

**ÇELİK SACLARIN HİDROLİK AKIŞKANLA
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN TEORİK VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**2011
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

Barış EVLEN

**ÇELİK SACLARIN HİDROLİK AKIŞKANLA ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN
TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Barış EVLEN

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Eylül 2011**

Barış EVLEN tarafından hazırlanan “ÇELİK SACLARIN HİDROLİK AKIŞKANLA ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. İbrahim KADI

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/ 09/ 2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. İbrahim KADI (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. İrfan YÜKLER (MÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARALI (KBÜ)

İmzası

...../...../2011

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Bariş EVLEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK SACLARIN HİDROLİK AKIŞKANLA ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Barış EVLEN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İbrahim KADI

Eylül 2011, 67 sayfa

Bu çalışmada, St22 türü soğuk haddelemeye uygun çelik sacın hidro şekillendirilebilirliği incelenmiştir. Sac malzemedeki hadde yönüne dik, hadde yönüne 45 derece ve hadde yönüne paralel olmak üzere üç farklı yönde çekme numunesi hazırlanmış ve tek eksenli çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonuçlarına göre malzemenin anizotropi katsayısı hesaplanmış ve malzemenin mekanik değerleri elde edilmiştir. Dairesel gridleme işlemine tabi tutulan sac malzeme, farklı basınç parametreleri kullanılarak hidro şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur. Şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen numunelerin şişme yükseklikleri ve et kalınlığı dağılımı ölçülmüş, şekillendirme sınır diyagramı (FLD) oluşturulmuştur. Çekme testinden elde edilen mekanik değerler ve deney parametreleri kullanılarak Ansys/Ls-Dyna programında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler : St22, hidro şekillendirme, Ansys/Ls-Dyna, FLD, şişme
yüksekliği, kalınlık dağılımı

Bilim Kodu : 708.3.029

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THEORYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FORMABILITY OF STEEL SHEETS BY HYDROFORMING

Barış EVLEN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İbrahim KADI

September 2011, 67 pages

In this study, hydro formability of cold rolled St22 steel sheets are investigated. Three different directional tensile test specimens (0° , 45° and 90° to rolling direction) are provided and tensile tests are examined. Anisotropy of material is calculated by using tensile test results. Sheet material is formed by hydroforming method with using different pressure parameters. Hydroformed specimens bulging heights and thickness distribution are measured by researcher. Also finite elements analysis are done by using tensile test results and experimental parameters in Ansys/Ls-Dyna programme. Results are evaluated by comparing to finite element analyse and experimental results.

Key Words : St22, hydroforming, Ansys/Ls-Dyna, FLD, bulging height,
thicknes distribution

Science Code : 708.3.029

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. İbrahim KADI' ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili eőim ve aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI	3
1.2. LİTERATÜRDE BULUNAN BENZER ÇALIŞMALAR.....	4
BÖLÜM 2	14
HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ	14
2.1. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TANIMI	14
2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ	15
2.2.1. Sac Hidrolik Şekillendirme.....	15
2.2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme.....	15
2.2.3. Hidro Mekanik Derin Çekme	16
2.3. HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİNİN KULLANILDIĞI ALANLAR	17
2.4. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE SIKLIKLA KULLANILAN MALZEMELER.....	18
2.5. SİSTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	18

2.5.1. Avantajları	18
2.5.2. Dezavantajları	19
2.6. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI	19
BÖLÜM 3	22
METAL ŞEKİL VERME SİMÜLASYONLARI.....	22
3.1. SONLU ELEMANLAR NEDİR?	22
3.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİNİN FAYDASI NEDİR?.....	23
3.3. SONLU ELEMANLAR METODU (FEM).....	24
3.4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMLERİ.....	26
3.4.1. Explicit Yöntem	26
3.4.2. Implicit Yöntem	26
3.5. ÇALIŞMADA GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLERİN İŞLEM BASAMAKLARI.....	26
3.5.1. Modelin Oluşturulması Veya Çağırılması.....	26
3.5.2. Analiz Metodunun Seçilmesi	27
3.5.3. Element Tipinin Belirlenmesi	27
3.5.4. Çözüm Formülasyonunun Seçilmesi	28
3.5.5. Real Constant Tanımlanması	28
3.5.6. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması (Material Properties)	29
3.5.7. Mesh (Ağ Örme).....	30
3.5.8. Modelin Elemanlara Bölünmesi	30
3.5.9. Kontak Türünün Belirlenmesi	31
3.5.10. Sınır Şartlarının (Constraints) Tanımlanması	33
3.5.11. Yük, Basınç Ve Hareket Parametrelerinin Tanımlanması.....	33
3.5.12. Yüklemelerin Sisteme Atanması.....	33
3.5.13. Çözüm Parametreleri	33
3.5.14. Çözüm.....	34
BÖLÜM 4	35
DENEY DÜZENEGİ TASARIMI	35
4.1. KALIP SİSTEMİ TASARIMI	35
4.2. KALIP SİSTEMİ ELEMANLARI.....	37
4.2.1. Kalıp Üst Yarımının Tasarımı	37

4.2.2. Diş Kalıp Tasarımı	38
4.2.3. Kalıp Alt Yarımını Tasarımı.....	38
4.2.4. O-Ringler	39
4.2.5. Konsol Tasarımı.....	40
4.2.6. Hidrolik Silindir Bağlantısı.....	41
4.2.7. Hortum Ve Rekorlar.....	42
4.2.8. Pompa.....	43
4.2.9. Kullanılan Yağın Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri	44
BÖLÜM 5	45
MATERYAL VE METOT.....	45
5.1. MALZEME ÖZELLİKLERİ	45
5.2. MEKANİK TESTLER	46
5.2.1. Tek Eksenli Çekme Test Numunelerinin Hazırlanması ve Çekme Testi	46
5.2.2. Anizotropi.....	47
5.3. İLKEL PUL ÇAPI HESABI VE NUMUNE HAZIRLAMA	48
5.4. ŞEKİLLENDİRME İÇİN GEREKLİ MİNİMUM BASMA KUVVETİ HESABI	49
5.5. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ	49
5.5.1. Şekillendirme İşlemi Sonrası Kalınlık Dağılımı Ölçümü.....	51
5.5.2. Şişme Yüksekliği Ölçümü	52
5.5.3. Şekillendirme Sınır Diyagramı (FLD) Oluşturulması.....	52
5.6. ANSYS/LS-DYNA SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ	52
BÖLÜM 6	54
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ.....	54
6.1. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI	54
6.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ SONUÇLARI	54
6.2.1. Şişme Yüksekliği Ölçümü.....	56
6.2.2. Kalınlık Dağılımı Ölçümleri.....	57
6.2.3. Grid Ölçümü ve Şekillendirme Sınır Diyagramının Oluşturulması	57
6.3. ANALİZ İŞLEMLERİ.....	58
BÖLÜM 7	61

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Hidro şekillendirme ve ortaya çıkış süreci.....	1
Şekil 1.2. Alüminyum aks a) dört adet hidroform edilmiş parçadan oluşan montaj, b) hidroform ile şekillendirilmiş gövde elemanı (BMW).....	6
Şekil 1.3. Sac hidroform metoduyla üretilmiş lüks bir otomobil tavan elemanı	7
Şekil 1.4. Bir alüminyum tüpün sıcak hidro şekillendirilmesiyle elde edilmiş otomobil modeli, uzunluğu yaklaşık 250mm (SPS)	7
Şekil 1.5. Haddelenmiş çelik sacların hidro şekillendirilebilirliğini inceleyen bir çalışma.....	7
Şekil 1.6. Kim ve arkadaşlarının şekillendirdiği bir otomobil yakıt tankı	8
Şekil 2.1. Hidrolik şekillendirme yoluyla üretilen alüminyum otomobil gövdesi	14
Şekil 2.2. Hidromekanik derin çekme işlemi: a) Hidrostatik hidromekanik derin çekme işlemi, b) Hidrodinamik hidromekanik derin çekme işlemi.....	17
Şekil 2.3. Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örnekleri.....	19
Şekil 2.4. Başlangıç daire ve şekillendirme sonrası boyutları	20
Şekil 2.5. Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı örneği	20
Şekil 3.1. Shell 163 malzeme (düğüm noktası) node tanımlaması	27
Şekil 3.2. Sac malzeme mekanik özelliklerinin tanımlanması.....	30
Şekil 3.3. Diğer malzemelerin mekanik özelliklerinin tanımlanması	30
Şekil 3.4. Sac malzemenin elemanlara bölünmesi	31
Şekil 3.5. Kontak türlerinin tanımlanması	32
Şekil 3.6. Kontakların tanımlanması	32
Şekil 4.1. Üretilmek istenen parça modeli	35
Şekil 4.2. Kalıp tasarımı montaj resmi	36
Şekil 4.3. Kumanda kolu montajı	36
Şekil 4.4. Kalıp üst yarımı	37
Şekil 4.5. Dişi kalıp geometrisi	38
Şekil 4.6. Kalıp alt yarımı	39
Şekil 4.7. O-ring.....	39

Şekil 4.8. Kalıp tasarımı	40
Şekil 4.9. Konsol	41
Şekil 4.10.Hidrolik silindir ve bağlantısı	42
Şekil 4.11.Vana ve basınçlı sıvı girişi bağlantıları	43
Şekil 4.12.Pompalar (a) 1600 bar kapasiteli pompa, (b) 250 bar kapasiteli pompa	44
Şekil 5.1. Çekme testi numune boyutları	47
Şekil 5.2. Deney numuneleri.....	49
Şekil 5.3. Çekilecek kap boyutları.....	51
Şekil 5.4. Asıl şekillendirme deneylerinin yapıldığı hidrolik pres.....	51
Şekil 5.5. Şişme yüksekliği ölçüm noktaları.....	52
Şekil 6.1. Öndeneysel sonrası elde edilen numunelerin üst görünüşü.....	56
Şekil 6.2. Asıl deneyler sonrası elde edilen numuneler.....	56
Şekil 6.3. Dört nolu numune grubu	56
Şekil 6.4. Akışkan basıncına göre şişme yüksekliği grafiği	57
Şekil 6.5. Kalınlık dağılımı grafiği.....	58
Şekil 6.6. Şekillendirme sınır diyagramı	59
Şekil 6.7. Üç nolu numune grubu analiz sonuçları a) Şekillenme sınır diyagramı (FLD), b) Kalınlık dağılımı	60
Şekil 6.8. İki nolu numune analiz sonuçları a) Şekillenme sınır diyagramı (FLD), b) Kalınlık dağılımı	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Pompaların teknik özellikleri.....	43
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan sac malzemenin kimyasal bileşimi.....	46
Çizelge 5.2. St22 sac malzemenin diğer standart ve kalitelerdeki karşılığı.....	46
Çizelge 5.3. Şekillendirme deney parametreleri.....	52
Çizelge 5.4. Analizler için programa tanımlanan malzeme parametreleri.....	53
Çizelge 6.1. St22 çelik malzemenin mekanik özellikleri.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- R : Dikey anizotropi katsayısı
- \bar{R} : Ortalama dikey anizotropi katsayısı
- n : Deformasyon sertleşmesi üssü
- β : Çekme oranı
- D : Taslak çapı
- d : Kalıp çapı veya yaklaşık olarak elde edilen ürünün çapı
- F : Kuvvet
- K : Sertlik matrisi
- u : Yer değiştirme vektörü
- Rc : Rockwell
- P : Fosfor
- S : Kükürt
- N : Azot
- As : Arsenik
- Cr : Krom
- W₀ : İlk genişlik
- W_f : Son genişlik
- l₀ : İlk boy
- l_f : Son boy
- R₀ : Hadde yönüne paralel anizotropi katsayısı
- R₄₅ : Hadde yönüne 45 derece açılı anizotropi katsayısı
- R₉₀ : Hadde yönüne 90 derece açılı anizotropi katsayısı
- D_f : Flanş çapı
- D : Kalıp iç çapı
- h : Kalıp derinliği
- r : Kalıp köşe radüsü

KISALTMALAR

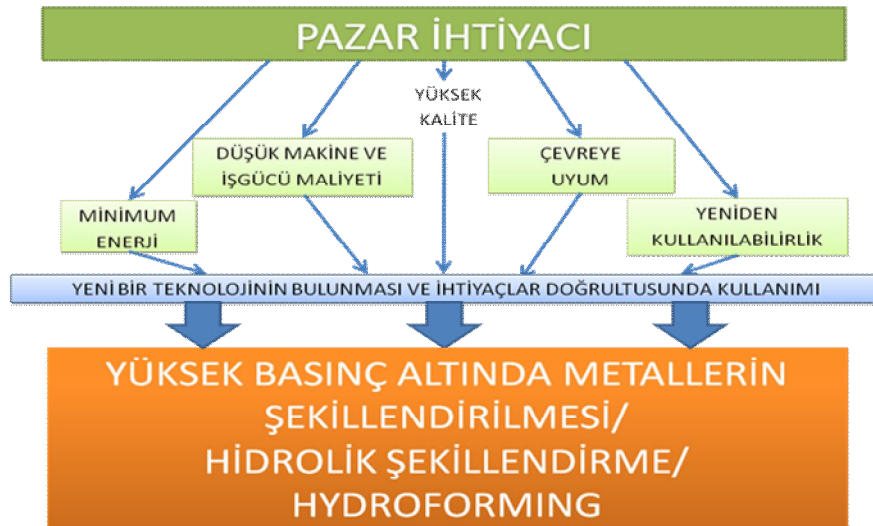
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Çizim)
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizleri)
FEM	: Finite Element Modelling (Sonlu Elemanlar Modeli)
2D	: Two Dimensional (İki Boyutlu)
3D	: Three Dimensional (Üç Boyutlu)
MPa	: Megapascal
CNC	: Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
FLD	: Forming Limit Diagram (Şekillenme Sınır Diyagramı)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
EN	: Avrupa Normu
TS	: Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yüksek basınç altında şekillendirme (Hydroforming) işleminde bir kalıp tarafından sıkıştırılmış içi boş yapıya sahip bir borunun içine veya bir sac üzerine yüksek basınçlı akışkan gönderilerek borunun/sacın cidarlarının kalıbın geometrisine göre genişlemesi ve istenen şekle gelmesi işlemidir. Diğer bir deyişle, boru veya sac malzemenin üzerine basınçlı akışkan gönderilerek sacın veya borunun kalıba sıvanması ve istenilen formun verilmesi işlemidir.

Sac plakaların şekillendirme işlemlerine alternatif olan bu metot, derin çekilmiş parçaların düşük maliyetle üretilmesi ihtiyacına karşılık olarak 1940'ın sonlarında geliştirilmiştir. Günümüzde otomotiv, havacılık, uzay ve gemi endüstrisi gibi çeşitli alanlarda uygulanabilen bu teknolojiye olan ilgi 1990 yılından sonra artmıştır.



Şekil 1.1. Hidro şekillendirme ve ortaya çıkış süreci

Günümüzde özellikle taşımacılık ve savunma sanayiinde kullanılan malzeme ve bu malzemenin şekillendirilmesinde kullanılacak teknolojinin önemi oldukça büyüktür. Bunun yanı sıra; mukavemet/ağırlık oranı yüksek olan araçlar üretmek de şu an olduğu gibi gelecekte de önemini koruyacaktır. Çelik saclar otomotiv ve beyaz eşya üretiminde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomobil tasarımcıları otomobillerde ideal ergonomik şekil ve hafiflik aramaktadırlar. Çelik sac üreticileri de bu ihtiyaca uygun malzeme geliştirmeye çalışmaktadırlar [1]. Diğer imalat yöntemleri kullanılarak birkaç aşamada şekillendirilebilen karmaşık geometriye sahip parçalar hidro şekillendirme yöntemiyle tek bir kademede şekillendirilebilmektedir. Bu durum, hidro şekillendirme işlemini klasik yöntemlerden daha avantajlı hale getirmektedir.

Özel geometrideki ürünlerin mukavemet/ağırlık oranı, diğer imalat yöntemlerine göre, yüksek basınç altında şekillendirme işlemiyle çok daha yüksek olarak üretilmektedir. Klasik şekillendirme yöntemleri kullanılarak üretilen karmaşık şekle sahip bir elemanda şekillendirme bazen birkaç aşamada yapılabilmekte veya ürün birkaç parçadan oluşturulup kaynak işlemi ile birleştirilebilmektedir. Bu durumda ise üretimi gerçekleştirilen parça daha ağır olmakta ve boyutsal hassasiyeti çok iyi olmamakta; dolayısıyla bunların hepsi maliyet artışı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bütün bu nedenlerden ötürü, dünya sanayisi artık hidrolik akışkan ile şekillendirmeye kaymaktadır. Gelişmiş dünya ülkeleri uçak ve otomobil endüstrisinde bu teknoloji ile kendi pazarlarında farklılık yaratmakta ve ön plana çıkmaktadırlar.

Son yıllarda metal şekillendirme işlemlerinin (haddeleme, dövme, çekme, hidro şekillendirme ve ekstrüzyon) matematik modellemelerine oldukça yoğun bir ilgi oluşmaktadır. Mühendislik uygulamalarında genellikle yükü azaltmak, gerilmeyi düşürmek ya da malzemenin mikro yapısını kontrol edebilmek için en uygun kalıp şekli oluşturulmaya çalışılır. Temel amaçlar üretim maliyetini düşürmek ve daha az kayıpla ya da kayıpsız bir üretim yapmayı sağlamaktır [2].

Hidro şekillendirme ile üretimde istenen tolerans ve boyut tamlığı sağlanabilmesi için tasarım işlemi, oldukça dikkatli ve bütün alternatif ve olasılıklar matematiksel

temellere dayandırılarak gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve sonlu elemanlar analizlerinin (FEA) kullanımı bir gereklilik haline gelmiştir. FEA analizlerinin yapılabilmesi için alaşımın mekanik değerlerinin (akma gerilmesi, kopma gerilmesi, elastikiyet modülü, deformasyon hızı duyarlılığı, poisson oranı vs.) yanısıra şekillenebilirlik limit değerlerinin de programa tanımlanması gerekmektedir.

Bu amaç doğrultusunda, çalışmanın ikinci bölümünde hidro şekillendirme, hidro şekillendirme türleri, hidro şekillendirme sisteminin üstünlük ve sınırlılıklarından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde; matal şekil verme simülasyonlarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde; deneylerde kullanılan Erdemir kalite St22 saclarının hidrolik akışkanla şekillendirilmesinin deneysel ve teorik işlem basamakları ve deney parametrelerinden bahsedilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği hidro şekillendirme sistemi, kalıp, sistem elemanları ve parametreleri tanıtılmıştır. Beşinci bölümde; sistemin çalışması anlatılmış, deney parametreleri ve yapılan deneyler hakkında bilgi verilmiştir. Hidro şekillendirme işleminin teorik modelleri oluşturulmuş, sonlu elemanlar analizi yapılmış, analiz parametreleri ve teorik analizlerde kullanılan malzeme modelleri, kontak modelleri ve ağ örme işlemleri basamak basamak anlatılmıştır. Altıncı bölümde; deneysel uygulama ve teorik çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir. Yedinci bölümde; çalışmanın teorik ve deneysel çıktıları karşılaştırmalı olarak sıralanmış, sonuçlar tartışılmış, önerilerde bulunulmuştur.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Gerçekleştirilen çalışmanın amacı, sac şekillendirme metotlarından biri olan sac hidro şekillendirme metodunu kullanarak ERDEMİR üretimi St22 çelik sacların şekillendirilebilirliğinin teorik ve deneysel olarak incelenmesidir. Ayrıca hidro şekillendirme metodunun klasik sac şekillendirme metotlarından üstünlükleri doğrulanacaktır. Ayrıca şekillendirme işlemi sonucunda düzenli kalınlık dağılımının sağlanması hedeflenmektedir. Deneylerde farklı kalınlıklardaki ERDEMİR üretimi St22 saclar tasarlanan kalıp geometrisinde şekillendirilmiş ve incelenmiştir.

1.2. LİTERATÜRDE BULUNAN BENZER ÇALIŞMALAR

Sac metallerin şekillendirilmesi ile ilgili farklı araştırmacılar tarafından çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu metotlar dört başlık altında incelenebilir:

1. Simülasyon testleri,
2. Temel mekanik testler,
3. Sınırlı kubbe (dome) yüksekliği,
4. Biçimlendirme sınır diyagramı [1].

Bir malzemenin şekillendirilebilirliğini ve özellikle derin çekilebilirliğini etkileyen faktörler ise üç grupta toplanabilir:

1. Malzeme özellikleri,
2. Kalıp geometrisi,
3. İşlem koşulları [3].

Bu üç faktör birbiri ile yakından ilgilidir. Malzemenin biçimlendirilebilme kabiliyeti iyi ise, iyi olmayan kalıp geometrisi ve işlem koşulları ile sağlam parça elde edilebilir. Bunun tersi olarak biçimlendirilebilme kabiliyeti zayıf olan malzeme için, uygun kalıp geometrisi ve işlem koşulları gerçekleştirilebilirse sorunsuz üretim yapılabilir [3].

Malzemenin kalın olması, tane yapısının ince olması, mümkün mertebe tek fazlı oluşu ve metalik olmayan kalıntılardan arındırılmış olması malzemelerin çekilebilme kabiliyetlerini olumlu yönde etkilemektedir [3].

Metalik malzemelerin çekilebilme kabiliyetlerini etkileyen en önemli mekanik özellik R dikey anizotropi katsayısıdır. Dikey anizotropi katsayısı ise malzemenin kristalografik yapısına ve kristallografik yönlenmesine bağlıdır [3].

Klasik sac şekillendirme metotlarıyla şekillendirilmesi güç malzemelerin deformasyonu için ise hidrolik akışkanla şekillendirme teknolojisi kullanılmaktadır.

Hidro şekillendirme konusunda son yıllarda yeni sistem ve teknolojiler denenmeye başlanmıştır.

Hidro şekillendirme konusunda geliştirilen yeni sistemler adım kontrollü hidro şekillendirme presleridir. Bu preslerin en büyük faydası her bir işlem basamağı ve işlem esnasında uygulanan bütün parametreler bilgisayar kontrollü olarak uygulanabilmektedir. Ayrıca sadeleştirilmiş hidro şekillendirme sistem ekipmanları kullanarak, işlem maliyetinin düşürülmesini hedefleyen, genellikle deneysel kaygılar güdülerek tasarlanmış tüp ve sac hidro şekillendirme sistemleri de geliştirilmektedir.

Hidro şekillendirme sistemi tasarımında dikkat edilmesi gereken başlıca unsurlar optimum sıvı basıncının ve baskı kuvvetinin uygulanması, ayrıca sistemin sızdırmazlığının sağlanmasıdır. Sıvı basıncı, çok yüksek olursa, malzeme sünekliğin izin verdiği orandan çok daha hızlı olarak kalıbın şeklini almaya zorlanacaktır. Bu da şekillenecek levhada beklenenden daha evvel yırtılmalara yol açar. Diğer taraftan, eğer sıvı basıncı çok düşük olursa, işlem esnasında yeterince uzama meydana gelmemesinden dolayı, malzeme buruşmaya daha meyilli olacaktır. Bundan dolayı, üst ve alt limitler arasında sıvı basıncını ayarlamak gerekir [4-13]. Optimum sıvı basıncının kontrolü, bitmiş üründe yırtılmaların ve buruşmaların en az olduğuna emin olunan basınç değeridir.

Otomobil üreticilerinin, uluslararası çapta rekabet edebilmesi, uzay ve uçak teknolojisinin geliştirilebilmesi için, maliyeti azaltan, kaliteyi yükselten yeni teknolojilerin çok yakından takip edilmesi gerekmektedir.

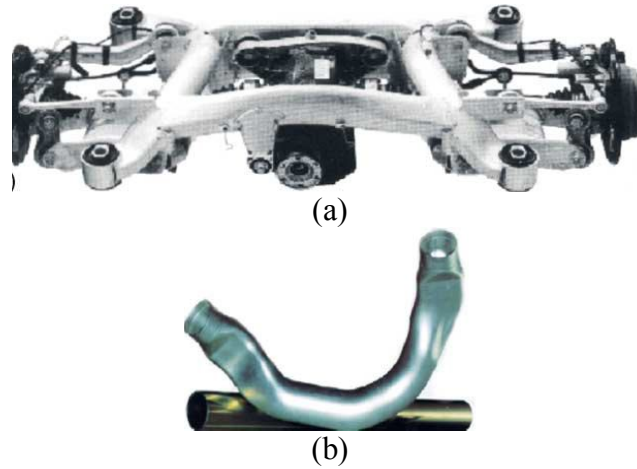
1995 yılından beri BMW'nin ürettiği arka akslar, yüksek iç basınç (Sıvı basıncı) ile şekillendirilmiş borulardan üretilmektedir [14-15].

Hidro şekillendirme işlemi farklı uygulama alanları ile birçok araştırmacıya ilham kaynağı olmuştur.

Parsa ve Darbandi yaptıkları çalışmada bir otomobil parçasının hidroforming yöntemiyle üretiminin deneysel ve nümerik analizini incelemiştirlerdir. Çalışmada 3

farklı parçanın üretim yöntemi üzerinde durulmuştur. Çekme işleminin sıvama işleminden üstünlüğü çeper kalınlığı ölçümleri kullanılarak yapılmıştır. Laboratuvar ölçeğinde yapılan deformasyon işleminde akışkan basınç kuvveti ve saç metalin etkisi üzerinde durulmuştur. Çalışmada IF çeliği, AA 2024 ve St14 kalite çelik kullanmışlardır. Hidroforming yöntemiyle ve çekme işlemiyle üretilen üç örnek parça üzerinde çalışılmış simülasyon ve sonlu elemanlar analizleri yapılmış, ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, çekmeyle yapılan hidroforming işleminin sıvamayla yapılandan daha iyi sonuçlar verdiği, çekme ile yapılan işlemde herhangi bir bozukluk olmadığı görülmüştür [16].

Hartl, çalışmada hidrolik şekillendirme işleminin diğer işlemlerden işlem basamakları, bitmiş ürün kalitesi ve maliyet farkı, pres ve işlem ekipmanları bakımından üstünlüklerini vurgulamış, ayrıca daha hafif ama dayanımı yüksek malzemelerle ve ısı uygulayarak yapılan yeni bir hidroforming tekniği geliştirmeye çalışmıştır [17].



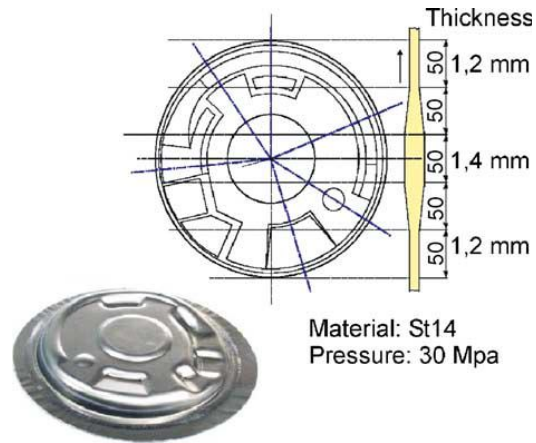
Şekil 1.2. Alüminyum aks a) dört adet hidroform edilmiş parçadan oluşan montaj, b) hidroform ile şekillendirilmiş gövde elemanı (BMW) [17]



Şekil 1.3. Sac hidroform metoduyla üretilmiş lüks bir otomobil tavan elemanı. [17]



Şekil 1.4. Bir alüminyum tüpün sıcak hidro şekillendirilmesiyle elde edilmiş otomobil modeli, uzunluğu yaklaşık 250mm [17]



Şekil 1.5. Haddelenmiş çelik sacların hidro şekillendirilebilirliğini inceleyen bir çalışma [18].

Kim vd. yaptıkları çalışmada, bir otomobil benzin deposunun hem hidro forming metoduyla hem de geleneksel birleşik kalıpla üretimini yapıp bu iki metodun karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan işlemlerin FEM analizi ve modellenmesi yapılmıştır. Özellikle hidro mekanik şekillendirme işlemi ile otomobil benzin deposu üretimindeki optimum yük fonksiyonuna dikkat çekilmiştir. Sonuç olarak hidro mekanik şekillendirme işlemi ile şekillendirmenin parçadaki cidar kalınlığı değişimini en optimum seviyeye taşıdığı ve malzemenin belli bölgelerinde görülen incelmelerin geleneksel kalıplama yönteminden daha az gerçekleştiği görülmüştür [19].



Şekil 1.6. Kim ve vd. şekillendirdiği bir otomobil yakıt tankı [19]

Hidro şekillendirme konusunda deneysel çalışmalar çoğu kez bilgisayar analizleriyle de desteklenmiştir. Böylelikle yapılan deneylerden beklenecek sonuçlar önceden tahmin edilebilmekte veya sonuçlara göre uygulanan işlemin doğruluğu deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilebilmektedir.

Lo vd. [20], metalik yarım küre hidroforming bükme işlemi için sıvı basıncı-zımba stroku konusu ile ilgili bir seri deneysel ve teorik çalışma yapmışlardır. Metaller ve termoplastiklerle ilgili olarak halen bu değerlendirmeler devam etmektedir.

Brunet vd. 1998 yılında sac metal şekillendirme işleminde boyun vermenin deneysel ve teorik olarak yaptıkları çalışmada, şekillendirme sınır diyagramı kontrolü için iki farklı yaklaşımı detaylı olarak açıklamıştır. İlk önce deneysel çalışma anlatılmıştır. Çalışmada, sacdaki yer değişim alanlarını ölçmek için bir

korelasyon tekniği geliştirilmiştir. İkinci yaklaşım ise teoriktir. Burada boyun verme kriteri, yükün uygulanış şekline ve düzlemsel uzamanın meydana geldiği yerin belirlenmesi amaçlanmış Hill'in veya Barlat-Lian'ın anisotropisini izah etmek amacıyla Gurson-Tvergaard'in hasar modeli düzenlenerek ihtimaller verilmiştir. Özellikle non-linear uzama yolu için ve linear uzama hattı için kriterlerin yazıldığı formlar hazırlanmıştır. Sonuç olarak, üç farklı alüminyum sacın ve orta sertlikte bir çelik sacın şekillendirme sınır diyagramları deneysel ve teorik yollarla hesaplanarak elde edilmiştir [21].

Mattiasson'da 2000 yılında Endüstride Sac metal şekillendirme işlemlerinin sonlu elemanlarla simülasyonu konusundaki yaptığı çalışmayla; son yıllarda sacların şekillendirilmesi işleminin simülasyonu için nümerik işlemlerinin kullanımında büyük gelişmeler olduğundan bahisle, özellikle otomotiv endüstrisinde gerçek bir uygulama alanı bulduğundan bahsetmiştir. Bu makalede sac metal şekillendirme konusunda, pratik ve uygulanabilir konular sunulmuş ve bazı şekillendirme hatalarının meydana gelebileceği yerler belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada, yerinde şekillendirme metodu gözden geçirilmiş, pratik kullanımı konusunda sac şekillendirme simülasyonu yapılmıştır. Bu konuda özellikle değişik sonlu element formülasyonları, konunun tarihi gelişiminin gözden geçirilmesiyle uygulanmıştır. Sonuçta ise günümüz simülasyon teknolojisi kısa olarak tanıtılmıştır, özellikle de otomotiv endüstrisindeki sac metallerin şekillendirme simülasyonları konusundaki uygulamalar geniş olarak anlatılmıştır [22].

Li-Ping Lei vd. paslanmaz çelik sac metal şekillendirmesinde tasarım ve sonlu elemanlar analiziyle deneysel yöntemin karşılaştırılması adlı çalışmalarında: bükme ve çekme işlemlerinde Code Marc Finite-Element sonlu gerilme formülüyle katı elementler kullanılarak paslanmaz çelik sac metal şekillendirme analizleri yapılmıştır. Bükme deformasyonunda zımba ve iş parçası temas yüzeyi arasındaki boşluğun arttırılması sırasında geri esneme açısını arttırmıştır. Kontak tanımlamaları basitleştirildiği için teorik ve deneysel sonuçlar arasında farklar meydana germiştir [23].

Polanco vd., DIN1614 çelik malzemeden yapılan otomobil fren pedalının presle şekillendirilmesinde ortaya çıkan kırılma problemi üzerinde durmuşlardır. Şekillendirme işlemi sonrası meydana gelen kırılmanın tokluğun düşük olduğu bölgelerde gerçekleştiğini yaptıkları mikroyapı analizleri sonucu ortaya koymuşlardır [24].

Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunlukları büyük ebatlı geometrilerin oluşturulmasında tercih edilmelerini sağlamaktadır. Buna rağmen geleneksel derin çekme kalitesindeki çelik saclarla kıyaslandıklarında zayıf şekillenebilme kabiliyetleri bu alaşımları dezavantajlı duruma düşürmektedir. Bu sorun özellikle kompleks geometrili parçaların şekillendirilmesinde daha çok görülmektedir. Şekillendirme işlemi boyunca yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda işlem yapılması alüminyum alaşımlarının akma noktasını ve deformasyon sertleşmesi üssünü düşürmekte, böylece daha iyi şekillendirme işlemi gerçekleştirilebilmektedir [25].

Wu vd., LZ61 alaşımının şekillenebilirlik limit diyagramını tespit edebilmek için 0,6mm kalınlığındaki sac plakalara çeşitli sıcaklık aralıklarında çekme ve forming tesleri uygulayarak anizotropi ve sıcaklığın deformasyon karakteristiği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çekme testi sonuçlarından elde edilen plastik uzama oranı, anizotropi ve çalışma sertleşmesine göre şekillenebilirlik limitlerini değerlendirmişlerdir [26].

AZ31 alaşımının oda sıcaklığı ile 225°C arasında hidrolik şişirme testlerini gerçekleştiren Altan ve arkadaşları oda sıcaklığında 12mm, 225°C' de 38mm ile en büyük çekme yüksekliğine ulaşmışlardır [27].

Quan vd. 7075 alüminyum alaşımının sıcak deformasyon boyunca dinamik yumuşama davranışını izotermal sıcak sıkıştırma testleri ile 250°C~450°C sıcaklık değerleri arasındaki 5 farklı sıcaklıkta ve dört farklı deformasyon hızıyla (0.01, 01, 1 ve 10s⁻¹) incelemişlerdir. Sonuçlar sıcaklık değişiminin alaşımın dinamik yumuşama davranışında önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Dinamik yumuşama oranı ile dinamik yeniden kristalleşmenin birleşerek akma gerilmesinin düşmesine neden

olduğu görülmüştür. Optik mikroyapılar; sıkıştırılan numunenin tane yapısının dinamik yumuşama, deformasyon sertleşmesi ve deformasyon oranının artışıyla daha homojen hale geldiği görülmüştür. 7075 alüminyum alaşımının sıcaklık etkisiyle oluşan deformasyon davranışı akma gerilmesi, sıcaklık, deformasyon hızı, gerinme ve dinamik yumuşama arasındaki ilişkilerle kesin olarak tanımlanabilmektedir ve plastik deformasyon davranışının sonlu elemanlar analizi için temel teşkil etmektedir. 450°C ve daha yüksek sıcaklıklarda dinamik yumuşama derecesi deformasyon boyunca gitgide küçülmektedir [28].

Takuda vd. elik sac malzeme üzerine yaptıkları çalışmaya göre ise sıcak derin çekme işleminde sıcaklık arttıķa deformasyon sertleşmesi ve akma gerilmesi değerleri azalmış, sınır çekme oranı da düşmüştür [29].

Koç vd. ise 5052 ve 6061 alüminyum sacların yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarına göre tek eksenli (ekme testi) ve iki eksenli (şişirme testi) yüklemeler altında alaşımların deformasyon davranışlarını incelemişlerdir [30]. Çalışma sonucunda mikroyapı analizleri, uygulanan farklı sıcaklık ve deformasyon hızının tane boyutu değerine çok etkili olmadığını göstermiştir. Bunun nedeninin; termal işleminde aktif hale geçen dislokasyon çizgilerinin yüksek sıcaklık altında akma gerilmesini düşürmesi olduğu yorumunda bulunmuşlardır. Diğer yandan; kalınlık değerim değerleri karşılaştırıldığında şişirme testlerinden elde edilen gerilme eğrilerinin genellikle deneysel olarak ölçülen değerlerle uyum gösterdiği görülmüştür. Bundan dolayı; karmaşık geometri ve farklı yükleme koşullarının olduğu sıcak hidro şekillendirme analizleri için iki eksenli şişirme testi sonuçlarının kullanılabilieceği sonucuna varılmıştır [30].

Araştırmacılar çoğu kez yaptıkları çalışmaları sonlu elemanlar analizleri ile desteklemektedirler. Günümüzde sıcak şekillendirme işleminin sonlu elemanlar analizleri iki ana amacı işaret etmektedir. Birincisi; baskı plakası ve kalıp arasındaki ısı transferi hakkında ilk elden bilgi sahibi olmak, ikincisi ise; malzemelerin ısıl davranışı ve ekilebilirliğinin artırılmasıdır. Morsy ve Manabe yaptıkları çalışmada AZ31 alaşımlı sacın sıcak derin çekme işlemi üzerine ısı transferinin etkisini sonlu

elemanlar metoduyla incelemiştirler [31]. Bu amaçla; birinci modelde sac ve zımba soğutma sıvısıyla oda sıcaklığında tutulurken, kalıp ve baskı plakası 300°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Sacın başlangıç sıcaklığı oda sıcaklığında tutulmuştur. Ayrıca çalışmada deformasyon hızının sac plakanın şekillenmesi üzerine etkisi üzerinde durulmuştur. Analizler iki farklı zımba hızında gerçekleştirilmiştir. Similasyon sonuçları aynı model üzerinde ısı transferine göre karşılaştırılmıştır. İkinci modelde kalıp, sac, baskı plakası ve zımba 300°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Similasyon sonuçları; Mg alaşımlarının derin çekilebilirliğinde ısı transferinin oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Birinci modelin yani sadece kalıp alt ve üst yarımının ısıtılıp, sac ve zımbanın oda sıcaklığında kaldığı durumda şekillenmenin daha iyi olduğu görülmüştür. Bu modelde, parçanın yan duvarları zımba ile soğutulmuştur ve böylece akma gerilmesi artmış, artan akma gerilmesi malzemede meydana gelen bölgesel incelmeleri ortadan kaldırmıştır.

Şekillendirme işlemi esnasında uygulanan sıcaklık ve değiştirilen deformasyon hızı değerleri malzemenin şekillenme oranını ve dolayısıyla da şekillenebilirliğini etkilemektedir. Yuan ve arkadaşları; dikdörtgen kesitli otomotiv yapı elemanlarının hidro şekillendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada tüp paslanmaz çelik malzeme ile hidro şekillendirme deneyleri yapmışlardır. Eksenel yüklemeli hidro şekillendirme yükleme bölgesinde oldukça güçlü bir etkiye sahiptir. İç basınç eksenel yüklemeye daha hızlı artırıldığında geçiş bölgesinde patlama gerçekleşmektedir. Diğer taraftan; çok yüksek eksenel yüklemeler kırılmaya neden olmaktadır. Kesit alanının merkez noktasında maksimum kalınlık ve geçiş bölgesinde minimum kalınlık elde edilmiştir. Eğer tüp malzemenin “n” değeri çok büyükse şekillenme sonucunda elde edilen parçanın et kalınlığının daha düzenli olarak dağıldığı görülmüştür [32].

Lee vd. 7075 alaşımlı tüp malzemenin oda sıcaklığı ve 50,100,150,200,250,300°C sıcaklıklardaki deformasyon davranışını incelemiştirler. Bunun için malzemeyi önce 3 farklı gruba ayırıp her bir gruba farklı ısı işlem uygulanmıştır (O, T6, W). Isıl işlem uygulanan sac malzemelere belirtilen sıcaklıklarda tek eksenli çekme testleri uygulanmıştır. Ardından ısı işlem görmüş malzemelere tüp hidro şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda yüksek dayanımlı alüminyum alaşımının karmaşık geometrili parçaların tek bir kademedeki hidroformingle başarılı

bir şekilde elde edilebilmesinin malzemeye uygulanacak olan ısı ileme ve hidroform esnasında uygulanacak sıcaklıkla sağlanabileğini vurgulamışlardır. Malzemenin akma davranışının sıcaklığa bağlı olarak dinamik deformasyon yaşanması, dinamik toparlanma ve dinamik çökeltilerden etkilendiğini vurgulamışlardır. Düşük sıcaklıklarda ve tavlama malzemelerde dinamik deformasyon yaşanması akma davranışını daha fazla etkilemiştir. 100-200°C arasındaki sıcaklıklarda ve solüsyona alınmış malzemelerde dinamik toparlanma ve çökeltmenin dayanım ve uzamayı kontrol altında tuttuğunu belirtmişlerdir. 200°C'nin üstündeki sıcaklıklarda dinamik toparlanmanın en etkin mekanizma olduğu vurgulanmıştır [33].

Bir malzemenin çekilebilme kabiliyetinin ölçüsü olarak çekme oranı (β) kullanılır. Çekme oranı;

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (1.1)$$

ile ifade edilebilir. "D" taslak çapı ve "d" ise kalıp çapı veya yaklaşık olarak elde edilen ürünün çapıdır.

Birçok araştırmacı hidro şekillendirme metodu kullanarak malzemelerin çekme oranını artırma yoluna gitmişlerdir. Tekkaya ve ekibi hidro mekanik derin çekme işleminin karmaşık parça üretimini kolaylaştırdığı ve 2.25'in üzerindeki çekme oranına sahip ürünler için kullanılabileceğini belirlemişlerdir [34]. Bu oran yumuşak çelik için 3.53, yumuşak alüminyum için 3.44 olarak elde edilebilirken [35], bir başka çalışmada bakır sac malzeme için maksimum 2.65 çekme oranının elde edildiği görülmüştür [36]. Günümüzde havacılık ve uzay sektöründe çok geniş bir kullanım alanı olan süper alaşımlı malzemelerin şekillendirilmesinde 2.45 çekme oranına ulaşılabildiği deneysel olarak kanıtlanmıştır [37].

BÖLÜM 2

HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

2.1. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TANIMI

Hidrolik şekillendirme temel olarak metal sac veya tüp malzemenin akışkan bir ortam vasıtasıyla (su, viskoz polimerik malzeme vs) kapalı bir kapta şekillendirilmesidir. İlk olarak 1890'larda ortaya çıkmış [38], ancak asıl gelişimini II. Dünya Savaşı sonrasında gerçekleştirmiş bir imalat yöntemidir. İlk araştırmalar Almanya ve Japonya' da gerçekleştirilmesine rağmen; günümüzde Amerika, Rusya, Fransa, İsrail, Çin ve Kore gibi değişik ülkelerde gerek üniversite gerekse özel araştırma birimlerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Yöntem, yeterli bilgi birikimine ulaşılamamış olmasından ve bazı teknik zorluklardan ötürü 1990'lara kadar gereken ilgiyi görmemiştir [38].

Günümüzde özellikle otomotiv sanayinde tüp hidrolik şekillendirme yoluyla üretilmiş gövde sistemleri (gösterge panosu, radyatör çerçeveleri, koltuk çerçeveleri), tavan yan kenarları; şasi sistemleri (motor beşiği, arka beşik, merdiven çerçeveleri, sönümleme çubukları); kontrol ve süspansiyon sistemleri (kontrol kolları, direksiyon milleri); motor ve çekiş sistemleri (egzoz manifoldu, kam mili) görmek mümkündür. Şekil 2.1'de hidrolik şekillendirme yöntemiyle alüminyum malzemeden üretilmiş otomobil gövdesi görülmektedir.



Şekil 2.1. Hidrolik şekillendirme yoluyla üretilen alüminyum otomobil gövdesi [39]

Sac hidrolik şekillendirme teknolojisi ise düşük adetli üretimlerde, prototip imalatında, alüminyum alaşımları ve yüksek dayanımlı çelikler gibi şekillendirilebilirliği göreceli olarak düşük malzemelerin kullanıldığı durumlarda yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ

Hidrolik şekillendirme bir tür esnek şekillendirme teknolojisidir. Değişken biçimli takımla şekillendirme teknolojileri basit ekipmanlar gerektirmeleri, mevcut donanımına uyum sağlayabilmeleri, düşük enerji tüketimleri, yüksek ürün kaliteleri ve fayda/maliyet oranlarının yüksek olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Değişken biçimli takımla şekillendirme: lastik kalıpla şekillendirme ve akışkan ortam yardımıyla şekillendirme olarak iki grubu içerir [38].

Akışkan ortam ile şekillendirme de kendi içinde 1) Gaz ile şekillendirme 2) Hidrolik şekillendirme olmak üzere iki alt grup içerir.

Hidrolik şekillendirmeyi 3 ana grup altında toplayabiliriz:

1. Sac hidrolik şekillendirme
2. Tüp hidrolik şekillendirme
3. Hidromekanik derin çekme

2.2.1. Sac Hidrolik Şekillendirme

Hidrolik sac şekillendirme genel olarak iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

1. Sac plakanın bir akışkan vasıtasıyla şekillendirilmesi,
2. Sac plakanın bir zımba vasıtasıyla şekillendirilmesi.

2.2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme

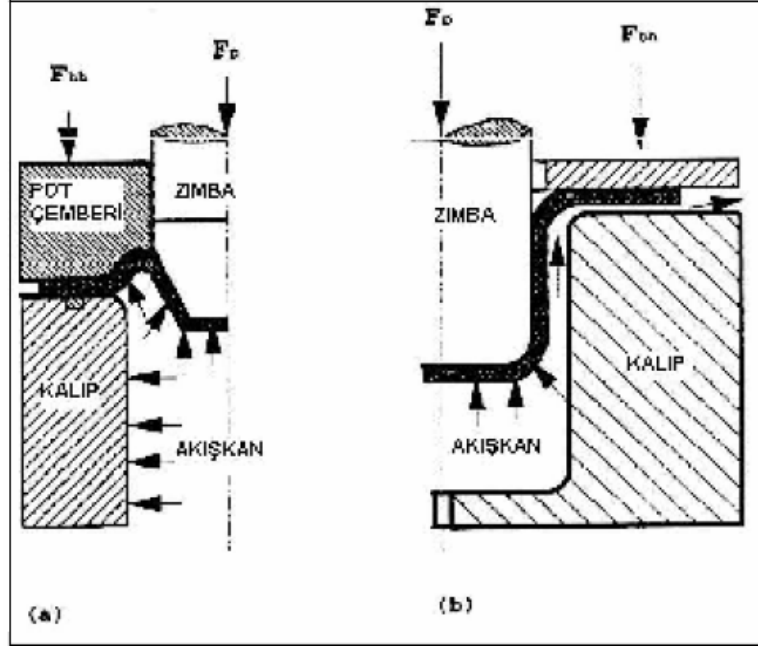
Öncelikle düz ve ön şekillendirilmiş boru, istenen geometriye göre hazırlanan kalıba

yerleştirilir ve boru içerisine düşük oranda iç basınç uygulanır. Boru içindeki düşük miktardaki basınç sabit tutularak kalıp alt ve üst yarımı birbirleriyle birleştirilerek kapatılır. Sızdırmazlığı ve aynı zamanda aksel stroku sağlayacak olan pistonlar harekete geçer, borunun iki tarafını kapatır ve ortam şekillendirmeyi sağlayacak akışkanla doldurulur. Uygulanan iç basınçtan ve eğer varsa aksel sıkıştırmadan dolayı malzeme kalıbın içinde akmaya başlar, şişer ve kalıbın şeklini alır. İşlem sonunda kalıp açılır ve parça dışarıya alınır (Şekil 2.2.).

2.2.3. Hidro Mekanik Derin Çekme

Klasik hidrolik şekillendirme işlemi esnasında kullanılan lastik plaka bu işlem esnasında ortadan kalkar. Malzeme direk olarak akışkan ortamı ile temas halindedir. Birçok farklı türe ayrılabilmesine rağmen temel olarak 2 ana sınıfta düşünebilir: (a) Hidrostatik hidromekanik derin çekme (b) Hidrodinamik hidromekanik derin çekme [41]. Hidromekanik çekme yönteminde klasik çekmeye oranla daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabilir. Pratik uygulamalar hidromekanik çekmede 2.7 gibi yüksek derin çekme oranlarına rahatlıkla ulaşılabilir. Bu durum bize klasik çekmede birden çok çekme kademesi gerektirecek profillere tek adımda ulaşma imkanı verir. Ayrıca bu işlem esnasında, malzemenin çekme zımbasına akışkan basıncı yardımıyla sıvanması sayesinde taban kavis bölgesinde malzeme incilmesi çok az olmaktadır. Bu büyük üstünlük, çok ince malzemelerin bile hidromekanik yöntem kullanılarak çekilmesine olanak sağlar. Küçük taban kavisleri kullanılabilir. Bu özellik, basınçlı kap imalatı gibi alanlarda, oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Klasik derin çekmede et kalınlığındaki yerel incelmelerden kaçınmak için, nominal kalınlıktan daha kalın levhalar kullanılırken; hidromekanik derin çekme yöntemiyle üretilen parçalarda, nominal kalınlığa çok daha yakın malzemeler kullanılabilir.

Yöntem otomobil parçalarının üretiminde (far kovanları, çamurluklar), uçak sanayinde ve mutfak ekipmanları üretiminde kullanılmaktadır [38].



Şekil 2.2. Hidromekanik derin çekme işlemi: a) Hidrostatik Hidromekanik derin çekme işlemi, b) Hidrodinamik Hidromekanik Derin çekme İşlemi [40]

2.3. HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİNİN KULLANILDIĞI ALANLAR

Hidro şekillendirme işlemiyle üretilen ürünler özellikle mukavemet ve uniform malzeme kalınlık dağılımının arandığı bütün ortamlarda kullanılmaktadır. Özellikle;

1. Otomotiv Endüstrisi
2. Uçak sanayiinde
3. Savunma Sanayiinde
4. Mutfak ekipmanları
5. Uzay Bilimi
 - 5.1. Işıklandırma sistemi
 - 5.2. Ağır Parçalar

başlıca kullanım alanlarıdır.

2.4. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE SIKLIKLA KULLANILAN MALZEMELER

Hidro şekillendirme işlemi özellikle savunma sanayi, uçak ve uzay sanayinde kullanıldığı için yine bu alandaki üretimlerde kullanılan metal ve alaşımlarına sıklıkla uygulanabilen bir metottur. Günümüzde birçok malzemenin bu metotla şekillendirilebilirliği üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ancak en yoğun olarak;

1. Çelikler,
2. Paslanmaz çelikler,
3. Derin çekme sacları,
4. Alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde tercih edilir.

2.5. SİSTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

2.5.1. Avantajları

1. Zor geometriye sahip malzemeler rahatlıkla üretilebilmekte,
2. Birçok operasyon yerine tek operasyonda üretim yapılabilme,
3. Yüksek mukavemetli malzemeler rahatlıkla şekillendirilebilmekte,
4. Hassas ölçüleri yakalayabilmekte,
5. Diğer imalat yöntemlerine göre parçaların % 50 ye yakın daha hafif olarak üretim imkanı sağlanabilmekte,
6. Çevreyle uyumlu olmayan plastik parçalar yerine çevre ile daha uyumlu yeniden kullanılmaya daha uygun metal parçalar kullanabilmektedir.
7. Diğer yöntemlere nazaran malzemenin yapısal sertliğini artırır.
8. Daha düşük üretim maliyeti ve enerjiyle üretim kolaylığı sağlar

Geleneksel yöntem ve hidroforming yöntemlerinin karşılaştırılacak olursa;

Hidrolik şekillendirme işlemi klasik şekillendirme metotlarına göre:

1. 50% daha hafif
2. 45% daha az parçalı

3. 45% daha az kaynaklı
4. Daha küçük toleranslı olması sistemi diğer şekillendirme metotlarından daha avantajlı hale getirmektedir.

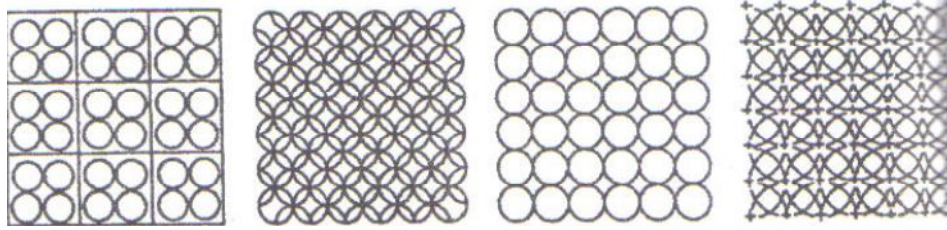
Ancak bütün bu sıralanan avantajlarının yanı sıra sistemin ve kurulumun getirdiği bazı dezavantajlı durumlar da bulunmaktadır.

2.5.2. Dezavantajları

1. Ürün çevrim sürecinin seri olarak gerçekleştirilememesi,
2. Ekipman ve kurulum maliyetinin yüksek olması,
3. Kalıp ve sistem tasarımı için geniş kapsamlı bilgi gereksinimi,
4. Montaj için yeni kaynak teknolojilerine ihtiyaç duyulması.

2.6. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI

Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için, plastic şekil değiştirme analizlerine gerek vardır. Bu amaçla, metalik sac yüzeyine, elektrokimyasal yolla, Şekil 2.4.' deki örneklere benzer şekilde dairelerden oluşan bir ağ çizilir [3].

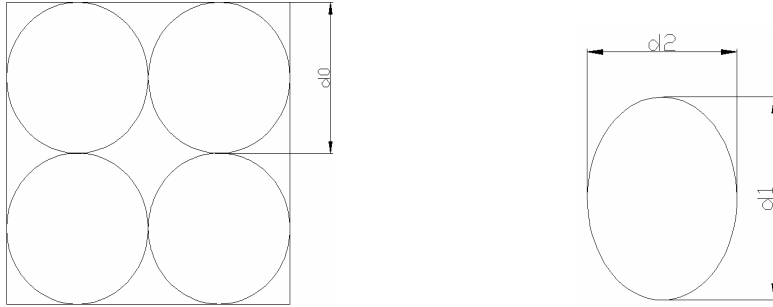


Şekil 2.3. Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örnekleri [3]

Deney numunesinin boyutlarını, yağlama yöntemini ve yağlayıcı türünü değiştirerek çekme, Erichsen, Swift veya benzeri deneylerle, plastic şekil değiştirme işlemi için farklı gerilme durumları oluşturulur. Bu gerilme koşulları altında malzeme boyun verme veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastic şekil değiştirme işlemi sürdürülür. Deney sonrası değerlendirme için boyun verme bölgesindeki, çatlak bölgesindeki

veya çatlağın bitişiğindeki 1.ci ve 2.ci komşu daire seçilir. Ancak bu seçim başlangıçta kesin yapılır ve tüm analizler için hep aynı bölgede daire değerlendirilir [3].

Şekillendirme işlemi sonunda başlangıç daire çapında (d_0) ya büyüme olur veya daire elipse dönüşür (Şekil 2.5.).



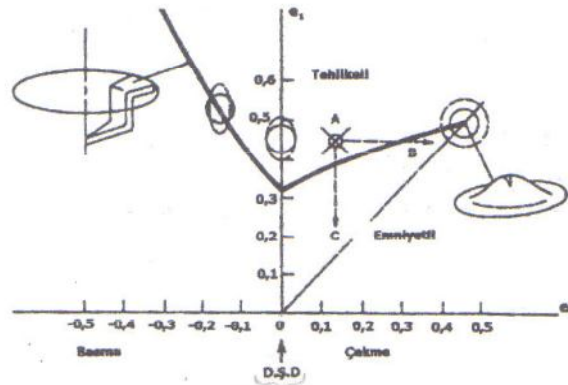
Şekil 2.4. Başlangıç daire ve şekillendirme sonrası boyutları

Şekil değiştirmiş dairenin d_1 en büyük ekseni ile d_2 en küçük ekseni ölçülerek, en büyük (e_1) ve en küçük (e_2) birim şekil değiştirme miktarları bulunur.

$$e_1 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (2.1)$$

$$e_2 = \frac{d_2 - d_0}{d_0} \quad (2.2)$$

Değişik deneylerde, değişik koşullar için bulunan değerler bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 2.6.' da görülen "Şekillendirme Sınır Diyagramı" elde edilir.



Şekil 2.5. Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı örneği [3]
Şekillendirme sınır diyagramının üst bölgesi tehlikeli bölge, alt bölgesi emniyetli bölgedir. Ayrıca diyagram, çekme-çekme veya çekme-basma deformasyon türlerinin olduğu iki bölgeye ayrılır. Çekme-çekme bölgesinde e_2 pozitif işaretlidir ve bu bölgeye ait ilk çalışmalar Keeler tarafından gerçekleştirilmiştir. Çekme-basma bölgesinde e_2 negatif işaretlidir ve bu bölge ile ilgili ilk çalışmalar Goodwin tarafından yapılmıştır. Bu nedenle şekillendirme sınır diyagramları Keeler-Goodwin Diyagramları olarak da adlandırılmaktadır. Şekillendirme sınır diyagramında e_2 'nin sıfır olduğu nokta, düzlemsel şekil değiştirmeyi belirleyen noktadır. Farklı malzemelerin karşılaştırılmasında bu noktaya ait değerler kriter olarak kullanılır.

BÖLÜM 3

METAL ŞEKİL VERME SİMÜLASYONLARI

ANSYS yazılımı; mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan ilişkilerini simule etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simule edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. [42,43].

ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de programın içindeki çizim komutları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Hesaplama için gerekli olan ağ sistemi yani mesh de oluşturulmaktadır. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilmektedir.

Bu bölüm Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) ve Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) hakkında bilgi sunmaktadır.

3.1. SONLU ELEMANLAR NEDİR?

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) mühendislik yapılarının davranışı ve kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılan bir bilgisayar destekli sayısal bir tekniktir. Akış, gerilme, burkulma, titreşim, deformasyon, yırtılma gibi davranışların hesaplanmasında kullanılabilir. Bu metod yük altındaki veya sabitlenmiş olan parçanın küçük ya da büyük ölçüdeki sapmaları hesaplamak için kullanılabilir. Malzemenin elastik ya da

plastik deformasyonunun analizi yapılabilir.

Büyük bir yapının analizindeki astronomik rakamların hesaplanmasında bilgisayara ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Sonlu elemanlar metodunda, bir yapı birkaç küçük ve basit blok ve elementten oluşturulur. Bireysel bir elementin davranışı basit bir denklem eşitliğiyle tanımlanabilir. Elementlerin davranışını tanımlayan oldukça karmaşık eşitlikler kurulabilmektedir. Bilgisayar bu büyük denklemleri çözebilmektedir. Bilgisayar çözümden elementlerin davranışını ortaya çıkarır. Buradan yapının tüm parçalarının gerilmesi ve sapmaları giderilebilir. Eğer yapının dayanımı yeterince kuvvetliyse kullanılan malzemenin izin verilen geriliminin benzeşimi yapılabilir [2].

Sonlu elemanlar terimi hesaplamalar, farklı eşitlikler, kısmen farklı eşitliklerde kullanılan ölçülemeyecek kadar küçük “farklı elementler” in kullanımı teknolojisini belirler. Sonlu elemanlar analizi analitik olarak kullanılan kısmen farklı eşitliklerin detaylandırılmasından daha karmaşık olan yapıların detaylandırılmasının bir yoludur [2].

3.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİNİN FAYDASI NEDİR?

Sonlu Elemanlar Analizi yapının bir bilgisayarda planlaması boyunca karmaşık ve detaylandırılmış bir yapının değerlendirilmesini mümkün kılar. Tasarımın gerçekleştirilebilmesi ve yapının dayanımının yeterli olup olmadığının bilgisayarla gösterilmesi analiz işleminin maliyetini doğrular. Ayrıca Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) önemli olan tasarım yapısının gerçekleştirilebilirlik, hayata geçirilebilirlik oranını belirler [2].

FEA'nın bulunmadığı zamanlarda bir tasarım yapısının geliştirilmesi ancak elle yapılan hesaplamalarla geliştirilmekteydi. Karmaşık yapılarda hesaplamaların yapılabilmesini mümkün kılmak için daha basit ve sadeleştirilmiş tasarımlar oluşturmak gerekirdi. Ancak tasarımdaki önemli değişiklikler risk içermektedir. Tasarımlar prototiplerin oluşturulmasını ve kullanma alanlarında test edilmeyi

gerektirecektir. Ancak bu testler ise deformasyon ve dayanım testi ile tasarımın maliyetini yükseltecektir [2].

FEA ile, bir tasarımın ağırlığı minimize edilebilir ve bu da prototip imaline ihtiyacı azaltabilir. FEA ile analiz ileride yapılacak benzer tasarımlar için de deneyimin geliştirilmesini sağlamaktadır [2].

3.3. SONLU ELEMANLAR METODU (FEM)

Sonlu elemanlar metodu titreşim, ısı transferi, akışkan mekaniği ve katıların mekaniği problemlerinin çözümü için uygulanabilen ve bu iş için bilgisayarın kullanıldığı sayısal bir tekniktir. Bu alanların hepsindeki problemlerin çözüm işlemi aynıdır, ancak bu görüş katı mekaniği problemlerinde kullanılan FEM' in uygulama alanını işaret eder. Tüm sonlu elemanlar modellerinde ilgili alan sonlu sayıya bölünür. Bu elementler “nod” adı verilen noktalardan birleştirilir. Katı modellerde her elementin yer değiştirmesi direk olarak nodal yer değiştirmeyle ilişkilendirilir. FEM nodal yer değişimlerini çözmeye çalışır, bunun için de gerilmeler uygulanan kuvvetle eşitlenir. Nodal yer değişimleri yapının hareketindeki her bir sabitlemeyle tutarlı olmalıdır [2].

$$F = K * u \quad (3.1)$$

Burada F kuvvet, K sertlik matrisi, u yer değiştirme vektörü

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

FEM nodal yer değiştirme için eşitliğin koşullarını doğrusal cebirsel bir eşitliğe dönüştürür. Denklemler bir kere çözüldüğünde bütün elementlerdeki aktif gerilim ve gerinimler bulunabilir. Parçayı çok sayıda küçük parçalara bölerek ve ayırarak denklemin çözümü kolaylaştırılmış olur. Sonlu elemanlar metodunun kullanılmasının

önemli bir nedeni, bu metod genelde problemin doğru çözümünün yolunu geliştirir [2].

Bütün sonlu elemanlarla çözüm metotları kullanıcıları bazı basamakları uygulamaya mecbur kılar. Bu basamaklar kısaca aşağıdaki gibi toparlanabilir.

1. Şeklin (Geometrinin) Belirlenmesi: İlk olarak analizi yapılacak yapının geometrisinin belirlenmesi ve oluşturulması gerekir. Geometri üç boyutlu modelleme programlarında çizildikten sonra bu ortama taşınarak yapılabilir.
2. Element Tipinin ve Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi: 2. aşamada malzeme özellikleri belirlenir. İzotropik bir katının elastik analizinde malzemenin Poisson oranı ve Young modülü de önemlidir.
3. Cisme Ağ Örümesi (Mesh Edilmesi): Daha sonraki aşamada nesne küçük parçalara ayrılır. Bu işlem elementlerin tipinin belirlenmesini kolaylaştırır. Ayrıca bir parçaya örülen ağ ne kadar küçük parçalar halinde olursa problemin çözümü gerçeğe o kadar yakın olmaktadır. İşlemin doğruluk oranı gerçeğe o kadar yakın olmaktadır.
4. Sınır Şartlarının Dış Yüklerin Belirlenmesi: Bir sonraki aşama yapının sınır şartları ve uygulanan yüklerin belirlenmesidir.
5. Çözüm Oluşturma: Beşinci basamakta ise daha önceden girilen parametrelere göre çözüm gerçekleştirilir.
6. Sınır şartları ve uygulanan yüklere göre çözüm işlemi gerçekleştirildikten sonra verilere geri dönülür. Bu veriler herhangi bir grafik veya şema çeşidiyle gösterilebilir.
7. Mesh İşleminin Tekrar Düzeltilmesi: Sonlu Elemanlar Metotları tahmin metotlarıdır ve genelde tahminin doğruluğu kullanılan elementlerin sayısı ile artar. Bu yüzden eğer bir sonlu elemanlar çözümünün doğruluğunun gerçeğe daha yakın olmasını sağlamak için cismin element sayısını artırmamız gerekir.
8. Sonuçların Yorumlanması: bu basamak belki de yapılan analizlerin en kritik basamağıdır çünkü modelleyen kişinin model çıktılarını anlayabilmesi ve yorumlayabilmesi için mekanizme hakkında bilgiye sahip olması gerekir. Bu gerçek mühendislik problemlerinin çözümünde doğru sonuçların elde edilmesi ve modellemede yapılan hataların tanımlanabilmesi için önemli bir kriterdir [2].

3.4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMLERİ

Explicit ve Implicit yöntemler, hareket formüllerinin integrasyonunda kullanılan yöntemlerdir.

3.4.1. Explicit Yöntem

Explicit Dynamic Analizleri küçük zaman aralıkları kullanarak karmaşık kontak problemlerinde ve büyük deformasyon dinamiklerinin hızlı çözümlerini hesaplamak için kullanılır [44].

3.4.2. Implicit Yöntem

Implicit metod daha büyük zaman aralıklarında daha az karmaşık sistemlerin çözümünde kullanılır.

3.5. ÇALIŞMADA GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLERİN İŞLEM BASAMAKLARI

Gerçekleştirilen analizler Explicit Dynamic Analysis olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yapısal analiz tipi sadece ANSYS LS-DYNA ile gerçekleştirilebilmektedir. ANSYS LS-DYNA; Ls-Dyna Explicit sonlu elemanlar programına bir arayüzey sağlar.

3.5.1. Modelin Oluşturulması Veya Çağırılması

Model genellikle 2D veya 3D uzayında uygun birimler (m.,mm., inç, vb.) kullanılarak çizilir. Model, ANSYS ön işlemcisi kullanılarak oluşturulabileceği gibi başka bir CAD program paketinde hazırlanmış bir dosyanın (IGES,STEP gibi) ANSYS ön işlemcisi tarafından okunması ile de sağlanabilir. Modelin oluşturulması esnasında dikkat edilmesi gereken konulardan biri çizimde kullanılan birim ile malzeme özellikleri ve uygulanan yük birimlerinin uyumlu olmasıdır.

Ansys tarafından desteklenen bir programda kabuk eleman olarak 3 boyutlu model oluşturulur. IGES formatında kaydedilen resim dosyası Ansys Mechanical/Ls-Dyna modülünde Import seçeneği ile dışarıdaki bir klasörden çağırılır.

3.5.2. Analiz Metodunun Seçilmesi

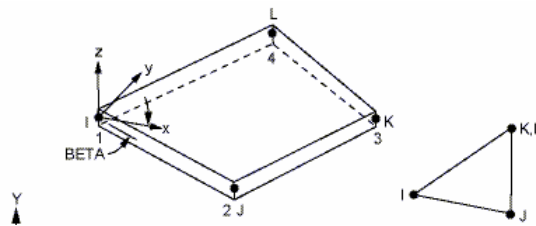
Ansys Ls-Dyna analizler için 3 farklı disiplin (yapısal analiz, termal analiz ve Ansys Akışkan Analizi) kullanılmaktadır. Sistem veya parçaların Ansys'de çözümlenebilmesi için 3 farklı çözüm metodu kullanılmaktadır (h metodu, p yapısal metodu ve Ls-Dyna Explicit metodu). H metodu bütün analiz türleri için kullanılabilirken, p metodu sadece lineer yapısal statik analizlerde kullanılabilir. Çözümlemesi gereken probleme bağlı olarak h metodu p metodundan daha iyi bir mesh (ağ örme) sistemine ihtiyaç duymaktadır [43].

Yapılacak analiz yapısal analiz (structural) ve Ls-Dyna explicit metoduyla gerçekleştirilecektir.

3.5.3. Element Tipinin Belirlenmesi

Element seçimi modelin geometrisine bağlı olarak 1D, 2D veya 3D olabileceği gibi yapılması düşünülen analizin tipine de bağlıdır [42]. Gerçekleştirilen analiz için Thin Shell 163 seçilmiştir.

Shell 163 bükme işlemi ve membran teorisiyle kullanılan 4 düğüm noktasına sahip bir elementtir. Düzlemsel ve dik yüklemelerin her ikisi de uygulanabilmektedir. Bu elementin her bir düğüm noktasında serbestlik derecesi 12'dir. Bu element tipi sadece Explicit dinamik analizlerde kullanılabilir.



Şekil 3.1. Shell 163 malzeme (düğüm noktası) node tanımlaması [44]

3.5.4. Çözüm Formülasyonunun Seçilmesi

Seçilen element tipine göre element çözüm formülasyonu tesbit edilebilmektedir. Programda 12 farklı element formülasyonu bulunmaktadır. Bunlar:

1. Hughes-Liu
2. Belytschko-Tsay (default)
3. BCIZ triangular shell
4. Co triangular shell
5. Belytschko-Tsay membrane
6. S/R Hughes-Liu
7. S/R corotational Hughes-Liu
8. Belytschko-Levithan shell
9. Fully integrated Belytschko-Tsay membrane
10. Belytschko-Wong-Chiang
11. Fast (corotational) Hughes-Liu
12. Fully integrated Belytschko-Tsay shell

Çalışma için S/R corotational seçilmiştir. Bu formülasyon seçilebilir indirgenmiş integrasyon kullanır. Ayrıca dönen sistemlerin de analizi bu formülasyonla gerçekleştirilebilmektedir.

3.5.5. Real Constant Tanımlanması

Ansys kullanılan yüzey yüzeye kontak elemanlarının kontak davranışlarının kontrolü için real constantları ve KEYOPT kullanır [45]. Bu menüde belirlenmesi gereken malzeme kriterleri:

SHRF= Malzemenin kesme faktörüdür.

NIP (number of Integration Points): element kalınlığının tamamında birleştirme noktalarının sayısıdır. Maksimum 100 olabilir. Eğer NIP değeri 0 girilirse Ansys bu değeri otomatik olarak 2 alır.

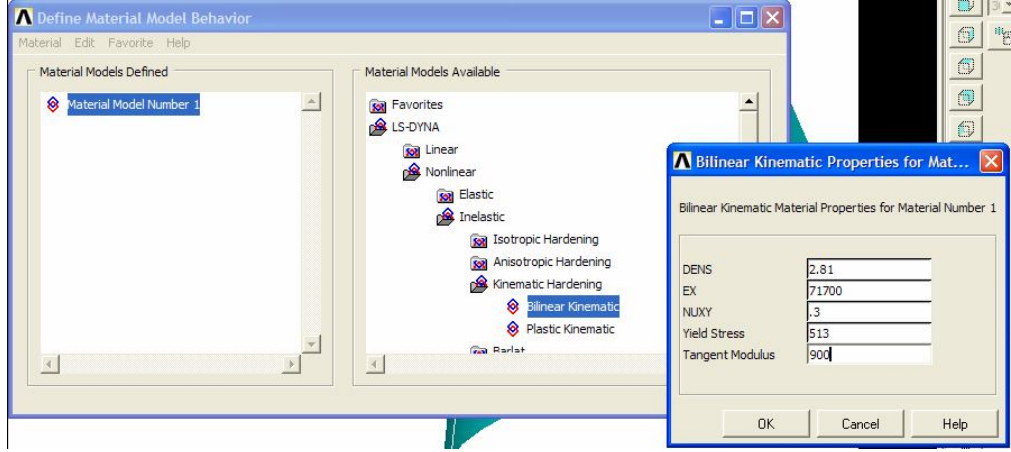
Thickness: T1-T4 arasındaki değerler sacın 4 farklı noktasındaki kalınlık

değerleridir. Eğer malzemenin kalınlığı bölgesel olarak değişiyorsa bu kalınlık değerlerinin tek tek belirtilmesi gerekir. Ancak sacın tamamı aynı kalınlıkta ise sadece T1 değeri girilir.

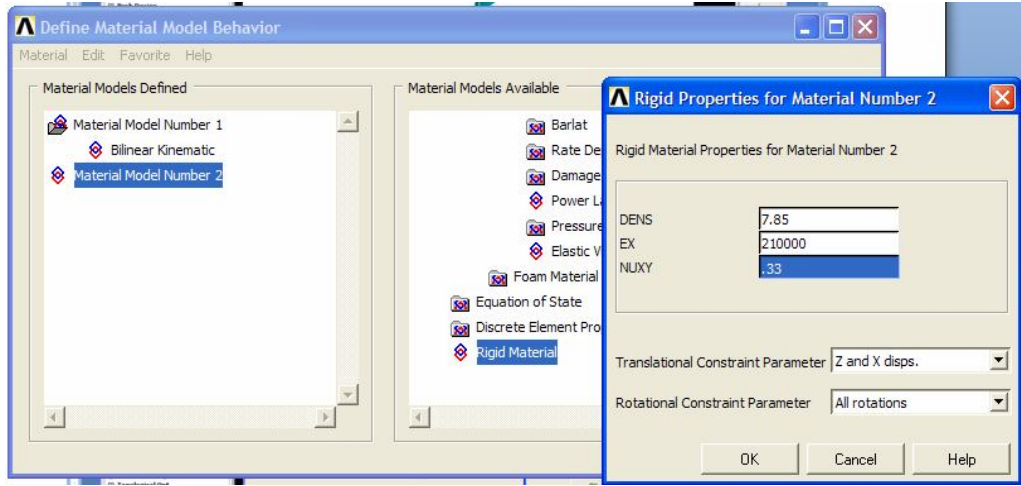
3.5.6. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması (Material Properties)

Shell 163 element tipi için aşağıdaki malzemeler seçilebilmektedir:

1. Isotropic Elastic
2. Orthotropic Elastic
3. Bilinear Kinematic
4. Plastic Kinematic
5. Blatz-Ko Rubber
6. Bilinear Isotropic
7. Temperature Dependent Bilinear Isotropic
8. Power Law Plasticity
9. Strain Rate Dependent Plasticity
10. Composite Damage
11. Piecewise Linear Plasticity
12. Modified Piecewise Linear Plasticity
13. Mooney-Rivlin Rubber
14. Barlat Anisotropic Plasticity
15. 3-Parameter Barlat Plasticity
16. Transversely Anisotropic Elastic Plastic
17. Rate Sensitive Power Law Plasticity
18. Transversely Anisotropic FLD
19. Elastic Viscoplastic Thermal
20. Johnson-Cook Plasticity
21. Bamman



Şekil 3.2. Sac malzeme mekanik özelliklerinin tanımlanması



Şekil 3.3. Diğer malzemelerin mekanik özelliklerinin tanımlanması

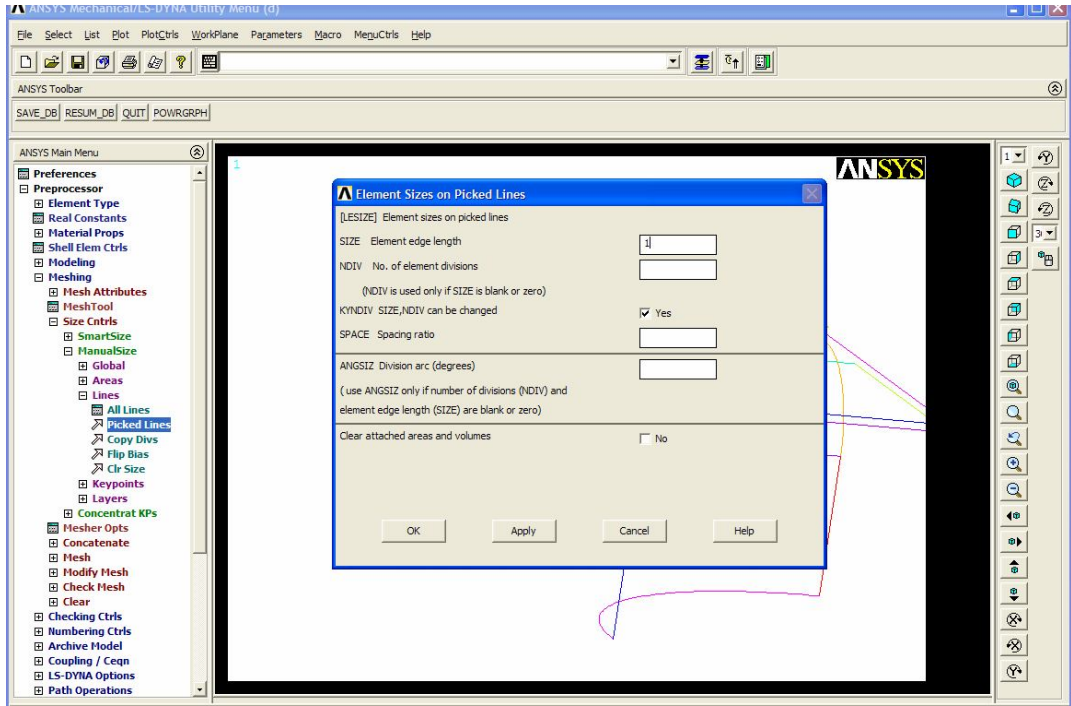
3.5.7. Mesh (Ağ Örne)

Tanımlanan malzeme mekanik özellikleri ve kalınlık değerlerinin (real constants) parçalara atanması gerekmektedir.

3.5.8. Modelin Elemanlara Bölünmesi

Model sürekliliğinin belirli sayıdaki ayrı parçalara veya diğer bir ifade ile sonlu elemanlara bölünmesidir. Daha çok sayıda eleman genel olarak daha iyi sonuçlar fakat daha uzun analiz zamanı demektir. Modelin elemanlara bölünmesi kullanıcı tarafından tek tek tanımlanarak yapılabileceği gibi ANSYS tarafından uygun

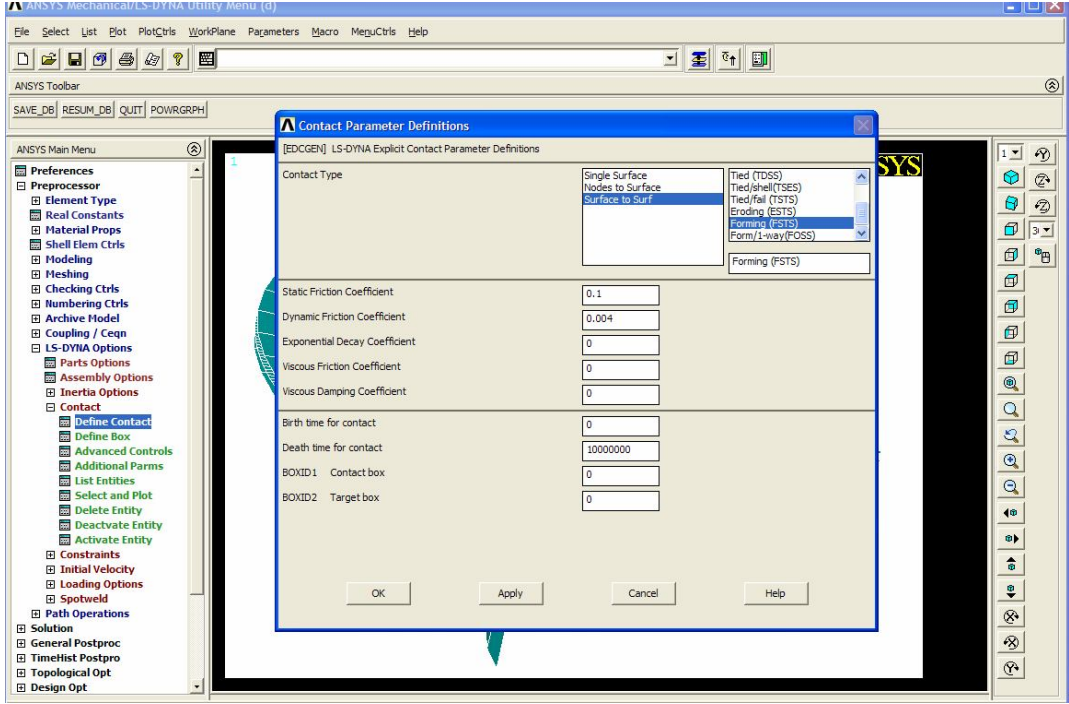
seçenekler kullanılarak otomatik olarak da yapılabilir. Kullanıcı tarafından tek tek tanımlayarak elamanlara bölme işlemi uzun ve zor bir işlemken otomatik olarak elamanlara bölme işleminde gerekli tek şey model kenarları boyunca eleman yoğunluğunun veya eleman büyüklüğünün belirlenmesidir. Ayrıca kullanılan elemanın tipine bağlı olarak eleman özelliklerinin de (gerçek sabitler) tanımlanması gerekir.



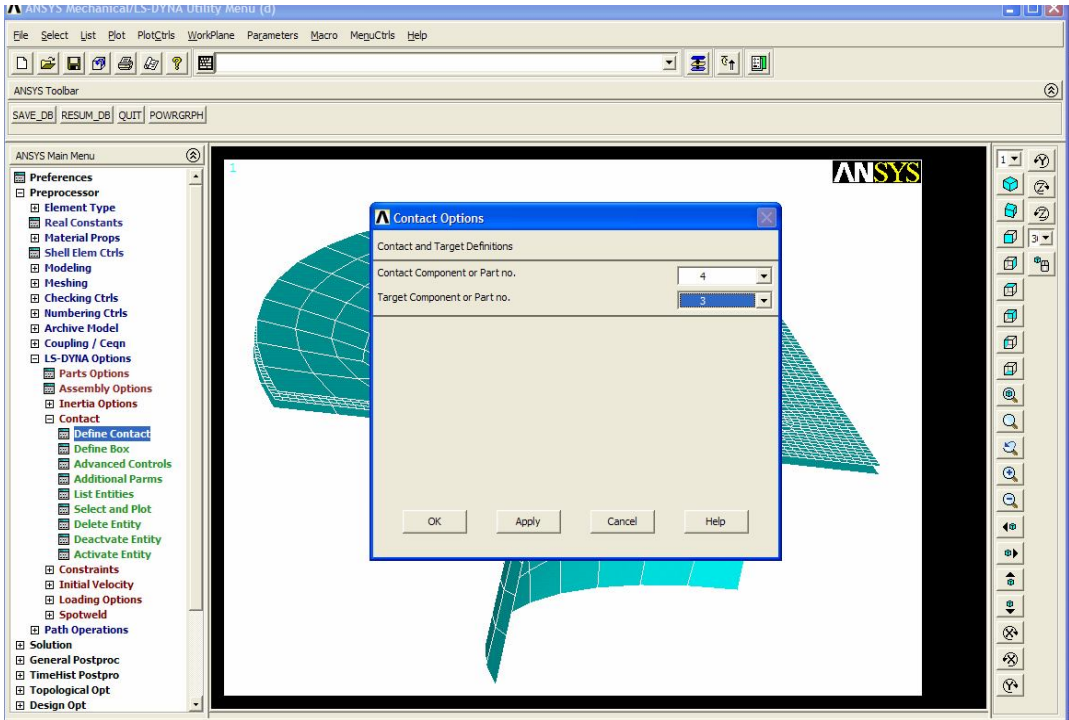
Şekil 3.4. Sac malzemenin elemanlara bölünmesi

3.5.9. Kontak Türünün Belirlenmesi

Kontak çeşidi olarak yüzey yüzeye kontak seçilir ve yapılan işlemin yüzey yüzeye kontaklı bir şekillendirme işlemi olduğu tanımlanır. Malzemenin statik sürtünme katsayısı ve dinamik sürtünme katsayısı tanımlanır. Ardından önce pot baskı plakası-sac, sac-destek elemanı, sac-kalıp arasındaki kontaklar tanımlanır. Ardından autogen yapılarak sistemin atladığı noktaların da otomatik kontak yapması sağlanır.



Şekil 3.5. Kontak türlerinin tanımlanması



Şekil 3.6. Kontakların tanımlanması

3.5.10. Sınır Şartlarının (Constraints) Tanımlanması

Eğer modele bir yük uygulanırsa, model bilgisayarın sanal dünyasında sonsuza kadar ivmelenir. Bu ivmelenme bir sınırlılık veya bir sınır şartı uygulanana kadar devam eder. Yapısal sınır şartları genellikle sıfır yer değiştirme, termal sınır şartları belirlenmiş bir sıcaklık, akışkan sınır şartları için bir basınç olarak tanımlanır. Bir sınır şartı bütün yönlerde (x,y,z) uygulanabileceği gibi yalnızca belirli bir yönde de tanımlanabilir. Sınır şartları anahtar noktalarda, düğüm noktalarında, çizgi veya alanlarda tanımlanabilir. Sınır şartı, simetri veya axisimetri tipinde de olabilir.

3.5.11. Yük, Basınç Ve Hareket Parametrelerinin Tanımlanması

Deformasyon işlemi için hareket mesafesi ve yük miktarları tanımlanır. Bunun için basınç (işlemin başından sonuna kadar uygulanacak sac basıncı MPA cinsinden, 2 basamakta tanımlanır), baskı (işlemin başından sonuna kadar uygulanacak pot baskı kuvveti Newton cinsinde, n 2 basamakta tanımlanır), baskı-zaman (uygulanacak pot baskı kuvveti başlangıç ve bitişte aynı değerde olduğu için başlangıç ve bitiş zamanına pot baskı kuvveti dağılımı 2 basamakta tanımlanır) , alttabla (destek plakasının kalıp derinliğince katedeceği derinlik mesafesidir), zaman (alttablanın katedeceği mesafenin kaç saniyede gideceği tanımlanır.)

3.5.12. Yüklemelerin Sisteme Atanması

Yüklemeler gerilme analizlerinde noktasal bir basınç veya yer değiştirme, termal analizlerde sıcaklık, akışkan analizlerinde hız formunda olabilir. Yükler bir noktaya, bir kenara, bir yüzeye ve hatta toplam cisme uygulanabilir. Yükler model geometrisi ve malzeme özelliklerinde kullanılan birim cinsinden tanımlanmalıdır.

3.5.13. Çözüm Parametreleri

Solution time seçeneğinden şekillendirme için toplam zaman tayin edilir. Sonuçların ansys ve Lsdyna çıktısı olarak görebilme imkanımız bulunmaktadır.

3.5.14. Çözüm

Bu kısım tamamiyle otomatiktir. Genel olarak bir sonlu elemanlar çözücüsü üçe ayrılır. Bunlar ön-çözücü, matematik motoru ve son-çözücüdür. Ön-çözücü modeli okur ve modeli matematiksel şekilde formülize eder. Preprocessing kademesinde tanımlanan bütün parametreler ön-çözücü tarafından kontrol edilir ve herhangi bir şeyin eksik bırakıldığını bulursa matematik motorunun devreye girmesini engeller. Model doğruysa, çözücü devreye girerek eleman dirençlik matrisini oluşturur ve yer değiştirme, basınç gibi sonuçları üreten matematik motorunu çalıştırır. Matematik motoru tarafından üretilen sonuçlar son-çözücü kullanılarak düğüm noktaları için deformasyon miktarı, gerilme, hız gibi değerler üretilir [43].

BÖLÜM 4

DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

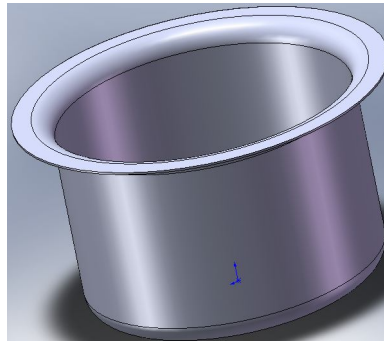
Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kalıp baskı ünitesi ve dış gövde TUBİTAK Lisans öğrencileri tez destek ve araştırma projesi kapsamında hazırlanmıştır. Kalıp alt yarımı ve kalıp üst yarımı gerçekleştirilen bu proje kapsamında üretilmiştir.

Bu gövdeye göre tasarlanan 2 farklı geometride iç kalıp kullanılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir.

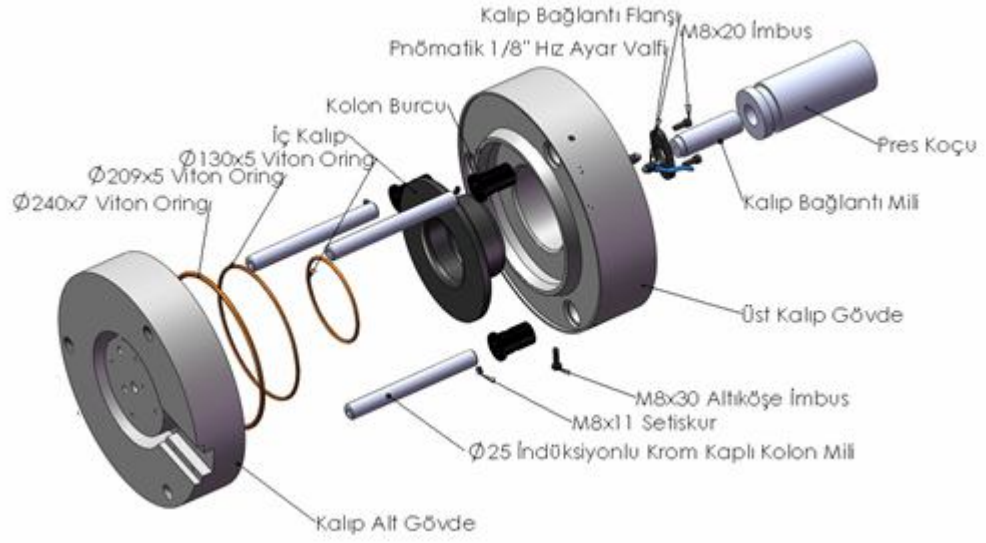
4.1. KALIP SİSTEMİ TASARIMI

Hidrolik şekillendirme kalıbı ile silindirik kap (Şekil 4.1) üretilecektir. Tasarlanan hidro şekillendirme sisteminde işlem zımba kullanılmadan doğrudan sac parça üzerine basınçlı sıvı gönderilerek üretim gerçekleştirilecektir. Bu şekilde sistem basitleştirilerek üretilebilirliğinin artması ve maliyetin düşmesi hedeflenmiştir.

Kurulması planlanan sistemin SolidWORKS programında 3 boyutlu olarak tasarımı yapılmış, Autocad programında 2 boyutlu görünüşleri çıkarılmış ve sistem için gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

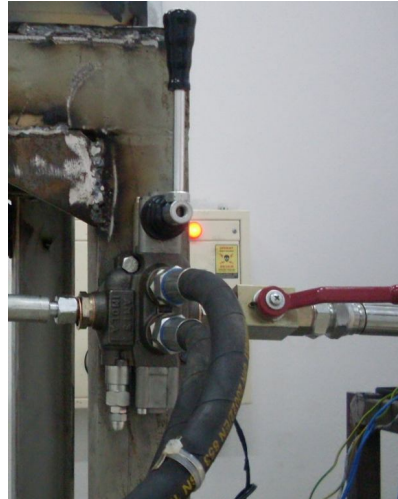


Şekil 4.1. Üretilmek istenen parça modeli



Şekil 4.2. Kalıp tasarımı montaj resmi

Hidro şekillendirme kalıp sistemi tasarlanan bir çelik konstrüksiyon konsol gövde üzerine oturtulmuştur. Konsola iş makinelerinden temin edilen 150mm çapında ve 400mm kurs boyundaki hidrolik silindir monte edilmiştir. Kalıp üst yarımının aşağı-yukarı hareketi bu silindir ile sağlanmaktadır. Ayrıca hidrolik silindirin hareketi için ise konsol gövdesine kumanda kolu monte edilmiştir. Böylece hidrolik silindirin hareketi kontrol edilebilmektedir. Silindire güç 250bar basınç ve 3 l/dk debiye sahip pompadan iletilmektedir.



Şekil 4.3. Kumanda kolu montajı

Sistemde şekillendirme işlemini gerçekleştirmek üzere Hidroteks DTA 10 yağ kullanılmıştır. Yağın kalıp içine gönderilmesi 1600bar çalışma basıncına ve 0.5 l/dk debiye sahip hidrolik güç ünitesi ile sağlanmaktadır.

Şekillendirme işleminin gerçekleştirildiği hidro şekillendirme ünitesinin fotoğraf görüntüsü Şekil 4.8.' de yer almaktadır.

4.2. KALIP SİSTEMİ ELEMANLARI

4.2.1. Kalıp Üst Yarımının Tasarımı

Çekirdek kalıbın (iç kalıp) bağlandığı kısımdır. Demonte olan çekirdek kalıbın rahat sökölüp takılabilmesi için yuvaya içerden dışarı doğru 3 ° açısı verilmiştir. Şekillendirme sırasında yüksek iç basınç oluşacağından o-ringlerin patlaması veya herhangi bir sızıntı durumunda sıcak yağın çevreye saçılmasını önlemek için alt tarafa 5 mm fatura bulunmaktadır. Böylece kalıptan taşan yağ kalıbın altına taşırılmaktadır. Alt ve üst kalıbı eş eksenli olarak merkezleyebilmek için çevrede 3 adet; eşit açı ile dağıtılmış; 25 mm çapında indüksiyonla sertleştirilmiş, krom kaplı kolon mili kullanılmıştır. Kolon millerini yataklamak için 50 Rc (Rockwell) sertliğinde 3 adet şapkalı burç yapılmıştır.



Şekil 4.4. Kalıp üst yarımı

Üst kalıp yarımı Ç_1040 orta karbonlu imalat çeliğinden yapılmıştır. Kalıp yarımı dairesel olduğu için imalatı CNC tornada yapılmıştır.

4.2.2. Dişi Kalıp Tasarımı

Dişi kalıp değişik şekillerde parçalar imal edilebilmesi için demonte olarak tasarlanmıştır. Üst kalıp yarımına rahat girip çıkması için dişi kalıp yuvasına ve kalıbın dış çeperlerine 3° açı verilmiştir. Isıl işleme sertleştirmeye tabi tutulmuştur.

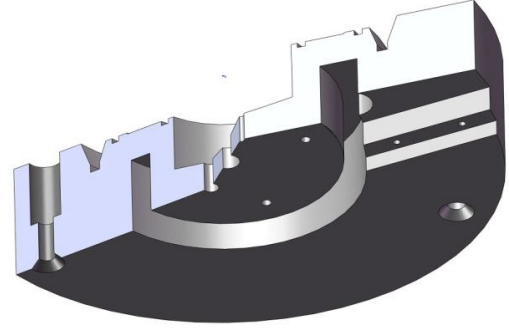
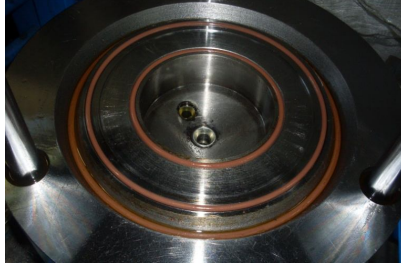


şekil 4.5. Dişi kalıp geometrisi

Kalıp çekirdeği Ç_1040 orta karbonlu imalat çeliğinden yapılmıştır. Kalıp çekirdeği dairesel olduğu için imalatı CNC tornada yapılmıştır. Alüminyum sac malzemenin kalıp yüzeyinden rahat kayması ve kalıba sıvanmasını önlemek için 55 Rc (Rockwell) değerinde sertleştirilmiştir.

4.2.3. Kalıp Alt Yarımı Tasarımı

Kalıp alt yarımındaki yağ giriş kanalı, giriş hortumunun ucundaki rekorun pasosuna göre tasarlanmıştır. Yağın tahliye deliği, yağın tamamının tahliye edilebilmesi için iç haznenin tabanına dıştan merkeze doğru 10° eğim verilerek merkezden delinmiştir. şekillendirme işleminin bittikten sonra yağın tahliyesi yüksek basınçla dayanıklı vananın açılması ile yapılmaktadır.

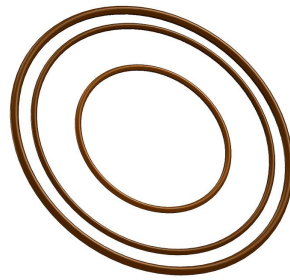


Şekil 4.6 Kalıp alt yarımı

Kalıbın alt yarımı da Ç_1040 orta karbonlu imalat çeliğinden yapılmıştır. Şekil 4.6.'da da görüldüğü gibi basınç göstergesi ve yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı çelik örgülü borular ve vana kalıp alt yarımına montajı yapılmıştır.

4.2.4. O-Ringler

Alt kalıbın üst kısmında 3 adet viton o-ring kullanılmıştır. En küçüğü 130 mm çapında 5 mm et kalınlığındadır. Bu o-ring sac malzemeye temas etmektedir. O-ring yağın şekillendirilecek sacın arkasına geçmesini önler ve iç basıncı sabit tutar. Ortadaki o-ring ise 208 mm çapında 5 mm et kalınlığındadır. Bu o-ring birinci emniyet o-ringidir. Herhangi bir durumda iç o-ringin patlaması durumunda basınçlı yağın dışarıya sızmasını önlemek için tasarlanmıştır. En dıştaki o-ring 230 mm çapında 7 mm et kalınlığında 2 inci emniyet o-ringidir.



Şekil 4.7. O-ring



Şekil 4.8 Kalıp tasarımı

Şekillendirme kalıbının tamamı tasarımı gerçekleştirilen bir çelik konstrüksiyon gövde üzerine oturtulmuştur. Çelik konstrüksiyon gövdeye iş makinelerinden çıkma olarak temin edilen 200mm çap ve 400mm kurs boyuna sahip bir hidrolik silindir monte edilmiştir. Takılan silindirin ileri geri hareketini kontrol etmek için bir kumanda kolu kullanılmıştır.

4.2.5. Konsol Tasarımı

Hidro şekillendirme kalıp sistemini ve bağlantı elemanlarını tek bir birim üzerinde toplamak ve kalıbı çalışır vaziyete getirmek için çelik konstrüksiyondan bir konsol tasarlanmıştır. Bütün sistem bu konsol üzerine oturtulmuştur. Konsolun tamamı U profili TS 912-C200-Fe37-2profiller ile oluşturulmuştur. Toplamda altı metre boyunda 2 adet profil kullanılmıştır. Profiller kaynakla birleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Konsol

4.2.6. Hidrolik Silindir Bağlantısı

Büyük tonajlı iş makinelerinden çıkma olarak temin edilen hidrolik silindir kaynak vasıtasıyla konsol ile birleştirilmiştir. Kalıp ile silindir arasındaki bağlantıyı sağlamak için ise $\text{Ø}80 \times 200\text{mm}$ boyutlarında çevrede 4 adet sıkma vidası bulunan ara eleman yapılmıştır. Ara parça piston koluna vidalı olarak geçmektedir. Alt yüzeye yerleştirilen kalıp çevredeki 4 adet vida ile sıkıştırılmaktadır.



Şekil 4.10. Hidrolik silindir ve bağlantısı

Hidrolik silindirin hareketi kumanda kolu ile kontrol edilmektedir.

4.2.7. Hortum Ve Rekorlar

Sistemde kullanmış olduğumuz hortumlar; yüksek sıcaklık ve yüksek basınca dayanıklı çelik örgü telle desteklenmiş hidrolik hortumlarıdır. Yağın giriş hortumu 600 bar basınca dayanıklı 1/2" tir. Yağın tahliye hortumu 400 bar basınca dayanıklı 3/4" tir. Aynı zamanda kullanmış olduğumuz bağlantı elemanları, rekorlar ve vana yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklıdır.



Şekil 4.11. Vana ve basınçlı sıvı girişi bağlantıları

4.2.8. Pompa

Çalışmada kullanılan yüksek basınçlı hidrolik pompanın ve silindirin hareketini sağlayan hidrolik pompanın teknik özellikleri Çizelge 4.1.' de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Pompaların teknik özellikleri[35]

Model Tanımı	WW-RKP1200	
Çalışma Basıncı	1600 Bar	250 Bar
Gösterge	1600 Bar Gliserinli Manometre	250 Bar Gliserinli Manometre
Basınç Ayarı	0-1200 bar arası serbest ayarlanabilir	0-214 bar arası serbest ayarlanabilir
Valf Tipi	Tek etkili	Çift etkili
Pompalama Hızı	0,5 Litre/dakika	3 Litre/dakika
Yağ Tankı	12 Litre standart. İsteğe göre daha büyük tank	7 Litre standart. İsteğe göre daha büyük tank
Elektrik Motoru	380 Volt 2850 d/d 1,5 KW ya da 220 Volt 2.2 KW	380 Volt 2850 d/d 1,5 KW ya da 220 Volt 2.2 KW
Kumanda Tipi	Kablolu uzaktan kumandalı	Kablolu uzaktan kumandalı
Markası	Werner Weitner	Werner Weitner
Kalite Standartı	TUV, CE, ISO 9001-2000	TUV, CE, ISO 9001-2000



(a)



(b)

Şekil 4.12. Pompalar (a) 1600 bar kapasiteli pompa, (b) 250 bar kapasiteli pompa

4.2.9. Kullanılan Yağın Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri

Yaptığımız deneyde Hidroteks DTA 10 kalite yağ kullanılmıştır. Ağır yüklerde çalışmayan sistemler için geliştirilmiş, aşınma ve korozyon önleyici katıklar ile çok iyi rafine edilmiş baz yağların karışımıyla harmanlanmış ekonomik hidrolik yağdır. Ayrıca, ihtiva ettiği antioksidan katıkları sayesinde, ömrü daha da uzar, sistemde mekanik bir sorun olmadığı sürece köpürmez.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

5.1. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Gererek şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan düşük karbonlu çeliklerde P, S, N, Sb, As, Cr, Si gibi elementler derin çekme kabiliyetini azaltıcı etkilerden dolayı istenmezler. Karbonun %0.8, manganezin %0.35, silisyumun %0.01' den az olması arzu edilir [3].

Yapılan deneysel çalışmalarda soğuk haddelemeye uygun 2mm kalınlığındaki Erdemir kalite St22 sac malzeme kullanılmıştır. Sac malzemenin 10mm*10mm*1mm boyutlarında numune kesilerek Kardemir Demir Çelik fabrikasında spektral analize tabi tutulmuştur. Spektral analiz sonuçları EK 1.' de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre sac malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan sac malzemenin kimyasal bileşimi

%	C (Max.)	Mn (Max.)	P (Max.)	S (Max.)	N (Max.)	Al (Min.)	Diğer
Standart	0.10	0.45	0.035	0.035	0.007	-	
Erdemir	0.07	0.40	0.020	0.020	0.012	0.020	

Sac malzemenin diğer standart ve kalite numaralarının karşılıkları Çizelge 5.2.' de verilmiştir.

Çizelge 5.2. St22 sac malzemenin diğer standart ve kalitelerdeki karşılığı

ERDEMİR KALİTE NO	DIN STANDARDI	DIN KALİTE	AISI/SAE	ASTM	Almanya	Türkiye
6422	DIN1614-1	ST22	A621	A621	STW22	1,0332
ERDEMİR KALİTE AÇIKLAMASI	Soğuk haddelemeye uygun yumuşak çelik					

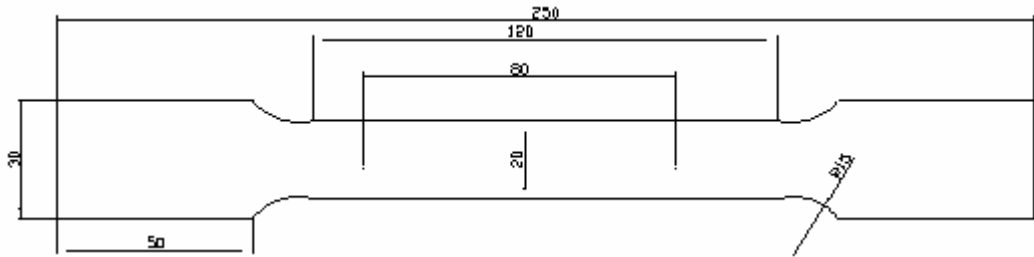
5.2. MEKANİK TESTLER

5.2.1. Tek Eksenli Çekme Test Numunelerinin Hazırlanması ve Çekme Testi

Sac malzemenin mekanik özellikleri şekillenebilirliği etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu bakımdan sac malzemeye tek eksenli çekme testi uygulanmıştır.

Deneylerde ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak St22 sac malzemenin tek eksenli çekme testi TS EN ISO 6892-1 standardına [47] uygun olarak ÇAĞÇELİK Demir Çelik Fabrikasında yapılmıştır.

Çekme test numunesi boyutları Şekil 5.1.' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Çekme testi numune boyutları

Haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90° açılarda her bir yön için 3'er adet olmak üzere toplam 9 adet çekme test numunesi hazırlanmıştır. Çekme testi Alşa marka, 40 Ton kapasiteli çekme cihazında yapılmıştır. Çekme işlemleri 2 mm/dak. çekme hızıyla yapılmıştır.

5.2.2. Anizotropi

Yassı metalik malzemeler için tanımlanan dikey anizotropi katsayısı (R) veya ortalama dikey anizotropi katsayısı (\bar{R}) 1'den büyük olması istenir. Başka bir ifadeyle metalik sacın kalınlık yönündeki plastic şekil değiştirme direncinin, sac düzlemi içindeki plastic şekil değiştirme direncinden fazla olması istenmektedir. Böylece malzemenin kalınlığında fazla incelme olmadan, plastic şekil değiştirme büyük oranda metalik sac düzleminde oluşacak ve biçimlendirme başarıyla sonuçlanacaktır [3].

Bu tip anizotropi genellikle aşağıdaki formülle hesaplanan gerinim oranı R ile belirlenir.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{w_f l_f}{w_0 l_0}\right)}$$

(5.1)

Burada;

w_0 = ilk genişlik

w_f = son genişlik

l_0 = ilk boy

l_f = son boy

genellikle çekme gerinim oranı (\bar{R}) değeri sac metalden en az üç yönde alınan numune değerlerinden aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\bar{R} = \frac{1}{4(R_0 + R_{90} + 2R_{45})} \quad (5.2)$$

Sac malzemelerin çoğunda hadde yönüne açılı olarak alınan numunelerin R değerleri farklı çıkar bunun için ortalama değer belirlenmesi gerekmektedir.

Şekillendirilmesi gereken kalıp geometrisine göre ilkel pul çapı hesaplanan sac malzemeler, lazer ile kesilmiştir.

5.3. İLKEL PUL ÇAPI HESABI VE NUMUNE HAZIRLAMA

Sac malzeme ilkel pul çapı;

$$D = \sqrt{(D_f^2 + 4dh - 3,44rd)} \quad (5.3)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Formülasyona göre;

D : ilkel pul çapı,

D_f : Flanş çapı,

D : Kalıp iç çapı,

h : Kalıp derinliği,

r : Kalıp köşe radüsüdür.

Buna göre sac malzeme lazer kesim metodu ile Ø195mm boyutunda Lazer kesim metoduyla sac malzemeler kesilmiştir. Toplamda 7 adet 125*100*1 mm boyutlarında çelik sac kesilerek deney numuneleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.2. Deney numuneleri

Lazer kesim metoduyla kesilen sac malzemelerin üzerine serigrafi yöntemiyle 2mm çapında dairesel gridler işaretlenmiştir. Dairesel gridlerin hidrolik yağın etkisiyle silinmemesi için baskı işleminden sonra sac malzemeler 150°C sıcaklıkta fırınlama işlemine tabi tutulmuştur.

5.4. ŞEKİLLENDİRME İÇİN GEREKLİ MİNİMUM BASMA KUVVETİ HESABI

Pot basıncı uygulayacak silindir çevresi=49cm , silindirin 0.5cm et kalınlığı olduğuna göre yarıçap;

$$2\pi r=49\text{cm} \quad r=7.64\text{cm}$$

Buna göre piston alanı: $A = \pi r^2$ formülünden $A=183,374\text{cm}^2$

$$P_{\text{akışkan}} * A_{\text{kalıp}} = P_{\text{piston}} * A_{\text{piston}}$$

$$\text{Buradan } P_{\text{piston}} = (P_{\text{akışkan}} * A_{\text{kalıp}}) / A_{\text{piston}}$$

Akışkanın etki ettiği çap maksimum 102mm olduğuna göre

150 bar (15MPa) şekillendirme sıvısı basıncına göre piston basıncı:

$$(150 * (\pi * 5.1^2)) / 183,374 = P_{\text{piston}}$$

$$P_{\text{piston}} = 66.8 \text{ bar} = 67 \text{ kg/cm}^2 = 6.7 \text{ MPa}$$

200 bar (20MPa) şekillendirme sıvısı basıncına göre piston basıncı:

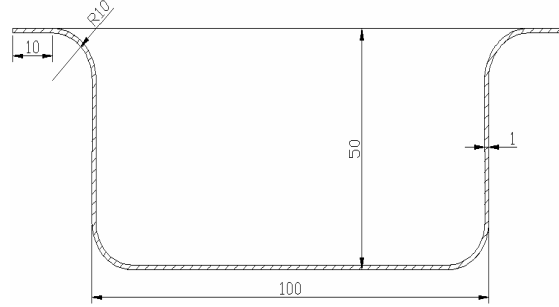
$$(200 * (\pi * 5.1^2)) / 183,374 = P_{\text{piston}}$$

$$P_{\text{piston}} = 89 \text{ bar} = 89 \text{ kg/cm}^2 = 8.9 \text{ MPa}$$

5.5. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ

250 bar basınç kapasiteli güç ünitesi vasıtasıyla hidrolik silindire yağ basılmaktadır. Hidrolik silindirin aşağı hareketini sağlayan yağ giriş üst bağlantı girişinde vana bulunmaktadır. Vananın açılmasıyla akışkan piston içine dolmakta ve kalıp üst yarımını aşağıda yer alan kalıp üst yarımına doğru itmektedir. Kalıp alt yarımı üzerinde yer alan sac malzeme üst kalıp yarımının kapanması ile iki kalıp yarımı arasında sıkıştırılmış olur. Sıkıştırma işleminden sonra silindir girişindeki vana kapatılarak silindirin geriye kaçırması engellenmiş olur. 1600 bar basınçlı hidrolik güç ünitesinin basınç uygulamasıyla sac malzeme üzerine basınçlı akışkan gönderilir. Sac malzeme yağın baskı kuvvetiyle yukarı doğru itilerek üst kalıp yarımının içinde yer alan iç kalıba doğru itilir, ve sıvanarak kalıp geometrisini alması sağlanır. Şekillendirme işlemi sonrasında kalıbın alt kısmında yer alan vana açılarak kalıp

içinde yer alan yağ pompa tankına tahliye edilir. Üst kalıp yarımı yukarı kaldırılarak numune kalıp içinden alınır. Böylece şekillendirme işlemi tamamlanmış olmaktadır.



Şekil 5.3. Çekilecek kap boyutları

Şekillendirme işleminin uygulamaları ön deneyleri tasarlanan ve kurulumu sağlanan hidrolik ünite de gerçekleştirilmiştir. Ancak hidrolik sistemin ve pistonun kapama gücü malzemenin şekillendirilmesinde yetersiz kalmış, şekillendirme işlemi gerçekleştirilememiştir. Bunun üzerine kalıp sistemi üniversitemiz atölyesinde mevcut bulunan Hidroliksan marka 160 Ton basınç kapasiteli hidrolik prese bağlanmış ve deneysel uygulamaların tamamı bu pres sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Asıl şekillendirme deneylerinin yapıldığı hidrolik pres

Hidro şekillendirme işleminde sabit bir pot baskı kuvveti uygulayıp şekillendirme basıncının değiştirilmesi planlanmıştır. Bunun için ön deneylerde farklı pot baskı kuvvetleri uygulanmıştır. Farklı kuvvetlerle gerçekleştirilen şekillendirme işlemlerinin sonuçları değerlendirilmiş, en uygun değer deneylerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Buna göre şekillendirme işleminde kullanılacak olan sabit pot baskı kuvveti 48000N (128 Ton) olarak seçilmiştir.

St22 malzemenin şekillendirme parametreleri Çizelge 5.3.'de verilmiştir.

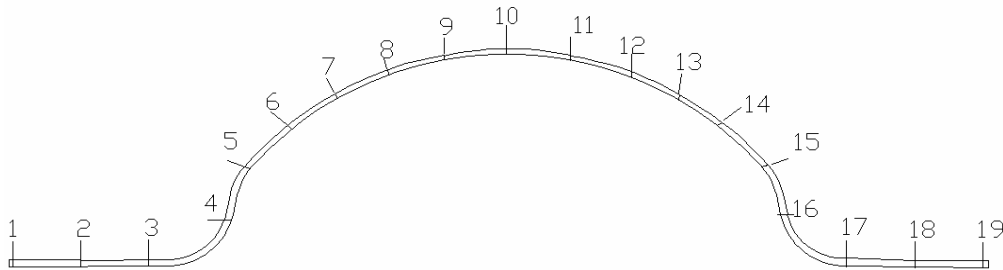
Çizelge 5.3. Şekillendirme deney parametreleri

Parametre	1.Grup	2.Grup	3.Grup	4.Grup
Pot Baskı Basıncı	128 Ton (48000N)	128 Ton (48000N)	128 Ton (48000N)	128 Ton (48000N)
Akışkan Basıncı	11 MPa	14 MPa	17 MPa	18 MPa

Her bir akışkan basıncı parametresi için üçer numune şekillendirilmiştir. Deneysel uygulamaların sonuçlarında elde edilen numunelerin ölçümlerde parametreye göre şekillendirme sonuçlarının ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

5.5.1. Şekillendirme İşlemi Sonrası Kalınlık Dağılımı Ölçümü

Oda sıcaklığında 1mm kalınlığındaki St22 sac malzeme kullanılarak gerçekleştirilen hidro şekillendirme deneylerinin sonucunda elde edilen numunelerin kalınlık dağılımı yaklaşık 1cm mesafelerle mikrometre ile ölçülmüştür.



Şekil 5.5. Şişme yüksekliği ölçüm noktaları

Ölçüm sonucu elde edilen numuneler üzerinden alınan ve sonlu elemanlar analizleri

ile elde edilen kalınlık dağılımı değerleri grafiklerle değerlendirilmiştir.

5.5.2. Şişme Yüksekliği Ölçümü

Şişirme işlemi uygulandıktan sonra numunelerin şişme yükseklikleri dijital mihengir ile ölçülmüştür. Elde edilen değerler grafik haline getirilerek değerlendirilmiştir.

5.5.3. Şekillendirme Sınır Diyagramı (FLD) Oluşturulması

Malzemenin üzerine baskı metoduyla 2mm çapında dairesel gridler çizilmiştir. Şekillendirme işlemi sonrasında sac malzeme üzerindeki gridlerin d_1 ve d_2 eksenlerindeki boyutsal değişimi ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçlarına göre Denklem (2.1) ve (2.2)' den yola çıkılarak e_1 ve e_2 hesaplanmış, bu değerler şekillendirme sınır diyagramı eksenleri üzerine yerleştirilerek eğri oluşturulmuştur.

5.6. ANSYS/LS-DYNA SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

Hidrolik akışkanla şekillendirme işleminin sonlu elemanlar analizleri Ansys Ls-Dyna paket programında Explicit metod kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kalıp sisteminin elemanlarının üç boyutlu modeli kabuk eleman olarak SolidWorks paket programında oluşturulmuş, IGES formatında kaydedilerek analiz yapmak üzere Ansys programına aktarılmıştır. İki farklı element tipi belirlenmiştir. Sac malzemenin element tipi Thin Shell 163 olarak ve diğer elemanlar (kalıp, baskı plakası ve destek plakası) Rijit eleman olarak belirlenmiştir. Bunun nedeni yapılacak çalışma kapsamında sadece sac malzeme üzerindeki gerilme ve zorlanmaların incelenmek istenmesidir.

Çalışma için S/R coorotational seçilmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 5.4.'de belirtilen değerlerde tanımlanmıştır.

Çizelge 5.4. Analizler için programa tanımlanan malzeme parametreleri

St22 Sac Malzeme Parametreleri	Kalıp ve Diğer Elemanların Parametreleri
Yoğunluk (DENS)=7.86 Elastisite Modülü (EX)=210000 Poisson Oranı (NUXY)=0.3 Akma Dayanımı (Yield Modulus)=215MPa Tanjant Modülü (Tangent Modulus)=461MPa	Yoğunluk (DENS)=7.85 Elastisite Modülü (EX)=210000 Poisson Oranı (NUXY)=0.3

Sac malzeme ve diğer elemanlara uygulanan deney parametreleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir. Bu değerler Ansys sonlu elemanlar programına da tanımlanmış ve sistem analizi çözümlenmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

6.1. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI

Bölüm 5’ de belirtilen standart ve parametrelere göre çekme testine tabi tutulan St22 sac malzemenin Çizelge 6.1.’ de mekanik özellikleri verilmiştir. Hadde yönüne farklı açılarda alınan çekme numunelerinden elde edilen plastik anizotropi değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Çizelge 6.1. St22 çelik malzemenin mekanik özellikleri

Akma Sınırı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Kopma Uzama Boy (%)	Sertlik HB	Isıl Gen. Kat.	Isı İletkenliği	Özgül Ağırlığı	Elektrik İletkenliği	Magnetik Özellik	Çelik Grubu	Kullanım Yerleri
215	220	28	132	11,7	52	7,86	5,9	1	Semen tasyon çeliği	Soğuk çekilmiş yumuşak saçlar, ekstra derin çekme saçları

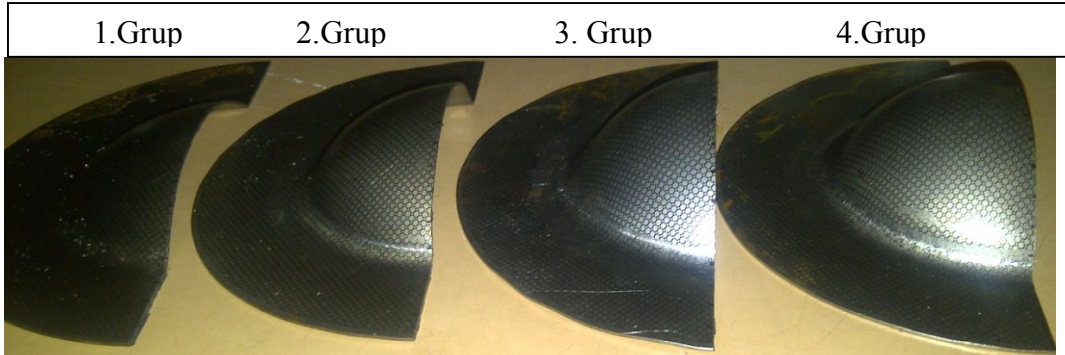
6.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİ SONUÇLARI

İlkel pul çapında lazer kesim metoduyla hazırlanan numunelerle öncelikle ön deneyler gerçekleştirilmiş, asıl deneylerde uygulanacak sabit pot baskı kuvveti tespit edilmiştir (Şekil 6.1.). ön deneylerin değerlendirilmesi esnasında sacın şekillenme yüksekliği, kırışıklık ve kulaklanmalar gözönünde bulundurulmuştur.



Şekil 6.1. Öndenev sonrası elde edilen numunelerin üst görünüşü

Ön hidro şekillendirme deneylerinin ardından Çizelge 5.3.' de verilen parametreler kullanılarak asıl hidro şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerden şişme yüksekliği ölçümleri, kalınlık dağılımı ölçümleri ve grid ölçümleri gerçekleştirilmiş, şekillendirme sınır diyagramı (FLD) oluşturulmuştur.



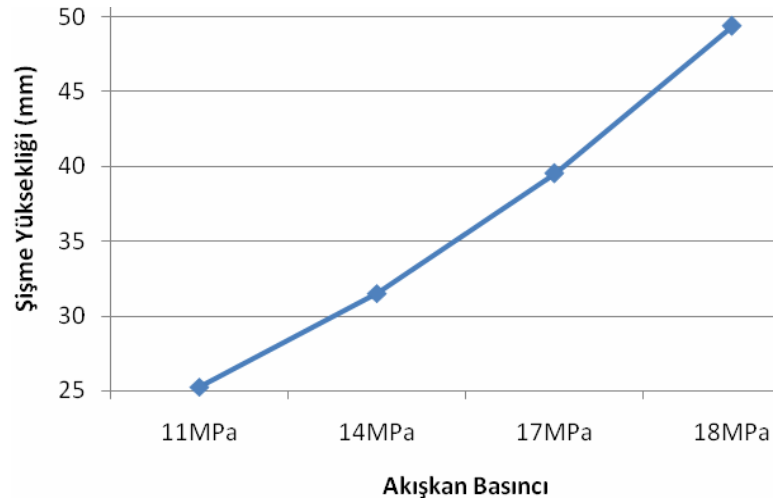
Şekil 6.2. Asıl deneyler sonrası elde edilen numuneler



Şekil 6.3. Dört nolu numune grubu

6.2.1. Şişme Yüksekliği Ölçümü

Deneylelerden elde edilen numuneler üzerinden dijital mihengir kullanarak yükseklik ölçümü yapılmıştır. Dört farklı şekillendirme basıncı kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen numunelerin şişme yükseklikleri gruplar halinde değerlendirilmiş, bu grupların ortalama yükseklik değerleri grafik haline getirilmiştir. Buna göre numunelerin şişme yüksekliği grafikleri Şekil 6.3.'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Akışkan basıncına göre şişme yüksekliği grafiği

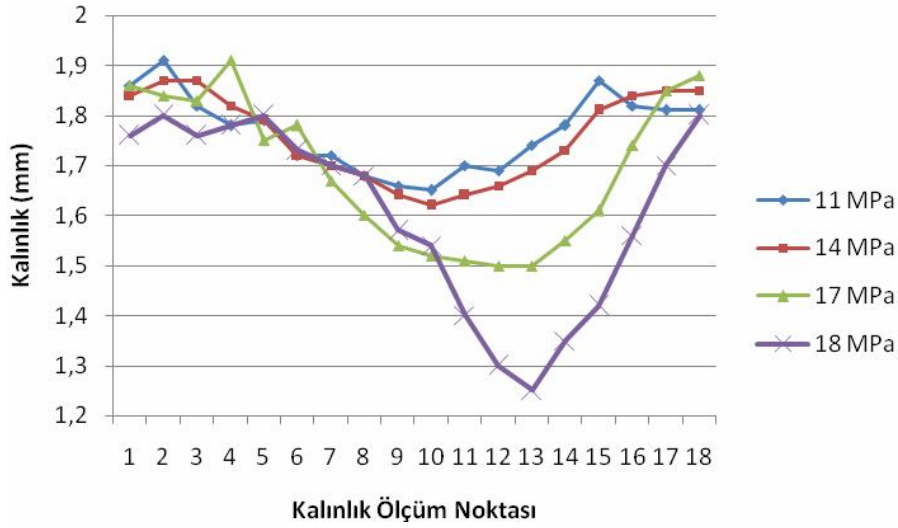
Ön deneylerdeki hidro şekillendirme işlemi değerlendirildiğinde, şekillendirme esnasında pot baskısının yetersiz olması sonucunda malzemenin flanş bölgelerinde kırışıklıklar meydana gelebilmektedir. Bu durumda sac malzemenin kırışık bölgelerinin kalıpla teması kesilip, sac malzeme- kalıp arasından basınçlı akışkan sızmakta; sızan yağ sacın diğer yüzeyine geçmekte ve şekillendirmeyi engellemektedir.

Ancak asıl deneylerde uygulanan pot baskı kuvveti (48000N); malzemenin kırışma ve katlanmasını engellemekte, şekillendirme işleminin başarıyla sonuçlanmasını sağlamaktadır.

Sac malzemeye uygulanan akışkan basıncının artmasıyla doğru orantılı olarak şişme yüksekliğinin de arttığı görülmüştür.

6.2.2. Kalınlık Dağılımı Ölçümleri

Hidrolik akışkanla şekillendirme deneylerinin neticesinde elde edilen numuneler ortasından uzay testeresi ile kesilmiştir. Kesilen numunelerin herbirinde birer santimetre aralıklarla kalınlık dağılımı ölçüm noktaları tespit edilmiş ve işaretlenmiştir. Toplamda numunelerin her birinden 19 ölçüm alınmış, her bir grubun ortalamaları alınarak sonuçlar grafik haline getirilmiştir.



Şekil 6.5. Kalınlık dağılımı grafiği

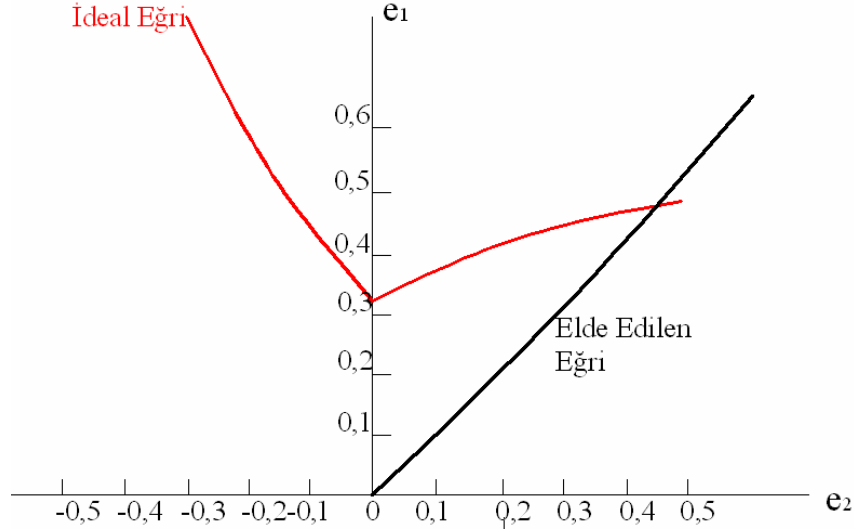
Sac malzemeler haddeleme işlemine tabi tutulurken malzeme kalınlığına belli bir tolerans verilerek haddeleme işlemi yapılmaktadır. Deneylerde kullanılan malzemenin haddeleme kalınlığı $2\text{mm} \pm 0.4\text{mm}$ dir.

Şekillendirme işleminde sac malzeme üzerine uygulanan akışkan basıncının artmasıyla şişme yüksekliği de artmış fakat sac malzeme kalınlığı aynı bölgelerde giderek azalmıştır.

6.2.3. Grid Ölçümü ve Şekillendirme Sınır Diyagramının Oluşturulması

Dördüncü gruptaki numunelerin şekillendirme işlemi, numuneler patlayana (yırtilana) kadar devam ettirilmiştir. Yırtilma bölgesine en yakın komşu grid düzlemi tayin edilmiş ve ölçümler o sıradaki gridlerden alınmıştır.

Sac malzeme üzerine oluşturulan 2mm çapındaki dairesel gridlerin geometrisi şekillendirme işlemi ile değişmiş, elips formuna gelmiştir. Elipslerin büyük ve küçük eksenlerindeki (d_1 ve d_2) değişimlere göre sac malzemenin şekillendirme sınır diyagramı oluşturulmuştur. Elde edilen diyagram ideal şekil değiştirme diyagramıyla kıyaslanmıştır.



Şekil 6.6. Şekillendirme sınır diyagramı

Şekil 6.6.' da St22 sac malzeme ile yapılan deneyler ve ölçümler neticesinde oluşturulan şekillendirme sınır diyagramı siyah çizgi ile, literatürden elde edilen az karbonlu çelik sınıfının sınır diyagramı kırmızı renkli çizgi ile temsil edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi hidro şekillendirme işleminde sac malzemenin şekillenebilirlik limiti aşılmış ve malzeme emniyetli bölgeden tehlikeli bölgeye taşmıştır. Dolayısıyla sac malzemede yırtılma gerçekleşmiştir.

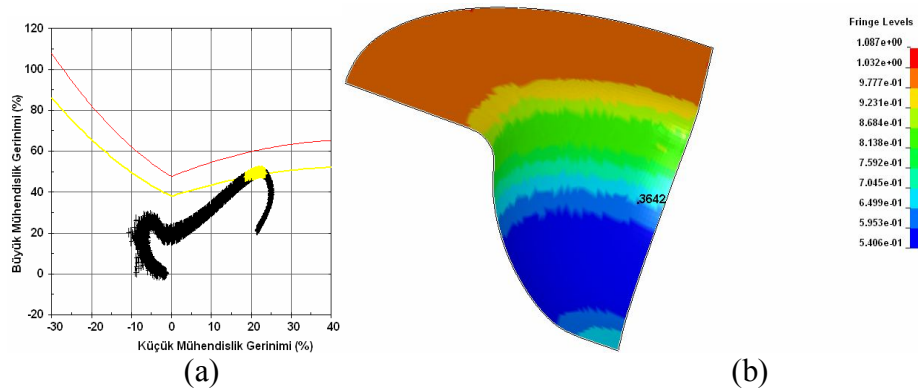
Bu durumda St22 sac malzemenin mevcut kalıp derinliği ve çapında 18MPa basınçtan daha az bir basınçla yaklaşık 47mm derinliğe kadar emniyetli olarak şekillendirilebildiği görülmüştür. Bu da mevcut çelik malzemenin derin çekme ve hidro şekillendirme işlemlerine uygun, sünek bir malzeme olduğunu göstermektedir.

6.3. ANALİZ İŞLEMLERİ

Çalışmada sonlu elemanlar analizleri Ansys Mechanical/LsDyna’ da gerçekleştirilmiş ve sonuçları aynı programda değerlendirilmiştir.

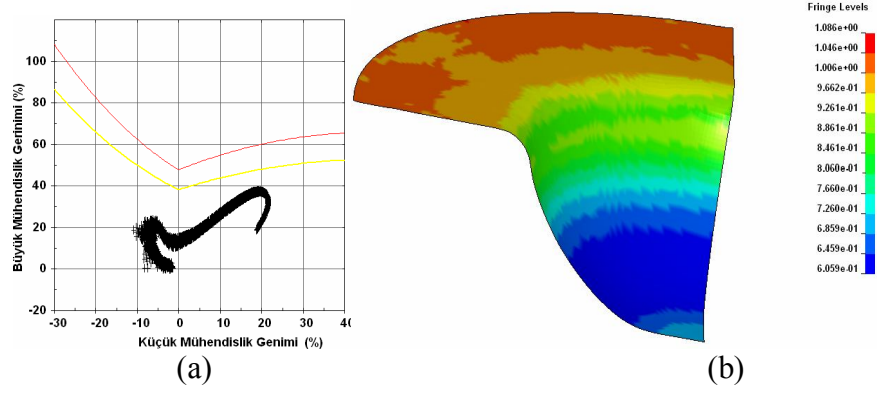
Gerçekleştirilen analiz işlemleri en yüksek basınç ve en fazla şişme yüksekliğinin elde edildiği numuneler için uygulanmıştır.

Analizlerin neticesinde üç nolu numune grubunun patlamadığını fakat emniyetli sınırı aştığını görebilmekteyiz. Ayrıca kalınlığın tepe bölgesine çıkıldıkça azaldığı, malzemenin incelendiği görülmektedir (Şekil 6.6.). Bu durum, şekillendirme işlemine devam edilip basınç artırıldığında malzemenin tepe bölgesinden patlama riski taşıdığına açık bir göstergesidir.



Şekil 6.7. Üç nolu numune grubu analiz sonuçları (a) Şekillenme sınır diyagramı (FLD), (b) Kalınlık dağılımı

İki numaralı numune grubunda ise herhangi bir riskin oluşmadığı, malzemenin şekillendirme işlemi boyunca şekillenebilirlik sınır eğrisinin altında kaldığı sonlu elemanlar analizlerinden görülmüştür (Şekil 6.8.). Ayrıca aynı numunenin kalınlık dağılımı skalasına bakıldığında ise, malzemenin tepe bölgesindeki kalınlığın dört nolu numune grubundan daha fazla olduğu, dolayısıyla yırtılmanın oluşmadan şekillendirilebileceği analiz sonuçlarından ve deneysel numunelerin kalınlık ölçümlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 6.8. İki nolu numune analiz sonuçları (a) Şekillenme Sınır Diyagramı (FLD), (b) kalınlık dağılımı

Kalınlık dağılımlarına Ansys Sonlu elemanlar Analizinde bakıldığında ise malzemenin 0.5mm' ye kadar incelmeye gösterebileceği görülmüştür.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada Erdemir kalite St22 sacının hidrolik akışkanla şekillendirilmesi incelenmiştir. Şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir.

1. Tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiş ve malzemenin mekanik değerleri elde edilmiştir.
2. Sac malzemeye farklı basınç ve baskı plakası kuvvetlerinde şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Mevcut imkanlar doğrultusunda şekillendirme işlemi neticesinde sac malzemenin herhangi bir deformasyona uğramadan en fazla 30mm yüksekliğe kadar şişirilebildiği görülmüştür.
3. Aynı zamanda şekillendirme işlemi Sonlu elemanlar analizi metodu ile simüle edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre malzemenin şekillendirme sınır diyagramı oluşturulmuştur. En büyük şişme yüksekliğinin elde edildiği numunelerde dahi malzemenin şekillendirme sınırını aşmadığı, ancak bazı numunelerde güvenli bölgenin üzerine çıkıldığı fakat hasar oluşmadığı görülmüştür. Ancak şekillendirme işlemine devam edilmesi durumunda malzemenin emniyetli bölgeyi aşarak yırtılacağı kanısına varılmıştır.
4. Numunelerin şişme yüksekliklerine bakıldığında akışkan basıncının artırılması şişme yüksekliğinin artmasını sağlamıştır. Pot baskı kuvvetinin artırılması malzemenin kaymasını ve şekillenmesini engellerken, azaltılması malzemenin kırışmasına ve kırışıklık bölgelerinden yağ kaçırarak malzemenin şişmesine engel teşkil etmektedir.
5. Numunelerin şişirme işlemi sonrası kalınlıklarının homojen olarak değiştiği, kalıp radüs bölgelerinde malzeme yığılması gerçekleşmesinden dolayı kalınlığın arttığı görülmüştür. En düşük malzeme kalınlığı değeri şişme bölgesi tepe noktasında elde edilmiştir.

İleriki dönemlerde gerçekleştirilebilecek çalışmalarda sac malzemenin patlama noktasına kadar şişirilerek maksimum şişme yüksekliği tespit edilebilir. Ayrıca sac malzemeye sıcaklık uygulanarak termal hidro şekillendirme işlemiyle oda sıcaklığında gerçekleştirilen hidro şekillendirme işlemleri ve şişme yükseklikleri kıyaslanabilir. Karmaşık geometrilere sahip farklı kalıplarla şekillendirme işlemi gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- 1.Hashim, A. A., “Ticari sacların ve Erdemir derin çekme saclarının derin çekilebilme özelliklerinin belirlenerek benzer ithal saclarla karşılaştırması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi**, Ankara, 1-7, (2001).
- 2.Bahar, A. F., “Finite element analysis of extrusion dies”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü**, İstanbul, 4-6, (2003)
- 3.Kayalı, E. S. ve Ensari, C., “Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları”, **İTÜ Rektörlüğü**, İstanbul, 389-401, (2000)
- 4.McClintock, F. A., “A Criterion for ductile fracture by the growth of holes”, **Journal of Applied Mechanics**, 35 (2) : 363-371, (1968).
- 5.Rice, J. R., and Tracey, D. M., “On the ductile enlargement of voids on triaxial stress fields”, **Journal of Mechanical Physics and Solids**, 17 (3) : 201-217, (1969).
- 6.Clift, S. E., Hartley, P., Sturgess, C.E.N., and Rowe, G.W., “Fracture prediction in plastic deformation process”, **International Journal of Mechanical Science**, 32 (1) : 1-17, (1990).
- 7.Hartley, P., Pillinger, I., and Sturgess, C., “Numerical modeling of material deformation processes research development and applications”, **Springer-Verlag**, 252-273, (1992).
- 8.Youssef, Y. and Denault, J., “Thermoformed glass fiber reinforced polypropylene: microstructure, mechanical properties and residual stresses”, **Polymer Composites**, 19 (3) : 301-9, (1998).
- 9.Tirosh, J., Yossifon, S., Eshel, R. and Betzer, A., “Hydroforming process of uniform wall thickness products”, **ASME Journal of Engineering for Industry**; 99 (3) : 685-691, (1977).
10. Yossifon, S., Tirosh, J. and Kochavi, E., “On suppression of plastic buckling in hydroforming processes”, **International Journal of Mechanical Science**, 26 (6-8) : 389-402, (1984).
11. Yossifon, S. and Tirosh, J., “Rupture instability in hydroforming deep-drawing process”, **International Journal of Mechanical Science**, 27 (9) : 559-70, (1985).

12. Yossifon, S. and Tirosh, J., “Buckling prevention by lateral fluid pressure in deep drawing”, *International Journal of Mechanical Science*, 27 (3) : 177–85, (1985).
13. Yossifon, S. and Tirosh, J., “On the permissible fluid-pressure path in hydroforming deep drawing processes analysis of failures and experiments”, *Journal of Engineering for Industry*, 110 (2) : 146–152, (1988).
14. Zeytin, H., Teymur, K. ve Arısyoy, B.H., “Alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği”, *MAM-MKTAE/OSD*, Proje No:50H5602, (2000)
15. Daehn, G.S., Vohnout, V.J. and DuBois, L., “Improved formability with electromagnetic forming fundamentals and a practical example”, *Department of Materials Science and Engineering, The Ohio State University*, 614 (292) : 6779, (1999)
16. Parsa, M.H. and Darbandi P. “Experimental and numerical analyses of sheet hydroforming process for production of an automobile body part”; *Journal Of Materials Processing Technology*, 198 (1-3) : 381–390, (2008)
17. Hartl, Ch., “Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2-3) : 383–392, (2005)
18. Krahn, M., Kopp, R., Krux, R. and Kleiner, M., “Umformen von flexibelgewalzten Blechen mittels Wirkmedien, Kolloquium Wirkmedien-Blechumformung”, *Sheet Metal Hydroforming*, Dortmund, Germany, 137-148, (2001)
19. Kim, J., Son, B.M., Kang, B.S., Hwang, S.M. and Park, H.J., “Comparison stamping and hydro-mechanical forming process for an automobile fuel tank using finite element method”; *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 : 550-557, (2004)
20. Lo, S.W., Hsu, T.C. and Wilson, W.R.D., “An analysis of hemispherical-punch hydroforming processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 37 (1-4) : 225-239, (1993)
21. Brunet, M., Mguil, S. and Moretin, F., “Analytical and experimental studies of necking in sheet metal forming processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81: 40-46, (1998)
22. Mattiasson, K., "On finite element simulation of sheet metal forming process in industry", *European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMdS 2000)*, Barcelona, September (2000)

23. Lei, L., Hwang, S. M. and Kang B.S., “Finite element analysis and design in stainless steel sheet forming and its experimental comparison”, *Journal of Materials Processing Technology*, 110 (1) : 70-77, (2001)
24. Setién, J., González, J.J. and Polanco, J.A., “Cracking diagnostics of brake pedals during press forming operations”, *Engineering Failure Analysis*, 7 (2) : 69 - 74, (2000)
25. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M. and Sterzing, A., “Sheet metal forming at elevated temperatures”, *Annals of the CIRP*, 55 (2) : 793-816, (2006)
26. Wu, H.-Y., Zhou, G.-Z., Gao, Z.-W. and Chiu, C.H., “Mechanical properties and formability of an Mg–6%Li–1%Zn alloy thin sheet at elevated temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1-3) : 419–424, (2008)
27. Kaya, S., Altan, T., Groche, P. and Klo, C.,”Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet at elevated temperatures using the hydraulic bulge test”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48 (5) : 550–557, (2008)
28. Quan, G.-Z., Liu, K.-W., Zhou, J. and Chen, B., “Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy”, *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 19 (3) : 537-541, (2009)
29. Takuda, H., Mori, K., Masachika, T., Yamazaki, E. and Watanabe, Y., “Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing”, *Journall Of Materials Processing Technology*, 143-144 : 242-248, (2003)
30. Mahabunphachai, S. and Koç, M., “Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures”, *Materials And Design*, 31 (5) : 2422-2434, (2010)
31. El-Morsy, A.-W. and Manabe, K.-I., “Finite element analysis of magnesium AZ31 alloy sheet in warm deep drawing process considering heat transfer effect”, *Materials Letters*, 60 (15) : 1866-1870, (2006)
32. Yuan, S.J., Han, C. and Wang, X.S., “Hydroforming of automotive structural components with rectangular sections”, *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 46 (11) : 1201-1206, (2006)
33. Lee, M.-Y., Sung, M. S., Kang, C.-Y., Suh, D.-W. and Lee, S.-Y., “Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 155-156 : 1337-1343, (2004)

34. Önder, E. ve Tekkaya, A. E., “Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48 (5) : 532-542, (2008)
35. Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B. and Zhou, X., “Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by around die based on an innovative hydromechanical deep drawing method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (2-3) : 191–200, (2005)
36. Thiruvarudchelvan, S. and Lewis, W., “A note on hydroforming with constant fluid pressure”, *Journal of Materials Processing Technology*, 88 (1-3) : 51–56, (1999)
37. Dachang, K., Yu, C. and Yongchao, X., “Hydromechanical deep drawing of superalloy cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 166 (2) : 243–246, (2005)
38. Şahin S., “Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması”, *Mühendis ve Makina*, 45 (533) : 35-39, (2004)
39. İnternet: Schuler Hydroforming,
<http://royalmechanical.files.wordpress.com/2011/06/hydroforming.ppt>, (2011)
40. Zhang, S.H., “Developments in hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 91 (1-3) : 236-244, (1999)
41. Yossifon, S. and Tirosh, J., “Rupture instability in hydroforming deep drawing process”. *International Journal of Mechanical Science*, 27 (9) : 559-570, (1985)
42. Çalık, A., “Ansys ve uygulamaları”, Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Zonguldak, 52, (2004)
43. Pençe, E., “Eğitim amaçlı ansys paket programının tanıtılması”, Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi*, Karabük, 13, (2007)
44. İnternet: Ansys Help Tutorials,
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Explicit+Dynamics/ANSYS+LS-DYNA>
45. Ansys Inc., “Ansys Coupled-Field Analysis Guide Ansys Release 10.0”, *Ansys*; 3-8, (2005)
46. Türk Standartları Enstitüsü, “Metalik Malzemeler Çekme Deneyi EN ISO 6892-1”, *TSE* (2011)

ÖZGEÇMİŞ

Barış EVLEN 1980 yılında Silifke' de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Aksaray Anadolu Ticaret Meslek Lisesi' nden 1998 yılında mezun oldu. 2003 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Tasarım ve Konstrüksiyon Anabilim Dalı' nda öğrenime başlayıp 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karabük Kardemir Demir Çelik Fabrikalarında Arıtma Tesisi tasarım ve yapım aşamasında şantiye şefi olarak görev aldı. 2008 yılında ÇAĞÇELİK Demir Çelik Fabrikalarında Tasarım Mühendisi olarak göreve başladı. 2009 yılında aynı fabrikanın Kalite Kontrol Müdürlüğü kadrosuna atandı ve halen aynı yerde ve konumda çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : ÇAĞÇELİK Demir Çelik Fabrikası 5000 Evler Mevkii Kamil Güleç
Caddesi Beşbinevler/KARABÜK
Tel : (532) 345 78 78
E-posta : baris@cagcelik.com.tr