

T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DERİN ÇEKME
İŞLEMİNİN SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

Mehmet ERDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN

EKİM 2017
ÇORUM

Mehmet ERDOĞAN tarafından hazırlanan “Alüminyum Alaşımlarının Derin Çekme İşleminin Sonlu Eleman Yöntemi ile Analizi” adlı tez çalışması **02.10.2017** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZGEDİK

Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emin ERDİN

Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun **18.10.2017** tarih ve **2017/205** sayılı kararı ile Mehmet ERDOĞAN’ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.



Doç. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki tüm bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Mehmet ERDOĞAN,



ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DERİN ÇEKME İŞLEMİNİN SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Mehmet ERDOĞAN

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2017

ÖZET

Yüksek özgül dayanımları ve sağladıkları ağırlık kazançları sayesinde 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımı sacların sanayide kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada AA6082-T6 alüminyum alaşımı sac levha kullanılmıştır. Alüminyum alaşımı sacların plastik şekillendirilmesiyle pek çok farklı sektörde çok sayıda ürün elde edilmektedir. Ancak plastik şekillendirmenin lineer olmayan karakteristiği ile malzeme, ortam ve işlem parametrelerinden oluşan pek çok değişkene bağlı bir olay olması nedeniyle işlemin etkinliğinin önceden bilinmesi oldukça güçtür. Bununla birlikte, günümüzdeki rekabet ortamında ilk denemede, doğru parçayı en az hata ile kısa sürede üretmek önemlidir. İmalatta deneme-yanılma metodu; ıskarta, işçilik ve zaman kayıpları ile maliyet artışına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak sonlu eleman yazılımlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sonlu eleman yazılımları ile elde edilen sonuçların doğrulanması için gerçek imalat süreci etkin şekilde modellenerek tutarlılık karşılaştırması yapılmalıdır. Bu çalışmada derin çekme işleminde şekillendirilebilirliğin ölçüsü olan çekme oranı sınırının (LDR: Limiting Drawing Ratio) baskı levhası basıncı, çekme hızı ve yağlama koşullarıyla değişimi fiziksel deneylerle ve sonlu eleman analizi ile incelenmiştir. Derin çekme işlemi uygulanacak alüminyum saclar, LDR için en yüksek değeri yakalayabilmek amacıyla artan çaplarda kesildikten sonra; zimba, matris ve baskı plakasından oluşan silindirik derin çekme kalıpları kullanılarak hız ve basınç ayarlı hidrolik pres ile şekillendirilmiştir. Baskı levhası basıncı, çekme hızı ve yağlama şartlarına bağlı olarak yapılan fiziksel deneyler ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tutarlılık karşılaştırması yapılmıştır. Sonlu eleman analiz

prosedürünün tutarlılığı belirlendikten sonra fiziksel olarak modellenmesi maliyetli ve zaman alıcı olan ilerlemeye bağlı zımba hızı, çekme basıncı değişimlerinin ve sürtünme şartlarının şekillendirilebilirliğe etkileri sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sac şekillendirme, derin çekme, sonlu eleman yöntemi (SEY), alüminyum alaşımı, çekme oranı sınırı (LDR), anizotropi



ANALYSIS OF ALUMINUM ALLOYS DEEP DRAWING PROCESS VIA FINITE ELEMENT METHOD

Mehmet ERDOĞAN

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2017

ABSTRACT

Usage of 6xxx and 7xxx series aluminum alloys in industry becomes widespread day by day by means of high specific strength and weight acquisition performance. In this study, AA6082-T6 aluminum alloy sheet metal was used. A large number of products in plenty of sectors are obtained via plastic forming of aluminum alloy sheets. However, determination of process efficiency is quite hard since plastic forming has non linear characteristics and process depends on plenty of variables consisting of material, environment and process parameters. On the other hand, it is important to manufacture true part as soon as possible with minimal defect on the first try in competitive environment of modern-days. Trial and error method in manufacturing leads to cost increase due to waste product, workmanship and manufacturing lead time increase. Correspondingly, usage of finite element softwares becomes widespread each passing day. Real manufacturing process has to be modeled efficiently and consistency comparison has to be performed to validate the results obtained from finite element simulations. In this study, variation of limiting drawing ratio (LDR) which is the measure of formability in deep drawing process was investigated via physical experiments and finite element analyses depending on blankholder pressure, drawing speed and lubrication conditions. Aluminum sheets were prepared for deep drawing process in various increasing radii to obtain maximum value of LDR and deep drawn between cylindrical deep drawing molds (punch, die and blankholder) with a velocity and pressure adjustable hydraulic press. Consistency comparison was performed between the results obtained from physical experiments and finite element analyses performed depending on blankholder pressure, drawing speed and lubrication conditions. Effects of varying punch speed and drawing pressure depending on stroke

as well as lubrication conditions on formability were investigated via finite element analyses due to the costly and time-consuming nature of physically modeling of the process.

Keywords: Sheet forming, deep drawing, finite element method (FEM), aluminum alloy, limiting drawing ratio (LDR), anisotropy



TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, teşvik ve destekleri ile her türlü problemin üstesinden gelmemde bana yardımcı olan danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma sınavı jürimde bulunan değerli öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

NETFORM Mühendislik Makine Metal San. Tic. Ltd. Şti.' ne ve yetkilisi Mak. Müh. Mert AYGEN' e Simufact Forming sonlu eleman benzetim programı eğitimi ve eğitim sonrası destek ve yardımları için teşekkür ederim.

Deney ve analiz çalışmalarımda bana yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Özgür ÖZDİLLİ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini her zaman hissettiğim bütün aileme sonsuz teşekkürler ederim.

Bu tez çalışmasına, MUH19004.16.006 numaralı proje kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı, Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
RESİMLER DİZİNİ.....	xvi
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Derin Çekme İşlemi.....	3
2.2. Derin Çekmede İşlem Adımları	4
2.3. Çalışmadaki Derin Çekme Yöntemi.....	4
2.4. Derin Çekme Mekanığı	5
2.5. Derin Çekmenin Mühendislik Analizi	7
2.5.1. Derin çekme oranı (DR).....	7
2.5.2. Redüksiyon oranı (r).....	8
2.5.3. Kalınlık/çap oranı (t/D)	8
2.5.4. Derin çekme kuvveti	8
2.5.5. Sac tutma kuvveti	8
2.5.6. Dairesel çekme sacı çapının hesaplanması.....	9
2.6. Derin Çekme Kabiliyetini Etkileyen Faktörler	10
2.6.1. Malzeme özelliklerinin etkisi	11
2.6.2. Kalıp geometrisinin etkisi	15
2.6.3. İşlem koşullarının etkisi	18
2.7. Kaynak Araştırması	19
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. Deneysel Çalışma	21
3.1.1. Presin teknik özellikleri.....	21
3.1.2. Kalıp tasarımı	22
3.1.3. Çekilecek sacın ilk çapının hesaplanması	23

3.2. Çekme Sacının Teknik Özellikleri.....	24
3.2.1. Kimyasal bileşimi.....	25
3.2.2. Fiziksel ve mekanik özellikleri.....	26
3.2.3. Çekme deneyi.....	26
3.2.4. Tavlama işlemi.....	30
3.3. Derin Çekme Deneyleleri.....	32
3.3.1. Derin çekme hızının derin çekme kuvvetine etkileri.....	32
3.3.2. Baskı plakası kuvvetinin derin çekme işlemine etkileri.....	35
3.3.3. Sürtünme değerinin derin çekme işlemine etkileri.....	40
3.3.4. Çekme oranı (DR) değerinin sınırları.....	43
3.4. Derin Çekme İşleminin Sonlu Elaman Analizi.....	48
3.4.1. Simufact Forming programı.....	49
3.4.2. Teorik modelleme.....	50
3.4.3. Modelin tasarlanması.....	50
3.4.4. Analiz girdileri.....	51
3.4.5. Modele ağ örme.....	52
3.4.5. Analiz sonuç görüntüleme.....	53
3.5. Analiz Çalışmaları.....	53
3.5.1. Derin çekme hızının çekme kuvvetine etkisinin benzetim ile analizi..	53
3.5.2. Baskı plakası kuvvetinin derin çekme işlemine etkisinin benzetim ile analizi.....	55
3.5.3. Sürtünme katsayısının derin çekme işlemine etkisinin benzetim ile analizi.....	56
3.5.4. Derin çekme oranı sınırlarının benzetim ile analizi.....	57
4. DENEY VE BENZETİM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	59
4.1. Derin Çekme Hızının Derin Çekme Kuvvetine Etkisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	59
4.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Derin Çekme İşlemine Etkisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	61
4.3. Çekme Oranı Sınırlarının Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	64
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	66
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Dairesel çekme sacı çapının hesaplanması (Schuler, 1998)	10
Çizelge 3.1. Kalıp ölçüleri.....	23
Çizelge 3.2. Sacın ilk çapının hesaplanması.....	24
Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin diğer standartlardaki karşılığı.....	25
Çizelge 3.4. AA6082-T6 alaşımının % kimyasal bileşimi.....	25
Çizelge 3.5. AA6082-T6 fiziksel ve mekanik özellikleri.....	26
Çizelge 3.6. Çekme deneyi sonuçlarının tablo halinde gösterilmesi.....	28
Çizelge 3.7. Anizotropi hesaplamaları için gerekli veriler.....	29
Çizelge 3.8. Tavlama sonrası çekme deneyi sonuçları.....	31
Çizelge 3.9. Farklı baskı plakası basıncı ve hızlarda deney sonuçları.....	33
Çizelge 3.10. 135 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında deney sonuçları.....	36
Çizelge 3.11. 150 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında deney sonuçları.....	38
Çizelge 3.12. 135 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında deney sonuçları.....	41
Çizelge 3.13. 155 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında deney sonuçları.....	42
Çizelge 3.14. Yüksek DR elde etmek için yapılan deney sonuçları.....	44
Çizelge 3.15. Tavlama işleminden sonra yüksek DR elde etmek için yapılan deney sonuçları.....	46
Çizelge 3.16. Farklı derin çekme hızlarında yapılan analiz sonuçları.....	54
Çizelge 3.17. Farklı baskı plakası basınçlarında yapılan analiz sonuçları.....	55
Çizelge 3.18. Farklı sürtünme katsayılarında yapılan analiz sonuçları.....	57
Çizelge 3.19. Yüksek DR elde etmek için yapılan analiz sonuçları.....	58
Çizelge 4.1. Farklı derin çekme hızlarında deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Çizelge 4.2. Farklı baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	61

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.3. Yüksek DR elde etmek için yapılan deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	64



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Derin çekme işlemi (Erişir, 2013).....	3
Şekil 2.2. Derin çekmede işlem adımları (Gülmez, 2011).....	4
Şekil 2.3. Çekme kalıbındaki işlev bölgeleri.....	5
Şekil 2.4. Derin çekmenin mekaniği (Demiray, 2006).....	6
Şekil 2.5. Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler (Demiray, 2006).....	6
Şekil 2.6. Çekme işlemi esnasında çekme sacına etki eden kuvvetler (Güneş, 2002).....	7
Şekil 2.7. Gerilme-BŞD eğrisi.....	12
Şekil 2.8. Dikey anizotropi parametresi	13
Şekil 2.9. (a) Çekme kenarının yuvarlatılması (b) Çekme kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması (Çapan, 1990).....	16
Şekil 2.10. (a) İstampa kenarının yuvarlatılması (b) İstampa kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması (Çapan, 1990).....	17
Şekil 2.11. Çekme aralığı (Çapan, 1990).....	17
Şekil 3.1. Elde edilecek silindirik kap.....	23
Şekil 3.2. Çekme deneyinde elde edilen Gerilme-BŞD eğrisi.....	28
Şekil 3.3. Tavlama prosedürü.....	31
Şekil 3.4. Tavlama sonrası elde edilen Gerilme-BŞD eğrisi.....	31
Şekil 3.5. Baskı plakası basıncı 40 bar ve farklı hızlarda yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	34
Şekil 3.6. Baskı plakası basıncı 80 bar ve farklı hızlarda yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	34
Şekil 3.7. 135 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri.....	37
Şekil 3.8. 150 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri.....	39
Şekil 3.9. 150 mm çapındaki tavlama işlemi yapılmış malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri.....	39
Şekil 3.10. 150 mm çapındaki tavlama işlemi yapılmış ve yapılmamış malzemenin aynı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri.....	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. 135 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında kuvvet-strok grafikleri.....	42
Şekil 3.12. 155 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında kuvvet-strok grafikleri.....	43
Şekil 3.13. Yüksek DR elde etmek için yapılan deneylerin kuvvet-strok grafikleri..	45
Şekil 3.14. DR=2,13 oranı elde etmek için yapılan deneylerin kuvvet-strok grafikleri.....	47
Şekil 3.15. DR=2,20 ve 2,27 oranları elde etmek için yapılan deneylerin kuvvet-strok grafikleri.....	47
Şekil 3.16. Geometrik model, sonlu eleman modeli ve sonuçlar.....	48
Şekil 3.17. Eleman tipleri.....	49
Şekil 3.18. Sayısal benzetim girdi ve çıktıları.....	50
Şekil 3.19. Farklı derin çekme hızlarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	54
Şekil 3.20. Farklı baskı plakası basınçlarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	56
Şekil 3.21. Farklı sürtünme katsayılarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	57
Şekil 3.22. Yüksek DR elde etmek için yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	58
Şekil 4.1. 2,50 mm/s derin çekme hızında deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	60
Şekil 4.2. 0 ve 120 bar baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	62
Şekil 4.3. 40 ve 80 bar baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	63
Şekil 4.4. DR=2,07 elde etmek için yapılan deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	65
Şekil 4.5. DR=2,13 elde etmek için yapılan deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri.....	65

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kulak oluşumu.....	15
Resim 3.1. Derin çekme deney düzeneği.....	21
Resim 3.2. Hidrolik pres LCD ekranı.....	22
Resim 3.3. Kalıp, zımba ve baskı plakası görünümü.....	22
Resim 3.4. Standartlara uygun deney parçası hazırlanması.....	27
Resim 3.5. Deney parçasının çekme cihazına bağlanması.....	27
Resim 3.6. Deney numunelerinin koptuktan sonra bir araya getirilmeleri.....	29
Resim 3.7. Isıl işlem fırını.....	30
Resim 3.8. Farklı baskı plakası basıncı ve hızlarda çekilen parçalar.....	33
Resim 3.9. 135 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında çekilen deney parçaları.....	36
Resim 3.10. 150 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında çekilen deney parçaları.....	38
Resim 3.11. 135 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında çekilen deney parçaları.....	41
Resim 3.12. 155 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında çekilen deney parçaları.....	43
Resim 3.13. Yüksek DR elde etmek için çekilen deney parçaları.....	44
Resim 3.14. DR=2,13 oranı elde etmek için çekilen deney parçaları.....	46
Resim 3.15. DR=2,20 ve 2,27 oranları elde etmek için çekilen deney parçaları....	46
Resim 3.16. Analiz girdilerinin oluşturulması.....	51
Resim 3.17. Baskı plakası kuvvetinin tanımlanması.....	52
Resim 3.18. Sac malzemenin ağ örülmüş görüntüsü.....	52
Resim 3.19. Analiz sonuç görüntüleme ekranı.....	53
Resim 4.1. 2,50 mm/s derin çekme hızında deney ve analiz sonucu elde edilen silindirik derin çekme çekme ürünleri.....	60
Resim 4.2. 0 bar baskı plakası basıncında deney ve analiz sonucu elde edilen silindirik derin çekme ürünleri.....	62
Resim 4.3. 120 bar baskı plakası basıncında deney ve analiz sonucu elde edilen silindirik derin çekme ürünleri.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Zimba ve matris arasındaki boşluk
d	Zimba çapı
D	Sac daire çapı
f_{μ}	Yırtılma faktörü
F_N	Baskı Plakası kuvveti
F_P	Zimba kuvveti
F_T	Yırtma kuvveti
l	Deneyden sonra son boy
l_0	Deney parçasının ilk boyu
m	Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
n	Deformasyon sertleşmesi üssü
P_N	Baskı plakası basıncı
R	Dikey anizotropi katsayısı
\bar{R}	Ortalama dikey anizotropi katsayısı
r	Redüksiyon oranı
r_m	Matris kenar yarıçapı
r_{st}	Zimba kenar yarıçapı
t	Sac parçası kalınlığı
w	Deneyden sonra son en
w_0	Deney parçasının ilk eni
ΔR	Düzlemsel anizotropi katsayısı
ϵ_t	Boyuna gerçek birim şekil değiştirme
ϵ_w	Enine gerçek birim şekil değiştirme
σ_{ak}	Akma dayanımı
$\sigma_{\check{c}}$	Çekme dayanımı

Kısaltmalar

BŞD	Birim Şekil Değişirme
DR	Çekme Oranı (Drawing Ratio)
FEM	(Finite Element Method)
LDR	Çekme Oranı Sınırı (Limiting Drawing Ratio)
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi



1.GİRİŞ

Günümüzdeki rekabet ortamında ilk denemede, doğru parçayı en az hata ile kısa sürede üretmek önemlidir. İmalatta deneme yanılma metodu; ıskarta, işçilik ve zaman kayıpları ile maliyet artışına neden olmaktadır. Bu çalışmanın amacı; alüminyum alaşımlı levhaların derin çekilmesi işleminde ortaya çıkan hataların önlenmesi amacıyla, derin çekme işlemini etkileyen faktörleri, modeli ve malzeme özelliklerini de inceleyerek, sonlu eleman yazılımı kullanan bir program ile modellemek ve çözüm üretmektir. Bu çalışmada metal şekillendirme sektörü için özel olarak geliştirilmiş bir sayısal benzetim yazılımı olan “Simufact Forming” programı kullanılmıştır.

Derin çekme işlemi büyük miktarda plastik deformasyonun gerçekleştiği; anizotropi, parça geometrisi, malzemenin kimyasal bileşimi, ortam koşulları, pres hızı ve basıncı başta olmak üzere pek çok parametrenin etkin olduğu ve matematiksel analizin son derece zor olduğu bir imalat yöntemidir. Bu parametrelerin yanlış seçilmesine bağlı olarak üründe kulaklanma, yırtılma, kırışma gibi kusurlar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, işlem sonucunda elde edilecek ürünün istenen kalitede olması için analiz süreci iyi planlanmalı ve söz konusu hataların önlenmesi amacıyla derin çekme işlemini etkileyen malzeme, ortam ve işlem parametreleri incelenmelidir. Bu çalışmada alüminyum alaşımı sacların derin çekme işleminde baskı levhası basıncı, çekme hızı ve yağlama şartlarının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmada derin çekme işleminde şekillendirilebilirliğin ölçüsü olan LDR'nin baskı levhası basıncı, çekme hızı ve yağlama koşullarıyla değişimi fiziksel deneyler ve sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Derin çekme işlemi uygulanacak alüminyum saclar, LDR için en yüksek değeri yakalayabilmek amacıyla artan çaplarda kesildikten sonra; zımba, matris ve baskı plakasından oluşan silindirik derin çekme kalıpları kullanılarak hız ve basınç ayarlı hidrolik pres ile şekillendirilmiştir. Baskı levhası basıncı, çekme hızı ve yağlama şartlarına bağlı olarak yapılan fiziksel deneyler ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tutarlılık karşılaştırması yapılmıştır. Sonlu eleman analiz prosedürünün tutarlılığı belirlendikten sonra fiziksel olarak

modellenmesi maliyetli ve zaman alıcı olan stroka bağlı zımba hızı ve çekme basıncı değişimleri ile sürtünme şartlarının şekillendirilebilirliğe etkileri sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir.

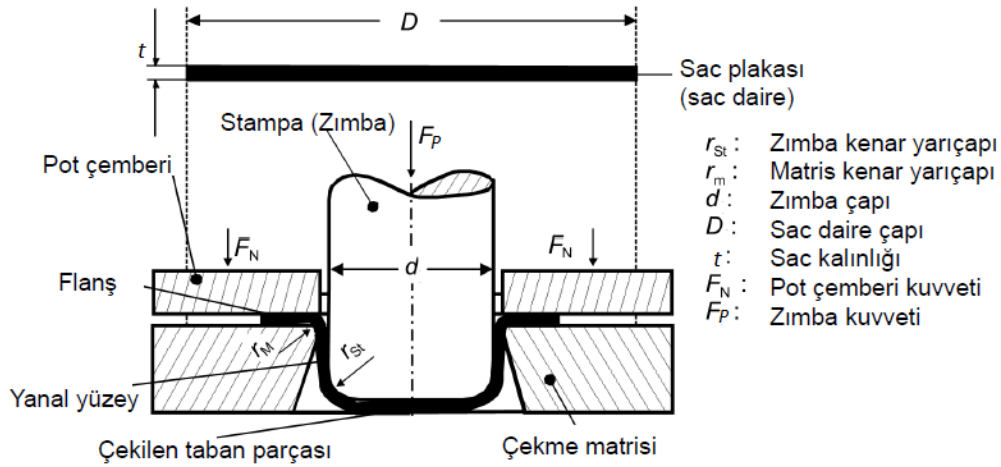
Bu çalışma sonucunda derin çekme işleminin sonlu eleman analizi için tutarlı bir sonlu eleman prosedürü oluşturulması ve bu prosedür ile çok sayıda analiz yapılarak alüminyum alaşımı sac levhalar için LDR'nin tek kademede 2 değerinin üzerine etkin bir şekilde çıkarılması için uygun parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Derin Çekme İşlemi

Derin çekme bir sac metal şekillendirme işlemi olup silindir, kare veya prizma kap şekillerin veya daha konkav parçaların üretilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.1’de gösterildiği üzere zımba ile sacın boşluğa doğru itilerek akmasının sağlanması işlemidir. Sac genellikle aşağıya doğru baskı plakası (pot çemberi) tarafından basılarak tutulur. Bu işlemle yaygın üretilen parçalar içecek kutuları, mermilikler, lavabolar, yemek tencereleri ve otomobil kaporta panelleridir (Groover, 2016).

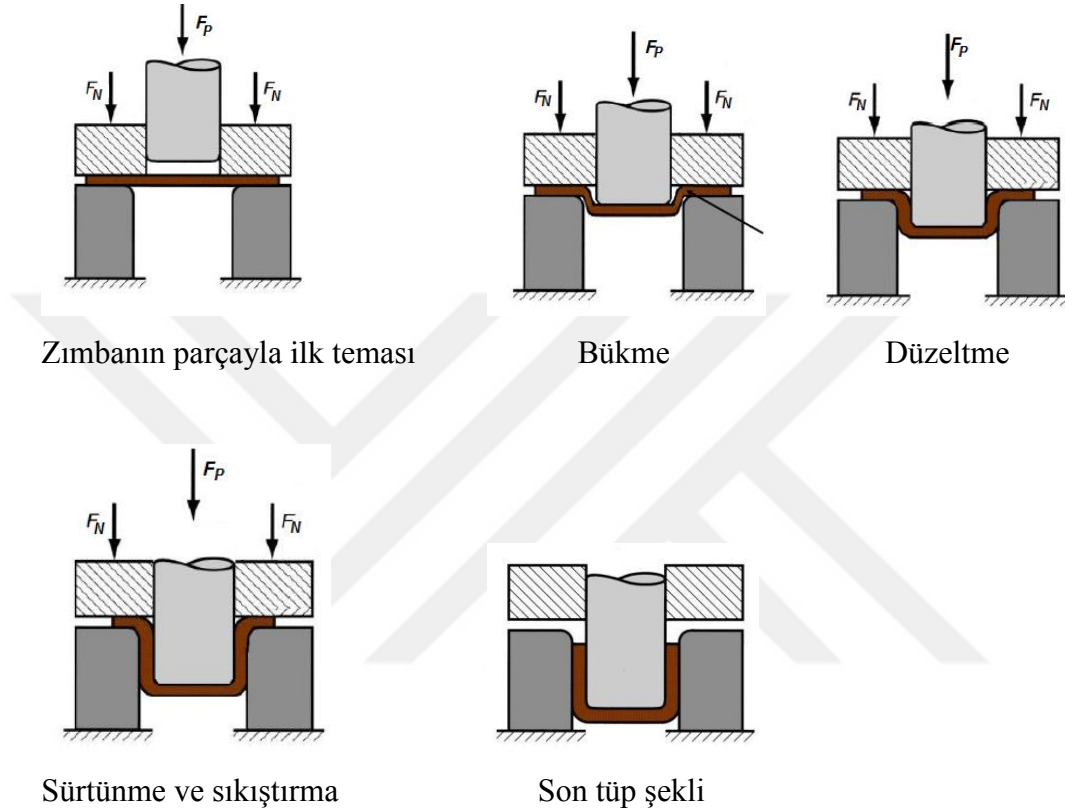


Şekil 2.1. Derin çekme işlemi (Erişir, 2013)

Tüm saclar kesme işlemi dışında şekillendirilirken bir yandan uzatılır, öte yandan sıkıştırılarak büzülme ile son şeklini alır. Sac şekillendirme ya mekanik ya da hidrolik preslerde yapılır. Sac şekillendirme zımba (ıstamp, erkek kalıp) ile matris (alt kalıp, dişi kalıp) arasında yapılır. Sacın kırışmasını önlemek için genellikle baskı plakası (pot çemberi, sac tutucu) kullanılır.

2.2. Derin Çekmede İşlem Adımları

Derin çekme işleminde, kesilen ilk sac parçasının kalıp üzerine yerleştirilmesinden son şeklini alıncaya kadar olan işlem adımları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Derin çekmede işlem adımları (Gülmez, 2011)

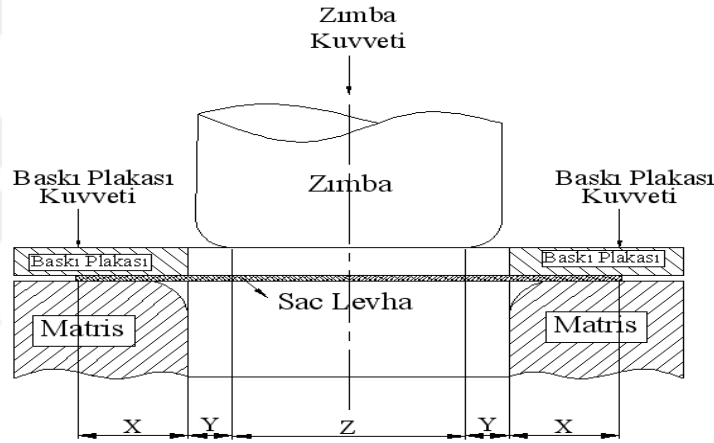
2.3. Çalışmadaki Derin Çekme Yöntemi

Bu çalışmadaki işlem, derin çekme işlemi için kullanılan hız ayarlı hidrolik pres, zımba, matris, baskı plakası ve baskı plakası basınç ayar sistemi ile yapılan derin çekme uygulamasıdır.

Derin çekme kalıpları tasarlanarak imal edilir ve pres sistemine zımba, matris ve baskı plakası monte edilerek derin çekme ünitesi hazırlanır. Hazırlanan sistemde sac levha değişik baskı plakası basınçlarında, değişik hızlarda ve farklı yağlama koşullarında derin çekme işlemi gerçekleştirilerek elde edilen ürünler üzerinde çalışmalar yapılır.

2.4. Derin Çekme Mekanikliği

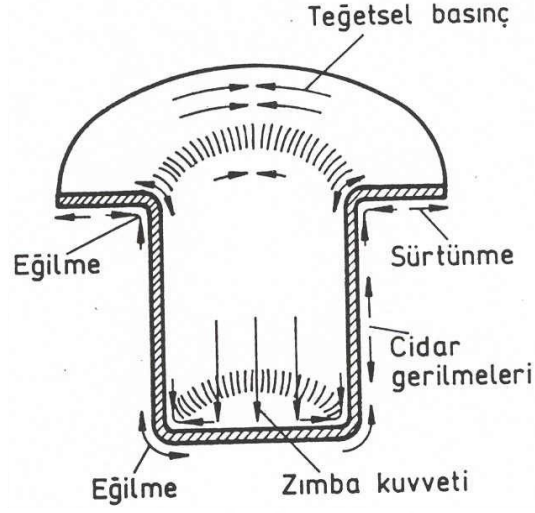
Derin çekme işleminde, matris üzerine yerleştirilen sac levha baskı plakası yardımı ile belirli bir basınçta sabitlenerek zımbanın sabit bir basınçta sac malzeme üzerine uyguladığı kuvvetle matris içerisine doğru ilerler ve sac malzemenin zımba etrafına homojen bir şekilde sarılması sağlanır. Böylece işlemin sonunda matris içerisine ilerleyen levhanın matris boşluğunda şekillendirilmesi sağlanır. Matris ve baskı plakası arasında kalan sac levhanın baskı plakasının verdiği kuvvet ile sac levhanın akmasına karşı sürtünme kuvveti oluşturularak şekillenmesi sağlanmaktadır. Çekme sacı X, Y, Z şeklinde belirtilen üç ayrı bölgeye ayrılabilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Çekme kalıbındaki işlev bölgeleri

X ile belirtilen bölge sac levhanın matrisle temas ettiği kısımdır. Y ile gösterilen bölgenin çekme başlangıcında matrisle ve zımbayla teması olmamaktadır. Z ile gösterilen dairesel bölge ise zımbanın alt yüzeyiyle temas eder. Çekme sırasında X ile ifade edilen bölge baskı plakası ile temas ettirilerek basıncın etkisi ile çekmeye karşı kuvvet oluşturulur, çekilme esnasında malzeme kalınlığı artar, Y bölgesinde sac malzeme uzama ve kayma eğilimi gösterdiğinden malzeme kalınlığında incelmeye uğruşur. Z bölgesinde şekil değişimi olmaz.

Derin çekme işleminde malzemenin baskı plakası ile temas halinde olduğu yüzeyde basma gerilmesi oluşur ve matrisin kavis kısmında malzeme şekillenirken incelmeye yani metal akışı meydana gelir (Şekil 2.4).



Şekil 2.6. Çekme işlemi esnasında çekme sacına etki eden kuvvetler (Güneş, 2002)

2.5. Derin Çekmenin Mühendislik Analizi

Yapılacak derin çekme işlem miktarlarındaki sınırların değerlendirilmesi çok önemlidir. Bu değerlendirme verilen bir durum için çoğunlukla hesaplanabilecek basit bir ölçmeyle yapılır. Ek olarak derin çekme kuvveti ve baskı plakası kuvveti de önemli işlem parametreleridir. Sonuçta, sac metal başlangıç boyu tespit edilir (Groover, 2016) .

2.5.1. Derin çekme oranı (DR)

Derin çekme oranı, başlangıçtaki parça çapının (D), zımba çapına (d) oranı olup üst limiti normal şartlarda 2'dir.

$$DR = D/d \leq 2,0 \quad (2.1)$$

Bu değer, malzemelerin derin çekilebilirliğinin bir ifadesidir. Malzemelerin çatlak başlangıcından hemen önce maksimum hangi çapa kadar çekilebildiğini açıklar (Gülmez, 2011). Bir derin çekme işleminde sınır değer zımba ve matris köşe

yarıçaplarına, sürtünme durumuna, derin çekme derinliğine ve sac metalin süneklik ve anizotropi gibi özelliklerine bağlıdır (Groover, 2016).

2.5.2. Redüksiyon oranı (r)

Silindirik şekiller için tanımı;

$$r = (D - d) / D \quad (2.2)$$

olup r değeri 0,50'den daha küçük olmalıdır (Gülmez, 2011).

2.5.3. Kalınlık/çap oranı (t/D)

Başlangıç sacının kalınlığının çapına oranı olup % 1'den büyük olmalıdır. (2.3)

t/D oranı azalırken kırışma eğilimi de artar (Groover, 2016).

2.5.4. Derin çekme kuvveti

Derin çekme için gerekli zımba kuvveti,

$$F_P = \pi D \sigma_c (D/d - 0,7) \quad (2.4)$$

şeklinde formüle edilir. Burada D, başlangıç çapı; σ_c , çekme dayanımı ve d ise zımba çapıdır. 0,7 sabiti sürtünmeyi dikkate alan düzeltme faktörüdür.

Eş. 2.4, işlemdeki maksimum kuvveti tahmin eder. Derin çekme kuvveti zımbanın aşağıya doğru hareketi boyunca değişir. Genellikle maksimum değerine zımbanın toplam hareketinin üçte birine gelince ulaşır (Groover, 2016).

2.5.5. Sac tutma kuvveti

Derin çekme işleminde kırışıklıkları önlemek için sac malzeme üzerine uygulanan kuvveti ifade eden sac tutucu kuvveti;

$$F_N = 0.015 \sigma_{ak} \pi / 4 [D^2 - (d + 2.2t + 2r_m)^2] \quad (2.5)$$

şeklinde formüle edilir. Burada σ_{ak} , akma dayanımı; t , parça kalınlığı ve r_m ise matris radyüsüdür. Sac tutucu kuvveti genellikle derin çekme kuvvetinin üçte birine eşittir (Groover, 2016).

2.5.6. Dairesel çekme sacı çapının hesaplanması

Derin çekme sırasında sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse, derin çekilerek elde edilen kabın yüzeyi (S) ile çekme sacının yüzeyi (S_1) eşit olmalıdır. Dolayısıyla, çekme sacının çapı D ile gösterilirse;

$$S_1 = \frac{\pi}{4} D^2 = S \text{ bağıntısından } D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \text{ bulunur.}$$

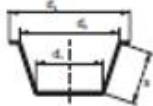
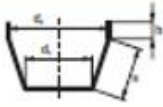
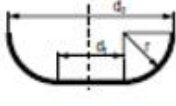
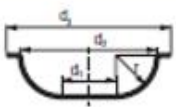
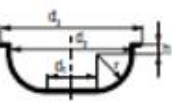
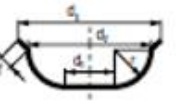
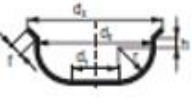
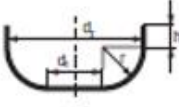
Derin çekme ile elde edilecek kap elemanlara ayrılarak bu elemanların yüzeylerinin toplamı $\sum S$ ile gösterilirse, çekme sacı çapının

$$D = \sqrt{\sum \frac{4S}{\pi}} \quad (2.6)$$

şeklinde hesaplanması en uygun yoldur (Çapan, 1990).

Çeşitli dairesel kap şekilleri için D değerleri hesaplamakta kullanılan formüller Çizelge 2.1'de verilmiştir (Schuler, 1998).

Çizelge 2.1. Dairesel çekme sacı çapının hesaplanması (Schuler, 1998)

Çekilecek Kap Şekli	Sac Çapı (D)
20 	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2} \cdot *$
21 	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot [s \cdot (d_1 + d_2) + 2 \cdot d_2 \cdot h]} \cdot *$
22 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2}$ or $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
23 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + d_3^2 - d_2^2}$ or $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
24 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + d_3^2 - d_2^2}$ or $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h) - 0.56 \cdot r^2}$
25 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$ or $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3) - 0.56 \cdot r^2}$
26 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$ or $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h + 0.5 \cdot f) + 2 \cdot d_3 \cdot f - 0.56 \cdot r^2}$
27 	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot (1.57 \cdot r \cdot d_2 + 2 \cdot r^2 + d_2 \cdot h)}$ or $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h) - 0.56 \cdot r^2}$

2.6. Derin Çekme Kabiliyetini Etkileyen Faktörler

Derin çekmeyi etkileyen faktörler üç grupta ele alınabilir. Bunlar; çekme işleminde kullanılan malzemenin özellikleri, kalıp geometrisi ve işlem koşullarıdır. Bu üç grup aslında birbiri ile iç içedir (Demirci, 2002).

2.6.1. Malzeme özelliklerinin etkisi

Malzemenin kalın olması çekme oranı sınırını arttırır. Çünkü daha fazla çekme derinliği ve daha fazla kalınlık incelmeye imkân verir. Malzemenin tane yapısının ince olması, tek fazlı olması ve metalik olmayan kalıntılardan arındırılmış olması derin çekmeye olumlu etki yapar.

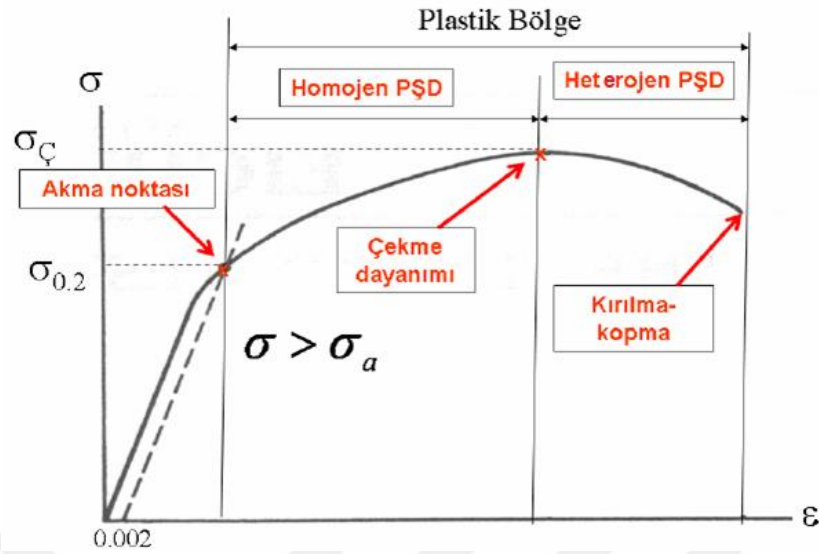
Malzemenin sertliği veya akma gerilmesi derin çekme kabiliyeti açısından ölçü kabul edilmez. Çünkü alüminyum düşük karbonlu çeliğe göre daha yumuşak olmasına rağmen derin çekme kabiliyeti daha azdır (Demirci, 2002).

Deformasyon sertleşmesi üssü (n) ve deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) değerlerinin yüksek olması derin çekme işlemini olumlu etkiler fakat etkinlikleri görece düşüktür (Demirci, 2002).

Derin çekmeyi etkileyen diğer bir önemli faktörde R , dikey anizotropi katsayısıdır. Bu katsayı malzemenin yapısına ve kristalografik yönlenmesine bağlıdır. Uygun kristalografik yönlenme, haddeleme koşulları ve yumuşatma tava rejiminin kontrollü yapılması ile sağlanır (Demirci, 2002).

Mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın deney çekme deneyidir. Çekme deneyi ile mukavemet (akma ve çekme mukavemeti) ve sünekliğin (% uzama ve % kesit daralması) dışında, deformasyon sertleşmesi üssü (n), deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) ve anizotropi katsayısı (R) gibi parametreler de belirlenebilmektedir (Bakkaloğlu, 2014).

Akma sınırı çekme testinde elastik deformasyonun tamamlandığı ve plastik deformasyonun başladığı noktadır. Belirli bir üst akma noktası büyük miktarda serbest hareketli dislokasyonlara sahip olmayan dinlendirilmiş çelik gibi malzemelerde görülür. Plastik deformasyonun gerçekleşmesi için sac parçanın bütün bölgelerinde bu noktanın aşılması gerekir (Akıllı, 2010). Tavlanmış alüminyumda akma düzgün olarak meydana gelmez. % 0.1 veya % 0,2'lik bir gerilme noktasında eğriye çizilen paralelin eğriyi kestiği nokta akma dayanımı olarak alınır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Gerilme BŞD eğrisi

Çekme deneyi sonucunda elde edilen çekme dayanımı, akma sınırı, yüzde kopma uzaması gibi değerler şekillendirme işleminde levhanın davranışını tanımlamada yeterli değildir. Elastik ve plastik uzama değerleri her ne kadar malzemenin şekillendirilebilirliği hakkında bilgi verseler de, tek eksenli çekme sonucunda elde edilen bu değerlerin çok eksenli gerilme halinin etkin olduğu bir derin çekme işlemi için yeterli olmayacakları açıktır. Bu nedenle sacların şekillendirilebilirliğinin incelenmesi için özel deneyler yapılır (Çapan ve Demir, 1998).

Eriksen çökertme değeri, belirli çapta küresel uçlu bir zımba yardımı ile deney numunesinin çökertilen kısmının yırtılması anındaki derinliğidir. Eriksen deney sonuçları, malzemeleri standardize etmek için kullanılmayıp daha ziyade her malzemenin kendi standardındaki değerlerle mukayese imkanı veren değerler olarak incelenir. Eriksen çökertme deneyi bilhassa preste şekil verme, sıvama, derin çekme gibi imalat işlemlerinde kullanılan sac ve şeritlerde arzu edilen bir deneydir (Ertan, 2007).

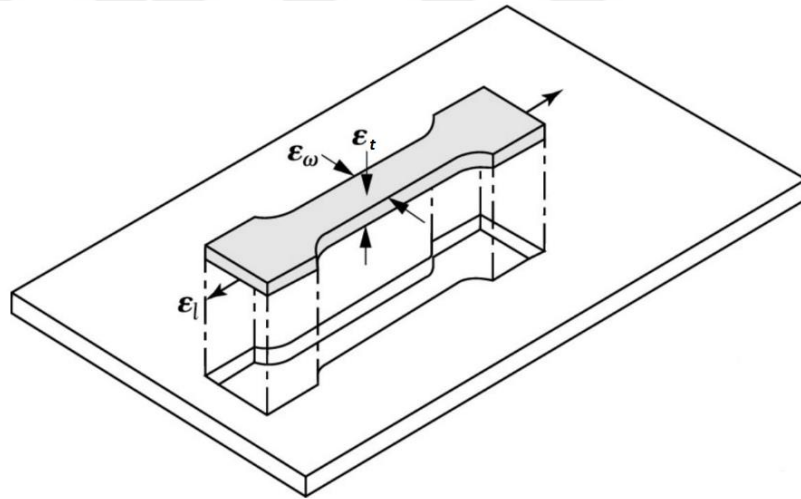
Özellikle karmaşık şekilli sac parçalar için şekillendirmenin analitik olarak incelenmesi güç olduğundan malzemenin üretim koşullarındaki davranışını belirlemek amacıyla, şekillendirme sınır diyagramlarından (FLD: Forming Limit Diagram) faydalanılır. Bir şekillendirme sınır diyagramının elde edilmesi için önce

şekillendirilecek sac levha yüzeyine kimyasal dağlama veya fotoğraf baskısı gibi tekniklerle dairelerden oluşan bir ağ çizilir. Daha sonra yağlama yapılmadan yırtılma görülene kadar sac şekillendirilerek incelve (boyun verme) ve yırtılma oluşan bölgelerde dairelerin şekil değişimi incelenir (Çapan, 1990).

Anizotropi değeri de malzemenin şekil alabilme yeteneğinin tahmininde kullanılabilir. Çekme deneyinde enine doğrultuda gerçek şekil değiştirme (ϵ_w) ve kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme (ϵ_t) kullanılarak (Şekil 2.8),

$$R = \epsilon_w / \epsilon_t \quad (2.7)$$

bağıntısı ile hesaplanan dikey anizotropi katsayısı ile anizotropi değeri ifade edilir.



Şekil 2.8. Dikey anizotropi parametresi

Çekme deneyinden önce ve sonra deney parçasının eni w_0 ve w , kalınlığı ise t_0 ve t ile gösterilirse,

$$\epsilon_w = \ln (w/w_0), \quad (2.8)$$

$$\epsilon_t = \ln (t/t_0) \text{ olduğundan} \quad (2.9)$$

$$R = \epsilon_w / \epsilon_t = \ln(w/w_0) / \ln(t/t_0) \quad (2.10)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Pozitif bir sayı olan dikey anizotropi parametresinin fiziksel anlamı, $R > 1$ olduğu takdirde, malzemenin sac düzlemindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu şeklindedir. Aksi halde ($R < 1$), izotrop bir malzemede ise $R = 1$ 'dir. Anizotropi parametresinin deneysel olarak saptanmasında, küçük olmaları nedeniyle eşdeğerlerinin ölçülmesinde hata yapılabileceği için R 'nin yukarıdaki ifadesi, hacim sabitliğinden

$$t/t_0 = w_0 l_0 / w l \quad (2.11)$$

alınarak

$$R = \ln(w/w_0) / \ln(w_0 l_0 / w l) \quad (2.12)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Burada l_0 ve l , deney parçasının sırasıyla çekme deneyinden önceki ve sonraki boyudur. Böylece çekme deney parçasının kalınlığı yerine eni ve uzunluğu ölçülerek R 'nin daha sağlıklı olarak saptanması sağlanmış olur. Bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleriyle yapılan deneylerde değişik R değerleri bulunabilir. Böyle bir sacda düzlemsel anizotropi olduğu söylenir. Düzlemsel anizotrop bir sacda dikey anizotropi parametresi için bir ortalama değer tarif edilir. Ortalama dikey anizotropi parametresi

$$\bar{R} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90}) / 4 \quad (2.13)$$

eşitliği ile hesaplanır.

$\bar{R} = 1$ ise malzeme izotropdur. $\bar{R} \neq 1$ ise ve aynı zamanda bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleriyle yapılan deneylerde elde edilen R değerleri farklılık göstermiyorsa malzemede dikey anizotropi ve düzlemsel izotropi bulunduğu söylenir.

$\bar{R} \neq 1$ ise ve aynı zamanda değeri sac düzleminde doğrultuya bağlı olarak değişiyorsa malzemede dikey ve düzlemsel anizotropi vardır.

Düzlemsel anizotropi derin çekilmiş kaplarda kulak oluşumuna yol açar (Resim 2.1). Düzlemsel anizotropi katsayısı;

$$\Delta R = (R_0 + R_{90} - 2 R_{45}) / 2 \quad (2.14)$$

eşitliğiyle ifade edilir (Çapan, 1990).

Düzlemsel anizotropiye sahip parçalar haddeleme yönünde, ona dik yönde veya bu iki yön arasındaki herhangi bir açıya sahip yönde farklı plastik şekil değiştirme özelliği gösterirler. R_0 , R_{45} , R_{90} farklı düzlemsel anizotropi değerleri olup, bu malzeme ile elde edilen kabın yüksekliğinde dalgalanma olur. Bu dalgalanmada yüksek kalan kısımlara “kulak” adı verilir (Resim 2.1). $\Delta R=0$ iken kulaklanma olayı görülmez, $\Delta R<0$ ise 45° ’lik yönlerde, $\Delta R>0$ ise 0° ve 90° ’lik yönlerde kulak oluşumu görülür (Ertan, 2007).

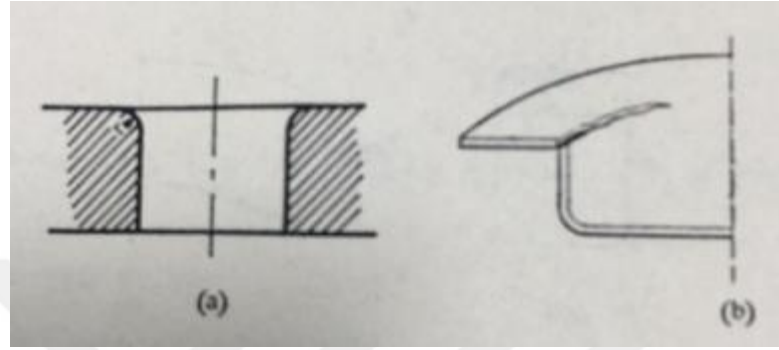


Resim 2.1. Kulak oluşumu

2.6.2. Kalıp geometrisinin etkisi

Derin çekme olayında derin çekmeyi etkileyen önemli diğer parametreler matris kenar yarıçapı (r_m), zımba kenar yarıçapı (r_{st}) ve zımba ile kalıp arasındaki boşluk (c) mesafesidir. Sac malzemenin kalıp içine girerken temas ettiği ilk yer matris kenar yarıçapıdır ve malzemenin şekillenmesinde önemli rol oynar. Bu değer malzemenin rahat kayabileceği bir şekilde olmalıdır. Ayrıca r_m değerinin artması ile uygulanması gereken derin çekme kuvveti azalır ve derin çekme oranı artar. Fakat r_m değeri

sınırsız olarak arttırılmaz. Bu değerin çok büyük olması durumunda baskı plakasının etki alanı azalır ve sac çevresi ile ürünün yan duvarlarında kırışıklık sonucu erken hasar görülür. Bir derin çekme takımından iyi sonuç alınmasında çekme kenarı yuvarlatılmasının büyük etkisi vardır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. (a) Çekme kenarının yuvarlatılması. (b) Çekme kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması (Çapan, 1990)

Çelik için, birinci kademede;

$$r = r_m = 0,8\sqrt{(D - d)t} \quad \text{alınmalıdır.} \quad (2.15)$$

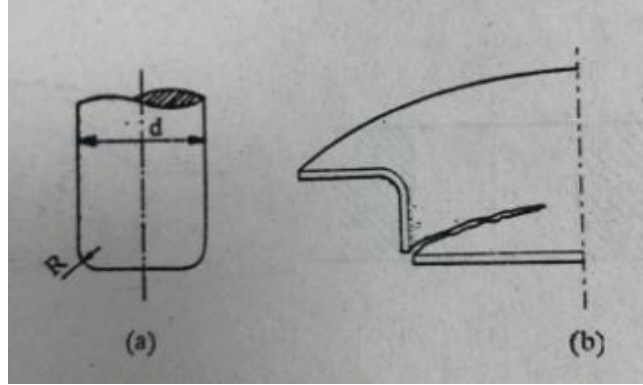
Alüminyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri daha zayıf olduğundan r değeri çeliğe kıyasla % 10 kadar büyük alınır.

$$r = r_m = 0,9\sqrt{(D - d)t} \quad (2.16)$$

İkinci ve daha sonraki kademelerde ise çekme kenarı yuvarlatma çapı

$$r_{mn} = (d_{n-1} - d_n)/2 \quad (2.17)$$

alınır (Çapan, 1990). Sacın ıstampa tarafından delinmemesi için ıstampa kenarı uygun şekilde yuvarlatılmalıdır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. (a) İstampa kenarının yuvarlatılması. (b) İstampa kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması (Çapan, 1990)

Sac kalınlığına bağılı olarak $5t < r_{st} < 10t$, İstampa çapına bağılı olarak da $r_{st} = (0,1 \dots 0,3)d$ alınabilir (Çapan, 1990). (2.18)

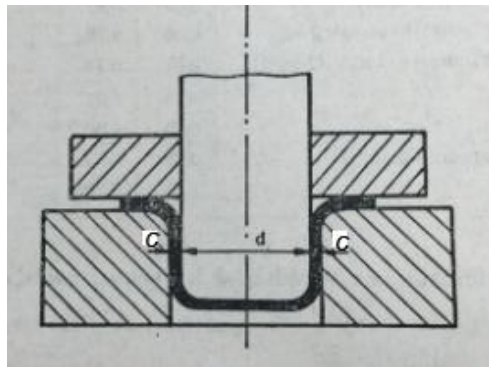
Çekme aralığı için (şekil 2.11) aşağıdaki ampirik denklemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Çapan, 1990).

$$\text{Çelik için} \quad c = t + 0,07\sqrt{10t} \quad (2.19)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad c = t + 0,02\sqrt{10t} \quad (2.20)$$

$$\text{Isıya dayanıklı alaşımlar için} \quad c = t + 0,20\sqrt{10t} \quad (2.21)$$

$$\text{Diğer demir dışı malzemeler için} \quad c = t + 0,04\sqrt{10t} \quad (2.22)$$



Şekil 2.11. Çekme aralığı (Çapan, 1990)

2.6.3. İşlem koşullarının etkisi

Bilindiği üzere derin çekme işlemi; takım tasarımı, üretimi, malzeme, tezgah, yardımcı ekipman kullanımı gibi bir çok faktörün etkilediği bir şekillendirme yöntemidir.

Derin çekmede başlangıç sacının bazı bölgelerinin yağlanmasında uygun yağ seçilmemesi ve yağlamanın yetersizliği yüksek sürtünme kuvvetlerinin oluşumuna yol açarak yüksek çekme kuvveti gerektirir. Çoğu durumda yağlama yetersizliğinden dolayı çekilen parça tabana yakın kısımlardan yırtılır. Uygun yağ seçimi ve yeterli bir yağlama sürtünme kuvvetlerini azaltır, erken hasar olayını önler ve derin çekme oranını artırır. Başlangıç sacının baskı plakası ve matris ile temas eden yüzeyleri yağlanmalıdır. Zımba tabanı ile temas eden yüzeyin yağlanması olumsuz etki gösterir. Zımba tabanında malzemenin taban bölgesindeki iç yüzeyi ile zımba arasında oluşan sürtünme kuvvetleri derin çekme kabiliyetine olumlu etki yapar. Bazı durumlarda sürtünmeyi arttırmak amacı ile zımba taban yüzeyi zararsız olacak şekilde pürüzlendirilir.

Baskı plakası basıncının ve zımba hızının uygun seçilmesi derin çekme işlemini olumlu yönde etkiler. Basıncın ve hızın fazla olması durumunda malzeme, çekme işlemini tamamlayamadan yırtılır.

Soğuk biçimlendirme işlemlerinde sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık 80 °C'ye kadar yükselebilir. Buda malzemede gevrek davranışa yol açabilir. Bu nedenle işlemi sürekli oda sıcaklığında tutmak için gerekli soğutma önlemleri alınmalıdır. Ayrıca şekillenecek parçanın geometrisi çekilme esnasında ve parçanın şekillenmesinde önemli rol oynar (Demirci, 2002).

2.7. Kaynak Araştırması

Düşük alaşımlı çelikler, alüminyum, magnezyum, titanyum alaşımları ve pirinç gibi malzemelere yoğun olarak uygulanan derin çekme işlemi düzlemsel sacların kalıplar arasında gerdirilerek plastik şekillendirilmesine dayalı bir imalat yöntemidir. Yüksek özgül dayanımları, ekonomiklikleri ve sağladıkları ağırlık kazançları sayesinde alüminyum alaşımı sacların hafif yapısal uygulamalarda kullanımı her geçen gün yaygınlaşmakta olmakla birlikte şekillendirilebilirlikleri zımba hızı, çekme oranı, tutma süresi, ısıl işlem ve sıcaklık gibi çok sayıda parametreye bağlı ve oda sıcaklığında şekillendirilebilirlikleri düşüktür (Ghosh ve ark., 2014). Kimyasal bileşim, ısıl işleme bağlı içyapı ve sac imalatında kullanılan haddeleme işleminin etkilerinden kaynaklanan anizotropi gibi nedenlerle malzeme davranışını belirlemek güç olduğundan deneysel karakterizasyon ve modelleme derin çekme işleminin etkinliğini arttırmada ön plana çıkmaktadır (Msolli ve ark., 2015). Karakterizasyon iyi yapılmadığı ve işlem parametreleri doğru seçilmediği takdirde çekme oranı düşük çıkmakta (Gavas, 2005) ve yırtılma, kırışma ve kulaklanma gibi kusurlar ortaya çıkmaktadır (Vahdat ve ark., 2006). Derin çekmede önemli bir parametre de yağlamaya bağlı sürtünme katsayısıdır (Ma ve ark., 2015). Alüminyum alaşımı sacların derin çekilebilirliğini belirlemeye yönelik literatürde pek çok deneysel (Ghosh ve ark., 2014; Kumar ve ark., 2014; Kilpatrick ve ark., 2015; Raju ve ark., 2010; Huang ve ark., 2013; Laurent ve ark., 2015; Jayahari ve ark., 2014; Demiray, 2006; Gavas, 2005), analitik (Kilpatrick ve ark., 2015; Klinger ve Bohn, 2013; Göl, 2005) ve sonlu eleman tabanlı (Laurent ve ark., 2015; Jayahari ve ark., 2014; Zheng ve ark., 2016; Dwivedi ve Agnihotri, 2015; Karalı, 2005) çalışma bulunmaktadır. Özellikle 6xxx ve 7xxx serisi yeni alüminyum alaşımı saclarla ilgili şekillendirilebilirlik bilgileri kısıtlıdır (Kumar ve ark., 2014). Colgan ve Monaghan (2003), deney ve sonlu eleman analizi ile derin çekmede ıstampa kuvveti ve kalınlık değişimini incelemişlerdir. İnceleme sonuçları, deneysel sonuçlar ile benzetimin birbiriyle örtüşüğünü göstermiştir. Duchene ve Habreken (2005), derin çekme işleminde ıstampa kuvveti, ıstampa radyüsü ve derin çekme ürün yüksekliği değerlerini benzetim ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Araştırma, deney sonuçları ile benzetimin birbirine yakın olduğunu göstermiştir. Demirci ve ark. (2005), nonlinear eksplisit sonlu eleman metodu (ANSYS LS-DYNA) kullanarak temas modeli, malzeme özellikleri (Al 1050)

ve sürtünme katsayısı ile benzetim gerçekleştirmişler, baskı plakasının cidar kalınlığına etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak %90 uyum sağlandığı görülmüş, derin çekme işleminde kalıp üretilmeden önce karşılaşılabilecek problemler belirlenmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur. Gavas ve İzciler (2006), yaptıkları çalışmada derin çekme işlemi için yeni bir uygulama geliştirmişlerdir. Bu uygulama ile derin çekme işleminde baskı plakasında Anti-Lock Braking Sistemi (ABS) kullanarak malzemenin kalıp içine akışını kontrol etmişlerdir. Literatürdeki bilgiler ışığında bu çalışmada derin çekme işlemlerinde yoğun olarak kullanılan AA5754 (Etial 53) serisinin 2 mm kalınlığındaki alüminyum malzeme kullanmışlardır. Baskı plakasının kontrolüne yönelik çalışma yapılarak optimum baskı plakası kuvveti deneysel ve sayısal olarak tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonlu eleman analizinde yoğun olarak kullanılan nonlineer ekspilist sonlu eleman metodu (ANSYS LS-DYNA) ile karşılaştırılmıştır. Akıllı (2010), 2 mm kalınlığındaki AA5754 malzemesinin derin çekme metodu ile soğuk/sıcak şekillendirilmesini sonlu eleman metodu ile analiz etmiş ve derin çekme modeli olarak silindirik kap kullanmıştır. Sac levhanın silindirik kap şeklinde biçimlendirilmesi teorik ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Derin çekme ile şekillendirmenin teorik analizi ANSYS/LS-DYNA yazılımı kullanılarak çözümlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalarda Makina Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan 50 ton kapasiteli hidrolik derin çekme presi kullanılmıştır. Derin çekme deney düzeneği ve ön deneylerin yapıldığı Hidrolik kontrol düzeneği Resim 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.1. Derin çekme deney düzeneği

3.1.1. Presin teknik özellikleri

Alüminyum sacların derin çekilebilmesi için, zımba hızının düşük olması gerekmektedir. Zımba hızı, bir kontrol ünitesi ile LCD ekran yardımıyla 2,5 mm/s – 15 mm/s arasında ayarlanabilmektedir (Resim 3.2). Pres zımba kuvveti hıza bağlı olarak, baskı plakası basıncı ise manuel olarak ayarlanmaktadır.



Resim 3.2. Hidrolik pres LCD ekranı

3.1.2. Kalıp tasarımı

Zımba, kalıp ve baskı plakası ölçüleri önceki bölümde verilen bağıntılar dikkate alınarak hesaplanmış ve imalatı yaptırılmıştır (Resim 3.3).



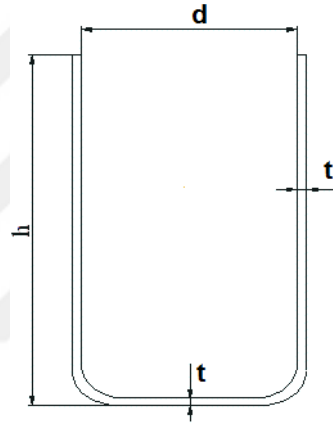
Resim 3.3. Kalıp, zımba ve baskı plakası görünümü

Zımba ve kalıp radyüsü alüminyum malzeme çekileceği göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır (Bölüm 2.6.2). Kalıp ölçüleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kalıp ölçüleri

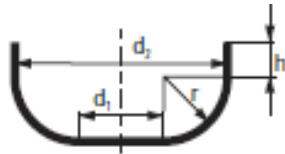
Zımba Çapı (mm)	75,00
Zımba Radyüsü (mm)	17,37
Zımba Yüksekliği (mm)	110,00
Kalıp İç Çapı (mm)	77,50
Kalıp Radyüsü (mm)	6,50
Baskı Plakası Çapı (mm)	79,00
Kalıp Dış Çapı (mm)	200,00

Çekme işlemi esnasında elde edilecek parça Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

**Şekil 3.1** Elde edilecek silindirik kap

3.1.3. Çekilecek sacın ilk çapının hesaplanması

Çekilecek silindirik kap için ilk sac çapı Eş. 3.1 veya Eş. 3.2 ile hesaplanmıştır (Schuler, 1998).



$$\sqrt{d_1^2 + 4(1,57rd_1 + 2r^2 + d_2h)} \quad (3.1)$$

$$\sqrt{d_2^2 + 4d_2(0,57r + h) - 0,56r^2} \quad (3.2)$$

Bu hesaplamada d_2 , zımba çapı; r ise zımba radyüsüdür.

Bu bağıntılar kullanılarak farklı çekme oranları için farklı ilk sac çapı hesapları yapılmış ve deneylerde 140, 145, 150, 155, 160, 165 ve 170 mm çaplarında sac kullanılmasına karar verilmiştir. Bu hesaplamalar için hazırlanan tablo, Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Sacın ilk çapının hesaplanması

h (mm)	d ₂ (mm)	r (mm)	d ₁ (mm)	D _h (mm)	D (mm)
35	75	15	45	136,25	140
40	75	15	45	141,65	145
45	75	15	45	146,85	150
50	75	15	45	151,87	155
55	75	15	45	156,73	160
60	75	15	45	161,44	165
65	75	15	45	166,02	170

h: Derin çekme yüksekliği, d₂: Zımba çapı, r: Zımba radyüsü
d₁: Taban çapı, D_h: Hesaplanan parça çapı, D: Deney parça çapı

3.2. Çekme Sacının Teknik Özellikleri

Alüminyumun hafiflik ve dayanıklılığının yanındaki asıl avantajları uygun şekillerde şekillenme kabiliyetinin çok yüksek olması ve endüstride geniş bir kullanma alanının bulunmasıdır. Alüminyumla çalışmak genel olarak demir esaslı metallerle çalışmaktan daha kolay olup üretimde, ufak düzeltmelerle sonuç alındığı için kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Alüminyum çok çeşitli şekillerde ve ölçülerde üretilebilmektedir. Bunlar alüminyum folyo, sac, tabaka, katı metal, boru olarak sayılabilir. Ayrıca çok geniş bir alaşım çeşitliliğine ve bunların yaygın kullanım alanına sahiptir.

Alüminyum alaşımları ısı işleme tabi tutulanlar ve ısı işleme tabi olmayanlar olarak iki gruba ayrılırlar. İki grupta soğuk işleme aşamaları (yuvarlatma, çekme) ile sertleştirilir ve tavlama işlemi ile yumuşatılır. Bunun yanında ısı işleme tabi tutulan alüminyum alaşımları ısı işlemlerle de (doğal ve yapay çökeltme) sertleştirilebilir. Ayrıca alüminyum tavlama ile diğer metal malzemelere nazaran daha etkin derin çekilebilir. Bunun yanında yoğunluğunun düşük olması, korozyona dayanıklı olması ve yüksek elektrik ve ısı iletim özellikleri alüminyumu cazip hale getirmiştir. Dezavantajları ise yüksek ısıya karşı fazla dayanıklı olmamasıdır (Demirci, 2002).

6082 alüminyum alaşımı (AA6082), mükemmel korozyon direncine sahip orta dayanımlı bir malzeme olup 6xxx serisi alaşımların en yüksek mukavemete sahip olanıdır. 6082 alaşımı, yapısal bir alaşım olarak bilinir. Levha formunda 6082, işleme için en sık kullanılan alaşımdır. Nispeten yeni bir alaşım olan 6082 daha yüksek mukavemeti sayesinde birçok uygulamada 6061'in yerini almıştır. Büyük miktarda manganez ilavesi tane yapısını kontrol eder ve bu da daha güçlü bir alaşım oluşturur. AA6082 ile ince cidarlı karmaşık şekilleri üretmek zordur.

6xxx serisi alaşımlar ısıtılma işlemiyle sertleştirilebilmektedir. AA6082-T6 çözeltiye alınıp, suni yaşlandırılmış, orta seviye dayanıma sahip bir havacılık-uzay sanayi malzemesidir. Yüksek kaynak edilebilirliği, eloksallama gibi yüzey işlemlerine uygunluğu gibi özellikleri ile yüksek gerilmeli uygulamalarda kiriş, destek, taşıma elemanı gibi hem görsel hem de yüksek mukavemetin gerektiği alanlarda kullanılır. İyi profil çekme özelliklerinden dolayı ekstrüzyon ile üretilir.

3.2.1. Kimyasal bileşimi

Bu çalışmada kullanılan Etial-61 (AA6082-T6) sacının diğer standartlardaki karşılığı Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılan alüminyum malzemenin diğer standartlardaki karşılığı

ABD (AA)	TÜRKİYE (ETİBANK)	ALMANYA (DIN)	İNGİLTERE (BS)	RUSYA
6082	ETİAL 61	AlMgSi1	H30	A35
FRANSA (AFNOR)	İSVİÇRE	İTALYA (UNI)	İSVEÇ	
A-SGM0,7	AlMgSi0,6	3571	14-4212	

Çizelge 3.4'te AA6082-T6 alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 3.4. AA6082-T6 alaşımının ağırlıkça % kimyasal bileşimi

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer	Al
0,5	0,7-1,3	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,15	0,15	Kalan

3.2.2. Fiziksel ve mekanik özellikleri

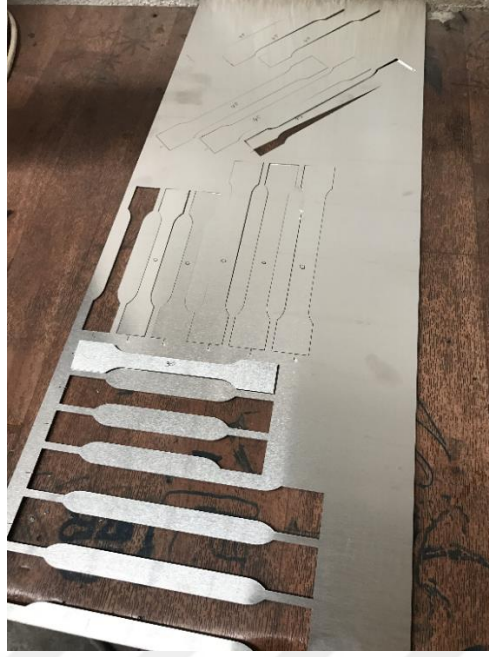
Bu çalışmada kullanılan Etial-61 (AA6082-T6) sacının fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. AA6082-T6 fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2,71
Erime Sıcaklığı (°C)	575
Isıl Genleşme Katsayısı	23.1 x 10 ⁻⁶
Isıl Kapasite (W/m.K)	170
Elektriksel İletkenlik (IACS) (%)	44
Mekanik Özellikler	
Akma Dayanımı (MPa)	270
Çekme Dayanımı (MPa)	330
Uzama (%)	11
Elastisite Modülü (Gpa)	71

3.2.3. Çekme deneyi

Çekme deneyinin amacı; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemektir. Bunun için boyutları standartlara (TS EN ISO 6892-1 Ocak 2010, Ek B, TİP 1, TİP 2) uygun, farklı doğrultularda (0°, 45°, 90°) deney parçaları (Resim 3.4) hazırlanmıştır. Deney numunesi çekme cihazına iki ucundan çenelere yerleştirilmiştir (Resim 3.5).

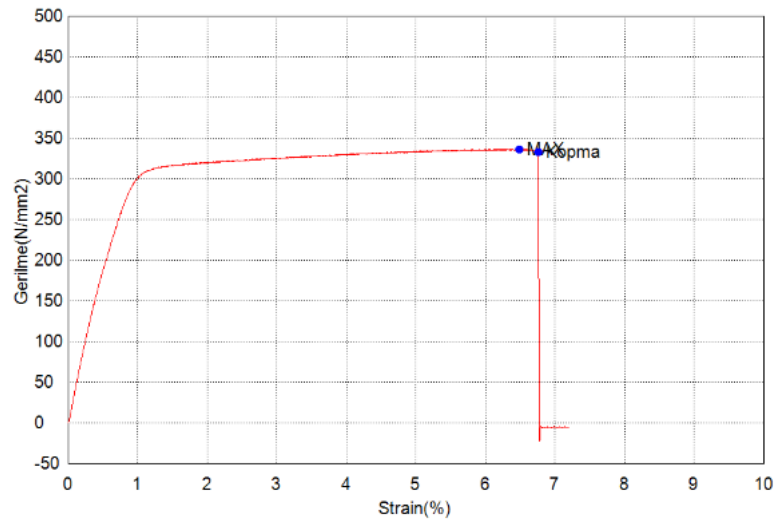


Resim 3.4. Standartlara uygun deney parçası hazırlanması



Resim 3.5. Deney parçasının çekme cihazına bağlanması

Çekme hızı 10 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Numune kopuncaya kadar kuvvet-uzama değerleri kaydedilmiştir. Hadde doğrultusuna göre X°'de yönlenmiş numunenin çekme deneyinden elde edilen gerilme-BŞD eğrisi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme deneyinde elde edilen Gerilme BŞD eğrisi

Deney numuneleri farklı doğrultularda (0° , 45° , 90°), 3'er adet olmak üzere toplam 9 adet olarak hazırlanmış olup elde edilen sonuçlar Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Çekme deneyi sonuçlarının tablo halinde gösterilmesi

Deney No	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Uzama (mm)	Maksimum Uzama (%)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Gerilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (mm)	Kopma Uzaması (%)
00-01	6321,25	311,56	8,38	5,17	6137,50	306,87	9,12	5,63
00-02	6650,00	332,50	13,06	8,06	5765,63	288,28	15,45	9,54
00-03	6725,00	336,25	11,07	6,83	6531,25	326,56	14,64	9,04
45-01	6615,63	330,78	11,49	7,09	6415,64	320,78	12,15	7,50
45-02	6384,38	319,22	8,10	5,00	6153,13	307,65	8,54	5,27
45-03	6328,13	316,41	10,71	6,61	6148,88	307,34	11,78	7,27
90-01	6662,50	333,13	12,21	7,54	6028,13	301,41	17,06	10,53
90-02	6509,38	325,47	8,08	4,99	6412,50	320,63	8,45	5,22
90-03	6721,88	336,10	10,51	6,49	6650,00	332,50	10,96	6,76

Deney numunesi koptuktan sonra tekrar bir araya getirilerek (Resim 3.6), çekme deneyinden sonra deney parçasının son genişlik (w) ölçülmüştür.



Resim 3.6. Deney numunelerinin koptuktan sonra bir araya getirilmeleri.

Deney parçasının ilk boy (l_0) ve ilk en (w_0) değerleri deneyden önce not edilmiştir. Deneyden sonra son boy (l) ve son en (w) ölçüleri alınarak, anizotropi hesaplarını yapabilmek için Çizelge 3.7 hazırlanmış ve Eş. 2.12 hesaplama yapılmıştır.

Çizelge 3.7. Anizotropi hesaplamaları için gerekli veriler

Parça No	w_0	w	l_0	l	w/w_0	$w_0 l_0 / w l$	$R = \epsilon_w / \epsilon_e$	R_{ort}
00-01	19,68	19,27	162,00	170,38	0,979	0,971	0,717	0,623
00-02	19,51	19,19	162,00	175,06	0,984	0,941	0,271	
00-03	19,34	18,75	162,00	173,07	0,969	0,965	0,882	
45-01	19,43	19,04	162,00	173,49	0,980	0,953	0,421	0,813
45-02	19,64	19,10	162,00	170,10	0,973	0,979	1,333	
45-03	19,47	18,97	162,00	172,71	0,974	0,963	0,685	
90-01	19,52	19,14	162,00	174,21	0,981	0,948	0,371	0,344
90-02	19,57	19,31	162,00	170,08	0,987	0,965	0,379	
90-03	19,57	19,30	162,00	172,51	0,986	0,952	0,284	

Eş. 2.13 ve Eş. 2.14 kullanılarak ortalama dikey anizotropi parametresi ve düzlemsel anizotropi katsayısı sırasıyla 0,648 ve -0,329 bulunur.

$R \neq 1$ ve $\Delta R < 0$ olduğundan derin çekme işlemi sonunda hadde doğrultusu ile 45°lik açı yapan yönlerde kulaklanma olacaktır.

3.2.4. Tavlama işlemi

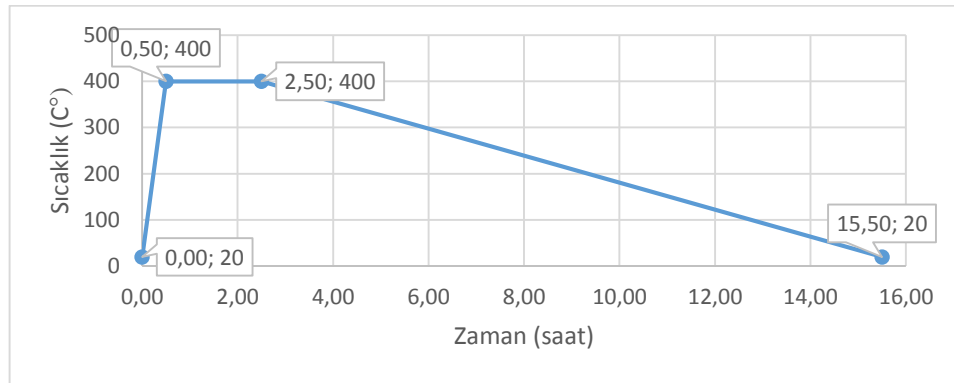
Sertleştirme ve yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuş alaşımların yumuşatılmaları için tavlama 350~450°C'ta, 1 ilâ 2 saat süreyle uygulanır. Bu sıcaklıklarda fazla doymuş katı eriyik tamamen ayrışır ve kuvvetlendirici fazlar ayrılıp toparlanırlar. Bunun için soğuma temposu saatte 30°C'yi geçmemelidir. Tavlamadan sonra alaşım bir düşük çekme mukavemeti, ortalama süneklik ve yüksek gerilme korozyonu mukavemetine sahip olur (Oğuz, 1990).

Bu çalışmada kullanılan AA6082-T6 alüminyum sac levhanın sünekliğini artırmak için tavlama işlemi yapılmıştır. Tavlama işlemi için Protherm marka MOS 180/8 model yüksek sıcaklık fırını (Resim 3.7) kullanılmıştır.



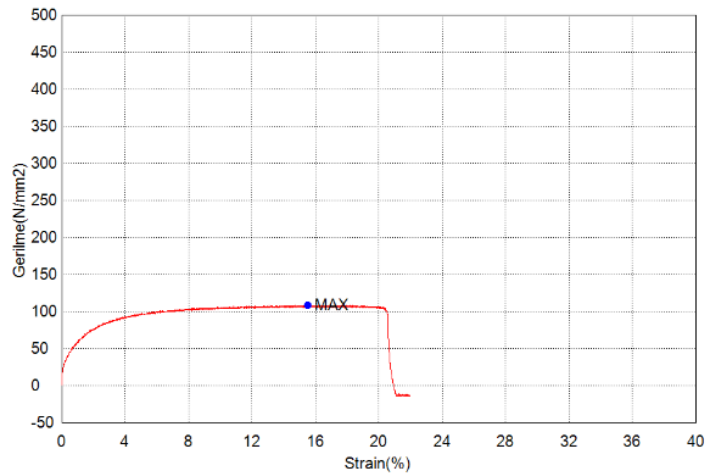
Resim 3.7. Isıl işlem fırını

Tavlama işlemi için kullanılan sıcaklık zaman prosedürü Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tavlama prosedürü

Tavlama sonrasında boyutları standartlara uygun deney numuneleri ile çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen örnek bir gerilme-BŞD eğrisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Tavlama sonrası elde edilen Gerilme BŞD eğrisi

Tavlama sonrası deney numuneleri farklı doğrultularda (0°, 45°, 90°), olmak üzere toplam 3 adet olarak hazırlandı ve çıkan sonuçlar Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Tavlama sonrası çekme deneyi sonuçları

Parça No	Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Gerilim (MPa)	Maksimum Uzama (mm)	Maksimum Uzama (%)
00-01H	1353,13	108,25	18,62	15,52
00-45H	1481,5	118,50	15,97	13,31
00-90H	1406,25	112,50	21,68	17,35

3.3. Derin Çekme Deneyleri

Deneyleerde 1 mm kalınlığında AA6082-T6 alüminyum alaşımlı sac malzemeler kullanılmıştır. Çekme hızının, baskı plakası basıncının ve sürtünmenin sac metal şekillendirme işlemindeki etkilerinin tespit edilmesi amacıyla; farklı hızlarda, farklı basınçlarda ve farklı sürtünme koşullarında deneyler yapılmıştır. Ayrıca, ısıl işlemin etkisini görmek amacıyla tavlama işlemi yapılan malzemelerle de deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3.1. Derin çekme hızının derin çekme kuvvetine etkileri

Çekme hızı, çekilen sac malzemenin fiziksel özelliklerini ve şekil değiştirmesini önemli ölçüde etkilemektedir. Çekme hızı değerleri, genellikle deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmektedir. Çekme işleminde, malzemeye şekil değiştirmesi için yeterli zaman verilmelidir. Aksi takdirde sac malzeme üzerinde yırtılmalar oluşmaktadır (Gürün, 2008).

Deneysel çalışmalar için 140 mm çapında, 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin; belirlenen baskı plakası basınçlarında (40 bar, 80 bar) ve çekme hızlarında (2,50 mm/s, 5,00 mm/s, 7,50 mm/s, 10,00 mm/s, 12,50 mm/s, 15,00 mm/s) yapılan derin çekme deneyleri sonucunda, farklı baskı plakası basınçlarındaki çekme hızının derin çekme kuvvetine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre çekme hızı arttıkça derin çekme kuvvetinin arttığı görülmektedir. Ayrıca baskı plakası basıncı artırıldığında doğal olarak derin çekme kuvveti de artmıştır. Belirli bir değerde, çekme hızı da artırıldığında (80 bar, 15.00 mm/s), sac malzeme üzerinde yırtılmalar olmuştur. Alüminyum (AA6082-T6) malzemenin, farklı baskı plakası basınçlarında ve çekme hızlarında çekilmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.9'da ve aynı çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik çekme ürünler Resim 3.8'de verilmiştir.

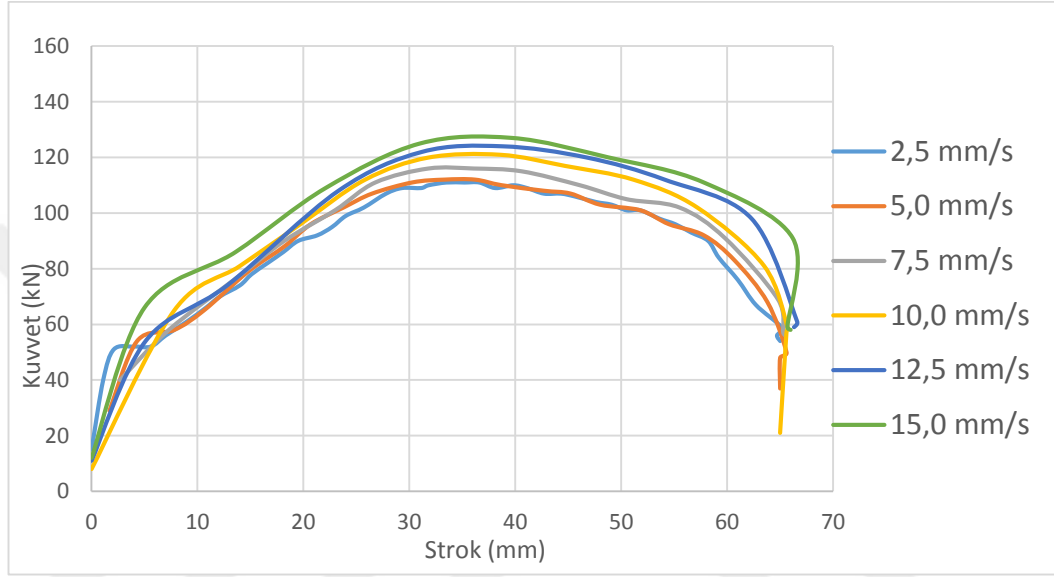
Çizelge 3.9. Farklı baskı plakası basıncı ve hızlarda deney sonuçları

Parça No	Derin Çekme Hızı (mm/s)	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Strok (mm)	Maksimum Kuvvet (kN)	Deney Sonucu
1	2,50	50	65	111	Hasarsız
2	5,00	50	65	112	Hasarsız
3	7,50	50	65	116	Hasarsız
4	10,00	50	65	121	Hasarsız
5	12,50	50	65	124	Hasarsız
6	15,00	50	65	127	Hasarsız
7	5,00	80	65	141	Hasarsız
8	10,00	80	65	146	Hasarsız
9	15,00	80	65	110	Yırtilma

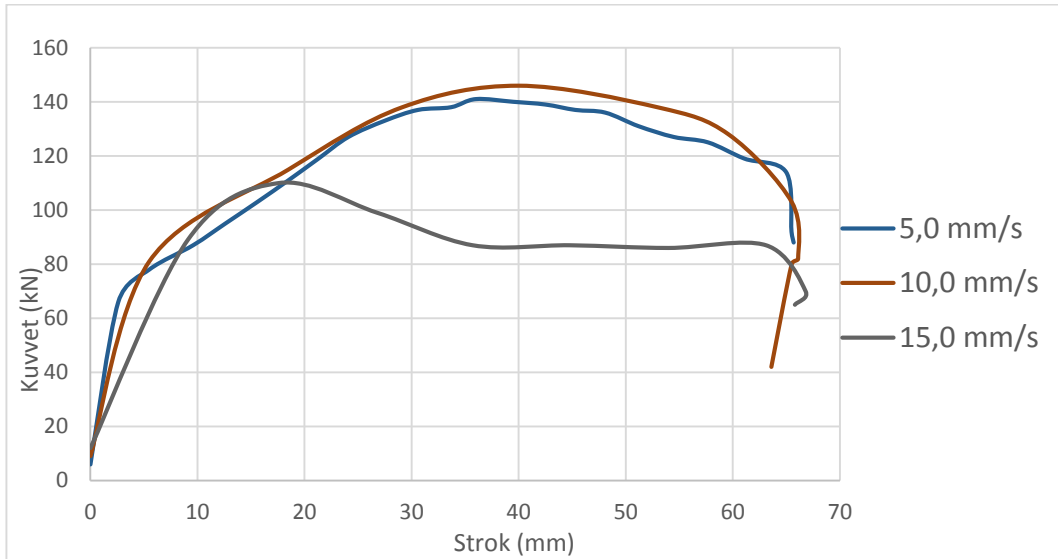


Resim 3.8. Farklı baskı plakası basıncı ve hızlarda çekilen deney parçaları

AA6082-T6 malzemenin baskı plakası basıncı 40 bar ve farklı çekme hızlarında yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.5'te, baskı plakası basıncı 80 bar ve farklı çekme hızlarında yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Baskı plakası basıncı 40 bar ve farklı hızlarda yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri



Şekil 3.6. Baskı plakası basıncı 80 bar ve farklı hızlarda yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri

3.3.2. Baskı plakası kuvvetinin derin çekme işlemine etkileri

Derin çekme işlemi sırasında, sac parça üzerine baskı plakası tarafından belirli bir kuvvet uygulanarak, çekme esnasında üründe oluşabilecek kırışıklıklar engellenir ve çekme işleminin etkin bir şekilde gerçekleşmesi sağlanır. Sac malzeme kalınlığının az olduğu veya derin çekme yüksekliğinin fazla olduğu durumlarda kırışıklıkları önlemek amacıyla bu tür bir çekme işlemi yapılması gerekmektedir. Çekme işlemlerinde baskı plakası kuvveti, çekilen kabın derinliğine göre ayarlanmaktadır (Gürün, 2008). Yapılan deneysel çalışmalarda, baskı plakası kuvveti kalıp sistemine eklenen bir baskı plakası ve hidrolik sistem ile oluşturulmuştur. Uygulanan baskı kuvvetinin büyüklüğü; teorik hesaplamalar, literatürde bulunan çalışmalar, analiz programlarından alınan değerler ve yapılan deneysel çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir.

En uygun baskı plakası kuvvetini belirlemek amacıyla, derin çekme işlemi farklı baskı plakası kuvvetlerinde tekrarlanarak belirlenmiştir. Deneysel referans almak amacıyla, baskı plakası kuvveti Eş. 2.5 ile hesaplanmıştır. Buna göre; 150 mm başlangıç çapı, 270 MPa akma dayanımı, 75 mm zımba çapı, 1 mm sac kalınlığı ve 6,5 mm matris radyüsü için $F_N = 45708,17$ N hesaplanmış olup 120 mm mil çapı için baskı plakası basıncı referans değeri 40,40 bar olarak belirlenmiştir.

Tavlama yapılmış deney numuneleri için akma dayanımı 110 MPa olup, referans baskı plakası basıncı 16,40 bar olarak belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar için 135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin 2,50 mm/s hızda, belirlenen baskı plakası basınçlarında (0 bar, 40 bar, 80 bar, ve 120 bar) yapılan derin çekme deneyleri sonucunda, baskı plakası basıncının derin çekme kalitesine ve çekme kuvvetine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre baskı plakası basıncı 0 bar için çok kırışık bir ürün elde edilmiştir. Kırışıklıklar kalıp boşluğunda sıkışmaya neden olduğundan parça yırtılmıştır. 40 bar ve 80 bar için yapılan deneylerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Baskı plakası basıncı 120 bar değeri için yapılan deneyde derin çekme kuvveti belirli bir değerin üstüne çıktığında malzeme yırtılmıştır.

135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki malzemenin, farklı baskı plakası basınçlarında çekilmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10'da ve aynı çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik derin çekme ürünleri Resim 3.9'da verilmiştir.

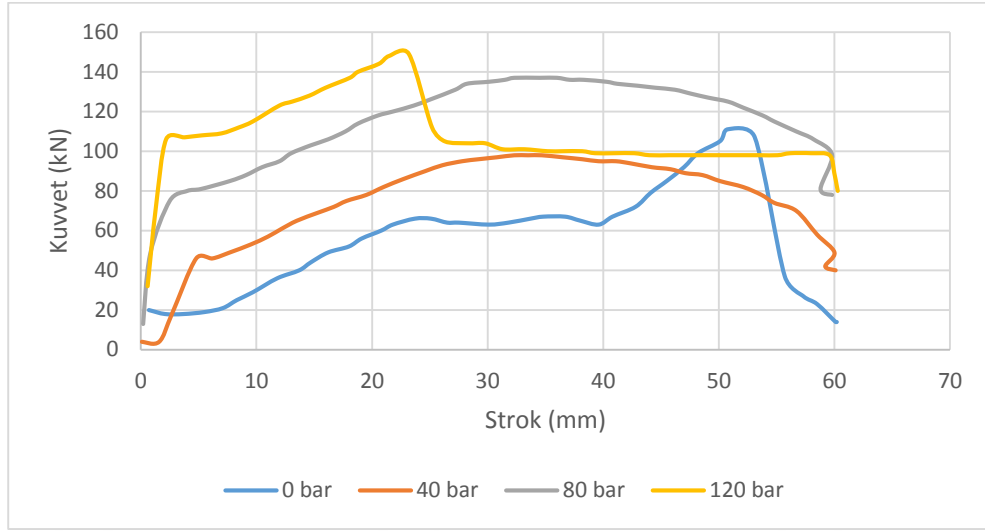
Çizelge 3.10. Çap 135 mm malzemenin farklı baskı plakası basınçların da deney sonuçları

Parça No	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Strok (mm)	Maksimum Kuvvet (kN)	Derin Çekme Hızı (mm/sn)	Deney Sonucu
1	0	60	67	2,5	Çok kırışık
2	40	60	98	2,5	Hasarsız
3	80	60	137	2,5	Hasarsız
4	120	60	149	2,5	Yırtılma



Resim 3.9. 135 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında çekilen deney parçaları

135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki malzemenin, farklı baskı plakası basınçlarında yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. 135 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarındaki kuvvet-strok grafikleri

Baskı plakası basıncının etkisini, tavlama işlemi yapılmış deney numunesinde görebilmek için yapılan deneyler için 150 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin 2,50 mm/s hızda, tavlama işlem yapılmamış numunelerde belirlenen baskı plakası basınçlarında (25 bar, 30 bar, 40 bar ve 80 bar), tavlama işlemi yapılmış numunelerde (10 bar, 30 bar), yapılan çekme deneyleri sonucunda, baskı plakası basıncının derin çekme kalitesine ve derin çekme oranına etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneylerin sonuçlarına göre baskı plakası basıncı arttıkça kırışıklıkların azaldığı görülmektedir. En iyi sonuç hesaplamalardan da tespit edildiği üzere 40 bar civarında elde edilmiştir. Bu basıncın altında kırışıklıklar, üzerinde ise yırtılmalar görülmektedir. Ayrıca baskı plakası basıncı artırıldığında doğal olarak çekme kuvveti de artmıştır. Belirli bir değerde (80 bar), sac malzeme üzerinde yırtılmalar olmuştur. Tavlama yapılmış deney parçasının akma dayanımı düştüğü için gerekli baskı plakası basıncı daha düşük hesaplanmıştır. 10 bar civarında başarılı sonuç elde edilmiştir. Baskı plakası basıncı 30 bara artırıldığında sac malzeme yırtılmıştır.

AA6082-T6 malzemenin, farklı baskı plakası basınçlarında derin çekilmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.11’de ve aynı çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik ürünler Resim 3.10’da verilmiştir.

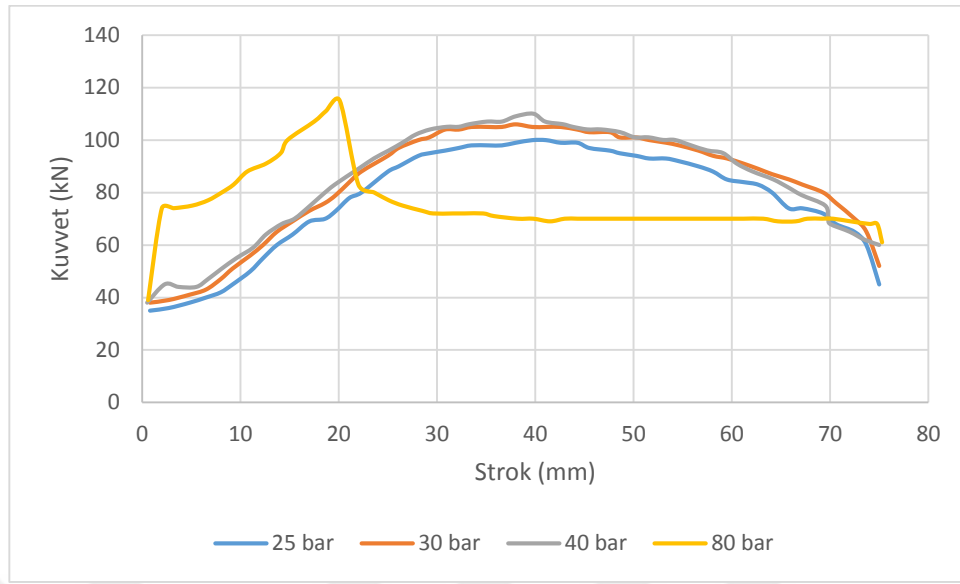
Çizelge 3.11. 150 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçların da deney sonuçları

Parça No	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Strok (mm)	Tavlama	Maksimum Kuvvet (kN)	Çekme Hızı (mm/sn)	Sonuç
1	25	75	YOK	100	2,5	Kırışık
2	30	75	YOK	106	2,5	Az kırışık
3	40	75	YOK	110	2,5	Hasarsız
4	80	75	YOK	115	2,5	Yırtılma
1T	10	75	VAR	55	2,5	Hasarsız
2T	30	75	VAR	57	2,5	Yırtılma

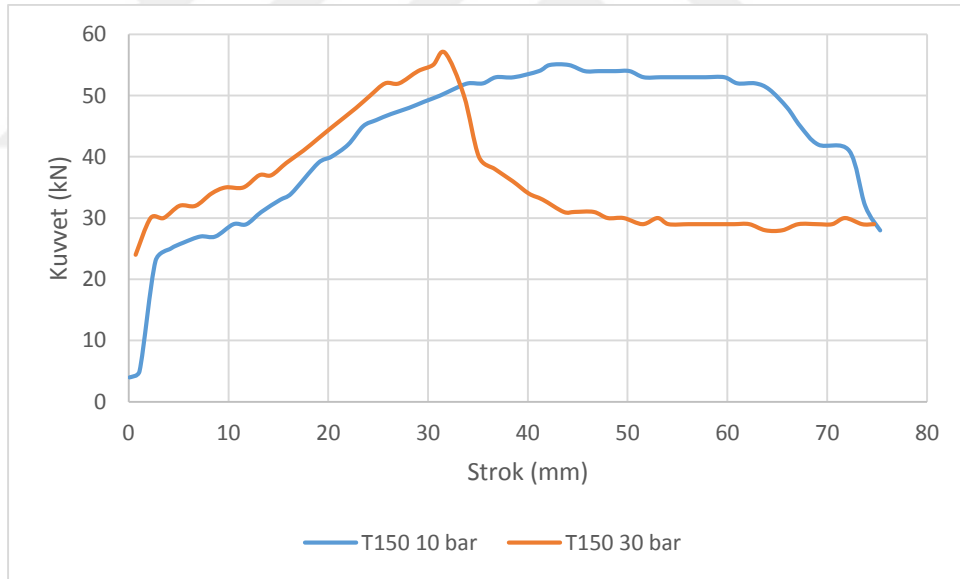


Resim 3.10. 150 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında çekilen deney parçaları

150 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki malzemenin, tavlama işlem yapılmamış numunelerde farklı baskı plakası basınçlarında yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.8’de, tavlama işlemi yapılmış numunelerde farklı baskı plakası basınçlarında yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.9’da verilmiştir.

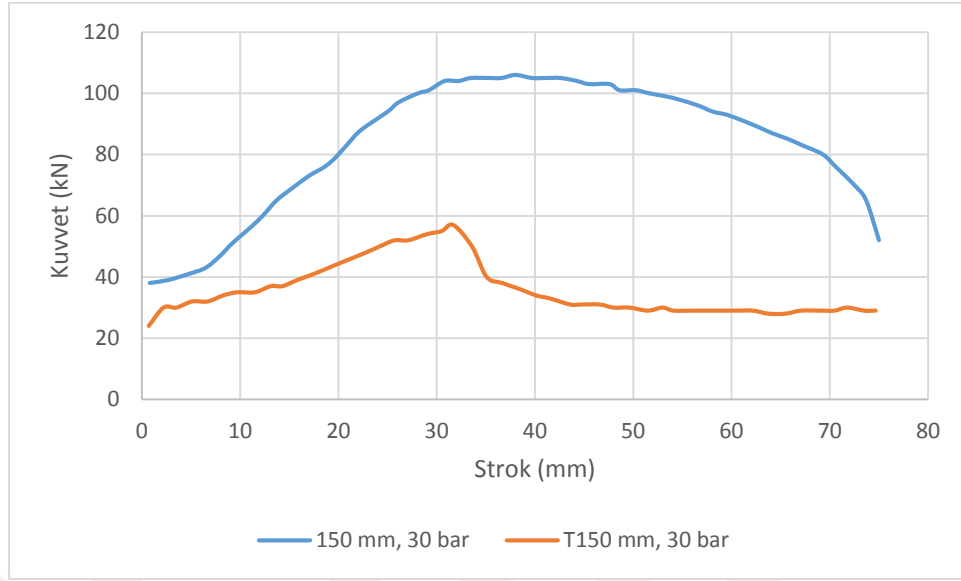


Şekil 3.8. 150 mm çapındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri



Şekil 3.9. 150 mm çapındaki tavlama işlemi yapılmış malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri

150 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki malzemenin, tavlama işlem yapılmış ve yapılmamış numunelerde aynı baskı plakası basınçlarında (30 bar) yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. 150 mm çapındaki tavlama işlemi yapılmış ve yapılmamış malzemenin aynı baskı plakası basınçlarında kuvvet-strok grafikleri

3.3.3. Sürtünme değerinin derin çekme işlemine etkileri

Triboloji sistemlerinde sürtünme; sac/yağ/baskı plakası, sac/yağ/matris, sac/yağ/matris radyüsü aralarında mümkün olduğunca az olmalıdır. Zımba ve sacın temas yüzeyleri arasındaki sürtünme çok yüksek zımba kuvvetleri oluşsun diye mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.

Ancak yırtılma oluşmaması için zımba kuvveti; $F_P \leq F_T = f_{\mu} \cdot \sigma_{\varphi} \cdot \pi \cdot d \cdot t$ olmalıdır. Burada; F_T , yırtılma kuvveti; f_{μ} , yırtılma faktörü olup sac/yağ/zımba arasındaki sürtünmeden etkilenen yırtılma faktörünün büyümesi daha büyük yırtılma kuvveti oluşturarak parçada yırtılmaya neden olur (Ay, 2008).

Deneysel çalışmalarda sürtünmeyi azaltmak için, 135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin, 40 bar baskı plakası basıncında, 2.50 mm/s çekme hızında, deney sacı ile matris arasına yarı sentetik bor yağı uygulanmıştır. Naylon kullanımının etkisini görebilmek için sac ile matris arasına 1 kat ve yine sac ile matris arasına 2 kat naylon yerleştirilip deneyler tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda naylon kullanımının sürtünmeyi azaltarak derin çekme kuvveti değerini düşürdüğü

görülmüştür. 2 kat naylon kullanılması bir fayda sağlamamıştır.

AA6082-T6 malzemenin, sürtünmeyi azaltmak için bor yağı ile birlikte 1 kat ve 2 kat naylon kullanılarak çekilmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.12’de ve aynı derin çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik ürünler Resim 3.11’de verilmiştir.

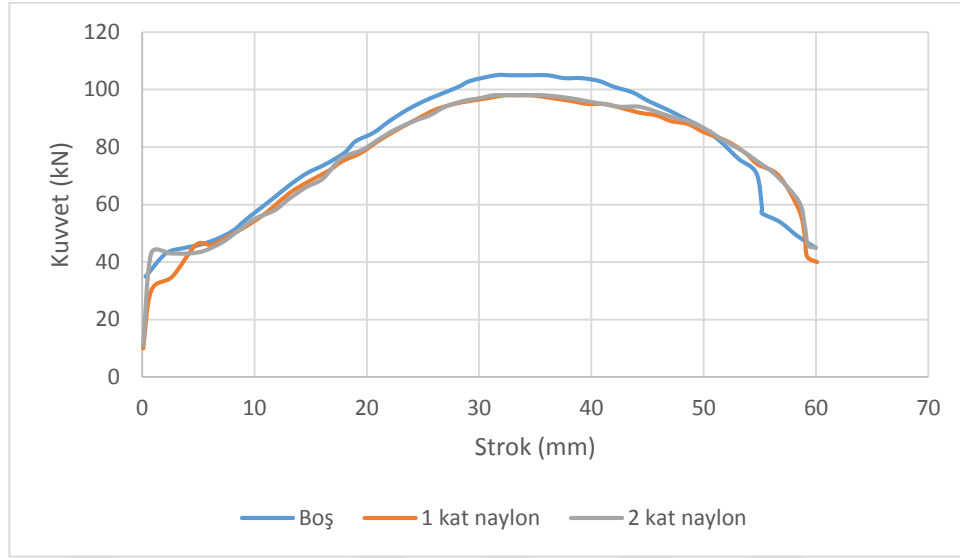
Çizelge 3.12. 135 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında deney sonuçları

Parça No	DR (-)	Strok (mm)	Naylon	Maksimum Kuvvet (kN)	Deney Sonucu
1	1,80	60	YOK	105	Hasarsız
2	1,80	60	1 kat	98	Hasarsız
3	1,80	60	2 kat	98	Hasarsız



Resim 3.11. 135 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında çekilen deney parçaları

AA6082-T6 malzemenin sürtünmeyi azaltmak için bor yağı ile birlikte naylon kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. 135 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında kuvvet-strok grafikleri

Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda sürtünmeyi azaltmak için, deney sacı ile matris arasına yarı sentetik bor yağı uygulanmıştır. 155 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin, 30 bar baskı plakası basıncında yapılan derin çekme deneyleri sonucunda sacın yırtıldığı görülmüştür (Resim 3.12). Deney malzemesi için hedeflenen derin çekme oranı 2,07'dir. Bu oranı sağlayabilmek için sac ile kalıp arasına naylon uygulanarak tekrar deney yapılmıştır. Deney sonucunda çekme işlemi başarılı olmuştur.

AA6082-T6 malzemenin, sürtünmeyi azaltmak ve yüksek DR değerleri elde etmek için bor yağı ile birlikte naylon kullanılarak derin çekilmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.13'te ve aynı derin çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik ürünler Resim 3.12'de verilmiştir.

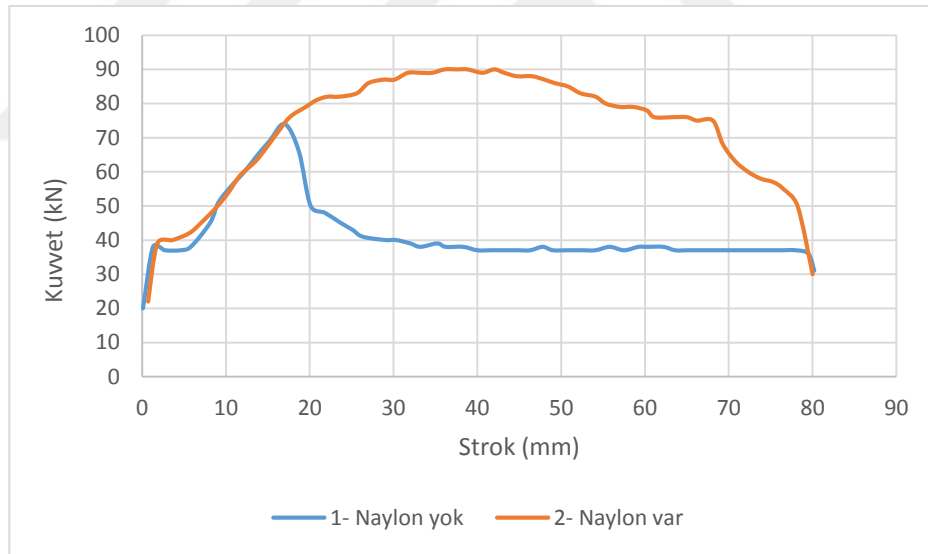
Çizelge 3.13. 155 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında deney sonuçları

Parça No	DR (-)	Strok (mm)	Naylon	Maksimum Kuvvet (kN)	Deney Sonucu
1	2,07	80	YOK	74	Yırtılma
2	2,07	80	VAR	90	Hasarsız



Resim 3.12. 155 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında çekilen deney parçaları

AA6082-T6 malzemenin sürtünmeyi azaltmak ve yüksek DR değerleri elde etmek için bor yağı ile birlikte naylon kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. 155 mm çapındaki malzemenin farklı sürtünme koşullarında kuvvet-strok grafikleri

3.3.4. Çekme oranı (DR) değerinin sınırları

Çekme oranı, başlangıçtaki parça çapının (D), zımba çapına (d) oranı olup normal şartlarda üst limit 2’dir.

Bu değer, malzemelerin derin çekilebilirliğinin bir ifadesidir. Malzemelerin çatlak başlangıcından hemen önce çekilebileceği maksimum çapı gösterir.

Deneysel çalışmalarda DR değerini 2'nin üzerine çıkarmak için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde ilk olarak doğru kalıp geometrisi için hesaplamalar yapılmış olup matris radyüsü (r_m) 6,5 mm olarak belirlenmiştir. Uygun yağlama şartları oluşturulmuş ve baskı plakası basıncı için hesaplanan değer civarında denemeler yapılarak en uygun baskı plakası basıncına karar verilmiştir. Çekme hızı olarak da deneyler sonucunda presin minimum değeri olan 2,5 mm/s seçilmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda yapılan deneylerde DR maksimum 2,07 olarak elde edilmiştir. DR 2,13 için yapılan deneyler başarıya ulaşmamıştır.

AA6082-T6 malzemenin, yüksek DR elde edilmesi için yapılan bütün çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 3.14'te ve aynı derin çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik ürünler Resim 3.13'te verilmiştir.

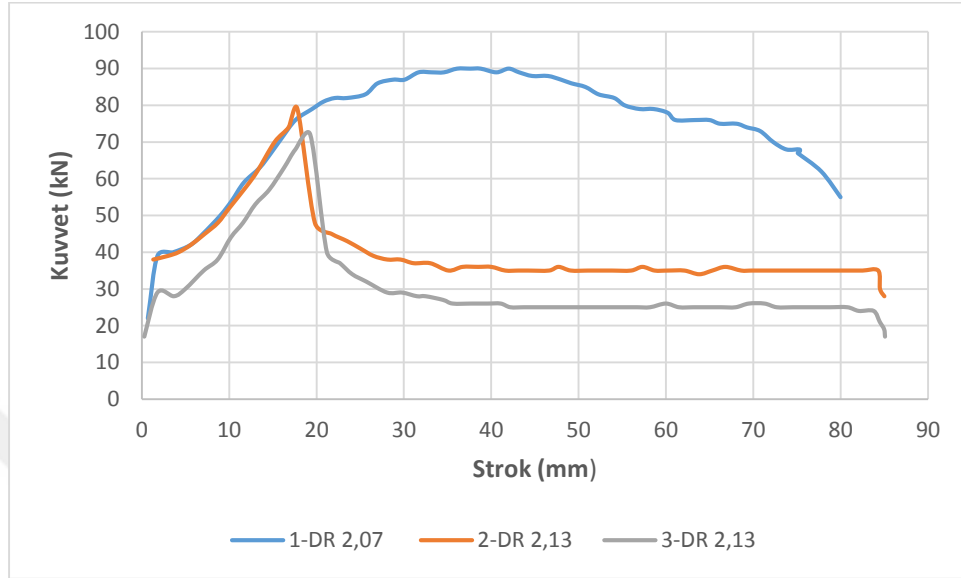
Çizelge 3.14. Yüksek DR elde etmek için yapılan deney sonuçları

Parça No	Parça Çapı (mm)	DR (-)	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Strok (mm)	Maksimum Kuvvet (kN)	Deney Sonucu
1	155	2,07	30	80	90	Hasarsız
2	160	2,13	30	85	79	Yırtılma
3	160	2,13	10	85	72	Yırtılma



Resim 3.13. Yüksek DR elde etmek için çekilen deney parçaları

AA 6082-T6 malzeme ile yüksek DR elde etmek için yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Yüksek DR elde etmek için yapılan deneylerin kuvvet-strok grafikleri

AA6082-T6 deney malzemesinin çekme oranının 2,07'den daha üst değerlere çıkabilmesi için malzemeye tavlama işlemi yapılmıştır (Bölüm 3.4.4.). Tavlama işlemi sonrasında DR= 2,13; 2,20 ve 2,27 için deneyler yapılmıştır. Tavlama yapılmış deney parçasının akma dayanımı düştüğü için gerekli baskı plakası basıncı daha düşük hesaplanmıştır. Çekme hızı için daha önce belirlenen deneyler sonucunda 2,5 mm/s kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda DR maksimum 2,13 olarak elde edilmiştir (Resim 3.14). DR=2,20 için yapılan deneylerde derin çekme işlemi tamamlanmış fakat kırışıklıklar kabul edilebilir seviyenin üstünde olmuştur. Kırışıklıkların giderilmesi amacıyla baskı plakası basıncı artırıldığında ise parça yırtılmıştır. DR=2,27 için yapılan deneyler başarıya ulaşmamıştır (Resim 3.15) .

AA6082-T6 malzemenin tavlama işlemi uygulandıktan sonra daha yüksek DR elde etmek için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.15'te ve aynı derin çekme parametreleri ile yapılan deneylerden elde edilen silindirik ürünler Resim 3.14 ve Resim 3.15'te verilmiştir.

Çizelge 3.15. Tavlama işleminden sonra yüksek DR elde etmek için yapılan deney sonuçları

Parça No	Parça Çapı (mm)	DR (-)	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Strok (mm)	Maksimum Kuvvet (KN)	Deney Sonucu
1T	160	2,13	20	85	59	Yırtılma
2T	160	2,13	15	85	61	Hasarsız
3T	165	2,20	10	90	57	Kırışik
4T	165	2,20	15	90	53	Yırtılma
5T	170	2,27	10	95	50	Yırtılma

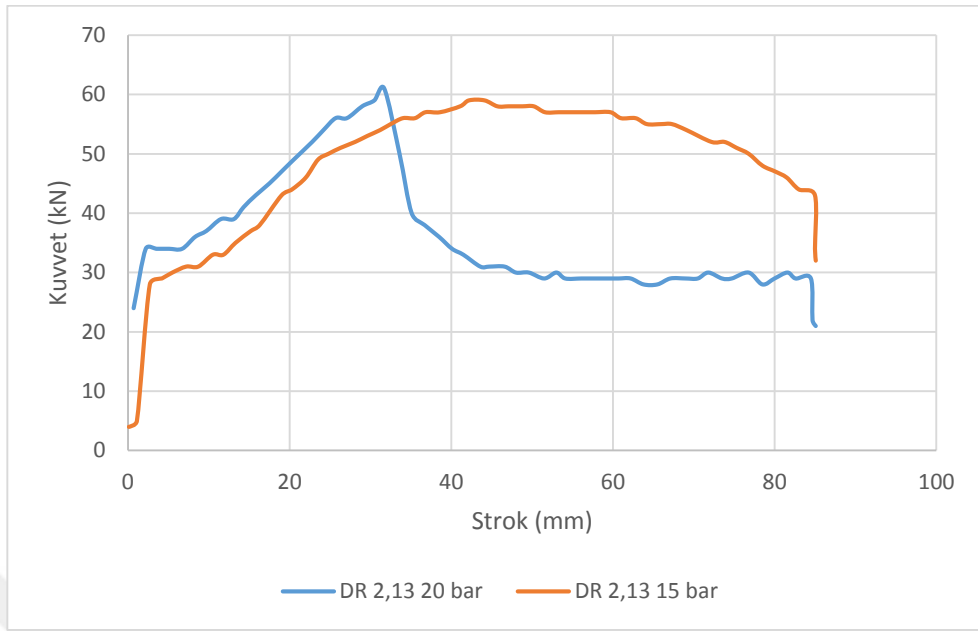


Resim 3.14. DR=2,13 oranı elde etmek için çekilen deney parçaları

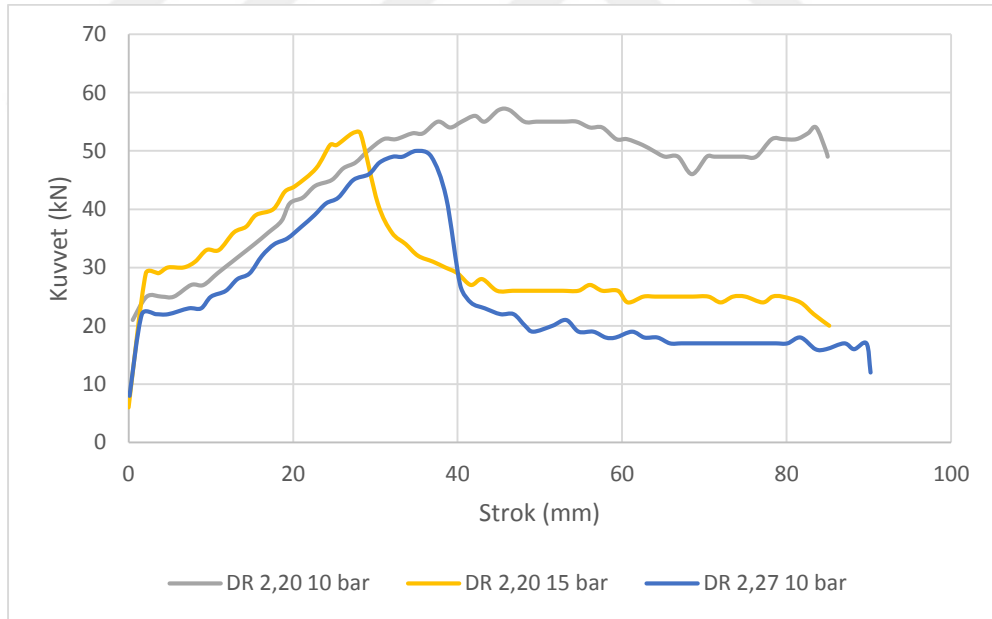


Resim 3.15. DR=2,20 ve 2,27 oranları elde etmek için çekilen deney parçaları

AA6082-T6 malzemenin tavlama işleminden sonra DR=2,13 oranının elde etmek için yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.14'te, DR=2,20 ve 2,27 elde etmek için yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.14. DR=2,13 elde etmek için yapılan deneylerin kuvvet-strok grafikleri

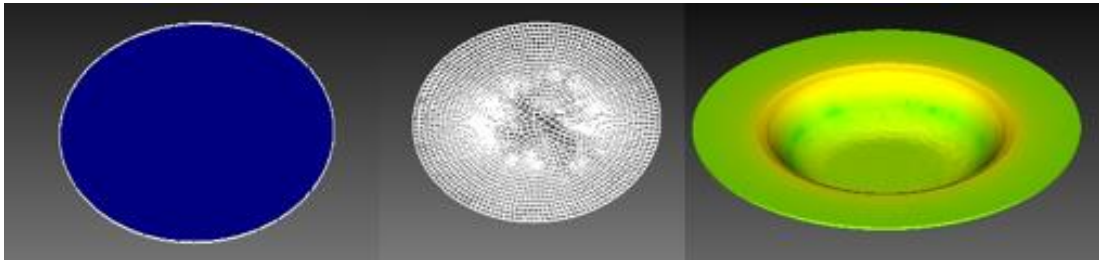


Şekil 3.15. DR=2,20 ve 2,27 elde etmek için yapılan deneylerin kuvvet-strok grafikleri

3.4. Derin Çekme İşleminin Sonlu Elaman Analizi

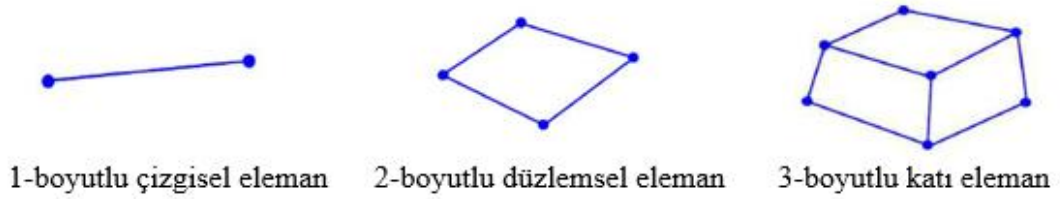
Sonlu eleman yöntemi fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Yöntem karmaşık yapıların, üzerinde hesaplama yapılabilecek daha küçük yapılar ile modellenmesi esasına dayanır. Bu fikri günlük hayatta da birçok uygulamada kullanırız. Örneğin bir eğrinin boyunu hesaplamak istesek ya da bir dairenin çevre formülü kullanmadan çevresini hesaplamak istesek eğri üzerinde, boyunu hesaplayabildiğimiz düz doğrular çizip bunları toplayabiliriz. Bu yöntemle belli bir doğrulukta eğrinin boyunu hesaplamış oluruz. Kullanacağımız düz çizgilerin boyu ne kadar küçük olursa o kadar gerçeğe yakın sonuç elde ederiz. Çizgilerin hepsinin boyunun eşit olması şart değildir. Önemli olan onların toplamıdır. Ayrıca dar köşelerde düz çizginin boylarının küçültülmesi daha hızlı bir hesaplama ve daha hassas bir sonucu elde etmek için iyi bir strateji olur.

Sonlu eleman yöntemi ile parça modellenirken, model küçük parçalardan oluşan temel elemanlara ayrılır. Buna mesh işlemi denir. Her elemanın köşelerinde düğüm noktaları vardır. Hesaplamalar bu düğüm noktaları üzerinde gerçekleştirilir. Dolayısı ile fiziksel ortam önce elemanlara bölünür (Şekil 3.16) ve elemanların köşe noktaları ise fiziksel ortamı temsil eden noktalar uzayı olmuş olur. Elde edilen sonuçlar bu noktaların üzerindeki değerlerdir. (Bazı durumlarda noktaları birleştiren çizgiler üzerinde de olabilir.)



Şekil 3.16. Geometrik model, sonlu eleman modeli ve sonuç modeli

Parça şekline ve modelleme tipine göre eleman tipleri çeşitlilik gösterir. Sonlu eleman modeli tek boyutlu (çizgi model), iki boyutlu (düzlem model) ve üç boyutlu (katı model) olabilir (Şekil 3.17). Modellemenin şekline göre eleman tipi atanır.



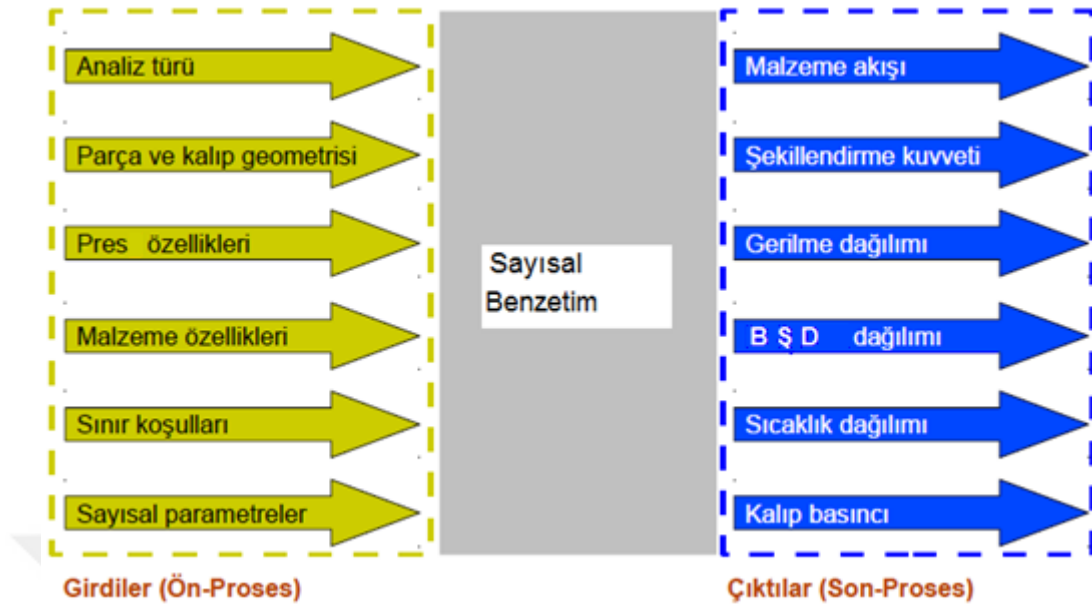
Şekil 3.17. Eleman tipleri

Sonlu eleman modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle geometrik modeli hazırlamak gerekir. Ardından ağ oluşturma işlemi ile eleman ve düğüm noktaları elde edilir (Çayıröğlu, 2013).

3.4.1. Simufact Forming programı

Simufact; metal şekillendirme, mekanik birleştirme, kaynak ve hızlı prototipleme uygulamaları için benzetim programları geliştiren, Almanya merkezli bir yazılım şirkettir. Sayısal benzetim konusunda sektörün en büyük grubu olan MSC.Software bünyesinde yer alan Simufact'ın geliştirdiği Simufact Forming programı ile soğuk, ılık ve sıcak dövme, sac şekillendirme, hadde, ısıl işlem prosesleri gerçeğe en uygun şekilde analiz edilebilir. Simufact Forming, imalat sektörü için özel olarak geliştirilmiş bir sayısal benzetim yazılımıdır.

Simufact Forming benzetim programında girdiler ve çıktılar bir şema halinde Şekil 3.18'de gösterilmiştir (Netform, 2015).



Şekil 3.18. Sayısal benzetim girdi ve çıktıları

3.4.2. Teorik modelleme

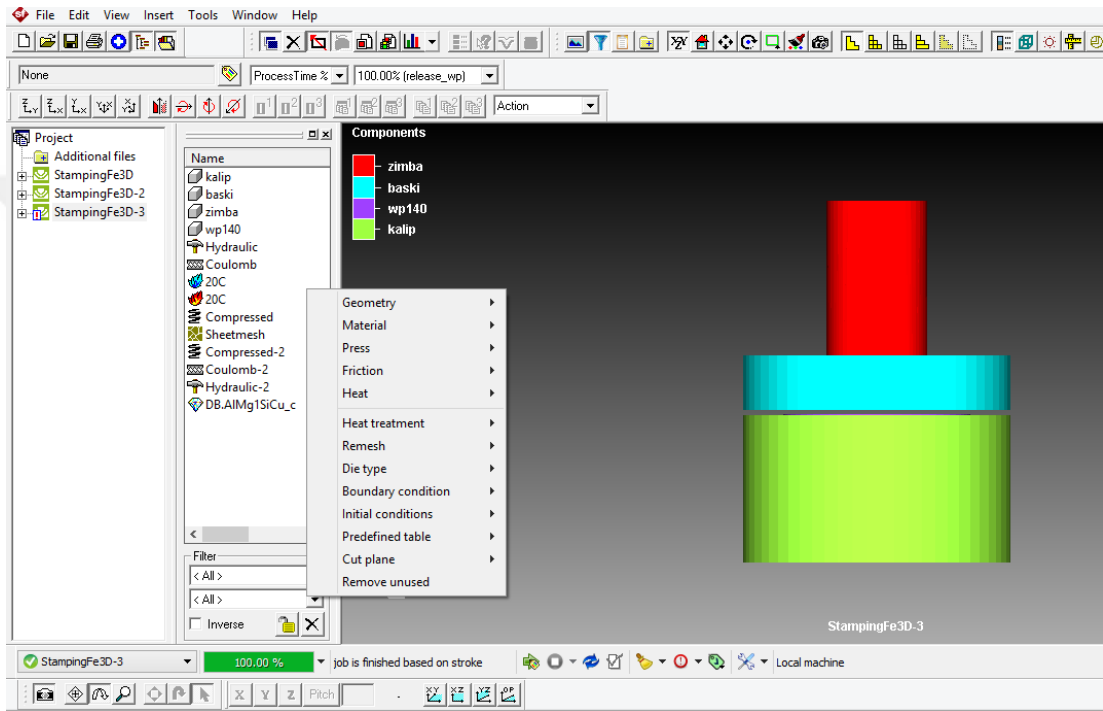
Kalıp sistemi sırasıyla zımba, baskı plakası, sac ve matrizen oluşmaktadır. Oluşturulan modelin çalışma sisteminde matris sabit kalırken, sac baskı plakası tarafından uygulanan kuvvet etkisiyle kalıp ile baskı plakası arasına sıkıştırır ve zımbanın doğrusal hareketi matris içinden geçerken sacı şekillendirmektedir.

3.4.3. Modelin tasarlanması

Teorik modelleme hazırlanırken geometrik modeller SolidWorks katı modelleme programında hazırlanmıştır. Kalıp elemanları ile birlikte bütün parçalar Z ekseninde 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Modellenen parçalar kalıp sistemine yerleştirilirken zımbanın düşey doğrultuda aşağı doğru hareketi esas alınmıştır. SolidWorks 2013 programında modellenen parçalar stl (STereoLithography) formatına çevrilerek Simufact Forming programına aktarılmıştır.

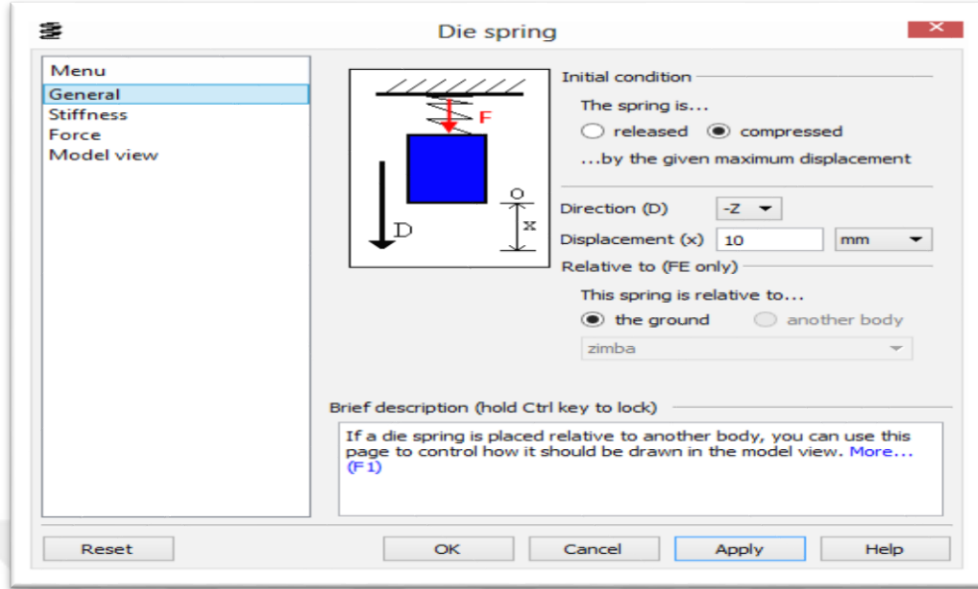
3.4.4. Analiz girdileri

Kullanılacak malzeme Simufact Forming programının kütüphanesinden seçilmiştir. Yapılan analizlerde sabit hızlı hidrolik pres kullanılmıştır. Hızlar 2,5 mm/s ile 15 mm/s arasında seçilmiştir. Sürtünme katsayısı sabit olup 0,10 ile 0,17 arasında değerler verilmiştir. Parça ve kalıp sıcaklıkları 20°C alınmıştır (Resim 3.16).



Resim 3.16. Analiz girdilerinin oluşturulması

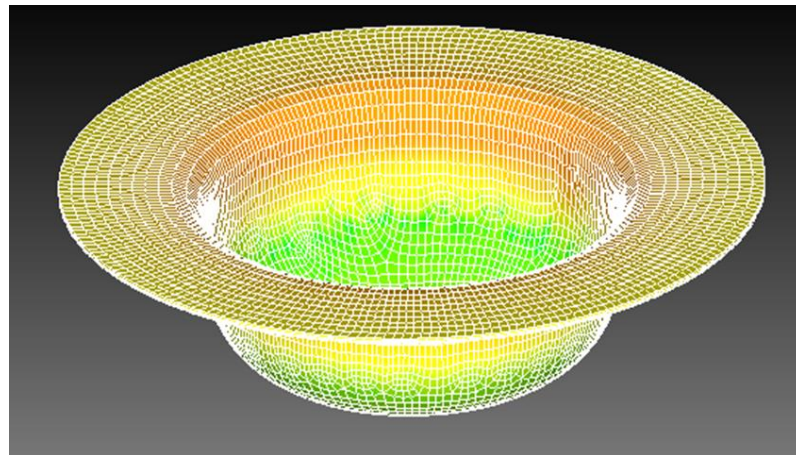
Baskı plakası kuvvetini tanımlamak için baskı plakasına –Z yönünde sıkıştırılmış yay kullanarak 0 ile 120 kN arasında sabit kuvvetler uygulanmıştır (Resim 3.17).



Resim 3.17. Baskı plakası kuvvetinin tanımlanması

3.4.5. Modele ağ örme

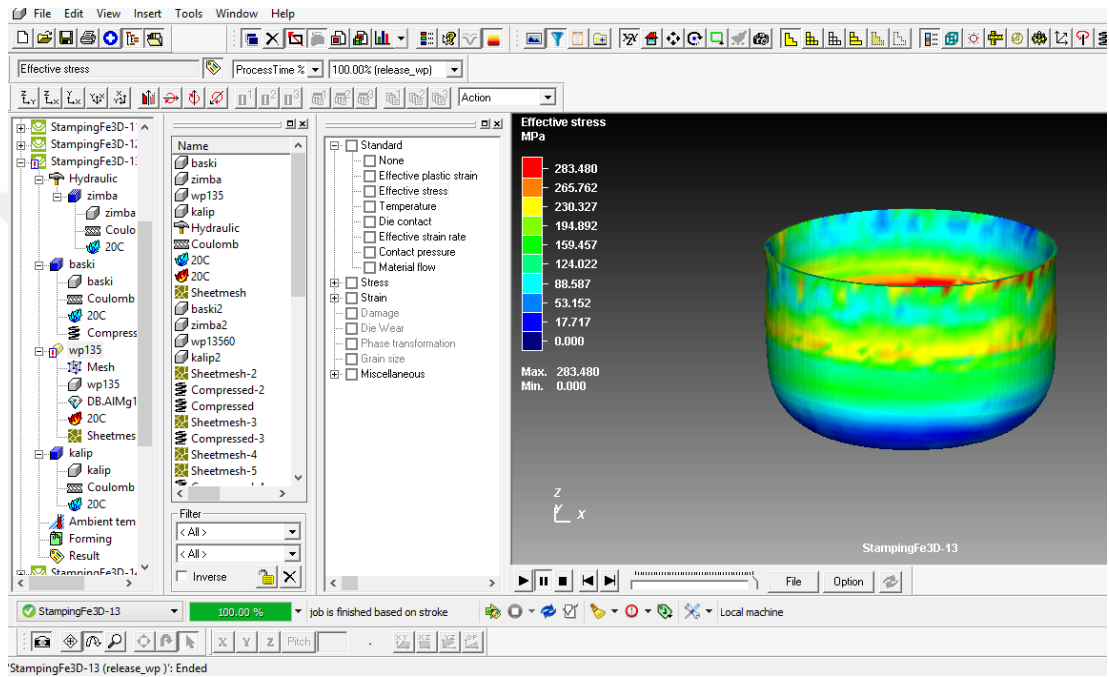
Yapılan analizlerde zimba, baskı plakası ve kalıp rijit cisim olarak tanımlanmıştır. Sac malzeme için altı yüzlü eleman tipi ile ağ örülmüştür. Üç boyutlu olarak yapılan analizlerde sac üzerindeki ağ deformasyon sonuçlarının daha sağlıklı alınabilmesi için 2 mm eleman boyunun yanında kalınlık yönünde 3 sıra eleman kullanılarak analizler yapılmıştır (Resim 3.18).



Resim 3.18. Sac malzemenin ağ örülmüş görüntüsü

3.4.5. Analiz sonuç görüntüleme

Simufact Forming programı ile yapılan analizlerde, parça üzerindeki gerilme dağılımı, deformasyon dağılımı, şekillendirme kuvveti değişimi, malzeme akışı, sıcaklık dağılımı, kalınlık değişimi parametreleri ve kalıp üzerindeki gerilme, deformasyon ve sıcaklık dağılımı olmak üzere pek çok çıktı parametreleri incelenebilmektedir (Resim 3.19).



Resim 3.19. Analiz sonuç görüntüleme ekranı

3.5. Analiz Çalışmaları

3.5.1. Derin çekme hızının çekme kuvvetine etkisinin benzetim ile analizi

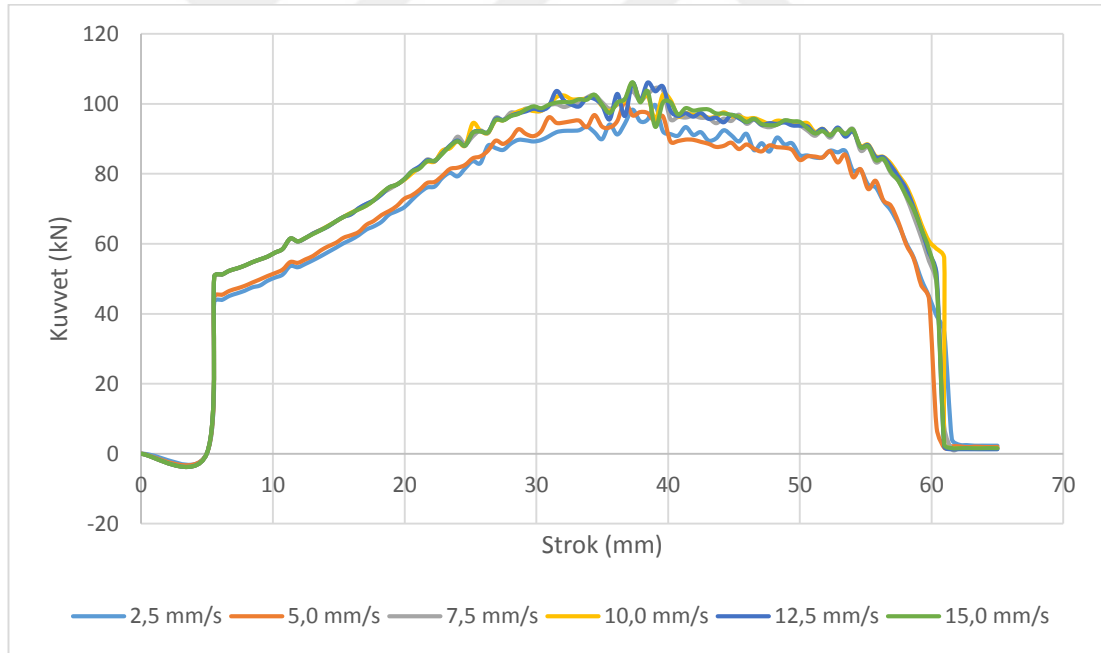
Yapılan çalışmalarda 140 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin, 50 bar baskı plakası basıncında ve farklı derin çekme hızlarında (2,50 mm/s; 5,00 mm/s; 7,50 mm/s; 10,00 mm/s; 12,50 mm/s; 15,00 mm/s) yapılan çekme analizleri sonucunda, farklı çekme hızlarının derin çekme kuvvetine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan analizlerin sonuçlarına göre derin çekme hızı arttıkça derin çekme kuvvetinin arttığı görülmektedir. AA6082-T6 malzemenin, farklı derin çekme hızlarında yapılan benzetimlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. Farklı derin çekme hızlarında yapılan analiz sonuçları

Derin Çekme Hızı (mm/s)	Analiz Tamamlanma Oranı (%)	Benzetimde Maksimum Kuvvet (kN)	Deneyde Maksimum Kuvvet (kN)	Tutarlılık (%)
2,50	100	99,63	111	90
5,00	100	100,54	112	90
7,50	100	104,53	116	90
10,00	100	105,95	121	88
12,50	100	106,07	124	86
15,00	100	106,14	127	84

AA6082-T6 malzemenin baskı plakası basıncı 50 bar ve farklı derin çekme hızlarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. Farklı derin çekme hızlarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri

3.5.2. Baskı plakası kuvvetinin derin çekme işlemine etkisinin benzetim ile analizi

Yapılan benzetimlerde 135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin, 2,50 mm/s hızda belirlenen baskı plakası basınçlarında (0 bar, 40 bar, 80 bar ve 120 bar) yapılan analizler sonucunda, baskı plakası basıncının çekme kalitesine ve çekme kuvvetine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

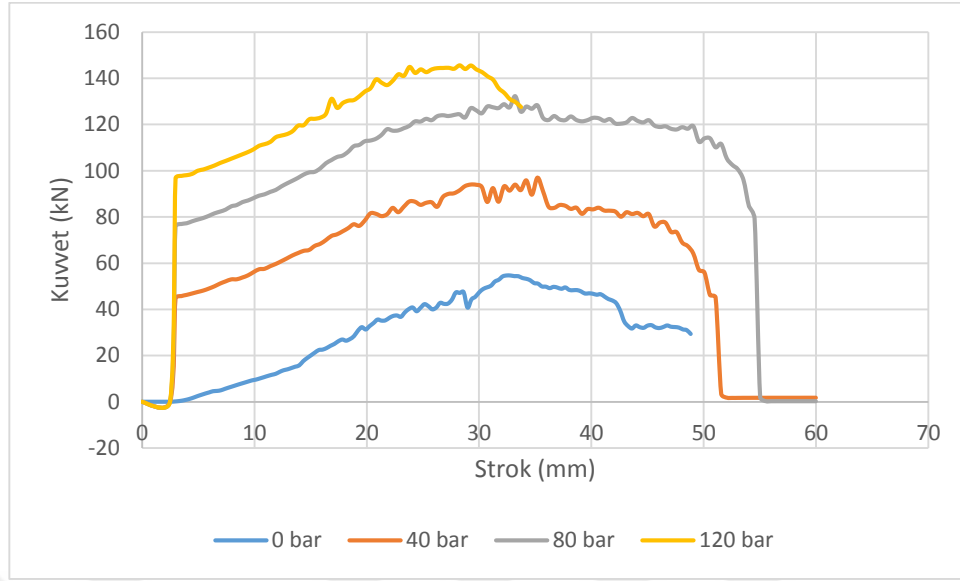
Yapılan analizlerin sonuçlarına göre baskı plakası basıncı 0 bar için çok kırışık bir ürün elde edilmiş ve kırışıklıklar kalıp boşluğuna sıkıştığından parça yırtılmıştır. 40 bar ve 80 bar için yapılan deneylerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Baskı plakası basıncının 120 bar olduğu durumda derin çekme kuvveti kritik değeri aşarak malzemenin yırtılmasına neden olmuştur.

135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.17. Farklı baskı plakası basınçlarında yapılan analiz sonuçları

Baskı Plakası Basıncı (bar)	Analiz Tamamlama Oranı (%)	Benzetimde Maksimum Kuvvet (kN)	Deneyde Maksimum Kuvvet (kN)	Tutarlılık (%)
0	81.82	54,67	67	82
40	100.00	96,96	98	99
80	100.00	132,29	137	97
120	56.79	145,62	149	98

135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki malzemenin farklı baskı plakası basınçlarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Farklı baskı plakası basınçlarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri

3.5.3. Sürtünme katsayısının derin çekme işlemine etkisinin benzetim ile analizi

Yapılan benzetimlerde sürtünmenin etkisini analiz etmek için 135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin, 40 bar baskı plakası basıncında, 2,50 mm/s derin çekme hızında ve farklı sürtünme katsayılarında (0,10; 0,12; 0,16; 0,20) yapılan analizlerde, sürtünme katsayısının derin çekme kuvvetine etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

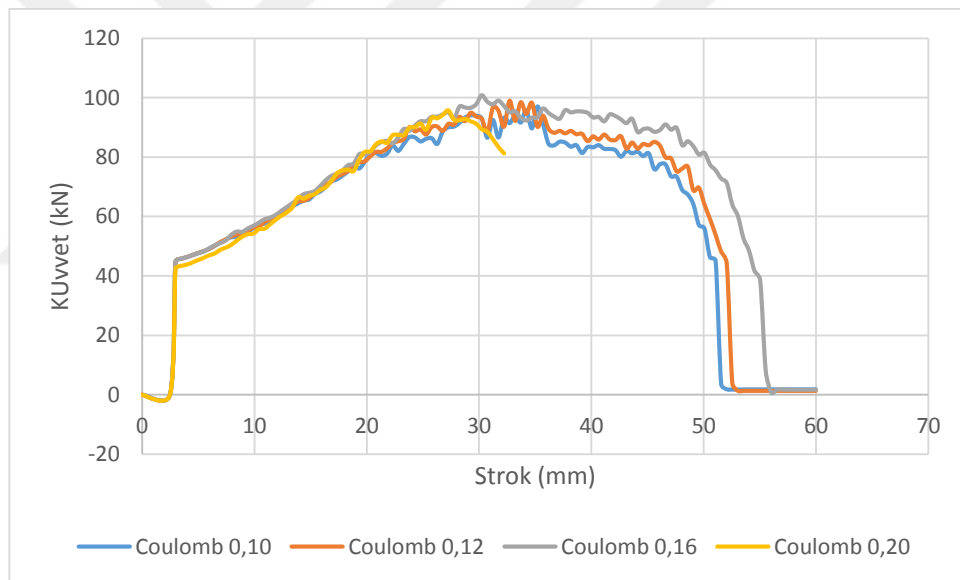
Analizler sonucunda sürtünme katsayısı arttıkça derin çekme kuvvetinin de arttığı, belirli bir değerin üzerinde malzemenin çekilemediği görülmüştür. Sürtünme katsayısının 0,20 değerinde analiz % 53,45 oranında iken durmuş ve derin çekme işlemi başarısız olmuştur.

AA6082-T6 malzemede sürtünmenin etkisini tespit etmek için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Farklı sürtünme katsayılarında yapılan analiz sonuçları

Sürtünme Katsayısı (-)	Analiz Tamamlanma Oranı (%)	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Kuvvet (kN)
0,10	100,00	283,48	96,96
0,12	100,00	282,93	98,95
0,16	100,00	309,86	100,76
0,20	53,45	309,29	95,75

AA6082-T6 malzemenin farklı sürtünme katsayılarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21. Farklı sürtünme katsayılarında yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri

3.5.4. Derin çekme oranı sınırlarının benzetim ile analizi

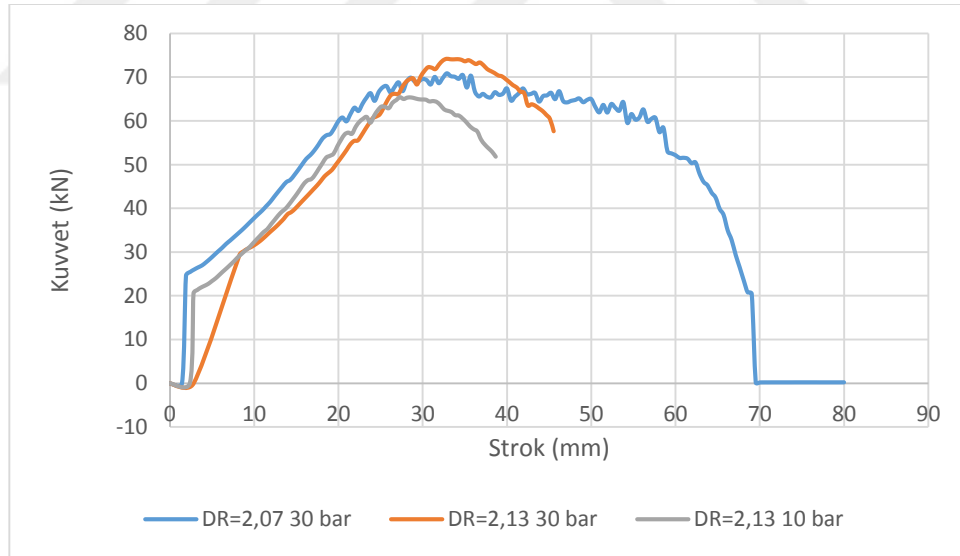
Benzetim çalışmalarında DR'nin 2'nin üzerine çıkarılabilmesi için yapılan analizlerde 2,5 mm/s derin çekme hızında ve 0,1 sürtünme katsayısı değerinde yapılan analizlerde DR maksimum 2,07 olarak elde edilmiştir. DR=2,13 için yapılan analizler başarıya ulaşmamıştır.

AA6082-T6 malzeme ile yüksek DR elde etmek için yapılan bütün çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 3.19’da verilmiştir.

Çizelge 3.19. Yüksek DR elde etmek için yapılan analiz sonuçları

DR	Başlangıç Parçası Çapı	Baskı Plakası Basıncı	Analiz Tamamlanma Oranı	Benzetimde Maksimum Kuvvet	Deneyde Maksimum Kuvvet	Tutarlılık
(-)	(mm)	(bar)	(%)	(kN)	(kN)	(%)
2,07	155	30	100,00	70,89	90	79
2,13	160	30	51,19	74,15	79	94
2,13	160	10	46,20	65,41	72	91

AA6082-T6 malzeme ile yüksek DR elde etmek için yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22. Yüksek DR elde etmek için yapılan analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri

4. DENEY VE BENZETİM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

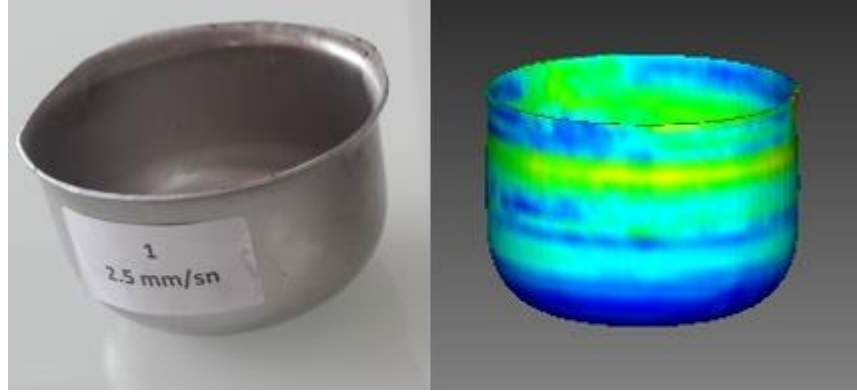
4.1. Derin Çekme Hızının Derin Çekme Kuvvetine Etkisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

140 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin 50 bar baskı plakası basıncında ve farklı derin çekme hızlarında (2,50 mm/s; 5,00 mm/s; 7,50 mm/s; 10,00 mm/s; 12,50 mm/s; 15,00 mm/s) yapılan deney ve analizlerin sonuçları arasında maksimum derin çekme kuvveti referans alındığında %84 ile %90 arasında uyum vardır. Düşük hızlarda sonuçlar daha yakın iken derin çekme hızı arttıkça sonuçların arasındaki fark artmakta olup tutarlılık yeterli düzeydedir (Çizelge 4.1).

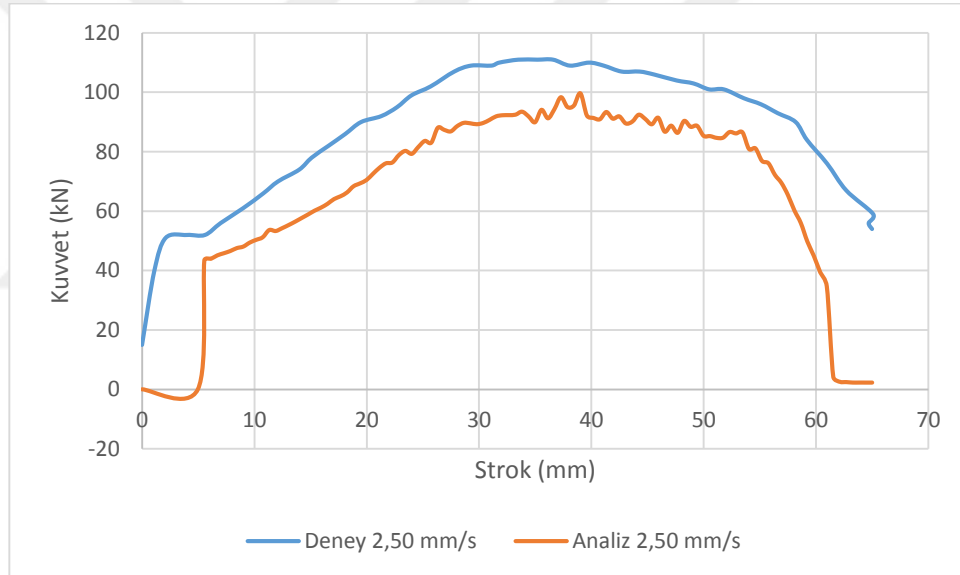
Çizelge 4.1. Farklı derin çekme hızlarında deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Deney No	Derin Çekme Hızı (mm/s)	Deney Sonucu	Benzetim Tamamlanma Oranı (%)	Deneyde Maksimum Kuvvet (kN)	Benzetimde Maksimum Kuvvet (kN)	Tutarlılık (%)
1	2,50	Hasarsız	100	111	99,63	90
2	5,00	Hasarsız	100	112	100,54	90
3	7,50	Hasarsız	100	116	104,53	90
4	10,00	Hasarsız	100	121	105,95	88
5	12,50	Hasarsız	100	124	106,07	86
6	15,00	Hasarsız	100	127	106,14	84

AA6082-T6 malzemenin 50 bar baskı plakası basıncında ve 2,50 mm/s derin çekme hızında deney ve benzetim ile elde edilen silindirik derin çekme ürünleri Resim 4.1’de verilmiştir. Aynı şartlar için kuvvet-strok grafikleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Resim 4.1. 2,50 mm/s derin çekme hızında deney ve benzetim sonucu elde edilen silindirik derin çekme ürünleri



Şekil 4.1. 2,50 mm/s derin çekme hızında deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri

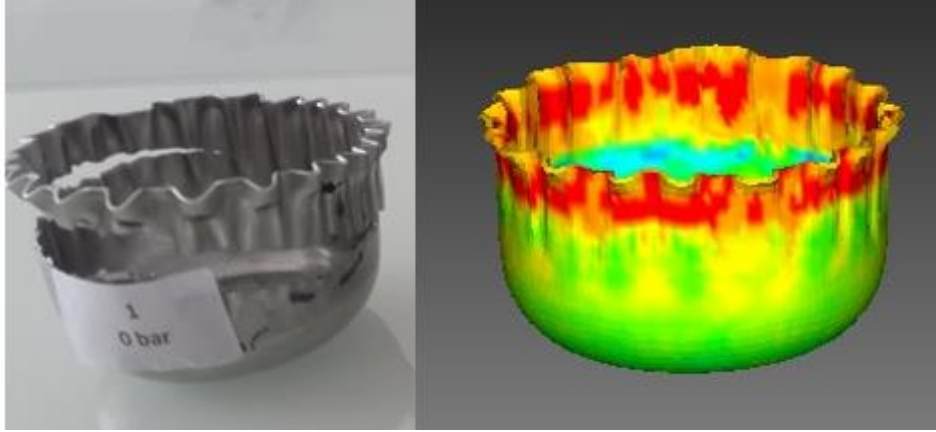
4.2. Baskı Plakası Kuvvetinin Derin Çekme İşlemine Etkisinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

135 mm çapında ve 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin 2,50 mm/s hızda ve belirlenen baskı plakası basınçlarında (0 bar, 40 bar, 80 bar, 120 bar) yapılan deney ve analizlerin sonucunda baskı plakası basıncının derin çekme kalitesi ve çekme kuvvetine etkileri karşılaştırılmış olup sonuçlar arasında % 82 ila % 98 uyum olduğu görülmüştür (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Farklı baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

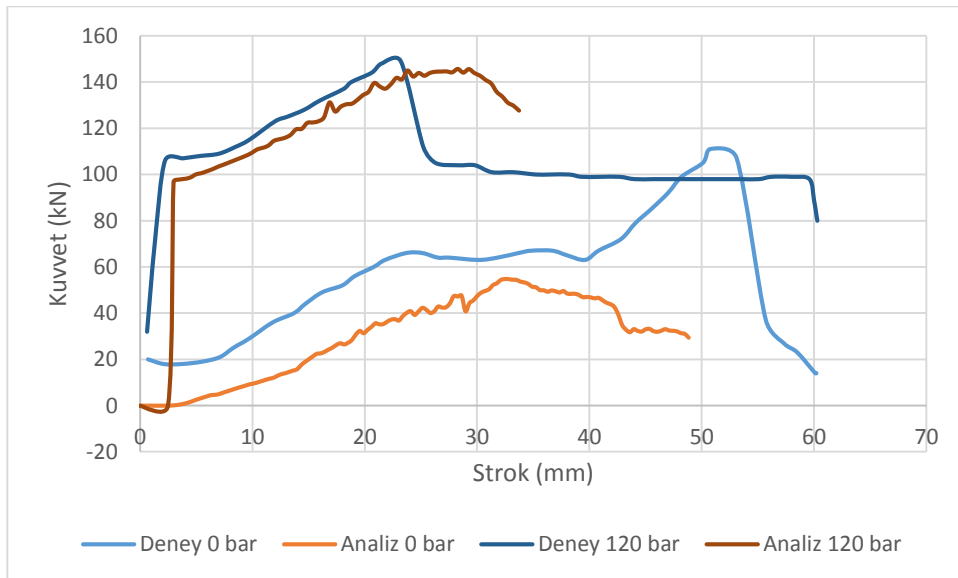
Deney No	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Deney Sonucu	Benzetim Tamamlanma Oranı (%)	Benzetimde Maksimum Kuvvet (kN)	Deneyde Maksimum Kuvvet (kN)	Tutarlılık (%)
1	0	Çok Kırışik	81,82	54,67	67	82
2	40	Hasarsız	100,00	96,96	98	99
3	80	Hasarsız	100,00	132,29	137	97
4	120	Yırtılma	56,79	145,62	149	98

Baskı plakası basıncının bulunmadığı deney ve analiz sonuçlarında çok kırışik bir ürün elde edilmiştir. Kırışiklikler kalıp boşluğuna sıkıştığından parça yırtılmıştır (Resim 4.2). 40 bar ve 80 bar için yapılan deneylerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Baskı plakası basıncının 120 bar olduğu durum için yapılan deneyde derin çekme kuvveti kritik değerin üzerine çıkmış ve malzeme yırtılmıştır.

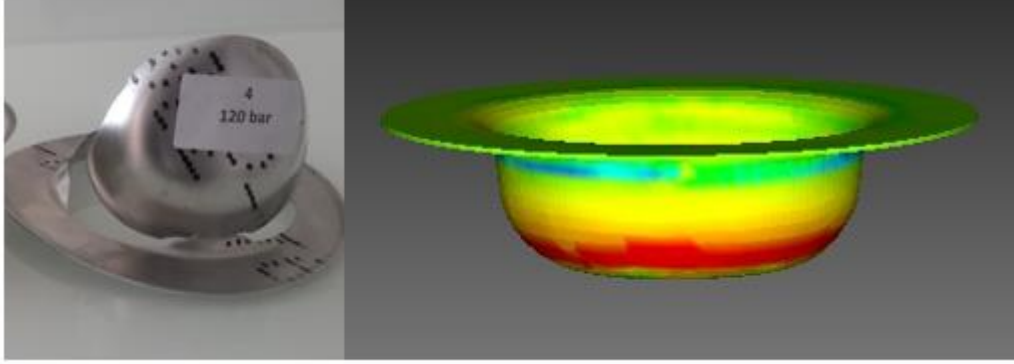


Resim 4.2. 0 bar baskı plakası basıncında deney ve analiz sonucu elde edilen silindirik derin çekme ürünleri

AA6082-T6 malzemenin 0 ve 120 bar baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-strok grafikleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Grafiklerin parça yırtıldıktan sonra farklı olmalarının nedeni benzetim programının parça hasara uğradığı anda durmasıdır. Deneylerde kullanılan pres ise strok tamamlanana kadar işleme devam etmektedir (Resim 4.3).

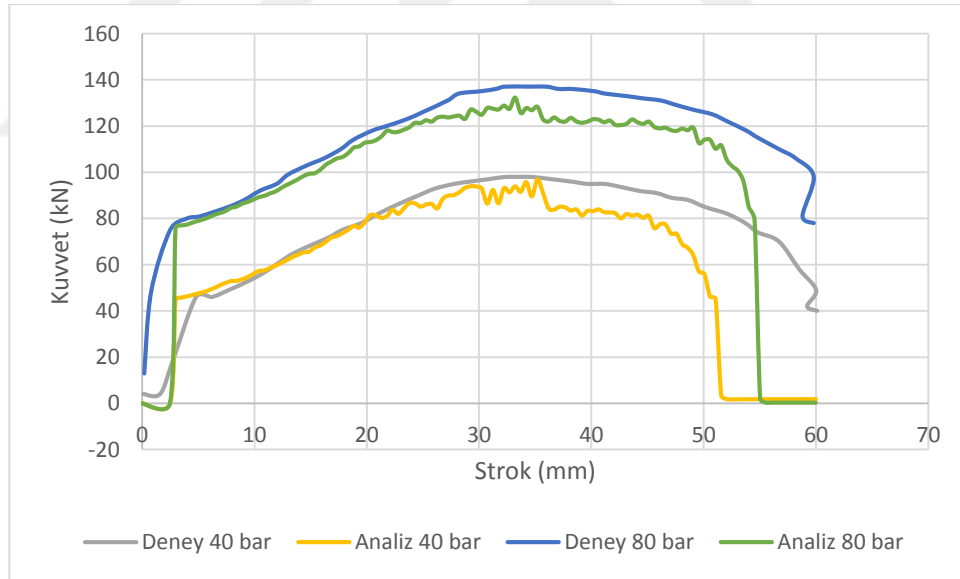


Şekil 4.2. 0 ve 120 bar baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri



Resim 4.3. 120 bar baskı plakası basıncında deney ve analiz sonucu elde edilen silindirik derin çekme ürünleri

40 ve 80 bar baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonucunda elde edilen kuvvet-strok grafikleri ise Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. 40 ve 80 bar baskı plakası basınçlarında deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri

4.3. Çekme Oranı Sınırlarının Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yüksek DR elde etmek amacıyla yapılan deney ve benzetim çalışmalarının sonuçlarında maksimum derin çekme kuvveti referans alındığında % 79 ile % 94 arasında uyum vardır (Çizelge 4.3). Yapılan deney ve analizlerde DR maksimum 2,07 olarak elde edilmiştir. DR=2,13 için yapılan analizler başarıya ulaşmamıştır.

Çizelge 4.3. Yüksek DR elde etmek için yapılan deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Deney No	DR (-)	Baskı Plakası Basıncı (bar)	Deney Sonucu	Benzetim Tamamlanma Oranı (%)	Benzetimde Maximum Kuvvet (kN)	Deneyde Maximum Kuvvet (kN)	Başlangıç Sac Çapı (mm)	Tutarlılık (%)
1	2,07	30	Hasarsız	100,00	70,89	90	155	79%
2	2,13	30	Yırtılma	51,19	74,15	79	160	94%
3	2,13	10	Yırtılma	46,20	65,41	72	160	91%

AA 6082-T6 malzemenin yüksek DR elde edilmesi için yapılan deney ve analizlerden elde edilen kuvvet-strok grafikleri DR=2,07 için Şekil 4.4'te, DR=2,13 için Şekil 4.5'te verilmiştir. Grafiklerin parça yırtıldıktan sonra farklı olmalarının nedeni benzetim programının parça hasara uğradığı anda durmasıdır. Deneylerde kullanılan pres ise strok tamamlanana kadar işleme devam etmektedir.



Şekil 4.4. DR=2,07 elde etmek için yapılan için deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri



Şekil 4.5. DR=2,13 elde etmek için yapılan için deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-strok grafikleri

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Derin çekme işlemini etkileyen parametreleri incelemek amacıyla, deneysel olarak ve sonlu eleman analizleri ile çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Sabit baskı plakası basıncında, sacların farklı hızlarda yapılan derin çekme işlemlerinde, derin çekme hızı arttıkça derin çekme için gereken kuvvet de artmaktadır. Deneysel olarak ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen sonuçlar % 84 ile % 90 arasında uyum sağlamıştır.
2. Sabit derin çekme hızında, sacların farklı baskı plakası basınçlarında yapılan derin çekme işlemlerinde, baskı plakası basıncı arttıkça derin çekme için gereken kuvvet de artmaktadır. Basıncın düşük olması kırışıklıklara neden olurken, fazla olması da parçaların derin çekme işleminin yapılamamasına ve bölgesel olarak aşırı plastik deformasyon nedeniyle sacların yırtılarak hasara uğramasına neden olmaktadır. Deneysel olarak ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen sonuçlar % 82 ile % 98 arasında uyum sağlamıştır.
3. Yüksek DR elde etmek için yapılan derin çekme işlemlerinde, uygun kalıp geometrisi ile uygun sürtünme şartları (yağlama ve naylon film kullanımı) altında hesaplanan baskı plakası basıncında denemeler yapılarak maksimum 2,07 DR elde edilmiştir. Deneysel olarak ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen sonuçlar % 79 ile % 94 arasında uyum sağlamıştır.
4. AA6082-T6 deney malzemesinin çekme oranının 2,07'den daha üst değerlere ulaşabilmesi için malzemeye tavlama işlemi yapılmıştır. Tavlama işlemi sonrasında DR=2,13; 2,20 ve 2,27 için deneyler yapılmıştır. Tüm bu yapılan deneyler sonucunda hasarsız olarak DR değerinin maksimum 2,13 olduğu durumda derin çekme işlemi gerçekleştirilebilmiştir.

5. Deneysel çalışmalarda sürtünmeyi azaltmak için deney sacı ile matris arasına yarı sentetik bor yağı uygulanmıştır. Naylon film kullanımının etkisini görebilmek için sac ile kalıp arasına 1 kat ve yine sac ile kalıp arasına 2 kat naylon film yerleştirilip deneyler tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda naylon film kullanımının sürtünmeyi azaltıp, gereken derin çekme kuvveti değerini düşürdüğünü görülmüştür. 2 kat naylon film kullanılması bir fayda sağlamamıştır.
6. Yapılan benzetimlerde sürtünmenin etkisini analiz etmek için farklı sürtünme katsayılarında (0,10; 0,12; 0,16; 0,20) yapılan analizlerde, sürtünme katsayısının derin çekme kuvvetine etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Analizler sonucunda sürtünme katsayısı arttıkça, gereken derin çekme kuvvetinin de arttığı, belirli bir değer üstünde malzemenin çekilemediği görülmüştür. Sürtünme katsayısı değerinin 0,20 olduğu durumda benzetim işleminin % 53,45 olduğu durumda durarak yarıda kalmış ve derin çekme işlemi başarısız olmuştur.
7. Yapılan bu çalışma ile sac levhaların SEM ile şekillendirilmesi sayesinde kalıp seti ile hidrolik pres kullanılarak yapılan fiziksel deneylere gerek kalmadan her türlü malzemenin uygun baskı plakası kuvveti, derin çekme hızı ve şekillendirme şartları belirlenebilmektedir. Böylece sanayide tasarım ve üretim aşamalarında zaman ve maliyetten büyük kazanç sağlanabilir.

Elde edilen sonuçlar ışığında, bundan sonra çalışılması gereken noktalar ve yapılabilecek öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1. Sac parçaya uygulanan tavlama işleminin parametreleri değiştirilerek, DR değeri artırılabilir. Tavlama işlemi maliyetli ve zaman alan bir işlem olduğu için çalışmalar SEM ile yapılabilir.

2. Derin çekme işleminde sıcaklığın etkisi incelenebilir. Kalıp, baskı plakası, iş parçası ve zımba ısıtılarak, değişik sıcaklıklarda gerçekleştirilen derin çekme işlemlerinde ılık/sıcak şekillendirmenin derin çekme performansına etkileri incelenebilir.
3. Yapılan benzer çalışmalarda malzemenin anizotropik özelliği ile ilgili incelemeler detaylandırılarak kulak oluşumunun engellenmesiyle parça sarfiyatı azaltılabilir.
4. Sanayide seri üretimde kullanılacak derin çekme presi projeleri geliştirilerek pres üzerinde kolay değiştirilebilir kalıplar, elektronik kumandalı basınç ayarları, parça hasara uğradığı anda işlemi durdurma sistemi, parçayı kalıba yerleştirmede lazer işaretleme sistemi ve detaylı veri alma üniteleri tasarlanabilir.
5. Detaylı pres verileri alınarak deneysel olarak ve SEM ile elde edilen sonuçların uyumunun artırılmasıyla ilgili çalışmalara ağırlık verilebilir.

KAYNAKLAR

- Akıllı, A., 2010. AA5574 Malzemesinin Derin Çekme Metodu İle Soğuk Sıcak Şekillendirilmesi Ve Sonlu Elemanlar Metodu İle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Ay, İ., 2008. İmalat Yöntemleri, Balıkesir Üniversitesi Ders Notları 2, Balıkesir.
- Bakkaloğlu, A., 2014. Sac Şekillendirme Prosesleri Ders Notları, Yıldız Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Colgan, M. and Monaghan, J., (2003) Deep drawing process analysis and experiment, *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 35-41.
- Çapan, L., 1990. Metallerde Plastik Şekil Verme, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Çapan, L., ve Demir, C., 1995. Alüminyum levhalarda derin çekilebilirlik ve mekanik özellikler arasındaki ilişkiler, *Metal Dünyası*, 27-28, 21-27.
- Çayıroğlu, İ., 2013. Bilgisayar Destekli Tasarım ve Analiz Ders Notları, Karabük Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük.
- Demiray K, 2006. Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Karabük.
- Demirci, H.İ., 2002. Yüksek Hızda Şekillendirmeye Etki Eden Kalıp Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demirci, H.İ., Yaşar, M., Demiray, K. ve Karaltı, M., 2005. Derin çekme işlemlerinde baskı plakasının cidar kalınlığı üzerindeki etkisinin ANSYS LS- DYNA İle İncelenmesi, 4th International Advanced Technologies Symposium september, 28-30, Konya.
- Duchene. L., ve Habraken A.M., 2005. Analysis of the sensitivity of FEM predictions to numerical parameters in deep drawing simulations, *European Journal of Mechanics*, 24, 614-629.
- Dwivedi, R., Agnihotri, G., 2015. Numerical simulation of aluminum and brass material cups in deep drawing process, *Materials Today: Proceedings*, 2, 1942-1950.
- Erişir, E., 2013. MMT407 Plastik Şekillendirme Yöntemleri, Kocaeli Üniversitesi Metalürji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü 4 Sac Şekillendirme ve Delme Ders Notları.

- Ertan, S., 2007. AA1050A ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarında Termomekanik Proseslerin Şekillendirilebilirliğe Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gavas, M., 2005. AL-1050 Alaşımlı alüminyum sacın kare derin çekilmesinde çekme oranı limitinin belirlenmesi, Teknoloji Dergisi, 8(2), 215-221.
- Gavas, M., ve İzçiler, M., 2006. Deep drawing with anti-lock braking system (ABS), Mechanism and Machine Theory,
- Ghosh, M., Miroux, A., Werkhoven, R. J., Bolt, P. J., Kestens, L. A. I., 2014. Warm deep-drawing and post drawing analysis of two Al–Mg–Si alloys, Journal of Materials Processing Technology, 214, 756-766.
- Göl, S., 2005. Derin Çekme İşlemine Etki Eden Parametrelerin Analizi ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gülmez, T., 2011. MAK3 351 İmal Usulleri, İTÜ Makina Mühendisliği Ders Notları, İstanbul.
- Groover, Mikell P., 2016. Principles of Modern Manufacturing, Wiley.
- Gürün, H., 2008. Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi Ve Bulanık Mantık ile Tahmini, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Güneş, A.T., 2002. Pres İşleri Tekniği, TMMOB, Cilt 2, Ankara, 15-149.
- Huang, X., Suzuki, K., Chino, Y., Mabuchi, M., 2013. Influence of initial texture on cold deep drawability of Mg-3Al-1Zn alloy sheets, Materials Science & Engineering A, 565, 359-372.
- Jayahari, L., Sasidhar, P. V., Reddy, P. P., Balunaik, B., Gupta, A. K., Singh, S. K., 2014. Formability studies of ASS 304 and evaluation of friction for Al in deep drawing setup at elevated temperatures using LS-DYNA, Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 26, 21-31.
- Karalı, M., 2005. Derin Sac Çekme İşleminde Pot Çemberi Baskısının Kontrolünün Cidar Kalınlığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Klinger, J. F., Bohn, M., 2013. Predicting dimensional deviations of structural vehicle body parts deep drawn from aluminum blanks, Procedia CIRP, 7, 353-358.

- Kilpatrick, W., Brown, D., Leacock, A. G., 2015. The finite element implementation, validation and verification of a plane stress yield criterion for use in sheet metal forming analysis, *International Journal of Mechanical Sciences*, 101-102, 363-375.
- Kumar, M., Sotirov, N., Chimani, C. M., 2014. Investigations on warm forming of AW-7020-T6 alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1769-1776.
- Laurent, H., Coer, J., Manach, P. Y., Oliviera, M. C., Menezes, L. F., 2015. Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al-Mg alloy, *International Journal of Mechanical Sciences*, 93, 59-72.
- Ma, W., Wang, B., Fu, L., Zhou, J., Huang, M., 2015. Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25, 2342-2351.
- Msolli, S., Badreddine, H., Labergere, C., Martiny, M., Robin, G., Jrad, M., Saanouni, K., Choquart, F., 2015. Experimental characterization and numerical prediction of ductile damage in forming of AA1050-O sheets, *International Journal of Mechanical Sciences*, 99, 262-273.
- Netform, 2015. Simufact Forming v13 Simulasyon Programı Temel Yazılım Eğitimi, Netform Mühendislik Makine Metal, İzmir.
- Oğuz, B., 1990. Demir Dışı Metallerin Kaynağı, Oerlikon yayınları.
- Raju, S., Ganesan, G., Karthikeyan, R., 2010. Influence of variables in deep drawing of AA 6061 sheet, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 1856-1862.
- Schuler, 1998. *Metal Forming Handbook*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Vahdat, V., Santhanam, S., Chun Y. W., 2006). A numerical investigation on the use of drawbeads to minimize ear formation in deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 176, 70-76.
- Zheng, K., Politis, D. J., Lin, J., Dead, T. A., 2016. A study on the buckling behaviour of aluminium alloy sheet in deep drawing with macro-textured blankholder, *International Journal of Mechanical Sciences*, 110, 138-150.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ERDOĞAN, Mehmet
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri: 27.10.1972 – Samsun
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (532) 475 94 45
e-mail : merdogan77@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	İTÜ/Makina Fak./Makina Müh. Bölümü	1992
Lise	Çorum Merkez Fatih Lisesi	1988

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1992-	BİLSAR Tekstil A.Ş.	Yönetici

Yabancı Dil

İngilizce (YÖKDİL: 57,5)