

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROGRESİF KALIPLA DERİN ÇEKME SÜREÇLERİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk DOĞAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

Mayıs 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PROGRESİF KALIPLA DERİN ÇEKME SÜREÇLERİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ufuk DOĞAN
(503111517)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

Mayıs 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111517 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ufuk DOĞAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“PROGRESİF KALIPLA DERİN ÇEKME SÜREÇLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ekrem Tüfekçi**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **25 Mayıs 2015**





Aileme,



ÖNSÖZ

Hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden çok şey öğrendiğim tez danışmanım Prof. Dr. Şafak Yılmaz’a böylesine zor ve derin bir çalışmayı benimle yürüttüğü için sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Makine Mühendisi Hakan Şen ve Berkay Ergene’ye; analiz çalışmalarımda bilgi ve deneyimlerini paylaşan arkadaşım Makine Mühendisi Samet Göner’e teşekkür ediyorum.

Deneyisel veri ve materyalleri temin etmemde, problemlerin çözümü için gerek teorik gerekse pratik olarak bilgi ve fikir alış verişinde bulunduğum Makine Yüksek Mühendisi Gökhan Deniz’e saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak her zaman ve her koşulda yanımda olan, bu süreçte desteklerini ve inançlarını hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Ufuk DOĞAN
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
2. SAC METALLER VE DERİN ÇEKME	11
2.1 Derin Çekme İşlemi	13
3. SAC ŞEKİLENDİRME TEORİSİ.....	17
3.1 Metallere Plastik Şekil Verme.....	17
3.1.1 Birim şekil değiştirme kavramı	17
3.1.2 Plastik şekil değiştirmede gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi	19
3.1.3 Plastik şekil değiştirmenin temel ilkeleri	20
3.1.4 Soğuk şekil değiştirme	21
3.1.5 Plastik şekil değiştirmeyi etkileyen faktörler	22
3.1.6 Mekanik işlemlerde şekil değiştirme hızının etkisi.....	24
3.1.7 Sürtünme ve yağlama	25
3.2 Mekanik Özellikler.....	27
3.2.1 Çekme deneyi.....	28
3.2.2 Gerçek gerilme - genleme eğrisi	30
3.2.3 Elastiklik modülü	31
3.2.3.1 Akma ve çekme mukavemeti	32
3.2.3.2 Uzama	35
3.2.3.3 Kopma uzaması, pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı.....	36
3.2.3.4 Anizotropi	38
3.3 Şekillendirme Sınırı Diyagramı	42
3.3.1 DC04 sac malzeme için SSD literatür özeti	48
3.4 Derin Çekme	50
3.4.1 Zimba ile kalıp arasındaki boşluk (çekme aralığı)	51
3.4.2 Kalıp kenarının (çekme kenarının) yuvarlatılması.....	52
3.4.3 Zimba kenarının yuvarlatılması	52
3.4.4 Pot çemberi kuvveti.....	53
3.4.5 Çekme kuvveti ve işi	54
3.5 Malzemenin Mekanik Davranışının İncelenmesi.....	55
3.5.1 Plak teorisi.....	55
3.5.2 Kirchhoff plak teorisi	56
3.5.3 Mindlin plak teorisi	57
3.5.4 Akma kriterleri	58
3.5.4.1 Tresca akma kriteri.....	58
3.5.4.2 Von-Mises akma kriteri.....	58
3.5.5 Pekleşme modelleri	58
4. YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	61

4.1	Parçanın Derin Çekilmesi İşlemi.....	61
4.1.1	Kalıpların 3B modelleri.....	65
4.1.2	I. Derin çekme kalıbı 3B modeli	65
4.1.3	II. Derin çekme kalıbı 3B modeli	67
4.1.4	III. Derin çekme kalıbı	67
4.2	ERD 7114 Sac Özelliklerinin Tespiti	69
4.2.1	ERD 7114 sac metalin genel özellikleri	69
4.2.2	ERD 7114 sac metalin mekanik özellikleri	69
4.2.3	Tek eksenli çekme deneyi	70
4.2.4	Anizotropi deneyleri.....	73
4.3	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz.....	74
4.3.1	ANSYS ile modellemenin yapılması	75
4.3.2	Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi.....	83
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	85
5.1	DC04 Sac Metalinin Çekme Deneyi ile Elde Edilen Mekanik Özellikleri	85
5.2	Sac Parçanın Fiziksel Ölçülerinin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması.....	89
5.2.1	Uzunluk, genişlik ve derinlik ölçümü	89
5.2.2	Sac uzunlukları olarak SEA'nın doğrulanması	91
5.2.3	Sac kalınlıkları olarak SEA'nın doğrulanması	95
5.2.4	Deney ve analiz doğrulamasının özeti.....	100
5.3	I. II. III. Derin Çekme Analizinin Gerçekleştirilmesi	101
5.3.1	Örgü eleman yapısının tayini	104
5.4	Derin Çekme İşlemi İçin ŞSD'nin Oluşturulması	106
5.4.1	0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analiz sonuçları	106
5.4.1.1	I. Derin çekme	106
5.4.1.2	I. II. III. Derin çekme	108
5.4.1.3	I.III. Derin çekme	112
5.4.1.4	II.III. Derin çekme.....	115
5.4.1.5	0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analizinin değerlendirilmesi	118
5.4.2	0,7 , 0,5 ve 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analiz sonuçları.....	120
5.4.2.1	I. Derin çekme	120
5.4.2.2	I.II.III. Derin çekme	123
5.4.2.3	I. III. Derin çekme	126
5.4.2.4	II.III. Derin çekme.....	129
5.4.2.5	0,7 , 0,5 ve 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analizinin değerlendirilmesi	132
6.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	135
6.1	Genel Sonuçlar	135
6.2	Öneriler.....	136
	KAYNAKLAR.....	137
	ÖZGEÇMİŞ.....	143

KISALTMALAR

3B	: Üç Boyutlu
DP	: Çift fazlı
ERD	: Erdemir
IF	: Arayer Atomsuz (interstitial-free)
PŞD	: Plastik Şekil Değişirme
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
ŞSD	: Şekillendirme Sınırı Diyagramı
UHSS	: Çok Yüksek Mukavemetli Çelikler
ULC	: Çok Düşük Karbon





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Şekillendirme işlemi için kullanışlı olan ve çekme testlerinden elde edilen malzeme özellikleri [42].	27
Çizelge 3.2 : Tavlanmış çeşitli metalik malzemelerin oda sıcaklığındaki pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı değerleri [1].	38
Çizelge 3.3 : Çekilecek sac parça çapının hesaplanması için formüller [8].	50
Çizelge 3.4 : Çeşitli malzemeler için kademelendirme sayıları [8].	51
Çizelge 3.5 : Çeşitli malzemeler için pot çemberi basıncı [88].	53
Çizelge 3.6 : Derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında “d/D” oranına bağlı olarak “m” değerleri [8].	54
Çizelge 3.7 : Derin çekme işinin hesaplanmasında “x” değerleri [8].	55
Çizelge 4.1 : ERD 7114 sacının kimyasal bileşimi (%) [79].	69
Çizelge 5.1 : DC04 sac metalin mekanik özellikleri özet çizelgesi.	87
Çizelge 5.2 : I. Derin çekme sonrası deney örneğinin ölçüm sonuçları	90
Çizelge 5.3 : Kalınlık ölçüm ve analiz sonuçları	100
Çizelge 5.4 : En büyük ve en küçük genleme hesaplama formülleri [85].	103
Çizelge 5.5 : 0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analizleri özet tablosu.	119
Çizelge 5.6 : 0,7; 0,5; 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analizleri özet tablosu	133



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 11 baskıda sac metalin oluşan formu	2
Şekil 2.1 : Mukavemete göre sac metallerin sınıflandırılması [30].	11
Şekil 2.2 : Mekanik prese ait şematik bir görüntü [31].	12
Şekil 2.3 : Derin çekme işleminin oluşumu [32].	14
Şekil 2.4 : Derin çekme elemanlarının gösterimi [33].	14
Şekil 2.5 : Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu [37].	15
Şekil 2.6 : Çekilen parçayı etkileyen değişik kuvvetler [38].	15
Şekil 3.1 : Çekme gerilmesi, kayma gerilmesi ve hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirmenin tanımı [31].	18
Şekil 3.2 : Şematik olarak soğuk şekil değiştirme oranının ve tavlama sıcaklığının mekanik özellik ve mikro yapıya etkisi [31].	22
Şekil 3.3 : Ara yüzey sürtünmesinin tanımlanması [31].	25
Şekil 3.4 : Çekme deneyinin ve kuvvet-uzamaya göre çekme eğrisinin şematik görünümü [70].	28
Şekil 3.5 : Çekme eğrisi bölgeleri.	29
Şekil 3.6 : Mühendislik ve gerçek gerilme eğrileri [70].	31
Şekil 3.7 : Çekme deneyi ile elde edilen gerilme-genleme eğrisi ve akma eğrisi diyagramı [66].	33
Şekil 3.8 : Farklı metallere ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri [40].	34
Şekil 3.9 : Aynı kalınlıkta fakat farklı akma mukavemetine sahip düşük karbonlu çeliklere ait şekillendirme sınırı diyagramları [60].	34
Şekil 3.10 : Düzgün uzama ve kopma uzamasının gösterimi [47].	36
Şekil 3.11 : Pekleşme üstelinin tayini ve pekleşme üstelinin gerilme–birim şekil değiştirme grafiği üzerindeki etkisi [45,56].	37
Şekil 3.12 : Haddelemeden çıkmış sac malzeme üzerindeki anizotropi yönlerinin gösterimi. Sacdan alınan üç çekme numunesi ile malzemenin anizotropi değerleri belirlenir [61].	39
Şekil 3.13 : Anizotropi katsayısının çekme deneyi ile ölçümü [36].	40
Şekil 3.14 : Kulaklanmaya ait örnek, ferritik paslanmaz çelik X6Cr17 [62].	42
Şekil 3.15 : Metalik sac yüzeye çizilen benek örneği [63].	43
Şekil 3.16 : Çekme deneyi örneği, Erichsen deney örneği ve çentikli çekme deneyi örneği [64].	44
Şekil 3.17 : Başlangıç dairesi ve başlangıç dairesinin şekil değiştirmesinden sonraki durum [2].	44
Şekil 3.18 : Mylar bandına ait örnek [24].	45
Şekil 3.19 : Dijital kameralara ait örnekler [25].	45
Şekil 3.20 : Sac malzemenin şekillendirilmesinde karşılaşılabilecek yük durumları [65].	45
Şekil 3.21 : Ölçüm değerlerinin diyagram üzerine aktarılması ve şekillendirme sınırı diyagramının elde edilmesi [65].	46
Şekil 3.22 : DC04 sacının pekleşme üsteline göre ŞSD'nin değişimi [1].	48
Şekil 3.23 : DC04 sacının anizotropi katsayısına göre ŞSD'nin değişimi [1].	49
Şekil 3.24 : DC04 farklı kalınlıklardaki ŞSD diyagramı [1].	49
Şekil 3.25 : Silindirik bir kabın kademeli derin çekilmesi [68].	51
Şekil 3.26 : Zimba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi [69].	52
Şekil 3.27 : Pot çemberi kuvvetinin etkisi [33].	53

Şekil 3.28 : Çekme derinliği ve pot çemberi kuvvetine göre sac çekilebilirlik diagramı [33].	54
Şekil 3.29 : Üniform kalınlıktaki dikdörtgen bir plağın geometrisi ve koordinatları [75].	55
Şekil 3.30 : İnce elastik plağın düzlem gerilme halinin temsili [72].	56
Şekil 3.31 : Kirchhoff plak teorisinin kinematığı [74].	57
Şekil 3.32 : Mindlin plak teorisinin kinematığı [74].	57
Şekil 3.33 : İzotropik ve kinematik pekleşme modelinin şematik olarak gösterilmesi.	59
Şekil 4.1 : Progresif kalıp makinesinin bir görünümü	61
Şekil 4.2 : Kesme ve derin çekme aşamalarına ait görüntüler	62
Şekil 4.3 : Kesme ve derin çekme kalıplarının bir görünümü	62
Şekil 4.4 : Kesme işlemin ardından oluşan parça geometrisi ve ölçüm parametreleri	63
Şekil 4.5 : Derin çekme işleminin ardından oluşan parça geometrisi ve ölçüm parametreleri	63
Şekil 4.6 : Çanak derinliğinin mihengir ile ölçüm işlemi	64
Şekil 4.7 : Kalınlık ölçümü için parçanın kesilmiş görüntüleri	65
Şekil 4.8 : I. derin çekme kalıbı kesit görünümü	66
Şekil 4.9 : I. derin çekme kalıbı patlatılmış görünümü	66
Şekil 4.10 : II. derin çekme kalıbının patlatılmış görüntüsü	67
Şekil 4.11 : III. derin çekme kalıbının patlatılmış görünümü	68
Şekil 4.12 : I, II, ve III. operasyonlardaki zımba eğrilik yarıçapları	68
Şekil 4.13 : Çekme deneyinde kullanılan örneğin boyutları [78].	70
Şekil 4.14 : Haddeme yönüne 0^0 , 45^0 ve 90^0 hazırlanmış çekme deneyi örnekleri	70
Şekil 4.15 : Shimadzu çekme deneyi cihazı	71
Şekil 4.16 : Deney numunesinin çeneye bağlanmış görünümü	72
Şekil 4.17 : Çekme deneyi sonrası bazı kopan numunelerin görünümü	72
Şekil 4.18 : Anizotropi katsayılarını hesaplamada kullanılan çekme numuneleri	73
Şekil 4.19 : ANSYS “Workbench” giriş ekranı	75
Şekil 4.20 : Malzeme verilerinin girilmesi	76
Şekil 4.21 : I. derin çekme kalıbının “Design Modeler” da simetrik görünümü	77
Şekil 4.22 : Tüm kalıpların birlikte simetrik görüntüsü	78
Şekil 4.23 : Model penceresinde geometri özelliklerinin atanması	79
Şekil 4.24 : Kalıplar arasındaki temas yüzeyi ve özelliklerinin atanması	80
Şekil 4.25 : Kalıp parçasının örgülü görünümü ve özellikleri	81
Şekil 4.26 : İş parçası örgüsünün özellikleri	81
Şekil 4.27 : Analiz ayarları ve sınır koşullarının verilmesi	82
Şekil 5.1 : Haddeme yönüne 0,45,90 derecede hazırlanmış numunelerin çekme eğrisi	85
Şekil 5.2 : Haddeme yönüne 0,45,90 derecede hazırlanmış tüm numune testlerinin birlikte gösterildiği mühendislik gerilme-genleme diyagramları	86
Şekil 5.3 : 0,6 mm DC04 sacının derçek derilme-denleme eğrileri	88
Şekil 5.4 : DC04 malzemesinin gerçek gerilme-genleme diyagramı	89
Şekil 5.5 : Kalıpta kesmeye uğrayan sac parçanın ortalama uzunlukları	91
Şekil 5.6 : Analiz sonucunda parça uzunluğundaki yerdeğiştirme	92
Şekil 5.7 : Analiz sonucunun parça uzunluğu ölçüm dağılımındaki yeri	92
Şekil 5.8 : Analiz sonucunda parça genişliğindeki yerdeğiştirme	93

Şekil 5.9 : Analiz sonucunun parça genişliği ölçüm dağılımındaki yeri	93
Şekil 5.10 : Analiz sonucunda parça derinliğindeki yerdeğiştirme	94
Şekil 5.11 : Analiz sonucunun derinlik ölçüm dağılımındaki yeri	94
Şekil 5.12 : Parça kalınlıkları için referans alınan noktalar	95
Şekil 5.13 : Tam parça üzerinde alınan noktalar ve kalınlık ölçümleri	96
Şekil 5.14 : Tam parça üzerinde alınan noktaların kalınlık analiz sonuçları.....	96
Şekil 5.15 : Genişlik yönünde alınan kesit kalınlıklar için referas noktalar	97
Şekil 5.16 : Genişlik yönünde alınan kesit kalınlıkların analiz sonuçları.....	97
Şekil 5.17 : Uzunluk yönünde alınan kesit kalınlıklar için referas noktalar.....	98
Şekil 5.18 : Uzunluk yönünde alınan kesit kalınlıkların analiz sonuçları	98
Şekil 5.19 : Çapraz yönde alınan kesit kalınlıklar için referas noktalar	99
Şekil 5.20 : Çapraz yönde alınan kesit kalınlıkların analiz sonuçları.....	99
Şekil 5.21 : Deney numunesinin baskı ve analiz sonrasında aldığı şekiller	102
Şekil 5.22 : I. derin çekme analizi sonrası 0,6 mm sac için en büyük ve en küçük genleme diyagramı	103
Şekil 5.23 : Adaptif ve sabit örgü çözümlerinin kalınlık sonuçları	104
Şekil 5.24 : Yakınsama geçmişi ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	105
Şekil 5.25 : İlk derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği.....	106
Şekil 5.26 : İlk derin çekme analizindeki kalınlık dağılımları.....	107
Şekil 5.27 : 0,6 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD	107
Şekil 5.28 : Üç işlemde gerçekleştirilen derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği	108
Şekil 5.29 : I.II.III. derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri.	109
Şekil 5.30 : Yerel kalınlaşmanın gerçek deney numunesi üzerinde gösterimi	109
Şekil 5.31 : 0,6 mm sac kalınlığı I.II.III. derin çekme işlemi için ŞSD.....	110
Şekil 5.32 : 0,6 mm sac kalınlığına göre arındırılmış I. II. III. derin çekme işlemi için ŞSD.....	110
Şekil 5.33 : I-II-III operasyonu için $dt > \%20$ koşulundaki elemanların eşdeğer gerilmeleri	111
Şekil 5.34 : I-II-III operasyonu için çekme-basma bölgesinde ŞSD eğrisinin minimum genleme değerini aşan elemanların eşdeğer gerilmeleri	111
Şekil 5.35 : İki işlemde gerçekleştirilen derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği	112
Şekil 5.36 : I-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri	112
Şekil 5.37 : 0,6 mm sac kalınlığı I. III. derin çekme işlemi için ŞSD	113
Şekil 5.38 : 0,6 mm sac kalınlığına göre arındırılmış I. III. derin çekme işlemi için ŞSD.....	113
Şekil 5.39 : I-III operasyonu için $dt > \%20$ koşulundaki elemanların eşdeğer gerilmeleri	114
Şekil 5.40 : I-III operasyonu için çekme-basma bölgesinde ŞSD eğrisinin minimum genleme değerini aşan elemanların eşdeğer gerilmeleri	115
Şekil 5.41 : II-III işleminde gerçekleştirilen derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği.....	115
Şekil 5.42 : II-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri....	116
Şekil 5.43 : 0,6 mm sac kalınlığı II. III. derin çekme işlemi için ŞSD	116
Şekil 5.44 : 0,6 mm sac kalınlığına göre arındırılmış II-III derin çekme işlemi için ŞSD.....	117
Şekil 5.45 : II-III operasyonu için $dt > \%20$ koşulundaki elemanların eşdeğer gerilmeleri	117

Şekil 5.46 : II-III operasyonu için çekme-basma bölgesinde ŞSD eğrisinin minimum genleme değerini aşan bölgelerin eşdeğer gerilmeleri.....	118
Şekil 5.47 : 0,7, 0,5, 0,4 sac kalınlıkları için ilk derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri	121
Şekil 5.48 : 0,7 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD	122
Şekil 5.49 : 0,5 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD	122
Şekil 5.50 : 0,4 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD	122
Şekil 5.51 : 0,7, 0,5, 0,4 sac kalınlıkları için I-II-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri	124
Şekil 5.52 : 0,7 mm sac kalınlığı I-II-III derin çekme işlemi için ŞSD.	125
Şekil 5.53 : 0,5 mm sac kalınlığı I-II-III derin çekme işlemi için ŞSD.	125
Şekil 5.54 : 0,4 mm sac kalınlığı I-II-III derin çekme işlemi için ŞSD.	126
Şekil 5.55 : 0,7, 0,5, 0,4 sac kalınlıkları için I-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri	127
Şekil 5.56 : 0,7 mm sac kalınlığı I-III derin çekme işlemi için ŞSD	128
Şekil 5.57 : 0,5 mm sac kalınlığı I-III derin çekme işlemi için ŞSD	128
Şekil 5.58 : 0,4 mm sac kalınlığı I-III derin çekme işlemi için ŞSD	129
Şekil 5.59 : 0,7; 0,5; 0,4 mm sac için II-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlıkları	130
Şekil 5.60 : 0,7mm sac kalınlığı II-III derin çekme işlemi için ŞSD.....	131
Şekil 5.61 : 0,5 mm sac kalınlığı II-III derin çekme işlemi için ŞSD.....	131
Şekil 5.62 : 0,4 mm sac kalınlığı II-III derin çekme işlemi için ŞSD.....	132

PROGRESİF KALIPLA DERİN ÇEKME SÜREÇLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu tez çalışmasında, progresif kalıpla derin çekme işlemi ile üretilen DC04 sac metal parçanın sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve simülasyonu yapılmıştır. Sac malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için sacın haddeleme yönüne 0, 45, 90 derece olacak şekilde hazırlanan numuneler ile çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buradan malzemenin gerilme-genleme eğrileri, anizotropi katsayıları, pekleşme üstelleri, mukavemet katsayıları gibi analiz için gerekli parametreler elde edilmiştir. Gerilme-genleme eğrilerinde, üç haddeleme yönünde malzemenin benzer elastik ve plastik davranış gösterdiği tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinde çözücü ve çözüm yolu seçimi çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Zira, modellenen sistemin de problem çözümüne doğru bir biçimde ulaşmayı sağlayacak nitelikte olması gerekir. Bunun içinde deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının birbiri ile uyumlu olması beklenir. Birden fazla baskı ile aşamalı olarak gerçekleşen derin çekme analizleri, kapalı çözüm metoduyla ANSYS “Static Structural” modülü kullanılarak yapılmıştır.

0,6 mm kalınlığındaki sac parça progresif kalıp makinesinde üç farklı kalıp ile üç ayrı baskı işleminden geçerek derin çekilmektedir. Derin çekme işlemi sonlu elemanlar analizi ile birebir olarak modellenmeye çalışılmıştır. Öncelikle, sac metal malzemenin kesme kalıbı ile kesildikten sonra uzunluk, genişlik ve kalınlığı ölçülmüştür. Ardından, derin çekme işlemi yapılarak uzunluğu, genişliği, derinliği ve et kalınlıkları ölçülmüştür. Kesme ve derin çekme sonrası uzunluklar arasında oluşan fark ölçülmüş ve ilk derin çekme için sonlu elemanlar analizleri bu sonuçlar birbiri ile uyumlu olana dek sürdürülmüştür. Yüzeyler arasındaki sürtünme katsayıları ve pot çemberi kuvveti bilinmeyenlerini değişkenler olarak değerlendirip sonuçlar birbiri ile uyumlu olana dek analizler tekrar edilmiştir.

Derin çekme işleminde bilinmeyenler olan pot çemberi kuvveti ve yüzeyler arasındaki sürtünme katsayılarının elde edilmesinden sonra, ikinci ve üçüncü derin çekme işlemlerine geçilmiştir. Parça progresif kalıp makinesi ile I. II. ve III. işlemleri ile derin çekilmektedir. Aynı analizin içerisinde, üç derin çekme işlemi için sonlu elemanlar modeli kurularak analizler yapılmıştır. Sac parça nihai formunu üçüncü baskı sonrasında almaktadır. İşlem sayısını düşürebilmek için II.’den III. baskıya ve I.’den III. baskıya doğrudan geçiş için analizler tekrarlanmıştır. Benzer analizler daha ince sac kalınlıkları ile de tekrarlanarak hasar oluşmadan hem sacdan hemde baskı sayısından tasarruf edilebilirlik incelenmiştir. Bunun için şekillendirme sınırı diyagramı farklı sac kalınlığı ve farklı derin çekme süreçleri için oluşturulmuştur.

Analiz sonuçlarından en büyük ve en küçük genlemeler ile kalınlıklar esas olarak incelenmiştir. Elde edilen genlemeler ile literatürden alınan hasar eğrileri kullanılarak şekillendirme sınırı diyagramları oluşturulmuş ve 0,6 mm kalınlığında ki sac parçanın,

kalıplarda herhangi bir değişiklik yapılmadan, aslında iki aşamalı bir derin çekme işlemi ile de hasara uğramadan gerçekleştirilebileceği belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, sac kalınlığının en az incelme işlemi II.'den III. derin çekme işlemine doğrudan geçişte olduğu, en fazla incelme işlemi ise I.'den III. derin çekme işlemine geçişte olduğu görülmüştür. Bununla beraber, progresif kalıp makinesinde II.'den III. baskıya direk geçiş sağlanarak analiz sonucu deneysel olarak ispatlanmıştır.

Bu çalışmalara ek olarak, sac kalınlığı inceltilebilirliği ve derin çekme baskı sayısının düşürülebilirliğini incelemek için analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ile, tek baskılı derin çekme işlemlerinde zımba eğrilik yarıçapı arttıkça, sac parça kalınlığının daha az incelme, zımba eğrilik yarıçapı azaldıkça da sac parça kalınlığının daha fazla incelme sonucu ortaya koyulmuştur. Ancak birden fazla aşamada gerçekleştirilmesi gereken derin çekme işlemlerinde ise, nihai formu veren zımbaya daha benzer geometri ve eğrilik yarı çaplı bir zımba ile ilk baskıyı gerçekleştirmenin derin çekme sonunda sac kalınlığını daha az incelteceğini ve şekillendirme sınırı eğrisinin daha aşağısında çalışılabileceğini göstermiştir. Bunun sonucu olarak da, II.'den III. baskıya doğrudan geçerek sac kalınlığının 0,5 mm'ye düşürülebileceği sonucu elde edilmiştir.

Sac kalınlıkları ve şekillendirme sınırı diyagramları beraber değerlendirildiğinde, sac malzeme kalınlığının %20 ve daha fazla incelme noktalarının hasar eğrisine daha çok yaklaşan noktalar olduğu gözlemlenmiştir. Hasar eğrisini geçen ve hasara uğrayan noktaların ise sacın daha fazla incelmeye uğradığı yüzeylerde meydana geldiği sonucu elde edilmiştir.

FINITE ELEMENT ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DEEP DRAWING PROCESSES USING PROGRESSIVE DIE

SUMMARY

Deep drawing is a kind of sheet metal forming process in which a sheet metal blank is radially drawn into a forming die by a punch. The process is considered "deep" drawing when the depth of the drawn part exceeds its diameter. This can be achieved by a single step or multiple steps redrawing the part through a series of dies. The flange region experiences a radial drawing stress and a tangential compressive stress due to the material retention property. These compressive stresses (hoop stresses) result in flange wrinkles. Wrinkles can be prevented by using a blank holder, the function of which is to facilitate controlled material flow into the die radius. Higher blank holder force causes cracking in workpiece and lower blank holder force causes wrinkling so that a proper and optimal blank holder force should be used to achieve a high quality drawing process. Progressive dies are known as multi-stage dies. Punches and dies are designed so that successive stages in the forming of the part are carried out in the same die on each stroke of the press.

Throughout this study, both theoretical and experimental studies are applied over deep drawing process. A sheet metal goes into a progressive die machine with a uniform shape and leaves the line as a finished part. The part is objected to eleven operations in the machine; cutting, deep drawing, drilling in succession. In this operation, the general shape of the part is created by applying three deep drawing processes. Deep drawing process in three steps are analyzed by finite element method. ANSYS "Static Structural", an implicit solver is used in the analysis.

During the experiments DC04 sheet metal with 0,6 mm wall thickness is used. DC04 is widely used material in aerospace, automotive, white goods and many other different areas in industry. It is a suitable sheet metal for extra deep drawing processes. In order to determine its mechanical properties tensile experiments are applied. The tensile tests are done considering anisotropy of the material so that the tests are applied in three directions which are 0, 45 and 90 degrees to rolling direction. It is seen that, material shows the same elastic and plastic behavior in all directions. Because, their stress-strain curves are so similar to each other so that their behaviors are assumed as if they harden isotropically. This is a very important issue in finite element analysis because this manufacturing is modelled considering tensile test data.

The basic mechanical parameters such as Elastic modulus, Poisson ratio and Density of material is evaluated considering steel properties as 210 GPa, 0,298 and 7,85 E-6 kg/mm³ respectively. Another properties like yield strength, tensile strength, strain hardening exponent, strength coefficient, elongation at rupture are obtained from tensile experiment. These parameters are very close to each other for each direction to rolling. Their average values are evaluated as yield strength 171 MPa, tensile strength 348 MPa, strain hardening exponent 0,248, strength coefficient 613 MPa, elongation at rupture 0,5. In large deformation, use of true stress-true strain data gives more real

results. Through engineering stress-strain curve, the material behavior can be modelled up to necking point. So that, engineering stress-engineering strain data is converted into true stress-true strain data using Holloman strain hardening equation to model material's behavior after necking point.

Whether a sheet metal can be deep drawn successfully into a round cup-shaped part has been found to be a function of the normal anisotropy (plastic anisotropy) for the sheet metal. In order to determine the magnitude of normal anisotropy, a tensile test specimen is prepared and subjected to an elongation of 15% to 20%. Because cold-rolled sheets generally have anisotropy in their planar direction, the normal anisotropy of a specimen cut from a rolled sheet depends on its orientation with respect to the rolling direction of the sheet. For this condition an average anisotropy values is calculated as 1,772. This shows that the material shows high resistance in thickness direction. The other phenomenon faced during deep drawing process is earing. Planar anisotropy determines the amount of earing to be occurred during drawing process and is found as 0,375.

Deep drawing with progressive die has some unknowns like friction coefficient between surfaces and blankholder force. In order to provide a proper analysis these parameters must be obtained. To do this, the length, width, thickness and depth of the 20 parts are measured after first deep drawing process. Then the analysis of first deep drawing process is launched until the length, width, thickness and depth of the part match with the part obtained from the experiment. After obtaining friction coefficients and blank holder force, the analysis of second and third deep drawing analysis are applied. Deep drawing process are repeated by applying first and second, second and third operations in order to observe if number of deep drawing processes can be decreased or not. The same procedure, analysis on decreasing of deep drawing process, is repeated for lower sheet thickness without any failure.

Forming limit diagrams are widely used to evaluate the formability of thin sheet metals. For each analysis, forming limit diagram is constructed with principal strains obtained from analysis. For each analysis, from first to third, from second to third, first-second-third operations, forming limit diagrams are created. In the same way, diagrams are reconstructed for different sheet thickness, 0,5 and 0,4 mm. In FLDs, as the thickness of the sheet increases limit curve shifts upward and as the thickness of the sheet decreases forming limit curve shifts downward. Shifting upward shows the material has high formability property and shifting downward shows the material has low formability property. Strain hardening exponent also affects the forming curve same as sheet thickness. The tensile experiments show that DC04 has high strain hardening exponent and this means it has the property of high formability.

For 0,6 mm sheet thickness, forming limit diagrams show that workpiece does not subject to any failure in first-second-third, first-to-third, second-to-third operations. Because none of the principal strains passes above the forming limit curve. But there are some data close to forming limit curve whose thickness decreases 20% or more so that, slimming of the sheet metal above 20% notifies about the failure risk. Even so, it

is seen that the number of press can be decreased for sheet metal with 0,6 mm wall thickness because all the principal strains are located below the forming limit curve for first-to-third and second-to-third operations.

The analysis done for 0,6 mm sheet thickness is repeated for lower sheet thickness; 0,5 and 0,4 mm. It is seen that, the first deep drawing process can be successfully achieved without any damage for both 0,5 and 0,4 sheet thicknesses. When the deep drawing is done by three operations, both of the metals fail. When the operation is done by decreasing the number of steps from three to two for first-to-third press, both 0,5 and 0,4 mm thick metals fail. When two-to-third press is applied, as 0,4 mm sheet suffers damage but 0,5 mm does not suffer damage. Generally, sheet with 0,4 mm thickness suffers more damage than the sheet with 0,5 mm thickness. This is an expected result because thinner sheets are subjected more stress than thicker sheets. So that, both decreasing number of press and the sheet thickness deep drawing operation can be provided successfully.

Examination of sheet metal slimming is very important in the case of sheet metal failures. It is seen that, the punch radius plays very important role in sheet metal slimming. As the punch radius increases the sheet metal gets less thinner. As the punch radius decreases the sheet metal gets more thinner. The radius of first punch is 3,5 mm and the second one is 2 mm and the third one is variable from 2 mm to 1 mm. So, when the first deep drawing is applied using the first punch and die, the amount of decrease in 0,6 mm sheet thickness is about %16. When the second deep drawing is applied using the second punch and die, the amount of decrease in 0,6 mm sheet thickness is about %21. It shows that, for one step deep drawing operation, use of sharper punch causes more slimming. However, for multi-stage deep drawing process, things can change. When first-to-third two step deep drawing analysis is applied, the amount of decrease in 0,6 mm sheet thickness is about %42. But when second-to-third two step deep drawing analysis is applied, the amount of decrease in 0,6 mm sheet thickness is about %25. Here, things are different. So, it can be inferred that, in multi-stage deep drawing processes, use of similar punch form to final punch form in the first press leads sheet metal to becoming less thinner.

In progressive die machines, the rate of production is so high. Any improvement in his production line brings about very considerable benefits. Performed studies show that, one press operation can be removed using 0,6 mm sheet, and sheet thickness can be decreased to 0,5 mm by removing the first press operation from the manufacturing line. Removing one die saves one die cost, and decreasing sheet thickness provides very high amount of profit.



1. GİRİŞ

Küresel dünya sanayiinde ki Üretim ve İmalat sektörü, 20. yüzyılın sonlarına kadar deneme-yanılma kavramının en çok gerçekleştiği bir endüstri sistemi içerisindeydi. Günümüzde, teknoloji ve mühendisliğin eş zamanlı ilerlemesi tasarım ve imalatın gelişmesine önemli katkıda bulunmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanımının yaygınlaşması ve çeşitli test ekipmanlarının gelişimi, mühendisliği pratikliğe yaklaştırarak, deneme-yanılma adımlarını en aza indirmeyi başarmıştır.

Sac metal şekillendirme, üniversite ve sanayinin üzerinde çalıştığı en önemli proseslerden birisidir. Sac metallerin şekillendirilmesi işleminden önce, teorik alt yapıyı sonlu elemanlar analizleri ve testler ile doğrulayarak üretime geçilmesi 21. Yüzyılın başlarında akademik çalışmalar ile birlikte daha da ileriye taşınmıştır. Bu çalışmalar için, SEY paket programlarının yanında, sac metal şekillendirilebilirliğine özel yazılımlar da geliştirilmiştir. Bu gelişme, sac metal parçalardan üretilen ürünlerin yüksek doğruluk ve minimum hata ile üretilmesi gerekliliğini artan rekabet şartlarında ne derece önemli olduğunun da bir göstergesi olmuştur.

Sac metal parçalar otomotiv, beyaz eşya, havacılık ve uzay gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hammadde ihtiyacının artması, kalite, güvenlik standartlarındaki ve arz-talep dengesindeki değişimler, sektörlerdeki üreticileri ve sanayiye teknik bilgi sağlayan araştırmacıları daha yeni yöntemler ile çalışmaya teşvik etmiştir. Ayrıca, düz sacları, yüksek üretim hızlarında ekonomik olarak ve değişik formlarda şekillendirmek, bu şekillendirme yöntemlerinin yaygınlaşmasını ve gelişmesini sağlamıştır.

Sac şekillendirme işlemlerinden birisi olan ve en yaygın olarak kullanılan derin çekme işleminde, kalıplar genel olarak 3 parçadan oluşmaktadır. Birincisi ıstampa olarak nitelendirilen ve çıkıntılı bir şekle sahip olan “zımba” (punch) adını alır. İkincisi matris olarak nitelendirilen ve girintili bir şekle sahip olan “kalıp” (die) adını alır. Üçüncüsü ise, sac tutucu olarak nitelendirilen ve baskı sırasında metal akışını kontrol etmede kullanılan “pot çemberi” (blank holder) olarak adlandırılır.

Kırışma, boğumlanma, buruşma, kırılma veya yırtılma sac malzemelerin şekillendirilmesinde en sık karşılaşılan problem tipleridir. Bu sebeple, tasarımcı veya imalatçı hangi özellikte bir sac metal kullanması gerektiğini iyi bilmek zorundadır. Bunu değerlendirebilmek için, en sık ve yaygın olarak başvurulacak verilerden biri de şekillendirme sınırı diyagramı (ŞSD)'dir. ŞSD, şekillendirme sırasında problemler ile karşılaşıldığında nasıl çözüm üretilmesi gerektiği hakkında bilgi verebilmektedir. Daha tasarım aşamasında iken, ne tür problemler ile karşılaşılabilineceği ve buna göre sac malzeme seçimi ve optimizasyonunun deneme-yanılmaya olanak vermeden yapılabilmesini sağlayabilmektedir.

1.1 Tezin Amacı

Sunulan tezin amacı, progresif kalıpla derin çekme işlemi adımlarını sonlu elemanlar analizi ile optimize ederek derin çekme adımı sayısında ve sac kalınlığında tasarruf sağlayabilmektedir.

Bu amaçla, 11 operasyonda progresif kalıp kullanılarak basılan bir parçanın, ilk üç operasyonunu oluşturan derin çekme işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ve simülasyonları yapılmıştır. Parça ana geometrisini derin çekme işlemi oluşturmaktadır ve bu işlem üç baskıda elde edilmektedir. İmalatta Erdemir 7114 kalite (EN 10130 No: DC04) No'lu 0,6 mm kalınlığında düşük karbonlu ekstra derin çekmeye uygun çelik sac metal kullanılmaktadır. Şekil 1.1' de analiz doğrulamasında kullanılan örnek imalatın aşamaları görülmektedir.



Şekil 1.1 : 11 baskıda sac metalin oluşan formu

Analiz doğrulamalarından sonra, sac kalınlığını ve derin çekme adımlarını azaltmak için farklı kalıp tasarım tasarım simülasyonları çalışılmıştır. Elde edilen bulgular yorumlanarak optimum tasarım ve imalat koşulları belirlenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde derin çekme saclarının şekillendirilebilirliği üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, ERD 7114 kalite sacın Avrupa Birliği Standardı (EN) karşılığı olan DC04 üzerinde yoğunlaşmıştır.

Tisza ve Kovac [1] DC04, DC05 ve DD14 saclarının ŞSD'lerini Nakazima numunesi ile deneysel olarak incelemiş ve sac kalınlığı, pekleşme üsteli ve anizotropi katsayılarına göre değişen ŞSD'yi belirlemiştir. Diyagrama göre, pekleşme üsteli ve sac kalınlıkları arttıkça malzemenin kırılma eğrisi yukarı yönde kaymakta, yani malzemeye daha güvenli bir şekilde form verilebilmektedir.

Anket [2] doktora tez çalışmasında, 0,9 mm kalınlığında ki DC04 sacının hidromekanik derin çekme ve konvansiyonel derin çekme yöntemleri ile şekillendirilebilirliğini sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel olarak incelemiştir. Sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarını ortaya koymak için "Erichsen testi" ile şekillendirme sınırı diyagramlarını oluşturmuştur. Deney değişkenleri olarak; farklı sac malzeme çapları, şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve pot çemberi kuvveti kullanmıştır. Farklı çaplardaki DC04 sac malzemeler hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme süreçlerinde şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve pot çemberi kuvvetini değiştirerek test edilmiştir.

Faris [3] dairesel kalıp profilli metallerin derin çekme ve ütüleme işlemlerinde gerilme ve genleme dağılımını SEY ile incelemiştir. Çeyrek geometri olarak modellediği iş parçasının kalınlık değişimlerini zımba eğim açıları, farklı zımba hız ve deplasmanları için değerlendirmiştir.

Zhang ve Wang [4] anizotropik sac metallerde ki boyun vermeyi ŞSD'yi öngörmek için modellemişlerdir. Sac metal kalınlığındaki değişimi, pekleşme üsteli davranışını ve plastik anizotropi katsayılarını bularak bunların sac metal şekillendirilebilirliğine etkilerini araştırmışlardır. Buradan, pekleşme üstelinin boyun verme oluşumunu ve boyun verme gelişimini etkilediğini, sac kalınlığının ise yalnızca boyun verme gelişimini etkilediği sonucuna varmışlardır.

Gök ve Demirci [5] sonlu elemanlar metodunun gerçek bir sanayi parçasında uygulanması üzerine çalışmışlardır. Karmaşık geometriler içeren kalıp yüzeylerinde, ince çelik sac malzemenin hangi doğrultuda akacağı ve şekillendirme esnasında incelenen sacın kırılma, kırışma ve benzeri şekil hatalarının; kalıp tasarımı aşamasında

önceden görülüp önlem alınması büyük önem taşımaktadır. Derin çekme sonucu elde edilecek sac parçanın şeklini, kalınlığını, içerdiği ön gerilmeleri, çekme prosesinde kullanılacak minimum sac boyutunu, sacın malzemesini ve en uygun kalıp yüzeyleri tasarımını bilgisayar simülasyonları ile önceden görülerek maliyetten ve zamandan tasarruf etmek üreticiler için büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı “DYNAFORM 5.0” kullanılarak, AISI 1017 çelik sac malzemenin derin çekilmesi prosesi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda analiz şartları ile benzer deneysel derin çekme prosesi gerçekleştirilmiştir. Analiz ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, aralarında tutarlılık görülmüştür.

Anket ve Koruvatan [6], sac malzemelerin şekillendirilmesinde sınır diyagramının kullanımını, teorisini, çizimini, okunmasını ve yorumlanmasını incelemiş ve literatürdeki şekillendirme süreçlerini adım adım izleyerek bir şekil değiştirme diyagramı elde etmişlerdir. Çekme deneyi ve Erichsen deney numunelerinin şekil değiştirme işleminden sonra, daha önce sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan beneklerdeki uzama miktarını ölçmüşlerdir. Deney numunelerindeki şekil değiştirmeler ölçülerek ŞSD’yi oluşturmuşlardır.

Banabic ve Bunge [7] 0,85 mm kalınlığındaki DC04 sac metalin mekanik parametrelerinin varyasyonlarını incelemişlerdir. Mekanik parametrelerin yoğunluk dağılım fonksiyonlarını incelemek için toplamda 113 tek eksenli çekme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Gerilme-genleme eğrilerinin dağılımı ile, Swift pekleşme kanununun mekanik katsayılarını yeni bir yöntem kullanarak belirlemişlerdir. Bu deneysel verileri kullanarak, şekillendirme sınırı bandını “Monte Carlo” tekniği kullanarak hesaplamışlardır. Şekillendirme sınırı bandını belirlemek için, kapalı (implicit) Marciniak-Kuczynski modelini kullanmışlardır.

Gavas ve Küçükrendeci [8] anizotropik alüminyum sacdan hazırlanan değişik taslak malzeme şekillerini, kare kutu şeklinde derin çekerek incelemiştir. Çekilen tüm parçalar herhangi bir kırılma veya kopmaya uğramamıştır. Optimum taslak malzeme şekilleriyle, çekilen kutularda hurda malzeme miktarı ve buna bağlı olarak maliyetler azalmakta, ancak, hafif kırışmalar meydana gelmekte ve bu nedenle de yüzey kalitesi bozulmaktadır. Diğer taslak malzeme şekillerinden elde edilen kutularda ise, kulaklaşma/kırışma oldukça fazla olduğundan hurda malzeme miktarı ve buna bağlı olarak maliyetler artmakta, fakat özellikle köşelerdeki yüzey kalitesi daha iyi elde edilmektedir.

Karalı [9] derin sac çekme prosesi esnasında, pot çemberi kuvvetine bağlı olarak, kutu ağzında oluşan kulaklaşmaları deneysel olarak incelemiştir. Model olarak, 2 mm kalınlığa sahip Al1050 sac malzeme kullanılmıştır. Zımba ilerlemesine bağlı olarak, sabit ve değişken pot çemberi kuvvetlerinin etkileri karşılaştırılmıştır. Değişken baskılı çekmelerde, değişim eğrilerindeki farklılıkların kutu yüksekliğine ve kulaklaşmaya olan etkileri de incelenmiştir. Sabit pot çemberi kuvvetinin, çekme derinliği ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Ancak, buna bağlı olarak kutu ağzında kulaklaşmaların arttığı gözlenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalardan, teorik, deneysel ve sayısal yollarla elde edilmiş farklı baskı tiplerinin, sonucu doğrudan etkilediği gözlenmiştir. Daha derin ve daha düzgün bir kutu elde etmek için, pot çemberi kuvvetinin çekme boyunca değiştirilmesi gerektiği gözlenmiştir.

Karalı [10] silindirik derin çekme prosesinde zımba uç şeklinin cidar kalınlık dağılımına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesini yapmıştır. Zımba uç şekli değiştirilerek farklı şekillendirmeler gerçekleştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan uç şekillerinden yuvarlak, eliptik ve küresel uçlar model olarak seçilmiştir. Yuvarlak ve eliptik uçlar için farklı yarıçap değerleri referans alınarak birbirlerine göre farkı incelenmiştir. Eliptik uçlu zımbanın, zımba ilerleme eksenindeki yarıçap değeri ile ona dik eksenindeki yarıçap değerleri yer değiştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Zımba uç şeklinin kutu köşesinin oluşumunda, cidar kalınlık değişiminde ve mukavemet açısından önem arz eden boğumlanma bölgesinde farklılıklar oluşturduğu gözlenmiştir. Elde edilen veriler literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Özçelik [11] derin çekme prosesinin simülasyonunu yapmıştır. 0,6 mm kalınlıktaki ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sacdan, dikdörtgen derin çekme ürünü için, DYNAFORM sonlu elemanlar metodu simülasyonu çalışmıştır. Bu çalışmada, 4 mm, 6 mm ve 8 mm ıstampa radyüsü, 10 mm/s, 30 mm/s ve 50 mm/s şekil değiştirme hızı değişkenlerinin en büyük kalınlık azalmasına ve hasarsız ürün yüksekliğine etkisi incelenmiştir.

Siegert ve Wagner [12] derin çekme prosesi üzerine çalışmışlardır. Silindirik kutuların derin çekilmesi esnasında, sac malzemenin pot çemberi altında kalan kısmı çevresel çekme gerilmesi ve teğetsel basma gerilmesi etkisi altındadır. Sacın kırılmaması için mümkün olduğunca basma uygulanmalıdır. Bu basma, pot çemberi ve sac malzeme arasındaki ve kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünmeyi etkiler. Genel olarak, daha

yüksek basma gerilmesi, daha yüksek pot çemberi kuvveti, daha yüksek sürtünme kuvvetlerine yol açar.

Gürün [13] derin çekme kalıplarında çekmeyi etkileyen değişkenleri deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarda, değişik çekme değişkenleri kullanılarak, silindirik ve kare olmak üzere iki farklı geometride derin çekme prosesleri gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmalar, alüminyum, DKP ve pirinç malzemelerde uygulanmıştır. Derin çekme sırasında oluşan çekme kuvvetleri, ölçülmüştür. Kalıp kavisi, zımba kavisi, şekil değiştirme hızı, çekme boşluğu ve sac malzeme kalınlığı değişkenlerinin çekme prosesine etkileri incelenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak deney örneklerinde oluşan kırışıklık, kırılma, sac kalınlığı incelmesi ve çekme kuvvetleri incelenmiştir. Sac malzemenin ve çekme değişkenlerinin, sac malzemelerdeki kırışıklığı, kırılmayı ve miktarını, sac kalınlığında incelemeyi ve çekilebilirlik oranlarını doğrudan etkilediği görülmüştür.

Özek ve Bal [14] derin çekme kalıplarında matris-zımba radyüsü ve çekme oranının et kalınlığı üzerindeki etkisi konusunda çalışmışlardır. DKP 37 sacı kullanılarak kalıp ve zımbanın radyüs değişimlerinin, derin çekme oranı sınırının, baskı plakası ve kalıp açılarının et kalınlığı üzerindeki etkisini belirlemek için yapılmıştır. Baskı plakası yüzeylerine $\alpha=2,5^\circ$, $\alpha=7,5^\circ$, $\alpha=12,5^\circ$, $\alpha=15^\circ$ açılar, kalıp ve zımba köşelerine $R=10$ mm, $R=8$ mm, $R=6$ mm, $R=4$ mm radyüsler verilmiştir. Zımba çapı 30 mm, matris çapı 32,3 mm ve kalıp boşluğu 1,15 mm dir. Kalıp ve parça arasındaki sürtünmeyi azaltmak için Shell Tellus 68 yağ kullanılmıştır. Et kalınlığının ölçümü kutu üzerinde altı farklı bölgeden yapılmıştır. Çalışmada; çekme oranı sınırı “ β ”, baskı plakası açısı “ α ”, kalıp ve zımba radyüsünün artmasıyla et kalınlığının azaldığı görülmüştür [60].

Yang ve Mori [15] bir magnezyum malzemenin soğuk derin çekilmesi esnasında göstermiş olduğu şekil değiştirme davranışları üzerine çalışmışlardır. Derin çekme, oda sıcaklığında ve silindirik zımba kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; kırılma modelleri, sınır çekme oranı, şekil değiştirme yükü, kalınlık dağılımı, anizotropik etki, yaşlandırma ve takım konfigürasyonu üzerinde durulmuştur. Sonuçlar göstermiştir ki; kalıp boşluğu yerine zımba yuvarlatması (radyüs), kalınlık değişimi üzerinde daha büyük etkiye sahiptir.

Kojima ve Kamado [16] derin çekme işleminin deneysel ve numerik çalışmasını kapalı (implicit) yöntemle 3B olarak incelemiş, sınır koşulları simetrikliğinden yararlanarak hesaplama süresini azaltmak için geometrinin çeyrek parçası üzerinde çalışmışlardır.

Hariharan ve Balaji [17] sac metal parçalarda başlangıç parça boyutunu azaltacak malzeme optimizasyonu üzerine odaklanmıştır. Bir otomobil parçası olan tavan sacı, analiz için tercih edilmiştir. Analizlerde gerçek deney sistemi profillerini kullanabilmek için kalıp koordinatlarını ölçen bir bilgisayar destekli alet geometrisi geliştirilmiştir. ŞSD ve kalınlık değişimindeki azalmalar SEY ile analiz edilmiştir. Malzemelerin deneysel verileri, dairesel analiz tekniği ile elde edilmiştir. Büyük uzamalardaki fark % 2-10 ve küçük uzamalarda % 0-6 arasında değişmiştir. Bu çalışma ile % 1,57 oranında ağırlık azalması elde edilmiştir.

Kang ve Son [18] bir yakıt tankının sayısal analiz kullanarak, hidroşekillendirme ve geleneksel yöntemler ile şekillendirilmesinin mukayesesini yapmışlardır. Otomobil yakıt tankının her iki yöntemde de üretilebilmesi için, sayısal bir model ileri sürmüşlerdir. Bu model, geleneksel derin çekme yönteminde deneysel olarak doğrulanmıştır. Yakıt tankı, hidrolik şekillendirme yönteminde, geleneksel yöntemle göre daha eşit kalınlık dağılımlı olarak üretilebilmiştir. Karmaşık yapıları parçaların, hidrolik veya geleneksel yöntemler ile üretilmesi prosesinin SEY ile analiz edilmesi, alet tasarımını kolaylaştıracaktır.

Önder ve Tekkaya [19] farklı geometriye sahip iş parçalarının geleneksel ve hidromekanik derin çekme ile şekillendirilmesinin sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Analizlerde, elastoplastik malzeme modeli ve Hill 48 akma modeli kullanılmıştır. Sac malzeme olarak DC04 kullanılmıştır. Silindirik geometriye sahip zımba ile yapılan derin çekme analizleri gayet başarılıdır. % 5-10 aralığındaki incelme daha çok zımba ucuna yakın bölgede baskın olmuştur. Hidromekanik derin çekmede aynı bölgede çok az incelme gözlenmiştir. Hidromekanik derin çekmede sac malzemenin, geleneksel derin çekmeden daha az incelme, yüksek basınçlı hidrolik şekillendirmede ise en fazla incelme meydana geldiği gözlenmiştir. Derin parçaların şekillendirilmesinde hidromekanik derin çekme çok uygundur. Çünkü basınçlandırılmış sıvı, zımba ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvvetini artırır. Bu ise malzeme akışının kontrolü ile çekilebilirliği ve iş parçasının üst köşesindeki boğumlanma oluşumundan kaçınmayı olumlu yönde etkiler. Hidromekanik derin çekmede pot çemberi, kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünme kuvveti çok küçüktür.

Bu durum, sac malzemenin herhangi bir preslemeye maruz bırakılmadan dişi kalıp içerisine kolayca akışını sağlar. Hidromekanik derin çekmede incelmanın ve kalınlık farklılaşmasının daha az olması, sürtünmeleri azaltıp daha dengeli malzeme akışı sağlar. Bu durum, malzemelerin daha derin çekilebilmesini sağlar. Yüksek basınçlı hidrolik şekillendirme daha derine çekmeye uygun değilken daha karmaşık parçaların şekillendirilmesine uygundur. Çalışmada; derin çekme, hidromekanik derin çekme ve yüksek basınçlı hidrolik şekillendirme proseslerinin simülasyon sonuçları yardımıyla en uygun şekillendirme yöntemi ve en uygun proses değişkenleri üzerinde durulmuştur.

Lang ve Zhou [20] deneysel çalışmaların karmaşık, en uygun proses değişkenlerinin kararlaştırılmasının zor olması sebebiyle SEY'in uygun proses değişkenlerini tespit etmede çok faydalı olduğu üzerinde durulmuştur. Sistem tasarlanmadan ve kurulmadan önce şekillendirme süreci SEY ile analiz edilirse tasarım ve imalata hazırlık süreci oldukça kısılacaktır.

Khandeparkar ve Liewald [21] karmaşık basamaklı geometriye sahip metal kutuların hidromekanik derin çekilmesi konusunda çalışmışlardır. Düşük karbonlu bir elik olan DC04 ve paslanmaz elik DIN 1.4301 deney malzemesi olarak kullanılmıştır. 100 mm zımba çapı için, maksimum derin çekme oranı " $\beta_{0,max}=3,0$ " olan bir kalıp seti tasarlanmış ve kurulumu yapılmıştır. 200 MPa basınç seviyesine dayanacak şekilde kalıp seti tasarlanmıştır ve hazne basıncı, basınç kontrol valfi ile kontrol edilmiştir. İşlem, ncelikle LS-DYNA ile simüle edilmiştir. Deneyler, iki farklı zımba geometrisi için gerçekleştirilmiştir. Karmaşık, pozitif ve negatif geometriler zımba ucuna oluşturulmuştur. Bu zımba ile ulaşılabilecek en yüksek derin çekme oranı araştırılmıştır. DC04 için " $\beta_{0, max} = 3,0$ " ve DIN1.4301 için " $\beta_{0,max} = 2,875$ " ekme oranı sınırına ulaşılmıştır.

Chino ve Iwasaki [22] farklı sıcaklıklarda AZ31 magnezyum alaşımının, Erichsen Testi kullanılarak, gererek şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Oda sıcaklıklarında düşük "r" değerine ve yüksek "n" değerine sahip örnekler mükemmel şekillendirilebilirlik göstermiştir. Sıcaklık farkının tane büyüklüğünü etkilediği ve bu durumun şekillendirilebilirliği geliştirdiği grlmştir.

Narayan ve Narayanan [23] sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden birisi de şSD'dır. şSD,

malzemelerin farklı şartlarda uzamalarını değerlendirmek için çok önemli bir araçtır. Bu kavram, ilk olarak 1960’larda Keeler ve Goodwin tarafından ileri sürülmüştür.

Yıldız ve Kırılı [24] derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişlerdir ve çözücü olarak LS-DYNA kullanmışlardır. Çalışmada, karmaşık geometrilere sahip kalıp yüzeylerinde, çelik sac malzemenin ne doğrultuda akacağı ve şekillendirme esnasında incelen sacın kırılma, kırışma vb. şekil hatalarının; kalıp tasarımı aşamasında önceden görülüp önlem alınması, tasarım değişikliklerinin sonuçlarının kalıp imal edilmeden öngörülebilmesi için yapılması gerekenler incelenmiştir. Çalışmada, araç süspansiyon sisteminin önemli bir parçası olan askı desteği ve kalıpları, hasarsız bir şekilde imal edilmiştir. İlk modelden itibaren kalıp sistemine eklenen her sınır şartı ve özelliğin, şekillendirme prosesine etkisi rahatlıkla gözlenmiş ve üç boyutlu geometrik modelin nasıl değiştirilmesi gerektiği hakkında fikir vermiştir. Parçanın kalıptan kusursuz çıkması için gerçekleştirilecek deneme yanılmalar ortadan kaldırılmıştır. Kalıplara yapılacak kaynaklama ile malzeme ilavelerinin, kalıp ömrünü kısaltması ve imalat süresini uzatması engellenmiştir.

Metal şekillendirme proseslerinde en çok problem yaşanan proses derin çekmedir. Plastik şekillendirme prosesleri için bazı tablolar hazırlanmıştır. Bu tablolar amprik metodlarla hazırlandığından, yalnızca deney malzemesinin kullanıldığı uygulamalarda işe yaramakta ve malzemenin iki boyutta aktığı kabulü ile oluşturulmaktadır. Karışık geometrilere sahip parçaların soğuk şekillendirilmesinde bu veriler yetersiz kalmaktadır. Karmaşık yüzeylere sahip her parça için defalarca denemeler yapılmakta, kalıp tasarımı değiştirilip istenen ürün elde edilinceye kadar deneme yanılma yoluyla sonuca ulaşmaya çalışılmaktadır. Sac malzemede meydana gelen kırışmalar pot çemberina açılan kilit bölgeleri ile engellenmeye çalışılmaktadır. Ayrıca, kalıplar üzerine yapılan kaynak prosesleri kalıpta kalıcı iç gerilmeler oluşturmakta, kalıbın ömrünü kısaltmaktadır. Bu proseslerin tümü üretim maliyetini yükseltmektedir.

Çetin [25] yüksek lisans tezinde derin çekme ile soğuk şekillendirmenin sonlu elemanlar yardımıyla analiz çalışmasını yapmıştır. Derin çekme ve sonu elemanlar analizinin teorisini detaylı olarak incelemiş olup, bir deneysel ve bir numerik çalışma yaparak iş parçası üzerindeki yırtılma ve buruşmalara sebep olabilecek faktörleri teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırarak belirlemiştir.

Karaağaç ve Gürün [26] AISI 304 paslanmaz çelik sac malzemenin geleneksel olarak ve sıvı basıncıyla derin çekilebilirliklerinin SEY'yle karşılaştırmalı analizi konusunu çalışmışlardır. Geleneksel yöntemlerle yapılan derin çekme proseslerinde, kalıp yapımının maliyetli, zaman alıcı ve zahmetli olmasından dolayı bu yöntem ile üretim ekonomik olmamaktadır ve şekillendirme problemleri yaşanmaktadır. Sıvı Basıncıyla Şekillendirme “SBŞ” teknolojisi kullanılarak derin çekme kalıplama yöntemi, geleneksel kalıplama yöntemlerine göre daha ekonomik ve uygulama yönünden pratik bir yöntem olarak yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada; çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta olan AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemenin dairesel ve karesel geometrili ürünler için, geleneksel ve SBŞ yöntemi ile derin çekilebilirlikleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sanal ortamda incelenmiştir. Analizlerde AUTOFORM ticari yazılımı kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar; gerilme dağılımı, kalınlık değişimi, şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırışıklık oluşumu gibi ölçütler açısından değerlendirilmiştir.

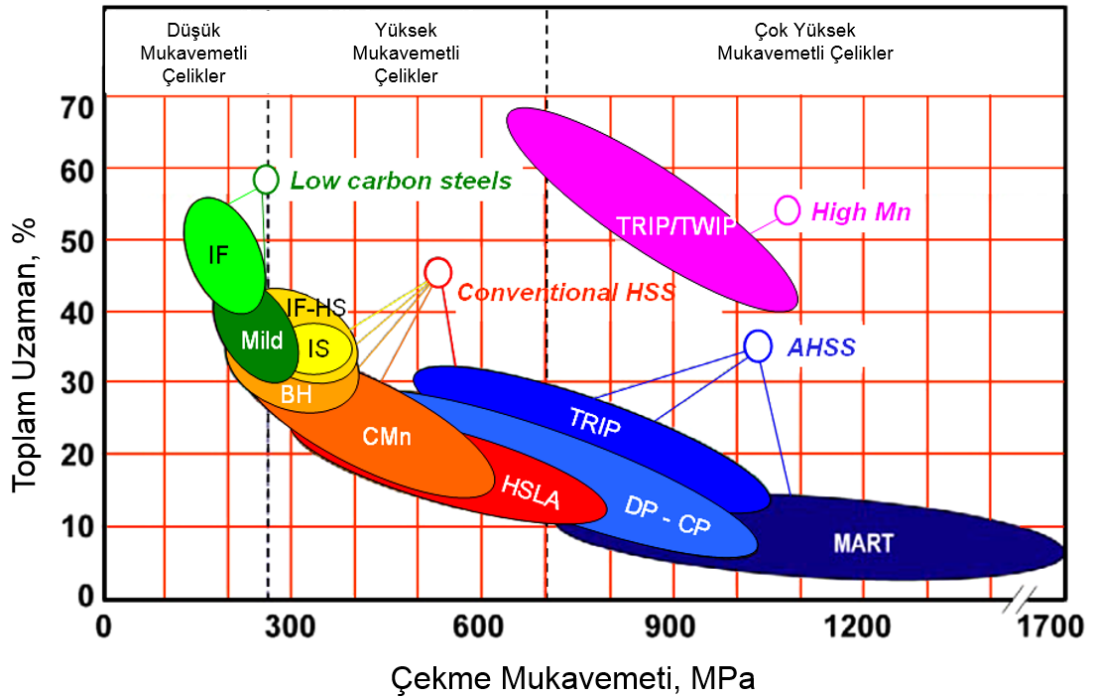
Hanggi [27] bir sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin çıkartılabilmesi için; derin çekme şartlarında çalışmaları temel alan Nakajima testinin, bilinen en iyi metot olduğunu ileri sürmüş ve Nakajima testinin yapılışını ortaya koymuştur.

Narayanasamy ve Narayanan [28] farklı kalınlıklarda, kaplanmış ve kaplanmamış, dokular arası çatlakları giderilmiş, düşük akma dayanımı ve yüksek anizotropi değerleri ile ekstra derin çekilebilme özelliğine sahip, düşük karbon içeren farklı kalınlıklarda çeliklerin şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırışma sınır diyagramlarını ortaya koymuşlardır. Derin çekmeye uygun düşük karbon içeren çeliklerin şekillendirilebilirlik verileri ile şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırışma diyagramları arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir.

Nakajima testi, farklı geometrilerdeki malzemelerin; kırılma meydana gelinceye kadar küresel zımba kullanılarak şekil değiştirmesi prensibine dayanmaktadır. Farklı genişlikteki numunelerin kullanımı ile farklı çekme derinlikleri ve farklı şekillendirme şartları sac malzeme yüzeyinde meydana getirilir. Bu numuneler büyük uzama şartlarında sac malzemenin şekil değiştirmesine izin veren numunelerdir [29]. Bu uygulamanın özelliği malzemeye bağlı olarak en fazla şekil değişimi gerçekleştirmektir.

2. SAC METALLER VE DERİN ÇEKME

Sac metalleri, üretim işlemlerine göre soğuk haddelenmiş, sıcak haddelenmiş, yüzeyi iyileştirilmiş veya sipariş imalat olarak genel gruba ayrılabilirler. Genellikle rulo sarılarak veya plakalar halinde üretim işlemleri tamamlanmaktadır. Şekil 2.1’de sac metallerin çekme mukavemeti ve kopma uzamasına göre karşılaştırılması gösterilmektedir.



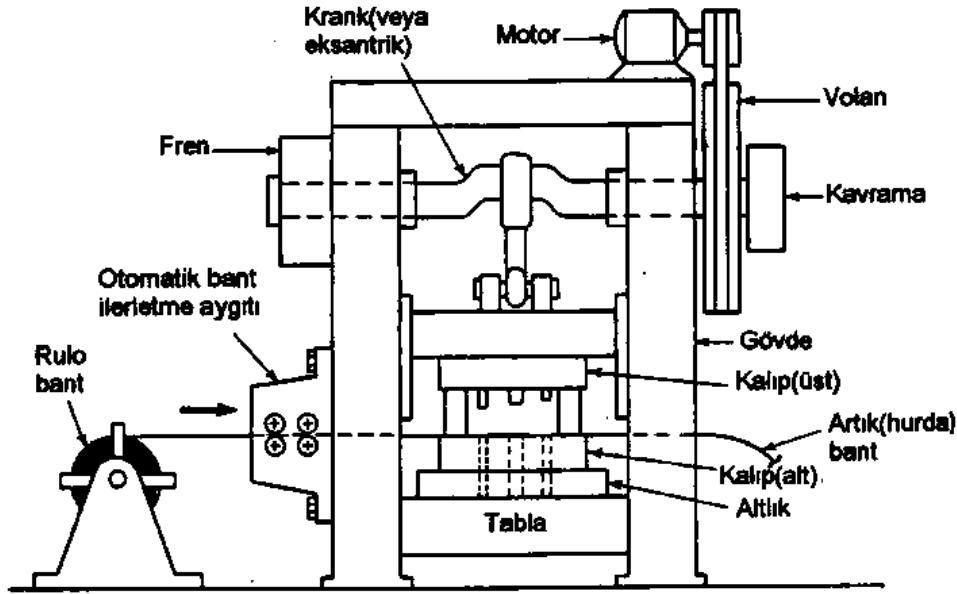
Şekil 2.1 : Mukavemete göre sac metallerin sınıflandırılması [30].

Düşük dayanımlı çelikler olarak bilinen; IF arayer atomsuz çelikler (Interstitial Free Steels) ve MILD yumuşak çeliklerin (Mild Steels) çekme mukavemetleri yaklaşık olarak 150 – 300 MPa arasındadır. Yüksek mukavemetli çelikler olarak bilinen BH, fırında sertleşebilen çelikler (Bake Hardenable Steels), IS izotropik çelikler (Isotropic Steels), IF-HS yüksek mukavemetli arayer atomsuz çelikler (High Strength Interstitial Free Steels), CMn karbon manganez çelikleri (Carbon Manganese Steels) ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin (High Strength Low Alloy Steels) çekme mukavemetleri yaklaşık olarak 250 – 800 MPa arasındadır.

Bunun yanında, çok yüksek mukavemetli çelikler (Advanced High-Strength Steels) olarak bilinen; TRIP çelikleri (Transformation Induced Plasticity Steels), DP çift fazlı çelikler (Dual Phase Steels), CP kompleks fazlı çelikler (Complex Phase Steels) ve MART martensitik çeliklerin (Martensitic Steels) çekme mukavemetleri yaklaşık olarak 450 – 1700 MPa arasındadır.

Sac şekillendirme yöntemleri genel olarak, kesme, bükme, sıvama, gererek şekillendirme ve derin çekme olarak sınıflandırılabilirler. Bu yöntemler, tek bir işlemde gerçekleştirilebileceği gibi, farklı ve birden fazla işlemde de gereksinime göre gerçekleştirilebilirler. Buna göre, basit geometrilili parçalardan ziyade, biraz daha karmaşık geometrilili parçalar, uygun kalıplar kullanılarak bu işlemlerin birden fazlasının presin tek bir çevrimi esnasında arka arkaya uygulanması ile hızlı ve ekonomik olarak üretilebilirler.

Şekil 2.2’de bir mekanik baskı makinasına ait temel parça ve ekipmanlar sergilenmiştir.



Şekil 2.2 : Mekanik prese ait şematik bir görüntü [31].

Ruloya sarılmış sac metal otomatik bant ilerletme aygıtına bağlanarak baskı işleminin yapılacağı kalıplara doğru taşınmaktadır. Mekanik preslerde tahrik sistemini, bir motor ve bir motora bağlı volan grubu veya kayış kasnak sistemi oluşturur. Krank veya eksantrik milli pres, tahrik sisteminden gelen hareketi üst kalıba iletir. Krank veya eksantrik milinin tasarım özelliği sayesinde, üst kalıp hareket ederek sac parça üzerindeki formu verdikten sonra tekrar ilk pozisyonuna geri döner. Elde edilen parça

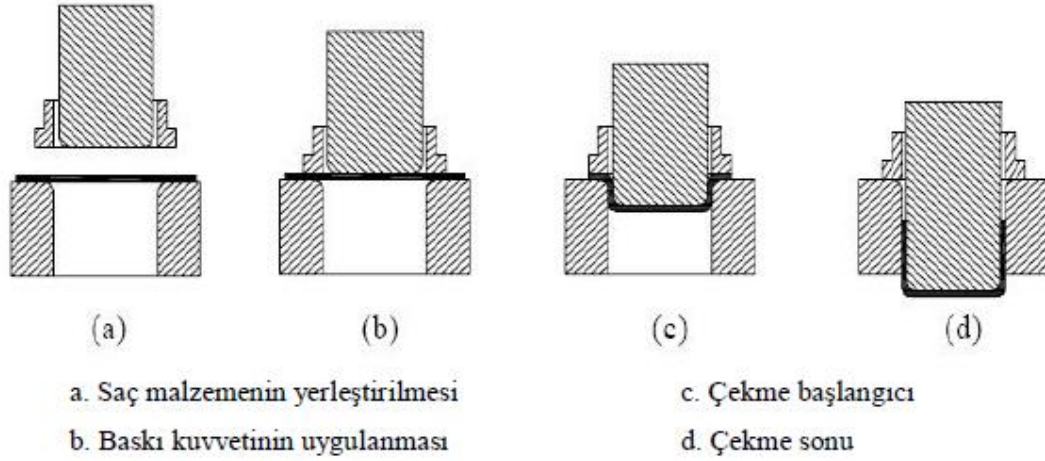
pres tablasının deliğinden aşağı düşer. Böylelikle mekanik preslerde bir çevrim tamamlanmış olur. Sac metal şekillendirme genellikle soğuk şekil verme olarak gerçekleştirilirler. Nispeten ince metal saclarda yapılan kesme ve şekillendirme işlemleride, sac metal kalınlığı 0,4 mm – 6 mm, levha kalınlığı ise 6 mm’den büyük olarak kabul edilebilir [32].

2.1 Derin Çekme İşlemi

Derin çekme, pot çemberi tarafından sıkıştırılan yassı sac malzemenin erkek tarafından dışının içerisine yerleştirilmesi esasına dayanan bir işlemdir. İşlem sonucunda elde edilen parçanın sac malzeme kalınlığı işlem başında giren sac malzeme kalınlığına oldukça yakın olması beklenir. Derin çekme işleminde aranan en önemli özelliklerden biri sacın derin çekilebilirlik özelliğinin yüksek olmasıdır. Bu özelliği etkileyen birçok parametre vardır. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir:

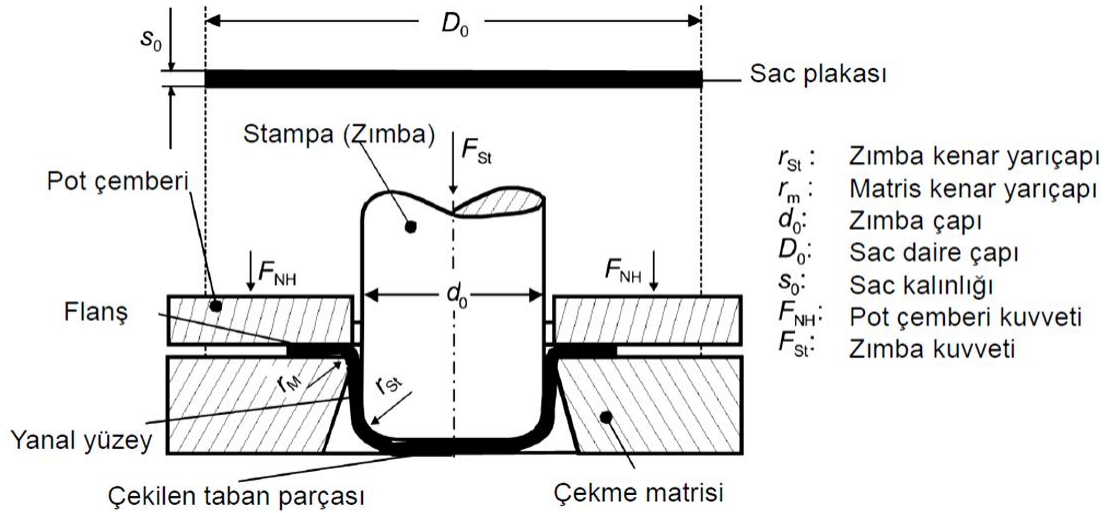
- Sac metalin mekanik özellikleri,
- Sac kalınlığı ve anizotropisi,
- Zimba – kalıp açıklığı,
- Zimba ve kalıbın köşe eğrilik yarıçapları,
- Sıkıştırma kalıbının kuvveti,
- Sürtünme ve yağlama özellikleri,
- Zimba hızı.
- Pot çemberi kuvveti olarak tanımlanabilir.

Şekil 2.3’de derin çekme işleminin şematik görünümü verilmiştir. Sac malzeme kalıplar arasına yerleştirildikten sonra, pot çemberi sac yüzeyine baskı uygulamaktadır. Ardından zimba sacı kalıp içerisine doğru iterek saca istenen form verilmiş olur.



Şekil 2.3 : Derin çekme işleminin oluşumu [32].

Zımba, kalıp ve pot çemberi derin çekme işlemini oluşturan ana elemanlardır. Şekil 2.4’de derin çekme işlemini oluşturan parçalar ve çekme sonrası sac plakanın aldığı geometrik ölçüler tanımlarıyla birlikte verilmiştir.

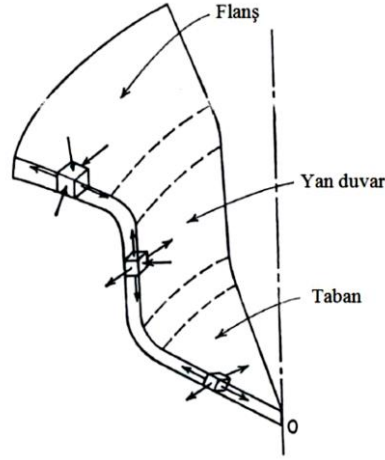


Şekil 2.4 : Derin çekme elemanlarının gösterimi [33].

Pot çemberi kuvveti, parçanın deforme olmadan ve buruşmadan şekil alabilmesi için önemli bir yer teşkil etmektedir. Pratikte, düşük karbonlu çeliklerin karbon dağılımları sac yüzeyinde eşit olmayabilmektedir. Buna göre, sac parçanın düzgün form alabilmesi için, pot çemberi kuvvetinde değişiklik yapılabilir.

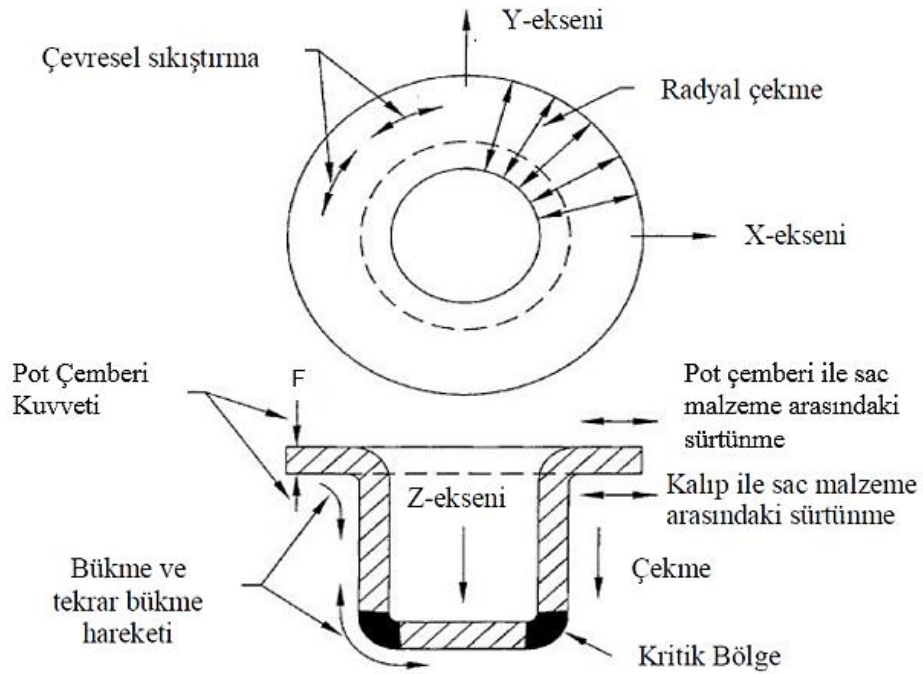
Derin çekme işleminde Şekil 2.5’de görüldüğü gibi malzeme üç ayrı bölgede farklı gerilme ve plastik şekil değiştirmenin etkisi altındadır. Zımbanın tabanına temas eden taslağın orta bölgesi zımbanın çevresi boyunca zımbanın üstüne doğru bükülür.

Bükmeden dolayı bu bölgede kalınlık bir miktar azalır. Zımbanın hareketinden dolayı parçanın tabanında iki eksenli çekme gerilmesi vardır.



Şekil 2.5 : Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu [37].

Böylece sac parça çevresel olarak basma, radyal olarak çekme gerilmelerinin etkisindedir. Ayrıca sıkıştırma kalıbı da sac düzlemine dik yönde basınç uygulamaktadır. Parçanın yan duvarlarında ise iki yönlü sadece çift eksenli çekme gerilmesi söz konusudur [31]. Şekil 2.6’da derin çekme sırasında sac parçayı etkileyen kuvvetler ve kritik bölgeler verilmiştir.



Şekil 2.6 : Çekilen parçayı etkileyen değişik kuvvetler [38].



3. SAC ŞEKİLLENDİRME TEORİSİ

Saca şekil vermenin teorisi, metallere plastik şekil verme, sac malzemenin mekanik özellikleri, şekil değiştirme sınır diyagramları, derin çekme, malzemelerin mekanik davranışı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz başlıkları altında incelenmiştir.

3.1 Metallere Plastik Şekil Verme

Metalik malzemeleri şekillendirmede kullanılan en genel yöntemlerden birisi olan plastik şekil verme proseslerinde, yani metalik proseslerde, metalik malzemeye bir kuvvet tatbiki ile malzemelerin plastik olarak şekil değiştirmesi sağlanır. Plastik bölgeye geçmiş olan malzeme deformasyona uğrayarak şekil almış olmaktadır. Bu durum metalik malzemelerin çok iyi plastik şekil değiştirme özelliklerine sahip olmasından kaynaklanır. Mekanik prosesler sonucunda, malzemelerin genellikle mekanik ve fiziksel özellikleri değişir ve daha iyi özellik kazanırlar [31].

Mekanik proseslerde uygulanan kuvvete “F”, malzemenin şekil değiştirme şartlarındaki mukavemeti “σ”, malzeme ile takım arasındaki sürtünme katsayısı “μ”, şekillendirilecek malzemelerin şekli ile ilgili geometrik faktör “c” etki eder. “σ, μ, c”yi etkileyen faktörler, dolaylı olarak uygulanan mekanik prosesi de etkiler. Bu üç faktör içerisinde bulunan, şekillendirilecek malzemenin şekil değiştirme şartlarındaki mukavemetine “σ” etki eden faktörler; şekil değiştirme sıcaklığı “T”, şekil değiştirme miktarı “ε”, şekil değiştirme hızı “ε̇” ve malzemenin metalürjik yapısı “s”dır [31].

Malzeme plastik şekil alırken, gerilme-genleme eğrisinin plastik bölgesi içerisinde davranır. Saca bu şekilde kalıcı form verilmiş olur.

3.1.1 Birim şekil değiştirme kavramı

Tek ekseninde ortalama birim şekil değiştirme; boyuttaki şekil değiştirme miktarının ilk boyuta oranı olarak tanımlanmaktadır. Buna mühendislik birim şekil değiştirmesi denir ve formül (3.1) ile hesaplanır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

Burada,

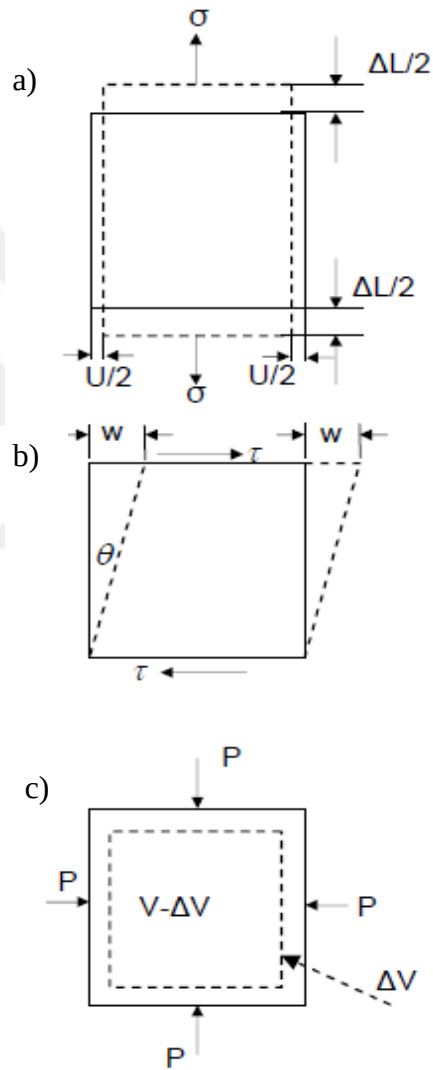
ε : Birim şekil değiştirme

ΔL : Şekil değiştirme miktarı

L_0 : İlk uzunluk

L_i : Şekil değiştirme sonundaki uzunluk

dur.



Şekil 3.1 : Çekme gerilmesi, kayma gerilmesi ve hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirmenin tanımı [31].

Şekil 3.1 (a) 'da görüleceği üzere çekme gerilmesi etkisi ile bir cisimde meydana gelen birim şekil değişimi görülmektedir. Birim şekil değiştirmeyi, boyuttaki değişimin ilk boyuta oranı yerine, tek eksendeki boyut değişiminin, o andaki boyuta oranı olarak

tanımlamak daha doğru olup; (3.2) bağıntısı ile gerçek birim şekil değiştirme “ ϵ ” belirlenebilir.

$$\epsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_i}{L_0} \quad (3.2)$$

Plastisite ve metal şekillendirme konularında gerçek birim şekil değiştirmeyi kullanmak daha faydalı olmaktadır.

Cisimde elastik şekil değişimleri sadece herhangi bir ekseninde şekil değişimi olarak kabul edilemez. İki çizgi arasındaki açının değişimi türünde de şekil değişimi söz konusu olabilir. Bir dik açıdaki açı değişimine “kayma birim şekil değiştirmesi” denir. Bu durum Şekil 3.1 (b)’de gösterilmiştir.

Uygulanan kayma gerilmesi sonucu “a” noktasındaki 90 derecelik açı, “ θ ” kadar küçülmüştür. Kayma birim şekil değiştirmesi “ γ ”, “ ω ” öteleme miktarının iki düzlem arasındaki “L” mesafesi arasındadır. Elastik şekil değiştirmelerde olduğu gibi, açı çok küçük ise, açının tanjantı açının radyan cinsinden değerine eşittir. Dolayısıyla kayma birim değiştirmesi, formül (3.3)’te ki gibi ifade edilir.

$$\gamma = \omega/L = \tan \theta \quad (3.3)$$

Kenar uzunluğu “L” olan bir kübün altı yüzüne de “P” basıncı etkiğinde (Şekil 3.1 c), kübün hacminde “ V_0 ”, “ ΔV ” kadar bir küçülme olur. Hidrostatik basınç etkisiyle bir cisimde meydana gelen birim şekil değişimi, dilatasyon (hacimsel birim şekil değişimi) olarak bilinir ve “ $\Delta = \Delta V/V_0$ ” şeklinde ifade edilir.

3.1.2 Plastik şekil değiştirmede gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi

Plastik şekil değiştirmenin değişik türleri, plastisite teorisindeki matematiksel formülleri elastisite teorisine oranla daha karmaşık hale sokmakta ve plastisite analizlerini zorlaştırmaktadır. Örneğin elastik şekil değiştirme, plastik şekil değiştirme sonuca varmak için izlenen yükleme yoluna bağlıdır. Ayrıca plastik şekil değiştirmede gerilme ile şekil değiştirme arasında, elastik şekil değiştirmede olduğu gibi doğrusal bir ilişki yoktur. Şekil değiştirme sertleşmesi olayını basit bağlantılarla plastisite teorisine uyarlamak oldukça zordur. Ayrıca, gerçek malzemelerde görülen plastik anizotropi, elastik histerizis ve Bausehinger olayı gibi olaylar plastisite teorisi ile tam olarak incelenememektedir [31].

Basit bir çekme deneyi sonucunda elde edilen grafik yardımı ile çizilen “gerçek gerilme (σ_g)-gerçek birim şekil değiştirme (ϵ_g)”, eğrileri plastisite çalışmalarında çok faydalıdır. Gerçek malzemelere ait tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelenerek bunların ideal malzemelere ait teorik gerilme şekil değiştirme eğrilerinden hangisi ile bağdaştırılabileceğine karar verilebilir. Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisine genellikle plastik akış eğrisi adı verilir. Çünkü bu eğri, belirli bir şekil değiştirme oranı için metalin plastik olarak akışını sağlayacak gerekli gerilmeleri belirtmektedir.

Plastik akış eğrisi matematiksel olarak formül (3.4)’te ki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_g = K \cdot \epsilon_g^n \quad (3.4)$$

şeklinde ki bir denklem ile ifade edilebilir.

Burada;

n = Pekleşme üsteli,

K = Malzeme sabiti

olup $\epsilon_g=1$ için bulunan gerilmeye eşdeğerdir. Bu denklem plastik şekil değiştirmenin başladığı akma noktası ile boyun verme olayının başladığı maksimum yük noktası arasındaki homojen şekil değiştirme bölgesinde geçerlidir [31].

3.1.3 Plastik şekil değiştirmenin temel ilkeleri

Metalik malzemelerin plastik şekil değiştirmesi en genel olarak belirli düzlemlerde ve doğrultularda atomların kayması ile gerçekleşir. Kaymanın kolaylıkla olmadığı durumlarda ise şekil değiştirmeye ikizleme katkıda bulunur. Metalik malzemelerin şekil değiştirme mekanizmaları; kayma, ikizlenme, tane sınırlarının kayması ve yüksek sıcaklık sünmesidir. Metalik malzemelerin elastik veya plastik şekil değişimine karşı direnci atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden ileri gelmektedir [31].

Bir atom düzleminin komşu atom düzleminde kayabilmesi için gereken gerilme formül (3.5) ile hesaplanabilir.

$$\tau_{\max} = \frac{G}{2\pi} \quad (3.5)$$

Burada; G = Kayma elastisite modülüdür.

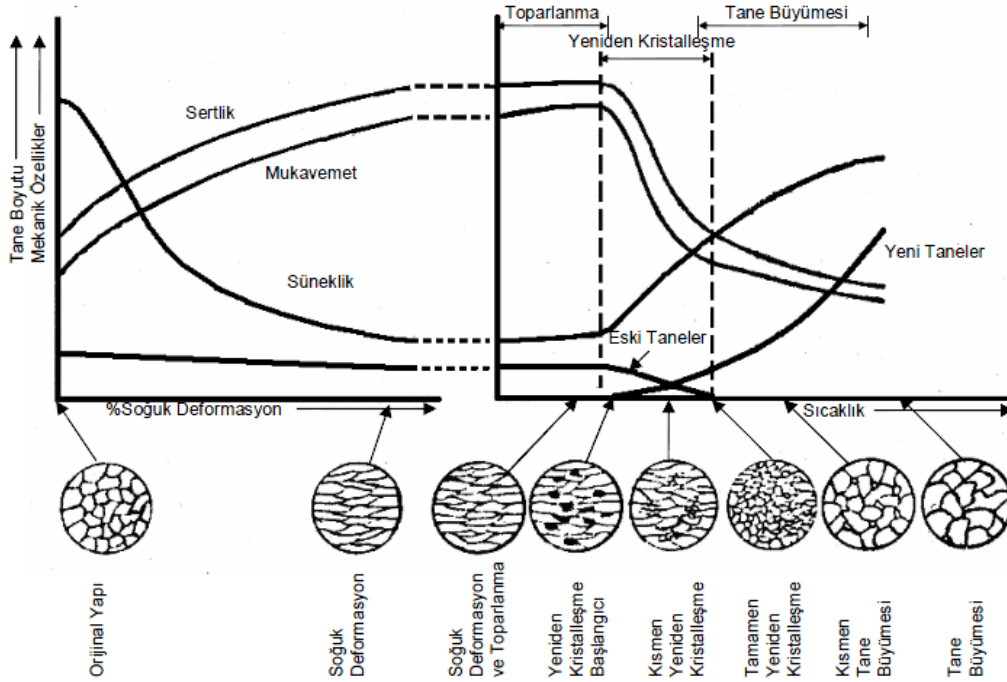
Deneyler, plastik şekil değişimine yol açan kayma gerilmesinin birçok metalde 7 kg/mm² mertebesinde olduğunu göstermiştir. Oysa, metallerde kayma modülünün 700-7000 kg/mm² civarında olduğu göz önüne alınırsa, teorik kayma gerilmesi 70-700 kg/mm² olarak hesaplanır. Teorik ile pratik değerler arasındaki fark kristal hatalarından ileri gelmektedir [31].

3.1.4 Soğuk şekil değiştirme

Soğuk şekil değiştirme malzemeye plastik şekil verme yöntemleri ile uygulanır. Plastik şekillendirme hem dislokasyonların hareketini sağlar, hem de yeni dislokasyonların oluşumuna sebep olur. Soğuk şekil değiştirme sonunda mukavemetin artması şekil değiştirme sertleşmesi nedeniyledir. Şekil değiştirme sertleşmesi, dislokasyonların birbirleri ve dislokasyonların hareketini zorlaştıran çeşitli engeller ile etkileşimi sonucunda oluşur. Soğuk şekil değiştirme ile malzeme mukavemetindeki artış, soğuk şekil değiştirme miktarı ile orantılıdır [31].

Soğuk şekil değiştirme sonucunda malzemenin taneleri şekil değişimi yönünde uzar ve belirli kristallografik doğrultularda yönlenir. Tanelerde dislokasyon yoğunluğunun artması yanında birçok atom boşluğu da meydana gelir. Aynı zamanda malzemenin yoğunluğunda bir azalma görülür.

Soğuk şekil değiştirme sırasında sarf edilen enerjinin bir kısmı dislokasyon enerjisine çevrilir, bir kısmı ise ısı halinde kaybolur. Şekil 3.2’de soğuk şekil değiştirme de şekil değişimi miktarına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim görülmektedir.



Şekil 3.2 : Şematik olarak soğuk şekil değiştirme oranının ve tavlama sıcaklığının mekanik özellik ve mikro yapıya etkisi [31].

Ön şekil değiştirme oranı arttıkça malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinde artış, buna karşılık sünekliğinde azalma olur. Şekil değiştirme sırasında atom boşluklarının meydana gelmesi ve bunların konsantrasyonunun soğuk şekil değiştirme miktarı arttıkça artması malzemede çatlaklara sebep olur. Çatlak oluşumunu ve soğuk şekil değiştirme de azalan sünekliği artırmak amacıyla malzeme ara tavlama tabii tutulur [31].

3.1.5 Plastik şekil değiştirmeyi etkileyen faktörler

Malzemenin yapısı ve mekanik özellikleri ile şekil değiştirme şartları malzemelerin plastik şekil değiştirme kabiliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunlar dışında, şekil değiştirmede uygulanan hidrostatik basınç, malzemedeki kalıntı gerilmeler ve şekillenecek malzemenin geometrik şekli gibi faktörlerde plastik şekil değiştirmesini etkiler. Plastik şekil değiştirmeyi gerçekleştirecek gerilmeyi ve/veya yapılabilecek şekil değiştirme oranını etkileyen faktörler: malzeme yapısı, mekanik özellikler, şekil değiştirme hızı, sıcaklık, sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler ve geometrik faktörlerdir [31].

Genel olarak, tek fazlı malzemelerin plastik şekil değiştirme kabiliyeti çok fazlı malzemelerden daha iyidir. Küçük taneli malzeme, yüksek kırılma tokluğu ve süneklik

özelliğine sahip olmasına karşın, mukavemetin yüksek olması nedeniyle plastik şekil değiştirme için daha büyük gerilme uygulanmasını gerektirir. Malzeme yapısında bulunan metalik olmayan oksit, sülfür veya nitrür gibi kalıntılar (inklüzyonlar) genellikle plastik şekil değiştirme kabiliyetini azaltır [31].

Malzemelerde uygulanan şekil değiştirme hızı, mühendislik şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki şekilde ifade edilir (3.6) ve (3.7). Mühendislik şekil değiştirme hızı, çekme veya basma deneyinde çene hızı ile doğru orantılıdır.

Mühendislik şekil değiştirme hızı örnek boyuna ve çene hızına bağlı olarak;

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d[(L-L_0)/L_0]}{dt} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3.6)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Burada;

L_0 : Örneğin şekil değiştirme öncesi uzunluğu,

L : Örneğin şekil değiştirme sonrası uzunluğu,

V : Çene hızı ($V=dL/dt$)

Gerçek şekil değiştirme hızı birim zamanda meydana gelen gerçek birim şekil değiştirme miktarını gösterir ve;

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir.

Gerçek şekil değiştirme hızının, örnek boyu ve çene hızı ilişkisini veren (3.7) bağıntısına göre, çene hızı sabit iken, örnek uzadıkça gerçek şekil değiştirme hızının azalacağı, numune boyu kısaldıkça gerçek şekil değiştirme hızının artacağı anlaşılmaktadır. Gerçek şekil değiştirme hızı, örnek boyunun etkisini gösterdiğinden, mühendislik şekil değiştirme hızına göre daha doğru sonuç vermektedir.

Şekil değiştirme hızının mekanik özelliklere önemli ölçüde etkisi vardır. Şekil değiştirme hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar. Farklı şekil değiştirme hızları uygulanması halinde çekme eğrilerinin yukarıya doğru kaydığı, buna karşılık toplam birim şekil değiştirme miktarının azaldığı görülür. Şekil değiştirme hızının akma gerilmesine ve küçük birim şekil değiştirme miktarlarındaki plastik gerilmeye etkisi çekme mukavemetine etkisinden daha fazladır. Metalik malzemelerden hacim

merkezli kübik yapıda olanlar diğer metalik malzemelere göre şekil değiştirme hızına daha duyarlıdır [31].

Genellikle, şekil değiştirme hızı artarken malzemenin sünekliği azalır. Şekil değiştirme hızı artarken sünekliğe bağlı olarak malzemenin şekil değiştirme duyarlılığı üssü de azalır. Yüksek şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü, metalik malzemelerde süper plastikliği karakterize eder.

Metalik malzemelerde, şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü, oda sıcaklığında genellikle düşüktür ($m < 0,1$), “m”in en yüksek değeri “1” olabilir. Bu durumda malzeme sıcak cam gibi akar. Şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü, malzemenin sünekliğini karakterize eder, öyle ki;

$m \leq 0,1$ ise malzeme sünek değildir.

$m \approx 0,3-0,4$ ise malzeme sünektir.

$m \geq 0,5$ ise malzeme süperplastiktir.

$m = 1$ ise malzeme cam gibi akar.

3.1.6 Mekanik işlemlerde şekil değiştirme hızının etkisi

Mekanik proseslerde şekil değiştirme hızının başlıca üç etkisi vardır. Bunlar;

a) Metalin plastik gerilmesi şekil değiştirme hızıyla artar, dolayısıyla mekanik prosesde şekil değiştirmeyi gerçekleştirecek kuvvet artar,

b) İş parçasının sıcaklığı, artan şekil değiştirme hızı ile adyabatik ısınma yüzünden artar,

c) Şekil değiştirme hızının artması ile metal-takım ara yüzeyindeki yağ filmi dağılmadan şekil değiştirme tamamlanabileceğinden yağlama durumu geliştirilmiş olur [31].

Standart çekme deneyinde kullanılan çekme cihazlarının çene hızları “ 6×10^{-5} - 6×10^{-1} ” arasındadır. Endüstride kullanılan birçok plastik şekil verme cihazının hızı, çekme deneyi çene hızlarından daha fazladır. Birçok malzeme için endüstriyel plastik şekil verme proseslerinde kullanılan şekil değiştirme hızı sınırlarının üstündeki şekil değiştirme hızlarında “toplam % uzama” değeri artar, fakat kritik bir şekil değiştirme hızına erişildiğinde süneklik aniden azalır [31].

3.1.7 Sürtünme ve yağlama

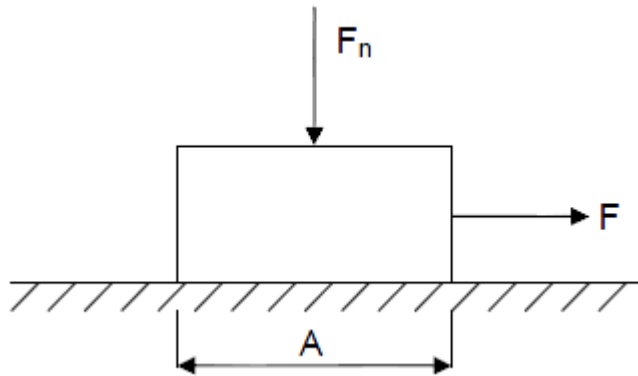
Plastik şekillendirmeyi gerçekleştirecek cihazda, kalıp ile iş parçasının teması sonucu gerçekleşmektedir. Temasta olan ve birbirine göre bağıl olarak harekette bulunan iki parçanın temas yüzeyi arasındaki sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık yükselişi ile enerji kaybı meydana getirir. Bu olayların etkisini azaltmak için alınması gereken önlemlerin en önemlisi yağlamadır [31].

Genel anlamda sürtünme, birbirleri ile temas eden ve bağıl olarak hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir.

Mühendislik ve fiziksel olayların çoğunda sürtünmenin etkisi, sürtünme katsayısı “ μ ” ile tanımlanır (Şekil 3.3). Sürtünme katsayısı, “ $\mu = F/F_n$ ” şeklinde tanımlanır. Burada;

F : Sürtünme Kuvveti,

F_n : Normal Kuvvettir.



Şekil 3.3 : Ara yüzey sürtünmesinin tanımlanması [31].

Temas yüzeylerinin pürüzlülüğü nedeniyle, pürüzlülük mertebesinde ufak ve bölgesel alanlardan ibaret olan gerçek temas alanı “ A_g ”, temas yüzeyinin sınırlarını belirleyen metrik alandan “ A ” çok daha küçüktür. Buna rağmen gerilmelerin hesaplanmasında (3.8)’de olduğu gibi uygulanan kuvvetin toplam alana “ A ” etkilediği kabul edilir.

Buna göre ara yüzey basınç veya ara yüzeydeki basma gerilmesi “ σ ”,

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (3.8)$$

sürtünme gerilmesi veya ara yüzey kayma gerilmesi (τ_i) ;

$$\tau_i = \frac{F}{A} \quad (3.9)$$

olarak hesaplanır. Buradan;

$$\mu = \frac{F}{F_n} = \frac{\tau_i}{\sigma} \quad (3.10)$$

olur. Buna Coulumb sürtünme katsayısı denir.

Mekanik işlemlerde, temas eden malzemelerden biri (iş parçası) plastik şekil değişimine uğrar, bu işlem sırasında daha sert olan (kalıp veya takım), yüzeye sürtünerek kayar. Bu sırada da bir sürtünme gerilmesi “ τ_i ” meydana gelir. Sürtünme gerilmesi, iş parçasının kayma plastik gerilmesinden “ τ_f ” büyük olamaz. “ $\tau_i \geq \tau_f$ ” olduğunda iş parçası takım üzerinde kayamaz ve sürtünmenin etkisi ile şekil değişimine uğrar, bu durumda sürtünme katsayısının anlamı yoktur. Tresca akma kriterine göre kayma gerilmesi, çekme veya basma gerilmesinin yaklaşık olarak yarısı değerinde olduğundan, sürtünme katsayısının maksimum değeri, “ $\mu_{max} = \frac{\tau_f}{\sigma_f} = 0.5$ ” olur. Bu sonuç, ara yüzey basıncı veya ara yüzey basma gerilmesi “ σ ”nin malzemenin plastik gerilmesi “ σ_f ”ye eşit olması durumunda doğrudur [31].

Sürtünme katsayısı arttıkça iş parçasının şekil değiştirme kabiliyeti azalır. Pratikte, sürtünme katsayısının değeri deneysel olarak saptanır. Sürtünmeyi azaltmak için yağlama yapılır. Mekanik proseslerde yağlama;

- a) Sürtünmeyi azaltır.
- b) Aşınmayı kısmen veya tamamen önler.
- c) Şekil değiştirme için uygulanması gereken kuvveti azaltır.
- d) İş parçasının şekil değiştirme oranını artırır.
- e) Sürtünme nedeniyle oluşması muhtemel yüzey hatalarını azaltır.
- f) Parça yüzeyinin düzgün çıkmasını sağlar.
- g) Takımın aşınmasını azaltarak ömrünü artırır.
- h) Parça ile takım arasında ısı yönünden yalıtkanlık sağlar.
- i) Adyabatik ısınmayı önleyerek parça ve takımı soğutur.

Yağlayıcı maddeler katı, sıvı, yarı katı ve gaz olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Sıvı yağlayıcılar sürtünme halinde bulunan yüzeyler arasına kolayca girip çıktıklarından ve bunun sonucu olarak ısıyı da kolayca dışarıya taşıdıklarından sanayide daha çok kullanılırlar. Sıvı yağlayıcı maddeler, organik, madensel ve sentetik olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Değişik şartlarda çalışan yağların yağlama özelliklerini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Yağların seçiminde özellikle çalışma şartları ve kalitesi göz önüne alınmalıdır. Çalışma şartları olarak, yağın kullanılacağı temas yüzeyinin durumu, sıcaklık, hız ve

ara yüzey basıncı gibi faktörler düşünülmelidir. Yağın kalitesi olarak, ısılatma kabiliyeti, oksidasyona karşı dayanıklılık, temizleme yeteneği, katılaşma ve alevlenme noktası gibi özellikler düşünülmelidir [31].

3.2 Mekanik Özellikler

Akma mukavemeti “ σ_{AK} ”, çekme mukavemeti “ σ_C ”, mukavemet katsayısı “ K ”, pekleşme üsteli “ n ”, anizotropi faktörü “ R ”, kopma uzaması “ $\% \delta$ ” sacların şekillendirilebilirliğini ifade eden mekanik özellikler arasında yer almaktadır. Sacların bazı özelliklerinin tüm şekil verme prosesine önemli etkileri vardır. Çizelge 3.1’de bu özellikler incelenmiştir.

Çizelge 3.1 : Şekillendirme işlemi için kullanışlı olan ve çekme testlerinden elde edilen malzeme özellikleri [42].

Malzeme Özelliği	Elde Edilişi	Malzeme Özelliğinin Etkiledikleri	Malzeme Özelliğinin Etkilendikleri
n (Şekil Değiştirme Sertleşmesi Üssü)	Logaritmik olarak geçcek gerilme-uzama eğrisinin eğimi	Büyük uzamalarda gerdirilebilirlik, küçük uzamalarda kırışma boğumlanma ve geri yaylanma	Tane büyüklüğü, artık gerilme, akma gerilmesi, sıcaklık, kimyasal içerik soğuk çalışma miktarı
R (Anizotropi Faktörü)	Genişlikçe uzamanın kalınlıkça uzamaya oranı	Derin çekilebilirlik, kulak oluşumu ve anizotropik davranış	Şekil değiştirme derecesi, artık gerilme, yaşlandırma sıcaklığı, proses sırası, kimyasal içerik
σ_{AK} (Akma Mukavemeti)	Gerilme-uzama eğrisinin $\%0,2$ ’sinin kesişmesinden elde edilen değer	Geri yaylanma, düşük uzamalarda şekil değiştirme sertleşmesi, boğumlanma ve kırışma	Tane büyüklüğü, kimyasal içerik ve elastisite modülü
σ_C (Çekme Dayanımı)	Örneğin tutmuş olduğu max. yükten elde edilen değer, mühendislik gerilme-uzama eğrisinin sıfıra yöneldiği nokta	Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı, üniform uzama	Tane büyüklüğü, kimyasal içerik, çekme testinden önceki şekil değiştirme
Kopma Uzaması	Örneğin tutabildiği max. yükten elde edilir.	Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı	Kimyasal içerik, artık gerilme, çekme testinden önceki şekil değiştirme

En çok tanınan sac metal şekillendirme prosesleri, derin çekerek veya gererek şekillendirme prosesini veya her ikisini birden kullanır. Derin çekme, düz şekilli saclara kap şeklini verme prosesi olarak makalelerde tanımlanmaktadır. Üretilmiş olan kabın et kalınlığı, şekillendirmeden önceki sac kalınlığı ile hemen hemen aynı kalmaktadır. Gererek şekillendirmede, sac kalınlığı ile ürün kalınlığı mukayese edildiğinde ise, sac kalınlığının azaldığı görülür. İyi çekilebilirlik özelliğe sahip bir sac, şekillendirme esnasında kalınlığında bir değişiklik meydana gelmeksizin kalınlık incelmeye karşı yüksek dirence sahip olmalıdır. “ R ” değeri incelmeye karşı direncin bir ölçüsüdür ve çekme deneyinden elde edilir [43].

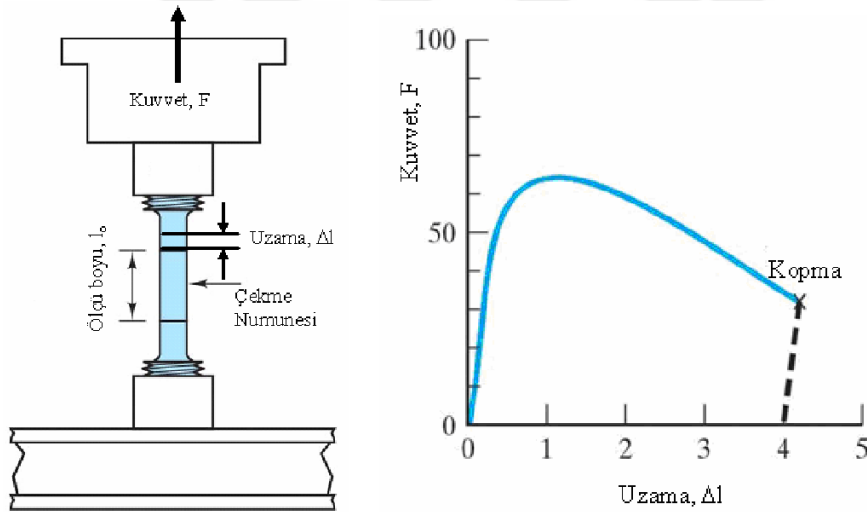
Gererek şekillendirmede kullanılan sac metaller yumuşak olmalı ve boğumlanma meydana gelmeden dengeli şekil değiştirmelidir. “ n ”, gererek şekillendirilebilirliğin iyi bir ölçüsüdür. Büyük “ n ” değeri daha yüksek plastik şekillendirme özelliği

demektir. Hataları kontrol etmenin diğerk bir önemli tekniğı ise şekillendirme sınırı diyagramıdır [43].

Makine ve sistemlerin “statik” ve “sanki statik” (düşük frekansta yükleme hızı) yüklemelerinde, o malzemeye ait göz önüne alınması gereken mekanik özellik değerleri elde edilir [44].

3.2.1 Çekme deneyi

Tasarımda en çok önemsenen özellikler, malzemelerin ne kadar dayanıklı oldukları ve ne ölçüde şekil değiştirebilme kabiliyetine sahip olduklarıdır. Malzemelerin dayanım ve şekil değiştirme özelliklerini belirlemede kullanılan en yaygın test; “Çekme Deneyi” dir [70]. Çekme deneyi, bu amaç için hazırlanan bir test numunesinin (çekme numunesi) çekme makinesine bağlanarak çekme kuvvetine maruz bırakılmasıdır. Etki eden kuvvet numune koparılanaya kadar arttırılır. Bu esnada, etki eden kuvvet ve test numunesinde meydana gelen uzama sistem tarafında sürekli olarak kaydedilir.



Şekil 3.4 : Çekme deneyinin ve kuvvet-uzamaya göre çekme eğrisinin şematik görünümü [70].

Bu verilerin, mühendislik olarak daha anlamlı olabilmesi için geometrinin etkisinin giderilmesi gerekir. Bu nedenle “kuvvet-uzama (F - Δl)” diyagramınının “gerilme - birim şekil değiştirme (σ- ε)” diyagramına (3.11) ve (3.12) eşitlikleri kullanılarak dönüştürmek gerekir.

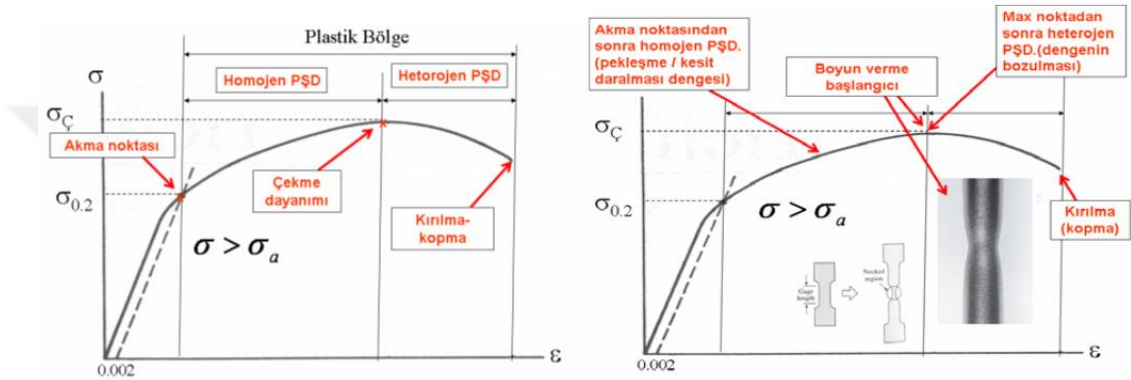
Gerilme = Çekme kuvveti / Kuvvete dik kesit alanı

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.11)$$

Birim şekil değişimi = Uzama miktarı / İlk ölçü boyu

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (3.12)$$

Bu şekilde nokta nokta saptanan değerlerden gerilme – birim şekil değiştirme diyagramına geçilir. Çekme deneyi sırasında parça, önce “Elastik” şekil değişimine daha sonrada “Plastik” şekil değişimine maruz kalır. Daha sonra parça kırılarak kopar. Elastik şekil değiştirme akma noktasına kadar devam eder. Akma noktasından sonra, malzeme plastik olarak şekil değiştirmeye maruz kalır ve kopuncaya kadar devam eder.



Şekil 3.5 : Çekme eğrisi bölgeleri

Akma noktasından, çekme dayanıma kadar olan bölge de homojen şekil değiştirme, çekme dayanımından (boyun verme başlangıcı), kopuncaya kadar olan bölge de ise heterojen şekil değiştirme meydana gelmektedir.

Homojen Bölgede, deney sırasında parça uzunluğu sürekli artar. Plastik şekil değiştirmede (PŞD) hacim sabit kalır ve uzunluktaki artış kesit alanında daralma ile dengelenir. Akma noktasından sonra tepe noktasına kadar malzeme pekleşir ve daha çok gerilme gerekir. Fakat plastik şekil değiştirme oldukça kesit küçülür Böylece gerilmede yükselir ve bu iki durum birbirini dengeleyerek deformasyon devam eder.

Heterojen bölgede, tepe noktasından (çekme dayanımından) sonra plastik kararsızlık başlar. Kesit bir bölgede hızla daralmaya başlar ve malzeme boyun (neck) verir. Şekil değişimi için gereken kuvvet azalır. Bu nedenle eğri aşağı doğru döner. Belli bir noktada kopma gerçekleşir.

Çekme deneyi ile elastik özellikler (elastisite modülü, elastiklik sınırı, rezilyans v.s.) ve plastik özellikler (akma mukavemeti, çekme mukavemeti, kopma uzaması, % kesit daralması, tokluk v.s.) tespit edilebilir. Bunun dışında şekil değiştirme şartlarında elde

edilen “gerilme-birim uzama” eğrilerinin genel görünümü mekanik proses sırasında malzemenin şekil değiştirme özellikleri hakkında bilgi verir [45].

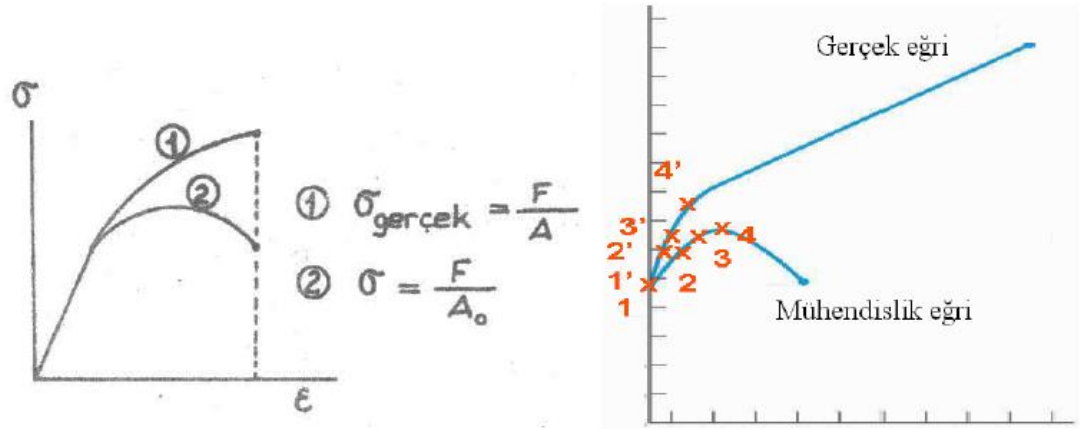
Çekme deneyinin pratik uygulanmasında standart ölçülerde hazırlanan bir deney numunesinin, geliştirilmiş çekme cihazlarında, iki ucundan sıkıştırılarak sabit bir şekil değiştirme hızı ile parçanın kopuncaya kadarki davranışı incelenir. ε sabit iken cihaz üzerinde $F = f(\Delta R)$ kaydedilir. Seçilen şekil değiştirme hızını “ ε =sabit” gerçekleştirecek şekilde, yükü sürekli artırarak elde edilecek yükleme uzama ilişkisi ve buna bağlı olarak hesaplanan gerilme-birim uzama oranı “ ε ” birer diyagram olarak gösterilebilir. Bu şekilde belirlenen gerilme-genleme diyagramlarına “pekleşme eğrileri”, “gerilme-uzama eğrileri” veya günlük kullanımda “çekme diyagramları” denir [45].

Şekil değiştirme davranışına göre metalik malzemelerin çekme diyagramlarını üç ana grupta toplamak mümkündür. Birçok saf metallerin, genellikle yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip metallerin (Al, Cu gibi) ve bunların alaşımlarının (Al alaşımları gibi) gerilme-birim uzama diyagramlarında elastik bölgeden plastik şekil değiştirme bölgesine geçiş belirgin değildir. Çekme-uzama eğrisi süreklilik gösterir. Genellikle hacim merkezli kübik metalleri, prinçler ve bronzlar gibi bazı metal alaşımları ise çekme diyagramlarında süreksizlik gösterirler. Üçüncü tipte ise, plastik şekil değiştirmenin başlaması, dislokasyonların bloke edilmesi ile belli bir gerilme değerine kadar geciktirilir. Bu değerler ölçülebilir kalıcı şekil değiştirmenin (makro plastik şekil değiştirme) başlaması ile sabit kalır ve hatta daha küçük sabit bir değere düşebilir. “ $\sigma = f(\varepsilon)$ ” diyagramlarının çizilebilmesi için örneklerin standart alınması “ A_0 =kesit, l_0 =şekil değiştirme bölgesinin boyu olmak üzere” ve ilgili “ $\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa]$ ” ve “ $\varepsilon = \frac{\Delta l \times 100}{l_0} [\%]$ ” “dönüşümlerinin hesaba katılmış olması gerekir [44].

3.2.2 Gerçek gerilme - genleme eğrisi

Mühendislik değerlerin hesaplanması, deney parçasının deney öncesi boyutları dikkate alınarak yapılmıştır. Ancak plastik deformasyonla birlikte parçanın boyunda sürekli bir uzama gerçekleşir ve buna bağlı olarak plastik şekil değiştirmede hacim sabitliği prensibine dayanarak kesitinde azalma gerçekleşir. Bu ölçüler esas alınarak elde edilen gerilme birim şekil değiştirme değerleri, gerçek değerler olarak nitelendirilir (σ_g , ε_g) [70]. Tasarımda, küçük miktarlarda şekil değiştirmeler söz konusu olduğu için

mühendislik değerleri kullanmak yeterli olur. Ne var ki, imalatla büyük miktarlarda şekil değişimleri söz konusu olduğu için mutlaka gerçek değerleri kullanmak gerekir.



Şekil 3.6 : Mühendislik ve gerçek gerilme eğrileri [70].

Gerçek birim şekil değişimi (3.13), (3.14), (3.15) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$\epsilon_g = \frac{dL}{L} \quad (3.13)$$

$$\epsilon_g = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (3.14)$$

$$\epsilon_0 = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.15)$$

Gerçek gerilme ise, (3.16) ve (3.17) eşitlikleri ile elde edilmektedir.

$$\sigma_g = \frac{F}{A} = \frac{F.L}{A_0 L_0} \quad (3.16)$$

$$\sigma_g = \sigma(1 + \epsilon) \quad (3.17)$$

Eğer mühendislik değerler biliniyorsa yukarıdaki dönüşüm uygulanarak gerçek gerilme – gerçek birim şekil değişimi değerleri saptanabilir. Gerçek değerlerle çizilen gerilme – birim şekil değişimi ($\sigma_g - \epsilon_g$) eğrisine akma eğrisi (flow curve) adı verilir [70].

3.2.3 Elastiklik modülü

Bir malzemenin elastik deformasyona karşı koyma kabiliyeti, elastik rijitlik (stiffness) olarak adlandırılmakta; elastiklik modülü de bunun bir ölçütünü ifade etmektedir. Elastiklik modülü bir malzeme özelliğidir. Elastiklik modülü yüksek olan malzemelerde, belli bir gerilme sistemi altında zorlanma ile ortaya çıkan elastik deformasyonlar, düşük elastiklik modülü değerine sahip malzemelere göre daha az olmaktadır. Metalik malzemelerde atomlararası bağ kuvvetine veya enerjisine dayanan elastik rijitlik ve bunun göstergesi olan elastiklik modülü, artan sıcaklık ve

atomlararası mesafe ile düşüş sergilemekte; malzemeye uygulanan ısı işlemlerden, belli orana kadar yapılan alaşımlandırmadan, malzemenin mikro etkilenmemektedir. Elastiklik modülünde sıcaklık ile ortaya çıkan düşüşler; atomlararası mesafenin artması ve bağ kuvvetinin azalması ile bağdaştırılmaktadır. Anizotropik metallerin kafes yapıları dikkate alındığında, atomlararası mesafenin doğrultulara göre farklılaşması, bağ kuvveti ve elastik sabitlerin, dolayısıyla da elastiklik modülünün farklı kristallografik doğrultularda birbirinden farklı değerler sergilemesine yol açmaktadır [46].

Çekme deneyindeki elastik deformasyon bölgesinde elastiklik modülü Hooke kanununa göre **(3.18)** bağıntısıyla ifade edilmektedir.

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3.18)$$

Burada;

E : Elastiklik modülü,

σ : Gerilme,

ε : Birim şekil değişime,

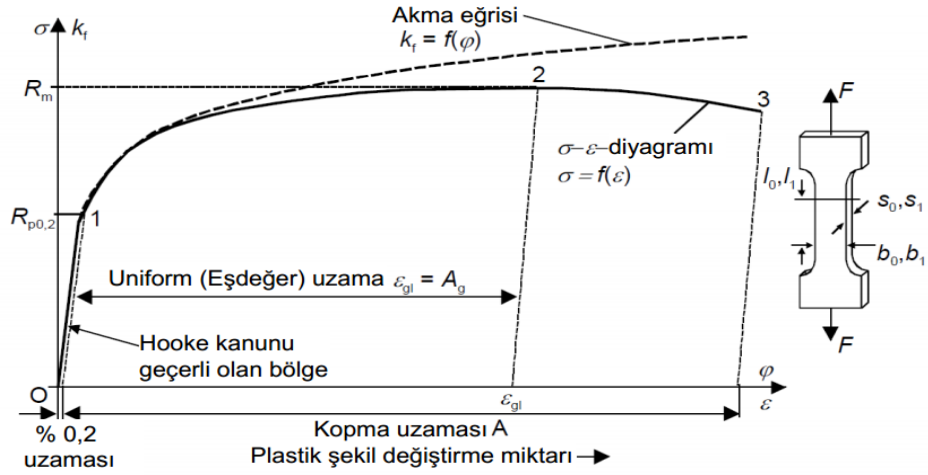
dir. Yani elastiklik modülü, çekme deneyinden elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin eğimine eşittir.

Elastisite modülünün şekillendirme açısından metallere şekil verme sırasında görülen elastik geri yaylanmayı belirlediği için önemlidir. Bu olay daha çok yüksek akma mukavemeti ve düşük elastiklik modülüne sahip malzemelerde görülür. Bu yüzden şekillendirme açısından yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler tercih edilmelidir.

3.2.3.1 Akma ve çekme mukavemeti

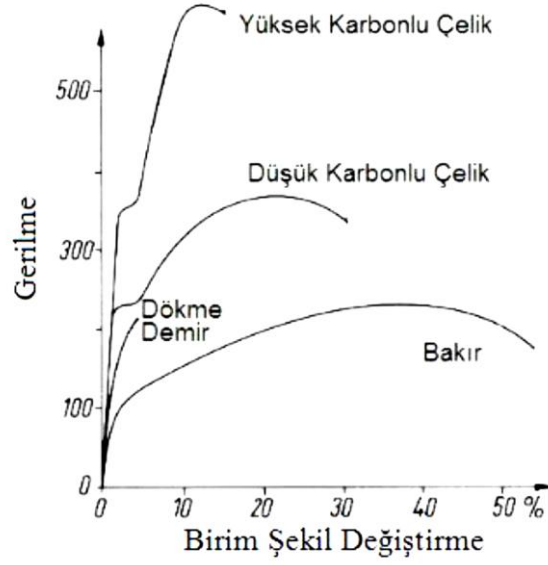
Çekme deneyinde elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramlarında malzemenin elastik deformasyon bölgesinden plastik deformasyon bölgesine geçtiği nokta akma noktasıdır. Bu noktaya karşılık gelen gerilme değeri malzemenin akma mukavemetini verir [29]. Gerçekte akma noktasını tanımlanmak zordur. Akma noktası uzama göstermeyen çelikler için, uzama ekseninin % 0,2' sinden çıkılan paralel doğrunun çekme eğrisini kestiği noktadaki gerilme değeri ile ifade edilir. Akma sınırı belirgin olmayan malzemelerde akma mukavemeti yerine “ ε_p ” kadar kalıcı şekil değiştirme üreten gerilme değeri “ R_p ” alınıp kullanılır. Uygulamada genellikle % 0,2 birim uzamaya karşılık gelen “ $R_{p0,2}$ ” değeri seçilir [2].

Şekil 3.7’ de çekme deneyi sonucu oluşan gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



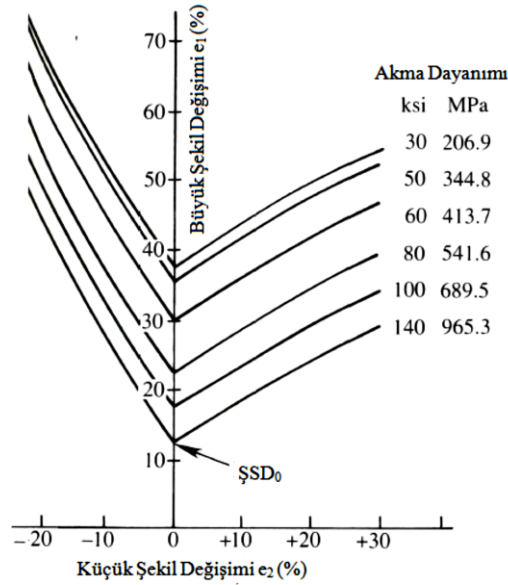
Şekil 3.7 : Çekme deneyi ile elde edilen gerilme-genleme eğrisi ve akma eğrisi diyagramı [66].

Şekillendirme uygulanacak olan parçada akma mukavemetinin bilinmesi doğru kuvvetin uygulanması ve oluşabilecek olan hataların önüne geçilmesi açısından önemlidir. Şekillendirmede yüksek akma mukavemeti geri yaylanma olasılığı, hızlı kalıp aşınması ve sınırlı süneklik ile kusurların oluşması olasılığını belirtir. Bununla beraber düşük akma mukavemeti parçanın şekillendirme sırasında uygulanan gerilmeye dayanamamasına neden olur. Metalik malzemeler benzer elastik özellik gösterse bile farklı plastik özellikler gösterebilmektedir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi demirimsi malzemeler aynı elastiklik modülüne sahip olabilirken farklı kopma mukavemeti değeri gösterebilmektedirler.



Şekil 3.8 : Farklı metallere ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri [40].

Akma mukavemetinin şekillendirmeye olan etkisini şekillendirme sınırı diyagramları üzerinden görmek mümkündür. Şekil 3.9’ da aynı kalınlıkta fakat farklı akma mukavemetine sahip az karbonlu çeliklere ait şekillendirme sınırı diyagramları verilmiştir. Akma mukavemeti arttıkça diyagramın aşağıya doğru kaydığı görülmektedir. Yani güvenli şekillendirme yapılabilecek olan bölgenin daraldığı ve burdan artan akma mukavemeti ile şekillendirme kabiliyetinin azaldığı yorulumu yapılabilir. Düşük akma mukavemetine sahip metaller daha yüksek şekillendirme sınırı diyagramına sahip olmaktadır.



Şekil 3.9 : Aynı kalınlıkta fakat farklı akma mukavemetine sahip düşük karbonlu çeliklere ait şekillendirme sınırı diyagramları [60].

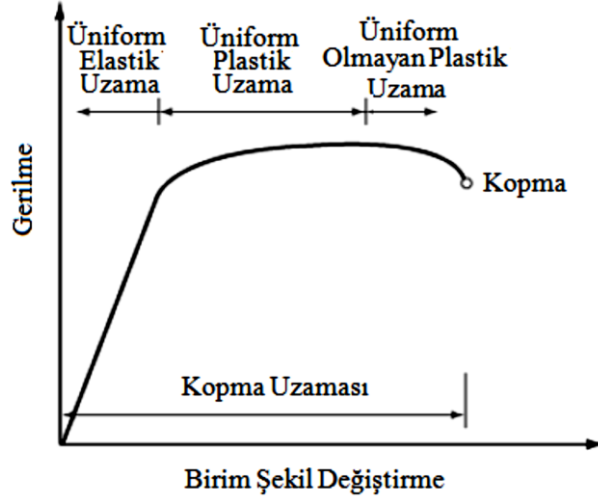
Çekme mukavemeti “ σ_C ” herhangi bir malzemenin birim kesit başına taşıyabileceği en büyük yükü gösterir. Çekme diyagramındaki en büyük gerilmedir. Gerdirilebilirliğin ölçümü için, daha çok çekme dayanımının akma dayanımına oranı “ σ_C/σ_{AK} ” kullanılmaktadır. Çelik daha yüksek “ σ_C / σ_{AK} ” oranı ile daha yüksek şekil verilebilirlik gösterir, çünkü yüksek pekleşme özelliğine sahiptir [50].

Malzemenin sertliği veya akma mukavemeti derin çekme kabiliyeti açısından ölçü kabul edilemez. Çünkü, alüminyum düşük karbonlu çeliğe oranla daha yumuşak olmasına rağmen, daha düşük derin çekme kabiliyetine sahiptir. Çekme dayanımı, derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında; akma gerilmesi, pot çemberi kuvvetinin belirlenmesinde önemlidir [45].

3.2.3.2 Uzama

Çekme deneyinde, deney parçası, en büyük yüke kadar tüm ölçü boyunda düzgün olarak şekil değiştirir. Çekme kuvvetinin en büyük değerini almasıyla yerel kesit daralması (boyun verme) başladığı için uzama da üniform olmaktan çıkar. Sacların şekillendirilmesinde malzemenin üniform uzama yüzdesinin yüksek olması istenir. Gerilme – birim şekil değiştirme davranışı “ $\sigma = K.\epsilon^n$ ” ile gösterilebilen bir malzemenin çekme deneyinde maksimum yükte “ $\epsilon=n$ ” olduğundan plastik şekil verilecek bir sacın pekleşme üstelinin yüksek olması faydalıdır [88].

Çekme deneyinde kopma uzaması düzgün uzama ile boyun vermeden kopmaya kadar gerçekleşen uzamanın toplamadır. Üniform uzamaya malzemenin pekleşme üsteli n , boyun verme ile kopma arasındaki uzamada (büzülme uzaması) ise m etki eder. Yüksek m değeri kırılmadan önce oluşan büzülme uzamasının büyük olmasına yol açar. Dolayısıyla n ve m değerleri büyüdükçe toplam uzama da artar.



Şekil 3.10 : Düzgün uzama ve kopma uzamasının gösterimi [47].

3.2.3.3 Kopma uzaması, pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı

Kopma uzama yüzdesi veya kısaca kopma uzaması “% δ ” değeri, deney parçasının başlangıçtaki boyu “ L_0 ” (şekil değişimine maruz bırakılan, çekme örneğinin çoğu kez işaretlenmiş çizgiler ile belirlenen ilk boyu), deney sonunda kopan iki parça yan yana getirilerek işaretler arası ölçülen kopma boyu “ L_k ” esas alınarak (3.19) ile hesaplanır.

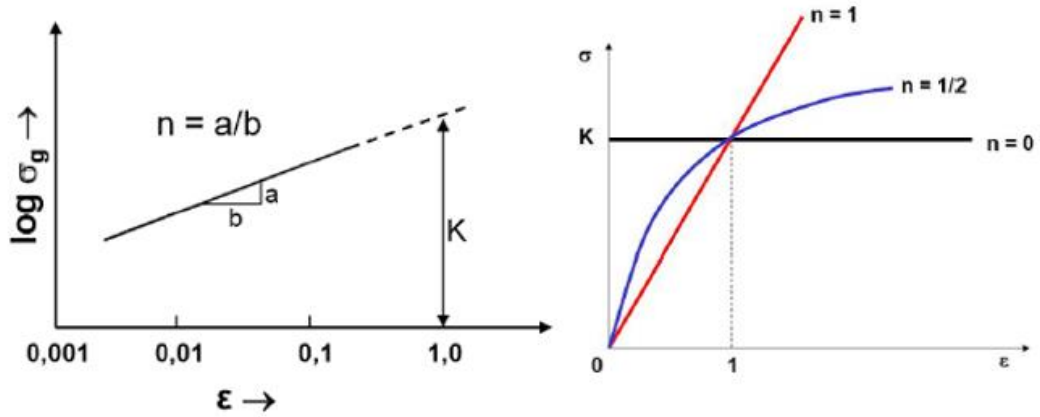
$$\% \delta = [(L_k - L_0)/L_0] \times 100 [\%] \quad (3.19)$$

Çekme kuvvetinin en büyük değeri alması ile yerel kesit daralması (boğumlaşma) başladığı için bu noktadan sonra kırılma oluncaya kadar uzamada üniform olmaktan çıkar. Sacların şekillendirilmesinde malzemenin üniform uzama yüzdesinin yüksek olması istenir. Gerçek gerilme şekil değiştirme davranışı Holloman [50], denklemine göre “ $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ ” ile gösterilebilen bir malzemenin; çekme deneyinde maksimum yükte “ $\epsilon = n$ ” olduğundan, plastik şekil verilecek bir sacın pekleşme üstelinin yüksek olması faydalıdır.

Düşük karbonlu çeliklerde Holloman eşitliği plastik şekil değiştirme bölgesinde geçerli bir eşitliktir. “ n ” değeri gererek şekillendirmede çok önemli bir değişkendir. Malzemenin plastik şekillendirme bölgesi yüksek “ n ” değeri gösterir ve bu bölge boğumlaşmaya karşı yüksek direnç gösterecektir. Böylece sacda üniform plastik şekil değişimi meydana gelecektir. Boğumlaşma, “ n ” değerinin düşük olduğu bölgede görülecektir ve bölgesel olarak kalacaktır. İncelmenin çabuk meydana gelmesinin sonucu olarak, çatlak oluşumu çabuk meydana gelecektir [52].

Çekme deneyinde kopma uzaması, üniform uzama ile boğumlaşma uzamasının toplamıdır. Üniform uzamaya malzemenin “n” değeri etki eder. Dolayısıyla “n” değeri büyüdükçe toplam uzamada artar [8,53]. Bu değer gerilebilirlik ve şekillendirilebilirliği etkiler. “n” değerinin artışı ile gerilebilirlik artar. Mukavemet katsayısı şekillendirme ya da kırılma sınırları üzerinde doğrudan etkiye sahip değildir. “n” değeri ile ilgili bu “K” değeri şekillendirme karakteristiğini etkiler [54]. “K” değeri malzemenin dayanım seviyesini ifade etmede kullanılır ve şekillendirme için gerekli kuvvetin büyüklüğünü ifade eder. “n” değeri ise gerçek gerilme uzama eğrisinin eğimi ile ilgilidir ve malzemenin bölgesel şekil değişimini engelleme yeteneği olarak ifade edilir [55].

Pekleşme üsteli plastik şekil değişiminin başladığı akma gerilmesi ile boğumlanmanın başladığı nokta arasında bulunan homojen şekil değiştirme bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme değerlerine göre çizilen “ $\log \sigma_g - \log \epsilon_g$ ” grafiğinin eğimine eşittir (Şekil 3.11). Malzeme mukavemet katsayısı ise, “ $\epsilon=1$ ” ($\log \epsilon=0$) olduğu noktadaki gerçek gerilmedir. Pekleşme üsteli, “ $n=0$ ” (ideal plastik malzeme) ile “ $n=1$ ” (elastik malzeme) değerleri arasında olabilir.



Şekil 3.11 : Pekleşme üstelinin tayini ve pekleşme üstelinin gerilme–birim şekil değiştirme grafiği üzerindeki etkisi [45,56].

Holloman bağıntısının “ $\sigma_g = K \cdot \epsilon_g^n$ ”, logaritması alındığında, “ $\ln \sigma_g = \ln K + n \ln \epsilon_g$ ” elde edilir. Bu ifade, “ $y = ax + b$ ” şeklinde yazılırsa, eğimi, “ $a=n$ ” olan bir doğru olduğu görülür [58]. Logaritmik koordinatlarda çizilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme diyagramları da bir doğru halini almakta ve bu doğrunun eğimi pekleşme üstelini vermektedir [70]. Denklem çözülüp katsayılar bulunduğunda, “n” elde edilir. Deneyde, “x” değişkeni şekil değiştirme, yani, “ ϵ ” ve “y” değişkeni ise gerçek gerilme, yani, “ σ ”, olduğuna göre, pekleşme üsteli “a” ifadesi olarak; mukavemet katsayısı

“ $n \log \epsilon$ ” ifadesinin sıfır olduğu yerde “ $\log \sigma = \log K$ ” ifadesinden “K” çekilerek hesaplanmaktadır [59]. Pekleşme üstelinin hesaplanması için, gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerinden, akma sınırı ile maksimum yük arasındaki veriler kullanılır. “n” ve “K” değerleri, hadde yönüne göre üç farklı doğrultu için hesaplandıktan sonra, deney malzemesinin ortalama pekleşme üsteli ve ortalama mukavemet katsayısı hesaplanır.

Literatürde, pekleşme üsteli ve dikine anizotropinin beraber değerlendirildiği ve “nR” değerine göre malzemenin şekillendirilebilirliğinin ifade edildiği çalışmalar mevcuttur [26,50]. “nR” değerinin yüksek çıkması, sacların yüksek gerilebilirlik özelliğine sahip olacağını göstermektedir. “nR” değeri ile malzemenin şekillendirilebilirliğine karar verilebilir. “nR” değeri artarsa malzemenin şekillendirilebilirliği de artacaktır [50,57].

Bazı metallere ait n ve K değerleri Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2 : Tavlanmış çeşitli metalik malzemelerin oda sıcaklığındaki pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı değerleri [1].

Malzeme	n	K (MPa)
% 0,08 C Çeliği (1008)	0,25	600
%0,15 C Çeliği (1015)	0,18	620
% 0,45 C Çeliği (1045)	0,12	950
302 Paslanmaz Çeliği	0,3	1300
410 Paslanmaz Çeliği	0,1	960
Bakır	0,33	450
Pirinç (70/30)	0,41	500
Muntz Metali (40 Zn)	0,5	800
1100 Alüminyum	0,25	140
2017 Alüminyum	0,15	380
5052 Alüminyum	0,13	210
7075 Alüminyum	0,17	400

3.2.3.4 Anizotropi

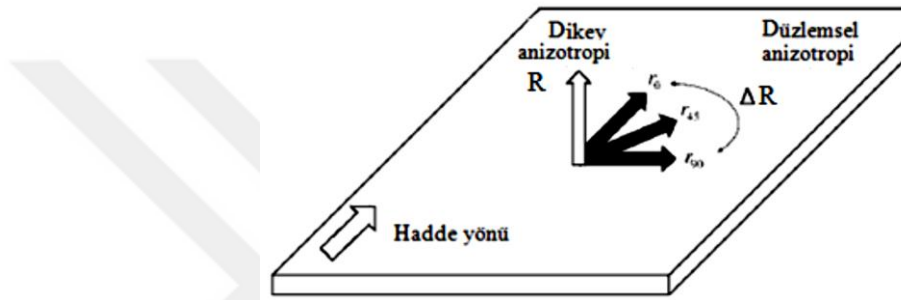
İzotropi teorik bir kabuldür. Çünkü tüm sac metal malzemeler, haddeleme ile üretilmektedir ve içerisinde bir takım kusurlar barındırmaktadır. Haddeleme sonucunda taneler haddeleme doğrultusunda uzar, sonuç olarak malzemenin farklı doğrultularında farklı mekanik özellikler görülür. İzotropik malzemelerde ise mekanik özellikler yönden bağımsızdır ve her doğrultuda aynı özellikler görülmektedir.

Belirli bir zımba çapı “d” için, yırtılmadan çekilebilecek en büyük çekme sacı çapı “ D_{max} ” olursa;

$$\text{Derin Çekme Oranı Sınırı} = D_{\max}/d \quad (3.20)$$

olarak ifade edilir. Bu oranın sacın mekanik özellikleri ile ilişkisi pek çok araştırmada incelenmiştir [2].

Haddelemeden çıkmış sac malzemede, yüzey boyunca üç farklı anizotropi değeri tanımlanmıştır. Bunlar R_0 (paralel), R_{45} (diyagonal) ve R_{90} (transvers)'dir. Sac yüzeyi için tanımlanan bu üç anizotropi değeri tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilmektedir. Şekil 3.12' de gösterildiği gibi sac üzerinden üç ayrı oryantasyonda çekme numuneleri kesilip, kalınlık ve genişlik yönündeki plastik uzama değerleri kolaylıkla bulunabilir.



Şekil 3.12 : Haddelemeden çıkmış sac malzeme üzerindeki anizotropi yönlerinin gösterimi. Sacdan alınan üç çekme numunesi ile malzemenin anizotropi değerleri belirlenir [61].

Sac malzemelerde anizotropi, normal anizotropi ve düzlemsel anizotropi olmak üzere iki başlıktan oluşur. Normal anizotropi sacın kalınlığına göre değişiklik gösteren malzeme özelliklerinin değişimlerini ölçerken, düzlemsel anizotropi ise sac yüzeyinin farklı yönlerindeki malzeme özelliği farklılıklarını ölçer [61].

Normal anizotropi katsayısı çeliğin şekillendirme sırasında incelmeye karşı direncini belirler ve derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür. Literatürde metalik sac malzemelerde normal anizotropi katsayısı R ile gösterilir ve sacın genişlikteki birim şekil değişiminin kalınlıktaki birim şekil değişimine oranı olarak tanımlanır. Normal anizotropi katsayısı “ R ” (3.21) bağıntısı ile elde edilmektedir.

$$R = \varepsilon_w / \varepsilon_t = \ln(w_i / w_0) / \ln(t_i / t_0) \quad (3.21)$$

Burada;

ε_w : Genişlikteki birim şekil değiştirme

w_i : Deney parçasının ilk genişliği

w_s : Deney parçasının son genişliği

ε_t : Kalınlıktaki birim şekil değiştirme

t_i : Deney parçasının ilk kalınlığı

t_s : Deney parçasının son kalınlığı

dır.

Pozitif bir sayı olan dikine anizotropinin 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 [45].

Sac metallerin ince olması sebebiyle kalınlıklarındaki birim şekil değişikliğini ölçmek boylarındaki birim şekil değişikliğini ölçmekten daha zordur. Bu durum kalınlık ölçümünde hatalara sebep olmaktadır. Bu yüzden hacim sabitliği temel alınarak (3.22) eşitliği yazılabilir.

$$R = \varepsilon_w / \varepsilon_t = \ln(w / w_0) / \ln(w_s \cdot \ell_s / w_0 \cdot \ell_i) \quad (3.22)$$

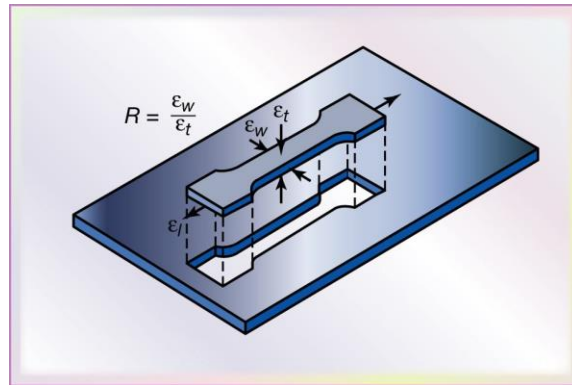
Burada;

ℓ_i : Deney parçasının ilk uzunluğu,

ℓ_s : Deney parçasının son uzunluğu

dur.

Şekil 3.13’te ki gibi hazırlanmış deney örneğinin son uzunluğu ve kalınlığı genellikle %15 - %20 uzama miktarlarında ölçülür veya düşük sünekliğe sahip malzemelerde boyun vermenin başladığı %uzamanın altındaki uzama miktarında ölçülür [4]. Deformasyonun yapıldığı yöne göre normal anizotropi katsayısının değeri değişebilir. Bu yüzden numuneden farklı yönlerde alınan örnekler ile ölçülen R değerinin (3.23) eşitliği ile ortalamasının alınması gerekir. Bu değer ortalama normal anizotropi katsayısıdır “ $\bar{R}$ ”.



Şekil 3.13 : Anizotropi katsayısının çekme deneyi ile ölçümü [36].

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3.23)$$

Burada :

R_0 : Deformasyon yönünde normal anizotropi katsayısı,

R_{45} : Deformasyon yönü ile 45^0 lik açı yapan normal anizotropi katsayısı,

R_{90} : Deformasyon yönü ile 90^0 lik açı yapan normal anizotropi katsayısıdır.

Titanyum gibi normal anizotropisi büyük malzemelerde bir seferde daha derin malzemeler çekilebilmektedir. Çinko gibi normal anizotropisi birden küçük malzemelerde plastik şekil değiştirme kalınlık yönünde oluşur. Kalınlığın bu şekilde plastik şekil değiştirmeye uğraması hasarın erken oluşmasına sebep olur. Çelik gibi malzemeler 1,5 gibi dik anizotropi değeri ile derin çekme prosesinde iyi sonuç verirler [2].

Düşük karbonlu çeliklerde " $\bar{R}$ " değeri birden büyüktür ve yaklaşık olarak "1,35- 1,96" arasında değişir [80]. Alüminyum alaşımları için " $\bar{R}$ " değeri "0,60-0,85" arasındadır. " $\bar{R}$ " değeri "0,85"den büyük ise malzeme iyi derin çekilebilir, "0,65"den küçük ise malzeme zayıf derin çekilebilirlik özelliğine sahiptir [2].

Normal anizotropi sacın çekilebilirliğini, düzlemsel anizotropi ise kırılma sınırlarını etkiler. Alüminyum alaşımları incelendiğinde ise, yüksek "n" değeri, yüksek " σ_c/σ_{AK} " oranı ve yüksek " $\bar{R}$ " değeri kırılma oluşumunu engelleyecek ve şekillendirilebilirliği olumlu yönde etkileyecektir [54].

Düzlemsel anizotropi derin çekme operasyonlarında kulaklanma olarak bilinen, parçanın kenarlarında dalgalanmalara neden olur. Kulaklar, derin çekme işleminden sonra, kabın çevresi boyunca kesilir. Dolayısıyla hem malzeme kaybına hem de ek bir kesme işlemine sebep olduğu için bu durum istenmez. Düzlemsel anizotropi ΔR ile gösterilmektedir. " ΔR " büyüdükçe kulak yüksekliği artar ve " $\Delta R=0$ " ise kulaklanma oluşmaz. " ΔR " (3.24) bağıntısı ile tanımlanmaktadır.

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3.24)$$



Şekil 3.14 : Kulaklanmaya ait örnek, ferritik paslanmaz çelik X6Cr17 [62].

Sacın şekil alma kabiliyeti yüksek R ve düşük ΔR değeri ile yakından ilişkilidir. Fakat genellikle sac metaller yüksek R değerinin yanında yine yüksek ΔR değerine sahiptir.

Anizotrop malzemelerde kulak oluşumunun kaçınılmaz olduğu fakat azaltılabileceği yönünde çalışmalar mevcuttur. Sabit pot çemberi kuvveti ile çekme derinliğinin artırılabilirdiği, fakat aynı ölçüde kulak oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir. Sabit pot çemberi kuvveti yerine değişken pot çemberi kuvveti seçilerek kulak oluşumunun azaltılabileceği deneysel olarak görülmüştür [10].

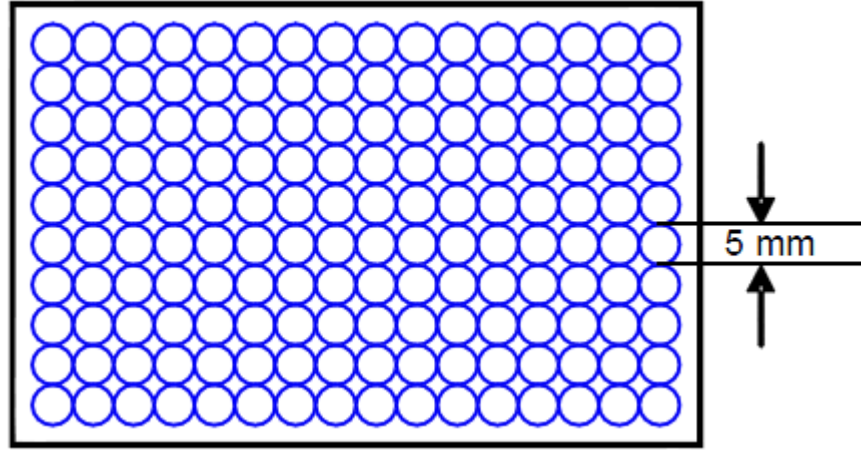
3.3 Şekillendirme Sınırı Diyagramı

Sac malzemeleri şekillendirme prosesi genellikle karmaşık bir prosesdir. Bir defa da bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme prosesleri parçaya birlikte uygulanabilir. Bu nedenle malzemenin çekme deneyi yardımı ile bulunan, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, pekleşme üsteli, anizotropi gibi mekanik özellikleri tek başlarına şekillendirme özelliklerini ifade etmeye yetmezler. Sac malzemelerin imalat sırasındaki davranışlarını daha iyi tanımlamak amacıyla, gererek şekillendirme prosesine benzediği için *Erichsen* veya *Olsen* deneyi, derin çekme prosesine benzediği için ise *Swift* deneyi son yıllarda büyük ölçüde kullanılmaktadır. *Erichsen* veya *Olsen* deneyinde tümsek yüksekliği, *Swift* deneyinde ise derin çekme oranı ölçü olarak kullanılır [31]. Nakajima testi ise hem gererek şekillendirme hem de derin çekme işlemi proseslerini içerdiği için en yaygın olarak kullanılan deney yöntemidir.

Sac malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler, belirli koşullar altında gerçekleştirilmektedir. Laboratuvar koşulları endüstriyel koşullardan farklıdır. Dolayısıyla bu deneyler, malzemenin deney şartları altındaki davranışı

hakkında bilgi verir. Başka bir ifade ile, söz konusu deneyler malzeme sınıflandırma ve seçme konusunda yararlı olmaktadır. Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için ise plastik şekil değiştirme analizlerine ihtiyaç vardır [2].

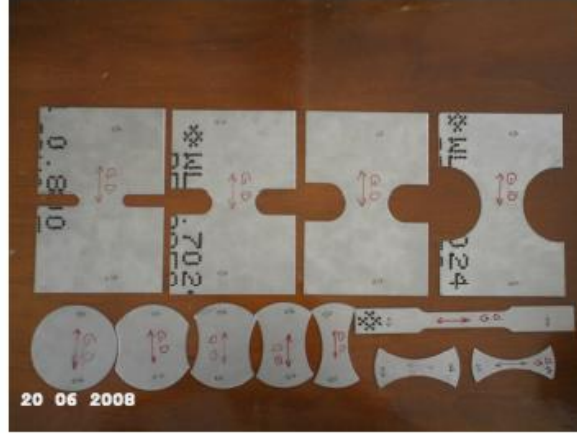
Sac malzemelerin plastik şekil değiştirme analizlerini yapabilmek için öncelikle sac malzemenin yüzeyine Şekil 3.15’de görüldüğü gibi elektrokimyasal vb. yollarla dairelerden oluşan benekler çizilir.



Şekil 3.15 : Metalik sac yüzeye çizilen benek örneği [63].

Daha sonra deney numunesinin boyutları, yağlama yöntemi ve yağlayıcı türü değiştirilerek; çekme, Erichsen, Swift veya benzeri deneyler yardımıyla plastik şekil değiştirme prosesi için farklı yük durumları oluşturulur. Bu yük koşulları altında, sac malzemedede boğumlaşma veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme uygulanır.

Şekil 3.16’daki çekme deneyi numunesi, Erichsen deney numunesi ve çentikli çekme deney numunesinin şekil değiştirmelerinin ölçülmesinden elde edilen büyük ve küçük uzama miktarları Şekil 3.21’de örnek olarak konulmuş olan diyagram üzerine yerleştirilerek ŞSD elde edilir.



Şekil 3.16 : Çekme deneyi örneği, Erichsen deney örneği ve çentikli çekme deneyi örneği [64].

Örneklerin şekil değiştirmesi sonucunda, Şekil 3.17’de görüldüğü gibi, başlangıçta, sac malzemenin yüzeyine işaretlenmiş olan dairenin çapında “ D_0 ”, ya büyüme olur (dengeli iki eksenli çekme gerilmesi durumu) veya daire elipse dönüşür. şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksenini “ D_1 ” ile, en küçük eksenini “ D_2 ” ölçülerek, en büyük “ e_1 ” ve en küçük “ e_2 ” gerçek birim şekil değiştirme uzamaları (3.25) ve (3.26) eşitlikleri ile bulunur.

$$\varepsilon_1 = \ln (D_1 / D_0) \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_2 = \ln (D_2 / D_0) \quad (3.26)$$

Formülleri ile hesaplanır.

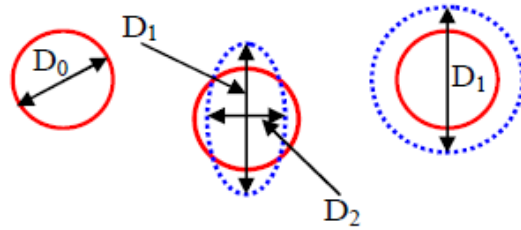
Burada;

D_1 : Şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksenini,

D_2 : Şekil değiştirmiş dairenin en küçük eksenini,

D_0 : Başlangıç daire çapı,

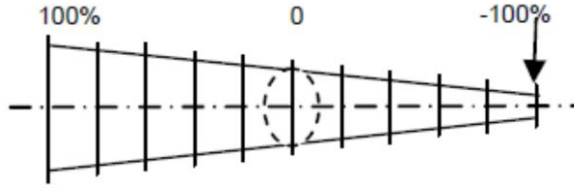
dır.



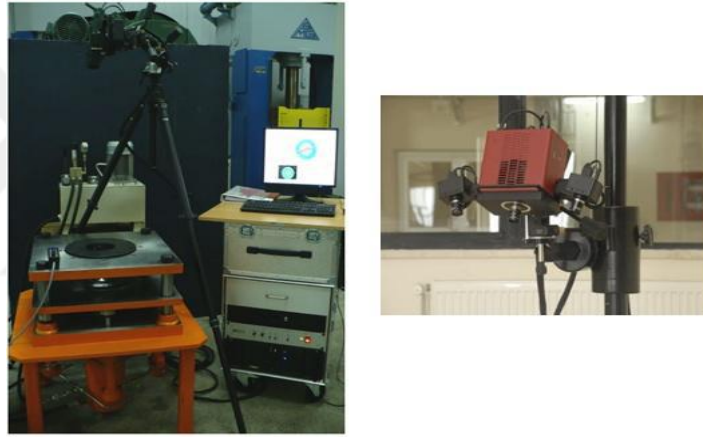
Şekil 3.17 : Başlangıç dairesi ve başlangıç dairesinin şekil değiştirmesinden sonraki durum [2].

ŞSD’nın pozisyonu malzeme dayanımına ve kalınlığa bağlıdır. Zımba çapı, ağ modeli ve takım geometrisine de bağlıdır. Deney esnasında malzemenin yağlanması, çatlağın malzemenin merkezinde oluşmasını sağlar [99].

Sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerdeki şekil değişimlerinin ölçülmesi için uygulanan bir diğer yöntemde, Mylar bandı kullanılmaktadır [22]. Mylar bandı ile ölçüm zaman alan ve ölçüm hatalarına sebep olan bir yöntemdir. Bunun sonucunda otomatik olarak yüzeydeki şekil değişimlerini ölçen sistemler geliştirilmiştir [23]. Bu yüzden bazı çalışmalarda Mylar bandları yerine yüksek çözünürlüklü kameralar ile numune yüzeyindeki şekil değişimi kayda alınmaktadır. Böylece ε_1 ve ε_2 değerleri hassas olarak ölçülebilmektedir.

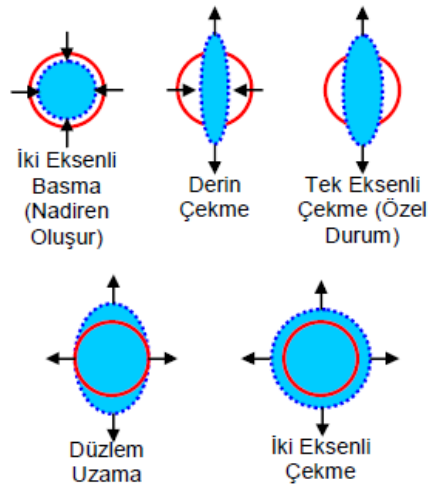


Şekil 3.18 : Mylar bandına ait örnek [24].



Şekil 3.19 : Dijital kameralara ait örnekler [25].

Son adım olarak ise ölçülen değerlerin diyagrama aktarılması ile şekillendirme sınırı diyagramı elde edilmektedir.



Şekil 3.20 : Sac malzemenin şekillendirilmesinde karşılaşılabilecek yük durumları [65].

eğrisine yakın değerlerin bulunması, seri üretimde çatlama ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Bu durumda, şekillendirme prosesini emniyetli bölgeye çekecek önlemler alınmalıdır.

Örneğin, iki eksenli çekme gerilmesinin hâkim olduğu gererek şekillendirme prosesine uğramış bir parçada, plastik şekil değiştirme miktarları şekillendirme sınırı eğrisinin üst bölgesinde kalıyorsa malzemede çatlama olacaktır. Çatlamayı önlemek için ya küçük şekil değiştirme miktarını artırma veya büyük şekil değiştirme miktarını azaltma yoluna gidilmelidir. Küçük şekil değiştirme miktarını artırmak için malzemenin bu yöndeki hareketi sınırlandırılır. Bunun için sıkıştırma kalıbına girinti çıkıntı verilerek veya bu bölgedeki sürtünme artırılarak malzemenin hareketi zorlaştırılır. Büyük şekil değiştirme miktarını azaltmak için şekillendirme derinliğini azaltma veya bölgesel incelme olayını önleme yoluna gidilir. Bölgesel incelmeyi önlemek için, erkek kalıbın bu bölge ile temas eden kısmında sürtünme artırılarak şekil değiştirme miktarı azaltılır. Bu anlatılanlar söz konusu örnek için geçerlidir. Her durum için önce bir şekil değiştirme analizi yapılarak, daha sonra çözüm yoluna gidilmelidir [6].

Genelde zimba veya erkek kalıp kuvvetini azaltacak önlemler, şekillendirme prosesinin emniyetli bölgede kalmasına katkıda bulunacaktır. Belirli bir kalıp tasarımı ile koşulları değiştirerek, şekillendirme prosesini emniyetli bölgeye çekmek mümkün değilse daha kaliteli malzeme seçimi yoluna gidilir. Bunun tersine, deneme çalışmaları sonunda şekillendirme prosesine ait veriler, şekillendirme sınırı diyagramının çok altında bulunuyorsa, daha düşük kalitelerde malzeme kullanımına geçilerek, maliyet açısından ekonomi sağlanmalıdır [2].

Eğrinin sol tarafı çekme - basma şartlarındaki şekillendirme ile ilgilidir. Büyük ya da küçük uzama şekillendirilebilirlik sınırının üstüne düştüğünde boğumlanma, uzamalar kırılma sınırlarına ulaştığında ise kırılma görülür. Bu ifade, eğrinin hem sağ hem de sol tarafı için geçerlidir. Sabit bir küçük uzama değeri için şekillendirme ve kırılma sınır eğrileri arasındaki açıklığın büyük olması, sac malzemenin çekme basma şartlarında (derin çekme) şekillendirilebilirliğe daha yatkın olduğunu göstermektedir. Küçük uzama arttığında şekillendirme ve kırılma arasındaki fark düşmektedir. Bu, küçük uzama seviyesine sahip sacı daha da güvenli kılar. Aradaki farkın büyük olması eğrilerin sola kaymasına sebep olur. Küçük uzamadaki aşırı artış kırılma değişiminin daha büyük olmasına neden olur. Belirli bir küçük uzama için büyük uzamanın artması

“n” değerinin artmasından dolayıdır. Normal anizotropinin büyük olması çekme-basma şartlarında büyük uzama miktarının daha büyük olmasını sağlar. Buradan, çekme-basma şartlarında sacın şekillendirilebilirliğinin düzlem gerilme ve germe-germe şartlarından daha iyi olduğu anlaşılır. Bunun sebebi Mohr dairesinden de anlaşılabilir gibi, kesme uzamasının çekme basma şartlarında daha büyük olması nedeniyle olmaktadır. Mekanik özelliklerin yüksek olması kırışmaya karşı olan direnci geliştirerek şekillendirilebilirliği artırmaktadır [10].

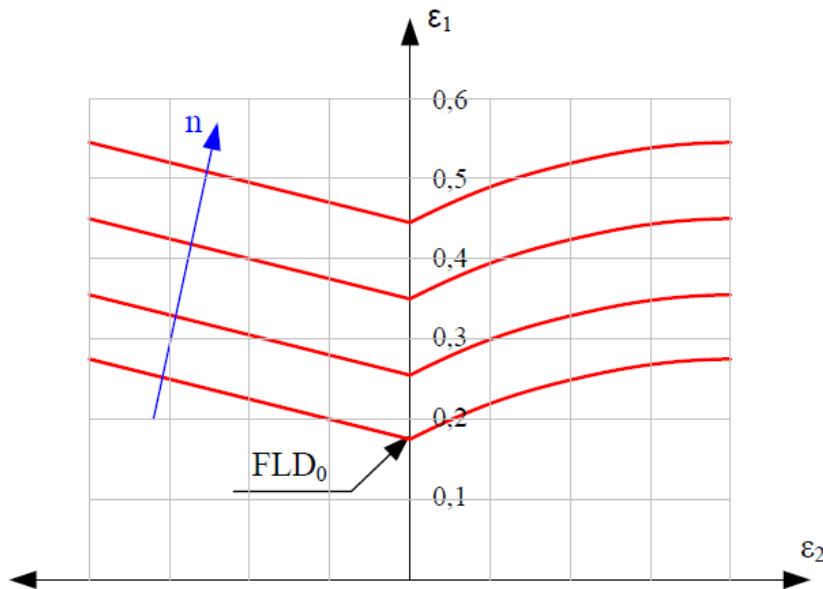
Literatürde [1] benzer olarak dikine anizotropi artışı ile şekillendirme ve kırılma eğrileri arasındaki açıklığın artacağına işaret edilmektedir.

Kalınlık artışı kırılma eğrisinin yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Kırılma ve şekillendirme eğrileri arasındaki açıklığın yüksek olması malzemenin yüksek çekilebilirlik (çekilerek uzatmaya yatkın) sergileyeceğini göstermektedir. Kalınlık, derin çekilebilirliği artırır ve iki eğri arasındaki açıklığı büyütür. Kalınlık düştüğünde ise açıklık azalacaktır [31].

3.3.1 DC04 sac malzeme için ŞSD literatür özeti

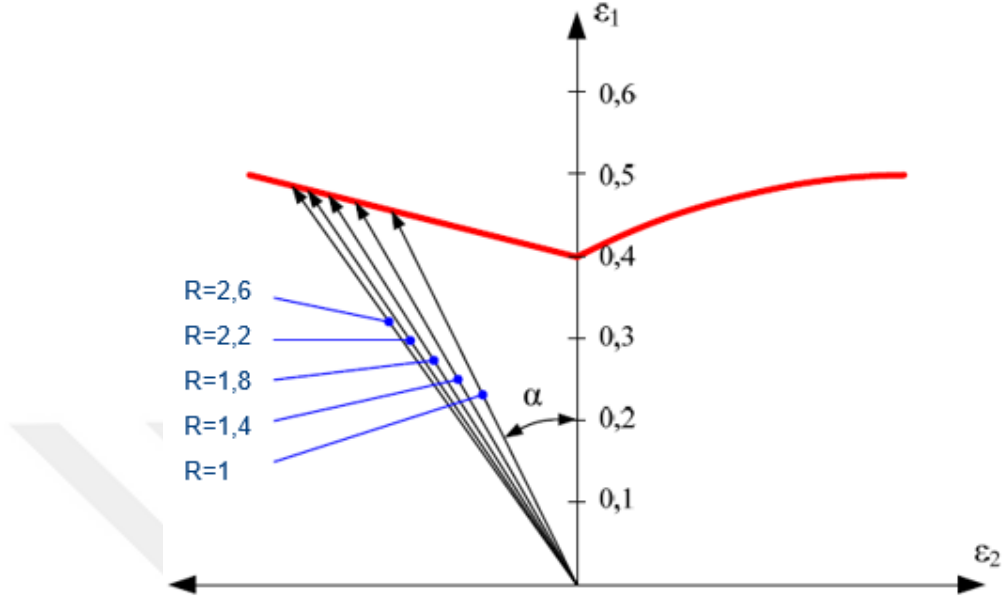
Literatürde, DC04 sacının pekleşme üsteli, anizotropi katsayısı ve sac kalınlığına göre ŞSD üzerindeki etkisi Şekil 3.22, 3.23 ve 3.24’ de verilmiştir.

Şekil 3.22’de, DC04 sacı için pekleşme üsteli arttıkça, sacın güvenli biçimde şekillenmesine, özellikle en büyük birim şekil değiştirme yönünde olumlu katkı sağladığı görülmektedir [1].



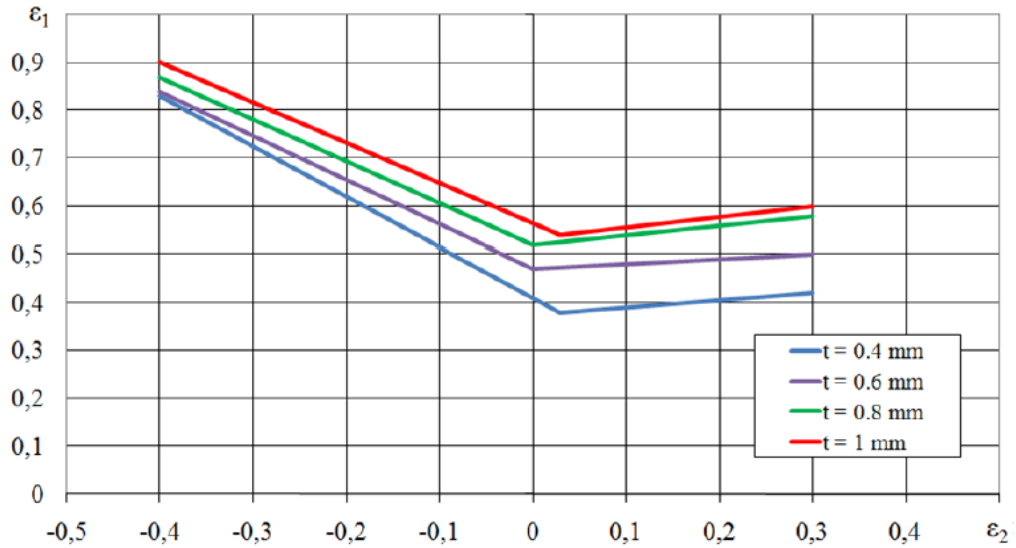
Şekil 3.22 : DC04 sacının pekleşme üsteline göre ŞSD’nin değişimi [1].

Şekil 3.23’ de görüleceği üzere, DC04 sacı için anizotropi katsayısının artması, enküçük birim şekil değiştirme yönünde şekillendirme sınır eğrisinin ilerlemesini sağlamaktadır [1].



Şekil 3.23 : DC04 sacının anizotropi katsayısına göre ŞSD'nin değişimi [1].

Şekil 3.24’ de DC04 sacının farklı et kalınlıklarındaki ŞSD eğrilerini gösterilmiştir. Sac kalınlığının artması kırılma riskini azaltmaktadır.

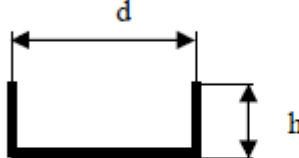
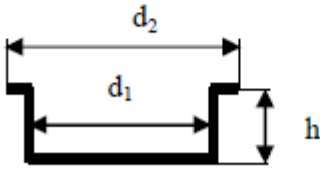


Şekil 3.24 : DC04 farklı kalınlıklardaki ŞSD diyagramı [1].

3.4 Derin Çekme

Derin çekme sırasında sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse, derin çekilerek elde edilen kabın yüzeyi “A” ile, çekilecek sacın yüzeyi “A1” eşit olmalıdır. Dolayısıyla, çekilecek sacın çapı “D” ile gösterilirse; “ $A_1 = \pi D^2/4 = A$ ”. Burdan; “ $D = \sqrt{4A/\pi}$ ” bulunur. Derin çekme ile elde edilecek kap, elemanlara ayrılarak bu elemanların yüzeylerinin toplamı “ ΣA ” ile gösterilirse, çekilecek sac çapının “ $D = \sqrt{\Sigma 4A/\pi}$ ” şeklinde hesaplanması en uygun yoldur [8]. Çeşitli kap şekilleri için “D” değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Çekilecek sac parça çapının hesaplanması için formüller [8].

Kap Şekli	Çekilecek Sac Çapı
	$\sqrt{d^2 + 4dh}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$

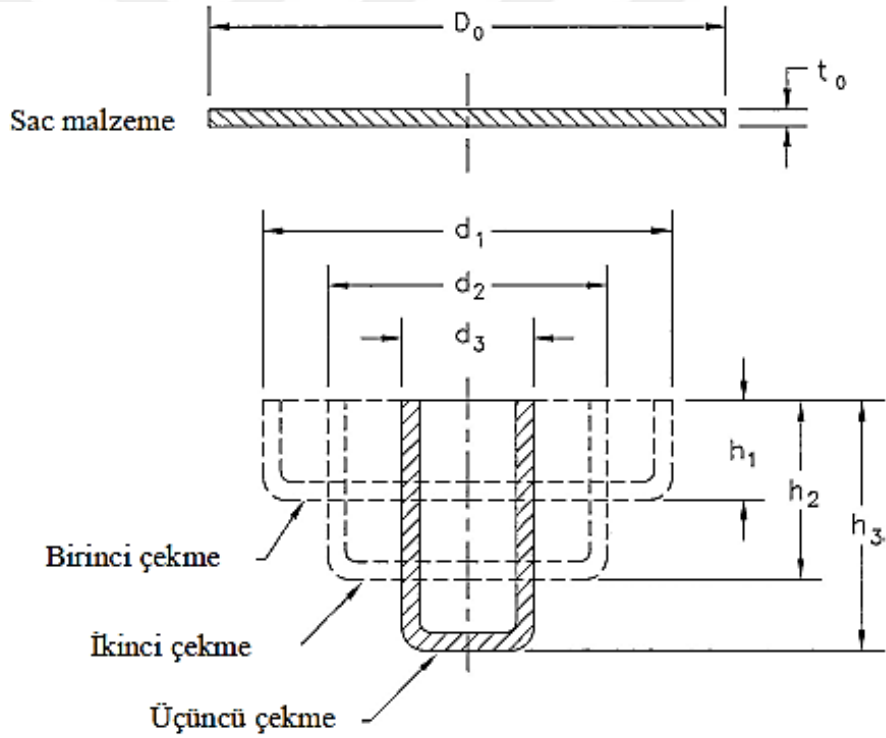
Derin çekme sırasında sac pekleşir. Pekleşme ise derin çekmede kutu yüksekliğini sınırlayan bir faktördür [8]. Diğer bir deyimle, derin kutular bir prosede çekilemezler. Sünek metaller derin çekmeye en uygun olanlardır.

Pratikte $D/d > 21/20$ olduğu takdirde pot çemberi kullanılır. $D/d < 21/20$ olduğunda ise proses pot çemberi kullanılmadan ve katlanmalar meydana gelmeden yapılabilir [8]. İlk kademede elde edilecek kabın iç çapı “ d_1 ”, çekilecek sac çapı “D” ise; “ $d_1 = m_1 D$ ” ve ikinci ve daha sonraki kademeler için kap çapı, “ $d_n = m_n d_{n-1}$ ” olarak hesaplanır. Kademelendirme sayısı olarak adlandırılan “m” değerleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Çeşitli malzemeler için kademelendirme sayıları [8].

Malzeme	Pot Çemberli Çekme		Pot Çembersiz Çekme
	m_1	m_2	$m_1=m_2$
Çelik sac (kalınlık<2 mm)	0,56	0,80	0,90...0,93
Çelik sac (kalınlık>2 mm)	0,56	0,83	0,90...0,93
Prinç, bakır, gümüş (kalınlık<2 mm)	0,50	0,75	0,90...0,93
Prinç, bakır, gümüş (kalınlık>2 mm)	0,52	0,75	0,90...0,93
Çinko	0,75	0,91	0,90...0,93
Alüminyum (kalınlık<2 mm)	0,55	0,80	0,90...0,93
Alüminyum (kalınlık>2 mm)	0,55	0,83	0,90...0,93
Paslanmaz Çelik	0,60	0,80	0,90...0,93

Şekil 3.25’de ise silindirik bir kutunun ikinci ve/veya daha sonraki bir kademede derin çekilmesiyle ilgili örnek görülmektedir.



Şekil 3.25 : Silindirik bir kabın kademeli derin çekilmesi [68].

3.4.1 Zımba ile kalıp arasındaki boşluk (çekme aralığı)

Çekme aralığı için aşağıdaki deneye dayalı denklemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir:

$$\text{Çelik için} \quad w=t+0,07\sqrt{10t}$$

$$\text{Alüminyum için} \quad w=t+0,02\sqrt{10t}$$

$$\text{Isıya dayanıklı alaşımlar için} \quad w=t+0,20\sqrt{10t}$$

Diğer demir dışı malzemeler için

$$w=t+0,04\sqrt{10t}$$

Burada;

t: Deney malzemesinin kalınlığı,

w: Zımba ve kalıp arasındaki boşluk miktarıdır (saç malzeme dahil) [8].

3.4.2 Kalıp kenarının (çekme kenarının) yuvarlatılması

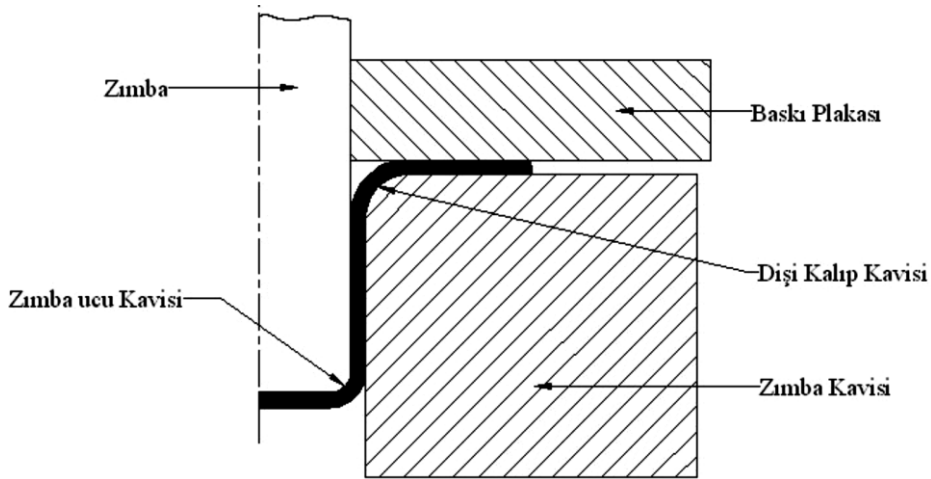
Bir derin çekme takımından iyi sonuç alınmasında çekme kenarı (dişi kalıp) yuvarlatmasının büyük etkisi vardır (Şekil 3.25).

Çelik için, birinci kademede “ $r=0,8\sqrt{(D-d)t}$ ” alınmalıdır. Alüminyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri daha düşük olduğundan, “r” değeri çeliğe kıyasla % 10 kadar büyük alınır: “ $r=0,9\sqrt{(D-d)t}$ ”. İkinci ve daha sonraki kademelerde ise çekme kenarı yuvarlatma yarıçapı “ $r_n=(d_{n-1}-d_n)/2$ ” alınır [88].

3.4.3 Zımba kenarının yuvarlatılması

Sacın zımba tarafından delinmemesi için zımba kenarı uygun şekilde yuvarlatılmalıdır (Şekil 3.26).

Saç kalınlığına bağlı olarak “ $5t < R < 10t$ ”, ıstampa çapına bağlı olarak da “ $R=(0,1...0,3)d$ ” alınabilir [88].



Şekil 3.26 : Zımba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi [69].

3.4.4 Pot çemberi kuvveti

Çeşitli malzemeler için pot çemberi basıncı Çizelge 3.5’te verilmiştir. Pot çemberi kuvveti ise; basıncın temas alanı ile çarpımıdır. Dolayısıyla birinci kademe için pot çemberi kuvveti; “ $F_p = \pi/4(D^2-d^2)p$ ” denklemiyle hesaplanır.

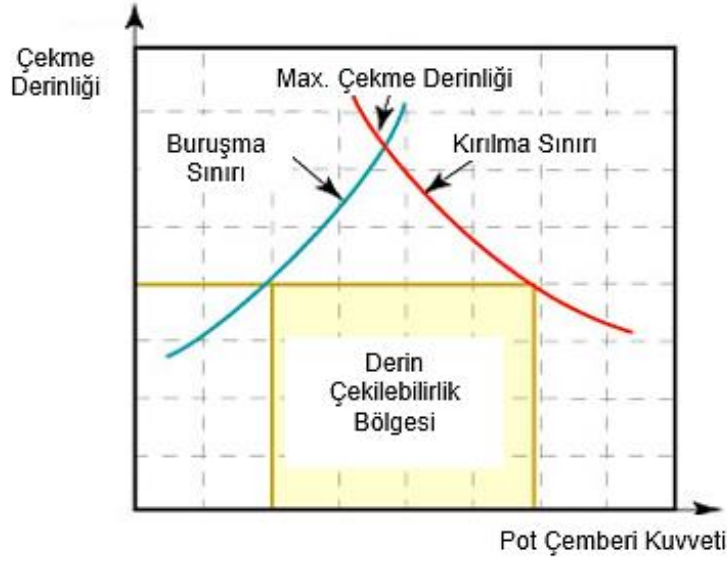
Çizelge 3.5 : Çeşitli malzemeler için pot çemberi basıncı [88].

Malzeme	p (MPa)
Alüminyum	1...1,2
Çinko	1,2...1,5
Düralümin	1,5...1,6
Paslanmaz Çelik	2
Pirinç	2
Çelik	2,5
Kalay	3

Pot çemberi kuvvetinin yetersiz olması halinde kırışmalara engel olunamayacağı açıktır. Gereğinden büyük pot çemberi kuvveti ise kırılmaya neden olur. Şekil 3.27 ve Şekil 3.28 bu durumları açıklamaktadır.



Şekil 3.27 : Pot çemberi kuvvetinin etkisi [33].



Şekil 3.28 : Çekme derinliği ve pot çemberi kuvvetine göre sac çekilebilirlik diagramı [33].

3.4.5 Çekme kuvveti ve işi

Derin çekme sırasında zımbanın uyguladığı maksimum kuvvet, birinci kademe için

“ $F_d = \pi d t \sigma_c m$ ” denklemiyle hesaplanır.

Bu ifadede,

d: ıstampa çapı,

t: sac kalınlığı,

σ_c : sacın çekme dayanımı,

m: ise d/D oranına bağlı bir katsayıdır (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6 : Derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında “d/D” oranına bağlı olarak “m” değerleri [8].

d/D	0,55	0,575	0,60	0,625	0,65	0,675	0,70	0,725	0,75	0,775	0,8
m	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40

İkinci ve daha sonraki kademelerde çekme kuvveti birinci kademe için hesaplanan değer 5/4 katı alınır. Çekme işi ise çift tesirli preste; “ $W = x F_d h$ ”, tek tesirli preste; “ $W = (x F_d + F_p) h$ ” denklemleri ile hesaplanır.

Bu ifadelerde, “h” çekme derinliği, “x” çekme kuvvetinin kurs sırasındaki değişimini göz önüne alan bir katsayıdır (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7 : Derin çekme işinin hesaplanmasında “x” değerleri [8].

d/D	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
X	0,80	0,77	0,74	0,70	0,67	0,64

3.5 Malzemenin Mekanik Davranışının İncelenmesi

Tezin bu bölümünde sac malzemeye şekil verme üzerinde etkili olan plak ve akma kriterleri incelenmiştir. İncelenen bu kriterler sonlu elemanlar yönteminde malzemenin plastik davranışını karakterize etmek için kullanıldığından tezin bu bölümünde yer verilmiştir.

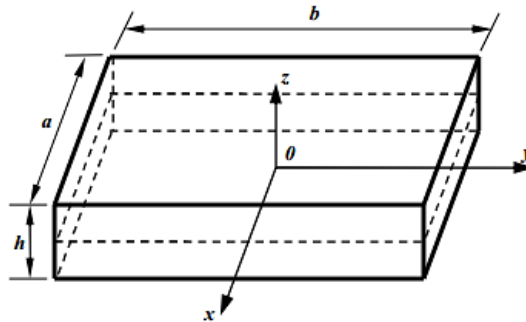
3.5.1 Plak teorisi

Plaklar, üçüncü boyutu (kalınlık) diğer iki boyutunun yanında (on kat veya daha fazla) küçük olan yapı elemanları olarak tanımlanmaktadır. Bir parçanın ince plak olarak varsayılabilmesi için (3.27) eşitliklerinde ki koşullar sağlanmalıdır.

$$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{10} \quad \text{veya} \quad \frac{h}{a} \leq \frac{1}{10} \quad (3.27)$$

Plak yapılar kalınlık boyutu diğer boyutlarına nazaran çok küçük olduğundan bir düzlem gerilme problemi olarak ele alınmaktadır. Şekil 3.29 ‘da görüldüğü gibi, $z = \pm h$ bölgesi x ve y düzlemi tarafından sınırlanmıştır. Bu yönde (z) plak gerilme taşımamaktadır (stress-free) ve $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ dir.

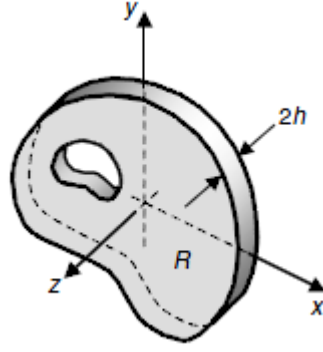
koşulu sağlanmalıdır.



Şekil 3.29 : Üniorm kalınlıktaki dikdörtgen bir plağın geometrisi ve koordinatları [75].

Kalınlık yeterince ince olduğundan z yönündeki gerilme değişimleri çok az olacaktır ve bu yüzden tüm kısım boyunca sıfır olacaktır [72]. Gerilme durumu için (3.28) eşitlikleri yazılabilir.

$$\sigma_x = \sigma_x(x,y), \sigma_y = \sigma_y(x,y), \tau_{xy} = \tau_{xy}(x,y), \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (3.28)$$



Şekil 3.30 : İnce elastik plağın düzlem gerilme halinin temsili [72].

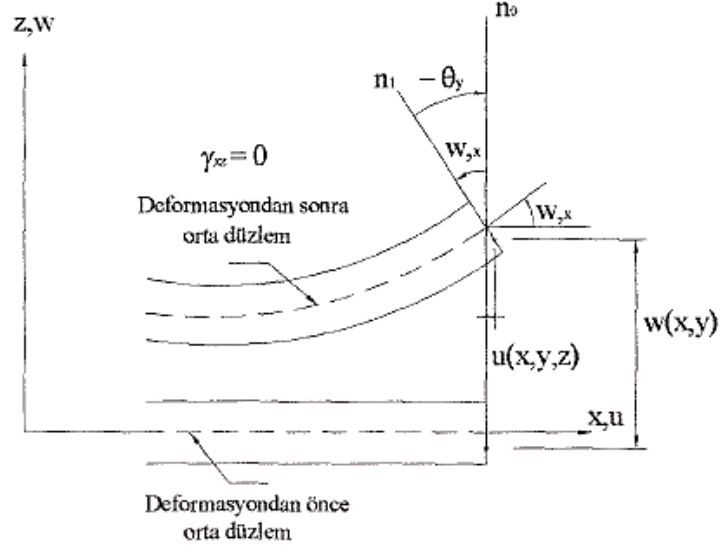
Sadeleştirilmiş düzlem gerilme halini kullanarak, karşılık gelen birim şekil değiştirme bileşenleri Hooke yasasından;

$$\begin{aligned}
 e_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) \\
 e_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) \\
 e_z &= -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{\nu}{1-\nu}(e_x + e_y) \\
 e_{xy} &= \frac{1+\nu}{E}\tau_{xy}, \quad e_{xz} = e_{yz} = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

bağıntıları elde edilir [72].

3.5.2 Kirchhoff plak teorisi

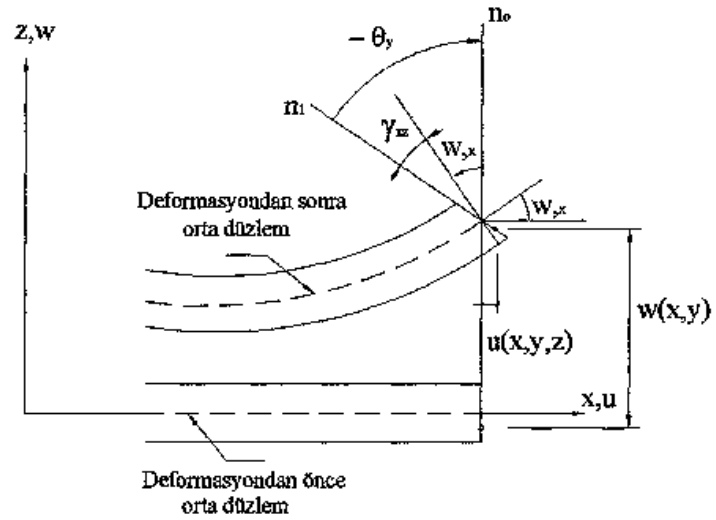
Kirchhoff plak teorisi, Şekil 3.31’de verildiği gibi deformasyondan önce düzleme dik olan düzlem kesitler (n_0), deformasyondan sonra da orta düzleme dik kalırlar (n_1) [74]. Teoride enine kayma şekil değiştirmeleri ve kayma gerilmeleri ihmal edilmektedir ve bu da gerçekte yalnızca ince plaklar için geçerlidir. Kalın plakların analizinde ise, enine kayma gerilmeleri ve kayma şekil değiştirmeleride hesaba katılmaktadır ve bu da, Mindlin Plak Teorisi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.31 : Kirchhoff plak teorisinin kinematığı [74].

3.5.3 Mindlin plak teorisi

Mindlin plak teorisi Kirchhoff hipotezinin genelleştirilmiş bir halidir. Bu teoride, plağın deformasyondan önce, orta düzleme dik olan düzlem kesitler (n_0), deformasyondan sonra da düzlem kalmasına rağmen orta düzleme dik olması gerekmez (n_1) varsayımı yapılmaktadır [74]. Enine kayma şekil değişimleri ve kayma gerilmeleri sabittir olarak kabul edilir.



Şekil 3.32 : Mindlin plak teorisinin kinematığı [74].

3.5.4 Akma kriterleri

Akma yüzeyinin geometrisi akma şartının belirlenmesinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle akma yüzeyinin geometrisini ifade eden pek çok akma kriteri geliştirilmiştir. Bu bölümde tez çalışmaları kapsamında kullanılmış olan akma kriterlerine dair bilgiler sunulmuştur.

3.5.4.1 Tresca akma kriteri

Tresca (1864) akma kriteri maksimum kayma gerilmesi kriteri olarak da bilinmektedir. Bu kritere göre akma, kayma gerilmesinin kritik bir değer ulaşması ile başlamaktadır. Kriter aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\max \{ |\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3| \} = \sigma_y \quad (3.30)$$

Burada $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ asal gerilmeler ve σ_y akma gerilmesidir.

3.5.4.2 Von-Mises akma kriteri

Von-Mises (1913) akma kriterinde üç eksenli yükleme durumu için akma yüzeyi daire olarak ifade edilmiştir. Von-Mises akma kriteri J_2 kriteri olarak da bilinmektedir. İzotropi kabulü yapılan bu kriterinde akma kriteri aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

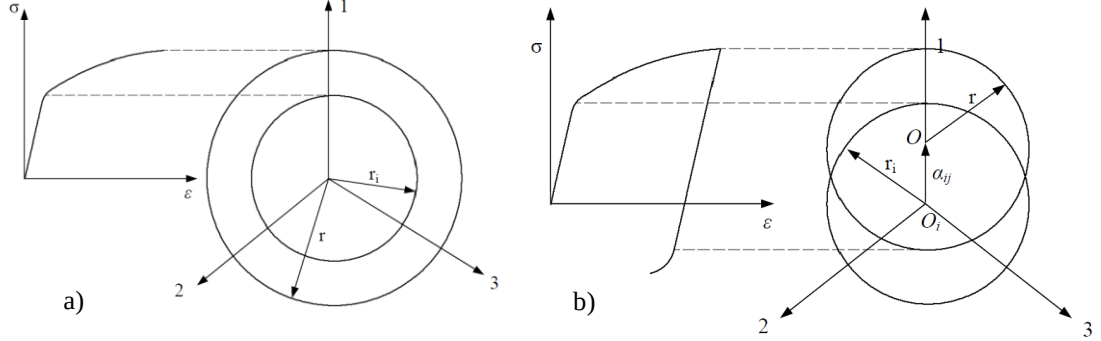
$$J_2 = S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_y^2 \quad (3.31)$$

Burada S_{ij} deviatorik gerime tensörü ve σ_y akma gerilmesidir

3.5.5 Pekleşme modelleri

Elastik deformasyon boyunca malzemenin mekanik özelliklerinde bir değişim olmaz, ancak malzeme elastik limit sınırını geçecek şekilde yüklenip daha sonra yük kaldırılırsa malzemenin mukavemet özellikleri değişir. Bu olaya pekleşme denir. Pekleşme olayı ile akma yüzeyi değişim gösterir. Eğer yük altındaki malzemede akma yüzeyinde herhangi bir değişim yoksa (elastik-mükemmel plastik malzemelerde olduğu gibi) pekleşme durumundan söz edilemez [76].

Pekleşme iki temel modda gerçekleşir: izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme. İzotropik pekleşmede akma yüzeyinin merkezinin sabit kalarak, yüzeyin şeklinin değişmeden büyüdüğü kabulü yapılır (Şekil 3.33a).



Şekil 3.33 : İzotropik ve kinematik pekleşme modelinin şematik olarak

Akma başladıktan sonra gerilmenin artırılmasıyla pekleşme görülür. r_i yarıçapındaki ilk akma yüzeyi merkezi sabit kalacak şekilde büyür. 1, 2 ve 3 rakamları asal eksenleri ifade etmektedir. Gerilme 1 ekseninde uygulanmıştır. İzotropik pekleşme modeline göre çekmedeki akma dayanımı basmadaki akma dayanımına eşittir [77]. İzotropik pekleşme modeli çevrimsel yüklemeye maruz kalmayan parçaların plastik deformasyonunda kullanılabilir.

Yüklemenin bir düz bir ters değiştiği durumlarda kinematik pekleşme modeli kullanılmalıdır. İzotropik pekleşme modelinde Bauschinger etkisi dikkate alınmaz. Gerçekte, çevrimsel yüklemenin her adımında malzeme pekleşmeye uğrarlar. Bunun sonucunda, basmadaki ve çekmedeki akma gerilmeleri birebirinden farklı olur. Şekil 3.33b’de de gösterildiği gibi, basmadaki akma gerilmesi, çekmedekinden daha düşüktür. Bu durum malzemenin yumuşaması olarak adlandırılır. Akma başladıktan sonra gerilmenin artırılmasıyla pekleşme görülür. r_i yarıçapındaki ilk akma yüzeyi büyüklüğü sabit kalacak şekilde uygulanan gerilme doğrultusunda kayar. O_i yüzeyin ilk durumundaki merkezini ve O son durumundaki merkezini belirtmektedir. Akma yüzeyini ifade eden çemberin ilk yarıçapı r_i son yarıçapına eşittir. 1,2 ve 3 rakamları asal eksenleri ifade etmektedir. Gerilme 1 ekseninde uygulanmıştır. α_{ij} akma yüzeyinin ne kadar yer değiştirdiğini ifade eden tensördür. Kinematik pekleşme modeline göre çekmedeki akma dayanımı basmadaki akma dayanımından yüksektir [77]. Kinematik pekleşmede akma yüzeyinin şekli ve büyüklüğü değişmeden yer değiştirdiği kabulü yapılır.



4. YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması üç ana aşamada gerçekleşmiştir. Bu aşamalar, derin çekme işlemi ile “Çanak” olarak adlandırılan parçanın basılması, basılı sac parçanın kalınlık, çekme derinliği, genişliği ve uzunluğunun ölçülmesi ve sac malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çekme deneyini kapsamaktadır.

4.1 Parçanın Derin Çekilmesi İşlemi

Parça 11 operasyondan geçen bir progresif kalıp makinesinde basılmaktadır. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, rulo halinde gelen sac metal makaraya sarılmış halden açılıp yataklayıcı silindirik şeritler üzerinden geçerek cihaza yerleştirilmektedir.



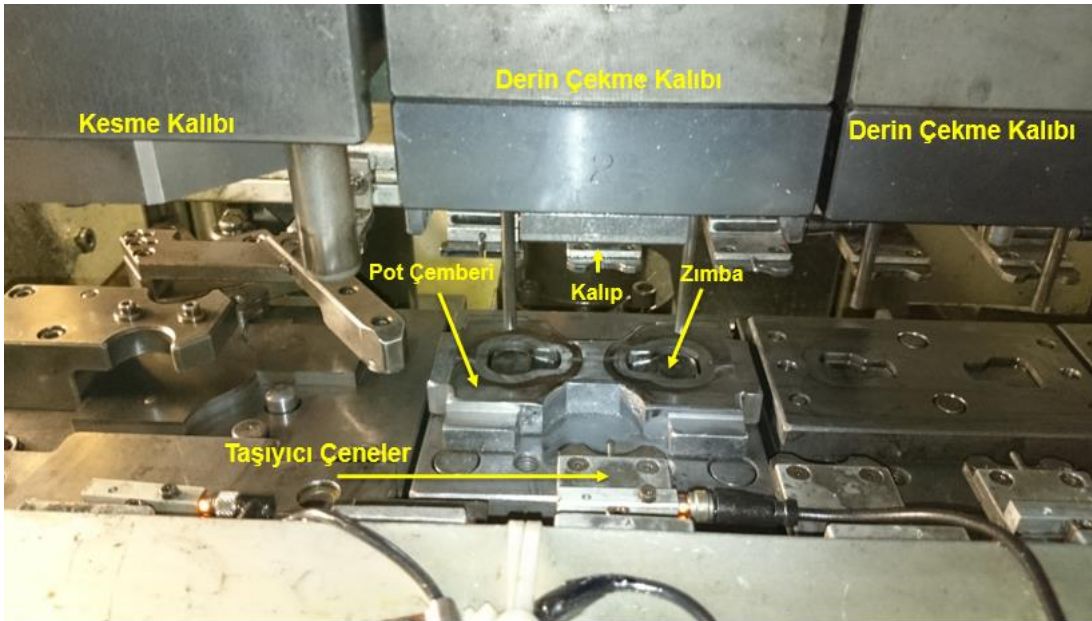
Şekil 4.1 : Progresif kalıp makinesinin bir görünümü

Sac metal ilk istasyonda kesme kalıbı ile kesilmektedir. Ardından 3 aşamalı derin çekme kalıpları ile parça sırasıyla Şekil 4.2’de gösterilen formları almaktadır.



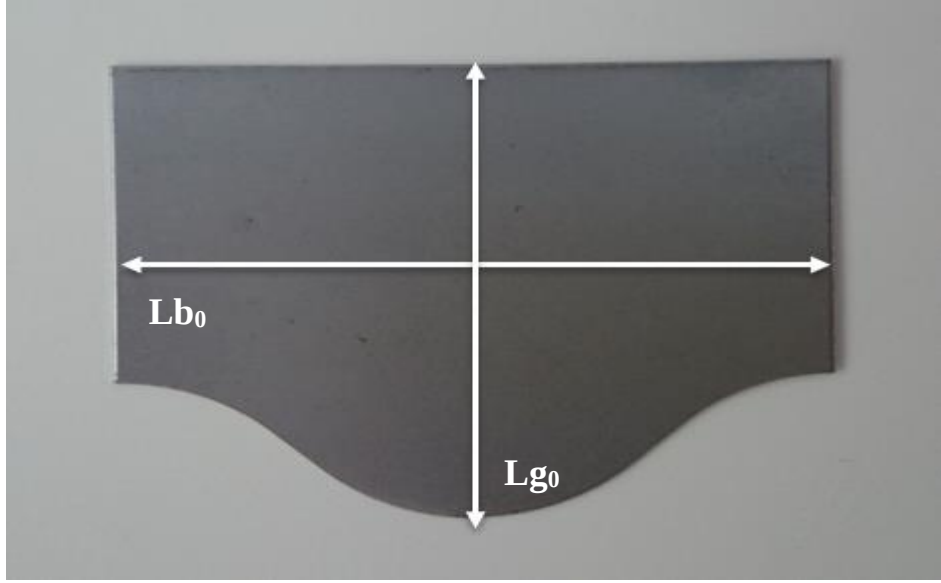
Şekil 4.2 : Kesme ve derin çekme aşamalarına ait görünümeler

Bu progresif kalıp makinesinde, kesme, derin çekme, delme ve sıvama işlemleri yapılmaktadır. Parça her istasyonda ki baskı sonrasında taşıyıcı çeneler ile bir sonraki istasyona taşınmaktadır. Şekil 4.3’de bu parçayı basan kalıpların bir görünümü açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 4.3 : Kesme ve derin çekme kalıplarının bir görünümü

İlk operasyonda sac doğrusal olmayan bir geometri ile kesilmektedir. Her kesim ve işlemde parçada sonra ölçüsel farklılıklar oluşabilmektedir. Bunun için, Şekil 4.4’de gösterilen uzunlukların ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler 20 numune üzerinde kalibrasyonu yapılmış dijital kumpas ile alınmıştır. Bu ölçümler sonuçlar kısmında bir tablo halinde sunulmuştur.



Şekil 4.4 : Kesme işleminin ardından oluşan parça geometrisi ve ölçüm parametreleri

Burada,

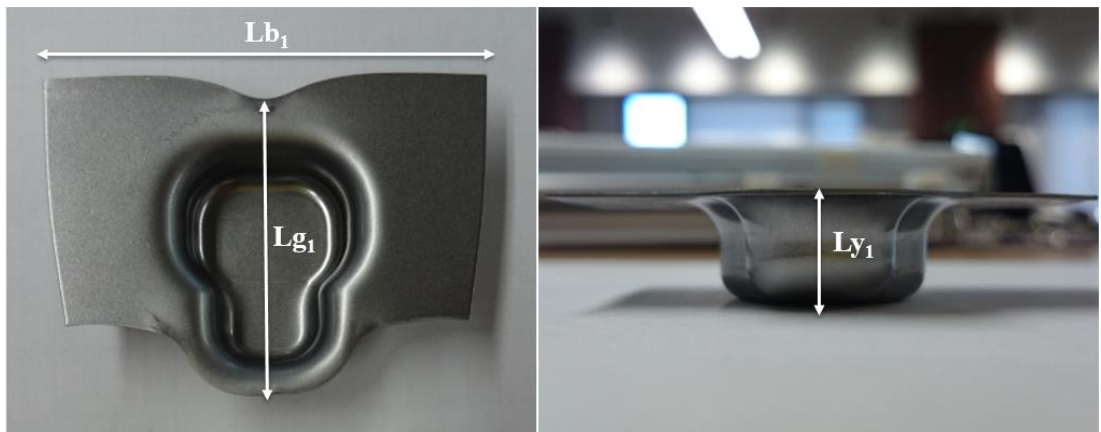
Lb_0 : Kesme sonrası oluşan parça uzunluğu

Lg_0 : Kesme sonrası oluşan parça genişliği

Lt_0 : Kesme sonrası oluşan parça kalınlığı

dır.

Derin çekme işleminden sonra, kesme işleminde olduğu gibi parça üzerinde uzunluk, genişlik, derinlik ve kalınlık parametreleri incelenmiştir. Uzunluk, genişlik ve kalınlıklar kalibrasyonu yapılmış dijital kumpas ile, derinlik ise kalibrasyonu yapılmış dijital mihengir ile ölçülmüştür (Şekil 4.5, 4.6) .



Şekil 4.5 : Derin çekme işleminin ardından oluşan parça geometrisi ve ölçüm parametreleri

Burada,

Lb_1 : I. Derin çekme sonrası oluşan parça uzunluğu

Lg_1 : I. Derin çekme sonrası oluşan parça genişliği

Lh_1 : I. Derin çekme sonrası oluşan parça derinliği

dır.

Şekil 4.6'da çanak derinliğinin ölçüm işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Çanak derinliğinin mihengir ile ölçüm işlemi

Derin çekme sonucu oluşan kalınlıkların ölçümü için Şekil 4.7'de görüldüğü gibi parça kesilmiş kesitlerden ölçüm alınmıştır. Kalınlık ölçümü kumpas ile hassas yapılması zor bir işlemdir. Parçanın her kesitinde kalınlık ölçümünü doğru yapabilmek kumpas ile neredeyse imkansızdır. Bu sebeple kumpas ile ölçülmesi daha kolay bölgelerden parça tel erezyon makinesiyle kesilerek kalınlık ölçümleri belirli noktalarda alınmıştır.



Şekil 4.7 : Kalınlık ölçümü için parçanın kesilmiş görüntüleri

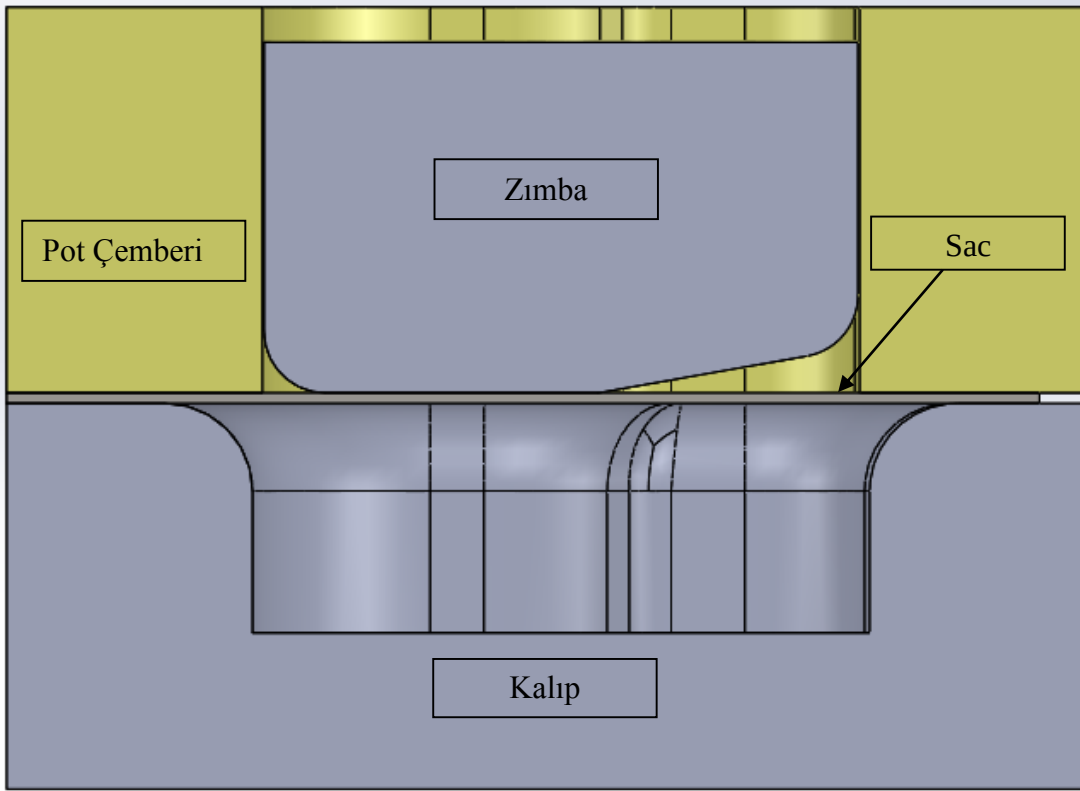
Sonuçlar kısmında, parça kalınlıklarının ölçüm sonucu ve sonlu elemanlar analizi sonucunda oluşan kalınlıkların karşılaştırılması yapılmıştır.

4.1.1 Kalıpların 3B modelleri

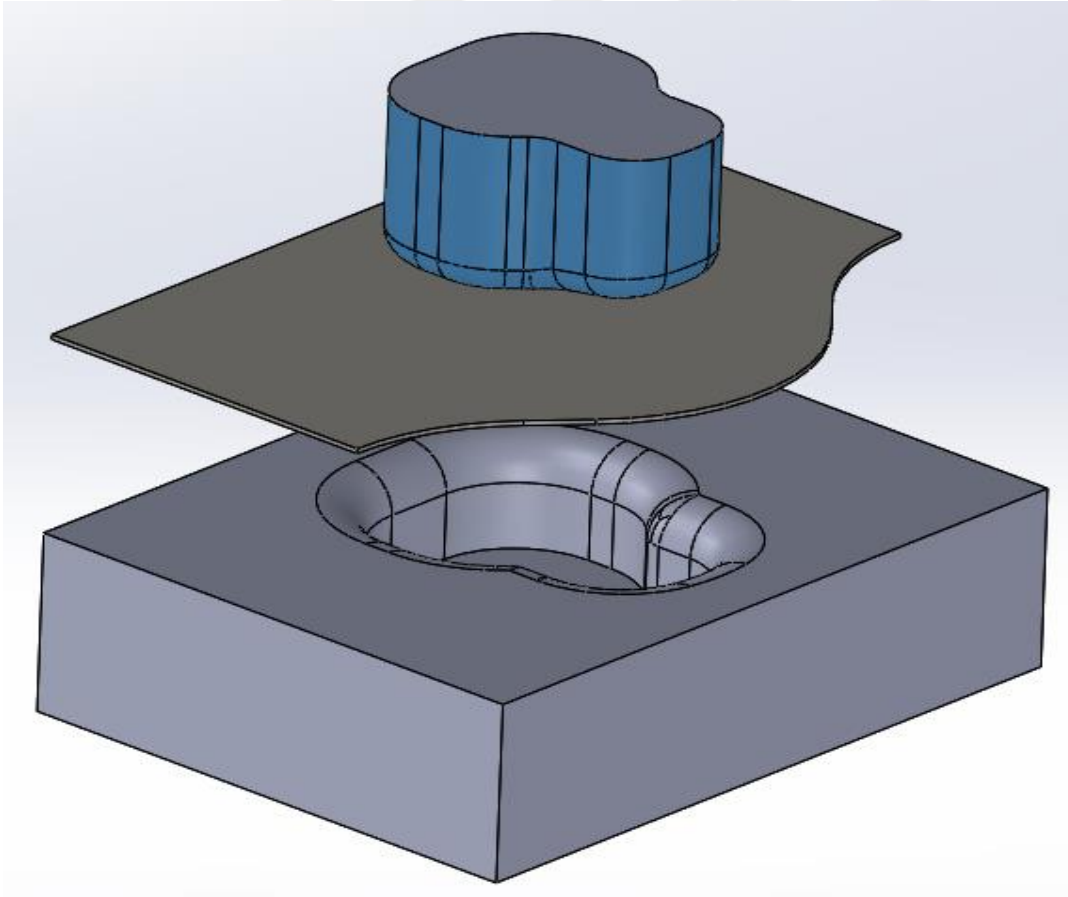
Kalıpların birebir çizimleri ile sonlu elemanlar analizi yapmak hem çözüm süresinin uzamasına hem de analizin yakınsamamasına sebep olabilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde model sonlu bir model olarak, yani sonsuz noktadan oluşan gerçek geometriyi sonlu elemanlara bölerek analiz gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında, sac metal kalıpları bir çok karmaşık parçadan oluşan elemanlardır ve iş parçasının formunu verecek olan ana parçalar üzerinde çalışmak daha doğru olacaktır. Çünkü parçanın çalışma koşulları analiz modellenirken oluşturulmaktadır.

4.1.2 I. Derin çekme kalıbı 3B modeli

Derin çekme işleminde kullanılan kalıbın Şekil 4.8’ de kesit görünümü ve Şekil 4.9’da patlamış görünümü verilmiştir. Zımba ve kalıp arasındaki açıklık kalıp tasarımcısı tarafından 0,67 mm olarak verilmiştir. Kullanılan sac metal kalınlığı ise 0,6 mm’dir. Zımba yarı çapı uniform ve 3,5 mm’ dir. Zımbanın kalıp içersinde alacağı mesafe 13,1 mm’dir.



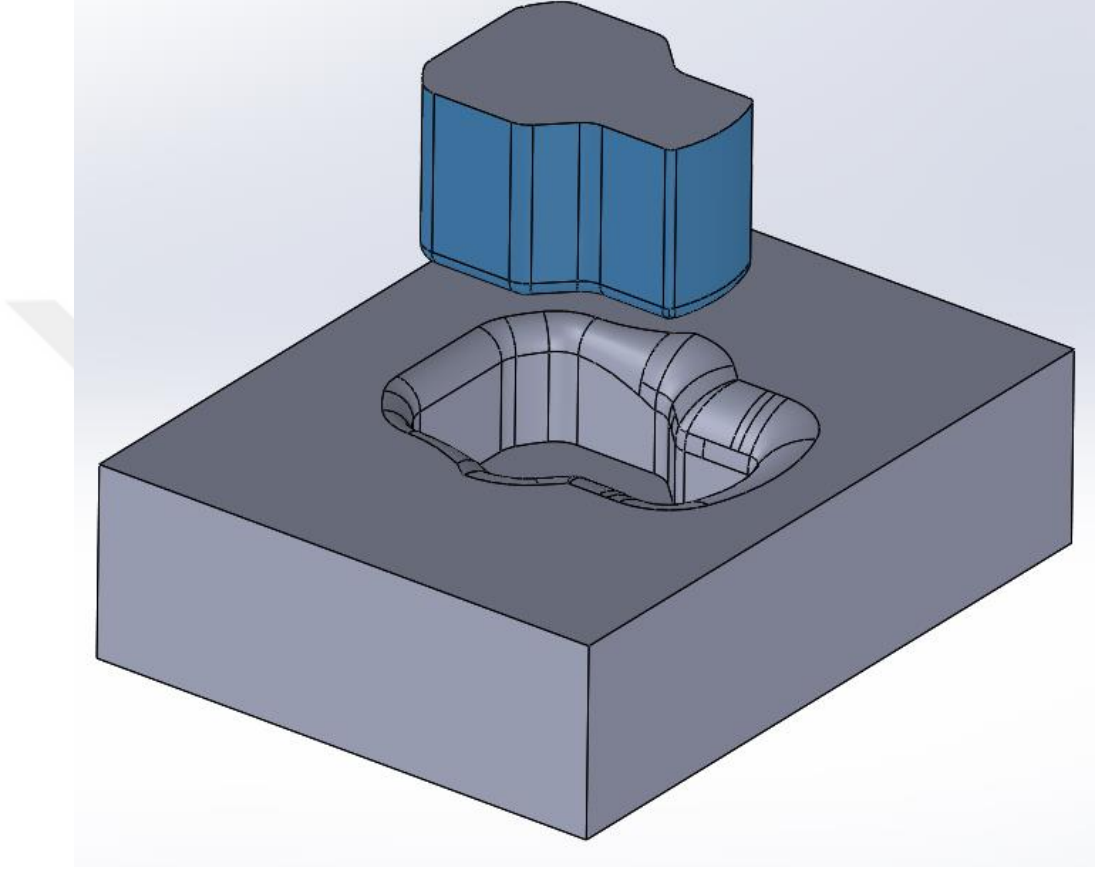
Şekil 4.8 : I. derin çekme kalıbı kesit görünümü



Şekil 4.9 : I.derin çekme kalıbı patlatılmış görünümü

4.1.3 II. Derin çekme kalıbı 3B modeli

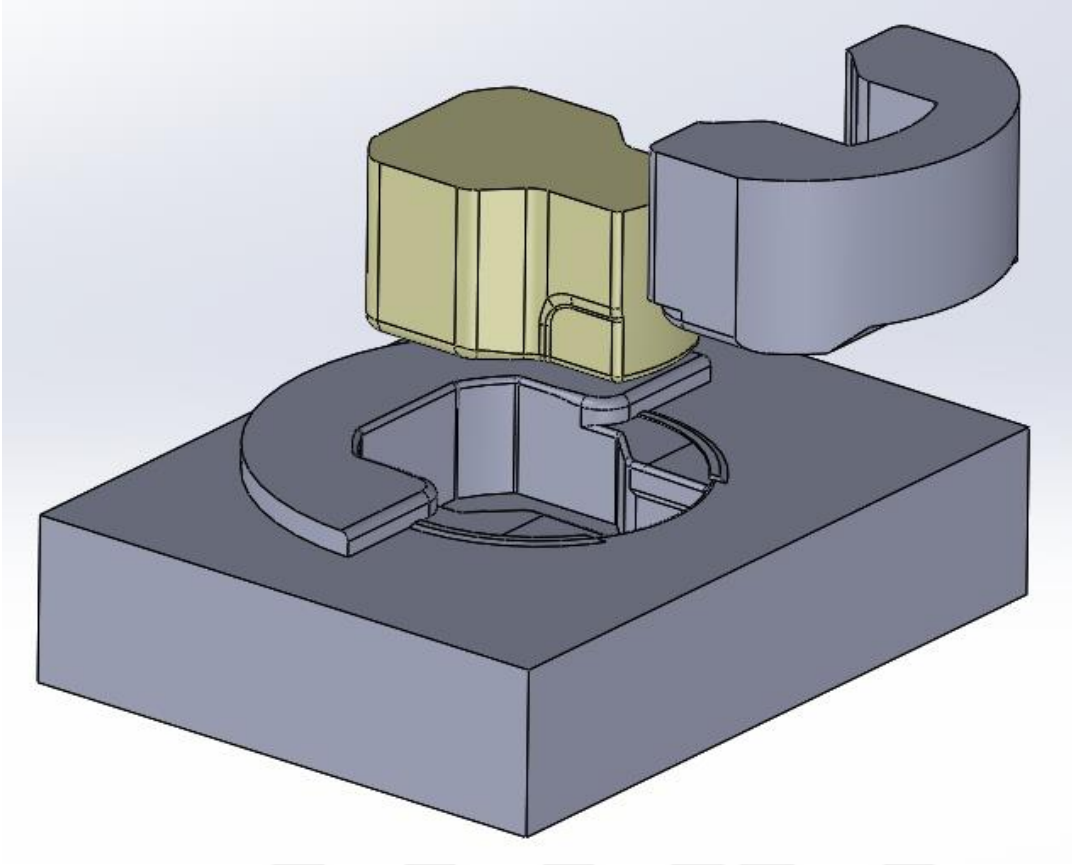
Çekme kalıbı ikinci operasyonu oluşturmaktadır. İlk operasyona göre zımba kenar eğrilik yarıçapı 2 mm dir ve öncekie göre daha keskindir. Istamp ve matris arasındaki boşluk kalıp tasarımcısı tarafından 0,62 mm olarak verilmiştir. Zımbanın kalıp içerisinde alacağı mesafe 14.1 mm 'dir.



Şekil 4.10 : II. derin çekme kalıbının patlatılmış görüntüsü

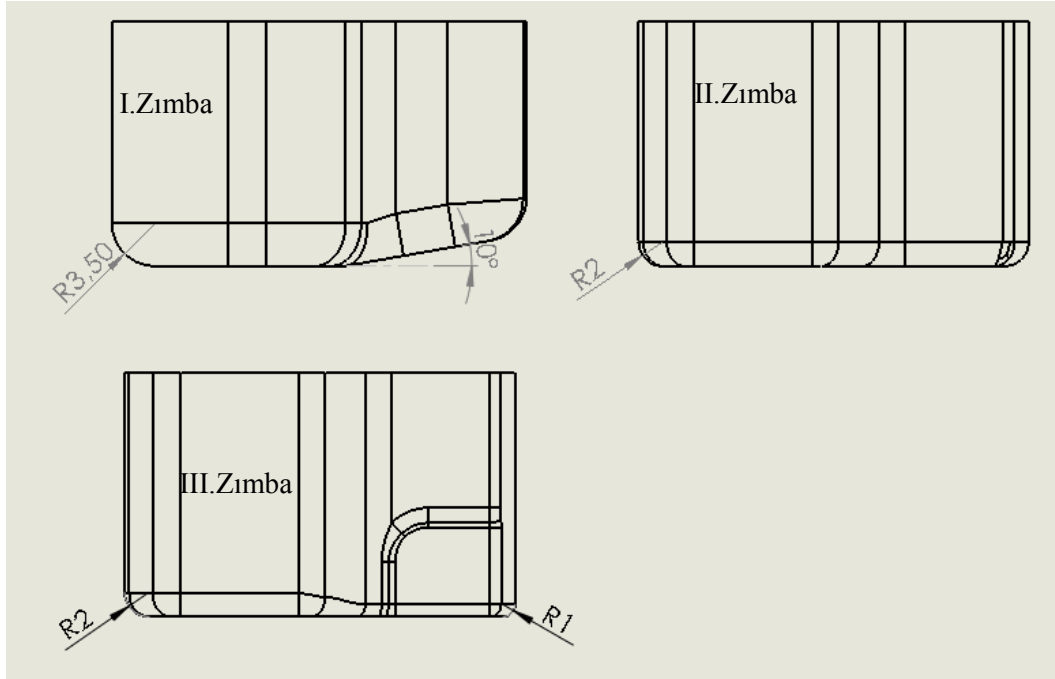
4.1.4 III. Derin çekme kalıbı

III. kalıp aşamalı derin çekme işleminin son adımıdır. Bu aşamada iki zımba ile birlikte iş parçasına form verilmektedir. Parçanın ana hatlarını oluşturan son operasyondur. Bu baskı ile kenar eğrilik yarıçapı önceki operasyona göre daha keskin hatlara getirilmektedir. Istamp ve matris arasındaki boşluk kalıp tasarımcısı tarafından 0,62 mm olarak verilmiştir. Zımbanın kalıp içerisinde alacağı mesafe 14.1 mm 'dir.



Şekil 4.11 : III. derin çekme kalıbının patlatılmış görünümü

Şekil 4.12’de 1, 2, ve 3. Operasyonlara ait zımba eğrilik yarıçapının değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.12 : I, II, ve III. operasyonlardaki zımba eğrilik yarıçapları

4.2 ERD 7114 Sac Özelliklerinin Tespiti

ERD 7114 kalite sac metalin özellikleri kimyasal ve tek eksenli çekme deneyi ile elde edilen mekanik özellikler olmak üzere iyi grupta incelenmiştir.

4.2.1 ERD 7114 sac metalin genel özellikleri

ERD 7114 kalite sac malzeme, düşük dayanımlı çelikler olarak bilinen; IF arayer atomsuz çelikler (Intersitital Free Steels) grubunda olup, soğuk haddelenmiş ve ekstra derin çekmeye uygun bir yassı çelik ürünüdür. Çizelge 4.1’de sac malzemenin kimyasal bileşimi ve standart karşılığı kendi ürün kataloğundan alıntılanarak verilmiştir.

Çizelge 4.1 : ERD 7114 sacının kimyasal bileşimi (%) [79].

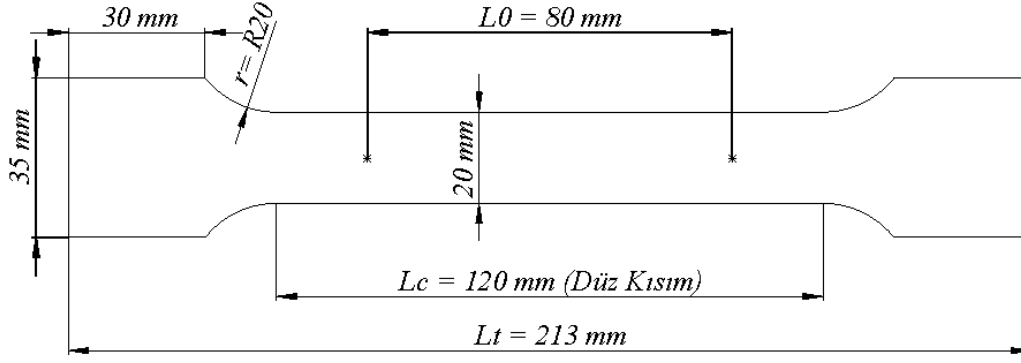
Standart: DIN EN 10130:2006

Kimyasal Bileşim (%)		ERDEMİR Kalite No	C max.	P max.	S max.	Mn max.	Ti max.
Standart	Kalite						
DIN EN 10130	DC01	7122	0.12	0.045	0.045	0.60	-
DIN EN 10130	DC03	7123	0.10	0.035	0.035	0.45	-
DIN EN 10130	DC04	7114	0.08	0.030	0.030	0.40	-
DIN EN 10130	DC04	145	0.07	0.030	0.025	0.35	-
DIN EN 10130	DC05	7115	0.06	0.025	0.025	0.35	-
DIN EN 10130	DC06	7116	0.02	0.020	0.020	0.25	0.30

Çizelge 4.1’de sac metal malzemenin kimyasal bileşiminde bulunan maksimum element değerleri yüzde olarak verilmiştir. Haddeme işlemine göre, tüm elementler sacın her bölgesine aynı oranda dağılmayabilir, örneğin, bir kısım bölgede %0.08 olan karbon miktarı, başka bir bölgede %0,01 olabilmektedir. Buna göre de, malzeme aynı doğrultuda dahi farklı mukavemet değerleri gösterebilmektedir. Bu sebeple, mekanik özellikler değerlendirilirken standart sapması yüksek olmayan değerlerin ortalamaları alınarak işlem yapmak daha doğru olacaktır.

4.2.2 ERD 7114 sac metalin mekanik özellikleri

ERD 7114 düşük karbonlu çeliğinin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deney numunesi ölçüleri (Şekil 4.13), TS EN ISO 6892-1 standardına göre belirlenmiştir. Rulo halinde olan sac metalde, bölüm 3.2.1.6 Şekil 3.14’ de belirtildiği gibi, hadde yönüne göre üç farklı doğrultuda numune hazırlanarak, her bir numuneden 3’er çekme deneyi yapılmış, gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ve anizotropi katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : Çekme deneyinde kullanılan örneğin boyutları [78].

4.2.3 Tek eksenli çekme deneyi

Deney numuneleri, rulonun herhangi bir bölgesinden, pürüzsüz, aşınmamış, korozyona uğramamış ve buruşmamış bir bölgeden bir plaka halinde önce makas ile kesilmiştir. Ardından, hassas kesim için tel erezyon ile kesimi yapılmıştır.



Şekil 4.14 : Haddelene yönüne 0° , 45° ve 90° hazırlanmış çekme deneyi örnekleri

Tez çalışması kapsamında yapılan çekme deneyleri, Şekil 4.15 de gösterilen 50 kN kapasiteli Shimadzu AG-IS çekme deney cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15 : Shimadzu çekme deneyi cihazı

Cihazda bulunan iki adet CCD kamerayla, numunelerde meydana gelen deformasyon miktarları deney süresince izlenmekte ve bir ara program vasıtasıyla bilgisayara aktarılmaktadır.

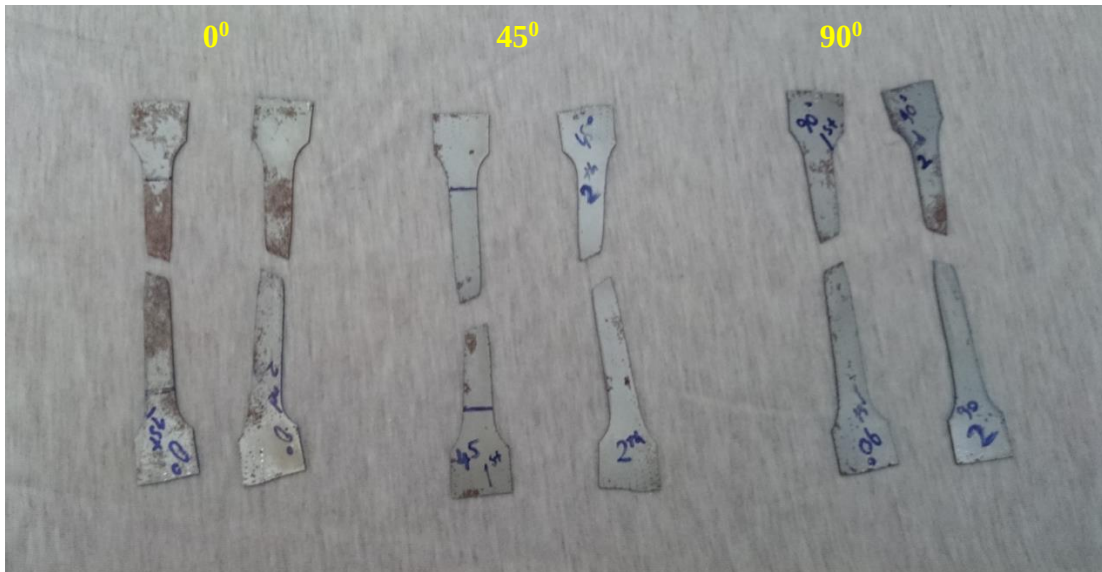
Kameraların numunelerde oluşan deformasyonları takip edebilmesi için, çekme numunelerinin ölçüm boyu üzerine referans çizgileri çizilmekte ve numuneler makinenin iki çenesi arasına bağlanmaktadır. Şekil 4.16 deney numunesinin çekme cihazına bağlanmış halini göstermektedir.



Şekil 4.16 : Deney örneğinin çeneye bağlanmış görünümü

Çekme sırasında, çene hızı tüm numunelerde 1 mm/dak sabit hızda olacak şekilde uygulanmıştır. Her iki malzemede, üç haddeleme yönünün (0 , 45 ve 90) her biri için deney üç kez tekrar edilmiş ve sonuçların ortalamaları alınmıştır.

Şekil 4.17’de ERD 7114 sac malzesine ait deney sonrası kopan numuneler gösterilmektedir. şekilde görüleceği gibi, malzeme deneyden bir süre sonra korozyona uğramıştır.



Şekil 4.17 : Çekme deneyi sonrası bazı kopan numunelerin görünümü

Çekme deneyinde elde edilen veriler Kuvvet (F) ve çizigilerin yer değıştirmesi (ΔL) olarak elde edilmektedir. Gerilme-genleme eğrisini çıkartabilmek için 3.11 ve 3.12 eşitlikleri kullanılarak mühendislik eğrileri çizilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde gerçek gerilme-gerçek genleme değerleri kullanılacağından, 3.15 ve 3.17 eşitlikleri kullanılarak gerçek gerilme- gerçek genleme eğrileri çizilmiştir. 3.4 eşitliği ile pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı her bir haddeleme yönü için hesaplanıp bunların ortalaması alınmıştır. Holloman bağıntısı ile de ortalama gerçek gerilme-genleme eğrisi oluşturulmuştur.

4.2.4 Anizotropi deneyleri

Sac malzemenin haddeleme doğrultusundan etkilenme karakterini belirlemeye yarayan anizotropi deneyini gerçekleştirmek için, çekme deneyinde olduğu gibi numuneler hazırlanmıştır. Anizotropi numuneleri haddeleme doğrultusu ile 0° , 45° ve 90° 'lik açılarda kesilmiştir. Her test en az üç numune ile tekrar edilmiştir. Shimadzu üniversal çekme cihazına bağlanan numuneler 1mm/dak hızla, gerilmenin çekme dayanımına ulaştığı bölgede (yaklaşık olarak %20 birim uzamanın olduğu noktada) durdurulmuştur ve numunen üzerine çizilmiş olan 5 noktada kalınlık ve genişlikler kumpas ile ölçülmüştür.



Şekil 4.18 : Anizotropi deneylerinde kullanılan çekme örnekleri

Buradan, 3.22 ve 3.23 eşitlikleri ile dikine anizotropi katsayıları, 3.24 ve 3.25 eşitlikleri ile de ortalama dikine ve düzlemsel anizotropi katsayıları hesaplanmıştır. Tüm deneysel bulgular, sonuçlar kısmında sunulmuştur.

4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

Derin çekme işlemlerinin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizi ANSYS “Static Structural” modülü ile yapılmıştır. Önce basitleştirilen ve analize uygun biçime getirilen kalıp geometrileri CAD (Bilgisayar destekli tasarım) programından parasolid formatında alınmıştır. 3 operasyonda aynı analizin içerisinde gerçekleştirileceğinden dolayı, sınır koşullarına uygun bir biçimde 3 kalıpta CAD modelin içerisinde konumlandırılmıştır. Analiz süresini daha kısa zamana indirmek amacıyla, simetriklikten yararlanarak modelin yarısı üzerinde analiz gerçekleştirilmiştir.

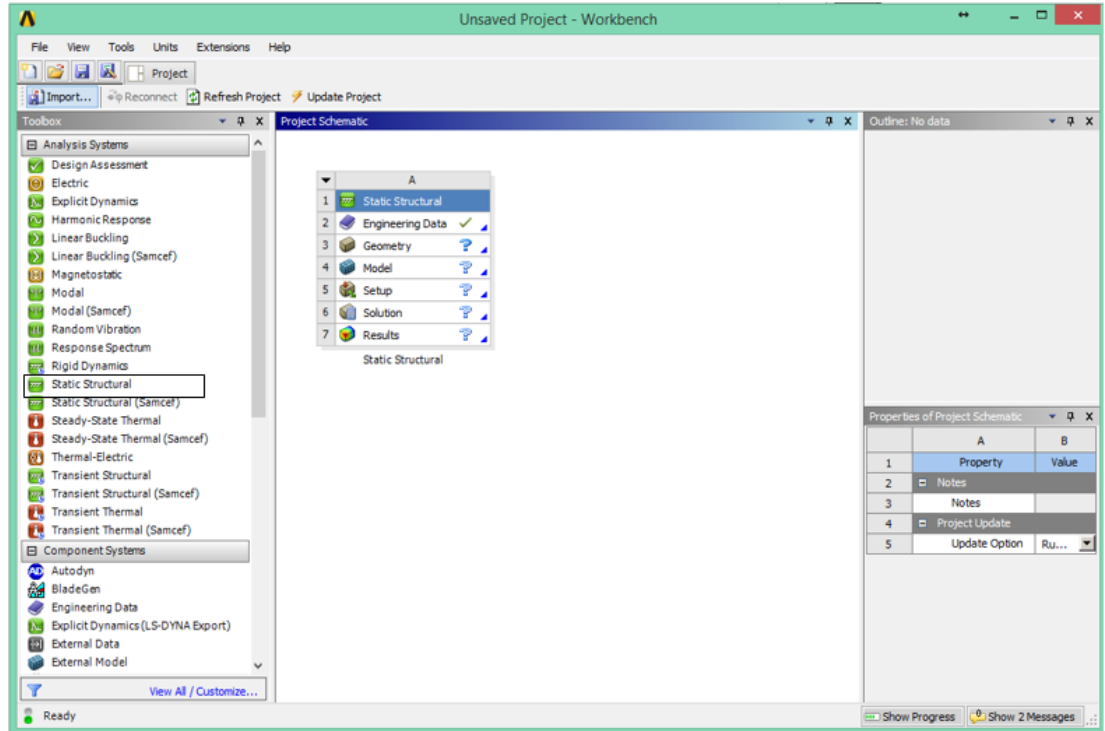
“Static Structural” (Yapısal Statik) modülü zamandan bağımsız olarak çalışmakta ve “ $F=k.x$ ” denklemini çözmektedir. Burada “F” kuvveti, “k” malzeme rijitliğini ve “x” yer değiştirmeyi temsil eder. Öncelikle deplasmanlar (x) çözülmekte, deplasmanlardan birim şekil değiştirmelere, ve birim şekil değiştirmelerden de, gerilmelere ve kalınlık değişimlerine ve daha bir çok mühendislik parametrelerinin hesaplanması sağlanabilmektedir. İmplicit yöntemde her zaman basamağı tekrarlı olarak çözülür.

Sac metal form verme işlemleri için tamamen sac şekillendirme için kullanılan yazılımlar da vardır ve bu programlar implicit veya eksplisit olarak çözüm yapabilmektedirler. Sac şekillendirme asıl olarak, düşük frekansta gerçekleşen bir statik olaydır (quasi-static). Kullanılan sac metal, kabuk (shell) ve katı eleman (solid) olarak tanımlanabilmektedir. Kabuk elemanın, daha kısa sürede yakınsama, kalınlık değişim parametrelerini görüntüleyebilme, daha az işlemci ve bellek kullanımı gibi bir çok avantajı bulunmaktadır. Kabuk eleman teori kısmında anlatıldığı üzere ince plak veya kabuk teorisine dayandırılarak ANSYS tarafından çözümü sağlanmaktadır. Kabuk eleman için ANSYS bu teoriyi kullanmaktadır ve düzlem gerilme halini çözüme dahil eder. Katı eleman almanın ise, daha uzun zamanda yakınsama hatta kritik formlarda yakınsamaması, kalınlık parametrelerini görüntüleyememe, daha çok işlemci ve bellek kullanımı gibi dezavantajları vardır. Kullanılan sac metal çok ince (0,6 mm) olduğundan, Kirchhoff Plak Teorisi varsayımına uymaktadır ve sonuçlarda da belirgin bir hataya maruz bırakmayacaktır.

Elbette, implicit çözücülerin eksplisit çözücülere göre bir takım dez avantajları bulunmaktadır. Çok ani kalınlık değişimlerinde analiz yakınsamamaktadır. Halbuki eksplisitte sınır koşulları ve modelleme doğru oluşturulduğu, örgü (mesh) yapısı doğru kurulduğu ve modele uygun zaman basamağı (time step) verildiği müddetçe böyle sorunlar ile karşılaşilmamaktadır. Kinetik ve iç enerji parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir. İç enerji, kinetik enerji değerinin en fazla %10 kadarı olmalıdır. Bu LS-Dyna’da teorik bir kabuldur. Eksplisitte daha çok ani ve hızlı gerçekleşen (çarpışma gibi) olaylar simüle edildiği için, analiz süresi uzun tutulursa, çözüm süresi sonsuza kadar gitmekte, yani herhangi bir çözüme ulaşmadan program hata verebilmektedir.

4.3.1 ANSYS ile modellemenin yapılması

“ANSYS Workbench” paket programının açılış sayfasının sol kısımdaki unsur ağacında, analiz sistemleri (Analysis Systems) başlığı altında bir çok modelleme aracı bulunmaktadır. Burada ne tür analiz yapılmak isteniyorsa simgesi sürüklenerek ortadaki boş panel ekranına doğru sürüklenir. Şekil 4.19’da görüleceği gibi “Static Structural” modülü sürüklenerek analiz modülü belirlenmiştir. Sağ taraftaki pencere de ise, seçilen analiz tipinin her bir basamağının özellikleri görüntülenebilmektedir. “Static structural modülünde” 7 girdiden oluşan bir parametre ağacı bulunmaktadır



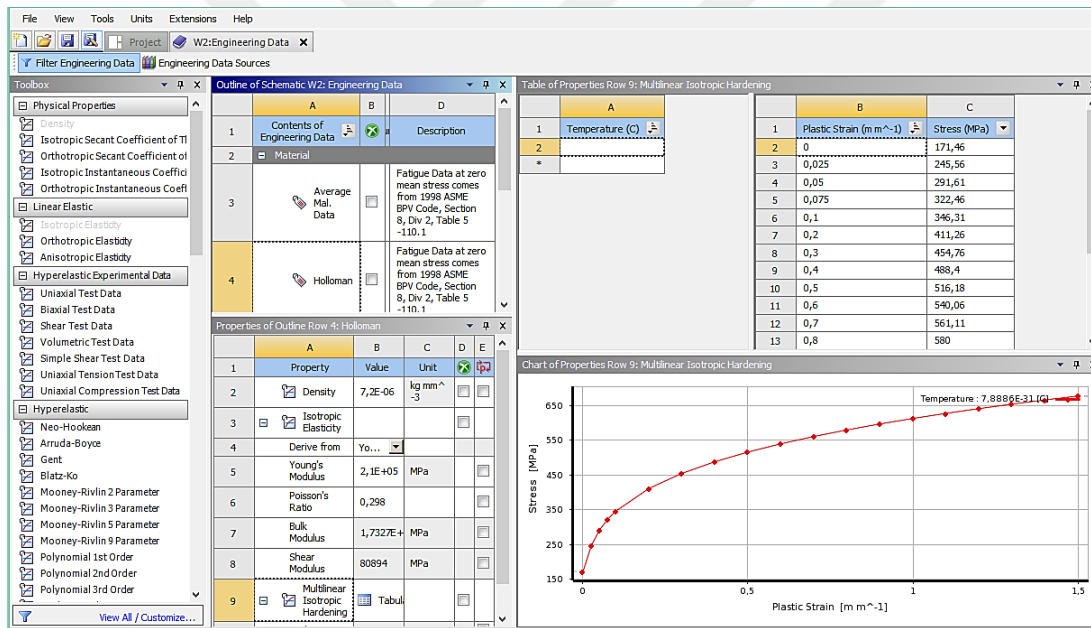
Şekil 4.19 : ANSYS “Workbench” giriş ekranı

- “Static Structural”

En üst kısmında bulunan öge, analiz tipini temsil etmektedir. “Static structural” (yapısal statik) ögesi ile analiz yapılacağını ve bu analiz tipinin analiz mühendisi tarafından girilmesini istediği parametreler alt basamaklarında sıralanmaktadır.

- “Engineering Data”

“Engineering data” (Mühendislik verisi) malzeme veri tabanının bulunduğu, malzeme özellikleri tanımlanabilen ve yeni bir malzeme eklenebilen sekmedir. Şekil 4.20’de görüldüğü gibi, çekme deneyi sonucu elde edilen gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme verisi, “Multilinear Isotropic Hardening” plastisite modeli olarak girilmiştir. Burada, malzemenin elastiktik modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu tanımlanmıştır. Analizin gerçekleştirilebilmesi için en az bu fiziksel özelliklerin tanımlanması gerekmektedir.

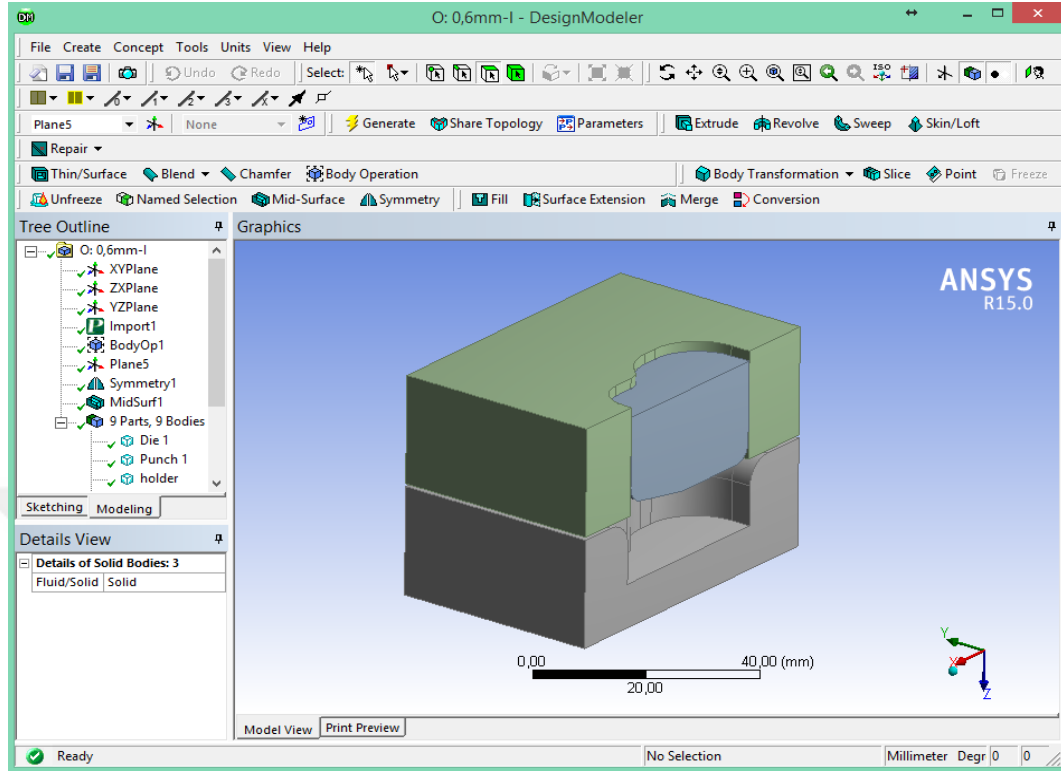


Şekil 4.20 : Malzeme verilerinin girilmesi

- “Geometry”

“Geometry” (Geometri) sekmesi, analizi yapılacak modelin değişik CAD dosya uzantılarında taşınabilmesine olanak sağlamaktadır. Aktarılan model üzerinde geometrik değişiklikler “Design Modeler” (tasarım modelleme) özelliklerini kullanarak yapılabilmektedir. “Design modeler” içerisinde, yeni geometrik tasarımlar oluşturulabilmektedir. Şekil 4.21’de görüleceği gibi ilk derin çekme operasyonunun gerçekleştirileceği kalıp modelinin “Design Modeler” da simetrisi alınmıştır. Ayrıca

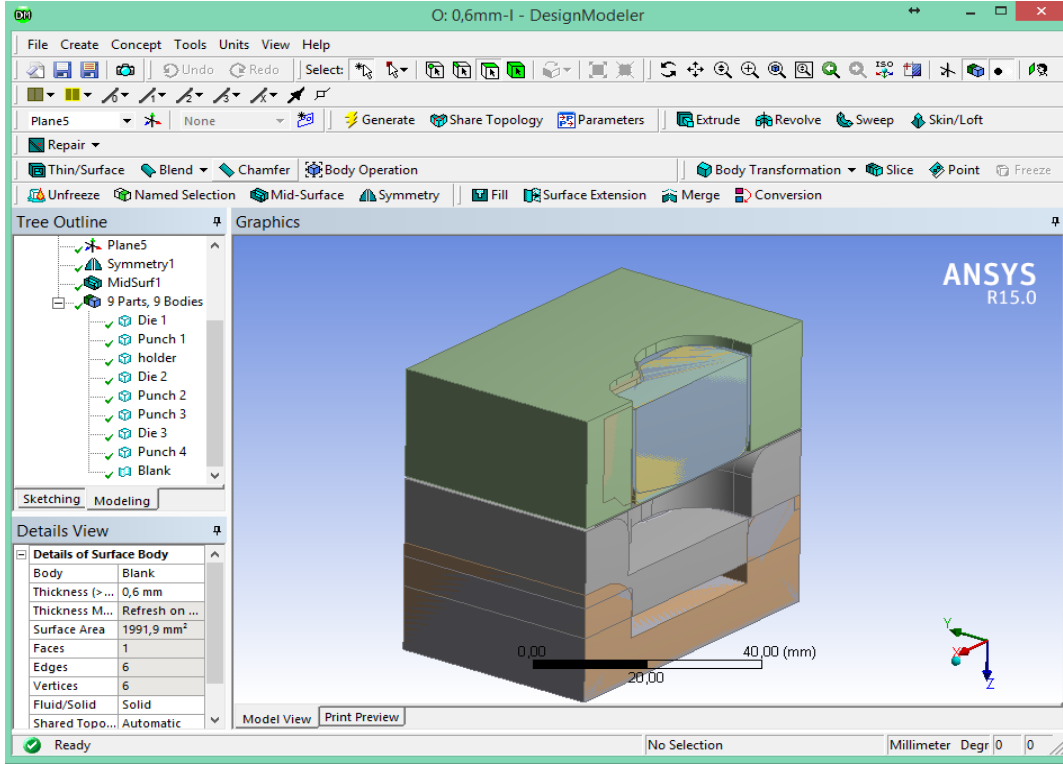
sac malzemenin yüzey olarak tanımlanmasında “midsurface” komutu ile tanımlanmıştır.



Şekil 4.21 : I. derin çekme kalıbının “Design Modeler” da simetrik görünümü

“Design modeller” da “Body Operation” unsuru altında “simplify, clean, symmetry” gibi yardımcı komutlar bulunmaktadır. “Simplify” daha basit topoloji matris oluşturabilmek için modeli geometrik olarak sadeleştirmektedir. “Clean” modelde gözden kaçan artık küçük geometrilerin kaldırılmasını sağlamaktadır. “Symmetry” ise, bir düzleme göre bir parçanın simetriği almak için kullanılmaktadır. Bu ve bunlara benzer yardımcı olabilecek bir çok parametre design modeller içerisinde yer almaktadır.

Şekil 4.22’de tüm kalıplar üstüste konularak analiz modeli oluşturulmuş ve simetriği (modelin yarısı) alınmıştır. Her bir kalıp geometrisi, sac parçaya değmeyecek şekilde birbirine yakın konumlandırılmıştır. Her bir kalıp sıra ile hareket edeceğinden, birbirine yakın konumlandırılması daha az deplasman ile sınır koşulu verilmesini sağlamaktadır. Bu da çözüm süresini kısaltan bir yaklaşımdır.

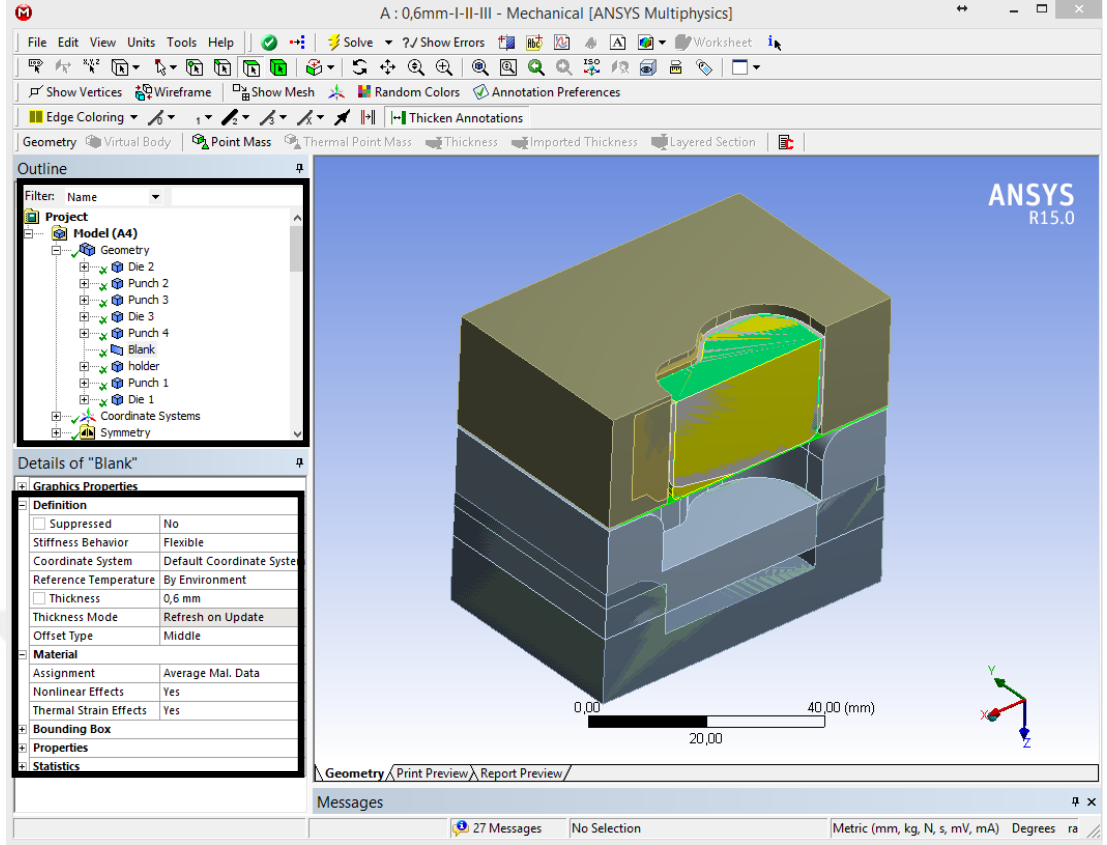


Şekil 4.22 : Tüm kalıpların birlikte simetrik görüntüsü

- “Model”

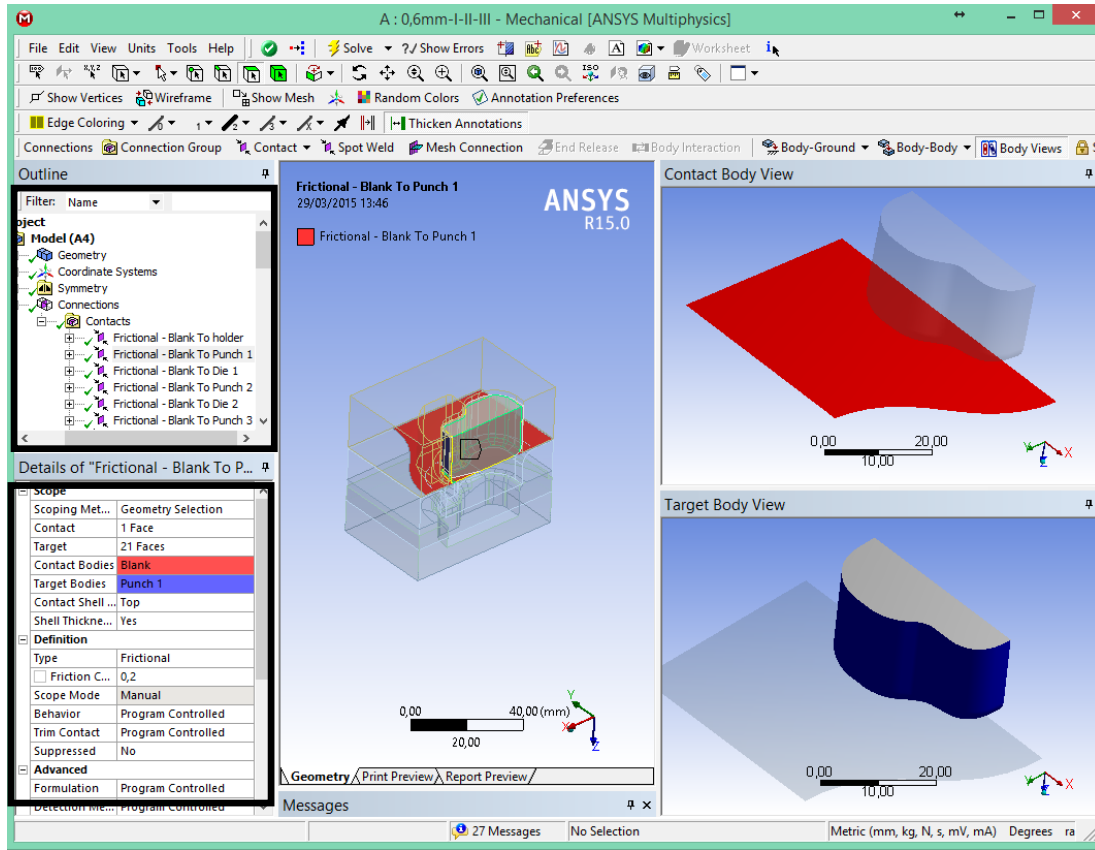
Bu bölümde, tüm analiz girdi ve çıktıları tanımlanmaktadır. Bu aşamada analiz girdisinin yapılacağı bir çok parameter bulunmaktadır. Bunlar genel olarak, geometri tayini ve malzemelerin atanması, örgü (mesh) oluşturulması, parçalar arasındaki temas (contact) özelliklerinin belirlenmesi, analiz ayarlarının ve sınır koşullarının (boundary conditions) girilmesi ve sonuçların (solution) görüntülenmesine dayanmaktadır.

Şekil 4.23’de geometriyi oluşturan kalıplar gösterilmektedir. Buna göre, iş parçası esnek (flexible) olarak tanımlanmış ve önceki kısımda oluşturulan malzeme verisi sac metale atanmıştır. Kalınlık 0,6 mm’ dir. Diğer kalıp parçaları ise rijit olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.23 : Model penceresinde geometri özelliklerinin atanması

Şekil 4.24’de kalıplar arasındaki temas yüzeyleri, tipi ve özellikleri tanımlanmıştır. Birbiri ile ilişkili olan tüm yüzeyler sürtünmeli (frictional contact) olarak tanımlanmıştır. Sürtünmeli temas, ANSYS’te doğrusal olmayan ve çözüm için iterasyon gerektiren bir temas tipidir. Bu kısım, çok önemli bir durum arz etmekte, birbiri ile temas eden veya edebilecek olan yüzeyler uygun sürtünme katsayıları ile doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu temas yüzeylerinin doğru tanımlanmaması durumunda, analiz başlangıcında “parçaların istemsiz bir şekilde hareket etmesi” uyarısı vermekte ve çözüme başlamamaktadır.



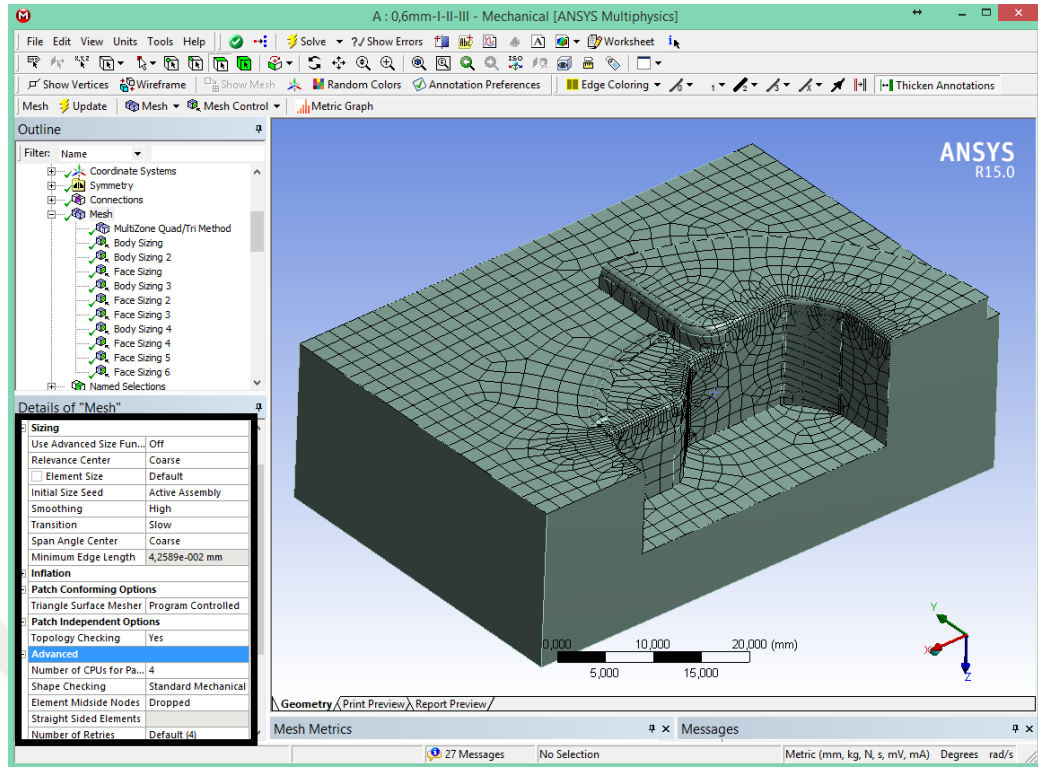
Şekil 4.24 : Kalıplar arasındaki temas yüzeyi ve özelliklerinin atanması

- “Mesh”

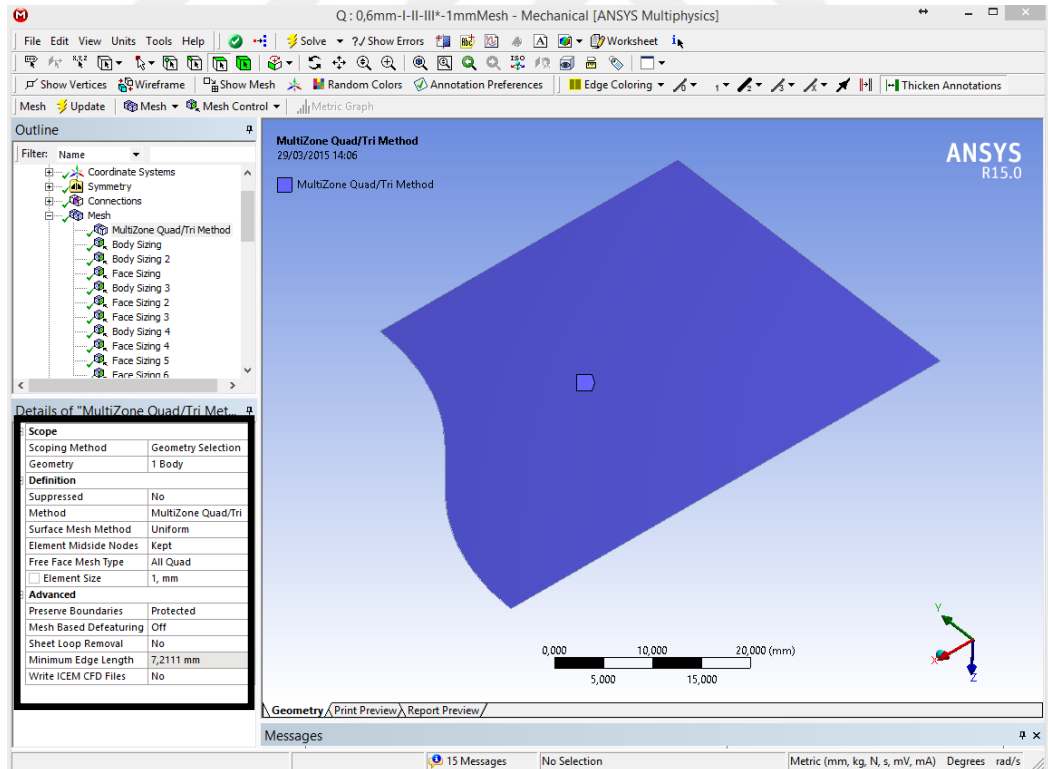
Kalıp ve iş parçasının uygun olarak örülmesi bu tür analizlerde çok önemlidir. Eleman ve düğüm sayısı çözüm süresi ile ilgili ve sonuçların doğruluğu açısından dikkat edilmesi gereken diğer bir konudur. Bu bölümde her bir parçaya kendi geometrisine göre uygun bir şekilde mesh atılmıştır.

Şekil 4.25’de 3.operason kalıbına atılan örgüyü göstermektedir. Burada, bir eğriliği en az 3 eleman ile geçme gerekliliği göz önünde bulundurulmuştur. Bu sebeple parçaya tasarımda verilmiş olan küçük kenar çaplı köşeler sık elemanlar ile geçilmiştir. Rijit parçalarda gerilme ve şekil değiştirme olmayacağından ve çözüm süresinden kazanmak için, orta düğüm noktaları (midside nodes) kapalı olarak örülmüştür.

İş parçasında ise (Şekil 4.26), daha doğru ve daha çok bilgi ile sonuçları okumamız için, orta düğüm noktaları (midside nodes) açık olarak tutulmuştur. 1 mm eleman boyu ile iş parçası örülmüştür.



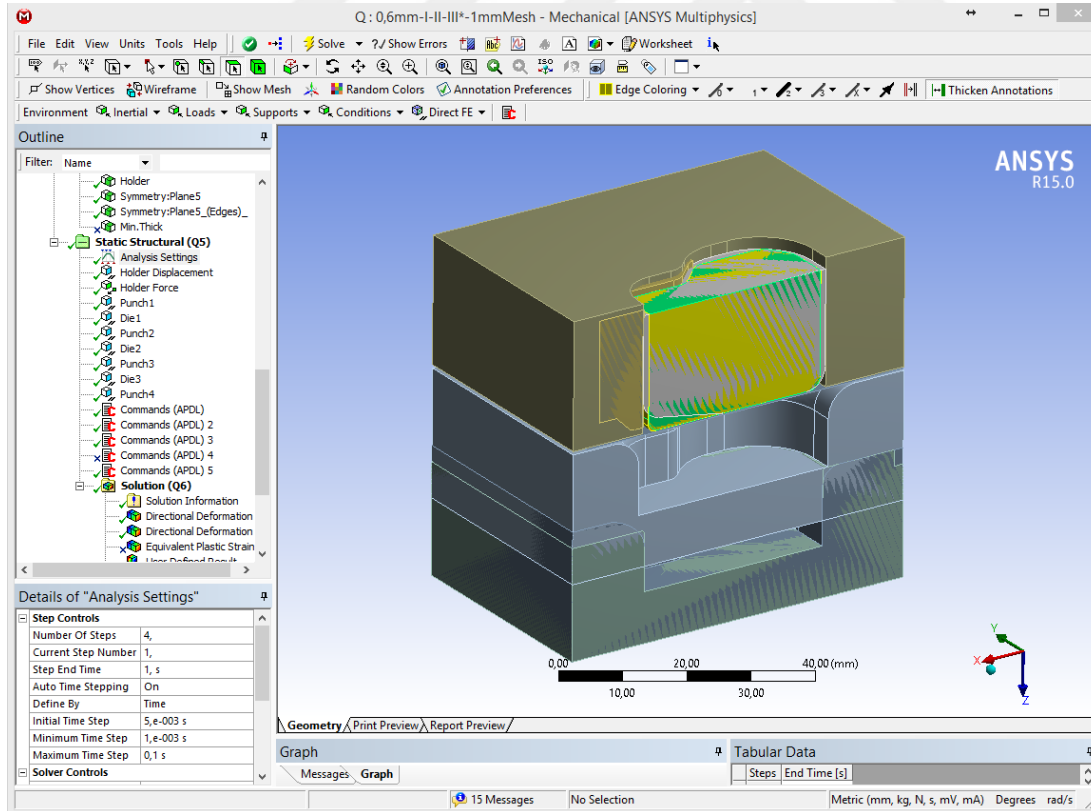
Şekil 4.25 : Kalıp parçasının örgülü görünümü ve özellikleri



Şekil 4.26 : İş parçası örgüsünün özellikleri

- “Static Structural” Yapısı ve Sınır Koşullarının Tayini

Bu bölüm genel analiz ayarlarının yapıldığı ve sınır koşullarının verildiği kısımdır. Analiz ayarlarında, bir ilk zaman basamağı tanımlanır veya otomatik olarak programa bırakılabilir. Burada, analizin doğrusal ve doğrusal olmayan (nonlinear) ayarları, sonuçta elde edilmek istenen veri sayısı gibi bir çok kontrol parametresi bulunmaktadır. Buradan sonra, her bir parça için sınır koşulları tanımlanır. Bu tezdeki modelde, zımba ve kalıplar hareketinde parçalara deplasman sınır koşulları tanımlanmış, pot çemberine ise hem deplasman hemde kuvvet sınır koşulu tanımlanmıştır. Analizde, üç operasyon sıra ile gerçekleşeceğinden, 1. operasyondan sonra bu kalıplar öldürülüp ikinci kalıplar aktif edilmiş, 2. operasyondan bu kalıplar öldürülüp 3.operasyona geçilmiştir. “Workbench” kendi içerisinde böyle bir modül sağlamadığından, burada “Command” açılarak ne zaman hangi parçaların öldürüleceği hangi parçaların ise canlandırılacağı, ANSYS APDL ‘ e uygun kodlar ile programa tanıtılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede aynı analiz içerisinde 3 operasyonda simüle edilebilmiştir. Böylelikle herhangi bir olası veri kaybının da önüne geçilmiştir.



Şekil 4.27 : Analiz ayarları ve sınır koşullarının verilmesi

- **“Solution”**

Başarı ile sonuçlanan analizden sonra, sonuçları toplamak için “Solution” çubuğunun altında istenilen bir çok parametreye ulaşılabilir. Gerilmeler, kalınlıklar, birim şekil değiştirmeler, yer değiştirmelere gibi bir çok mühendislik çözümüne ulaşılabilir. Ancak bazı sonuçlar, kullanıcı tanımlı olarak ta gelebilir. Örnek olarak, kalınlık hesaplaması için, “Solution” çubuğunun altına bir command açılarak, “SHELLTHICK” komutu ile kalınlıkları ister global koordinatlarda istenirse çözüm koordinatlarında hesaplatılabilir. Çıkarılan sonuçlar her bir zaman aralığı için görüntülenebilir ve sonuçlar görsel olarak canlandırılabilir ve “.txt” ve “.xls” olarak dışa aktarılabilir.

4.3.2 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Analiz sonuçları, sac kalınlığındaki değişimler, en büyük ve en küçük birim şekil değiştirmeler, yöne bağlı deformasyonlar ve gerilmeler bağlamında incelenmiştir. Analizler, I.baskı, I., II., ve III. baskı, I. ve III. baskı, II. ve III. baskı ile ve farklı sac kalınlıkları ile tekrarlanmıştır. Sonuçlar, global koordinat sistemine göre, çözüm koordinat sistemine göre veya analiz mühendisi tarafından oluşturulan bir düzlem baz alınarakta görüntülenebilir. Yalnız, sonuçları çözüm koordinatlarında (Solution Coordinates, bkz. ANSYS Help) almak daha anlamlı ve doğru olmaktadır. Eğer CAD verisi olarak geometri alınıyorsa mutlaka çözüm koordinatlarında sonuçlar okunmalıdır. Eğer, “Design Modeler”da çizimler yapıp geometri oluşturuluyorsa, global ve çözüm koordinat sistemi aynı olacağından sonuçların çözüm veya global olarak okunmasında bir farklılık meydana gelmeyecektir.

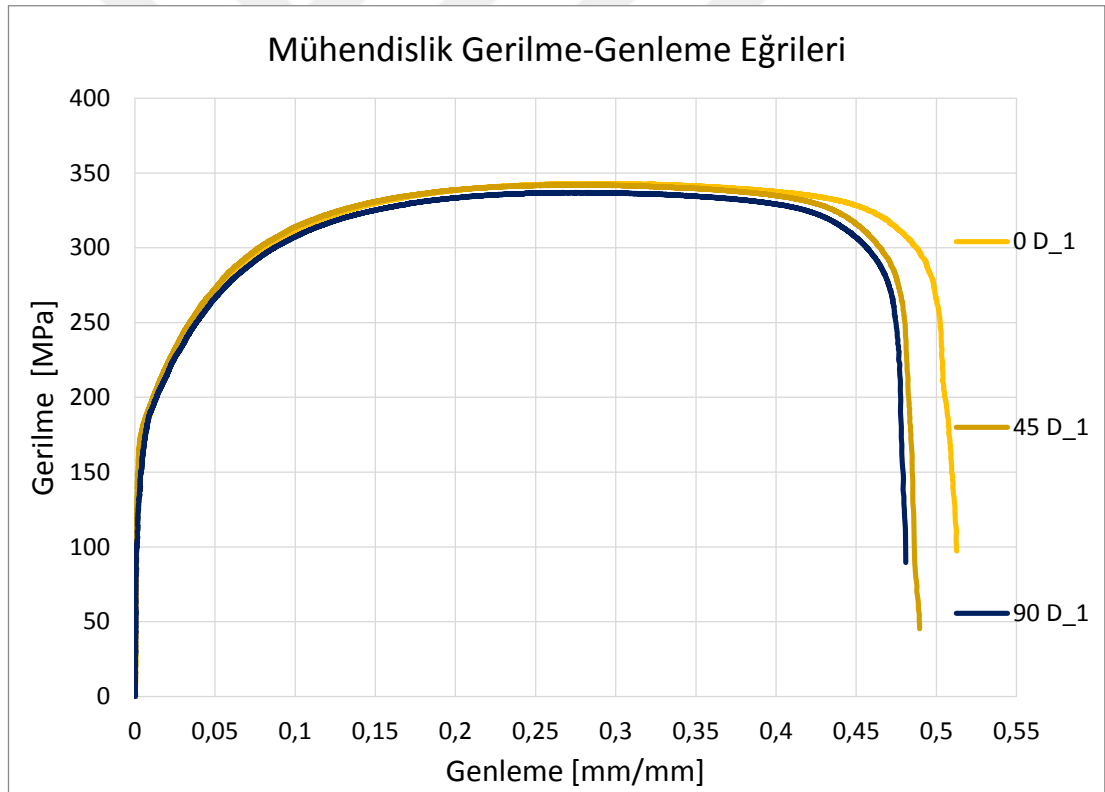


5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, deneysel ve teorik analiz çalışmalarında yapılan tüm işlemler, yorumlar ve önerilere yer verilmiştir.

5.1 DC04 Sac Metalinin Çekme Deneyi ile Elde Edilen Mekanik Özellikleri

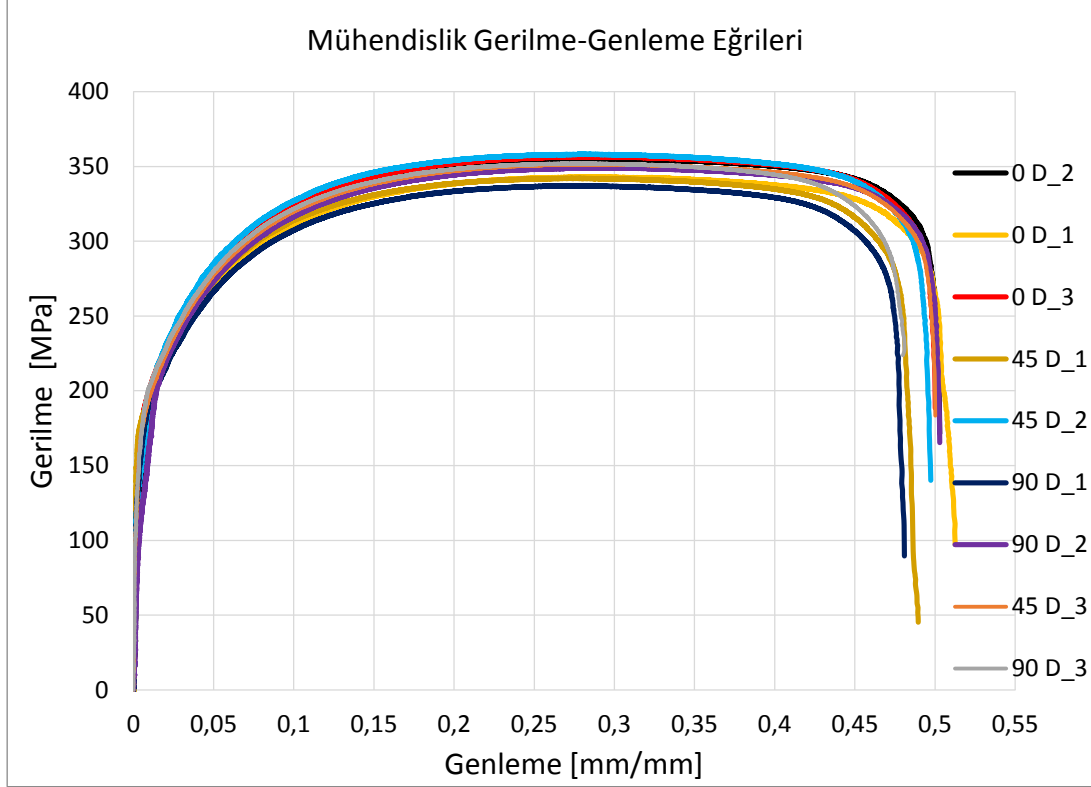
Shimadzu marka çekme deneyi cihazında, 1 mm/dak çekme hızıyla gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilen mühendislik Gerilme-Genleme eğrisi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Haddelenme yönüne 0,45,90 derecede hazırlanmış numunelerin çekme eğrisi

Bu grafikte, 0 D_1, haddelenme yönünde hazırlanmış 1. deney numunesinin çekme eğrisini, 45 D_1 haddelenme yönüne 45 derecede hazırlanmış 1. deney numunesinin çekme eğrisini, 90 D_1 ise, haddelenme yönüne 90 derecede hazırlanmış 1. deney numunesinin çekme eğrisini temsil etmektedir. Buna göre, üç haddelenme yönünde de malzeme benzer elastik ve plastik davranış göstermiştir. Akma noktaları belirgin

olmamakla birlikte birbirine yakındır. Çekme dayanımları arasında belirgin bir fark bulunmamaktadır. Kopma uzamalarında ondalık mertebesinde farklılıklar görülmektedir. Malzeme özelliklerinin tekrar edilebilirliğini incelemek için, bu deneylerin her biri üç kez tekrarlanmış ve tüm çekme deneyi sonuçları Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 : Haddeme yönüne 0,45,90 derecede hazırlanmış tüm numune testlerinin birlikte gösterildiği mühendislik gerilme-genleme diyagramları

Çekme eğrilerine göre malzeme üç yönde de benzer elastiklik ve plastiklik özelliği sergilemiştir. Haddeme yönündeki numuneler çok az bir fark olsa da daha büyük uzama değerinde kopmuşlardır. Sac metallerdeki karbon dağılımları dengesizliği ve haddeme kaynaklı farklı sonuçlar doğabilmektedir. Bununla birlikte, çekme eğrilerinin bu kadar benzer olması malzemenin yaklaşık olarak izotropik davrandığı şeklinde yorumlanabilir.

Buradan sonra, malzemenin gerçek gerilme-genleme eğrileri çıkarılmıştır. Metal şekillendirme gibi büyük deformasyonların bulunduğu bir analizde eğrinin gerçek verilerini kullanmak doğru olacaktır. Çekme deneyinde elde edilmiş DC04 sac metaline ait mekanik özellikler Çizelge 5.1’de sunulmuştur. Her doğrultuda %0,2 uzamada alınan akma mukavemetleri birbiri ile neredeyse aynıdır. Aynı bilgi, çekme

mukavemeti, mukavemet katsayısı ve pekleşme üsteli içinde geçerlidir. Ortalama kopma uzamaları “ δ_k ” 0,5 tir. Anizotropi katsayıları $\delta = \%20$ dolaylarında iken hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 : DC04 sac metalin mekanik özellikleri özet çizelgesi

Açı [°]	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	δ [%]	δ_k	K [MPa]	n	$\bar{R}$	ΔR
0	173,10	351,3	20,24	0,512	623	0,255	1,713	
45	171,11	350,25	20,15	0,495	612	0,247	1,585	
90	170,16	343,3	20,03	0,483	605	0,243	2,206	
Ortalama	171,46	348,28	20,14	0,50	613	0,248	1,772	0,375

Çelik malzeme Elastiklik modülü “ $E=210$ GPa”, Poisson oranı “ $\nu=0,298$ ” ve malzeme yoğunluğu “ $d=7,85$ E-6 kg/mm³” olarak değerlendirilmiştir.

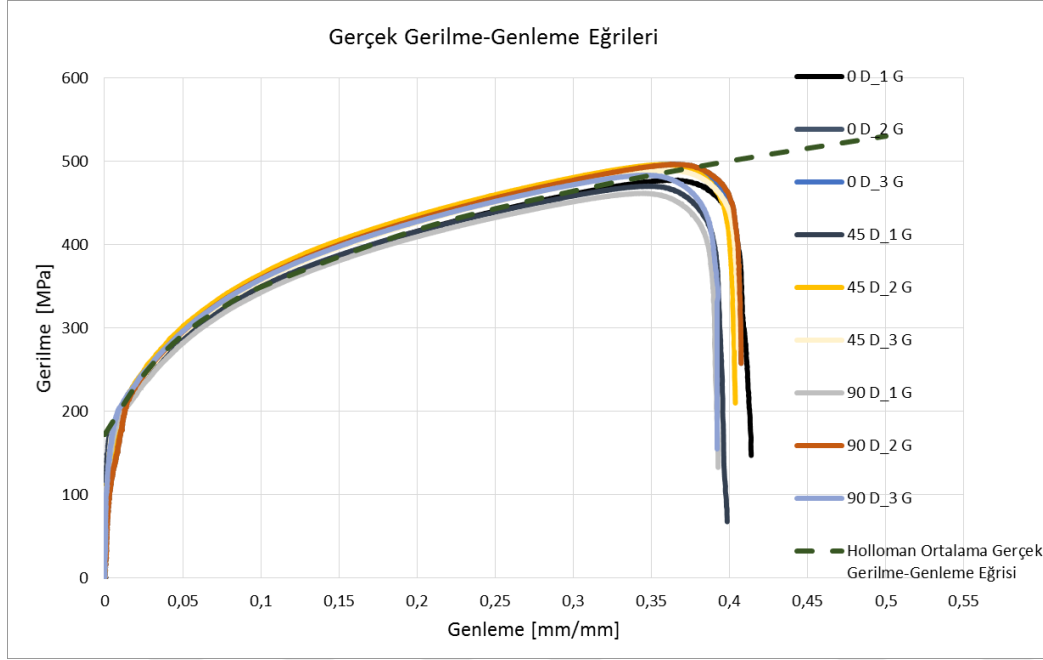
Pekleşme üsteli artan süneklik ile orantılıdır. Şekil değiştirme pekleşme üstelinin değişimi, şekillendirme sınırı eğrisinin konumunu da değiştirmektedir. Daha yüksek pekleşme üsteli, şekillendirme sınırı eğrisini yukarı yönde kaydırmaktadır [1].

Mukavemet kat sayısı K, doğrudan malzemenin dayanımı hakkında bilgi verir [84]. Mukavemet katsayısının büyük olması tane boyutunun küçük olduğunu gösterir [57]. Holloman denkleminde göre, mukavemet katsayısı ne kadar yüksek ise, malzemenin gerçek mukavemetinin de o kadar yüksek olduğu sonucu çıkmaktadır.

Malzemenin ortalama dikine anizotropi katsayısı “ $\bar{R}$ ” değeri yüksek çıkmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda IF çelikler için yüksek “ $\bar{R}$ ” değerinin, derin çekme esnasında kalınlık yönünde incelleme direncinin yüksek olacağını ve bu sebeplede sacın yüksek derin çekilebilirlik yeteneğine sahip olacağını vurgulamaktadır [80].

Düzlemsel anizotropi katsayısı “ ΔR ” derin çekme sonrasında kulak oluşumunu gösteren parametredir. Özellikle anizotropik malzemelerin çekilmesi esnasında kulaklaşma problemi ile karşılaşılabilir. Düzlemsel anizotropinin sıfır olması kulaklaşma olmayacağını gösterir. Bu değer ne kadar fazla ise o kadar çok kulak ve o kadar da çok artık malzeme miktarı oluşacaktır [81]. Yapılan deneyler sonucunda bu değer 0,375 olarak hesaplanmıştır ve derin çekme sonrası kulak oluşacağını haber vermektedir.

Holloman denkleminden elde edilen pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısının ortalama değerlerini alınıp tekrar denklemde yerine koyularak gerçek gerilme-genleme grafiği elde edilmiştir. Elde edilen pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı değerleri incelendiğinde DC04 sac malzeme oldukça yüksek bir değer göstermiştir. Pekleşme üsteli arttıkça toplam kopma uzaması da artar [8].



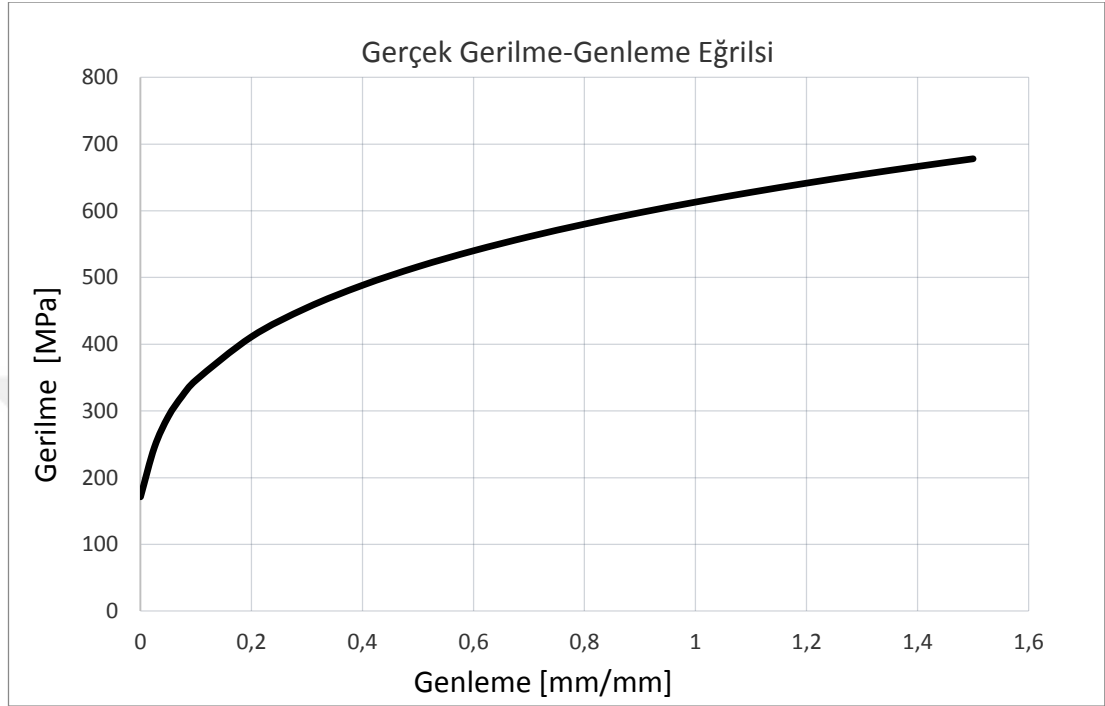
Şekil 5.3 : 0,6 mm DC04 sacının gerçek gerilme-genleme eğrileri

Pekleşme malzemenin şekillendirilebilirliğini olumlu yönde etkilemektedir. Pekleşme sac metallerin şekillendirilebilirliğini olumlu yönde etkiler [82]. Bu sebeple pekleşme üsteli ne kadar büyükse sac malzeme o kadar kolay şekillendirilebilecek veya şekillendirilebilirlik sınırları o kadar yüksek olacaktır. En büyük “n” değeri en büyük şekil değişimini gösterir [80,83]. “n” değeri arttıkça malzemenin gerdirilebilirliği ve homojen şekil değiştirme kabiliyeti artar, boyun verme ise zorlaşır [84]. Bu durumda, DC04 malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarının yüksek olacağı sonucu çıkartılabilir.

“nR” değerinin yüksek çıkması, sacların yüksek gerilebilirlik özelliğine sahip olacağını göstermektedir. “nR” değeri ile malzemenin şekillendirilebilirliğine karar verilebilir [50]. “nR” değeri DC04’te yüksek çıkmıştır ve yüksek şekillendirilebilir bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Mühendislik ve gerçek gerilme-birim şekil değiştirme dönüşümleri arasında elastik bölgede fark yoktur. Ancak akma noktasından sonra aralarında fark oluşmaya başlar

ve bu fark giderek artar (Şekil 5.3). Malzeme boyun vermeye başladıktan sonra homojen olmayan şekil değişiminden dolayı uzama hesaplanamamaktadır. Bu sebeple boyun vermeden sonraki kısımlar için Holloman denklemi kullanılarak gerçek gerilme-genleme eğrisi çizdirilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : DC04 malzemesinin gerçek gerilme-genleme diyagramı

Gerçek ve mühendislik gerilmelerinin arasında elastik bölgede fark olmadığı için gerçek gerilme-genleme eğrisinin plastik bölgesi çizdirilmiştir. Bu eğri aynı zamanda sonlu elemanlar analizinin plastik bölge eğrisi olarak tanımlanmıştır.

5.2 Sac Parçanın Fiziksel Ölçülerinin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizinin Doğrulanması

Tersine mühendislik ile analiz parametreleri oluşturulacağından, parçanın kesme ve derin çekme sonrası oluşacak formunun fiziksel olarak ölçülerini değerlendirmek gerekir. Bunun için çeşitli uzunlukların ve sac et kalınlığının ölçümleri yapılmıştır.

5.2.1 Uzunluk, genişlik ve derinlik ölçümü

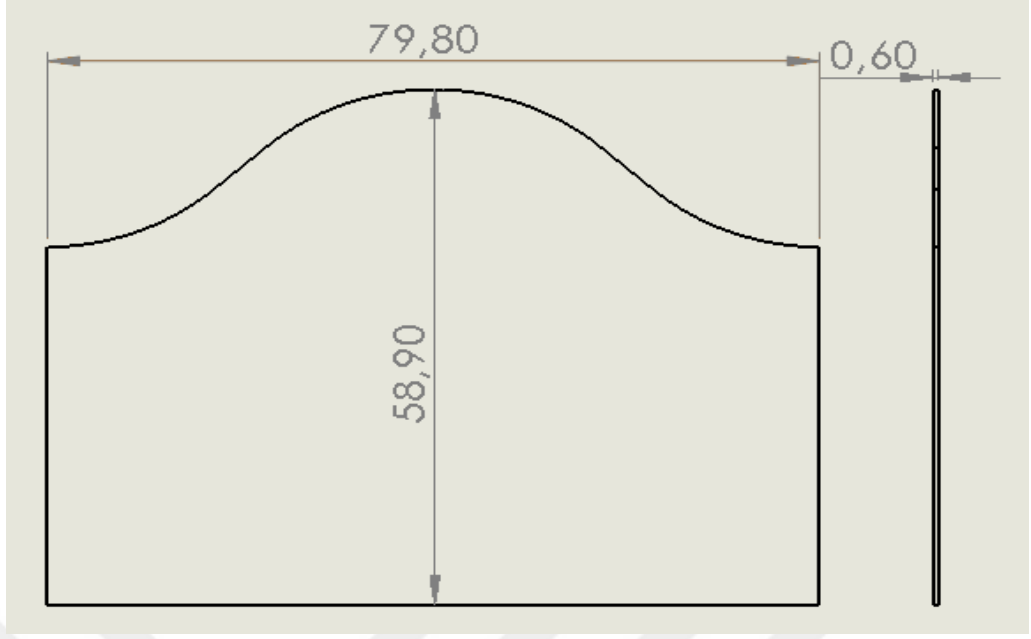
Parça kesme ve I. derin çekme işlemlerinden çıktıktan sonra Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 'te gösterildiği gibi uzunluk ve genişlikleri ölçülmüştür. Çizelge 5.2' de 20 parçanın ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.2 : I. derin çekme sonrası deney örneğinin ölçüm sonuçları

	Uzunluk "Lb ₀ " (mm)	Uzunluk "Lb ₁ " (mm)		Genişlik "Lg ₀ " (mm)	Genişlik "Lg ₁ " (mm)		Derinlik "Ly ₁ " (mm)
No	Kesme	D. Çekme	Fark I.	Kesme	D. Çekme	Fark II.	Ortalama
1	79,83	72,12	7,71	59,15	49,30	9,85	13,11
2	79,83	72,50	7,33	58,50	48,50	10,00	13,09
3	79,84	72,23	7,61	59,13	49,35	9,78	13,11
4	79,84	72,60	7,24	58,50	48,50	10,00	13,13
5	79,73	72,17	7,56	59,13	49,30	9,83	13,12
6	79,73	72,50	7,23	59,13	48,52	10,61	13,16
7	79,74	72,40	7,34	58,50	49,30	9,20	13,13
8	79,70	72,52	7,18	58,50	49,35	9,15	13,12
9	79,76	72,27	7,49	58,50	48,35	10,15	13,14
10	79,76	72,25	7,51	59,12	49,40	9,72	13,11
11	79,80	72,26	7,54	59,13	49,30	9,83	13,12
12	79,70	72,17	7,53	59,10	49,34	9,76	13,09
13	79,84	72,59	7,25	59,10	48,45	10,65	13,16
14	79,84	72,48	7,36	58,50	48,58	9,92	13,16
15	79,75	72,40	7,35	59,10	48,50	10,60	13,16
16	79,8	72,33	7,47	58,50	48,50	10,00	13,12
17	79,82	72,35	7,47	58,55	49,30	9,25	13,11
18	79,78	72,25	7,53	59,12	48,52	10,60	13,12
19	79,84	72,57	7,27	59,30	49,35	9,95	13,11
20	79,83	72,45	7,38	59,18	48,60	10,55	13,08
Ort	79,8	72,34	7,42	58,90	48,92	9,97	13,12

Bu tabloya göre parça derin çekme işlemine girmeden önce ortalama uzunluğu, 79,80 mm olarak, ortalama genişliği ise 58,90 mm olarak hesaplanmıştır. I. derin çekme işleminden sonra ise, ortalama uzunluğu 72,34 mm, ortalama genişliği 48,92 mm ve ortalama derinliği ise 13,11 mm olarak ölçülmüştür.

Ölçüm sonuçlarına bakıldığında, parça aynı ölçülerde kesilememiştir. Çünkü kalıp makinesinde bu operasyonda çalıştığı bir tolerans aralığı bulunmaktadır. Bu ölçüler analiz girdisi olarak sac katı modelinde kullanılacağından ortalama değerler üzerinde çalışmak daha doğru olacaktır. Buna göre sacın ortalama olarak hesaplanan uzunluk ve genişlik uzunlukları, sac metale Şekil 5.5'te ki gibi katı modele atanmıştır.



Şekil 5.5 : Kalıpta kesmeye uğrayan sac parçanın ortalama uzunlukları

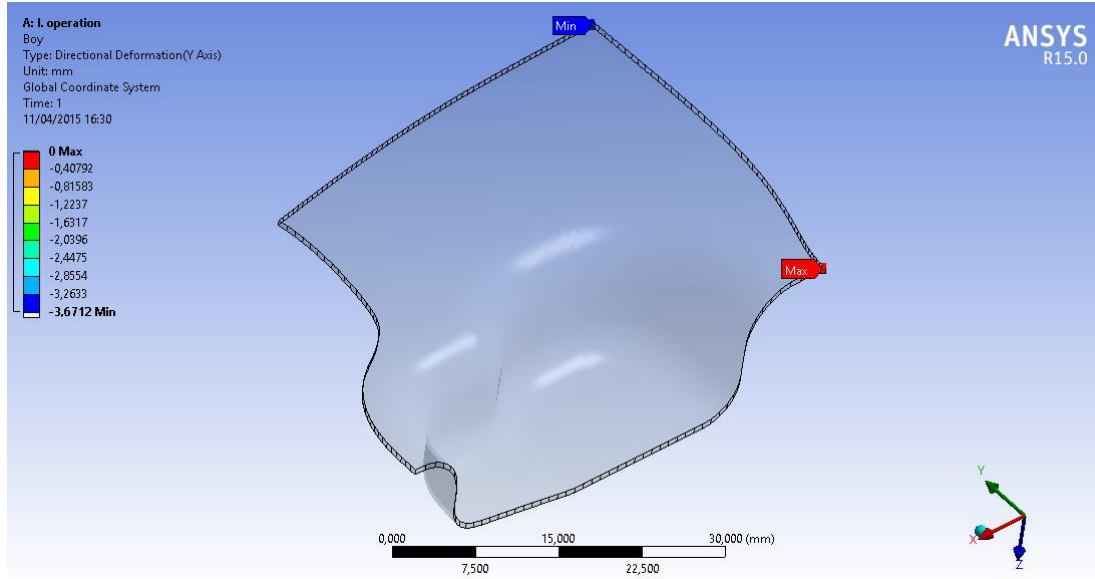
Analiz çözümünde derin çekme sonrası ilk duruma göre bu ölçülerdeki değişim (fark) okunacağından, bu değer ölçülen herhangi bir ölçü arasında yer alıp almaması çok önemlidir. Çünkü bu ölçü, analizin pratiğe ne ölçüde yaklaşacağını gösterecektir. Kesime uğramış sac parçanın uzunluk ve genişlik uzunlukları ve derin çekmeye uğramış sac parçanın derinliği analiz girdisi olarak kullanılmıştır. Derin çekme sonrası oluşan sac parçanın uzunluğu ve genişliği ise analiz çıktısı olarak kullanılmıştır.

5.2.2 Sac uzunlukları olarak SEA'nın doğrulanması

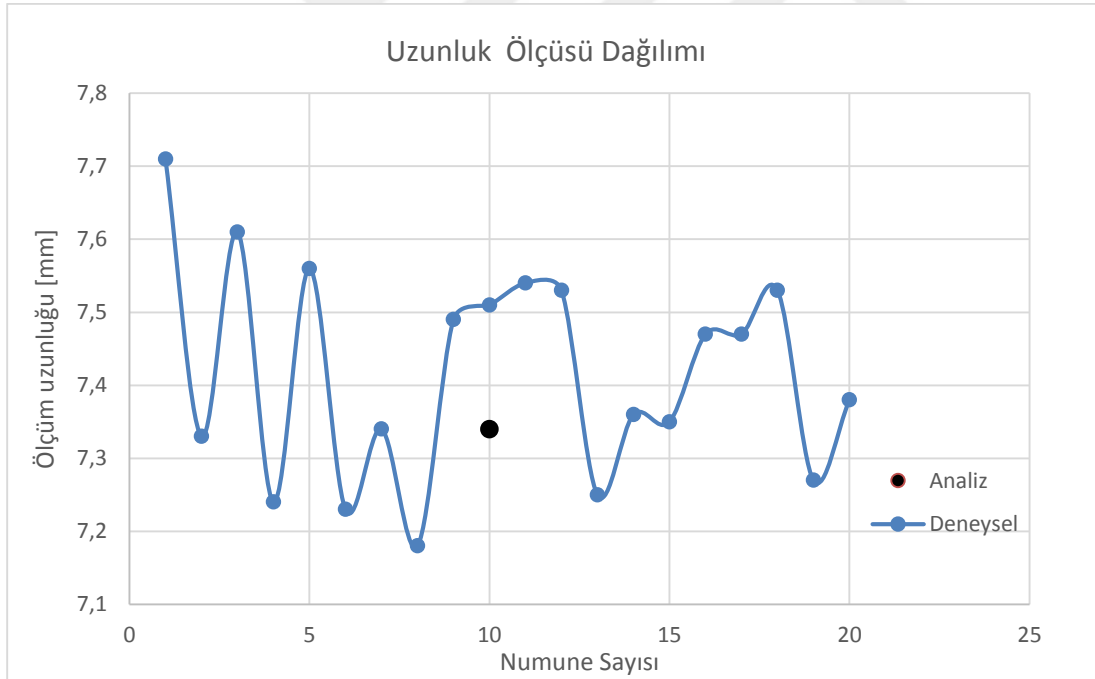
Analiz bittikten sonra, parça uzunluk, genişlik ve derinliğinin sonuçları sırasıyla Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8'de gösterilmiştir. Çizelge 5.2, 5.3 ve 5.4'te ise analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar dağılımı içerisindeki yeri gösterilmiştir. Burada ölçülerin birebir eşit olması elbette beklenen bir durum değildir. Önemli olan, analiz sonucunda elde edilen uzunluk, genişlik ve derinlik uzunluklarının, alınan 20 adet ölçüm içerisinde yerini almasıdır.

ANSYS'te sonuçlar koordinat düzlemine göre okunmuştur. Örneğin, +x yönünde deplasmanlar pozitif, -x yönündeki deplasmanlar negatif olarak okunmaktadır. Yalnız, toplam yer değiştirme bu sonuçların mutlak değeri alınarak okunması gereklidir. Parça simetrik olarak alındığından boy uzunluğu sonucunun iki katı değerlendirilmelidir. Buna göre, parça uzunluğunda ki yer değiştirme miktarı 7,34 mm elde edilmiştir (Şekil

5.6). Bu sonuç parça ölçümünde elde edilen uzunluk ölçümleri ile bağdaşmaktadır (Şekil 5.7).

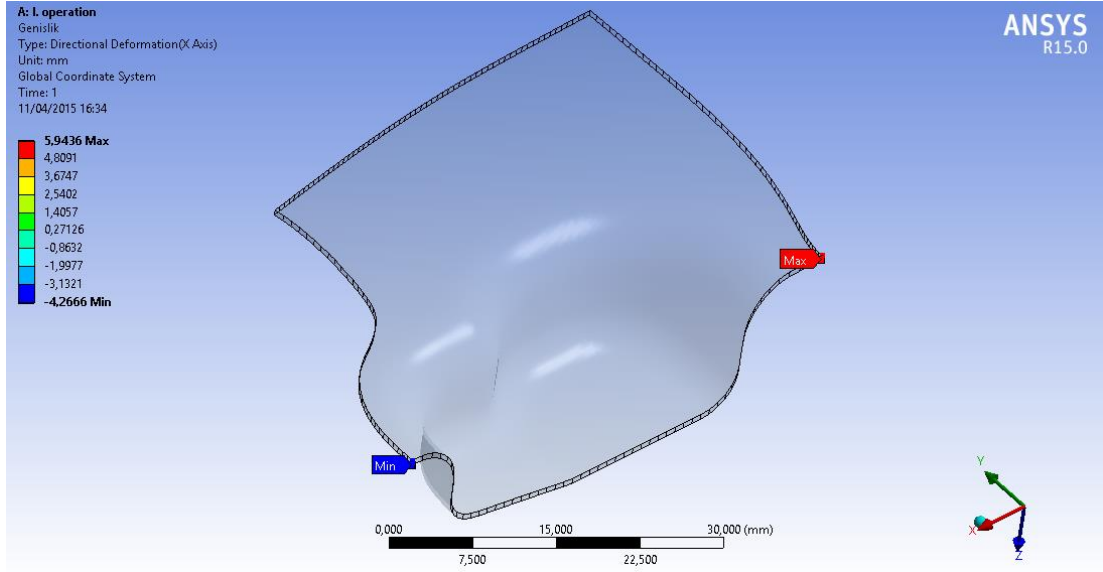


Şekil 5.6 : Analiz sonucunda parça uzunluğundaki yerdeğiştirme

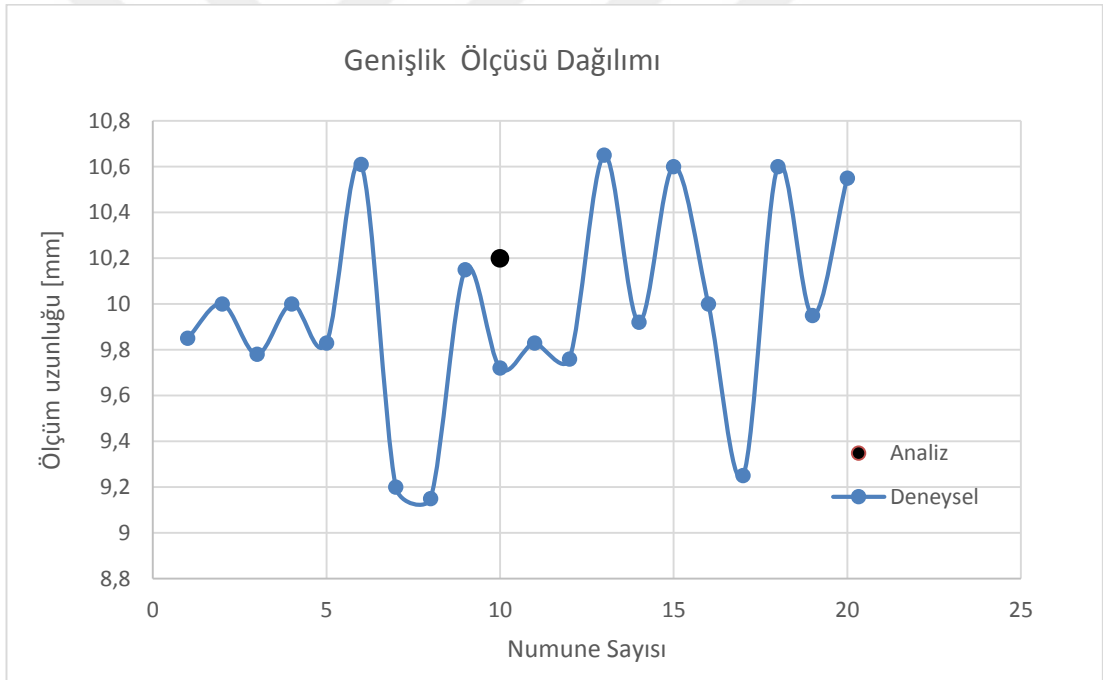


Şekil 5.7 : Analiz sonucunun parça uzunluğu ölçüm dağılımındaki yeri

Genişlikte ki yer değıştirme miktarı 10,20 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 5.8). Bu sonuç parça ölçümünde elde edilen uzunluk ölçümleri ile bağdaşmaktadır (Şekil 5.9).

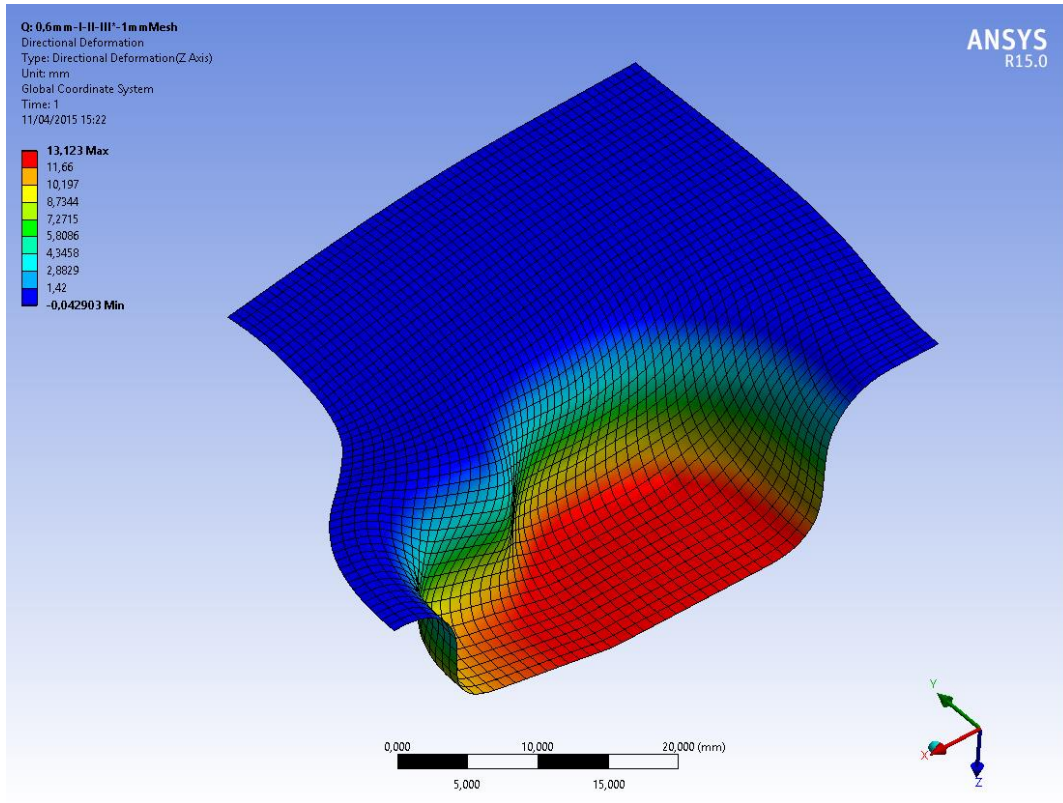


Şekil 5.8 : Analiz sonucunda parça genişliğindeki yerdeğiştirme

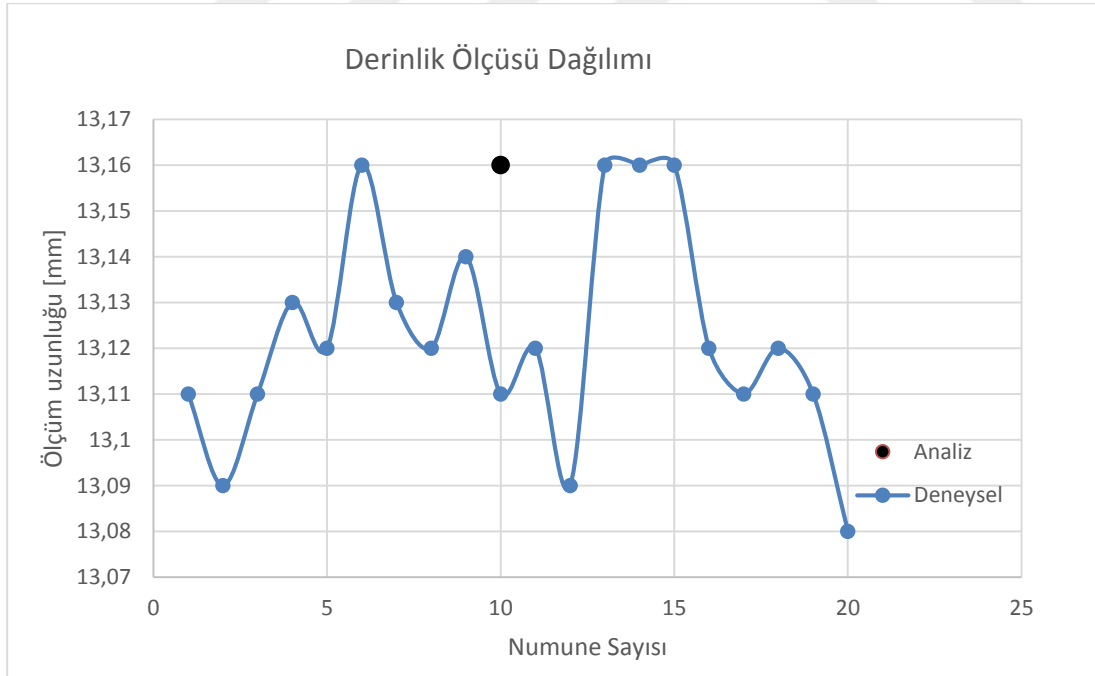


Şekil 5.9 : Analiz sonucunun parça genişliği ölçüm dağılımındaki yeri

Parça ölçümünde elde edilen parça derinliği bir analiz girdisi olarak kullanıldığından (zımba deplasman miktarı) sonuçların doğruluğundan emin olmak için derinlik yönündeki (z-ekseni) yer değiştirmeleri inceleme gereği duyulmuştur. Burada ki sonuca göre, parça 13,16 mm çekme yönünde yer değiştirmiştir (Şekil 5.10) . Bu sonuç parça ölçümünde elde edilen uzunluk ölçümleri ile bağdaşmaktadır (Şekil 5.11).



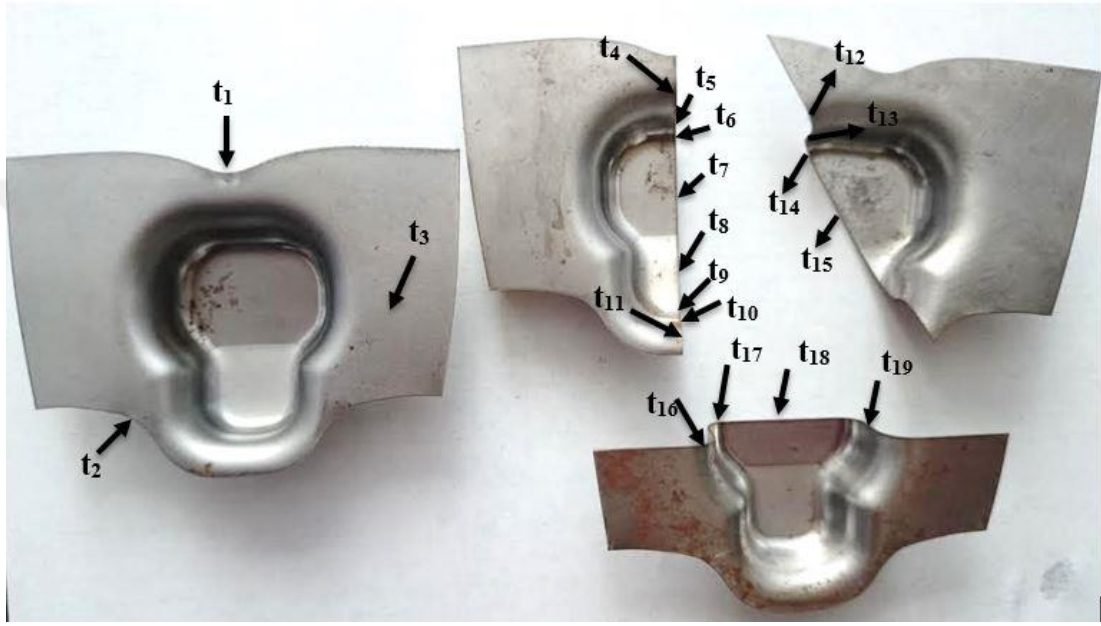
Şekil 5.10 : Analiz sonucunda parça derinliğindeki yerdeğiştirme



Şekil 5.11 : Analiz sonucunun derinlik ölçüm dağılımındaki yeri

5.2.3 Sac kalınlıkları olarak SEA'nın doğrulanması

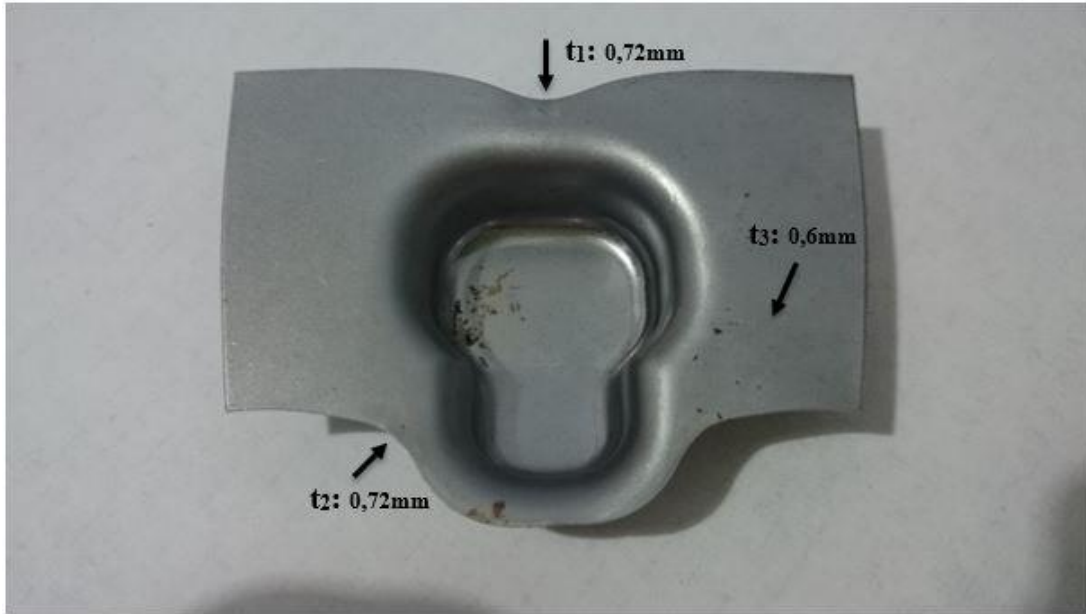
Sac parça doğrusal olmayan bir geometriye sahip olduğundan kalınlıklarının ölçümü yapılması hassasiyet bir iş gerektirmektedir. Bu sebeple ölçümler dijital kumpas ile alındığından, parçanın kalınlığına dik kesit olacak şekilde kesme işlemleri yapılmıştır. Sac metalin kalınlık ölçümlerinin alındığı noktalar Şekil 5.12'de verilmiştir. Bu noktalar ölçülebilmesi kolay noktalar ve kritik olan noktaların bir harmanlaması olarak seçilmiştir.



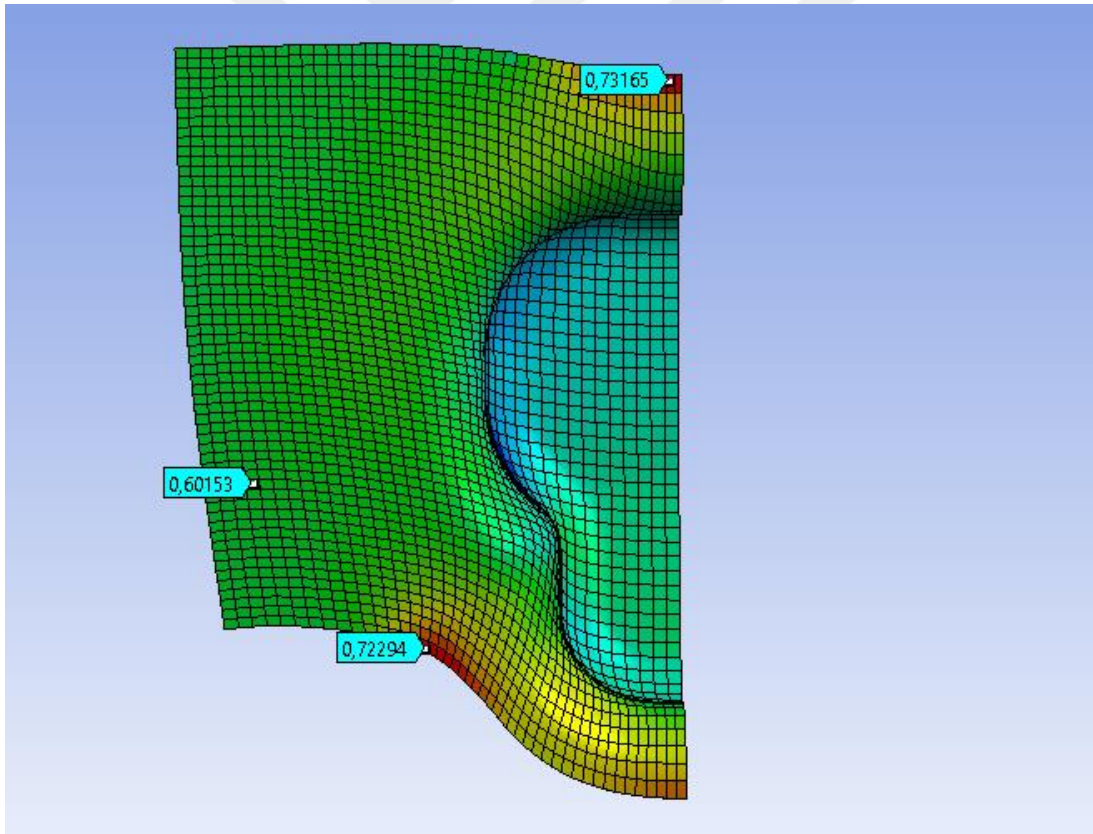
Şekil 5.12 : Parça kalınlıkları için referans alınan noktalar

Genel olarak, t1 ve t2 noktalarında kalınlaşma olduğu t3 noktasında ise kalınlık değişimi olmadığı gözlenmiştir. t4, t6, t9, t11, t12, t14, t16 ve t17 noktaları parça üzerindeki eğrilik yarıçapı yüzeylerini temsil etmektedir. t5, t7, t8, t10, t13, t15, t18 ve t19 noktaları ise düz yüzeyleri temsil etmektedir. Şekil 5.13, 5.15 ve 5.17 ve 5.19'da ölçülen noktaların kalınlıkları ve detaylı gösterimi verilmiştir. Şekil 5.14, 5.16, 5.18 ve 5.20'de analizde hesaplanan kalınlıkların gösterimi verilmiştir.

Parçaların eğrilik yarıçapı ölçümlerinde, kumpasın yüzeye dik tutulması gerekmektedir. Kalınlık ölçümleri ölçüm aletine ve ölçen kişiye göre farklılık gösterebilmektedir. Bu sebeple kalibre edilmiş kumpas ve aynı kişi tarafından ölçümler alınmıştır. Eğrilik yarıçapı noktaları ve çevrelerinde kumpas ile ölçü almak zor ve hatalı olabilmektedir.



Şekil 5.13 : Tam parça üzerinde alınan noktalar ve kalınlık ölçümleri

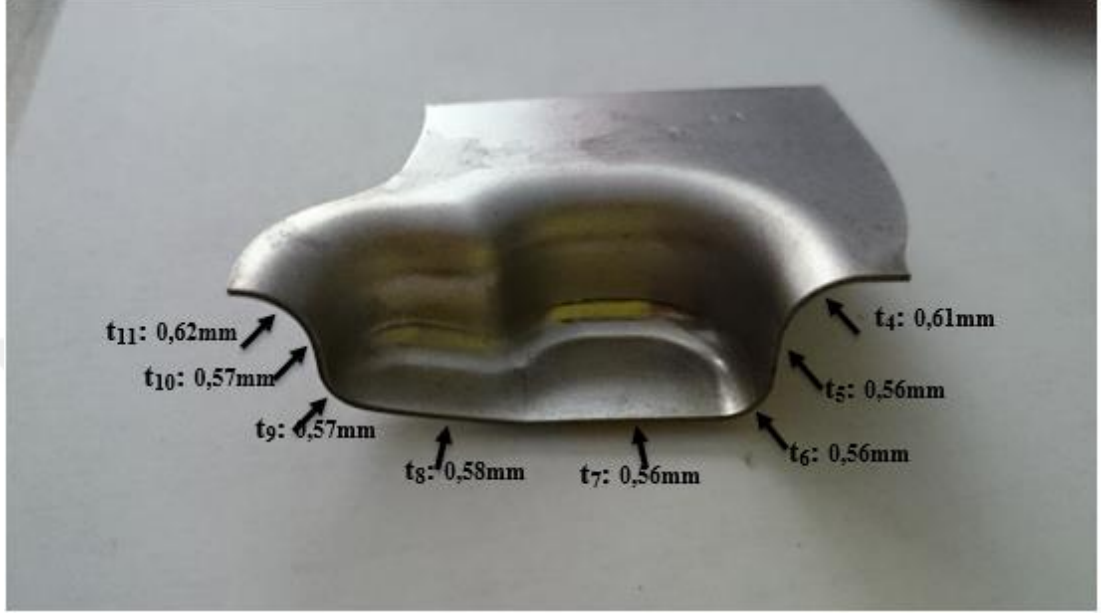


Şekil 5.14 : Tam parça üzerinde alınan noktaların kalınlık analiz sonuçları

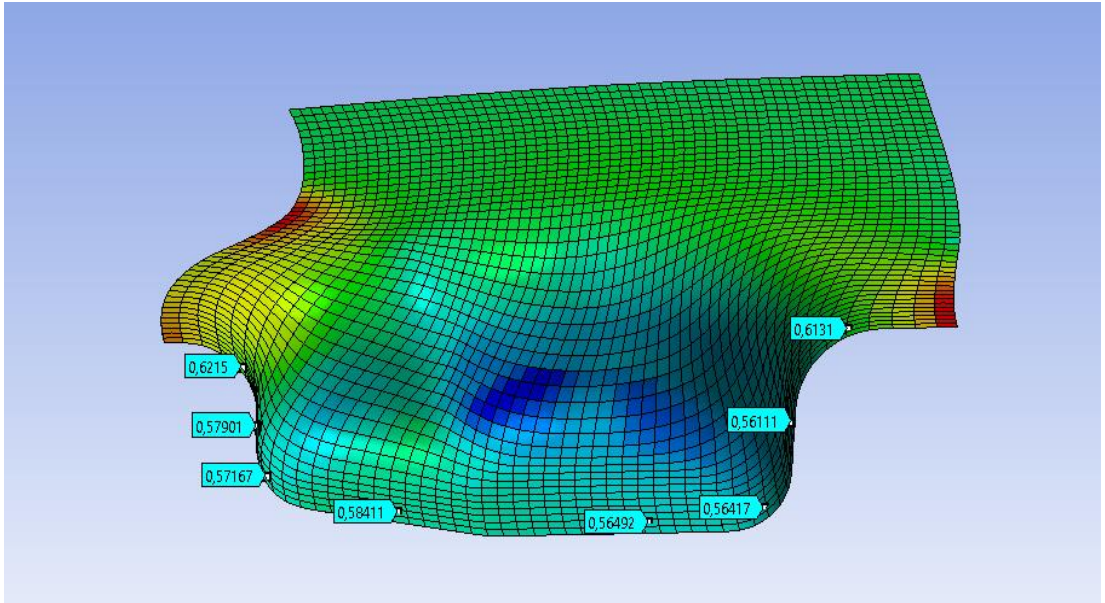
Şekil 5.11’de verilen 3 noktanın kalınlıklarının Şekil 5.13’da verilen ölçüm sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Kumpas ile yüzdelik hassasiyetinde

ölçüm alınabildiğinden virgülden sonra iki rakam bulunmaktadır. Analizde ise daha fazla hassasiyette sonuçlar alınabilmektedir.

Şekil 5.15’de verilen 8 noktanın kalınlık değerleri Şekil 5.16’daki değerler ile karşılaştırıldığında yüzdeler hassasiyette birbiri ile örtüştüğü gözlemlenmektedir.

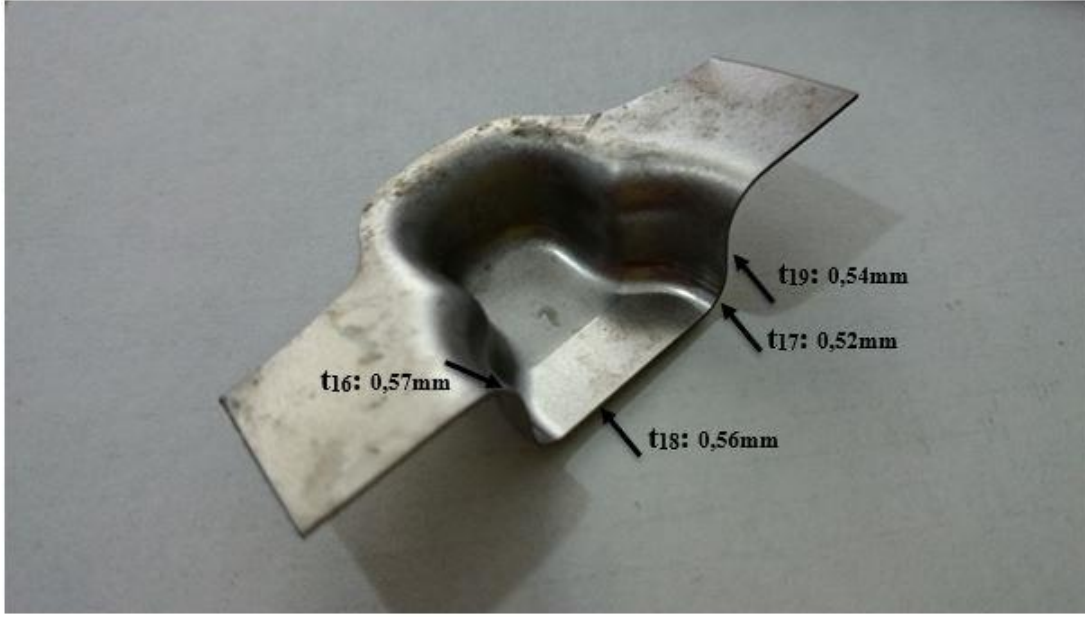


Şekil 5.15 : Genişlik yönünde alınan kesit kalınlıklar için referas noktalar

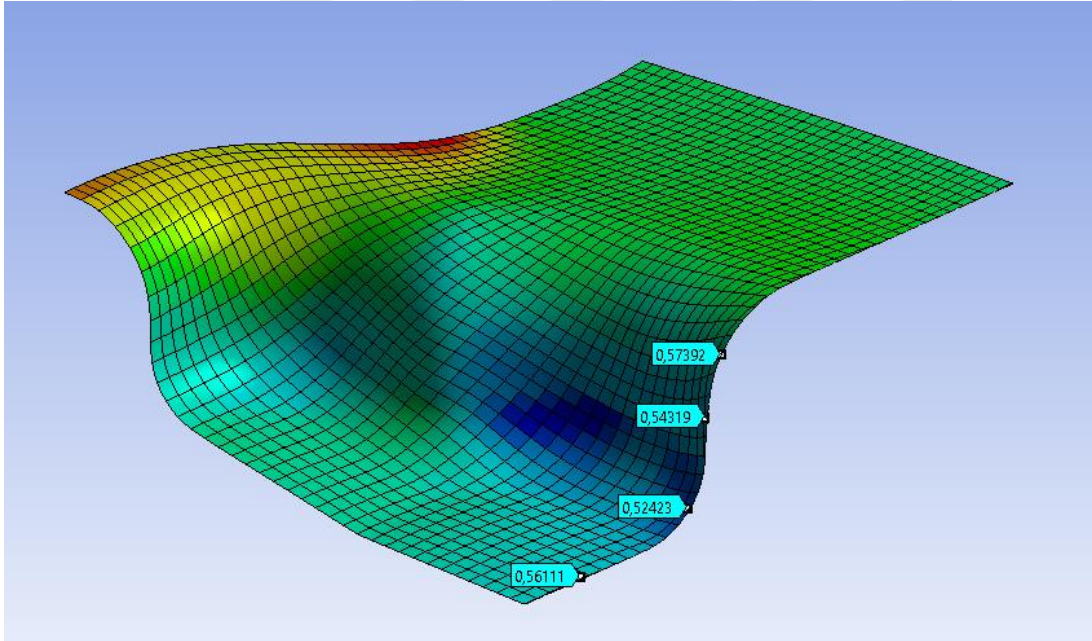


Şekil 5.16 : Genişlik yönünde alınan kesit kalınlıkların analiz sonuçları

Şekil 5.17’de verilen 4 noktanın kalınlık değeri Şekil 5.18’deki değeri ile karşılaştırıldığında yüzdelik hassasiyetlerde birbiri ile örtüştüğü gözlemlenmektedir.



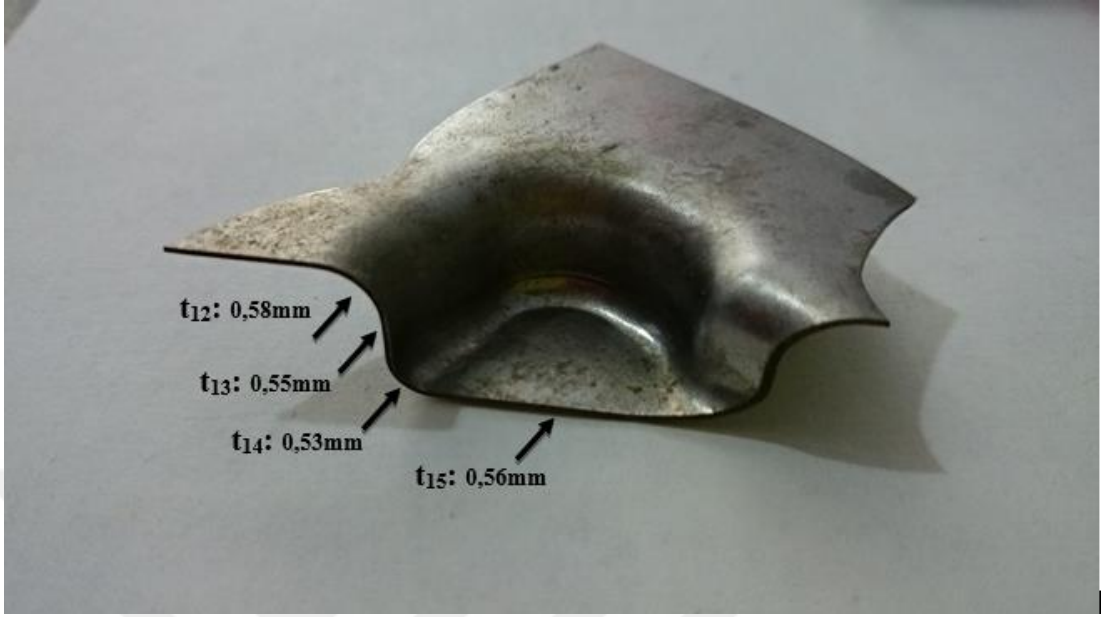
Şekil 5.17 : Uzunluk yönünde alınan kesit kalınlıkları için referans noktalar



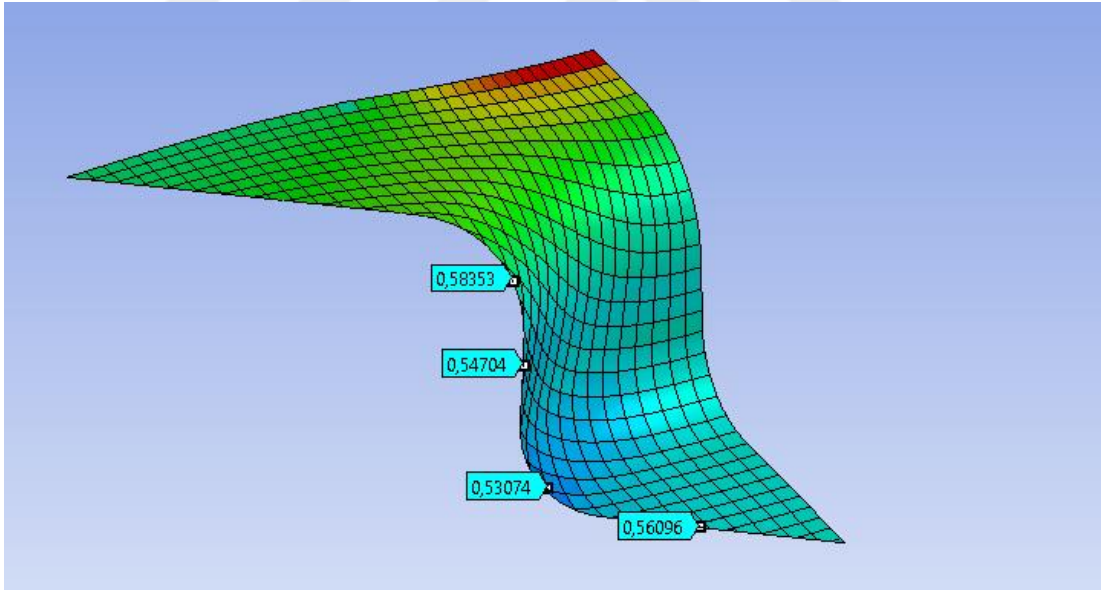
Şekil 5.18 : Uzunluk yönünde alınan kesit kalınlıklarının analiz sonuçları

Şekil 5.18’de bir noktanın 0,51668 mm’ye kadar incelme olduğu görülmektedir. Yalnız kumpas ile ölçülebilen en küçük kesit kalınlığı 0,52 mm olmuştur. Burada, ölçümden kaynaklanan veya analizden kaynaklanan bir farklılık vardır. Ancak, atomik seviyede sac metalde yerel incelme ve çökmeler meydana gelebilmektedir. Bu, kumpas ile alınamayacak bir ölçüm olmaktadır.

Şekil 5.19’da verilen 4 noktanın kalınlık değeri Şekil 5.20’deki değeri ile karşılaştırıldığında yüzdelik hassasiyetlerde birbiri ile örtüştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 5.19 : Çapraz yönde alınan kesit kalınlıkları için referans noktalar



Şekil 5.20 : Çapraz yönde alınan kesit kalınlıklarının analiz sonuçları

Çizelge 5.3’de ölçüm ve analiz sonuçlarının özeti verilmiştir. Ölçümler yüzde hassasiyetlerde alındığından, analiz sonuçlarında virgülden sonra iki haneye yuvarlatılarak çizelgeye yerleştirilmiştir.

Çizelge 5.3 : Kalınlık ölçüm ve analiz sonuçları

I. Derin çekme				
No	Ölçüm [mm]	Analiz Sonucu [mm]	Fark (mm)	Fark (%)
t1	0,72	0,73	0,01	1,39
t2	0,72	0,72	0,00	0,00
t3	0,60	0,60	0,00	0,00
t4	0,61	0,61	0,00	0,00
t5	0,56	0,56	0,00	0,00
t6	0,56	0,56	0,00	0,00
t7	0,56	0,56	0,00	0,00
t8	0,58	0,58	0,00	0,00
t9	0,57	0,57	0,00	0,00
t10	0,57	0,58	0,01	1,75
t11	0,62	0,62	0,00	0,00
t12	0,58	0,58	0,00	0,00
t13	0,55	0,55	0,00	0,00
t14	0,53	0,53	0,00	0,00
t15	0,56	0,56	0,00	0,00
t16	0,57	0,57	0,00	0,00
t17	0,52	0,52	0,00	0,00
t18	0,56	0,56	0,00	0,00
t19	0,54	0,54	0,00	0,00

Sonuçlar virgülden sonra iki haneye düşürüldüğünde, yani iki önemli sayı ile sonuçlar incelendiğinde, sadece t1 ve t10'da (kırmızı işaretli) fark bulunmaktadır. Diğer ölçümler birbiri ile örtüşmüştür. Yüzde fark sütunu, ölçüm sonuçlarına göre oluşturulmuştur. Parçadaki doğrusal olmayan yüzeylerin çokluğu daha fazla noktadan ölçüm alınmasını engellemiştir. Ölçüm için daha fazla sayıda numune kullanılmamıştır. Sebebi ise, parça telerezyon cihazına el ile konumlandırıldığından farklı düzlemlerde kesilerek farklı kalınlık değerlerinin okunacağı ve yanıltıcı olacağıdır. Sonuç olarak, analiz sonuçları gerçek durum ile başarılı bir şekilde uyumludur.

5.2.4 Deney ve analiz doğrulamasının özeti

Gerçeği analize yakınsatmak tezin proje kısmını temsil etmektedir. Bundan sonraki elde edilecek sonuçlar ve öneriler bu analiz ve gerçek bağdaştırmasının bir sonucu olacaktır. Bu sebeple, gerçek ve analiz birbirisine mümkün olduğunca yaklaştırılmıştır. Bu yaklaşma için ilk derin çekme işlemi referans alınmıştır.

Çünkü bu işlemde oluşturulacak koşullar ikinci ve üçüncü işlemler için de zaten geçerli olacaktır.

Parça ölçümünde, sac parçanın boyutsal olarak analiz girdileri oluşturulmuştur. Buna göre, sac kalınlığı 0,6 mm, çekme derinliği 13,1 mm, sac boyu 79,80 mm ve sac genişliği 58,90 mm olarak belirlenmiştir. Burada, bilinmeyenler olan, pot çemberi kuvveti, parçalar arasındaki sürtünme katsayıları, deneme yanılma yöntemi ile ancak bulunabilmiştir. Literatürde verilen sürtünme katsayıları ve derin çekmede tavsiye edilen pot çemberi kuvvetinden yola çıkılarak, parça uzunlukları ve kalınlıkları birbiri ile bağdaşana dek analiz tekrarlanmıştır. İki yüzü aşkın analiz sonucunda, pot çemberi kuvveti değişken ve 15kN - 30kN aralığında, zımba ve sac arasındaki sürtünme katsayısı 0.2, kalıp ile sac arasındaki sürtünme katsayısı 0.05, pot çemberi ve sac arasındaki sürtünme katsayısı ise 0.1 olarak bulunmuştur.

Analiz sonucunda elde edilen parça uzunluk ve genişliği, ölçülen 20 değer içerisinde yer aldığından kabul edilir bir sonuçtur. Çünkü analiz yaklaşık olarak bir sonucu temsil eder, pratikte ise kalıp makinesinin gerek kesme gerekse derin çekme işleminde bir çalışma toleransı olduğundan her baskıda sonsuz adet farklı ölçüm sonucu çıkarabilmektedir.

Kalınlık ölçümlerindeki farklar ise oldukça az ve kabul edilebilir bir sonuçtur. Gerçekte parça sonsuz noktadan oluşmaktadır. SEA'da ise parçanın sonlu noktalardan oluşturulması, ortam sıcaklığı, malzeme karbon dağılımından kaynaklanan farklı mekanik özellikler, gerçek koşulların tam olarak modellenememesi gibi durumlar sonuçlarda belirsizlik ve farklılıklara sebep olabilen doğal bir sonuçtur.

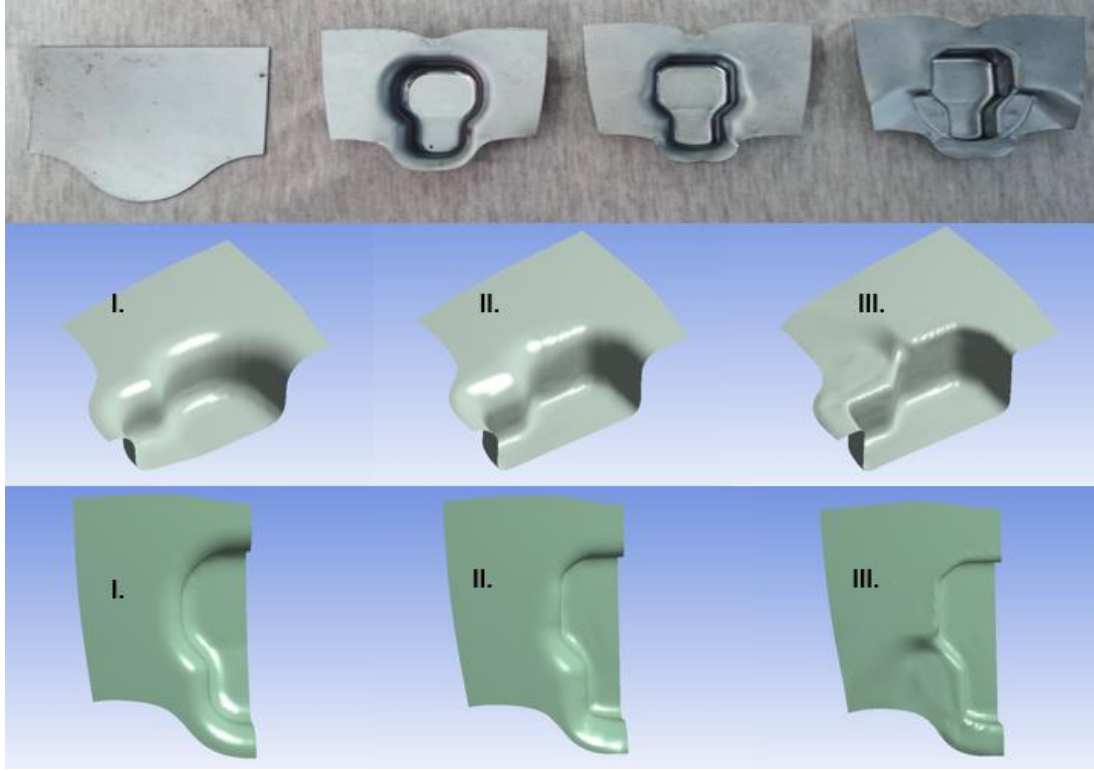
Yine de, gerek parça uzunluklarının gerekse parça kalınlıklarının gerçek ile bu kadar bağdaştırılabilmesi analizin bu problem için yüksek doğruluğa sahip bir program haline geldiğinin bir ispatıdır. Dolayısıyla bu sağlama ile, bilinmeyen analiz girdileri oluşturulmuş ve diğer derin çekme işlemlerine geçilmiştir.

5.3 I. II. III. Derin Çekme Analizinin Gerçekleştirilmesi

Tezin bu bölümüne kadar, I. derin çekme işlemi üzerindeki analiz ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Bu bölüm de, derin çekmeyi oluşturan diğer işlemlere yer verilmiştir. Burada, parçanın çekme derinliği ikinci ve üçüncü operasyonlarda değişmemektedir. Yalnızca, parça genel hatlarındaki eğrilik yarıçapları daha keskin

bir hal almaktadır. Parça kalıp geometrilerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır ve progresif kalıp makinasında kullanılan kalıplar olduğu gibi analizde kullanılmıştır.

I.Baskı sonrasında elde edilen sürtünme katsayıları ve pot çemberi kuvveti ikinci ve üçüncü çekme işlemlerinde atanmıştır. Şekil 5.21’de gerçek deney numunesinin baskı ve analiz sonrasında aldığı form karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.21 : Deney numunesinin baskı ve analiz sonrasında aldığı şekiller

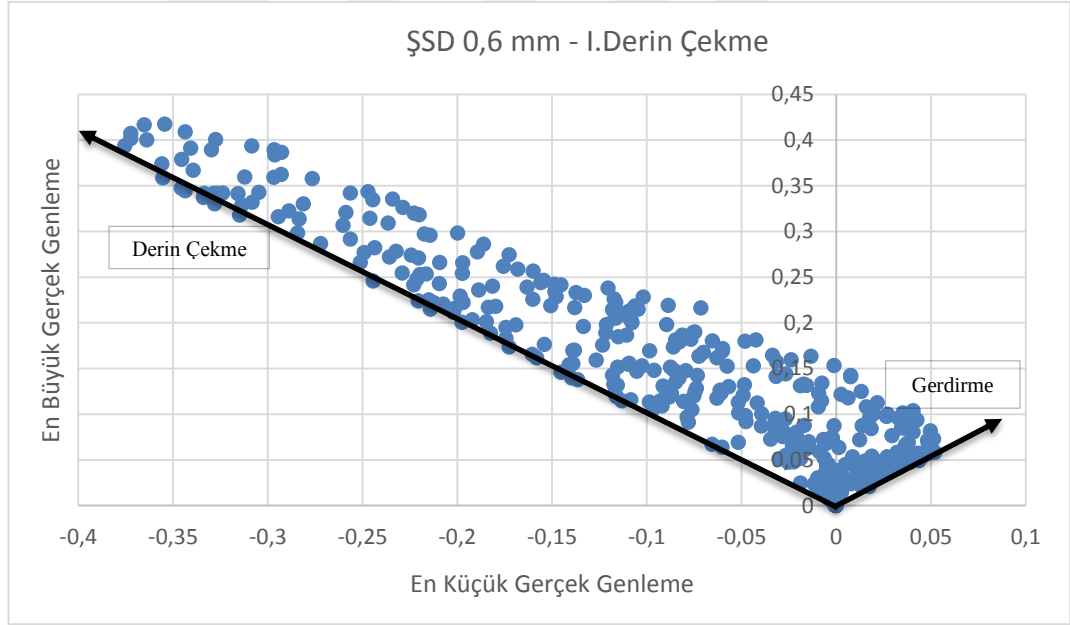
Şekil verme işlemi analiz ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Buradan sonra, parçanın şekil değiştirme sınırını belirleyebilmek ve ŞSD’nı oluşturabilmek için, ANSYS’te “eptox” ,”eptoy”, “eptoz”, “eptoxy” çözümlerini kullanarak x, y ve z yönündeki birim şekil değiştirme verisi parçanın kendi çözüm koordinatlarında elde edilmiştir. ŞSD’de x ve y yönündeki en büyük ve en küçük genlemelere ihtiyaç olduğundan dolayı kalınlık (burada z) eksenindeki birim şekil değiştirmeler ile ilgilenilmemiştir. Genleme verileri ANSYS’ten Excel’e aktarılmıştır. Çizelge 5.7’deki formüller yardımıyla asal genlemeler elde edilmiştir.

Çizelge 5.4 : En büyük ve en küçük genleme hesaplama formülleri [85].

Parametre	Sembol	Formül
En Büyük Genleme	$\epsilon_{\max}$	$(\epsilon_x + \epsilon_y)/2 + (((\epsilon_x - \epsilon_y)/2)^2 + (\gamma_{xy}/2)^2)^{0.5}$
En Küçük Genleme	$\epsilon_{\min}$	$(\epsilon_x + \epsilon_y)/2 - (((\epsilon_x - \epsilon_y)/2)^2 + (\gamma_{xy}/2)^2)^{0.5}$

Hesaplanan en büyük ve en küçük genlemeler ile I.II.III. çekme operasyonları için ŞSD oluşturulmuştur. I'den III. işleme geçiş için ve II'den III. işleme geçişler için de ŞSD oluşturulmuş ve farklı sac kalınlıkların da oluşarı diyagramlar incelenmiştir. Buna göre, bu diyagramlar aracılığıyla 3 olan derin çekme işlem sayısının 2 işleme düşürülebilirliği ve/veya sac kalınlığının inceltilebilirliğine karar verilecektir.

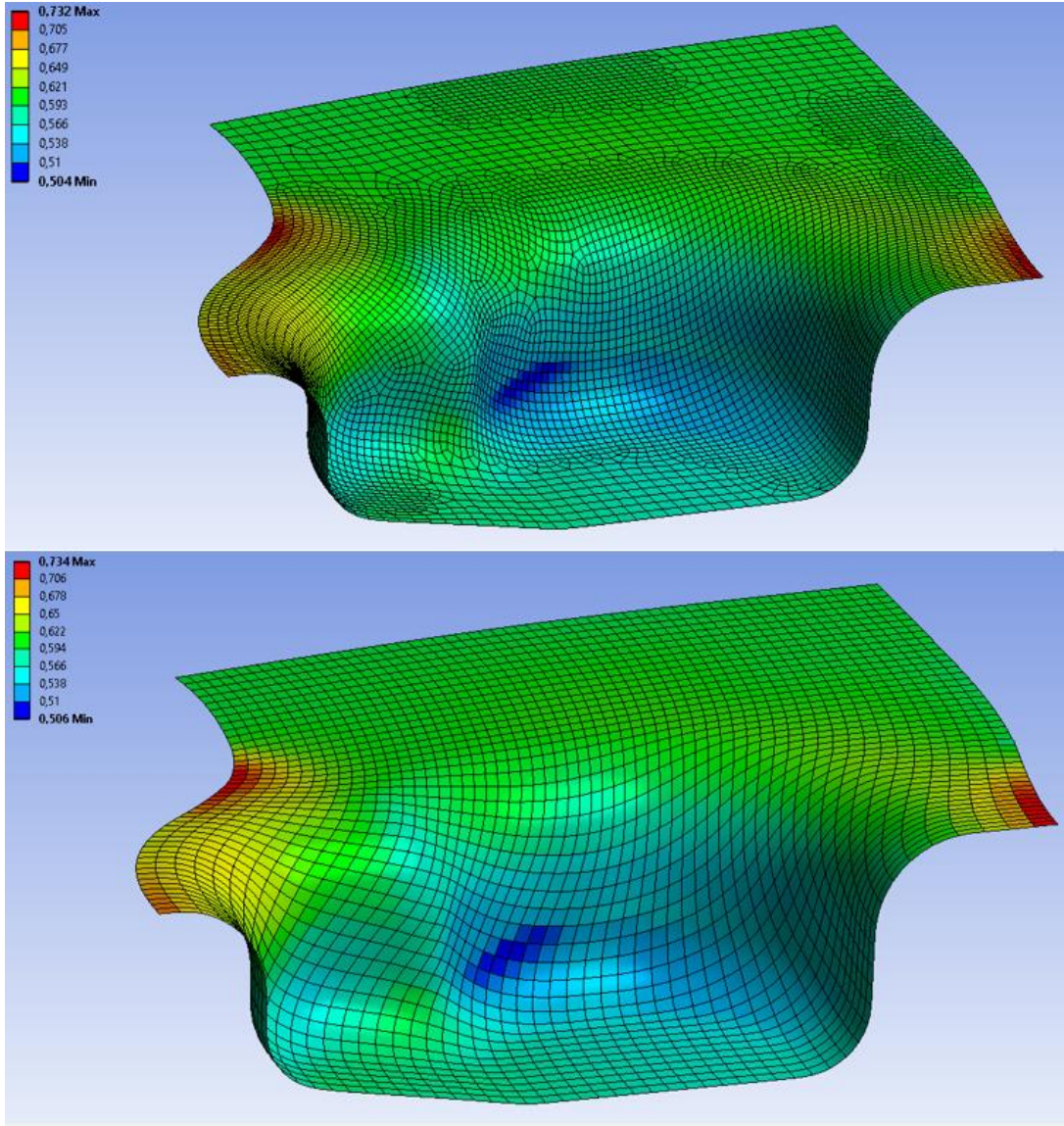
I.derin çekme işlemi sonucu 0,6mm sac kalınlığı için oluşturulan en büyük ve en küçük gerçek genleme grafiğı noktalar kümesi olarak grafikte oluşturulmuştur (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 : I. derin çekme analizi sonrası 0,6 mm sac için en büyük ve en küçük genleme diyagramı. Diyagramın sol tarafı çekme-basma, sağ tarafı ise çekme-çekme bölgesini temsil etmektedir. Diyagrama, noktalar derin çekme bölgesinde yoğunlaşmıştır. Analiz içerisinde bazı elemanların gerdirilmeye uğradığı eksenin sağ tarafında yer almasından anlaşılmaktadır.

5.3.1 Örgü eleman yapısının tayini

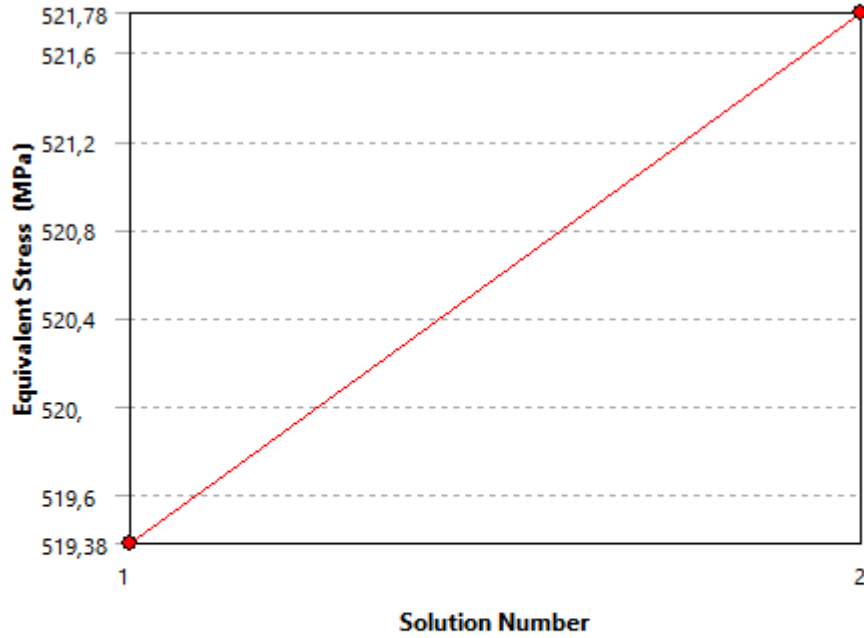
Örgü eleman uzunluklarının tayini sonuçların doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Örgü eleman uzunlukları azaldıkça, yani toplam eleman sayısı arttıkça sonuçlarının hassasiyeti ve doğruluğu artmaktadır. Bunu tayin edebilmek için “Convergence History” özelliği kullanılmıştır. Bu komuta göre, analiz sırasında, gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelere otomatik olarak eleman atılmakta ve eleman yoğunluğu arttırılmaktadır. Şekil 5.23’de yoğunlaştırılmış örgü ile sabit uzunlukta oluşturulan elemanların kalınlık bazındaki dağılımı verilmiştir. “Converge History“ kullanılarak 1 mm elemanlar ile analiz başlanmış ve Şekil 5.23’de ki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.23 : Adaptif ve sabit örgü çözümlerinin kalınlık sonuçları

Yalnız öyle bir nokta vardır ki, eleman sayısı ne kadar arttırılırsa arttırılsın sonuçlarda belirgin bir fark gerçekleşmemektedir. Şekil 5.20’de görüldüğü gibi, asıl olarak ilgilenilen kalınlık değişimlerinde iki örgü yapısı arasında belirgin bi fark bulunmamaktadır. Daha sık örgü, daha uzun analiz süreleri ve yakınsamama gibi problemleri beraberinde getirmektedir.

“Convergence History” sonuçlarına bakıldığında (Şekil 5.24), 1 mm örgü ile eş değer gerilme 519 MPa seviyelerinde görülürken, adaptif örgüleme ise eşdeğer gerilme 521,78 MPa seviyelerine çıkmakta ve burada ki değişim ise %0,46115 gibi çok küçük bir değerdir. Düğüm ve eleman sayıları ise adaptif örgüleme sonrası iki katını aştığı görülmektedir. Bu sonuç ise, 6 saatte tamamlanan bir analizin en az 12 saatte tamamlanabileceği bilgisini verebilmektedir.



	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	519,38		10643	3417
2	521,78	0,46115	23311	7603

Şekil 5.24 : Yakınsama geçmişi ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Bu sebeple, iki örgü yapısı arasında %0,46 gibi bir sonuç ihmal edilebilir bir sonuç olduğundan, bütün analizlerde ki elemanlar 1 mm eleman boyutu ile geçilmiştir.

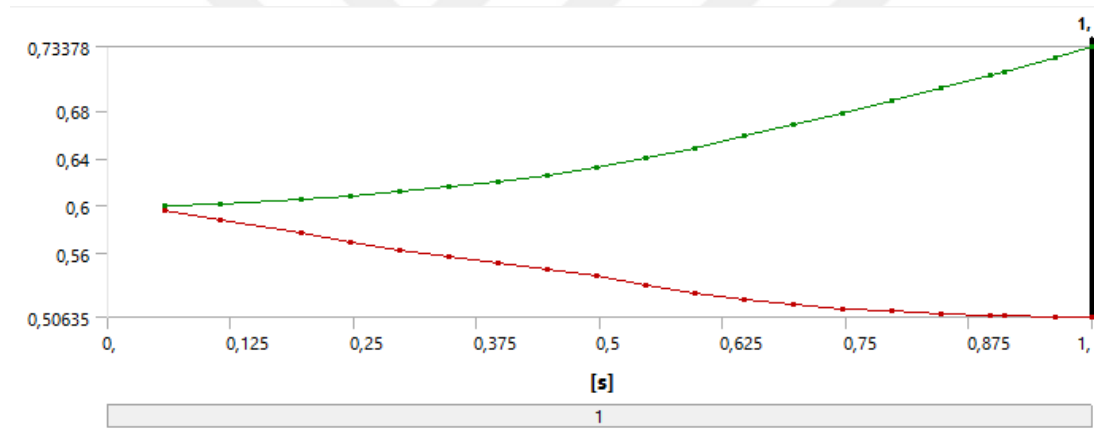
5.4 Derin Çekme İşlemi İçin ŞSD'nin Oluşturulması

Farklı sac kalınlıklarına göre tüm derin çekme analizleri tekrarlanmıştır. ANSYS'te elde edilen en büyük ve en küçük genlemeler 0,6mm, 0,7mm, 0,5mm ve 0,4 mm sac kalınlıkları için çizilmiştir. Bu tezde sacın hasar durumunun araştırılması için Tizsa ve Kovac'ın [1] DC04 için farklı kalınlıklarda elde etmiş olduğu ŞSD'ler kullanılmıştır ve analiz sonunda elde edilen sonuçlar ile beraber çizilerek yorumlanmıştır. Ayrıca sac kalınlıklarındaki değişimlerin derin çekme işlemi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

5.4.1 0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analiz sonuçları

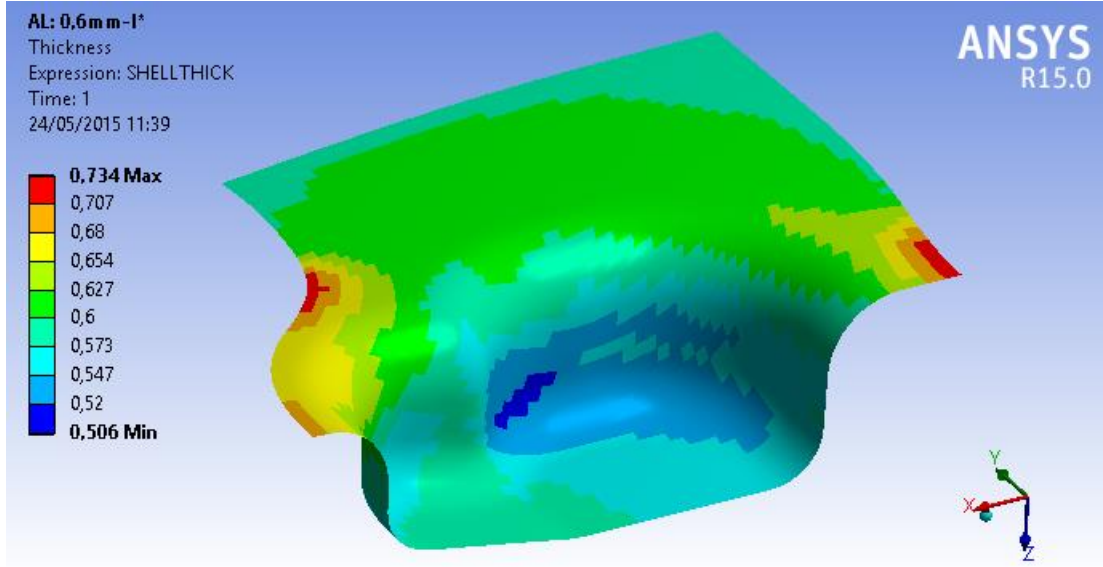
5.4.1.1 I. Derin çekme

Şekil 5.25'de en büyük ve en küçük sac kalınlığının simülasyon süresine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 5.25 : İlk derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği

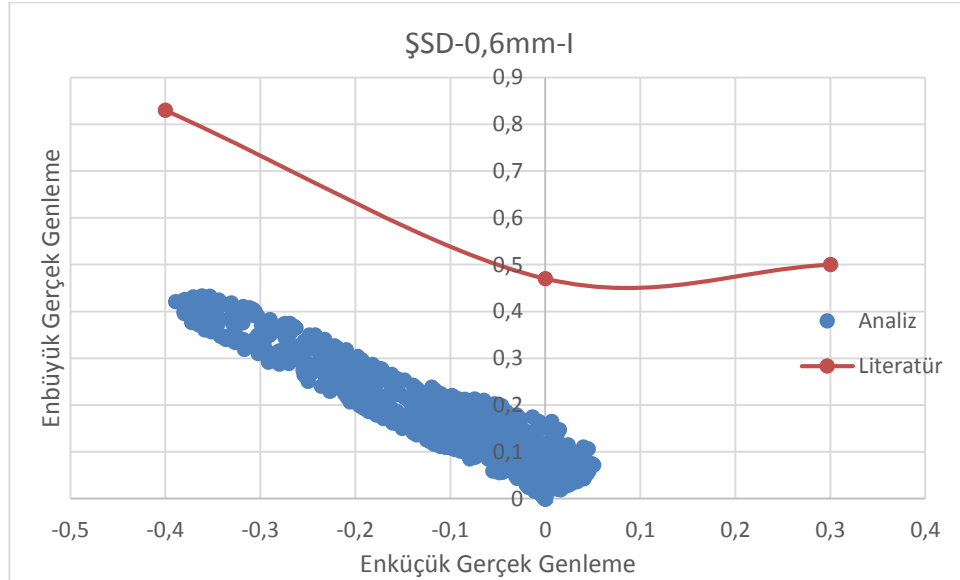
Sac kalınlığı 0,6 mm'den 0,73378 mm'ye yükselmiştir ve 0,50635 mm'ye kadar düşmüştür. Sac kalınlığında yaklaşık olarak %16'lık bir incelme meydana gelmiştir. Şekil 5.26'da I. derin çekme sonucu yüzeylerde oluşan kalınlık değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.26 : İlk derin çekme analizindeki kalınlık dağılımları

Minimum ve maksimum sac kalınlıkları eleman ölçeğinde görülebilmektedir. Kırmızı elemanlar yerel kalınlaşmayı, mavi elemanlar ise yerel incelmeyi temsil etmektedir. Kırmızı bölge 0,706 mm ve 0,734 mm kalınlıkları arasında kalan elemanları, mavi bölge ise 0,506 mm ve 0,52 mm arasında kalan elemanları temsil etmektedir.

Şekil 5.27’de, elde edilen en büyük ve en küçük gerçek genleme noktaları ve üzerine çizilen ŞSD verilmiştir.

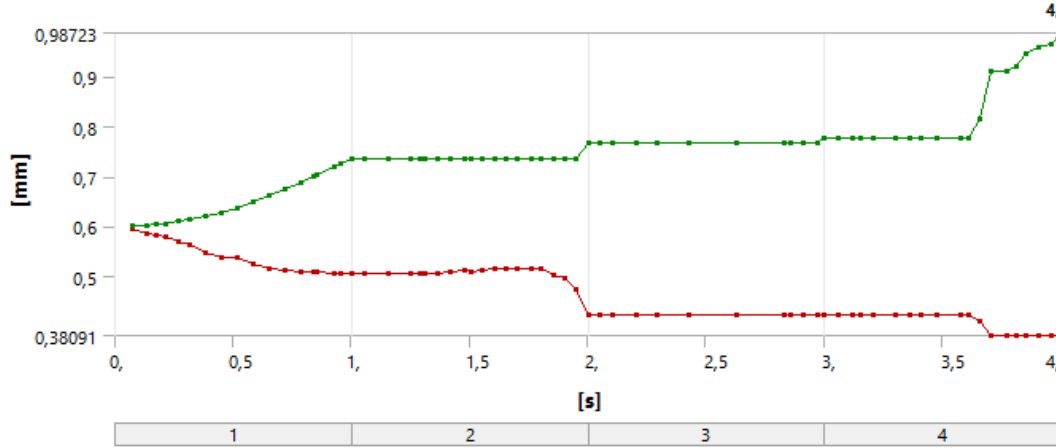


Şekil 5.27 : 0,6 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD

Genleme noktaları ŞSD eğrisinin altında kaldığından işlem sonrası iş parçasında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Gerçek deney numunesi üzerinde de, gözle görülür herhangi bir hasar oluşmamıştır.

5.4.1.2 I. II. III. Derin çekme

Bu bölümde, parçanın üç aşamada ki derin çekilmesi incelenmiştir. Şekil 5.28’de en büyük ve en küçük sac kalınlığının simülasyon süresine göre değişimi verilmiştir.

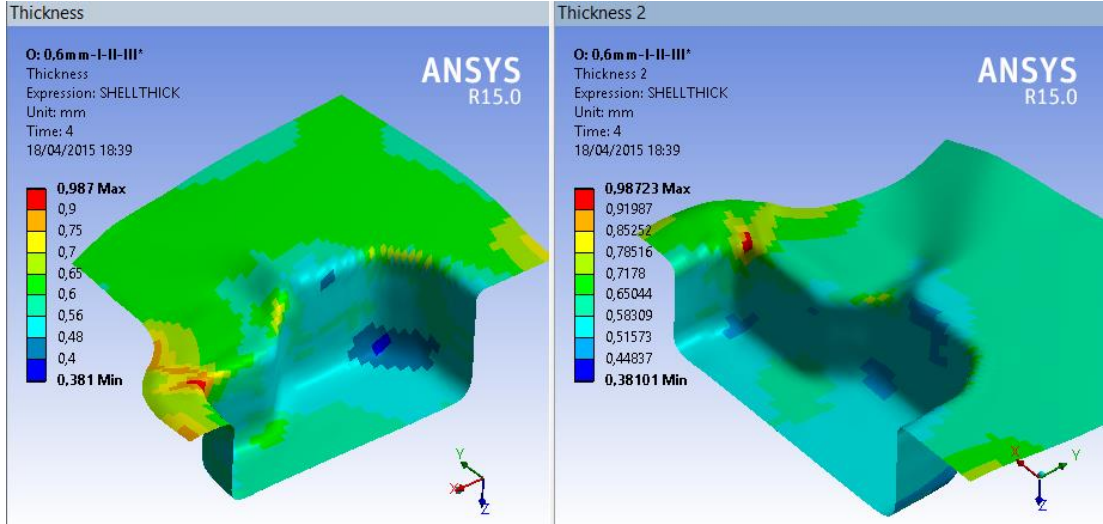


Şekil 5.28 : Üç işlemden gerçekleştirilen derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği

Sac kalınlığı işlem sonunda 0,6 mm’den 0,98723 mm’ye yükselmiştir ve 0,38091 mm’ye kadar düşmüştür. Bu değerler sac kalınlığında elde edilen en büyük ve en küçük noktalar ile oluşturulmaktadır. Sac kalınlığında yaklaşık olarak %36 lık bir incelme meydana gelmiştir.

Şekil 5.29’da analiz sonrası elde edilmiş minimum ve maksimum sac kalınlık dağılımı görülmektedir. Kırmızı elemanlar yerel kalınlaşmayı, mavi elemanlar ise yerel incelmeyi temsil etmektedir. Kırmızı bölge 0,90 mm ve 0,987 mm kalınlıkları arasında kalan elemanları, mavi ve yeşil bölge ise 0,381 mm ve 0,48 mm arasında kalan elemanları temsil etmektedir. En çok incelme mavi renkle gösterilen küçük bir alanda meydana gelmiştir.

Literatür, derin çekme işleminde incelme oranının %20’ den fazla olması durumunun kritik olduğunu söylemektedir [86]. Bu sebeple, incelme oranının bu seviyeler ve aşağı seviyeleri detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 5.29 : I.II.III. derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri

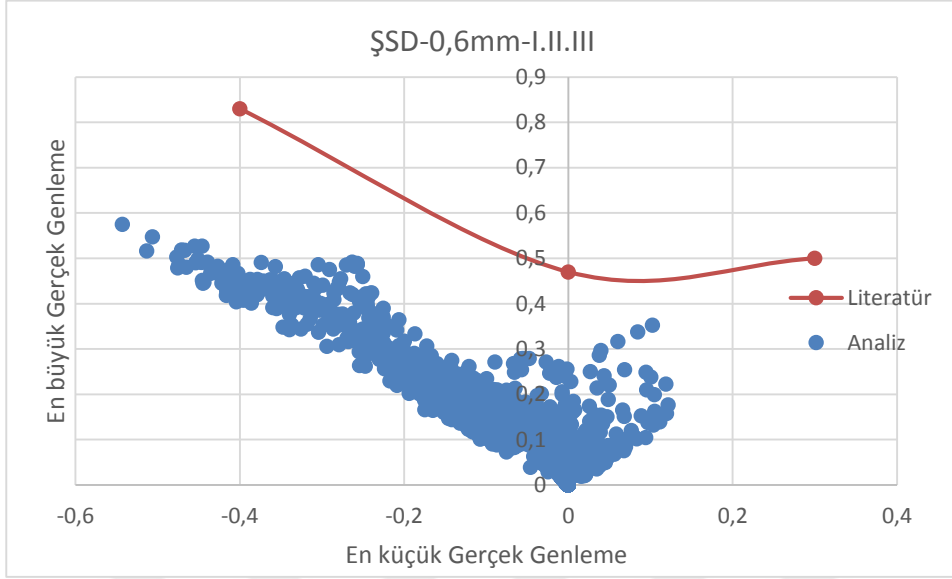
Bir elemanın ise yerel olarak kalınlaştığı görülmektedir. Bu eleman çekme-basma bölgesinde kaldığından dolayı kalınlaşmıştır (Şekil 5.29). Kalınlaşma küçük bir bölgede meydana gelmiştir. Çevre elemanlardaki maksimum kalınlık 0,86 mm'dir. Şekil 5.30'da ise, bu noktanın gerçek parça üzerindeki durumu gösterilmektedir.



Şekil 5.30 : Yerel kalınlaşmanın gerçek deney numunesi üzerinde gösterimi

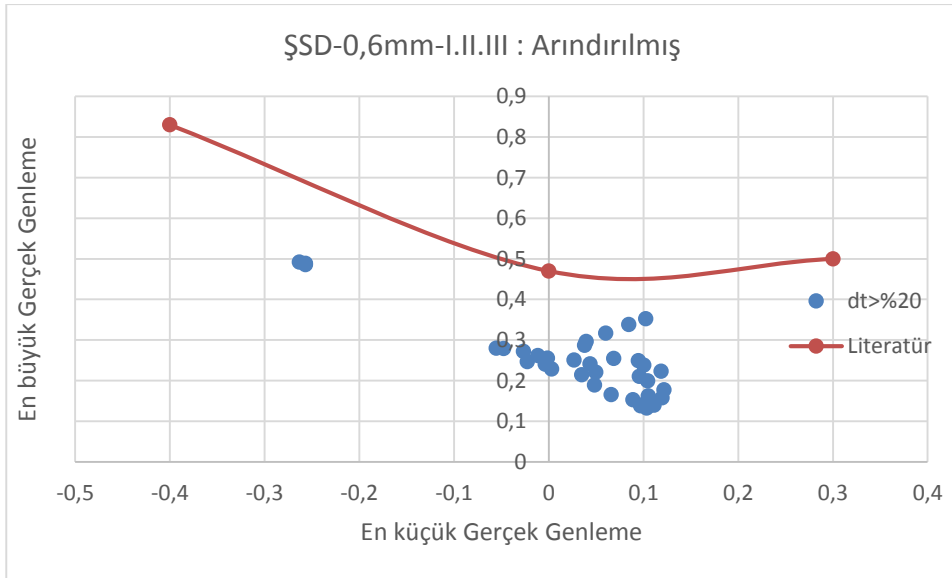
Deney numunesinde ki yerel kalınlaşma, kırmızı işaretli bölgede oluşmuştur. Çıplak göz ile incelendiğinde ayırt edilebilmektedir.

Şekil 5.31’de analiz sonrası I.II.III. derin çekme adımları için çizilen ŞSD gösterilmiştir.



Şekil 5.31 : 0,6 mm sac kalınlığı I.II.III. derin çekme işlemi için ŞSD

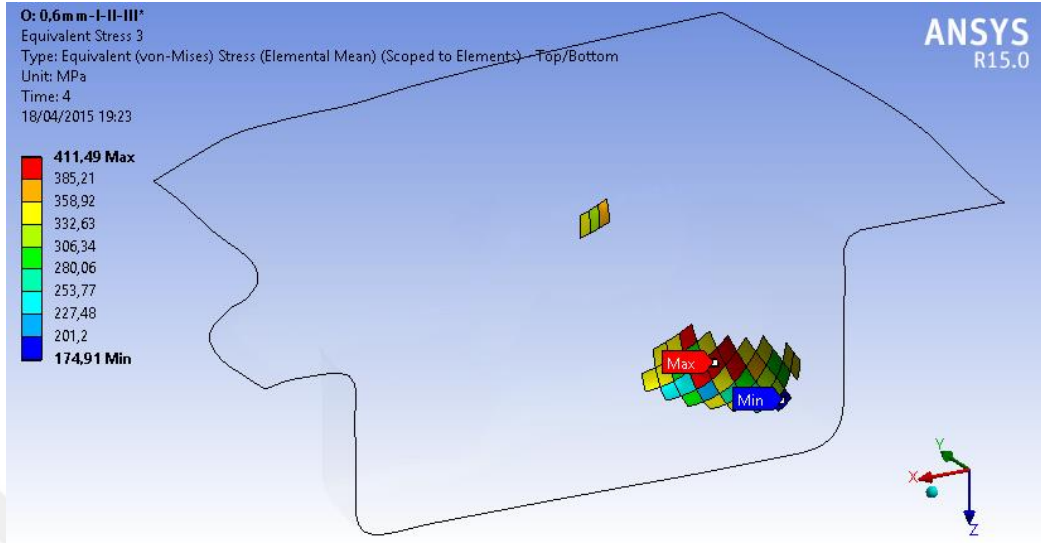
Genleme noktaları hasar eğrisini altında kalmıştır. Gerçek deney numunesi üzerinde de herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Yalnız, hasar bölgesine yaklaşan noktalar bulunmaktadır. Bu noktalar detaylı incelendiğinde, kalınlıkların %20 ve daha fazla incelendiği elemanlar olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.32’de kalınlıkların 0,48 mm ve aşağısında kalan noktalar seçilerek ŞSD tekrar çizilmiştir.



Şekil 5.32 : 0,6 mm sac kalınlığına göre arındırılmış I.II.III. derin çekme işlemi için ŞSD

Diyaframda görüldüğü gibi, hasar bölgesine yaklaşan noktalar incelmenin daha fazla olduğu noktalar olduğu anlaşılmıştır. Bu durum literatürün bahsettiği kritik incelme

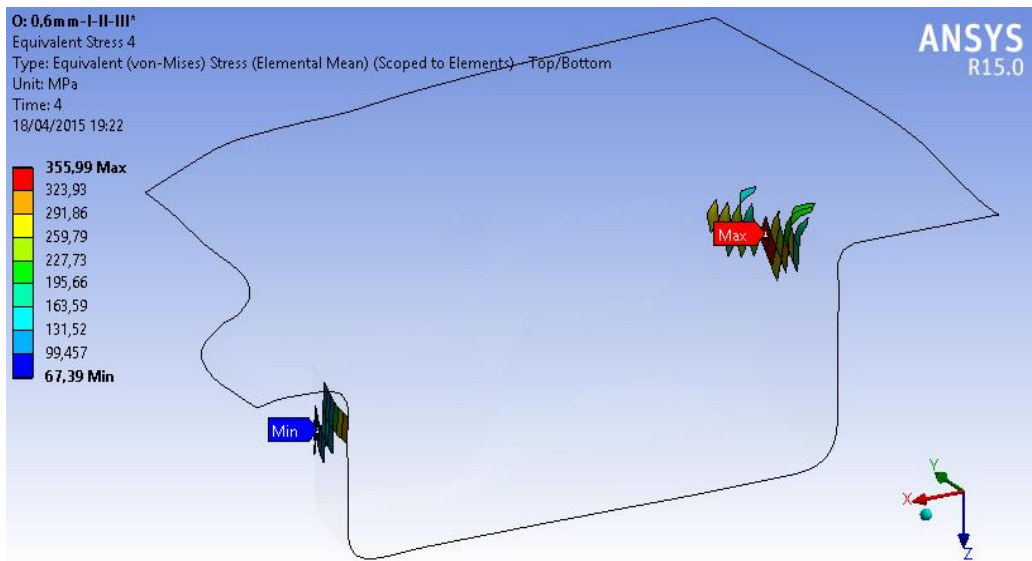
oranının (dt) %20 veya daha büyük dolaylarında olmasını ispatlar niteliktedir. Bu elemanlardaki gerilmeler ise Şekil 5.33’de gösterilmiştir.



Şekil 5.33 : I-II-III operasyonu için $dt > 20\%$ koşulundaki elemanların eşdeğer gerilmeleri

0,48 mm’den daha ince elemanlar üzerindeki maksimum eşdeğer gerilme 411 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, malzemenin boyun verme gerçek gerilme değeri olan 500 MPa’nın altındadır.

Şekil 5.31’de, bazı elemanların çekme basma bölgesinde (diyagramın sol bölgesi), şekil değiştirme sınır diyagramının sol tarafını aştığı görülmektedir. Bunun ne anlam ifade edebileceğini incelemek için, bu bölgeyi aşan en küçük ve en büyük genlemelere sahip elemanların eşdeğer gerilmeleri incelenmiştir (Şekil 5.34).

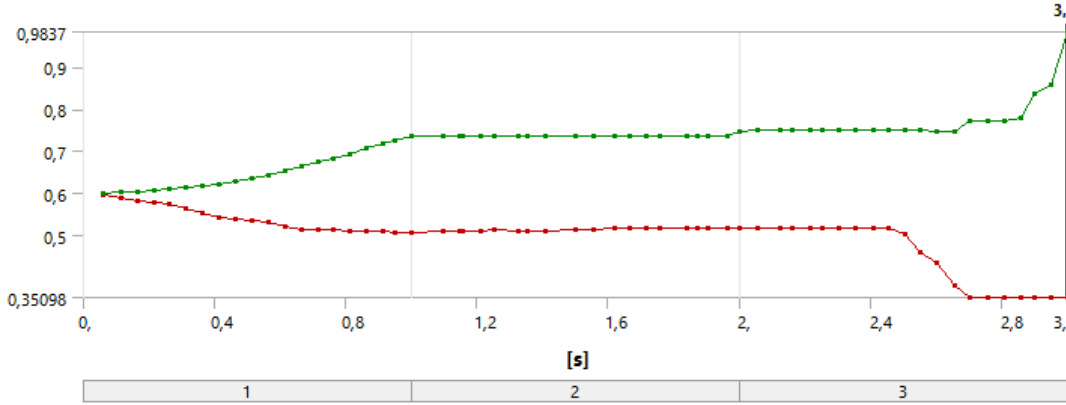


Şekil 5.34 : I-II-III operasyonu için çekme-basma bölgesinde ŞSD eğrisinin minimum genleme değerini aşan elemanların eşdeğer gerilmeleri

Sacın daha çok incelme olduğu bölgelerde (Şekil 5.33) daha çok gerilme olduğu, daha az incelme olduğu bölgelerde ise (Şekil 5.34) daha az gerilme olduğu görülmüştür. Bu bölgeler boyun verme gerçek gerilme değeri olan 500 MPa'ın altında kalmıştır.

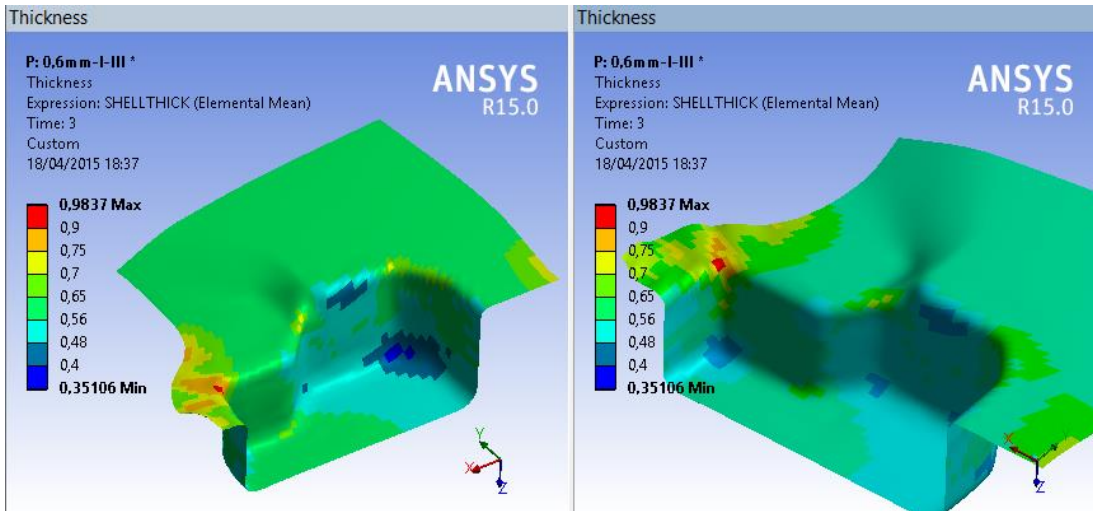
5.4.1.3 I.III. Derin çekme

Bu bölümde, I.'den III. işleme geçilerek parçanın iki operasyonda derin çekilmesi incelenmiştir.



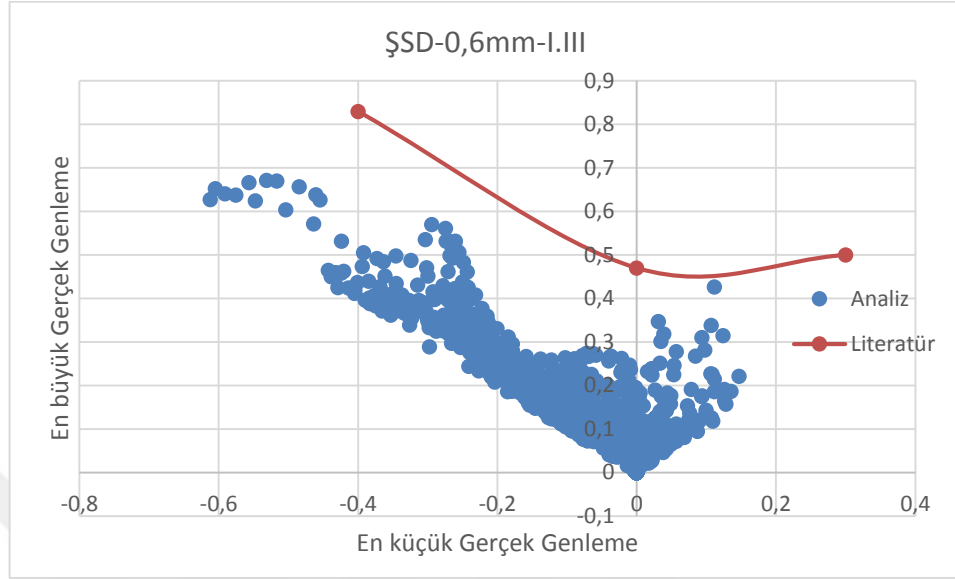
Şekil 5.35 : İki işlemde gerçekleştirilen derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği

Sac kalınlığı işlem sonunda 0,6 mm'den 0,98370 mm'ye yükselmiştir ve 0,35106 mm'ye kadar düşmüştür. Sac kalınlığında yaklaşık olarak %41'lik bir incelme meydana gelmiştir. Yalnız, bu kez daha çok elemanda yani sac üzerindeki daha çok noktada incelme olmuştur.



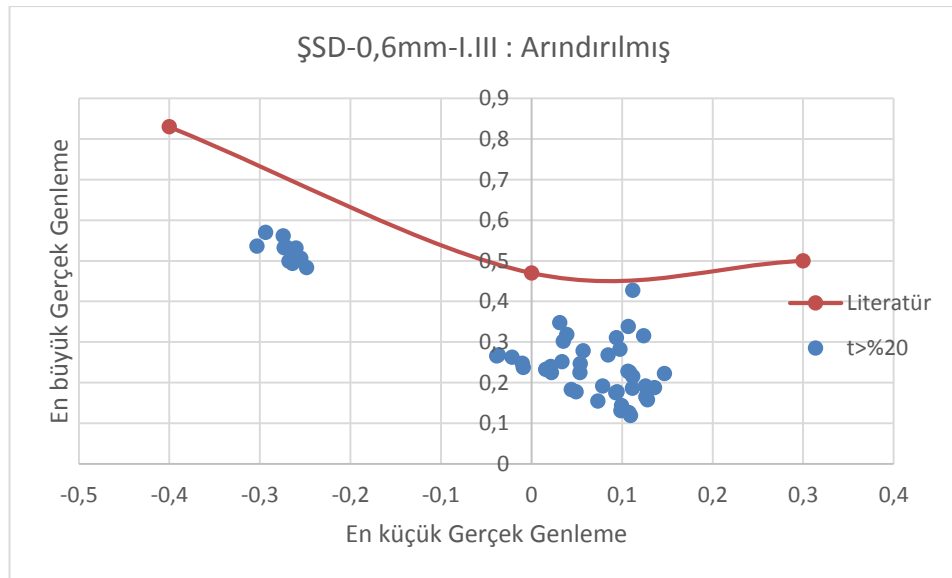
Şekil 5.36 : I-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri

I.'den III. operasyona direk geçişte sac kalınlığı  işlemli derin çekmeye göre %5 daha çok incelmiştir. Yerel kalınlaşma ise yakın değerdedir. Kalınlaşma küçük bir bölgede meydana gelmiştir. evre bölgelerdeki maksimum kalınlaşma 0,88 mm'dir.



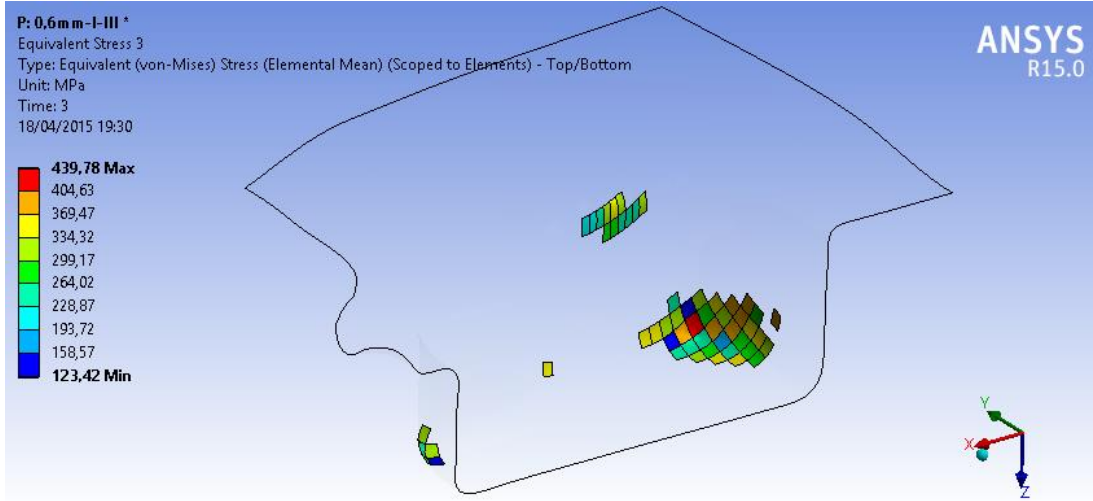
şekil 5.37 : 0,6 mm sac kalınlığı I. III. derin çekme işlemi için şSD

şekil 5.37'de iki baskıda elde edilmiş şSD verilmiştir. Genleme noktaları hasar eğrisini altında kalmıştır. Yalnız, I. II. III. derin çekme işlemine göre hasar eğrisine yaklaşan daha çok nokta bulunmaktadır. Detaylı inceleme için, kalınlık oranının %20 ve daha fazla incel-diği elemanlar seçilerek şSD tekrar çizilmiştir (şekil 5.38).



şekil 5.38 : 0,6 mm sac kalınlığına göre arındırılmış I. III. derin çekme işlemi için şSD

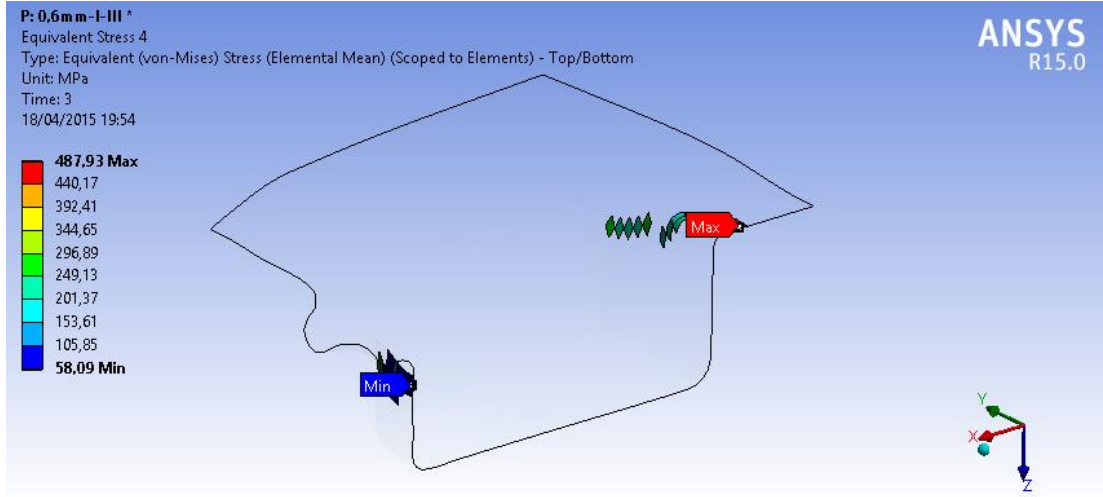
Diyagramda görüldüğü gibi, hasar bölgesine yaklaşan noktalar incelmenin daha fazla olduğu noktalardır. Bu elemanlardaki gerilmeler ise şekil 5.39'da gösterilmiştir.



Şekil 5.39 : I-III operasyonu için $dt > 20\%$ koşulundaki elemanların eşdeğer gerilmeleri

0,48 mm'den daha ince elemanlar üzerindeki maksimum eşdeğer gerilme 439 Mpa olarak elde edilmiştir. I.II.III. operasyona göre bu noktalardaki gerilmeler daha yüksek çıkmıştır. Buna göre, ŞSD'de hasar eğrisine daha çok yaklaşmıştır çünkü 3 işlemlili operasyona göre sac daha fazla incelme göstermiş ve inceldiği noktalarda daha fazla gerilme taşımaktadır. Yine de, sacda hasar meydana gelmemiştir. Dolayısıyla, riskli de olsa 3 işlemlili derin çekme işlemi I. ve III. operasyonlar uygulanarak 2 işleme düşürülebilir.

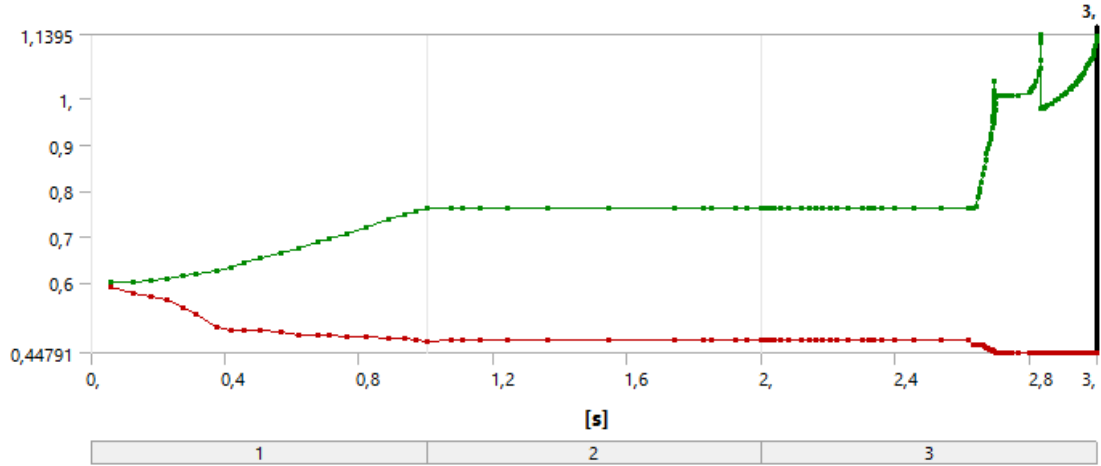
Şekil 5.37'de, bazı elemanların 3 işlemlili derin çekme de olduğu gibi çekme basma bölgesinde ŞSD'nin sol tarafını aştığı görülmektedir. Bu noktaların sac yüzeyinde karşılık geldiği bölge Şekil 5.40'de gösterilmiştir. Bu noktalar kalınlığı 0,6 mm ve 0,48 mm aralığında olan bölgeyi içermektedir. Bu noktalarda ki gerilmeler daha büyük çıkmıştır. Ancak, çekme deneyi verileriyle karşılaştırıldığında, hem boyun verme gerçek gerilmesi olan 500 MPa değerini aşmadığı hem de sac incelmesinin kritik olmadığı bölgede olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, çekme-basma bölgesinde ki eğrinin dışına çıkan noktaların parçayı hasara uğratacak bir veri olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.40 : I-III operasyonu için çekme-basma bölgesinde ŞSD eğrisinin minimum genleme değerini aşan elemanların eşdeğer gerilmeleri

5.4.1.4 II.III. Derin çekme

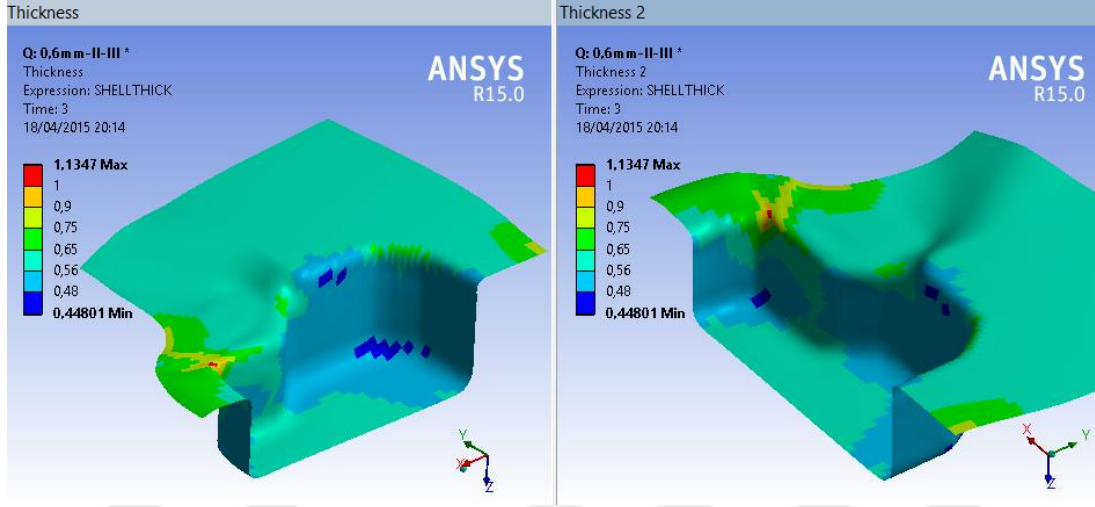
Bu bölümde, II.'den III. işleme geçilerek parçanın iki operasyonda derin çekilmesi incelenmiştir. Şekil 5.41'de en büyük ve en küçük sac kalınlığının simülasyon süresine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 5.41 : II-III işleminde gerçekleştirilen derin çekme işlemindeki kalınlık değişim grafiği

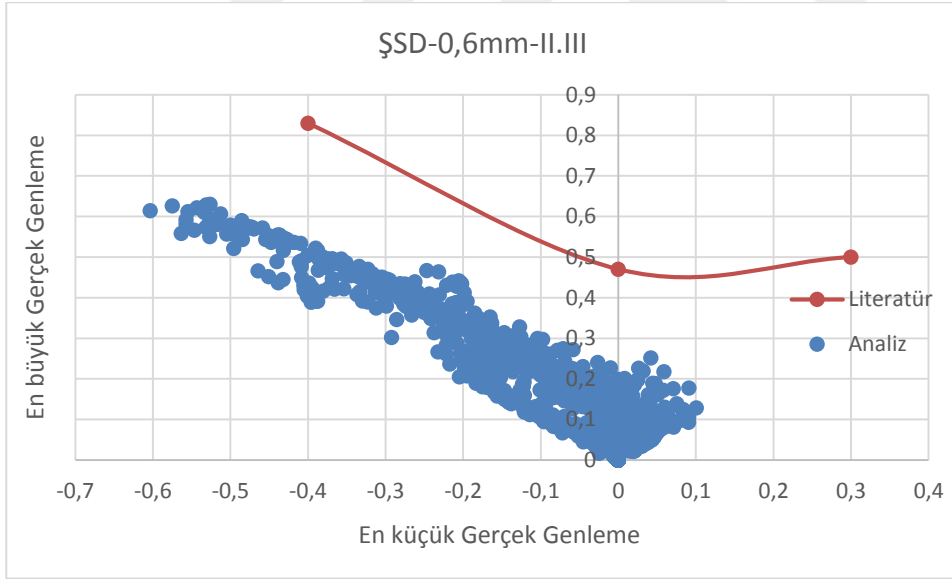
Sac kalınlığı işlem sonunda 0,6 mm'den 1,1347 mm'ye yükselmiştir ve 0,44801 mm'ye kadar düşmüştür. Kalınlaşma yalnızca bir elemanda yüksek çıkmıştır (Şekil 5.42). Çevre elemanlardaki en yüksek kalınlık 0,94 mm'dir. Sac kalınlığında yaklaşık olarak %25'lik bir incelmeye meydana gelmiştir. I.III. derin çekme ve I.II.III. derin çekme işlemine göre sacda en az incelmeye bu işlemde gerçekleşmiş ve üç işlemlilik derin çekmeye göre %11 daha az incelmeye meydana gelecektir. Buna göre, zaten hazırda 3 işlemlilik basılan bu parça, II. ve III. işlemler ile uygulansaydı daha az incelmeye meydana gelecekti. Ayrıca, ilk baskıyı daha küçük eğrilik yarıçaplı zımba ile yapmak sacı daha çok incelttiği,

yalnız bu eğrilik yarıçapı bir sonraki baskının zımba eğrilik yarıçapına daha yakın ise, çoklu derin çekme işlemi sonunda daha az incelme meydana geleceği anlaşılmaktadır.



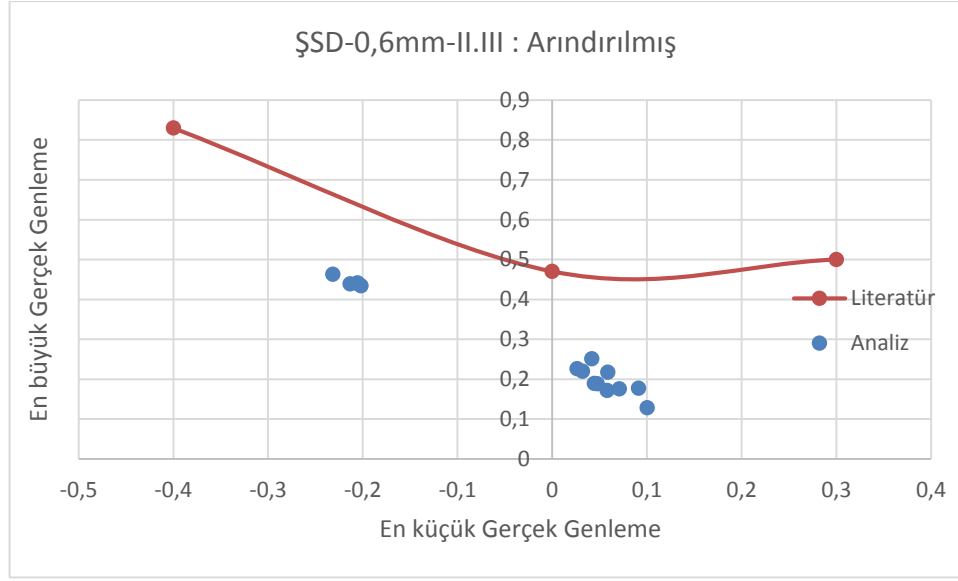
Şekil 5.42 : II-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri

Diğer 3 ve 2 aşamalı işlemlere göre bu kez daha az elemanda yani sac üzerindeki daha az noktada incelme olmuştur. Şekil 5.43’de iki baskıda elde edilmiş ŞSD verilmiştir.



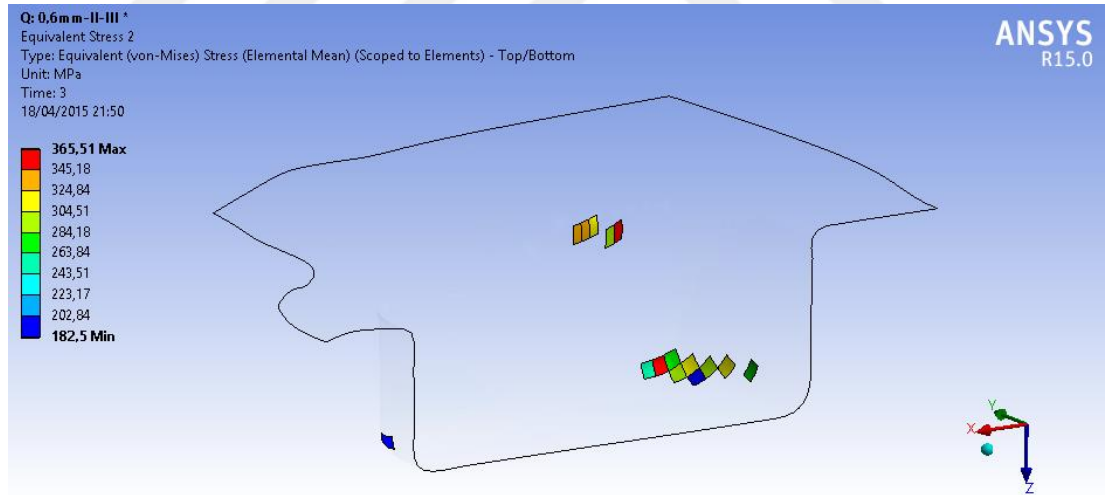
Şekil 5.43 : 0,6 mm sac kalınlığı II. III. derin çekme işlemi için ŞSD

Genleme noktaları hasar eğrisini altında kalmıştır. Hatta, diğer operasyonlara nazaran hasar eğrisinin en uzağında kalan operasyon olduğu görülmektedir. Detaylı inceleme için, kalınlık oranının %20 ve daha fazla incelme olduğu elemanlar seçilerek ŞSD tekrar çizilmiştir (Şekil 5.44).



Şekil 5.44 : 0,6 mm sac kalınlığına göre arındırılmış II-III derin çekme işlemi için SSD

Diyagramda görüldüğü gibi, hasar bölgesine yaklaşan noktalar incelmenin daha fazla olduğu noktalardır. Bu sonuç, II.'den III. operasyona geçişinin diğer işlemlere göre daha güvenli olduğunu göstermektedir. Bu elemanlardaki gerilmeler ise Şekil 5.45'de gösterilmiştir.

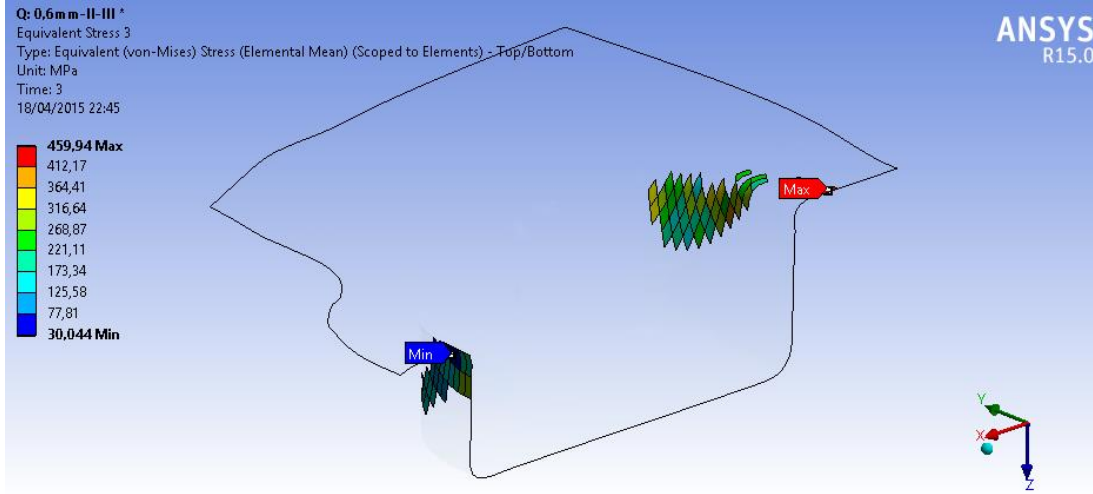


Şekil 5.45 : II-III operasyonu için $dt > \%20$ koşulundaki elemanların eşdeğer gerilmeleri

0,48 mm'den daha ince elemanlar üzerindeki maksimum eşdeğer gerilme 365 MPa olarak elde edilmiştir. I.II.III. operasyona göre bu noktalardaki gerilmeler çok daha düşük çıkmıştır. Buna göre, SSD'de hasar eğrisinden daha çok uzaklaşmıştır çünkü 3 işlemlili operasyona göre sac daha az incelmeye göstermiş ve incelme noktalarında da daha az gerilme taşımaktadır. Sacda hasar meydana gelmemiştir. Dolayısıyla, 3 işlemlili

derin çekme işlemi II. ve III. operasyonlar uygulanarak 2 işleme güvenli bir şekilde düşürülebilmektedir.

Şekil 5.43’de, 3 işlemlili derin çekmede olduğu gibi çekme basma bölgesinde ŞSD’nin sol tarafını aştığı görülmektedir. Bu noktaların sac yüzeyinde karşılık geldiği bölge Şekil 5.46’da gösterilmiştir. Bu noktalar kalınlığı 0,6 mm ve 0,48 mm aralığında olan bölgeyi içermektedir.



Şekil 5.46 : II-III operasyonu için çekme-basma bölgesinde ŞSD eğrisinin minimum genleme değeri aşan bölgelerin eşdeğer gerilmeleri

5.4.1.5 0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analizinin değerlendirilmesi

Tezin bu kısmında 0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analizi kalınlık ve ŞSD kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda 0,6 mm DC04 sacı için elde edilmiş ŞSD diyagramı literatürden alınarak kullanılmıştır. ANSYS’te analiz sonunda elde edilen x ve y yönündeki birim şekil değiştirmeler ve xy yönündeki kayma birim şekil değiştirmeleri alınarak, yüzeydeki en büyük ve en küçük şekil değiştirmeler elde edilmiş ve sonucunda da ŞSD çizilmiştir. Sac parça üçüncü formu alabilmek için 3 defa da derin çekme işlemine maruz bırakılıyordu. Yalnız elde edilen sonuçlar sac parçanın üçüncü yani nihai formunu hasara uğramadan 2 operasyonda da alabileceğini göstermiştir.

Öncelikle, analiz girdilerinin bulunması için için incelenen ilk derin çekme prosesi, sonrasında normal deney şartı olan 3 işlemlili derin çekme analizi yapılmıştır. Bu parça gerçekte hasara uğramadığı görülmektedir. İncelenen kalınlık dağılımları ve beraberinde değerlendirilen şekillendirme sınırı diyagramı bu sonucu doğrulamaktadır.

Sonrasında, operasyon sayısının düşürülebilirliği incelenmiş ve I.'den III. baskıya, II. baskı atlanarak direk olarak geçilebilirlik incelenmiştir. Bu işlemde sac kalınlığının daha fazla incelendiği görülse de, en büyük ve en küçük genlemeler ŞSD' de hasar bölgesi içerisinde yer almamıştır. Bu sonuç, baskı sayısının ikiye düşürebileceğini göstermiştir.

Daha sonra, II.'den III. baskıya I. baskı atlanarak direk olarak geçilebilirlik incelenmiştir. Sac kalınlığının en az bu işlemde incelendiği görülmüştür ve şekillendirme sınırı diyagramında da genleme değerleri hasar bölgesine en uzak çıkan işlem olmuştur. Çizelge 5.5'de ilk duruma göre minimum sac kalınları değerleri ve değişim oranları verilmiştir. Burada, t_0 ilk sac kalınlığını, t_{min} en küçük sac kalınlığını ve dt ise sac incelme oranını göstermektedir.

Çizelge 5.5 : 0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme analizleri özet tablosu

Operasyon	t_0 (mm)	t_{min} (mm)	dt (%)	Hasar Durumu	Deney Yapıldı mı
I	0,6	0,50635	15,61	Yok	Evet
I-II-III		0,38101	36,50	Yok	Evet
I-III		0,35106	41,49	Yok/Yakın	Hayır
II		0,47386	21,02	Yok	Evet
II-III		0,44801	25,33	Yok	Evet

Dolayısıyla bu işlemi uygulamak operasyon sayısının azaltılmasında sacı hasara uğratmadan kullanılabilecek en güvenilir sonuçtur. Daha büyük zımba eğrilik yarıçapları ile derin çekme işleminin yapılması ve sonrasında daha küçük zımba eğrilik yarıçapları ile işleme devam edilmesinin tehlikeli olabileceği sonucu çıkmaktadır. Literatürde bu sonucu doğrulamaktadır [16].

Sonuçlar incelendiğinde, şekillendirme sınırı diyagramı kullanımının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Hasar bölgesine yaklaşan elemanlar sac kalınlığı incelme oranının %20 ve daha fazlası olan yüzeyi temsil ettiği sonucu ortaya çıkmıştır. Yani 0,48 mm kalınlık ve aşağısında kalan bölgeler kritik bölgeler olduğu anlaşılmıştır. Özellikle, ŞSD çekme-basma bölgesinde, eğrinin kenar sınırlarını aşan bölgeler olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeler detaylı olarak incelendiğinde, her derin çekme işlemde sac üzerindeki aynı bölgelerin ŞSD eğrisinin sol kenarı dışına taşıdığı ve bu bölgelerin kalınlıklarının 0,6 mm ve 0,48 mm aralığında kaldığı ve kopma gerilmesi değeri olan 500 MPa değerine ulaşmadığından herhangi bir hasarın meydana gelmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

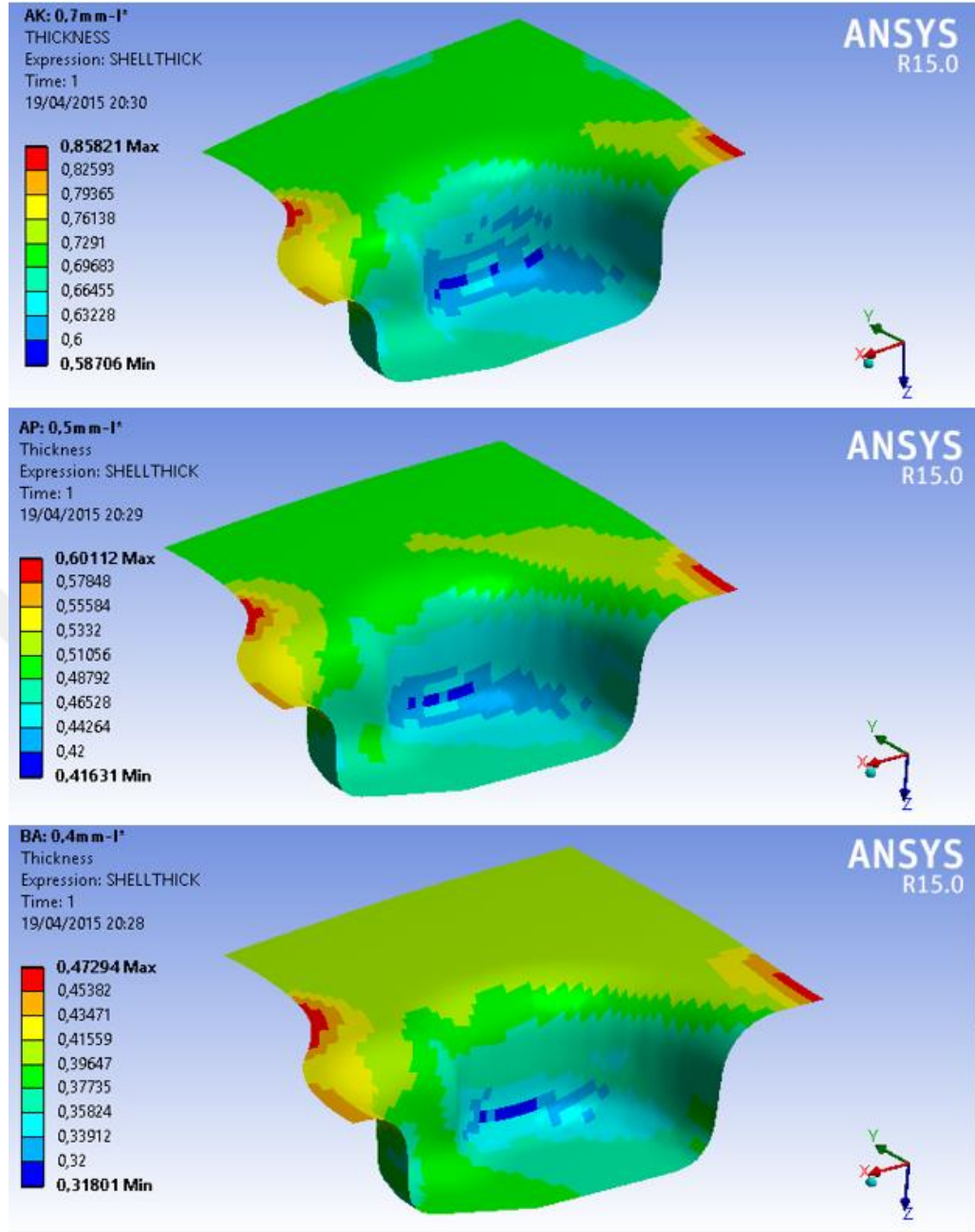
Tezin buraya kadar olan bölümünde, progresif kalıp makinesinde hazırda basılan 0,6 mm sac kalınlığı için 3 olan derin çekme işlem sayısının 2 operasyona düşürülebilirliği üzerinde analiz çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar kalıplarda herhangi bir değişikliğe gidilmeden derin çekme sayısının azaltılabilirliğini göstermiştir. Bu sonuç, üretim hızında veya üretilen parça adedinde belirgin bir avantaj sağlamamaktadır. Ancak, kalıbın yenileme maliyeti açısından önemli bir avantaj ve kâr sağlamaktadır. Bir sonraki bölümde ise, sac kalınlığını azaltabilme ve bununla beraber operasyon sayısı azaltılabilirliği üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

5.4.2 0,7 , 0,5 ve 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analiz sonuçları

5.4.2.1 I. Derin çekme

Şekil 5.47’de I. derin çekme işleminin analizi sonucunda oluşan kalınlık dağılımı verilmiştir.

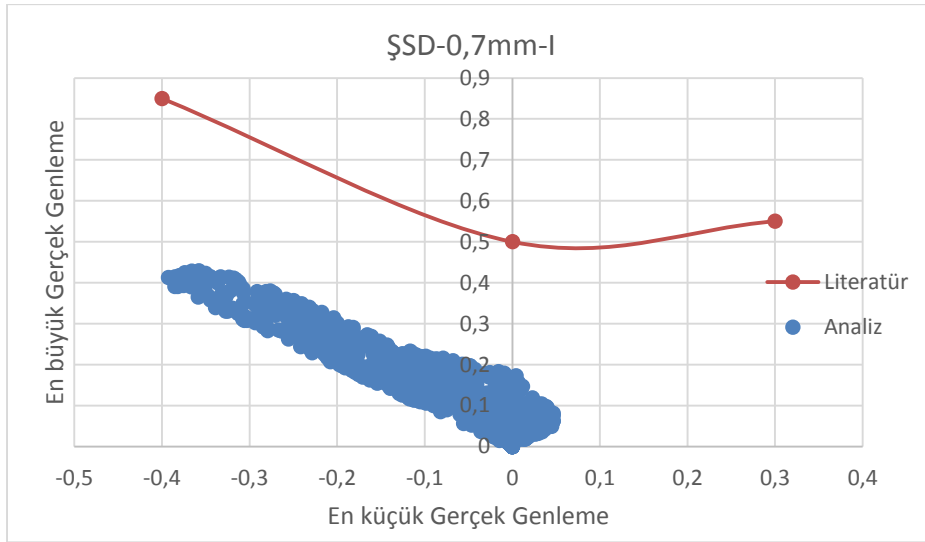
Sac kalınlığı 0,7 mm sac için 0,8582 mm’ye yükselmiştir ve 0,5871 mm’ye kadar düşmüştür. I. derin çekme işlemi için sac kalınlığında yaklaşık olarak %16’lık bir incelme meydana gelmiştir. 0,5 mm sac için kalınlık 0,6011 mm’ye yükselmiştir ve 0,4163 mm’ye kadar düşmüştür. Sac kalınlığında bu işlem için yaklaşık olarak %17’lik bir incelme meydana gelmiştir. 0,4 mm sac kalınlığı ise 0,47294 mm’ye yükselmiş olup 0,31801 mm’ye kadar düşmüştür. Bu işlemde ise sac kalınlığında yaklaşık olarak %20’lik bir incelme meydana gelmiştir. Şekil 5.48’te analizi sonucu elde edilen kalınlık değişimlerinin sac yüzeylerinde ki dağılımı verilmiştir.



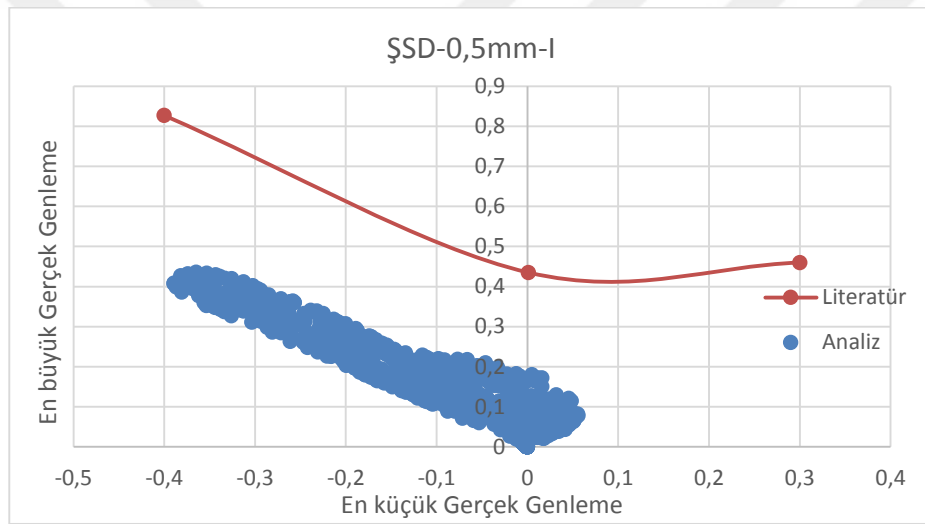
Şekil 5.47 : 0,7, 0,5, 0,4 sac kalınlıkları için ilk derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri

Kırmızı elemanlar yerel kalınlaşmayı, mavi elemanlar ise yerel incelmeyi temsil etmektedir. 0,6 mm sac kalınlığında olduğu gibi, diğer sac kalınlıklarında da yerel incelmeler ve yerel kalınlaşmalar aynı bölgelerde meydana gelmiştir.

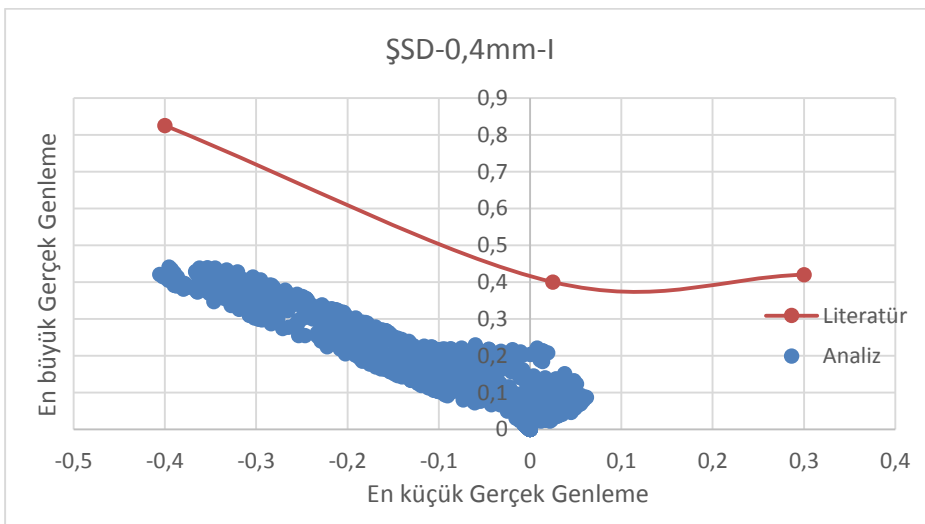
Şekil 5.48, 5.49, 5.50’de, I. derin çekme işlemi için elde edilen ŞSD’ler verilmiştir.



Şekil 5.48 : 0,7 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD



Şekil 5.49 : 0,5 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD

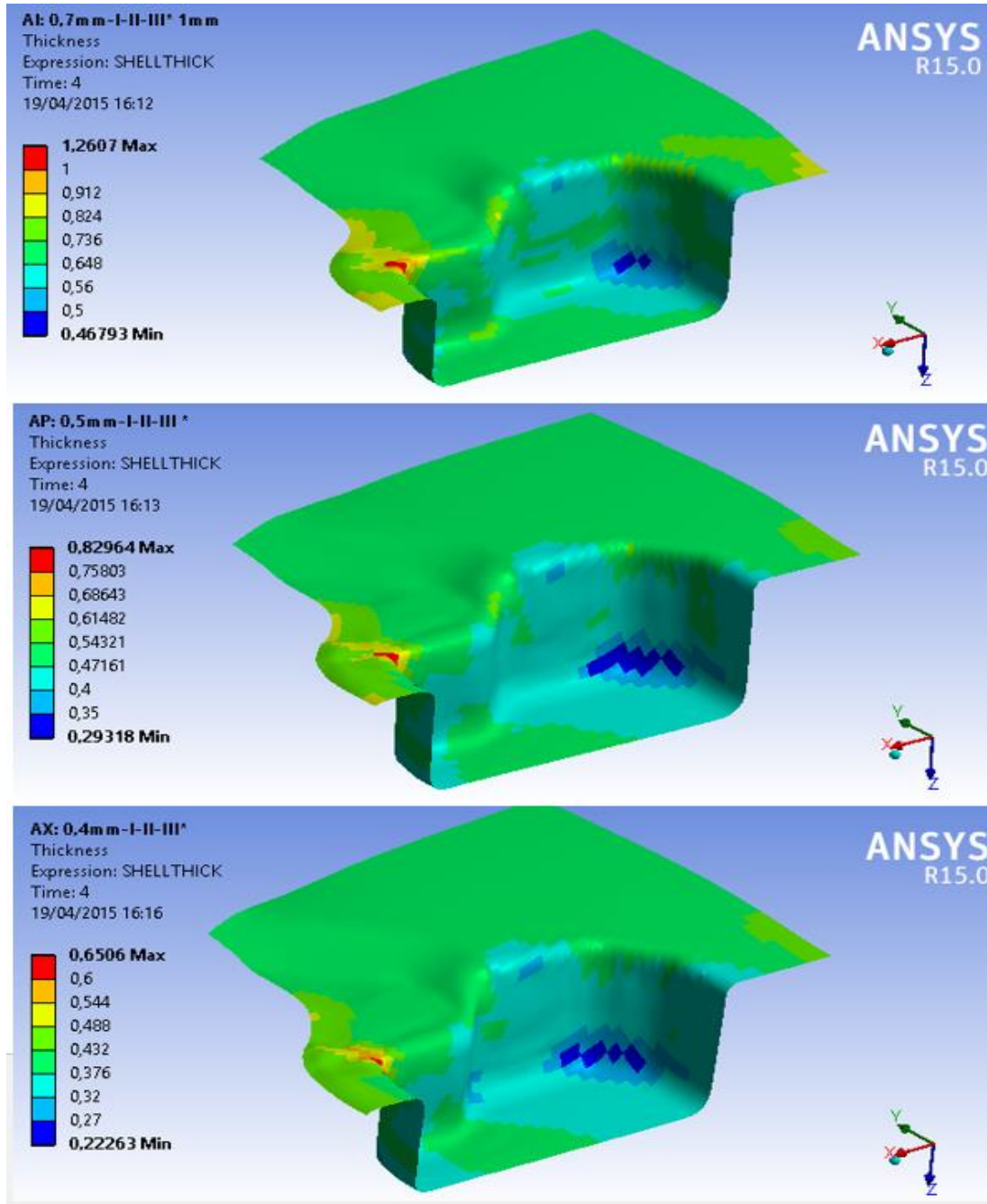


Şekil 5.50 : 0,4 mm sac kalınlığı I. derin çekme işlemi için ŞSD

En büyük ve en küçük genleme noktaları şekillendirme sınırı eğrisini altında kaldığından işlem sonrası iş parçasında hasar meydana gelmeyecektir. Yani ilk derin çekme işlemi sonucunda sac kalınlığını 0,4 mm'ye kadar düşürmek sac da hasar meydana getirmeyecektir.

5.4.2.2 I.II.III. Derin çekme

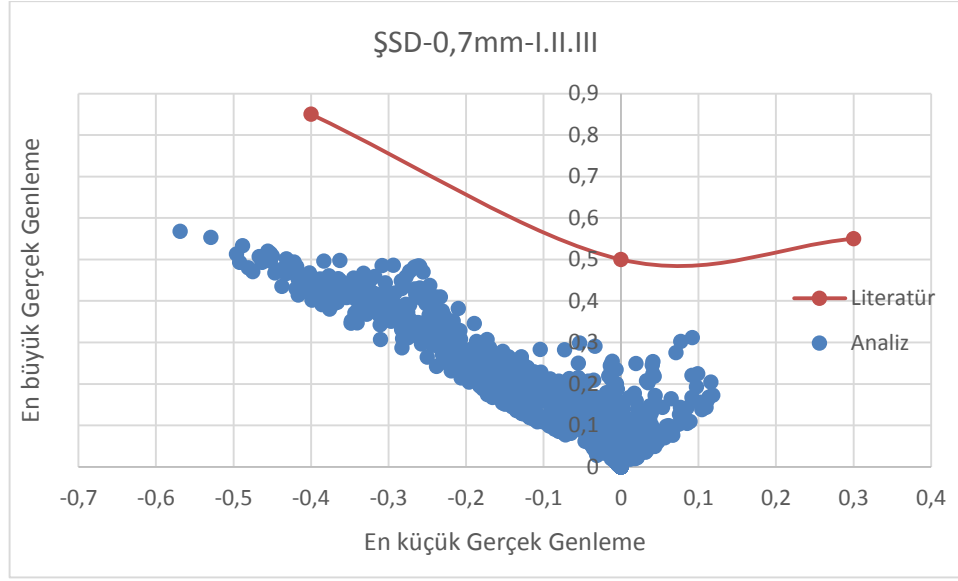
Şekil 5.51'de 3 aşamalı derin çekme analizinde elde edilen sac kalınlığının simülasyon süresine göre değişimi verilmiştir. Sac kalınlığı 0,7 mm sac için 1,2607 mm'ye yükselmiştir ve 0,4673 mm'ye kadar düşmüştür. I. II. III. derin çekme işlemi için sac kalınlığında yaklaşık olarak %33'lük bir incelme meydana gelmiştir. 0,5 mm sac için kalınlık 0,82964 mm'ye yükselmiştir ve 0,29318 mm'ye kadar düşmüştür. Sac kalınlığında bu işlem için yaklaşık olarak %41'lik bir incelme meydana gelmiştir. 0,4 mm sac kalınlığı ise 0,6506 mm'ye yükselmiş olup 0,22263 mm'ye kadar düşmüştür. Bu işlemde ise sac kalınlığında yaklaşık olarak %44'lük bir incelme meydana gelmiştir. Şekil 5.53'de analiz sonucunda elde edilen yüzeylerde ki kalınlık değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.51 : 0,7, 0,5, 0,4 sac kalınlıkları için I-II-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri

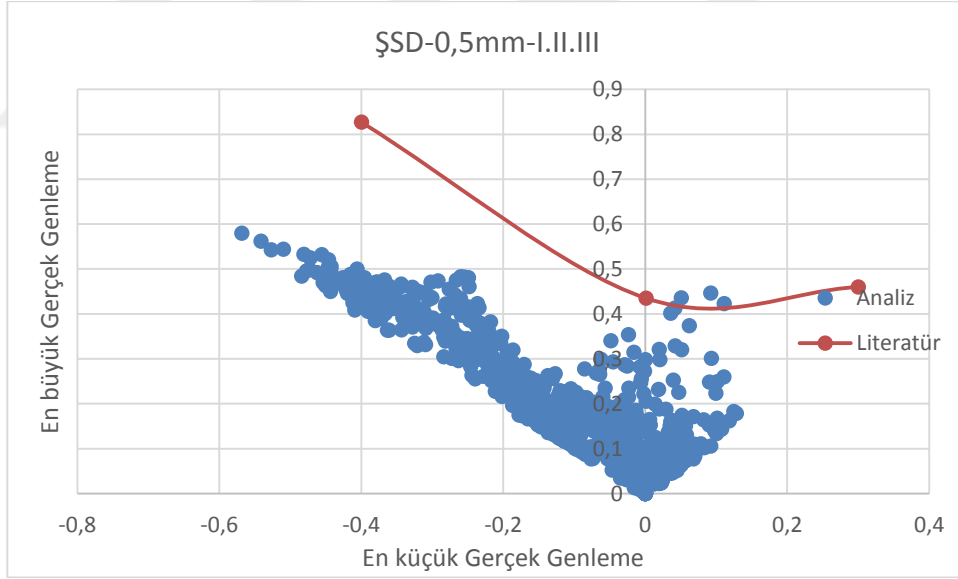
Kırmızı elemanlar yerel kalınlaşmayı, mavi elemanlar ise yerel incelmeyi temsil etmektedir. Sac kalınlığı azaldıkça, incelme oranının arttığı görülmektedir.

Şekil 5.52, 5.53, 5.54’de, I. II. III. derin çekme işlemi için elde edilen ŞSD’ler verilmiştir.



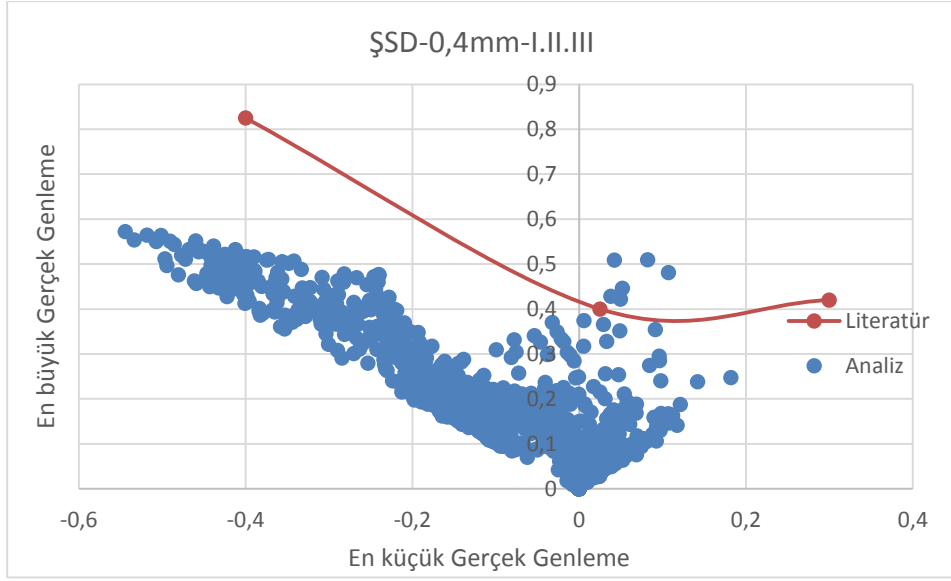
Şekil 5.52 : 0,7 mm sac kalınlığı I-II-III derin çekme işlemi için ŞSD.

0,7 mm kalınlığında ki sac için en büyük ve en küçük genleme noktaları şekillendirme sınırı eğrisini altında kaldığından işlem sonrası iş parçasında hasar meydana gelmeyecektir.



Şekil 5.53 : 0,5 mm sac kalınlığı I-II-III derin çekme işlemi için ŞSD.

0,5 ve 0,4 mm kalınlığında ki saclar ise hasara uğrayacaktır çünkü asal genleme değerleri hasar bölgesine girmiştir. Hasar eğrisine yaklaşan noktaların kalınlığı %20 veya daha fazla oranda incelen bölgeye karşılık gelmektedir. ŞSD'ye göre, hasar sac kalınlığının en çok incelendiği bölge üzerinde gerçekleşmiştir. 0,4 mm sacda 0,5 mm saca göre daha fazla hasar meydana gelecektir.



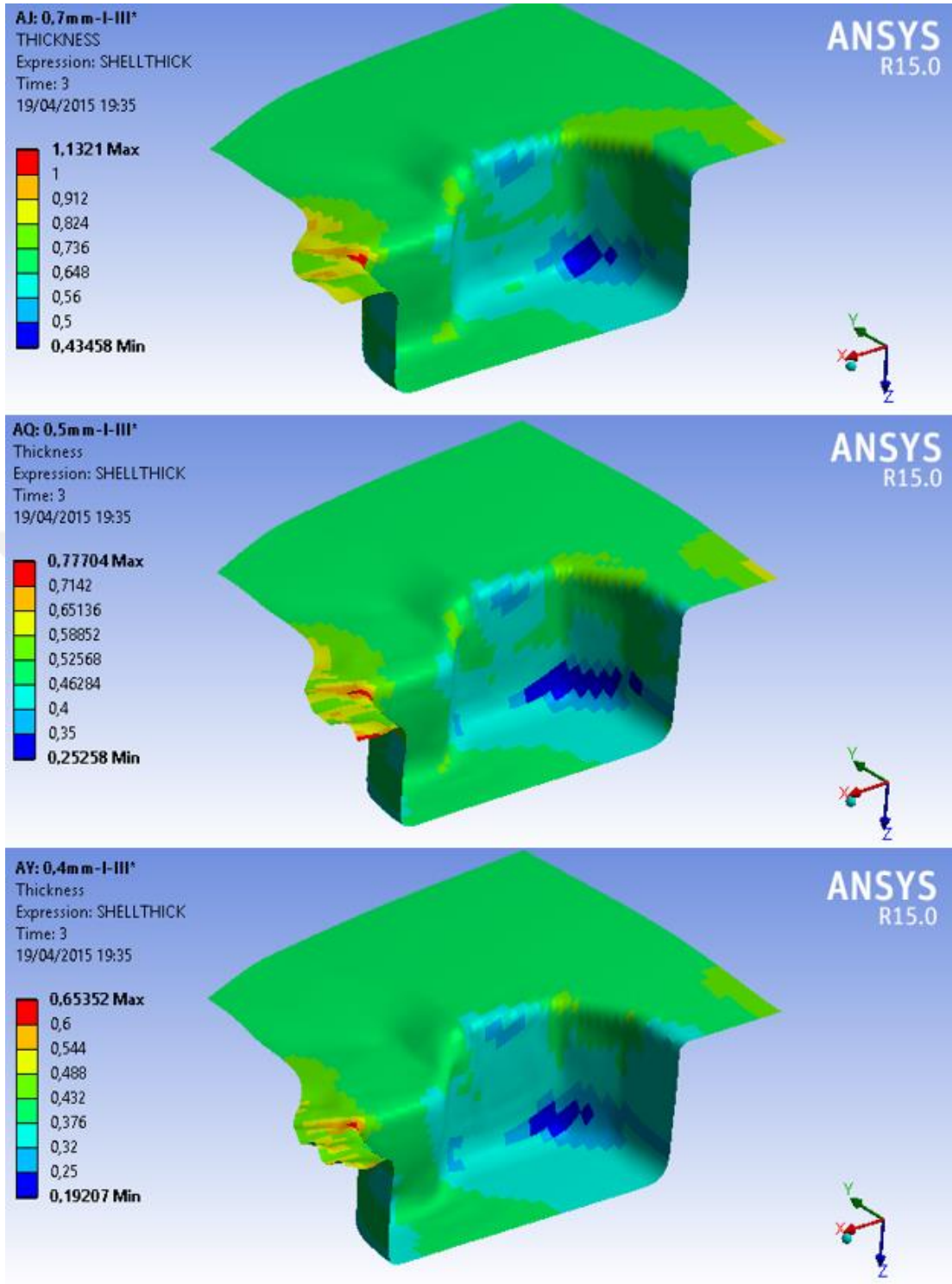
Şekil 5.54 : 0,4 mm sac kalınlığı I-II-III derin çekme işlemi için ŞSD.

0,7 mm kalınlığındaki sac metal için, gerçek birim şekil değiştirme değerlerinin hasar eğrisinden daha uzakta olması beklenen bir durumdur. Çünkü sacın daha kalın olması hem incelmeye karşı daha fazla direnç gösterir hemde sac düzleminde diğer ince saclara nazaran daha az gerilme taşıyacaktır. Özellikle 0,7 mm sac ile analiz yapılmasının nedeni de öngörülen sonuçların bir nevi ispatını elde etmektir.

5.4.2.3 I. III. Derin çekme

Analizler sonucunda I-III derin çekme işlemlerinde oluşan kalınlık değişimleri Şekil 5.55’de verilmiştir.

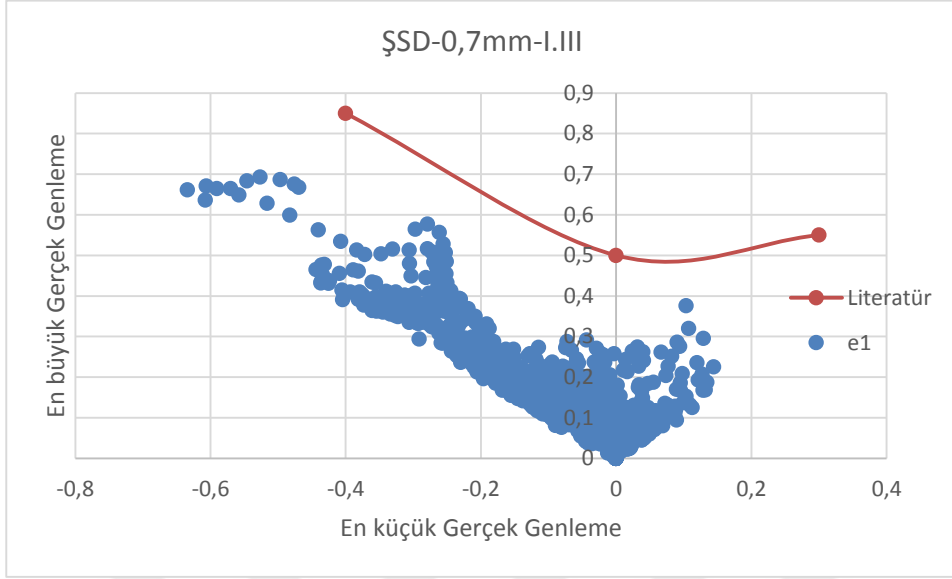
I.’den III. baskıya geçiş sonrasında sac kalınlığı 0,7 mm sac için 1,1321 mm’ye yükselmiştir ve 0,43458 mm’ye kadar düşmüştür. I. II. III. derin çekme işlemi için sac kalınlığında yaklaşık olarak %38’lik bir incelmeye meydana gelmiştir. 0,5 mm sac için kalınlık 0,77704 mm’ye yükselmiştir ve 0,25258 mm’ye kadar düşmüştür. Sac kalınlığında bu işlem için yaklaşık olarak %50’lik bir incelmeye meydana gelmiştir. 0,4 mm sac kalınlığı ise 0,65352 mm’ye yükselmiş olup 0,19207 mm’ye kadar düşmüştür. Bu işlemde ise sac kalınlığında yaklaşık olarak %52’lik bir incelmeye meydana gelmiştir.



Şekil 5.55 : 0,7, 0,5, 0,4 sac kalınlıkları için I-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlık değişimleri

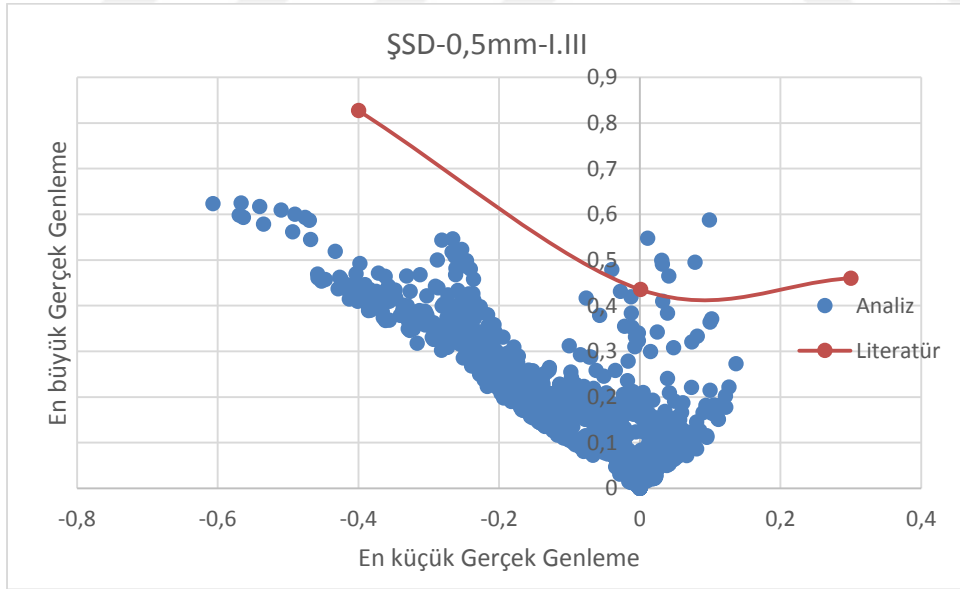
I. II. III derin çekme analizine göre, bu analizde sacda daha fazla incelme meydana gelmiştir. Lacivert ve mavi renkli elemanlar, sac kalınlığının %20 ve daha fazla incelmenin meydana geldiği bölgeleri göstermekte ve sac üzerinde en kritik bölgeler olduğunu temsil etmektedir.

Şekil 5.56, 5.57, 5.58 'de I. II. III. derin çekme işlemi için elde edilen ŞSD'ler verilmiştir.



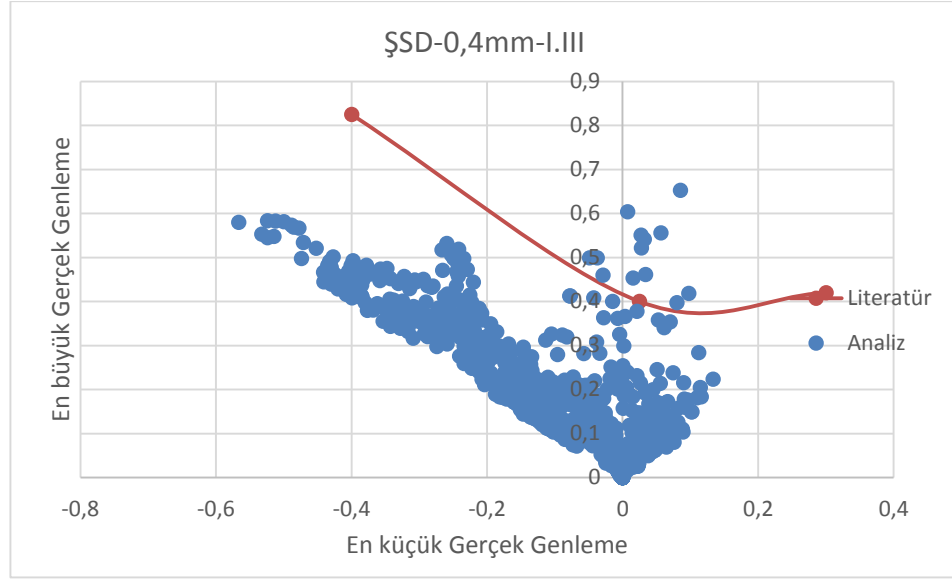
Şekil 5.56 : 0,7 mm sac kalınlığı I-III derin çekme işlemi için ŞSD

0,7 mm kalınlığında ki sac için en büyük ve en küçük genleme noktaları şekillendirme sınırı eğrisini altında kaldığından işlem sonrası iş parçasında hasar meydana gelmeyecektir.



Şekil 5.57 : 0,5 mm sac kalınlığı I-III derin çekme işlemi için ŞSD

0,5 ve 0,4 mm kalınlığında ki sac lar ise hasara uğrayacaktır çünkü asal genleme değerleri hasar bölgesi içerisine girmiştir.



Şekil 5.58 : 0,4 mm sac kalınlığı I-III derin çekme işlemi için ŞSD

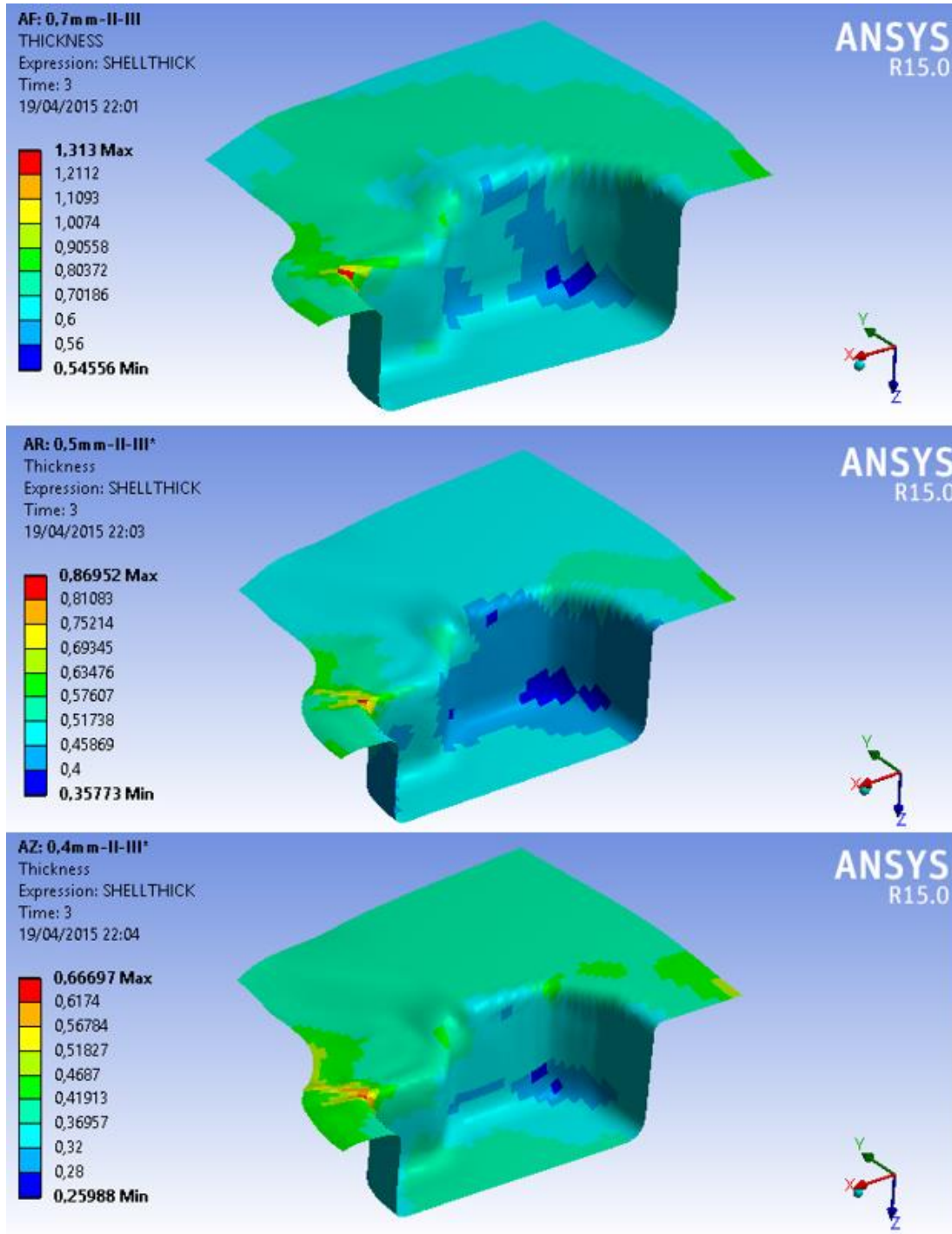
Hasar eğrisine yaklaşan noktaların kalınlığı %20 veya daha fazla oranda incelen bölgeye karşılık gelmektedir. ŞSD'ye göre, hasar sac kalınlığının en çok incelendiği bölge üzerinde gerçekleşmiştir. Diyagrama göre, 0,4 mm sacda daha fazla nokta hasar bölgesi içerisinde ve 0,5 mm saca göre daha fazla hasar meydana gelecektir.

Bu sonuca göre, I.'den III. derin çekme işlemine sac kalınlığını azaltarak geçiş yapmak yırtılmalara sebep olmaktadır.

5.4.2.4 II.III. Derin çekme

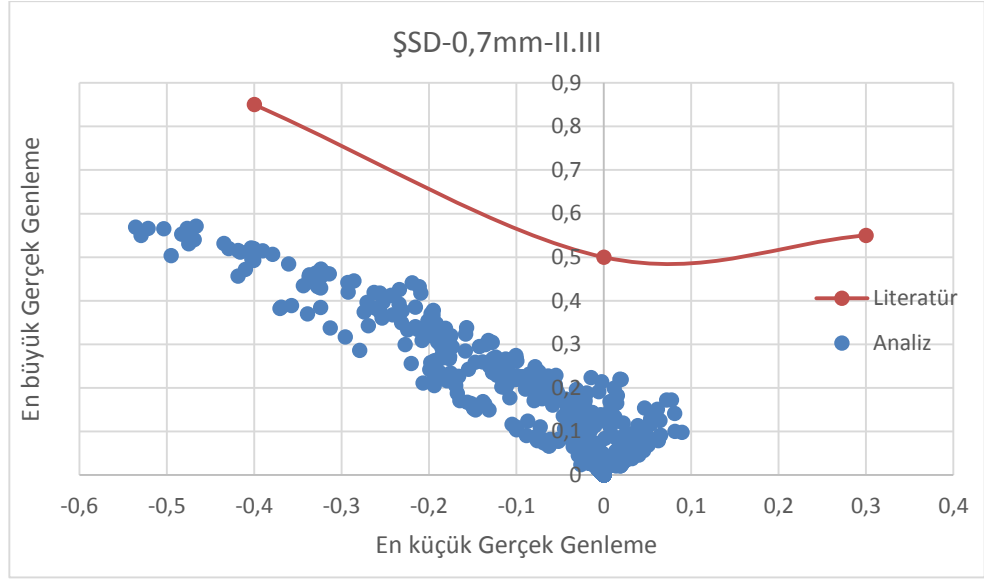
Şekil 5.59'da II.'den III. derin çekme işlemine doğrudan geçişte oluşan kalınlık değişiminin analiz sonucu verilmiştir.

Sac kalınlığı 0,7 mm sac için 1,313 mm'ye yükselmiştir ve 0,54556 mm'ye kadar düşmüştür. I. II. III. derin çekme işlemi için sac kalınlığında yaklaşık olarak %22 oranında bir incelme meydana gelmiştir. 0,5 mm sac için kalınlık 0,86952 mm'ye yükselmiştir ve 0,35773 mm'ye kadar düşmüştür. Sac kalınlığında bu işlem için yaklaşık olarak %29 oranında bir incelme meydana gelmiştir. 0,4 mm sac kalınlığı ise 0,66697 mm'ye yükselmiş olup 0,25988 mm'ye kadar düşmüştür. Bu işlemde ise sac kalınlığında yaklaşık olarak %35 oranında bir incelme meydana gelmiştir. Şekil 5.63'de kalınlık analizi sonuçları gösterilmiştir.



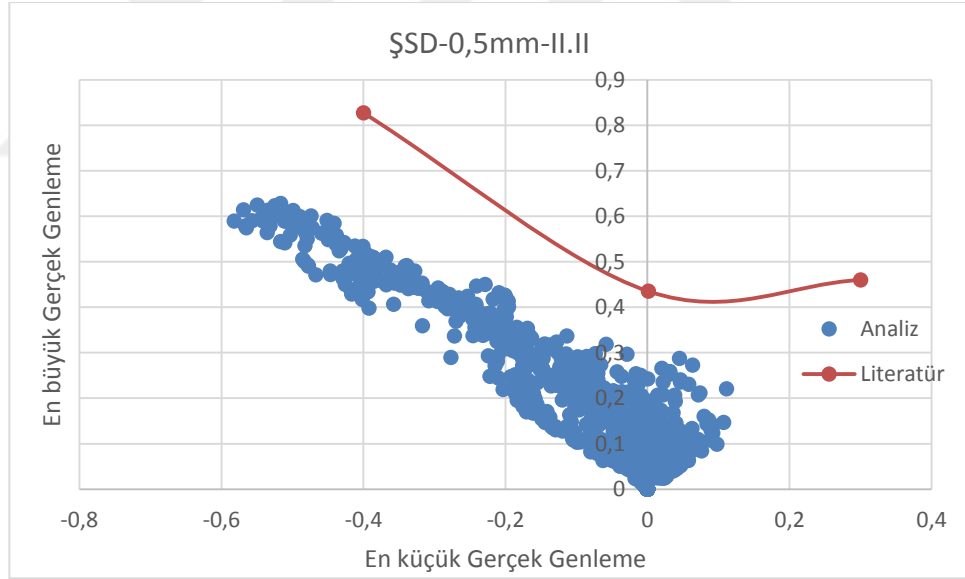
Şekil 5.59 : 0,7; 0,5; 0,4 mm sac için II-III derin çekme analizinde elde edilen parça kalınlıkları

II'den III. derin çekme işlemine geçişte, her sac kalınlığında daha az incelme olduğu sonucu elde edilmiştir. Sacın daha az incelmesi daha güvenli bir bölgede şekil aldığını göstermektedir. Devam eden şekillerde ise ŞSD'ler çizilmiştir.



Şekil 5.60 : 0,7mm sac kalınlığı II-III derin çekme işlemi için ŞSD

0,7 mm kalınlığında ki sac için en büyük ve en küçük genleme noktaları şekillendirme sınırı eğrisini altında kaldığından işlem sonrası iş parçasında hasar meydana gelmeyecektir.

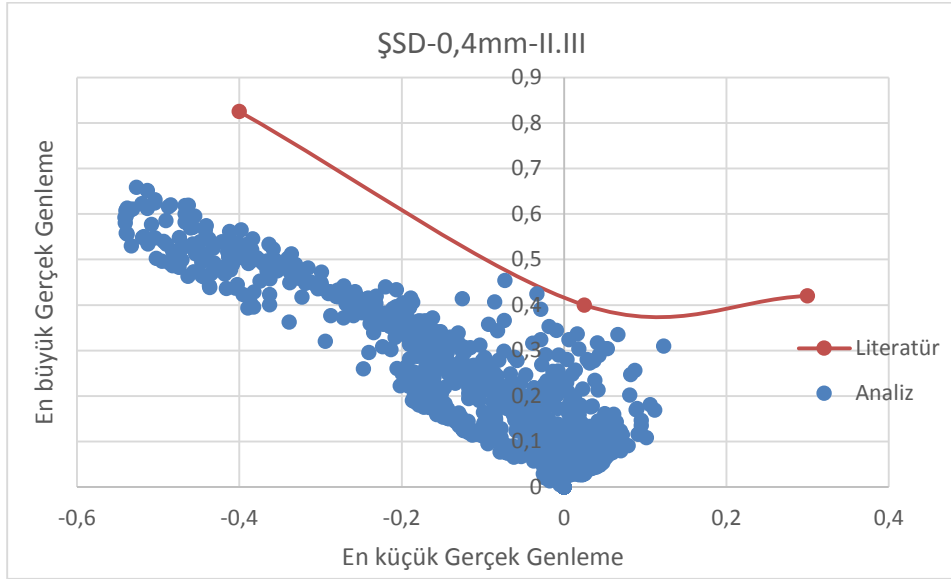


Şekil 5.61 : 0,5 mm sac kalınlığı II-III derin çekme işlemi için ŞSD

0,5 mm kalınlığında ki sac parçada diyagrama göre hasar meydana gelmeyeceği anlaşılmaktadır. Çünkü en büyük ve en küçük genlemeler hasar bölgesinden oldukça uzak bölgede yer almıştır. Buna göre, sac kalınlığı II.'den III. operasyona geçişlerde ancak azaltılabilmektedir.

0,4 mm kalınlığında ki sac ise hasar eğrisi üzerinde yer almış bir noktaya sahiptir. Bu noktalar sınır boyun verme çizgisini aşır hasar eğrisi sınırına yaklaşmışlardır. Yani,

sacın en çok incelendiği bölgeyi temsil etmektedir ve bu alanda sac şekillendirme işlemlerine bulunmak oldukça kritik ve tehlikeli bir hal alabilmektedir.



Şekil 5.62 : 0,4 mm sac kalınlığı II-III derin çekme işlemi için ŞSD

Sac malzemedeki karbon dağılımlarının ve yağlamanın değişkenlik göstereceği bir derin çekme işleminde hasar eğrisi üzerinde çalışmak iş parçasında hasar meydana gelmesinde kaçınılmaz bir hal alacaktır.

5.4.2.5 0,7 , 0,5 ve 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analizinin değerlendirilmesi

Tezin bu bölümünde 0,7; 0,5; 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analizi kalınlık ve ŞSD kapsamında değerlendirilmiştir. Analizde bütün çözümler çözüm koordinatlarında, x, y ve xy eksenlerinde birim şekil değiştirme ve kalınlık sonuçları alınmıştır. Literatürden bu kalınlıklar için şekillendirme sınırı diyagramları bulunarak, hesaplanan değerler ile beraber çizilmiştir.

Öncelikle, ilk derin çekme işlemi her bir sac kalınlığı için incelenmiştir. Görülmüştür ki, 0,6 mm sac kalınlığı ile oldukça benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Üç farklı sac kalınlığında ki saclar da hasar eğrisine uzak bir davranış göstermiştir ve bu işlem esnasında herhangi bir hasar meydana gelmeyeceği anlaşılmaktadır.

Daha sonra, progresif kalıp makinesinde 3 işlemde basılan operasyonlar incelenmiştir. Sac kalınlıklarının ilk ve son duruma göre değişim değerleri çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.6 ve yapılan analizlerden, tek bir derin çekme işleminde, daha küçük zımba eğrilik yarıçapı yerine daha büyük zımba eğrilik yarıçapı ile derin çekme yapıldığında sac kalınlığının daha az incelendiği sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 5.6 : 0,7; 0,5; 0,4 mm sac kalınlığı için derin çekme analizleri özet tablosu

Operasyon	t_0 (mm)	t_{min} (mm)	dt (%)	Hasar Durumu
I	0,7	0,58706	16,13	Yok
I-II-III		0,46793	33,15	Yok
I-III		0,43458	37,92	Yok
II		0,56121	19,83	Yok
II-III		0,54556	22,06	Yok
Operasyon	t_0 (mm)	t_{min} (mm)	dt (%)	Hasar Durumu
I	0,5	0,41631	16,74	Yok
I-II-III		0,29318	41,36	Var
I-III		0,25258	49,48	Var
II		0,37631	24,74	Yok
II-III		0,35773	28,45	Yok
Operasyon	t_0 (mm)	t_{min} (mm)	dt (%)	Hasar Durumu
I	0,4	0,31801	20,50	Yok
I-II-III		0,22263	44,34	Var
I-III		0,19207	51,98	Var
II		0,27402	31,50	Yok
II-III		0,25988	35,03	Var

I. derin çekme işleminde zımba eğrilik yarıçapı sabit ve 3,5 mm, II. derin çekme işleminde zımba eğrilik yarıçapı sabit ve 2 mm dir. Dolayısıyla, tek seferde ikinci derin çekme kalıpları ile derin çekme yapıldığında sac kalınlığı daha çok incelmıştır. III. derin çekme işleminde zımba eğrilik yarıçapı değişken ve 2 mm'den 1 mm'ye doğru azalmaktadır. II. derin çekme işleminde kullanılan zımba eğrilik yarıçapı III. derin çekme işleminde kullanılan zımba eğrilik yarıçapına ölçü ve geometrik olarak daha yakın olduğundan, II'den III'e geçişlerde sac kalınlığı I'den III'e geçişlere nazaran daha az incelmıştır.

Makine ve kalıplarda herhangi birdeğişiklik yapılmadan, sac kalınlıkları değiştirilirse nasıl sonuçlar alınacağı üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar 0,7 mm sac kalınlığı için herhangi bir deformasyon olmayacağını göstermiştir. 0,6 mm sac kalınlığı ŞSD'si ile karşılaştırıldığında, 0,7 mm sacın gerçek birim şekil değiştirme genlemeleri eğrinin daha çok aşağısında kalmış, yani hasar bölgesinden uzaklaşmıştır.

Ayrıca, ŞSD’de sac kalınlığı arttıkça sınır eğriside yukarıya çıkmaktadır ve burda eğri yukarı yönde ilerlerken noktalar 0,6 mm saca göre aşağıya doğru yani hasar bölgesinden uzaklaşma yönünde eğilim göstermiştir. Bu, beklenen bir durumdur ve sonuçlar arasında ki uyumluluğu göstermektedir. Derin çekme işleminin 0,7 mm sac kalınlığında hem üç işlemli hemde iki işlemli derin çekme işlemlerinin hiç birinde sac da hasar meydana gelmeyeceğini göstermiştir. Sonuç olarak 0,7 mm sac kalınlığı kullanmak ile, 0,6mm sac kalınlığı kullanmak arasında herhangi bir fark olmadığı ve 0,7 mm yerine 0,6 mm kullanılabileceği (ki gerçek durumda da 0,6 mm kullanılıyor) anlaşılmaktadır.

0,5 mm sac kalınlığında ki analiz sonuçları I. II. III. derin çekme işleminin uygulanması halinde prosesin hasar bölgesi içerisinde yer aldığını göstermektedir. I.’den III. derin çekme işlemine geçişte, genleme noktalarının hasar eğrisini geçtiği görülmektedir. Üç baskıda elde edilen derin çekme işlemine göre daha çok nokta hasar eğrisini geçmiştir. Buda daha çok hasarın meydana geleceğini göstermektedir. Yalnız, II.’den III. derin çekme işlemine geçişte sacın hasar görmeyeceği sonucu ortaya çıkmıştır. Çünkü en az sac incilmesi bu operasyon da oluşacağı görülmüştür (Çizelge 5.6).

0,4 mm kalınlığında ki sac ise, tüm derin çekme işlemleri sonucunda hasara uğrayacağı, ne 3 işlemde ne de 2 işlemde derin çekilmesinin hasara uğramasını engellemeyeceği görülmüştür.

Mevcut progresif kalıp makinesinde, sürtünme ve pot çemberi kuvvetinde değişiklik yapılmayacağından, hasarın engellenebilmesi için ancak derin çekme yüksekliğinin azaltılması gerekmektedir.

Bu analizlerin sonucu olarak, sac kalınlığı inceltmesinin yapılabileceği ancak II.’den III. operasyona geçişte uygun olacağı ortaya çıkmıştır. Sac kalınlığı inceltme çalışmaları bir çok endüstride yapılan malzeme ucuzlatma çalışmalarından birisidir. Bir ayda, 15 milyon adet basılan bu parça için çok büyük bir kâr getireceği aşîkardır. Ayrıca bir operasyon azaltarak da, yıllık kalıp tadilat ve bakım masrafının da önüne geçilebilecektir

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Genel Sonuçlar

Progresif kalıp makinesinden 11 işlemde çıkan bir DC04 sac metal parçanın genel geometrik formunu oluşturan 3 derin çekme işlemi üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile analiz çalışmaları yapılmıştır. Parçanın güvenilir bir şekilde 11 operasyonu yapabilmesi için, derin çekme baskılarından başarılı ve hasarsız bir şekilde ayrılması gerekmektedir. Parça ard arda 3 derin çekme işlemine maruz kalmakta ve üçüncü derin çekme ile parça genel geometrisi oluşmaktadır.

Sacın mekanik özelliklerinin tayini için üç yönde çekme deneyi yapılmıştır. Malzemenin üç yöndeki elastik ve plastik pekleşme özelliklerinin biririne çok yakın olduğu gözlemlenmiş, analiz çalışmalarında plastik bölge için izotropik pekleşme modeli tercih edilmiştir. Ortalama normal anizotropi katsayısı 1'den büyük çıkmıştır ve malzemenin kalınlık yönünde daha dirençli olacağını göstermiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, sac kalınlıklarının neredeyse birebir gerçek deney numunesi ile bağdaştığı görülmektedir. Bu bağdaşma analizin gerçek deney şartları ile uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sacın rulodan kesimi sonrası, 20 deney numunesinin uzunluğu, genişliği ölçülmüş ve ortalamaları alınıp 3B modelde parçaya atanmıştır. Daha sonra I. derin çekme deney numunesinin uzunluk, genişlik, derinlik ve çeşitli kesitlerde kalınlıkları ölçülmüştür. Burada ölçülen ortalama derinlik analiz girdisi olarak kullanılmıştır. Buna göre zımbanın kalıp içerisin de ne kadar ilerleyeceği analiz sınır koşulu olarak verilmiştir. Gerçek deney koşullarında bilinmeyenler olan sürtünme katsayıları ve pot çemberi kuvvetini bulabilmek için, literatür değerleri başlangıç değerler olarak kullanılmıştır. Gerçek deney numunesinin uzunluk, genişlik, derinlik ve kalınlıkları yaklaşık değerlere varıncaya dek, bilinmeyenler değiştirilerek 300'e varan analiz sonucunda deney ve analiz sonuçları birbiri ile bağdaştırılmıştır.

Daha sonra, üç derin çekme işleminin (I. II. III.) analizleri yapılmıştır. Parçanın literatürden şekillendirme sınırı diyagramı elde edilip, bu diyagram üzerinde analizde

elde edilen en büyük ve en küçük genlemeler çizdirilmiştir ve diyagrama göre parçanın hasara uğramadığı sonucu elde edilmiştir ki gerçek deney parçasında da durum böyledir. Aynı işlemler, doğrudan II'den III'e ve doğrudan I'den III'e geçişler içinde tekrar edilmiştir. ŞSD'ye göre baskı azaltma işlemi yapılırsa dahi parçanın hasara uğramayacağı, ancak I'den III'e geçişte sacın yerel olarak daha fazla inceleyeceği, II'den III'e geçişte ise daha az inceleyeceği sonucu elde edilmiştir. Dolayısıyla, 0,6 mm sac kalınlığı için derin çekme işlemi iki aşamalı olarakta güvenli bir şekilde yapılabilecektir.

Daha sonra, sac inceltilebilirlik çalışmaları ve bununla beraber baskı sayısının yine azaltılabilirliği için analiz çalışmaları yapılmıştır. Burada, sac kalınlığı 0,5 mm için üç aşamalı olan I. II. III. ve iki aşamalı olan I. III. - II. III. derin çekme analizleri yapılmış ve ŞSD'ler oluşturulmuştur. Diyagramlar, doğrudan II'den III'e geçişte sac kalınlığının inceltilebileceği sonucunu ortaya koymuştur.

0,4 mm sac için ise, tüm işlemlerde sacda hasar meydana geleceği sonucu ortaya çıkmıştır.

Yapılan analiz çalışmaları daha büyük zımba eğilim yarıçapından sonra, daha küçük zımba eğrilik yarıçapı ile işleme devam etmenin sacı daha çok inceltebildiğini göstermiştir. Tek adımda derin çekme işeminde zımba eğilim yarıçapı arttıkça, sac kalınlığının daha az incelendiği sonucu elde edilmiştir. Ancak aynı durum çok adımlı derin çekme işlemleri için geçerli değildir. İlk zımba eğilim yarıçapı büyükse ve ondan sonraki adımda zımba eğilim yarıçapı daha küçükse, ya da keskin ise, sacda daha fazla inceltme meydana gelecek ve daha fazla hasara yatkınlık ortaya çıkacaktır.

6.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile, DC04 malzemesinin derin çekme sonucunda kalınlık inceltmesine bağlı olarak güvenli bölgede kalacağı veya kırılmaya uğrayacağı bir aralık belirlenebilir. Şekillendirme sınırı diyagramları deneysel olarak elde edilerek, kalınlık inceltmesine bağlı oluşacak kırılmalar için bir kütüphane oluşturulabilir. Farklı derin çekme yüksekliklerinde deney ve analizler tekrarlanarak, sac malzemenin buna bağlı çalışacağı hasar ve güvenli bölgeler oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tisza, M. ve Kovács, Z. P. (2012). New Methods for Predictions The Formability of Sheet Metals, Production Processes and Systems, Volume 5. No. 1. pp. 45-54
- [2] Anket, O. (2011). DC04 otomotiv sacının hidromekanik yöntem ile şekillendirilebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel olarak incelenmesi. Doktora tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim dalı, Balıkesir.
- [3] Faris, S. T. (2009). Study of the stress and strain distribution during deep drawing and ironing process of metals with a circular profiled die, vol. 02 no.2. pp. 80-95.
- [4] Zhang, L. ve Wang, J. (2012). Modeling the localized necking in anisotropic sheet metals, International Journal of Plasticity 39 (2012) 103–118.
- [5] Gök, A., Demirci, H. İ., Gök, K. (2009). Sonlu elemanlar metodunun gerçek bir sanayi parçası üzerinde uygulanması. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- [6] Anket, O., Koruvatan T., Ay, İ. (2011). Sac malzemelerin şekillendirilmesinde şekillendirme Sınırı diyagramlarının kullanımı. Politeknik dergisi, Cilt:14 Sayı: 1 s. 39-47.
- [7] Banabic, D. H., Bunge, J., Pöhlandt, K., Tekkaya, A. E. (2000). Formability of Metallic Materials. Springer, Berlin, p.122.
- [8] Gavas, M., Küçükrendeci, L. (2004). Alüminyum kare kabın derin çekilmesinde taslak malzeme şekillerinin değerlendirilmesi. DPU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6-185.
- [9] Karalı, M. (2004). Silindirik kapların derin çekilmesinde farklı baskı plakası kuvvetlerinin ve uygulama yöntemlerinin kulaklaşmaya olan etkilerinin incelenmesi”, Trakya Üniv. J. Sci., 9-41.
- [10] Karalı, M. (2006). Silindirik derin çekme prosesinde zımba uç formunun cidar kalınlık dağılımına etkisinin SEY yöntemiyle incelenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik, 4-53.
- [11] Özçelik, G. (2008). Derin çekme prosesinin simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- [12] Siegert, K., Wagner, S. (1994). "Deep drawing", TALAT Lecture 3704, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart.
- [13] Gürün, H. (2008). Derin çekme kalıplarında parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini”, Doktora Tezi, Gazi Ü. Fen Bil. Ens., Ankara.
- [14] Özek, C. ve Bal, M. (2009). Derin çekme kalıplarında matris-zımba radyüsü ve çekme oranının et kalınlığına etkisi. Gazi Ü. Müh.Mim.Fak.Dergisi, 24-33.
- [15] Yang, L., Mori, K., Tsuji, H. (2008). Deformation behaviour of magnesium alloy AZ31 sheet in cold deep drawing. Trans.Nonferrous Met.Soc.China, 18- 86.
- [16] Kojima, Y., Kamado, S., Sakai, T., Itoh, S., Hai, V. (2008). Experimentally and Numerical Study on Deep Drawing Process for Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperatures. Materials Transactions, Vol. 49, No. 5 pp. 1101 to 1106

- [17] **Hariharan, K., Balaji C.** (2009). Material optimization:a case study using sheet metalforming analysis. *Journal Of Materials Processing Technology*, 209- 324.
- [18] **Kang, B. S., Son, B. M., Kim, J.** (2004). A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44- 87.
- [19] **Önder, E., Tekkaya, A. E.** (2008). Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48- 532.
- [20] **Lang, L., Li, T., Zhou, X., Kristensen, B.E., Danckert, J., Nielsen, K.B.** (2006). Optimized decision of the exact material modes in the simulation for the innovative sheet hydroforming method", *Journal of Materials Processing Technology*, 177- 692.
- [21] **Khandeparkar, T., Liewald, M.** (2008). Hydromechanical deep darwing of cups with stepped geometries. *Journal of Material Processing Technology*, 202- 246.
- [22] **Chino, Y., Iwasaki, H., Mabuchi, M.** (2007). Stretch formability of AZ31 alloy sheets atdifferent testing temperatures. *Materials Science and Engineering, A* 406- 90.
- [23] **Narayanasamy R., Narayanan C. S.** (2007). Forming limit diagram for interstitial free steels supplied by Ford India Motors", *Materials and Design*, 28- 16.
- [24] **Yıldız, H. ve Kırılı O.** (2004). Derin çekme prosesinin doğrusal olamayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi. *Pamukkale Üni. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10- 317.
- [25] **Çetin, M. S.** (2007). Derin çekme ile soğuk şekillendirmenin sonlu elemanlar metodu yardımıyla analizi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.
- [26] **Karaağaç, İ., Gürün, H., Özdemir, A.** (2009). AISI 304 Paslanmaz çelik sac malzemenin klasik olarak ve sıvı basıncıyla derin çekilebilirliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmalı analizi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- [27] **Hanggi, P.** (2007). Determination of process limitations in sheet metal, *Univercity of Erlangen-Nürnberg, Chair of Manufacturing Technology*
- [28] **Narayanasamy, R., Narayanan, C. S.** (2006). Forming, fracture and wrinkling limit diagram for if steel sheets of different thicness. *Materials and Design*, 29- 1467.
- [29] **Galanulis, K.** (2008). Optical measuring technologies in sheet metal processing, *GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, Mittelweg 7,*
- [30] **Url-1** < http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf >, alındığı tarih: 15.03.2015.
- [31] **Kayalı, E. S. ve Ensari, C.** (2000). *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*. İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya – Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [32] **Gülmez, T.** (2013) İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İmal usulleri ders notu, bölüm 6.
- [33] **Erişir, E.** (2013). Kocaeli Üniversitesi Metalürji ve Malzeme mühendisliği Bölümü, Plastik şekillendirme Yöntemleri Ders notu, Bölüm 4.

- [34] **Şener, B. (2012).** Otomotive sektöründe kullanılan derin çekme saclarının şekillendirilebilirliğinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [35] **Metal Forming Handbook.** (1998). Schuler, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [36] **Kalpajian, S. (2003).** Manufacturing Processes for Engineering Materials, 4th. Edition, Chapter 7, Upper Saddle River N.J.
- [37] **Dieter, G. E. (1988).** Mechanical Metallurgy, Chapter 20 Sheet – Metal Forming, McGraw – Hill Book Company, New York.
- [38] **Suchy, I. (2006).** Handbook of die design, McGraw-Hill.
- [39] **ASM Handbook.** (1988). Forming and Forging Volume 14, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [40] **Aran, A. (2008).** Malzeme Bilgisi Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul
- [41] **Url-2**
<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=17&Pageid=2144416737>>, alındığı tarih: 20.03.2015.
- [42] **Andersson, R. (2005).** Deformation characteristics of stainless steels. Doctoral Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- [43] **Meriç, C., Köksal, S. (1997).** An investigation of deep drawig of low carbon steel sheets and applications in artificial neural Networks. Mathematical&Computational Applications, 2- 119.
- [44] **Demirci, A. H. (2004).** Malzeme bilgisi ve malzeme muayenesi-seçilmiş temel kavramlar ve endüstriyel uygulamalar”, Alfa kitabevi, İstanbul.
- [45] **Kayalı, S., Ensari, C. (1986).** Metallerde plastik şekil verme ilke ve uygulamaları. İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- [46] **Öztürk, F., Toros, S., Esener, E. ve Uysal, E. (2009).** Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 11. Otomotiv Sempozyumu, 8 -9 Mayıs Bursa.
- [47] **Baydoğan, M. ve Kayalı, E. S. (2012).** İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Malzemenin Mekanik Özellikleri Ders Notu.
- [48] **ASM Handbook.** (1988). Mechanical Testing and Evaluation Volume 8, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [49] **Erdoğan M. (1998).** Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [50] **Narasamy, R., Parthasarathi, N.L., Narayanan, C., Venugopal, T., Pradhan, H.T. (2008).** A study on fracture behaviour of three high strength low alloy steel sheets during formation with different strain rations”, Materials and Design, 29- 1868.
- [51] **Ay İ. (2010).** Gerçek gerilme gerçek uzama eğrileri için yaklaşık denklemler. Balıkesir Ü., Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmalat yöntemleri II ders notları.
- [52] **Meriç, C., Köksal, S., Karlık. (1997).** An investigation of deep drawig of low carbon steel sheets and applications in artificial neural Networks. Mathematical&Computational Applications, 2-119.

- [53] **Andersson R.** (2005). Deformation characteristics of stainless steels. Doctoral Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- [54] **Narayanasamy, R., Satheesh, J. Narayanan, S.** (2008). Effect Of Annealing on combined forming, fracture and wrinkling limit diagram of Aluminium 5086 alloy sheets. *Int.J. Mech. Des.*31.
- [55] **Akbarpour M.R., Ekrami A.** (2008). Effect of ferrite volume on work hardening behavior of high bainite dual phase (dp) steels. *Materials Science and Engineering, A* 477-306.
- [56] **Aslantas K.** (2007). Plastik şekil verme-I. Afyon Kocatepe Ü. Fen Bil.Ens., Üretim Yöntemleri I ders notları.
- [57] **Narayanasamy, R., Narayanan, S., Parthasarathi, N.L.** (2007). Some analysis on stres and strain limit for necking and fracture during forming of HSLA steel sheets. *Materials Science and Engineering, A* 445-446-427.
- [58] **Çapan L.** (2007). Metallerde pekleşme üstelinin hesaplanması ve sünekliği etkisi. *Metal Dünyası*.
- [59] **Atmaca, A.** (2006). Çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriksli kompozit plakaların elastoplastik gerilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [60] **Mielnik, E. M.** (1991). *Metalworking Science and Engineering*, McGraw –Hill Book Company, New York.
- [61] **Altan, T. ve Tekkaya, A. E.** (2012). *Sheet Metal Forming Fundamentals*, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [62] **Tikhovskiy, I., Raabe, D. ve Roters, F.** (2008). Simulation of a 17% Cr Stainless Steel Considering Texture Gradients. *Materials Science and Engineering, A*488, 482 – 490.
- [63] **Joshi, A. M.** (2007). Strain studies in sheet metal stamping. B.E Mechanical, A.M.I.
- [64] **Prod, E.** (2007). Svensson, C. (2004). The influence of sheet thickness on the forming limit curve for austenitic stainless steel. Examensarbete, Örebro Ü. Department of technology, Örebro, Sweden.
- [65] **Duddeck, F.** (2007). 9-material models, Department Of Engineering Queen Mary College, London University, London, UK.
- [66] **Erişir, E.** (2013) Kocaeli Üniversitesi Metalürji ve Malzeme mühendisliği Bölümü, Plastik şekillendirme Yöntemleri Ders notu, Bölüm 2.
- [67] **Çınar, G.** (2006). Effect of Anisotropy on Formability in Sheet Metal Forming, Master Thesis, Istanbul Technical University Institute of Science and Technology, İstanbul, 2006.
- [68] **Suchy, I.** (2006). *Handbook of die design*, McGraw-Hill, (2006).
- [69] **Gürün, H.** (2008). Derin çekme kalıplarında parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini”, Doktora Tezi, Gazi Ü. Fen Bil. Ens., Ankara.
- [70] **Ergun, C.** (2014). İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Malzeme Bilimi Ders notu, Bölüm 4.
- [71] **Özer, F.** (2011) .Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yaylanmanın doğru tahmini ve

- telafisi. Yüksek lisans tezi, Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi. Fen Bil. Ens., Ankara.
- [72] **Sadd, M.** (2014). Elasticity, Third Edition: Theory, Applications, and Numerics
- [73] **Gedikli, H.** (2005). İnce düz kabuk elemanların artırılmış sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Tek. Uni., Fen Bil. Ens., Trabzon, (2005).
- [74] **Meek, J.L.** (1991). Computer methods in structural analysis. Fong&Sons printers pte.Ltd, First edition, USA.
- [75] **Uymaz B.** (2008). Fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen plakların üç boyutlu serbest titreşim analizi. Doktora Tezi, Trakya. Uni., Fen Bil. Ens., Edirne.
- [76] **Ragai, I.** (2006). Experimental and finite element investigation of springback of aerospace/automotive sheet metal products, Doktora Tezi, McGill University, Montreal.
- [77] **Tang, B., Lu, X., Wang, Z., Zhao, Z.** (2010). Springback investigation of anisotropic aluminum alloy sheet with a mixed hardening rule and Barlat yield criteria in sheet metal forming, Materials and Design 31, 2043–2050.
- [78] **Metalik Malzemelerin Çekme Deneyi Standardı**, (Ocak 2010). TS EN ISO 6892-1 Ek:B.
- [79] **Erdemir Ürün Kataloğu**, (2014).
- [80] **Narayanasamy, R. ve Narayanan, S.** (2006). Some aspects on fracture limit diagram developed for different steel sheets, Materials Science and Engineering, A 417-197.
- [81] **Wu, H.Y., Zhou, G.Z., Gao, Z.W., Chiu, C.H.** (2008). Mechanical properties and formability of an Mg-6%Li-1%Zn alloy thin sheet at elevated temperatures”, Journal of Materials Processing Technology, 206-419.
- [82] **Zhang, S.H., Wang, Z.R, Xu, Y., Wang, Z.T, Zhou, L.X.** (2004). Recent developments in sheet hydroforming technology. Journal of Materials Processing Technology, 151-237.
- [83] **Bedir, F., Durak, E., Delikanlı, K.** (2006). Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde uygulanabilirliği ve mekanik özellikleri. Mühendis ve Makine Dergisi, 47-37.
- [84] **Url-3**
[http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201MekanikOzelliklerSur me\(4\).pdf](http://web.itu.edu.tr/~dikicioglu/WEBMAL201/Mal201MekanikOzelliklerSurme(4).pdf), alındığı tarih: 10.04.2015
- [85] **Url-4**
<http://www.amesweb.info/StressStrainTransformations/PlaneStrainPrincipalStrains/PlaneStrainPrincipalStrains.aspx>, alındığı tarih: 12.04.2015
- [86] **Dachang, K., Yu C., Yongchao, X.** (2005). Hydromechanical deep drawing of superalloy cups. Journal of Materials Processing Technology, 166-243.
- [87] **Ay, İ.** (2015) İmalat Yöntemleri II Ders Notları. Alındığı tarih: 21.03.2015, adres: <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/iy2/lecture13.pdf>.
- [88] **Çapan, L.** (2003). Metallere Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [89] **Doğu, M.** (2014). Çamaşır makinesi imalatında kullanılan çelik sacların şekil alma kabiliyetlerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Anabilim Dalı, İstanbul.



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ufuk Doğan
Doğum Yeri ve Tarihi : Beyoğlu, 18.09.1987
E-Posta : dufuk@msn.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Yeditepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yapısal tasarım ve analiz uzmanı. Yeditepe Üniversitesi Onur Ödülüne ve 5 patentlenmiş tasarıma sahiptir.