

**SAC METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNDE PRES HIZI VE
MALZEMENİN ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİNİN DENEYSEL
VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Onur ÇAVUŞOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2013

ANKARA

Onur ÇAVUŞOĞLU tarafından hazırlanan “SAC METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNDE PRES HIZI VE MALZEMENİN ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİNİN DENEYSEL VE TEORİK İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr. Hakan GÜRÜN

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Ulvi ŞEKER

.....

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd.Doç.Dr. Hakan GÜRÜN

.....

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç.Dr. Hakan ATEŞ

.....

Metallurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 07/06/2013

Bu tez ile G.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof.Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Onur ÇAVUŞOĞLU

**SAC METAL ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNDE PRES HIZI VE
MALZEMENİN ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİNİN DENEYSEL
VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Onur ÇAVUŞOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2013

ÖZET

Yapılan çalışmada DP600 ve DP780 sac malzemenin şekillendirilmesinde deformasyon hızı ve malzemenin şekillendirme işlemine etkileri incelenmiştir. Öncelikle, DP600 ve DP780 sac malzemeye, farklı deformasyon hızlarında 0°, 45°, 90° hadde yönlerinde çekme testleri yapılarak malzeme davranışını belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca, matematiksel bir model oluşturularak, Autoform sac malzeme şekillendirme simülasyon programı yardımıyla farklı deformasyon hızlarında sac malzemenin şekillendirilebilirlik analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, farklı deformasyon hızlarının DP600 ve DP780 sac malzemelerin şekillendirmesine etkileri incelenerek, kullanılan sac malzemeler için en uygun şekillendirme hızı değerleri tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028

Anahtar Kelimeler : Şekillendirme hızı, Sac metal şekillendirme

Sayfa Adedi : 57

Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr. Hakan GÜRÜN

**EXPERIMENTAL AND THEORITICAL INVESTIGATION OF THE
EFFECTS OF PRESS SPEED AND MATERIAL ON FORMABILITY OF
SHEET METAL PARTS**

(M.Sc. Thesis)

Onur ÇAVUŞOĞLU

**GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

June 2013

ABSTRACT

In this study, the effects of deformation speed and material to formability of DP600 and DP780 sheets were be investigated. At first, to be determine the behavior of material, tensile tests were performed to DP600 and DP780 sheets in different deformation speed and 0 °, 45 °, 90 ° rolling directions. Furthermore, by creating a mathematical model, sheet material formability analyzes were carried out on different deformation speeds with the help of Autoform. As results of analysis, by the effects of deformation speed on sheet metal formability of DP600 and DP780 materials investigating and for sheet materials used the most suitable deformation speed was determined.

Science Code : 708.3.028

KeyWords : Deformation speed, Sheet metal forming

Page Number : 57

Thesis Supervisor : Assist. Prof. Dr. Hakan GÜRÜN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam kapsamında yardımlarını esirgemeyen ve değerli bilgilerini benimle paylaşan danışmanım Yrd.Doç.Dr.Hakan GÜRÜN’e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	.vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	.viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. KURAMSAL TEMELLER	9
3.1. Derin Çekme	9
3.1.1. Derin çekme kalıpları.....	10
3.2. Derin Çekme Mekanığı ve Oluşan Gerilmeler.....	11
3.3. Derin Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler	13
3.3.1. Malzeme özelliklerinin etkisi.....	13
3.3.2. İşkem değişkenlerinin şekillendirmeye etkisi	18
3.4. Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik Sac Malzemeler.....	21
3.4.1. Çift fazlı çelikler	23
4. MATERYAL ve METOT	25
4.1. Sac Malzeme	25
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	25

	Sayfa
4.3. Deney Düzenegi	26
4.3.1. Veri analizi	26
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	29
5.1. Çekme Testi Sonuçları	29
5.1.1. Gerilme – deformasyon eğrisi	29
5.1.2. Akma dayanımı	31
5.1.3. Çekme dayanımı	32
5.1.4. Pekleşme katsayısı	33
5.1.5. Toplam uzama	34
5.2. Analiz Çalışmaları	36
5.2.1. Şekillendirme Analiz Sonuçları	40
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. DP600 ve DP780 çelik malzeme kimyasal analiz değerleri	25

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Derin çekme süreci	9
Şekil 3.2. Çekme kalıbı	10
Şekil 3.3. Derin çekme işleminde gerilme bölgeleri	12
Şekil 3.4. Çekme işlemi sırasındaki metal akışı	13
Şekil 3.5. Gerçek gerilme – birim şekil değişimi grafiğinin logaritmik eğimi	16
Şekil 4.1. Çekme testi deney numunesi (ASTM E8)	26
Şekil 5.1. DP600 farklı hızlardaki gerçek gerilme- deformasyon eğrileri	30
Şekil 5.2. DP780 farklı hızlardaki gerçek gerilme - deformasyon eğrileri	31
Şekil 5.3. DP600 şekillendirme hızı - akma dayanımı grafiği	32
Şekil 5.4. DP780 şekillendirme hızı- akma dayanımı grafiği	32
Şekil 5.5. DP600 şekillendirme hızı- çekme dayanımı grafiği	33
Şekil 5.6. DP780 şekillendirme hızı - çekme dayanımı grafiği	33
Şekil 5.7. DP600 sac malzeme şekillendirme hızı – pekleşme katsayısı değişimi grafiği	34
Şekil 5.8. DP780 sac malzeme şekillendirme hızı – pekleşme katsayısı değişimi grafiği	34
Şekil 5.9. DP600 şekil değiştirme hızı - toplam uzama grafiği	35
Şekil 5.10. DP780 şekil değiştirme - toplam uzama grafiği	35
Şekil 5.11. Ölçüm bölgeleri	41
Şekil 5.12. Şekil değiştirme hızı - pekleşme gerilmesi grafikleri	42
Şekil 5.13. DP600 şekil değiştirme hızı - pekleşme gerilmesi grafiği	43
Şekil 5.14. DP780 şekil değiştirme - pekleşme gerilmesi grafiği	43

Şekil	Sayfa
Şekil.5.15. Şekillendirme hızı - sac kalınlığı değişimi grafikleri.....	45
Şekil 5.16. DP600 şekil değiştirme - sac kalınlığı değişim grafiği.....	45
Şekil 5.17. DP780 şekil değiştirme hızı- sac kalınlığı değişim grafiği.....	46
Şekil 5.18. DP600 şekillendirme süreci - kuvvet grafiği	47
Şekil 5.19. DP780 şekillendirme - kuvvet grafiği.....	47
Şekil.5.20. Şekil değiştirme hızı - geri esneme grafikleri.....	49
Şekil 5.21. DP600 şekil değiştirme hızı - geri esneme grafiği.....	49
Şekil 5.22. DP780 şekil değiştirme hızı -geri esneme grafiği.....	50

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Hadde yönü	18
Resim 3.2. Yüksek mukavemetli sac malzeme diyagramı.....	23
Resim 3.3. Çift fazlı sacların mikro yapısının şematik olarak gösterimi	24
Resim 4.1. Çekme testi verilerinin excel ortamında hesaplanması.....	28
Resim 5.1. Birim değerlerinin belirlenmesi ve yeni dosya açılışı.....	37
Resim 5.2. Ağ örgü değerleri	37
Resim 5.3. Matematiksel model.....	38
Resim 5.4. Malzeme tanımlama ekranı.....	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
F_N	Baskı Kuvveti
F_{st}	Zımba Kuvveti
σ_r	Radyal Çekme Gerilmesi
σ_t	Teğetsel Basma Gerilmesi
n	Pekleşme Katsayısı
σ_g	Gerçek Plastik Gerilme
ϵ	Gerinim
C	Malzeme Dayanım Katsayısı
ϵ	Birim Şekil Değiştirme Oranı
m	Deformasyon Hızına Duyarlılık Üsteli
r	Anizotropi
ϵ_w	Genişlikteki Deformasyon
ϵ_T	Kalınlıktaki Deformasyon
P_b	Baskı Plakası Kuvveti
$\sigma_{müh}$	Mühendislik Gerilmesi
$\sigma_{gerçek}$	Gerçek Gerilme
$\epsilon_{müh}$	Mühendislik Gerinimi
$\epsilon_{gerçek}$	Gerçek Gerini

Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
GYMÇ	Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler

1. GİRİŞ

Endüstriyel ürünler incelendiğinde, sac metal ürünlerin üretilmesinde sac metal kalıpcılığının vazgeçilmez bir üretim yöntemi olduğu görülmektedir. Sac metal kalıpcılığının yoğun olarak kullanıldığı otomotiv ve beyaz eşya sektörlerinin de bir üretim üstü haline gelen ülkemizin ihracat rakamlarında büyük bir paya sahip olması sac metal kalıpcılığının öneminin bir başka göstergesidir.

Sac metal kalıpcılığı, delme-kesme, çekme ve bükme işlemlerinin sonunda saca istenilen şeklin verilmesi işlemidir. Çekme, şekil verme ve bükme işlemleri saca basma ve çekme gerilmelerinin oluşturulması sonucunda sacın plastik şekillendirmeye uğratılmasıyla oluşur. Delme - kesme işlemi ise saca kopma dayanımının üzerinde bir kuvvet uygulanmasıyla sacın istenilen profilde ayrılması olarak tanımlanabilir.

Günümüzde gelişen teknolojinin de yardımıyla saca istenilen şekli vermek için gerekli işlemler belirlenerek çeşitli benzetim programlarında tasarım ve analizler gerçekleştirilerek sacın plastik şekillendirilmesinde nasıl bir eğilim gösterdiği önceden tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Bu analizler sonucunda saca meydana gelecek inceme, kırılma bölgeleri, değerleri, yırtılma ve geri esneme bölgeleri belirlenebilmektedir. Böylece sacın davranışı kalıp tasarım aşamasında belirlenerek gerekli değişiklikler tasarımda yapılmaktadır. Sonuç olarak sac şekillendirme analizi yapan benzetim programları ile tasarım değişiklikleri kalıp imalatı yapılmadan öngörerek doğru bir üretim yapılmasını hedeflemektedir.

Sacın şekillendirilmesi birçok faktör etki etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan bu programlarında da şekillendirmeye etki eden çeşitli parametrelerdeki meydana gelecek değişikliklere göre de sacın şekillendirme benzetimi yapılabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada DP600 ve DP780 sac malzemenin şekillendirilmesinde şekillendime hızının etkilerini incelenmiş ve örnek bir matematiksel model oluşturularak autoform sac metal şekillendirme analiz programları yardımıyla şekillendirme hızı ve malzemenin şekillendirmeye etkilerini incelemek amacıyla farklı şekillendirme hızlarında analizler gerçekleştirilmiş ve şekillendirme için en uygun değerler belirlenerek literature katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Bu nedenle öncelikle malzemenin şekillendirme hızına karşı davranışının belirlenmesi için çekme testleri yaptırılmış ve bu sonuçlar neticesinde şekillendirme analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Derin çekme işlemi sac metal parçaların şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenle, derin çekme hakkında bugüne kadar birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar incelendiğinde çalışmaların malzeme ve işlem değişkenlerinin şekillendirmeye etkileri üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Ayrıca, gelişen teknolojiyle beraber yapılan çalışmaların sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan benzetim programlarıyla desteklendiği belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen bazı çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Chenot ve Massoni tarafından yapılan çalışmada yeni metal şekillendirme işlemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle modelleme ve kontrol konusunu incelemişlerdir. Malzemenin katı ve sıvı halde şekillendirilmesi için gerekli klasik formülleri kısaca, malzeme davranışı, sürtünme kanunu, sonlu elemanlar açısından irdeleyerek iş parçası ile takım arasındaki bağlantıyı tartışmışlar ve birçok yeni şekillendirme işleminin sayısal simülasyon teknolojisiyle çok daha etkili bir şekilde optimize edilebileceği sonucuna varmışlardır [1].

Fırat ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sac metal şekillendirme analizlerini sac metal şekillendirmedeki en önemli sorunlardan biri olan geri esnemeyi vurgulayarak , Bauschinger etkisini, bir is plastisite modeli sunarak, sonlu elemanlar yöntemiyle şekillendirme ve geri esneme analizleri yaparak hesaplamaya çalışmışlardır [2].

Tizca, çalışmasında son yıllarda modelleme ve mühendislik yazılımların rolünün imalat sanayinde sürekli arttığını değinmiş, imalatın eşzamanlı birçok parametrenin etkisi sonucun da oluşan bir süreç olduğunu belirterek geçmişte deneme yanılma yöntemiyle yapılan maliyetli ve zaman alıcı analizlerle günümüzdeki uygulamalarını karşılaştırarak modelleme ve benzetimin imalatla günlük bir araç olduğunu belirtmiştir. Ancak hala bazı sanayicilerin bu yazılımları zaman alıcı ve maliyetli olarak düşündükleri ve analiz sonuçlarına da şüphe ile yaklaştıkları sonucuna

vararak benzetim ve modelleme yazılımlarına bilimsel araştırma ve endüstriyel uygulamalar bakımından değerlendirmiştir [3].

Gantar ve arkadaşları, sac metal şekillendirme süreçlerinin optimizasyonları ile kazandıkları deneyimleri çeşitli endüstriyel uygulamalarda incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeleri optimum ürün şekli ve açılımın belirlenmesi, son sac kalınlığı, buruşma, takım üzerindeki yüklerin tahminin ve sacdaki oluşabilecek geri esneme ile kalıntı gerilmeler bakımından değerlendirerek sayısal benzetim programlarının güvenilirliği, maliyet, yararlarını ve benzetim programlarının gerekliliğini irdelemişlerdir [4].

Papeleux ve Pontot sayısal benzetim programlarının yaygın olarak kullanılmasına rağmen geri esneme konusunda doğruluğunu ve güvenilirliğini tam olarak kanıtlanmamış olduğunu belirtmiş ve çalışmalarında çeşitli fiziksel parametrelerin geri esnemeye etkisini incelemişlerdir [5].

Naka ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ince taneli Al-Mg alaşımı (5083-O) farklı sıcaklık (293 - 573 K) ve farklı hızlarda (0,2-200 mm/dak) şekillendirilmesini deneysel olarak incelemiş, 473-573 K sıcaklık değerleri arasında şekillendirme hızı arttıkça şekillendirme gerilmelerin arttığını, oda sıcaklığında ise şekillendirme limit diyagramının hıza duyarlı olmadığını ortaya koymuş, 537 K ve düşük şekillendirme hızında, şekillendirmede belli bir gelişme sağladığını fakat 473 K den aşağı sıcaklıklardaki şekillendirmelerde malzemenin dayanım – sertlik ilişkisinden etkilendiğini belirtmiştir [6].

Naka ve Yoshida çalışmalarında kalıbı ısıtmak suretiyle 293-473 K arası sıcaklık ve 0,2-500 mm/dak arası hızlarda Al-Mg alaşımı (5083-O) sac malzemenin derin silindirik çekilebilirliğini araştırmışlardır. Sıcaklık artışıyla deformasyon direncindeki oluşan azalma ile çekilebilme oranı arttığını , şekillendirme hızının artışıyla ise çekilebilme oranının tüm sıcaklıklarda azaldığını sonucuna varmışlardır [7].

Canteli ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bükme parametrelerini ve sıcaklık dağılımını tahmin edebilmek için bir termo mekanik model geliştirerek, sacın mekanik özelliklerine sıcaklık etkisini hesaplanmıştır. Bükme işlemindeki son açının, uygulanan kuvvet ortadan kalktıktan sonra oluştuğunu belirtmiştir [8].

Palaniswamy ve arkadaşları Mg alaşımlı AZ31B sacının çekilebilirliğini izotermal olamayan sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Benzetim çalışmalarında, sıcaklık artışıyla, çekilebilme oranında artış öngörülmüş, maksimum çekilebilirlik oranı da 200 C derecede elde etmişlerdir. Bu tespit etikleri sonuçlar, yapılan deneylerle örtüşmüştür [9].

Michel ve Picart yaptıkları çalışmada, yapısal parametrelerin boyut ve uzunluk üzerinde ilişkisi olmadığından metal Şekillendirme süreçlerinde boyutsal etkilerin gösterilmesine tam olarak uyum sağlayamadığını belirtmiş, çok ince parçaların sac metal şekillendirmeleri için malzeme davranışlarını benzeştirmek için gerginlik eğimini plastisite teorisi kabul etmişlerdir. Yapısal bir parametre uzunluğu, etkin plastik geriliminin eğimine ilişkilendirerek, eğimi, her bir birleşim noktasında kalınlık boyunca birleşim noktalarının koordinatlarında bağımlı olan bir interpolasyon kullanılarak hesaplanmıştır. Etkin plastik gerilimi, sürekli tekrarlanan taslağın çözümlenmesiyle sağlayarak, sonlu elemanlar çerçevesindeki algoritmanın akış diyagramı sac metal şekillendirmenin iki sayısal örneğiyle sunmuşlardır [10].

Kim ve arkadaşları, çekme özellikleri ve gerilme oranını yaptıkları çalışmada incelemişler, CQ ve DP590 malzeme için klasik ve yüksek hızda Şekillendirme deneyleri uygulamışlar ve Şekillendirme limit diyagramındaki değişimleri incelemişlerdir. Buna göre çalışmalarında şekillendirme limit diyagramının normal ve yüksek hızda şekillendirmede gerilme oranının çeliklerin şekillendirilebilmesini etkilediği sonucuna varmışlardır [11].

Karthing ve arkadaşları, çalışmalarında farklı şartlarda 409, 439 ve 18Cr-Cb alaşımları için şekillendirme deneyleri yapmışlar. Yağlama, zımba hızı, baskı kuvveti ve sac kalınlığının etkilerini incelemişlerdir [12].

Selt ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yüksek hızda deformasyonun şekillendirmeye etkilerini araştırmışlardır. 50-220 m/s hızlara da şekillendirilmesini kamera yardımıyla inceleyerek, ihtiyaç duyulan enerjinin neredeyse lineer bir davranış gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, şekillendirilebilmeyi, takım ve zımba geometrisini de etkilediğini belirtmişlerdir [13].

Naka ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 5083 alüminyum-magnezyum alaşımlı sacın şekillendirilmesinde sıcaklık ve şekillendirme hızının, şekillendirme limit diyagramına etkilerini incelemişlerdir. 2-200 mm/dak hız ve 293K-593K sıcaklık değerleri arasında gerçekleşen deneylerde şekillendirme limit diyagramının yüksek sıcaklıklarda hızın azalmasıyla arttığını oda sıcaklığında ise hızın şekillendirme limit diyagramını etkilemediği kanaatine varmışlardır [14].

Leington ve Lee yaptıkları çalışmada matris ve zımba sıcaklığının sac metal silindirik çekme işlemine etkilerini incelemişlerdir. Takım sıcaklığının 100°C, 200°C ulaştığında arasında sürtünmenin de etkilerinin incelenmesi gerektiğini, matris sıcaklığını 25°C den 100°C dereceye kadar aralığında şekillendirme bir etkisinin olmadığını, zımba sıcaklığının 5°C-25°C arasında artırılmasıyla şekillendirme limit diyagramının %15 oranında arttığını belirtmişlerdir [15].

Wang ve çalışma arkadaşları yaptıkları çalışmada, 5182 alüminyum alaşımlı sacının ılık derin çekilme özelliklerini farklı hız, farklı sıcaklık ve farklı baskı kuvvetleri uygulayarak yaptıkları deneylerde incelemişlerdir. Çalışma sonucunda 5182 alüminyum alaşımının en uygun sıcaklık, çekme hızı ve baskı kuvvetini belirlemişlerdir [16].

Pekel yüksek lisans tezinde AA5754-O malzemenin şekillendirilmesinde sıcaklık ve Şekillendirme hızının çekme işlemine etkilerini incelemiştir [17].

Öztürk ve Alkan, 106M058 kodlu Tübitak Projesinde alüminyum alaşımların şekillendirilmesinde sıcaklık ve deformasyon hızının şekillendirmeye etkisi incelemek için tek eksenli çekme testleri ve bulge testleri yapmışlardır. Ayrıca, sonlu elamanla yöntemiyle analizler yaparak deneysel ve teorik olarak incelemiştir [18].

Wu ve arkadaşları, sac malzeme şekillendirilebilirliğine etki eden faktörleri incelemiştir. Çalışmada, 0,6 mm kalınlığında LZ61 alaşımlı sac için SSD (şekillendirme sınır diyagramı) belirlenmiştir. Şekil değiştirme karakteristiklerinde, anizotropi ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Ortalama plastik uzama oranı, anizotropi ve şekil değiştirme sertleşmesi üssü gibi şekillendirilebilirlik değişkenleri, çekme testi sonuçlarından belirlenmiştir. Bütün test sıcaklıklarındaki mekanik özelliklerde anizotropinin etkisi gözlenmiştir. Çekme özellikleri ve şekillendirilebilirlik değişkenleri SSD ile ilişkilendirilmiştir [19].

Narayanasamy ve arkadaşları, sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini ifade eden değişkenlerin incelemesini yapmışlardır. Çekme testlerinden, bütün “IF” çeliklerin, yüksek “n”, ”K” ve iyi süneklik sergilediği gözlenmiştir. Normal anizotropi “r”, sacların şekillendirilebilirliği ile ilişkilendirilmiştir. Bütün saclar iyi şekillendirilebilirlik sergilemektedir. Sacların çekilebilirliği, “n” ve “r” değerlerinden etkilenmektedir. 0,85 mm kalınlığındaki “IF” çeliği, yüksek “r” değeri sergilemiştir. “r” değerinin yüksek olması yüzünden, diğer saclar ile karşılaştırıldığında, bu sacın çekme-basma bölgesinde şekillendirilebilirliği yüksek olmaktadır. “r” değeri arttığı için, herhangi bir küçük uzama değerinde, çekme basma bölgesindeki maksimum büyük uzama değerinin arttığı gözlenmiştir [20].

Meriç ve arkadaşları, alüminyum alaşımı sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini mukayese etmişlerdir. Şekil değiştirme sertleşmesi üssü ve ortalama anizotropi gibi

özellikler sac metallerin şekillendirilebilirliğini etkileyen çok önemli özelliklerdir. Çalışmada, alüminyum alaşımları test edilmiştir ve elde edilen değerler birbirleri ile mukayese edilmiştir. Al99.0 alaşımı, yüksek “n” (pekleşme katsayısı) ve “r” (anizotropi) değeri sergilemiştir. Bu malzemenin diğerlerine göre, iyi akış ve derin çekme yeteneği gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer bir sonuç ise, AlMgCu alaşımının en az “ ΔR ” değerine sahip olduğudur. Buradan, bu malzemenin, diğer alaşımlara göre kulak oluşumuna karşı çok güvenli olduğu sonucu çıkmaktadır [21].

Narayanasamy ve arkadaşları, 3 farklı HSLA çelik sacın farklı gerilme-uzama oranları için, deneysel uzama değerlerinden elde edilen geliştirilmiş gerilme bazlı ŞSD ve kırılma sınır diyagramları üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, 3 sacın şekillendirme ve kırılma davranışları, mekanik özellikler ve içyapısı ile ilişkilendirilerek incelemişlerdir. Karbon-magnezyum çeliği, düzlem uzama ve germe-germe şartlarında iyi şekillendirilebilirlik sergilemiştir. Yüksek anizotropi ve “pancake” şeklinde içyapı sergileyen karbon-magnezyum çeliği, çekme operasyonlarına oldukça uygun bulunmuştur [22].

Chino ve arkadaşları, farklı sıcaklıklarda, AZ31 magnezyum alaşımının, Erichsen Testi kullanılarak, gererek şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Oda sıcaklıklarında düşük “r” değerine ve yüksek “n” değerine sahip örnekler mükemmel şekillendirilebilirlik göstermiştir. Sıcaklık farkının tane büyüklüğünü etkilediği ve bu durumun şekillendirilebilirliği geliştirdiği görülmüştür [23].

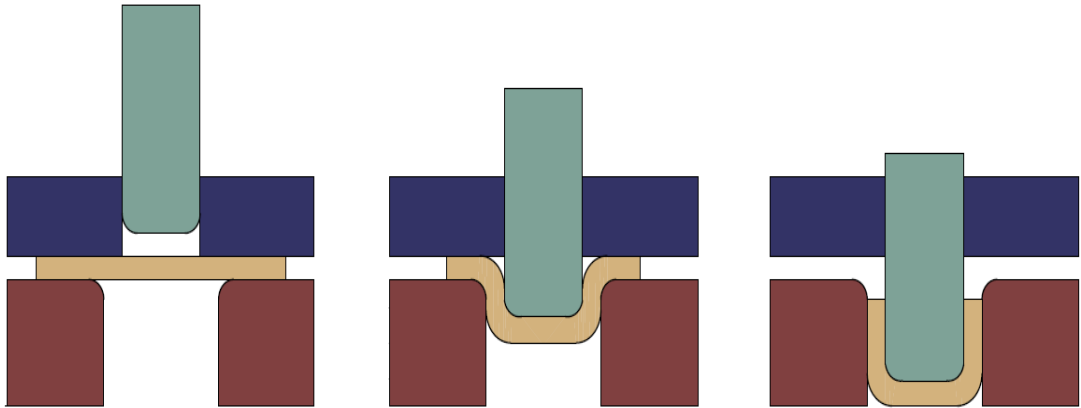
Literatür araştırması değerlendirildiğinde Şekillendirmeyi etkileyen birçok etken bulunduğu ve her farklı malzeme için bu etkenlerin incelemek için daha birçok farklı araştırma yapılabileceği görülmektedir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Derin Çekme

Düz levha halindeki sac malzemenin erkek zımba hareketiyle dişi kalıp içerisine sıvanması suretiyle belli bir derinlik ve profile sahip kapalı bir kap haline getirilmesi işlemine derin çekme denilmektedir. Derin çekme işlemi, sac uygulanan kuvvetin etkisiyle sacda basma, eğme, bükme gibi farklı biçimlendirme işlemlerinin bir araya gelmesiyle oluşur. Zımbanın hareketi ile sac malzemenin kalıp içine doğru hareketi ile şekillenme sağlanır.

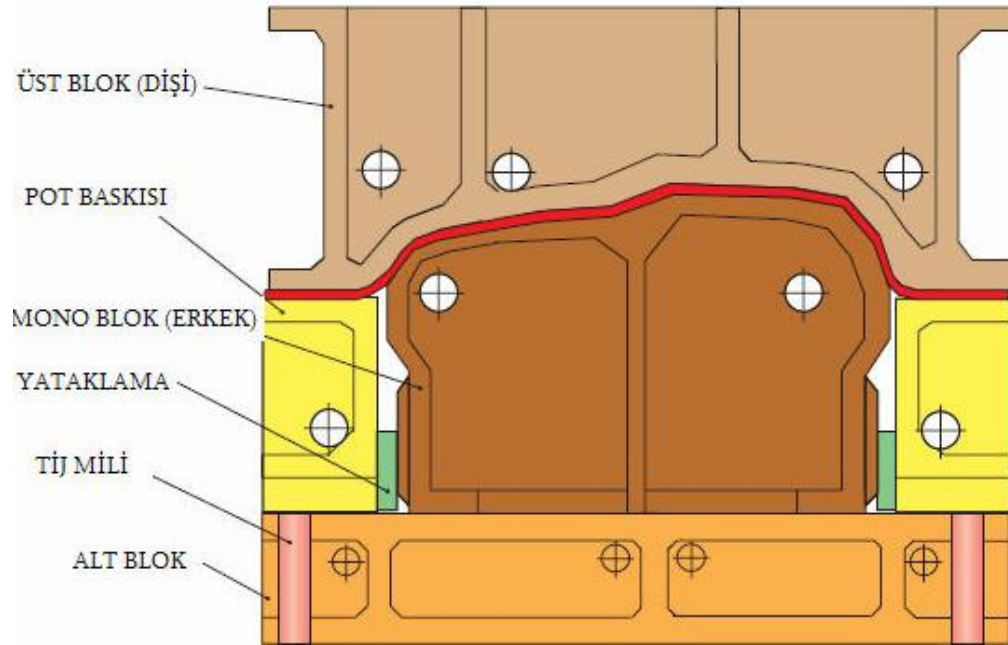
DIN 8584 standardına göre derin çekme; şekillendirme sürecimde sacda çekme ve basma gerilmeleri meydana getirerek, sac levha halindeki malzemenin tek tarafı açık bir kap olarak şekillendirilmesi ya da ön çekme işlemine uğramış tek tarafı açık kap halindeki parçanın kendinden daha küçük kesitli bir kap haline getirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.1. Derin çekme süreci

3.1.1. Derin çekme kalıpları

Şekil 3.2.' de örnek bir derin çekme kalıbı elemanları tanıtılmıştır.



Şekil 3.2. Çekme kalıbı [24]

Üst kalıp tablası:

Kalıbın pres üst tablasına uygun konumda bağlanması için kullanılır.

Alt kalıp tablası:

Kalıbın pres alt tablasına uygun konumda bağlanması için kullanılır.

Zimba:

Sacın dişi kalıp içerisine akışını sağlayarak saca şeklini verir.

Dişi Kalıp:

Presin hareketine devam etmesi ve erkek kalıp yardımıyla dişi kalıp içerisine akması ile sacın son şeklini almasını sağlar. Ayrıca, şekillendirme başlamadan, baskı plakası ile sacı sıkıştırarak, sacın şekil alması esnasının oluşabilecek kırıkşıkları engeller.

Baskı plakası (pot çemberi):

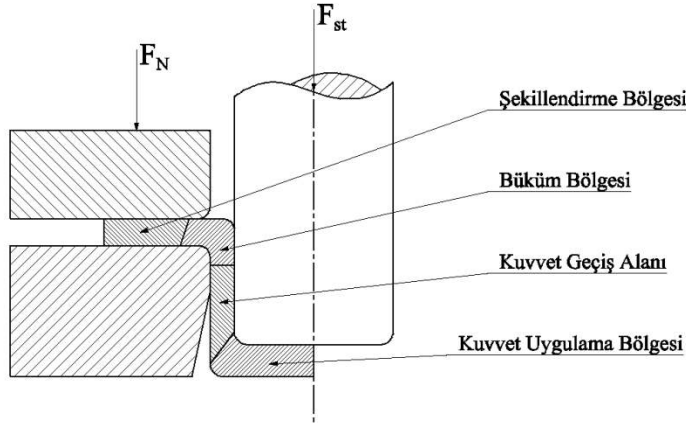
Baskı plakası, dişi kalıp ile şekillendirme öncesi sacı sıkıştırarak sacı tutar. Pres hareketine devam etmesiyle sacın dişi kalıp içerisine uygun hızda akmasına yardımcı olur.

Tij milleri:

Baskı Plakası ile pres alt tablası arasında bağlantı görevi görür. Sacı tutmak için gerekli basıncın iletilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, kalıp tasarımı ve pres tipine göre tij milleri yerine gazlı yaylar da kullanılmaktadır. Baskı plakası ile kalıbın alt plakası arasında çalışarak sacı gerdirilmesi için gerekli basıncı sağlar.

3.2. Derin ekme Mekanığı ve Oluşan Gerilmeler

Çekme işleminde ilk önce sacın kalıp içerisine yerleştirildikten sonra pres hareketi ile kalıp dişi kalıp ile baskı plakası arasında sacın basarak gerdirilmesi sağlanır. Daha sonraki aşamada zımba yardımıyla sac dişi kalıp radyüsleri üzerinden akarak kalıp boşluğuna doğru girmeye başlar. Bu aşamada dişi kalıp ile zımba arasında kalan sacda düşey duvarlar ve büküm kenarları oluşur. Plastik şekil değiştirmenin son aşamasında, zımbaya sarılmış olan sac merkeze doğru akışına devam ederek son şeklini alır.



Şekil 3.3. Derin çekme işleminde gerilme bölgeleri [25]

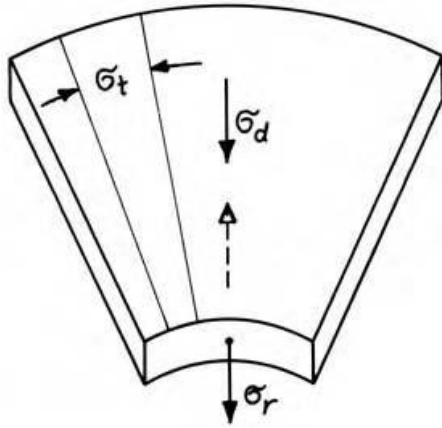
Çekme işlemi sonucunda oluşan sac parça dört karakteristik bölgeye ayrılmaktadır [25].

- 1- Şekillendirme bölgesinde baskı plakası kuvveti F_N uygulanmaktadır. Bu sacın kırışmadan akmasını sağlamaktadır.
- 2- Malzeme dişi kalıp ile baskı plakası arasında çekme yüksüğü radyüsü üzerinden akarak bükme bölgesini oluşturur.
- 3- Yan duvarlar bu bölgede oluşur. Burada sadece kuvvet aktarımı gerçekleşmektedir.
- 4- Saca pres kuvvetinin uygulandığı bölgedir.

Ayrıca, derin çekme işlemi uygulanan sac parçada aşağıda belirtilen gerilmeler meydana gelmektedir [26].

- 1- Kalıp ile baskı plakası arasında radyal çekme
- 2- Kalıp ile zımba arasında sürtünme ve malzemede çekme gerilmesi
- 3- Kalıp ağız çevresi boyunca malzemede çekme, basma ve kayma gerilmesi
- 4- Zımbanın uç kavisi boyunca malzemede eğilme, kayma, basma ve çekme gerilmesi
- 5- Zımbanın yüzeyinde uzama ve kayma

Sac malzemeye kuvvet uygulanarak daha küçük bir çapa akışa zorlanmasından dolayı σ_t teğetsel basma gerilmesi oluşmaktadır (Şekil 4). σ_r radyal çekme gerilmesi, sac malzemenin zımba ile dişi kalıp arasına çekilmeye başlamasıyla meydana gelmektedir. Şekillendirme başlamadan önce baskı plakası ile dişi kalıp arasından sacın sıkıştırılması sırasında baskı plakasının sac uyguladığı kuvvetten dolayı basma gerilmesi oluşmaktadır. Dişi kalıpta bulunana çekme radyüsleri boyunca sac malzemede bükme gerilmesi oluşmaktadır [28].



Şekil 3.4. Çekme işlemi sırasındaki metal akışı [28]

3.3. Derin Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler

Derin çekme işlemini etkileyen faktörler, malzeme özelliklerinin etkisi ve işlem değişkenlerinin etkisi olarak iki açıdan değerlendirilmiştir. Bunlar; malzeme özelliklerinin şekillendirmeye etkisi ve işlem parametrelerinin şekillendirmeye etkileridir.

3.3.1. Malzeme özelliklerinin etkisi

Şekillendirmeye etki eden en önemli faktörlerden birisi malzeme cinsi ve özellikleridir. Her malzemenin kendine has karakteristik özelliklere sahiptir. Malzeme özellikleri birçoğu çekme testi sonucu elde edilebilmektedir. Çekme

deneyi, endüstride metalik malzemelerin akma gerilmesi, çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk, % uzama ve % kesit daralması gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan başlıca bir deneydir [27].

Akma mukavemeti

Klasik elastisite teorisine göre akma gerilmesinin altında yüklemeye maruz kalan parçalarda sadece elastik deformasyon meydana geleceği kabul edilmektedir. Bu bölgede bilindiği gibi malzemede herhangi bir tahribat meydana gelmez [27].

Malzemenin kalıcı şekil değişimi meydana gelmeden çıkabileceği en üst gerilme sınırı olarak tanımlanmaktadır [29]. Plastik şekil değiştirmenin başlaması için gerilmelerin sağlaması gereken bağıntıya akma kriteri denilmektedir. Sünek malzemeler için kullanılan iki akma kriterim bulunmaktadır. Bunlar, Tresca ve von Mises akma kriterleridir. [27].

Sac metal malzemelerin şekil alabilmeleri için malzemenin tamamında akma sınırının aşılması gerekmektedir. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde akma mukavemetinin düşük olması şekillenme sonrası oluşacak geri esnemeyi etkileyeceğinden malzemenin akma mukavemetinin düşük olması istenmektedir.

Sac malzemelerin şekillendirilmesi sırasında akma mukavemetinin altında uygulanan kuvvetler, malzemeyi elastik olarak deforme etmektedir. Kuvvetin ortadan kalkması ile malzeme eski şekline geri dönecektir.

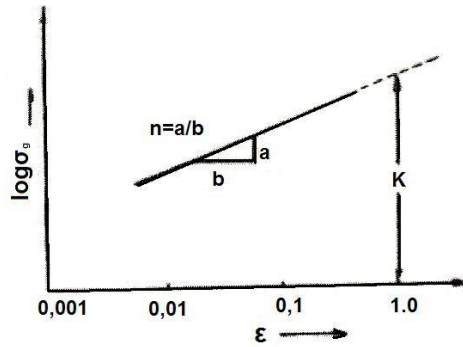
Çekme testi sonucu elde edilen birim uzama - gerilme eğrisinin başlangıç noktası ile akma sınırı üst akma sınırı arasında Hooke kanununa göre belirlenen doğrunun eğimi olarak hesaplanmaktadır. Sac metal malzemelerin Şekillendirmesi sırasında ortaya çıkan en önemli sorunlardan birisi olan geri esnemenin belirlenmesinde en önemli rol oynamaktadır.

Pekleşme üsteli

Çok kristalli metallerde dislokasyon hareketleri çeşitli engeller tarafından kısmen engellenir. Şekil değişimi sırasında ilerleyen dislokasyonlar bu tür engellere gelince durmak zorunda kalır ve arkasından gelenler ile birlikte bu bölgede bir dislokasyon yığılması oluşturur. Artan zorlanma ile birlikte yeni dislokasyonları oluşur, sayıları gittikçe artan dislokasyonlar birbirlerini de engellemeye başlarlar. Malzemede kalıcı Şekil değiştirmek için gereken gerilmenin sürekli artması gerekir. Malzemenin plastik Şekil değişimine karşı direnci giderek artar. Bu olay pekleşme olarak adlandırılmaktadır [29].

Sac malzemelerin şekillendirilme kabiliyeti, sacın deformasyon sürecindeki sertleşebilme özelliğine bağlıdır [30]. Saca uygulanan gerilmedeki artış ile plastik şekil değişimi ve sertleşme, soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliğidir. Bölgesel olarak plastik değişimine uğrayan bir bölgede, burada oluşacak pekleşmeden dolayı dayanım artacağından, bu bölgedeki şekil değişimi durur ve parçanın diğer komşu bölgelerdeki plastik şekil değişimi başlar [31].

Deformasyon sertleşmesi, malzemenin çekme testine tabi tutularak, plastik deformasyonun başladığı akma mukavemeti ile boyun vermenin başladığı çekme mukavemeti arasındaki homojen plastik deformasyon bölgesindeki Hollman denkleminde $\sigma = K \epsilon^n$ göre çizilen gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme değeri neticesinde Hollman denkleminde (3.1) göre çizilen grafiğin eğimi deformasyon sertleşmesi (n) değerini vermektedir.



Şekil 3.5. Gerçek gerilme – birim şekil değişimi grafiğinin logaritmik eğimi [32]

$$\sigma_g = K \varepsilon^n \quad (3.1)$$

Gerçek Plastik Gerilme

K= Sabit

ε = Deformasyon

n= pekleşme üsteli

Deformasyon hızına duyarlılık üsteli (m)

Sac malzemenin plastik deformasyonunu etkileyen önemli faktörlerden biriside malzemenin deformasyon hızına karşı gösterdiği duyarlılıktır. Daha önce yapılan çalışmalara incelendiğinde genel olarak deformasyon hızında meydana gelecek artışların akma gerilmesini de arttırdığı görülmektedir. Akma gerilmesinde ki artması da malzemenin plastik deformasyona uğramasını zorlaştırmaktadır. Bunu deformasyon hızına karşı malzemenin gösterdiği duyarlılık olarak tanımlayabilmektedir.

Akma dayanımının deformasyon hızıyla olan duyarlılığı aşağıdaki üstel ifade ile gösterilmektedir.

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^m \quad (3.1)$$

σ = gerilme

C= Malzeme dayanım sabiti

m= deformasyon hızına duyarlılık üsteli

ε =Birim Şekil değiştirme hızı

Anizotropi (r)

Sac malzemeden hazırlanan bir deney parçasına çekme deneyi uygulandığında plastik şekil değişimi çekme eksenini boyunca, buna dik olarak uzanan kalınlık ve genişlik doğrultusunda ise kısılma şeklinde meydana gelir. Hacim sabitliği uzama Şekil birim toplamının kısılma Şekil değişimlerinin toplamına eşit olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu kalınlık ve genişlik yönlerindeki birim şekil değişimlerinin birbirlerine eşit olmasını gerektirmemektedir. Genişlik yönündeki birim Şekil değişimi ϵ_w 'nin kalınlık yönündeki birim değişimi ϵ_T 'ye oranı r değeri olarak tanımlanır [31].

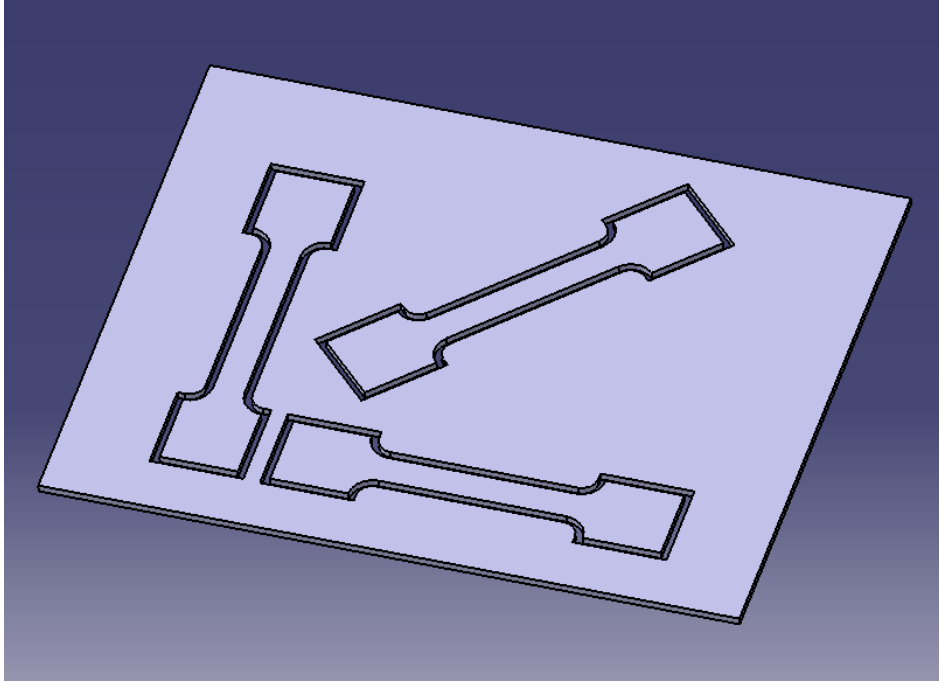
Anizotropi, hadde yönüne göre şekillendirme esnasında sacın gösterdiği duyarlılık olarak tanımlanabilir.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_T} \quad (3.2)$$

ϵ_w = Genişlikteki gerinim

ϵ_T = Kalınlıktaki gerinim

Ortalama dikey anizotropi katsayısı “ r ” sac malzemelerde derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür. Bunun, 1 ve 1’den büyük olması istenir. [32]



Resim.3.1. Hadde yönü

3.3.2. İşlem değişkenlerinin şekillenmeye etkisi

Malzeme özelliklerin şekillendirmeye etkilerinin yanında şekillendirme işlemi sırasında çalışma işlem parametrelerinin de şekillendirme sürecine etkileri mevcuttur. İşlem parametrelerini malzeme etkilerinden ayıran en önemli özellik işlem değişkenlerinin üretim sürecinde kişiler tarafından belirlenmesidir.

Sac parça - kalıp geometrisi ve çekme boşluğu

Kalıp, malzeme özellikleri ile beraber sacın uygun bir şekilde istenilen zımba ile dişi arasında akarak istenilen geometri elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kalıbın tasarımı aşamasında bu detayların belirlenmesi gerekmektedir.

Kalıbın ana görevi diğer işlem ve malzeme değişkenlerinin etkileri ile birlikte pres tezgahından aldığı kuvvet yardımıyla saca gerekli gerilmeleri uygulayarak malzemenin istenilen geometriyi almasını sağlamaktır. Şekillendirme işlemi

sırasında kalıp radyüsleri ve süzdürme çubuklarının sacın dışı kalıp içerisine akışını önemli ölçüde etki etmektedir. Tasarım aşamasında kalıbın radyüs miktarı belirlenmelidir. Sac malzemen radyüslerden geçişi sırasında plastik deformasyona uğrayarak istenilen form içerisine akmaktadır. Radyüs miktarının gereğinden fazla verildiği durumlarda sacın hareketi sırasında rahat bir davranış sergileyerek buruşma ve üründe ölçüsel şekil bozuklukları meydana gelebilecektir. Radyüs miktarının az verilmesi durumlarda ise sacın akışı ve kuvvetin yayılımı zorlaşacaktır. Bu da sacda bölgesel incelmeler ve yırtılmalara neden olabilecektir.

Kalıp radyüsleri ürün geometrisi ile yakından ilgilidir. Karmaşık geometriye sahip parçalarda küçük radyüsler kullanılmak zorunda kalmaktadır. Bu gibi durumlarda çekme radyüsü bu hattın dışından geçirilmeli ya da çekme operasyonlarında radyüs büyük tutulup, kalibre operasyonunda radyüsler küçültülerek istenilen değere düşürülmelidir [31].

Ayrıca, kalıp radyüsleriyle beraber şekillendirmeye etki eden bir başka faktörde kullanılan süzdürme çubuklarıdır. Ürün geometrisine göre kalıpta belli bölgelerde sacın akışını yavaşlatma için süzdürme bölgeleri kullanılmaktadır. Süzdürme bölgeleri ve süzdürme çubuklarının tipi ve büyüklükleri analiz programları yardımıyla belirlenebilmektedir.

Kalıbın çalışması esnasında dışı kalıp ile zımba arasında sacın uygun şekilde akabilmesi için sac kalınlığı da dikkate alınarak bir miktar boşluk bırakılmalıdır. Boşluk miktarı fazla bırakıldığında sacın akış kontrolü zorlaşacak buruşma ve istenilen geometrinin elde edilememesine, az bırakılması da sac kalınlığında incelme ve yırtılmalara neden olacaktır.

Sac kalınlığındaki artış sac malzemenin şekillenebilirliğini arttırmaktadır [34]. Ayrıca, sac kalınlığı kalıplama kuvveti ve kalıp tasarımına etki eden bir başka parametredir.

Kullanılacak pres tipi şekillendirme sürecini etkileyecektir. Sac metal Şekillendirme işlemlerinde genellikle hidrolik ve mekanik presler tercih edilmektedir. Mekanik presler, volandan aldığı eksantrik dişli hareketi yardımıyla pres koçu ile kalıba aktarır. Fakat işlem sırasında kuvvet sabit değildir. Hidrolik preslerde ise pres koçu sıvı basıncı ile hareket almaktadır. Pres hareketi sırasında kuvvet sabit kalır. Derin çekme işlemlerinde kullanılması daha uygundur.

Çekme hızı

Çekme işleminde sac metal malzemenin dışı kalıp içerisine akış hızına çekme hızı olarak tanımlayabilir. Sorunsuz bir çekme gerçekleşmesi için hızın uygun seçilmesi gerekmektedir.

Çekme hızının yüksek olması sac parça üzerine etkiyen çekme kuvvetinin dağılmasına izin vermeyecek ve dolayısıyla sacın yırtılmasına neden olacaktır. Ayrıca, yüksek çekme hızı kalıp içerisinde ısınmaya neden olacak ve yağlama yapıldığı takdirde yağın etkisini azalmasına neden olacaktır [34]. Ayrıca, literatürdeki yapılan çalışmalar incelendiğinde çekme hızının artması sac malzemenin Şekil alabilirliğini azalttığı görülmektedir.

Baskı plakası basıncı

Çekme kalıplarında baskı plakası basıncı genellikle pres tablasına bağlı tij milleri ya da kalıp içerisindeki gazlı yaylar ile sağlanmaktadır. Çekme işleminde dışı kalıp içerisine uygun bir akış sağlamak için şekillendirme başlamadan önce sacın yeterli miktarda gerdirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle baskı plakası basıncının kalıp tasarım aşamasında belirlenerek uygun gazlı yay, yay seçimi ya da tij milleri kullanılacaksa uygun pres seçimi yapılması gerekmektedir. Basıncın yetersiz kaldığı durumlarda sac metal malzemede kırışıklıklar meydana gelebilecek ya da istenilen ürün geometrisi tam olarak elde edilemeyecektir. Baskı plakası basıncının gereğinden fazla verilmesi de şekillendirme öncesi sac malzemede gerginliği

arttırarak sacın pres hızına göre akmasını engelleyerek sacda incelme ve yırtılmalara neden olacaktır.

Yağlama

Yağlama, şekillendirme işlemi sırasında iş parçası ile kalıp yüzeyleri arasında meydana gelecek sürtünmeyi azaltarak sacın kalıp içinde akışını kolaylaştırmaktadır. Temas yüzeylerinde sürtünme katsayısını azaltarak şekillendirme için gerekli kuvveti ve kalıp aşınmalarını azaltarak kalıp ömrünü uzatmaktadır. Ayrıca, plastik deformasyon sırasında ortaya çıkacak ısının soğurması için de kullanılmaktadır.

Sıcaklık

Sıcaklık, sac metal malzemeler mekanik özelliklerini etkileyerek deformasyon sırasında farklı davranış göstermektedirler. Sac metal şekillendirme işlemlerinde de ortam sıcaklığı şekillendirme sonucu elde edilecek ürün geometrisini etkileyeceği için önem taşımaktadır.

Sıcaklığın yükselmesi çoğunlukla malzemenin sinekliğini ve tokluğunu artırır, elastikiyet modülü, akma sınırı ve çekme dayanımı ise düşürmektedir. Ayrıca, pekleşme üsteli de sıcaklıktan etkilenen bir malzeme özelliğidir. Sıcaklığın yükselmesi pekleşme üstelinin düşmesine yol açmaktadır [35].

Sac malzemenin şekillendirilmesinde sıcaklık, malzemedede oluşacak pekleşme gerilmelerini azaltacaktır. Bu da kalıplama kuvvetinin düşmesine sağlayacak ve geri esneme miktarını düşürecektir.

3.4. Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik Sac Malzemeler

Yüksek mukavemetli çeliklerin geliştirilmesindeki temel amaç ağırlığın azaltılmasıdır. Bunun için yapılan çalışmalar neticesinde ağırlık azaltılarak,

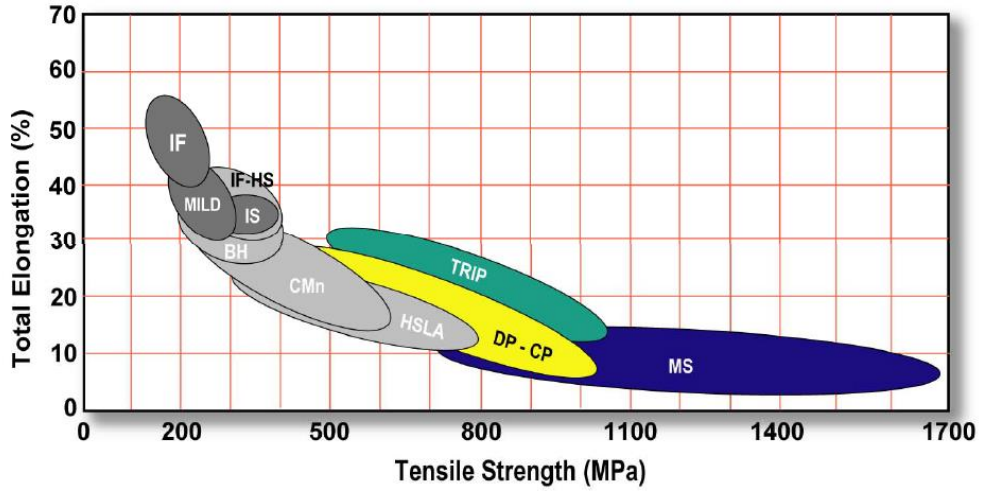
mukavemet ve enerji emme kapasitesi yüksek bu çelik grubu ortaya çıkmıştır. Otomotiv sektöründe çok yaygın olarak kullanmakta olan GYMÇ bu özelliklerinden dolayı yakı tüketimini azaltmakta ve can güvenliğini arttırmaktadır. Ancak, artan mukavemetle beraber malzemenin uzaması azalmış ve şekil alabilme kabiliyeti düşmüştür.

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler, yüksek dayanım ve şekillendirilme kabiliyetleri nedeniyle tamamen otomotiv gövde, panel ve kaporta parçaları için üretilmektedir. Geliştirilen bu çelik kalitesi yerine geleneksel yüksek mukavemetli ya da yumuşak çeliklerin herhangi bir kalitesi kullanıldığında ortaya çıkan en büyük problem dayanım ve şekillendirilebilirlik özelliklerinin uyuşmamasıdır [30].

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler akma mukavemeti 550 MPa üzerinde olan çelikleri ifade etmektedir [36].

Genel olarak AHSS çelik ailesinin kaliteleri dört grupta sınıflandırılabilir [30].

1. Trip Çelikleri
2. Dual Fazlı Çelikler
3. Kompleks Fazlı Çelikler
4. Martensitik Çelikler
5. Mangan – Boron Çelikleri

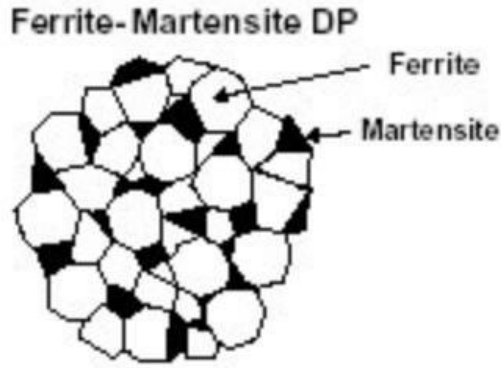


Resim 3.2. Yüksek Mukavemetli Sac Malzeme Diyagramı [37]

Renklendirilmiş kısımlar geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikleri göstermektedir.

3.4.1. Çift fazlı çelikler

Çift fazlı çelikler geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler olarak sınıflandırılmaktadır. Genellikle çift fazlı çelikler magnezyum ya da silisyum gibi bazı alaşım elementleri içermektedir. Bu çelik türünün mukavemet kazanmasının nedeni ise ferritik matriste martenzit yapı oluşumudur. Çift fazlı çelikler ferritik matris yapısında ikinci bir faz olarak sert martenzitik adacıklar bulunmaktadır. Bu durum, yarı kararlı östentit deformasyonu ile gergin yapıda martenzit oluşumu ile mukavemet, süneklik ve malzeme tokluğunun artmasını sağlamaktadır. Karbon içeriği genellikle 0,005 ile 0,2 % arasında, mangan içeriği ise 1,5 % oranını bulabilmektedir [38].



Resim 3.3. Çift fazlı sacların mikro yapısının şematik olarak gösterimi [37]

Çift fazlı çeliklerde ikinci fazın hacim oranı sacı mukavemetini belirlerken, ferrit faz saca süneklik sağlamaktadır. Çift fazlı sacların deformasyonu sırasında, gerilmeler, martenzit adaları çevreleyen düşük mukavemetli ferrit fazda bulunmaktadır. Bu malzemenin yüksek sertleşebilme oranını oluşturmaktadır. Yüksek sertleşebilme oranı ve uzama özelliği sayesinde çift fazlı çelikler benzer akma mukavemetine sahip diğer çeliklere göre çok daha yüksek çekme mukavemetine sahiptirler [40].

4. MATERYAL ve METOT

Yapılan bu çalışmada, sac metal şekillendirme işlemlerinde pres hızı ve malzemenin şekillendirmeye etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçlar, DP600 ve DP780 sac malzemeler farklı çekme hızlarında çekme testlerini tabi tutulmuş, elde edilen veriler autoform bilgisayar destekli sac şekillendirme benzetim programına tanıtılarak şekillendirme analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Sac Malzeme

Malzemelerin kendine has mekanik özellikleri bulunmaktadır. Malzemeler, farklı deformasyon şartlarına göre değişik davranışlar gösterebilmektedir. Farklı şekillendirme hızlarında malzemelerin şekillenme davranışını karşılaştırabilmek için iki farklı sac malzeme seçilmiştir. Bunlar, otomotiv sektöründen yaygın olarak kullanılmakta olan DP600 ve DP780 sac malzemelerdir. Sac malzemelere dair spektral analizler yaptırılmış olup kimyasal analiz kimyasal analiz raporları çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge.4.1. DP600 ve DP780 çelik malzeme kimyasal analiz değerleri

Çelik Kalitesi	Tip	Alaşım Elementleri %				
		C	Mn	Mo	Cr	Si
DP600	GI	0.100	1.523	0.196	0.197	0.157
DP780	GA	0.113	2.082	0.181	0.239	0.036

4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Burada öncelikle çekme testi yapılması ihtiyacı kullanılan analiz ve şekillendirme benzetim programı için ön şarttır. Tek eksenli çekme deneyleri için ASTM E8 standardına uygun çekme deneyi numuneleri hazırlanmış ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için Numunelerin kesilmesi su jeti tezgahında yapılarak malzeme üzerinde oluşabilecek ısı etkilerinin azaltılması sağlanmıştır. Ayrıca,

numunelerin, çekme testi sırasında çentik etkisi göstermemesi için yan yüzeyleri temizlenmiştir.



Şekil.4.1. Çekme Testi Deney Numunesi (ASTM E8)

4.3. Deney Düzeneği

Deneyler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde bulunan Zwick marka çekme test cihazında yapılmıştır. Gerilim – birim şekil değişimi ölçümler mekanik deformasyon ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Her bir malzeme çeşidi ve her farklı deformasyon hızı için üçer (3) numune çekme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler hem analiz programı için kaydedilmiş hem de gerilim – birim şekil değişimi grafiği olarak verilmiştir.

4.3.1. Veri analizi

Programdan elde edilen veriler ölçüm yazılımından .raw formatında alınmaktadır. Gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerlerinin elde edilmesi için test sonucu elde edilen veriler ile öncelikle mühendislik gerilmesi ($\sigma_{müh}$) ve mühendislik şekil değişiminin ($\epsilon_{müh}$) hesaplanması gerekmektedir. Çekme testi sonucu elde edilen çekme kuvveti ile şekil değişimi ölçerin yer değiştirme miktarı ($\Delta L=L-L_0$) yardımıyla aşağıdaki bağlantı kullanılarak mühendislik gerilmesinin belirlenmiştir.

$$\sigma_{müh} = F/A_0 \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{müh} = \Delta L/L_0 \quad (3.4)$$

Mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekil değişimi için hesaplanan değerler teorik değerlerdir ve tasarımda kullanılması daha doğru olmaktadır. Mühendislik gerilme ve mühendislik şekil değişiminin hesaplanmasının ardından 3.5 ve 3.6 nolu bağlantılar kullanılarak excel ortamında (Resim 4.1.) gerçek gerilme ve gerçek şekil değişimi hesaplanması gerçekleştirilmiştir.

$$\sigma_{gerçek} = \sigma_{müh} (1 + \epsilon_{müh}) \quad (3.5)$$

$$\epsilon_{gerçek} = \ln(1 + \epsilon_{müh}) \quad (3.6)$$

A	B	C	D	E	F	G	H
DP600_7,5_0				DP600_7,5_0			
Eng Strain	Eng Stress	True Strain	True Stress	Eng Strain	Eng Stress	True Strain	True Stress
0	1,821562182	0	1,821562182	0	1,880070976	0	1,880070976
6,70826E-08	1,819253849	6,70826E-08	1,819253971	-1,32329E-07	1,876632554	-1,32329E-07	1,876632305
6,70826E-08	1,819830904	6,70826E-08	1,819831026	-1,32329E-07	1,872044492	-1,32329E-07	1,872044245
6,70826E-08	1,819830904	6,70826E-08	1,819831026	-1,32329E-07	1,874340348	-1,32329E-07	1,8743401
6,70826E-08	1,821545405	6,70826E-08	1,821545527	-1,32329E-07	1,875479607	-1,32329E-07	1,875479359
6,70826E-08	1,82727943	6,70826E-08	1,827279552	-1,32329E-07	1,871479197	-1,32329E-07	1,87147895
6,70826E-08	1,826143582	6,70826E-08	1,826143704	-1,32329E-07	1,873185805	-1,32329E-07	1,873185557
6,70826E-08	1,824419722	6,70826E-08	1,824419844	-1,32329E-07	1,87147395	-1,32329E-07	1,871473703
6,70826E-08	1,815245281	6,70826E-08	1,815245403	-1,32329E-07	1,87146665	-1,32329E-07	1,871466403
6,70826E-08	1,8203986	6,70826E-08	1,820398722	-1,32329E-07	1,872043352	-1,32329E-07	1,872043104
6,70826E-08	1,81695088	6,70826E-08	1,816951002	-1,32329E-07	1,874342857	-1,32329E-07	1,874342609
6,70826E-08	1,814671879	6,70826E-08	1,814672001	-1,32329E-07	1,872617088	-1,32329E-07	1,87261684
6,70826E-08	1,814671879	6,70826E-08	1,814672001	-1,32329E-07	1,87376684	-1,32329E-07	1,873766592
6,70826E-08	1,810661713	6,70826E-08	1,810661835	-1,32329E-07	1,869751831	-1,32329E-07	1,869751583
6,70826E-08	1,808930549	6,70826E-08	1,80893067	-1,32329E-07	1,865744121	-1,32329E-07	1,865743874
6,70826E-08	1,802626774	6,70826E-08	1,802626894	-1,32329E-07	1,862313112	-1,32329E-07	1,862312866
6,70826E-08	1,802043784	6,70826E-08	1,802043905	-1,32329E-07	1,86114511	-1,32329E-07	1,861144863
6,70826E-08	1,803190817	6,70826E-08	1,803190938	3,37172E-07	1,86115606	3,37172E-07	1,861156687
6,70826E-08	1,807756124	6,70826E-08	1,807756245	3,37172E-07	1,870310282	3,37172E-07	1,870310913
6,70826E-08	1,804918329	6,70826E-08	1,80491845	8,06673E-07	1,878340301	8,06673E-07	1,878341817
5,36584E-07	1,81466252	5,36584E-07	1,814663494	1,27617E-06	1,895539143	1,27617E-06	1,895541562
5,36584E-07	1,824976461	5,36584E-07	1,82497744	1,74568E-06	1,909263177	1,74567E-06	1,909266509
1,00609E-06	1,835290402	1,00608E-06	1,835292248	1,74568E-06	1,925907331	1,74567E-06	1,925910693
1,47559E-06	1,847919866	1,47559E-06	1,847922593	2,21518E-06	1,949442588	2,21517E-06	1,949446907
1,94509E-06	1,858832776	1,94509E-06	1,858836391	3,15418E-06	1,97064184	3,15417E-06	1,970648055
2,41459E-06	1,872010077	2,41459E-06	1,872014597	3,62368E-06	2,006207526	3,62367E-06	2,006214796
2,88409E-06	1,893806678	2,88409E-06	1,893812139	4,09318E-06	2,030852386	4,09317E-06	2,030860699
3,35359E-06	1,922498831	3,35359E-06	1,922505279	4,56268E-06	2,067527675	4,56267E-06	2,067537108
4,29259E-06	1,967786674	4,29258E-06	1,967795121	5,97119E-06	2,128263823	5,97117E-06	2,128276531
4,76209E-06	2,000510793	4,76208E-06	2,00052032	6,44069E-06	2,174750335	6,44067E-06	2,174764342
5,7011E-06	2,041766557	5,70108E-06	2,041778197	7,37969E-06	2,23034727	7,37966E-06	2,23036373
6,6401E-06	2,116915158	6,64008E-06	2,116929215	8,31869E-06	2,3249555	8,31866E-06	2,324974841
7,5791E-06	2,175467956	7,57907E-06	2,175484444	9,25769E-06	2,395970073	9,25765E-06	2,395992254
8,5181E-06	2,284392523	8,51807E-06	2,284411981	1,06662E-05	2,521647178	1,06661E-05	2,521674074
9,45711E-06	2,359657996	9,45706E-06	2,359680311	1,16052E-05	2,610415394	1,16051E-05	2,610445688
1,03961E-05	2,444039473	1,03961E-05	2,444064882	1,25442E-05	2,718805829	1,25441E-05	2,718839934
1,18046E-05	2,580545797	1,18045E-05	2,580576259	1,39527E-05	2,881625424	1,39526E-05	2,881665631
1,27436E-05	2,674510766	1,27435E-05	2,674544849	1,53612E-05	3,002163317	1,53611E-05	3,002209434
1,41521E-05	2,783668848	1,4152E-05	2,783708243	1,67697E-05	3,190445374	1,67696E-05	3,190498877

Resim 4.1. Çekme test verilerinin excel ortamında hesaplanması

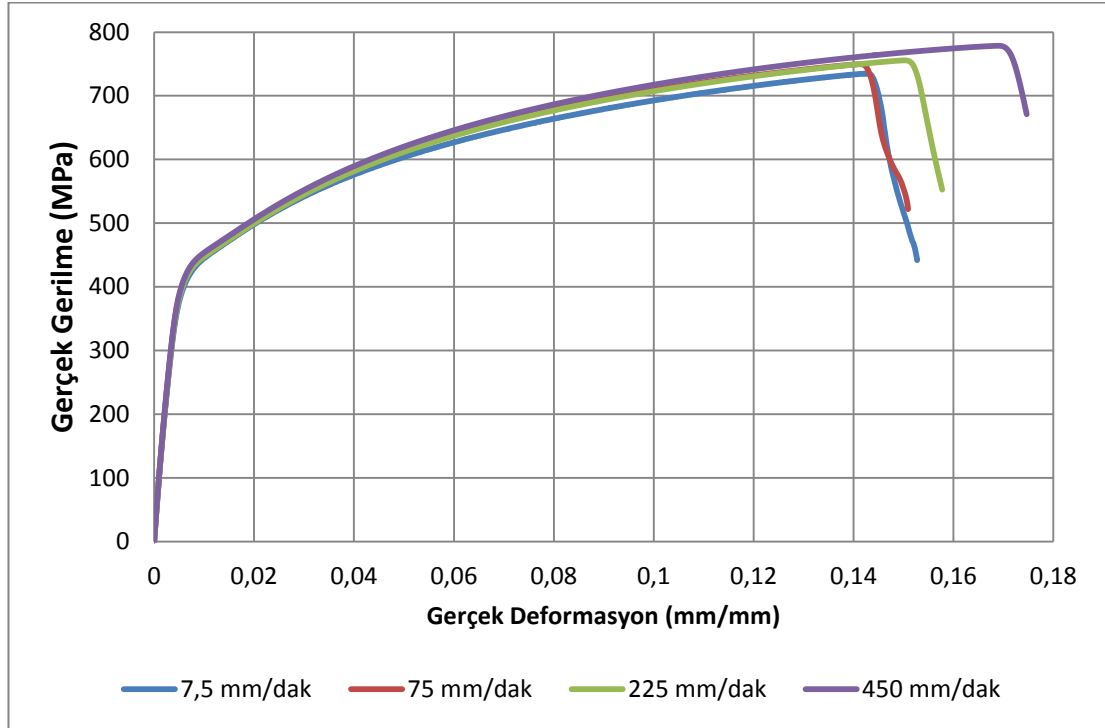
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Çekme Testi Sonuçları

Deformasyon hızının malzeme üzerindeki etkilerini incelemek için dört farklı hızda çekme testleri yapılmıştır. Her deney üç defa tekrar edilerek doğruluk oranının artırılması hedeflenmiştir. Yapılan testler sonucunda deformasyon hızı ve malzeme özelliklerinin sac metal parçaların şekillendirilmesine etkileri başlıklar halinde incelenmeye çalışılmıştır.

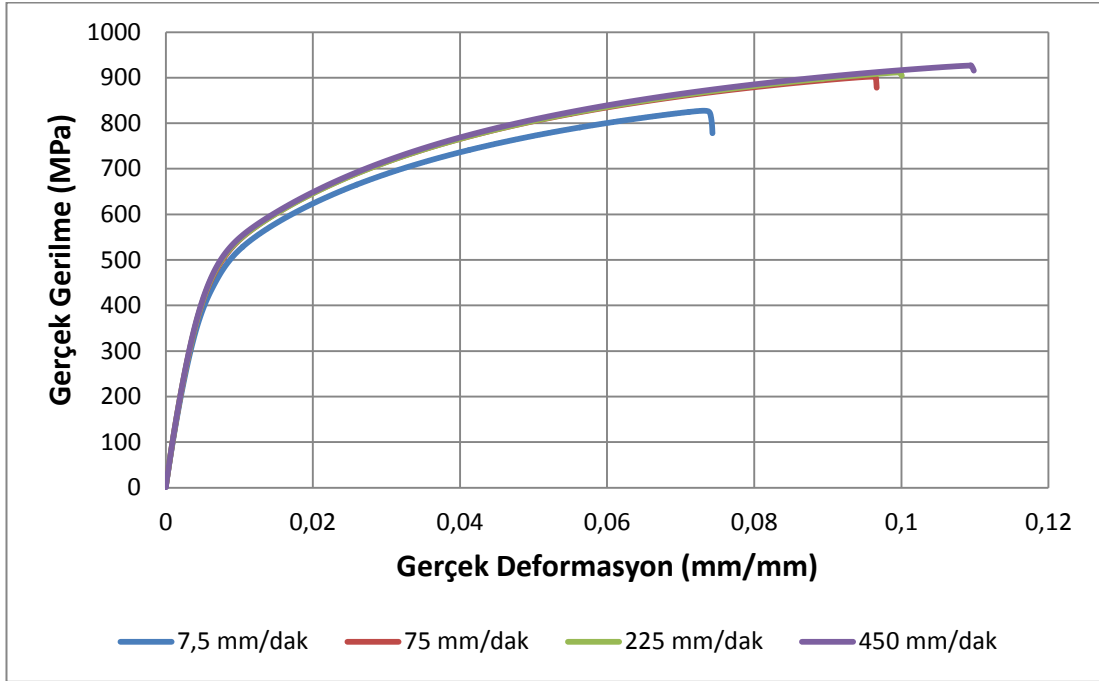
5.1.1. Gerilme – deformasyon eğrisi

Gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda Şekil 5.1.'de verilen DP600 sac malzemenin farklı hızlardaki gerçek gerilme - gerçek deformasyon eğrileri incelendiğinde deformasyon hızının artmasıyla malzemede meydana gelen gerilmenin de arttığı ve malzemede mukavemet kazandığı belirlenmiştir. Ayrıca, düşük deformasyon hızlarında malzemede meydana gelen gerilmeler fazla bir değişim olmazken, yüksek deformasyon hızlarında malzemede oluşan şekil değiştirmenin arttığı gözlemlenmiştir. Yu ve arkadaşlarının DP600 malzemenin farklı deformasyon hızlarındaki davranışını incelemek için yapmış oldukları çalışma ile benzer sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir [39].



Şekil 5.1. DP600 Farklı hızlardaki gerçek gerilme- gerçek deformasyon eğrileri

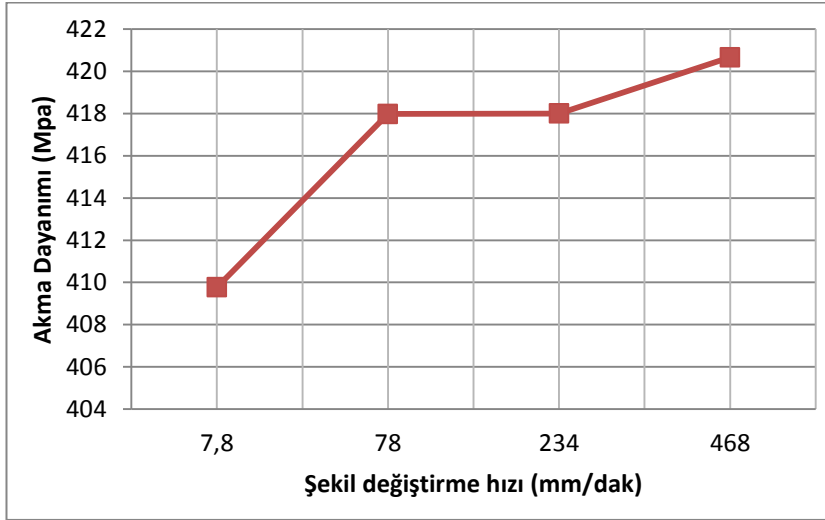
DP780 sac malzemenin farklı hızlardaki gerçek gerilim - gerçek deformasyon eğrileri Şekil 5.2.'de sunulmuştur. DP780 sac malzemenin çekme testi sonuçları incelendiğinde ise çok düşük deformasyon hızı için malzemede meydana gelen deformasyon ve gerilmenin daha yüksek deformasyon hızlarında gerçekleşen test sonuçlarına göre çok düşük kaldığı, deformasyon hızının artmasıyla malzemede oluşan gerilmenin belirgin şekilde artmadığı tespit edilmiştir. Bütün deformasyon hızlarında elde edilen gerçek gerilme- gerçek deformasyon hızları incelendiğinde ise artan deformasyon hızının malzemedeki deformasyonu arttırdığı görülmüştür. Kim ve arkadaşlarının yüksek mukavemetli çeliklerin farklı deformasyon oranlarında ki çalışması incelendiğinde DP780 malzemenin artan deformasyon oranıyla gerilim ve birim deformasyon değerinin arttığı açıkça görülmektedir [40]. Çalışmamızda elde edilen gerilim değerlerinin belirgin artış sergilememesinin nedeninin deformasyon oranlarının birbirine yakın seçilmesinden dolayı olduğu düşünülmektedir.



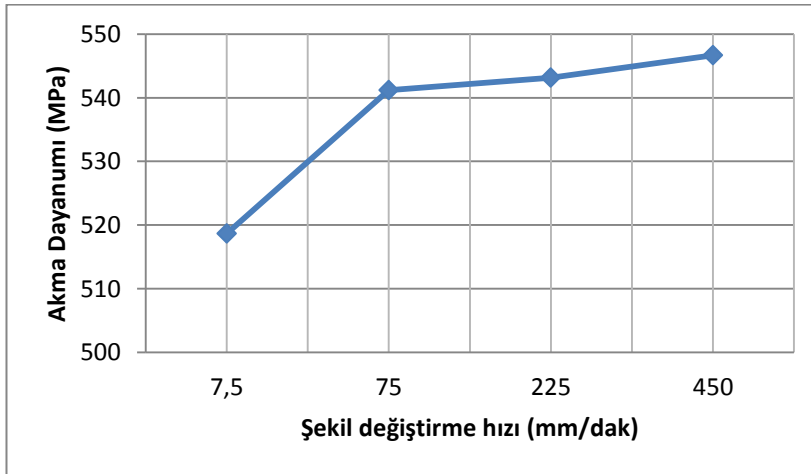
Şekil 5.2. DP780 Farklı hızlardaki gerçek gerilme - gerçek deformasyon eğrileri

5.1.2. Akma dayanımı

Şekillendirme analizlerine kullanılan DP600 ve DP780 malzemelerin çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerlerinin deformasyon hızındaki değişime karşı gösterdiği etkileri belirlemek için akma dayanımı – deformasyon hızı grafikeri Şekil.5.3 ve Şekil.5.4’ de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki malzeme içinde deformasyon hızı artışının akma dayanımı arttırdığı belirlenmiştir. Şekillendirilen bir parçanın tüm bölgelerinde kalıcı homojen bir şekil değişimi elde edebilmek için üst akma sınırının aşılması gerekmektedir [42]. Bu nedenle sac metal şekillendirme işlemlerinde deformasyon hızı artışı akma dayanımını arttıracak ve gereksinim duyulan kalıplama kuvvetinin de artışına neden olacaktır.



Şekil 5.3 DP600 şekil değiştirme hızı - akma dayanımı grafiği

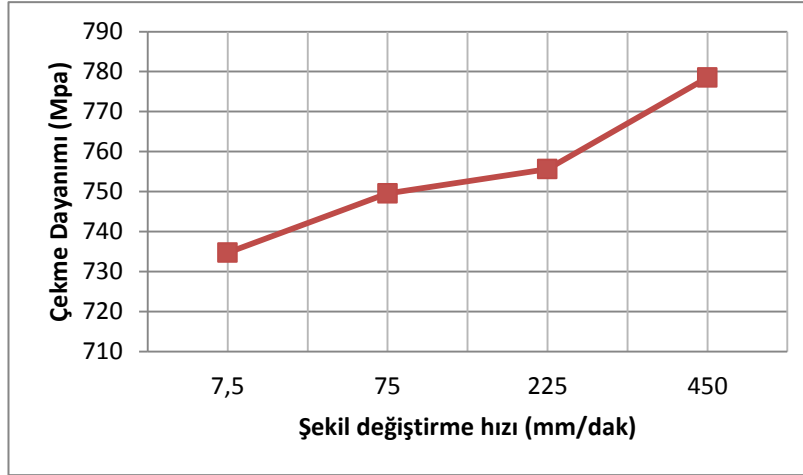


Şekil 5.4 DP780 şekil değiştirme hızı - akma dayanımı grafiği

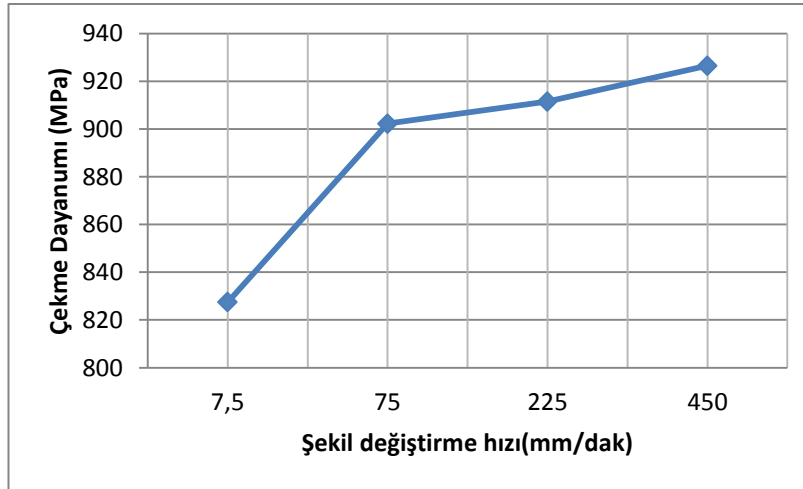
5.1.3. Çekme dayanımı

Çekme dayanımı malzemenin boyun vermeye başlamadan önce dayanabileceği en yüksek gerilmeyi ifade etmektedir. Uygulaman gerilmenin kesit alana olan oranıyla elde edilmektedir [29]. Şekillendirme kuvveti hesaplanırken çekme dayanımı değerlerinden yararlanılmaktadır. Malzemenin deformasyon hızına karşı davranışını incelemek amacıyla yapılan çekme testi sonuçları incelendiğinde deformasyon hızı

artışının çekme dayanımını da arttırdığı tespit edilmiştir. Çekme dayanımı – şekil değiştirme hızı grafikleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’de verilmiştir.



Şekil.5.5 DP600 şekil değiştirme hızı - çekme dayanımı grafiği

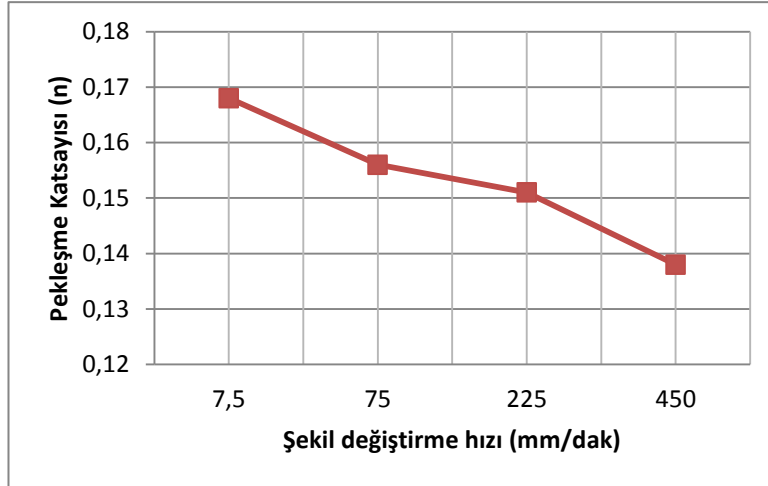


Şekil.5.6 DP780 şekil değiştirme hızı - çekme dayanımı grafiği

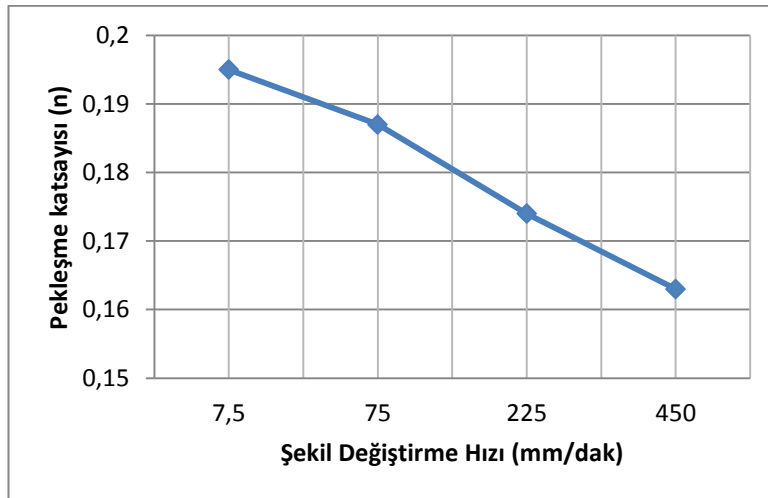
5.1.4. Pekleşme katsayısı

Pekleşme üsteli yüksek olan parçalarda şekil değiştirme dağılımı daha homojen olmaktadır. Bunun sonucu olarak derin, kompleks şekilli parçalar yüksek (n) değerli malzemeden üretilmektedir [43]. Gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen

şekil değiştirme hızı - pekleşme katsayısı grafikleri incelendiğinde her iki malzeme içinde artan deformasyon hızı ile pekleşme katsayısının azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.7 DP600 şekil değiştirme hızı – pekleşme katsayısı değişim grafiği

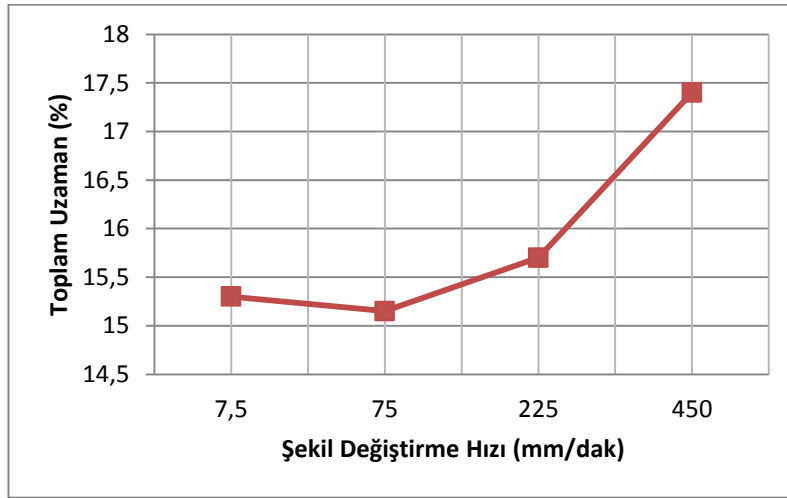


Şekil 5.8 DP780 şekil değiştirme hızı – pekleşme katsayısı değişim grafiği

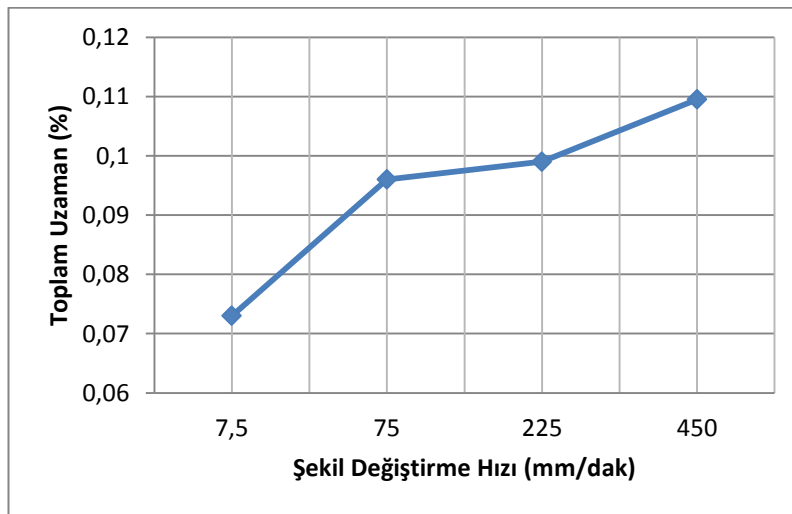
5.1.5. Toplam uzama

Malzemeler farklı şekil değiştirme hızlarına karşı farklı tepkiler göstermektedirler. Uzama miktarları da deformasyon hızından etkilenmekte ve sac metal şekillendirme işlemlerinde önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır.

Farklı şekillendirme hızlarında DP600 ve DP780 sac malzeme için elde edilen uzama değerleri Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde DP600 malzemenin DP780 malzemeye göre uzama değerlerinin yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu da çift fazlı çeliklerde mukavemet değerinin artışı uzama miktarını azalmasına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, her iki malzemenin de deformasyon hızı arttığında daha fazla uzama gerçekleştirdiği görülmektedir. Ancak, DP780 malzemenin DP600 malzemeye göre deformasyon hızından genel olarak daha fazla etkilendiği ve en az ve en yüksek deformasyon hızları arasında ki uzama farkının DP780 malzemedede daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.9. DP600 şekil değiştirme hızı - toplam uzama grafiği



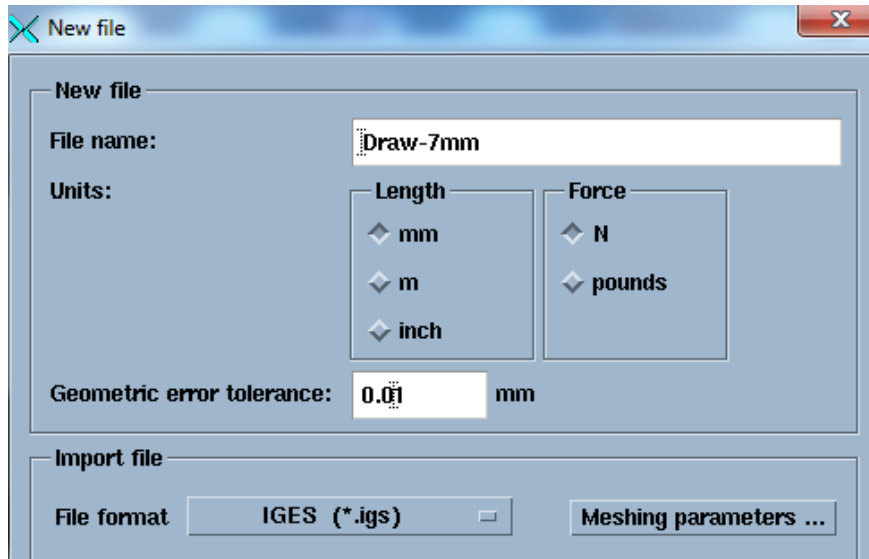
Şekil 5.10. DP780 şekil değiştirme hızı - toplam uzama grafiği

5.2. Analiz Çalışmaları

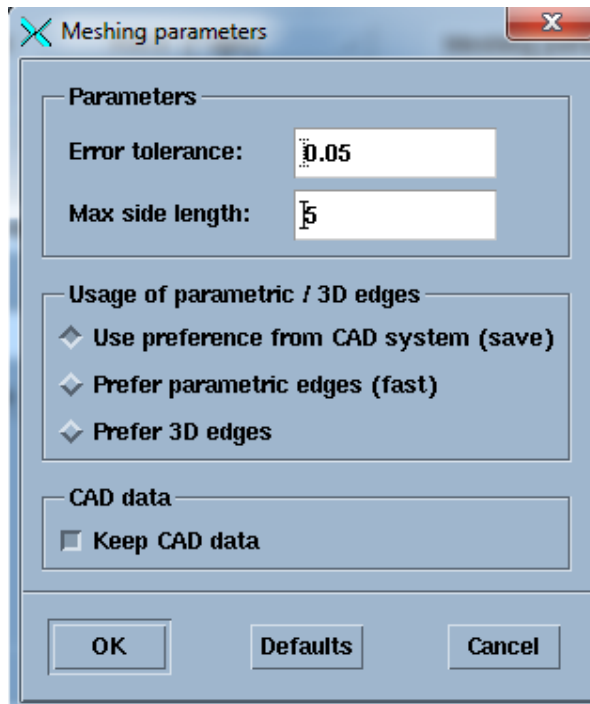
Yapılan çalışma kapsamında gerçekleştirilen çekme deneyler için sac malzeme üzerinde ki meydana gelen deformasyonları görmek ve deney sonuçları ile karşılaştırmak için sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak çalışan autoform sac metal şekillendirme benzetim programı yardımıyla analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Analiz çalışması için ilk önce, kalıp tasarımında oluşturulan modellerin Autoform ortamına aktarılması gerekmektedir. Şekillendirmeyi direk olarak etkileye dişi kalıp, baskı plakası ve zımba analiz çalışması için gerekli modellerdir. Bu nedenle, deneylerde kullandığımız kalıbın catia yazılımında modellenmiş olan verilerin “iges” uzantılı olarak kaydedilerek, autoform ortamında açılarak analiz çalışmalarına başlanmıştır. Analizler autoform R3 incremental modülünde yapılmıştır.

Daha önce, catia ortamında tasarlanan matematiksel modelin autoform ortamına aktarılma işlemine geçilmiştir. Öncelikle yeni dosya kısmından tasarlanan matematiksel model seçilmiş ve geometrik hata toleransı ve ağ yapısı parametreleri belirlenmiştir. Programın belirlenen hız parametrelerinde yapılacak daha doğru sonuçlar verebilmesi için geometrik hata toleransı ve mesh parametreleri düşük değerlerde olması tercih edilmiştir. Bu da hesaplama süresinin artmasına neden olmuş fakat daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

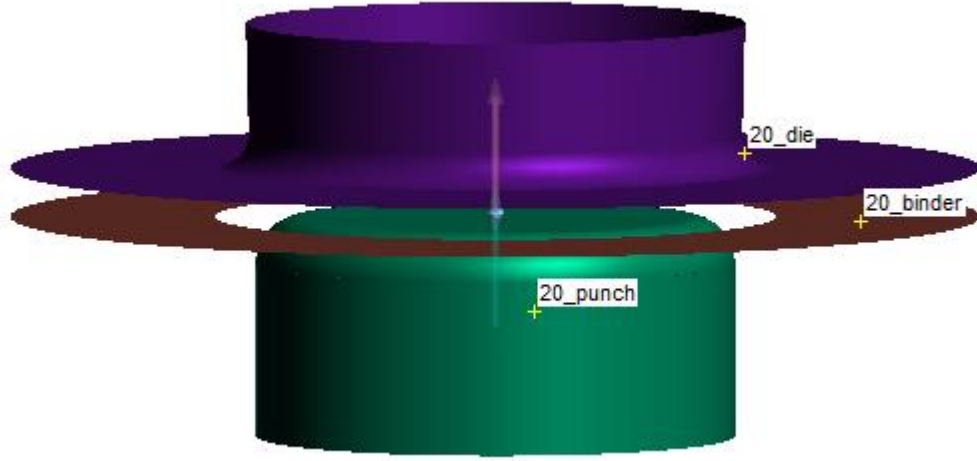


Resim 5.1. Birim değerlerinin belirlenmesi ve yeni dosya açılışı



Resim 5.2 Ağ örgü değerleri

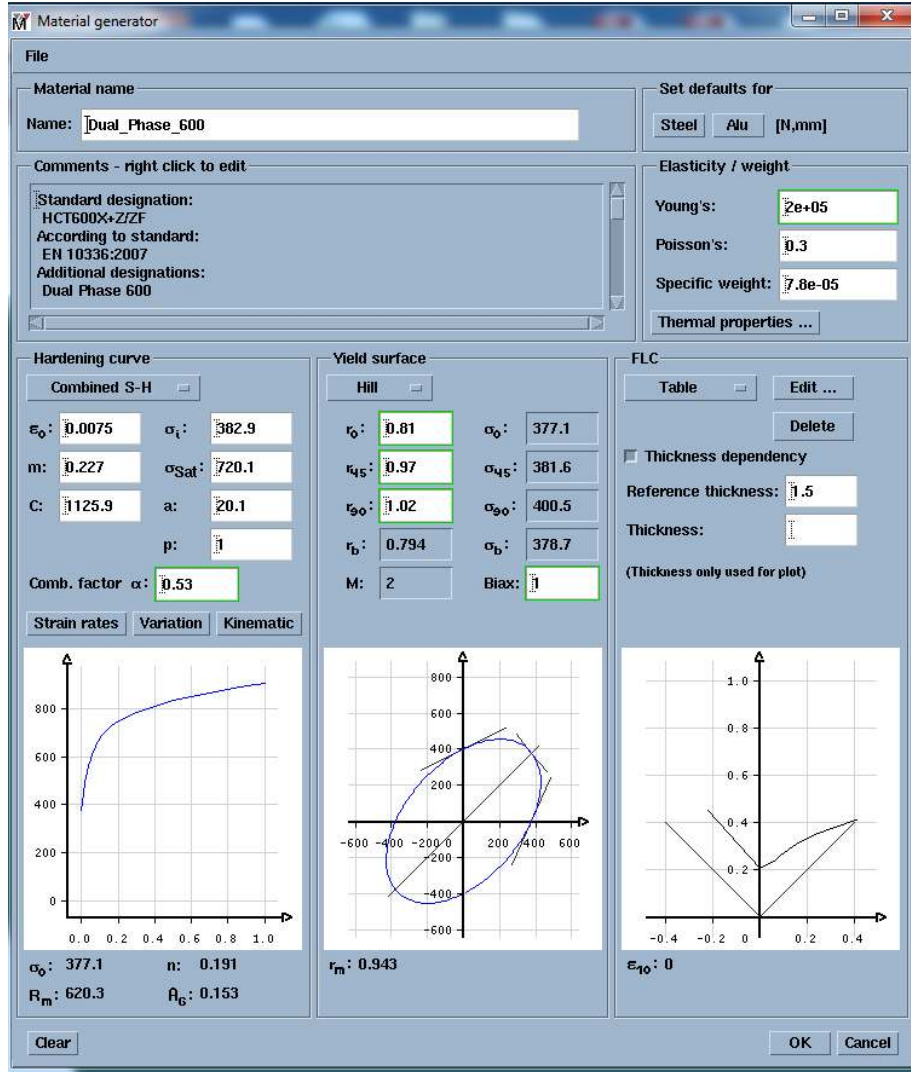
Birim türleri ve ağ yapısı değerleri girildikten sonra dosya çağırılarak autoform ortamına aktarılmıştır. Resim.5.3'te autoform ortamına aktarılan matematiksel model gösterilmektedir.



Resim 5.3. Matematiksel model

Autoform programının şekillendirme analizleri yapabilmesi için matematiksel model çağırıldıktan sonra öncelikle malzeme tanımlaması yapılmalıdır. Bunun için malzeme kütüphanesi kullanılarak DP600 ve DP780 malzeme verileri autoform ortamına aktarılmıştır.

Sac metal parçaların şekillendirilmesinde sonlu elemanlar yönteminde dayalı analiz programlarına şekil değiştirme hızının etkilerini incelemek için öncelikle istenilen hızın çekme testi sonucunda elde edilen gerilim – şekil değiştirme eğrilerini programa tanıtılması gerekmektedir. Bunun için farklı deformasyon hızlarında elde ettiğimiz eğriler tablo yöntemi kullanılarak Resim 5.4’da gösterilen malzeme tanıtma kısmından programa tanıtılmıştır. Öncelikle, test sonuçları excel ortamına aktarılmıştır. Daha sonra dat dosyayı elde edebilmek için excel de dostalar CSV formatında kaydedilmiştir. CSV olarak kaydedilen dosya TXT dosyası olarak açılabilir. Buradan farklı kaydet seçeneğinde dosya isminin yanına .dat uzantısı eklenerek data dosyası elde edilmiş ve bu dosyanın autoform programına aktarılmıştır. Ayrıca çekme testleri sonuçlarında elde edilen 0,45 ve 90 derece hadde yönlerindeki kesit daralması (r) değerleri ile malzeme tanımlama işlemi tamamlanmıştır.



Resim 5.4. Malzeme tanımlama ekranı

Bir sonraki adımda benzetim işlemine başlanabilmesi için benzetim tipi, kalıplama yöntemi ve sac kalınlığı belirlenmelidir. Burada incremental seçeneği şekillendirme sürecini incelenebilmesi açısından benzetim tipi olarak belirlenmiştir. Kalıplama yöntemi olarak tek etkili çekme seçeneği daha önce tasarlanan matematiksel modele göre seçilmiştir. Sac kalınlığı ise 1,5 mm girilerek işlem parametrelerinin tanıtılması adımına geçiş yapılmıştır. Ardından kalıp elemanlarının programa tanıtılması işlemine geçilmiştir. Bu seçenekte daha önceden oluşturulan matematiksel modelin dışı kalıp, zımba, baskı plakası olarak tanıtılması, çalışma yönleri ve hareket mesafeleri belirlenmiştir. Kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülük değerleri direk olarak şekillendirmeyi etkileyeceği için kalıp elemanları arasındaki sürtünme kat

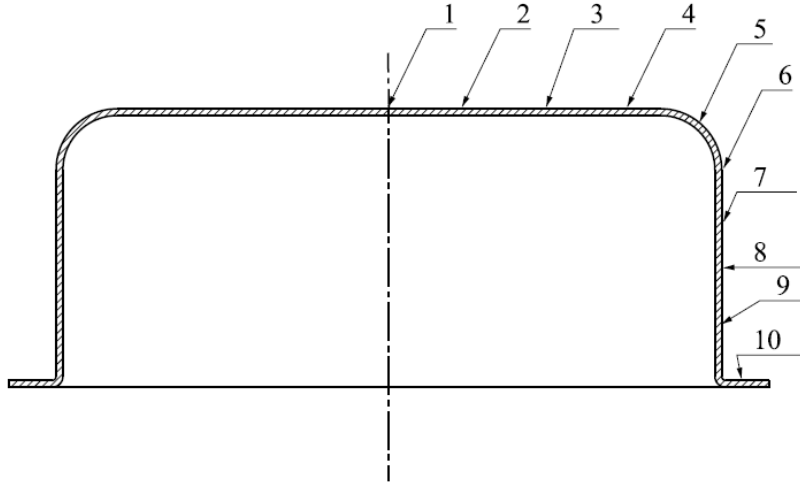
sayısının da programa girilmiştir. Derin çekme işleminde yağlama genel olarak ürün kalitesini arttırmaktadır. Bu nedenle derin çekme işleminde yağlama çok kullanılan bir etkidir. Ancak, yağlama, sac malzeme ile dişi kalıp arasında yapılmakta, zımbanın ise yağlanması istenmemektedir [44].

Bu sebepten dolayı dişi kalıp ve baskı plakası pürüzlülük değerleri zımba yüzey pürüzlülük değerine göre daha düşük değerde kabul edilmiştir. Baskı plakası kuvveti 5.1 nolu denkleme göre hesaplanarak 40000 N olarak girilmiştir.

$$P_b = \pi / 4 * (D_2 - d_2) * q \quad [29] \quad (5.1)$$

5.2.1. Şekillendirme analiz sonuçları

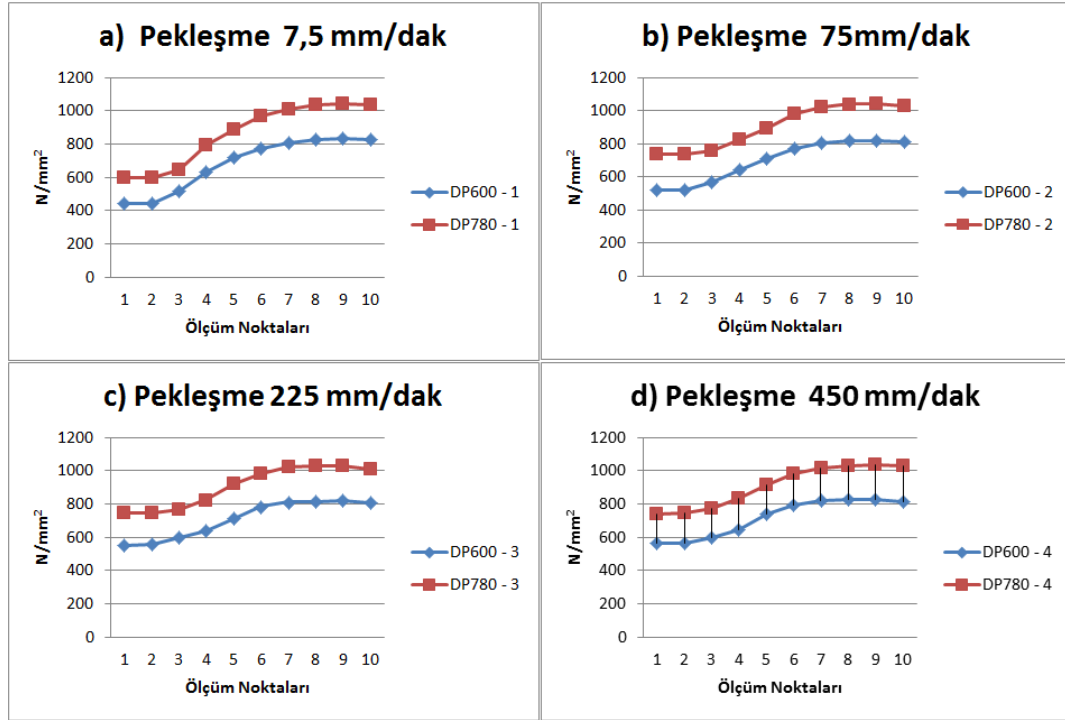
Gerçekleştirilen çalışmada 4 farklı şekillendirme hızında, DP600 ve DP780 sac malzemeler seçilerek bilgisayar ortamında belirlenen matematiksel model için derin çekme işlemi analizleri yapılmıştır. Elde edilen şekillendirme analizi sonuçları üzerin noktasal ölçümler yapılarak gerçek şekillendirme işlemlerinde malzemede meydana gelebilecek olası sonuçlar öngörölmeye çalışılmıştır. Öncelikle, gerçek üretimde ürün kalitesini etkileyecek olarak ürün kalitesini değerlendirmesinde göz önünde bulundurulan sac kalınlığı dağılımı, deformasyon bölgeleri, pekleşme ve esneme sonuçları incelenmiştir. Bu nedenle, şekillendirme analiz uygulanan matematiksel model üzerinden ölçüm noktaları belirlenmiştir. Ayrıca, farklı şekillendirme hızlarında iki malzeme için de şekillendirme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.11.'de ölçüm bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Ölçüm bölgeleri

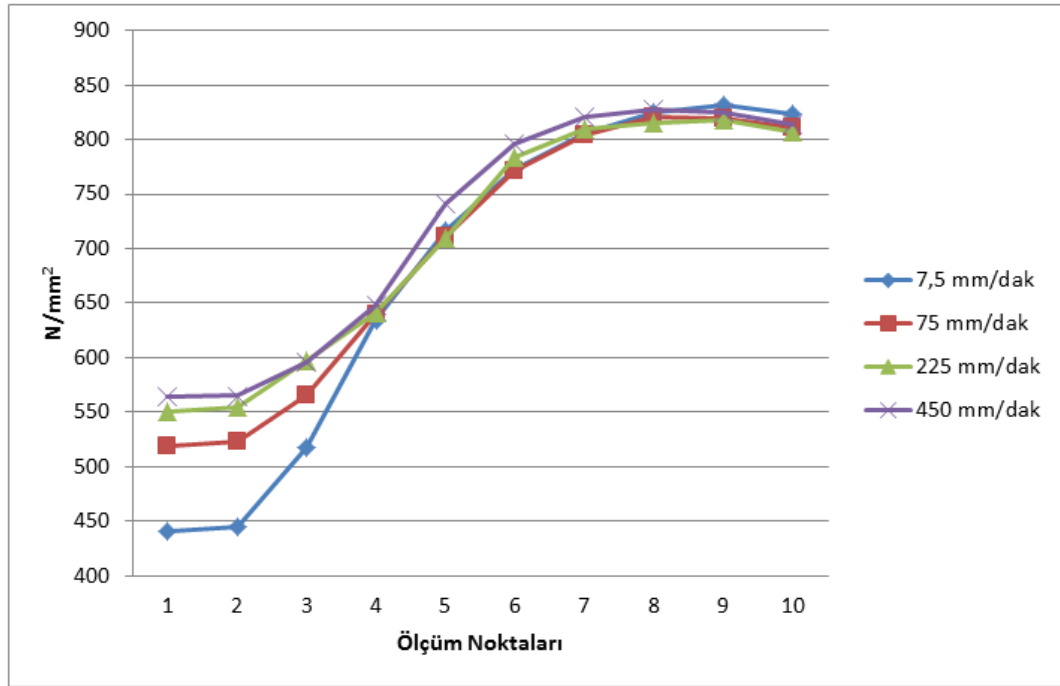
Pekleşme

Sac metal malzemeler Şekillendirme işlemlerinde temel prensip uygulanan kuvvetin etkisiyle sacda plastik şekil değiştirmenin oluşmaya başlamasıdır. Plastik şekil değişimine bağlı olarak malzemede mukavemet artışı olmakta buna bağlı olarak pekleşme gerilmesi meydana gelmektedir.

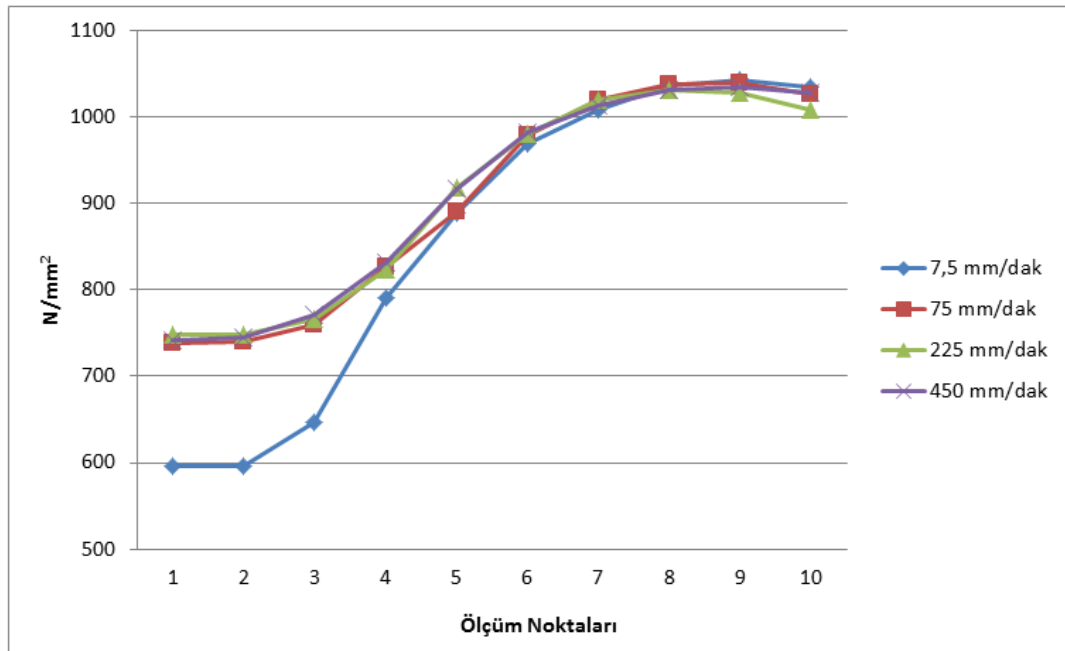


Şekil 5.12. Şekil değiştirme hızı - pekleşme gerilmesi grafikleri

Yapılan çalışmada, DP600 ve DP780 malzemelere farklı şekil değiştirme hızı değerlerinde pekleşme neticesinde şekil değişimi için gerekli gerilme değerleri ölçülerek şekil 5.11’de verilmiştir. Şekil 5.11.’de ki grafikler incelendiğinde malzeme mukavemetindeki artışın şekillendirme sırasında oluşan pekleşme gerilmesinin de arttırdığı belirlenmiştir. Şekil 5.12.’de verilen grafikler incelendiğinde, bütün hız değerlerinde artan şekil değiştirme hızına bağlı olarak pekleşme gerilmesinin de arttığı görülmektedir. Şekil 5.13’de verilen DP 780 malzemenin farklı hızlardaki deformasyonu sonucu elde edilen gerilmeler incelendiğinde ise, ilk hız değerinde ve form derinliği fazla olmayan bölgelerde gerilmelerin daha az olduğu görülmektedir. Şekil değiştirme hızının artan değerlerinde ise “n” deformasyon hızı üstelinin etkisinin çok fazla olmadığı, malzemelerdeki gerilmelerin çok yakın değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.13. DP600 şekil değiştirme hızı - pekleşme gerilmesi grafiği

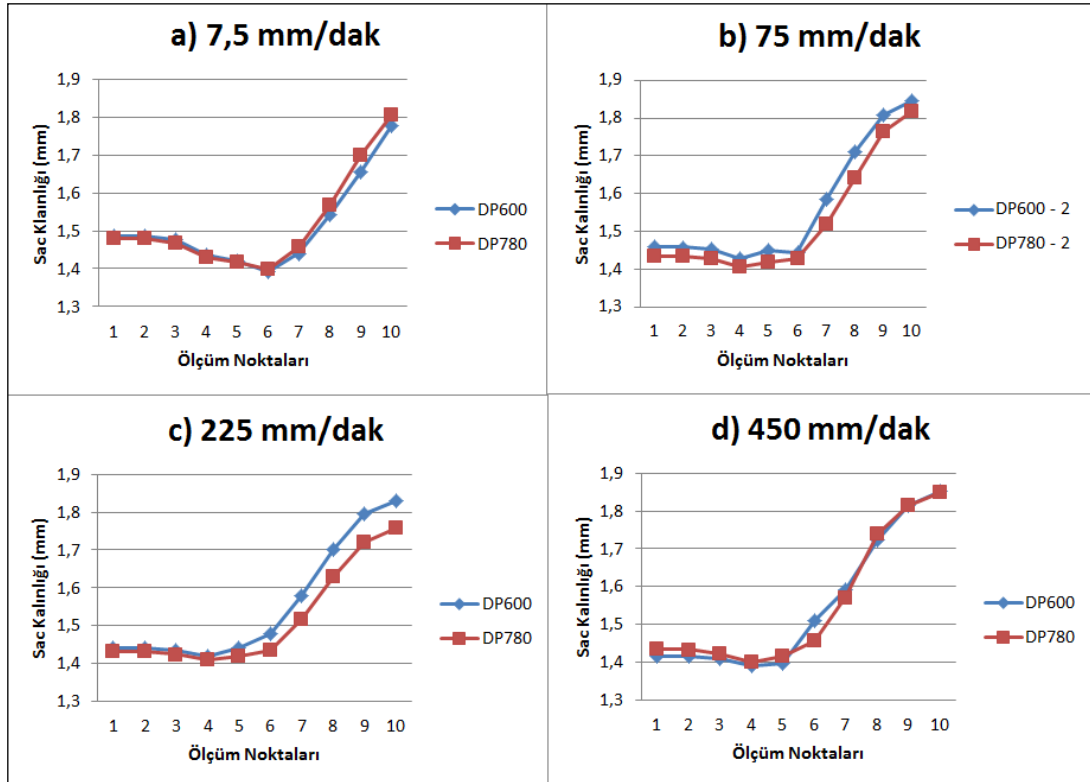


Şekil 5.14. DP780 şekil değiştirme - pekleşme gerilmesi grafiği

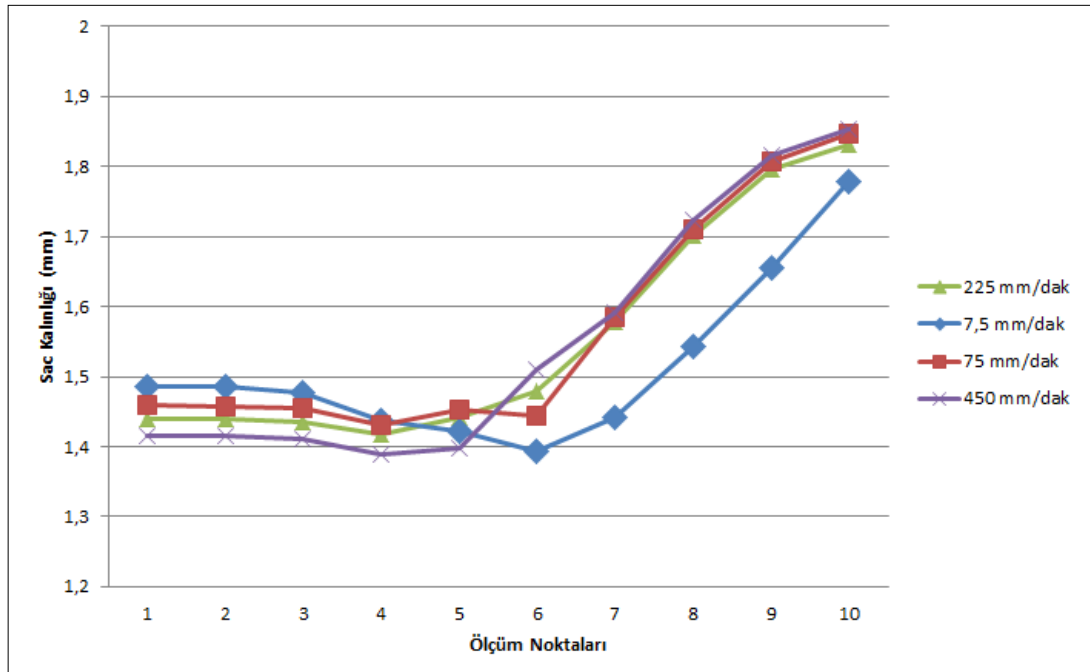
Kalınlık dağılımı

Sac parçaların şekillendirilmesinde deformasyon nedeniyle dislokasyonlar meydana gelmekte, malzemede uzama ve daralma bölgeleri oluşturarak sac kalınlığının Şekillendirilen forma göre değişimler meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenler sac parçaların Şekillendirilmesi esnasında en çok dikkat edilmesi gereken konulardan bir tanesi et kalınlıklarının değişimidir. Şekillendirme işleminin başarısı, et kalınlıklarının kontrolünün sağlanmasına bağlıdır. Et kalınlığının kontrolü, ürün kalitesini doğrudan etkilediği gibi, üretilen parçaların ölçü tamlığı açısından da son derece önemlidir. Analiz programlarında et kalınlığındaki %20 azalmanın, yırtılma riski oluşturduğu, et kalınlığındaki %30 azalmanın ise yırtılma bölgesi olarak gösterildiği anlaşılmaktadır.

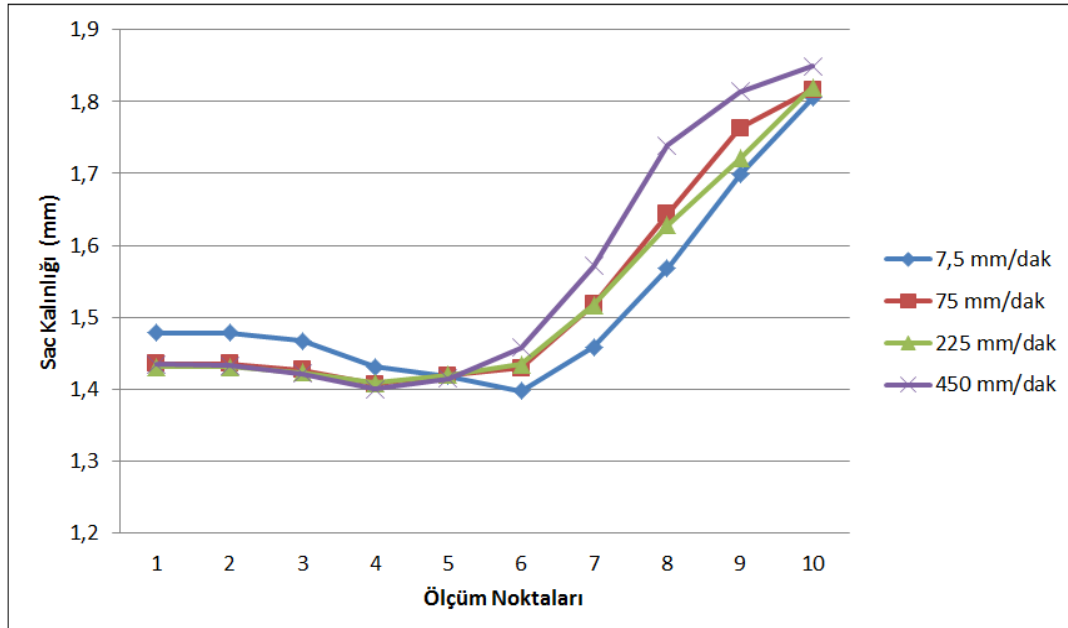
DP600 ve DP780 malzemelerin et kalınlıklarının ölçülmesi için kullanılan model Şekil 8’de verilmiştir. Farklı pres hızlarında şekil verilen ürünlerin eksene dik kesitleri alınarak 10 farklı noktadan et kalınlığı değişimleri gözlemlenmiştir. Analizler sonucu elde edilen grafikler incelendiğinde (Şekil 5.14.) şekillendirme hızının artması ile, sac malzemenin dip kısmında (1-4) , zımba kavis bölgesinde (4 - 6) ve çekilen kabın yan yüzeylerinde (7-8) et kalınlıklarının düştüğü görülmektedir. Et kalınlığındaki incelmelerin en fazla zımba kavisinin olduğu bölgede ve çekilen ürünün yan duvarlarında gerçekleştiği analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır. Ürün alt kavis ve ürünün etek kısımlarında ise, artan form verme hızlarına bağlı olarak et kalınlıklarında bir artış tespit edilmiştir. Deformasyon hızına bağlı olarak elde edilen et kalınlığı grafikleri, DP600 ve DP780 malzemelerin her ikisinde de Şekillendirme hızının artan değerlerinde ürünün alt kavis ve etek kısımlarında ise et kalınlığının artmasından dolayı kırışıklık riskinin arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.15. Şekillendirme hızı - sac kalınlığı değişimi grafikleri



Şekil 5.16. DP600 şekil değiştirme - sac kalınlığı değişim grafiği

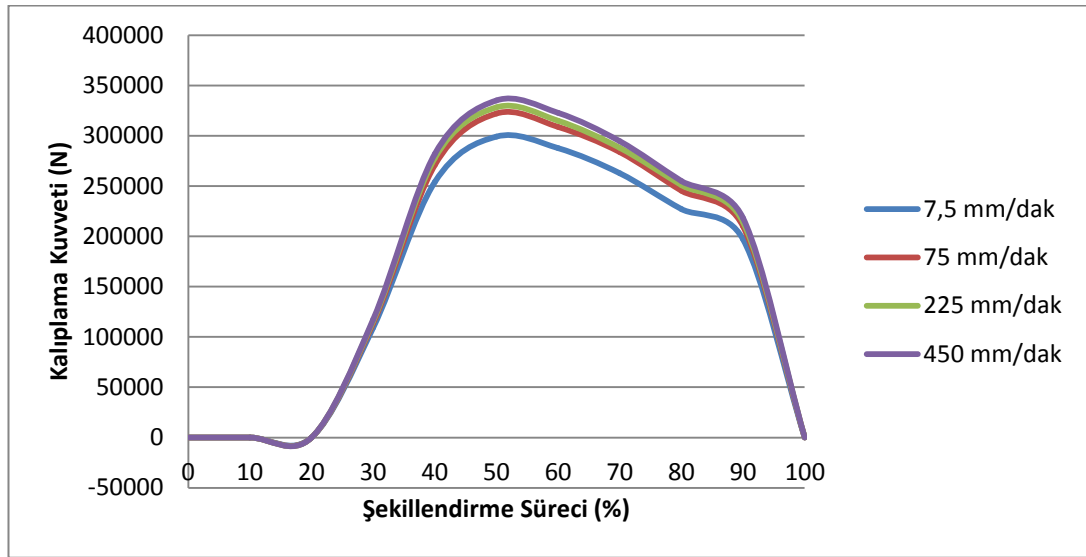


Şekil 5.17. DP780 Şekil değiştirme hızı- sac kalınlığı değişim grafiği

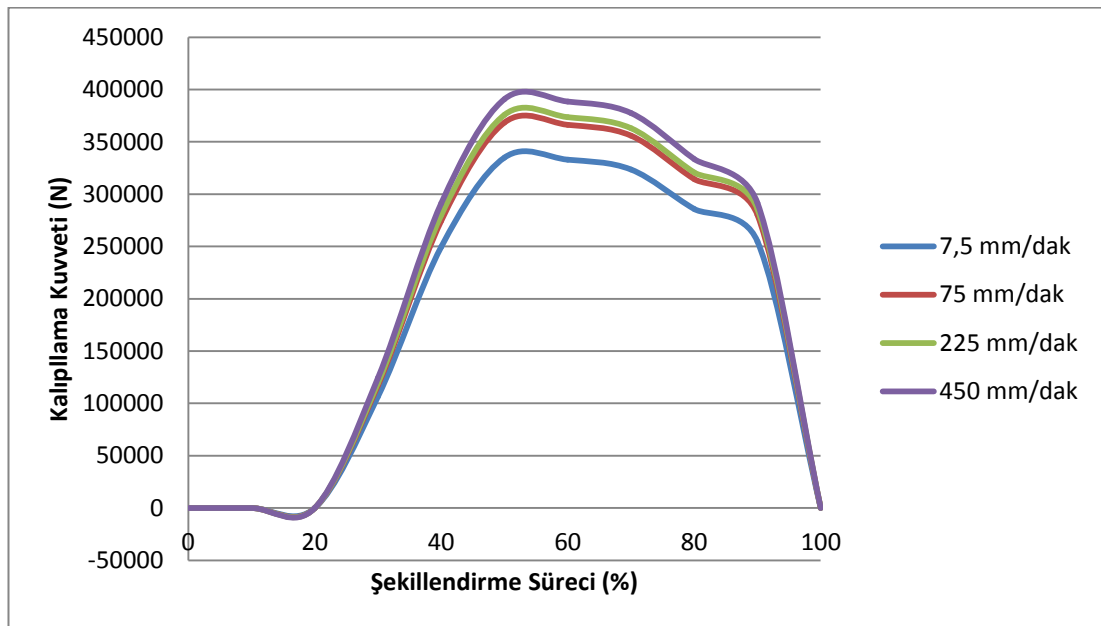
Şekillendirme kuvveti

Analiz işlemlerinden DP600 ve DP780 için elde edilen kuvvet grafikleri (Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.) incelendiğinde, deformasyon hızı artışına bağlı olarak şekillendirme kuvvetinin de arttığı tespit edilmiştir. DP780 malzemelerde hıza bağlı olarak en yüksek kalıplama kuvveti değeri 390860 N olurken DP600 malzemelerde kalıplama kuvvetinin daha düşük değerlerde gerçekleştiği görülmektedir.

Kuvvet grafiklerinin üst noktasında, kullanılan malzeme, malzeme kalınlığı ve Şekil alacak olan form yapısına bağlı olarak en yüksek şekillendirme kuvveti oluşmaktadır. Sac malzemenin kalıp içerisine akması ile baskı kuvveti ve form verilecek parça alanının azalmasından dolayı şekillendirme kuvvetinin zamana bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Form verme işleminin sonunda ise, küçük bir tepe olduğu fark edilmektedir. Bu küçük tepe noktasının, çekme derinliğine bağlı olarak oluşan ve çekme işleminin sonuna doğru zımba kavisinin ölçüsüne bağlı olarak sac malzemenin baskı plakasından kurtulması sonucu, baskı kuvvetinin ortadan kalkmasıyla oluşan malzemedeki düzensiz akışlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.18. DP600 şekillendirme süreci - kuvvet grafiği



Şekil 5.19. DP780 şekillendirme süreci - kuvvet grafiği

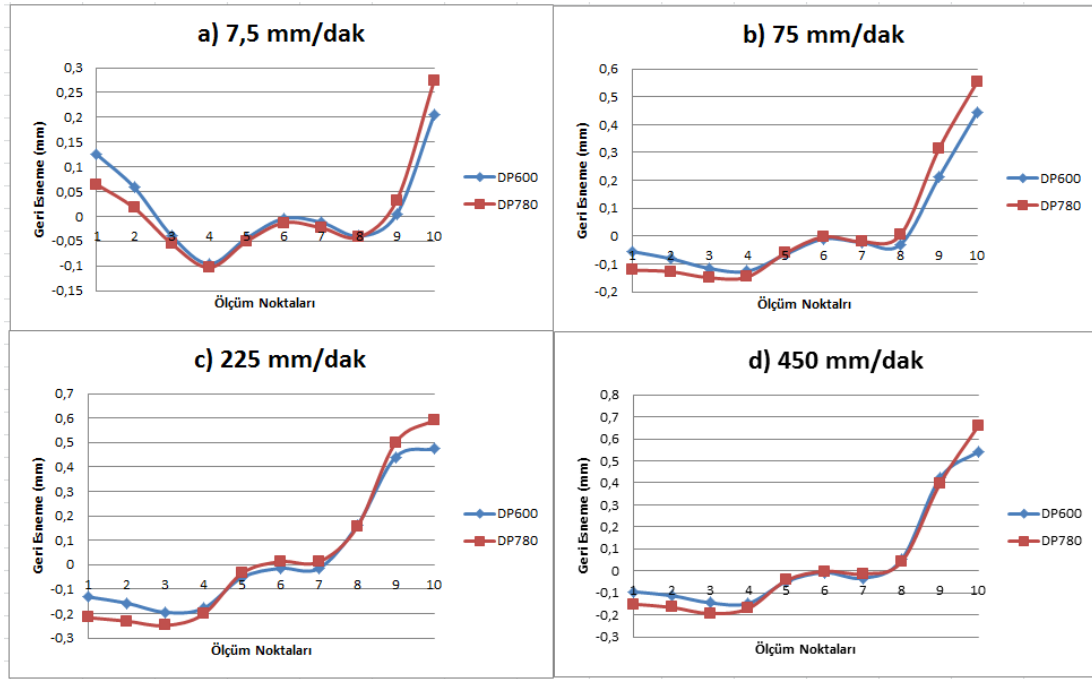
Geri esneme

Sac metal Şekillendirme işlemlerinin elde edilen ürün geometrisinin boyutsal toleranslar içinde olması istenmektedir. Ancak, sac kalıpcılığında incelendiğinde şekillendirme işlemlerinde karşılaşılan en büyük sorunun kalıptan çıkan

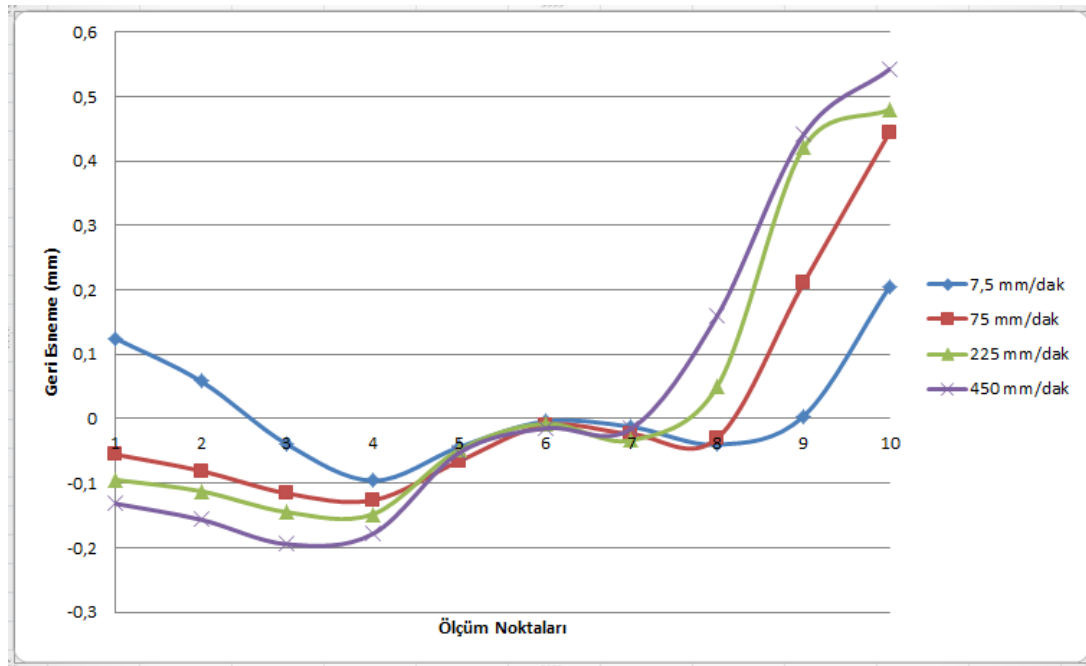
şekillendirilmiş parçada esnemeye bağlı boyutsal hatalardır. Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı benzetim programları yardımıyla şekillendirme sırasında oluşacak esneme miktarları bilgisayar ortamında tespit edilip gerekli telefi işlemleri yapılabilmektedir.

Yapılan çalışmada DP600 ve DP780 sac malzemelerin farklı hızlarda gerçekleştirilen derin çekme işleminde oluşan esneme miktarları benzetim programıyla tahmin edilmeye çalışılmıştır ve elde edilen değerler grafikler halinde Şekil 5.20.'de verilmiştir.

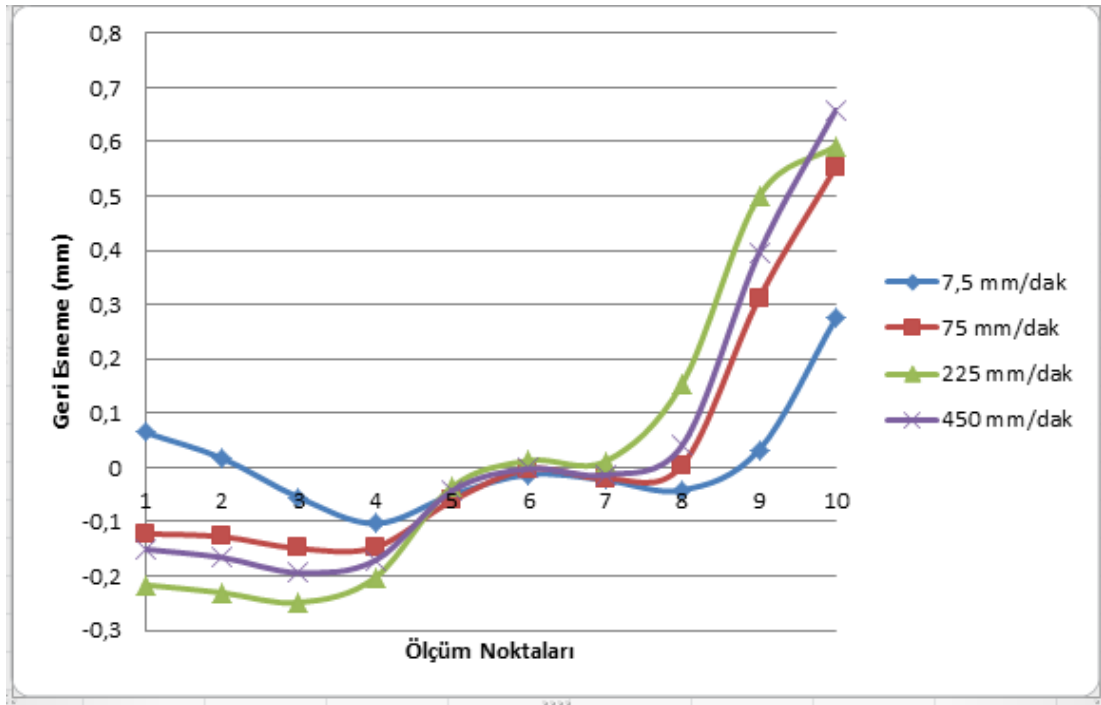
Analiz sonuçlarında elde edilen verilen incelendiğinde her iki malzeme içinde deformasyon hızı arttıkça esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, derin çekme işlemi uygulanan matematiksel model değerlendirildiğinde, sacın büküm noktasında geri esnemenin çok az miktarlarda olduğu, eteklerde ise şekillendirme işleminin sonunda sacın baskı plakasından kurtulması nedeniyle artı yönde yüksek miktarda esneme olduğu belirlenmiştir. Sacda, şekil değişimin az miktarda gerçekleştiği üst yüzey bölgesinde ise en düşük hız parametresi hariç diğer hızlarda eksi yönde esneme meydana geldiği görülmektedir. En düşük hız değeri olan 7,5 mm/dak 'da ise her iki malzemenin de üst yüzey bölgesinde artı esneme meydana gelerek farklı bir eğilim göstermiştir. Esnemenin plastik deformasyon sonucu malzemede oluşan kalıntı gerilmeler meydana geldiği düşünüldüğünde bunun nedenin ise malzemede hıza bağlı oluşan gerilme durumunun olduğu düşünülmektedir. Yüksek hız değerlerinde üst yüzey eksi yönde esneme meydana gelmesinin şekillendirilen geometrinin etek kısımlarında oluşan gerilmenin en düşük hıza göre çok daha yüksek değerde oluşmasından dolayı üst yüzeyde artı yönde esnemeye olanak vermediği düşünülmektedir.



Şekil 5.20. Şekil değiştirme hızı – geri esneme grafikleri



Şekil 5.21. DP600 şekil değiştirme hızı – geri esneme grafiği



Şekil 5.22. DP780 şekil değıştirme hızı - geri esneme grafiğı

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmada DP600 ve DP780 sac malzemenin silindirik çekme işleminde şekil değiştirme hızı ve malzemenin şekillendirmeye etkileri incelenmiştir.

1. Şekillendirme işleminde şekil değiştirme hızı artışın sacın deformasyona uğrayan bölgelerinde pekleşme gerilmesini çok fazla etkilemediği analiz sonuçlarından belirlenmiştir. Ancak deformasyon hızının en yavaş olduğu şekillendirme analizlerinde sacın az şekil değişimine uğrayan bölgelerinde pekleşme gerilmesinin yüksek deformasyon hızlarında yapılan şekillendirme işlemene göre düşük seviyede kaldığı görülmüştür. Ayrıca, oluşan pekleşme gerilmesi miktarının sacın mukavemeti ile doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.
2. Farklı hızlarında yapılan şekillendirme analizlerinde Şekillendirilen sac parçadaki kalınlık dağılımları incelendiğinde, deformasyon hızı arttıkça sacın etek kısımlarında kalınlaşma meydana geldiği, deformasyonun az olduğu üst bölgelerde ise genel olarak sacda hız artışıyla incelme meydana geldiği analizlerden belirlenmiştir. Ayrıca, DP780 sac malzemenin DP600 sac malzemeye göre daha mukavemetli oluşundan dolayı sac kalınlık dağılımları karşılaştırıldığında etek kısımlarında daha az kalınlaşma olduğu görülmüştür.
3. Analizlerden, deformasyon hızındaki artışın Şekillendirme kuvvetini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, DP780 sac malzemenin DP600 sac malzemeye göre daha mukavemetli bir malzeme oluşundan dolayı kalıplama kuvvetinin daha yüksek olduğu analiz çalışmalarında gözlemlenmiştir.
4. Deformasyon hızı artışının esneme miktarını arttırdığı belirlenmiştir. Ancak, silindirik çekme işleminde en fazla deformasyonun meydana geldiği büküm noktalarında geri esnemenin çok az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, DP780 sac malzemenin DP600 sac malzemeye göre şekillendirme işlemi sonrasında daha fazla esneme davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Tez çalışması değerlendirildiğinde başarı bir şekillendirme işlemi yapılabilmesi için diğer işlem değişkenleri ile birlikte sacın kalıp boşluğuna akış hızının en uygun seviyede tutulması gerektiği görülmüştür.

Bundan sonraki çalışmalara yönelik öneriler düşünüldüğünde baskı plakası kuvveti, kalıp elemanlarının yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık etkileri incelenerek çalışma genişletilebilir. Ayrıca, çalışma diğer yüksek mukavemetli saclarla birlikte son zamandalar kullanımı gittikçe yaygınlaşan hafif alüminyum magnezyum alaşımlarında Şekillendirilebilmesi içinde gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Chenot, J.L., Massoni,E., “Finite element modelling and control of new metal forming processes”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (11):1194-1200 (2006).
2. Firat,M., Kaftanoğlu,B., Eser,O., “Sheet metal forming analyses with an emphasis on the springback deformation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 196 (1-3): 135-148 (2008).
3. Tizca,M.,“ Numerical modelling and simulation in sheet metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 151 (1-3): 58-62 (2004) .
4. Gantar,G., Pelelnjak.T., Kuzman.K.,“ Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations”, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131: 54-59 (2002).
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. Naka,T., Torikai,G., Hino.G., Yoshida.F.,“ The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum–magnesium alloy sheet”, *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3): 648-653 (2001).
7. Naka,T., Yoshida,F.,“ Deep drawability of type 5083 aluminium–magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed”, *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90:19-23 (1999).
8. Canteli, J.A., Cantero J.L., Miguélez. M.H.,“ Theoretical analysis of air bending at high temperature”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (3): 1342-1350 (2009) .
9. Palaniswamy, H., Ngaile, Gracious., Altan, T.,“ Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology* ,146 (1): 52-60 (2004).
10. Michel ,J.F., Picart, P., “Modelling the constitutive behaviour of thin metal sheet using strain gradient theory”, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-169 (2002).
11. Kim S.B., Huh H., Bok H.H., Moon M.B., “Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology* , 236–287 (2010).

12. Karthing,V., Comstork Jr,R.J., Hersberger,D.R.,Wogoner,R.H., “Variability of sheet formability and formability testing”, *Journal of Materials Processing Technology* , 121: 350–362. (2002)
13. Seth,M., Vohnout,V.J., Daehn,G.S., “Formability of steel sheet in high velocity impact”, *Journal of Materials Processing Technology* , 168: 390–400 (2005).
14. Naka,T., Tarikai,G., Hino,R., Yoshida,F., “The effects of temperature and forming speed on formability limit diagram for type-5083 alüminyum-magnesium allow sheet”, *Journal of Materials Processing Technology*, 113: 648–653 (2001).
15. Leighton, D.H., Lee, D., “The effect of tooling temperature on the formability of sheet steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 45 (1-4): 577-582 (1994).
16. M.-J Wang., W Zhou., J. Ren., C.-W, Li., D.-Y,Huang., G.-Y.,Li., “Forming properties of 5182 aluminum alloy for automotive body sheet during warm deep drawing processes”, *CIRP Annals –Manufacturing Technology* , 39 (1): 257-261 (2004).
17. Pekel,A., “Sıcaklık ve çekme hızının AA 5754-O sacların Şekillendirilebilmesine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Şelçuk Üniversitesi FBE*, 30-88 (2008).
18. Öztürk,F., Alkan,M., “Sıcaklık ve deformasyon hızının Şekillendirmeye etkisinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi”, Tübitak Projesi, Proje No:106M058,(2009).
19. Wu H.Y., Zhou G.Z., Gao Z.W., Chiu C.H., “Mechanical properties and formability of an Mg-6%Li-1%Zn alloy thin sheet at elevated temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology* , 206: 419-427 (2008).
20. Narayanasamy, R., Narayanan, S., Sarma, S., “Forming limit diagram and crystallographic textures of annealed intersitial free steel sheets”, *Materials and Design*, 25 (1-3): 474-580,(2007).
21. Varol, R., Meriç, C., “Comparision of the formability of Al 99.0-O, AlFeSi-O, AlMnCu-O aluminium alloy sheets”, *Eurometal Working*, Milano, İtalya, (1994).
22. Narayanasamy, R., Narayanan, S., Parthasarathi, N.L., “Some analysis on stres and strain limit for necking and fracture during forming of HSLA steel sheets”, *Materials Science and Engineering*, A: 445-446, (2007).

23. Chino, Y., Iwasaki, H., Mabuchi, M., “Stretch formability of AZ31 alloy sheets at different testing temperatures”, *Materials Science and Engineering*, A 406: 90 (2007).
24. Schuller Metal Forming Handbook, Stuttgart, 1998
25. Training Aliminum Application Technologies (TALAT), Stuttgart, (2006)
26. Esener, C., “AA5754 malzemesinin derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi” (Yüksek Lisans Tezi), *Karabük Üniversitesi FBE*, Karabük, 13-65 (2006)
27. Sabri, E., Kayalı, C., Ensari, F., “Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri”, İstanbul, 10-16 (1983).
28. Tschatsch, H., “Metal Forming Practise”, Dresen, 278-280 (2006).
29. Aran, A., “Malzeme Bilgisi”, İstanbul, 28-34 (2008).
30. “Otomotiv Endüstrisi ve çelik: Yeni Nesil Çelikler”, *TUBİTAK – MAM*, Kocaeli, (2008).
31. Alıcı, İ., “Derin çekme saçlarının deformasyon davranışının incelenmesi”, (Yüksek Lisans Tezi), *Uludağ Üniversitesi FBE*, Bursa, (2001).
32. Aydın H., “Çelik Saçların Çift Faz Isıl işlemi Sonrası Mekanik Ve Mikro yapı Özelliklerinin Değişimi”, (Yüksek Lisans Tezi), *İstanbul Teknik Üniversitesi FBE*, İstanbul, 42-95 (2006).
33. Erdir, S., “Profilli derin çekmede hata analizi ve alınabilecek önlemler”, (Yüksek Lisans Tezi), *Yıldız Teknik Üniversitesi FBE*, İstanbul, 77-85 (1995).
34. Babanic, D., “Sheet Metal Forming Processes”, Cluj-Napoca, 244-248 (2010).
35. Gürün, H., “Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini”, (Doktora Tezi), *Gazi Üniversitesi FBE*, Ankara, (2008).
36. Çapan, L., “Metallere plastik şekil verme”, Çağlayan Kitapevi, İstanbul, (2010).
37. Zeytin H.K., Aydın H., Kubilay C.; “Otomotiv Endüstrisi Ve Çelik ileri Teknoloji Ürünü Yüksek Mukavemetli Çelikler”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası X. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, Bursa (2007).

38. “Advanced High Strenght Steel (AHSS) Application Guidelines” , World Auto Steel Association, Brüksel, 1-3 (2009).
39. Haidong Y., Yongjin G., Xinmin L., “Rate-dependent behavior and constitutive model of DP600 steel at strain rate from 10 s^{-1} to 103 s^{-1} ”, ***Journal of Materials and Design***, 30: 2501–2505 (2009).
40. Hoon, K., Daeyong, K., Heung, N., F.Barlat, Myoung-G., “Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling”, ***Materials Science&Engineering*** 559: 222–231 (2013).
41. Kenneth G., Micheal K.B., ***Engineering Material***, Properties and Selection (6th ed). Prentice Hall, 354-407 (1999).
42. Marciniak, Z., Duncan, J.L., “Mechanics of sheet metal forming”, Londra, 50 -242 (1992).
43. Yenice, M,M.,” Bükme ile Şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi”, ***Uludağ Üniversitesi FBE***, Bursa, (2006).
44. Karalı M., Silindirik kapların derin çekilmesinde farklı baskı plakası kuvvetlerinin ve uygulama yöntemlerinin kulaklaşmaya olan etkilerinin incelenmesi”, ***Trakya Univ J Sci***, 9: 41 - 46 (2008)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÇAVUŞOĞLU, Onur
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 1987 , Bursa
Medeni Hali : Bekar
e-mail : onur.cavusoglu@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü	2009