

**HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME YÖNTEMİNDE
ŞEKİLLENDİRİCİ SIVI BASINCININ ve POT
BASKI KUVVETİNİN ÜRÜN KALİTESİNE
ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ertan AKBAYIR

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran, 2013

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME YÖNTEMİNDE
ŞEKİLLENDİRİCİ SIVI BASINCININ ve POT BASKI
KUVVETİNİN ÜRÜN KALİTESİNE ETKİSİNİN SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

Ertan AKBAYIR

DANIŞMAN

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Ertan AKBAYIR tarafından hazırlanan ‘‘Hidromekanik Derin ekme Yönteminde Şekillendirici Sıvı Basıncının ve Pot Baskı Kuvvetinin Ürün Kalitesine Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi’’ adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 01/07/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği **Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : (Prof. Dr.Kubilay ASLANTAŞ)

Başkan :Prof. Dr. Ömer SOYKASAP
AKÜ Mühendislik Fakültesi

Üye :Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
AKÜ Teknoloji Fakültesi

Üye :Doç. Dr. Abdurrahman KARABULUT
AKÜ Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü. tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi.
- Görsel. işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu.
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu.
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi.
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı.
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

01/07/2013

Ertan AKBAYIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME YÖNTEMİNDE ŞEKİLLENDİRİCİ SIVI BASINCININ ve POT BASKI KUVVETİNİN ÜRÜN KALİTESİNE ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Ertan AKBAYIR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Bu çalışmada derin çekme işleminin imalat tekniklerinden birisi olan hidromekanik derin çekme yöntemi üzerinde durulmuştur. Hidromekanik derin çekme yönteminde bir karşıt sıvı basıncı yardımıyla, sac malzeme hareketli bir zımbanın şeklini almaktadır. Hidromekanik yöntemin en büyük üstünlüğü ise benzer ölçülere sahip birçok ürünün aynı kalıptan sadece zımba isimli parçanın değişimi ile elde edilebilmesine olanak sağlamasıdır. Hidromekanik derin çekme yönteminde dişi matrise gerek duyulmamaktadır. Sadece formu kazandırılacak olan zımbanın montajı ile o forma sahip ürün elde edilmiş olur.

Hidromekanik derin çekme yönteminde ürün kalitesini etkileyen en önemli unsurlar ise şekillendirici sıvı basıncı ve pot baskı kuvvetidir. Bu tez çalışmasında bu iki değişkenin incelmeye olan etkileri ve şekillendirme güvenilirlikleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonlu elemanlar analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler neticesinde hidromekanik derin çekme yönteminde belirli bir geometrinin şekillendirilmesi için yetersiz basınç bölgesi, güvenli bölge, kırılma bölgesi ve yırtılma bölgesi olmak üzere dört farklı bölge olduğu belirlenmiştir.

2013, ix + 79 sayfa

Anahtar Kelimeler: Derin Çekme Yöntemi. Hidromekanik Derin Çekme. Sac Metal Şekillendirme Yöntemleri. Hidroform sac şekillendirme.

ABSTRACT

M.Sc Thesis

INVESTIGATION OF BLANK HOLDER FORCE AND FORMING COUNTER LIQUID PRESSURE EFFECTS ON QUALITY OF PRODUCT IN HYDROMECHANICAL DEEP DRAWING PROCESS BY USING FINITE ELEMENT METHOD

Ertan AKBAYIR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kubilay ASLANTAS

Hydromechanical deep drawing, one of the deep drawing methods is studied in this research. Sheet metal takes the form of punch geometry via liquid counter pressure. Too many type of product can be produced with same die design only with changing the punch. Because there is no need to female die to shape the sheet metal in hydromechanical deep drawing process.

The most important parameters that directly effects the quality of product are the counter liquid pressure and blank holder force. In this study, the effect of two parameter on product quality has been investigated. This investigations made with help of 33 finite element analysis. At the end of this study, four different zones are drawn on blank holder force-counter pressure diagram. These zones are insufficient pressure zone, wrinkle zone, tearing zone and safe zone.

2013, ix + 79 pages

Key Words: Deep Drawing method. Hydromechanical Deep Drawing. Sheet Metal forming Methods. Hydroforming of sheet metal.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay Aslantaş'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşım Sayın Yalçın Topaçoğlu'na, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ertan AKBAYIR

AFYONKARAHİSAR, 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | ix |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ | 3 |
| 2.1 Geleneksel Derin Çekme İşlemi | 3 |
| 2.2 Hidroform Şekillendirme İşlemleri..... | 4 |
| 2.3 Hidromekanik Derin Çekme İşlemi | 6 |
| 2.3 Sac Metal Derin Çekilmesi İşleminin İncelenmesi..... | 10 |
| 2.3.1 Hidromekanik Derin Çekme İşleminin Temel Bileşenleri..... | 12 |
| 2.4 Derin Çekme Oranı | 14 |
| 2.5 Şekillendirme Sınır Diyagramı | 14 |
| 2.5.1 Şekillendirme Sınır Diyagramının Deneysel Olarak Belirlenmesi | 17 |
| 2.5.2 Şekillendirme Sınır Diyagramının Teorik Olarak belirlenmesi | 20 |
| 2.6 İzotropi-Anizotropi | 21 |
| 2.7 Pekleşme üsteli..... | 22 |
| 2.8 Süneklik | 23 |
| 2.9 Gevreklik..... | 23 |
| 2.10 Tokluk..... | 23 |
| 2.11 Sonlu Elemanlar Yöntemi..... | 23 |
| 2.11.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması..... | 24 |
| 2.12 Sonlu Elemanlar Yöntemi Yazılımları..... | 30 |
| 3. MATERYAL ve METOT | 32 |
| 3.1 Analizlerde Ele Alınan Değişkenler | 33 |
| 3.2 Analiz Aşamaları | 34 |
| 3.2.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması | 34 |
| 3.2.2 Şekillendirilecek Sac Malzemesi | 37 |
| 3.2.3 Analiz İçin Oluşturulan Mesh Bilgileri..... | 39 |

| | |
|---|----|
| 3.2.4 Kullanılan Sınır Şartları | 40 |
| 3.2.5 Zımba İlerleme Miktarı ve Hızı | 42 |
| 4.1 Silindirik Zımba İle Yapılan Hidromekanik Derin Çekme Analizlerinde Bulunan Şekillendirme Bölgelerine Ait Sonlu Elemanlar Analizlerinin İncelenmesi | 48 |
| 4.1.1 Yetersiz Basınç bölgesi Sonlu elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi | 49 |
| 4.1.2 Kırışma Bölgesi Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi | 54 |
| 4.1.3 Güvenli Bölge Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi | 58 |
| 4.1.4 Yırtılma Bölgesi Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi..... | 61 |
| 4.2 Kare Zımba İle Yapılan Hidromekanik Derin Çekme Analizleri | 65 |
| 4.3. Kare Zımba İle Yapılan Geleneksel Derin Çekme Analizi | 68 |
| 4.4 Geleneksel Derin Çekme Yöntemiyle Tek İşlem ile İmal Edilemeyecek Geometrilere Hidromekanik Yöntem Kullanılarak Tek İşlem ile İmal Edilebilirliği | 69 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ | 75 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 77 |
| 7. ÖZGEÇMİŞ..... | 79 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| K: | Mukavemet Katsayısı |
| MPa: | Megapascal |
| mm: | milimetre |
| n: | pekleşme üsteli |
| r: | plastik gerilme oranı |
| $\bar{\sigma}$: | Gerçek Gerilme |
| ε_0 : | ilk uzama |
| $\bar{\varepsilon}$ = | Gerçek uzama |

Kısaltmalar

| | |
|------|-------------------------------|
| SEY: | Sonlu elemanlar yöntemi |
| ŞSD: | Şekillendirme sınır diyagramı |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Şekil 2.1. Derin çekme işleminin bileşenlerini gösteren şematik bir ifade..... | 4 |
| Şekil 2.2. Basit bir hidroform yönteminde sac şekillendirme işlemi..... | 5 |
| Şekil 2.3. Hidroform yöntemiyle şekillendirme tipleri..... | 6 |
| Şekil 2.4. Hidromekanik derin çekme yönteminde diyafram kullanımı..... | 7 |
| Şekil 2.5 Çeşitli sac şekillendirme yöntemleri..... | 8 |
| Şekil 2.6. Hidromekanik ve geleneksel derin çekme işlem basamakları..... | 10 |
| Şekil 2.7. Geleneksel derin çekme işleminde saca uygulanan kuvvetler..... | 11 |
| Şekil 2.8 Şekillendirme Sınır Diyagramı..... | 16 |
| Şekil 2.9. GOM optik ölçüm sistemi..... | 18 |
| Şekil 2.10 Şekillendirme Sınır Diyagramı..... | 19 |
| Şekil 2.11 Probleme uygun modelleme ve sınır şartlarının şematik bir ifadesi..... | 25 |
| Şekil 2.12 Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar modeli..... | 26 |
| Şekil 2.13 Mesh ağı eğrissellik kontrolünü gösteren şematik bir ifade..... | 26 |
| Şekil 2.14 Düğüm noktalarının sayısal değerlendirilmesi..... | 29 |
| Şekil 2.15 Sınır şartları girilmesi gereken bileşenleri gösteren şematik bir ifade..... | 31 |
| Şekil 3.1 Analizi yapılacak geometri ölçüleri..... | 35 |
| Şekil 3.2 Sonlu eleman modeli..... | 35 |
| Şekil 3.3. Sonlu elemanlar modelinin kurulumu..... | 36 |
| Şekil 3.4 Analizlerde kullanılan St15 malzemesinin Gerilme-Gerinme Eğrisi..... | 38 |
| Şekil 3.5 Analizlerde kullanılan St15 malzemesinin Şekillendirme Sınır Diyagramı... | 39 |
| Şekil 3.6 Analiz bileşenlerinin yapay sinir ağı durumu..... | 40 |
| Şekil 4.1 Yetersiz Sıvı Basıncı neticesiyle oluşan durumu gösteren şematik bir ifade.. | 46 |
| Şekil 4.2 Pot baskısı ve Şekillendirici Sıvı Basıncı İlişkisi..... | 48 |
| Şekil 4.3 Yetersiz Basınç Bölgesindeki Kalınlık Değişimi..... | 49 |
| Şekil 4.4 Bağlı Kalınlık Değişimi..... | 50 |
| Şekil 4.5 Yetersiz Basınç Bölgesindeki Birim Uzamalar..... | 51 |
| Şekil 4.6. Yetersiz şekillendirme Bölgesinde ürün üzerindeki şekillenme tipleri..... | 52 |
| Şekil 4.7 Yetersiz Basınç Bölgesi sınırında ürün şekillendirme güvenilirliği..... | 52 |
| Şekil 4.8 Yetersiz Basınç Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı..... | 53 |
| Şekil 4.9 Kırışma Bölgesindeki kalınlık değişimi..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.10 Yırtılma Bölgesindeki Birim Uzama Miktarları..... | 55 |
| Şekil 4.11 Kırışma Bölgesinde Şekillendirme Tipleri..... | 56 |
| Şekil 4.12 Kırışma Bölgesindeki şekillendirme işleminde güvenilirlik..... | 56 |
| Şekil 4.13 Kırışma Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı..... | 57 |
| Şekil 4.14 Güvenli bölgede sac malzeme kalınlığı farklılıkları..... | 58 |
| Şekil 4.15 Güvenli bölgedeki Birim Uzama Miktarları..... | 59 |
| Şekil 4.16 Güvenli bölgede Şekillendirme Tipleri..... | 59 |
| Şekil 4.17 Güvenli bölgedeki şekillendirme işleminde güvenilirlik..... | 60 |
| Şekil 4.18 Yırtılma Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı..... | 61 |
| Şekil 4.19 Yırtılma bölgesinde sac malzeme kalınlığı farklılıkları..... | 62 |
| Şekil 4.20 Yırtılma bölgesindeki Birim Uzama Miktarları..... | 62 |
| Şekil 4.21 Yırtılma bölgesinde Şekillendirme Tipleri..... | 63 |
| Şekil 4.22 Yırtılma Bölgesindeki şekillendirme işleminde güvenilirlik..... | 64 |
| Şekil 4.23 Yırtılma Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı..... | 64 |
| Şekil 4.24 Kare Zımbayla yapılan hidromekanik derin çekme analizinde geometrikk Ölçüler..... | 65 |
| Şekil 4.25. Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme işleminde yetersiz basınç bölgesine ait bir ürün analizi..... | 66 |
| Şekil 4.26. Yetersiz pot kuvveti sonucu analiz sırasındaki kırışma..... | 67 |
| Şekil 4.27 karesel zımba ile hidromekanik derin çekme analizinde sac kalınlaşması... | 68 |
| Şekil 4.28. kare zımba ile yapılan geleneksel derin çekme işlemi..... | 69 |
| Şekil 4.29 Hidromekanik yöntem ile tek aşamada imal edilebilen bir geometri..... | 70 |
| şekil 4.30 Zımbanın zamana göre konumu..... | 71 |
| Şekil 4.31 Şekillendirici sıvı basıncının zamana göre değişimi..... | 73 |
| Şekil 4.32 Üç aşamalı hidromekanik derin çekme işleminde incelme miktarı..... | 74 |
| Şekil 4.33 Üç aşamalı hidromekanik derin çekme işleminde sac malzemenin zımbaa Formunu kazanması..... | 74 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 3.1 Analizlerde kullanılan sınır şartları | 41 |
| Çizelge 4.1 Sonlu Elemanlar Analizleri Güvenilirlik Sonuçları..... | 45 |
| Çizelge 4.2 Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme işleminde kullanılan pot baskı kuvvetleri ve şekillendirici sıvı basınç miktarları | 66 |

1. GİRİŞ

Teknoloji, insanlık tarihi boyunca daha az maliyetle, kaliteden ödün vermeden daha hızlı ve daha yüksek sayıda üretimin peşinde olmuştur. Daha ucuz ve daha kaliteli imalat için ise çoğu zaman alışlagelmiş imalat tekniklerinden sıyrılarak yeni imalat fikirleriyle üretime devam edilmiştir. Yeni imalat teknikleri, üzerinde çalışılması gereken birçok alanı içerebilmektedir. Birtakım bilim dallarında gerekli deneyler yapılmadan herhangi bir teknoloji geliştirmek çoğu zaman imkansız olabilir. Makine tasarımı konusunda da bu böyledir. Günümüzde makine tasarımı konusunda bilgisayarlardan oldukça faydaniılmaktadır. Mühendislik problemleri yüksek hızda, bilgisayarlar tarafından simule edilebilmektedirler. Her ne kadar bu simülasyonlar yaklaşık çözüm verseler de gerçeğe yaklaşım çoğu zaman işimize yarayacak kadar sonuca yakın olabilmektedir. Günümüzde bu simülasyonlar bile genelden özele doğru belirli bir konuya doğru odaklanmışlardır. Böylece yapılacak işe uygun komut ve özelliklerin biraraya getirilmesiyle istenen konuya odaklanmış ve bu konu hakkında doğrulamaların fazlasıyla yapılmış yazılımlar ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında alışılmış imalat tekniklerinden birisi olan derin çekme işleminin ülkemizde henüz yeterli sayılabilecek ölçüde uygulama alanı bulamamış bir yeniliği olan hidromekanik derin çekme yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Hidromekanik derin çekme işleminin en büyük avantajlarından birisi, şekillendirme işlemi sırasında incelmelerin oldukça az olmasıdır. Geleneksel derin çekme işleminde incelmeler hesaba katılarak, işlem başlangıcında daha fazla kalınlığa sahip sac malzemeler tercih edilirken, hidromekanik derin çekme yönteminde istenenden daha kalın sac kullanma ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Böylelikle, bu yöntem kullanılarak daha az hammadde kullanılmış olmaktadır. Daha az hammadde kullanımı ile ülke ekonomisine katkı sağlanmış olacaktır. Aynı zamanda hidromekanik yöntemde şekillendirilecek olan sac malzeme sıvı tarafından şekillendirildiği için metal-metal sürtünmesinden kaynaklanan yüzey kusurları tamamen ortadan kalkmış olmaktadır. Diğer yandan hidromekanik derin çekme işlemi ile tek işlem basamağıyla ürün elde edilebilmektedir. Sıvı basıncıyla yapılan bu şekillendirme işleminde ara şekillendirme işlemlerine gerek kalmaz dolayısıyla bu ara işlemlerdeki kalıp maliyetleri tamamen yok edilmiş olur. Ayrıca yine bu işlemlerden geçmesi için gereken makine teçhizat ve işgücü giderleri de yok edilmiş

olacaktır. Hidromekanik derin çekme işlemlerinde birbirine benzer ürünlerin aynı kalıpta üretilmesi de mümkündür. Basınçlandırılmış sıvı, sac malzemeye zımbanın formunu kazandırdığı için zımbanın geometrisini değiştirerek aynı kalıpta birden fazla ürün çeşidi elde edilebilmektedir. Böylelikle benzer ürünler için de ayrı ayrı kalıplar imal etmek gerekmemektedir. Bu durum, imalatçıların başlangıç maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüş olacaktır. Sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinde üretim aşamaları önemli ölçüde azaltıldığından, üretim hızı da önemli ölçüde arttırılmış olmaktadır. Kısaca özetlemek gerekirse hidromekanik derin çekme işlemiyle, başlangıç maliyetleri önemli ölçüde azalmakta ve imalat esnasındaki maliyetler azalmaktayken kalite ve imalat kapasitesi de artmış olmaktadır. Hidromekanik derin çekme yöntemi tüm bu üstünlükleriyle, üzerinde oldukça çalışılması gereken bir konu olarak karşımızda durmaktadır.

Yapılan bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirli bir ürün geometrisi için değişkenlerin geometri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonlu elemanlar programı olarak hidromekanik derin çekme işleminde henüz yeni ancak oldukça hızlı ve gerçekçi çözümler veren Stampack isimli yazılımdan faydalanılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

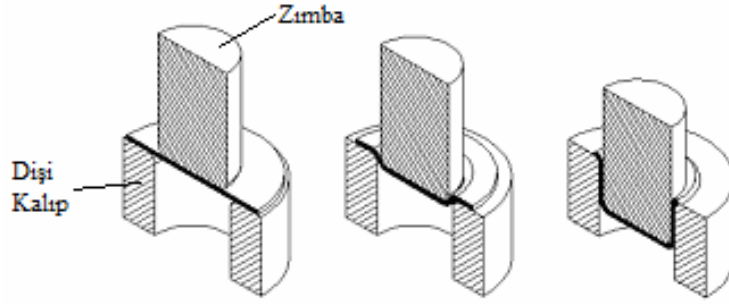
2.1 Geleneksel Derin Çekme İşlemi

Pek çok sanayi uygulamasında sıklıkla kullanılan metal şekillendirme işlemlerinde birisi de “derin çekme” işlemidir. Derin çekme yöntemi metal sac şekillendirme işlemlerinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Geleneksel derin çekme işleminde, şekillendirilmek istenen sac malzeme, dişi matris ve zımba arasında şekillendirilmektedir.

Uygulama esnasında zımba ve dişi matris arasında, sac kalınlığından biraz daha fazla boşluk bırakılır. Sac malzeme bu boşluğa girerek şekillendirilmiş olmaktadır. Ancak şekillendirme sırasında bazı kusurlar oluşmaktadır. Bunların en önemlisi marullanma diye tabir edilen kırışma kusurudur. Şekillendirme esnasında kırışan sac malzemenin atalet momenti büyümüş olur. Atalet momenti büyüyen sac malzemenin ise şekillendirilmesi zorlaşır. Kırışmayı engellemek için ise henüz şekillendirilmemiş sac malzeme üzerine pot baskısı diye tabir edilen bir metal plaka konur ve bu metal plaka ile sac malzeme üzerine yük uygulanır. Böylelikle sac malzemedeki kırışmanın önüne geçilmiş olur. Pot baskısı kırışmanın önüne geçebilir ancak şekillendirilecek sac malzemenin zımbaya yaklaşan kısımlarındaki kalınlaşmanın önüne geçemez. Kalınlaşan sac malzeme, dişi matris ve zımba arasında bulunan boşluğun üstüne çıktığında ise artık çok daha fazla şekillendirme yüküne ihtiyaç duyulur. Şekillendirme işleminden sonra ortaya çıkan ürünün geometrisinde ise bozukluklar oluşur. zımba ve dişi matris ise ömrünü daha hızlı bir şekilde tüketir.

Küçük çaplı derin çekme işlemleri göz önüne alındığında ise yukarıda bahsedilen kalınlaşmış sac, şekillendirme boşluğuna sığmadığı için burada ortaya çıkan ısı, şekillendirici zımbanın dişi matristen daha fazla genleşmesine yol açar. Genleşen zımba şekillendirme boşluğunu küçültmeye başlar ve daha küçük boşlukta daha yüksek ısı ortaya çıkar ve bu işlem şekillendirici zımbanın kırılmasına kadar devam edebilir. Tüm bu olumsuzluklardan dolayı geleneksel yöntem ile derin çekme işlemi diğer kesme ve bükme yöntemiyle şekillendirme işlemlerine nazaran daha yavaş ve daha dengeli çalışan pres makineleriyle yapılmalıdır. Bu da günümüzün yüksek kapasiteli ve düşük maliyetli imalat anlayışına ters düşmektedir.

Geleneksel derin çekme işleminde temel olarak sac malzemenin, zımba ile dişi matris arasında şekillendirilmesidir. Bu işlemin en temel bileşenleri de yine aynı şekilde zımba ve dişi matris olduğunu söyleyebiliriz. Ancak her zaman olmasa da sac şekillendirme uygulamasında baskı plakası da kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de geleneksel derin çekme işleminin temel bileşenlerini gösteren şematik bir ifade yer almaktadır.

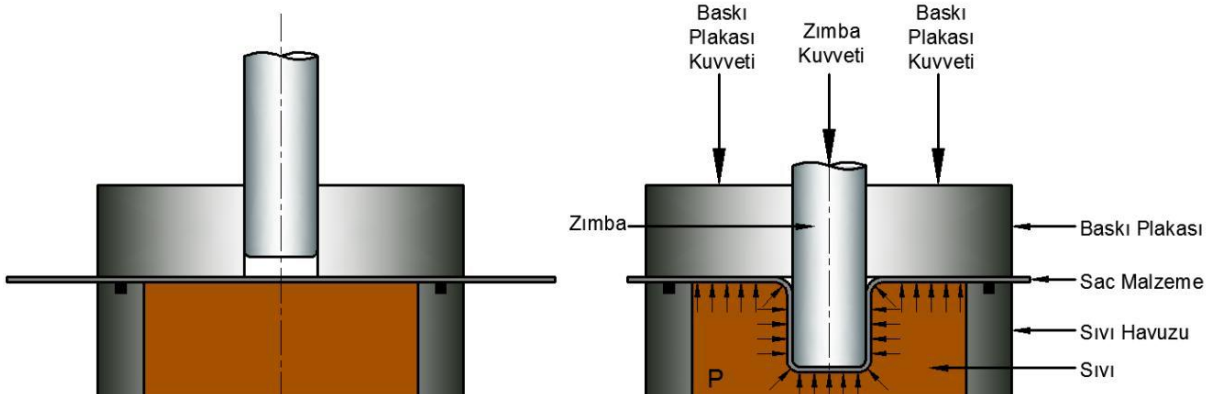


Şekil 2.1 Geleneksel derin çekme işleminin temel bileşenlerini gösteren şematik bir ifade

Günümüzde geleneksel metal şekillendirme yöntemi yerini sıvı basınçlı metal şekillendirmeye bırakmaktadır. Sıvı basınçlı metal şekillendirme yöntemi genel olarak hidroform yöntem olarak bilinmektedir.

2.2 Hidroform Şekillendirme İşlemleri

Hidroform yöntem, başta daha yüksek derin çekme oranı elde etme olmak üzere diğer pek çok avantajından dolayı geleneksel derin çekme işlemine tercih edilmektedir. Şekil 2.2’de basit bir hidroform yöntemi basit bir şekillendirme işlemi görülmektedir. Sızdırmazlığı sağlanmış bir basınç havuzunda sac malzemeye basınç uygulanmakta ve sac malzeme istenen şekil kazandırılmış olmaktadır (Baaksh-JooybariM., Goodarzian H., Okazi M. 2010)



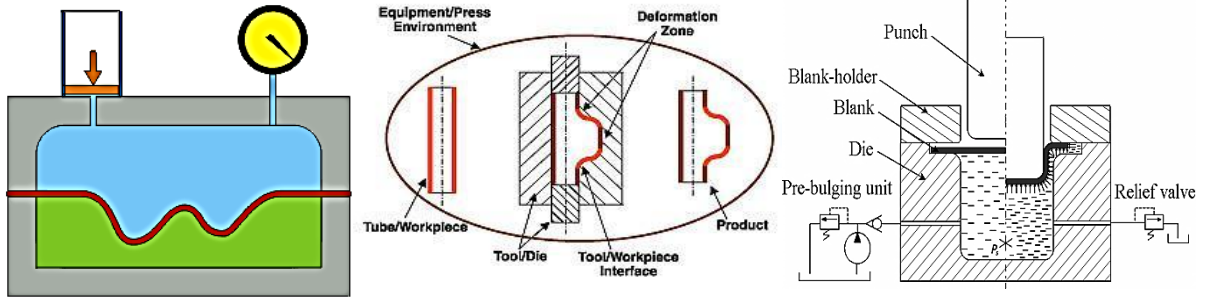
Şekil 2.2 Basit bir hidroform yönteminde sac şekillendirme işlemi

Hidroform yöntemi veya hidrolik şekillendirme, sac şekillendirme işlemlerinin başlıcaları arasında yer almaktadır. Bu şekillendirme yöntemi ikinci dünya savaşının ilk yıllarında geliştirilmiştir. Üzerinde yeteri kadar çalışılmamış olmasından dolayı Alman uçak endüstrisindeki uygulamaları sınırlanmıştır. Ancak 1990'lı yıllardan sonra otomobil endüstrisi başta olmak üzere pek çok sanayi alanında daha fazla ilgi çekmiştir (Zhang S. H., 1999).

Hidroform yöntemi genel olarak aşağıdaki araştırma konularında çalışılmaktadır;

- Hidroform yöntemiyle düz sac şekillendirme
- Hidroform yöntemiyle boru şekillendirilmesi (borusal elemanların hidroşişirilmesi)
- Hidromekanik derin çekme

Hidroform yöntemlerin, otomotiv endüstrisinin güçlü teknik gereksinimleriyle hızlı bir şekilde gelişeceğine inanılmaktadır. Hidroform yönteminin gelişmesinde bilgisayar destekli simülasyonlar etkin rol oynayabilir (Zhang S. H., 1999). Şekil 2.3'de sıvı basıncı yardımıyla gerçekleştirilen çeşitli sac şekillendirme işlemlerini gösteren şematik ifadeler yer almaktadır. Bu gibi çeşitli uygulama yöntemleri ile sac malzemelere ve hatta boru malzemelere de istenilen form kazandırılabilir.

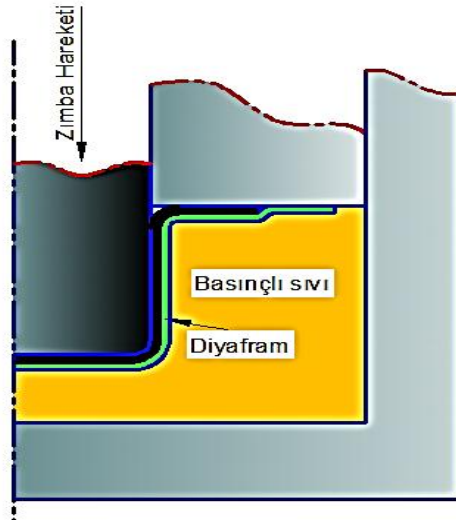


Şekil 2.3 Hidroform yöntemiyle düz sac şekillendirme, hidroform yöntemiyle boru şekillendirmesi, hidromekanik derin çekme (soldan sağa sırayla)

Bu tez çalışmasında hidroform metal şekillendirme yöntemlerinden birisi olan hidromekanik derin çekme yöntemi üzerinde durulacaktır.

2.3 Hidromekanik Derin Çekme İşlemi

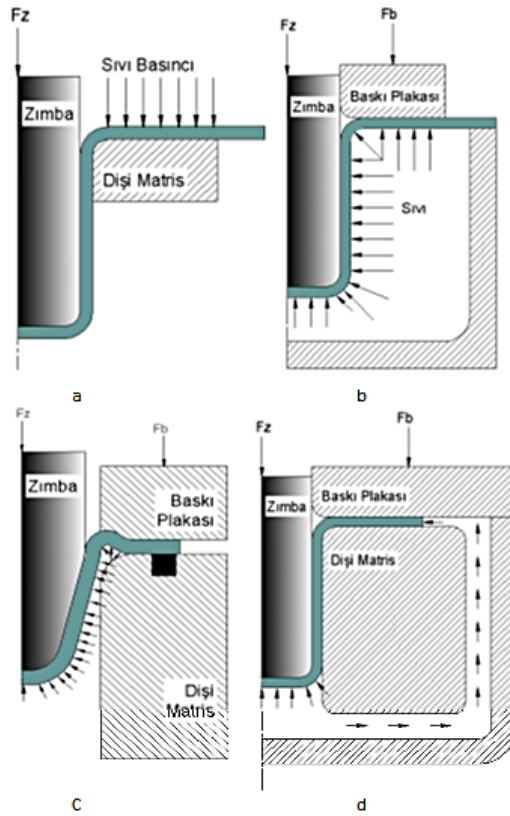
Hidromekanik derin çekme işlemi bir çeşit soft şekillendirme teknolojisidir. Şekillendirici matris havuzunda, dışı matris olarak su, yağ veya diğer sıvılar kullanılabilir. İş parçasının şekli zımba tarafından verilmektedir. Geleneksel yöntemdeki dışı matrisin yerini ise içi sıvı dolu olan bir basınç havuzu almıştır. Basınç havuzu içerisindeki basıncı istenen değerde tutabilmek için ise fazla basınç anında dışarı istenildiği miktarda sıvı atabilmek için bir boşaltma açıklığı bulunmaktadır. Bu boşaltma açıklığı öncesinde ise bir basınç valfi ve içerideki basıncı okuyabilmek için bir adet manometre kullanılmaktadır. Şekillendirici sıvıyı kontrol altında tutmak için ise sac malzeme ile sıvı arasında bir diyafram malzeme kullanılabilir. Böylece diyafram kullanımıyla geleneksel yöntemdeki dışı matris-sac arasındaki sürtünme tamamen ortadan kaldırılabilir ve böylece daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabilmektedir. Şekil 2.4’de bu duruma örnek bir hidromekanik derin çekme yöntemi gösterilmektedir (Dancert J., Kang D.C., Nielsen K.B., Zhang S.H. 1998).



Şekil 2.4 Hidromekanik derin çekme yönteminde diyafram kullanımı

Hidromekanik derin çekme yönteminin pek çok uygulama çeşidi bulunmaktadır. Her bir uygulama çeşidinin ise farklı üstünlükleri bulunmaktadır. Bazı uygulama çeşitleri seri imalatı daha kolay kılarken diğeri daha derin sac şekillendirmesini mümkün kılabilmektedir. Geometrinin tipine göre ve uygulama durumuna göre bu çeşitlerden hangisinin kullanılabileceği belirlenebilmektedir. Şekil 2.5'te bunlardan bazıları görülmektedir. Şekil 2.5.a'da pot baskı kuvveti olarak kullanılan sıvı basıncı görülmektedir. Bunun amacı pot çemberi ve sac malzeme arasında oluşan yüksek sürtünme kuvvetini engellemektir. Pot çemberi ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin ortadan kaldırılmasıyla birlikte sac malzeme daha derin şekillendirilebilmektedir. Ancak bu yöntem genel itibariyle geleneksel derin çekme yöntemi olduğu için geleneksel yöntemdeki sıkıntılar burada da yaşanmaktadır. Şekil 2.5.b'de ise sac malzemeyi şekillendiren sıvı basıncıdır ve bu sefer dışi matris ile sac malzeme arasındaki sürtünme kuvveti ortadan kaldırılmıştır. Diğer yandan bu gibi hidromekanik derin çekme çeşitlerinde sıvı basıncı temas ettiği her noktaya dik kuvvet uygular. Bu dik kuvvet uygulaması ile de sac malzeme zımbaya daha rahat sıvanarak geleneksel yöntemde olduğu gibi dışi matris ile zımba arasında oluşan makaslama etkisi hidromekanik yöntemlerde yer almaz. Hidromekanik yöntemde dışi matris değil, sıvı basıncı sacı zımbaya sıvamaktadır. Şekil 2.5.c'de ise en genel kullanım çeşidi görülmektedir. Dikkat edilecek olursa sac malzeme bir sanki bir eşiği atlıyormuş gibi davranmaktadır. Bu duruma orjinalinde “hydro-bulging” olarak tabir edilen hidro-şişme

olayı denir. Bu hidro-şişme olayı geleneksel yöntemlerde sacı gerdirerek kırışıklarını almaya yarayan süzdürme çubuğuna benzemektedir. Hidro-şişme, zımbaya yaklaşan ve yaklaşarak yer yer kalınlaşıp yer yer kırışan sac malzemeyi teğetsel gerilmelere maruz bırakır. Kırışıkları giderilen sac malzemenin atalet momenti düşmüş olur. Böylece hidro-şişme ile birlikte sac daha derin çekilebilmektedir. Aynı zamanda bu duruma “pre-bulging” ismi de verilmektedir. Şekil 2.5.d’de ise temelde geleneksel yöntemle şekillenen sac malzemenin altında sıvı basınçlandırılır ve basınçlanan sıvı sac arkasına yönlendirilir.



Şekil 2.5 Çeşitli sac şekillendirme yöntemleri

Geleneksel yöntemde derin çekilebilirlik oranı 2.2 oranına kadar çıkabilirken. hidromekanik derin çekme yönteminde derin çekilebilirlik oranı 2.8’e kadar çıkabilmektedir. Bu sebeple otomotiv ve havacılık gibi birçok sanayi alanında uygulama imkanı bulmuştur. Devamlı süregelen iyileştirme ve gelişmelerle birlikte birlikte bu yöntem diğer şekillendirme tekniklerinin yerini almaktadır. Çünkü bu yöntem ürünlerin

kalitesini arttırırken imal edilebilirliğini düşürmemektedir (Danckert J., Zhang S.H., 1998).

Hidromekanik derin çekme işlemi aşağıdaki üstünlüklere sahiptir.

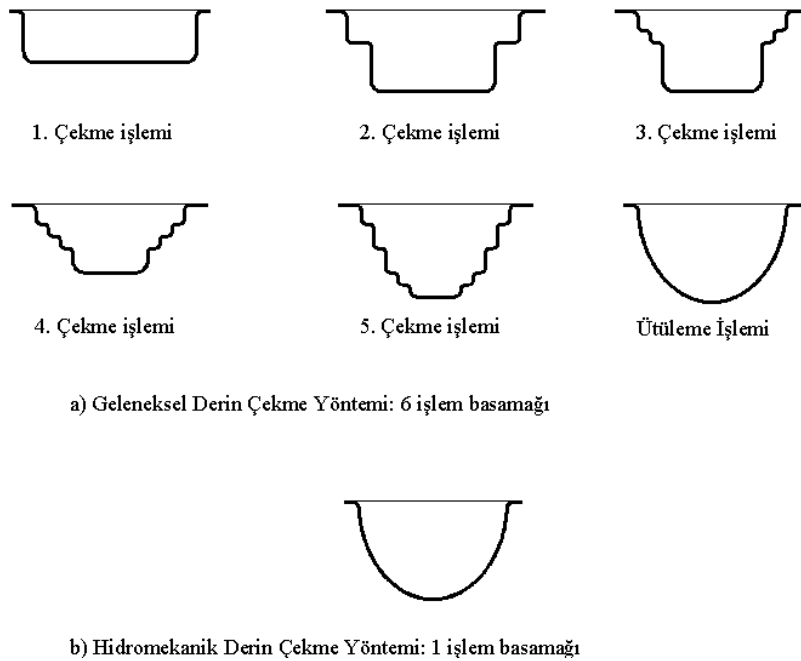
- a) Kırışıklık önleyici etki, kırılma önleyici etkiyi de beraberinde getirdiğinden daha yüksek çekme oranlarına ulaşabilmektedir. Böylelikle işlem adım sayıları azalmakta ve kalibre adı verilen ürünün son geometrisinin doğrulandığı ve parçanın ütülendiği adımlara gerek kalmamaktadır.
- b) Kırışıklıklar, karşı basınç yardımıyla giderilerek ölçüsel doğruluk yükseltilmiş olur.
- c) Dişi matrisin basınç havuzu ile olan yüzey sınırında metal teması olmadığı için matrisin ömrü oldukça yüksektir. Bu sebeple kalıp ömrü de önemli ölçüde yüksek olur.
- d) Sac metal malzeme, dişi matris ve zımba arasında, geleneksel derin çekme işleminde olduğu gibi çok küçük şekillendirme boşlukları arasında form verilmeye çalışmadığı için elde edilen üründe incelmeler çok azdır. Bu sayede sac kalınlığı lineer olan ürünler elde edilebilmektedir.
- e) Bu işlem geleneksel derin çekme yöntemi için uygun olmayan karmaşık şekilli iş parçalarının imalatı için kullanılabilir. Ayrıca benzer ölçülerde ancak farklı geometrilerdeki parçaların üretimi aynı kalıpla yapılabilir. Şekillendirici basınçlı sıvı, saca sürekli zımbanın formunu kazandırdığı için aynı kalıpta zımbayı değiştirerek birbirinden farklı ürünlerin üretilebilmesi mümkündür.

Ancak tüm bu üstünlüklere karşılık hidromekanik yöntemde yüksek basınçlarla çalışmak ve yüksek pot çemberi kuvvetlerinde çalışmak gerekmektedir (Danckert J., Zhang S.H., 1998).

Geleneksel yöntemde incelmeler gözönünde bulundurularak imal edilmesi istenen sac parçaları daha kalın seçilmektedir. İmalat aşamasında incelen sacın kritik kalınlıkta olması amaçlandığı için böyle bir seçim yapılmaktadır. Ancak hidromekanik yöntemle imal edilen ürünlerin daha lineer sac kalınlıklarına sahip olmasıyla birlikte daha kalın sac

kullanma gereksinimi ortadan kalkmış oldu ve böylelikle uçak ve uzay sanayisinde daha optimal parçalar üretilebilir duruma gelindi.

Şekil 2.6’da geleneksel derin çekme yöntemiyle birden fazla aşamada imal edilen bir ürünün hidromekanik derin çekme yönteminde tek aşamada imal edilebileceğini gösteren bir şematik ifade yer almaktadır. Tek aşamada imal edilebilmesine rağmen, yüzey kalitesi bakımından ve sac kalınlığı dağılımı bakımından hidromekanik derin çekme ile imal edilen ürünler geleneksel yöntemle üretilene nazaran daha da kalitelidir.



Şekil 2.6 Hidromekanik ve geleneksel derin çekme işlem basamakları

2.3 Sac Metal Derin Çekilmesi İşleminin İncelenmesi

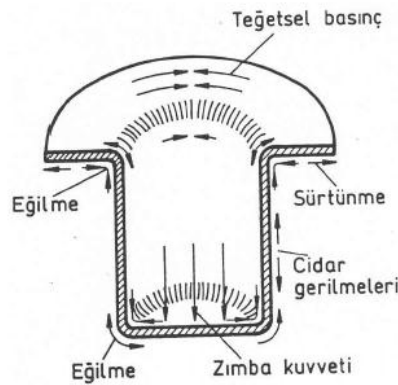
Derin çekme işlemi, iki boyutlu düzlemsel geometriye sahip sac malzemelerin çekme kalıbı elemanları yardımıyla preste çökertilmesi sonucu, belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçaların elde edilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, sac malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Yöntem dairesel, kare veya karmaşık şekilli parçaların üretiminde birçok avantaj sağlamaktadır. Bu yöntemde, levha halindeki malzemeler, zımba denilen itici kalıp

elemanı ile kalıp boşluğuna belirli bir kuvvet ve hızda itilmektedir. Bu işlem sonucunda, belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilmektedir (Özbay V., Özek C., 2012).

Üretim esnasında sac malzeme üzerindeki farklı bölgeler farklı gerilmelere maruz kalmaktadırlar. Bunlar;

- sac malzemenin dişi matris ile teması esnasındaki sürtünmeden oluşan gerilmeler
- sac malzemenin pot çemberi ile teması esnasındaki sürtünmeden oluşan gerilme
- zımbaya yaklaşan taneciklerin birbirine yaklaşması neticesinde sac malzeme içerisinde oluşan baskı gerilmeleri
- dişi matris kavisi üzerindeki eğilme gerilmeleri
- zımba tarafından şekillendirilen sac malzemenin yanal yüzeylerinde oluşan çekme gerilmesi

oluşan tüm bu kuvvetler şekillendirmeyi zorlaştırmakta ve şekillendirme işlemini bazı sınırlar içinde kalmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.7’de geleneksel derin çekme işleminde saca etkiyen yükleri gösteren şematik bir ifade yer almaktadır. Şekillendirme esnasında teğetsel basınç malzemenin kalınlaşmasına sebep olur. Kalınlaşan malzeme beklenenin üstüne çıktığı anda ise zımba ve dişi matris arasındaki boşluğa sığmayarak yanal duvarlarda cidar gerilmeleri oluşarak kalınlaşmaya zorlanmış olan sac malzeme bu sefer cidar gerilmeleriyle incelmeye maruz bırakılmış olur. Diğer yandan kalıp yuvarlatmalarının az olması durumunda sac malzeme burada daha zor şekilleneceğinden, bu bölgede incelmeler hatta yırtılmalar görülebilmektedir.



Şekil 2.7 Geleneksel derin çekme işleminde saca uygulanan kuvvetler

2.3.1 Hidromekanik Derin Çekme İşleminin Temel Bileşenleri

Hidromekanik derin çekme işleminde kullanılan temel bileşenleri şöyle sıralayabiliriz;

- Hidromekanik zımba
- Basınç Havuzu
- Sızdırmazlık Elemanı
- Pot Çemberi
- Şekillendirici Sıvı

Yukarıda bahsedilen beş bileşenin biri hariç hepsi bilgisayar yazılımında modellenmesi gerekmektedir. Bu beş bileşenden sadece şekillendirici sıvı bileşenin modellenmesine gerek yoktur. Şekillendirici sıvıların sıkıştırılabilirlik oranları arasında ihmal edilebilecek kadar bir fark olduğu için hesaplama anında sadece basınç değerini girmek yeterli olacaktır. Ayrıca bir şekillendirici sıvı tipi de belirlenmeyecektir.

2.3.1.1 Hidromekanik Zımba:

Hidromekanik zımba, hareketli bir bileşendir. Başlangıçta belirli bir konuma sahiptir. Analiz zamanı içerisinde belirli bir hız kazanabilir veya kaybedebilir. Sac malzemeye şeklini verecek olan bileşendir. Çoğu sonlu elemanlar yazılımında rijit olarak yazılıma belirtilmesi gerekir. Bazı programlarda ise bu özellik otomatik olduğu için zımba olarak seçilen geometri kendiliğinden rijit cisim olarak algılanmaktadır.

2.3.1.2 Basınç havuzu

Basınç havuzunu geleneksel yöntemde dişi matris olarak düşünebiliriz. Ancak geleneksel yöntemden farklı olarak basınç havuzu iç cidarı ile zımba arasında, sac malzeme kadar değil çok daha yüksek bir boşluk bulunabilir. Çünkü bu yöntemde saca asıl şekil kazandıran zımba ve dişi matris arasındaki sac boşluğu değil, sıvı basıncıdır. Geleneksel derin çekme işleminde zımba bileşenin de olduğu gibi çoğu sonlu elemanlar

yazılımında rijit cisim olarak tanımlamak gerekmektedir. Ancak yine zimba bileşeninin açıklamasında yer aldığı gibi bu konuyla alakalı olan yazılımlarda bu özellik otomatiktir. Ayrıca bu bileşenin rijit olarak tanımlanmasına gerek yoktur.

2.3.1.3 Sızdırmazlık elemanı

Sızdırmazlık elemanı temas ettiği iki yüzey arasında sızdırmazlığı sağlayan bileşendir. Pek çok sonlu elemanlar yazılımında bu bileşeni modelleyerek bazı malzeme tanımlamaları yapmamız gerekmektedir. Ancak yine yukarıda bahsedildiği gibi hidromekanik derin çekme yöntemi için yazılmış olan modüllere sahip yazılımlarda bu sözkonusu değildir. Sızdırmazlık elemanının görevi ve bulunması gereken konumu bellidir, sadece bu bileşenin modellenerek yazılıma tanıtılması yeterli olmaktadır.

Sızdırmazlık elemanı basınç havuzunda sacı şekillendirecek olan sıvının, zımbanın hareketi esnasında kazanmış olduğu yüksek basınç neticesiyle şekillendirici sıvının dışarı kaçmasına engel olmaktadır. Böylece istenen zaman diliminde istenen basınca ulaşılabilmiş olacaktır.

2.3.1.4 Pot çemberi

Pot çemberi geleneksel yöntemde kullanıldığı gibi kullanılmaktadır. Burada da görevi saca baskı uygulamaktır. Böylece kırışmaların önüne geçmek amaçlanmaktadır. Yine aynı şekilde bazı sonlu elemanlar yazılımlarında rijit cisim olarak tanıtılmalıdır.

Hidromekanik yöntemde, pot çemberine uygulanan baskı, geleneksel yöntemde uygulanan baskıdan çok daha yüksektir. Bunun sebebi, basınç havuzunda saca uygulanan basıncın pot çemberini yukarıya kaldırmaya çalışmasıdır. Hidromekanik yöntemde pot baskısı, hem kırışıkları engelleyebilecek hem de basınç havuzundan saca uygulanan baskı neticesiyle kendisini yukarı kaldırmaya çalışan kuvveti yenebilecek kadar yüksek olmalıdır.

2.3.1.4 Şekillendirici sıvı

Sonlu elemanlar yazılımlarında statik basınç uygulamak için sıvı tipinin belirtilmesine gerek yoktur. Sıvı tipi genellikle hidrodinamik ve ısı transferi problemlerinde belirtilmektedir. Sıvıların sıkıştırılabilirliğinin yok denecek kadar az olması ve sıvılar arasındaki sıkıştırılabilirlik farkları çok çok daha az olduğundan sonlu elemanlar analizlerinde şekillendirici sıvı tipinin ayrıca belirtilmesine gerek kalmamaktadır.

Deneysel çalışmalarda ise metallerin zarar görmemesi için hidrolik yağı kullanılabilirdiği gibi ekonomik olması gibi sebepler de düşünülerek hidrolik yağının içine belirli oranlarda su da katılabilmektedir.

2.4 Derin Çekme Oranı

Bir sacın bir defada kopmadan, yırtılmadan ve hasara uğramadan çekilebilmesi için ilkel parçanın sahip olması gereken en büyük çapın, zımba çapına oranına derin çekme oranı sınırı denir. Derin çekme oranı sınırı, derin çekme işleminin özel bir halidir. Sabit baskı plakası kuvveti ve kalıp geometrisi şartlarında, ilkel parça çapında meydana gelen bir değişiklik, derin çekme oranı sınırını belirlemektedir. Bu oranın en yüksek olabilmesi için ilkel parça çapı deneme yanılma veya ön deneyler yardımıyla belirlenmektedir (Marumo. Y., Saiki. H.,1998).

$$\text{Derin Çekme Oranı} = \frac{\text{En geniş sac metal çapı}}{\text{Zımba Çapı}} \quad (2.1)$$

2.5 Şekillendirme Sınır Diyagramı

Sac metal şekillendirilebilirliği, şekillendirme süresi boyunca sacın plastik olarak belirli görsel, mekanik ve ölçüsel sınırlar içinde deforme edilebilmesidir.

Sac metal şekillendirme işlemlerinin optimizasyonu çalışmalarında, otomotiv, uzay, inşaat, paketleme ve elektronik alanları başta olmak üzere pekçok alanda, kaliteden ödün vermeden sürekli maliyeti düşürmek ve yüksek sayıda üretim yapmak, bunun

yanında da daha az hammadde kullanma konusunda numerik simülasyonlar kilit rol üstlenmektedirler.

Sac şekillendirme işlemlerinde deneme yanılma süresini azaltmak ve bunun yanında deneme yanılma esnasında kaybedilen zamandan tasarruf etmek için analitik çözümler ve matematiksel modeller ile sac şekillendirme konusunda oldukça yoğun bir şekilde çalışılmaktadır.

Sac malzeme işlemlerinde şekillendirilebilirliğin sınırları, şekillendirme sınır diyagramı ile belirlenmektedir. Şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD), literatürde Forming Limit Diyagram (FLD) olarak geçmektedir. ŞSD'nin gelişimi ilk olarak Keeler ve Backofen'in dairesel sac malzemelerin küresel uçlu zımba ile gerilmesi ile ilgili deneyleriyle başlamıştır (Backofen W.A., Keeler S.P., 1963). Keeler ve Backofen teğetsel gerilmelerin radial gerilmelere oranının 0'dan 1'e doğru yükseldiğini, bununla da beraber kırılma-gerinme oranının da buna eşdeğer olduğunu gözlemlediler. Keeler bunun ardından şekillendirme sınırını belirlemek için sac malzeme üzerine çemberler çizerek sac malzeme şekillendirildikten sonraki çember durumlarını inceledi ve minor ve major gerinmeleri gösteren bir diyagram oluşturdu (S.P. Keeler.1965). Bu diyagramda kritik gerinme sınırı bir eğri ile belirtilmektedir.

Aşağıdaki diyagram çekme işlemi boyunca ortaya çıkabilecek farklı deformasyon çeşitlerini göstermektedir. Deformasyon modu sac malzeme üzerindeki çemberler ile görsel olarak tespit edilebilmektedir. Gerçekte bu çemberler veya noktalar üzerindeki bileşke yer değiştirme optik ölçüm cihazlarıyla ölçülmektedir. Karakteristik durumlar veya deformasyon modları şu şekildedir;

Germe veya iki eksenli gerilme: bu deformasyon tipi incelme olarak kendini gösterebilmektedir ve genellikle küresel uçlu zımbaların kullanıldığı şekillendirme işlemlerinde ortaya çıkmaktadır.

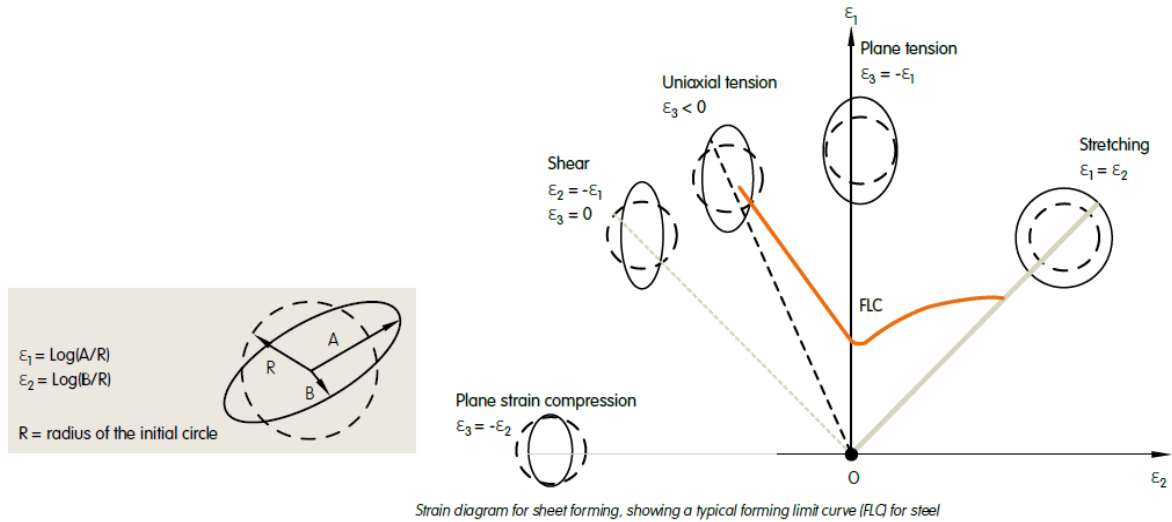
Düzlemsel gerinme: genellikle şekillendirilen iş parçasının dikey duvarlarında görülmektedir. Bu kısımda pot çemberinin baskı kuvvetinin oluşturmuş olduğu sürtünme kuvvetleri ile zımbanın şekillendirmeye zorladığı kuvvetler arasında gerçekleşmektedir.

Tek eksenli gerilme: bu tip gerilme kalıp radüsü bölgelerinde oluşur. Kalıp ağız radüsü bölgelerinde sac malzeme eğilmeye zorlanmaktadır.

Kayma deformasyonu: ideal şekillendirme modudur. Bu mod durumunda tüm bası gerilmeleri tüm diğer gerilmeleri absorbe etmektedir. Böylece sac malzeme kalınlığı sabit kalmaktadır. Bu tip deformasyon, sac akışının her yerden (axisimetrik parçalar) eşit olduğu, pot çemberi yükü altında kalan bölgede oluşur (www.arcelormittal.com/prcatdeepdrawing.pdf, 2013).

Şekil 2.8’de şekillendirme sınır diyagramının şematik bir ifadesi görülmektedir. Bu ifade ile birlikte ŞSD’nın oluşturulmasında birincil ve ikincil yöndeki uzama miktarlarının, şekillendirme sınır eğrisini nasıl oluşturduğu açık bir şekilde görülebilmektedir.

Şekillendirme işlemi öncesinde sac malzeme yüzeyine, sac malzemeye zarar vermeyecek şekilde küçük çemberler çizildiğinden bahsedilmişti. Sac malzemenin şekillendirilmesinden sonra ise sac malzeme üzerine çizilen bu çemberlerin elipleştiği gözlemlenmektedir. Bu elipslerin uzamalarının ve daralmalarının ilk yarıçapa oranının logaritması bize birincil ve ikincil yöndeki birim şekil değiştirmeyi vermektedir.



Şekil 2.8 Şekillendirme Sınır Diyagramı

$$\varepsilon_1 = \log(A/R) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_2 = \log(B/R) \quad (2.3)$$

2.5.1 Şekillendirme Sınır Diyagramının Deneysel Olarak Belirlenmesi

Deforme olmuş sac malzeme numunesindeki gerinmeler genellikle sac malzeme üzerine önceden çizilen çemberlerin şekillendirme işlemi sonrasında aldıkları şekil ile ölçülmektedir. Sac malzemede meydana gelen deformasyon bu çemberleri elips haline dönüştürmektedir. Major ve minor gerinmeler eliptik şekillerin eksenleri vasıtasıyla ölçülmektedir. Sac şekillendirme konusunda kullanılan en yaygın deneysel ölçüm yöntemleri aşağıdaki gibidir;

Uniaxial Gerilme: Bu test geleneksel bir çekme deneyi makinesinde yapılmaktadır. Buradan malzeme hakkında şekillendirilebilirliği hakkında önemli bir faktör olan gerilme-gerinme bilgileri elde edilir.

Jovignot Testi: 1930 yılında ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde şekillendirilmek istenen sac malzeme üzerine bir hidrolik basınç uygulanmaktadır. Dişi matrisin geometrisine (dairesel, eliptik ve dikdörtgensel) göre farklı gerinme patikaları elde edilir. Bu yöntemin esas amacı sac malzeme ile zımba arasında doğrudan temas olmamasıdır. Böylece zımba ve sac malzeme arasında sürtünmeden kaynaklanan sorunlar olmayacaktır.

Fukui Testi: 1939 yılında ortaya çıkmıştır. Dairesel sac metalin, küresel zımba ve konik dişi matris arasında şekillendirilmesine dayanır.

Swift testi: 1952 yılında ortaya çıkmıştır. Dairesel metal sacın alt tarafı düzgün, silindirik bir zımba ile şekillendirilmesinden oluşmaktadır. Bu test özellikle ŞSD'nin karmaşık gerinme patikalarının belirlenmesi için geliştirilmiştir.

Swift testinde sac malzemeye eşmerkezli eşit offsetli çemberler çizilerek sac malzeme şekillendirilmeye başlanır. Sac malzeme belirli bir çizgiye kadar çekildiğinde sac malzemede çatlama başlar. Böylece çatlama başlayan çizgi çapının zımba çapına oranı, bize o malzemenin derin çekilebilirliğini göstermiş olur.

Marciniak testi: 1973 yılında ortaya çıkmıştır. Alt kısmı düz olan bir zımba ile test gerçekleştirilir. Farklı gerinme patikaları elde etmek için farklı geometrilere sahip zımbalar kullanılabilir.

Nakazima Testi: Nakazima testi sac metal malzemelerin ŞSD'lerini elde etmek için sıkça kullanılan yöntemlerden birisidir. Mümkün olduğu kadar geniş bir gerinme alanı elde etmek için birçok birincil ve ikincil gerinme çifti toplanır. Farklı kombinasyonları elde etmek amacıyla, birçok test numunesi değişen geniŐliklerde gerilir. Nakazima testi, numuneleri yarı küresel bir zımba ile dairesel bir kalıp üstüne çekme işlemiyle uygulanır.

Nakazima testinde 7 adet test numunesi tek eksenli çekmeden eŐ iki eksenli çekme durumuna kadar gerilir. Test her numune için görülebilir bir boyun oluŐana kadar devam ettirilir. Bu durumda, bozulan bölgenin yanındaki ana gerinmeler ölçülür. Her numune için ŞSD oluŐturmak üzere bir veri noktası (birincil gerinme, ikincil gerinme) elde edilir. Bu prosedür 7 numune için de tekrarlandıktan sonra, ŞSD tamamen belirlenmiŐ olur.

Bugünün teknoloğisi gerinmelerin belirlenmesinde daha kesin ve hızlı ölçüm araçları sunmaktadır. Şekil 2.9'da görülen GOM/Aramis gibi optik bir ölçüm sistemi kullanarak numunelerin hazırlanması, Şekillendirme işlemi ve deformasyonların belirlenmesi çok daha etkin bir biçimde gerçekleŐtirilmektedir (Makine tasarımı ve imalat dergisi sayı 1, 2011).

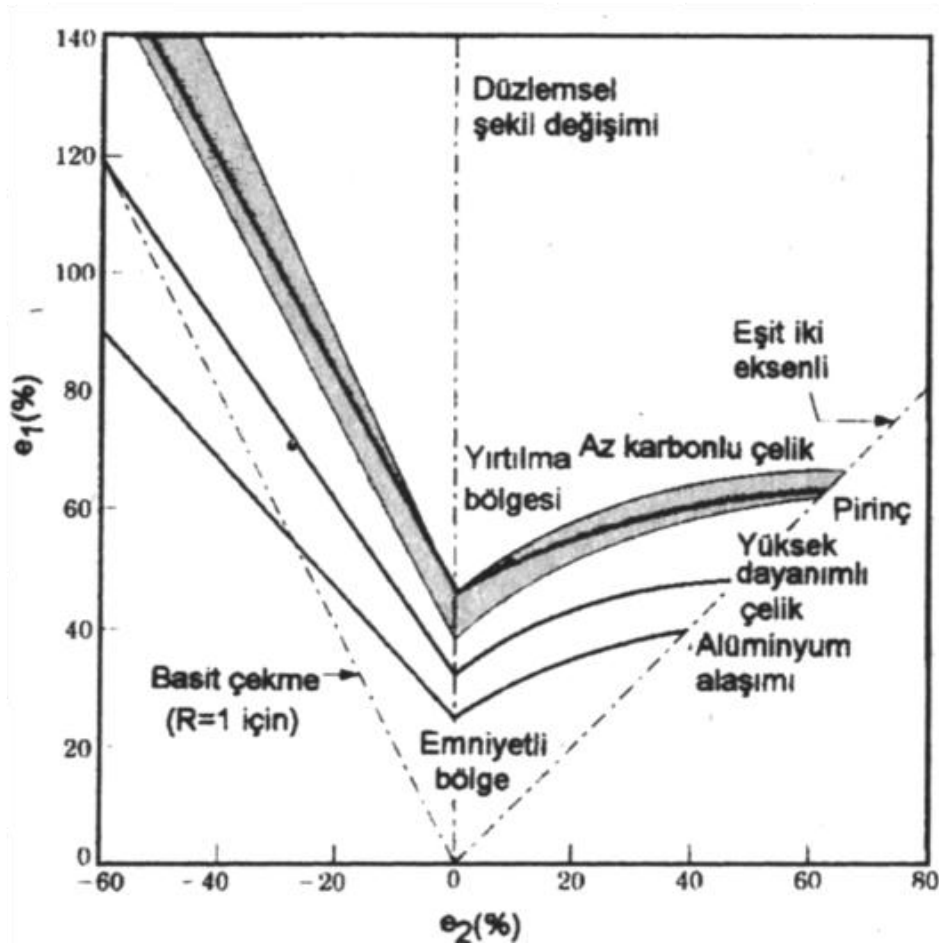


Şekil 2.9 GOM optik ölçüm sistemi

Saclarda plastik birim Şekil deĐiŐiminin ölçülmesinde “grid” tekniğinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemde başlangıçta levha üzerine (2-5 mm gibi) belirli çapta

çok sayıda çember foto-kimyasal veya elektro-kimyasal bir yöntemle işlenmektedir. Kalıpta şekillendirme sonrasında bu çemberler çeşitli boyut ve oranda elipslere veya daha büyük çaplı dairelere dönüşmektedir. Bu elipslerden boyun verme hasarının üstüne veya hemen yanına denk gelenlerin büyük ve küçük eksen boyları monoküler bir büyüteç ile ölçülerek kaydedilir. Ayrıca daha gelişmiş ve kare grid okuyabilen dijital ölçüm sistemleri de mevcuttur.

Şekil değişime sınır eğrisi malzeme cinsine göre de değişebilmektedir. Bu eğriler sıfırdan uzaklaştıkça malzeme daha güvenli olarak şekillendirilebilmektedir. Şekil 2.10'da malzemelere göre değişen şekillendirme sınır diyagramları gösterilmiştir. Şekillendirme sınır eğrisinin yukarısında kalan alan yırtılma bölgesi, şekillendirme sınırı eğrisinin altında kalan alan ise şekillendirme için güvenli bölgedir. Güvenli olarak şekillendirilen parçaların her iki yönde de birim şekil değiştirme oranları her noktada emniyetli bölgededir.



Şekil 2.10 Şekillendirme sınır diyagramında yer alan şekillendirme bölgeleri

Tek eksenli çekme durumunda:

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0 \text{ ve } \sigma_3 = 0 \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 = -\varepsilon_1/2 \text{ ve } \varepsilon_3 = -\varepsilon_1/2 \text{ (hacim sabitliği ilkesinden)} \quad (2.5)$$

Düzlem birim şekil değişimi durumunda:

$$\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 = 0 \text{ ve } \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \text{ (hacim sabitliği ilkesinden)} \quad (2.6)$$

$$\sigma_1 > 0, \sigma_3 = -\sigma_1/2 \text{ ve } \sigma_2 = 0 \text{ (}\sigma_3 \text{ kalınlık yönündeki gerilme)} \quad (2.7)$$

Çift eksenli çekme durumunda:

$$\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 = \varepsilon_1 \text{ ve } \varepsilon_3 = -2\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 \text{ (hacim sabitliği ilkesinden)} \quad (2.8)$$

$$\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_1 \text{ ve } \sigma_3 = 0 \text{ (}\sigma_3 \text{ kalınlık yönündeki gerilme)} \quad (2.9)$$

FLD diyagramı sacın farklı bölgelerinden, yarı-küresel bir zımba ile şeritlere “derin çekme” işlemi uygulama sonucu çizdirilir. Şeritlerde çatlak oluşuncaya kadar derin çekme yaptırılır. Her özel sac için bu test tekrarlanmalıdır.

2.5.2 Şekillendirme Sınır Diyagramının Teorik Olarak belirlenmesi

Sac metallerin şekillendirme sınırları birtakım fiziksel faktörden etkilenmektedir. Bunların en önemlilerinden bazıları, malzemenin pekleşmesi, gerilme oranı duyarlılığı, plastik anizotropi ve yapısal hatanın bir patika boyunca büyüyerek ilerlemesidir. Her bir parametrenin ayrı ayrı etkilerinin deneysel olarak incelenmesi zordur çünkü aynı zamanda bir parametreyi sabit tutup diğeriğini değiştirmek imkansızdır. Tüm şekillendirme proseslerinde şekillendirme sınırlarının deneysel olarak belirlenmesi sadece yorucu ve pahalı değil neredeyse imkansızdır. Çünkü malzeme noktalarındaki gerilme patikaları oldukça non-lineerdir ve herbiri birbirinden ayrılmaktadır. Bu yüzden sac metal şekillendirme işlemlerinde plastik şekil değişimini doğru bir şekilde hesaplayabilmek için pek çok matematiksel model geliştirilmiştir.

Örneğin Keeler modeline göre ŞSD düzlem gerilme durumundaki ε_{10} noktasından geçen iki doğru tarafından oluşturulur. Bu doğruların eğimleri ŞSD'nin sol ve sağ tarafları için sırasıyla is 45° ve 20° 'dir. Bu model ŞSD'leri, deneysel ve teorik

yaklaşımları basitleştirerek daha kolay bir biçimde tahmin etmek amacıyla atölyelerde kullanılmaktadır. Bu denklemde, “*t*” sac metalin mm olarak kalınlığı, “ ϵ_{10} ” mühendislik gerinmesi, “*n*” ise pekleşme üstelidir (Makine tasarım ve imalat dergisi sayı 1, 2011).

$$\epsilon_{10}(\%) = (23.3 + 14.13 \cdot t) \frac{n}{0.21} \quad (2.10)$$

2.6 İzotropi-Anizotropi

Malzemelerin gerilme-gerinme ve anizotropi davranışı genellikle “*n*” veya “*r*” olarak gösterilmektedir. “*n*” harfi İngilizce “nature” yani “doğa” kelimesinden gelmektedir ancak asıl olarak “*n*” gerilme pekleşme katsayısıdır. “*r*” ise “plastic ratio”, kelimesinden türetilmiştir, dilimizde ise “plastik gerilme oranıdır”.

En genel olarak sac malzemenin hadde yönüyle ilgilidir. Sac malzemenin molekül diziliminden kaynaklanarak, bir yönde daha kolay diğer yönde ise daha kolay olmayarak şekil almasıdır. Silindirik kapların derin çekilmesi esnasında oluşan kulaklaşma kusurları anizotropi kaynaklıdır.

Swift metallerin plastik şekil değişimindeki ilişkilerin tanımını için bir denklem hazırladı ve $\bar{\sigma}$ = Gerçek Gerinme, K =mukavemet katsayısı, $\bar{\epsilon}$ = Gerçek uzama, N = Gerinim Pekleşme Katsayısı, ϵ_0 = ilk uzama olarak tanımlayarak denklem 2.11’i önerdi (Engr. C. O. Osueke* et al 2011).

$$\bar{\sigma} = k(\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \quad (2.11)$$

Normal anizotropi;

$$R = \frac{\text{Genişlikteki Gerinme}}{\text{Kalınlık Gerinmesi}} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_1} \quad (2.12)$$

Haddelenmiş sac metal için;

$$R_{ort} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2.13)$$

2.7 Pekleşme üsteli

Sacın soğuk biçimlendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliği, gerilme artışı sonucu meydana gelen deformasyon ile sacın pekleşme durumudur.

Kristal yapı içerisinde, dislokasyonların kayması ile plastik şekil değişimi gerçekleşir. Kayma ile hareket eden dislokasyonlar, yeni dislokasyonlar oluşmasına sebep olurlar. Böylece, dislokasyon yoğunluğu artar. Diğer yandan, yoğunluğu artan dislokasyonların hareketi, gerek diğer dislokasyonlar gerekse boşluk, arayer, yeralan, çökelti, tane sınırı gibi diğer engeller tarafından engellenmeye başlanır. Başka bir deyişle dislokasyonların hareketlerini sürdürebilmeleri için gereken gerilme değeri gittikçe artar. Bu duruma “deformasyon sertleşmesi” (strain hardening, work hardening, strain aging, etc.) veya pekleşme adı verilir.

Bu nedenle, $\sigma - \epsilon$ diyagramının plastik bölgesinde artan şekil değiştirme ile gereken gerilme sürekli artma gösterir. Bu plastik şekil değişimi sırasında boyu sürekli artan deney parçasında hacmi sabit kalacak şekilde kesiti sürekli olarak azalma gösterir. Bu bölgede, kesitin azalması ($\sigma = F / A$) formülü gereği aynı gerilmeyi sağlamak için gereken kuvvet değerinin sürekli azalması anlamına gelir. Öte yandan, pekleşme mekanizması ise şekil değişimini sürdürebilmek için gereken kuvvetin sürekli artmasını gerektirir. Pekleşmenin etkisinin baskın olması durumunda, ihtiyaç duyulan kuvvet sürekli artmaya devam edecektir. Ne var ki, plastik şekil değişimi devam ettikçe pekleşme etkisi dominantlığını kaybeder. $\sigma - \epsilon$ diyagramında öyle bir nokta vardır ki (bu nokta max. noktadır), burada pekleşmenin etkisi kesit daralmasının etkisi ile birbirini dengeler. Bu noktadan sonra kesit daralmasının etkisi pekleşmenin etkisine göre daha baskın hale gelir ve şekil değişimi için gereken gerilme sürekli olarak azalır ve parça boyun vermeye (plastik kararsızlık) başlar, diyagram aşağı doğru yönelir. Diyagram kopmanın meydana geldiği noktada son bulur. Boyun vermenin başladığı bu noktada, yani maximum noktadaki gerilme değeri “çekme dayanımı” olarak adlandırılır. Kopmanın gerçekleştiği noktadaki gerilme değerini, “kopma dayanımı” adı verilir (Ergun C.).

2.8 Süneklik

Bir malzemenin plastik şekil değiştirme kabiliyetini ifade eder. Bu değerin büyümesi, malzeme kopana kadar daha büyük plastik şekil değiştirme gerçekleştirebiliyor anlamına gelir. Kopma uzaması ve alan daralması parametreleri ile ifade edilebilir.

2.9 Gevreklik

Plastik şekil değiştirme kabiliyetinin olmaması durumunu ifade eder. Eğri bazen elastik sınırdaki bazen de elastik sınıra çok yakın bir noktada son bulur.

2.10 Tokluk

Malzemenin kopana dek absorbe ettiği toplam enerjiyi ifade eder. Sünek malzemelerin tokluğunun daha yüksek, gevrek malzemelerin tokluğunun da düşük olduğu anlamı çıkarılabilir (Ergun C.).

2.11 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplamalarda, hesaplanması istenilen parçanın daha küçük parçacıklara bölünmesi esastır. Bu küçük parçacıklar düğüm noktalarında birbirlerine pimlerle bağlanmış gibi düşünölmektedir. Bu işlem bize cebirsel denklemler elde etmemize yaramaktadır (Kim Y., Olivier W., 2004).

Sonlu Elemanlar Analizi fiziksel bir sistemin matematik olarak ifade edilmesidir. Bu sistem alt parçalara ayrılabilen model olup, malzeme özelliklerine ve uygulanabilir sınır şartlarına sahiptir (Fahjan Y.)

Hesaplanması istenen geometrinin daha küçük parçacıklara ayrılma işlemi yapay sinir ağı oluşturulması olarak tabir edilmektedir. Bu küçük parçalara ayırma işleminde belirtilen küçük parçalar ne kadar küçük olursa çözümümüz gerçeğe o denli yakın olacaktır. Ancak parçacıkların küçölmesi aynı zamanda parçacık sayısının artması anlamına da gelmektedir. Artan parçacık sayısı ise o denli çözüm süresini uzatmaktadır. Bu durumda gerçek doğruluğa ulaşma konusunda mühendislerin optimal yaklaşım ile yeterli doğruluğa ulaşabilecekleri kadar parçacıkların boyutlarını küçölmeleri

gereklidir. Gereğinden fazla küçük boyuttaki elemanlar çözümü gerçeğe yaklaştırabilir ancak problemin çözüm zamanını da oldukça uzatabilmektedir. Yine gereğinden fazla büyük eleman seçimi de problemin çözümünü kısaltabilir ancak gerçeklikten uzak sonuçlar verebilir. Bu sebeple optimal parçacık boyutunun temin edilmesi gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ilk keşfedildiği zamanlarda yaklaşık çözüm vermesi ve bu yaklaşık çözümü elde edebilmek için dahi çok uzun süreli çözümler yapılması gerektiğinden üzerinde çok fazla çalışma imkanı bulunamamıştır. Ancak günümüz hesaplamalarında bilgisayarların kullanılmasıyla, daha hızlı işlemlerin çözülebilmesi sebebiyle sonlu elemanlar yöntemi konusunda tekrar çalışma fırsatı yakalanmış oldu.

2.11.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Sonlu elemanlar yöntemi genellikle 3 aşamada çözülmektedir. Bunlardan birincisi matematiksel modelin oluşturulmasıdır. Bu aşama literatürde “ön işlem” aşaması olarak isimlendirilmiştir. Matematiksel model, çözümü yapılacak parça veya sistemin bilgisayar ortamında çözülebilir nitelikte ve gerçeğe en yakın bir, iki veya üç boyutlu modeldir. Bu aşamada matematiksel modelin yapay sinir ağı oluşturulmaktadır. Ayrıca bu model üzerine problemin sınır şartları da eklenmektedir. İkinci aşama “işlem” aşamasıdır. İşlem aşaması bilgisayarın problemi çözme aşamasıdır. Üçüncü aşama ise “değerlendirme” aşamasıdır. Değerlendirme aşamasında, çözüm aşamasında çıkan sonuçlar görsel olarak sunulur ayrıca rapor olarak da problem çıktıları elde edilebilmektedir. Günümüzde daha büyük problemler birden fazla bilgisayar birbirine bağlanıp paralel işlem yaparak daha hızlı sonuca varabilmektedirler.

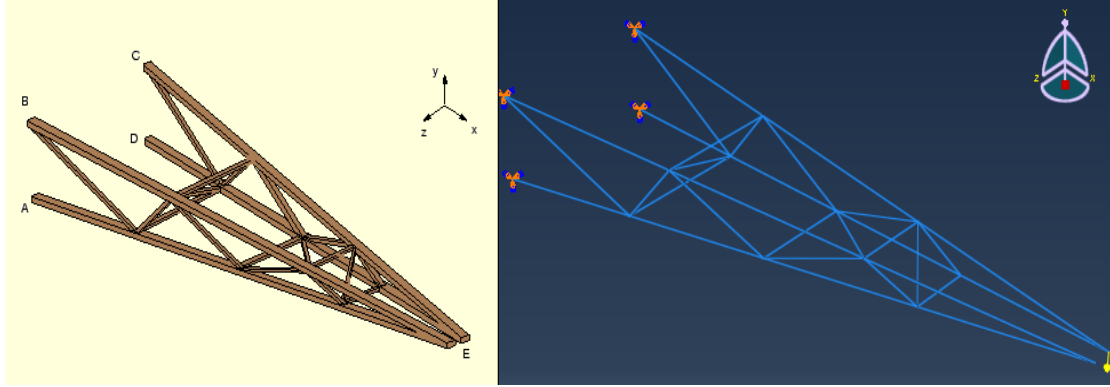
Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapmak isteyen kişi “ön işlem” aşamasındaki girdileri yeterli doğrulukta girmelidir. Aksi takdirde gerçekten uzak çözümler ve hatta sonu gelmez hesaplamalara girilebilir.

2.11.1.1 Ön-İşlem aşaması

Daha önce değinildiği gibi ön işlem aşamasında

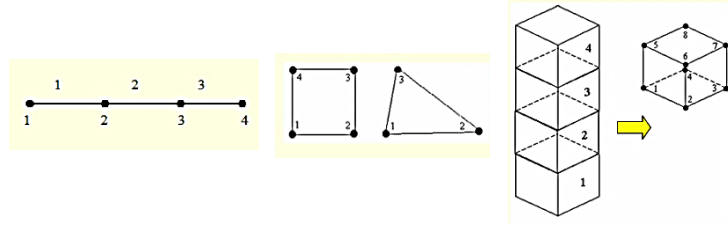
- sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülebilecek gerçek probleme yakın geometrik model ve bu modele uygun mesh oluşturulur.
- Malzeme özellikleri programa girilir.
- Problemin çözümü için gerekli olan sınır şartları girilir.

Genellikle kiriş problemleri için genellikle tek boyutlu, yüzeysel elemanlarla yapılacak çözümler için iki boyutlu, karmaşık yapı ve sınır şartlarına sahip geometriler için ise üç boyutlu mesh parçacıkları kullanılmaktadır.



Şekil 2.11 Probleme uygun modelleme ve sınır şartlarını girilmesini gösteren şematik bir ifade

Mesh oluşturma esnasında eğer gerekirse hesaplamaların daha hızlı olabilmesi için geometride aşırı önem arzetmeyen süreksizlikler kaldırılabilir ve çözüm için geometri daha basit hale getirilebilir. Örneğin hesaplanmasını istediğimiz geometrinin herhangi bir yüzeyindeki kabartma yazısı bulunduğu bölgede çok küçük boyutta mesh boyutu gerektireceğinden ve aynı zamanda bu kabartma yazısının problemin çözümü esnasında çok fazla bir önem arzetmeyeceği için bu gibi süreksizliklerin geometriden kaldırılması gerekir. Böylelikle çözüm zamanımızı oldukça kısaltabiliriz.

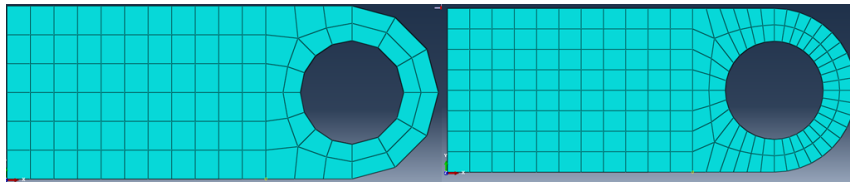


Şekil 2.12 Bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar modeli

Sonlu eleman yöntemi tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olarak çözülebilmektedir. Meshler de 1, 2 ve 3 boyutlu olabilmektedir. Bu mesh taneciklerinin kenarları her zaman doğrusal olduğunu da belirtmek gerekir.

Hesaplanması istenen geometride kıvrımlı kenarlar ve yüzeyler bulunabilir. Bu durumda bu kıvrımlı kenar ve yüzeydeki parçacık sayısının artırılması gerekmektedir. Çoğu sonlu elemanlar programında bu durumun üstesinden gelebilecek özellikler bulunmaktadır.

Örneğin üzerinde bir adet delik olan bir plaka üzerinde çekme deneyi yapılacak olsun. Bu durumda tüm plaka birbirine eşit dörtgen elemanlar ile bölünebilecekken, plaka üzerinde delik bulunduğu için bir süreksizlik söz konusu olur ve parçacık boyutunun burada daha hassas oluşması gerekebilir. Şekil 2.14’de bu duruma bir örnek gösterilmiştir. Soldaki durumda eğrisellik kontrolü yapılmadan parçacıklara bölünmüş bir model yer almaktadır. Bu durumda gerçek geometriden uzaklaşmış olduğu bariz bir şekilde bellidir. Sağdaki durumda ise gerçek geometriye daha yakın bir parçacıklara bölünme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2.13 Meshleme işleminde eğrisellik kontrolünü gösteren şematik bir ifade

Sonlu elemanlar yönteminde meshleri oluşturan parçacıkların bir, iki ve üç boyutlu olabileceğinden bahsedildi. Çözüm için istediğimiz güven aralığında istenilen parçacık boyutu seçilebilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde yapılacak çözüm için de malzeme özelliklerinin programlara girilmeleri gerekmektedir. Mesh örme işleminde nasıl probleme uygun modelleme tekniği (iki boyutlu veya üç boyutlu modelleme) kullanılıyor ise malzeme özelliklerini de yine aynı şekilde çözülmesi istenen problem tipine göre belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin çözülmesi istenen problem tipi sadece malzemenin elastik bölgesinde gerçekleşiyorsa,

- Elastik Modülü
- Poisson Oranı
- Malzeme yoğunluğu

bilgilerinin girilmesi yeterli olacaktır.

Ancak sonlu elemanlar hesaplamamız malzemenin plastik şekil değiştirme bölgesini de kapsıyorsa gerilme-gerinme değerlerini de girmemiz gerekecektir. Örneğin talaş kaldırma problemleri için tüm bu bilgilerin yanı sıra johnson-cook verileri gibi diğer malzeme özelliklerini de girmemiz gerekecektir.

Pek çok sonlu eleman yazılımında tek ve iki boyutlu geometrilerin kesit tanımlamaları ve kalınlık tanımlamaları da malzeme özellikleri bölümünden yapılmaktadır. Oluşturulan bir yüzey elemanına kalınlık bilgisi, oluşturulan bir boyutlu çubuk elemana ise kesit ve kesit oryantasyon bilgisi malzeme özellikleri kısmında verilebilmektedir. Böylece oluşturduğumuz bir ve iki boyutlu geometriler de çözüm esnasında 3 boyutlu hale gelmiş olacaktır.

Ön işlem aşamasındaki son kısım ise sınır şartlarının programa girilmesidir. Sınır şartları için sonlu elemanlar yazılımlarında istenilen yükleme durumları ve istenilen mesnetleme çeşitleri, istenilen konumda ayarlanabilmektedir. Ayrıca eğer malzeme özellikleri kısmında malzeme yoğunluğu da girilmişse, yerçekimi etkisi de sınır şartlarındaki yükleme durumuna eklenebilir.

Sac malzeme şekillendirme işlemlerinde girilmesi gereken sınır şartları, pot baskı kuvveti, zımba hızı veya zımba yer değiştirme mesafesi, şekillendirme işlemi süresi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak daha özele indiğimizde hidromekanik derin çekme işlemi gibi sıvı basıncı yardımıyla yapılan sac şekillendirme işlemlerinde tüm bunlara

ek olarak şekillendirici sıvı basınç bilgisi ve hatta zamana bağlı olarak, basınç değişim eğrisi grafik bilgileri de girilebilmektedir. Böylece yırtılma oluşum aşamalarında şekillendirici sıvı basıncı arttırabilirken, yırtılmaların ve kırışmaların oluşamayacağı şekillendirme zaman dilimlerinde ise sıvı basıncı düşürülebilmektedir. Şekillendirici sıvı basıncının değişken olmasının türlü avantajları bu şekilde yakalanabilmektedir. Daha az basınç, daha az pot baskı kuvveti gereksinimini ve daha az sürtünme kuvvetini dolayısıyla daha az incelmeyi beraberinde getirecektir. Maliyet açısından baktığımızda ise hidrolik pompaların daha yüksek basınçlarda çalışılması için gereken enerji kaybı da ortadan kalkarak enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

Sınır şartları da sonlu elemanlar yazılımlarında girildiğinde, hesaplama için gerekli tüm verilerin bilgisayara girilmesi tamamlanmış olacaktır. İşlem aşaması için sonlu elemanlar yazılımlarına girilmesi gereken verileri tekrar gözden geçirilmesi gerekirse;

- Analizi yapılacak parça veya parçaların geometrik modelinin oluşturulması,
- Malzeme özelliklerinin girilmesi,
- Eğer çözmek istediğimiz bir montaj ise, sonlu eleman yazılımında ilişkili yüzeylerin birbirlerine tanıtılması,
- Oluşturulan geometrik modelin daha küçük elemanlara bölünerek yapay ağ örülmesi,
- Sınır şartlarının belirlenmesi

olarak sıralayabiliriz.

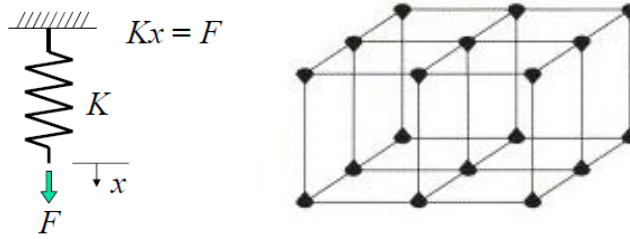
2.11.1.2 İşlem aşaması

İşlem aşamasında ise ön-işlem kısmında oluşturulan geometrik datalar ve sınır şartları dahilinde bilgisayar programı hesaplamalar yapmaktadır. Bu kısımda bilgisayara dışarıdan herhangi bir data girişi veya çıkışı yapılamaz. Bilgisayarın hesaplamayı bitirmesi beklenilir. Bu hesaplamaların temelinde

K = Rijitlik Matrisi. X = yer değiştirme Miktarı. F =Uygulanan yük ise

$$[K]\{x\} = \{F\} \quad (2.14)$$

Formülasyonu bulunmaktadır. Bu denklemler daha küçük parçalara bölerek oluşturduğumuz sanal ağın düğüm noktalarında yapılmaktadır.



Şekil 2.14 Düğüm noktalarının sayısal değerlendirilmesi

2.11.1.3 Son-İşlem aşaması

Son-İşlem aşamasında oluşturulan veya dışardan alınan geometri yine aynı aşamada tanımlanan sınır şartları dahilinde, işlem aşamasında çözümlendiği belirtilmişti. Son işlem aşamasında ise bu çözümlenin değerlendirilebilmesi amacıyla görselleştirme ve raporlaması yapılmaktadır. Çözümü yapılan problemin tipine göre çıktılar elde edilebilmektedir. Sac metal şekillendirme işlemi çıktılarını;

- Şekillendirilebilme güvenilirliği,
- İncelme ve yırtılma kontrolü,
- Geri esneme miktarı,

olarak sıralayabiliriz. Bu tez çalışmasında, incelme, yırtılma ve şekillendirilebilme güvenilirlik durumları üzerinde durulacaktır.

2.12 Sonlu Elemanlar Yöntemi Yazılımları

Sonlu elemanlar yazılımlarının çok genele hitap etmesi sebebiyle, sac şekillendirme problemleri çözümünde çok fazla bilginin programlara girilmesi gerekmektedir. Ayrıca post-process aşamasında istenilen bilgilere ulaşma sıkıntıları yüzünden sonlu eleman yazılım şirketleri, bu tip özel imalat teknikleri için özel yazılımlar geliştirmektedirler.

Sac şekillendirme imalat tekniği üzerine yoğunlaşmış olan bu yazılımlar genel olarak birbirlerine oldukça benzemektedirler. Bu tez çalışmasında özellikle hidromekanik derin çekme işlemi için bünyesinde ayrı bir modül barındıran Stampack isimli program seçilmiştir. Stampack yazılımı İspanyol Quantech firmasının ürünüdür ve sıvı basıncı yardımıyla sac şekillendirme işlemleri hakkında yeterli denemelere sahiptir. Yazılım içerisindeki malzeme kütüphanesinde malzemelerin gerilme-gerinme eğri grafik verileri, izotropi ve anizotropi verileri, yoğunluk, young modülleri gibi sacın şekillendirilme simülasyonu anında gerçeğe yakın tahmin elde edebilmesi için gerekli tüm veriler bulunmaktadır. Bunun haricinde hidromekanik derin çekme işleminin senaryosunu yazılım kendi içinde barındırdığı için diğer CAE yazılımlarında olduğu gibi farklı işlemler için farklı adımlar ve bu adımlarda farklı sınır şartları girilmesi gereği ortadan kaldırılarak preprocess kısmında yazılımı kullanan kişinin tecrübesine dayanan belirsizlikler en aza indirilmiştir.

Stampack sac şekillendirme yazılımı ile ütüleme, damgalama, kabartma, gererek şekillendirme, sıvı basıncı yardımıyla derin çekme, geleneksel derin çekme ve progresif adımlar oluşturma konusunda hesaplamalar yapılabilmektedir. Tüm bu çalışma konuları esnasında sac malzemede oluşabilecek kusurlar ve geri esneme hesaplanabilmektedir. Ayrıca şekillendirilen sacın geri esneme durumlarında geri esneme telafisi tayini de yapılabilmektedir.

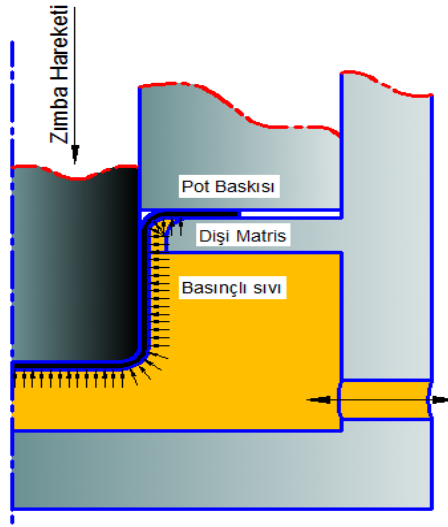
Hidromekanik derin çekme işleminde yazılıma girilmesi gereken verileri daha önce;

- Geometrik model
- Malzeme verilerinin ve sac kalınlık bilgilerinin girilmesi

- Montaj için temasların tanımlanması
- Sınır şartları

olarak sıralamıştık.

Bu tez çalışmasında yapılacak olan hidromekanik derin çekme analizlerindeki sınır şartlarını gözden geçirecek olduğumuzda şekil 3.16’da görüldüğü gibi, zımba hareketi, pot baskı kuvveti, şekillendirici sıvı basıncı gibi bileşenlere bir değer verilmesi gerekecektir. Dişi matris ise hidromekanik derin çekme işleminde sabit olduğu için Dişi matris bileşenini analizlerde sabit ve rijit cisim olarak kabul edilecektir.



Şekil 2.15 Sınır şartları girilmesi gereken bileşenleri gösteren şematik bir ifade

2.13 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sac Şekillendirme İşleminde İnceleme Kontrolü

Sac şekillendirme işlemi simülasyonlarında malzeme mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanında şekillendirme sınır eğrisinin de girilmesi gerekmektedir. Şekillendirme sınır eğrisi, analizi yapılacak malzeme kullanılarak deneysel metotlarla belirlenebilirken, matematiksel olarak da tahmin edilebilmektedir. Sonlu eleman yazılımlarında ise yazılım geliştiricileri tarafından oluşturulan malzeme kütüphanesine bu bilgiler girilmektedir. Dolayısıyla sac şekillendirme simülasyonu ile ürün geliştirmek isteyen tasarımcılar her malzeme için daha önce defalarca yapılan şekillendirme deneyini yapmadan da ürün geliştirebilmektedirler. Böylelikle daha hızlı sonuçlar alınabildiği gibi, alınan sonuçların güvenilirlikleri de kullanıcı beceri ve tecrübesine dayanmamış olacağından daha objektif ve doğru neticeler elde edilmiş olacaktır.

3. MATERYAL ve METOT

Analizi yapılacak olan hidromekanik derin çekme çalışmaları için literatür araştırmaları yapılmış ve endüstriye yönelik, seri üretime en elverişli ve aynı zamanda en etkili yöntemlerden birisi seçildi. Seçilen bu yöntemin halihazırda geleneksel yöntemler ile derin çekme işlemleri için kullanılan hidrolik preslerde de kullanım alanı olabilmesi de göz önüne alındı.

Yapılan bu tez çalışmasında, literatür kısmında incelenmiş olan sonlu elemanlar yöntemi, hidromekanik derin çekme işleminde kullanılmıştır. Denenilen birden fazla yazılım arasından İspanyol yazılım şirketi Quantech'in ürünü olan "Stampack" isimli yazılımdan faydalanılmıştır. Bu seçimin sebebi diğer sonlu elemanlar yazılımlarının hidromekanik derin çekme işlemi için uygun olmayışları, çözüm zamanlarının uzun olması ve elde edilen verilerin herhangi bir gerçek çözüme bağdaştırılarak doğruluğunun ispatlanmış olamamasıdır.

Stampack yazılımı genel olarak metal şekillendirme ağırlıklı bir yazılımdır, içinde piyasada kullanılan malzemeleri içeren geniş bir kütüphane mevcuttur. Plastik şekillendirme üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu yazılımın, bu tez çalışmasında seçilmesinin ana nedeni ise içerisinde hidromekanik derin çekme modülü barındırıyor olmasıdır.

Yapılan analiz çalışmalarında hidromekanik derin çekme işleminde değişken parametrelerinin ürün üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hidromekanik derin çekme işleminde ürün üzerinde etkili olan parametreler şunlardır;

- Şekillendirici sıvı basıncı
- Pot baskısı kuvveti
- Zimba hızı
- Şekillendirme süresi

Derin çekme oranı yukarıda bahsedilen parametrelerin birbirlerine uygunluğu neticesinde sonuçlanmaktadır. Malzemenin sac kalınlığı ve malzeme bilgisi gibi değişkenler ürünün derin çekme oranını değiştirmektedir. Ancak bu tez çalışmasında derin çekme oranı sabit tutulduğu için sac malzemesi ve kalınlığı gibi bilgiler de sabit

tutulmuştur. Bu veriler ancak derin çekme oranını etkileyen faktörlerdir ve bu verileri ürün üzerindeki etki olarak düşünüldüğünde bir paradoks oluşacağı için sacın kendisine ait özellikler, işlem parametrelerinden ayrı tutulmuştur.

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edebildiğimiz bilgiler;

- Şekillendirme hızı
- Kalınlık değişimleri
- Eğrilik
- Gerinme
- Şekillendirme sınır diyagramı
- Şekillendirme Bölgesi
- Güvenilirlik Bölgesi
- Şekillendirme Sınır Diyagramında düğüm noktalarının konumu

3.1 Analizlerde Ele Alınan Değişkenler

Hidromekanik derin çekme işleminde yukarıda belirtilen bileşenlerin bir kısmı dinamik bir kısmı ise statik durumdadır. Dinamik durumdaki bileşenler zımba ve pot çemberi olarak sıralayabiliriz. Zımba, sacı statik durumdaki sıvı basıncıyla şekillendirebilmek için hareketli olması gerekmektedir. Yine aynı şekilde pot çemberi de işlem öncesinde saca baskı uyguladığı ve sonrasında da baskıyı kaldırdığı için dinamik durumda kabul edebiliriz. Diğer tüm bileşenler statik durumdadır. Ancak statik durumdaki bileşenlerin geometrisi de dinamik bileşenlerin geometrisi kadar önemlidir. Zımba uç yarıçapı, dışı matris ağız yarıçapı gibi statik değişkenler de sabit tutulmuştur.

Analizlerde sadece pot baskı kuvvetleri ve şekillendirici sıvı basınçları değişken olarak kabul edilmiştir. Şekillendirici sıvı basıncının yüksek olması kırışmaya, düşük olması ise incelmeyi beraberinde getirmektedir. Bunun tam tersi şekilde pot baskı kuvvetinin düşük olması kırışmaları, yüksek olması ise yırtılmaları beraberinde getirmektedir. Çünkü kırışma ve yırtılmaların ortaya çıkmalarındaki asıl sebep şekillendirici sıvı basıncının sac üzerindeki radyal bası gerilmeleri ile birleşerek pot baskı kuvvetini

yenmesi ve şekillendirici sıvı basıncının dışarı kaçarak hidrodinamik basınç neticesiyle sacı çok daha fazla kırışmaya zorlamasıdır.

3.2 Analiz Aşaması

Analiz aşamasında kullanılması gereken veriler şunlardır;

- Analizdeki bileşenlerin geometrik özellikleri,
- Şekillendirilecek sacın malzemesi,
- Analiz için oluşturulan yapay sinir ağı bilgileri,
- Kullanılan şekillendirici sıvı basıncı ve pot baskı kuvveti büyüklükleri,
- Zımba ilerleme miktarı ve hızı

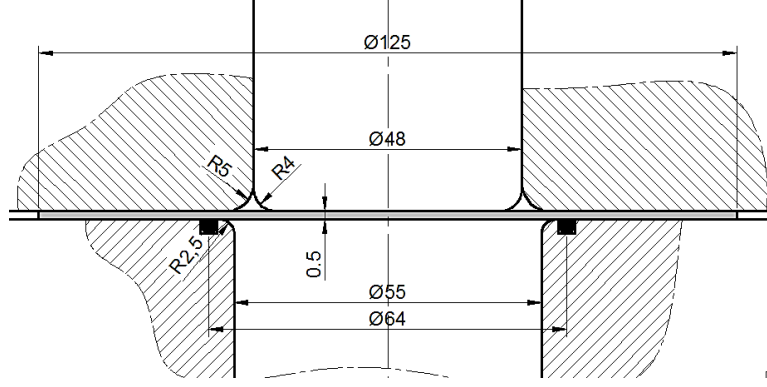
Verileri ışığında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Analizler boyunca ortam sıcaklığı sabit olarak 20°C olarak alınmıştır.

3.2.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Hazırlanması

Analiz için literatürden elde edilen veriler ışığında analiz için belirlenen geometri ölçüleri şekil 11’de belirtilmiştir. Bu çalışmada;

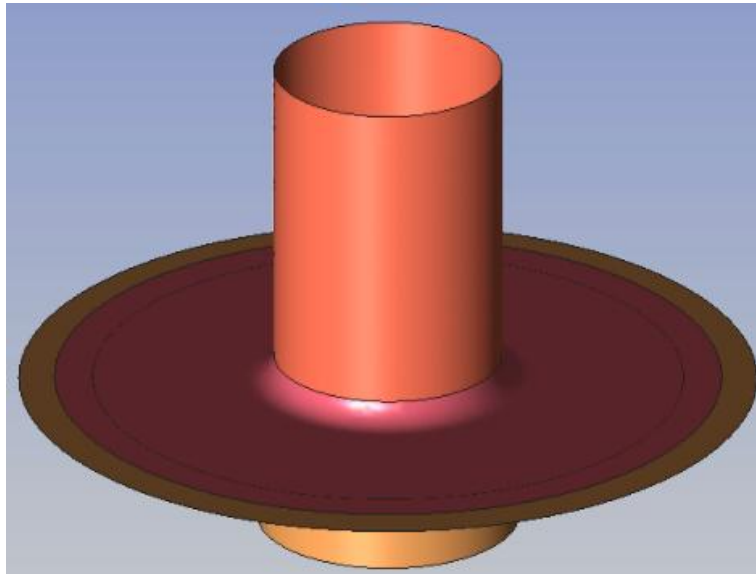
| | |
|--------------------------------------|--------|
| Zımba çapı | :48mm |
| Zımba uç yuvarlatma yarıçapı | :4mm |
| Sızdırmazlık elemanı çapı | :64mm |
| Dişi matris ağız yuvarlatma yarıçapı | :2.5mm |
| Şekillendirilmemiş sac Çapı | :125mm |
| Sac Kalınlığı | :0.5mm |

olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Analizi yapılacak geometri ölçüleri

Bu bilgiler ışığında kurulan sonlu eleman modeli şekil 3.2’de görülmektedir. Şekil 3.2’de görülen sonlu eleman eleman modeli yüzey modelleme tekniği ile oluşturulmuştur. Yüzeylerden oluşan geometriler ile daha hızlı çözümler yapılabilmesi amaçlanmıştır. Ancak programın özelliği dolayısıyla sadece sızdırmazlık elemanı tel modelleme ile oluşturulmuştur. Yüzey modellere sonlu elemanlar yazılımlarındaki yapay sinir ağı kısmında kalınlık atanabildiği gibi tel elemanlara da kesit atanabilmekteydi. Sızdırmazlık elemanımız sonlu eleman çözümünde tel eleman olarak modellenip bu tel elemana kesit atanmıştır. Şekil 3.3’de modellerin kesitleri daha anlaşılır bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Sonlu eleman modeli

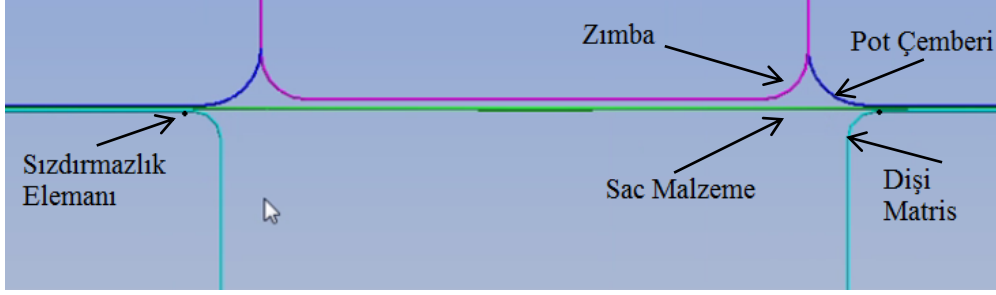
Sonlu eleman analizi için oluşturulan geometrinin kesiti şekil 3.3’de görülmektedir.

Zimba isimli parça pembe çizgi ile,

- Pot Çemberi isimli parça koyu mavi çizgi ile,
- Dişi matris isimli parça açık mavi ile,
- Sac malzeme yeşil renkli çizgi ile
- Sızdırmazlık elemanı ise bir nokta

olarak görülmektedir. Sonlu eleman modeli kendi merkez ekseninden geçen bir düzlem ile kesiştiği için yüzey modeller bir çizgi, tel model ise bir nokta olarak görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi sadece sızdırmazlık elemanı tel model olarak modellenmiştir.

Geleneksel derin çekme yöntemi çalışmalarında şayet incelenmesi istenen numune bir eksen etrafında aynı kesite sahipse, sonlu elemanlar yazılımlarında analiz edilirken hazırlanan geometri ekseriyetle eksenel simetrik olmaktadır. Bu modelleme tekniğinde numune merkezinden bir eksen geçmekte ve oluşturulan geometriler iki boyutlu çizgi olarak eksene göre konumlandırılmaktadırlar. Sonlu elemanlar yazılımı bu çizgileri sanki eksen etrafında dönerek bir yüzey oluşturmuş gibi kabul eder. Aynı zamanda bu çizgilerin yüzey olarak kabul edilmesinin yanısıra bir kalınlık da verilebilmektedir. Bu kalınlık, merkezden alttan veya üstten ötelemeli olabilmektedir. Ancak hidromekanik derin çekme imalat tekniğinde geleneksel yöntemden farklı olarak bir sızdırmazlık elemanı bulunmaktadır. Bu sızdırmazlık elemanı eksenel simetrik yöntemde bir nokta olarak tanımlanması gerektiği ve bu noktaya aynı zamanda hem kesit hem de yüzey formu kazandırılması gerektiği için günümüz şartlarında hidromekanik derin çekme yöntemi eksenel simetri metoduyla çözülememektedir. Bu sebeple tüm yüzeyler CAD ortamında oluşturulmuş olup sonlu elemanlar programına dışarıdan dahil edilmiştir.



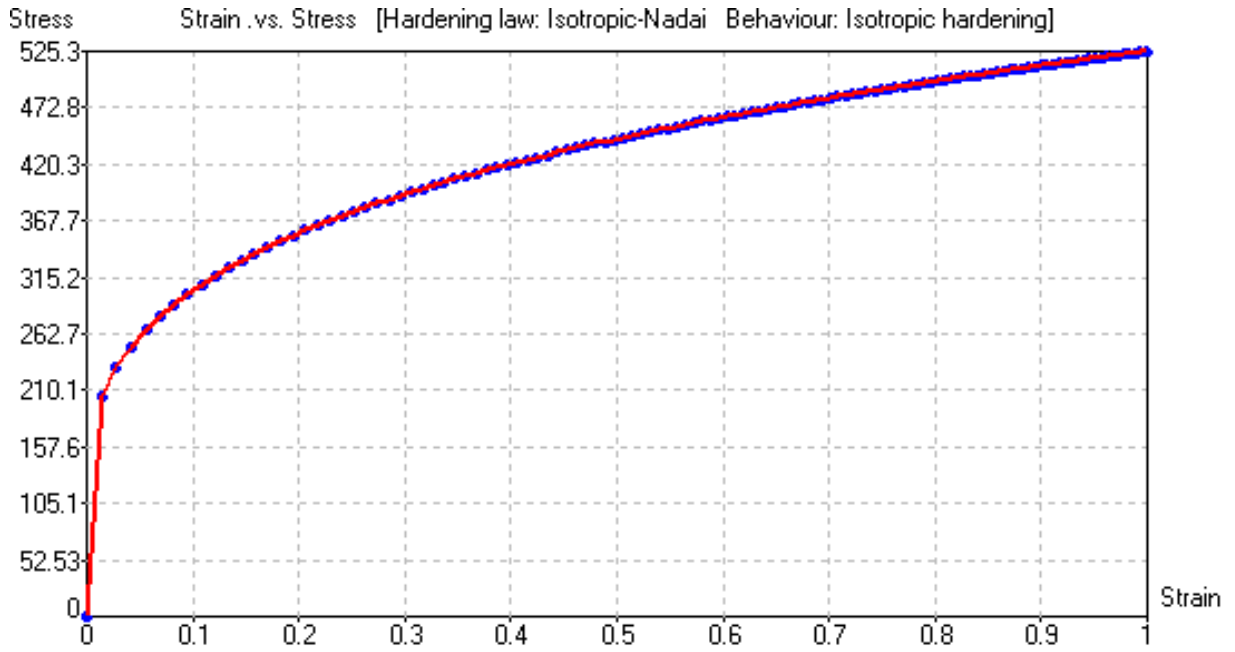
Şekil 3.3 Sonlu elemanlar modelinin kurulumu

3.2.2 Şekillendirilecek Sac Malzemesi

Analiz aşamasında sabit bir sac kalınlığı ve malzemesi belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında seçilen sac malzeme bilgileri aşağıdaki gibidir;

| | |
|--|---------------------------------|
| Malzeme ismi: | FeP05 G |
| Spesifikasyon ismi: | 1.0312, DC05+ZE, FEP05 ZE, St15 |
| ZE | |
| Young Modülü: | 210GPa |
| Poisson Oranı: | 0.3 |
| Yoğunluk: | 7800 Kg/m ³ |
| Geleneksel Elastik Limit: | 162MPa |
| R0 (Malzeme lif yönüne paralel poisson oranı): | 1.88 (-) |
| R45 (Malzeme lif yönüne 45° poisson oranı): | 1.61 (-) |
| R90 (Malzeme lif yönüne dik poisson oranı): | 2.37(-) |
| Hill: | Hill_48 |
| Anizotropi: | Transversal – Anizotropi |
| İzotropik Hardening Constant: | 512.1 MPa |
| İzotropik Hardening Exponent: | 0.245180 (-) |
| Hill exponent: | 1.72 (-) |

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Biaxial/Uniaxial yield stress oranı: | 1.05 (-) |
| Malzeme tipi: | Analitik |
| Pekleşme Kanunu: | İzotropik Nadai |
| Pekleşme Modülü: | 0MPa |
| Uzama Oranı Modeli: | Yok |
| Uzama Oranı Katsayısı: | 0.25 (1/s) |
| Uzama Oranı Sabiti: | 20 (-) |



Şekil 3.4 Analizlerde kullanılan St15 malzemesinin Gerilme-Gerinme Eğrisi

Şekillendirme sınır diyagramı analizde kullandığımız malzeme için aşağıdaki bilgileri vermektedir;

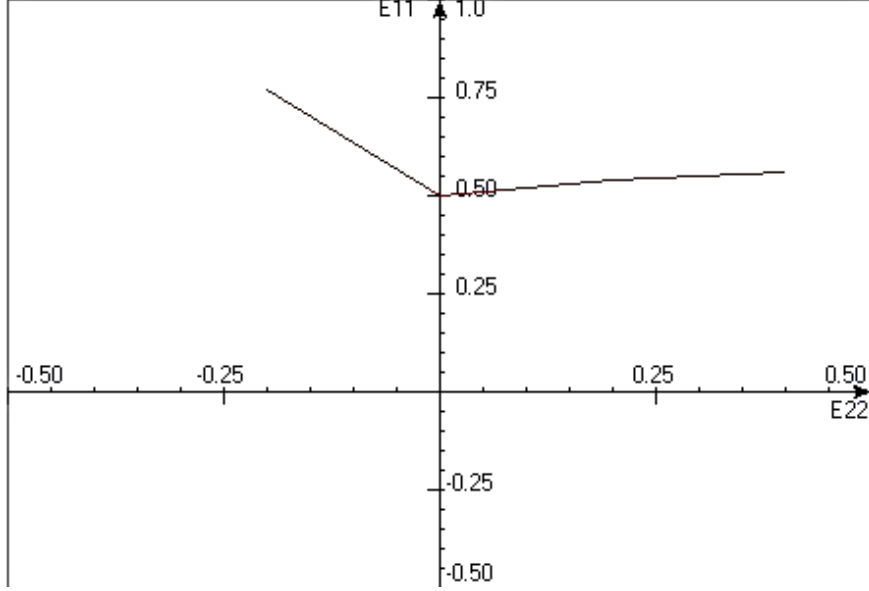
Malzeme ismi; FLC SPCEN 08

Referans Kalınlık: 0.5mm

Tehlikeli oran: %10

Düzlemsel Uzama: 5°

Düşük Uzama: 0.05 (-)

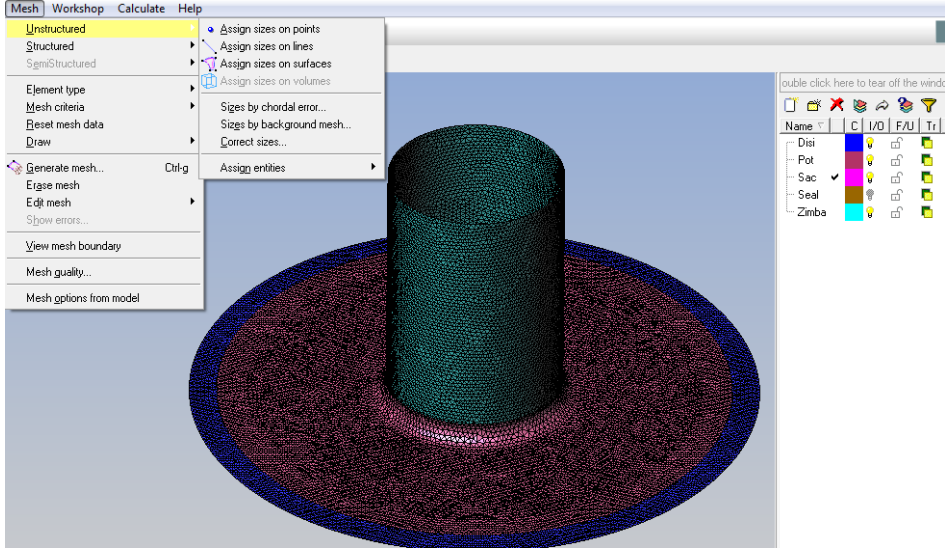


Şekil 3.5 Analizlerde kullanılan St15 malzemesinin Şekillendirme Sınır Diyagramı

3.2.3 Analiz İçin Oluşturulan Mesh Bilgileri

Sonlu elemanlar programlarında çözüm yapabilmek için geometrilerin daha küçük boyutlu elemanlara bölünmesi gerektiğini söylemiştik. Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde kullanılan mesh boyutu 1.25mm'dir. Mesh yapısı "Stampack" isimli sonlu elemanlar programında sırasıyla noktaların, kenarların ve yüzeylerin bölünmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 3.6'da ise bu yapay sinir ağları görülmektedir.

Buna ek olarak yapay sinir ağları analiz bileşenlerinin yuvarlatılmış kenarlarında daha doğru bir çözüm için 0.1mm olarak kıvrılma doğruluğu verilmiştir.



Şekil 3.6 Analiz bileşenlerinin yapay sınır ağlarına bölünmüş hali

3.2.4 Kullanılan Sınır Şartları

Çizelge 3.1’de yapılan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan basınç ve kuvvet büyüklükleri yer almaktadır. Çizelge 3.1’deki büyüklükler, analizler sırasında tam faktöriyel veya Taguchi ortogonal dizileri ile değil, analizlerden çıkan sonuçlara göre belirlenmiştir. 5MPa şekillendirici sıvı basıncı için pot çemberi baskı kuvveti aralığı 6 farklı analiz ile belirlenmişken, 7.5MPa basınç için 2 deney yeterli olmuştur. Bu yaklaşım yöntemiyle birlikte daha hızlı olarak şekillendirme için güvenli ve güvensiz bölgeler bulunmuştur.

Çizelge 3.1 Analizlerde kullanılan sınır şartları

| Analiz Sıra No. | Şekillendirici Sıvı Basıncı (MPa) | Pot Baskı Kuvveti (Ton) |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1 | 5 | 3 |
| 2 | 5 | 4 |
| 3 | 5 | 5 |
| 4 | 5 | 5,5 |
| 5 | 5 | 6 |
| 6 | 5 | 7 |
| 7 | 7,5 | 4 |
| 8 | 7,5 | 7 |
| 9 | 10 | 4 |
| 10 | 10 | 5 |
| 11 | 10 | 6 |
| 12 | 10 | 7 |
| 13 | 10 | 7,5 |
| 14 | 12,5 | 5,5 |
| 15 | 12,5 | 6 |
| 16 | 12,5 | 6,5 |
| 17 | 12,5 | 7,5 |
| 18 | 12,5 | 8,25 |
| 19 | 15 | 7 |
| 20 | 15 | 7,5 |
| 21 | 15 | 7,75 |
| 22 | 15 | 8 |
| 23 | 15 | 9 |
| 24 | 17,5 | 9 |
| 25 | 17,5 | 10,25 |
| 26 | 17,5 | 10,5 |
| 27 | 20 | 10 |
| 28 | 20 | 10,5 |
| 29 | 20 | 11 |
| 30 | 25 | 12 |
| 31 | 25 | 13 |
| 32 | 25 | 13,5 |
| 33 | 25 | 14 |

3.2.5 Zimba İlerleme Miktarı ve Hızı

Bu tez çalışmasında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde;

Zimba ilerleme miktarı :40mm

Zimba hızı :0.013 m/s olarak belirlenmiştir.

Bu değerler, farklı geometrilerle yapılan tüm analizlerde sabit tutulmuştur. Böylece farklı geometrilerin şekillendirilebilme farklılıklarını kıyaslamak mümkün hale gelmiştir.

Bahsedilen farklı geometri analizleri silindirik zimba, dikdörtgensel zimba ve karmaşık geometrili zimba ile yapılan analizlerden oluşmaktadır. Aynı şekillendirme hızında yeterli inceleme sağlanabilmesi için tüm analizlerde şekillendirici sıvı basınçları ve pot çemberi kuvvet büyüklükleri araştırılmıştır.

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 33 adet hidromekanik derin çekme analizi sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Bu analizler neticesinde şekillendirici sıvı basıncı ve pot baskı kuvvetlerinin incelmeye olan etkisi incelenmiştir. İncelemeler neticesinde sac şekillendirme işleminde pot baskısı ve şekillendirici sıvı basıncı diyagramında, kırışma bölgesi, yırtılma bölgesi, yetersiz basınç bölgesi ve güvenli bölge olarak 4 farklı bölge olduğu saptanmıştır.

Analizler sırasında sayısız kez yapılan denemelerde sürekli yırtılmalar, kırışmalar gözlemlenmiştir. Bunun sebebi kırışma ve yırtılma bölgelerinin sonsuz büyüklükte, güvenli şekillendirme bölgesinin ise oldukça dar bir alanda sınırlı kalmasıdır. Literatür araştırmalarından elde edilen basınç ve pot baskı kuvveti değer araştırmaları neticesinde 10MPa ve 6tonluk pot baskı kuvveti değeri denenmiş ve yapılan bu deneme neticesinde üründe meydana gelen incelmenin çok az olduğu ve şekillendirme işleminin de tamamen güvenli olduğu görülmüştür.

Denemeler esnasında temel aldığımız malzeme literatür araştırmalarında diğer araştırmacıların üzerinde çalıştığı malzemelere denk bir malzeme olması sebebiyle, yine literatür araştırmalarında buna benzer malzemeler için benzer şekillendirici sıvı basıncı ve pot baskı kuvveti büyüklükleri denenmiştir. Yapılan pekçok denemede yırtılma ve kırışma gözlemlenmiştir. Bu denemeler esnasında bir şekillendirici sıvı basıncı-baskı kuvveti çifti güvenli şekillendirme olarak tamamlanmıştır. Bu şekillendirici sıvı basıncı-baskı kuvveti çiftinin civarında yapılan 33 deneme ile de hidromekanik derin çekme yönteminde yırtılma, kırışma, yetersiz basınç ve güvenli bölge olmak üzere dört farklı bölge olduğu tespit edilmiştir.

Analiz aşamasında araştırılan pot baskı kuvvetleri ve şekillendirici sıvı basınçları tablo 4.1'de gösterilmiştir. Tablo 4.1'de verilen basınç ve baskı kuvveti değerleri birbirleriyle tam faktöriyel deney tasarımı veya Taguchi yönteminde olduğu gibi ortogonal dizilerden faydalanılarak yapılmamıştır. Bu analizlerdeki basınç ve kuvvet büyüklüklerinin kullanılma sıralarını yine analizlerden çıkan sonuçlar belirlemiştir. Örneğin 10MPa şekillendirici basıncı kullanıldığında 5tonluk pot kuvveti yetersiz gelip kırışmaya sebep oluyorsa, 5tondan daha az pot kuvvetlerini tekrar tekrar denenmesine

gerek duyulmamıştır. Yine benzer şekilde 10MPa sıvı basıncında 10tonluk pot kuvveti sacın yırtılmasına sebep oluyorsa 10tondan yüksek değerleri tekrar tekrar hesaplanmasına gerek duyulmamıştır.

Tablo 4.1'deki güvenilirlik durumları ise şekillendirme sınırı eğrisine göre belirlenmiştir. Bu güvenilirlik durumları da sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bazı analizler aşırı kırılma ve yırtılma sebebiyle tamamen neticelendirilememiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu tez çalışmasında yapılan sayısız hidromekanik derin çekme analizi denemeleri sürekli güvenli bölgede değil diğer bölgelerde çıkmıştır. Yapılan literatür araştırmaları neticesiyle de 10MPa şekillendirici sıvı basıncı ve 6ton pot baskı kuvvetinde analiz tamamen güvenli olarak sonuçlanmıştır. Sonuçlandırılan bu güvenli şekillendirme analizi sonrasında ise bu basınç-kuvvet ilişkisinin etrafındaki değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve 0.5mm St15 sac malzemesi için 40mm hidromekanik derin çekme işlemi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak güvenli şekillendirme bölgesi tespit edilmiştir.

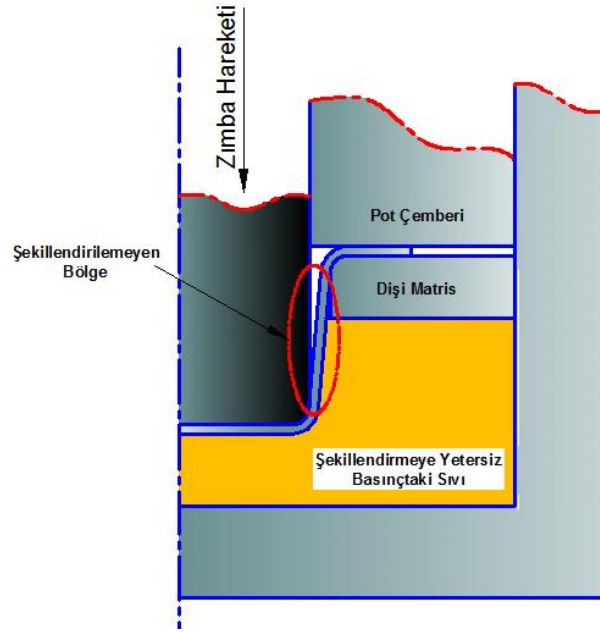
Sonlu elemanlar yöntemiyle tespit edilen bölgelerin sınırları ise en küçük kareler yöntemi kullanılarak çizilmiştir. Sınırların en küçük kareler yöntemi kullanılarak çizilmesiyle birlikte bölgeler tamamen birbirinden ayırt edilmiştir.

Çizelge 4.1 Sonlu elemanlar analizi güvenilirlik sonuçları

| Analiz Numarası | Analiz sıralaması | Basınç (MPa) | BH kuvveti (ton) | tmin (mm) | tmax (mm) | Güvenilirlik |
|------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| 1 | 28 | 5 | 3 | 0,41863 | 0,54976 | GÜVENLİ |
| 2 | 18 | 5 | 4 | 0,40675 | 0,5453 | GÜVENLİ |
| 3 | 33 | 5 | 5 | 0,3931 | 0,54429 | İNCELME |
| 4 | 4 | 5 | 5,5 | 0,05113 | 0,51606 | YIRTILMA |
| 5 | 27 | 5 | 6 | 0,047154 | 0,5134 | YIRTILMA |
| 6 | 19 | 5 | 7 | 0,040729 | 0,50905 | YIRTILMA |
| 7 | 20 | 7,5 | 4 | 0,4172 | 0,55199 | GÜVENLİ |
| 8 | 21 | 7,5 | 7 | 0,37257 | 0,5394 | YIRTILMA |
| 9 | 15 | 10 | 4 | | | KIRIŞMA |
| 10 | 2 | 10 | 5 | 0,41681 | 0,55988 | GÜVENLİ |
| 11 | 1 | 10 | 6 | 0,40863 | 0,5475 | GÜVENLİ |
| 12 | 3 | 10 | 7 | 0,39744 | 0,55416 | GÜVENLİ |
| 13 | 30 | 10 | 7,5 | 0,39134 | 0,54295 | İNCELME |
| 14 | 22 | 12,5 | 5,5 | 0,42456 | 0,69061 | KIRIŞMA |
| 15 | 26 | 12,5 | 6 | --- | --- | KIRIŞMA |
| 16 | 29 | 12,5 | 6,5 | 0,40749 | 0,55408 | GÜVENLİ |
| 17 | 23 | 12,5 | 7,5 | 0,40149 | 0,54673 | GÜVENLİ |
| 18 | 31 | 12,5 | 8,25 | 0,39309 | 0,54429 | İNCELME |
| 19 | 7 | 15 | 7 | | | KIRIŞMA |
| 20 | 14 | 15 | 7,5 | | | KIRIŞMA |
| 21 | 14 | 15 | 7,75 | 0,40062 | 0,55643 | GÜVENLİ |
| 22 | 6 | 15 | 8 | 0,39842 | 0,5531 | İNCELME |
| 23 | 5 | 15 | 9 | 0,39252 | 0,54658 | İNCELME |
| 24 | 24 | 17,5 | 9 | 0,39481 | 0,56128 | İNCELME |
| 25 | 32 | 17,5 | 10,25 | 0,38477 | 0,54764 | İNCELME |
| 26 | 25 | 17,5 | 10,5 | 0,38249 | 0,54636 | YIRTILMA |
| 27 | 9 | 20 | 10 | | | KIRIŞMA |
| 28 | 16 | 20 | 10,5 | 0,38526 | 0,5927 | YIRTILMA |
| 29 | 8 | 20 | 11 | 0,38061 | 0,55267 | YIRTILMA |
| 30 | 12 | 25 | 12 | | | YIRTILMA ve KIRIŞMA |
| 31 | 11 | 25 | 13 | | | YIRTILMA ve KIRIŞMA |
| 32 | 17 | 25 | 13,5 | 0,36368 | 0,57907 | YIRTILMA |
| 33 | 13 | 25 | 14 | 0,35565 | 0,55328 | YIRTILMA |

Güvenli bölge olarak tabir edilen ve burada sacın istenildiği gibi şekillendirilebildiği bölge, kırışma ve yırtılma bölgesi arasında bulunmaktadır. Yüksek şekillendirici sıvı basınçları yüksek sürtünme kuvvetini beraberinde getirdiği için sac malzeme yırtılmaya yönelmektedir. Yine aynı şekilde düşük şekillendirici sıvı basıncı zımbanın hareketi

esnasında sacı radyal olarak çekememekte dolayısıyla sac malzeme zımba uç kavisi ve dişi matris ağız kavisi arasında gerilmeye zorlanmaktadır. Bu durum sacın dişi matris kavisinde sürtünerek daha fazla incelmesine hatta numune üzerindeki gerilmenin en fazla olduğu yanal duvarlarında yırtılmasına sebep olmaktadır. Bu durum bir pot basıncı için yeterli miktarda şekillendirici sıvı basıncı olması gereğini göstermiştir. Şekil 4.1’de bu durumu gösteren bir şematik ifade yer almaktadır.



Şekil 4.1 Yetersiz Şekillendirici Sıvı Basıncı neticesiyle oluşan durumu gösteren şematik bir ifade

Pot baskı kuvvetinin şekillendirici sıvı basıncı ve kırışma kuvvetlerini yenemediği durumlarda ise şekillendirici sıvı, kırışan sac malzemenin arasından sızarak şekillendirici sıvı basıncını düşürmüştür. Bu durumda istenilen şekillendirici sıvı basıncına ulaşılamamıştır.

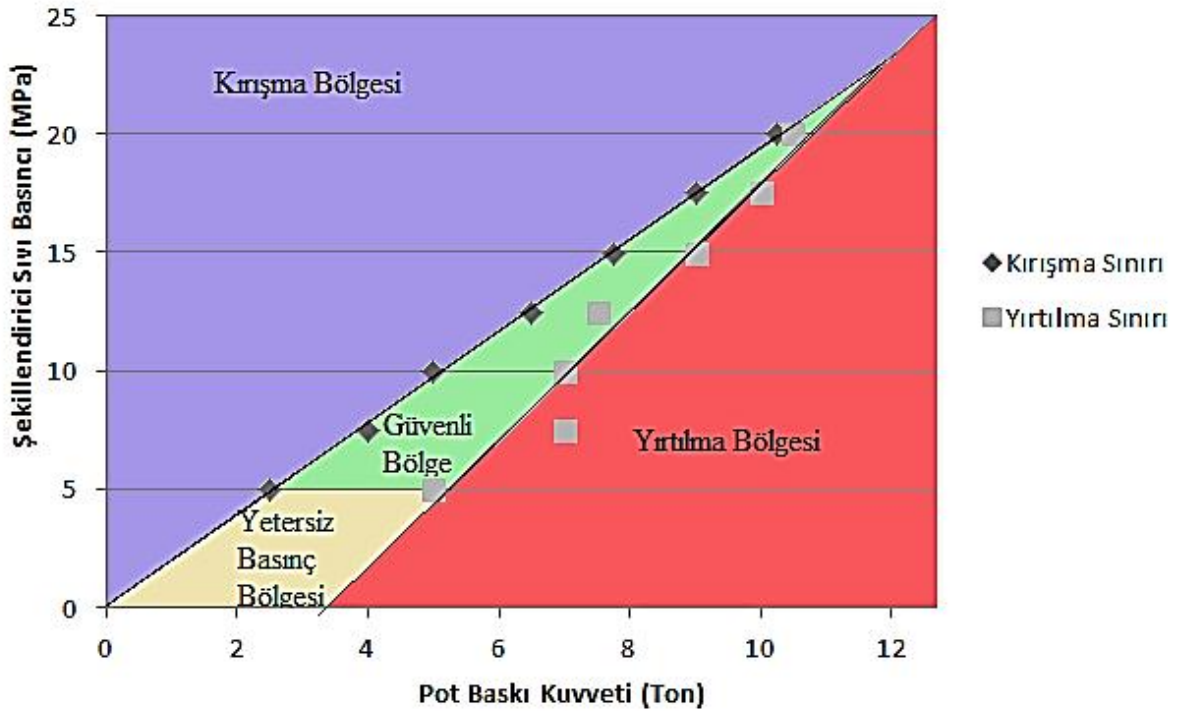
Pot baskısının yetersiz olması durumunda şekillendirici sıvı basıncı pot baskı kuvvetini karşı koyarak kırışmalara sebep olmuştur. Böylelikle kırışma durumunda sızdırmazlık elemanı görevini yerine getiremez duruma gelmiş ve istenilen şekillendirici basıncı değerine ulaşamamıştır. Analizlerden bu durumda çıkan sonuçlar kırışma bölgesine alınmıştır.

Pot baskısının yeterli ölçüde olması durumunda ise kırışma gerçekleşmemiş ve sac malzeme istenilen şekli almıştır. Sac malzemenin istenilen şekli alabildiği analiz sonuçları ise güvenli bölgeye alınmıştır. Güvenli bölgenin büyüklüğünü tespit edebilmek için şekillendirici sıvı basıncı sabit tutularak pot baskısı arttırılmıştır.

İncelmelerin yırtılmaya doğru yöneldiği analizlerde ise pot baskısının arttırılması kesilmiştir. Daha yüksek pot baskı kuvvetlerinin. saca gereğinden fazla yük uygulaması sebebiyle sac-dişi matris ve sac-pot çemberi arasındaki sürtünme kuvveti artmış ve sac giderek incelmeye hatta yırtılmaya başlamıştır. Bu durumda yırtılma bölgesine girilmiş olduğu görülmüştür. Sac istenilen şeklin kazandırılması için gereken basınçtan daha düşük şekillendirici sıvı basınçları ise yetersiz basınç bölgesine alınmıştır.

Silindirik zımba ile yapılan 33 adet sonlu elemanlar analizi neticesinde şekil 4.2’de görüldüğü gibi 4 farklı bölge oluşturulmuştur. bu bölgelerin sınırları, sonlu elemanlar analizlerinden çıkan yırtılma ve kırışma sınırındaki ürünler üzerindeki pot baskı kuvveti ve şekillendirici sıvı basınç bilgilerinin en küçük kareler yöntemini kullanarak bir çizgi ile birleştirilmesi ile çizilmiştir. Şekillendirici sıvı basıncı 23MPa civarını aştığı durumlarda ise yırtılma bölgesi ve kırışma bölgesi bir hat ile ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu basınç değerinden sonra güvenli şekillendirme sözkonusu olamamıştır. Pot baskısının yetersiz geldiği durumlarda sac malzeme kırışarak pot kuvvetini yenmiş ve basınç kaçağı oluştu. Pot baskısının kırışmayı engelleyebilecek kadar büyük olduğu durumlarda ise sac malzeme ile sürtünen pot çemberi ve dişi matris arasında oluşan sürtünme kuvvetleri, sac malzemenin yırtılmasına sebep olmuştur.

Bölge sınırlarını oluşturan yırtılma ve kırışma durumlarındaki şekillendirici sıvı basıncı ve pot çemberi kuvveti değerleri bir doğru boyunca değişiyor gibi gözüktüğü için bu değerler en küçük kareler yöntemi kullanılarak bahsedilen değerler için en uygun doğru çizilmiştir. Böylece 33 adet analizden çıkan sonuçlar ile bölge sınırları matematiksel yaklaşım ile optimize edilmiştir.



Şekil 4.2 Pot baskısı ve Şekillendirici Sıvı Basıncı İlişkisi

4.1 Silindirik Zımba İle Yapılan Hidromekanik Derin Çekme Analizlerinde Bulunan Şekillendirme Bölgelerine Ait Sonlu Elemanlar Analizlerinin İncelenmesi

Yapılan bu tez çalışmasında 33 farklı sonlu elemanlar analizi neticesinde 4 farklı bölge oluştuğu görülmüştü. Bu kısımda bu 4 farklı bölgeye ait 4 farklı sonlu elemanlar analizi incelenecektir.

Bu analizler boyunca şekillendirilmek istenen ürün hakkında;

- Kalınlık değişimi,
- Güvenilirlik,
- Uzama miktarları,
- Şekillenme Tipleri

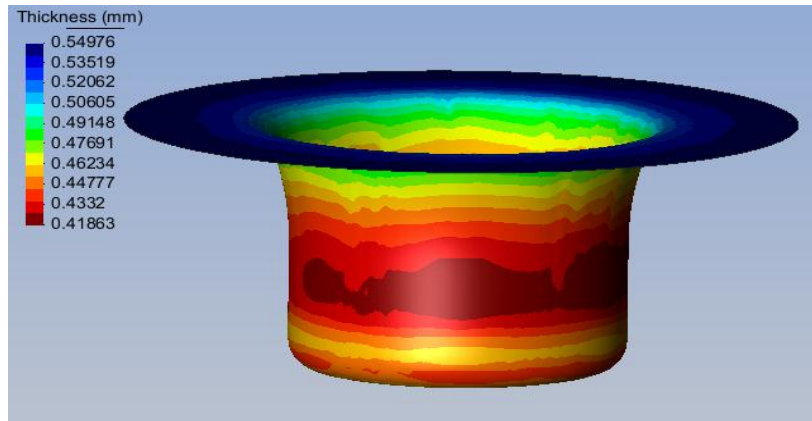
Sınır şekil diyagramları incelenecektir.

4.1.1 Yetersiz Basınç bölgesi Sonlu elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

Yetersiz bölge sınırı olarak 5MPa şekillendirici sıvı basıncı ve 3ton pot çemberi baskı kuvveti alınmıştır. Yapılan sonlu elemanlar analizleri neticesiyle 5MPa civarı ve daha düşük şekillendirici sıvı basınçlarında sac malzemenin zımba tarafından şekillendirilen kısımlarında da yırtılmalar gözlemlenmiş hatta sac malzemenin zımba tarafından tamamen şekillendirilemediği görülmüştür. Bu şekillendirilememe sorununun kaynağı pot baskı kuvvetinin fazla olduğu düşünülerek pot baskı kuvveti kırışma sınırına kadar düşürülmüş ancak yine de iyi bir şekillendirme işlemi gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple 5MPa basınç civarı ve daha düşük şekillendirici basınç büyüklükleri yetersiz basınç olarak kabul edilmiştir.

4.1.1.1 Yetersiz Basınç Bölgesi Sınırındaki Şekillendirme İşlemi İçin Ürün Üzerindeki Kalınlık Değişimlerinin İncelenmesi

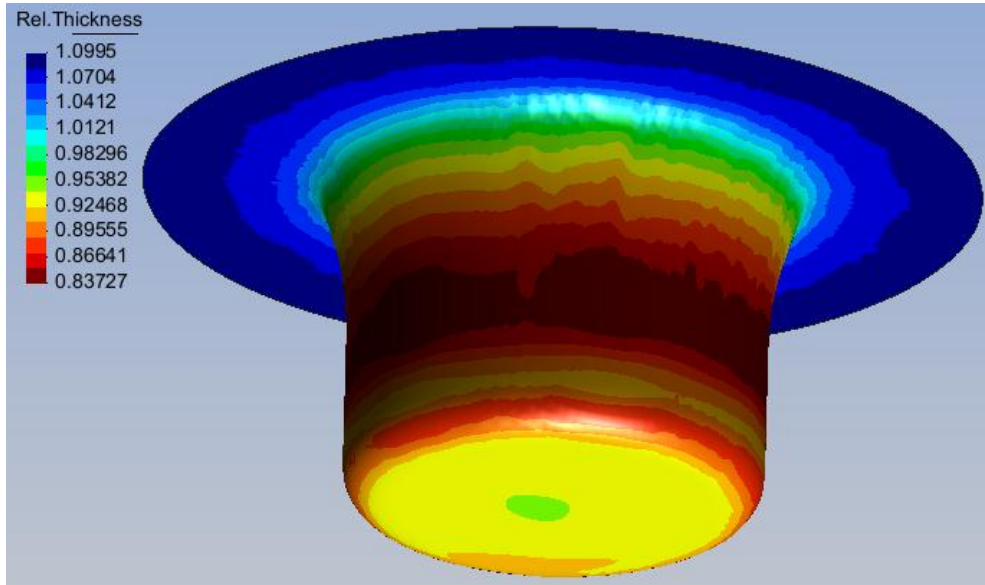
Şekil 4.3’de yetersiz basınç bölgesinde şekillendirme işlemi yapılan bu ürünün üzerindeki renk farklılıkları ile kalınlık değişimleri kolaylıkla görülebilmektedir. Bu analiz neticesinde en fazla incelme, literatür aşamasında araştırıldığı gibi, şekillenen düşey kısmın orta bölgelerinde olduğu görülmektedir. Ancak bu bölgede ani kalınlık değişimleri dalgalanmaya sebep olmuştur. Bu dalgalanma bize bu kısımda kırışmanın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3 Yetersiz Basınç Bölgesindeki Kalınlık Değişimi

Henüz şekillendirilmemiş, pot çemberi plakası ve dişi matris plakası arasında kalan sac malzeme de yine aynı şekilde literatür kısmındaki araştırmada belirtildiği gibi kalınlaşmalar gözlemlenmiştir. Bu kısımdaki kalınlaşmanın çok ileri boyutu kırıxmadır. Yetersiz basınç bölgesindeki bu ürünün analizinde pot baskı kuvvetinin azaltılması ile kırıxma bölgesine geçilebilmektedir.

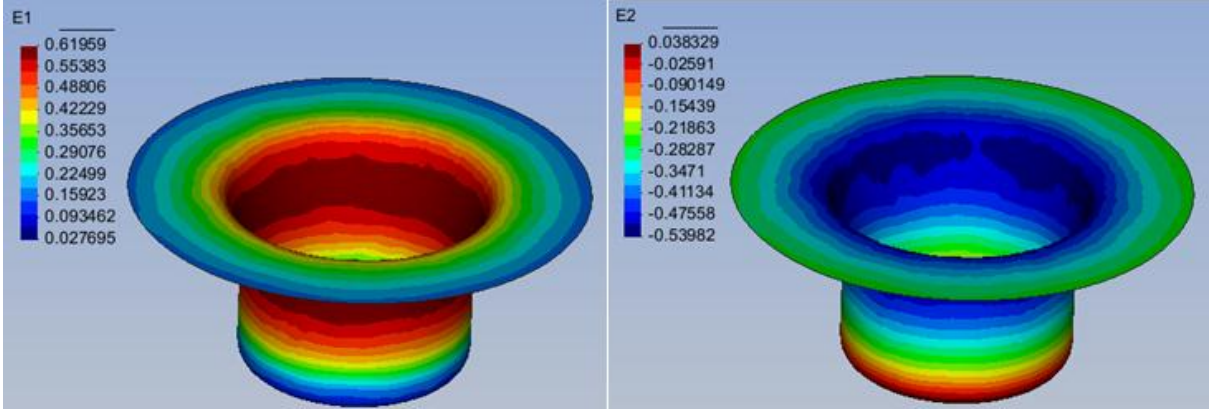
Şekil 4.4’de ise bağıl kalınlık değişimi görölmektedir. Şekillendirilmemiş bölge olan zımbanın alt kısmındaki bölgenin kalınlığı gerçek kalınlığa en yakın bölge olarak olarak görölmektedir. Diğer kısımlarda kalınlaşma veya incelme görölebilirken bu kısımda çok az bir kalınlık değişimi görölmektedir.



Şekil 4.4 Bağıl Kalınlık Değişimi

4.1.1.2 Yetersiz Basınç Bölgesi Sınırındaki Şekillendirme İşlemi Boyunca Üründeki Uzamaların İncelenmesi

Şekil 4.5’de, şekillendirilme işlemi sonrasında ürün üzerinde düşey ve yatay birim uzamalar görölmektedir. ϵ_1 düşey, ϵ_2 ise yatay birim uzamayı göstermektedir. Birim uzamaların ne şekilde tespit edildiği literatür kısmında incelenmiş bulunmaktadır.



Şekil 4.5 Yetersiz Basınç Bölgesindeki Birim Uzamalar

4.1.1.3 Yetersiz Basınç Bölgesi Sınırındaki Şekillenme Tiplerinin İncelenmesi

Şekil 4.6'da, yetersiz şekillendirme bölgesinde, ürün üzerinde oluşan şekillenme tiplerini göstermektedir. Üründe 6 farklı şekillendirme tipi olduğu görülmektedir.

Sonlu elemanlar programında;

“wrinkling” olarak bahsedilen kısım güçlü kırışma bölgesini ifade etmektedir. Bu bölge kırışmaya maruz kalmaktadır ancak üzerindeki pot kuvveti kırışma kuvvetini yendiği için bu kısımda herhangi bir kırışma oluşmadığı görülmektedir.

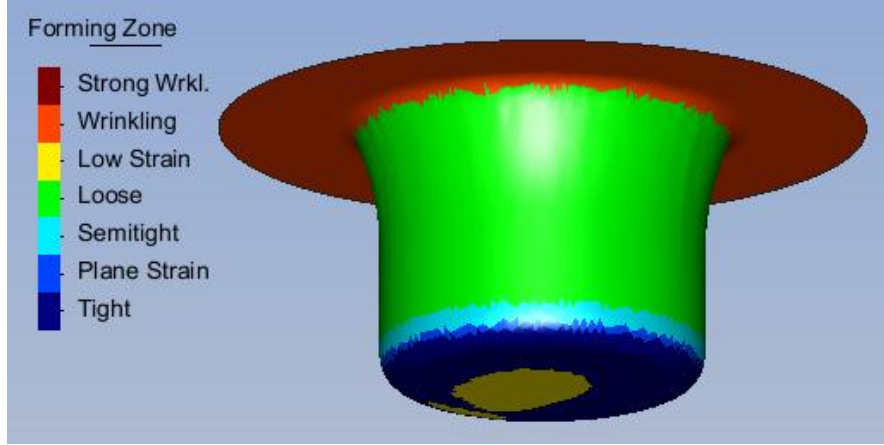
“Low Strain” olarak bahsedilen kısımda ise üzerinde düşük uzama olan kısımları göstermektedir.

“Loose” olarak bahsedilen, herhangi rijit analiz bileşeni ile bir yüksek bir baskı ile temasta olmayan bölgeleri göstermektedir.

“Semitight” olarak bahsedilen ise ise “yarı sıkı” olarak tabir edilebilecek bir ibaredir. Bir rijit analiz bileşeni ile orta derecede baskı ile temasta olduğunu göstermektedir.

“plane strain” bölgesinde düzlemsel bir uzamadan bahsedilmektedir. ŞSD’de sağ tarafta bulunan noktalar bu bölgede bulunmaktadır.

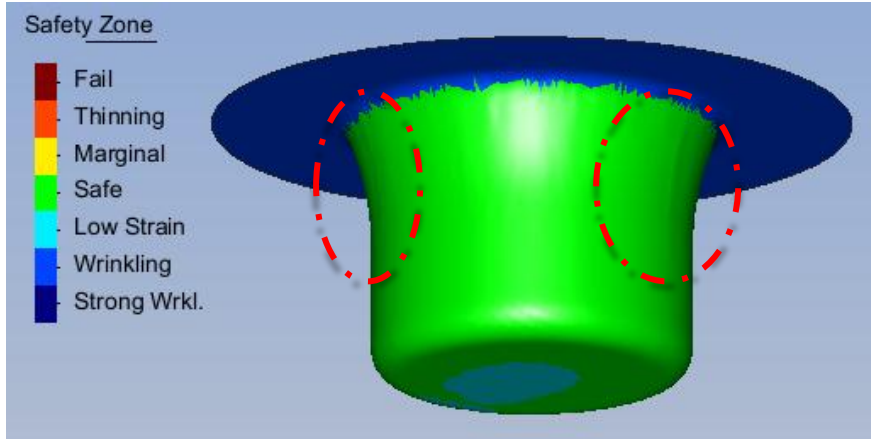
“Tight” bölgesi, aynı doğrultuda basınca maruz kalan en büyük düzlemsel alan bölgesidir. Bu sebeple aynı doğrultudaki en büyük kuvvet burada oluşmaktadır. Zimba bileşeni ile tam temas bölgesidir.



Şekil 4.6 Yetersiz şekillendirme Bölgesinde ürün üzerindeki şekillenme tipleri

4.1.1.4 Yetersiz Basınç Bölgesi Sınırdaki Şekillendirme Güvenilirliğinin İncelenmesi

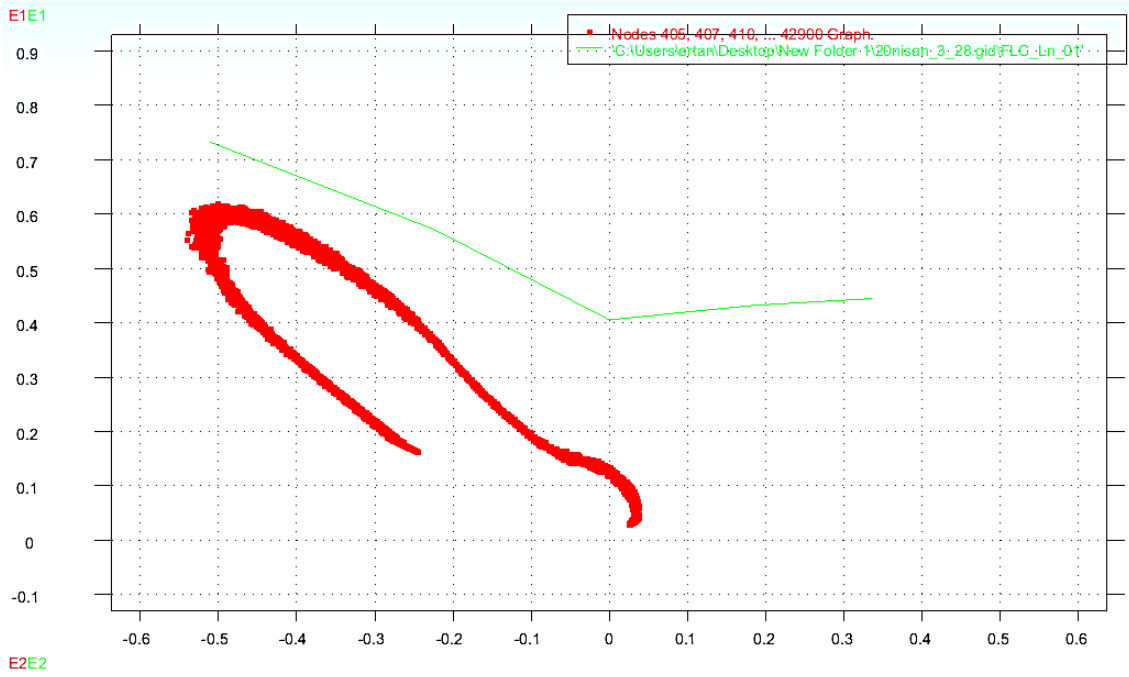
Yetersiz basınç alanı sınırı görsel olarak belirlenen bir sınırdır. Bu sınıra yakın olan basınç değerleri ürünü zimbaya tam olarak sıvayamadığı için kırışmalar görülebilmektedir. Şekil 4.7’de kırmızı çember içine alınan bölgede kırışma gözlemlenmektedir.



Şekil 4.7 Yetersiz Basınç Bölgesi sınırında ürün şekillendirme güvenirligi

4.1.1.5 Yetersiz Basınç Bölgesi Sınırında, Şekillendirme Sınır Diyagramı

Yetersiz basınç bölgesinde yapılan şekillendirme işleminde sac üzerindeki düğüm noktalarındaki birim uzamalar şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu düğüm noktalarındaki birim uzamalar şekillendirme sınır eğrisini geçmemiş, tamamen güvenli bölgede yer almıştır.

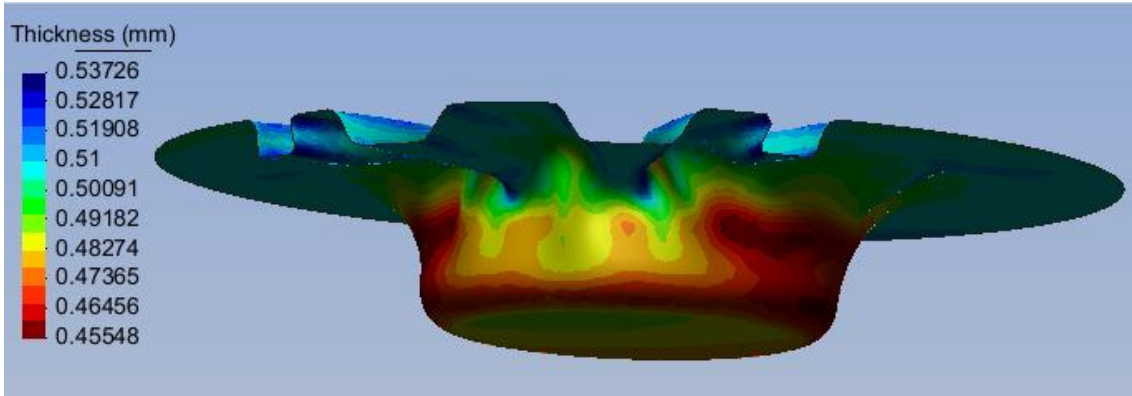


Şekil 4.8 Yetersiz Basınç Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı

4.1.2 Kırışma Bölgesi Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

Kırışma bölgesi için 10MPa şekillendirme sıvı basıncında, 4ton pot çemberi baskı kuvveti ile yapılan analizden alınan veriler incelenecektir. Şekillerden görüldüğü gibi kırışmalar bir doğrultuda oluşmuştur. Kırışmaların sadece bir doğrultuda oluşmuş gibi analizin sonuçlanmasının sebebi ise sacın bir bölgesinde oluşan herhangi bir kırışma neticesiyle şekillendirici sıvı kaçaklarının oluşması ve analizi gerçekleştirecek basıncın bir türlü modellenememesi olarak düşünülmektedir.

4.1.2.1 Kırışma Bölgesi Sınırdaki Şekillendirme İşlemi İçin Ürün Üzerindeki Kalınlık Değişimlerinin İncelenmesi

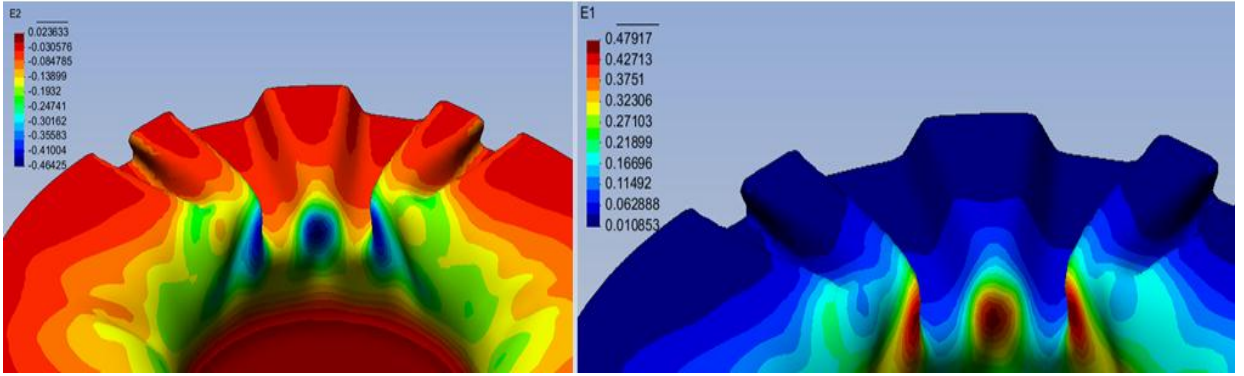


Şekil 4.9 Kırışma Bölgesindeki kalınlık değişimi

Şekil 4.9'da kırışma bölgesinde şekillendirme işlemi yapılan bu ürünün üzerindeki renk farklılıkları ile kalınlık değişimleri görülmektedir. Yüksek boyutlu kırışma, şekillendirici sıvı basıncının dışarı kaçmasına sebep olduğu için analiz yarıda kesilmiş ve zımba hareketini tamamlayamamıştır.

4.1.2.2 Kırışma Bölgesi Sınırındaki Şekillendirme İşlemi Boyunca Üründeki Uzamaların İncelenmesi

Şekil 4.10'da, şekillendirilme işlemi sonrasında ürün üzerinde düşey ve yatay birim uzamalar görülmektedir. ϵ_1 düşey, ϵ_2 ise yatay birim uzamayı göstermektedir.

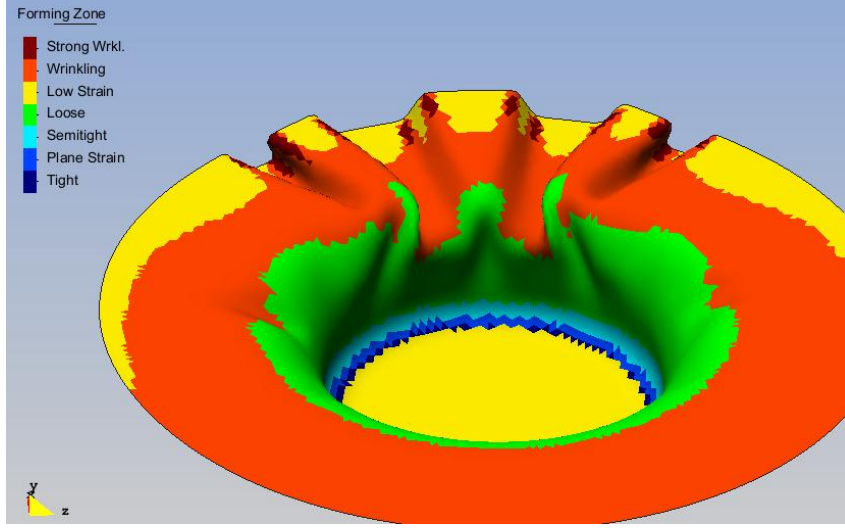


Şekil 4.10 Yırtılma Bölgesindeki Birim Uzama Miktarları

4.1.2.3 Kırışma Bölgesi Sınırındaki Şekillenme Tiplerinin İncelenmesi

Şekil 4.11'de, kırışma bölgesinde, ürün üzerinde oluşan şekillenme tiplerini göstermektedir. Yetersiz basınç bölgesinde 6 şekillenme tipi görülmüştü, bu üründe ise 7 farklı şekillendirme tipi olduğu görülmektedir.

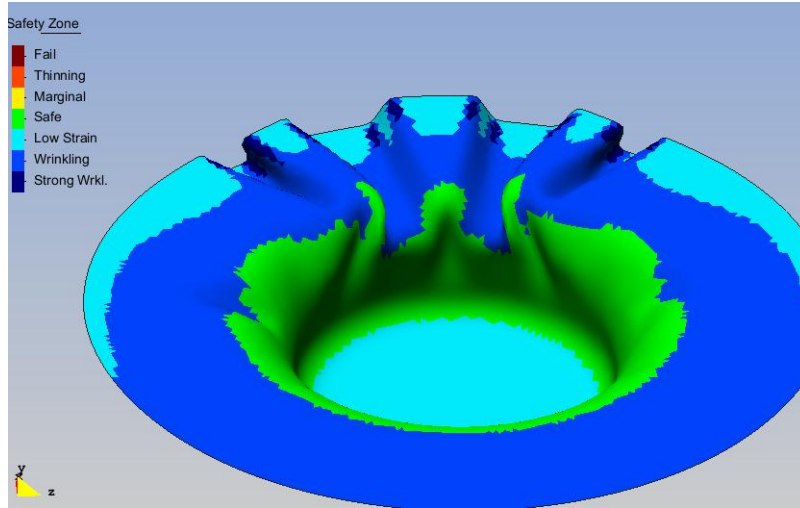
Yetersiz basınç bölgesinde olmayıp burada ortaya çıkan şekillenme tipi “strong wrinkling” şekillenme tipidir. Bu şekillenme tipi güçlü kırışma tipidir. Malzeme buralarda pot baskısını yenerek kuvvetli bir şekilde kırışmaktadır.



Şekil 4.11 Kırışma Bölgesinde Şekillendirme Tipleri

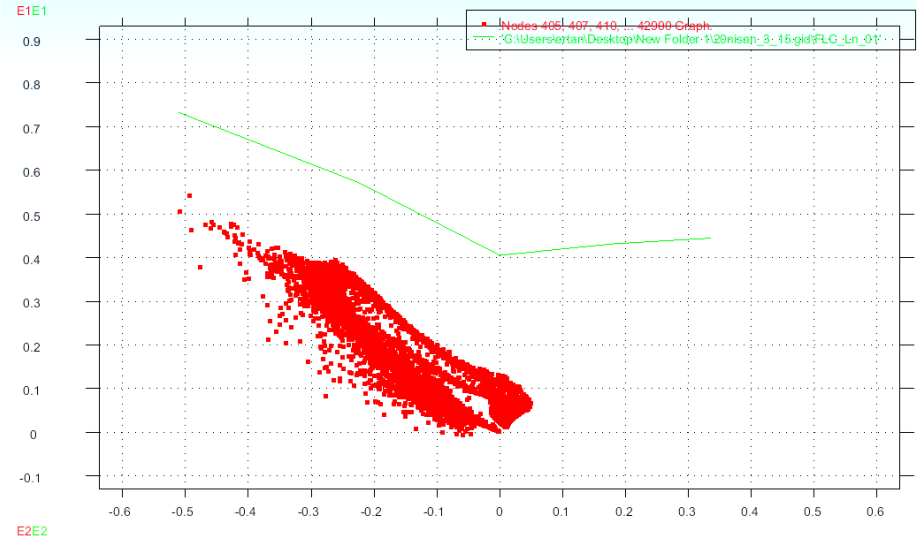
4.1.2.4 Kırışma Bölgesi Sınırındaki Şekillendirme Güvenilirliğinin İncelenmesi

Şekil 4.12’de kırışma bölgesindeki şekillendirme güvenilirliği görülmektedir. Kırışma bölgesinde sac malzeme kalktığı için ve buradan sızdırmazlık sağlanamadığı için analiz istenildiği gibi gitmemekte ve analiz durmaktadır. Bu sebeple kırışmaları bu durumda mümkün olabildiği kadar inceleyebilmekteyiz. Kırışma bölgesinde herhangi bir yırtılma görülmemektedir. Kırışarak atalet momenti yükselen sac diğer yandan sızdırmazlığı bozarak analizin daha fazla sürmesini engellemektedir. Oysa geleneksel yöntemi düşünecek olsaydık analiz devam ederek kırışan bölgelerde yırtılmalar görülebilecekti.



Şekil 4.12 Kırışma Bölgesindeki şekillendirme işleminde güvenilirlik

4.1.2.5 Kırışma Bölgesi Sınında, Şekillendirme Sınır Diyagramı



Şekil 4.13 Kırışma Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı

Kırışma bölgesinde yapılan şekillendirme işleminde sac üzerindeki düğüm noktalarındaki birim uzamalar şekil 4.13’de gösterilmiştir. Bu düğüm noktalarındaki birim uzamalar şekillendirme sınır eğrisini geçmemiş, tamamen güvenli bölgede yer almıştır. Burada çalışmanın yarım kaldığı da açıkça görülmektedir. Derin çekme işlemlerinde güvenli bölgelerdeki şekillendirme sınır diyagramlarında görülen kanca silüeti burada tamamlanmamıştır. Kırışmaların oluşması şekillendirici sıvı basıncının dışarı kaçmasına sebep olarak analizin sonuna kadar devam etmesine engel olmuştur. Ayrıca kırışma durumlarında, dişi matris ağız yarıçapına yakın yerlerde sac malzemenin atalet momenti büyümektedir. Atalet momenti büyümüş olan malzemenin ise şekillendirilebilmesi çok zor ve hatta imkansız hale gelebilmektedir. Bu esnada kırışmış olan sacı şekillendirmek isteyen zımba sacı ezerek, sacın üstüste katlanmasına ve ilerleyen şekillendirme zamanlarında ise yırtılmasına sebep olabilmektedir.

Tüm bu sebeplerden dolayı kırışma oluşumu hidromekanik derin çekme işleminde geleneksel derin çekme işlemine oranla daha fazla kaçınılması gereken bir durumdur. Diğer yandan yüksek basınca sahip olan şekillendirici sıvı basıncının üründe meydana gelen kırışmalardan dolayı dışarı kaçması çeşitli iş kazalarına sebep olabilmektedir.

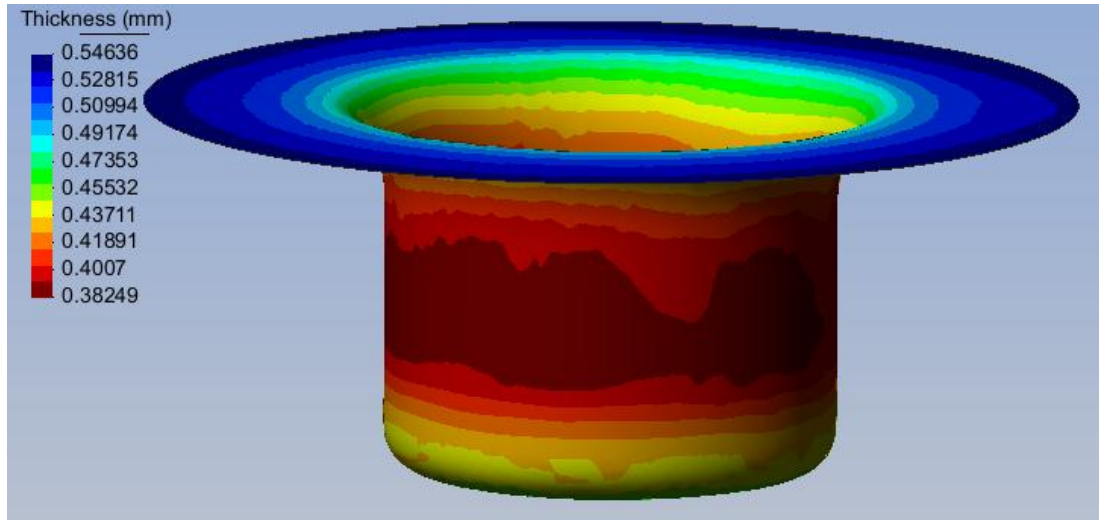
Deneysel çalışmalarda bu gibi durumlar için deney düzeneklerinde ayrı bir çember konularak basınçlı sıvının bu çembere çarpması sağlanmaktadır.

4.1.3 Güvenli Bölge Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

Güvenli bölge için 10MPa şekillendirme sıvı basıncında, 6ton pot çemberi baskı kuvveti ile yapılan analizden alınan veriler incelenecektir.

4.1.3.1 Güvenli Bölgedeki Şekillendirme İşlemi İçin Ürün Üzerindeki Kalınlık Değişimlerinin İncelenmesi

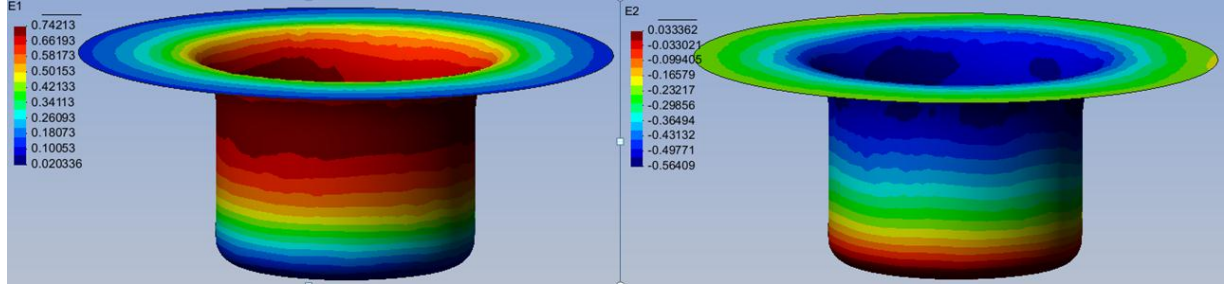
Şekil 4.14'de güvenli bölgede yapılan şekillendirme işlemi sonrasında ürünün üzerindeki renk farklılıkları ile kalınlık değişimleri görülmektedir. Yetersiz basınç bölgesinde olduğu gibi bu bölgede de literatür aşamasında bahsedilen kalınlık değişimleri gözlemlenmiştir. Düşey silindirik duvarın orta kesimlerinde en yüksek incelme, flanş kısımlarında ise en yüksek kalınlaşma görülmektedir.



Şekil 4.14 Güvenli bölgede yapılan şekillendirme işlemi sonrasındaki sac malzeme kalınlığı farklılıkları

4.1.3.2 Güvenli bölge Sınırındaki Şekillendirme İşlemi Boyunca Üründeki Uzamaların İncelenmesi

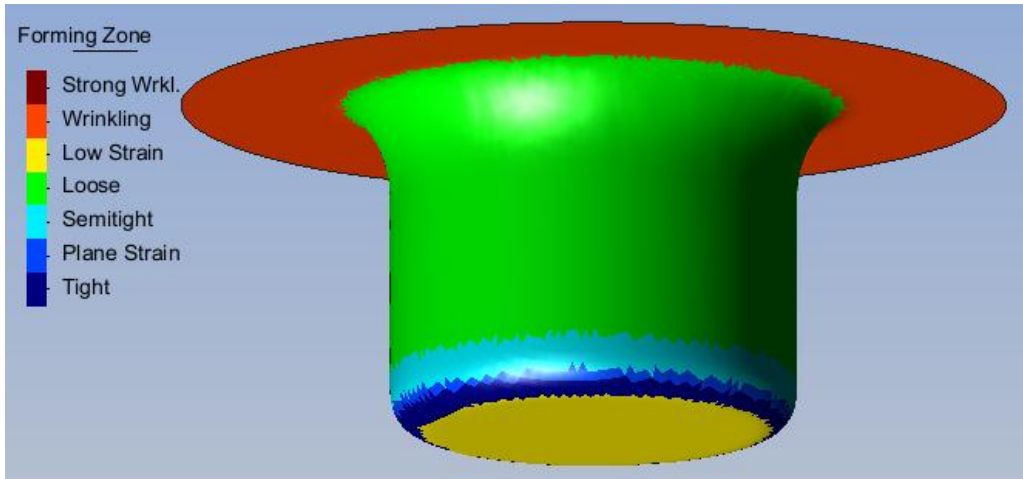
Şekil 4.15’de, şekillendirilme işlemi sonrasında ürün üzerinde düşey ve yatay birim uzamalar görülmektedir. ϵ_1 düşey, ϵ_2 ise yatay birim uzamayı göstermektedir.



Şekil 4.15 Güvenli bölgedeki Birim Uzama Miktarları

4.1.3.3 Güvenli bölge Sınırındaki Şekillenme Tiplerinin İncelenmesi

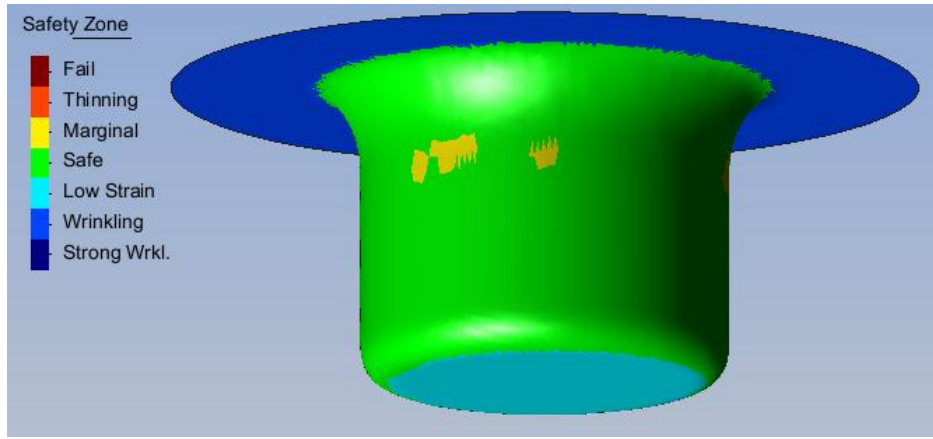
Şekil 4.16’da, Yırtılma bölgesinde ürün üzerinde oluşan şekillenme tiplerini göstermektedir. Yetersiz basınç bölgesinde olduğu gibi bu Yırtılma bölgesinde de 6 şekillenme tipi görülmüştür.



Şekil 4.16 Güvenli bölgede Şekillendirme Tipleri

4.1.3.4 Güvenli Bölgedeki Şekillendirme Güvenilirliğinin İncelenmesi

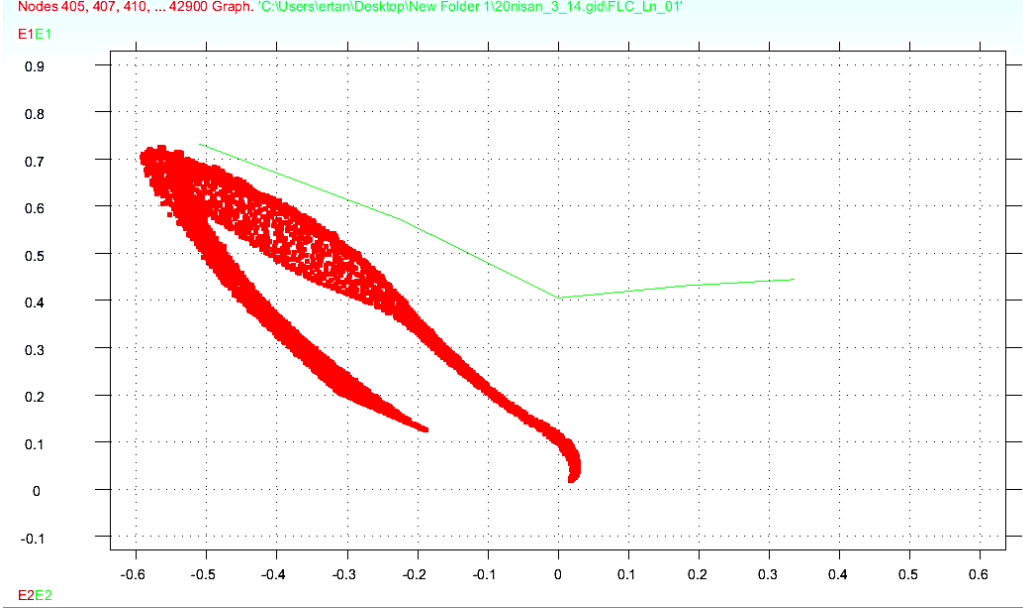
Yırtılma bölgesinde tamamen güvenli alanların olduğu görülmektedir. Ancak yer yer incelmeye doğru ilerleyen bölgeler göze çarpmaktadır. Güvenli bölgede incelme veya pot baskısını yenen kırışmalar bulunmamaktadır. Şekil 4.17’de kırışma olarak görülen yerler aslında kırışmaya çalışan sac malzemeyi göstermektedir. Bu kırışma bölgeleri pot baskısını yenedikleri için şekillenen ürünün bu kısımlarında kalınlaşmaların gerçekleştiği, kalınlık incelemesinde görülmüştü.



Şekil 4.17 Güvenli bölgedeki şekillendirme işleminde güvenilirlik

4.1.3.5 Güvenli Bölge Sınırında, Şekillendirme Sınır Diyagramı

Güvenli bölgede yapılan şekillendirme işleminde sac üzerindeki düğüm noktalarındaki birim uzamalar şekil 4.18’de gösterilmiştir. Bu düğüm noktalarındaki birim uzamalar, şekillendirme sınır eğrisini geçmemiş, tamamen güvenli bölgede yer almıştır. Burada çalışmanın oldukça başarılı bir şekilde tamamlandığı oluşan kanca formundan görülebilmektedir.



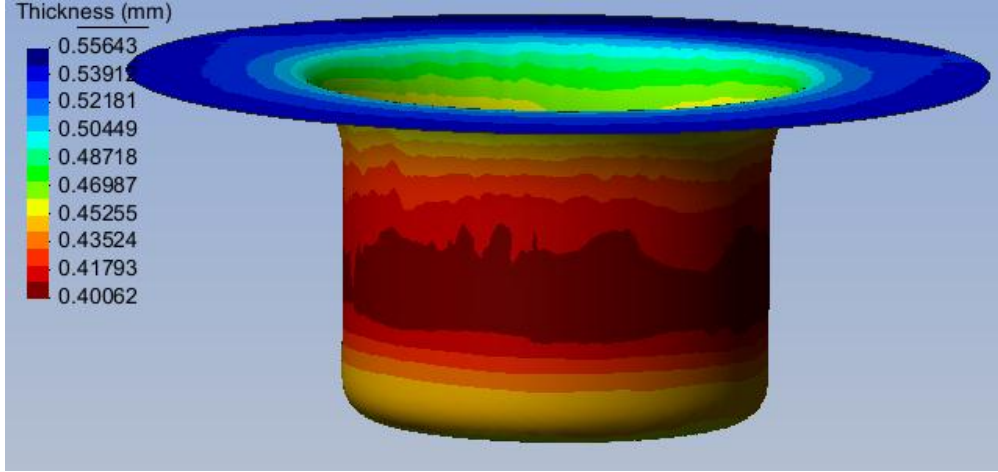
Şekil 4.18 Yırtılma Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı

4.1.4 Yırtılma Bölgesi Sonlu Elemanlar Sonuçlarının İncelenmesi

Yırtılma bölgesi için 17.5MPa şekillendirme sıvı basıncında, 10.5ton pot çemberi baskı kuvveti ile yapılan analizden alınan veriler incelenecektir.

4.1.3.1 Yırtılma Bölgesindeki Şekillendirme İşlemi İçin Ürün Üzerindeki Kalınlık Değişimlerinin İncelenmesi

Şekil 4.19'da güvenli bölgede yapılan şekillendirme işlemi sonrasında ürünün üzerindeki renk farklılıkları ile kalınlık değişimleri görülmektedir. Yetersiz basınç bölgesinde olduğu gibi bu bölgede de literatür aşamasında bahsedilen kalınlık değişimleri gözlemlenmiştir. Düşey silindirik duvarın orta kesimlerinde en yüksek incelme, flanş kısımlarında ise en yüksek kalınlaşma görülmektedir.



Şekil 4.19 Yırılma bölgesinde yapılan şekillendirme işlemi sonrasındaki sac malzeme kalınlığı farklılıkları

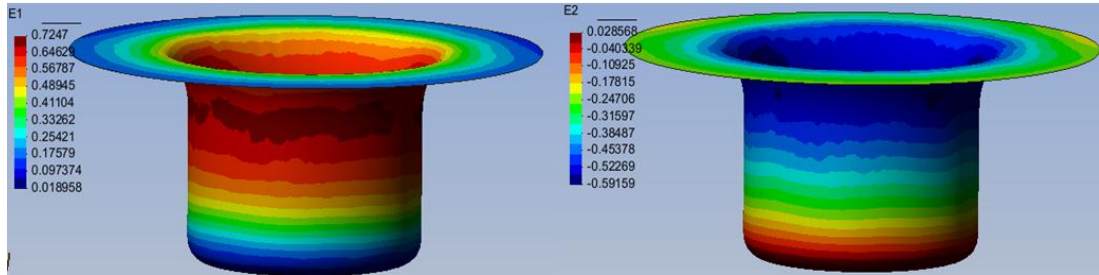
4.1.3.2 Yırılma Bölgesi Sınırındaki Şekillendirme İşlemi Boyunca Üründeki Uzamaların İncelenmesi

Şekil 4.20’da, şekillendirilme işlemi sonrasında ürün üzerinde düşey ve yatay birim uzamalar görülmektedir. ε_1 düşey, ε_2 ise yatay birim uzamayı göstermektedir.

$$\varepsilon_1 = \log(A/R)$$

$$\varepsilon_2 = \log(B/R)$$

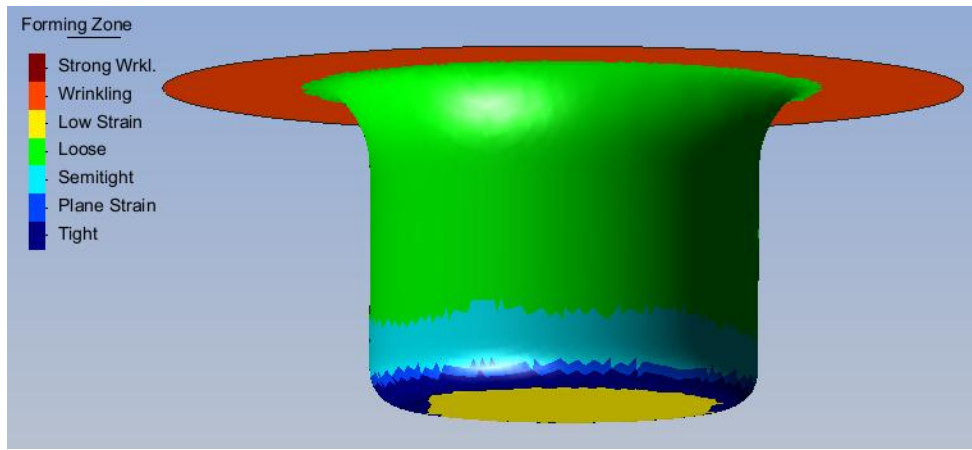
Formülasyonlarıyla tespit edilmektedir.



Şekil 4.20 Yırılma bölgesindeki Birim Uzama Miktarları

4.1.3.3 Yırtilma Bölgesindeki Şekillenme Tiplerinin İncelenmesi

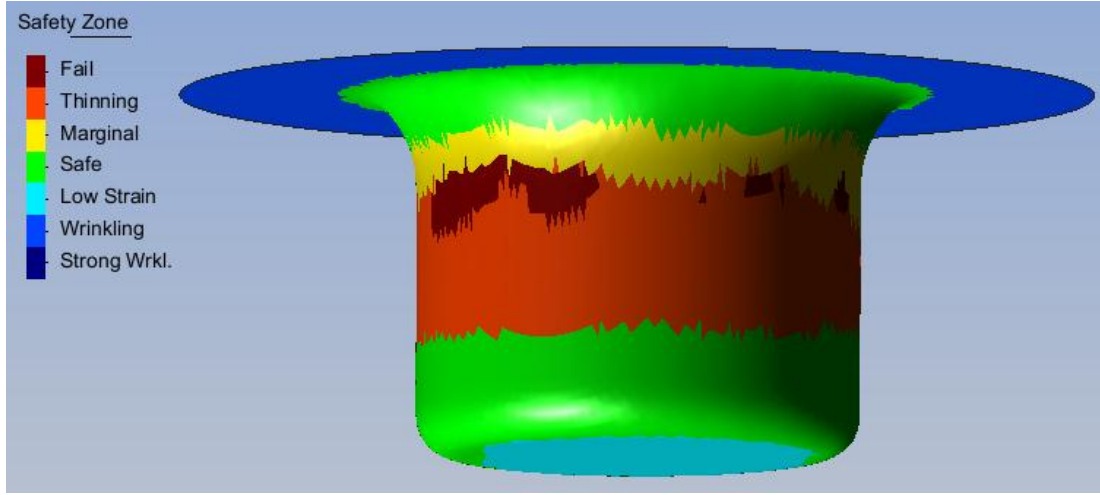
Şekil 4.21’de, Yırtilma bölgesinde ürün üzerinde oluşan şekillenme tiplerini göstermektedir. Şekillendirici sıvı basıncı - Pot baskı kuvveti grafiğindeki yetersiz basınç bölgesinde ve güvenli şekillendirme bölgesinde olduğu gibi yırtilma bölgesinde de 6 şekillenme alanı görülmüştür. Bunlar kırışma alanı, düşük gerinme alanı, serbest alan, yarı sıkı alan, sıkı alan olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.21 Yırtilma bölgesinde Şekillendirme Tipleri

4.1.3.4 Yırtilma Bölgesindeki Şekillendirme Güvenilirliğinin İncelenmesi

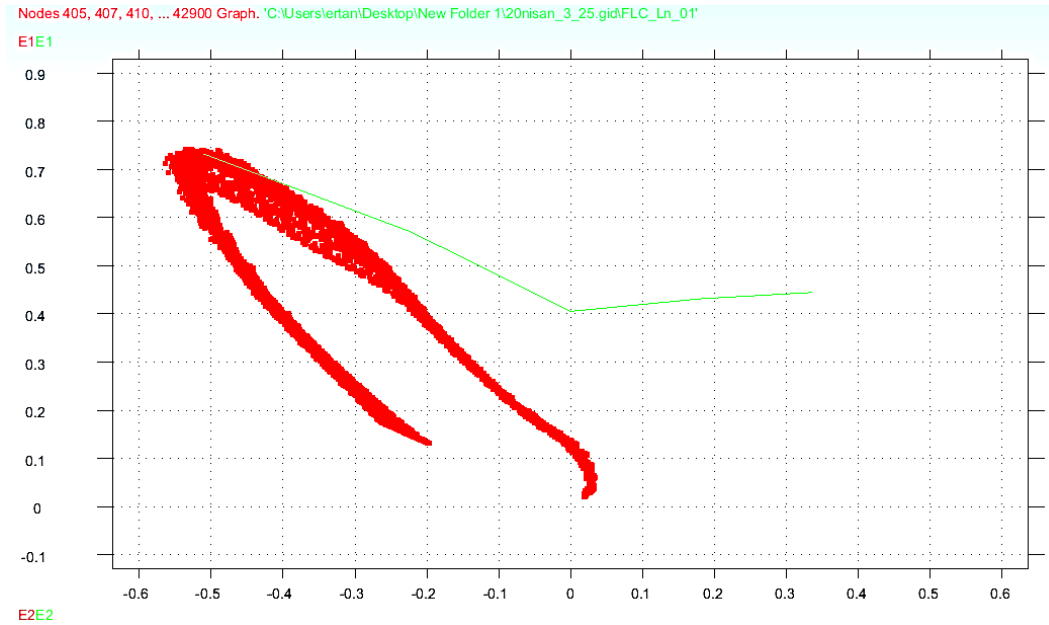
Şekil 4.22’de yırtilma bölgesinde “fail” olarak tabir edilen yırtilma bölgelerinin olduğu görülmektedir. Yırtilma bölgeleri incelen bölgenin üst kısmında yer almıştır. İncelme bölgesinin alt kısmında değil de üst kısmında yer alması burada şekillendirme öncesinde daha fazla deforme olduğu düşünülmektedir. İncelen bölgenin alt kısımları pot çemberi ve dişi matris arasında daha kısa süre bulunarak daha az sürtünmeye maruz kalmıştır. Dolayısıyla yırtilma olayının pot çemberi ve dişi matris arasında en çok süre kalarak şekillendirilen alanda olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.22 Yırtılma Bölgesindeki şekillendirme işleminde güvenilirlik

4.1.3.5 Yırtılma Bölgesi Sınırında, Şekillendirme Sınır Diyagramı

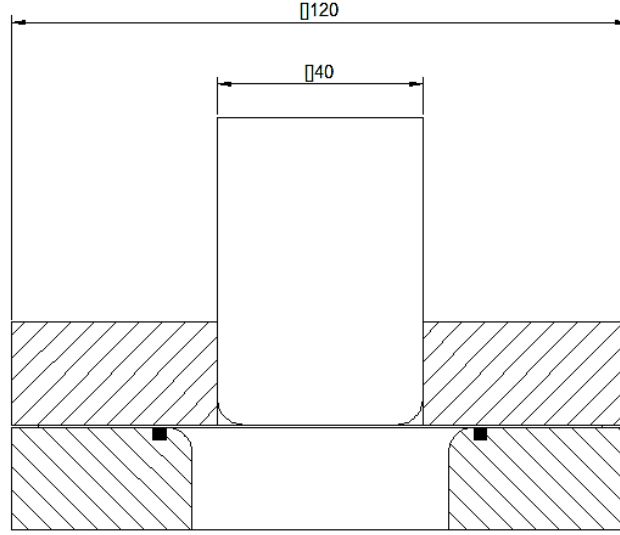
Yırtılma bölgesinde yapılan şekillendirme işleminde, sac üzerindeki düğüm noktalarındaki birim uzamalar şekil 4.23’de gösterilmiştir. Bu düğüm noktalarındaki birim uzamalar, şekillendirme sınır eğrisini kısmen geçmiştir. Şekillendirme sınır eğrisi üzerinde bulunan düğüm noktalarında yırtılma başlamış bulunmaktadır.



Şekil 4.23 Yırtılma Bölgesinde Şekillendirme Sınır Diyagramı

4.2 Kare Zımba İle Yapılan Hidromekanik Derin Çekme Analizleri

Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme analizleri şekil 4.24’de görülen geometriler ile yapılmıştır. Silindirik zımba ile yapılan analizler ile aynı şekilde çalışmaktadır.



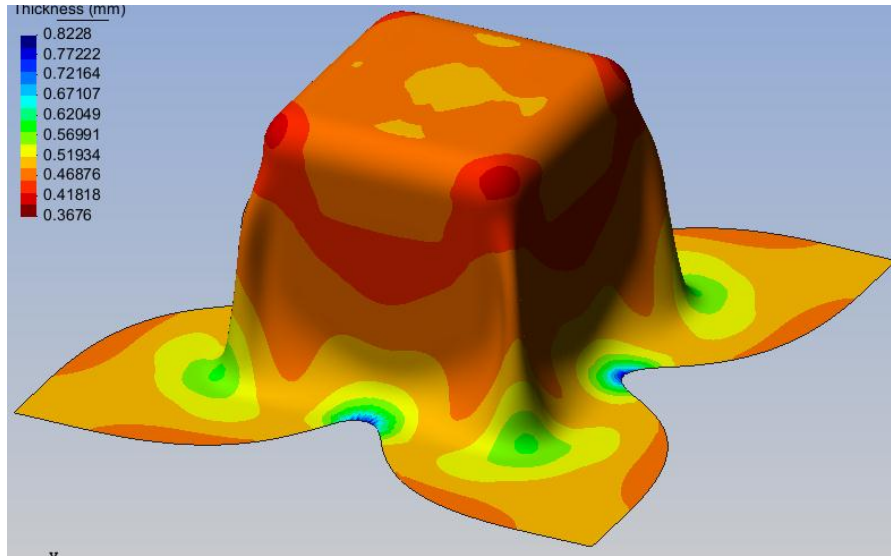
Şekil 4.24 Kare Zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme işleminde geometrik ölçüler

Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme analizleri de silindirik zımba ile yapılan analizlere benzemektedir. Sacı şekillendiren basınçlı sıvıdır. Bu analizlerde kullanılan veriler ise tablo 4.2’de verilmiştir. Bu tablodan da anlaşılacağı gibi kare zımba ile yapılan analizler neticesinde hidromekanik derin çekme işleminin karesel zımba ile oldukça iyi sonuçlar verememektedir. Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme analizlerinden güvenli şekillendirme bölgesinin daha dar bir alanda kısıtlı kaldığını görmekteyiz. Bunun sebebi sonuçlar ve tartışma kısmında incelenecektir.

Çizelge 4.2 Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme işleminde kullanılan pot baskı kuvvetleri ve şekillendirici sıvı basınç miktarları

| Şekillendirici Sıvı Basıncı | Pot Baskı Kuvveti | Sonuç | İncelme Değeri |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| 10 | 6 | Yetersiz Basınç | --- |
| 20 | 6 | Yetersiz Basınç | --- |
| 35 | 6 | Yetersiz Basınç | --- |
| 45 | 6 | Yetersiz Pot | --- |
| 45 | 7 | Yetersiz Pot | --- |
| 45 | 8 | marjinal | 0.33 |
| 55 | 8 | Yetersiz Pot | --- |
| 55 | 10 | Yırtılma | 0.33 |
| 50 | 9 | İncelme | 0.34 |
| 40 | 6 | Yetersiz Basınç | 0.38 |

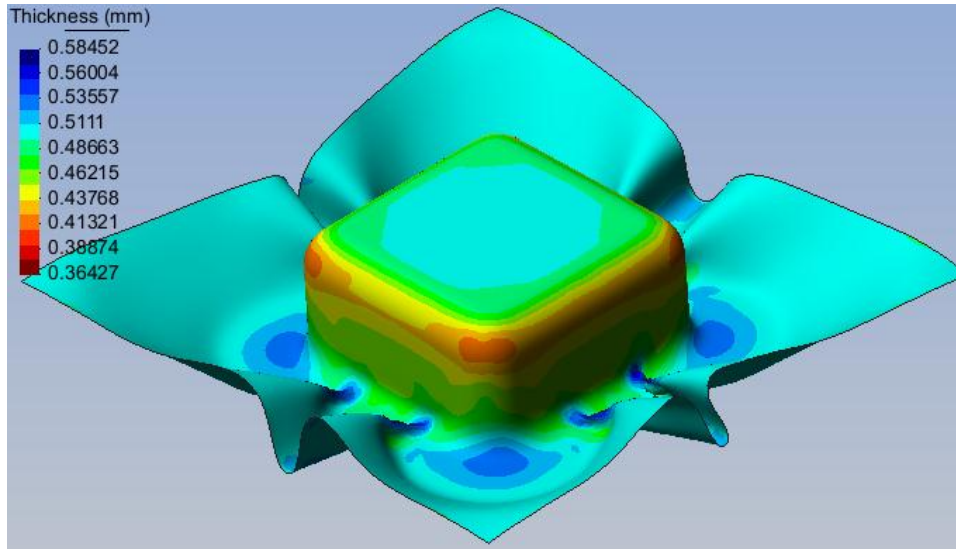
Yetersiz basınç bölgesini bir görsel ile inceleyecek olursak şekil 4.25’de görüldüğü gibi zımbanın köşe kısımlarında kırışıklıkların arttığını ve bu kısımların zımbaya yeteri kadar sıvanamadığı görülmektedir. Bu durumda şekillendirici sıvı basıncını arttırmak oldukça mantıklı görülmektedir. şekillendirici sıvı basıncının miktarı artırılarak denemelere devam edilmiştir.bu durumda 10MPa şekillendirici sıvı basıncı uygulanmıştır. Pot baskı kuvveti ise 6Ton olarak girilmiştir.



Şekil 4.25 Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme işleminde yetersiz basınç bölgesine ait bir ürün analizi

40mm karesel zımba için yetersiz gelen şekillendirme basıncı artırılarak analizlere devam edilmiştir.

Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme analizlerinde güvenli bölgenin oldukça dar oluşu ve incelmelerin kritik seviyelerde olması dolayısıyla aynı zımba ölçüleri ile geleneksel derin çekme işlemi de gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25’de yetersiz basınç sonucu oluşan kırışmaları önlemek amacıyla yükseltelen basınç neticesiyle pot baskı kuvvetinin yetersiz kalması sonucu oluşan kırışmalar görülmektedir. kırışmaların oluşmasıyla birlikte basınç kaçaqları oluşmakta ve şekillendirme işlemi analiz sonlanmaktadır.

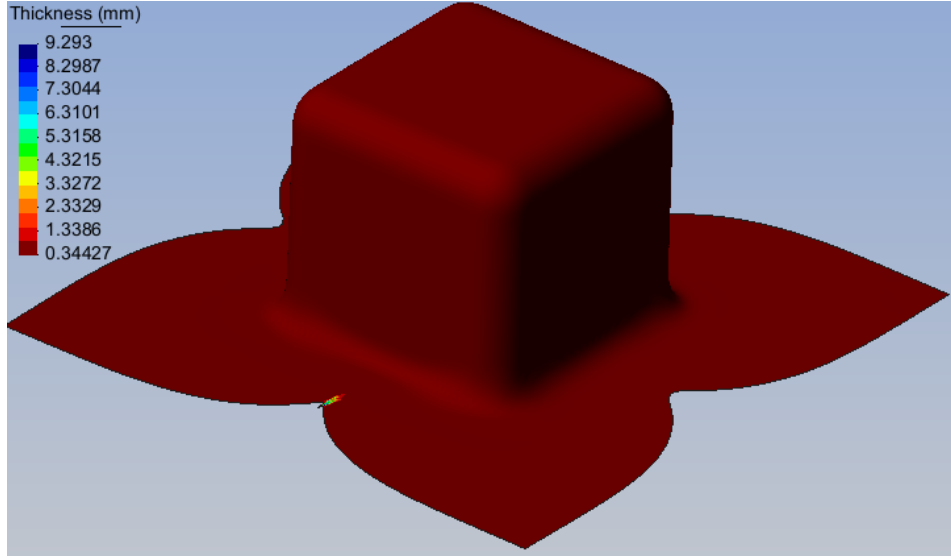


Şekil 4.26 Yetersiz pot kuvveti sonucu analiz sırasındaki kırışma

Sürekli yapılan analizler neticesiyle karesel zımba için de hidromekanik derin çekme için bir güvenli şekillendirici sıvı basıncı ve pot baskı kuvveti ikilisi bulunmuştur. Şekillendirici sıvı basıncının ise yeteri kadar büyük olduğu görülmektedir. Zımbaya tamamen sıvanmış olan sac malzeme bize şekillendirici sıvı basıncının yeterli büyüklükte olduğunu göstermektedir.

Hatalı analizler yavaş yavaş güvenli şekillendirme ikilisini çağırılmaya devam etmektedir. Şekil 4.27 ise güvenli bir şekillendirme analizi yer almaktadır. Bu resimde ürünün tamamen kırmızı olmasının sebebi bir noktada oluşan yüksek kalınlaşmadır. Bir

noktada oldukça yükselen sac kalınlığı, diğer noktalarla farkı arttırmıştır. Noktalar arası bağıl bir değerlendirme yapan yazılım tüm sacı kırmızı olarak göstermektedir.

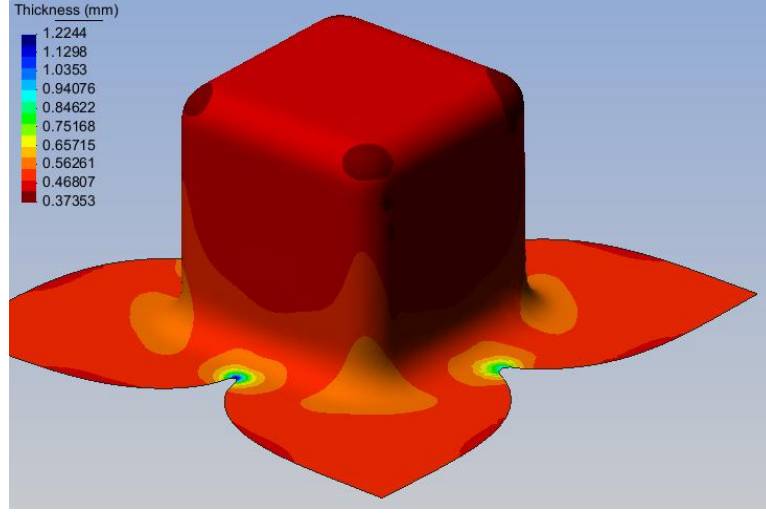


Şekil 4.27 Karesel zımba ile hidromekanik derin çekme analizinde sac kalınlaşması

4.3. Kare Zımba İle Yapılan Geleneksel Derin Çekme Analizi

Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme analizlerinde güvenli şekillendirme bölgesinin oldukça dar oluşu ve kusurlu imalat olasılığının oldukça yüksek olması sebebiyle aynı zımba ölçüleriyle geleneksel derin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel derin çekme analizinde şekillendirici sı basıncının olmaması sebebiyle sadece pot baskı kuvveti değişken olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.28’de kare zımba ile yapılan geleneksel derin çekme sonucu görülmektedir. görülen incelme miktarları en optimum pot baskı kuvveti için geçerlidir. Bu analizdeki pot baskı kuvveti 2tondur. Oysa hidromekanik derin çekme işleminde aynı incelme oranı 9ton ile yakalanabilmiştir. Hidromekanik derin çekme işlemi kendi yöntemi gereği daha yüksek pot basınçlara ihtiyaç duymaktadır. Bu da incelmelere zemin hazırlamaktadır.



Şekil 4.28 Kare zımba ile yapılan geleneksel derin çekme işlemi

Görüldüğü gibi geleneksel derin çekme işleminde karesel zımba ile yapılan şekillendirme işleminde geleneksel yöntemin incelme konusunda daha avantajlı olduğu görülmektedir. çünkü geleneksel derin çekme işlemi yüksek pot baskı kuvvetleri gerektirmemekte ancak dişi matris ile birlikte sacı malzemeye makaslama yaparak incelmesine ve yüzeylerinin bozulmasına sebebiyet verebilmektedir.

Bir sonraki konuda ise geleneksel yöntemlerle tek aşamada üretilemeyecek olan geometrilerin, hidromekanik yöntem kullanılarak tek aşamada üretilebilirliğini incelenecektir.

4.4 Geleneksel Derin Çekme Yöntemiyle Tek İşlem ile İmal Edilemeyecek Geometrilerin Hidromekanik Yöntem Kullanılarak Tek İşlem ile İmal Edilebilirliği

Bir önceki bölümde geleneksel yöntemin bazı durumlarda avantajlı olduğu görüldü. Ancak hidromekanik yöntem pek çok açıdan geleneksel yöntemden üstün olduğunu literatür kısmında bahsedilmişti. Bunlardan birisi de geleneksel yöntemlerle tek aşamada üretilmesi imkansız olan geometrilerin hidromekanik yöntem ile tek aşamada üretilebiliyor olmasıydı.

Bu bölümde geleneksel yöntem ile tek seferde üretilmesi imkansız olan bir geometrinin hidromekanik yöntem kullanılarak şekillendirilebilirliği incelenecektir.

Şekil 4.29’da görüldüğü gibi bir meyve presi parçası hidromekanik derin çekme analizi için modellenmiştir. Bu model temelde parabolik yapısı olmasından dolayı geleneksel yöntem ile bu paraboliklik gererek kısmen oluşturulabilir. Ancak geometrinin üzerinde bulunan girintili çıkıntılı dalgalanmalar bir son ütüleme işlemini gerektirmektedir. Bu sebeple bahsedilen geometri, geleneksel yöntem ile tek seferde üretilmeyecek bir parça olma özelliği taşımaktadır.



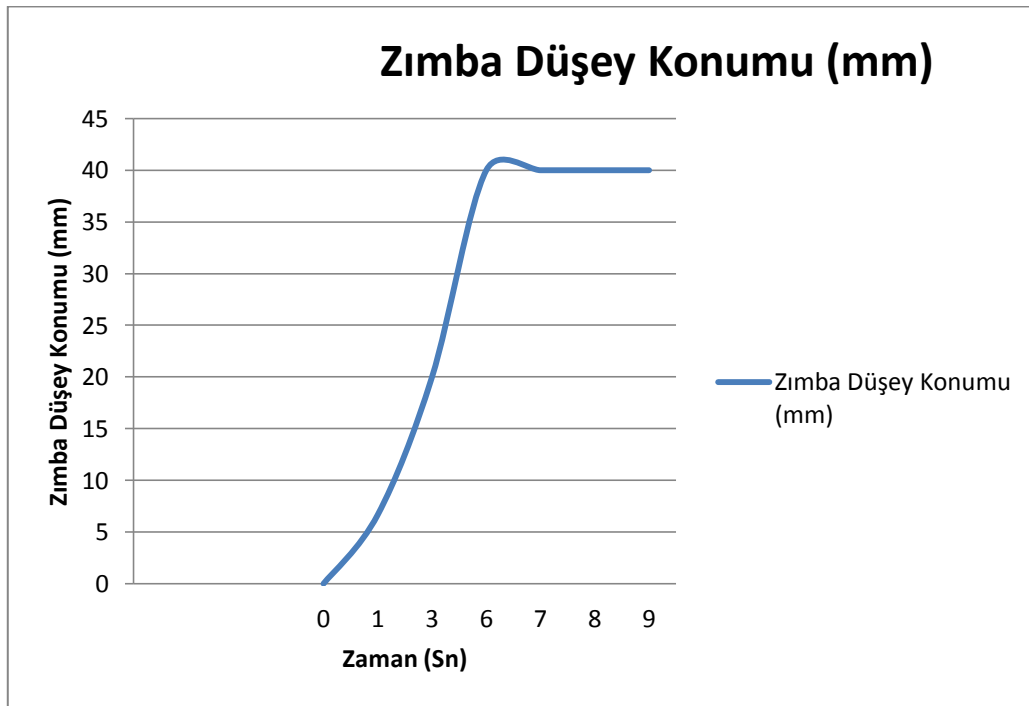
Şekil 4.29 Hidromekanik yöntem ile tek aşamada imal edilebilen bir geometri

Şekil 4.29’da görülen geometrinin geleneksel yöntemlerle neden üretilmeyeceği bir önceki paragrafta açıklanmıştır. Ancak hidromekanik yöntemle nasıl üretilbileceği konusunda ise literatür bilgilerine geri dönmemiz gerekecektir. Literatür araştırmalarında hidromekanik yöntemin kendi içinde pre-bulging veya hydro-bulging diye bahsedilen ön-şişme işlemini barındırıyor olmasıdır.

Pre-bulging işleminde sac malzeme zımbaya doğru şişirilmesi işlemidir. Zımbaya doğru şişen sac malzeme kubbe görünümü kazanır. Böylece daha yüzeysel bir kuvvet kullanılarak şekillendirme işlemi için gerekli sac malzeme pot çemberi ve dişi matris arasından az bir sürtünme kuvveti ile sıyrılmış olur. Zımbanın düşey hareketi ile sac malzeme bundan böyle sürtünme kuvvetine maruz bırakılmayacaktır. Dolayısıyla sacdaki incelmeye azaltılmış olacaktır. Bu işlem kalıp ustaları tarafından “ters forma

verme” olarak isimlendirmektedirler.bu yöntem geleneksel derin çekme yönteminde de kullanılmaktadır ancak bu işlem için ayrı bir kalıp gerekir. Bu çalışmada ise bu işlem için ayrı bir kalıp kullanılmayacaktır.

Daha önce hidromekanik derin çekme yönteminde, şekillendirici sıvı basıncının, pot baskı kuvvetinin ve zımba hareketinin zamana bağlı olarak istenildiği gibi ayarlanabildiğinden bahsedilmişti. Bu çalışmada bu zamanlama işleminden faydalanılacaktır. Şekil 4.30 ve 4.31’de bu zamanlama yer almaktadır.



Şekil 4.30 Zımbanın zamana göre konumu

Şekil 4.30’da, zımbanın bir ilk 3 saniyede sabit kaldığı, sonraki 3 saniyede 40mm’lik bir strok gerçekleştirdiği, ardından 3 saniye boyunca da aynı strokta sabit kalarak gerigitmediği görülmektedir. Bunun sebebi ise analizin 3 farklı şekillendirme durumundan oluşmasıdır. Bu şekillendirme durumları sac malzemenin istenen derin çekme oranında istenen incelme miktarı ile istenen formu en iyi şekilde alabilmesi amacıyla oluşturulmuştur.

Yapılan analiz;

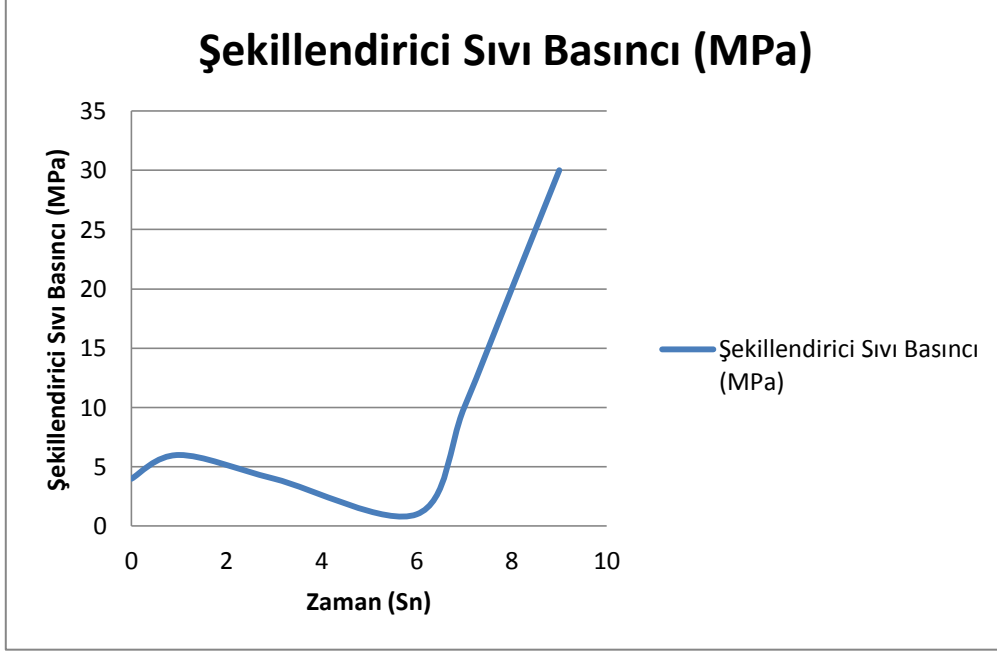
- Ön-Şişme
- Şekillendirme
- Son forma

işlem basamaklarından oluşmaktadır. Tüm bu aşamalar tek bir strok boyunca 9 saniyelik bir zaman dilimine yayılmıştır.

İlk saniyede ön şişme olayı ile sac malzeme zımbaya doğru şişirilmektedir.

- Kubbe formunu alarak pot çemberi ve dişi matrizen yeteri kadar sıyrılmış olan sac malzeme şekillendirilmeye hazırlanmıştır. Bu aşamada çok az bir incelmeye görülebilmektedir.
- Kubbe formu kazandırılan sac malzeme, zımbanın ilerlemesiyle birlikte parabolik olarak şekillendirilir. Bu esnada yüksek şekillendirme basınçları incelmeye sebep olacağı için basınç kısımlanabilir.
- Parabolik formu düşük şekillendirme basıncıyla kazanan sac malzeme daha fazla ayrıntılı olarak zımbanın formunu kazanabilmesi amacıyla zımba sabit tutularak şekillendirici sıvı basıncı yükseltilir. Böylece yüksek basınç, zımbanın formunu yok denebilecek bir incelmeye birlikte sac malzemeye kazandırabilmektedir.

Sac malzeme geleneksel derin çekme yönteminde ayrı ayrı kalıplardan geçirilerek bu aşamalardan geçirilmektedir. Bu da işletmeler için hem başlangıç hem de sürekli maliyetleri yükseltmektedir. Ayrıca ilk ürünü oluşturma esnasında her aşamadaki zımba ve dişi matris geometrilerinin tayini için yapılan ar-ge denemeleri, başlangıç maliyetlerini oldukça yükseltebilmektedir.

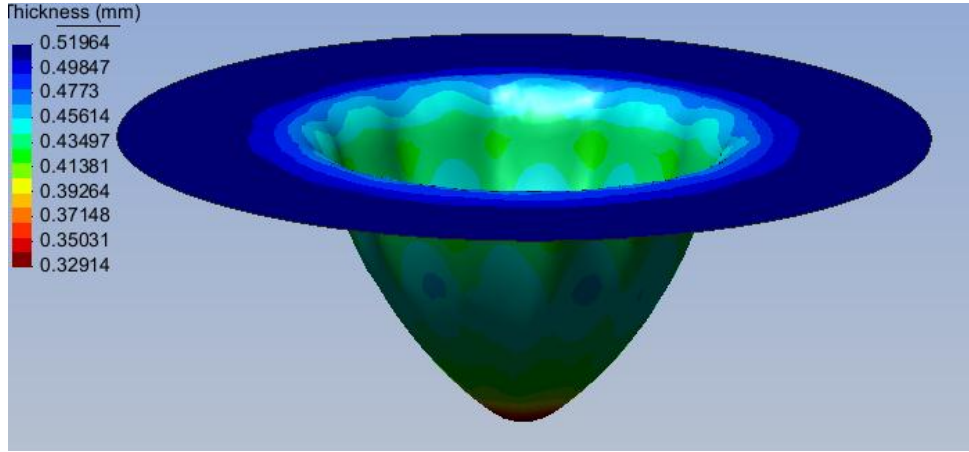


Şekil 4.31 Şekillendirici sıvı basıncının zamana göre değişimi

Şekil 4.31’de şekillendirici sıvı basıncının zamana göre değişimi görülmektedir. İlk 1 saniyeye kadar olan zaman diliminde saca ters forma kazandırıldığı için basınç bir miktar arttırılmıştır. Bu zaman diliminde daha yüksek sıvı basınçları sacı inceltmiş olduğundan yapılan analizler neticesiyle arzu edilen kubbe yüksekliği için yaklaşık 6MPa sıvı basıncı değeri yeterli görülmüştür. Arzu edilen kubbe formu zımba kullanılmadan sadece şekillendirici sıvı basıncının arttırılmasıyla oluşturulmuştur. 1 ve 6 saniyeler arasında ise zımba, sac malzemeye şeklini kazandırmaktadır. Bu şekil verme işlemi detayları içermeyen sadece genel parabolik geometrinin kazandırılabilmesi amaçlanmıştır. Böylece zımbanın hareketi sırasında sacda incelmenin önüne geçilmesine çalışılmıştır. 6 ve 9 saniye arası ise zımbanın alt noktada beklediği, sıvı basıncının ise oldukça yükseltilerek detay formlarının saca kazandırılması amaçlanmıştır. Sac malzemenin zımbanın tamamen formunu kazanması için gerçekleştirilen bu işleme ütüleme denilmektedir.

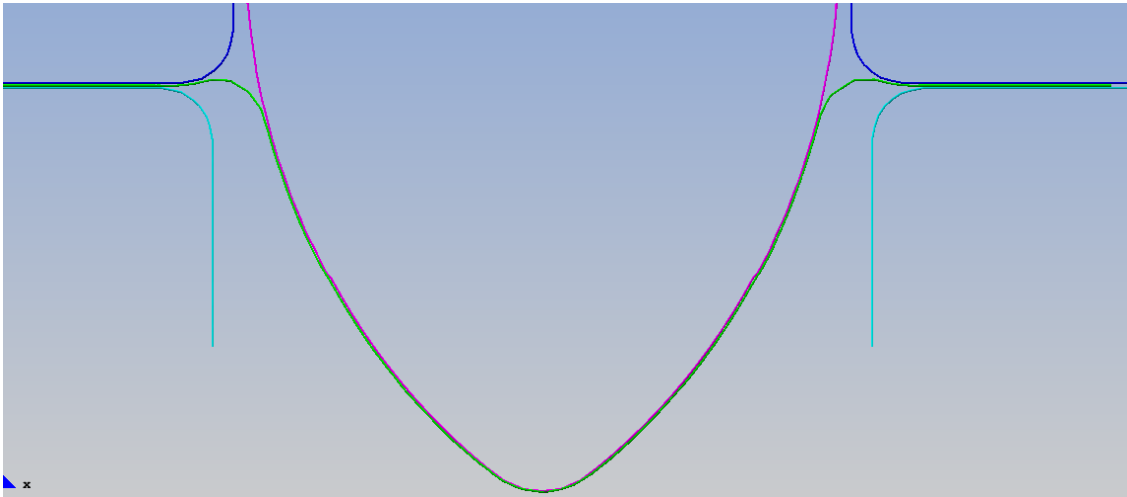
9 saniyede gerçekleştirilen deney neticesinde incelleme sac malzemedeki oluşmuş incelleme miktarı yaklaşık 0.18mm olduğu görülmüştür. Şekil 4.32’de sac malzemedeki kalınlık değişimlerinin tüm geometri üzerindeki dağılımı görülmektedir. Şekil 4.32’de en ince

kısım yaklaşık 0.33mm, en kalın kısım ise 0.52mm olarak görülmektedir. Sac malzemede oluşan kalınlaşmaların nedenine literatür kısmında bahsedilmiştir.



Şekil 4.32 Üç aşamalı hidromekanik derin çekme işleminde incelme miktarı

Şekil 4.33'de ise aynı geometrinin kesit görünümü yer almaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi sac malzeme, zımbanın formunu yüksek ölçüde kazanmıştır. Zımbaya yakın yerde sac malzeme yukarı doğru şişmesi hidromekanik derin çekme işleminin oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Buradaki şişme olayı teğetsel gerilmeler doğurmakta ve zımbaya yaklaştıkça kırışma ve kalınlaşma etkisi gösteren sac malzemeyi açarak kırışıkları giderir. Pek çok hidromekanik derin çekme yönteminde bu şişme durumu özellikle istenmektedir.



Şekil 4.33 Üç aşamalı hidromekanik derin çekme işleminde sac malzemenin zımba formunu kazanması

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Silindirik zımba ile yapılan 33 adet sonlu elemanlar analizi neticesiyle kırışma bölgesi, güvenli bölge, yetersiz bölge ve yırtılma bölgesi olmak üzere 4 adet şekillendirme bölgesi belirlenmiştir. Güvenli bölgede çıkan sonuçlarda, sac malzemelerin şekillendirme işlemi sonrasında çok az incelmelere sahip olduğu ve bu inceme miktarlarının da güvenli bölge içerisindeki diğer analizlerde birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Güvenli bölge içerisinde olmak kaydıyla, şekillendirici sıvı basıncı ne kadar artarsa sac malzeme o oranda zımbanın geometrisini kazanmış olacaktır. Bunun neticesiyle zımbanın formunu daha iyi alabilmesi amacıyla değişken şekillendirici basınçlar ve pot baskı kuvvetleriyle de hidromekanik derin çekme işleminin uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Güvenli bölgede olması koşuluyla, şekillendirici sıvı basıncının ve pot baskı kuvvetinin yükseltilmesi daha iyi form kazanmış ürünler ortaya çıkarılabileceği düşünülmektedir.

Kare zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme işleminde ise yüksek inceme durumları neticesiyle aynı zımba geometrisi ile geleneksel derin çekme analizi de yapılmış ve geleneksel yöntemin karesel zımba için inceme gözönünde bulundurulduğunda daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi zımba köşelerinde oluşan yığılmaların şekillendirici sıvı basıncıyla açılabilmesi için yüksek basınca ihtiyaç duyulması, yüksek şekillendirici sıvı basıncının da kırışma durumu olmaması için yüksek pot baskı kuvvetlerini beraberinde getirmesi ve yüksek pot baskı kuvvetlerinin de sac malzeme de yüksek sürtünme kuvvetleri oluşturması olarak düşünülmektedir.

Ancak kare zımba ile geleneksel derin çekme işleminde pot baskı kuvvetinin yüksek olmasının gerekmemesi ve dişi kalıbın yüksek kalıp ağız radüsü sayesinde makaslama kuvveti oluşturmadan bir miktar daha az incemeyle birlikte istenilen ürünün elde edilebileceği görülmüştür.

Karmaşık geometrili parabolik zımba ile yapılan analizlerde ise zımba formunun karmaşık yapısından dolayı geleneksel derin çekme yöntemiyle tek seferde imal

edilebilmesi imkansız olduğundan aynı zımba ile geleneksel derin çekme analizi gerçekleştirilmemiştir. Karmaşık geometriye sahip parabolik zımba ile yapılan hidromekanik derin çekme analizlerinde ise yeterli incelme miktarlarına ulaşarak güvenli olarak şekillendirme analizi tamamlanmıştır. Bu yöntemi kullanarak imalat yapmak isteyen uygulayıcılar öncelikle sonlu elemanlar yazılımları ile istedikleri geometri için zamana bağlı olarak basınç ve kuvvet büyüklüklerini belirleyerek imalata başlayarak gerçek deneme sayılarını azaltabileceklerdir.

Hidromekanik yöntemin oldukça esnek olması, basınç, kuvvet ve hareket gibi değişkenlerin zamana bağlı olarak arzu edildiği gibi değiştirilmesiyle birlikte son zamanlarda dünyada bu yöntem ön plana çıkmaktadır. Aynı zamanda uygulama yöntemlerinin de birden fazla olması sebebiyle imalatçılar tamamen özgür bir şekilde kendilerine uygun olan bir geometriyi hidromekanik derin çekme tekniği ile ürün geliştirebilmektedirler.

6. KAYNAKLAR

Andersen J.F., 1994, Shape accuracy and parameters influencing the shape accuracy using conventional and hydro-mechanical deep drawing, *IDDRG '94*, 545–553, Lisbon, Portugal.

Baakshi-Jooybari M., Goodarzian H., Okazi M., 2010, Investigation of conventional deep drawing and hydroforming deep drawing via experimental and finite element simulation, *Indian Journal of Science and Technology* **Vol. 3 No. 9** ISSN: 0974- 6846

Backofen W.A., Keeler S.P., 1963, Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, *Trans. Am. Soc. Met.* **56**, 25–48.

Dancert J., Kang D.C., Nielsen K.B., Zhang S.H., 1998, Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes, Denmark School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001.

Danckert J., Zhang S.H., 1998, Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology* **83**, 14–25

Engr. C. O. Osueke* et al. / (IJAEST) *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies* **Vol no 9, Issue No 2**, 280-288.

Ergun C., Malzeme Bilimi MAL201 4.Hafta, Metallerin Mekanik Özellikleri.

Fahjan Y., Sonlu Elemanlar Yöntemi (Sap2000 Uygulaması), 1.Genel kavramlar

İTÜ makina fakültesi, imalat mühendisliği programı, crn 11052, ıml 401 imalat laboratuvarı – 1. *Laboratuvar el kitabı*, rev. **06-01**.

Kim Y., Olivier W., 2004, Engineering Design and Rapid Prototyping in Finite Element Method, 16810 MIT

Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi Sayı 1, Mayıs 2011, **Cilt 13**.

Marumo Y., Saiki H., 1998, Evaluation of the forming limit of aluminum square cups. *J. of Mater. Process. Technology*, **80-81**, 427-432.

Özbay V., Özek C., 2012, Açılı Derin Çekme Kalıplarında Küresel Kaplar İçin Derin Çekme Oranı Sınırının Deneysel Ve Sayısal Olarak Araştırılması, *International Iron & Steel Symposium*, Karabük Türkiye 1985

S.P. Keeler, 1965, Determination of forming limits in automotive stampings. *Sheet Met. Ind.* **42**, 683–691.

www.arcelormittal.com/prcatdeepdrawing.pdf, 05.05.2013

Zhang S. H., 1999, Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology* **91**, 236–244

7. ÖZGEÇMİŞ

| | |
|---------------------------------|--|
| Adı Soyadı | : Ertan AKBAYIR |
| Doğum Yeri ve Tarihi | : Bakırköy / 11.09.1984 |
| Yabancı Dili | : İngilizce |
| İletişim (Telefon/e-posta) | : 0534 772 5654 / ertanakbayir@mirholding.com.tr |
| Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) | |
| Lise | :A. ve Nermin Bilimli Anadolu Teknik Lisesi, Uçak Bakım Teknisyenliği ve Gövde-Motor Bölümü (1998-2003) |
| Ön Lisans | :İstanbul Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine Bölümü (2003-2005) |
| Lisans | :Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Resmi ve Konstrüksiyonu Öğr. (2005-2009) |
| Yüksek Lisans | :Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (2011-2013) |
| Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl | :Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş, Ar-Ge Mühendisi (2012-.....), :Kama Pres A.Ş. Konstrüktör Ressam (2010-2011) |