

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRA DERİN ÇEKME ÇELİĞİNİN
ŞEKİLLENDİREBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Muhammed Ali Şahin

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Ekim, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRA DERİN ÇEKME ÇELİĞİNİN
ŞEKİLLENDİREBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Muhammed Ali ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 20.10.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Vedat TAŞKIN, Üye
Trakya Üniversitesi

Dr.Öğr. Üye. Bora ŞENER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Ekstra Derin Çekme Çeliğinin Şekillendirebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Ali ŞAHİN

İmza



*Aileme
ve
biricik nişanlıma*

TEŞEKKÜR

Bu bitirme çalışmamda her zaman desteğini yanımda hissettiğim, gece gündüz demeden her türlü desteğini benden esirgemeyen ve çalışmamda bana yol gösteren değerli tez danışman hocam sayın Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma konularında fikirlerine ihtiyaç duyduğum anlarda bilgi ve tecrübeleriyle bana engin bilgilerini aktaran ve çalışmamda bana ışık tutan sayın Dr. Öğr. Üyesi Bora ŞENER'e ve verdiği kıymetli bilgilerden dolayı jüri hocalarımdan sayın Doç. Dr. Vedat TAŞKIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve her daim yanımda olduklarını hissettiğim anneme, babama ve nişanlıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Ali ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
1.1 Giriş.....	17
1.2 Literatür Çalışması.....	18
1.3 Tezin Amacı.....	41
1.4 Hipotez.....	41
2 PLASTİK ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ	42
2.1 Derin Çekme Yöntemi	43
2.1.1 Derin Çekme İşleminde Kullanılan Parçalar.....	43
2.1.2.1 Flanş Bölgesinde Kırışma	43
2.1.2.2 Yan Duvarda Kırışma	44
2.1.2.3 Yırtılma	44
2.1.2.4 Kulaklanma.....	44
2.1.2.5 Yüzey Çizikleri	45
2.1.3 Derin Çekme İşlemi	45
2.1.4 Derin Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler	46
2.1.4.1 Malzeme Özellikleri	47
2.1.4.2 Hill48 Akma Kriteri.....	49
2.1.4.3 Kalıp Geometrisi.....	49
2.1.4.4 İşlem Koşulları.....	50
2.1.5 Şekillendirme Sınır Eğrisinin Oluşturulması	50
2.1.6 Şekillendirme Limit Diyagramının Teoremi	52
2.1.7 Derin Çekme Mekanığı.....	52
2.1.8 Derin Çekme İşlemine Kuvvet Etkisi	56
2.1.9 Derin Çekmede Gerilme Durumu.....	57

3 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	59
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	59
4 MATERYAL VE METHOD	61
4.1 Geometri Oluşturulması ve Sınır koşulları	61
4.2 Pot Basıncı Belirleme	62
4.3 Sonlu Elemanlar Ağı ve Temas Tanımlaması	63
4.4 Malzeme Özellikleri	64
5 SONUÇ VE TARTIŞMA	66
5.1 Tekli Numune Sonuçları	66
5.2 Diğer Numunelerin Sonuçları	69
5.3 Farklı Pot Basıncında FLD Diyagramı Değişimi	70
6 DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	72
KAYNAKÇA	74
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	79

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum Elementinin Simgesi
r	anizotropi
C°	Celsius(Sıcaklık Birimi)
Ø	Çap Simgesi
B	Çekme Oranı
s ⁻¹	Frekans(Hz)
σ	Gerilme
ε	Gerinim
n	Gerinim Sertleşmesi
K°	Kelvin(Sıcaklık Birimi)
kN	Kilonewton (Kuvvet Birimi)
Mn	Mangan Elementinin Simgesi
MPa	Megapaskal (Basınç Birimi)
K	Mukavemet Katsayısı
N	Newton (Kuvvet Birimi)
Pa	Paskal (Basınç Birimi)
P	Postasyum Elementinin Simgesi
R	Radyus Simgesi
s	Saniye
Si	Silisyum Elementinin Simgesi
σ _x	X eksenindeki Gerilme
ε _x	X Eksenindeki Gerinim

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EDD	Ekstra Derin Çekme
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelik
HSS	Yüksek Mukavemetli Çelik
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
PTFE	Yüksek Mukavemetli Teflon Malzeme
SE	Sonlu Elemanlar
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
ŞLD	Şekillendirme Limit Diyagramı
ŞSGD	Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1:	Şekillendirme Limit Diyagramı [1].....	19
Şekil 1.2:	Şekillendirme işlemi sonucunda kullanılan terimler [12]	20
Şekil 1.3:	EDD ve AA5052 sac malzemeler için farklı akma modellerinin karşılaştırılması ile elde edilen sınırlayıcı çizim oranının belirlenmesi [23].....	22
Şekil 1.4:	Belirli Değerler altında Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması [2]	23
Şekil 1.5:	Deney ve sonlu elemanlar Metodunun Karşılaştırılması [52]	25
Şekil 1.6:	HSLA 300 Çeliğine ait Şekillendirme Limit Diyagramı [4].....	26
Şekil 1.7:	a) AA2024.T4 ve b) AA5754.O için örnek çalışma [14].....	27
Şekil 1.8:	Alüminyum 7076 Malzemesine ait Şekillendirme Limit Diyagramı ve Deney verisi [5].....	28
Şekil 1.9:	Farklı sürtünme katsayılarında Yük-Deplasman karşılaştırılması [30]	29
Şekil 1.10:	Kalınlık dağılımı (a) 150 ° C'de ve (b) 300 ° C'de [32]	30
Şekil 1.11:	Kalınlık değişiminin delik çapı oranına etkisi [54].....	30
Şekil 1.12:	Pot Basıncının Kapların kırışmasına etkisi [39]	32
Şekil 1.13:	Farklı kalınlıktaki EDD çeliğinin ŞLD [54]	33
Şekil 1.14:	Ürün $n\bar{r}$ 'nin üç boşluk genişliği için kutup tepe mesafesi üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düzlem gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54].....	33
Şekil 1.15:	Ürün n/\bar{r} 'in üç boşluk genişliği için maksimum kalınlık gerilimi üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düzlem gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54]	34
Şekil 1.16:	n değerinin çift eksenli gerilimde (germe) kırılma durumunda zımba yüksekliğine etkisi. b) Çift eksenli çekmede (derin çekme) kırılmada \bar{r} değerinin zımba yüksekliğine etkisi [54].....	34
Şekil 1.17:	$n\bar{r}$ 'nin üç boşluk genişliği için en yüksek ana gerilim üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düz gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54].....	35
Şekil 1.18:	$n\bar{r}$ ürününün, üç boşluk genişliği için kalınlık gerilim dağılımının yarım genişliği üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düz gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54]	35
Şekil 1.19:	Değişken pot baskıları altında çekilmiş kaplar a)Fotoğraf görüntüsü b)Açımın yüksekliği [6].....	36
Şekil 1.20:	Kap yüksekliği ve kulaklaşmayı ifade eden toplu sonuçlar [6]	36
Şekil 1.21:	Ekstra derin çekme çeliğinin oda sıcaklığında deneysel ve simüle edilmiş kalınlık dağılımı	40

Şekil 2.1: Flanş Bölgesi Kırışması [20].....	43
Şekil 2.2: Yan Duvar Kırışması [20].....	44
Şekil 2.3: Yırtılma [20].....	44
Şekil 2.4: Kulaklanma [20].....	44
Şekil 2.5: Yüzey Çizikleri [20].....	45
Şekil 2.6: Derin Çekme İşlemi [8].....	45
Şekil 2.7: Derin Çekme İşlemi Sonucu üretilen Parça [22]	46
Şekil 2.8: Derin Çekme İşlem Adımları[22]	46
Şekil 2.9: Deneysel Akma Eğrisi ile numerik akma modellerinin karşılaştırılması a)Hollomon, b)Ludwik, c)Swift, d)El-Magd [61]	48
Şekil 2.10: Derin Çekme Yöntemi	53
Şekil 2.11: Derin Çekme İşlem adımları [2].....	54
Şekil 2.12: Çekme anındada iş parçasının durumu, pot çemberi, zimba ve kalıp [2]	54
Şekil 2.13: Derin çekme sırasında oluşan gerilmeler [2].....	55
Şekil 2.14: Derin çekme sacına etki eden kuvvetler [2].....	56
Şekil 2.15: Derin çekme işleminde radyal çekme ve çevresel basma kuvvetleri[10]	56
Şekil 2.16: Derin Çekme işlemi anında oluşan Farklı Gerilme Durumları [10]	57
Şekil 3.1: Eleman Tipleri [55]	60
Şekil 4.1: Zimba-Kalıp Montaj Görünümü	61
Şekil 4.2: Zımbanın Zaman-Deplasman Grafiği	62
Şekil 4.3: Zimba-Kalıp Kesit Görünümü [54].....	62
Şekil 4.4: Kullanılan Numuneler [4]	63
Şekil 4.5: Similasyonda kullanılan modelin mesh dağılımı	64
Şekil 4.6: EDD Çeliğin Gerilme-Gerinim Grafiği	65
Şekil 5.1: a=50 kN, b=100kN, c=150 kN, d=200 kN pot basınçları altında sacın şekillendirilme durum simülasyonu.....	66
Şekil 5.2: a=50 kN, b=100 kN, c=150 kN, d=200 kN pot kuvvetleri altında sacın majör(dikey) ve minör(yatay) eksenlerdeki uzama değerlerini veren grafikler.....	67
Şekil 5.3: Farklı numuneler ile elde Edilen Şekillendirme Limit Diyagramı(200P)....	69
Şekil 5.4: Analiz ve Test sonuçlarının karşılaştırılması	70
Şekil 5.5: Farklı Pot basıncında ŞLD test sonuçları ile karşılaştırılması.....	70

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1: Derin Çekmeye Etki Eden Faktörler [3].....	24
Tablo 2.1: Akma Eğrisi Modellerleri [58]	47
Tablo 4.1: Sonlu elemanlar modelinde kullanılan Parametreler [52,57]	61
Tablo 4.2: Malzeme Özellikleri [54].....	64



Ekstra Derin Çekme Çeliğinin Şekillendirebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi

Muhammed Ali ŞAHİN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Sac şekillendirme işlemleri, günümüzde özellikle otomotiv, savunma sanayi, beyaz eşya sektörü gibi birçok büyük sanayi kuruluşları tarafından kullanılan önemli bir şekillendirme işlemlerinden biridir. Bu işlem plastik bir şekillendirme işlemi olup, başarılı bir şekilde yapılabilmesi için birçok parametrenin doğru bir şekilde kullanılmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu parametreleri malzeme özellikleri, yağlama, basınç ve geometrik etkiler olarak ele alabiliriz. Şekillendirme işlemi sırasında, bahsedilen bu parametrelerin sonuca ve birbirlerine etkisi oldukça fazladır. Bu yüzden bu parametrelerin kontrollü bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Bu değerlerden biri ya da birkaçı olması gereken değerden farklı kullanıldığında, imal edilecek parçada yırtılma, kırılma, çizilme ve kulaklanma olarak ifade edilen hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarların imal edilecek üründe görülmemesi için önceden deneysel çalışmalar yapılmalı ve belirlenen uygun değerlere göre şekillendirme işlemi yapılmalıdır. Bu deneysel çalışmalar özellikle büyük sanayi kuruluşları için hem yüksek maliyetli hem de zaman kaybına neden olmaktadır. Bu maliyetlerden kurtulmak için bilgisayar tabanlı sonlu elemanlar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar sayesinde yüksek maliyetli deneysel çalışmalar azalmakta ve zaman kazancı sağlanmaktadır. Bu yüksek lisans tez

çalışmasında deneysel çalışması yapılmış ekstra derin çekme çeliğinin şekillendirme diyagramının elde edilmesi ve deneysel verilerle simülasyon değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, 175x200mm numune üzerinden uygun pot kuvveti 200kN olarak belirlenmiştir. Ekstra derin çekme çeliği için uygun pot kuvveti değerlerine göre farklı ebatlarda numuneler kullanılarak şekillendirme limit diyagramı oluşturulmuştur. Elde edilen grafiğin deneysel verilerle uygun olduğu görülmüştür. Belirlenen pot baskı kuvveti değeri 200-300-400 kN olarak artırıldığında değişimin fazla olmadığı fakat yırtılma hızının arttığı gözlemlenmiştir.

Metal şekillendirme işlemi esnasında kalıp ile pot arasında malzemenin uygun şekilde ilerlemesine olanak sağlayan süzdürme çubuğu bulunmaktadır. Bu çubuğun bilgisayar programına uygun modellenmesi oldukça zor olacağı için bu yapı eklenmeden uygun pot baskı kuvveti belirlenmiştir. Bu baskı kuvvetinin gereğinden fazla olması sac parçasının yırtılmasına, pot baskı kuvvetinin olması gerekenden az olması ise sac parçasında kırışıklığa yol açmaktadır. Uygun şekillendirme değeri belirlendikten sonra farklı numuneler kullanılarak ekstra derin çekme çeliğinin şekillendirme limit diyagramı oluşturulmuştur. Bu yöntem ile maliyetli ve zaman kaybına neden olan deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmadan istenilen malzemenin şekillendirme limit diyagramının oluşturulacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ekstra derin çekme, metal şekillendirme, sonlu elemanlar yöntemi, şekillendirme limit diyagramı, süzdürme çubuğu

Analysis of the Formability of Extra Deep Drawing Steel by Finite Element Method

Muhammed Ali ŞAHİN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM

Sheet metal forming operations are one of the important forming processes used by many large industrial enterprises, especially in the automotive, defense industry, white goods sector today. This is a plastic forming process, which requires the correct use of many parameters in order to be successfully performed. We can consider these parameters as material properties, lubrication, pressure, and geometric effects. During the forming process, these parameters mentioned have a significant impact on the result and on each other. Therefore, these parameters need to be applied in a controlled manner. When one or more of these values are used excessively or in low amounts, damages expressed as tearing, wrinkling, scratching, and earring occur in the part to be manufactured. In order to prevent these damages from appearing on the product to be manufactured, experimental studies should be carried out in advance and the forming process should be carried out according to the appropriate values determined. These experimental studies are both costly and time-consuming, especially for large industrial enterprises. In order to get rid of these costs, computer-based finite element software is used. Thanks to these softwares, high-cost experimental studies are reduced, and time savings are achieved. In this study, an experimental study was carried out to obtain the forming diagram of extra-deep drawing steel and the simulation values were compared with experimental data.

In this study, the appropriate pot force was determined as 200kN via a 175x200mm sample. A forming limit diagram has been created using samples of different sizes according to the appropriate pot pressure values for extra-deep drawing steel. The obtained graph was found to be suitable with experimental data. When the clarified pot forces value was increased to 200-300-400 kN, it was observed that the change was not much, but the rupture rate increased.

During the metal forming process, there is a drawbeads between the mold and the pot, which allows the material to move properly. Since it will be quite difficult to model this rod according to the computer program, an appropriate pressure force has been determined without adding this structure. An excess of this pressure force leads to a rupture of the sheet metal part, and an excess of the pot pressure force leads to a crease in the sheet metal part. After determining the appropriate forming value, the forming limit diagram of extra-deep drawing steel was created using different samples. With this method, it has been seen that the forming limit diagram of the desired material will be created without the need for costly and time-consuming experimental methods.

Keywords: Extra deep drawing, metal forming, finite element method, forming limit diagram, drawbead.

1.1 Giriş

Derin çekme işlemi özellikle otomotiv, endüstri ve savunma gibi büyük sanayilerce sıklıkla kullanılan plastik şekillendirme işlemlerinden biridir. Bu plastik şekillendirme işleminin doğru ve uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi için malzeme, yağlama, basınç ve geometrik etkiler gibi sonuca doğrudan etkisi olan parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerin her biri diğerine doğrudan etkisi olduğu için uygun plastik şekillendirme işlemi belirlemek için çeşitli işlemler gerekmektedir. Bu işlemlerin başında yaygın ve pahalı olan test ile uygun parametrelerin belirlenmesi işlemi gelmektedir. Bu işlemlerde kalıbın prese göre ayarlanması, presin sürekli saca beslenmesi gibi işlemler sanayiciler için önemli süreler almaktadır. Bu süreleri azaltmak ve en az maliyetle ürün üretmek sanayi kuruluşlarının sürekli düşündüğü sorunların başında gelmektedir. Ayrıca test işlemi oldukça pahalı olduğu için sanayi kuruluşları alternatif yollar aramaktadır. Bu yolların başında ise sonlu elemanlar metodu denilen ve bilgisayar programı yardımıyla oldukça çeşitli sayıda deneme yapmaya imkân sağlayan programlar gelmektedir.

Kullanılan yeni otomasyon sistemleri ve gelişen teknolojiler sayesinde istenilen parametrelere göre müşterinin istediği gibi ürün elde etmek sanayi kuruluşlarının olmazsa olmazlarından. Bu işlemleri mümkün olan en kısa sürelerde yapmak onlar için hayati önem taşımaktadır. Bu amaçla özellikle metal şekillendirme işlemlerinde hızlı sonuç alınabilmesi için deneysel çalışmaların azaltılarak bilgisayar ortamına aktarılması hem maddi açıdan hem de zaman açısından oldukça hesaplı hale gelmektedir.

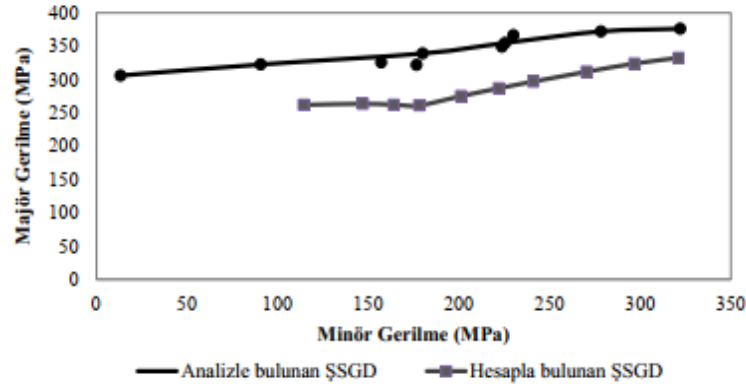
Bu yüksek lisans tez çalışmasında deneysel çalışmaları gerçekleştirilen Ekstra Derin Çekme çeliğinin öncelikle yapılan deney çalışmasına uygun pot basıncı değerinin belirlenmesi sonlu elemanlar programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Uygun pot basıncı değeri belirlenerek aynı malzeme ve koşullar altında farklı numuneler kullanılarak şekillendirme limit diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen değerler yapılan deney çalışması ile kıyaslanmıştır. Belirlenen pot baskısı değeri artırılarak şekillendirme limit diyagramının değişimi incelenmiştir.

Bu Yüksek lisans Tez çalışmasının sonucunda Ravi Kumar D. [54] tarafından yapılan deneysel çalışma ile simülasyon sonuçlarının belirlenen numunelere göre oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma ile oldukça maliyetli olan işlemlerin bilgisayar programları yardımıyla oldukça hızlı ve efektif olarak elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

1.2 Literatür Çalışması

Türköz M. ve ark. [1] gerçekleştirdikleri çalışmada, sac şekillendirme işlemlerinde, yoğun olarak kullanılan Al 5754-O malzemeye ait olan şekillendirme limit diyagramının çıkartılması ile ilgili teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sanayide kullanılan saclarda başlıca problem, sacın istenen şekli alabilmesi için bölgesel boyun verme ve yırtılma hasarının oluşması gerekmektedir. Yapılan işlem sırasında malzeme davranışını öngörmek için bilgisayar modelleri geliştirilmiş olsa da bu modeller ile gerçek davranışı ifade edebilmek için malzeme özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu malzeme özellikleri ise, genellikle çekme deneyi ve şekillendirme limitini belirleyen grafikler sayesinde elde edilmektedir.

Şekillendirme limitini gösteren diyagramlar, limit birim şekil değiştirme değerlerini gösteren ve şekillendirme limit diyagramı olarak ifade edilmektedir. Şekillendirme limit diyagramının hasar tahminini, karmaşık ve birden fazla kademeli şekillendirme işlemlerinde doğru varsayım yapılamadığı belirlenmiştir. Şekillendirme limit diyagramının bu durumlarda da başarılı hasar tahminlerinde bulunduğu gerçeğine dayanarak, çalışma grubu alüminyum alaşımına ait sınır gerilme diyagramının çıkartılması için hem malzeme kütüphanelerinden hem de mevcut çekme testi deneylerinden elde edilen teorik ve deneysel değerleri kullanarak alaşıma ait sınır değer diyagramlarını oluşturup kıyaslamasını gerçekleştirmişlerdir. Şekil 1.1'de majör ve minör gerilme grafiğini gösteren şekillendirme limit diyagramı görülmektedir.



Şekil 1.1: Şekillendirme Limit Diyagramı [1]

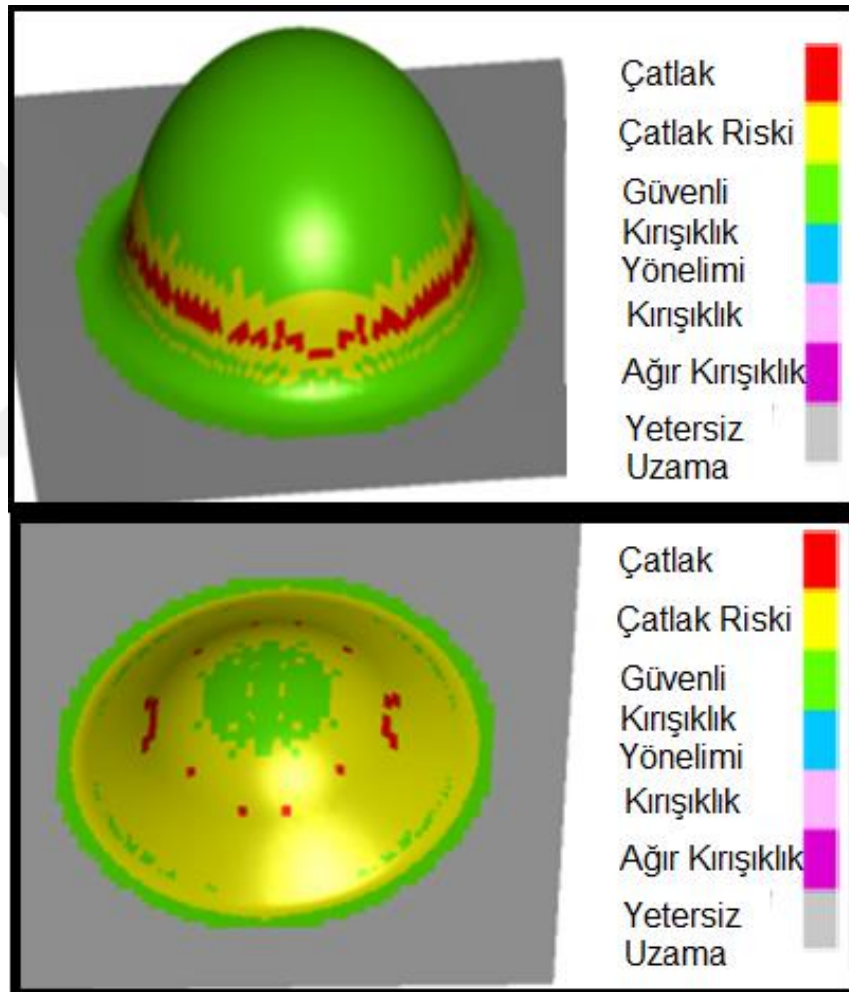
Sonuç olarak şekillendirme esnasında akış yolu değişen malzemeler için deformasyon limitinin doğru bir şekilde tahmin edilemediği, bu sebepten dolayı da karmaşık şekillendirme operasyonlarının analizinde Şekillendirme limit diyagramının kullanılmayacağı ileri sürülmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda şekillendirme limit gerilme grafiklerinin karmaşık şekillendirme operasyonlarında şekillendirme işlemini şekillendirme limit grafiklerinden daha güzel karakterize edildiği gösterilmiştir.

Ayrıca Al 5754-O malzemesine ait şekillendirme limit gerilme grafiği hem teorik formüller ile hem de hesaplamalı mühendislik programı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Benzer özellikler gösteren iki grafik arasında yaklaşık olarak % 18 fark bulunmuştur. Bu nedenle grafiklerin birbiri arasında benzer olduğu sonucuna varılmıştır.

Prajeesh B. ve ark. [11] yaptıkları incelemede, minör gerinim sıfır olduğunda majör gerinim değeri olan şekillendirme limit diyagramı üzerindeki düzlem gerinim kesişimi, gerinim şekillendirme deneyleri ile tür, ısıl işlem ve kalınlıkta geniş bir varyasyona sahip bazı önemli alüminyum alaşımları için belirlenmiştir. Bu durum, alüminyum alaşımlarının hasar tahminlerinin doğruluğunda önemli bir iyileşmeyi sağlamıştır.

Sadough S.A. ve ark. [12] yaptıkları çalışmada kompozit malzemelerin derin çekme işlemi için başlangıçtaki sacın şeklini optimize etmek amacıyla nümerik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Uygun sac malzeme seçimi sadece malzeme tasarrufunu sağlamak ile kalmamakta aynı zamanda malzemenin kırışma ve istenmeyen yırtılmaların da oluşmasını etkilemektedir. Bununla birlikte, özellikle kompozit levhalar söz konusu olduğunda, malzeme davranışının karmaşıklığı nedeniyle en uygun sac kalınlığını bulmak kolay değildir. Bu çalışmada, kompozit bardakların derin çekilmesinde en uygun ham sac kalınlığının bulunması için sistematik bir yöntem önerilmiştir.

Kompozit levhaların derin çekme işlemi önce ABAQUS / Eksplisit programı kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil hassasiyetini sayısal olarak elde etmek için, bir çift deformasyon işlemi analizde kullanılmıştır. Levha düzgün bir işleme tutularak sac kalınlığı bulunmuştur. Tahmin edilen uygun boşluk değeri bilgisayar programı yardımıyla analizi gerçekleştirilmiştir ve ilk boşluğun nihai ürün sınırları ile olan tutarlılığı araştırılmıştır. Araştırma sayesinde, önerilen sistematik en uygun ham sac tasarım yönteminin, kompozitlerin derin çekme işleminin tasarımında çok etkili olduğu bulunmuştur. Yapılan analiz sonucunda oluşan görseller ise şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Şekillendirme işlemi sonucunda kullanılan terimler [12]

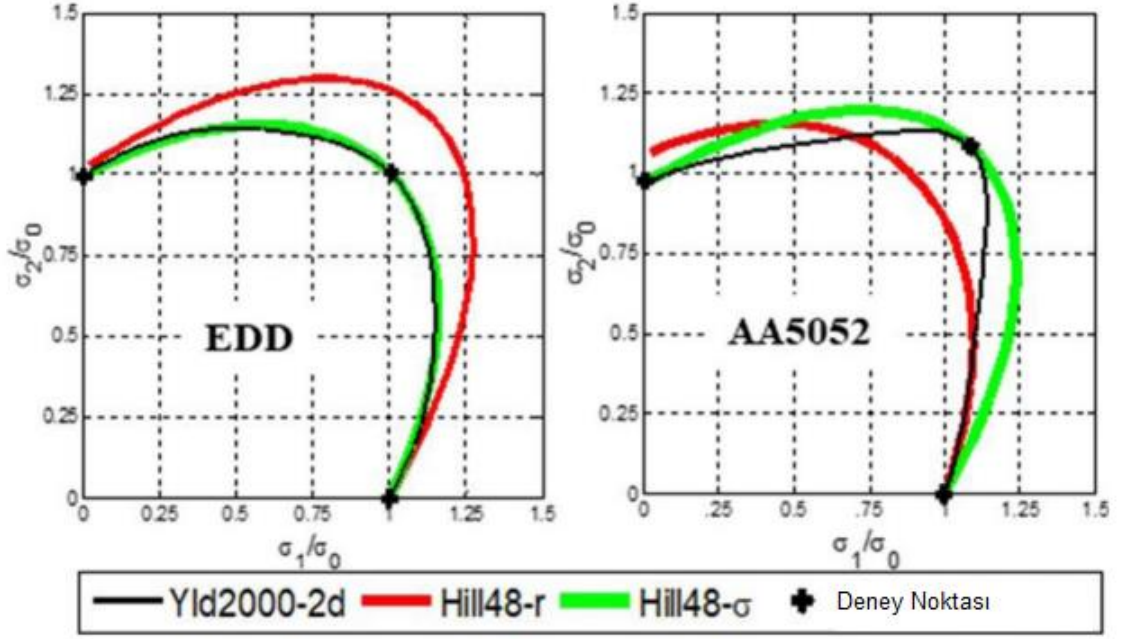
Larour P. [13] gerçekleştirdiği doktora çalışmasında çarpışma koşullarında otomotiv sac kalitelerinin gerilme hızı duyarlılık davranışını etkileyen farklı parametreleri göstermektedir. İncelenen gerilme hızı ve sıcaklık aralığında dinamik bir davranışın olduğu gösterilmiştir. Gerinim hızı hassasiyetine ait değerler, dikkate alınan gerilme hızı

aralığının yanı sıra sıcaklık ve plastikliğe de bağlıdır. Gerinim hızı hassasiyeti, artan plastik gerinim seviyesi ile ısı iletmeyen yumuşama etkileri ile birlikte sertleştirme potansiyelinin kademeli olarak tükenmesi nedeniyle azalmaktadır.

Bu deneysel çalışma gerilme hızı hassasiyetini etkileyen parametrelerin belirlenmesine yardımcı olmakta, sıcaklık, plastik deformasyon, katı çözültü alaşımı, ikinci faz sertleştirme ve açma etkisi gibi faktörlerin kıyaslamalı etkilerini incelemektedir. Böylelikle otomotiv saclarının gerinim hızı duyarlılık değerleri için geniş bir veri tabanı oluşturmakta daha ileri deneysel ve modelleme araştırmaları için referans olabilecek çelik kalitelerinin tespitine olanak sağlamaktadır.

Başaka Ş. ve ark. [23] derin çekme işlemi sırasında elde edilen ve önceden gerilmiş sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini ve kırılma davranışını tahmin etmek için deneysel ve sayısal araştırmalar yapmıştır. Hill48-r, Hill48- σ ve Yld2000 gibi malzeme modelleri kullanılarak şekillendirme limit diyagramları tahmin edilmiştir. Ls-Dyna yazılımı ile kırılma davranışı ve kırılma başlangıcı tahmin edilmiştir.

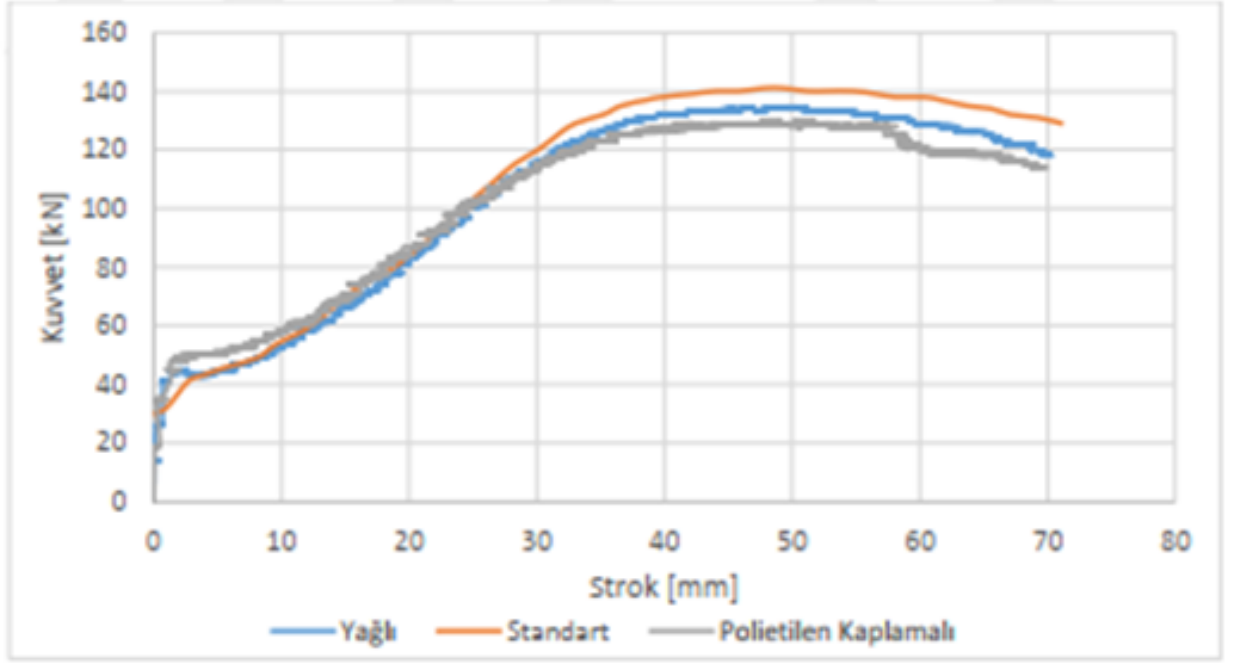
Yld2000-2d modeline sahip MK-FLD, deneysel boyun gerinim verilerini tahmin edebilir. En uygun Hill48-r, Hill48- ∞ ve Yld2000-2d akma modellerini içeren FE simülasyonu ile elde edilen malzemelerin her ikisinin de şekillendirme diyagramını tahmin etmek için kullanılmıştır. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi, Hill48-r modelinin Ekstra derin çekme levhası için grafiği %9,6, AA5052 malzeme için grafiği %8,1 oranında fazla tahmin ettiği bulunmuştur. Ayrıca, Hill48 modeli, Ekstra derin çekme levhası için şekillendirme grafiği %2,9 oranında ve AA5052 malzemesi için %5,9 oranında fazla tahmin etmiştir. Bununla birlikte, Yld2000-2d modelinin FE simülasyonuna dahil edilmesi, alınan her iki tabaka malzemesi için deneysel şekillendirme grafik ve kalınlık dağılımını doğru bir şekilde öngörmüştür.



Şekil 1.3: EDD ve AA5052 sac malzemeler için farklı akma modellerinin karşılaştırılması ile elde edilen sınırlayıcı çizim oranının belirlenmesi [23]

Özdilli Ö. [2] gerçekleştirdiği doktora çalışmasında derin çekme prosesinde sürtünmeyi düşürmek ve üretim verimliliğini yükseltmek için polimer kaplamalı çelik sacların derin çekme işlemi deneysel olarak ele alınmıştır. Yapılan deney çalışmalarında çekme oranı, pot basıncı ve çekme hızı değerleri farklı değerlerde değiştirilmiştir ve ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Derin çekme işlemi esnasında yukarıda ifade edilen kusurları azaltmak ve ürün kalitesini artırmak amacıyla çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır. Yağlayıcı kullanılmış olsa bile yüzeylerde plastik şekillendirme sonucunda çiziklerin oluştuğu görülmüştür. Buna ek olarak, derin çekilmiş bir ürüne imalat sonrası, herhangi bir kaplama ya da boyanın yapılması uygun olmamaktadır. Derin çekme işlemi öncesinde metal sacların polimer esaslı bir malzeme ile kaplanması; şekil 1.4'teki grafikte de gösterildiği gibi parçanın uzun ömürlü olmasına, tasarımsal açıdan şık olmasına, hasarlara karşı dayanımının yüksek olmasına, derin çekme işlemi esnasında sürtünmenin azalması gibi faydalar sağladığı yapılan çalışmaların neticesinde ortaya çıkmıştır.



Şekil 1.4: Belirli Değerler altında Kuvvet-Strok Eğrilerinin Karşılaştırılması [2]

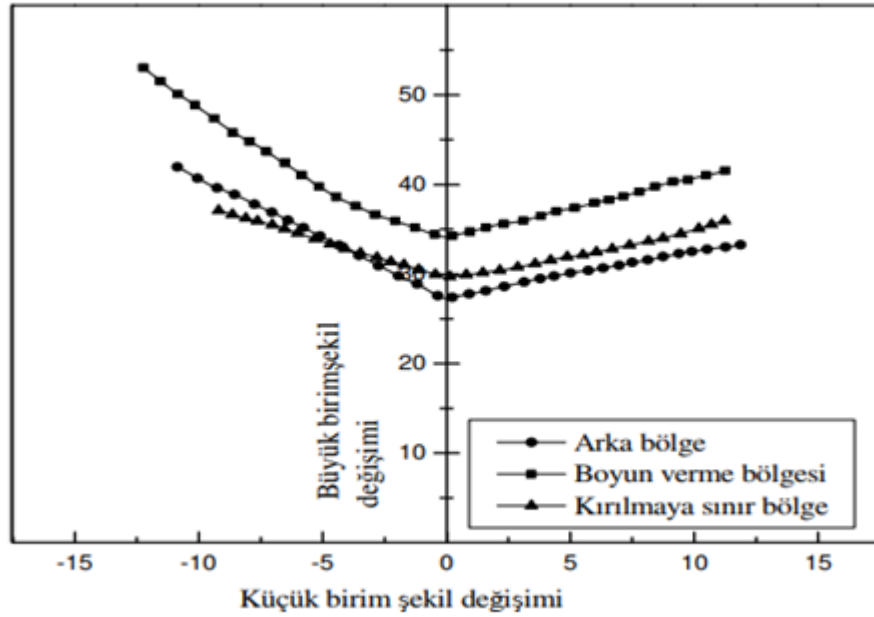
Yıldız H. ve Kırılı O. [3] yaptıkları incelemede karmaşık geometriler içeren parçaların şekillendirmesinde kalıp yüzeyleri oldukça etkilidir. Kalıp yüzeyleri, çelik sac parçasının ne doğrultuda ilerleyeceği ve şekillendirme sırasında incelenen sacın yırtılma durumu, kırışma ve benzeri hasarların; kalıp tasarımı safhasında, önceden fark edilip önlem alınması, tasarım değişikliklerinin sonuçlarının kalıp üretilmeden hesaba katılarak yapılması gerekenler araştırılmıştır. Çünkü bu işlemlerin önceden belirlenerek yapılması maliyet ve fiyat açısından oldukça önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışmada, sorunların halledilmesi için ekspilisit tabanlı doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Kullanılan bu metotta, doğrusal olmayan malzeme ve kontak modelleri önce bir örnekle kıyaslanmıştır ve modelin doğruluğu incelenmiştir. Ayrıca uygulamaya yönelik bir örnek üzerinden kalıp tasarımı adım adım uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonucunda elde edilen değerler Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1: Derin Çekmeye Etki Eden Faktörler [3]

Faktör	Değişiklik	Etki	
		Buruşma	Yırtılma
Çekme Derinliği	Azaltıldı	Azaldı	Azaldı
Kesim Hattı	Daraltıldı	Azaldı	Azaldı
Malzeme	Elastisite Modülü düşürüldü	Azaldı	Azaldı
Sac Kalınlığı	Arttırıldı	Arttı	Azaldı
Kalıp yüzeyleri	Eğrilik yarıçapı büyüdü	Azaldı	Azaldı
Kalıp Açısı	Arttırıldı	Azaldı	Azaldı
Baskı Kuvveti	Azaltıldı	Arttı	Azaldı
Yüzey Sürtünmesi	Azaltıldı	Değişmedi	Azaldı

Demirci H.İ. ve ark [52] gerçekleştirdikleri çalışmada deneysel ve maliyetli metotları ortadan kaldırmak ve ampririk formüller ile yaklaşık sonuçların elde edildiğini göstermek istemiştir. Bu amaçla metallerin plastik şekil verme sürecinde verimliliği artırmak amacıyla, şekillendirme sonuçlarının önceden tahmin edilebileceği, uygulanacak zımba kuvvetinin, baskı plakası basıncının ve sac levhadaki kalınlık dağılımının belirlendiği hesaplama metodu geliştirmişlerdir. Bu amaçla doğrusal olmayan ekspilisit sonlu elemanlar metodu (ANSYS/Ls-Dyna) kullanılarak, pot basıncının cidar kalınlığına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 1.5’te verilmiştir. Değerler deneysel verilerle kıyaslanmıştır ve % 90 uyum sağlandığı görülmüştür. Derin çekme işleminde üretim aşamasına geçilmeden önce karşılaşılabilecek sorunlar saptanmış ve sorunların çözüm yolları belirlenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda, HSLA 300 çeliğinin şekillendirme sınır diyagramı ve bu grafiğin oluşturulmasında kullanılan metotlar tartışılmıştır.

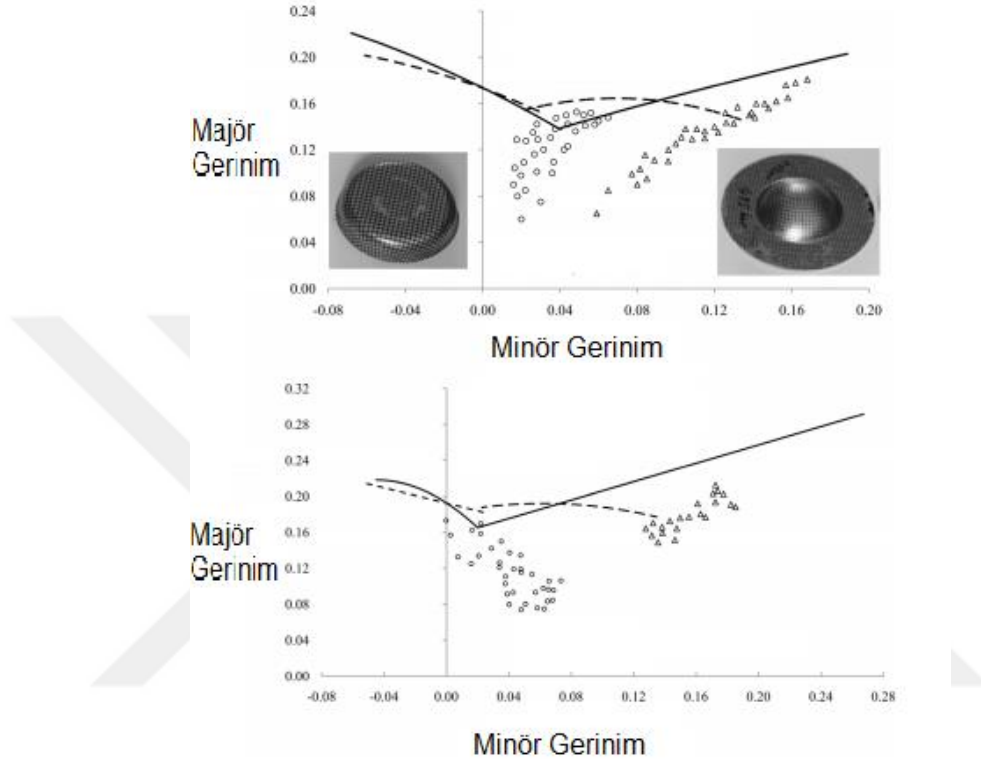


Şekil 1.6: HSLA 300 Çeliğine ait Şekillendirme Limit Diyagramı [4]

Yüksek oranda anizotropik çeliklerin derin çekilmesi, oluşan kaptı kulaklanmaya neden olmaktadır. Kumar R. ve ark. [25] silindirik kablarn derin çekilmesinde, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı açık bir yazılım olan Ls-Dyna kullanılarak ekstra derin çekme çelik saclarından düz tabanlı bir zımba kullanılarak bu kulaklanma problemini incelemiştir. Levhaların mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirlik parametreleri basit çekme testlerinden belirlenmiştir. Pot baskı kuvveti 18-20 kN olarak yapılan deney çalışmasının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak daha hızlı ve uygun maliyetli yapıldığı gösterilmiştir. Ayrıca ilk boşluk şeklinin optimize edilmesi sonuçlara olumlu etki etmektedir. Yapılan karşılaştırma sonucunda kulaklanma yüksekliğinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

Dilmec M. ve ark. [14] gerçekleştirdikleri bu çalışmada şekillendirme limit diyagramlarının oluşturulmasını sağlayan ASTM E2218-02 ve ISO 12004-2 test mekanizmalarının arasındaki farkları anlamak ve hangisinin daha güvenilir olduğunu görmek adına çalışmalar yapmıştır. Bu test mekanizmalarında kullanılması amacıyla AA2024-T4 ve AA5754-O alaşımları, sahip oldukları orta seviyede süneklikten ötürü, deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneyde, numunelerin geometrisi, yağlama koşulları ve şekillendirme limit diyagramlarındaki eğrilerde ortaya çıkan limit gerinim

değerleri kıyaslanmıştır. Ayrıca daha sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere kopma mekanizmalarına ait izler tespit edilmiş ve hangi mekanizma ile koptuklarına dair araştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak ISO 12004-2 standartlarının ŞLD eğrileri oluşturma açısından daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür ve şekil 1.7’de de gösterilmiştir.

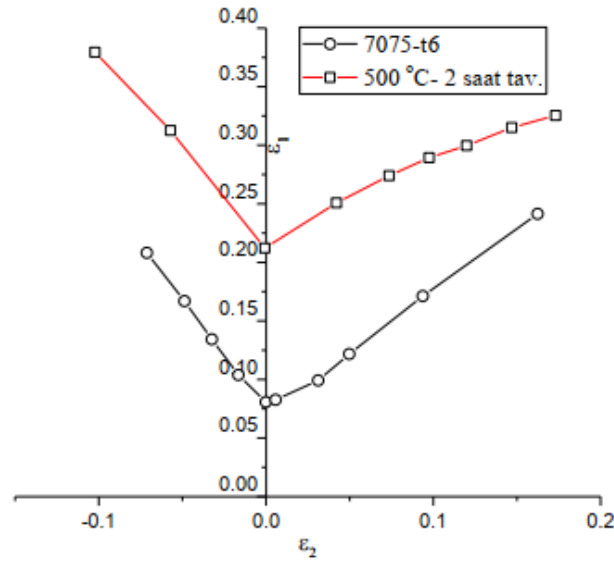


Şekil 1.7: a) AA2024.T4 ve b) AA5754.O için örnek çalışma [14]

Kumar R. ve ark. [26] kaliteli ürünler için en uygun karşı basınç aralığını belirleme yolunu açmaktadır. Aşırı basınç nedeniyle duvarda buruşma ve kırılmayı önlemek için ön şişkin basınç ve kesme basıncının değerini sabitlemek için en uygun bölge belirlenmiştir.

Kılıç S. ve Kacar İ. [5] yaptıkları çalışmada uzay sanayi ve havacılık sektörü için son derece büyük öneme sahip bir malzeme olan 7075 alüminyum alaşımının farklı ısıl işlem uygulanmış durumları için şekillendirilebilme limit diyagramını deneysel olarak elde edilmesinde çalışılmıştır. 7075 alüminyum alaşımını yaşlandırma işleminin iyileştirmelerinin en fazla gözlemlendiği alaşımlardandır. Alaşımın en dayanıklı hali olan T6 temperinde, malzemenin şekillendirilebilirliği hiç iyi olmadığı bilinmektedir. Dolayısıyla, alaşımı ilk olarak solüsyona alarak şekillendirme işlemi yapıp sonrasında yapay yaşlandırma uygulandığında hem şekil verme işlemi zor olmamakta hem de

malzemenin dayanımının arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 1.8’de elde edilen deney verileri ile analiz değerlerinin kıyaslandığı görülmektedir.



Şekil 1.8: Alüminyum 7076 Malzemesine ait Şekillendirme Limit Diyagramı ve Deney Verisi [5]

Raman Goud R. ve ark. [15] gerçekleştirdikleri çalışmada oda ve yüksek sıcaklıklarda ekstra derin çekme çeliği için sınır diyagramlarının oluşturulması, tasarlanmış ve imal edilmiş sıcak şekillendirme takım kurulumu kullanılarak gerdirmeye şekillendirme işlemleri gerçekleştirilerek deneysel olarak belirlenmiştir. EDD çeliğinin şekillendirme limit diyagramı yardımıyla şekillendirilebilirliği analiz edilmiş ve gerilme sertleşme katsayısı (n) ve normal anizotropi (r-) gibi mekanik özelliklerle ilişkilendirilmiştir.

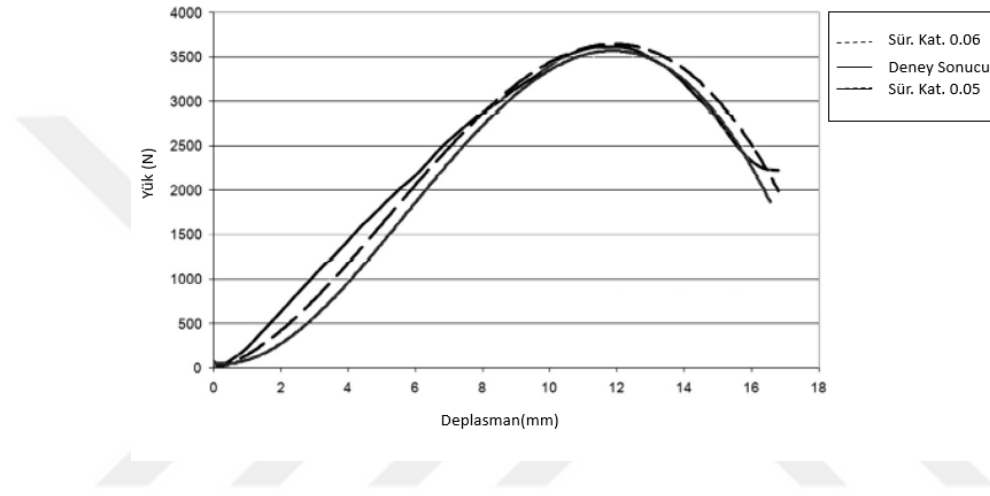
Chin ve ark. [27] eliptik silindirik kabın derin çekme işlemindeki tahmin modelini oluşturmuştur. Kabın kulaklanma davranışına esas olarak düzlemsel anizotropi neden olmaktadır. AISI1008 Malzeme akış karakteristiğini incelemek için sonlu elemanlar tabanlı simülasyon programı kullanılmıştır. Kupa yükseklikleri için teorik sonuçlar, deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Üç farklı metalin derin çekme işleminde Barlat-89 akma kriteri kullanan Saha P. ve ark. [28] IFHS, DP600 ve DP980 çelikleri için deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılmıştır.

Kumar S. Ve ark. [29] aksenal simetrik parçalar için derin çekme kalıbının otomatik tasarımı için bilgiye dayalı bir sistemin geliştirilmesinde yapay zeka kullanmıştır. Mevcut sistem sadece aksenimetrik derin çekilmiş parçalar için derin çekme kalıpları tasarlanabileceğini göstermektedir.

Jayahari ve ark. [30], farklı boşluk çaplarında östenitik paslanmaz çelik (ASS) -304, sıcak koşullar altında derin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çekme oranının oda sıcaklığında 2,16'dan 150°C'de 2,5'e sınırlandırılmasında önemli bir gelişme olduğu gözlemlenmiştir. Farklı çaplardaki boşluklar ve sıcak koşullar altında, çekme oranında önemli bir iyileşme olduğu bulunmuştur.

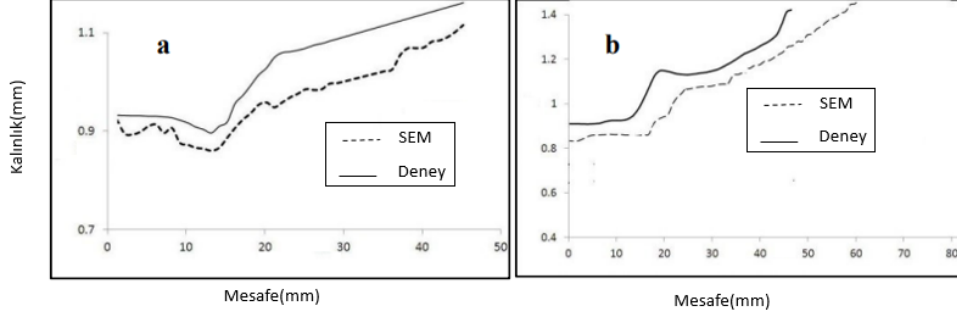
Şekil 1.9'da Jayahari ve ark. [30] yük-strok eğrisinde sürtünme katsayısını değerlendirmek için derin çekme testi ve sonlu elemanlar analizini kullanan pratik bir metodoloji sunulmaktadır.



Şekil 1.9: Farklı sürtünme katsayılarında Yük-Deplasman karşılaştırılması [30]

Takalkar A. Ve ark. [31], yüksek sıcaklıkta derin çekme sürecindeki güncel gelişmeler hakkında bilgi vermektedir. Yırılma, buruşma, kulaklanma ve yaylanma gibi kusurların giderilmesi için geometrik ve proses parametrelerinin etkileri göz önünde bulundurulmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda farklı malzemeler için elde edilen sonuçtan farklı davranışlar ve şekillendirilebilirlik gözlenmiştir. Bu durum, karmaşık profil bileşenlerinin endüstri gereksinimlerine göre çizilmesini sağlamıştır.

Hussaini S. ve ark. [32] yaptıkları çalışmada, östenitik paslanmaz çelik 316'nın sıcak şekillendirme koşullarında şekillendirilebilirliğinin araştırılması ve derin çekme için en uygun sıcaklığın bulunmasını amaçlanmıştır. Derin çekme işlemi açık sonlu elemanlar kodu LS-Dyna'da simüle edilmiştir ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 1.10'da gösterilmiştir.

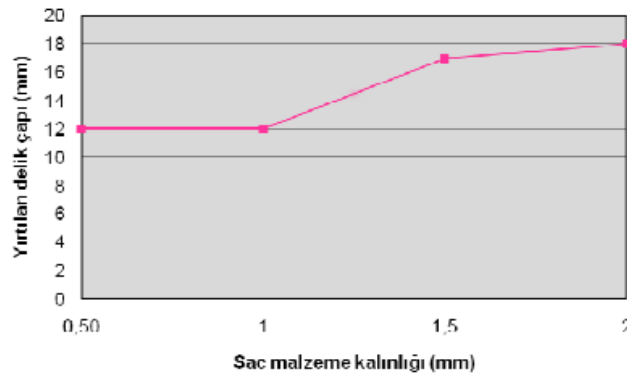


Şekil 1.10: Kalınlık dağılımı (a) 150 ° C'de ve (b) 300 ° C'de [32]

Jayahari ve ark. [33] 304 paslanmaz çeliği malzemesinin şekillendirilebilirlik analizini hem teorik hem de deneysel sonuçlarla sıcak şekillendirme altında incelemiştir. Bu çalışmada derin çekilmiş kaplar, sabit delme hızı, değişen boşluk çapı, boşluk tutma basıncı ve boşlukların sıcaklığı gibi çeşitli proses parametreleri dikkate alınarak şekillendirme işlemi yapılmıştır. Sonuçlar, sonlu elemanlar analizini doğrulayan teorik ve deneysel veri eğrileri arasında benzer olduğunu göstermektedir.

Goud R. ve ark. [34] şekillendirme işleminde ekstra derin çekme çeliğinin kalınlık dağılımını farklı sıcaklıklar altında sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Bunun için farklı boyutlardaki numuneler değerlendirilmiştir. Daha yüksek şekillendirme sıcaklığı ile daha yüksek şekillendirilebilirliğin elde edilebileceğini gösterilmiştir

Alparslan Y.E. [54] gerçekleştirdiği yüksek lisans çalışmasında, ortası delikli Al 1050 alaşımli alüminyum malzemenin delik çaplarındaki artışa göre derin çekme davranışları, deney ortamında araştırılmıştır. Farklı kalınlığa sahip parçaların yırtılmadan çekilebildiği maksimum delik çapları tespit edilmiştir ve şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11: Kalınlık değişiminin delik çapı oranına etkisi [54]

Vaidyanathan A. ve ark. [35], ekstra derin çekme çelik numunelerinde iki geçişe kadar kısıtlı oluk presleme(KOP) uygulanmıştır. Şekillendirilebilirliği incelemek için, çelik numuneleri tipik bir derin çekme tertibatı kullanılarak derin çekilmiş ve sınırlayıcı çekme oranı hesaplanmıştır. Ekstra derin çekme çeliği üzerinde iki KOP geçişi yaparak, şekillendirilebilirliğin çoğundan ödün vermeden daha güçlü kapların üretilebileceği bulunmuştur.

Movahedian S. ve ark. [36], derin çekme, duvar ütüleme ve tavlama adımlarını içeren bir karbon çelik silindirin şekillendirme sürecini deneysel olarak test etmek ve sayısal olarak modelleme çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) uygulanarak çeşitli oluşum aşamalarının geometrik modellemesi yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar deneysel testlerle karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel testlerle iyi bir uyum göstermiştir.

Hatasız çekilmiş bir parça üretmek her zaman zor bir iştir. Choudhari C. ve ark. [37] incelleme ve kırışıklıkları önlemek için sayısal analiz ve derin çekme işleminin deneysel doğrulamasını sunmaktadır. Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımı ile simülasyon sonuçları deney yoluyla doğrulanmıştır. Deneysel ve şekillendirilebilirlik analizi, dikkate alınan proses parametreleri için, 2 mm boşluk kalınlığına sahip malzemenin şekillendirilebilirliğinin, 1 mm ve 0.8 mm boşluk kalınlığına kıyasla, kuru yağlama ile 100 kN yük için daha iyi olduğu şekillendirme limit diyagramı elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucuna göre, 2 mm boşluk kalınlığına sahip malzemenin şekillendirilebilirliğinin, 1 mm ve 0.8 mm boşluk kalınlığına kıyasla daha iyi olduğu sonucuna varılabilmektedir.

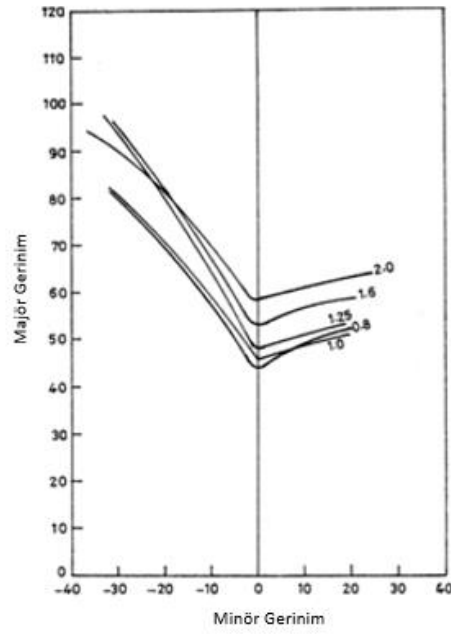
Kurra S. ve ark. [38], ekstra derin çekme çeliğinin artımlı sac formundaki şekillendirilebilirlik ve kalınlık dağılımına odaklanmaktadır. Artımlı sac şekillendirmede malzemenin şekillendirilebilirliği öncelikle maksimum şekillendirilebilir duvar açısı ve izin verilen maksimum incelleme ile ölçülür. Maksimum duvar açısı genellikle, çok sayıda deney gerektiren kırılmaya kadar farklı duvar açıları kullanılarak elde edilir. İzin verilen maksimum incelmeyi elde etmek için, oluşturulan geometrinin kalınlığı derinlik boyunca çeşitli noktalarda ölçülmüştür. Ek olarak, kalınlık dağılımı teorik olarak sinüs yasasına dayanarak ve ayrıca sonlu elemanlar kodu Ls-Dyna kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik ve simüle edilmiş kalınlık değerleri ölçülen kalınlık değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan sonlu elemanlar modelinin kalınlık dağılımını öngörmede teorik modele göre daha doğru olduğu bulunmuştur.

Atrian A. ve ark. [39] yaptıkları çalışmada, deneysel çalışması yapılan 304 çeliklerinin derin çekme işlemini ABAQUS yazılımı yardımıyla sonlu elemanlar (FE) simülasyonu gerçekleştirilmiş ve yapılan çalışmaların sonuçları birbiriyle karşılaştırılması araştırılmıştır. Sonuçlar, pot kuvvetindeki artış ile derin çekilmiş kapların kulaklanmasında bir azalmaya işaret etmektedir. Şekil 1.12’de görüldüğü üzere, yapılan deney çalışması göstermektedir ki pot kuvveti azaldıkça kırışıklık artmaktadır. Ek olarak, FE simülasyonu numunelerdeki yırtılma yerini tahmin edebildiği görülmektedir.



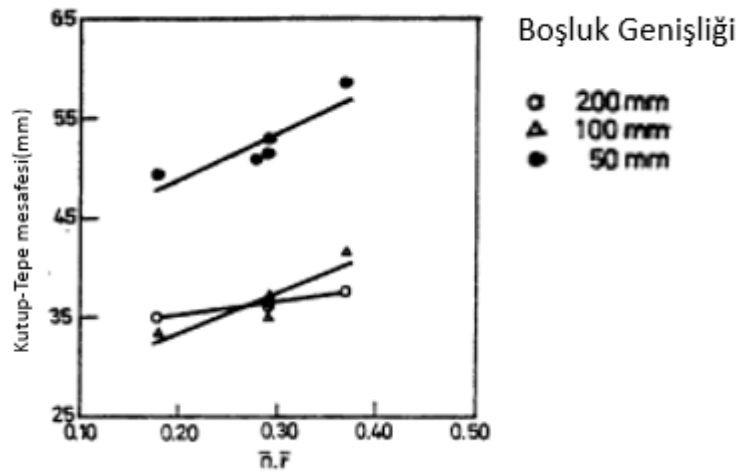
Şekil 1.12: Pot Basıncının Kapların kırışmasına etkisi [39]

Ravi Kumar D. [54] yaptığı incelemede beş adet alüminyumdan ekstra derin çekme (EDD) düşük karbonlu çelik sacın geniş bir varyasyonla şekillendirilebilirliği kalınlık olarak karakterize edilmiştir ve şekil 1.13’te gösterilmiştir. Şekillendirme limit diyagramları, uygun şekilde tasarlanmış ve imal edilmiş aletler kullanılarak zımba gerdirme deneyleri yapılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Fld'den gözlemlenen şekillendirilebilirlik, mikroyapı, mekanik özellikler ve deformasyon sertleşme katsayısı (n) ve normal anizotropi (r) gibi şekillendirilebilirlik parametreleri ile ilişkilendirilmiştir. Farklı gerilme durumları altında zımbalama esnasındaki malzemedeki gerilme dağılımı incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan, beş tabakadan dördünün, iyi şekillendirilebilirlik gereksinimlerini karşılamak için uygun tane büyüklüğüne ve mekanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu tabakaların kritik derin çekme uygulamaları için uygunluğu, fld'deki kritik strain seviyesi ve aralığı açısından incelenmiştir. Bu sonuçlar şekillendirilebilirlik parametreleriyle oldukça uygun olduğu gözlemlenmiştir.

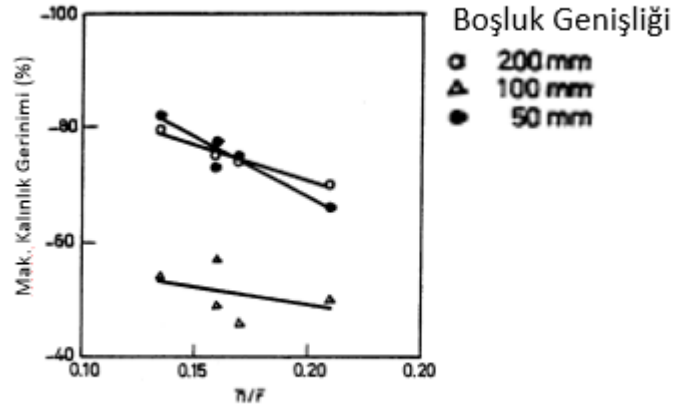


Şekil 1.13: Farklı kalınlıktaki EDD çeliğinin ŞLD [54]

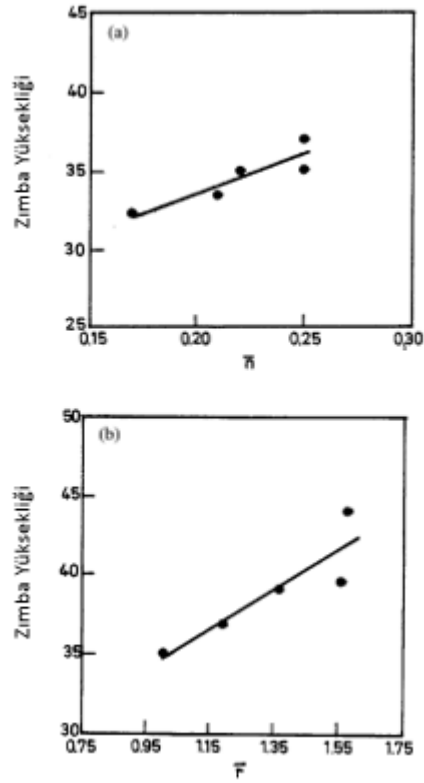
Derin çekme sırasındaki kulaklanma eğiliminin, anizotropi, ŞLD seviyesi, tabaka kalınlığı ile önemli ölçüde artmıştır. N ve r'nin gerilme dağılım özellikleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.



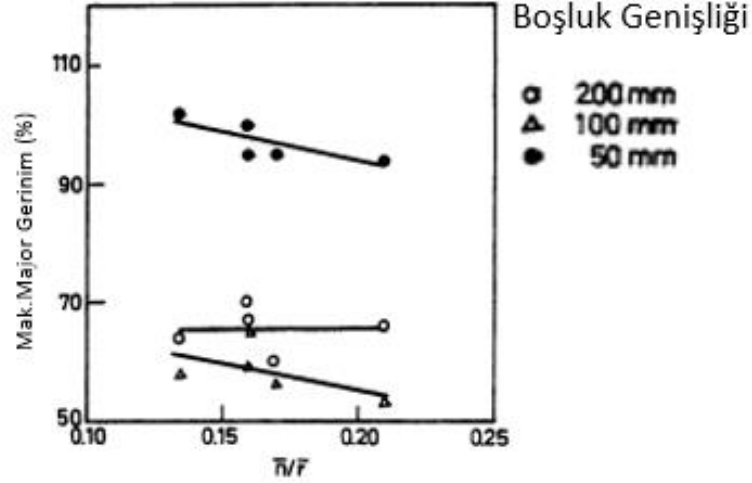
Şekil 1.14: Ürün \bar{n} 'nin üç boşluk genişliği için kutup tepe mesafesi üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düzlem gerinim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54]



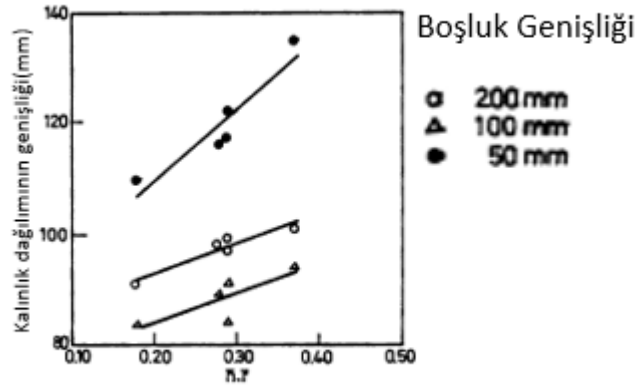
Şekil 1.15: Ürün n/\bar{r} 'in üç boşluk genişliği için maksimum kalınlık gerilimi üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düzlem gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54]



Şekil 1.16: n değerinin çift eksenli gerilimde (germe) kırılma durumunda zımba yüksekliğine etkisi. b) Çift eksenli çekmede (derin çekme) kırılmada \bar{r} değerinin zımba yüksekliğine etkisi [54]



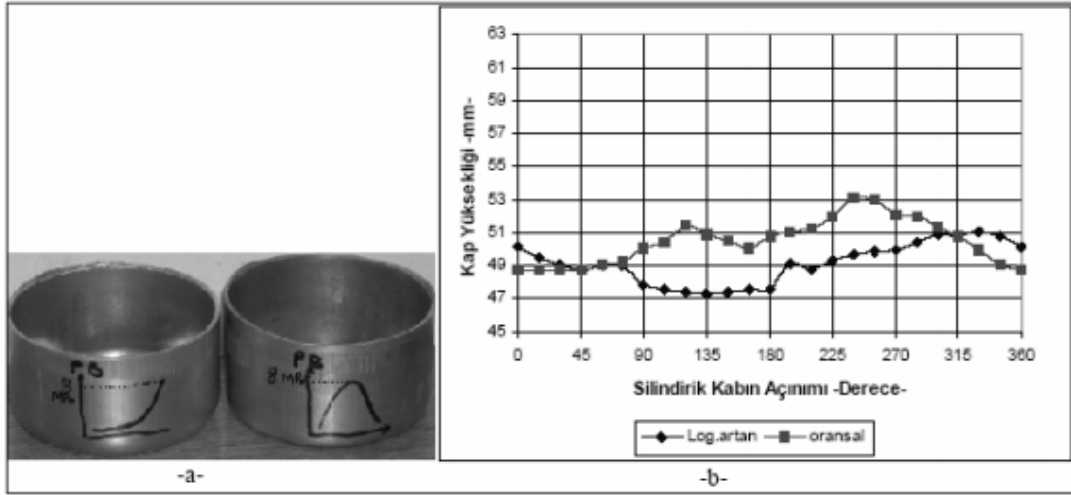
Şekil 1.17: $n\bar{r}$ 'nin üç boşluk genişliği için en yüksek ana gerinim üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düz gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54]



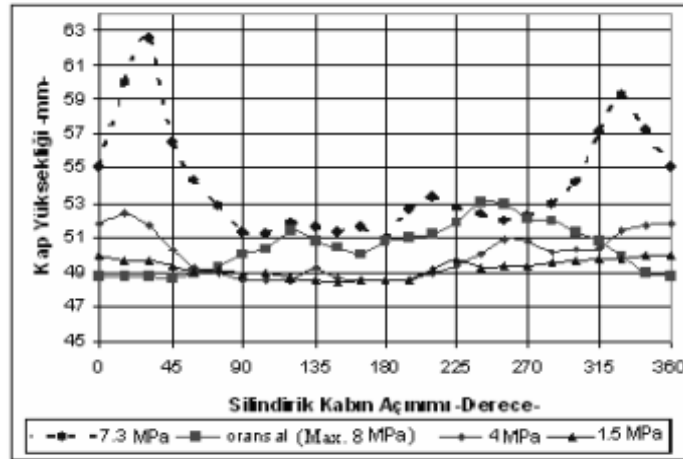
Şekil 1.18: $n\bar{r}$ ürününün, üç boşluk genişliği için kalınlık gerinim dağılımının yarı genişliği üzerindeki etkisi: 200 mm (çift eksenli gerilim), 100 mm (düz gerilim koşulu) ve 50 mm (gerginlik-sıkıştırma) [54]

Karalı M. [6] gerçekleştirdiği çalışmada, derin sac çekme işlemi sırasında pot basıncı ile kap ağzında meydana gelen kulaklaşmalar deneysel olarak araştırılmıştır. 2 mm kalınlıkta ve malzemesi Al 1050 sacdan model kullanılmıştır. Zımba ilerlemesine bağlı olarak sabit ve değişken pot basıncı değerleri kıyaslanmıştır. Baskının değiştiği çekmelerde değişimin

eğrisinde meydana gelen farklılıkların kap yüksekliği ve kulaklaşma üzerindeki etkileri şekil 1.20’de incelenmiştir. Değişken olmayan pot basıncı çekme derinliği ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Fakat bununla bağlantılı olarak da kap ağzında kulaklaşmaların arttığı gözlenmiştir. Yapılan araştırmalarda sayısal, teorik ve deneysel yollarla elde edilen farklı pot basıncının sonuca direk olarak etki ettiği şekil 1.19’da gösterilmiştir.



Şekil 1.19: Değişken pot baskıları altında çekilmiş kaplar a)Fotoğraf görüntüsü
b)Açınım yüksekliği [6]



Şekil 1.20: Kap yüksekliği ve kulaklaşmayı ifade eden toplu sonuçlar [6]

Anket O. ve ark. [7] gerçekleştirdikleri çalışmada Şekillendirme limit Diyagramlarının teorisi, çizimi, okunması ve yorumlanması incelenmiş ve literatürdeki şekillendirme

süreçleri adım adım irdelenerek bir Şekillendirme limit grafiği oluşturulmuştur. Şekillendirme limit grafiklerinin doğru olarak okunması ve yorumlanması, sac malzemelerin daha verimli kullanılmasında yol gösterici olacaktır.

Zaky A. ve ark.[40] kulaksız silindirik bir kabın derin çekilmesi için boşluğun optimum şeklini belirlemeyi amaçlamaktadır. Deforme olmuş kabın kulaklanma davranışı, sac metallerin anizotropik özelliklerinden tahmin edilmiştir. Deneylerde kullanılan sac metalleri düşük karbonlu çelik ve ticari olarak saf alüminyumdur. Tüm levhalar için nominal kalınlık 1.0 mm kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda dairesel boş yüklerle kıyasla en uygun şekli çizerken zımba yükü düşürülmektedir. Düşük karbonlu çelik için 2,17'lik bir çekme oranında, değiştirilmiş iş parçasının maksimum zımba yükü, dairesel iş parçalarına kıyasla yaklaşık %5,4 oranında düşük çıkmaktadır.. Ticari olarak saf alüminyum için 1.87'lik bir çekme oranında, değiştirilmiş boşluğun maksimum zımba yükü, dairesel boşluklarla birleştirildiğinde yaklaşık %8.2 oranında düşük çıktığı gözlemlenmiştir.

Ha J. ve ark. [41] çift fazlı (DP780) ve ekstra derin çekme kalitesi (EDDQ) çelik sacların orantısız gerinim yolları altındaki anizotropik sertleşme davranışlarını incelemiştir. Deneysel çalışma iki aşamalı tek eksenli gerilim testleri yapıldı. EDDQ için bu yaklaşım, akış geriliminin aşılması ve ardından gerilme sertleştirme durgunluğunun bir aşaması da dahil olmak üzere gerilme sertleştirme anizotropisini iyi bir şekilde yakaladığını göstermektedir.

Basak S. ve ark. [42] ekstra derin çekme çeliğinin akma davranışını ve mukavemet yönlülüğünü deneysel bir çalışma ile araştırmıştır. Yapılan deneysel çalışma ile ekstra derin çekme çeliğinin akma davranışını ve mukavemet yönlülüğü değerlendirilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemiyle Yld96 anizotropi plastisite teorisi tahmin edilerek karşılaştırılmıştır. Yld96 anizotropi plastisite teorisi tahmin edildi ve deneysel veri sonuçlarına göre %6 hata içerisinde olduğu görülmüştür.

Meinders M. ve ark. [43] derin çekme sırasında Uyarlanmış Boşlukların davranışını araştırmak için sonlu elemanlar kodu kullanmıştır. Boşluk tutucu kuvveti ve dolayısıyla sürtünme, Uyarlanmış Boşlukların derin çekilmesinde önemli bir parametredir. Bu nedenle, boşluklarını doğru bir şekilde simüle etmek için boşluk tutucu kuvvetinin daha doğru bir tanımına ihtiyaç vardır sonucuna varılmıştır. Deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasındaki korelasyon tatmin edici olduğu görülmektedir.

Verma R. ve ark. [44] şekillendirme limiti oranı malzeme özelliklerinin, sürtünme katsayısının ve kalıp ark yarıçapının bir fonksiyonu olduğu ifade edilmiştir. Kalıp ark yarıçapı etrafındaki bükülmeyi dikkate almaktadır. Sürtünme etkisi, pot basıncı dikkate alınarak daha gerçekçi olduğu kabul edilir. Kapsamlı parametrik çalışmalarda çeşitli malzeme özelliklerinin, baskı kuvvetinin, sürtünme katsayısının ve kalıp ark yarıçapının etkisi göz önüne alınmıştır. Kapsamlı bir parametrik çalışma sonucunda yarıçap, sürtünme katsayısı ve kalıp yayı çalışmaları yarıçapın şekillendirme limit oranı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Şekillendirme limit oranı arttıkça, kalıp ark yarıçapında bir artış görülmektedir. Ancak sürtünme katsayısı arttığında ise azalma görülmektedir. Sac kalınlığının çekilebilirlik üzerinde çok önemli bir etkisinin ise olmadığı anlaşılmıştır.

Souto N. ve ark. [45] gerçekleştirdikleri çalışmanın ana odağı, anizotropi, sertleşme ve kopma evrimi de dahil olmak üzere sac metal davranışının tam bir karakterizasyonu için küresel bir prosedürün geliştirilmesidir. DC04 yumuşak çeliğin ilk anizotropisi, sertleşmesi ve kopması, karışık bir izotropik-kinematik sertleştirme yasası ve makroskopik bir kopma kriteri ile birleştirilmiş kuadratik olmayan Yld2004-18p akma kriteri tarafından oluşturulan karmaşık bir fenomenolojik model kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu amaçla, homojen olarak kabul edilen çeşitli deneysel testlerden elde edilen sonuçlara ve doğrulanmasına göre, geliştirilen global prosedürün sac metallerin mekanik davranışlarının daha kapsamlı bir karakterizasyonu için çok yararlı olabileceği gösterilmiştir.

Li R. ve ark. [46] yaptıkları çalışmada, sac şekillendirme işlemini optimize etmeye çalışmak için aktif süzdürme çubuğu teknolojisinin kullanıldığı deneysel bir çalışma tarif edilmiştir. Oval AA 6111-T4 panelleri, yaklaşımın fizibilitesini belirlemek için çeşitli çekme yörüngeleri kullanılarak bir dizi test çalışması yapılmıştır. Erken evrelerde süzdürme çubuğu penetrasyonunun sıfırdan 5 mm'ye çıkarılması ile sabit 5mm olarak belirlenmesi arasında %40 artış olduğu belirlenmiştir. Araştırmanın ikinci bölümünde, yüksek simetrik olmayan panel oluşturma üzerindeki etkisini incelemek için aktif çekme kafası teknolojisi kullanılmıştır. Çekme derinliği ve boşluk tutma kuvvetleri açısından çizim sınırı eğrileri çizilmiştir. Gerinim yolu analizinin sonuçları deneyler ile başarıyla desteklendiği görülmektedir.

Artımlı şekillendirme, herhangi bir özel kalıp olmadan özel sac metal parçalar üretmek için kullanılan esnek bir işlemdir. Tabakayı gerekli üç boyutlu şekillere deforme etmek

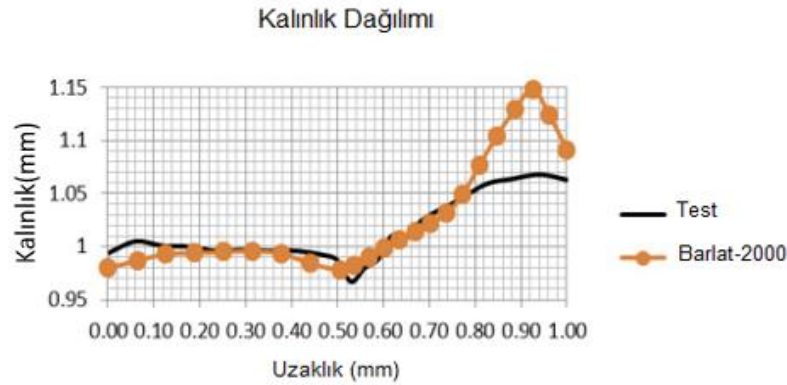
için hemi-küresel başlı bir alet kullanılır. Aletin yolu, bilgisayar destekli üretim yazılımı kullanılarak oluşturulan bir parça program tarafından kontrol edilmektedir. Suresh K. ve ark. [47] yaptıkları çalışmada ekstra derin çekme çeliğinin şekillendirilebilirliğini sayısal simülasyonlarla incelemiştir. Bunun için değişik duvar açıları ve test geometrisi kullanılmıştır. Bu geometriler dairesel, eliptik, parabolik ve üstel olmak üzere dört farklı cinsle tasarlanmıştır. Tüm bu sekiz geometrinin şekillendirilebilirliği Ls-Dyna'da analitik FLD eğrisi kullanılarak test edilmiştir. Maksimum duvar açıları sayısal simülasyonlardan elde edilen değerler deneysel değerlerle karşılaştırılır. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir korelasyon olduğu gözlenmiştir ve hata oranlarının maksimum %3,62 olduğu bulunmuştur.

Gangadhar J. ve ark. [48] ekstra derin çekme çeşitli sıcaklıklarda farklı boyutlarda boşluklar için derin çekme ve yeniden çekme çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Daha sonra Ls-Dyna için malzeme modelleri oluşturulmuştur. Simülasyonlar, çeşitli boş ebatları için ve farklı sıcaklıklarda, malzeme modeli Barlat-36 ve visko-plastik termal model 106 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımba Yüğü, kalınlık dağılımı ve sıcaklık gradyanı gibi sonuçlar simülasyon sonucunda elde edilmiştir ve bu sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak her birinin etkisi tartışılmıştır. Yeniden çizim için aynı sıcaklıkta farklı çaplarda boşluklar kullandığımızda, dinamik gerilme rejiminin ve gerilme sertleşmesinin çekme oranının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir.

Kotkunde N. ve ark. [49] yaptıkları çalışmada, oda sıcaklığında EDD çeliği için Barlat 2000 akma kriterini incelemişlerdir. Barlat-2000 akma kriteri için malzeme sabitlerini belirlemek amacıyla tek eksenli çekme testi deneyleri yapılmıştır. Buna ek olarak, Barlat-2000 akma kriteri için çift eksenli akma gerilimi ve çift eksenli anizotropik katsayı gibi ek parametrelerin belirlenmesi amacıyla çift eksenli çekme testi ve sıkıştırma testi yapılmıştır. Ayrıca, Ls-Dyna çözücü ile DYNAFORM yazılımı kullanılarak derin çekme işleminin sonlu elemanlar analizinde Barlat-2000 akma kriteri sabitleri uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarını doğrulamak için oda sıcaklığında derin çekme deneyi yapılmıştır. Kalınlık dağılımı ve kabın kulaklanma profili karşılaştırılmıştır. Barlat-2000 verim ölçütünün kalınlık dağılımı tahmini için çok uygun olduğu, ancak kulaklanma tahmininin deneysel sonuçlara göre zayıf olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular göstermektedir ki, Barlat-2000 akma kriteri, tüm stres durumunu çok iyi tahmin eder. Bu, Barlat-2000 akma kriterinin ekstra derin çekme çeliğinin akma davranışını çok doğru tahmin ettiği anlamına gelmektedir.

Ayrıca, Barlat-2000 akma kriteri kullanılarak kalınlık dağılımı tahmini deneysel verilerle uyum içindedir. Bununla birlikte, duvarın üst kısmında kalınlık dağılımında hafif farklılıklar olduğu şekil 1.22’de görülmektedir. Ayrıca, Barlat-2000 akma kriteri kullanılarak yapılan kulaklanma tahmini deneysel verilerle karşılaştırıldığında kötü tahmin edilmektedir. Temel olarak, Barlat-2000 akma kriterini kullanarak deneysel sonuçlara benzerlik yüksek çıkmaktadır.



Şekil 1. 21: Ekstra derin çekme çeliğinin oda sıcaklığında deneysel ve simüle edilmiş kalınlık dağılımı

Saad M. ve ark. [50] yapılan çalışmada, günümüz endüstrisinin metal şekillendirme süreçleri üzerinde yapılan son gelişmeleri ve devam eden teknolojileri gözden geçirmektedir. Sonrasında birçok sürecin temeli haline gelen bazı devrimci araştırmalara da yer vermektedir. Metal şekillendirme, sac işleme için farklı, yenilikçi ve kolay yöntemlerin getirildiğini gözlemleyebildiğimiz için ilerleyen bir alandır ve optimizasyonu için dövme ve ekstrüzyon işleminde ağır araştırmalar yapılmıştır. Büyüyen teknolojilerle, ileri süreçlere uyum sağladığı görülmüştür.

Peter I. ve ark. [51] yaptıkları araştırmada, artan Tabaka Şekillendirme kullanımına yönelik doğru proses parametrelerini bireyselleştirmek amacıyla farklı metalik levhalar üzerinde işlem yapabilir araştırmaya katılan küçük orta ölçekli işletmelerin ihtiyacını daha iyi karşılanmasının sağlanmasıdır. Öte yandan, deney yapılan alaşımlar arasında çelik, bu şekillendirme prosedürü ile en deforme olabilen malzemedir; Al alaşımı söz konusu olduğunda, şekillendirilebilirliği proses parametrelerinden büyük ölçüde etkilenir, şekillendirilebilirlik derinliği daha düşük sabitleme kuvvetleri kullanılarak iki katına çıktığı görülmüştür.

1.3 Tezin Amacı

Derin çekme işlemleri bünyesinde oldukça fazla parametre barındırdığı için uygulaması ve deneysel çalışmaları zaman alan ve maliyetli uygulamalardan biridir. Bu parametrelerden süzdürme çubuğu ve sürtünme katsayısı oldukça önemli konulardan biridir. Bu durumun uygulanabilirliğinin getirdiği zorlukları ortadan kaldırmak için bu yüksek lisans tez çalışmasında bilgisayarlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ekstra derin çekme çeliğinin süzdürme çubuğu göz ardı edilerek uygun pot basıncı ve şekillendirme limit diyagramının elde edilmesi için çalışılmıştır. Süzdürme çubuğunun simülasyona dahil edilmesi oldukça zor olduğu için bu yapı olmadan şekillendirme grafiğinin belirlenmesi, deney çalışması yapmadan veri elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Bu amaçla ilk olarak farklı pot baskı değerlerinde numune davranışı incelenmiştir ve uygun pot baskı kuvveti aralığı belirlendikten sonra farklı numuneler kullanılarak şekillendirme limit diyagramları oluşturulmuştur. Çalışmanın devamında pot baskı kuvveti daha da artırılarak malzeme davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deney verileriyle kıyaslanmıştır.

1.4 Hipotez

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, ekstra derin çekme çeliğinin pot basıncı değerinin tahmini için sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak pot baskı kuvveti belirlenmiştir ve farklı ebatlarda numuneler kullanılarak şekillendirme limit diyagramı oluşturulmuştur.

Çalışmada pot baskı kuvveti bir numune üzerinden belirlenmiştir. Baskı kuvveti, baskı hızı, sürtünme katsayısı, baskı şekline göre farklılık gösteren pot baskı kuvveti belirlendikten sonra, farklı numuneler benzer sınır koşulları altında analiz edilmiştir ve numune şekline göre şekillendirme diyagramı üzerinden minör ve majör gerinim değerleri elde edilmiştir. Ekstra derin çekme çeliğinin deneysel sonuçları numerik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen optimum pot basıncı değeri ile deneysel verilerin doğrulandığı görülmüştür.

Oluşturulan bu hipotez ile deneysel çalışmanın masraflı ve zaman kaybına neden olan deneysel çalışmalar, bilgisayar programları yardımıyla oldukça hızlı ve hassas bir doğruluk payı ile tahmin edileceğini ortaya koymaktadır.

PLASTİK ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ

Plastik şekillendirme işlemleri günümüzde ticari açıdan oldukça önemli bir üretim işlemidir. Büyük sanayi kuruluşları ve önemli sektörler için kullanılan metal parça plastik şekillendirme işlemi kullanılarak üretilmektedir. Katı bir malzemeye, eski özelliklerini tamamen kaybederek plastik olarak yeni bir yüzey yapısı, şekli ve özelliği kazandırmak için kontrollü yapılan işleme şekil verme işlemi denir ve sac şekillendirme genel olarak karmaşık bir işlemdir. Bu işlemin karmaşıklığına malzeme özellikleri, uygulanacak baskı kuvvetleri ve yağlama kalitesi gibi etkenler etki etmektedir. Bu etkileri belirlemek ve istenilen ürün kalitesini elde etmek için yüzlerce deney yapılması gerekmektedir. Her bir deney için ayrı numune oluşturulmalı ve o numuneler için farklı parametreler kullanılarak deney setlerinin tekrarlı bir şekilde uygulanması gerekmektedir. Özellikle parçanın geometrisi karmaşık bir yapı halini aldığında bu deneyler zor ve sonuç alınamaz duruma gelmektedir. Bu durum maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bu oluşun maliyeti ve zaman kaybını gidermek için sonlu elemanlar simülasyon tekniğini kullanmak hem deney masraflarının oluşmasını engellemekte hem de zaman kaybını azaltarak işletmelerin üzerindeki yükü hafifletmektedir.

Sac şekillendirme yöntemleri:

1. Sac kesme,
2. Sac bükme,
3. Derin çekme,
4. Diğer şekillendirme yöntemleri olarak gruplandırılabilir.

Bu tez çalışmasında incelenen derin çekme işlemi, düz saclardan basit veya karmaşık kap, kutu ve diğer farklı şekillerde parçalar oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir ve soğuk şekillendirme olarak adlandırılmaktadır. Metal içecek kutuları, mermi kovanları, otomotivde kullanılan sac parçaların üretimi bu yöntemle üretilmektedir.

2.1 Derin Çekme Yöntemi

Derin çekme işlemi metal bir sacdan üç boyutlu derin bir kab oluşturma yöntemi olarak açıklanabilir. Sac levhalardan silindirik şekilde kaplar oluşturmak için kullanılan yöntemlerin en önemlilerinden biri derin çekmedir. Genellikle parçanın derinliği çapına göre daha büyük olduğunda, işlem derin çekme ismini almaktadır. Bu işlem sırasında zımba sac üzerine uygun basınç ve hızda baskı uygulayarak sac levhanın kalıp içerisine doğru akmasını sağlamakta ve şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir.

2.1.1 Derin Çekme İşleminde Kullanılan Parçalar

Zımba: Kalıp şekline göre sac malzemeye istenilen şekli vermek için kullanılır. Sacın kalıbın içine doğru ilerlemesini sağlamaktadır.

Kalıp: Sac malzemenin son şekline uygun bir şekilde oluşmasını sağlayan yapıdır.

Pot Çemberi: Sacın ekstra bir kuvvet ile sıkıştırılmasını sağlayarak kalıp içerisine düzgün akmasını sağlamaktadır. Şekillendirme işlemde sacın kırışmamasını sağlamaktadır

2.1.2 Derin Çekme İşleminde Kullanılan Hasar Terimleri

Derin çekme sırasında oluşabilecek hasarlar şunlardır:

2.1.2.1 Flanş Bölgesinde Kırışma

Basma gerilmeleri altında sacın burkularak kırışması durumunu ifade etmektedir. Pot çemberi kullanılmadan yapılan derin çekme işleminde, yetersiz pot çemberi basıncı olduğunda ve pul çapının gereğinden fazla büyük alınması durumunda görülmektedir. Kırışma görünümü Şekil 2.1'de gösterildiği gibi oluşmaktadır [20].



Şekil 2.1 :Flanş Bölgesi Kırışması [20]

2.1.2.2 Yan Duvarda Kırışma

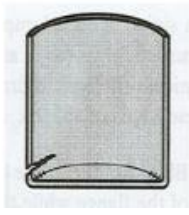
Flanşta meydana gelen kırışıklığın içeri çekilmesi neticesinde ortaya çıkar. Şekil 2.2’de gösterildiği gibidir [20].



Şekil 2.2: Yan Duvar Kırışması [20]

2.1.2.3 Yırtılma

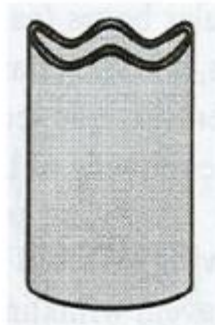
Genellikle pot çemberi kuvvetinin yüksek olduğu durumda ve flanştan malzemenin uygun şekilde ilerleyememesi durumunda, genellikle derin çekme uygulanan kabın dibinde veya ıstampanın basma yüzeyine yakın radyüs diblerinde oluşmaktadır. Ortaya çıkan yırtılma örneği görseli Şekil 2.3’te gösterilmektedir [20].



Şekil 2.3: Yırtılma [20]

2.1.2.4 Kulaklanma

Sacın düzlemsel anizotropisine bağlı olarak kabın üst kenarına yakın yerlerde oluşmaktadır. Kulaklanma durumunun örneği Şekil 2.4’te gösterildiği ortaya çıkmaktadır [20].



Şekil 2.4: Kulaklanma [20]

2.1.2.5 Yüzey Çizikleri

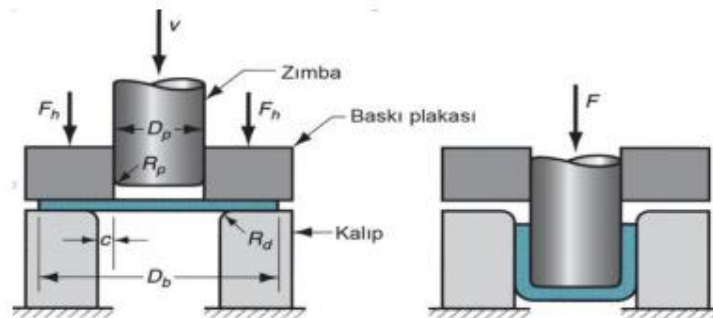
Kalıbın yüzeyine ve kullanılan yağlayıcının cinsine bağlı olarak kabın dış yüzeyinde ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.5'te gösterildiği ortaya çıkmaktadır. Daha kaliteli yağlayıcı kullanmak bu durumla karşılaşmamak için önem arz etmektedir [20].



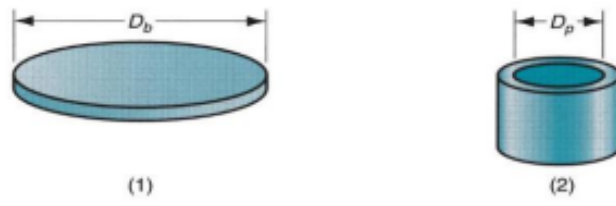
Şekil 2.5: Yüzey Çizikleri [20]

2.1.3 Derin Çekme İşlemi

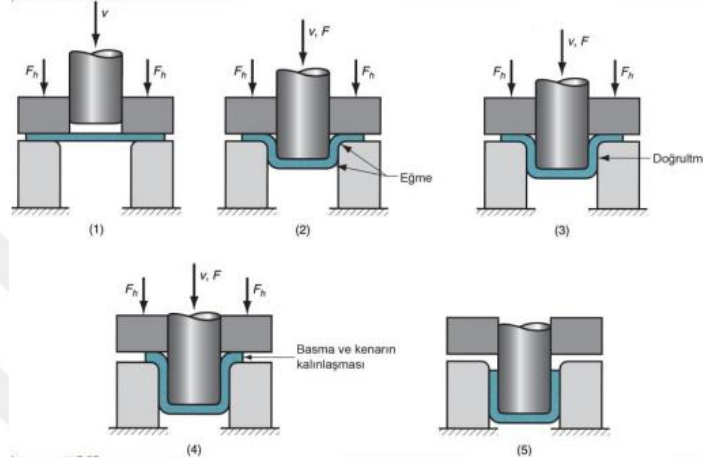
Karmaşık şekillere sahip örneğin konkav, silindir veya kare formda sac parçaların talep edilen şekilde oluşturulması için uygulanan yönteme “Derin çekme” işlemi denmektedir [8]. Bu yöntemde kalıplar üzerinde bulunan boşluğa yerleştirilmiş olan malzemeye zımba ile basınç uygulanır. Uygulanmış olan bu basınç ile malzemede oluşan gerilim malzemeye ait akma dayanımı değerini geçerse malzemede plastic deformasyon bölgesine geçilir ve malzeme kalıbın şekline girmeye başlar. Bu durum Şekil 2.6’da görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Derin Çekme İşlemi [8]



Şekil 2.7: Derin Çekme İşlemi Sonucu üretilen Parça [22]



Şekil 2.8: Derin Çekme İşlem Adımları[22]

1. Zımba iş parçasına temas eder
2. Eğme işlemi
3. Doğrultma işlemi
4. Sürtünme ve sıkıştırma işlemi
5. Derin çekme gerçekleşmiş ve kap duvarları incelmıştır [8].

2.1.4 Derin Çekme İşlemini Etkileyen Faktörler

Derin çekme işlemi etkileyen durumları 3 ana başlık halinde ifade edebiliriz:

1. Malzeme Özellikleri
2. Kalıp Geometrisi
3. İşlem Koşulları

2.1.4.1 Malzeme Özellikleri

Elastisite Modülü: Malzemenin yük etkisi altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Aynı zamanda atomlar arası bağ kuvvetini ve malzemenin rijitliğini ifade etmektedir. Elastisite modülü ne kadar büyükse malzemenin elastik uzaması da o kadar büyüktür.

Gerilme birim şekil değiştirme eğrisinin sıfır olduğu nokta ile üst akma noktası arasında malzemenin elastik bölgesi olarak adlandırılır. Hook kanunu bu bölgede geçerlidir ve diyagram üzerindeki bu doğru eğiminden Elastisite modülü elde edilir.

Pekleşme Üsteli”n”): Bir sac malzemenin sahip olduğu sertleşme yeteneği, malzemenin soğuk şekillendirilebilmesini etkileyen önemli bir özelliktir. Plastik değişimin olduğu bölgede meydana gelecek pekleşme nedeniyle dayanım artar. Malzeme deforme oldukça deformasyon sertleşmesi nedeniyle şekillendirebilirliği giderek azalmaktadır.

Üniform şekil değişimi, sacın pekleşme kabiliyetinin bir kriteridir. Diğer bir kriterse, pekleşme üsteli (n) kriteridir. Plastik şekil değişiminin üniform olduğu akma ile çekme dayanımı arasındaki bölgede, gerilme ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki tablo 2.1’deki formüller ile verilmektedir.

Tablo 2.1: Akma Eğrisi Modelleri [58]

Modeller	EŞİTLİKLER	
Holloman	$\sigma = K(\varepsilon_p)^n$	2.1
Ludwik	$\sigma = \sigma_0 + K(\varepsilon_p)^n$	2.2
Swift	$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n$	2.3
El-Magd	$A + B\varepsilon_p + C[1 - e^{(-\beta\varepsilon_p)}]$	2.4

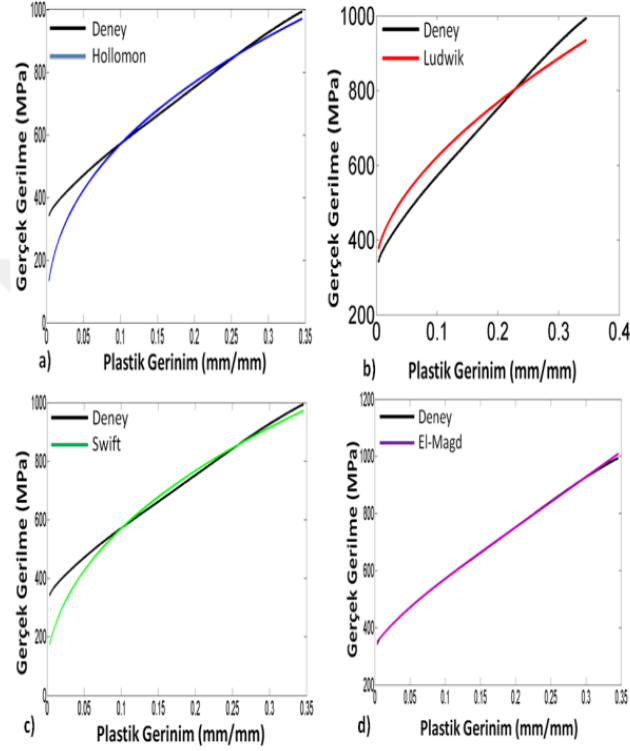
σ = Gerilme

K= Malzemenin mukavemet Katsayısı

ε = Plastik gerinim

n = Pekleşme üsteli

A,B,C, β = Malzeme Sabitleri



Şekil 2.9: Deneysel Akma Eğrisi ile numerik akma modellerinin karşılaştırılması
a)Hollomon, b)Ludwik, c)Swift, d)El-Magd [61]

R , sac malzemenin incelmeye ya da kalınlaşmaya karşı direncini ifade eden önemli bir parametredir [58]. İncelmeye ya da kalınlaşmaya karşı olan bu direnç derin çekmede düzgün şekil alabilmeye katkı sağlamaktadır. Sacın haddeme yönüne göre farklı doğrultulardaki çekme deneyi numuneleriyle testler gerçekleştirilir ve yöne bağlı olarak farklı R değerleri elde edilir. Elde edilen R değerleri eşitlik 2.5'te gösterilen formül ile ortalama plastik anisotropi \bar{R} değerinin elde edilmesini sağlar.

$$\bar{R} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4 \quad (2.5)$$

Yukarıdaki eşitlik 2.5'te verilen R_0 , R_{45} ve R_{90} terimleri sırasıyla haddeme yönüne paralel, diyagonal ve dik doğrultudaki anisotropi katsayılarını ifade etmektedir.

Sac malzemeler çekme testlerinden elde edinilen bilgilere göre üç doğrultuda da farklı özellikler gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle sac malzemenin anisotropic davranışını aktarabilecek uygun bir malzeme modeli seçilmelidir. Bu tez çalışması kapsamında en yaygın kullanılan Hill 48 akma kriteri kullanılmıştır. Malzemenin pekleşme eğrisinin tanımlanmasında ise swift denklemi kullanılmıştır.

2.1.4.2 Hill48 Akma Kriteri

Anizotropik akma kriteri, R.Hill tarafından 1948 yılında von Mises kriterini genelleştirerek izotropik pekleşme temeli kullanılarak geliştirilmiştir [59]. Malzeme davranışının gerçeğe yakın bir şekilde ifade edilebilmesi için üç ortogonal simetri düzleminde anizotropiye ihtiyaç duymaktadır. İkinci dereceden bir fonksiyon olarak ifade edilen bu kriter Denklem 2.6'daki gibi gösterilmektedir.

$$2f(\sigma_{ij})=F(\sigma_y-\sigma_z)^2+G(\sigma_z-\sigma_x)^2+H(\sigma_x-\sigma_y)^2+2L\tau_{yz}^2+2M\tau_{xz}^2+2N\tau_{xy}^2=1 \quad (2.6)$$

Burada f, akma fonksiyonu, F, G, H, L, M, N sabitleri malzemenin anizotropi parametreleri ve x, y, z değerleri asal anizotropik eksenlerdir. Hill-48 akma kriteri düzlem gerilme durumları için Denklem 2.7'deki formunu almaktadır..

$$2f(\sigma_{ij})= (G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (2.7)$$

Sac metal şekillendirme işlemlerinde, r₀, r₄₅, r₉₀ anizotropi parametreleri ve asal anizotropik yönlerdeki akma gerilmeleri X=σ₀ , Y=σ₉₀ olarak adlandırılmaktadır. Anizotropi parametreleri ve F, G, H katsayıları arasındaki ilişki ise denklem 2.8'de verilmiştir.

$$R_0=H/G, r_{90}=H/F, \sigma_{45}=H/(F+G)-0.5 \quad (2.8)$$

Akma gerilmesi ve anizotropi değerleri arasındaki ilişki ise denklem 2.9'da gösterildiği gibidir:

$$\sigma_0 / \sigma_{45} = ((r_0(1+r_{90}))/r_{90}(1+r_0))^{0.5} \quad (2.9)$$

2.1.4.3 Kalıp Geometrisi

Derin çekme işleminde kalıp, uygun geometrinin oluşturulmasında oldukça önemli bir role sahiptir. Sac şekillendirme işlemi sırasında malzeme özellikleri ve uygun geometrinin seçilmesi hasarsız numune alınmasında önem arz eden parametrelerden bir tanesidir. Kalıp tasarımında bu durumların bilinmesi oldukça önemlidir [17].

Kalıbın başlıca görevi pres tezgahından aldığı kuvvet yardımıyla saca gerekli gerilmeleri uygulayarak sac malzemenin belirlenen kalıp şekli içerisinde uygun şekilde hareketini ve hasarsız geometrinin oluşmasını sağlamaktır.

2.1.4.4 İşlem Koşulları

Pot Çemberi kuvveti: Katlanmaların oluşmaması ve sacın düzgünce kalıp içine doğru itilebilmesi amacıyla baskı plakası kullanılmaktadır [18]. Bu baskı plakası sac malzemeye kuvvet uygulayarak sacın geriye doğru hareket ederek sac malzemenin şekil almasını sağlamaktadır. Baskı plakasının etkisiyle kaptı yırtılmalar veya kırışmalar oluşabilmektedir. Derin çekerken malzemenin kırışmaması amacıyla baskı plakaları kullanılmaktadır. Baskı plakaları malzemeye basma kuvveti yaparak malzemenin çekilmesine yardım eder. Baskı plakalarına gereğinden fazla kuvvet uygulandığı durumda malzememizde yırtılmalar, delinmeler görülebilir.

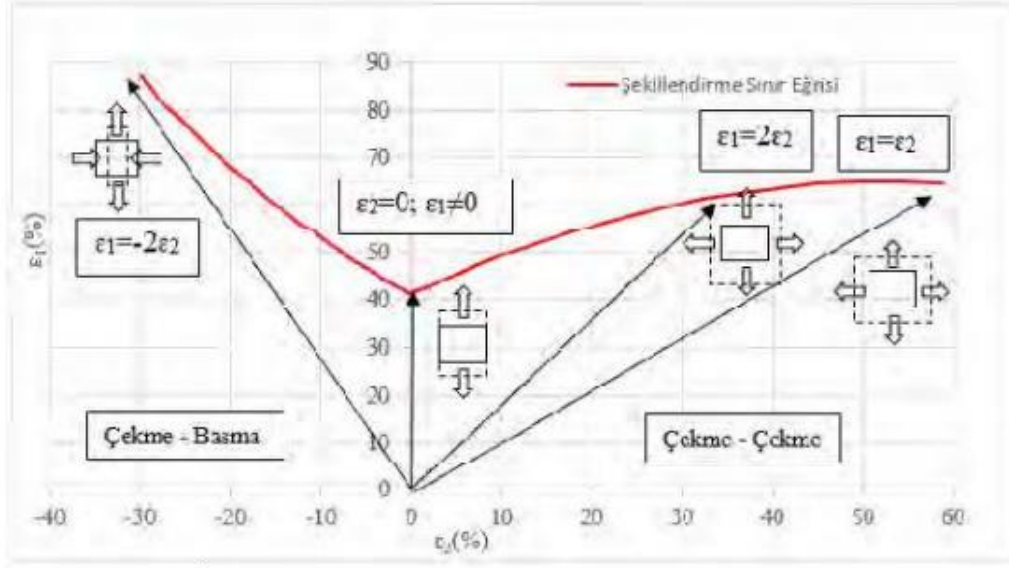
Numune kalınlığı: Numune kalınlığının artırılması malzemenin biçimlendirilebilirliği üzerinde pozitif etki eder. Yapılan şekillendirme işleminde kalınlığı fazla olan sac malzemede kalınlığı az olan malzemeye göre daha büyük sınır gerinimleri görülür.

Derin çekme hızı: Bu parameter çekilen parçanın düzgün bir şekilde çekilebilmesine ve malzemenin fiziksel özellikleri üzerinde etkilere sahiptir. Çekme hızı genel olarak malzemenin kalınlığı ve cinsi dikkate alınarak seçilir.

Çekme kalıbının tasarımı: Derin çekme uygulamalarında kullanılacak olan kalıbın tasarımı oldukça önem arz etmektedir. Çünkü çekme kalıbında veya malzemede var olan bir uygunsuzluk derin çekme işlemini olumsuz olarak etkilemektedir.

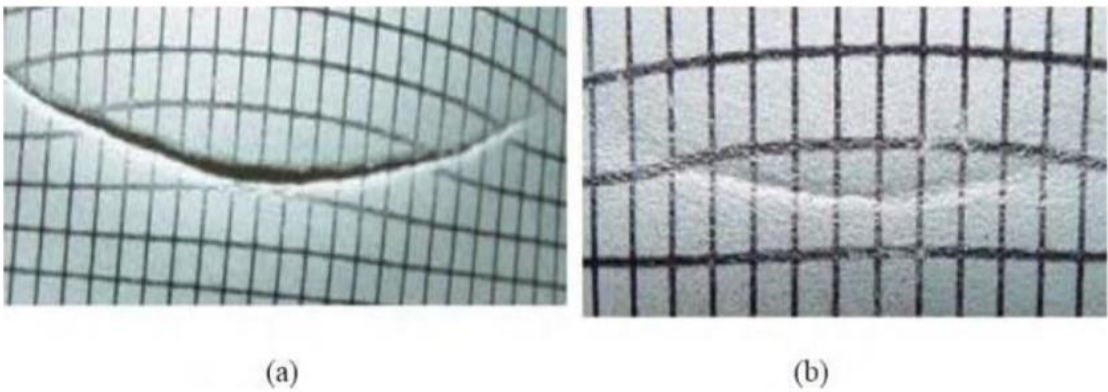
2.1.5 Şekillendirme Sınır Eğrisinin Oluşturulması

Düzlem dışı gerinim ve düzlem gerinim deneyleri malzemenin şekillendirme limit diyagramının oluşturulmasında kullanılan yöntemlerdir. Bu deney yöntemlerinde diyagramın sadece sağ ($\epsilon_2 > 0$), veya sadece sol tarafını ($\epsilon_2 < 0$) ya da her iki bölge de oluşturulabilir. Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Zimba veya numune geometrisinde değişiklikler yapılarak farklı gerinim yolları oluşturulmaktadır [59].



Şekil 2.10: Şekillendirme Limit Diyagramı [59]

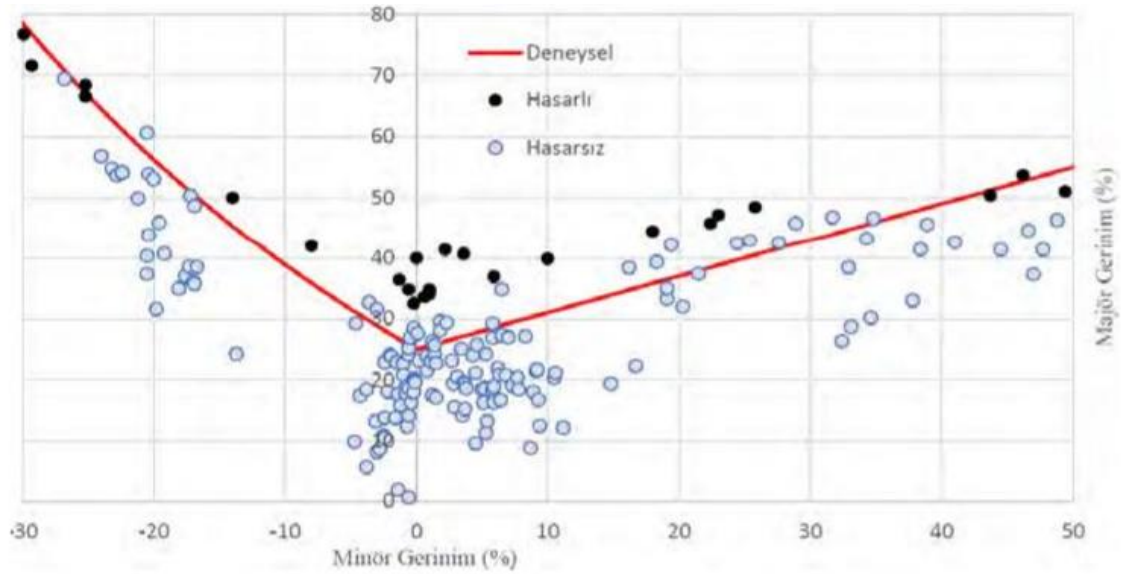
Maciniak testi düzlem gerinim testi olarak ifade edilmektedir ve dikey şekillendirme hareketini yatay şekillendirme hareketine dönüştürmeyi hedeflemektedir. Orta kısmı delik bir sac kullanılan bu testte zımba direk olarak numune ile temas etmemektedir. Bu sayede yırtılma düzlem gerinim bölgesinde olmaktadır. Düzlem dışı gerinim olan Nakajima testinde ise zımba geometrisi sabit tutularak numune boyutları değiştirilmektedir. Kalıp maliyeti açısından Nakajima deneyleri kabul görmektedir. Deneylere başlamadan önce numuneler Şekil 2.11'de gösterildiği gibi kare veya yuvarlak şekillerde gridlenmektedir.



Şekil 2.11: a) Numunede Yırtılma Durumu b) Numunede Boyun verme durumu [59]

DeneySEL çalışma işlemi sonrasında gridlenmiş numunelerden iki farklı yol ile ölçümler yapılabilmektedir. Bu yollardan bir tanesi eş zamanlı ölçüm, diğeri ise şekillendirme

sonrasında ticari yazılımlar ile yapılan ölçümlerdir. Şekillendirme sonrasında ölçüm alınmış numunenin şekillendirme limit diyagramı şekil 2.12’de gösterilmektedir [59].



Şekil 2.12: Şekillendirme Limit Diyagramı [59]

2.1.6 Şekillendirme Limit Diyagramının Teoremi

Sac numunelerin şekillendirme limit diyagramlarının deneysel olarak elde edilmesi maliyet bakımından oldukça fazladır. Bu işlemi hızlandırmak ve maliyetleri düşürmek için teoriksel şekillendirme limit diyagramları geliştirilmiştir. Bu eğriler malzemenin yırtıldığı durum yerine boyun vermeye başladığı durumu ifade etmektedir. Bu da güvenli bölgede çalışmayı sağlamaktadır. Bu eğri Keeler-Brazier teorik eğrisi olarak ifade edilmektedir [59].

Keeler-Brazier eğrisi basit olması ve sadece iki değişkene ihtiyaç duymasından dolayı oldukça fazla tercih edilmektedir. Pekleşme üsteli ve sac kalınlığı kullanılarak Keeler-Brazier eğrisi aşağıdaki eşitliklerde ifade edilmektedir:

$$\epsilon_0 = [(23,3 + 14,134t)(n/0,21)] \quad (2.6)$$

$$\epsilon_{\text{major}} = \epsilon_0 + \epsilon_{\text{minör}} \cdot (0,027254 \cdot \epsilon_{\text{minör}} - 1,1965); \quad \epsilon_{\text{minör}} < 0 \quad (2.7)$$

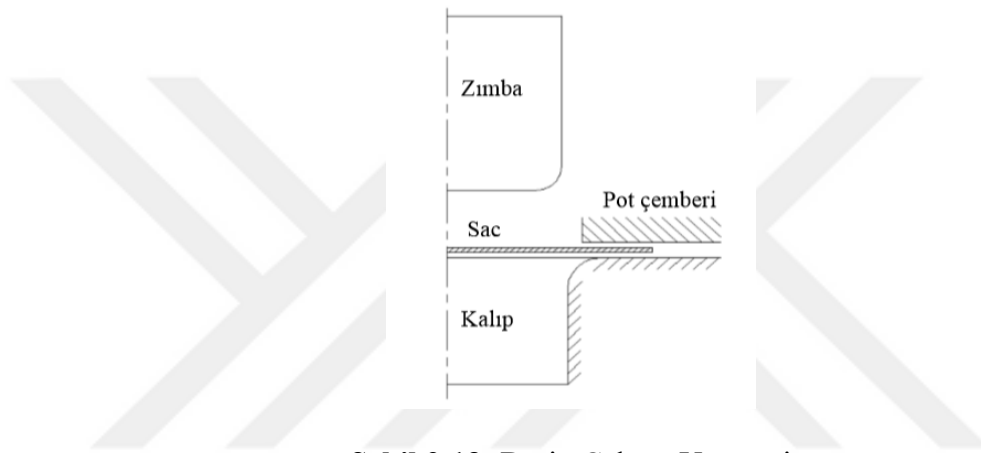
$$\epsilon_{\text{major}} = \epsilon_0 + \epsilon_{\text{minör}} \cdot (-0,008565 \cdot \epsilon_{\text{minör}} + 0,784854); \quad \epsilon_{\text{minör}} > 0 \quad (2.8)$$

2.1.7 Derin Çekme Mekanikliği

Derin çekme işleminde, çekilmesi istenilen kabın boyutlarına uygun malzeme veya yuvarlak sac malzeme hazırlanır [19]. Kalıbın üstüne konan sac levha zımba yardımıyla

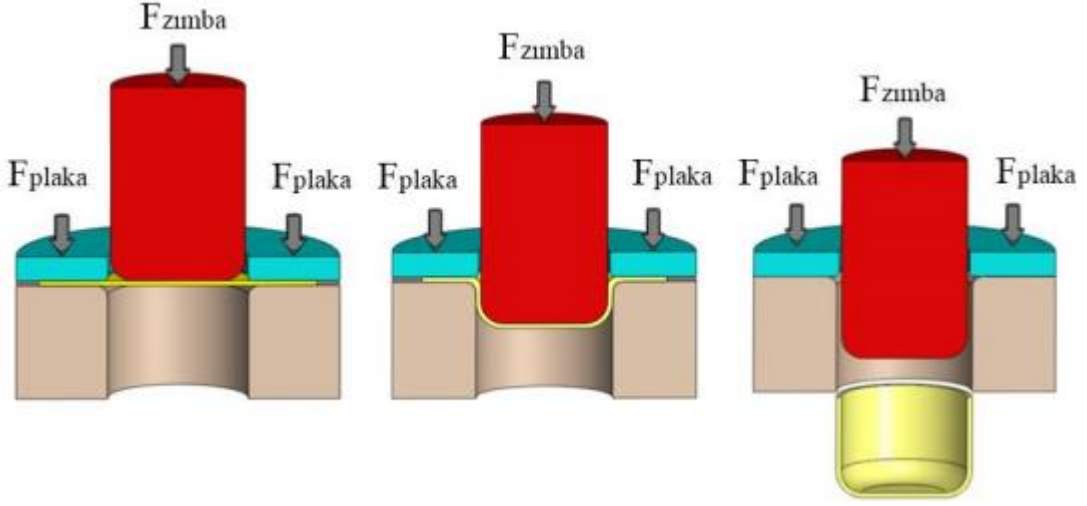
belirli bir basınçta sabitlenir. Sac malzemeye zımba tarafından uygulanan kuvvet nedeniyle levha kalıp içerisine doğru ilerler ve sac malzemenin zımba etrafına istenilen düzgünlükte ve homojen olarak sarılması sağlanır. Bu işlemlerin sonunda kalıp içerisine ilerleyen levha matris boşluğunda şekillendirilir. Derin çekme yöntemi Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

Derin çekmede anında zımbanın köşe kavisinde tek yönlü gerilmeden dolayı malzememizde maksimum derecede incelmeye gözlemlenir, zımba tabanındaysa sac kalınlığı değişmez, sacın pot çemberi ile bastırıldığı noktalarda ise iki eksenli sıkıştırma oluşarak sac malzemenin kalınlığında kalınlaşma oluşur.



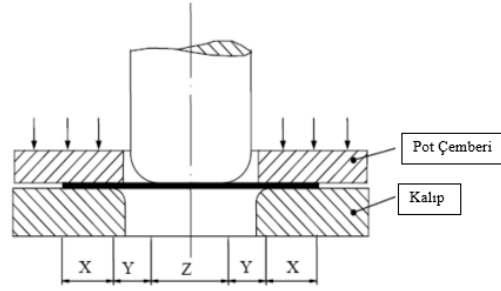
Şekil 2.13: Derin Çekme Yöntemi

Derin çekme yöntemi genel olarak ifade edilmek istenirse şu şekilde tarif edilebilir; sac malzemenin kalıp üstüne konulması ve daha sonra pot çemberi plakasının gerekli olan basınç değerinde sacı gerdirerek zımbanında gerekli kuvvet ile ilerlemesiyle saca istenilen şeklin verilmesidir. Bu işlem sırası Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.14: Derin Çekme İşlem adımları [2]

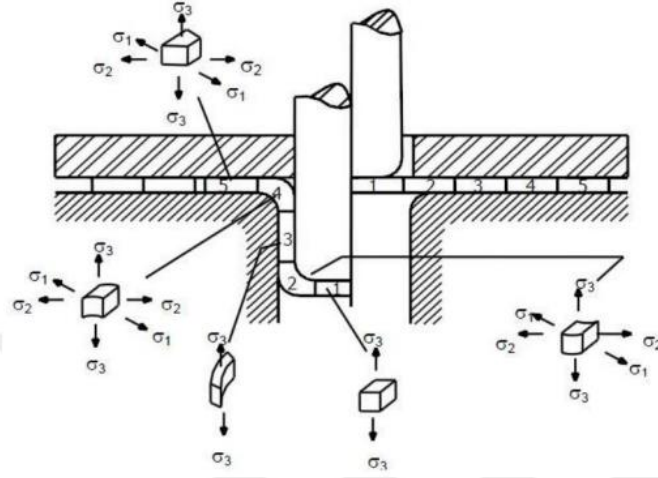
Derin çekilen dairesel biçimli metal sac levha uygulamada yer alan kalıplar ile temas ettiği bölgelerine bağlı olarak üç kısımda incelenmektedir [9]. Bu bölgeler şekil 2.15’de gösterildiği gibi X, Y ve Z olarak adlandırılabilir.



Şekil 2.15: Çekme anında iş parçasının durumu, pot çemberi, zımba ve kalıp [2]

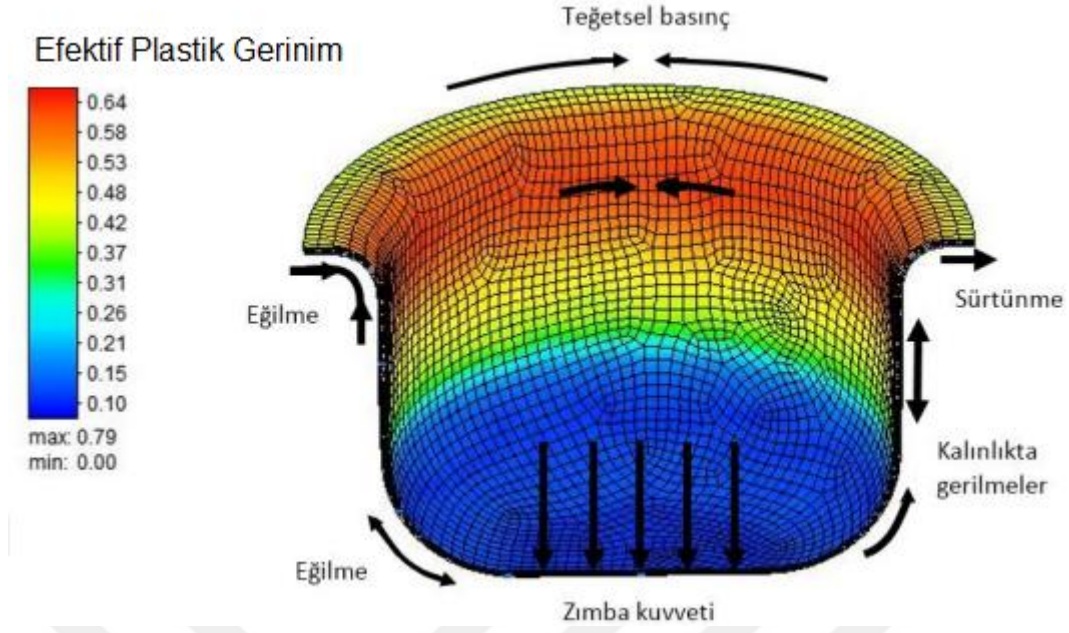
Şekil 2.15’de, X ile gösterilen halka şeklindeki bölge kalıpla, Z ile ifade edilen yer ise zımba alt yüzeyiyle temastadır [2]. Y ile gösterilen bölge ise işlemin ilk aşamasında ne zımba ile ne de kalıpla temas halindedir. Çekme uygulanırken X bölgesi, zımba kuvvetinin etkisiyle radyal çekme gerilmesi neticesinde matris boşluğuna doğru itilir. Malzemeye derin çekme uygulanırken malzemenin baskı plakasıyla temasta olduğu yüzeyde basma gerilmesi meydana gelir ve matrisin yuvarlatma yarıçapı bölgesinde malzemenin şekillenmesi esnasında Y bölgesinde incelmeler diğer bir ifadeyle metal akışı meydana gelir. Malzemenin geçmesi için kuvvet uygulandığı matris boşluğu çapı halkanın başlangıçtaki çapından küçük olduğundan dolayı buralarda basma gerilmesi ve bundan kaynaklı malzeme yığılmaları oluşmaktadır. Radyal çekme ile birlikte sac levha ilerlemeye devam ettikçe levha dış bölgesine doğru kalınlaşmalar görülür. Nihayetinde

ise X bölgesi bittiği noktada malzememizde boyun olduğu görülmektedir. Z bölgesinde ise şekil değişimi olmamaktadır.



Şekil 2.16: Derin çekme sırasında oluşan gerilmeler [2]

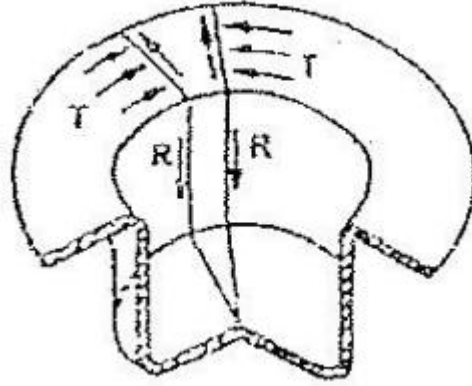
Saç malzeme ilk çapı ve zımba çapı oranını gösteren çekme oranı arttıkça saç malzemenin plastik deforme olması için ihtiyaç duyulan zımba kuvveti artmaktadır [2]. Zımba kuvvetinde meydana gelen artışlar derin çekme sırasında oluşan gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Oluşan gerilme türleri şekil 2.16’da verilmiştir. Bu sebeple derin çekme durumunda meydana gelen bu büyük gerilmelere karşı mukavim davranış gösteremeyen malzemede yırtılmalar oluşmakta ve işlemler sonucunda kalınlık değişim oranında gerçekleşen artışlardan dolayı yırtılmayla birlikte çizilmeler oluşmaktadır. Bu tür negatif oluşumları ortadan kaldırmak için çekme oranı (β), malzeme özellikleri ve geometriye dikkat edilerek en uygun şekilde belirlenmelidir (Özdilli Ö. 2018). Derin çekme işlemi sırasında çekme sacına farklı kuvvetler etki etmektedir. Bu etkiler şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.17: Derin çekme sacına etki eden kuvvetler [2]

2.1.8 Derin Çekme İşlemine Kuvvet Etkisi

Derin çekme işleminde sacın kalınlığında büyük değişiklikler olmaz. Şekil de görüldüğü gibi çapı büyük olan taslak zımba yardımıyla çapı daha küçük olan kalıbın içine itilerek biçimlendirme işlemi gerçekleştirilir.



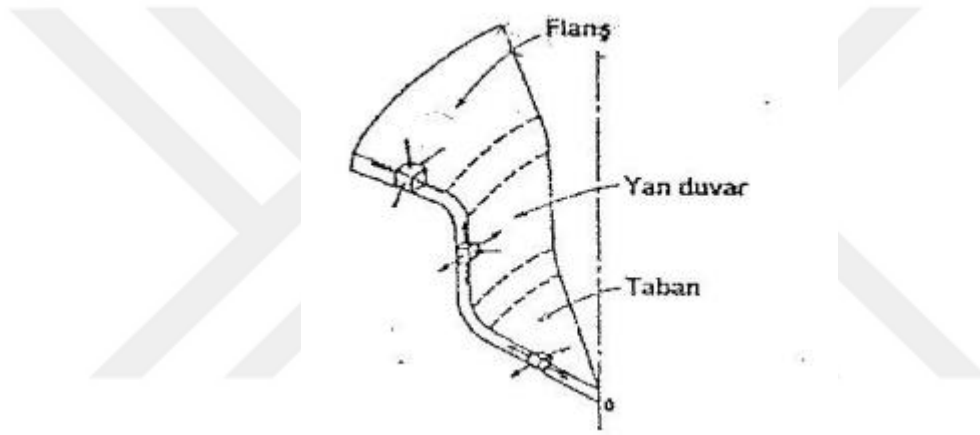
Şekil 2.18: Derin çekme işleminde radyal çekme ve çevresel basma kuvvetleri[10]

Malzemenin derin çekme işlemi sırasında malzeme, şekil 2.18'de de görüldüğü gibi radyal çekme kuvvetiyle kalıp içine doğru çekilirken, taslağımızın kalıp içine daha gelmemiş olan yerlerinde çevresel basma kuvveti oluşmaktadır [10]. Çevresel basma kuvvetlerinden kaynaklı olarak malzeme büzülür ve kalınlaşır, eğer tedbir alınmazsa malzeme kırışmayla karşı karşıya kalır. Bu basma kuvvetleri aşırı derecede olur ise

malzemede yırtılmaya sebebiyet verecektir. Oluşması muhtemel kırışmalar taslağın daha içine girmemiş kısımlarının uygun bir kalıp vasıtasıyla sıkıştırılmasıyla önlenir. Eğer sıkıştırma kalıbı kullanılmadan derin çekme işlemine tabi tutulacaksa kırışmanın önüne geçmek için derin çekme oranı (d_0/d_z) 1,2 değerinden küçük olmalıdır. Kalıp geometrisine bağlı olarak, taslağın yeterince kalın olması durumunda da sıkıştırma kalıbına gerek olmayabilir. Kırışmayı ya da yırtılmayı engellemek için uygun olan basma kuvvetleri kullanılmalıdır.

2.1.9 Derin Çekmede Gerilme Durumu

Derin Çekme işleminde Şekil 8’de görüldüğü gibi malzeme üç ayrı bölgede farklı gerilme ve plastik şekil değiştirmenin etkisi altındadır.



Şekil 2.19: Derin Çekme işlemi sırasında oluşan Farklı Gerilme Durumları [10]

Zımbanın taban kısmıyla temas halinde olan taslağın orta bölgesi zımba çevresince zımbanın üstüne doğru bükülür. Bükmeden dolayı bu bölgede kalınlık bir miktar azalır [10]. Zımbadaki hareketten kaynaklı olarak parçanın tabanında iki eksenli çekme gerilmesi vardır. Flanşta, yan duvarda ve tabanda oluşan gerilmeler Şekil 2.19’da gösterilmektedir. Taslağın dış çevresi kalıp girişinde radyal olarak kalıp içine çekilir. Malzemenin kalıp içerisine doğru çekilmesiyle taslak çevresi πd_0 değerinden πd_z değerine doğru azalır. Bu durumda malzemeye basma ve çekme gerilmeleri etki eder ve basma gerilmesi çevresel çekme gerilmesi ise radyal olarak etki eder. Bunun yanında sıkıştırma kalıbından taslak düzlemine karşı dik yönde bir basınç uygulanır. Malzeme kalıp içine çekildikçe çevresel büzülmeden dolayı kalınlığında artma olur. Malzeme, kalıp yarıçapı üzerinden geçerken bükme ve doğrultma işlemine uğrar. Bu arada radyal çekme kuvvetinin de etkisiyle kalınlığında azalma olur. Kalınlıktaki azalma daha önce meydana gelen kalınlıktaki artışın bir miktar dengelenmesini sağlar. Parçanın yan

duvarında sadece çift eksenli çekme gerilmesi vardır. Zimba ve kalıp mesafesi malzeme kalınlığında meydana gelen artış ile ulaşıldığı kalınlıktan az ise malzemede bu aşamada basınç etkisi ile ütüleme olacaktır. Genellikle kalıp-zimba mesafesi oluşabilecek sürtünme kuvvetlerini azaltarak zimbada meydana gelecek aşınmanın önüne geçilebilmesi amacıyla malzemenin kalınlığından belirli oranda büyük tutulmaktadır. Yalnızca malzeme kalınlığının homojen istendiği durumlarda bahsedilen mesafe malzeme kalınlığından küçük tutulur.



3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak uzay mühendisliğinde kullanılmaya başlamıştır ve 1956 yılında Turner ve arkadaşları tarafından yöntemin ilk makalesi yayınlanmıştır. Günümüzde ise oldukça geniş bir alanda otomotiv, uzay, savunma sanayi gibi büyük sektörlerde zaman ve maliyet kazancı sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi 1 boyutlu, 2 boyutlu ve 3 boyutlu yapı ve sistemlerin bilgisayar ortamında her türlü fiziki şartlara dayanıp dayanmadığının kontrollerinin deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmadan gerçeğe yakın sonuçların alınabildiği matematiksel bir yöntemdir [55]. Tasarımdaki elemanlar, geometrik olarak modeli en doğru bir şekilde ifade edebilmek için sonlu sayıda elemana bölünürler. Bu yüzden sonlu elemanlar yöntemi denilmektedir. Modellenen sistemi temsili için ağ yapısı, eleman tipi ve boyutu oldukça önemlidir. Şekil 3.1’de ise sıkça kullanılan eleman tipleri yer almaktadır. Bu yöntemin en yaygın kullanılan bilgisayar yazılımlarından biri de Ansys/Isdyna programıdır. Ekspilisit sonlu elemanlar programı olan bu yazılım ile çarpışma, metal şekillendirme gibi birçok sektör için uygulamalar yapılabilmektedir. Özellikle içerisinde barındırdığı birçok malzeme kütüphanesi ve kontak (bağlantı) elemanı algoritmalarıyla Ansys/Is-dyna programı muadillerine göre kullanıcılarına çok çeşitli seçenekler sunarak gerçeğe uygun sonuçlar bulabilmelerine olanak sağlamaktadır. Kullanılan bu yöntemler, pahalı olan test yöntemlerine kullanılarak hem zamandan kazanım hem de maliyetten kazanç sağlanmaktadır.


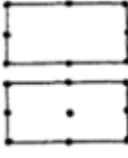


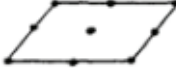

Literatürdeki çalışmalarda kabuk eleman tipinin sac şekillendirme analizlerinde oldukça fazla kullanıldığı belirtilmektedir [55]. Hughes-Liu elemanı kullanılan ilk kabuk eleman tiplerinden biridir ve oldukça fazla kullanıldığı görülmektedir.

Belytschko Lin Tsay tarafından geliştirilen bir diğer eleman tipi BelytschkoTsay’dır. Belytschko-Tsay eleman tipi, Hughes-Liu elemanına göre daha gelişmiş ve hassas çözümler sunduğu için zamanla kullanımı artmıştır. Bunun nedeni, kalınlık yönünde 5 katman bulunduran Belytschko-Tsay kabuk elemanının hesaplanması için 725

matematiksel işleme ihtiyaç duyulurken aynı özelliklere sahip Hughes-Liu kabuk elemanının hesabı için 4066 matematiksel işleme gereksinim duyulmaktadır.

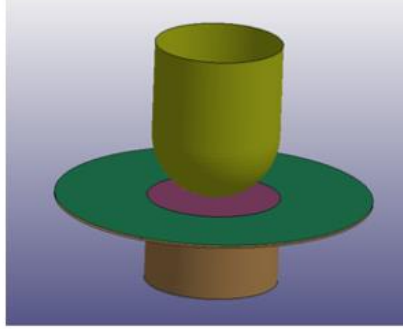
Günümüzün gelişen bilgisayar teknoloji sayesinde gelişmiş özelliklere sahip eleman tiplerinin çözümlenmesi problem oluşturmamaktadır. Bu teknolojiye oldukça ihtiyaç duyan eleman tiplerinden biri ise tam integrasyonlu kabuk elemandır [55]. Tam integrasyonlu eleman modeli hem geometriyi iyi ifade edebilmesi hem de hassas sonuçlar için oldukça tercih edilen bir eleman tipidir.

Eleman tipi ve boyutunun seçilmesinde uygun eleman tipinin seçilmesi oldukça önem arz etmektedir [55]. Eleman boyunun küçük seçilmesi, geometriyi daha iyi temsil edeceği için çözüm sonuçlarındaki hassasiyeti artırmaktadır. Ancak eleman boyutunun küçük seçilmesi toplam eleman sayısını artıracığı için simülasyon çözümlerinin uzamasına neden olacaktır. Bu yüzden en uygun eleman tipi ve boyutu seçilmesi oldukça önemlidir.

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

Şekil 3.1: Eleman Tipleri [55]

4.1 Geometri Oluşturulması ve Sınır koşulları



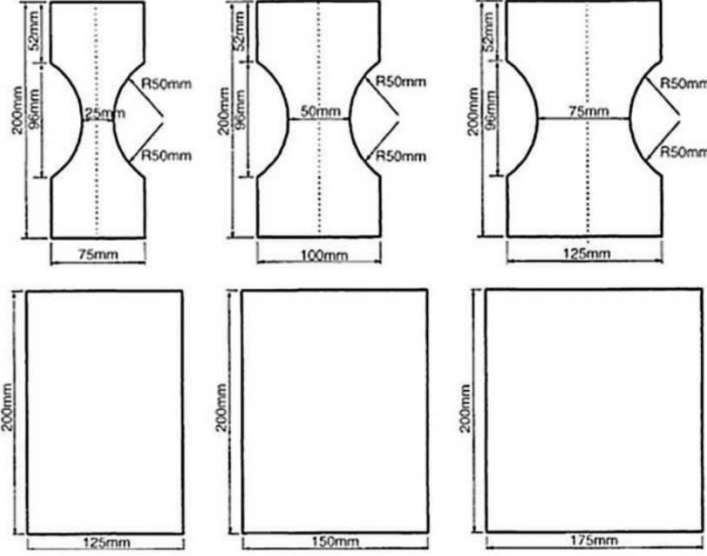
Şekil 4.1: Zımba-Kalıp Montaj Görünümü

Ravi Kumar D. (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmayı doğrulamak için yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında, şekil 4.1’de deney için kullanılan geometriler ANSYS Design Moduler yardımıyla modellenmiş ve ardından ANSYS mechanical programı kullanılarak sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan simülasyon modelleri LS-Prepost programı yardımıyla tablo 4.1’de verilen sınır koşulları değerleri kullanılarak çözümler alınmıştır. Zımba hareketinin zamana bağlı uygulanması şekil 4.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ETA-Postprocessor programı yardımıyla değerlendirilmiştir.

Tablo 4.1: Sonlu elemanlar modelinde kullanılan Parametreler [52,57]

Proses	Değer
Zımba Hareketi	100 mm
Zımba Hızı	1000 mm /s
Sürtünme Katsayısı	0.12
Pot Çemberi Kuvveti	50.000N-100.000N-150.000N-200.000N

İlk olarak şekil 4.2’de gösterilen numuneler içerisinde 200x175 numune kullanılarak test ve simülasyon koşulu için gerekli olan pot basıncı belirlenmiştir. Süzdürme çubuğunun simülasyon modeline eklenmesi oldukça zor olacağı için süzdürme çubuğundan kaynaklı oluşacak hatalar göz ardı edilerek deney ve simülasyon doğrulama çalışmalarına devam edilmiştir.

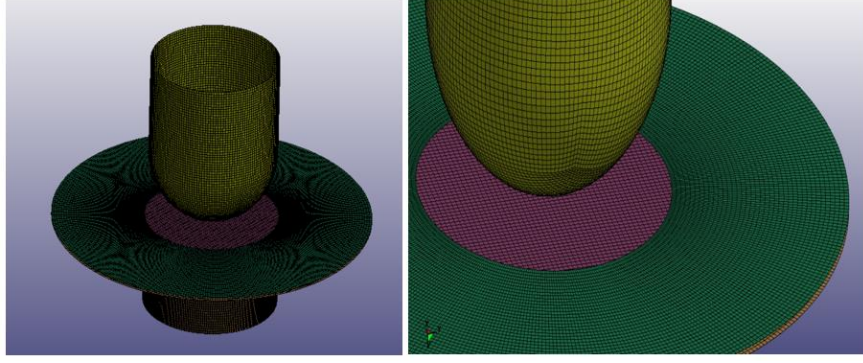


Şekil 4.4: Kullanılan Numuneler [4]

4.3 Sonlu Elemanlar Ağı ve Temas Tanımlaması

Yukarıda Şekil 4.3’te ölçüleri verilen tasarım, Ansys DesignModeler programında katı modelleme işlemleri gerçekleştirildikten sonra kalınlıklar ile boşluklar dikkate alınarak şekil 4.4’te olduğu gibi sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken tam integrasyonlu kabuk elemanlar kullanılmıştır ve 1mm eleman boyutuna göre toplamda 61,442 düğüm noktası ve 60,384 kabuk eleman kullanılmıştır.

Analiz modelinde, parçalar arasındaki temas durumu ayrı ayrı tanımlanmıştır. Burada, sac ve rijid parçalar için Is-dyna’da kütüphanesinde bulunan yüzey – yüzey (Forming_One_Way_Surface_to_Surface) kontak tanımlaması yapılmıştır. Sac – Pot çemberi arasında ise yine Is-dyna kütüphanesinde bulunan Surface_to_Surface kontak tanımlaması yapılmıştır. Bütün kontak tanımlamalarında sürtünme katsayısı 0.125 olarak alınmıştır.



Şekil 4.5: Similasyonda kullanılan modelin mesh dağılımı

4.4 Malzeme Özellikleri

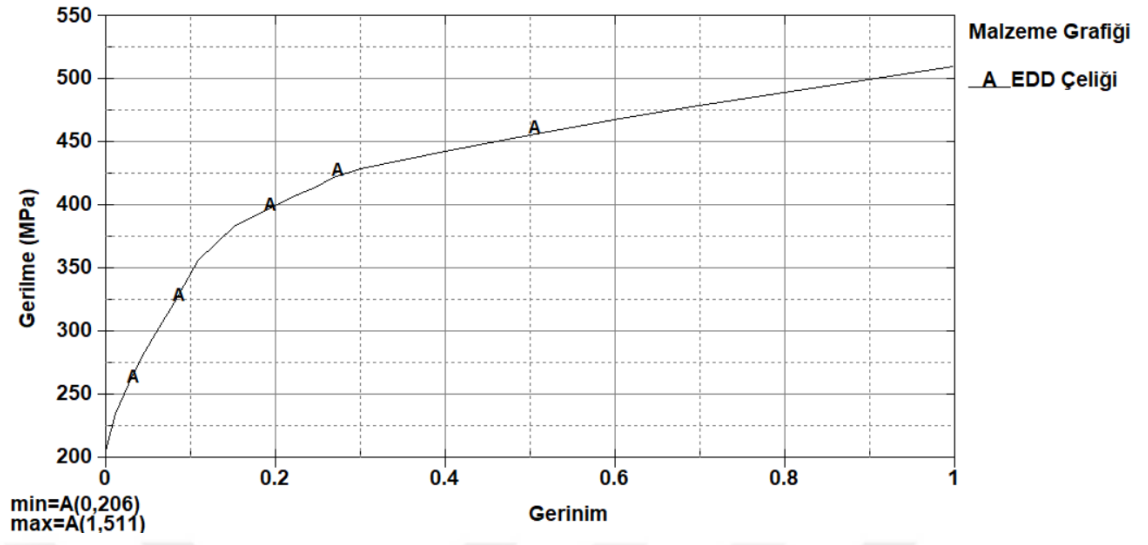
EDD çeliğine ait malzeme bilgileri çeşitli kaynaklardan derlenmiş ve Tablo 4.2’de verilmiştir. Bu koşullar daha önce gerçekleştirilen çeşitli deneysel çalışmalardan alınmış ve bu çalışmada kullanılmak üzere simülasyon programının malzeme kütüphanesine işlenmiştir.

Tablo 4.2: Malzeme Özellikleri [54]

Malzeme	Yoğunluk(kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama(%)	Gerinim Sertleşme Katsayısı
EDD Çeliği	7850	200	0.3	200	315	31.3	1.01

Ls-Dyna ile analizleri gerçekleştirilen sonlu elemanlar malzeme modeli tanımlaması için MAT_37_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC kullanılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan gerilme-gerinim grafiği şekil 4.6’da verilmiştir. Bu malzeme modeli Hill’48 malzeme modeli olarak ifade edilir ve basitliği ve kullanıcı dostu olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Hill malzeme modeli, üç ortogonal simetri düzlemi boyunca malzemenin anizotropik bir davranış ortaya koyduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ortalama plastic anisotropi denklemini kullanmaktadır.

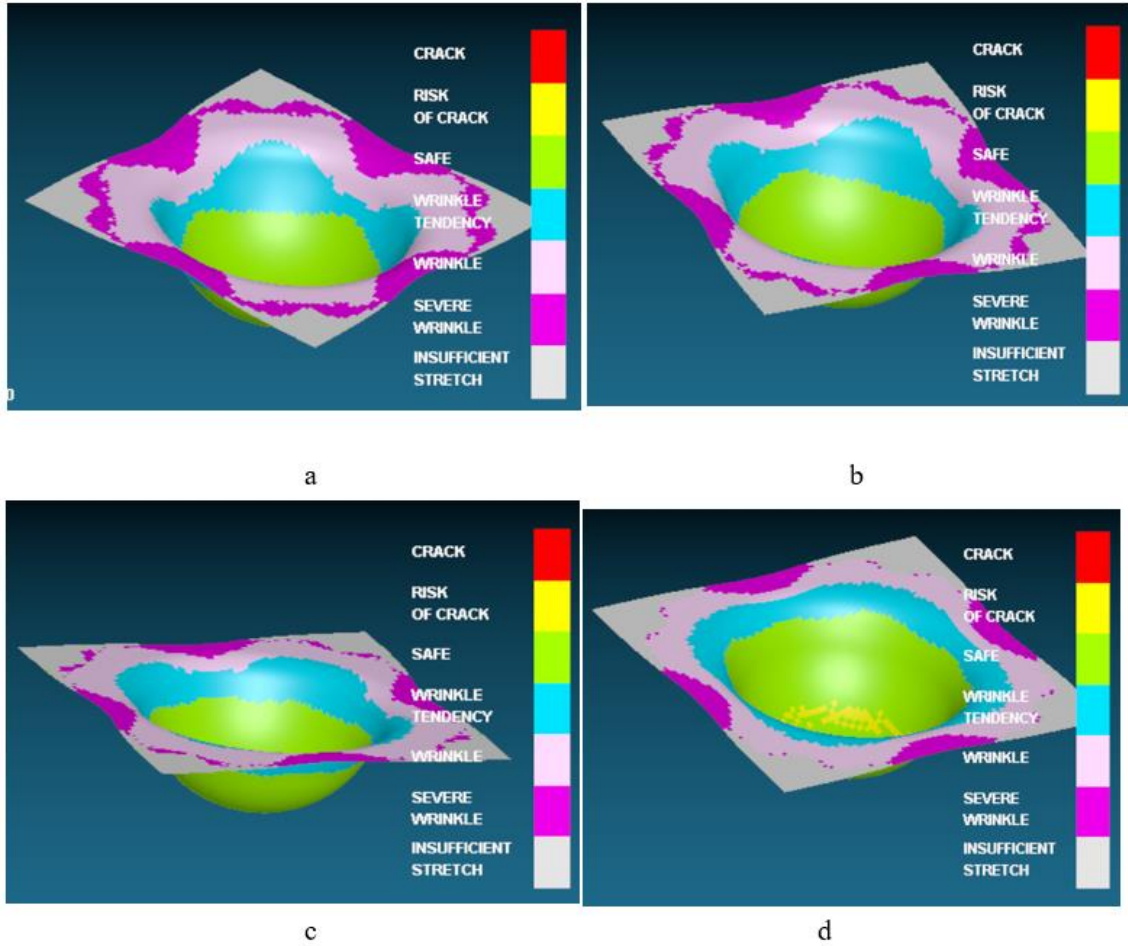
Benzer sınır şartları pot çemberi kuvveti 200.000N olacak şekilde şekil 4.4’te verilen diğer numunelere de uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar Ravi Kumar D. [54] yaptığı deney sonuçları ile karşılaştırılarak simülasyon çalışmasının doğruluğu kontrol edilmiştir.



Şekil 4.6: EDD Çeliğin Gerilme-Gerinim Grafiği

5.1 Tekli Numune Sonuçları

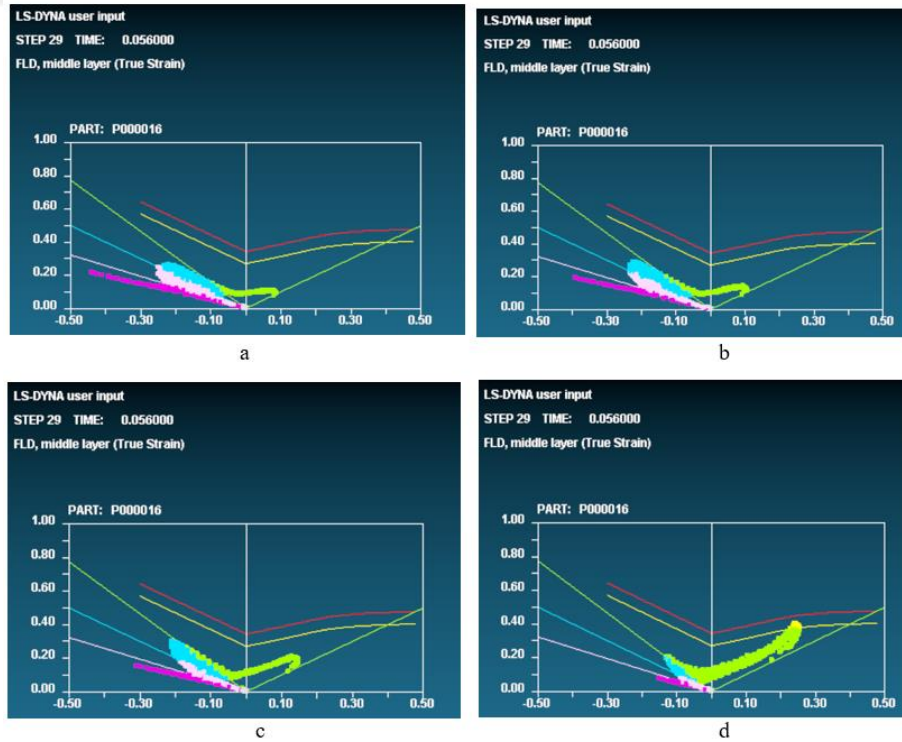
Simülasyon çözümlerinde LS-Dyna programı kullanılmış ve verilerin değerlendirilmesi için ETA Post Processor programı kullanılmıştır. Bu programa ait görsel örneği Şekil 5.1’de görüldüğü gibidir. İlk olarak gösterilen sonuçlar 200x175 numunesine ait olan sonuçlardır. Bu numune ile uygun pot basıncı kuvveti belirlenmiştir ve sonrasında benzer sınır koşulları diğer numunelere de uygulanarak şekillendirme limit diagramları oluşturulmuştur.



Şekil 5.1: a=50 kN, b=100kN, c=150 kN, d=200 kN pot basınçları altında sacın şekillendirilme durum simülasyonu

Buna göre sacın zımba tarafından şekillendirildikten sonra işlemi tamamlayıp yukarı kalkması esnasında, bitmiş parçanın görüntüsü şekil 5.1'deki gibi olmaktadır. Bu işlem sonrasında sacın üzerinde şekil değişikliği ve gerilme bulunan bölgeler renk dağılımı ile tarif edilmiştir. Bu dağılıma göre kırmızı renk parçanın çatladığı, sarı renk çatlak riskini taşıdığı bölgeyi ifade etmektedir. Yeşil renk parçanın emniyette olduğu ve ideal gerilme dağılımının olduğu bölgeyi göstermektedir. Bunların haricinde mavi renk sacın kırışma eğiliminin olduğu, açık pembe kırışma olgusunun gözlenmeye başladığı, mor renk ise şiddetli kırışma olgusunun gözlemlendiği bölgeleri temsil etmektedir. Son olarak gri renk kuvvet etkisinin önemsiz olduğu bölgeyi temsil etmektedir.

Buna göre şekil 5.2 incelendiği zaman, en şiddetli kırışıklık alanının olduğu bölge en çok 50 kN pot kuvvetinin uygulandığı durum olmakta ve 200 kN pot kuvvetine kadar pot kuvveti arttıkça kırışıklık bölgesinin miktarı azalmaktadır. Ancak, pot kuvveti arttıkça, parçanın başarılı bir şekilde şekillendirilebilirliği artmakta ve bu şekillendirme sınırın aşılması halinde de yırtılma riskini beraberinde getirmektedir. 200 kN pot kuvvetinde yırtılma riskinin adacıklar halinde başladığı görülmektedir. 150 kN pot kuvveti sonrası ortaya çıkan sac levhada bu riskin görülmediği simülasyondan anlaşıldığı için bu noktada yırtılma riski için sınırın 150 kN olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.2: a=50 kN, b=100 kN, c=150 kN, d=200 kN pot kuvvetleri altında sacın majör(dikey) ve minör(yatay) eksenlerdeki uzama değerlerini veren grafikler

Aynı veri değerlendirme programı, ilgili bölgelerdeki gerilme dağılımını ve tehlikesini grafik olarak sunmaktadır. Buna göre gerilme dağılımlarının majör ve minör uzama yönlerindeki uzama değerlerine göre tarif edildiği grafikler örnek olarak şekil 5.2'de görülmektedir. Majör eksenindeki uzama terimi, kuvvetin uygulandığı yöndeki parça uzamasının olduğu eksenini tarif ederken, minör eksenindeki uzama, kuvvetin uygulandığı eksene dik olan (Poisson uzaması/kısalmasının gerçekleştiği) eksenindeki uzamayı tarif etmektedir. Simülasyon 50 -100-150-200 kN pot kuvvetleri için tekrar edilmiş ve parçanın minimum ölçüde kırışıklık değerini veren en büyük kuvvet değeri araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Şekil 5.2a'da görüldüğü üzere 50 kN pot kuvveti majör ekseninde (dikey eksen) parça %30 uzama gösterdiğinde, minör ekseninde %40 tan fazla uzamaktadır. Majör ve minör eksenindeki uzamalar çatlak riskinin olduğu bölgeye gelmemesine rağmen sacın kırışma riskinin olduğu bölgede çoğunlukla bulunmaktadır. Bu durumda sacın yırtılma ihtimali düşük olmasına karşın kırışıklık ihtimali oldukça fazladır.

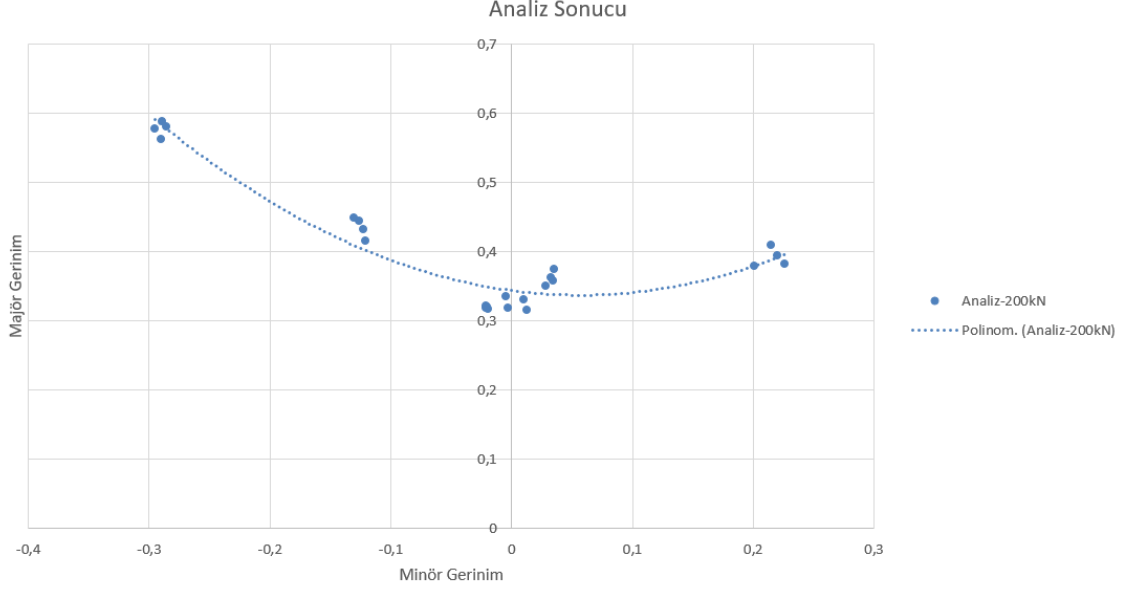
Şekil 5.2b'de görüldüğü üzere 100 kN pot kuvvetinde majör ekseninde (dikey eksen) parça %30 uzama gösterdiğinde, minör ekseninde %40 uzamaktadır. Majör ve minör eksenindeki uzamalar çatlak riskinin olduğu bölgeye gelmemesine rağmen sacın kırışma riskinin olduğu bölgede çoğunlukla bulunmaktadır. Kırışıklıkta 50 kN pot kuvvetine göre bir miktar azalma görülmektedir.

Şekil 5.2c'de görüldüğü üzere 150 kN pot kuvvetinde majör ekseninde (dikey eksen) parça %30 uzama gösterdiğinde, minör ekseninde %30 uzamaktadır. Majör ve minör eksenindeki uzamalar çatlak riskinin olduğu bölgeye gelmemesine rağmen sacın kırışma riskinin olduğu bölgede çoğunlukla bulunmaktadır. Kırışıklıkta 100 kN pot kuvvetine göre %25 azalma görülmektedir.

Şekil 5.2d'de görüldüğü üzere 200 kN pot kuvvetinde majör ekseninde (dikey eksen) parça %40 uzama gösterdiğinde, minör ekseninde %25 uzamaktadır. Majör ve minör eksenindeki uzamalar çatlak riskinin olduğu bölgeye gelmekte ancak sacın kırışma riskinin olduğu bölgeden uzaklaşmıştır. Kırışıklıkta 150 kN pot kuvvetine göre %50 azalma görülmektedir.

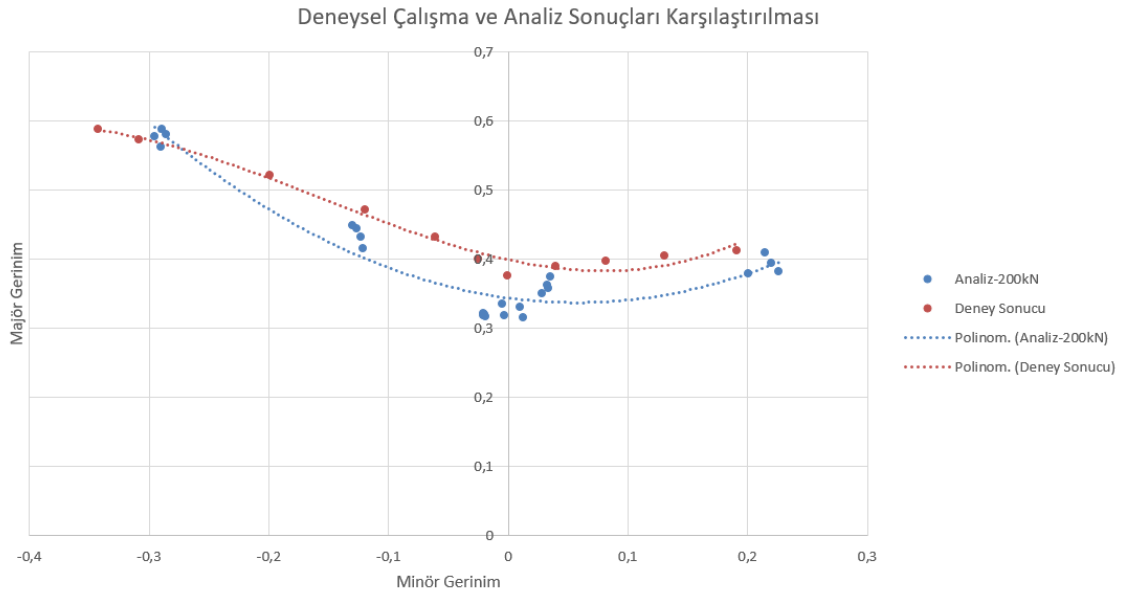
5.2 Diğer Numunelerin Sonuçları

Uygun pot baskı kuvveti değerinin 200 kN olduğu belirlendikten sonra şekil 1.13'teki test sonucunu da doğrulamak için diğer numuneler de benzer sınır koşullarına göre analiz edilerek Şekillendirme limit diyagramları elde edilmiştir. Şekil 5.3'te elde edilen şekillendirme limit diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 5.3: Farklı numuneler ile elde Edilen Şekillendirme Limit Diyagramı(200P)

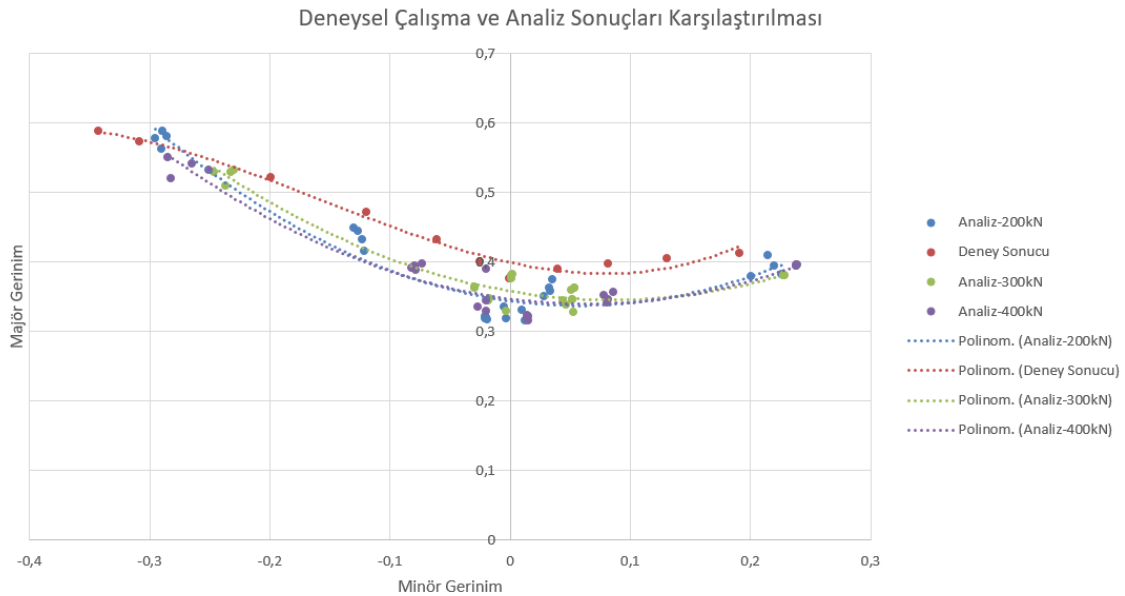
Yapılan çalışmalar sonucunda 200kN olarak belirlenen pot baskı kuvveti ile Şekil 4.4 'te bulunan diğer numuneler de benzer sınır koşulları ile analiz edilerek şekillendirme limit diyagramları şekil 5.3'te görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu diyagram ile Ravi Kumar D.[54] yapmış olduğu test çalışması şekil 5.4'te karşılaştırılmış ve oldukça yakın sonuçların alındığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4: Analiz ve Test sonuçlarının karşılaştırılması

5.3 Farklı Pot Basıncında FLD Diyagramı Değişimi

Yapılan çalışmalarda 200 kN pot baskı kuvveti değeri ile farklı numunelerin Şekillendirme limit diyagramları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafiğin farklı pot baskı kuvveti ile olan değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 5.5'te gösterildiği gibi oldukça yakın çıkmaktadır.



Şekil 5.5: Farklı Pot basıncında ŞLD test sonuçları ile karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlara göre pot baskı kuvvetinin artırılması şekillendirme limit diyagramının değişmesine etkisi çok düşük seviyede olmaktadır. Fakat pot basıncının artırılması erken yırtılmaya ve şekillendirmenin uygun olmamasına neden olmaktadır.

Tablo 5.1 Yırtılma Anında oluşan Gerinme Değerlerinin Karşılaştırılması

Test Sonucu (175mm)	Analiz Sonucu(200kN)	Hata Oranı (%)
0,491	0,461	6,11
Test Sonucu(150mm)	Analiz Sonucu(200kN)	Hata Oranı (%)
0,486	0,43	11,51
Test Sonucu(125mm)	Analiz Sonucu(200kN)	Hata Oranı (%)
0,451	0,41	9,09
Test Sonucu(100mm)	Analiz Sonucu(200kN)	Hata Oranı (%)
0,618	0,563	8,89
Test Sonucu(75mm)	Analiz Sonucu(200kN)	Hata Oranı (%)
0,423	0,412	2,6

Ravi Kumar D.[54] yapılan deneysel çalışma sonucunda numunelerin yırtılma anında ölçülen gerinim değerleri ile simülasyon sonucunda elde edilen gerinim değerleri de ayrıca karşılaştırılmıştır ve tablo 5.1’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların oldukça yakın çıktığı ve ufak farkların olduğu görülmektedir.

Simülasyon çalışması 1.numune için 4 farklı pot baskı kuvveti için tekrar edilmiş ve daha sonra farklı numune ebatları kullanılarak uzama (ŞSD-Şekillendirme Sınır Diyagramları) diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre;

1-Pot baskı kuvvetinin arttırılması ile malzeme üzerindeki kırışıklık miktarı azalmıştır.

2-Kırışma riskinin en yüksek olduğu pot baskı kuvveti 50 kN olmaktadır.

3-Malzeme yırtılma riskinin başladığı pot baskı kuvveti 200 kN olmaktadır.

4-150-200 kN arası pot kuvvetleri EDD çeliğinin 1000 mm/s zımba hızında şekillendirilmesi için ideal aralık olduğu belirlenmiştir.

Yapılan gözlemlere göre, sacı şekillendirmek için kritik parametreler pot basıncı/pot kuvveti, majör ve minör uzamalar olmaktadır. Pot basıncı ile kuvvetin uygulandığı doğrultudaki uzama olan majör eksen uzaması parametreleri arasındaki ilişki ise sacın hangi kalitede şekillendirildiğine dair fikir vermektedir. Pot baskı kuvveti değeri ayarlanarak, Majör eksendeki uzamanın 0.20-0.40 aralığında olması ve minör eksendeki uzamanın minimize edilmesi(-0.10 ile +0.10 aralığında tutulması) kırışıklığın ve yırtılmanın gerçekleşmediği “en başarılı” sac şekillendirme işlemini bu çalışma için tanımlamaktadır.

200*175 mm ebatlarında, 1 mm kalınlığındaki bir parçanın 50 mm derinlik ile şekillendirilebilmesi için 150-200 kN arasındaki pot baskı kuvvetinin kullanılabileceği ve optimum mukavemete sahip yapının eldesi için 200 kN pot baskı kuvvetinin ideal pot kuvveti olduğu tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının daha önce yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle deney düzeneği kullanılmadan zamandan ve maliyetten tasarruf edilerek imalat süreci için optimum değerler tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında ise farklı geometrilerde ve 1 mm kalınlığındaki numunelerin, sırasıyla 200,300 ve 400 kN pot kuvvetleri altındaki majör-minör uzama değerleri elde edilmiştir ve bu geometrilere ait şekillendirme sınır diyagramları çizdirilmiştir. Çizilen eğrilerin daha önce deneysel çalışması Ravi Kumar [54] tarafından yapılmış olan ve bu yüksek lisans tezine temel olan çalışmadaki değerler ile kıyaslanarak doğruluğu test

edilmiş ve oldukça yakın değerlerin bulunduğu görülmektedir. Bu değerlendirme sırasında deneysel çalışmada kullanılan süzdürme çubuğu analiz çalışmalarına dahil edilmemiştir. Ayrıca yağlama faktörlerinin net bir şekilde aktarılmaması ve kullanılan pot baskı kuvveti değerinin tam olarak yapılan deneysel çalışmada verilmemiş olması deneysel çalışma ile analiz çalışması arasında ortaya çıkan ufak farkların oluşmasına neden olmuştur. Belirli pot baskısı ve sürtünme katsayısı değerleri ile daha net ve kesin çözümler alınabilecektir.

Bu yüksek lisans çalışmasında yapılan analiz çalışmasında baskı plakası hızı, sürtünme katsayısı ve simülasyonda kullanılan malzeme kartı değerleri sabit tutularak şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiştir. Bu değerler değiştirilerek ya da farklı metotlar kullanılarak ekstra derin çekme çeliğinin şekillendirme limit diyagramına etkisi de ayrıca incelenebilir.

- [1] Türköz, M., Dilmeç, M., & Halkacı, H. S. (2018). AL-5754-O Sac Malzemenin Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramının Elde Edilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(2), 864-870.
- [2] Özduilli, Ö. (2018). Polimer kaplı metal sacların derin çekme davranışının incelenmesi.
- [3] Yıldız, H., & Kırılı, O. (2004). Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(3), 317-326.
- [4] Uysal, E., & Öztürk, F. Örnek Bir Uygulama İle Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Elde Edilmesi.
- [5] Kılıç, S., & Kacar, İ. (2019). Farklı Isıl İşlem Uygulanmış 7075 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Sınır Diyagramının Deneysel Olarak Belirlenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 512-520.
- [6] Karalı, M. (2008). Silindirik Kapların Derin Çekilmesinde Farklı Baskı Plakası Kuvvetlerinin Ve Uygulama Yöntemlerinin Kulaklaşmaya Olan Etkilerinin İncelenmesi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 41-46.
- [7] Anket, O., Koruvatan, T., & İrfan, A. Y. (2011). Sac malzemelerin şekillendirilmesinde şekillendirme sınır diyagramlarının kullanımı. Politeknik Dergisi, 14(1), 39-47.
- [8] İlhan, A. (2018). Sac metal şekillendirmede mukavemet arttırıcı parametrelerin optimizasyonu (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).
- [9] Ulu, D. (2008). Derin Çekme Prsosesi İle Üretilen Alüminyum Sac Metal Parçalarına Ait Veri Tabanı Oluşturulması. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi.
- [10] Karaağaç, İ., & Özdemir, A. (2011). Erdemir 6112 sac malzemenin hidromekanik derin çekme yöntemiyle şekillendirilebilirliği. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(4).

- [11] Prajeesh, B., Raja Satish, D., & Ravi Kumar, D. (2014). Improvement in accuracy of failure prediction in FE simulations of sheet metal forming of Al alloys. no. Aimtdr, 1-6.
- [12] Shirani, M., Agahi, A., Sadough, S. A., & Biglari, F. R. (2006). Experimental and analytical analysis of thermoplastic reinforced composite sheet deep drawing. Proceedings of the Materiaux, 1(1).
- [13] Larour, P. (2010). Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain (Doctoral dissertation, Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010).
- [14] Dilmec, M., Halkaci, H. S., Ozturk, F., Livatyali, H., & Yigit, O. (2013). Effects of sheet thickness and anisotropy on forming limit curves of AA2024-T4. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(9), 2689-2700.
- [15] Goud, RR, Prasad, KE ve Singh, SK (2014). Yüksek sıcaklıklarda ekstra derin çekme çeliğinin şekillendirilebilirlik sınır diyagramları. Procedia malzeme bilimi, 6, 123-128.
- [16] Öztürk, F., Esener, E., Toros, S., & Picu, CR (2010). 6061-O alaşımının şekillendirilebilirliği üzerine yaşlandırma parametrelerinin etkileri. Malzemeler ve Tasarım, 31 (10), 4847-4852.
- [17] Çavuşoğlu, O. (2013). Sac metal şekillendirme işlemlerinde pres hızı ve malzemenin şekillendirmeye etkilerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [18] Değirmenci, H. (2006). Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve nedenleri ile bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkileri.
- [19] Çelik, S. (2020). Sac malzemelerin şekillendirilmesinde geri yaylanma davranışının incelenmesi (Doctoral dissertation, Bursa Uludag University (Turkey)).
- [20] Mkt İmalat Teknikleri, - [http://mekatronik.kocaeli.edu.tr/upload-
/duyurular//091219073900f038f.pdf](http://mekatronik.kocaeli.edu.tr/upload-
/duyurular//091219073900f038f.pdf), 20.06.2021
- [21] Özçelik, G. (2008). Derin çekme işleminin simülasyonu (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).

- [22] Sac Şekillendirme İşlemleri, <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/mater-yaller/eminerdin@hititedutr300420180H7S9C0E.pdf>, 10.06.2021
- [23] Basak, S., Panda, S. K., & Lee, M. G. (2020). Formability and fracture in deep drawing sheet metals: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*, 170, 105346.
- [24] Srinivasu, C., Goud, R. R., Prasad, K. E., Varghese, G., Singh, S. K., & Gupta, A. K. (2015). Finite Element Simulation of Stretching Operation of EDD Steel at Different Temperatures. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1959-1967.
- [25] Kishor, N., & Kumar, D. R. (2002). Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 130, 20-30.
- [26] Singh, S. K., & Kumar, D. R. (2008). Effect of process parameters on product surface finish and thickness variation in hydro-mechanical deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1-3), 169-178.
- [27] Lin, C. T., & Kwan, C. T. (2009). Application of abductive network and FEM to predict the optimal blank contour of an elliptic cylindrical cup from deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), 1351-1361.
- [28] Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation
- [29] Naranje, V., & Kumar, S. (2014). A knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1419-1431.
- [30] Jayahari, L., Sasidhar, P. V., Reddy, P. P., BaluNaik, B., Gupta, A. K., & Singh, S. K. (2014). Formability studies of ASS 304 and evaluation of friction for Al in deep drawing setup at elevated temperatures using LS-DYNA. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 26(1), 21-31.
- [31] Takalkar, A. S., & Chinnapandi, L. B. M. (2019). Deep drawing process at the elevated temperature: A critical review and future research directions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 27, 56-67.
- [32] Hussaini, S. M., Singh, S. K., & Gupta, A. K. (2015). Formability studies of ASS 316 under different forming conditions. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1987-1995.
- [33] Jayahari, L., Gangadhar, J., Singh, S. K., & Balunaik, B. (2017). Investigation of high temperature forming of ASS 304 using BARLAT 3-parameter model. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 799-804.
- [34] Goud, R. R., Prasad, K. E., Singh, S. K., & Varghese, G. (2017). Thickness Distribution of Extra Deep Drawn steel in stretchforming at elevated Temperatures. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 827-834.
- [35] Vaidyanathan, A., Gupta, A. K., & Wahed, M. A. (2018). Deep Drawing of constrained groove pressed EDD steel sheets. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3713-3718.

- [36] Movahedian, S., Khamedi, R., Moradi, R., & Niknafs, H. (2021). Experimental and numerical analyses of carbon steel sheet metal forming process using strain rate dependent friction model. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1599-1607.
- [37] Choudhari, C. S., & Khasbage, S. S. (2021). Experimental investigation of forming parameters for square cup deep drawing process. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4261-4267.
- [38] Kurra, S., & Regalla, S. P. (2014). Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(2), 158-171.
- [39] Atrian, A., & Panahi, H. (2018). Experimental and finite element investigation on wrinkling behaviour in deep drawing process of Al3105/Polypropylene/Steel304 sandwich sheets. *Procedia Manufacturing*, 15, 984-991.
- [40] Zaky, A. M., Nassr, A. B., & El-Sebaie, M. G. (1998). Optimum blank shape of cylindrical cups in deep drawing of anisotropic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 76(1-3), 203-211.
- [41] Ha, J., Lee, M. G., & Barlat, F. (2013). Strain hardening response and modeling of EDDQ and DP780 steel sheet under non-linear strain path. *Mechanics of Materials*, 64, 11-26.
- [42] Basak, S., & Panda, S. K. (2018). Implementation of Yld96 anisotropy plasticity theory for estimation of polar effective plastic strain based failure limit of pre-strained thin steels. *Thin-Walled Structures*, 126, 26-37.
- [43] Meinders, T., van den Berg, A., & Huetink, J. (2000). Deep drawing simulations of tailored blanks and experimental verification. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), 65-73.
- [44] Verma, R. K., & Chandra, S. (2006). An improved model for predicting limiting drawing ratio. *Journal of materials processing technology*, 172(2), 218-224.
- [45] Souto, N., Andrade-Campos, A., & Thuillier, S. (2015). Material parameter identification within an integrated methodology considering anisotropy, hardening and rupture. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 157-172.
- [46] Li, R., Bohn, M. L., Weinmann, K. J., & Chandra, A. (2000). A study of the optimization of sheet metal drawing with active drawbeads. *Journal of Manufacturing Processes*, 2(4), 205-216.
- [47] Suresh, K., & Regalla, S. P. (2014). Analysis of formability in single point incremental forming using finite element simulations. *Procedia materials science*, 6, 430-435.
- [48] Gangadhar, J., Reddy, K. S. K., Goud, R. R., Varma, P., Prasad, K. E., Varghese, G., ... & kumar Singh, S. (2015). Finite element simulation of direct redrawing process of EDD steel at elevated temperatures. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1968-1977.
- [49] Kotkunde, N., Tunuguntla, M. P., Arote, A., & Gupta, A. K. (2015). Experimental and numerical study of formability for EDD steel. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3770-3777.

- [50] Saad, M., Akhtar, S., Srivastava, M., & Chaurasia, J. (2018). Role of simulation in metal forming processes. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19576-19585.
- [51] Peter, I., Fracchia, E., Canale, I., & Maiorano, R. (2019). Incremental sheet forming for prototyping automotive modules. *Procedia Manufacturing*, 32, 50-58.
- [52] Demirci, H. İ., Yaşar, M., Demiray, K., & Karalı, M. Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Cidar Kalınlığı Üzerindeki Etkisinin ANSYS-LS DYNA ile İncelenmesi. In 4th International Advanced Technologies Symposium (pp. 28-30).
- [53] Gavas, M., Köklü, U., & Alparslan, Y. E. (2010). Merkezi delikli Al-1050 sac malzemenin derin çekme özelliklerinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (elektronik)*, 7(2), 53-61.
- [54] Kumar, D. R. (2002). Formability analysis of extra-deep drawing steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 130, 31-41.
- [55] GÜLER, M., & Sadri, Ş. E. N. (2015). Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- [56] Sönmez, E. (2015). Metal şekillendirme işleminde geri esneme tahmininin 8 deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi.
- [57] Engin, K. E., & Eyercioğlu, Ö. (2019). Investigation of the effect of high punch speeds on the sheared surface temperature and quality of AISI 304 stainless steel workpiece by finite element method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1427-1440.
- [58] Şener, B. (2017). Çift gözlü kapların parçalı bastırıcı ile derin çekilmesinde en iyileme amaçlı bir algoritma geliştirilmesi.
- [59] ESENER, E. (2019). Plastisite modellerinde pekleşme etkisinin sonlu elemanlar analizi ile tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 171-181.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Proceeding Book of Sixth International Conference on Advances in Mechanical Engineering:ICAME 2021-YTU

ISBN:978-975-461-599-9 527-534 syf.

