Çekme esnasındaki anlık uzama değerlerinin (ΔL) ise ilk boya (L_0) bölünmesiyle elde edilen oranlar mühendislik gerinimi değerleridir. Mühendislik gerinimi ($\epsilon_{müh}$) ise şu şekilde ifade edilir (Denklem 2.2).

$$\epsilon_{müh} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

Çekme esnasında gerilmeler, gerinim değerleriyle orantılı olarak doğrusal bir biçimde bir müddet ilerler. Numunede bir noktadan sonra akma gerçekleşir ve grafik doğrusallığını kaybeder. Malzemenin akmaya başladığı bu nokta, akma

gerilmesi olarak kabul edilir. Akma gerilmesine ulaşan malzeme plastik deformasyona uğramaya başlar. Malzemeler farklı akma davranışları göstermektedirler. Bazı malzemelerde akma belirgin olarak gözlenebilirken bazı malzemeler için akma belirgin değildir. Belirgin olmayan akma gösteren malzemelerde bu nokta $\epsilon = 0,002$ noktasından başlayan ve lineer eğriye paralel olarak çizilen eğrinin gerilme ile kesiştiği nokta akma gerilmesi olarak alınır.

Akma başladıktan sonra gerilme – gerinim ($\sigma - \epsilon$) grafiği parabolik bir biçimde ilerlemeye devam eder ve maksimum bir gerilme sınırına ulaştıktan sonra malzeme boyun vermeye başlar. Malzemenin ulaştığı maksimum gerilme değeri çekme gerilmesi olarak adlandırılır. Malzeme boyun vermeye başladıktan sonra kuvvet düşerek ilerlerler ve bir süre sonra malzeme kopar. Malzemenin kopmaya başladığı bu nokta ise kopma gerilmesi ve kopma uzaması değerlerini verir. Örnek bir gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.7'deki gibidir.



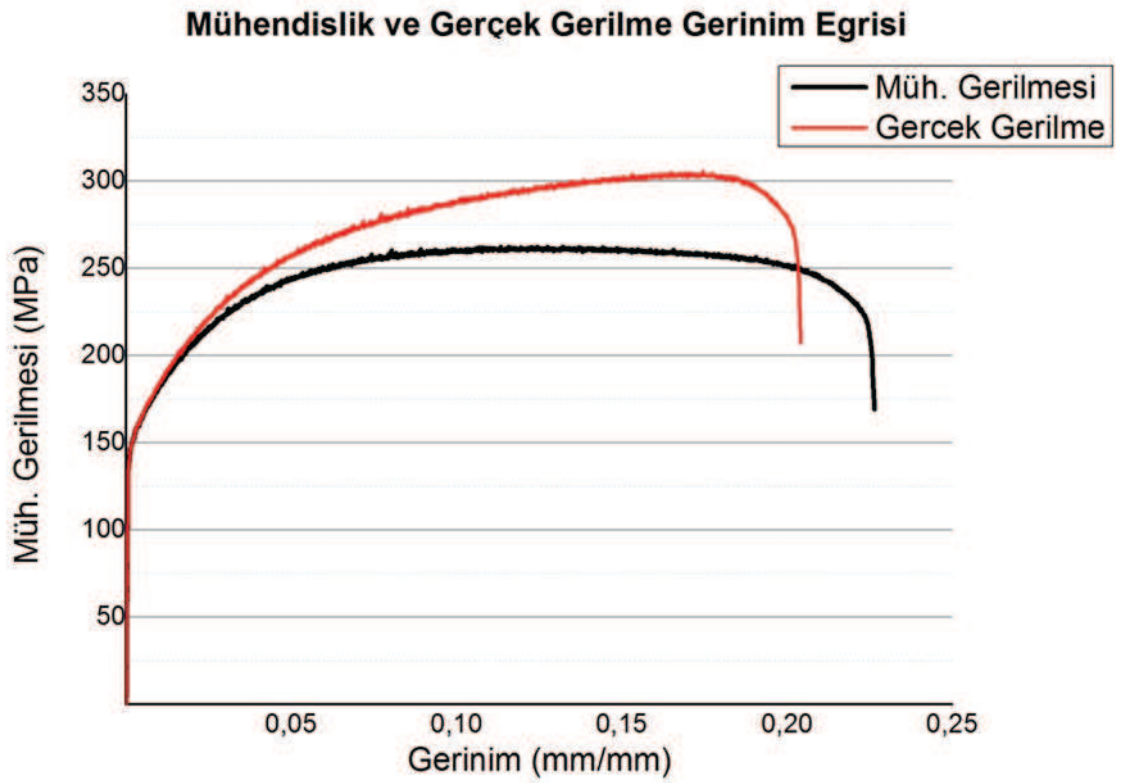
Şekil 2.8. Örnek bir ($\sigma - \epsilon$) grafiği

Mühendislik gerilme – gerinim grafiği elde edilirken kesit alanı sabit kabul edilmiştir. Ancak gerçekte numune çekme esnasında numunenin kesiti daralacağından kesit alanı zamana bağlı olarak azalacaktır. Bu nedenle gerçek gerilme – gerinim verilerin hesaplanması gerekmektedir (Denklem 2.4, 2.5).

Mühendislik ve gerçek gerilme gerinim eğrilerinin karşılaştırılması ise Şekil 2.8'deki gibidir.

$$\sigma_g = \sigma_{müh}(\varepsilon_{müh} + 1) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_g = \ln(\varepsilon_{müh} + 1) \quad (2.4)$$



Şekil 2.9. Mühendislik ve Gerçek Gerilme Gerinim Eğrileri

Elde edilen gerilme – gerinim grafiğinde malzeme öncelikle elastik deformasyona maruz kalır. Burada ($\sigma - \varepsilon$) grafiği doğrusal olarak uzar. Elastik deformasyon bölgesinde, Hooke yasası gereği bu lineer eğrinin eğimi elastik modül değerini verir (Denklem 2.3). Elastik modül, malzemelerin rijitliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilir.

$$E = -\frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.5)$$

Çekme deneyinde numuneye uygulanan dikey kuvvet nedeniyle numunenin boyca uzarken, eninde daralma meydana geleceğine değinilmişti. Bu daralmanın bir ölçütü olarak Poisson oranı önerilmiştir. Poisson oranı, malzemedeki enine kısalmanın boyuna uzamaya oranını ifade eder ve ' ν ' sembolü ile ifade edilir. Metallerde bu değer 0,28 ile 0,33 arasında değişmektedir. Poisson oranının denklemi şu şekildedir: (Denklem 2.6)

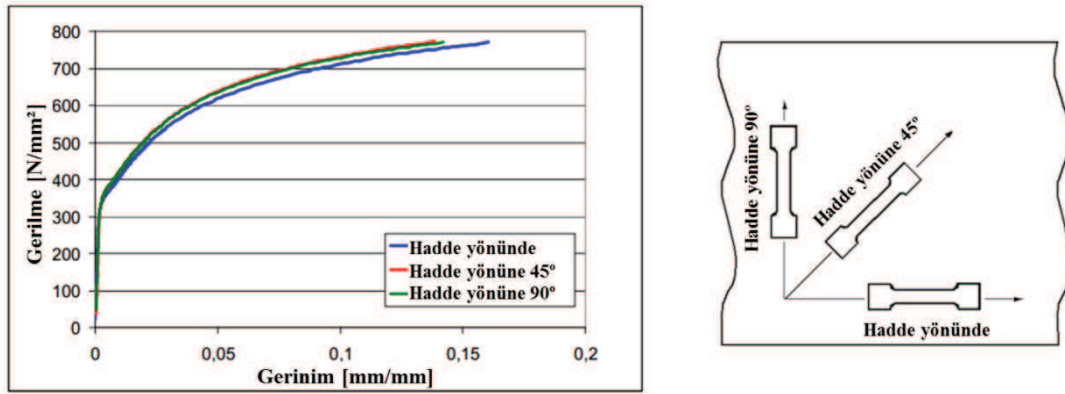
$$\nu = -\frac{\Delta d}{d} \frac{L_0}{\Delta L} \quad (2.6)$$

2.4. Anizotropi

Sac malzemeler, haddeleme ile üretildikleri için, malzeme iç yapısında yöne bağlı olarak farklılıklar gösterirler. Bu da sacların hadde yönüne göre farklı mekanik özellikler göstermelerine sebep olur. Bu durum anizotropi olarak ifade edilir ve r sembolü ile gösterilir. Teorikte izotropik yani tüm yönlerde özellikleri aynı malzeme kabulü yapılabilmesine karşın, gerçekte malzemeler anizotropiktir. Sac metallerde hadde yönüne göre mekanik özellikler değişmektedir. Bu nedenle sac şekillendirme uygulamalarında anizotropinin etkisi önemlidir. Sac malzemelerin anizotropik özelliklerinin belirlenebilmesi için genellikle sacın hadde yönünde, hadde yönüne dik ve hadde yönüne 45° açıda numuneler kesilerek her yöndeki numuneler için çekme deneyleri yapılarak anizotropi hesaplanır (Denklem 2.7).

$$r = \frac{\epsilon_{90}}{\epsilon_{45}} \quad (2.7)$$

Anizotropi başka bir deyişle malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direnci ifade eder. Şekil 2.9'da 3 farklı yönde elde edilmiş çekme numuneleri ile yapılan çekme testi sonuçları yer almaktadır.



Şekil 2.10. Farklı hadde yönüne bağlı olarak yapılan çekme testi sonuçları [30]

Malzemelerde anizotropiyi ifade etmek için Lankford parametrelerinden yararlanır. Bu parametreler hadde yönüne bağlı olarak 0° , 45° ve 90° olan yönlerdeki anizotropi değerleridir. Bu değerler kullanılarak ortalama anizotropi katsayısı hesaplanır. Ortalama anizotropi katsayısı r ifadesi ile gösterilir ve şu şekilde hesaplanır: (Denklem 2.8)

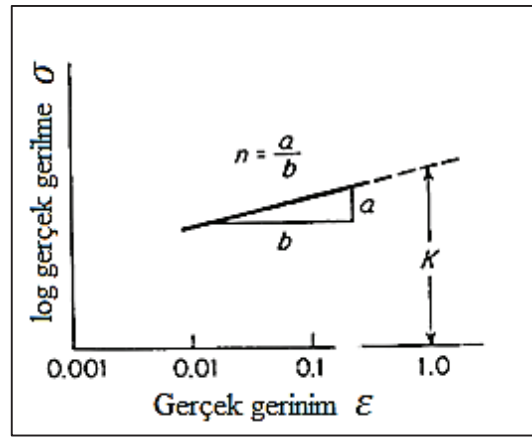
$$r = \frac{P_{90} - P_{45}}{P_{45} - P_{0}} \quad (2.8)$$

2.5. Akma Eğrisi

Gerçek gerilme (σ) – gerçek gerinim (ϵ) grafiğinde, malzemenin akmaya başladığı nokta ile yükün maksimum noktaya ulaştığı çekme mukavemetine kadar olan bölge akma eğrisi olarak ifade edilir. Burada dikey eksen gerilme iken yatay eksen plastik gerinimi ifade etmektedir. Sonlu elemanlar programında malzemedeki pekleşme, akma eğrisi ile tanımlanır. Geliştirilen pek çok akma eğrisi formülasyonları bulunmaktadır. Bunlar içerisinde çelikler için yaygın olarak kullanılan denklemlerden birisi Holloman denklemidir [31]. 1945 yılında Holloman'ın geliştirdiği denklemde akma eğrisi K ve n 'den oluşan iki parametreye bağlı olarak tanımlanmıştır (Denklem 2.9).

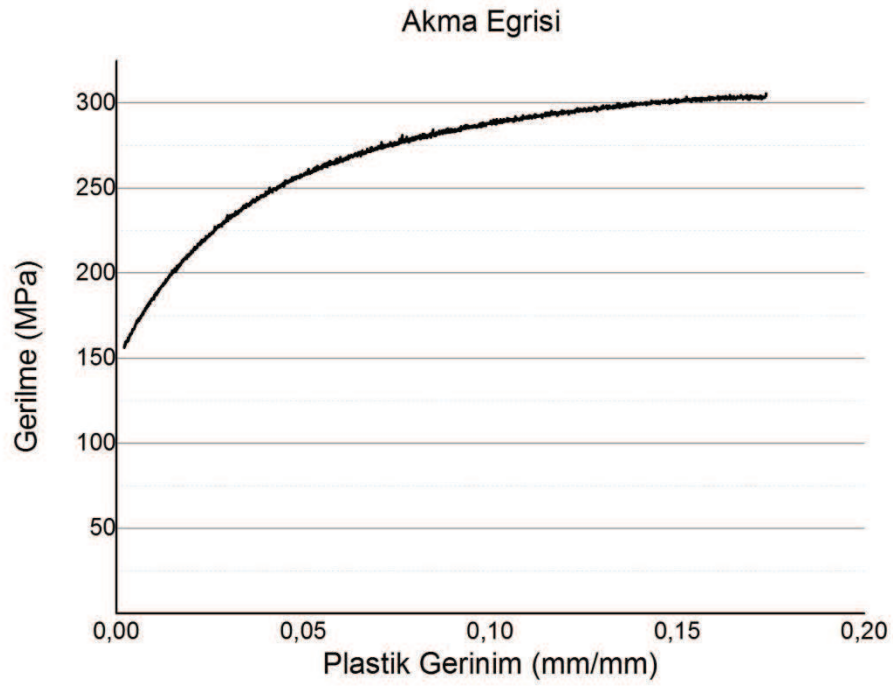
$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2.9)$$

Burada K mukavemet katsayısı, n ise pekleşme üstelidir. Gerilme – gerinim eğrisindeki verilerin logaritmaları alınarak çizdirilen grafiğe bir doğru denklemi tanımlandığında, oluşturulan doğrunun eğimi pekleşme üstelini, sabit katsayının logaritmik tersi ise mukavemet katsayısını vermektedir. Pekleşme üsteli değeri deformasyon sertleşmesine uğrama kabiliyetini belirlemektedir. Pekleşme olmayan ideal malzemelerde $n=0$ olarak kabul edilmektedir. Metallerde n değeri 0 ile 0,45 değerleri arasında bir değer almaktadır. Şekil 2.10'da mukavemet katsayısı K değerinin ve pekleşme üsteli n değerinin gerçek gerilme-gerinim grafiğinde üzerinde gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.11. Gerçek gerilme-gerinim grafiğinde K ve n parametrelerinin gösterimi [32]

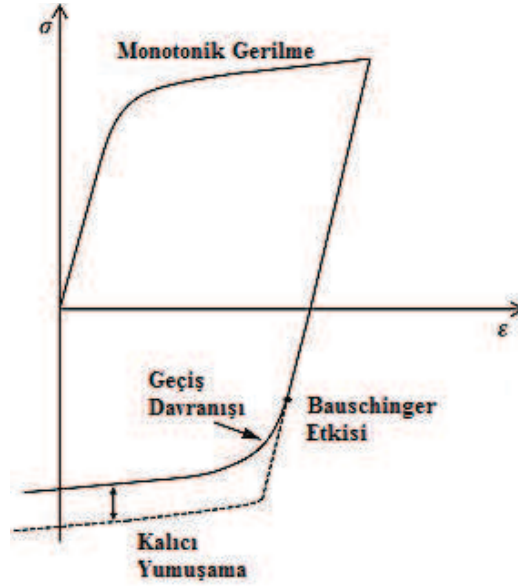
Akma eğrisi, malzemelerin plastik şekil değişimi davranışını ifade eder. Akma mukavemeti çekme mukavemetine arasında devam eden bir eğridir. Örnek bir akma eğrisi Şekil 2.11'deki gibidir. Burada dikey eksen gerçek gerilme eksenidir, yatay eksen ise plastik gerinim eksenidir.



Şekil 2.12: Örnek bir akma eğrisi

2.6. Bauschinger Etkisi ve Pekleşme

Çekme deneyinde akma gerilmesine ulaşıldıktan sonra yükün boşaltılıp, tersi yönde basma yapıldığında, basma halindeki ikinci akma gerilmesi, çekmenin yapıldığı ilk durumdaki akma gerilmesinden daha düşük çıkacaktır. Bu etkiye Bauschinger etkisi denilmektedir. Bauschinger etkisi, yüklemenin yön değiştirdiği uygulamalarda büyük önem arz etmektedir. Sac şekillendirmede, özellikle bükme işleminde kalıp yüzeyinde ve zımba köşe yarıçaplarında oldukça karşılaşılan bir durumdur. Şekil 2.12'de gerilme gerinim grafiği üzerinde Bauschinger etkisini göstermektedir.

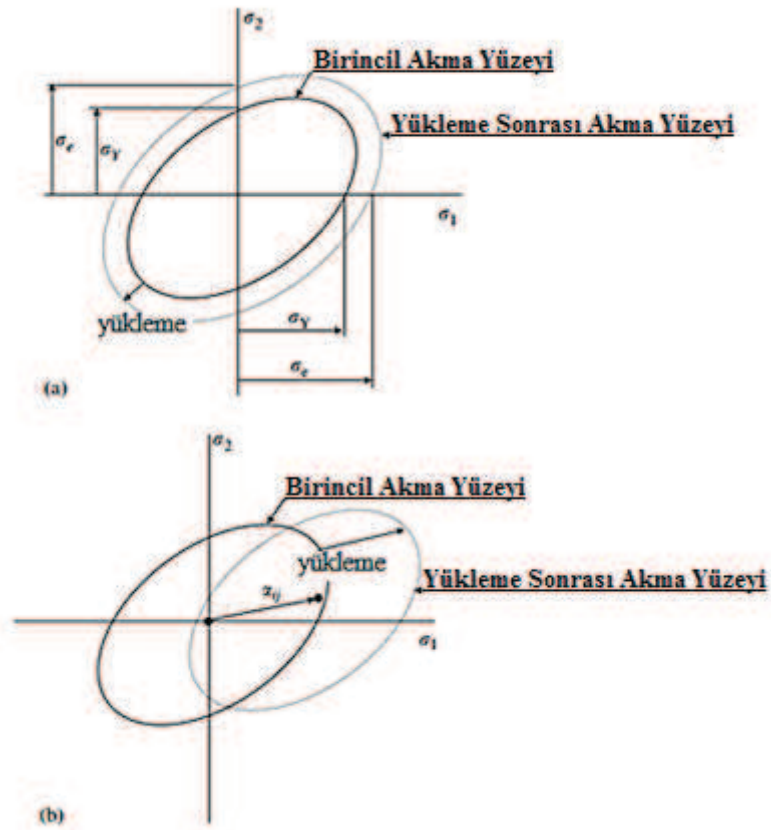


Şekil 2.13. Bauschinger etkisi [33]

Şekilde kesik çizgi Bauschinger etkisinin ihmal edildiği bir malzeme modeli davranışını göstermektedir. Kesikli olmayan çizgide ise Bauschinger etkisi altındaki davranışı görülmektedir. Bauschinger etkisi, malzemenin pekleşme özelliği ile ilgilidir.

Temelde 2 farklı pekleşme modeli bulunmaktadır. Bunlar; izotropik pekleşme, kinematik pekleşmedir. Ayrıca hem izotropik hem de kinematik pekleşme modelini içeren karma model kullanılmaktadır.

İzotropik pekleşmede akma yüzeyleri tüm eksenlerde üniform olarak genişlemektedir. Kinematik pekleşmede ise akma yüzeyleri boyutu sabit kalarak akma yönüne doğru bir miktar ötelenmektedir. Şekil 2.13'de izotropik ve kinematik pekleşme davranışları yer almaktadır.



Şekil 2.14. a) İzotropik pekleşme b) Kinematik pekleşme [34]

2.7. Akma Kriterleri

Sac şekillendirme simülasyonlarında akma yüzeylerinin belirlenmesi önemli bir role sahiptir. Bu amaçla pek çok akma kriteri geliştirilmiştir. Bunlar içerisinde en yaygın akma kriterleri, Tresca, von-Mises, Hill48 akma kriterleridir.

2.7.1. Tresca akma kriteri

1864 yılında Tresca tarafından önerilmiştir. Maksimum kayma gerilmesi kriteri olarak da bilinmektedir. Bu kriter göre malzemenin bir noktasında akmanın

gerçekleşebilmesi için o noktada maksimum kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması ile başladığı kabul edilir. (Denklem 2.10)

$$\tau_0 = \text{MAX} \left(\frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2}, \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2}, \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} \right) \quad (2.10)$$

Burada σ_1 , σ_2 ve σ_3 asal gerilmeler ve σ_y ise akma gerilmesidir.

2.7.2. Von-Mises akma kriteri

Maksimum şekil değiştirme enerjisi kriteri olarak da bilinir. Bu kritere göre, çok eksenli bir yükleme durumunda malzeme içerisindeki bir noktadaki eşdeğer gerilme değeri, akma gerilmesini aştığında o noktada akma meydana geleceği kabul edilir. (Denklem 2.11)

$$\sigma_e^{\text{vm}} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)}{2}} \quad (2.11)$$

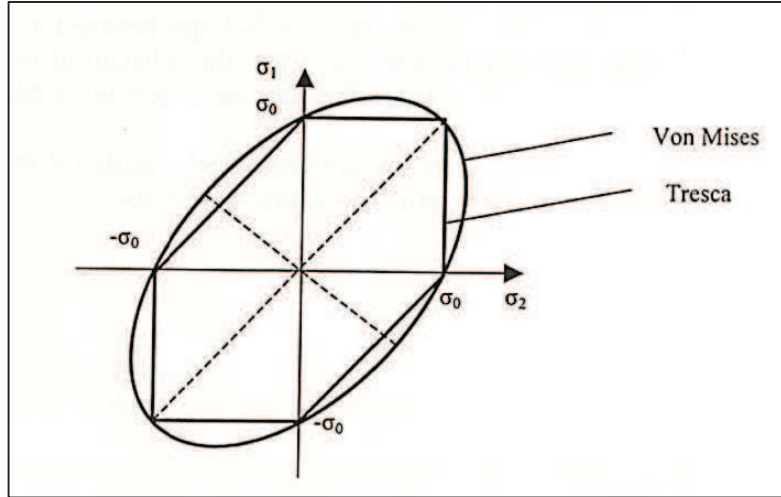
Asal gerilmeler cinsinde ifade edildiğinde ise şu şekilde ifade edilir: (Denklem 2.12)

$$\sigma_e^{\text{vm}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (2.12)$$

Düzlem gerilme halinde $\sigma_3 = 0$ olduğu için bu durumda denklem şu şekle dönüşür: (Denklem 2.13)

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_e^{\text{vm}2} \quad (2.13)$$

Elde edilen denklem bir elips denklemidir. Tresca ve von Mises gerilmeleri, 2 eksenli gerilme uzayında karşılaştırılması ise Şekil 2.14'deki gibidir.



Şekil 2.15. Tresca ve von Mises akma yüzeyleri [35]

2.7.3. Hill-48 akma kriteri

Sac şekillendirme simülasyonlarında en sık kullanılan akma kriterlerinden birisi Hill 48 quadratik akma kriteridir. Hill tarafından 1948 yılında geliştirilmiştir [35]. Hill 1948 modeli denklemi şu şekildedir: (Denklem 2.14)

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.14)$$

burada F, G, H, L, M ve N malzeme sabitleri olup x, y ve z eksenleri asal eksenlerdir. Düzlemsel gerilme durumu için Hill 48 denklemi şu şekilde yazılabilir; (Denklem 2.15)

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.15)$$

Buradaki F, G, H ve N parametreleri ise anizotropi cinsinden şu şekilde yazılabilir; (Denklem 2.16, 2.17, 2.18, 2.19)

$$F = \frac{p_i}{p_{5, :5 > p_{5, i}}} \quad (2.16)$$

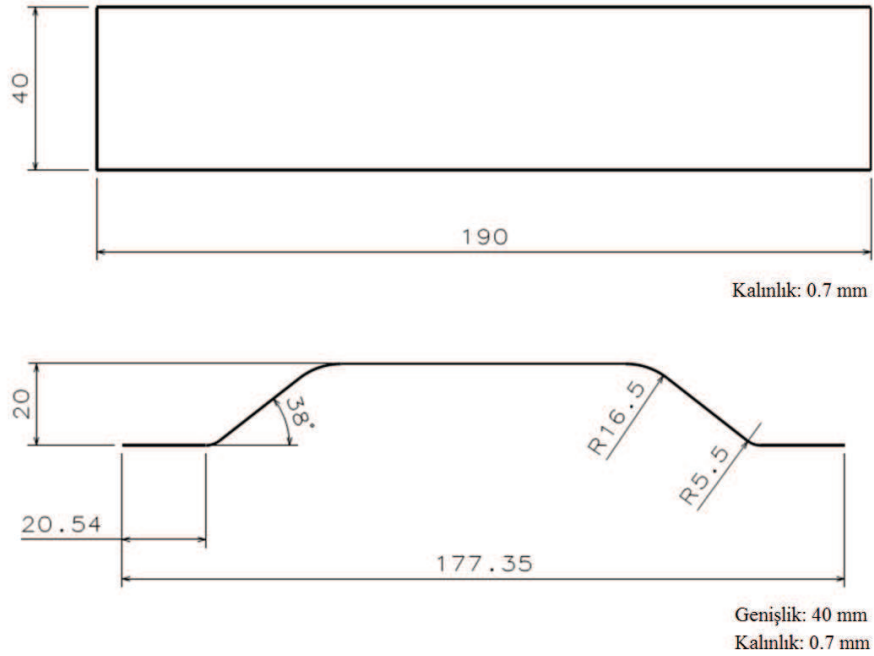
$$L = \frac{5}{:5 > p_i ;} \quad (2.17)$$

$$L = \frac{p_i}{:5 > p_i ;} \quad (2.18)$$

$$L = \frac{p_i > p_{5, i} ; :5 > 6p_{01} ;}{6p_{5, :5 > p_i ;}} \quad (2.19)$$

BÖLÜM 3. PROSES VE KALIP TASARIMI

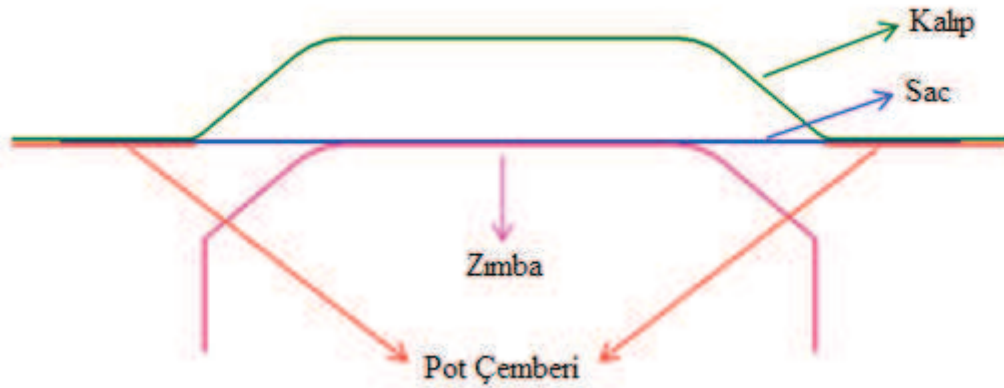
Bu çalışmada geri esneme davranışı açılı bir kanal çekme prosesi üzerinde incelendi. Bunun için 20 mm şekillendirme mesafesine ve yan duvarlarda 38° açıya sahip bir ürün için kalıp, zımba ve pot çemberinden oluşan şekillendirme yüzeyleri tasarlandı. Tasarlanan bu şekillendirme yüzeyleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirildi. Bununla birlikte deneysel çalışmaların yapılacağı bir kalıp seti, bu şekillendirme yüzeyleri kullanılarak tasarımı ve imalatı gerçekleştirildi. Çalışmada 190 x 40 ebatlarında 0.7 mm kalınlığında sac malzeme kullanıldı. Sac açınımı ve çalışma sonrası elde edilmesi amaçlanan ürün resmi Şekil 3.1'deki gibidir.



Şekil 3.1. (a) Çalışmada kullanılan sac ebatları (b) Ürün geometrisi

3.1. Açılı Kanal Çekme Prosesi

Açılı kanal çekme prosesi, şekillendirme mesafesi düşük, çift bükme ve çift açılı barındıran bir prosestir. Yan yüzeyler 38°'lik açıda sac tabanına gelmektedir. Proses, zımba, kalıp ve pot çemberi olmak üzere 3 elemandan oluşmaktadır. Şekillendirme mesafesi 20 mm olarak belirlenmiştir. Açılı kanal çekme prosesi Şekil 3.2'de gibidir.

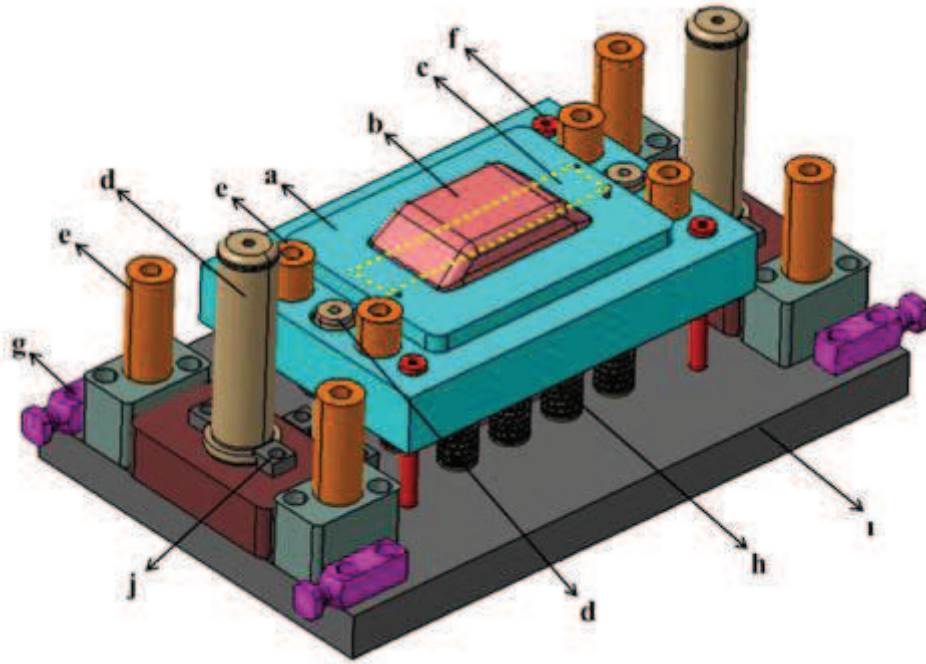


Şekil 3.2. Kanal çekme prosesinin şematik gösterimi

3.2. Kalıp Tasarımı

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için açılı kanal çekme prosesinin şekillendirme yüzeyleri kullanılarak bir kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kalıbı oluşturan parçalardan alt ve üst levhalar, kullanılacak presin tablasına uygun bir şekilde bağlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Proseste uygulanacak pot çemberi kuvvetinin ise mekanik yaylar ile iletilmesi kararlaştırılmıştır.

Kalıp tasarımında Catia yazılımı kullanılmıştır. Tasarlanan kalıp seti, alt ve üst kalıp takımı olmak üzere 2 ana montaj seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Alt kalıp takımı, zımba, pot çemberi, alt levha, dış ve iç kolon setleri, emniyet civataları, dış ve iç stoperlerden oluşmaktadır. Alt kalıp takımı Şekil 3.3'deki gibidir.

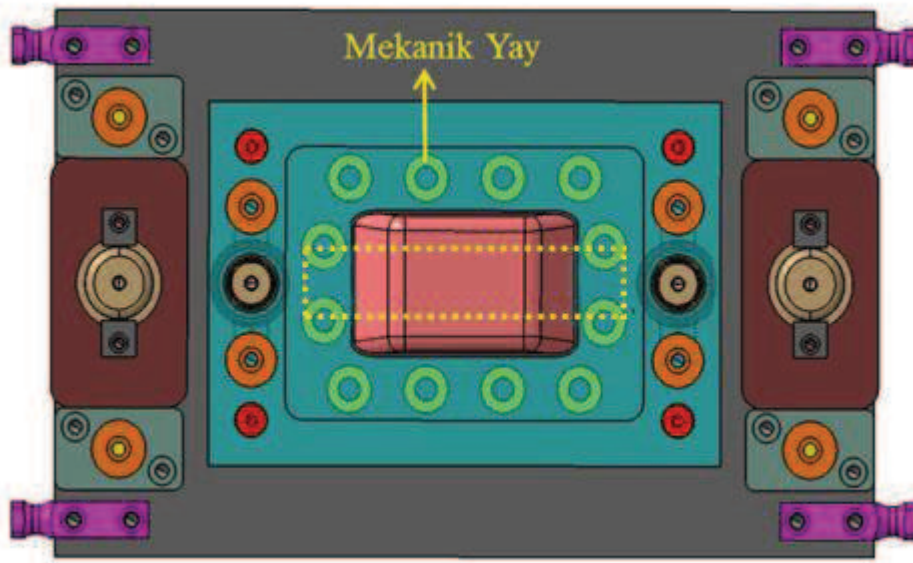


Şekil 3.3. Alt kalıp grubu elemanları (a) Pot Çemberi, (b) Zımba, (c) Sac, (d) Kolon (e) Stoper, (f) Emniyet Civatası, (g) Kalıp Taşıma Braketi (h) Yay, (i) Alt Plaka

Burada Şekil 3.4'te de görüleceği üzere, 2'şer adet dış ve iç kolon seti kullanılmıştır. İç kolon seti, pot çemberini desteklemesi amacı ile, dış kolon seti ise ana kalıp takımlarını desteklemesi amacı ile kullanılmıştır. İç kolonun çapı 25 mm, dış kolonun çapı 40 mm olarak seçilmiştir. Her bir kolon seti, kolon, burç, bağlama pabucu, ve kolonların yerleştirileceği bloklardan oluşmaktadır. Benzer şekilde kalıp kapandığında her iki takımı desteklemesi için 2'şer adet dış ve iç stoper kullanılmıştır. İç stoperler pot çemberi üzerine, dış stoperler ise alt levhalara yerleştirilmiştir. Zımba, alt levhanın tam ortasında olacak şekilde arka yüzeyinden civatalar ile sabitlenmiştir.

Çalışmada pot çemberi kuvveti için mekanik yay kullanılması kararlaştırılmıştır. Bunun sebebi mekanik yaylar, montajı kolay parçalar oldukları için kalıptaki yay sayısına bağlı olarak pot çemberi kuvvetinin kolayca değiştirilebilmesinin mümkün olmasıdır. Burada önemli olan yayların homojen bir biçimde dizilmesi ve kuvvetin tüm alanlara eşit miktarda dağıtılmasıdır. Mekanik yaylar, taşıyabilecekleri yük değerlerine göre standart olarak yeşil, kırmızı, mavi, sarı ve siyah renklerde, farklı boy ve çaplarda üretilmektedir. Yay seçiminde yayların

depolayabildiği yük miktarı oldukça önemlidir. Uygulanacak olan toplam pot çemberi kuvveti, yayların şekillendirme mesafesindeki toplam tepki kuvvetlerine eşit olacaktır. Bu nedenle, şekillendirme mesafesi 20 mm olan proses için uygun yük değerleri yay kataloglarından bakılarak, dış çapı 25 mm ve boyu 76 mm olan 12 adet sarı renkli yay kullanılması kararlaştırılmıştır. Şekil 3.4’de kalıptaki yay dizilimi, Tablo 1’de ise sarı renk yaylara ait katalog değerleri yer almaktadır.



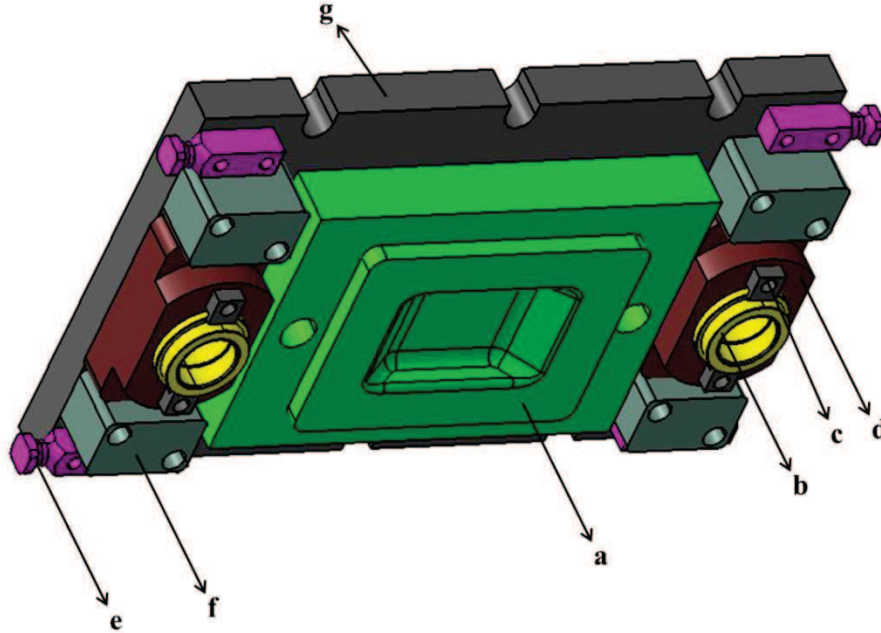
Şekil 3.4. Kalıptaki yay dizilimi

Tablo 3.1. KYS 25x76 sarı renk yay mekanik özellikleri [36]

KOD					% 30 Ömür		%40 Ömür		Kırılma Noktası	
	D (mm)	d (mm)	L (mm)	R (N/mm)	Maks. kapanma (mm)	Maks. Yük (N)	Maks. Kapanma (mm)	Maks. Yük (N)	Kapanma (mm)	Yük (N)
KYS 25 x 76	25	12.5	76	130.8	12.9	1690	19	2485	26	3401

Burada D dış çap, d iç çap, L toplam boy ve R ise yay katsayısıdır. Proses esnasında kalıp açıldığında, pot çemberi yaylar tarafından sürekli itmeye karşı zorlanacağı için pot çemberi, kalıp setinden ayrılabilir. Bunun önüne geçmek için, pot çemberinin köşelerine 4 adet emniyet civatası yerleştirilmiştir. Bu

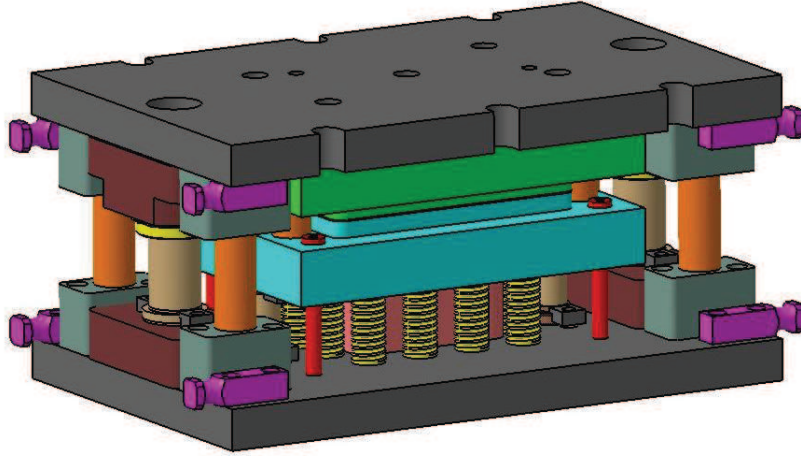
sayede pot çemberinin güvenli bir şekilde hareketi sağlanmış olunur. Kalıp taşıma braketleri ise, kalıbın taşınması esnasında kullanılan taşıyıcı elemanlardır. Alt ve üst kalıp takımlarında 4'er adet olmak üzere toplam 8 tane alt ve üst levhaların köşelerine yerleştirilmiştir. Alt kalıp takımında olduğu gibi üst kalıp takımında da en dış kısımda levha bulunmaktadır. Bu üst levha, alt levhadan farklı olmak üzere kalıbın yerleştirileceği pres tablasında bulunan oluklara uyumlu olacak şekilde dış kenarlarına kanallar açılmıştır. Bu sayede üst levhanın, pres tablasına kolayca bağlanması amaçlanmıştır. Üst kalıp takımı, üst levha, kalıp, burç, bağlama pabucu, kalıp taşıma braketleri, kolon seti üst bloğu, ve stoper üst bloğundan oluşmaktadır. Üst kalıp seti şekil 3.5'de yer almaktadır.



Şekil 3.5. Üst kalıp takımı (a) Kalıp, (b) Burç, (c) Bağlama Pabucu, (d) Kolon Üst Blok, (e) Kalıp Taşıma Braketi, (f) Stoper Üst Blok

İç kısımda yer alan kalıp, pot çemberi ile uyumlu çalışacak bir biçimde tasarlanmıştır. Ayrıca pot çemberine bağlı olan kolonların kalıba çarpması için kolonların rahat girebileceği iki adet delik delinmiştir. Kolon setini oluşturan parçalardan burç ve üst blok parçası üst kalıp takımında yer almaktadır. Burada burç malzemesi olarak bronz seçilmiştir. Bunun yanında sinterlenmiş çelik burçlar ve grafitli bronz burçlar da piyasada kullanılmaktadır. Burç ve kolon çapları eşit olacak şekilde kataloglardan seçilmiştir.

Alt ve üst kalıp takımları birleştirilerek kalıp seti tasarımı bitirilmiştir. Tasarlanan kalıp seti şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6. Tasarlanan kalıp seti

3.3. Kalıp İmalatı

Kalıp setini oluşturan parçalardan, zımba, pot çemberi, alt ve üst levha, kolon blokları ve stoperlerin imalatı cnc freze ve torna tezgahlarında gerçekleştirilmiştir. Kolon ve burç gibi standart malzemeler ise hazır temin edilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen ve hazır temin edilen kalıp elemanlarının montajı yapılarak kalıp seti montajı gerçekleştirilmiştir. Üretilen kalıp seti Şekil 3.7'deki gibidir.



Şekil 3.7. İmalatı gerçekleştirilen kalıp seti

BÖLÜM 4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

4.1. Deneysel Çalışmalar

İmal edilen kalıp seti kullanılarak DC04 malzemesi için sac şekillendirme işlemleri Coşkunöz A.Ş firmasında bulunan 200 ton kapasitesindeki bir hidrolik preste gerçekleştirildi. Deneylerin tümünde 30 kN pot çemberi kuvveti sağlayan 12 adet mekanik sarı yay kullanıldı. Deneylerin gerçekleştirildiği hidrolik pres Şekil 4.1’de, şekillendirilmiş bir sac ise Şekil 4.2’de yer almaktadır.

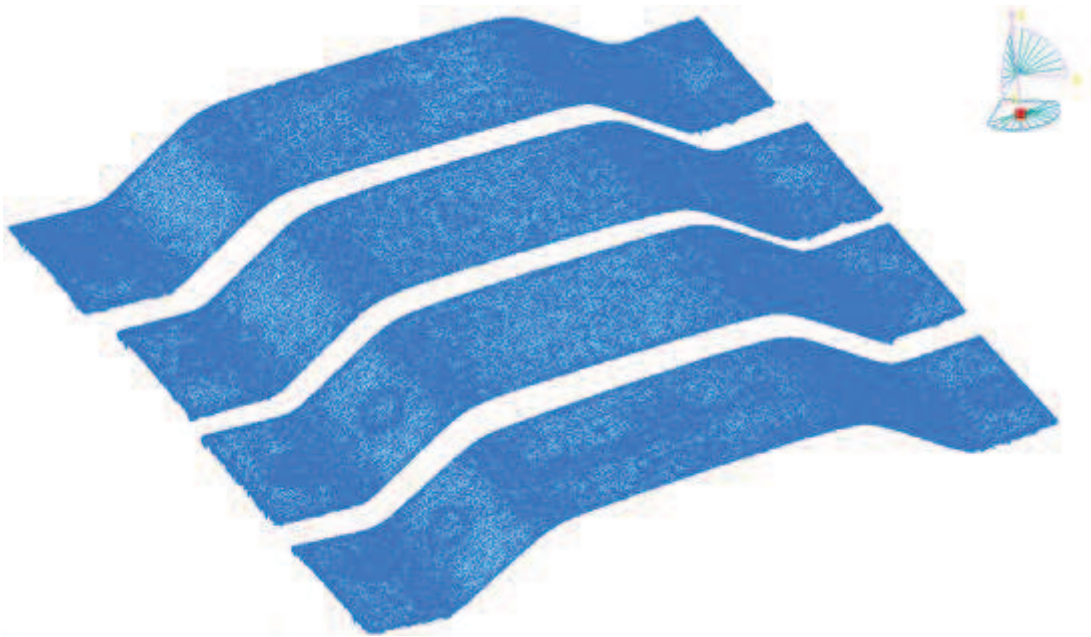


Şekil 4.1. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği hidrolik pres



Şekil 4.2. Şekillendirilmiş sac

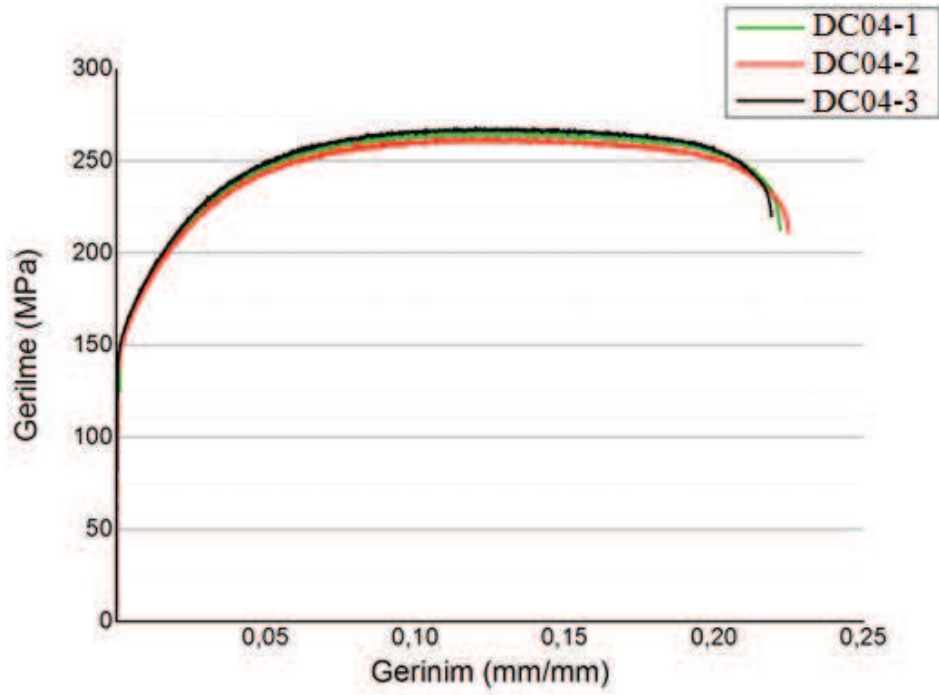
Şekillendirilen saclar sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilecek olan geometrilerle karşılaştırılabilmeleri amacıyla, Gom Atos optik tarayıcı ile taranarak bilgisayar ortamına aktarıldı. 3 boyutlu tarama cihazları ile toplam 4 adet parçaya ait .STL dosya formatında tarama yüzeyleri elde edildi. Elde edilen tarama yüzeyleri Şekil 4.3'teki gibidir.



Şekil 4.3. Optik tarayıcı ile elde edilen tarama yüzeyleri

Deneysel çalışmaların, sonlu elemanlar analizleri ile modellenebilmesi için kullanılan DC04 malzemesine ait mekanik özelliklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmaların ikinci kısmında DC04 malzemesi kullanılarak çekme deneyleri yapıldı.

Çekme deneylerinde ASTM E8 standartlarında kesilen çekme numuneleri kullanıldı (Şekil 2.5). Çekme deneyleri 25 mm/dk hızında ve 3 tekrarlı olarak yapılarak her bir numune için mühendislik ve gerçek gerilme – gerinim eğrileri çizdirildi. Buradan akma gerilmesi ve elastik modül değerleri tespit edildi. 3 numuneye ait mühendislik gerilme – gerinim eğrileri Şekil 4.4’teki gibidir. Elde edilen akma mukavemeti ve elastik modül değerleri ise Tablo 2’deki gibidir.



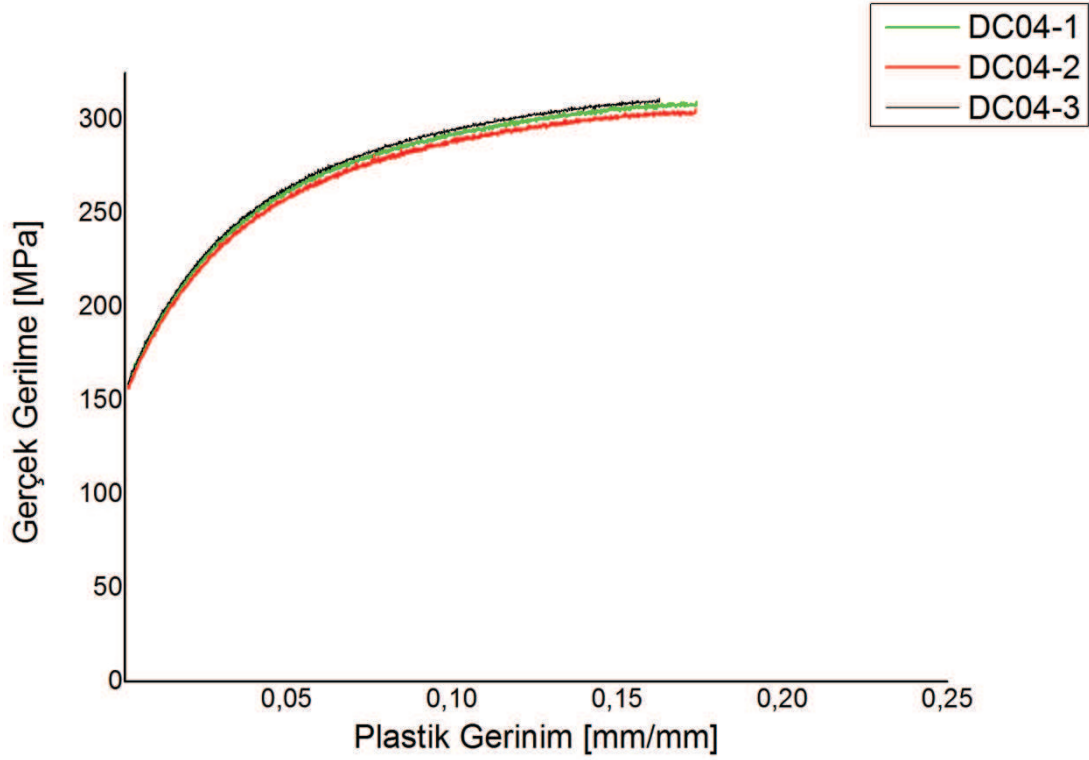
Şekil 4.4. Her 3 numuneye ait mühendislik gerilme - gerinim eğrileri

Tablo 4.1. Elde edilen akma mukavemeti ve elastik modül değerleri

Numune	Akma Gerilmesi [MPa]	Elastik Modülü [GPa]
DC04-1	158,404	205,161
DC04-2	156,310	201,674
DC04-3	158,170	209,533

Mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) değerlerinin bulunabilmesi için akma eğrilerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için her üç numuneye ait öncelikle gerçek gerilme – gerinim eğrileri ve buradan da akma eğrileri elde

edildi. Elde edilen akma eğrileri Şekil 4.5'te, hesaplanan K ve n parametreleri ise Tablo 3'teki gibidir.



Şekil 4.5. Her üç numuneye ait akma eğrileri

Tablo 4.2. Elde edilen mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) değerleri

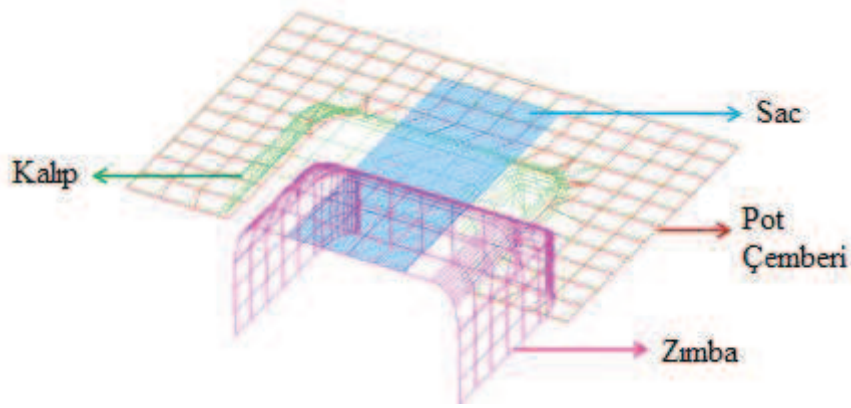
Numune	Mukavemet Katsayısı (K) [MPa]	Pekleşme Üsteli (n)
DC04-1	422,377	0,168
DC04-2	417,56	0,166
DC04-3	425.763	0,176

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizlerinin modellenmesinde öncelikle sac, pot çemberi, kalıp ve zımbadan oluşan kalıp yüzeyleri .iges dosya formatında program içerisine aktarıldı ve ardından her bir kalıp yüzeyi için ağ yapısı örüldü. Kalıp elemanları için 15x15 mm boyutunda, sac yüzeyinde ise 1x1 mm boyutunda elemanlar

kullanılarak ağ yapıları oluşturuldu. Eleman tipi olarak tam integrasyonlu (full integrated) kabuk elemanlar kullanıldı ve kalınlık yönünde integrasyon nokta sabiti 7, sac kalınlığı ise 0.7 mm olarak girildi. Sac açınımlı ve kalıp takımlarına ait ağ yapıları Şekil 4.6’da verildi.

Yapılan modellemede, üst kalıp 568, zımba 322, parça tutucu 115 ve sac parça 3800 adet kabuk elemandan oluşmaktadır. Tanımlanan eleman özellikleri Tablo 4’teki gibidir.



Şekil 4.6. Açılı kanal çekme prosesi sonlu elemanlar modeli

Tablo 4.3. Ağ yapısı tanımlanan parçaların eleman özellikleri

Eleman Özellikleri	Değer
Eleman tipi	Tam İntegrasyonlu Kabuk Eleman
İntegrasyon nokta sabiti	7
Sac kalınlığı	0.7 mm
Eleman Boyutu (Sac için)	1x1 mm
Eleman Boyutu (Kalıp elemanları için)	15x15 mm

Ağ yapısı ve eleman tiplerinin tanımlanmasından sonra sınır şartlarının tanımlanması aşamasına geçildi. Burada ilk olarak yazılıma kalıp, zımba, pot

çemberi ve sac tanımlanmış ve kuvvet, deplasman, simetri düzlemi, geri esneme sabitleri ve sürtünme katsayısını ifade eden parametreler simülasyona girildi.

Kalıp tasarımında şekillendirilmenin üst kalıp tarafından gerçekleştirileceği kararlaştırılmıştı. Bunun için üst kalıba 2000 mm/s hız değeri tanımlandı. Pot çemberinin ise kalıp hareketine zıt yönde kuvvet uygulaması gerekmektedir. İmal edilen kalıpta kullanılan 12 adet mekanik yayın 20 mm mesafede sağladığı toplam kuvvet 30000 N olmasına rağmen kalıp yüzeylerinin yarı kesitte sonlu elemanlar modellemesi yapıldığı için pot çemberi kuvveti bu değerin yarısı, yani 15000 N alındı.

Kalıp takım geometrisi sonlu elemanlar çözüm süresini kısaltmak amacıyla yarı kesitte modellenmişti. Bu nedenle sacın orta düzlemindeki düğüm noktalarına simetri koşulu tanımlandı. Bunun haricinde geri esneme sabit noktaları ve her bir parça için sürtünme katsayıları tanımlanarak sınır koşullarının tanımlanması aşaması bitirildi. Tanımlanan sınır koşulları Tablo 5'teki gibidir.

Tablo 4.4. Tanımlanan sınır şartları değerleri

Sınır Koşulu	Değer
Parça tutucu kuvvet	15000 N
Kalıp hızı	2000 mm/s
Sürtünme katsayısı	0,125
Simetri düzlemi	YZ düzlemi

Sınır koşullarının tanımlanmasından sonra malzeme davranışının tanımlanması aşamasına geçildi. Yapılan çalışmada anizotropinin etkisinin görülebilmesi amacıyla izotropik pekleşme kabulü yapılarak malzemeyi izotrop ve anizotropik olarak tanımlayan iki farklı malzeme modeli kullanıldı. İzotrop malzeme modelini akma eğrisinden elde edilen Holloman denklemi parametreleri K ve n değerleri ile çözüm yapılmaktadır. Malzemeyi anizotropik olarak kabul eden malzeme modelinde K ve n değerlerinin yanı sıra Hill-48 akma kriteri ve buna

bağlı olarak Lankford parametreleri olan r_0 , r_{45} ve r_{90} değerlerinden elde edilen ortalama anizotropi katsayısı r_{bar} değerini kullanmaktadır.

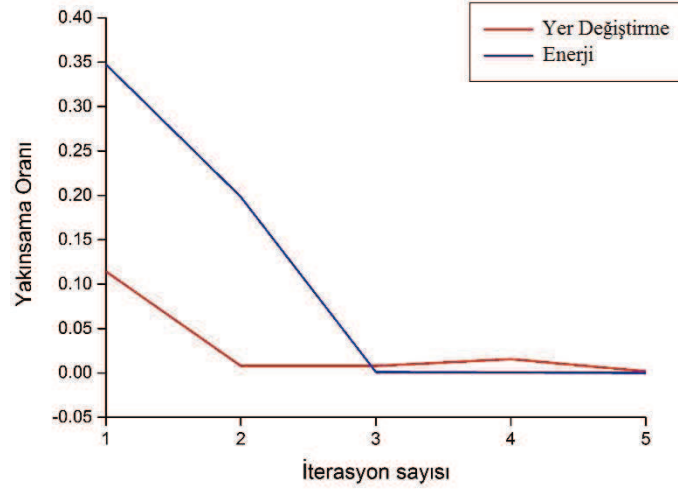
Çekme deneyi ile elde edilen malzeme mekanik özellikleri ile K ve n parametreleri malzeme kartlarına tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirildi. Anizotropik malzeme modelinde ortalama anizotropi katsayısı 1.982 kabul edildi [37]. DC04 malzemesine ait simülasyona tanımlanan malzeme özellikleri Tablo 6'daki gibidir.

Tablo 4.5. DC04 çeliğine ait malzeme özellikleri

ρ [ton/mm ³]	E [GPa]	ν	σ_{ak} [Mpa]	K [MPa]	n	r_{bar}
7.83×10^{-9}	201.674	0.28	156.309	421.9	0.17	1.982

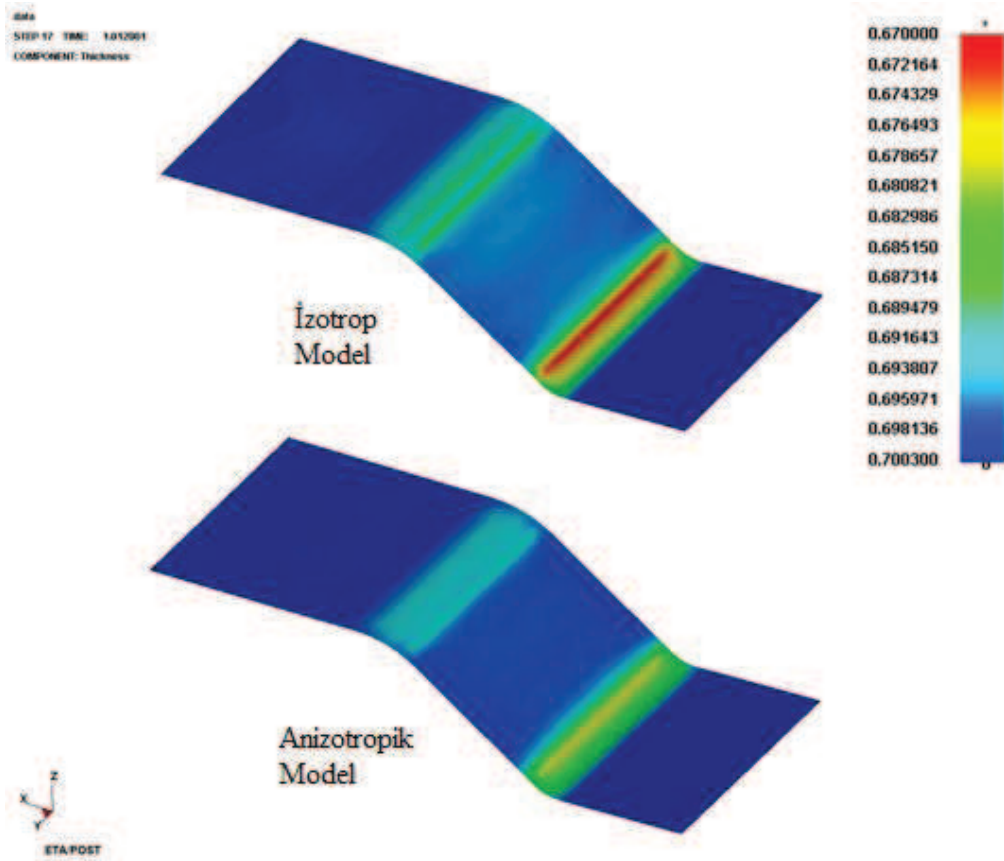
Burada, ρ yoğunluk, E elastik modül, ν poisson oranı, K mukavemet katsayısı, n pekleşme üsteli, r_{bar} ise ortalama anizotropi katsayısıdır.

Malzeme parametrelerinin belirlenmesinden sonra simülasyonların çözdürülmesi aşamasına geçildi. Simülasyonlar 15 adımı eksplisit ve son 2 adımı impilisit yöntem ile çözdürüldü. Yazılımda, ekspilisit yöntem ile şekillendirme kısmı, impilisit yöntemle ise oluşan geri esneme miktarları hesaplandı. İmpilisit yöntemde yazılım birçok iterasyonlar ve buna bağlı olarak yakınsamalar yapmaktadır. Anizotropik malzeme modeli ile gerçekleştirilen simülasyonda yazılım tarafından 5 adet iterasyon ile çözüm yapıldı. İterasyon sayısına göre yakınsama miktarları Şekil 4.8'deki gibidir.



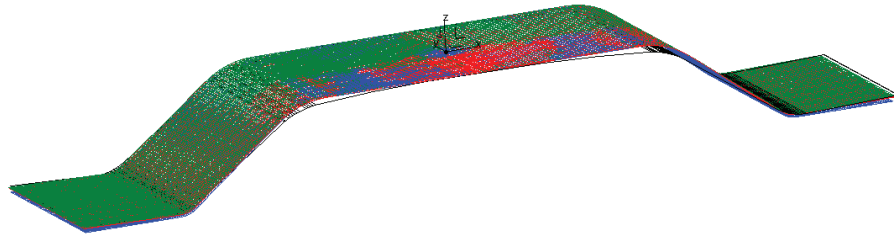
Şekil 4.7. İterasyon sayısına bağlı olarak yakınsama değerleri

Çözüm sonrası ilk olarak her iki malzeme modeli ile elde edilen sonuçlara ait kalınlık dağılımları incelendi. Kalınlık dağılımı sonuçları incelendiğinde izotrop malzeme modelinde sac kalınlığının daha fazla incelmeye maruz kaldığı tespit edildi. Kalınlık dağılımına ait karşılaştırma sonuçları Şekil 4.7'deki gibidir.

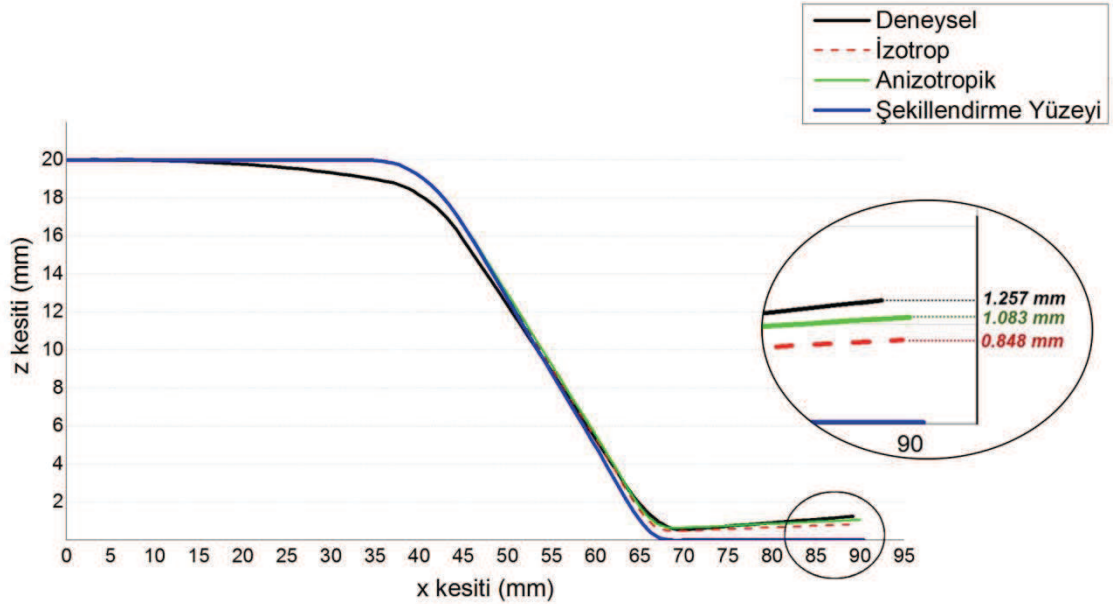


Şekil 4.8. Her iki modele ait kalınlık dağılımları

Kalınlık dağılımlarının incelenmesinden sonra her iki modelle elde edilen geri esneme yüzeylerinin deneysel çalışmalar ile elde edilen geri esneme yüzeyleri ile karşılaştırıldı. Bunun için her iki malzeme modeli ile elde edilen geri esneme yüzeyleri, deneysel çalışma sonrası taranan yüzey geometrisi ve geri esnemesiz şekillendirme yüzeylerinin ortak bir eksende konumlandırıldı ve ardından yüzeylerden kesit alınarak üst üste çizdirildi. Konumlandırılmış yüzey geometrileri Şekil 4.8’de, geri esneme yüzeylerine ait karşılaştırma ise Şekil 4.9’daki gibidir.



Şekil 4.9. Elde edilen yüzeylerin konumlandırılması



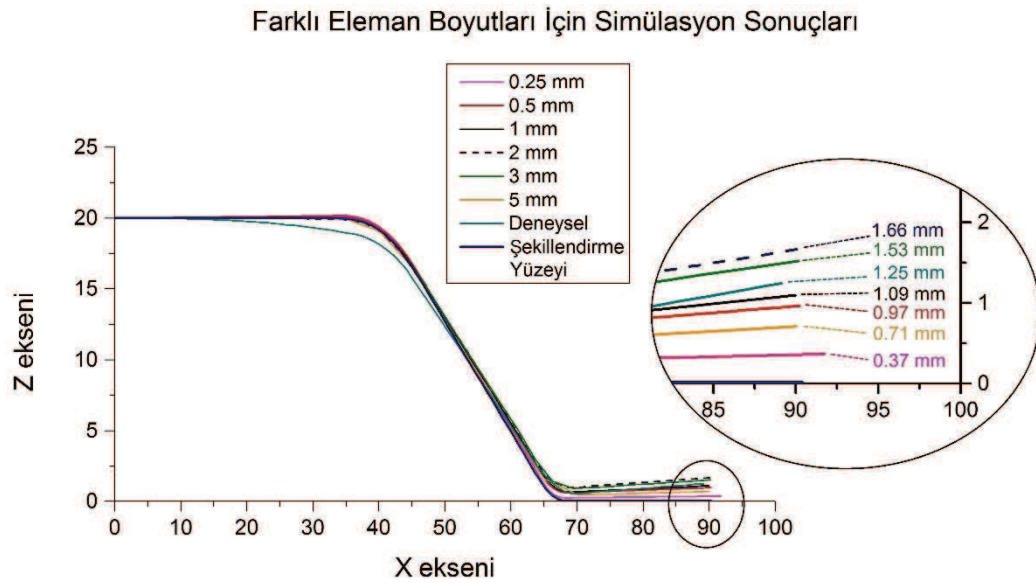
Şekil 4.10. Geri esneme yüzeylerine ait karşılaştırma

Grafik incelendiğinde, izotrop malzeme modeli kullanılarak çözdürülen simülasyonda geri esneme miktarının 0,848 mm, anizotropik modelde ise 1,083 mm olduğu görülmektedir. Deneysel yüzey ise 1,257 mm geri esnemeye maruz

kalmıştır. Anizotropik malzeme modeli kullanılan simülasyonda deneysel yüzeylere daha yakın geri esneme değerleri elde edildi. Bunda malzeme anizotropi özelliklerinin hesaplamaya dahil edilmesinin önemli rol oynadığı görülmektedir.

Yapılan simülasyonlarda eleman boyutu ve kalıp hızı değerleri sabit olarak kabul edilmişti. Ancak farklı eleman boyutu ve kalıp hızı değerlerinin geri esneme miktarlarına olan etkilerinin incelenmesi amacıyla çalışmalar yapıldı.

İlk olarak sac malzeme için 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 5 mm eleman boyutları kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirildi. Tüm simülasyonlarda, tam integrasyonlu kabuk eleman, DC04 malzemesine ait mekanik özellikler ve akma eğrisi, 0.7 mm sac kalınlığı ve 2000 mm/s kalıp hızı değerleri kullanıldı. Elde edilen sonuçlar, şekillendirme yüzeyi ve deneysel yüzey ile karşılaştırılarak Şekil 4.11'deki grafik elde edildi.

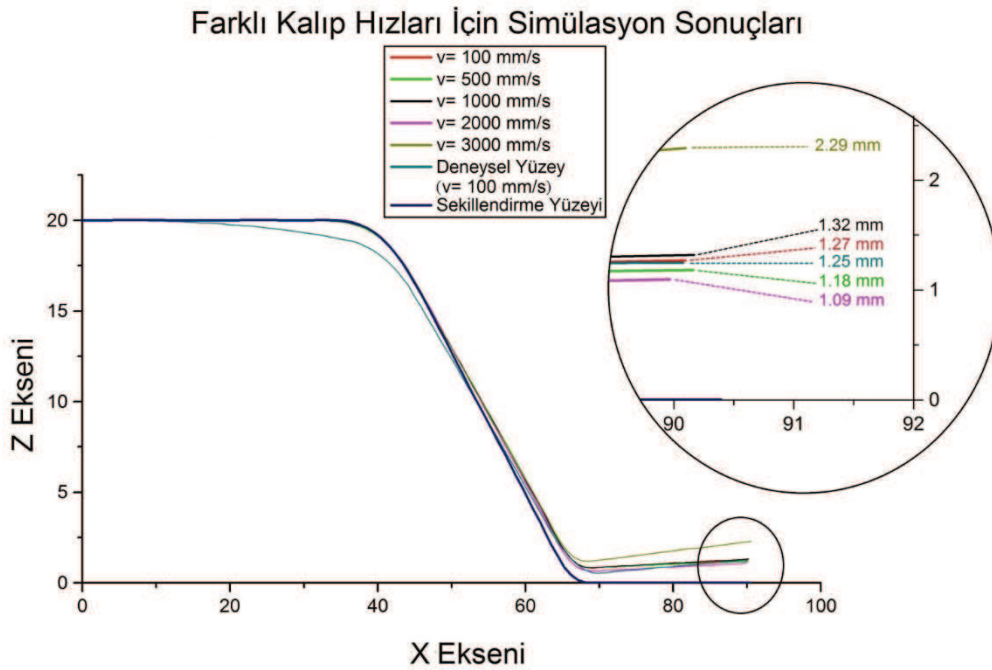


Şekil 4.11. Farklı eleman boyutları için simülasyon sonuçları

Grafik incelendiğinde, en çok geri esnemenin 2 mm eleman boyutu kullanıldığında, en az geri esnemenin ise 0.25 mm eleman boyutu kullanıldığında gerçekleştiği görülmektedir. Deneysel sonuçlara ise en yakın geri

esneme değerlerinin ise 1 mm eleman boyutu kullanıldığında gerçekleştiği görülmektedir.

Eleman boyutunun ardından, farklı kalıp hızlarının prosesteki geri esnemeye olan etkileri incelendi. Burada, 100 mm/s, 500 mm/s, 1000 mm/s, 2000 mm/s ve 3000 mm/s kalıp hızlarında simülasyonlar gerçekleştirildi. Tüm simülasyonlarda sac malzeme için 1 mm eleman boyutu, tam integrasyonlu kabuk eleman tipi, DC04 malzeme özellikleri ve akma eğrisi kullanıldı. Yapılan simülasyonlardaki geri esneme miktarları deneysel ve şekillendirme yüzeyleri ile karşılaştırıldı. Elde edilen grafik Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12. Farklı kalıp hızları için simülasyon sonuçları

Şekilde görüleceği üzere, bu proses için 3000 mm/s dışında diğer tüm kalıp hızlarında oluşan geri esneme miktarları birbirlerine oldukça yakın miktarlarda olduğu gözlemlenmektedir. 100 mm/s kalıp hızındaki geri esneme miktarının deneysel sonuçlara en yakın değerleri verdiği ve kalıp hızının artması ile geri esneme miktarlarındaki sapmanın arttığı görülmektedir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada sac şekillendirme proseslerinde sıklıkla karşılaşılan geri esneme davranışı, açılı bir kanal çekme prosesi üzerinde incelenerek, anizotropinin geri esneme üzerine etkileri incelenmiştir. Bunun için izotrop ve anizotrop olmak üzere iki farklı malzeme modeli kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirildi. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri sonucu her iki malzeme modeli için kalınlık dağılımları ve geri esneme yüzeyleri ilk durumdaki şekillendirme yüzeyi ile karşılaştırıldı.

Yapılan çalışmalar sonucu anizotropik malzeme kabulü yapılan simülasyonlarda, kalınlık dağılımı daha fazla değişkenlik göstermektedir. Buradan malzemenin hadde yönüne bağlı olarak değişen anizotropi parametrelerinin, malzemenin iç yapısında etkili bir rol oynadığı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca, geri esneme miktarları karşılaştırıldığında, anizotropik modelde daha fazla geri esneme meydana gelmekte ve bu modelin kullanımı ile tahmin hassasiyetinin arttığı gözlemlenmektedir. Tüm çözümler incelendiğinde, geri esnemenin sonlu elemanlar yöntemi ile tespit edilmesinde anizotropinin simülasyon sonuçlarında tahmin hassasiyetini artırdığı tespit edildi.

Bu çalışmada malzeme modelleri kullanılırken izotropik pekleşme kabulü yapıldı. Çalışmanın geliştirilebilmesi açısından kinematik pekleşmeyi de içeren farklı akma kriterlerini kullanan malzeme modelleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Akay, K., 2005, Otomotiv endüstrisinde kullanılan çift fazlı çeliklerin fiziksel özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa
- [2] Öztürk F., Toros S., Esener E., Uysal E., Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımının incelenmesi, Cilt:50, Sayı:596, Mühendis ve Makina, Makine Mühendisleri Odası.
- [3] Advanced high strength steel application guidelines, International Iron and Steel Institute Committee on Automotive Applications, 2005
- [4] Lee, S.W., Yang, D.Y., An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process, Journal of Materials Processing Technology, 80-81:60-67, 1998.
- [5] Papeleux, L., Ponthot, J.P., Finite element simulation of springback in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 125-126:785-791, 2002.
- [6] Li, K.P., Carden, W.P., Wagoner, R.H., Simulations of springback, International Journal of Mechanical Sciences, 44:103-122, 2002.
- [7] Gomes, C., Onipede, O., Lovell, M., Investigation of springback in high strength anisotropic steels, Journal of Material Processing Technology 159:91-98, 2005.
- [8] Lee, S.W., Kim, Y.T., A Study on the springback in the sheet metal flange drawing, Journal of Materials Processing Technology, Vol.187-188, P.P.89-93, 2007.
- [9] Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U., Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies, Materials and Design, 29:1043-1050, 2008.
- [10] Wang, J., Verma,S., Alexander, R., Gau, J.T., Springback control of sheet metal air bending process, Journal of Manufacturing Process, Vol. 10:21-27, 2008.

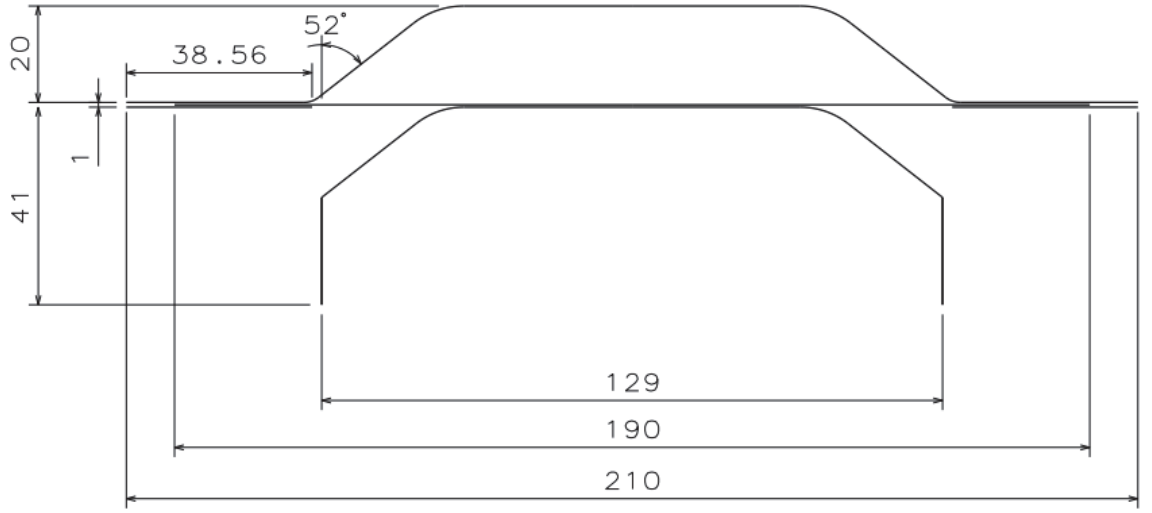
- [11] Firat, M., U-channel forming analysis with an emphasis on springback deformation, *Materials and Design*,28:147-154, 2007.
- [12] Panthi, S.K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S.S., Goel, M.D., Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback, *Materials and Design*, 31:657-662, 2010.
- [13] Toros, S., Polat, A., Öztürk, F., Formability and springback characterization of TRIP800 advanced high strength steel, *Materials and Design*, 41:298–305, 2012.
- [14] Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S., Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels, *Materials and Design*, 50:253-266, 2013.
- [15] Dongjuan, Z., Zhenshan,C., Xueyu,R., Yuqiang, L., An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending, *Materials Science*, 38:707-715, 2007.
- [16] Lee, J.Y., Lee, J.W., Lee, M.G., Barlat, F., An application of homogenous anisotropic hardening to springback prediction in pre-strained U-draw bending, *International Journal of Solids and Structures*, 49:3562-3572, 2012.
- [17] Öztürk, F., Toros, S., Kılıç, S., Tensile and springback behaviour of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures, *Journal of Iron and Steel Research*,16(6):41-46, 2009.
- [18] Fei, D., Hodgson, P., Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels, *Nuclear Engineering and Design*, 236:1847-1851, 2006.
- [19] Azraq, S.A., Costa, R.T.J., Springback prediction with FEM analysis of advanced high strength steel stamping process, *Intelligent Production Machines and Systems, IPROM Conference*; 2006.
- [20] Andersson, A., Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member, *Journal of Materials Processing Technology*, 169:352-356, 2005.
- [21] Asgari, S.A., Pereira, M., Rolfe, B.F., Dingle, M., Hodgson, P.D., Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 203:129-136, 2008.
- [22] Jan, S., Miroslav, J., Springback prediction in sheet metal forming processes, *Journal for Technology of Plasticity*, 37:93-103, 2012.

- [23] Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S., Experimental and numerical investigation of springback effect for advanced high strength dual phase steel, 39:318-328, 2012.
- [24] Kılıç, S., DP600 çeliğinin geri esneme davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, 2009.
- [25] Bathe, K.J., Finite element procedures for solids and structures-linear analysis, Ders Notu, Massachusetts Institute of Technology.
- [26] Özer, F., Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yaylanmanın doğru tahmini ve telafisi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, 2011.
- [27] Mete, O.H., Sac levhaların şekillendirilebilirliğine etki eden değişkenliklerin incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2007.
- [28] Haufe, A., Schweizerhof, K., Dubois, P., Properties and limits: Review of shell element formulations, Developer Forum, 2013.
- [29] Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International, 2010.
- [30] Yenice, M., Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi, Uludağ Üniversitesi, 2006.
- [31] Hollomon, J.H., Tensile deformation, Trans. AIME, 162:268–290, 1945.
- [32] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Inc., 1988.
- [33] Mendiguren, J., Rolfe, B., Weiss, M., On the definition of a kinematic hardening effect graph for sheet metal forming process simulations, Journal of Mechanical Sciences, Vol.92:109-120, 2015.
- [34] Kang, S.H., Imb, Y.T., Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation, Journal of Mechanical Sciences, Vol.49:423-439, 2007.
- [35] Banabic, D., Bunge, H.J., Pöhlant, K., Tekkaya, A.E., Formability of metallic materials, Springer-Verlag, 2000.
- [36] Kalıp Elemanları Kataloğu, Standart Kalıp A.Ş.

- [37] Ledoux, Y., Sebastian, P., Samper, S., Optimization method for stamping tools under reliability constraints using genetic algorithms and finite element simulations, *Materials Processing Technology* 210:474-486, 2010.

EKLER

EK A: Açılı kanal çekme prosesi teknik resmi



ÖZGEÇMİŞ

Emre SÖNMEZ, 21.09.1990'da Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ankara'da tamamladı. 2008 yılında Etimesgut Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine ve İmalat Mühendisliği'ne girdi ve 2012 yılında mezun oldu. 2012-2013 yılları arasında Yılka Elektronik San. Tic. Ltd. Şti'nde tasarım mühendisi olarak çalıştı. Aynı anda 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü Makine Tasarımı ve İmalatı anabilim dalında yüksek lisansa başladı. Şu anda Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.