



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ÇİFT TARAFLI SAC
HİDRO-ŞEKİLLENDİRMEDE PROSES
PARAMETRELERİNİN SAYISAL VE
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Selahattin Burak AKAY

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Selahattin Burak AKAY tarafından hazırlanan “ÇİFT TARAFLI SAC HİDRO-ŞEKİLLENDİRMEDE PROSES PARAMETRELERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması 09/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Haydar LİVATYALI

.....

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI

.....

Üye

Prof.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet FIRAT

.....

Üye

Doç.Dr. Serkan TOROS

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 217M700 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Selahattin Burak AKAY

Tarih: 09.07.2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇİFT TARAFLI SAC HİDRO ŞEKİLLENDİRMEDE PROSES PARAMETRELERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Selahattin Burak AKAY

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2021, 150 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Prof. Dr. Mehmet FIRAT
Doç. Dr. Serkan TOROS**

Bu doktora tezinde hidromekanik derin çekmeyle (HDMÇ) şekillendirilemeyecek geometrideki sac parçaların (ojiv, oval, eliptik, vb.) şekillendirilmesinde kullanılan Çift Taraflı Hidro-Şekillendirme (ÇTHŞ) prosesi deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Deney malzemesi olarak, otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılan AA 5754 alüminyum alaşımı ve gıda, otomotiv sektöründe sıkça kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik seçilmiştir. Prosesin deneysel olarak uygulanabilmesi için KTUN. Hidro-Şekillendirme Laboratuvarı'nda bulunan mevcut hidromekanik derin çekme kabiliyetine sahip olan hidro-şekillendirme presine ÇTHŞ'yi gerçekleştirecek şekilde gerekli sistemler entegre edilmiştir. ÇTHŞ'nin HMDÇ'ye göre şekillendirebilirliğe etkisinin farklı geometrideki iş parçalarında incelenebilmesi için silindirik ve eksenel simetrik geometriye sahip endüstriyel parça imalatı yapılmıştır.

ÇTHŞ ve HMDÇ proseslerinin sonlu elemanlar modeli Ls-Dyna SE programı kullanılarak oluşturulmuştur. SE analizleri ile adaptif olarak çalışan Bulanık Mantık Kontrol Algoritması (BMKA) ile de optimum şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti profilleri (yükleme profilleri) sayısal olarak belirlenmiştir. Silindirik olmayan eksenel simetrik parçaların şekillendirilmesindeki belirsizlikler, silindirik eksenel simetrik parçalara göre daha fazladır. Bu nedenle Hidro-şekillendirmenin adaptif kontrolü konusunda literatürde kullanılan Tip-1 BMKA'larının yanı sıra, belirsizliklerin modellenmesinde daha iyi sonuç alınabilen Tip-2 BMKA da kullanılmıştır. Sayısal olarak belirlenen optimum yüklem profilleri deneylerle de doğrulanmıştır.

ÇTHŞ ile üretilen eksenel simetrik endüstriyel parçada, HMDÇ ile üretildiğinde oluşan buruşma hatalarının tamamen giderildiği sayısal ve deneysel olarak ortaya konmuştur. Dolayısıyla HDMÇ ile üretilen endüstriyel parçada oluşan buruşma hatalarının düzeltilmesi için imalat yönünden ikinci bir operasyona gerek kalmamaktadır. Böylece ÇTHŞ prosesinin teknik ve mali avantajları ortaya konmuştur. ÇTHŞ'de optimum yüklem profillerinin belirlenmesi konusunda geliştirilen yöntemler hem silindirik hem de daha farklı bir geometriye sahip endüstriyel parça üretimi için de başarıyla uygulanarak, geliştirilen yöntemlerin malzemeden, kalınlıktan ve geometrik şekilden bağımsız olarak geliştirilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: AA 5754, AISI 304, Bulanık Mantık Kontrol Algoritması, Çift Taraflı Hidro-Şekillendirme, Hidro-Şekillendirme, Sonlu Elemanlar Analizleri, Tip-2 Bulanık Mantık

ABSTRACT

PhD THESIS

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PROCESS PARAMETERS IN DOUBLE-SIDED SHEET HYDRO FORMING

Selahattin Burak AKAY

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2021, 153 Pages

Jury

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

Prof. Dr. Haydar LİVATYALI

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Prof. Dr. Mehmet FIRAT

Asst. Prof. Dr. Serkan TOROS

Double Sided Hydroforming (DSHF) process, which is used in the shaping of sheet metals (ogive, oval, elliptical, etc.) that cannot be shaped by hydromechanical deep drawing (HDD), was investigated by experimental and numerical methods in this dissertation. AA 5754 aluminum alloy, which is used extensively in the automotive industry, and AISI 304 stainless steel, which is frequently used in the food and automotive industry, were preferred as test materials. In order for the process to be applied experimentally, the necessary systems have been integrated into the hydroforming press in the Hydroforming Laboratory to perform the ÇTHŞ. For the experimental implementation of the DSHF, the necessary components were integrated into the hydroforming press, which has the hydromechanical deep drawing capability, in the Hydroforming Laboratory in KTUN. In order to examine the effect of DSHF on formability according to HDD in different workpieces geometries, with cylindrical and axisymmetric industrial parts were manufactured.

The finite element model of the DSHF and HDD processes was created using the Ls-Dyna SE program. Optimum forming pressure, counterpressure and blank holder force (loading profiles) were determined numerically with Fuzzy Logic Control Algorithm (FLCA), which works adaptively with finite element analyses. The uncertainties in the shaping of non-cylindrical axisymmetric parts are greater than that of cylindrical axisymmetric parts. In addition to Type-1 FLCAs used in the literature for adaptive control of hydroforming, Type-2 BMKA, which can provide better results in modelling uncertainties, was also used. The numerically determined optimum loading profiles were also confirmed by experiments.

It has been demonstrated numerically and experimentally that the wrinkling errors that occur when produced with HDD in the axially symmetrical industrial part produced by DSHF are completely eliminated. Therefore, there is no need for a second operation in terms of manufacturing in order to correct the wrinkling errors in the industrial parts produced with HDD. Thus, the technical and financial advantages of the DSHF process have been revealed. The methods developed in DSHF for determining the optimum loading profiles were successfully applied for both cylindrical and industrial parts with a different geometry, and the developed methods were generalized independent of material, thickness and geometric shape.

Keywords: AA 5754, AISI 304, Fuzzy Logic Control Algorithm, Double Sided Hydroforming, Hydroforming, Finite Element Analysis, Type-2 Fuzzy Logic

ÖNSÖZ

Bu doktora tezinde hidro-şekillendirmenin bir çeşidi olan ve eksenî doğrultusundaki kesitleri farklı olan (silindirik olmayan eksenel simetrik) iş parçalarının tek seferde şekillendirilmesine imkan sağlayan çift taraflı hidro-şekillendirme (ÇTHŞ) yöntemi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidro-Şekillendirme Laboratuvarı'nda bulunan deneylerin gerçekleştirildiği deney presi, geçmişte hidromekanik derin çekme (HMDÇ) prosesine uygun olarak tek taraflı basınçla şekillendirilmeye uygun durumdaydı. ÇTHŞ deneylerinin gerçekleştirilmesi için deney presinde modifikasyonlar yapılması gerekti. HNC (Hidrolik Sayısal Kontrol) sistemi ve karşı basıncın üretilmesi için ikinci bir basınç yükselticinin sisteme eklenmesi gerekmiştir. İhtiyaç duyulan bütçeyi karşılamak üzere SSM Teknoloji Yönetimi Daire Başkanlığı'nın Teknoloji Paneline "Füze Başlığı Benzeri Üretimi Zor Parçaların Çift Taraflı Sac Hidro-Şekillendirme Prosesi ile Üretilmesi" ismiyle proje müracaatı yapılmıştır. Ayrıca TUSAŞ ile benzer bir proje üzerinde görüşmeler yapılmıştır. Son olarak Tübitak 1001 araştırma projesi için başvuru yapılmış ve proje önerisi desteklenmeye değer bulunmuştur. Bu tez çalışması kapsamında tez konusuyla da uyumlu olan TÜBİTAK 217M700 numaralı – "Çift Taraflı Sac Hidro-şekillendirmede Yükleme Eğrilerinin Adaptif Kontrolle Optimize Edilerek Şekillendirilebilirliğin Artırılması" konulu araştırma projesi ile gereken bütçe sağlanarak deney presinin modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece bu prosesin laboratuvar ölçekli çalışma olmaktan çıkıp endüstriyel bir üretim yöntemi olması yolunda bir adım atılmıştır. Danışman Hocam Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI'nın yürütücüsü olduğu bu projede araştırmacı olarak Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ, bursiyer olarak da Arş. Grv. Ekrem ÖZTÜRK, Arş. Grv. Osman ÖZTÜRK ve Arş. Grv. Gürkan ATAŞ çalışmışlardır. Proje kapsamında yaptıkları çalışmalarla tezime de önemli katkılar sağlamış olan proje ekibine teşekkürü bir borç bilirim. Projenin hayata geçmesi için gerekli desteği sağlayan TUBİTAK'a da teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitemde yer alan Prof. Dr. Haydar LİVATYALI, Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e ve Prof. Dr. Osman YİĞİT'e destekleri ve yönlendirmeleri için teşekkürlerimi sunarım.

Selahattin Burak AKAY
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. Hidro-şekillendirme	8
2.1.1. Sac Hidro-şekillendirme	9
2.1.2. Hidromekanik derin çekme prosesini etkileyen önemli parametreler	17
2.2. Çift Taraflı Sac Hidro-şekillendirme	22
2.3. Hidro-şekillendirmede yükleme profillerinin elde edilmesi	25
2.4. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmalarıyla Optimum Yükleme Profillerinin Bulunması	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. ÇTHŞ'nin Sonlu Elemanlar Yazılımıyla Modellenmesi	39
3.1.1. Geometrik Modelin Oluşturulması	40
3.1.2. Başlangıç ve sınır koşulları	44
3.1.3. Sıvı Basıncının Tanımlanması	46
3.1.4. Kesit (Section) Özelliğinin Tanımlanması.....	52
3.1.5. Temas tipi ve sürtünme katsayıları	54
3.1.6. Malzeme modeli.....	56
3.1.7. Analiz için modelde yapılan diğer tanımlamalar	58
3.2. Optimum Eleman Sayısı İçin Yakınsaklık Testi Analizi	59
3.3. Yükleme Profillerinin ÇTHŞ Prosesindeki Etkisinin Araştırılması	60
3.3.1. ÇTHŞ'de şekillendirme basıncının etkisi	61
3.3.2. ÇTHŞ'de baskı plakası kuvvetinin etkisi.....	62
3.3.3. ÇTHŞ'de karşı basıncın etkisi	62
3.4. Sürtünme Katsayılarının ÇTHŞ Prosesine Etkisinin Araştırılması.....	63
3.5. Deneylerde Kullanılacak Malzemeler ve Mekanik Özellikleri.....	64
3.6. Kalınlık Ölçüm Metodu ve Kalibrasyonu	67
3.7. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi	68
3.7.1. Maksimum yüzde incelme giriş değişkeni.....	70
3.7.2. İstampa duvarına temas giriş değişkeni	71
3.7.3. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeni	73
3.7.4. Baskı plakası radyüsüne temas giriş değişkeni.....	74
3.7.5. Çıkış değişkenleri.....	75
3.7.6. Bulanık kural-tabanlı matrisler	76

3.7.7. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmasının ÇTHŞ Prosesine Uygulanması....	78
3.8. Tip-2 Bulanık Mantık Adaptif Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi	82
3.9. Deney Presinde Mekanik ve Elektronik Kontrol Sisteminin Kurulması	87
3.10.....HDMÇ ve ÇTHŞ Deneylerinin Yapılması ve Karşılaştırılması	92
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	95
4.1. ÇTHŞ’de Karşı Basıncın Şekillendirmeye Etkisi	95
4.2. Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi	97
4.3. Deneylerde Karşılaşılan Problemler	103
4.4. Silindirik Kapların ÇTHŞ ile Üretilmesi ve HMDÇ ile Karşılaştırılması	106
4.4.1. Sacdaki kalınlık değişiminin karşılaştırılması	106
4.4.2. SÇO’ların Sayısal ve Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Karşılaştırılması	109
4.4.3. Üretilen sac parçaların geometrik doğrulukları yönünden karşılaştırılması	110
4.5. Oval bir Endüstriyel İş Parçası için Tip-2 BMKA Kullanılarak Yükleme Eğrilerinin Bulunması.....	110
4.5.1. Tip-2 BMKA Kullanılarak Yükleme Eğrilerinin Bulunması	111
4.5.2. Endüstriyel İş Parçasını ÇTHŞ ile Üretilmesi ve Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması	116
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	123
5.1. Sonuçlar	123
5.2. Öneriler	125
KAYNAKLAR	126
EKLER	129
6. ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

F_{NBPK}	: Net baskı plakası kuvveti (N)
F_{BPK}	: Baskı plakası kuvveti (N)
$F_{Istampa}$	: Istampaya üzerine gelen kuvvet (N)
$F_{Flanş}$	: Sac üzerinde kalıp altında kalan alana gelen kuvvet (N)
$P_{iç}$	: Sac üzerinde kalıp altında kalmayan alana gelen basınç (Pa)
$P_{dış}$	: Sac ile sızdırmazlık elemanı arasında kalan alana gelen basınç (Pa)
$P_{flanş}$	: Sac üzerinde kalıp altında kalan alana gelen basınç (Pa)
σ_m	: Mühendislik gerilmesi (Pa)
e_m	: Mühendislik BŞD
Y	: Akma Mukavemeti (Pa)
σ_g	: Gerçek gerilme (Pa)
ε_g	: Gerçek BŞD
dl	: Gerçek BŞD ölçü boyundaki anlık artış
l	: Anlık ölçü boyu (mm)
σ	: Gerilme (Pa)
P	: Basınç (Pa)
t	: Sac kalınlığı (mm)
BPK^{ieski}	: Bir önceki zaman adımında elde edilen baskı plakası kuvveti
BPK_i^{yeni}	: Yeni zaman adımında uygulanacak olan baskı plakası kuvveti
dt	: Zaman adımı
$numels$	: Analizdeki toplam eleman sayısı
$numnp$	: Analizdeki toplam düğüm sayısı
P	: Sıvı basıncı
P_i^{ieski}	: Bir önceki zaman adımında elde edilen sıvı basıncı
P_i^{yeni}	: Yeni zaman adımında uygulanacak olan sıvı basıncı
tt	: Analiz zamanı
α	: Bulanık mantık kontrol algoritmasından elde edilen ve yeni zaman adımındaki şekillendirme basıncını belirleyecek olan çıkış değişkeni
β	: Bulanık mantık kontrol algoritmasından elde edilen ve yeni zaman adımındaki baskı plakası kuvvetini belirleyecek olan çıkış değişkeni
γ	: Bulanık mantık kontrol algoritmasından elde edilen ve yeni zaman adımındaki karşı basıncı belirleyecek olan çıkış değişkeni
ΔP_i	: Ön tanımlı sıvı basıncı değeri
ΔBPK_i	: Ön tanımlı baskı plakası kuvveti değeri

Kısaltmalar

Hidromekanik Derin Çekme	: (HDÇ)
Baskı Plakası	: (BP)
Baskı Plakası Kuvveti	: (BPK)
Sıvı Basıncı	: (P)
Sonlu Elemanlar Analizi	: (SEA)
Sonlu Elemanlar	: (SE)
Bulanık Mantık Diyagramı	(BMD)
Bulanık Mantık Kontrol Algoritması	: (BMKA)
Sınır Çekme Oranı	: (SÇO)
Birim Şekil Değiştirme	: (BŞD)
Şekillendirme Sınır Diyagramı	: (ŞSD)
Sac Hidro-Şekillendirme Presi	: (SHP)
Hidrolik Sayısal Kontrol	: (HNC)
Net Baskı Plakası Kuvveti	: (NBPK)
ÇKR	: Çok kritik
KM	: Kural matrisi
KRD	: Kritik değil
KR	: Kritik
ÇKR	: Çok kritik

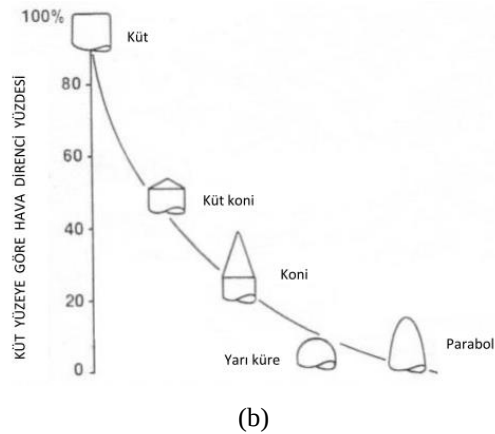
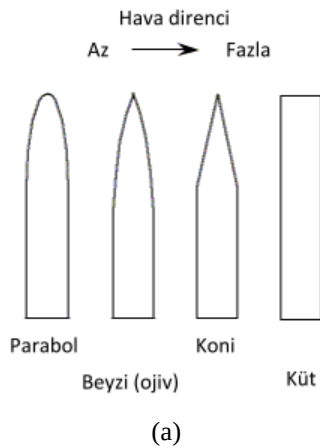
1. GİRİŞ

Sac metal parçalar uzay, otomobil, yüksek hızlı tren endüstrisi gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Dehghani ve Salimi, 2016; Lu ve ark., 2014). Özellikle havacılık ve otomobil endüstrilerinde, kademeli olarak yakıt tasarrufu ve ağırlığın azaltılması için alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımı gibi hafif malzemeler daha fazla uygulama alanı kazanmıştır (Liu ve ark., 2011). Bu endüstri kollarında ağırlık ve yakıt sarfiyatını azaltmak için, mukavemet/ağırlık oranları yüksek olan hafif alaşımlar, özellikle alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece araçlarda %40-75 arasında ağırlığın azaltılması mümkün olmaktadır (Choi ve ark. 2007a). Alüminyum alaşımları, ağırlığın azaltılmasının yanında üstün korozyon direnci, yüksek geri dönüşüm oranı ve kaza anında yüksek enerji absorbe etme özellikleri için de tercih edilmektedir. (Gedikli ve ark. 2011). Fakat hafif alaşımların ve yüksek mukavemetli çeliklerin (HSS, AHSS, UHSS) oda sıcaklığındaki sınırlı şekillendirilebilirlikleri, bu malzemelerin istenilen kompleks geometrilerde şekillendirilmesine engel olmaktadır. Bu da üretim maliyetlerinin artmasına ve bu nedenle hafif alaşımların kullanım alanının dar bir çerçevede kalmasına neden olmaktadır. Hafif alaşımların kısıtlı şekillendirebilirlikleri, yenilikçi üretim teknolojileri kullanılarak artırılmaya çalışılmaktadır. Geleneksel yöntemlerle şekillendirilmeleri zor olan malzemelerin bu sınırlamalarının üstesinden gelmek için uygulanan yöntemlerden biri hidro-şekillendirme prosesidir.

Hidro-şekillendirme, sac veya boru şeklindeki malzemelerin sıvı basıncı yardımıyla şekillendirilmesinde kullanılan bir imalat yöntemidir. Klasik bir kalıplama ile parçalar iki kalıp arasında şekillendirilirken, sac hidro-şekillendirme yönteminde tek bir kalıp kullanılmaktadır. Böylece kalıp masrafları azalmakta, kalıp uyumu aranmamakta ve farklı kalınlıktaki saclar tek bir kalıpla şekillendirilebilmektedir. Ayrıca sıvının bulunduğu ortamın şeklini kolayca alabilmesi özelliğinden faydalanılarak çok karmaşık şekillerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemde sac malzemenin tüm yüzeylerinde homojen dağılmış bir yük dağılımı olduğu için sac üzerindeki incelmeler daha az olmakta ve homojen bir kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Dolayısıyla sac parçalar daha fazla şekillendirilebilmektedir. Ayrıca hidro-şekillendirme ile üretilen parçalar daha yüksek mukavemete, daha iyi boyutsal ve geometrik doğruluğa ve daha düşük yüzey pürüzlüğüne sahip olabilmektedir. Bu sayede hassas ve kaliteli üretimin

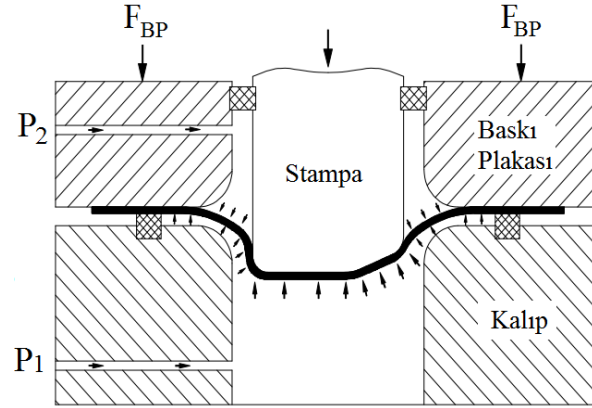
Hidromekanik derin çekme (HMDÇ), sıvı basıncıyla şekillendirme ve klasik derin çekme yöntemlerinin karışımı olan bir şekillendirme yöntemidir. Bu yöntemde; sac malzemeyi şekillendirmek için ıstampa sac metal parçayı kontrollü olarak yüksek basınçlı sıvı bir akışkana doğru hareket ettirmektedir. Baskı plakası sacı kalıba bastırarak şekillendirme sırasındaki malzeme akışını kontrol eder. ıstampa sıvı içerisinde hareket ettirilirken sıvı basıncı artırılır. Böylece ıstampa ile sac malzeme arasında temas alanı artmakta ve sacın incelerek yırtılma olasılığı azalmaktadır. Ayrıca sac, klasik derin çekme yöntemine göre, daha üniform bir yapıda ve kırılma başlangıcı geciktirildiğinden dolayı da çekme derinlikleri %30'a kadar daha fazla olabilmektedir.

Kalıp boşluğu fazla veya değişken ölçüdeki sac parçaların HMDÇ yöntemiyle hidro-şekillendirilmesinde, sacın yırtılması ya da buruşması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.2a'da görüldüğü gibi, roket başlığına benzer eksenel simetrik iş parçalarının derin çekme ile üretilmeleri oldukça zordur. Burun şeklinin hava direncine göre karşılaştırılmasında görüldüğü gibi direnç azaldıkça sac parçaların şekillendirilmesi de zorlaşmaktadır (Şekil 1.2b). Çünkü bu tip parçalarda, ıstampa ile kalıp arasındaki boşluk daha fazla olmak zorundadır. Bu nedenle HMDÇ prosesi ile silindirik olmayan eksenel simetrik iş parçalarının derin çekilmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bu tarz parçaların başarılı olarak şekillendirilmesi için çift taraflı sac hidro-şekillendirme (ÇTHŞ) yöntemi kullanılmaktadır. Klasik derin çekme ve HMDÇ'yle tek kademede üretilmeyen bu tip parçalar çift taraflı hidro-şekillendirme prosesi ile tek kademede üretilmesi mümkün olabilmektedir.



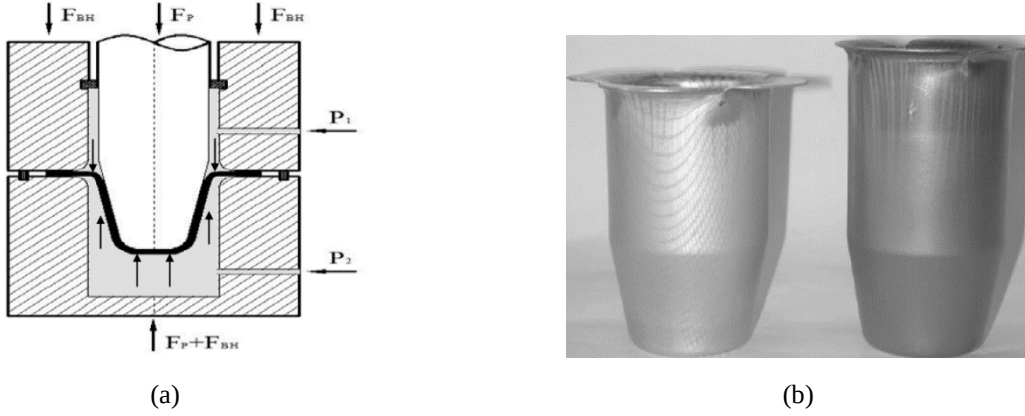
Şekil 1.2. (a) Roketlerde test edilen burun şekilleri (b) Roketlerde kullanılan burun şekillerine ait hava dirençlerinin karşılaştırılması

ÇTHŞ, HMDÇ prosesinin özelleşmiş bir halidir. Çift taraflı sac hidro-şekillendirmede, Şekil 1.3’de görüldüğü gibi, P_2 karşı basınç (üst basınç veya pozitif basınç) adı verilen ikinci bir basınçlı ortam daha bulunmaktadır. Hidromekanik derin çekmede bu basınç sıfırdır. Karşı basınç ile sacın her iki yüzüne de iki ayrı basınç etki etmektedir. Karşı basınç, şekillendirme sırasında, P_1 şekillendirme basıncı tarafından oluşturulan şekillendirmeleri kontrol ederek, sacdaki erken yırtılmaları engeller ve aynı zamanda kalınlık dağılımını da olumlu yönde etkiler. Kalınlık doğrultusunda oluşan gerilme ve birim şekil değiştirmeler artar. Bu sayede, kalınlık doğrultusundaki maksimum incelme artsa da, aynı sac parçada daha yüksek sınır çekme oranları elde edilebilir (Wang ve ark., 2008)



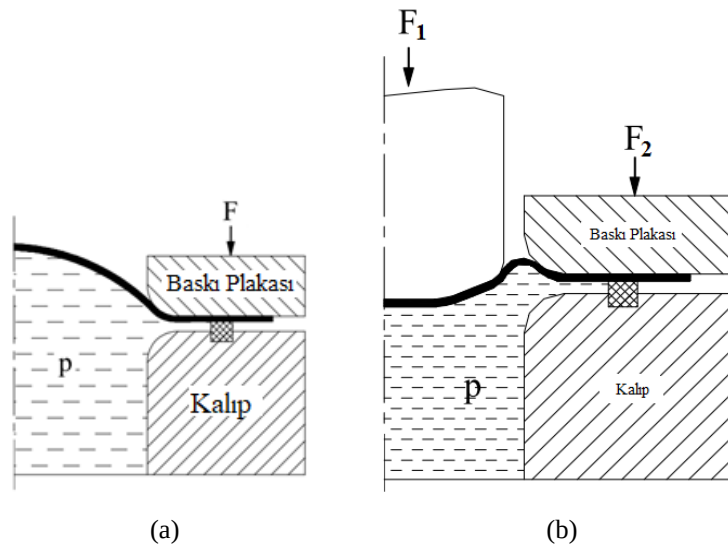
Şekil 1.3. Çift Taraflı Sac Hidro-Şekillendirme Prosesi

Literatürde yapılan çalışmalarda, genellikle şekillendirilmesi zor olan Şekil 1.4’deki gibi, konik ve küre parçalar incelenmektedir (Feng, 2011; Jinfeng 2013). Konik parçalarda baskı plakası-ıstampaya ve kalıp-ıstampaya arasındaki mesafe daha fazladır. Bu nedenle hidro-şekillendirme işleminin ilk safhalarında sacın ıstampaya yapışması için daha yüksek basınç uygulanması gerekir. Basınç artırıldığında sacın ıstampaya temas etmeyen bölgelerindeki gerilmeler artmakta ve sac bu bölgelerden yırtılmaktadır. Uygulanan karşı basınç, askıda kalan bu bölgelerdeki gerilmelerin ani artışını engelleyerek şekillendirme sırasındaki erken yırtılmaları önler.



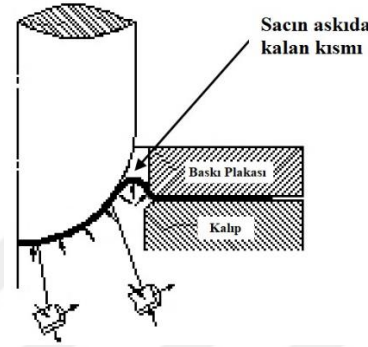
Şekil 1.4. (a) Konik Sac Parçaların Çift Taraflı Hidro-şekillendirilmesi (b) Konik Sac Parçalar

Çift taraflı hidro-şekillendirmede aynı zamanda sacın, kalıp ve baskı plakası radyüsüne temas etmesi de daha iyi kontrol edilebilmektedir. Özellikle ön şişirme yönteminde baskı plakası radyüsü temas kriteri önemlidir (Şekil 1.5 a). Ön şişirme; ıstampa sabit bir pozisyonda iken, şekillendirme işleminin ilk aşamasında, kalıp boşluğundaki basıncı önceden belirlenen bir değere kadar artırıp, sacı ıstampaya doğru belirli bir miktar şişirmektir (Lang ve ark.,2004). Genel olarak ön şişirme işleminin iki fonksiyonu vardır. Birincisi hidro-şekillendirme işleminin başlangıç aşamasında basınç oluşturmak, ikincisi ıstampa ucundaki gerilme durumunu değiştirerek kırılmaları ve şekillendirmenin başlangıcında oluşabilecek buruşmaları engellemektir. Ön şişirme işleminde sacın bükülüp düzelmesi ile ıstampa burnu etrafında önemli derecede pekleşme meydana gelir (Şekil 1.5b). Bu da yırtılma oluşumunu geciktirmektedir.



Şekil 1.5. (a) Ön şişirme işlemi (b) Şekillendirme sırasında baskı plakası radyüsüne temas

Şekillendirme sırasında, sacın kalıp ve baskı plakası radyüsüne temasının engellenmesi sacdaki sürtünmeleri azaltır. Bu sayede sınır çekme oranı artar. Klasik hidromekanik derin çekme prosesi düşünüldüğünde, şekillendirme basıncının sacı baskı plakasına temas ettirecek kadar arttığı durumlarda baskı plakası radyüsüne temas engellenemez (Şekil 1.6). Çift taraflı hidro-şekillendirmede ise karşı basınç ile sacın bu kısmının radyüse teması kontrol edilebilmektedir. Aynı zamanda iki taraftan da uygulanan basınç sayesinde, sacın flanş kısımlarına etkiyen basınç yağlama etkisi göstererek, kalıp-sac ve baskı plakası-sac arasındaki sürtünmeyi de azaltır.



Şekil 1.6. Baskı plakası radyüsü temas kriteri

Çift taraflı hidro-şekillendirmede her iki basıncın etkilerini simülasyon yazılımlarında görmek ve düzeltmek mümkün olabilir. Ancak yükleme profillerini deneme yanılma yöntemiyle bulmak neredeyse imkansızdır. Bu durumda çözüm, prosesin simülasyonu sırasında, ıstampanın çok küçük ilerlemelerinde yukarıda belirtilen kriterleri denetleyecek bir yaklaşım olan adaptif kontroldür.

Adaptif kontrol sistemi, kontrol ettiği prodesteki değişimlere göre kendi kontrol parametrelerini otomatik olarak değiştiren sistem olarak tanımlanır ve prosesin çalışma koşullarının ya da çevre koşullarının değişmesi sonucunda kontrol sistemindeki ayarlarının sürekli olarak değiştirilmesiyle gerçekleşir. Farklı adaptif kontrol tipleri adaptasyon mekanizma ve şekline göre, seçilen davranış ölçütüne ve ayarladıkları parametrelere göre sınıflandırılırlar. Adaptif kontrol uygulamasının diğer proses kontrol sistemlerinden farkı, kontrol edilen değişkenin başlangıçta belirlenen “istenilen değer” de sabit tutulması yerine sistemin değişen özelliklerine uygun olarak yeni değerler almasıdır (Dirim, 2010). Bu nedenle, değeri proses sırasında anlık olarak değişen sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti gibi optimum değerlerin bulunabilmesi için araştırmacılar literatürde adaptif FEM simülasyonları (Sheng ve ark., 2004), adaptif FEM simülasyonlarıyla eş zamanlı çalışan bulanık mantık kontrol algoritmaları (Choi ve ark.,

2007a; Intarakumthornchai ve ark., 2011) ve genetik algoritma (Shamsi-Sarband ve ark., 2012) yöntemlerini kullanmışlardır. Bu kontrol algoritmaları burkulma, buruşma veya yırtılma gibi erken hasar durumlarının belirlenmesi ve bu durumlardan kaçınılması için yapılmaktadır. Aynı zamanda bu algoritmalar, sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti gibi proses parametrelerinin uygun değerlerinin bulunması için kullanılmaktadır. Bu tarz bir proses simülasyonunda, proses parametreleri şekillendirme boyunca yeni koşullar altında sürekli olarak güncellendiği için adaptif proses simülasyonu olarak adlandırılmaktadır (Aydemir ve ark., 2005).

İyi bir şekillendirme için baskı plakası kuvveti, şekillendirme basıncı ve karşı basıncın optimum değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bu parametreler proses boyunca sabit değildir. Yani başarılı bir şekillendirme için, yükleme profili olarak adlandırılan, ıstampa konumuna bağlı olarak değişen eğriler belirlenmelidir. Daha da önemlisi bu yükleme profilleri iş parçasının şekli, malzemesi, kalınlığı, kullanılacak kalıpların radyüsü gibi birçok parametreye de bağlıdır. Literatürde bu eğriler deneme yanılma metoduyla veya belirli bir sahada değişen az sayıdaki basınçların uygulanmasıyla bulunmaktadır. Bu yöntemlerle yükleme profillerinin bulunması oldukça zor ve zaman alıcı olmaktadır. Başarılı bir şekillendirme yapılabilinse de optimum yükleme profillerinin elde edildiği garanti edilemez.

Bu tez çalışmasında, çift taraflı hidro-şekillendirmenin (ÇTHŞ) klasik hidromekanik derin çekmeyle (HMDÇ) karşılaştırmalı olarak etkisi incelenmiştir. Böylece ÇTHŞ'nin eksenel simetrik parçalarda şekillendirmeye etkisi ve avantajı ortaya konmuştur. ÇTHŞ prosesinde, yükleme profillerinin deneme-yanılma metoduyla bulunması mümkün değildir. Yükleme profillerinin optimuma en yakın değerlerinin elde edilmesi için, analizlerde bulanık mantık algoritmalarının kullanıldığı adaptif kontrol yöntemi uygulanmıştır. Böylece simülasyonlarda şekillendirilecek malzeme ve kalınlık bilgileri girildiği zaman, hemen hemen minimum buruşma ve homojen bir kalınlık dağılımını oluşturup uygun üretimi yapacak yükleme profilleri bulunmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

ÇTHŞ ile HDMÇ prosesleri birbirine benzerdir. ÇTHŞ’de, HMDÇ’deki şekillendirme basıncına ek olarak sacın diğer yüzeyine etkiyen ikinci bir basınçlı ortam (karşı basınç) bulunmaktadır. Basınçlı ortamlar farklı olsa da bu iki prosesin başarısını etkiyen faktörler temel olarak benzerdir. Örneğin; ÇTHŞ’de sac iş parçası, şekillendirme basıncıyla ıstampaya sıvanmaya başladıktan belirli bir süre sonra karşı basınç uygulanmaya başlanmalıdır. Aksi takdirde şekillendirme basıncıyla artan ıstampa-sac arasındaki sürtünme kuvvetleri, karşı basınçla azalarak sacın yırtılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ÇTHŞ prosesinin başlangıcında karşı basınç belirli bir süre uygulanmamaktadır. Yani ÇTHŞ, HMDÇ ile başlayıp(sadece şekillendirme basıncı) daha sonra karşı basıncın uygulanmasıyla(şekillendirme basıncı+karşı basınç) çift taraflı basıncın oluşmasıyla sona erer. Bu nedenlerden dolayı ÇTHŞ ile olduğu kadar HMDÇ prosesi ile ilgili araştırmalardan da faydalanılmıştır.

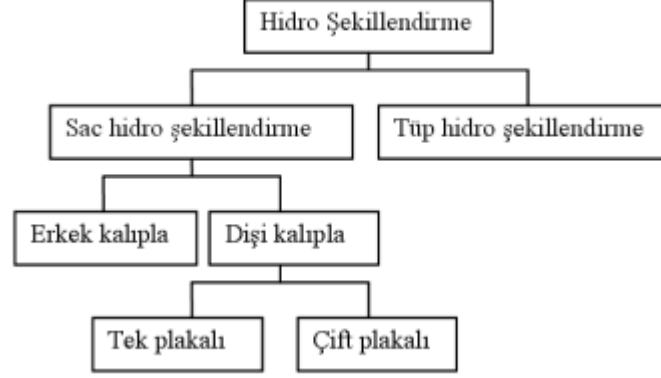
Bu bölümde öncelikle sac hidro-şekillendirme prosesi ve çeşitleri anlatılmış, HMDÇ prosesinin başarısına etki eden parametreler ve yükleme profillerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemler araştırılmıştır. Daha sonra çift taraflı hidro-şekillendirme konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Son olarak da hidro-şekillendirme proses simülasyonlarında kullanılan adaptif kontrol çeşitleri, algoritmaları ve uygulamaları hakkındaki çalışmalar incelenmiştir.

2.1. Hidro-şekillendirme

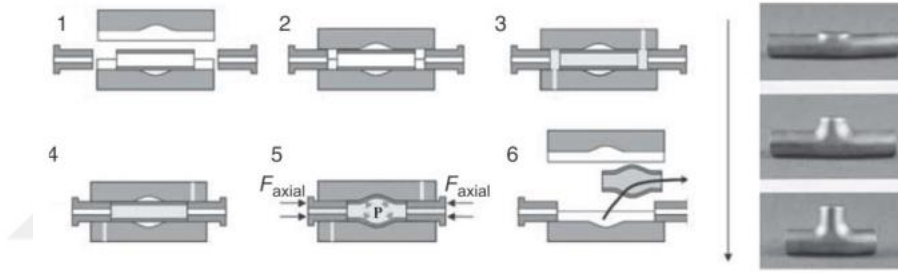
Hidro-şekillendirme sac veya boru şeklindeki malzemelerin kalıp yerine sıvı basıncı yardımıyla şekillendirilmesinde kullanılan ileri bir imalat teknolojisidir. Hidro-şekillendirme; sac hidro-şekillendirme ve tüp hidro-şekillendirme olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.1). Sac hidro-şekillendirmenin de erkek kalıpla sac hidro-şekillendirme (hidromekanik derin çekme) ve dişi kalıpla sac hidro-şekillendirme (yüksek basınçlı hidro-şekillendirme) olmak üzere iki çeşidi vardır. Dişi kalıpla sac hidro-şekillendirme ise kullanılan sacın tek ve çift plakalı olmasına göre ikiye ayrılmaktadır (Altan, 2006).

Sac hidro-şekillendirmede sac malzeme, yüksek basınçtaki sıvının etkisiyle erkek veya dişi kalıbın şeklini almaktadır. Tüp hidro-şekillendirmede ise Şekil 2.2’de görüldüğü gibi düz ya da önceden belirli bir geometride bükülmüş boru parçası eş zamanlı olarak uygulanan eksenel kuvvet ve iç basınç veya sadece iç basınç yardımıyla, alt ve üst kalıbın

oluşturduğu boşluğun şeklini almaktadır (Koç ve Taylan, 2001). Bu tez çalışmanın konusu sac hidro-şekillendirme olduğu için burada tüp hidro-şekillendirmeden bahsedilmemiştir.



Şekil 2.1. Hidro-şekillendirme yönteminin sınıflandırılması (Altan, 2006)

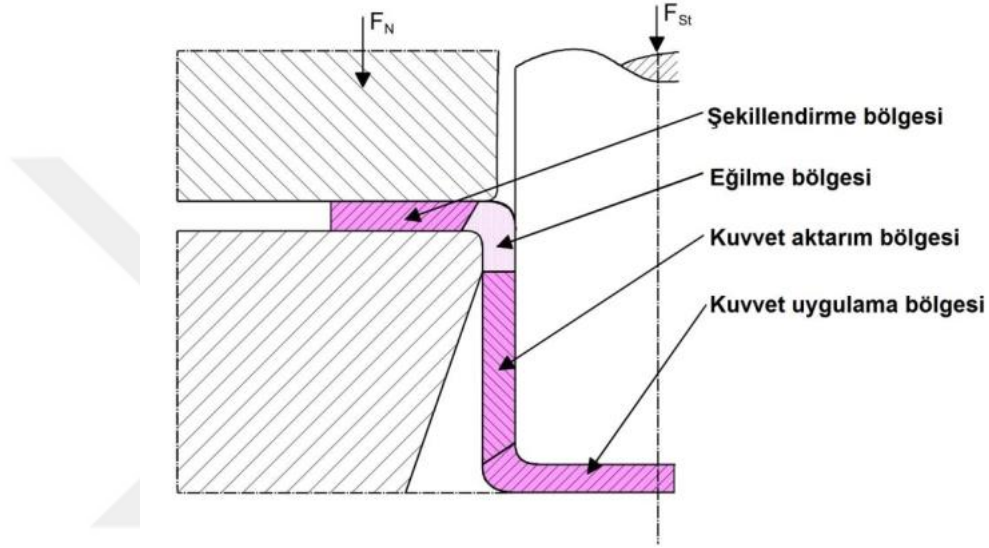


Şekil 2.2. Tüp hidro-şekillendirme (Koç ve Cora, 2008)

2.1.1. Sac Hidro-şekillendirme

Klasik bir kalıpla, parçalar iki kalıp arasında şekillendirilirken, sac hidro-şekillendirme yönteminde erkek veya dişi kalıptan biri kullanılmaktadır. Erkek kalıpla sac hidro-şekillendirme, diğer bir adıyla Hidromekanik Derin Çekme (HMDÇ), prosesinde klasik derin çekmede 3-4 kademede çekilebilecek kadar derin parçalar bile tek bir kademede şekillendirilebilirken, dişi kalıpla sac hidro-şekillendirmede sac malzeme sıvı basıncı etkisiyle kalıp duvarlarına yapışıp, malzemenin akması zorlaştığı için nispeten daha sığ parçalar şekillendirilebilir. Sac hidro-şekillendirme yönteminde farklı kalınlıktaki saclar tek bir kalıpla şekillendirilebilmektedir. Bu sayede kalıp uyumu aranmamakta ve daha düşük kalitedeki malzemelerle kalıp imalatı mümkün olmaktadır. Böylece kalıp masrafları %90'a varan oranda azalmaktadır. Ayrıca sıvının esnekliğinden yararlanılarak çok karmaşık şekillerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemde

sac malzemenin tüm yüzeyinde homojen dağılmış bir yük dağılımı olduğu ve erkek kalıp (ıstamp) ile sac arasındaki sürtünme kuvveti Şekil 2.3'de görülen ve derin çekme işleminde parçanın cidar kesitinde (kuvvet aktarım bölgesi) oluşan çekme kuvvetini azalttığı için sacda incelmeler daha az olmakta ve homojen bir kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Bu nedenle saclar daha fazla şekillendirilebilmektedir (Zhang, 1999). Ayrıca hidro-şekillendirme ile üretilen parçalar daha yüksek mukavemete, daha iyi boyutsal ve geometrik doğruluğa ve daha düşük yüzey pürüzlüğüne sahip olabilmektedir (Zhang ve ark., 2004).



Şekil 2.3. Sac malzemenin derin çekilmesinde gerilme bölgeleri (Siegert ve Wagner, 1994)

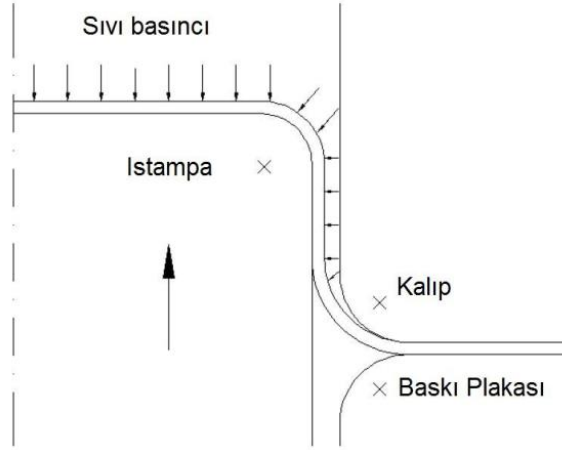
Sac metal parçalar uzay, otomobil, yüksek hızlı tren endüstrisi gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Dehghani ve Salimi, 2016; Lu ve ark., 2014). Özellikle havacılık ve otomobil endüstrilerinde, kademeli olarak yakıt tasarrufu ve yapısal ağırlık azalması gereksinimi ile alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımı gibi hafif malzemeler giderek daha fazla uygulama alanı kazanmıştır (Liu ve ark., 2008). Bu endüstri kollarında, ağırlık ve yakıt sarfiyatını azaltmak için, mukavemet/ağırlık oranları yüksek olduğu için, hafif alaşımlar, özellikle alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır (Choi ve ark. 2007a). Alüminyum alaşımlarından, ağırlık azaltılmasının yanında, üstün korozyon direnci, yüksek geri dönüşüm oranı ve kaza anında yüksek enerji absorbe etme özelliklerinden dolayı da yararlanır. (Gedikli ve ark. 2011).

Hidromekanik Derin Çekme (HMDÇ) işlemi karmaşık yapıdaki sac parçaları şekillendirmek için yaygın şekilde kullanılan bir üretim yöntemidir. HMDÇ prosesi hidrostatik derin çekme, hidrodinamik derin çekme ve radyal basınçlı derin çekme gibi

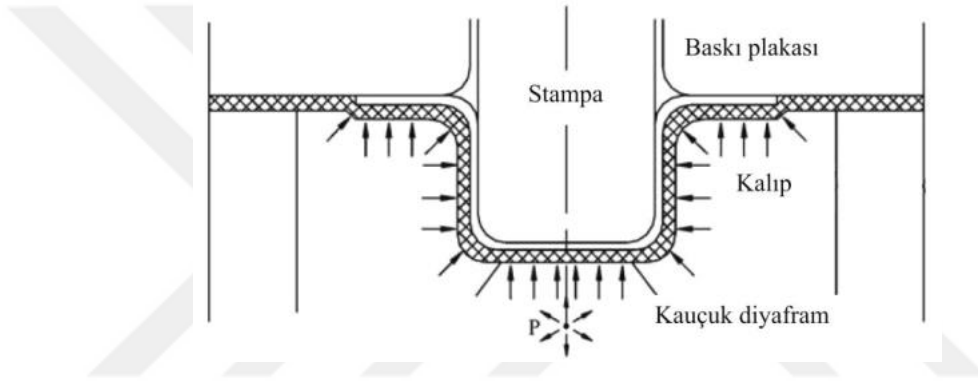
çeşitleri bulunmaktadır (Zhang ve Danckert, 1998). HMDÇ işleminde, sıvı basıncı, baskı plakası kuvveti, sac ile kalıp ve sac ile baskı plakası arasındaki sürtünme kuvveti, ıstampa geometrisi, ön şişirme basıncı gibi parametreler prosesin başarısını ve şekillendirilmiş sacın kalitesini etkileyen parametrelerdir. Sürtünmeyi mümkün olduğu kadar azaltmak için, sac ile kalıbın düz kısmı arasında ve sac ile baskı plakası yüzeyi arasında yağlama yapılmalıdır. Ancak sac ile ıstampa arasındaki sürtünme sacdaki lokal incelmeleri azaltıp, çekme oranını (Limited Drawing Ratio, LDR) arttıracak için bu yüzeylerde sürtünmeyi azaltacak herhangi bir işlem yapılmaması gerekir. HMDÇ prosesinde yüksek çekme oranlarına ulaşılabilmesinin en önemli nedeni de sac ile ıstampa arasında sıvı basıncı yardımıyla oluşan sürtünme kuvvetidir. Bu sayede lokal incelmeler azaltılır ve daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabilir (Zhang, 1999).

2.1.1.1. Hidromekanik derin çekme

Hidromekanik derin çekme prosesinde Şekil 2.4'de görüldüğü gibi temel olarak basınç kabı (kalıp) ve baskı plakası arasına yerleştirilen sac malzeme, ıstampa ilerlerken sıvı basıncı yardımıyla ıstampa şeklini alır. Hidromekanik derin çekme prosesi, sıvı basıncının uygulama yöntemine ve prosesin özelliğine göre çeşitlilik gösterir. Bu yöntemlerden birinde, Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, sac ve yüksek basınçlı sıvı arasında kauçuk diyafram kullanılmakta ve bu yöntemle esnek şekillendirme (flexforming) adı verilmektedir (Zhang 1999). Zhang ve ark. (2004)'e göre sac hidro-şekillendirme prosesinde sac ve basınçlı akışkan arasında kauçuk diyafram kullanıldığı bu proses eski zamanlara dayanmaktadır. Esnek şekillendirme yöntemi günümüzde de otomotiv endüstrisinde büyük boyutlu parçaların şekillendirilmesinde ve küçük ölçekli seri olmayan prototip üretiminde halen kullanılmaktadır. Bu sistemin daha iyi yüzey kalitesi ve daha karmaşık iş parçalarının üretilmesi gibi birçok avantajları mevcuttur. Fakat aynı zamanda bu sistemin düşük proses verimi ve ağır preslere ihtiyaç duyması gibi dezavantajları da vardır. Bunlara ek, bu sistemde diyaframın kolay parçalanma tehlikesi olup sac malzemedeki buruşmayı kontrol etmek zordur.



Şekil 2.4. HMDÇ prosesi

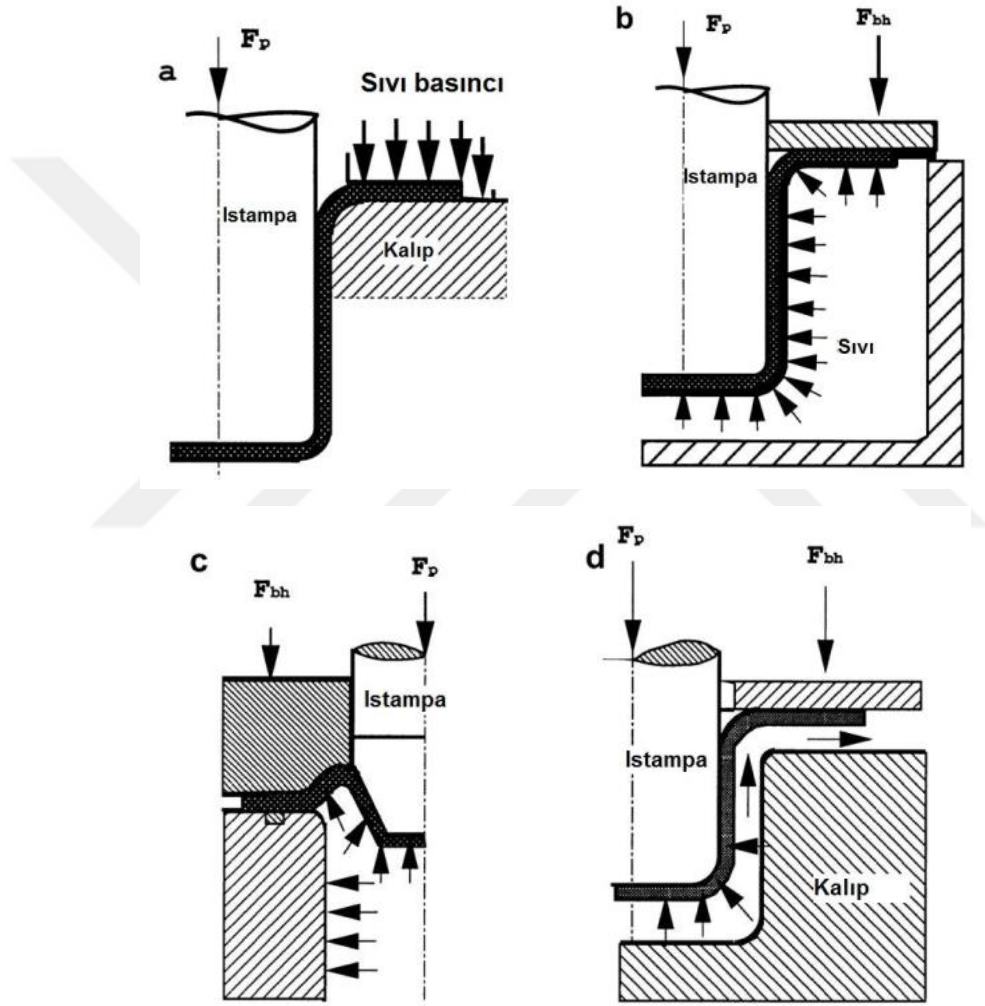


Şekil 2.5. Kauçuk diyaframlı sac hidro-şekillendirme prosesi (Zhang ve ark., 2004)

Kauçuk diyaframın başka sac üzerine sıvı basıncının gelişine göre erkek kalıpla sac hidro-şekillendirme yönteminin Şekil 2.6 'da görüldüğü gibi farklı çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 2.6a'da görülen yöntemde sac malzemenin flanş bölgesine baskı plakası yerine sıvı basıncı ile bir baskı plakası kuvveti uygulanmaktadır. Bu yöntemde baskı plakası bulunmadığı için sürtünme kuvvetlerinin azalmasından dolayı Sınır Çekme Oranının (SÇO) 2.3 değerine kadar arttığı belirtilmiştir (Zhang ve Danckert, 1998).

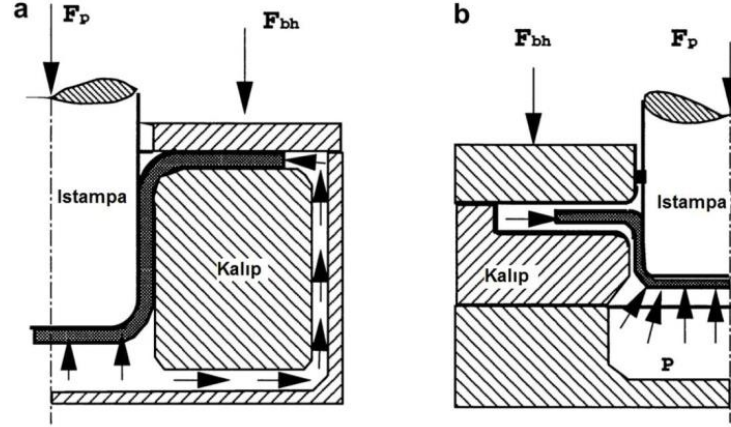
Şekil 2.6b'de görülen yöntemde dişi kalıp tamamen kaldırılarak sıvı basıncı tüm saca ince bir kauçuk diyafram üzerinde etki etmektedir. Bu yöntemde sıvı basıncının yetersiz olması durumunda sac üzerinde buruşmaların meydana geldiği, bu nedenle de sıvı basıncı değerinin çok önemli olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.6c'de dişi kalıbın sıvı basıncıyla yer değiştirdiği ve son parça şeklinin erkek kalıp tarafından belirlendiği ve sıvının kalıptan dışarı çıkışının sızdırmazlık elemanlarıyla engellendiği hidromekanik derin çekme prosesi görülmektedir. Bu proseste baskı plakasının fonksiyonu klasik şekillendirmedekiyle aynıdır. Yapılan araştırmalarda bu prosesin diğer yöntemlere göre

daha çok kullanıldığı görülmüştür. Şekil 2.6d’de ise sızdırmazlık elemanı kullanılmayıp ıstampa hareketi sırasında sıvı basıncı oluşturulmakta ve sıvının dışarı kaçmasına izin verilmektedir. Hidrodinamik derin çekme olarak isimlendirilen bu yöntemde sıvı basıncını ayarlamaya gerek olmadan parça şekillendirmenin mümkün olduğu belirtilmiştir. Meng ve ark. (2014) çalışmalarında bu yöntemle ilgili yapılan çalışmalar ve uygulamalar anlatılmıştır. Ayrıca bu çalışmada hidrodinamik derin çekme prosesinde sıvı basıncının aktif olarak kontrol edilmesi için yeni bir yöntem önerilmiş ve sonuçta şekillendirilebilirliğin arttığı belirtilmiştir.



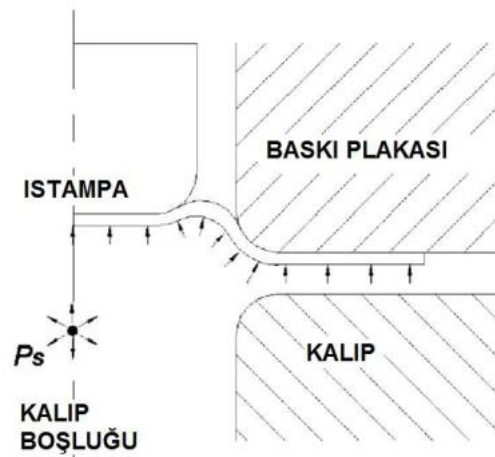
Şekil 2.6. Hidromekanik derin çekme yönteminin farklı çeşitleri (Zhang ve Danckert, 1998)

Hidromekanik derin çekme prosesinde daha yüksek şekillendirilebilirlik elde etmek amacıyla sacın çevresinden radyal olarak sıvı basıncının uygulandığı Şekil 2.7’de görülen radyal basınç destekli hidromekanik derin çekme prosesinde 3.3 SÇO değerlerine kadar ulaşılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir (Zhang ve Danckert, 1998).



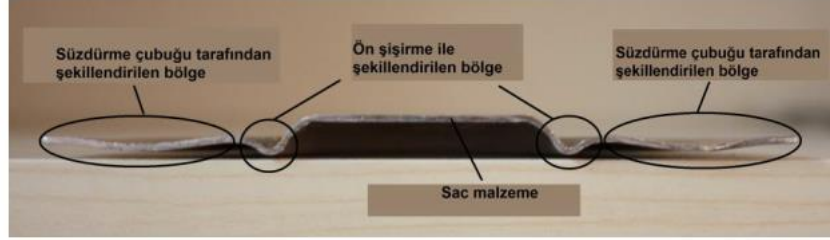
Şekil 2.7. Radyal basınç destekli hidromekanik derin çekme prosesi (Zhang ve Danckert, 1998)

HMDÇ prosesinde şekillendirilebilirliği artırmak için Lang ve ark. (2004) tarafından önerilen bir yöntemde, ıstampa sacdan belirli bir mesafe geride dururken bir ön şişirme basıncı uygulanmakta ve daha sonra ıstampa ilerleyerek sacı şekillendirmektedir (Şekil 2.8). Bu yöntemin iki etkisi vardır. Birincisi şekillendirmenin başlangıcında basınç oluşturmak ve diğeri de sacın ıstampa uç radyüsünü saracak bölgelerinde ön şekillendirme yaparak malzemenin pekleşmesi yoluyla yırtılmaya karşı direncini artırmaktır. Bu çalışmada ön şişirmenin 2 parametresi olan ön şişirme basıncını ve yüksekliğini ayarlayarak %27 ve %36 yüzde uzama değerlerine sahip AA6016-T4 ve AA1050-H0 malzemeleri için sırasıyla 2.46 ve 3.11 SÇO değerlerine kadar çıktığı belirtilmiştir.



Şekil 2.8. HMDÇ prosesinde ön şişirme yöntemi

Malzemelerin şekillendirilebilirliğinin artırılması amacıyla yeni bir yöntem olarak Halkacı ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada baskı plakasına süzdürme çubuğu benzeri unsurlar eklenmiş ve malzemelerin SÇO değeri artırılmıştır. Bu çalışmada sadece ıstampa uç radyüsü bölgesinin pekleşmesini sağlayan ön şişirme yönteminin yanında malzemenin tüm flanş bölgesinin pekleşmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada en yüksek şekillendirilebilirlik için optimum süzdürme çubuğu boyutları SE analizleri ile belirlenmiş ve önerilen yöntemle AA5754-O alaşımının SÇO değeri düz baskı plakasının kullanıldığı duruma göre 2.65'den 2.787 değerine kadar çıkartılmıştır. Ayrıca parametrelerin önemini belirlemek için uygulanan ANOVA yöntemiyle süzdürme çubuğunun yüksekliği en etkili parametre çıkarken, ön şişirme basıncının da ön şişirme yüksekliğinden daha etkili olduğu belirlenmiştir.

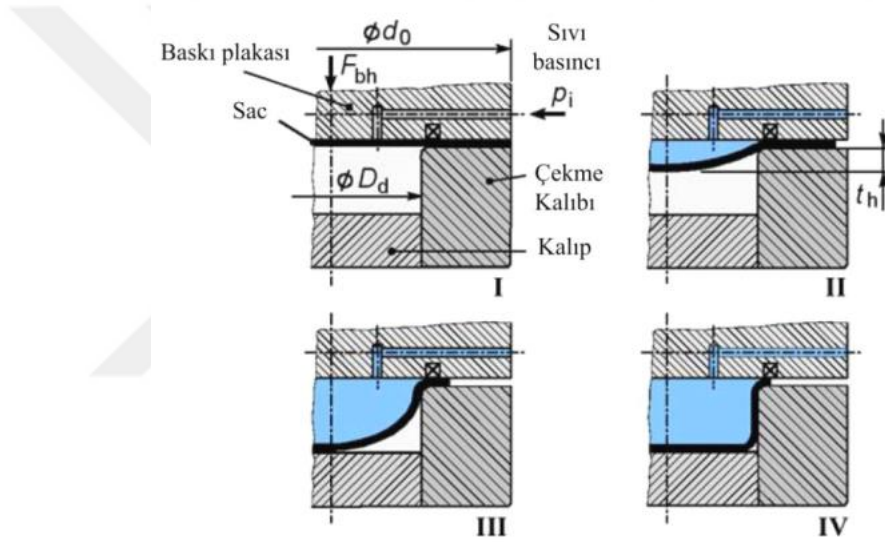


Şekil 2.9. Sac malzemenin tüm flanş bölgesinin pekleşmesi sağlanarak SÇO değerinin artırılması

2.1.1.2. Dişi kalıpla sac hidro-şekillendirme

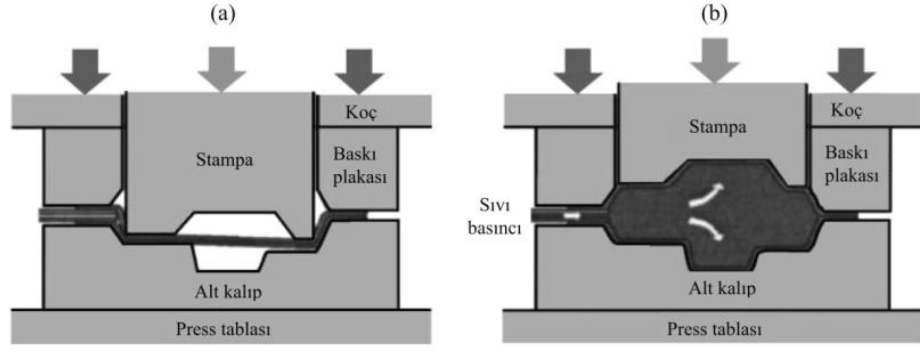
Dişi kalıpla sac hidro-şekillendirme diğer adıyla yüksek basınç (tek plakalı) hidro-şekillendirme yöntemi yüksek basınçtaki sıvının bir ıstampa görevi gördüğü böylece kalıp masrafları ve iş gücünden kazanç sağlandığı bir serbest hidro-şişirme prosesidir (Önder ve Tekkaya, 2008). Bu proseste önemli parametreler sıvı basıncı, baskı plakası (üst kalıp) kuvveti ve kalıpların şeklidir. Bu yöntemde sac malzeme üst ve alt kalıpları arasına yerleştirildikten sonra son geometri alt kalıp tarafından verilmektedir. Kalıplar kapatıldıktan sonra sac metal üzerine üst kalıba entegre edilmiş bir kanal yardımıyla basınç uygulanmaktadır. Temel olarak şekillendirme prosesi 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama üst kalıptan alt kalıba doğru olan serbest malzeme akışı ile karakterize edilmektedir (Şekil 2.10 II, III). Şekillendirme boyunca sıvı akışkanın sızıntısını ve kontrolsüz malzeme akışını önlemek için verilen basınca karşı üst kalıp kuvvetinin de ayarlanması gerekmektedir. Bu aşamada, eğer yeteri kadar parça miktarı alt kalıpla temas halinde ise iş parçası neredeyse tamamen şekillendirilmiş konumdadır. İkinci aşama ise

daha yüksek iç basınç yardımıyla parça kalibrasyonunu içermektedir (Şekil 2.10 IV). Proses sonunda kalıplar açıldıktan sonra tek bir iş parçası elde edilmektedir (Groche ve Metz, 2006). Kleiner ve ark. (2004)'e göre dişi kalıpla hidro-şekillendirme prosesi, geleneksel derin çekme prosesi ile karşılaştırıldığında, yüksek şekil ve boyut doğruluğu ya da yüksek mukavemet gibi teknolojik avantajlarının yanında aynı zamanda belirli geometriler için işlem adımlarını da azaltmaktadır. Bu yöntemin hidromekanik derin çekmeye göre bir dezavantajı, basınçtan dolayı sac ve kalıp ara yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetinin etkisiyle derinliği fazla olan parçaların üretilmesi mümkün olmamaktadır. Ancak bu proseste hidromekanik derin çekmede olduğu gibi ıstampa konumuna bağlı bir sıvı basıncı eğrisinin elde edilmesine gerek yoktur.



Şekil 2.10. Yüksek basınç (tek plakalı) hidro-şekillendirme prosesi ve adımları (Kleiner ve ark., 2004)

Çift plakalı hidro-şekillendirme, yüksek basınç hidro-şekillendirme ile aynı işlem adımlarına sahiptir. Bu prosesin farkı, üst kalıbın da alt kalıp gibi bir boşluk içermesidir. Bu proseste plakalar (sac malzemeler) belirli bir çekme derinliğine kadar geleneksel derin çekme ile şekillendirildikten sonra (Şekil 2.11a) bu iki plaka arasına hidrolik sıvı gönderilmektedir. Böylece alttaki sac alt kalıbın şeklini alırken üstteki sac ise ıstampa şeklini almaktadır (Şekil 2.11b). Bu proseste hidro-şekillendirme sırasında ıstampa belirli bir konuma kadar geri çekilebilmektedir (Siegert ve ark., 2000). Bu prosesin tek plakalı hidro-şekillendirme işlemine göre avantajı bir şekillendirme çevriminde 2 adet parçanın üretilmesidir. Bu proses çok yaygın kullanılmamakla birlikte hâlâ geliştirme aşamasındadır.



Şekil 2.11. İç yüksek basınç (çift plakalı) hidro-şekillendirme: (a) çift plakaların derin çekilmesi, (b) hidro-şekillendirme ile dönüşüm ve kalibrasyon (Siegert ve ark., 2000)

2.1.2. Hidromekanik derin çekme prosesini etkileyen önemli parametreler

HMDÇ prosesinde sıvı basıncı, baskı plakası kuvveti, sac ile kalıp ve baskı plakası arasındaki sürtünme, ıstamp ve kalıp radyüsleri, ön şişirme basıncı ve yüksekliği gibi faktörler bu prosesin başarısını ve dolayısıyla şekillendirilebilirliği etkileyen önemli parametrelerdir (Zhang ve ark., 2000a).

Sıvı basıncı, HMDÇ prosesinin başarısını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Sıvı basıncı neticesinde sac ile ıstamp arasında oluşan sürtünmenin varlığı HMDÇ prosesinde şekillendirilebilirliği artırmaktadır (Thiruvardhelvan ve Travis, 2003). Fakat HMDÇ prosesinde sıvı basıncının fazla olması da sac metalin yırtılma ihtimalini artırmaktadır. Bu nedenle Zhang (1999)'a göre HMDÇ prosesiyle şekillendirilebilirliğin artırılması için ıstamp strokuna göre sıvı basıncının en uygun değerleri hesaplanmalı ve deneylerde uygulanmalıdır. Sıvı basıncı HMDÇ prosesinde ya aktif olarak dışarıdan bir pompa veya basınç yükseltici yardımıyla kontrollü olarak uygulanmakta ya da pasif olarak ıstampın sıvıyı sıkıştırma etkisiyle oluşturulmaktadır.

HMDÇ prosesinde sacdaki radyal gerilmeyi ve çekme yükünü büyük ölçüde etkileyen önemli proses parametrelerinden biri de baskı plakası kuvvetidir (Candra ve ark., 2015). Baskı plakası kuvvetinin ayarlanması sac hidro-şekillendirme prosesinde önemli bir yere sahiptir. Çünkü uygulanan baskı plakası kuvveti şekillendirme işleminde malzeme akışını kontrol eder ve sızıntıyı önlemek için gerekli kuvveti sağlar. Buruşma ise sac metal şekillendirme prosesi esnasında oluşabilen kararsızlık türlerinden biridir. Şekillendirme esnasında baskı plakası kuvvetinin (BPK) fazla olması sacın flanş bölgesinden çekilebilirliğini azaltmakta ve bir süre sonra sacın yırtılmasına sebep olmaktadır. BPK'nın az olması ise sacın flanş bölgesinin buruşmasına neden olmaktadır.

Bu nedenle sıvı basıncı gibi baskı plakası kuvvetinin de ıstampa strokuna göre en uygun değerlerinin belirlenmesi sacın proses boyunca buruşma ve yırtılma olmadan kararlı bir şekilde şekillendirilebilmesi için önemlidir (Akay ve ark., 2014).

HMDÇ prosesini etkileyen önemli parametrelerden biri de sac ve kalıplar arasındaki sürtünmedir. Sacın baskı plakası ve kalıp arasındaki sürtünmesi sacın cidar bölgesindeki çekme gerilmelerini artırarak, şekillendirilebilirliği olumsuz olarak etkiler. Istamp ve sac arasındaki sürtünme ise HMDÇ prosesinde şekillendirebilirliği artıran temel etkindir (Halkacı ve ark., 2011). Bu nedenle sac ile kalıp ve baskı plakası yüzeyleri arasındaki sürtünmenin yağlayıcılar uygulanarak sürtünmenin mümkün olduğunca azaltılması gerekirken sac ve ıstampa arasında ise yağlayıcı kullanmaya gerek yoktur (Zhang ve ark., 2000). Metal şekillendirme prosesinde sürtünme, sacdaki birim şekil değiştirme (BŞD) dağılımının ve sac metalin çekilebilirliğinin yanında kalıpların aşınma durumunu da etkilemektedir (Singh ve Agnihotri, 2015).

Istampa burun ve kalıp radyüsü HMDÇ prosesinde şekillendirilebilirlik açısından önemlidir. Radyüslerin küçük olması büyük eğme gerilmelerinin oluşmasına yol açıp erken hasarlarla karşılaşılmasına neden olur. Kalıp radyüsünün büyük olması da sacın buruşmasına etki eder (Lang ve ark., 2004). Padmanabhan ve ark. (2007)'ye göre küçük kalıp radyüsünün kullanılması kalıp boşluğuna akan malzeme miktarını azaltmakta, büyük kalıp radyüsünün kullanılması ise proses sonunda aşırı malzeme budanmasına ve geri yaylanma karakteristiğine sebep olmaktadır. Bu proste uygun bir kalıp radyüsü kullanılması bir yandan düzgün bir malzeme akışına sebep olurken, diğer yandan ise geri yaylanma ve malzeme israfını azaltmaktadır.

Daha önce bahsedilen ön şişirme işleminin iki parametresi vardır. Biri ön şişirme yüksekliği diğeri de ön şişirme basıncıdır. Başarılı bir HMDÇ prosesi için bu parametrelerin uygun değerleriyle şekillendirme yapılması gerekir. Zhang ve ark. (1998)'e göre ön şişirme, malzemenin daha üniform uzamasına ve daha büyük sac çaplarının ıstampayla temas etmesini kolaylaştırıp sac ve ıstampa arasındaki sürtünmeyi artırmaktadır. Dolayısıyla ön şişirmenin etkisi ile buruşma ihtimalini azaltan güçlü bir radyal gerilme meydana gelmekte ve şekillendirilebilirliği düşük olan malzemeler bile şekillendirilebilmektedir. Bu radyal gerilme radyal doğrultuda uzamaya neden olmakta ve çevresel doğrultudaki fazla malzemeyi çekerek buruşmayı da önlemektedir. Yukarıda belirtilen parametrelerin prosese etkilerini ve en uygun değerlerini belirlemek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Halkacı ve ark. (2011) çalışmasında optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri (yükleme profilleri) önce SE analizlerinde

deneme ve yanılma usulüyle belirlenmiş sonra deneylerde iyileştirilmiştir. Bu yükleme profilleri ile yapılan deneylerde AA 5754 malzemenin SÇO değeri 2.27 olarak bulunmuştur. Halkacı ve ark. tarafından 2012'de yapılan çalışmada ise daha önce deneme ve yanılma ile belirlenmiş yükleme profilleri daha da geliştirilmiş ve diğer proses parametrelerinden sac ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısı, ıstampa radyüsü, tek taraflı boşluk ile ön şişirme yüksekliği ve basıncının prosese etkisi için Taguçi deney tasarımı yöntemine göre simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen maksimum yüzde incelme değerleri ANOVA yöntemiyle analiz edilerek parametrelerin prosese etkileri Çizelge 2.1'deki gibi ortaya koyulmuştur. İncelenen parametreler içerisinde en etkili olanı %63,9 katkı oranıyla kalıp ve ıstampa arasındaki tek taraflı boşluk bulunmuştur. İkinci sırada sac ve kalıp arasındaki sürtünme katsayısı ve üçüncü sırada da ön şişirme yüksekliği etkili parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca ön şişirme yüksekliğinin ön şişirme basıncına göre çok daha etkili olduğu bulunmuştur. Istampasac arasındaki sürtünme katsayısının arttıkça sacda oluşan yüzde incelmenin azaldığı, ıstampa radyüsü 5 mm'den 7 mm'ye çıktığında ise yüzde incelmenin arttığı görülmüştür. Ancak belirtilen bu parametrelerin diğerlerine göre etkilerinin çok az olduğu bulunmuştur. Belirlenen uygun parametrelerle deneyler gerçekleştirildiğinde ise AA 5754 malzemenin klasik derin çekme prosesinde 2.1 olan SÇO, 2.5 değerine kadar artırılmıştır (Şekil 2.12).

Çizelge 2.1 Halkacı ve ark. (2012) çalışmasında elde edilen ANOVA hesap tablosunda parametrelerin etkileri

Sıra No	Faktör	Faktör seviyesine bağlı ortalama $\bar{\eta}$		D O F	Kareler toplamı	Kareler Ortalaması	Varyans Oranı	Katkı Oranı
		1	2					
1	A: Baskı Plakası ve Kalıp Sürtünme Katsayısı (Mbp)	-26.97	-29.94	1	8.83	8.83	1.66	16.3
2	B: Istampanın Sürtünme Katsayısı (Ms)	-29.26	-27.65	1	2.59	2.59	0.49	4.8
3	C: Istampanın Radyüsü (Rs)	-27.75	-29.16	1	1.99	1.99	0.37	3.7
4	D: Tek Taraflı Boşluk (d)	-25.51	-31.39	1	34.51	34.51	6.50	63.9
5	E: Ön şişirme yüksekliği (h_0)	-27.29	-29.61	1	5.38	5.38	1.01	10.0
6	F: Ön şişirme basıncı (P ₀)	-28.02	-28.88	1	0.73	0.73	0.14	1.3
Toplam				6	54.03			
(Hata)				3	5.31	1.77		



Şekil 2.12. Halkacı ve ark. (2012) çalışmasında AA 5754'ün klasik derin çekmede 2.1 olan SÇO değeri HMDÇ prosesiyle 2.5 değerine yükseltilmiştir

Turkoz ve ark. (2013) çalışmasına daha önce silindirik parça için belirlenmiş olan optimum yükleme profillerinin kare kabın HMDÇ prosesiyle şekillendirilmesinde kullanılabilirliği analizler yoluyla araştırılmıştır. Kare kabın derin çekilmesinde etkili parametreler olan köşe radyüsünün (R) ve sac kalınlığının (t) parça genişliğine (W) oranlarının prosese etkisi aynı yükleme profilleri için araştırılmıştır. Ancak burada silindirik parça için bulunun yükleme profilleri sac kalınlığına göre oranlanarak uygulanmıştır. Buna göre t/W oranı arttıkça ve R/W oranı azaldıkça şekillendirilebilirliğin düştüğü bulunmuştur (Çizelge 2.2). Sac parçada en az incelmeye veren oranlar R/W için 0.25 ve t/W için ise 0.0125 olarak belirlenmiştir. Bu oranların uygun değerlerinde ise silindirik parça için optimum olarak belirlenmiş olan yükleme profilleriyle kare kabın da başarıyla şekillendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

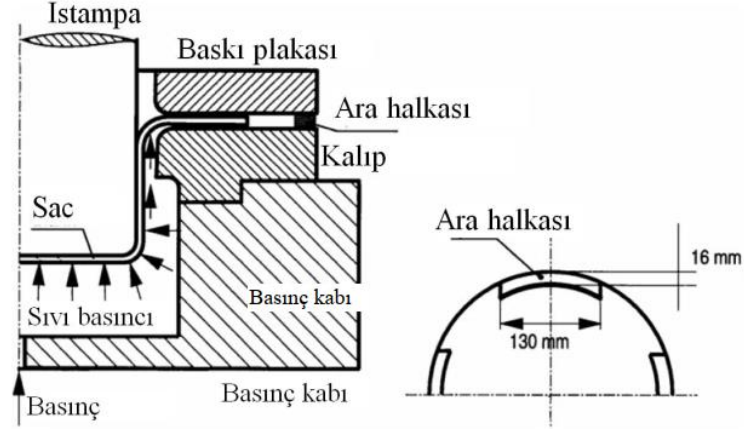
Çizelge 2.2. Turkoz ve ark. (2013) çalışmasında kare kap şekillendirme parametrelerinin prosese etkisi

	W (Parça Genişliği)	R (Köşe radyüsü)	T (Sac kalınlığı)	R/W	t/W	Maksimum incelme BŞD'si
1	40	5	0.5	0.125	0.0125	-0.22
2	40	5	1	0.125	0.025	-0.28
3	40	5	1.5	0.125	0.0375	-0.34
4	40	10	0.5	0.25	0.0125	-0.09
5	40	10	1	0.25	0.025	-0.10
6	40	10	1.5	0.25	0.0375	-0.13
7	60	7.5	0.75	0.125	0.0125	-0.40
8	60	7.5	1.5	0.125	0.025	-0.41
9	60	7.5	2.25	0.125	0.0375	-0.41
10	60	15	0.75	0.25	0.0125	-0.23
11	60	15	1.5	0.25	0.025	Hesaplanamadı
12	60	15	2.25	0.25	0.0375	Hesaplanamadı

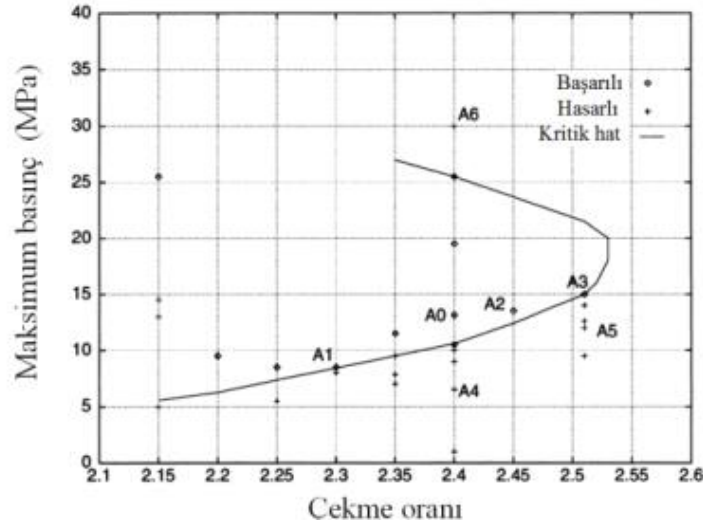
Akay ve ark (2014) çalışmasında ABAQUS SE yazılımında sıvı basıncının sac malzemenin kalıp boşluğu içerisine giren yeni elemanlarına deneylerdeki gibi gerçekçi olarak uygulanabilmesi için bir alt program yazılmıştır. Daha sonra gerçekleştirilen analizlerde daha önce deneysel olarak deneme ve yanılma ile belirlenmiş yükleme profilleri için belirli bir aralık taranarak sacda en az incelme veren profiller belirlenmiştir. Sonuçta sıvı basıncının gerçekçi olarak uygulanması ve yükleme profillerinin iyileştirilmesiyle sacdaki yüzde incelme %12.44'den %10.23'e düşürülmüştür.

Zhang ve ark. (2000) çalışmasında Şekil 2.13'de görüldüğü gibi sacın dış tarafında baskı plakası ve kalıp arasına 4 adet 1.11 mm kalınlığında spacer isimli parçalar yerleştirilerek aradaki mesafenin sabit olduğu durumda 1 mm kalınlığındaki çelik ve alüminyum sac malzemenin şekillendirilmesinde uygun basınç aralığı araştırılmıştır. Burada basınç pasif olarak uygulanmış ve basınç eğrisi, baskı plakası kuvveti, ayarlanan maksimum basınç değeri ve ıstampa hızı ile belirlenmiştir. Sonuçta başarılı parça şekillendirmek için maksimum basınç değerlerinin aralığı farklı SÇO değerleri için ortaya koyulmuştur. Lang ve ark. (2009) çalışmasında uçak sanayinde kullanılan iki parçanın HMDÇ prosesiyle üretilmesinde sac şekli optimize edilmiş ve sıvı basıncının parçaya etkisi hem sayısal hem de deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçta neredeyse lineer bir şekilde artırılan basınç için en uygun aralığın 18-25 MPa olduğu belirlenmiştir. Bu aralıktan düşük basınç değerlerinde gövde buruşması meydana geldiği, yüksek değerlerde ise yırtılma hasarı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmadan uygun basınç aralığı analiz ve deneylerde deneme ve yanılma ile tespit edilmiştir. HMDÇ prosesinde konik parçalar şekillendirilirken gövde buruşmasının çok kolay bir şekilde olduğu ve bu buruşmanın basınç yerine sac şeklini değiştirerek daha kolay bir şekilde giderildiği belirtilmiştir. Yukarıdaki her iki çalışmada da temel olarak hedeflenen parçaların şekillendirilmesi için sıvı basıncının maksimum değerleri ve uygun aralığı deneysel ve sayısal olarak deneme ve yanılma yoluyla belirlenmiştir. Bu yöntemde öncelikle SEA yazılımına farklı yükleme profilleri girilmektedir ve yapılan analizler sonucunda genelde sac malzemede buruşma ve/veya yırtılma olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eğer malzemede buruşma ve/veya yırtılma gözlemlenirse, daha önceden girilen yükleme profilleri birbirinden bağımsız bir şekilde değiştirilip tekrardan yazılıma girilmektedir. Bu işleme başarılı bir HMDÇ prosesi elde edilene kadar devam edilmektedir. Sonra elde edilen yükleme profillerinin uygunluğu deneylerde denenmektedir (Şekil 2.14). Bu metot oldukça vakit kaybettiren zahmetli bir yaklaşımdır. Deneme ve yanılma metodunun bu dezavantajını ortadan

kaldırmak için uygun yükleme profilleri, SEA yazılımları ile birlikte çalışan çeşitli kontrol algoritmaları ile belirlenmektedir.



Şekil 2.13. Zhang ve ark. (2000) çalışmasında deney sistemi



Şekil 2.14. Zhang ve ark. (2000) çalışmasında alüminyum için farklı SÇO'lar için belirlenmiş basınç aralığı

2.2. Çift Taraflı Sac Hidro-şekillendirme

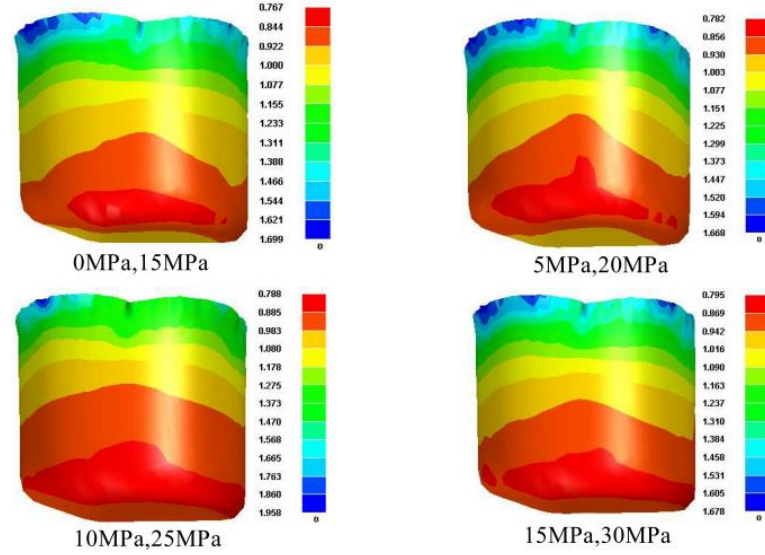
Çift taraflı sac hidro-şekillendirmede, hidromekanik derin çekmeye ek olarak ikinci bir basınç kabı bulunur. Bu ikinci sıvı basıncı şekillendirme sırasında sac üzerinde oluşan yüksek gerilmeleri yırtılma limitlerinin altında tutmak için kullanılır. Özellikle konik ve yarı küresel parçaların şekillendirilmesinde, düşük basınçtan dolayı ilk anda sac ıstampaya tam olarak sıvanamaz. Sac ile ıstampanın temas yüzeyinin az olması ilk andaki yırtılmaları tetikler. Bu olumsuz durumu bertaraf etmek için şekillendirme başlangıcında

Çift taraflı hidromekanik derin çekmenin hidromekanik kısmının yanında diğer bir avantajı da hidrostatik basıncın gerilme değerlerini olumlu yönde değiştirmesidir. Çift taraflı basınç hidrostatik gerilmeleri değiştirerek şekillendirme sırasında hasarlanma gerilmelerini artırmaktadır. Kao ve ark. (1990) hidrostatik basıncın, malzemenin şekillendirilebilirliğini arttırdığını deneysel olarak göstermişlerdir. Wu ve ark. (2009) hidrostatik basıncın, malzemenin şekillendirme limitlerini akma özelliklerini etkilemeden yükselttiğini gözlemlemişlerdir.

Wang ve ark. (2008) kalınlık doğrultusunda oluşan gerilmeleri incelemek amacıyla TC1 alüminyum alaşımlı sacı çift taraflı ve tek taraflı basınç uygulanacak şekilde şişirme testine maruz bırakmıştır. Sonuçta çift taraflı basınçla şekillendirilen sacın kalınlık birim şekil değiştirme değerleri artmış ve limit kubbe yüksekliği (limiting dome height, LDH) standart şişme yüksekliğine göre 31.8% artmıştır. Sonuçlar kalınlık doğrultusundaki normal gerilmelerin şekillendirilebilirliğe olumlu yönde etkidiğini göstermiştir.

Liu ve ark. (2017) çift taraflı basıncın etkisini göstermek için alüminyum alaşımlı sac kullanarak deney tasarımı yapılmıştır. Şekillenmiş parça üzerinde farklı basınç profillerinde kalınlık dağılımı sonuçları değerlendirilmiştir. Yükleme profillerinin (baskı plakası, alt basınç ve üst basınç) maksimum ve minimum değerleri daha önce yapılan analitik çalışmalardan alınmış olsa da deneylerde kullanılan eğriler rasgele belirlenmiştir. Saca karşı basınç uygulandığında en ince nokta sacın ekseninden kalıp radiusuna doğru kaymış ve gerilme değerleri artmıştır.

Feng (2011) pahlı geometriye sahip ıstampa geometrisi için, sac kalınlığındaki minimum incelmeyi performans kriteri olarak seçerek en uygun şekillendirme basıncı ve karşı basınç profillerini elde etmiştir. Burada şekillendirme basıncı 30MPa değerinde sabit tutup karşı basıncı 0-30 MPa arasında 5 MPa artıracak şekilde 0 MPa, 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa ve 30 MPa olarak seçmiş ve bunların her biri için analiz yaparak sac üzerinde minimum incelmeyi veren basınçları bulmuştur. Burada elde edilen şekillendirme basıncı ve karşı basınç arasındaki farkın sabit kalması gerektiği kabulünü yaparak şekillendirme basıncı değerini de değiştirerek en az incelmeye neden olan basınç eğrisini elde etmiştir (Şekil 2.16).



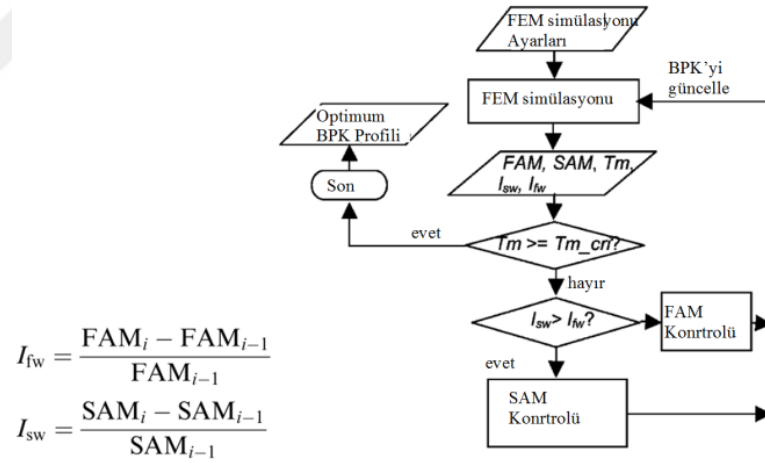
Şekil 2.16. Şekillendirme basıncı ve karşı basınç deneme profilleri

2.3. Hidro-şekillendirmede yükleme profillerinin elde edilmesi

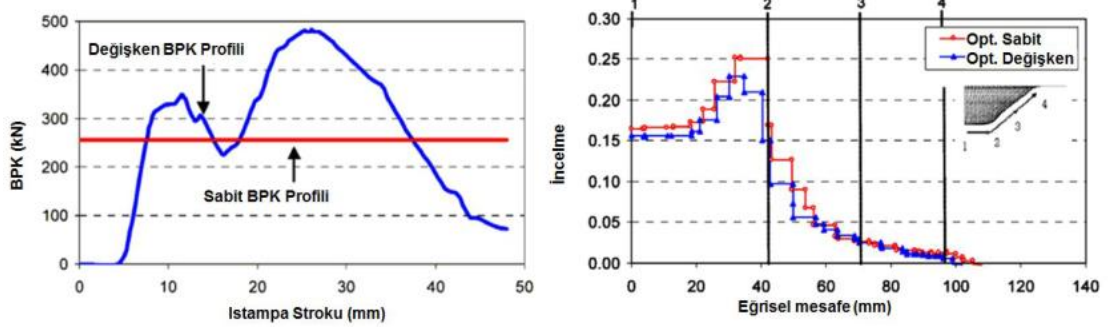
Şekillendirme proseslerinde parametrelerin uygun değerlerinin bulunması için literatürde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. İstatistiksel ve optimizasyon yöntemleriyle parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesi önceki fiziksel test ya da simülasyonlardan elde edilen bilgilere dayanmaktadır. Fakat yeni bir ürünün tasarımında genellikle bu bilgiler çok sınırlı olmaktadır. Bu nedenle değeri proses sırasında anlık olarak değişen sıvı basıncı ve BPK'nin optimum değerlerinin bulunabilmesi için araştırmacılar literatürde adaptif SE simülasyonları (Sheng ve ark., 2004), adaptif SE simülasyonlarıyla eş zamanlı çalışan bulanık mantık kontrol algoritmaları (Choi ve ark., 2007a; Intarakumthornchai ve ark. 2011) ve genetik algoritma (Shamsi-Sarband ve ark., 2012) yöntemlerini kullanmışlardır. Bu kontrol algoritmaları burkulma, buruşma veya yırtılma gibi erken hasar durumlarının belirlenmesi ve bu durumlardan kaçınılması için yapılmaktadır. Aynı zamanda bu algoritmalar, sıvı basıncı ve baskı plakası gibi proses parametrelerinin uygun değerlerinin bulunması için kullanılmaktadırlar. Bu tarz proses simülasyonu, proses parametrelerinin şekillendirme boyunca yeni koşullar altında sürekli olarak güncellendiği için adaptif proses simülasyonu olarak adlandırılmaktadır (Aydemir ve ark., 2005).

Sheng ve ark. (2004) çalışmalarında klasik derin çekmede BPK'nin simülasyon sırasında sürekli olarak ayarlanması için kapalı çevrim kontrol stratejisine benzeyen ve geri beslemeli bir kontrol olan adaptif simülasyon stratejisini geliştirmişlerdir. Böylece BPK profili tek bir simülasyon koşuturularak tahmin edilmiş ve hesap süresi kısaltılmıştır.

Bu yöntem iki adet konik kabın derin çekilmesi işleminde başarıyla uygulanmıştır. Bu yöntemde BŞD değerleri ve buruşma büyüklükleri kontrol algoritmasında maksimum parça incelmesi, flanş ve yan duvar buruşmasının her bir simülasyon adımında hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu durum değişkeni değerleri ile proportional plus integral (PI) kontrol algoritması BPK'nin ayarlanmasında kullanılmıştır. Bu kontrol stratejisi BPK'yi ayarlayarak buruşma büyüklüğünü kabul edilebilir bir seviyede tutmaya çalışmaktadır. Flanş bölgesinin buruşmaya eğilimi ilk çekme aşamasında en fazla olduğu için kontrol stratejisi flanş buruşmasını kontrol ile başlamaktadır (Şekil 2.17). Daha sonra yan duvar (FAM) ve flanş (SAM) buruşmasından hangisine göre kontrol yapılacağına, buruşma eğilimi göstergelerinden (I_{sw} ve I_{fw}) hangisinin büyük olduğuna göre karar verilmektedir. Yöntemin etkinliği konik parçaların derin çekilmesinde adaptif simülasyon ile belirlenen BPK ve duyarlılık (sensitivity) analizleri ile optimum olarak belirlenmiş sabit BPK kullanılması durumunda meydana gelen parça kalınlıklarının karşılaştırılması yoluyla belirlenmiştir (Şekil 2.18). Şekilden görüldüğü gibi adaptif simülasyon stratejisi ile belirlenen BPK, sabit BPK'ye göre sac malzemedeki yüzde incelme değerini %25'den %23'e düşürmüştür.

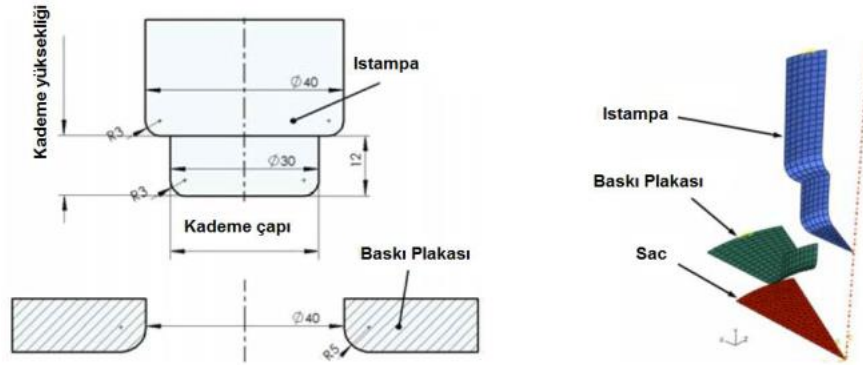


Şekil 2.17. Adaptif simülasyon stratejinin akış şeması

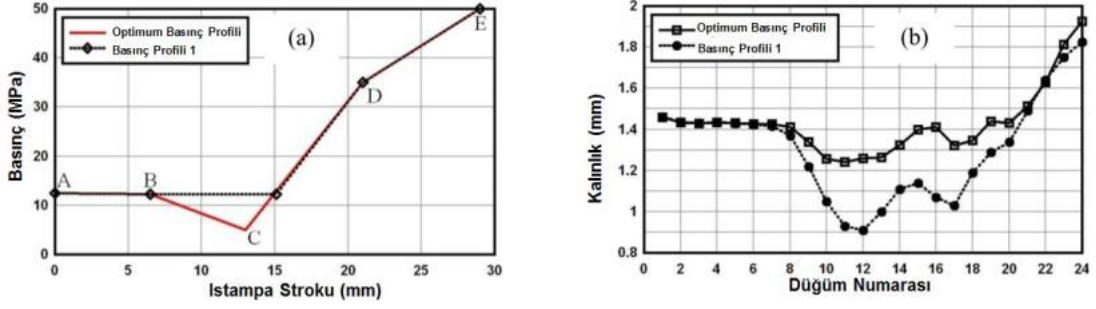


Şekil 2.18. Adaptif simülasyonlarla ve duyarlılık analizleri ile belirlenen BPK profilleri ile bu profil kullanılarak yapılan şekillendirme analizlerinde meydana gelen kalınlık karşılaştırması (Sheng ve ark. 2004)

Shamsi-Sarband ve ark. (2012) çalışmalarında iki kademeli bir parçanın HMDÇ yöntemi ile üretilmesi için gerekli optimum sıvı basıncı profilini, sonlu elemanlar modelinde genetik algoritma kullanarak belirlemişlerdir. Sonuçta iki kademeli iş parçasının (Şekil 2.19) klasik derin çekme yöntemine göre büyük bir avantajla tek kademede üretilebileceği önerilmiştir. Çalışmada kullanılan genetik algoritmalı kontrol stratejisi sayesinde sıvı basıncı eğrisinde en düşük değerin parça üzerindeki kademe şekillendirilirken oluştuğu bulunmuş böylece deneme ve yanılma olmadan kısa sürede optimum basınç profili belirlenebilmiştir. Şekil 2.20’de görüldüğü üzere basınç profilinde bu düşme olmadığı durumda incelme önemli oranda artmıştır.



Şekil 2.19. Shamsi-Sarband ve ark. (2012) çalışmasında şekillendirilen iki kademeli iş parçası

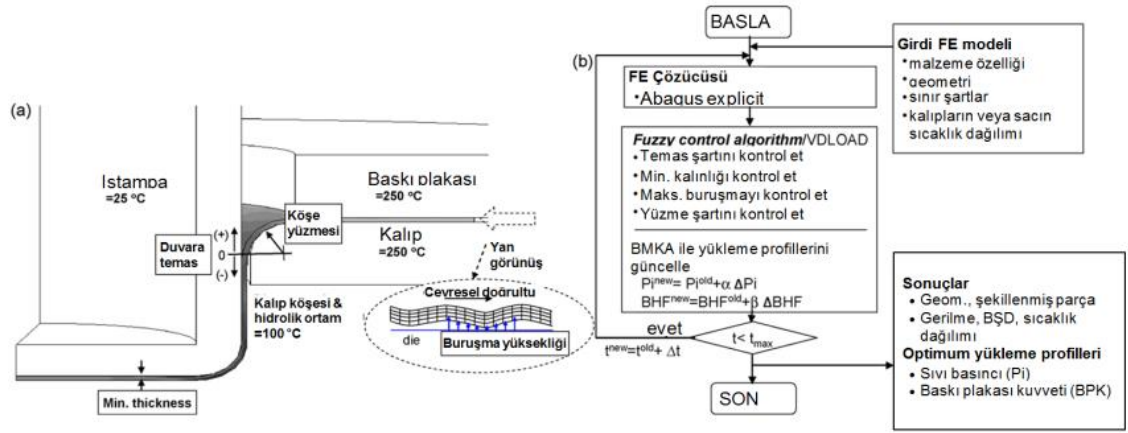


Şekil 2.20. Shamsi-Sarband ve ark. (2012) çalışmasında belirlenen optimum sıvı basıncı profili ve kalınlık dağılımı

Koyama ve ark. (2003) silindirik kapların derin çekilmesi işleminde proses sırasında optimum baskı plakası kuvvetinin şekillendirilen parça üzerinden yapılan ölçümlerle belirlenebilmesi için bulanık-adaptif tabanlı bir proses kontrol algoritması geliştirmişler ve sonuçta prosesin SÇO'sunu artırmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarında 1 mm kalınlıkta alaşımlı A5182-O alüminyum sac malzeme kullanmışlardır. Geliştirdikleri bulanık kontrol sistemi, maksimum görülebilir kalınlık (maximum apparent thickness) ve flanş azalma oranı olan flanş sonu deplasmanının ıstampa radyüsüne oranı ΔDR giriş değişkenlerini içermektedir. Çalışmalarında maksimum görülebilir kalınlık giriş değişkenini buruşma tahmini için kullanmışlar ve bu giriş değişkenini de baskı plakasının deplasmanını ölçerek hesaplamışlardır. Her iki giriş değişkeni için giriş üyelik fonksiyonlarını oluşturmuşlardır. Bu fonksiyonların sınır değerlerini sabit BPK altında gerçekleştirilen silindirik kap derin çekme deneyleri ile belirlemişler. BPK'nın artırılması, değiştirilmemesi veya azaltılması kararları için örneğin eğer maksimum görülebilir kalınlık büyük ve ΔDR büyük ise BPK'yi artır gibi bulanık kural matrisleri oluşturmuşlardır. Sonuç olarak bulanık kontrol algoritması ile elde ettikleri değişken BPK profili sayesinde, sabit BPK profilinin uygulandığı proses ile karşılaştırıldığında SÇO'da %2.4'lük bir artış elde etmişlerdir. Aynı zamanda BPK'nın şekillendirme başlangıcında lokal incelmeleri önlemek için mümkün olduğunca düşük, şekillendirme ortalarından sonlarına doğru ise buruşmayı önlemek için mümkün olduğunca yüksek tutulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Choi ve ark. (2007a) çalışmalarında ılık hidromekanik derin çekme prosesinde optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerini (yükleme profilleri) adaptif sonlu elemanlar analizi ile birlikte çalışan bulanık mantık kontrol algoritmasını kullanarak belirlemişlerdir. Çalışmada ABAQUS/Explicit SEA yazılımı için oluşturulan alt programa bulanık mantık kontrol algoritması eklenmiştir ve optimum yüklem

profillerinin bulanık kontrol algoritması yöntemiyle nasıl bulunduğunu gösteren akış şeması Şekil 2.21 'de verilmiştir. Bu yöntem uygulanırken kalıpların ve sıvının sahip olması gereken optimum sıcaklıklar daha önceden belirlenmiştir. Çalışmada SE yazılımında oluşturulan alt program yardımıyla her bir zaman adımının başında sacda oluşan minimum kalınlık, maksimum buruşma ve sacın ıstampa temas durumu gibi giriş değişkenleri ölçülerek optimum yükleme profilleri tek bir simülasyon analiziyle belirlenmiştir. Uygun sıvı basıncı profilinin belirlenmesi için minimum sac kalınlığı ve ıstampa duvarına temas kriterleri; uygun BPK profilini belirlemek için ise minimum sac kalınlığı ve buruşma yüksekliği kriterleri kullanılmıştır.



Şekil 2.21. Choi ve ark. (2007a) çalışmasında optimum yükleme profillerinin belirlenmesi: (a)Giriş değişkenleri, (b) Adaptif FEA ile birlikte çalışan bulanık mantık algoritmasının akış şeması

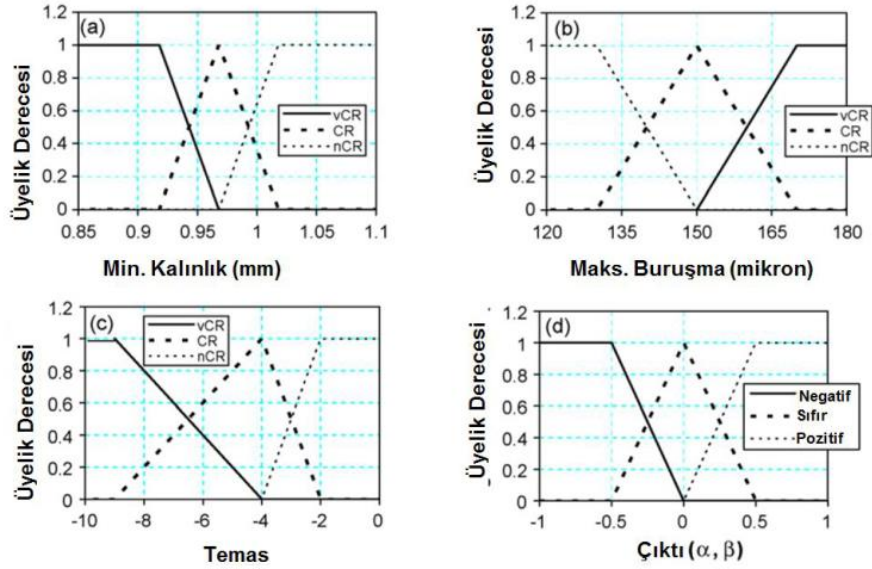
Bulanık kontrol yönteminde giriş değişkenlerine Şekil 2.22'deki üyelik fonksiyonlarına göre 0 ila 1 arasında vCR; çok kritik, CR; kritik ve nCR; kritik değil gibi durumları ifade eden üyelik dereceleri atanmıştır. Çalışmada %30 incelmede hasarın olduğu kabul edilmiştir. Örneğin sonlu elemanlar alt programından bulanık kontrol algoritmasına sacın minimum kalınlığının 1 mm olduğu bilgisi geldiğinde Şekil 2.22 'daki üyelik fonksiyonu yardımıyla kalınlığın üyelik değerleri çok kritik için 0, kritik için 0.4 ve kritik değil için 0.6 olmaktadır. Diğer girdi değişkenleri için de bu şekilde üyelik değerleri belirlenmiştir. Sonra Şekil 2.23 'de verilen kural tabanı matrislerine göre yüklemelerin (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) artması ya da azalması gerektiğine karar verilmiştir. Bu matriste girdi değişkenlerinin değerlerine göre 9 durumda (R1-R9) tecrübelerden yani bu konunun uzmanlarından yararlanarak yüklemelerin hangi yönde olacağına karar verilmiştir. Örneğin minimum kalınlık kritik değilken (nCR), temas çok kritik ise (vCR) sıvı basıncının artması gerektiğine karar

verilmiştir. Burada temasın kritik olması henüz sacın ıstampaya yeterince temas etmediğini belirtmektedir. Eğer kalınlık ve temas kritik değerlerde (CR) ise sıvı basıncının sabit kalması gerektiğine karar verilmiştir. Baskı plakası kuvveti için de sıvı basıncına benzer tarzda kurallar yazılmıştır. Kural tabanı matrisine göre pozitif, sıfır ve negatif gibi çıktı üyelik değerleri belirlenmiş ve sonra çıktı üyelik fonksiyonu ile bu değerler kesin çıktılara (α , β) dönüştürülmüştür (Şekil 2.22d). Kesin çıktı değerleri ile olması gereken yükleme değeri P ve BPK sırasıyla sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti olmak üzere

$$P_i^{\text{yeni}} = P_i^{\text{eski}} + \alpha \Delta P_i \quad (2.1)$$

$$BPK^{\text{yeni}} = BPK^{\text{eski}} + \beta \Delta BPK \quad (2.2)$$

ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.22. Bulanık mantık kontrol algoritmasında (a) kalınlık, (b) buruşma yüksekliği, (c) ıstampaya temas durumları ve (d) çıktı üyelik derecesi için oluşturulan üyelik fonksiyonları (Choi ve ark., 2007a)

(a)				(b)				
Min. Kalınlık	(PI)	Temas			(BHF)	Maks. buruşma		
		vCR	CR	nCR		vCR	CR	nCR
	vCR	(-)/R1	(-)/R2	(-)/R3	vCR	(-)/R1	(-)/R2	(-)/R3
	CR	(+)/R4	(0)/R5	(-)/R6	CR	(+)/R4	(0)/R5	(-)/R6
	nCR	(+)/R7	(+)/R8	(0)/R9	nCR	(+)/R7	(+)/R8	(0)/R9
vCR; çok kritik , CR; kritik , nCR; kritik değil				(+) ; artır , (0) ; değiştirme , (-) ; azalt				

Şekil 2.23. (a) Sıvı basıncı, (b) baskı plakası kuvveti için kural tabanı matrisi (Choi ve ark., 2007a)

Bu doktora tez çalışmasında da Choi ve ark. (2007)'nın geliştirdikleri adaptif SEA simülasyonlarıyla eş zamanlı çalışan bulanık mantık kontrol algoritması LS-DYNA/Explicit SEA yazılımına uygulanarak çift taraflı hidro-şekillendirme prosesi için gerekli optimum şekillendirme basıncı, karşı basınç ve BPK profilleri belirlenmiştir.

2.4. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmalarıyla Optimum Yükleme Profillerinin Bulunması

Başarılı bir şekillendirme yapabilmek için, diğer hidro-şekillendirme yöntemlerinde olduğu gibi ÇTHŞ'de de şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvvetinin (BPK) yükleme profilleri, ıstampa pozisyonuna bağlı olarak hassas bir şekilde bulunması gerekmektedir. ÇTHŞ'de şekillendirme basıncı ve karşı basıncın etkilerini simülasyon yazılımlarında görmek ve düzeltmek mümkün olabilir. Ancak yükleme profillerini deneme yanılma yöntemiyle bulmak neredeyse imkânsız gibidir. Bu durumda en etkili yöntem, prosesin simülasyonu sırasında, ıstampa çok küçük ilerlemelerinde yukarıda belirtilen kriterleri denetleyecek bir yaklaşım olan adaptif kontrol kullanmaktır. Adaptif kontrol sistemi, kontrol ettiği prosesteki değişimlere göre kendi kontrol parametrelerini otomatik olarak değiştiren sistem olarak tanımlanır ve prosesin çalışma koşullarının ya da çevre koşullarının değişmesi sonucunda kontrol sistemindeki parametrelerin sürekli olarak değiştirilmesiyle gerçekleşir. Farklı adaptif kontrol tipleri adaptasyon mekanizma ve şekline göre, seçilen davranış ölçütüne ve ayarladıkları parametrelere göre sınıflandırılırlar. Adaptif kontrol uygulamasının diğer proses kontrol sistemlerinden farkı, kontrol edilen değişkenin başlangıçta belirlenen "istenilen değer" de sabit tutulması yerine sistemin değişen özelliklerine uygun olarak yeni değerler almasıdır (Drim, 2010). Bu nedenle, değeri proses sırasında anlık olarak değişen sıvı basıncı ve BPK gibi optimum değerlerin bulunabilmesi için araştırmacılar literatürde adaptif FEM (Finite Element Method) simülasyonları (Sheng ve ark., 2004), adaptif FEM simülasyonlarıyla eş zamanlı çalışan Bulanık Mantık Algoritmaları (BMA) (Choi ve ark., 2007, Intarakumthornchai ve ark., 2011) ve genetik algoritma (Shamsi-Sarband ve ark., 2012) yöntemlerini kullanmışlardır. Bu kontrol algoritmaları burkulma, buruşma veya yırtılma gibi erken hasar durumlarının belirlenmesi ve bu durumlardan kaçınılması için yapılmaktadır. Aynı zamanda bu algoritmalar, sıvı basıncı ve baskı plakası gibi proses parametrelerinin uygun değerlerinin bulunması için de kullanılmaktadır. Bu tarz proses simülasyonu, proses parametrelerinin şekillendirme

boyunca yeni koşullar altında sürekli olarak güncellendiği için, adaptif proses simülasyonu olarak adlandırılmaktadır (Aydemir ve ark., 2005).

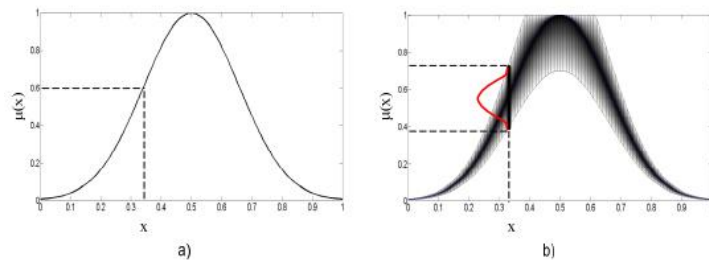
Literatürde adaptif kontrol için Genetik algoritmalar da kullanılmaktadır. Ancak bu algoritmalar çözüm uzayının tamamını değil yalnızca bir kısmını tararlar. Olasılık kurallarına göre çalışır ve ne kadar iyi çalışacağı önceden bilinemez. Bir parametrenin doğrusal ya da logaritmik kodlanması genetik algoritmanın performansında önemli değişikliklere yol açabilir. Uygun şekilde yazılmamış bir değerlendirme işlevi, çalışma zamanını uzatabileceği gibi çözüme hiçbir zaman ulaşamamasına da neden olabilir. Bu nedenle, tez konusu olan ÇTHŞ’de yükleme profillerinin bulunmasında efektif bir yöntem olmamaktadır.

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanı bulunan bulanık mantık sistemleri, klasik kontrol yöntemlerine kıyasla birçok avantaja sahiptir. Bulanık mantık ile ilgili en önemli uygulamalar kontrol alanında yoğunlaşmaktadır (Leondes, 1998). Uygulanacağı sisteme ait komple bir matematiksel modelin geliştirilmesini gerektirmeyen bulanık mantık kontrolörler, “EĞER-O ZAMAN” ifadelerini içeren bir kurallar bütününden oluşmaktadır. Oluşturulan kurallar, çıkışlar ve girişler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi modellemekte ve kontrol işlemi kuralların içeriğine göre gerçekleştirilmektedir (Chu ve ark., 2008). Bulanık mantık kontrolörler, genellikle tecrübelerden kazanılan bilgilerle oluşturulmaktadır (Alam ve Tokhi, 2008). Bu durum genel sistem verimliliğini oldukça büyük oranda etkilemektedir (Ustun ve Demirtas, 2008). Analizlerin her bir çözüm adımında (step) gerilmeler, birim değiştirmeler, incelmeler ve flanştaki buruşma kontrol edilerek bu değerlerin sınırları aşılmayacak tarzda proses parametrelerinin optimum değerleri hesaplanmalıdır. Bu işlem adaptif kontrol olarak adlandırılır. Doğal olarak analizlerin gerçek proseslerle oldukça iyi uyuşması gerekir. Gerçek proseste adaptif kontrolün sağlanması hemen hemen olanaksızdır. Bu nedenle analizlerde adaptif kontrol yapılmak zorundadır.

Bulanık mantık insana özgü yaklaşık akıl yürütmeyi temel alarak oluşturulan bir kuramdır. Bu yüzden bulanık mantık uygulamaları klasik yöntemlerin üstesinden gelemediği durumlara basit ve daha etkili çözümler getirebilmektedir. Klasik küme teorisi iki değerli $\{0,1\}$ bir mantık üzerine kurulmuştur. Bir E evrensel kümesinde bir x elemanının bir A kümesine ait olup olmama durumu 0 ya da 1 değeri alabilen bir fonksiyon ile ifade edilir. Fakat bir elemanın hangi kümeye ait olduğu her zaman net olarak belirlenemeyebilir. Bu gibi durumlarda bulanık mantık yaklaşımı esnek çözümler sağlamaktadır. Zadeh tarafından 1965 yılında önerilen bulanık küme teorisinde bir x

elemanın bir A kümesine olan aitliği bu ikili mantık yerine çok değerli bir mantıkla $\{0,1\}$ aralığında değerlendirilmektedir. Böylece bulanık mantık elemanların bir kümeye ait olup olmama durumuna ek olarak, bir elemanın bir kümeye ne derecede ait olduğu bilgisini de ortaya koymaktadır (Zadeh, 1965). Bulanık mantık notasyon ve operatörleri klasik mantık uygulamalarında kullanılan notasyon ve operatörlerin genişletilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yüzden bulanık kümeler, klasik kümeleri de kapsamakta ve dolayısıyla klasik kümelerin bir üst kümesi olmaktadır.

1990'ların sonlarından itibaren tip-2 bulanık mantık çalışmalarının yaygınlaşmaya başlaması ile günümüze kadar gelen bulanık mantık uygulamalarında kullanılan bulanık mantık teorisi literatürde tip-1 bulanık mantık olarak ayrıca belirtilmeye başlanmıştır. Tip-2 bulanık mantık, tip-1 bulanık mantık teorisinin bir uzantısıdır. Tip-1 bulanık kümelerde o kümeye ait olan elemanların üyelik dereceleri $\{0,1\}$ aralığında keskin değerler alırken, Tip-2 bulanık kümeler ise o kümeye ait her bir elemanın üyelik derecelerinin de bir bulanık küme belirttiği üyelik fonksiyonları ile ifade edilirler (Şekil 2.24). Böylece mevcut olan belirsizliğin modellenmesi tip-2 bulanık kümelerde yalnız dilsel değişkenlerle sınırlı olmayıp üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasında da yer almaktadır. Nasıl ki bir elemanın bir kümeye üyeliği 0 ya da 1 şeklinde tam olarak belirlenemediği durumlarda tip-1 bulanık kümeleri kullanılıyorsa, benzer şekilde bir tip-1 bulanık kümenin üyelik fonksiyonunu tanımlarken belirsizliklere bağlı olarak o kümeye ait elemanların üyelik dereceleri tam olarak belirlenemediği zaman tip-2 bulanık kümeler kullanılır (Şekil 2.24b). Bu yüzden tip-1 bulanık kümeler gerçek dünyadaki belirsizliklere karşı birinci dereceden bir yaklaşım olarak düşünülürse, tip-2 bulanık kümeler de belirsizliğe karşı ikinci dereceden bir yaklaşım olarak görülebilirler (Castillo ve Melin, 2008).

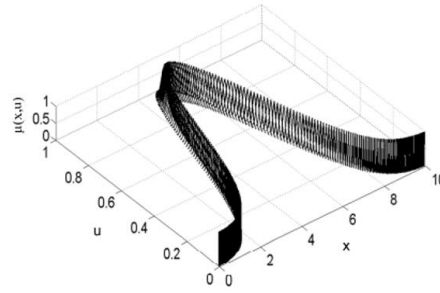


Şekil 2.24. Bir bulanık kümenin a) tip-1 ve b) tip-2 üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesi (Ulu, 2013)

Tip-1 bulanık sistemlerde kullanılan bulanık kümelerdeki üyelik değerleri birer keskin değer olduğundan tip-1 bulanık sistemler bu tip belirsizliklerin mevcut olması

durumunda yeteri kadar etkili olamamaktadırlar. Fakat tip-2 bulanık sistemlerde üyelik dereceleri de bir bulanık küme belirttiğinden tip-2 bulanık sistemler bu tip belirsizliklerin etkisini azaltabilmektedir. Bu yüzden tip-2 bulanık sistemler gürültülü girişlerin olması durumunda ve anlamları uzmandan uzmana değişebilen dilsel veriler üzerinde belirsizlik olması durumunda iyi bir başarımla sergileme yeteneğine sahiptir. Genellikle uzman bilgisinden gelen dilsel bilgiler üyelik fonksiyonlarının şekli hakkında bir bilgi vermez. Üyelik fonksiyonlarının nümerik veriler ile ayarlanması ya da belirlenmesi durumunda ise nümerik verilerdeki belirsizlik doğrudan üyelik fonksiyonları üzerinde bir belirsizliğe dönüşür. Bu gibi durumlarda ortaya çıkan dilsel ya da nümerik belirsizliklerin etkisi tip-1 bulanık sistemlerin aksine tip-2 bulanık sistemlerle azaltılabilmektedir. Teorik olarak bulanık kümelerin tip derecesi yükseldikçe belirsizliklerle baş edebilme yetenekleri artmasına karşın tip derecesinin yükselmesi bulanık sistemin karmaşıklığını hızlı bir şekilde arttırmaktadır. Bu yüzden tip derecesi ikiden daha büyük olan bulanık kümelerle oluşturulacak bulanık sistemlerin gerçekleşmesi oldukça zordur.

Genel tip-2 bulanık kümelerinin özel bir hali de aralık tip-2 bulanık kümeleri (AT2-BK) dir. Aralık tip-2 bulanık kümelerin tüm ikincil üyelik fonksiyonları bir fonksiyon yerine keskin bir değer almaktadır (Şekil 2.25). Böylece ikincil üyelik fonksiyonları aralık tip-2 bulanık kümelerde ayırt edici bir bilgi taşımamakta ve tip-2 bulanık mantık işlemlerinde sadece birincil üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerinin kullanılması yeterli olmaktadır. Bu nedenle aralık tip-2 bulanık kümeleri sağladıkları hesaplama kolaylıkları nedeniyle tip-2 bulanık sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.25 Tip-2 bulanık kümenin üç boyutlu gösterimi [18]

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı, Çift Taraflı Hidro-şekillendirme (ÇTHŞ) prosesinde literatürde şu ana kadar değişken karşı basınç eğrileri kullanılarak deneysel olarak incelenmeyen, baskı plakası kuvveti (BPK), şekillendirme basıncı ve karşı basınç parametrelerinin prodesteki birleştirilmiş etkilerini sayısal ve deneysel olarak araştırmaktır. Bu nedenle ÇTHŞ prosesinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için öncelikle gerekli olan proses tasarımı Tübitak 1001 projesi kapsamında proje ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği hidro-şekillendirme presi 60 ton baskı plakası ve ıstampa kuvveti, 1000 bar sıvı basıncı kapasitesine sahiptir. Şekillendirme basıncı tek etkili ve 2.5 litre hacmindeki, karşı basınç ise tek etkili ve 1 litre hacmindeki diğer bir basınç yükseltici ile elde edilmektedir. Preste kapalı çevrim Hidrolik Sayısal Kontrol (HNC) sistemi sayesinde baskı plakası kuvveti, şekillendirme basıncı, karşı basınç, ıstampa konum ve hızı hassas olarak ölçülerek kontrol edilebilmektedir. Bu parametrelerle birlikte ıstampa kuvveti ve basınç yükseltici konumu da 1 ms.'ye kadar istenilen sıklıkla ölçülerek HNC kartı tarafından kaydedilmekte ve deneyden sonra bilgisayara aktarılabilmektedir. Deney presi hakkında daha detaylı bilgiye Dilmeç ve ark. (2007)'nın çalışmasından ulaşılabilir.

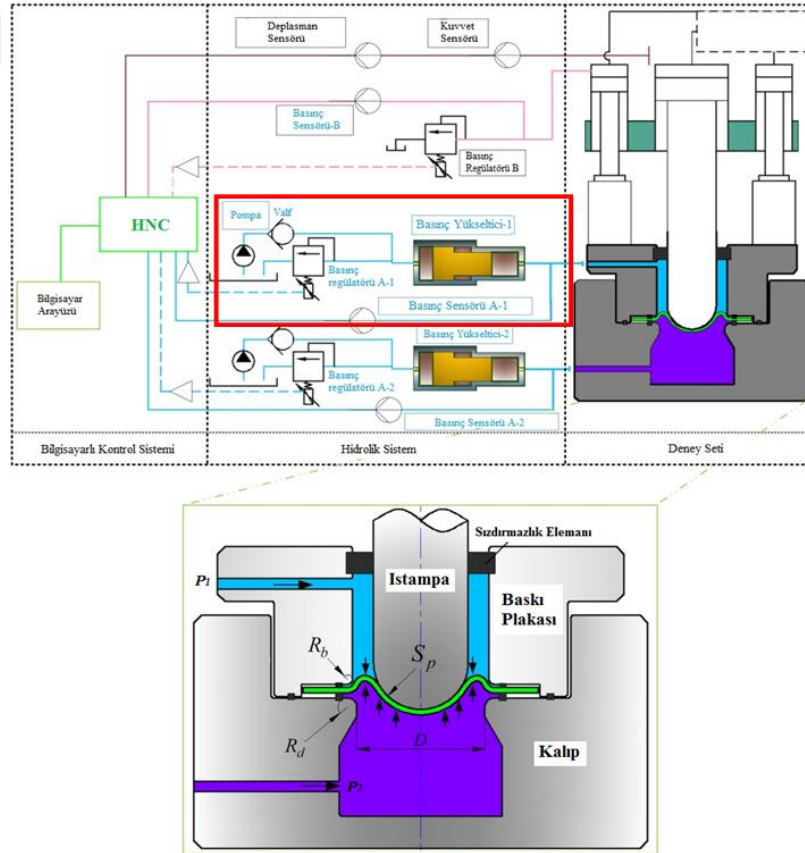
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidro-şekillendirme Laboratuvarı'nda bulunan ve Şekil 3.1'de gösterilen deney presinde iş parçaları geçmişte hidromekanik derin çekme (HMDÇ) prosesine uygun olarak tek taraflı basınçla şekillendirilmekteydi. Bu nedenle deney presinin ÇTHŞ prosesini gerçekleştirebilecek şekilde modifikasyonu yapılmıştır. Bu doğrultuda deney ünitesinde daha önce hidromekanik derin çekme prosesinde ıstampa pozisyonuna bağlı olarak şekillendirme basıncı ve baskı plakası kuvveti parametrelerinin eş zamanlı kontrolü için kullanılan üç eksen HNC (Hidrolik Sayısal Kontrol) sisteminin yerine karşı basıncı da kontrol edebilmek için dört eksen HNC sistemi deney ünitesine eklenmiştir.

Söz konusu presin çalışma sistemi Şekil 3.2'de yine şematik olarak verilen Liu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği sisteme oldukça benzerdir. Kırmızı çerçeve ile belirtilen kısımlar dışındaki sistem daha önce imal edilmiştir. Bu tez çalışması doğrultusunda kırmızı ile gösterilen kısım ilave edilerek, üç eksen kontrollü HNC değiştirilerek dört eksen kontrollü yeni HNC, basınç yükseltici, basınç sensörü, kontrol valfleri vb. elemanlar sisteme eklenmiştir. Ancak baskı plakası kuvveti (BPK) Liu ve arkadaşları tarafından

yapılan çalışmada sabit tutulmakta, kontrol sadece basınç sensörü ile sağlanmakta ve pistonlarda oluşacak sürtünmeler ihmal edilmektedir. Bu çalışmada ise BPK yük hücreleriyle ölçülmektedir. Bu nedenle pistonlardaki sürtünmelerin oluşturulacağı belirsizlikler ortadan kalkacağı için, modifiye edilen sistemde, proses çok daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

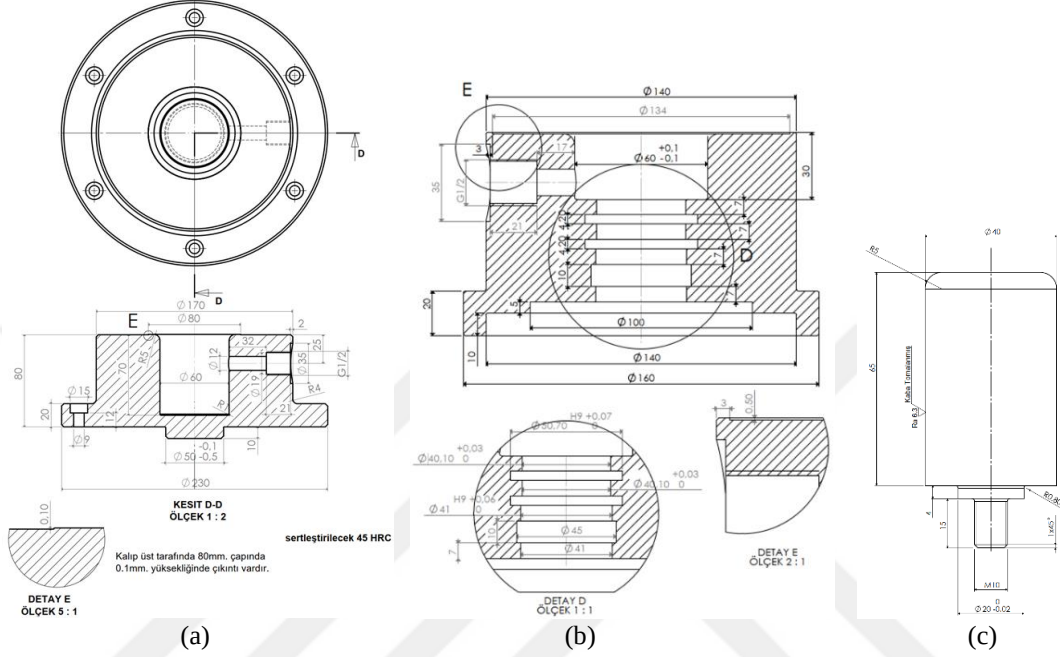


Şekil 3.1. Modifikasyonu gerçekleştirilen deney presi

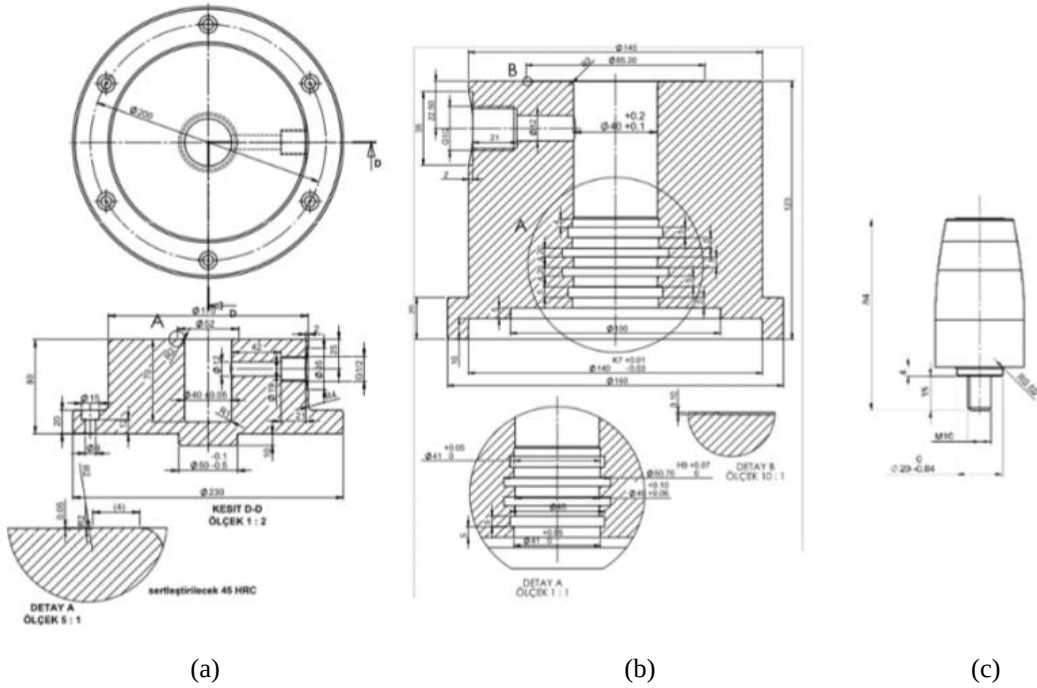


Şekil 3.2. Çift taraflı hidro-şekillendirme kontrol ünitesi ve deney seti

Şekil 3.4’de silindirik iş parçası imalatında, Şekil 3.5’de endüstriyel iş parçasının imalatında kullanılan ıstampa ve kalıplar verilmiştir. İş parçasına şeklini veren ıstampanın üst bölgesi sökülebilir yapıdadır. Bu sayede deneyler sırasında silindirik ıstampa başlığı ve endüstriyel iş parçasının ıstampa başlığı kolayca sökülüp takılabilmektedir.



Şekil 3.3. Silindirik iş parçasının ÇTHŞ ile üretilebilmesi için gerekli olan (a) üst kalıp tasarımı, (b) alt kalıp tasarımı, (c) ıstampa tasarımı



Şekil 3.4. Endüstriyel iş parçasının ÇTHŞ ile üretilebilmesi için gerekli olan (a) üst kalıp tasarımı, (b) alt kalıp tasarımı, (c) ıstampa tasarımı



Şekil 3.5. Endüstriyel iş parçasının ÇTHŞ ile imal edilebilmesi için gerekli üst kalıp, alt kalıp ve ıstampa

Bu doktora tezinde ÇTHŞ'nin şekillendirilebilirliğe etkisi silindirik ve oval şekilli iş parçaları için ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmadaki temel adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Çift taraflı sac hidro-şekillendirme prosesinin sonlu elemanlar yazılımıyla modellenmesi
- Adaptif kontrol sağlamak için bulanık mantık algoritmalarının geliştirilmesi
- Şekillendirme basıncı, karşı basınç, baskı plakası kuvveti ve ıstampa pozisyonu parametrelerinin eş zamanlı kontrolü için mekanik-elektronik kontrol sisteminin kurulması ve modifikasyonu
- Üretilcek parçaların belirlenmesi, kalıp tasarımı ve imalatı
- Simülasyonlarda bulanık mantık kontrol algoritmaları kullanılarak şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti parametreleri için en uygun yükleme profillerinin elde edilmesi
- ÇTHŞ'de analizlerin deneylerle doğrulanması
- Çift taraflı hidro-şekillendirmenin klasik hidromekanik derin çekmeye göre etkisinin;

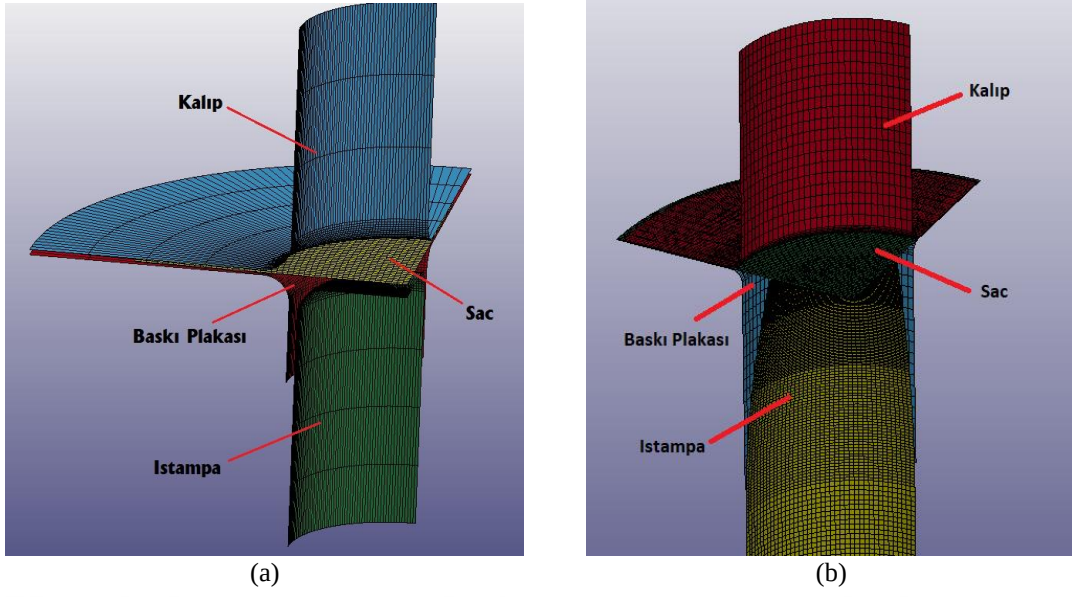
- Sınır çekme oranları
- Sacın kesiti boyunca kalınlık değişimi
- Sacdaki buruşma oluşumu

yönünden incelenmesi ve avantajlarının ortaya konması olarak sıralanabilir. Yukarıdaki konu başlıklarının her biri için yapılan çalışmalar ilgili bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1. ÇTHŞ'nin Sonlu Elemanlar Yazılımıyla Modellenmesi

ÇTHŞ prosesi LS-DYNA sonlu elemanlar analiz programında modellenmiştir. Tez ile ilgili ön analizler yapılırken ÇTHŞ prosesi Abaqus SEA programında iki boyutlu eksenel simetrik olarak modellenmesi tercih edilmiştir. Fakat iki boyutlu modelleme, analiz süresini kısaltsa da hidro-şekillendirmede istenmeyen bir durum olan buruşmayı simule edememektedir. Buruşma oluşup oluşmadığını ön görebilmek için literatürdeki buruşma kriterleri incelenmiştir. Önerilen tüm kriterlerdeki matematiksel formülasyonlar alt programlar ile hesaplatılmak için fazlasıyla karmaşıktır. Daha da önemlisi literatürdeki buruşma kriterlerinin hepsi örgü yapısı, analiz süresi gibi modelleme değişkenlerinden etkilenecek farklı sonuçlar elde edilmesine neden olacaktır.

Abaqus SEA programında ÇTHŞ'nin modellenmesinde karşılaşılan bir diğer sorun da basınçlı yüzeylerin tanımlanmasındaki zorluklardır. Hidro-şekillendirme prosesinin başında, sacın kalıp ile baskı plakası arasında kalan kısmı ıstampanın hareketi ile birlikte kalıp boşluğuna doğru hareket etmektedir. Yani sacın bu kısmına prosesin başlangıcında sıvı basıncı etki etmezken, prosesin devamında kalıp boşluğuna giren kısımlara sıvı basıncı etkimeye başlamaktadır. Bu durumu simule etmek Abaqus SEA yazılımında mümkün olmakta, ancak fortan tabanlı alt programlar yardımıyla yapılabilmektedir. Ayrıca geçmiş dönemlerde modelleme ile ilgili yaşanan sorunlarda yeterli teknik destek alınamamış ve yüksek maliyetler yüzünden çeşitli sıkıntılar yaşamıştır. Bu nedenlerle analiz programı olarak LS-DYNA paket programının kullanılmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir. Aynı zamanda iki boyutlu modellemenin sacdaki buruşmaları gösterememesi ve literatürde genelleştirilmiş bir buruşma kriterinin olmaması nedeniyle ÇTHŞ kabuk (shell) eleman olarak modellenmiştir. Analiz süresini azaltmak için de modelleme çeyrek şekilde yapılmıştır (Şekil 3.6).

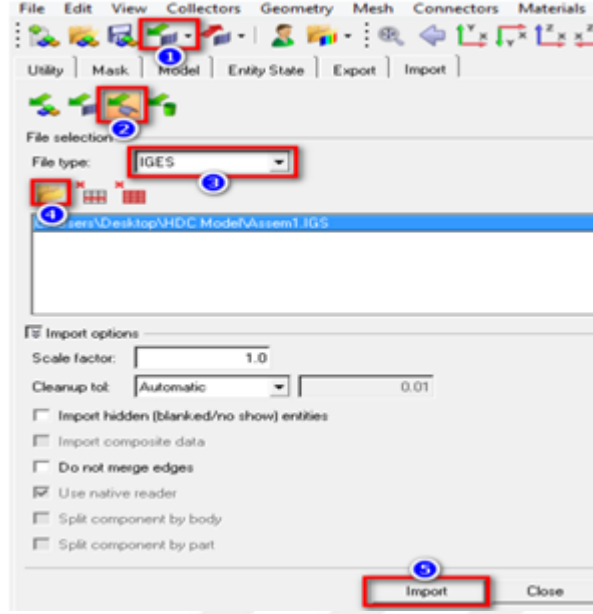


Şekil 3.6. ÇTHŞ'nin LS-DYNA SEA programında (a) silindirik (b) endüstriyel iş parçası çeyrek modeli

3.1.1. Geometrik Modelin Oluşturulması

ÇTHŞ prosesi için gerekli geometrik model; iş parçası (sac), kalıp, baskı plakası ve istampa olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. Modeldeki tüm parçalar ilk önce Solidworks 3B tasarım yazılımında yüzey olarak modellenmiş, daha sonra HyperMesh yazılımı kullanılarak bu yüzeylerin örgü yapıları oluşturulmuştur. Son olarak Ls-PrePost yazılımı yardımıyla model için gerekli başlangıç ve sınır şartları, malzeme modeli gibi işlemler tanımlanıp LS-DYNA/Explicit SEA yazılımı için çözüme uygun hale getirilmiştir.

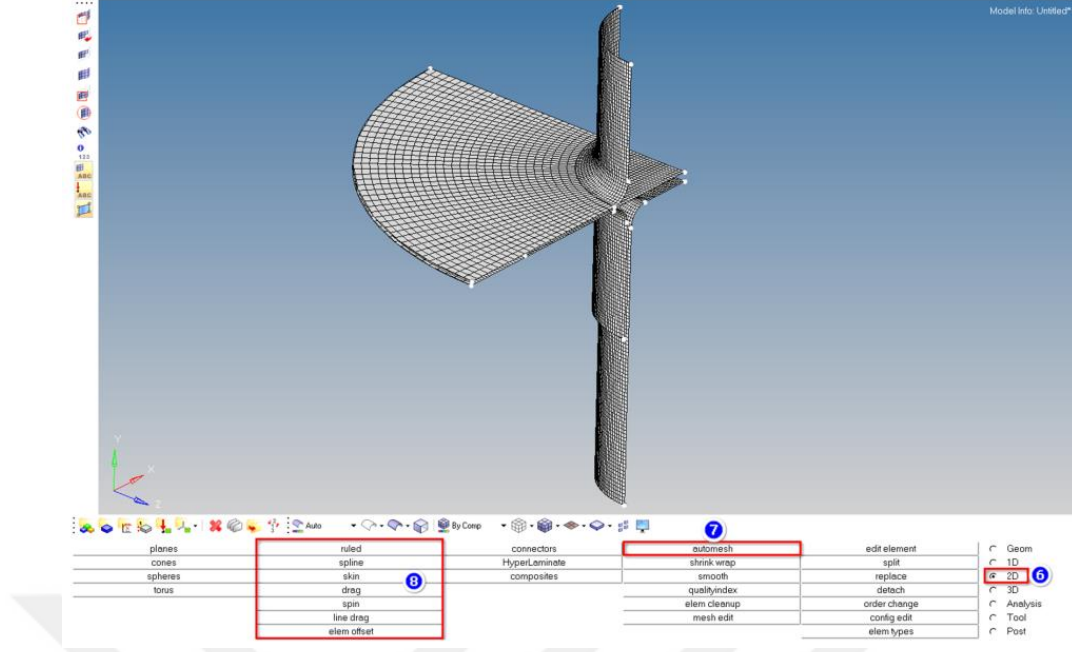
Solidworks 3B tasarım yazılımında yüzeyleri oluşturulan parçaların HyperMesh yazılımına import edilmesi için gerekli işlem adımları Şekil 3.7'de verilmiştir. Import işlemi için öncelikle şekildeki 1 numaralı import kısmına tıklanır ve 2 numaralı import model tıklanarak 3 numaralı kısımdan dosya tipi seçilir. Dosya tipi, Solidworks yazılımında parçaların export edildiği dosya tipidir. Bu çalışmada IGES dosya tipi kullanılmıştır. Bazı durumlarda, IGES dosya tipi kullanıldığında HyperMesh yazılımına import ederken parça programda gözükmemektedir. Bu gibi durumlarda farklı dosya tipleri kullanılmalıdır (step, parasolid vs.).



Şekil 3.7. Solidworks 3B tasarım yazılımında yüzeyleri oluşturulan parçaların HyperMesh yazılımına tanıtılması

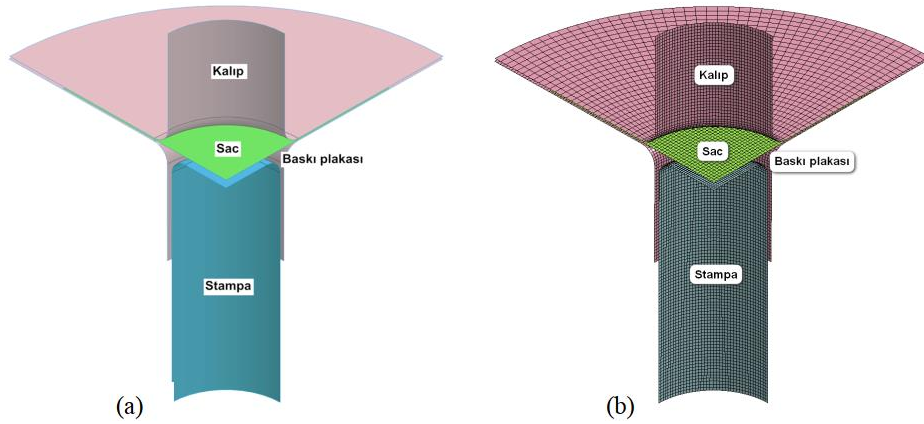
Ayrıca bilgisayarda yüzey/katı modellerinin tutulduğu klasör isminde ve yüzey/katı model isimlerinde Türkçe karakter kullanılmamasına özen gösterilmelidir. Aksi takdirde Solidworks yazılımında oluşturulan modelleri HyperMesh yazılımına import etmek imkansızdır. Dosya tipi seçildikten sonra 4 numaralı kısımdan bilgisayarda yer alan modeller seçilir. Son olarak 5 numaralı import butonu tıklanarak model programa import edilmektedir.

Model HyperMesh yazılımına import edildikten sonra Şekil 3.8’de gösterilen 6 numaralı kısımdan parçalar yüzey olarak modellendiği için 2D seçilir ve sonra 7 numaralı automesh otomatik ağ örme seçeneği seçilir. Bu çalışmada yer alan parçaların geometrilerinin çok fazla karmaşık olmamasından dolayı automesh ile ağ örme komutu yeterli olmuştur. Fakat daha karmaşık parçalarda düzenli bir ağ yapısının oluşturulması için 8 numaralı kısımda yer alan çeşitli komutlar (süpürerek, döndürerek, ağ örme vs.) kullanılmalıdır. Bu komutlara ve detaylı bilgilere Altair (2012)’den erişilebilir. Örgü yapısı oluşturulduktan sonra oluşan modelin görüntüsü Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8. Yüzey modelinin HyperMesh yazılımında örgü yapısının oluşturulması

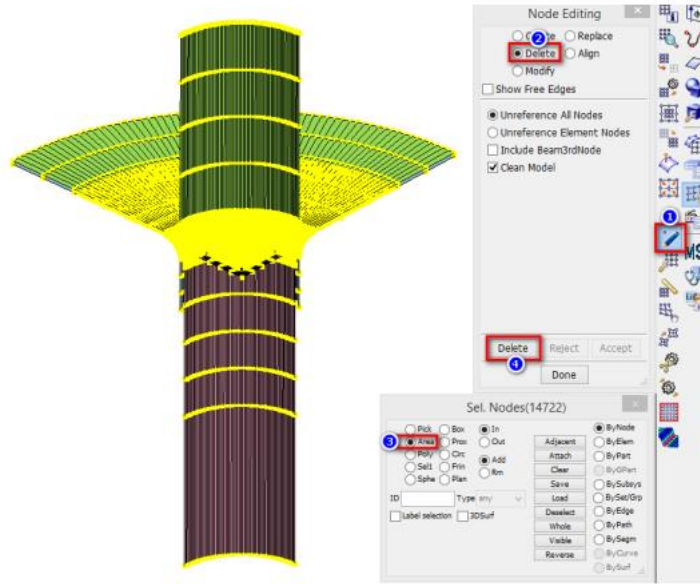
Model ağ örme işleminde tüm parçalar için dörtgen eleman kullanılmıştır. Modelin örgü yapısı oluşturulduktan sonra Şekil 3.7'deki 1 numaralı seçeneğin bir sağında yer alan export seçeneği ile model “*.k” adıyla kaydedilip Ls-PrePost programına import edilmek üzere hazır hale getirilmektedir. Keyword (*.k) uzantısıyla kaydedilen model daha sonra Ls-PrePost programında File-Import-LS-DYNA Keyword File yolu kullanılarak import edilir. Şekil 3.9a’da Solidworks 3B tasarım programında modellenen yüzey parçaları, Şekil 3.9b’de ise HyperMesh yazılımında örgü yapısı oluşturulan modelin Ls-PrePost yazılımına import edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.9. (a) Solidworks yazılımında oluşturulan yüzey modeli, (b) Ls-PrePost yazılımına import edilen örgü yapısı oluşturulmuş model

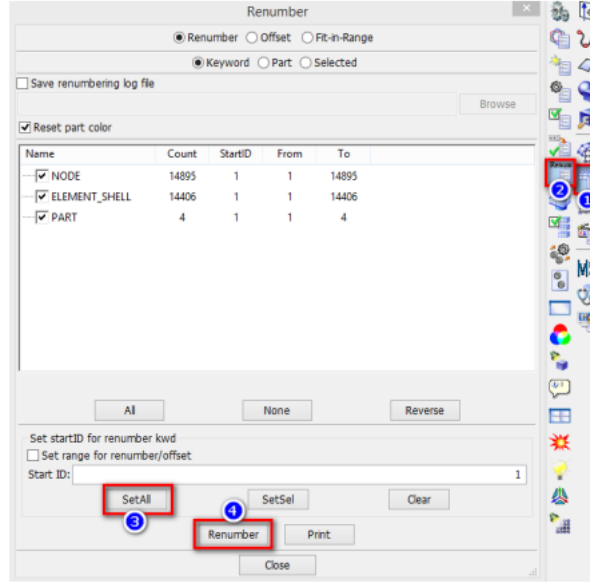
Model Ls-PrePost yazılımına import edildikten sonra, ağ örme işlemi yapılırken modelde oluşabilecek referanssız düğümleri silmek için Şekil 3.10’de gösterildiği gibi 1 numaralı Node Editing bölümü ve 2 numaralı delete seçeneği seçilir. Daha sonra 3 numaralı kısımdan modelin tamamı seçilerek 4 numaralı delete butonuna basılır. Tüm bu işlemlerin ardından modelde var olan tüm düğümler silinmiş olur. Eğer modelde referanssız düğümler yoksa bu kısma gerek yoktur fakat varsa ileride oluşabilecek hataları gidermek için bu kısmın yapılmasında büyük fayda vardır.

Tüm düğümler silindikten sonra modeldeki düğümlere yeniden numara atanması gerekmektedir. Bunun için Şekil 3.11’de gösterilen işlem adımları gereklidir. Öncelikle 1 numaralı model and part kısmından 2 numaralı renumber seçeneği seçilir. Daha sonra 3 numaralı SetAll ile tüm düğümler, elemanlar ve parça numaraları seçilir ve 4 numaralı renumber seçeneği ile seçilen bölümler yeniden numaralandırılır. Referanssız düğümlerin silinmesi ve renumber kısımlarının, modelden herhangi bir parçanın silinip yeniden başka bir parçanın import edilmesi halinde de yapılması uygundur. Çünkü Ls-PrePost, import edilen yeni parçadaki düğüm, eleman ve parça numaralarının var olan modeldeki numaralar ile sıralı bir şekilde numaralandırma işlemini kendisi yapamamaktadır.



Şekil 3.10. Modeldeki tüm düğümlerin silinmesi

Modele yeni bir parça eklendiğinde Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’teki kısımların yapılması, modeldeki numaralandırmaların sıralı bir şekilde olmasına ve model çözümlenirken düğümler ve elemanlar üzerinden yapılan çeşitli hesaplamaların daha kolay olmasına ve sonuç olarak analizin çözüm süresinin kısaltılmasını sağlamaktadır.



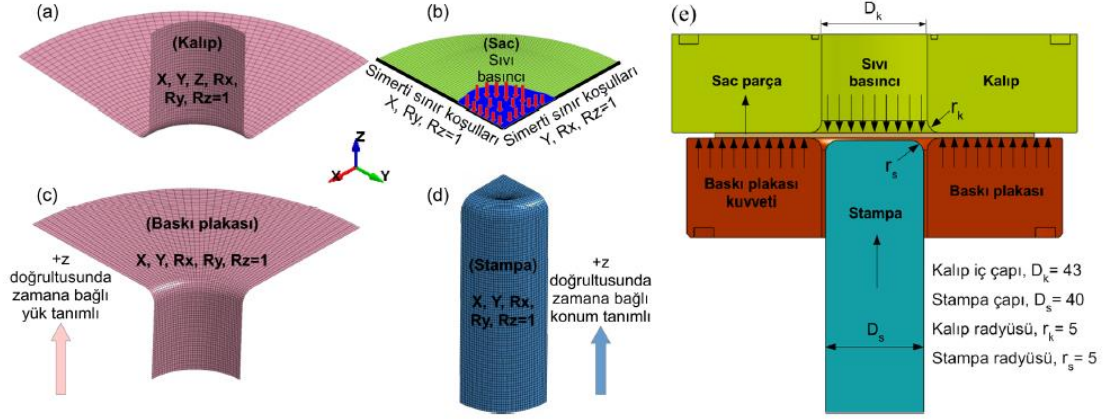
Şekil 3.11. Modeldeki düğümlere, elemanlara ve parçalara yeniden numara atanması için renumber işlemi

3.1.2. Başlangıç ve sınır koşulları

Şekil 3.12’da silindirik kap modelinde kullanılan sınır ve başlangıç koşulları görülmektedir. Burada:

- Kalıp için x, y ve z yönlerinde öteleme ve bu eksenlerde dönme engellenmiştir.
- Baskı plakasının hareketine, sadece z doğrultusunda müsaade edilmiştir.
- İstampaın hareketi +z yönünde konum-zaman grafiği ile tanımlanmıştır.

Baskı plakası kuvveti (BPK), baskı plakası aracılığıyla sac iş parçasına aktarılmaktadır. BPK, iş parçasının kalıp ile baskı plakası arasında kalan elemanlarına etki etmektedir. Aynı zamanda ıstampa, sac parçayı alt kısmından dokunarak yukarı doğru iterken, bu harekete ters yönde kalıp içerisinde kalan elemanlara da sıvı basıncı uygulanmaktadır. Uygulanan hidrolik basınç için akışkan sıvının tamamen modellenmesi yerine, bu sıvı basıncının etkiyeceği bölgenin sınırları tanımlanmış ve bu sınıra giren her elemanın üzerine tanımlanan basınç değeri etki etmiştir. Böylece sıvı basıncı, gerçek proseste olduğu gibi uygulanabilmiştir.



Şekil 3.12. ÇTHŞ modelinde kullanılan sınır koşulları: (a) kalıp, (b) sac, (c) baskı plakası, (d) ıstampa; (e) proses parametreleri

3.1.2.1. Kalıp için gerekli şartlar

Şekil 3.12a’da gösterildiği gibi kalıp için x, y ve z doğrultularında öteleme ve bu eksenlerde dönme engellenmiştir. Bu sınır şartı LS-DYNA’da malzeme modelinin tanımlandığı kart ile uygulanmaktadır ve malzeme modeli kısmında anlatılmıştır.

3.1.2.2. Sac için gerekli şartlar

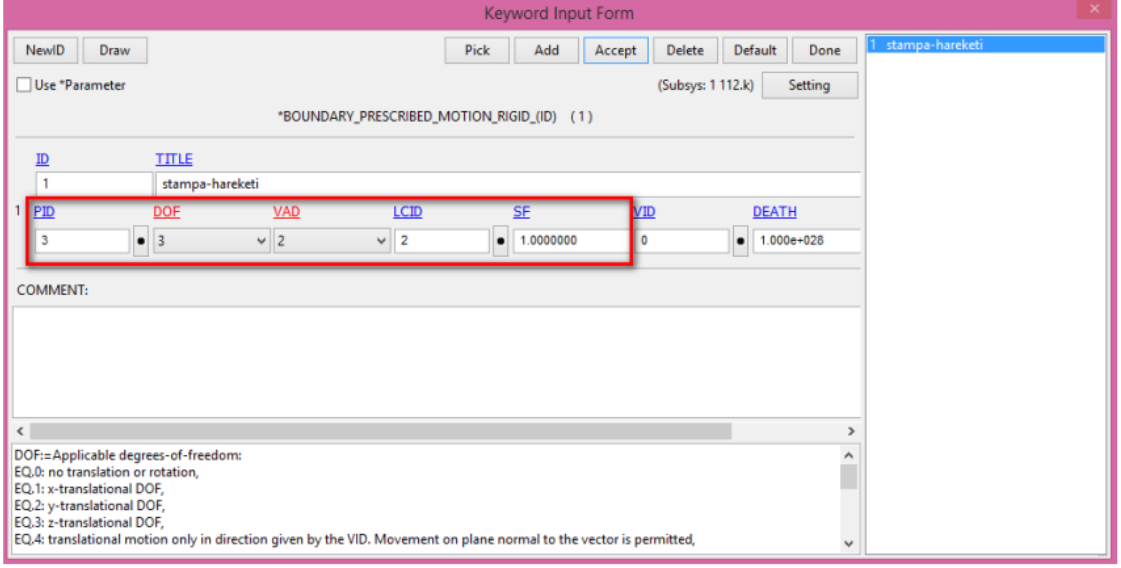
Model çeyrek olduğundan, Şekil 3.12b’de görüldüğü gibi sacın y eksenine paralel olan kenarı, şekillendirme olsa bile o kenardaki bir elemanın x eksenindeki konumu değişmeyeceğinden x doğrultusunda tutulmuştur. Simetri sınır koşulları gereği aynı kenar için y ve z doğrultusundaki dönme hareketi kısıtlanmıştır. Aynı şekilde x eksenine paralel olan kenar y doğrultusunda tutulup x ve z eksenlerinde dönmesi kısıtlanmıştır. Sac için geçerli bu simetri sınır koşulları LS-DYNA’da BOUNDARY_SPC-SET kartı açılarak tanımlanmıştır. Bu kartta sacın y eksenine paralel olan kenarındaki düğümler seçilmiş ve x doğrultusundaki ötelemede kısıt anlamına gelen DOFX, y ve z eksenlerindeki dönmede kısıt anlamına gelen DOFRY ve DOFRZ birimleri 1 yapılarak seçilen düğümlere sınır şartı uygulanmıştır. Aynı şekilde sacın x eksenine paralel olan kenarı için de DOFY=1, DOFRX=1 ve DOFRZ=1 sınır şartları uygulanmıştır.

3.1.2.3. Baskı plakası için gerekli şartlar

Şekil 3.12c’de verilen baskı plakasının sadece z doğrultusundaki hareketine müsaade edilmiştir. Diğer doğrultulardaki ve tüm eksenlerdeki hareketler ise yine malzeme modelinin tanımlandığı kart kullanılarak kısıtlanmıştır.

3.1.2.4. Istampı için gerekli şartlar

Şekil 3.12d’de verilen ıstampı için, baskı plakası ile aynı şekilde sadece z doğrultusunda harekete izin verilmiştir. Diğer doğrultularda öteleme ve tüm eksenlerde dönme hareketleri kısıtlanmıştır. Istampı hareketi için yine DEFINE_CURVE kartı ile eğri şeklinde zamana bağlı konum tanımlanmıştır.



ID	TITLE	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH
1	stampa-hareketi	3	3	2	2	1.0000000	0	1.000e+028

COMMENT:

DOF:=Applicable degrees-of-freedom:
EQ,0: no translation or rotation,
EQ,1: x-translational DOF,
EQ,2: y-translational DOF,
EQ,3: z-translational DOF,
EQ,4: translational motion only in direction given by the VID. Movement on plane normal to the vector is permitted.

Şekil 3.13. Istampı hareketinin tanımlanması

Istampı için gerekli sınır şartı ise Şekil 3.13’de gösterilen BOUNDARY_PRESCRIBED-MOTION-RIGID kartı kullanılarak modele tanımlanmıştır. Burada, PID kısmında ıstampı, DOF kısmında z yönünde hareket için 3 değeri, VAD kısmında yüklemenin konuma bağlı olduğunu gösteren 2 değeri, LCID kısmında zamana bağlı olarak tanımlanan konum eğrisi seçilerek ıstampı hareketi tanımlanmıştır.

3.1.3. Sıvı Basıncının Tanımlanması

Sac üzerine etki edecek sıvı basıncı tanımlanması için Şekil 3.14’de gösterilen LOAD_MASK kartı kullanılmıştır. Bu kart sayesinde tanımlanan aralıklarda kalan elemanların üzerine proses boyunca basınç etki etmektedir. Bu kartta, PID kısmında basıncın uygulanacağı parça yani sac, LCID kısmında DEFINE_CURVE ile tanımlanan zamana bağlı basınç eğrisi, LCIDM kısmında yine DEFINE_CURVE ile tanımlanan, x ve y doğrultularında basınç bölgesini tanımlayan eğri seçilmiştir (eğri tanımlanırken DATTYP=1 yapılmıştır). Son olarak VID2 kısmında basıncın hangi aralıklarda ve yönde

etki edeceğini belirten ve DEFINE_VECTOR kartı ile tanımlanan vektör seçilerek sac üzerindeki belirli bir alana etki edecek sıvı basıncı tanımlanmıştır. Bunların dışında basınç tanımı için LOAD_SEGMENT kartı da kullanılabilir. Bu kart ile basıncın etki edeceği elemanların seçilmesi ve basınç eğrisinin tanımlanması gerekmektedir. Fakat bu kart ile basıncın etki edeceği elemanlar seçileceği ve bu elemanların şekillendirme boyunca konumu değişeceği için bu kart ÇTHŞ prosesinin analizi için uygun değildir. Çünkü bu proseste basıncın etki edeceği bölge merkezden kalıp radyüsü bitimine kadardır ve bu bölge sürekli aynı kalmaktadır.

Keyword Input Form

NewID Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 112.k) Setting

*LOAD_MASK (1)

1 PID LCID VID1 OFF BOXID LCIDM VID2

4 4 0 0.0 0 5 1

2 ICYCLE

400

COMMENT:

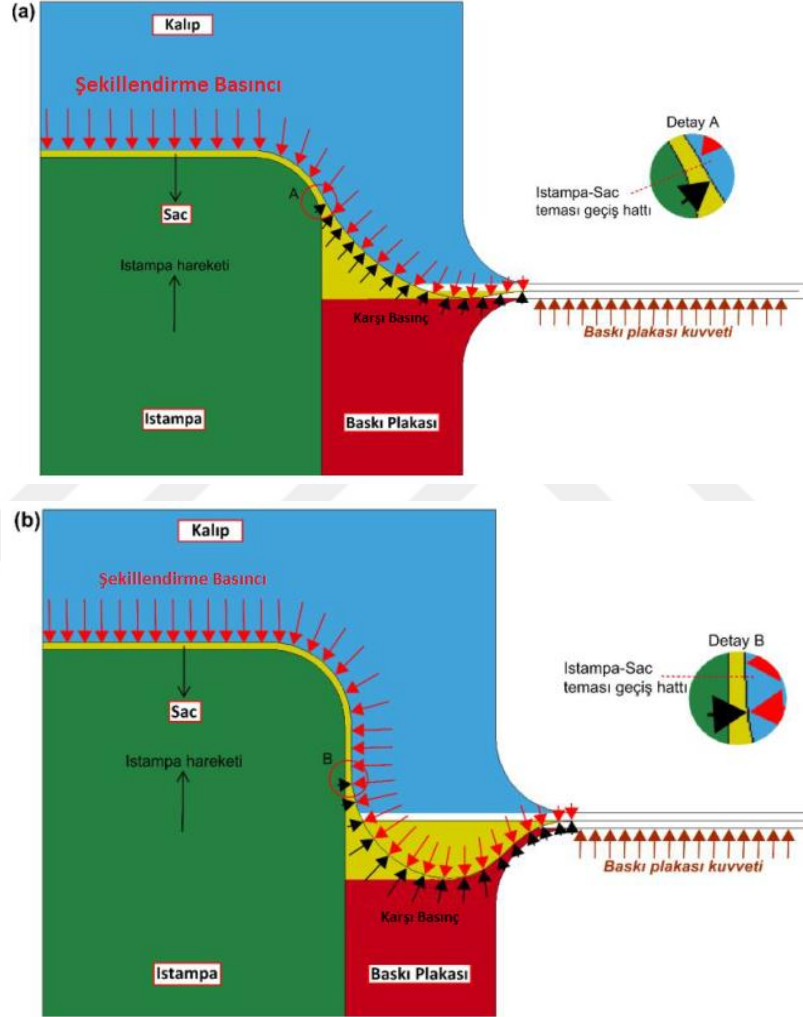
LCIDM:=Curve ID defining the mask. This curve gives (x,y) pairs of points in a local coordinate system defined by the vector ID, VID2. See also *DEFINE_CURVE. Curve should be flagged as DATTYP = 1.

Şekil 3.14. LS-DYNA Sıvı basıncının tanımlanması

ÇTHŞ prosesinde, şekillendirme basıncı ve karşı basınç olmak üzere iki adet basınçlı ortam bulunmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde, şekillendirme basıncı tanımlanırken, sac yüzeyine ıstampa hareketinin tersi yönünde basıncın uygulanması için kullanılan LOAD_MASK kartı kullanılmıştır. LS-DYNA SEA yazılımında yer alan bu kart sayesinde, yazılıma girilen zamana bağlı basınç eğrisi yardımıyla sac yüzeyindeki sabit bir alan üzerine istenilen basınç değerleri uygulanabilmektedir. Fakat ÇTHŞ prosesinde uygulanan diğer bir sıvı basıncı olan karşı basıncın bu kart ile uygulanması mümkün değildir. Çünkü bu proseste karşı basınç sac yüzeyindeki sabit bir alana değil, ıstampa ile temasın olmadığı bölgelere uygulanmaktadır.

Şekil 3.15’de ÇTHŞ analizinde ıstampa konumunun 12 ve 14 mm olduğu andaki şekillendirme basıncı ve karşı basıncın sac yüzeyine uygulandığı bölgeler gösterilmiştir. Burada kırmızı oklar ile gösterilen şekillendirme basıncı, kalıp boşluğundan kalıp radyüsü bitimine kadar uygulanırken, siyah oklar ile gösterilen karşı basınç ise ıstampa

ve baskı plakası arasından ıstampa ve sac arasında kalan bölgeye uygulanmaktadır. Şekil 3.15a ve Şekil 3.15b'deki detaylardan görüleceği üzere ıstampa-sac temas geçiş hattı altında kalan bölge analizin her adımında değişmektedir. Şekil 3.15a'da karşı basınç, sac henüz ıstampa yüzeyine sıvanmadığı için geniş bir alana uygulanırken, Şekil 3.15b'de sac ıstampa yüzeyine sıvandığı ve dolayısıyla temassız alan azaldığı için basınç daha dar bir alana uygulanmaktadır.



Şekil 3.15. ÇTHŞ analizinde basınç uygulama bölgeleri, ıstampa konumu a) 12 mm, b) 14 mm

Sacın ıstampa yüzeyine sıvandığı andan itibaren etkili olan bu değişimi modelleyebilmek için LS-DYNA SEA yazılımının R8 sürümü ve üzerindeki sürümlerde yer alan LOAD_SEGMENT_CONTACT_MASK kartı kullanılmıştır. Bu kart şimdilik LS-DYNA'nın güçlü paralel işlem (massively parallel processing, mpp) çözücüsü ile çalıştırılmaktadır. Bu kartın gelecek sürümlerde yapılacak güncellemeler ile paylaşımı

hafıza paralel işlem (shared-memory parallel processing, smp) çözücüsünde de çalıştırılması beklenmektedir.

LOAD_SEGMENT_CONTACT_MASK kartı, yazılımda tanımlanan segment setlerinin bir başka parça ile temas etmesi halinde karta tanımlı algoritmalar aracılığıyla gizlenmesi (mask) prensibine dayanmaktadır. Şekil 3.16’te bu kartın tanımlanması için gerekli parametreler verilmiştir. Şekilde gösterilen LSID, gizlemenin yapılacağı yükleme seti numarasını, P_1 ve P_2 sırasıyla alt ve üst basınç sınırları, CID1 ise gizlemenin yapılacağı tanımlı temas numarasını göstermektedir. LSID tanımında LOAD_SEGMENT_SET kartı kullanılmış ve sac parça üzerinde segment seti oluşturulmuştur. CID1 parametresine ise ıstampa ve sac arasında tanımlı temas numarası olan 1 değeri girilmiştir.

Keyword Input Form

☐ Use *Parameter (Subsys: 1 110mm.k)

*LOAD_SEGMENT_CONTACT_MASK (1)

ID	Heading	LSID	P1	P2	CID1	CID2	CID3	CID4	CID5	CID6	CID7	CID8
1	ters basınç tanımı	1	0.5000000	1.0000000	1	0	0	0	0			
2												

Repeated Data by Button and List

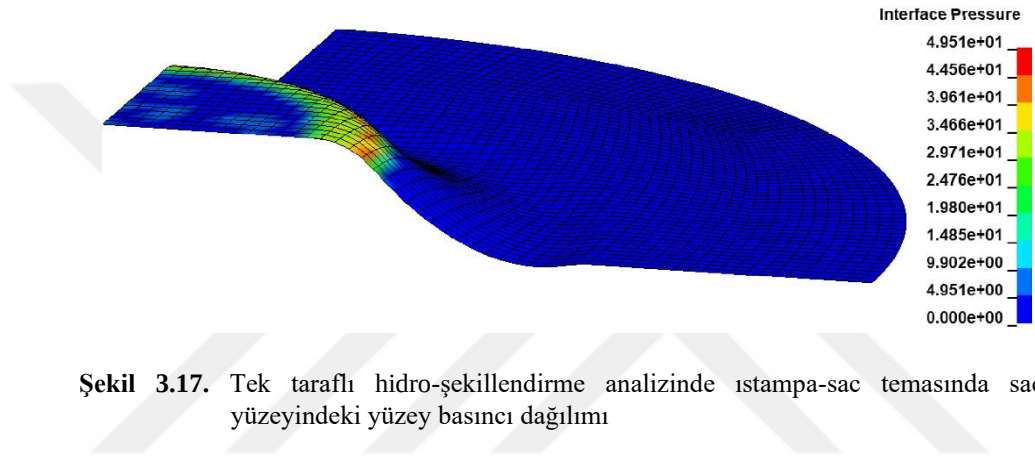
CID1	CID2	CID3	CID4	CID5	CID6	CID7	CID8

Şekil 3.16. LS-DYNA’da bulunan Load_Segment_Contact_Mask kartı

Bu kartta tanımlanacak en önemli parametreler P_1 ve P_2 ’dir. Bu parametrelerin yanlış tanımlanması durumunda basınç gizleme işlemi gerçekleştirilememekte ve sacın tüm yüzeyine karşı basınç etki etmektedir. Burada alt (P_1) ve üst (P_2) basınç sınır değerlerini belirlenmesi için temas anında parçalar arasındaki yüzey basıncının kontrol edilmesi gerekmektedir. Eğer yüzey basıncı P_1 değerinin altına düşerse LOAD_SEGMENT_SET ile tanımlanan basınç eğrisi sac yüzeyine uygulanmaktadır. Burada ıstampa ve sac arasındaki yüzey basıncının düşük olması parçalar arasında temasın olmadığı göstermektedir ve basınç gizleme yapılmadan uygulanmaktadır. Setler üzerindeki yüzey basıncı P_2 değerini aşarsa LOAD_SEGMENT_SET ile tanımlanan basınç uygulanmamakta ve dolayısıyla P_2 değerini aşan setlerde basınç gizleme işlemi yapılmaktadır.

Yüzey basıncının hangi değerinde temasın olup olmadığını nümerik veya deneysel olarak belirlemek zor olduğundan, P_1 ve P_2 değerleri karşı basıncı olmadan gerçekleştirilen bir analizdeki yüzey basınçları (interface pressure) kontrol edilerek

belirlenmiştir. Yüzey basınçlarının dosyaya yazdırılması için modelde DATABASE_BINARY_INTFOR ve DATABASE_EXTENT_INTFOR kartları aktif hale getirilmiştir. Ayrıca slave ve master parçaların yüzey basınç değerlerinin yazdırılması için SURFACE_TO_SURFACE kartındaki SPR ve MPR parametre değerleri 1 yapılmıştır. Analiz gerçekleştirildikten sonra sac üzerinde elde edilen yüzey basıncı dağılımı Şekil 3.17’de verilmiştir. Dağılıma bakıldığında özellikle ıstampa radyüsünde temas kuvvetinin arttığı ve yüzey basıncının 50 MPa değerlerine ulaştığı, ıstampa ile temasın olmadığı desteksiz bölgeden flanş bölgesine kadar ise yüzey basıncının sıfır olduğu görülmektedir.

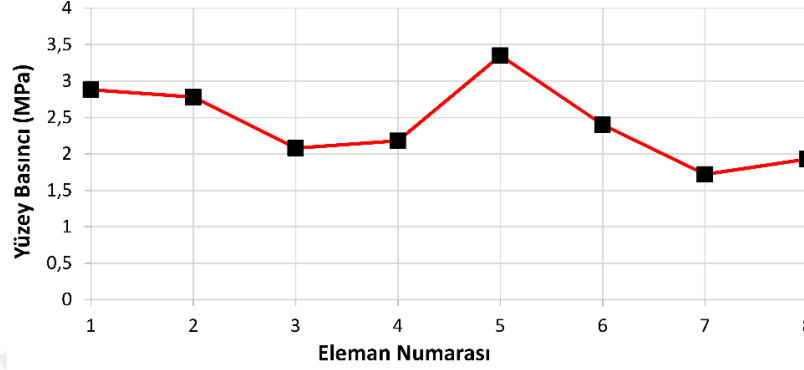


Şekil 3.17. Tek taraflı hidro-şekillendirme analizinde ıstampa-sac temasında sac yüzeyindeki yüzey basıncı dağılımı

Analizlerde kullanılacak P_1 ve P_2 'nin değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.17'daki ıstampa üst yüzeyi ile sac arasındaki yüzey basıncı değerlerinden yararlanılmıştır. Burada ıstampanın sac ile temas ettiği bölgede yüzey basıncının sıfır (koyu mavi bölge) veya sıfıra çok yakın (açık mavi bölge) olduğu görülmektedir. Yüzey basıncının değerini tam olarak belirlemek için ıstampanın sac ile temas ettiği bölgedeki koyu mavi kısımda bulunan sekiz adet elemanın yüzey basınç grafiği çizilmiş ve Şekil 3.18'de verilmiştir. Analiz neticesinde şekilden de görüleceği gibi en düşük yüzey basıncının 1.72 MPa olduğu saptanmıştır. Şekil 3.17'daki ıstampa konumundayken sıvı basıncının 30 MPa olduğu göz önünde bulundurularak 1.72 MPa yüzey basıncı değerinin ıstampa ile sac arasında temasın olduğunu gösterdiği varsayılmıştır. Dolayısıyla P_1 ve P_2 parametreleri sırasıyla 0.5 ve 1 MPa alınmıştır. Yani ıstampa ve sac arasındaki yüzey basıncı 1 Mpa değerini aştığında temasın olduğu algılanmış ve o elemanlar (segmentler) üzerindeki basınç gizlenmiş, 0.5 MPa değerinin altında kaldığında ise tanımlanan basınç gizleme yapılmadan basınç tüm elemanlara uygulanmıştır. Yüzey basıncı P_1 ve P_2 değerleri arasında kalan elemanlara ise basınç, modelde tanımlanan basınç eğrisi

değerleri Denklem 3.1’de verilen f katsayısı ile çarpıldıktan sonra uygulanmıştır. Burada ptemas, segment üzerindeki anlık yüzey basıncı değeridir.

$$f = \frac{P2 - p_{temas}}{P2 - P1} \quad (3.1)$$

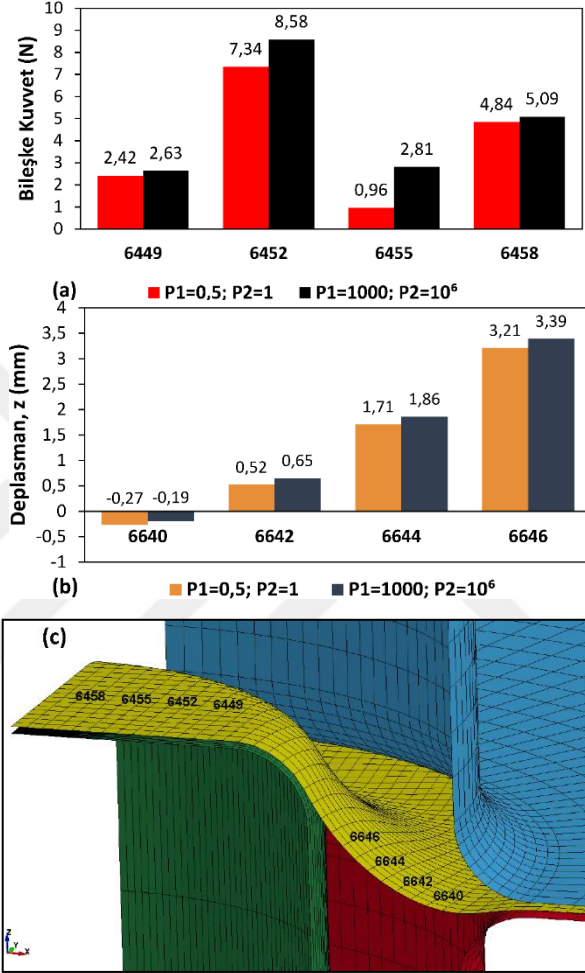


Şekil 3.18. Istamp a üst yüzeyinde mavi bölgede bulunan bazı elemanların yüzey basınç değerleri

LOAD_SEGMENT_CONTACT_MASK kartı ile basıncın elemanlar üzerinde gizlendiğini ve P_1 ile P_2 parametrelerinin etkisini saptamak için dört farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Birinci analizde sadece tek taraflı basınç kullanılmış ve LOAD_MASK kartı ile tanımlanmıştır. İkinci analizde de tek taraflı basınç kullanılmış fakat LOAD_SEGMENT kartı ile tanımlanmıştır. Üçüncü analizde çift taraflı basınçlardan şekillendirme basıncı LOAD_MASK kartıyla, karşı basınç ise LOAD_SEGMENT_CONTACT_MASK kartıyla tanımlanmıştır. Bu analizde P_1 ve P_2 değerleri yüzey basıncının ulaşamadığı kadar büyük (sırasıyla 10^3 ve 10^6 MPa) alınmıştır. Dördüncü analizde ise aynı kart ile P_1 ve P_2 sırasıyla 0.5 MPa ve 1 MPa alınmıştır. Bu analizler sonucunda ıstampanın üzerinde karşı basıncın da uygulandığı bir elemana etkiyen kuvvetler ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır.

Istamp a üzerindeki 6449, 6452, 6455 ve 6458 numaralı düğüm noktalarından ölçülen bileşke kuvvetler Şekil 3.19a’da verilmiştir. P_1 ve P_2 değerlerinin büyük olması, yani karşı basıncın gizleme yapılmadan saca uygulanması ile dört düğüm noktasındaki bileşke kuvvetlerin, P_1 ve P_2 değerlerinin küçük olduğu, yani sıvı basıncının yüzey basıncına göre gizlendiği analizdekilere göre daha büyük çıktığı görülmüştür. Desteksiz bölgedeki 6640, 6642, 6644 ve 6646 numaralı düğüm noktalarının ıstamp a hareketi (z) yönündeki deplasman değerleri ise Şekil 3.19b’de gösterilmiştir. Aynı şekilde, dört düğüm noktası için de gizlemenin yapılmadığı analizdeki deplasman değerlerinin gizlemenin yapıldığı analizdeki değerlere göre daha büyük olduğu saptanmıştır. Yani

ıstampa üzerindeki elemanlara da karşı basıncın uygulanması ile desteksiz bölgedeki düğüm noktaları ıstampa duvarından uzaklaştırılmış ve dolayısıyla deplasmanları daha büyük çıkmıştır. Her iki sonuç incelendiğinde, Load_Segment_Contact_Mask kartı ile P_1 ve P_2 değerleri uygun girildiği takdirde ıstampa ile temas halindeki elemanlar üzerine uygulanacak basıncın gizlenebildiği belirlenmiştir.



Şekil 3.19. P_1 ve P_2 değerlerinin analiz sonuçlarına etkisi: a) ıstampa üzerindeki bazı düğümlerde oluşan bileşke kuvvetler, b) desteksiz bölgedeki bazı düğümlerin ıstampa hareketi yönündeki deplasmanları, c) ıstampa üzerindeki ve desteksiz bölgedeki ölçümlerin yapıldığı düğümler

3.1.4. Kesit (Section) Özelliğinin Tanımlanması

HMDÇ ve ÇTHŞ analizleri, nümerik çözüm süresini kısalttığı için kabuk (shell) olarak modellenmiştir. Dolayısıyla analizde kullanılan tüm parçaların kesit özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Modelde tüm parçalar için tek bir kesit özelliği kullanılmış ve Şekil 3.20’de verilmiştir. Tüm parçaların için, analizin kararlı ve doğru olması açısından 7 integrasyon noktasına (NIP) sahip 16 numaralı tam integrasyonlu kabuk (shell) eleman formülasyonu (ELFORM) kullanılmıştır. SHRF kayma faktörü için ise

varsayılan değer olan 1 alınmıştır. Çalışmada 1 mm kalınlığa sahip Al 5754-O sac malzeme için bir dikdörtgen elemanda bulunan dört düğüm noktalarının kalınlıkları olan T1, T2, T3, T4 kısımlarına 1 yazılmıştır. Bu sayede analizde kabuk elemanlar her noktada 1 mm kalınlığa sahip olmuştur (Şekil 3.20). Aynı şekilde 0.18 mm kalınlığına sahip AISI304 paslanmaz çelik malzeme için T1, T2, T3, T4 değerleri 0.18 olarak girilmiştir.

Keyword Input Form

Subsys: 1 112.k

*SECTION_SHELL_(TITLE) (1)

TITLE

Kesit

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	16	1.0000000	7	1	0	0	1
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.

Replace Insert

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Şekil 3.20. Al 5754-O sac malzeme için kesit (section) özelliğinin tanımlanması

Keyword Input Form

Subsys: 1 olcekli_caydanlik_yeniistampa.k

*SECTION_SHELL_(TITLE) (4)

TITLE

SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
1	16	1	5	1	0	0	1
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
0.1800000	0.1800000	0.1800000	0.1800000	0.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

Data Pt.

Replace Insert

Delete Help

SECID:=Section ID. SECID is referenced on the *PART card and must be unique.

Şekil 3.21. AISI304 paslanmaz çelik malzeme için kesit (section) özelliğinin tanımlanması

Malzeme Modellerinin ve Kesit Özelliğinin Parçalara Atanması

Analizde model için tanımlanan kesit özelliği ve malzeme modellerinin parçalara ayrı ayrı atanması gerekmektedir. Modelde parçalara atanan özellikler Şekil 3.22’de gösterilmektedir. Atama işlemi PART_PART kartıyla yapılmıştır. Burada kart ile baskı plakası, kalıp, ıstampa ve sac için gerekli kesit (SECID) ve malzeme özellikleri (MID) parçalara atanmıştır. Sadece sac parça için HGID ile gösterilen HOURGLASS özelliği aktif edilmiştir. Bu özellik açılarak iş parçası şekillenirken üzerine etki edebilecek yanıl kuvvetlerden olayı parça üzerindeki elemanların çarpılması önlenmiştir. Normalde, kesit (section) kartında tanımlanan 16 numaralı eleman formülasyonu bu çarpılmaları önlemektedir fakat analizin doğruluğu ve çözüm süresinde olumsuz bir etki yaratmaması açısından HOURGLASS özelliği kullanılmıştır. Bu özellik için LS-DYNA’da HOURGLASS kartı açılmış ve PART_PART kartında yer alan HGID kısmından sadece sac parça için açılan bu özellik seçilmiştir.

Şekil 3.22. Kesit, malzeme ve hourglass özelliklerinin parçalara atanması

3.1.5. Temas tipi ve sürtünme katsayıları

ÇTHŞ analizinde, şekillendirme sırasında parçalar arasında iç içe geçme (penetration) olmaması ve analizin kararlı olması için sac-baskı plakası, sac-kalıp ve sac-ıstampa arasındaki temasların ve sürtünmelerin tanımlanması gerekmektedir. LS-DYNA’da ÇTHŞ prosesinin analizi için şekillendirme analizlerinde çokça kullanılan bir algoritma olan CONTACT_FORMING-ONE-WAY-SURFACE-TO-SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. “One-way” temas tipleri ana (master) segmanlar ve

yardımcı (slave) düğümler arasında basma yüklerini iletmeye imkân sağlarlar. Temas sürtünmesi aktif olduğunda eğer bağlı kayma söz konusuysa tanjant yükleri de iletirler. Bu temas tipindeki “One-way” terimi, ana segmanlar ile sadece tanımlı yardımcı düğümler arasında iç içe geçme durumunun kontrol edildiğini göstermektedir. Bu temas tipleri ana segmanın rijit gövde olduğu (metal şekillendirme simülasyonunda kalıp veya ıstampa gibi) analizler için uygundur (Anonim 2, 2015). ÇTHŞ analizinde bu tip temas algoritması kullanılmış ve Şekil 3.23’de verilmiştir. Kullanılan temas kartında yer alan SSID kısmında her üç temas tanımı için de yardımcı (slave) düğümleri ifade eden parça yani sac seçilmiştir. MSID kısmında ise ana (master) segmanları ifade eden parçalar yani kalıp, baskı plakası ve ıstampa seçilmiştir. Yardımcı düğüm ve ana segman tiplerini ifade eden SSTYP ve MSTYP kısımları ise SSID ve MSID kısımlarında seçimin parça şeklinde olması, yani parçalar için ekstrasdan set oluşturulmaması için 3 olarak seçilmiştir. Temas eden parçalar arasındaki sırasıyla statik ve dinamik sürtünme katsayılarını ifade eden FS ve FD kısımlarına ise Tablo 3.1 ‘de verilen sürtünme katsayıları girilmiştir. Bu değerler ise deney ve analiz sonuçlarını karşılaştırarak belirlenmiştir.

Şekil 3.23. ÇTHŞ analizinde parçalar arasında temas ve sürtünme katsayılarının tanımlanması

Tablo 3.1. Temas eden parçalar arasında tanımlanan sürtünme katsayıları

	Sac - Kalıp	Sac - Baskı Plakası	Sac - İstampa
Sürtünme Katsayısı	0.11	0.11	0.30

3.1.6. Malzeme modeli

ÇTHŞ prosesi için oluşturulan SEA modelinde kalıp, ıstampa ve baskı plakası rijit olarak modellenmiş ve bu parçalar için Şekil 3.24’de gösterilen 20 numaralı MAT_RIGID malzeme kartı kullanılmıştır. Bu kartta yer alan malzeme özellikleri çelik için malzeme kataloglarından elde edilmiş ve Tablo 3.1’de verilmiştir. Aynı zamanda kartta bulunan CMO kısmı için global yönde kısıt uygulayan 1 değeri, CON1 kısmı için, ıstampa ve baskı plakası z yönünde öteleme hareketi yapacağından 4 değeri, kalıp tüm yönlerde ve eksenlerde hareketsiz olacağı için 7 değeri seçilmiştir. CON2 bölümünde ise üç parça için tüm eksenlerde dönme hareketi kısıtlı olduğundan 7 değeri seçilmiştir.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 olcekli_caydanlik_yeniistampa.k) Setting

*MAT_RIGID_(TITLE) (020) (3)

TITLE
punch

1 MID RO E PR N COUPLE M ALIAS
1 7.830e-09 2.070e+05 0.2800000 0.0 0 0.0

2 CMO CON1 CON2
1.0 4 7

3 LCO OR A1 A2 A3 V1 V2 V3
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

1 punch
2 die
3 bholder

Şekil 3.24. Kalıp, ıstampa ve baskı plakası için kullanılan malzeme modeli

Tablo 3.1 Kalıp, ıstampa ve baskı plakası ait çelik malzemenin mekanik özellikleri

Elastisite Modülü (E) (Mpa)	Yoğunluk (RO) (ton/mm ³)	Poisson Oranı (PR)
2.1x10 ⁵	7.85x10 ⁻⁹	0.33

Al 5754-O alaşımlı alüminyum sac malzemesi ve AISI304 paslanmaz çelik elastik-plastik ve anizotropik olarak modellenmiştir. Şekil 3.25’de gösterilen MAT_PIECEWISE-LINEAR-PLASTICITY ve Şekil 3.26’da gösterilen 3-PARAMETER_BARLAT anizotropik malzeme kartı kullanılmıştır.

MAT_PIECEWISE-LINEAR-PLASTICITY kartında yer alan RO, E ve PR malzeme özellikleri kataloglardan alüminyum malzeme için bulunmuş ve Tablo 3.2’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.25’de SIGY kısmına ise Al 5754-O sac malzemenin akma mukavemeti 120 Mpa olarak girilmiştir.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 sac96-tam-model.k) Setting

*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (024) (1)

TITLE
blank_material

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
	1	2.700e-09	7.000e+04	0.3300000	120.00000	0.0	1.000e+20	0.0
2	C	P	LCSS	CSR	VP			
	0.0	0.0	1	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Plot Raise New Padd

Şekil 3.25. MAT_PIECEWISE-LINEAR-PLASTICITY malzeme kartının tanımlanması

Tablo 3.2. Al 5754-O alüminyum sac malzemenin mekanik özellikleri

Elastisite Modülü (E) (Mpa)	Yoğunluk (RO) (ton/mm ³)	Poisson Oranı (PR)
7x10 ⁴	2.7x10 ⁻⁹	0.33

3-PARAMETER_BARLAT kartında yer alan RO, E ve PR malzeme özellikleri kataloglardan çelik malzeme için bulunmuş ve Tablo 3.3’de verilmiştir. P1 ve P2 sırasıyla mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üssünü (n) temsil eder. Hadde yönü (R0), hadde yönü ile 45° (R45) ve hadde yönüne dik (R90) değerleri tek eksenli çekme testinden elde edilen R değerleridir (Şekil 3.26).

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use *Parameter ☐ Comment (Subsys: 1 95mm_CTHS_BULANIK_0.11-0.11-0.30_63-40_EKO_R10_Anizotrop_k) Setting

*MAT_3-PARAMETER_BARLAT_(TITLE) ((null)) (1)

TITLE
AA5754-O-Sac

1	MID	RO	E	PR	HR	P1	P2	ITER
	5	2.700e-09	7.000e+05	0.3000000	3.0	470.00000	0.3400000	0.0
2	M	R00	R45	R90	LCID	E0	SPI	P3
	8.0000000	0.7600000	0.6700000	0.7500000	1	0.0	0.0	0.0
3	AOPT	C	P	VLCID	PB	HTA	HTB	
	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0	0.0	
4	XP	YP	ZP	A1	A2	A3	HTC	HTD
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
5	V1	V2	V3	D1	D2	D3	BETA	HTFLAG

Şekil 3.26. 3-PARAMETER_BARLAT malzeme kartının tanımlanması

Tablo 3.3. AISI304 paslanmaz çelik sac malzemenin mekanik özellikleri

Elastisite Modülü (E) (Mpa)	Yoğunluk (RO) (ton/mm ³)	Poisson Oranı (PR)
2.07x10 ⁵	7.85x10 ⁻⁹	0.28

3.1.7. Analiz için modelde yapılan diğer tanımlamalar

ÇTHŞ prosesi sırasında meydana gelebilecek dalgalanmaları sönümleyebilmek için rijit gövdelerin ağırlık merkezine ve deforme olabilen düğümlere kütle ağırlıklı sönümleme tanımlayan DAMPING_GLOBAL kartı açılmış ve içerisindeki sistem sönümleme sabiti olan VALDMP için 5 değeri kullanılmıştır. CONTROL_CONTACT kartı açılarak özellikle içerisindeki SHLTHK kısmı aktif edilmiştir. SHLTHK (shell thickness) özelliğinin 1 yapılması ile şekillendirme sırasında iş parçasının (yardımcı düğümler) kalınlığında değişme oldukça temas algoritmasının değişen kalınlığı da hesaba katarak ana segman (rijit yapı) ile olan temasını arama algoritmasını değiştirmesi sağlanmıştır. Bu sayede, kalınlık azaldıkça ana segman ile olan temas daha dar alanlarda aranmaktadır.

Modelde HOURGLASS kartı açıldığından dolayı aynı zamanda CONTROL_HOURGLASS-936 kartı da aktif edilmiştir. Burada hourglass viskozite tipi (IHQ) ve hourglass katsayısı (QH) için varsayılan değerler kullanılmıştır. Modeldeki rijit parçalar için yapılan matris hesaplamalarının hızlı olması açısından CONTROL_RIGID kartı kullanılmıştır. Bu kartta LMF, JNTF, ORTHMD ve METALF kısımları için 1 değeri seçilmiştir. Şekillendirme esnasında iş parçasında meydana gelen incelmeleri görebilmek için CONTACT_SHELL kartı aktif edilerek bu kartta yer alan ISTUPD kısmı için 1 değeri kullanılmıştır.

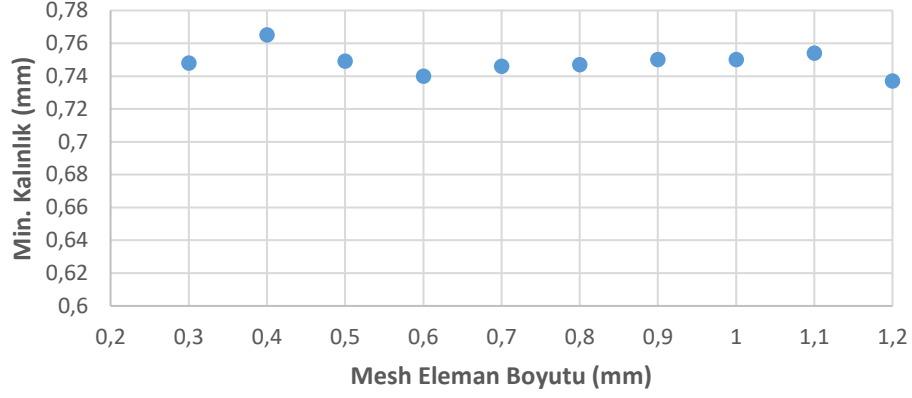
Son olarak CONTROL_TERMINATION kartından analiz bitiş süresi (ENDTIM) maksimum 0.012 saniye ayarlanmıştır. Zaman adımı LS-DYNA SEA programı tarafından otomatik olarak hesaplandığı ve zaman adımına müdahale etmenin iyi olmayıp sonuçları negatif yönde etkilediği için analize zaman adımı büyüklüğü girilmemiştir. Analizler sonucunda LS-DYNA tarafından hesaplanan minimum zaman adımı büyüklüğünün ise 2.2x10⁻⁷ olduğu görülmüştür.

3.2. Optimum Eleman Sayısı İçin Yakınsaklık Testi Analizi

Sonlu elemanlar analizlerinde uygun örgü elemanı boyutunu belirlemek için örgüdeki elemanların boyutu değiştirilerek analiz sonuçlarının değişmediği durumu görene kadar elemanlar küçültülmekte ve son eleman boyutuna karar verilmektedir. Öncelikle yakınsama miktarını belirlemek önemlidir. Eleman boyutu küçüldükçe sonuçlar belirli bir değere yakınsamaya başlar. Ardışık iki eleman örgüsünden elde edilen sonuçlarda önemli ölçüde değişiklik olmamaya başladığında, yakınsamanın gerçekleştiği varsayılabilir.

Elemanların küçültülmesi için tüm modelin eleman örgüsünün değiştirilmesi her zaman gerekli değildir. Saint-Venant İlkesi, bir bölgedeki yerel gerilmelerin başka yerdeki gerilmeleri etkilemediğini söylemektedir. Dolayısıyla, modelin yalnızca ilgilenilen belirli bölgelerinde eleman boyutu iyileştirmesi yapılabilir. Ayrıca kaba ve ince eleman örgüsü arasında bir geçiş bölgesi bulunabilir. Bazı modellerde, yarıçapın sıfır olduğu hem iç hem de dış köşeler vardır (örn. 90° keskin köşeler). Bu bölgelerdeki gerilme teorik olarak sonsuzdur. Bu gibi durumlarda eleman örgüleri arasında bir geçiş bölgesi oluşturulabilir. Fakat ÇTHŞ analizinde keskin köşeler bulunmamaktadır. Ayrıca sac ıstampa üzerinde kayarak şekil değiştirdiği için, radyüse denk gelen örgüler sürekli değişmektedir. Bu nedenle lokal bir örgü geçişi kullanılmamıştır.

Sacda dörtgen örgü eleman tipi kullanılmıştır. Burada 0.3 mm-1.2 mm arasında örgü büyüklükleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 3.27’de değişken örgü boyutlarına göre sac üzerinde oluşan minimum ve maksimum kalınlıkların grafiği verilmiştir. Diğer prosesler için de buradan elde edilen bilgiye göre modelleme yapılmıştır. Analizlerde sac çapı arttıkça eleman boyutu korunarak eleman sayısı artırılmıştır. Şekil 3.27’deki grafikten uygun eleman boyutu 0.8 mm olarak seçilmiş ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27. Örgü boyutu - Minimum kalınlık yakınsama grafiği

3.3. Yükleme Profillerinin ÇTHŞ Prosesindeki Etkisinin Araştırılması

Tez çalışmasında yükleme profilleri adaptif yaklaşımla Bulanık Mantık Kontrol Algoritmaları (BMKA) kullanılarak elde edilmiştir. BMKA ile yükleme profilleri elde edilirken en önemli adımlardan biri, kural tabanlı matrislerin doğru şekilde belirlenmesidir. Kontrol algoritmalarına tanımlanan kurallar, analiz boyunca oluşan temas, inceme, vb. gibi kriterleri her zaman adımda SE modelinden okuyarak uygulanacak basınç ve baskı plakası kuvvetlerini hesaplar. Istampo pozisyonuna göre bu hesaplanan değerlerin oluşturduğu eğrilere de yükleme profilleri adı verilir. BMKA’larda bu kural matrislerinin uygun ve doğru bir şekilde belirlenmesi için kullanıcının tecrübesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle ÇTHŞ’de şekillendirme basıncı, baskı plakası kuvveti ve karşı basınç değerleri belirlenirken şekillendirme karakteristiği hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Örneğin prosesin hangi kısmında daha yüksek şekillendirme basıncı gerektiği veya buruşmaların hangi anda oluşmaya başladığı ve baskı plakası kuvvetinin ne zaman artırılması gerektiği bilinmelidir. Bu şekillendirme karakteristiğinin kavranması aynı zamanda üyelik fonksiyonlarının da belirlenmesi için önemlidir. Daha önce HMDÇ prosesiyle ilgili yapılan çalışmalardan elde edilen tecrübelerle şekillendirme basıncı (iç basınç) ve baskı plakası kuvvetinin hidro-şekillendirme prosesi üzerindeki etkisi hakkında yeterli tecrübe edinilmiştir. ÇTHŞ’deki karşı basıncın şekillendirme üzerindeki etkisini anlamak ve BMKA’ları bu doğrultuda düzenleyebilmek için LS-DYNA SE programında deneme-yanılma yoluyla analizler yapılmıştır.

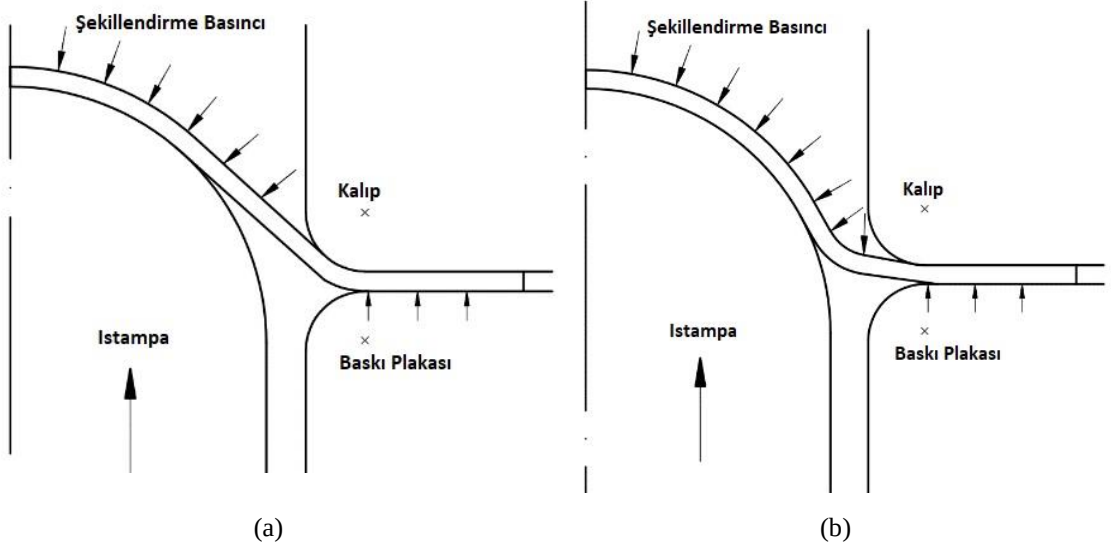
Analizler yapılırken öncelikle proses Hidromekanik Derin Çekme (HMDÇ) gibi düşünülüp, şekillendirme basıncı ve baskı plakası kuvveti yükleme profilleri;

- Sacın mümkün olduğunca hem kalıp hem de baskı plakası radyuslerine temas etmemesi,
- Baskı plakası kuvvetinin sacın buruşmayacağı kadar büyük ama yırtılma olmayacak kadar da küçük olması,
- Sacın kesitinde mümkün olduğunca az incelmeye olması,

kriterleri gözetilerek bir dizi analiz sonunda deneme-yanılma yoluyla elde edilmiştir. Bu yükleme profili elde edildikten sonra prosesin başında farklı karşı basınç eğrileri girilerek karşı basıncın şekillenen sac üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.3.1. ÇTHŞ’de şekillendirme basıncının etkisi

ÇTHŞ’de şekillendirme basıncı prosesin başlangıcından belirli bir ıstampa strokuna kadar şekillendirmenin başarısını etkileyen en önemli parametredir. Genellikle kalıp boşluğu dar ve eksenel simetrik olan parçaların hidro-şekillendirilmesinde şekillendirme basıncının prosesin başında hızlı bir şekilde artmasına gerek yoktur. Fakat kalıp boşluğu fazla veya eksenel doğrultusundaki kesitleri çok farklı olan iş parçalarının hidro-şekillendirilmesinde sacın ıstampa yüzeyine temas etmesi silindirik parçalara göre daha geç olmaktadır. Şekil 3.28(a)’da görüldüğü gibi şekillendirme basıncı gerekenden az uygulandığında sacın ıstampaya sıvanması gecikmektedir. Diğer bir olumsuz etki de ıstampa hareket ederken sacın kalıp radyüsüne sürtünerek ilerlemesidir. Sacın kalıp radyüsüne teması sürtünme kuvvetlerini ve sacın üzerindeki gerilmeleri artırarak aşırı incelmeye veya kopmaya neden olmaktadır. Şekillendirme basıncının gerekenden fazla uygulanması durumu Şekil 3.28(b)’de görülmektedir. Basıncın artmasıyla sac, ıstampaya Şekil 3.28(a)’dan daha geniş bir yüzey alanında sıvanmakta ve kalıp radyüsüne sürtünmeden şekillenme devam etmektedir. Bu olumlu etkilere rağmen hidrostatik basıncın sacın üzerinde oluşturduğu yüksek gerilme ve birim şekil değiştirmelerden dolayı yine askıda kalan kısımdan kopma gerçekleşmektedir. Belirtilen bu şekillendirme karakteristiği göz önüne alınarak uygun bir şekillendirme basıncı yükleme profili elde edilmelidir.



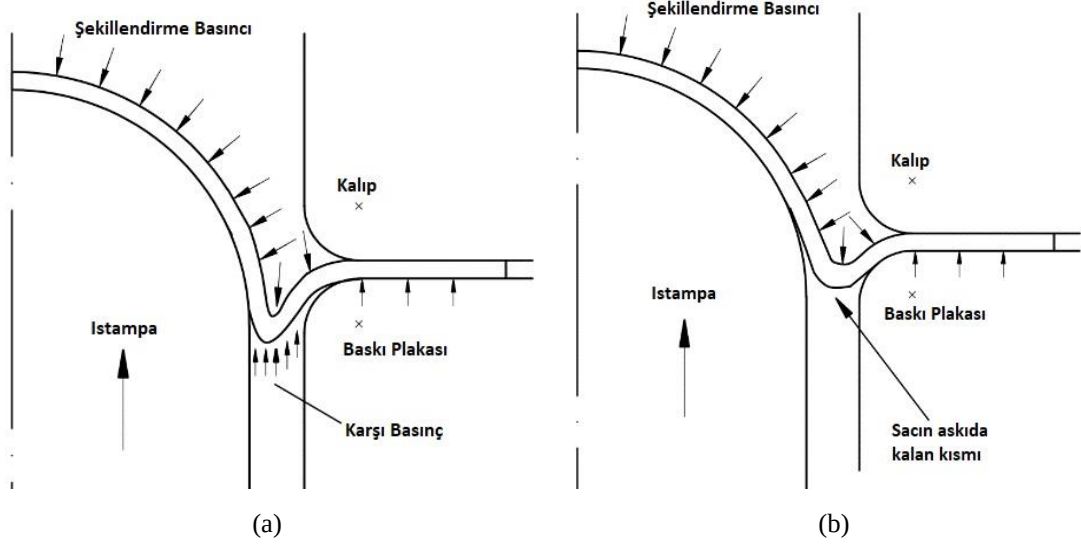
Şekil 3.28. Çift taraflı hidro-şekillendirmede (a) Sacın kalıp radyüsüne teması (b) Yüksek şekillendirme basıncı ile sacın kalıp radyüsünden ayrılması

3.3.2. ÇTHŞ’de baskı plakası kuvvetinin etkisi

Baskı plakası kuvveti, hidromekanik derin çekme işlemindeki önemli parametrelerden biridir. Proses boyunca malzeme akışını kontrol eder ve basınçlı sıvının kalıp ve baskı plakası arasından sızmasını önlemek için gerekli kuvveti sağlar. Aynı zamanda çekilen sacın flanş kısımlarında buruşma oluşmasını önler. Baskı plakası kuvveti artırıldığında ıstampa doğrultusunda oluşan gerilme de artacaktır ve buna bağlı olarak buruşma oluşumu engellenecektir. Ancak büyük baskı plakası kuvvetleri çekilen sacın çeperinde yırtılmaya neden olmaktadır (Gharib ve ark., 2006). Bu yüzden yırtılma ve buruşma limitleri içerisinde kalarak uygun kuvvetler bulunmalıdır.

3.3.3. ÇTHŞ’de karşı basıncın etkisi

Karşı basınç şekillendirme basıncı tarafından oluşturulan şekillendirmeleri kontrol ederek, sacdaki erken yırtılmaları engeller ve aynı zamanda kalınlık dağılımını da olumlu yönde etkiler. Kalınlık doğrultusunda oluşan gerilme ve birim şekil değiştirmeler artar. Bu sayede, kalınlık doğrultusundaki maksimum incelme artsa da aynı sac parçada daha yüksek sınır çekme oranları elde edilebilir (Wang ve ark., 2008).



Şekil 3.29. Çift taraflı hidro-şekillendirmede (a) buruşmaları önlemek için aşırı yüksek basınç nedeniyle BP radyüsüne temas (b) karşı basınçla sacın BP radyüsünden ayrılma

3.4. Sürtünme Katsayılarının ÇTHŞ Prosesine Etkisinin Araştırılması

ÇTHŞ’de sac, ıstampa, baskı plakası (BP) ve kalıp arasındaki temaslardan dolayı sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır. Bunlar; sac-ıstampa, sac-baskı plakası ve sac-kalıp arasında oluşan sürtünme kuvvetleridir. SE analizlerinde doğru sürtünme katsayılarının belirlenmesi deneylerin doğrulanması için son derece önemlidir. LS-DYNA yardım dosyalarında hidro-şekillendirme uygulamalarında tepki kuvvetlerinin sürtünme katsayılarıyla ilişkili olduğu ve yüksek sürtünme katsayılarının daha fazla tepki kuvveti oluşturduğu bilgisi verilmiştir (LS-DYNA Theory Manual). Bu nedenle sürtünme katsayılarının belirlenmesinde tepki kuvvetlerinin referans alınması düşünülmüştür. Deney presinde ıstampa kuvvetleri okunup kaydedilebilmektedir. Bu doğrultuda belirli bir yükleme profili kullanılarak deneme-yanılma metoduyla farklı sürtünme katsayılarıyla analizler yapılmıştır. Bu analizlerden okunan ıstampa kuvvetleriyle aynı yükleme profili kullanılarak yapılan deneylerden kaydedilen ıstampa kuvvetleri karşılaştırılmıştır.

Sürtünme katsayılarının direkt etkisinin görüldüğü bir diğer kriter de sacın kesiti boyunca oluşan yüzde incelmedir. Kalıp-sac ve kalıp-BP arasındaki sürtünme katsayısının yüksek olması artan sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle sacın kalıp boşluğuna akmasını zorlaştıracak ve incelmeleri artıracaktır. İstampa-sac arasındaki sürtünme katsayısının düşük olması ise sacın ıstampa burun radyüsü civarından yırtılmasına neden olacaktır. Bu nedenle öncelikle daha önce belirlenmiş bir yükleme profili kullanılarak

deney presinde başarılı şekillendirme yapılmıştır. Başarılı olarak şekillendirilen parçaların eğrisel mesafe boyunca kalınlık dağılımları ölçülmüştür. Analizlerde farklı sürtünme katsayıları kullanılarak deneme-yanılma yoluyla elde edilen kalınlık dağılımlarıyla deneylerden elde edilen kalınlık dağılımı mukayese edilerek en uygun sürtünme katsayıları belirlenmiştir.

3.5. Deneylerde Kullanılacak Malzemeler ve Mekanik Özellikleri

Tez çalışmasında 1 mm kalınlığında AL 5754 ve 0.18 mm kalınlığında SS 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. AL 5754 malzeme geçmiş çalışmalarda HMDÇ prosesi için sıkça kullanıldığı için tercih edilmiştir. Ekseni doğrultusundaki kesitleri farklı geometride olan parçalarda ÇTHŞ'nin incelenmesinde ise 0.18 mm kalınlığında SS 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme yine proje ekibinin daha önceki çalışmasında HMDÇ prosesi ile imal edilen endüstriyel parçalarda kullanılmış ve o proseste buruşma hataları giderilememiştir. Bu tez çalışması kapsamında ÇTHŞ ile üretilen endüstriyel parçanın geçmiş çalışmalarla kolaylıkla mukayese edilerek etkisinin görülebilmesi için aynı parçanın aynı malzemeyle üretilmesine karar verilmiştir. Esasen bu tez çalışmasının çıkış noktası da bu endüstriyel parçalardaki buruşma hatalarının giderilmesine çözüm bulmaktır.

Çalışmada kullanılan AA 5754 alüminyum alaşımlı sac malzeme 5XXX serisinde (Al-Mg alaşımı) yer almakta olup genel özellikleri orta dereceli mukavemete sahip olması, muhteşem korozyon direnci, yüksek tokluk ve iyi kaynaklanabilirlik olarak sıralanabilir. Bu özelliklerinden dolayı AA 5754 inşaat, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde kullanılır. Özellikle otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılan AA 5754'ün mukavemeti düşük karbonlu çeliğine yakın olmasına rağmen şekillendirilebilirliği ve rijitliği daha azdır (Boogaard 2002). Deneylerde kullanılan 1 mm kalınlığındaki AA 5754 sac malzeme satın alınırken H22 temperi halinde bulunmuştur. H22 temperi deformasyonla çeyrek sertleştirilmiş ve sonra kısmen tavllanmış durumda olan malzemeyi ifade eder. Satın alınan AA 5754 malzemenin spektral analiz sonucu Çizelge 3.1'deki gibidir. Esasen ısıtılma işlemi uygulanamayan alaşımlar sınıfına giren AA 5754 tavlansız O temperine dönüştürülmüştür. Böylece deformasyonun etkisi giderilerek malzeme en yüksek sünekliğe sahip duruma getirilmiştir. AA 5754 saclar 120x120 mm ölçülerinde kesim işlemlerinin yapılmasının ardından malzemelere tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sınır çekme oranını belirlemek için

deney öncesi numuneler dairesel olarak kesilmiştir. Isıl işlemler, Konya Teknik Üniversitesi Malzeme laboratuvarında bulunan Protherm marka kül fırınında yapılmıştır. Numuneler 380°C’de 4 saat boyunca tavllanmış ve oda sıcaklığında havada soğutulmuştur (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Tavlamaya tabi tutulan numuneler ve ısıl işlem fırını

Tavlama, rekristalizasyon sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen bir ısıl işlemidir. Tavlama işlemi ile dislokasyon yoğunluğu en düşük seviyeye inmiş yeni kristaller meydana gelir. Tavlamanın başlangıcında aşırı şekil değiştirmiş bölgelerde yeni kristal çekirdekleri oluşur. Bunlar zamanla tüm malzemeyi kaplar. Başlangıçta ince taneli olan yapı uzun süre tavlanişsa tane büyümesi meydana gelir ve kaba taneli bir yapı oluşur. Bu da sünekliğin artmasına fakat sertlik ve mukavemetin düşmesine neden olur. Tavlama sıcaklığı metalin ergime sıcaklığına, uygulanan plastik deformasyonun miktarına ve tavlamanın süresine bağlıdır. Çalışmada AA 5754-H22 malzemesi 380°C’de 4 saat tavlandıktan sonra oda sıcaklığında havada soğutulmuştur. Bu değerler en yüksek sünekliği sağlayan ve malzeme mukavemetini önemli miktarda düşürmeyen değerler olduğu için alınmıştır (Çetin 2005).

304 paslanmaz çelik, paslanmaz çelik sektörünün temelidir ve aynı zamanda tüm paslanmaz çelik modelleri arasında en çok tercih edilen modeldir. 304 paslanmaz çeliğin diğer modellere oranla daha fazla tercih edilmesinin sebebi kolay temin edilmesi, kolay şekillendirilmesi ve kaynak sırasında kolayca uyum sağlamasıdır. Bunun yanı sıra diğer paslanmaz çelik türlerine göre oldukça uygun fiyatlıdır. Fiyat-performans oranı en sık tercih edilme nedenlerinden biridir. 304 kalite paslanmaz çelik, %15 ila %20 arasında krom ve %2 ila %10 arasında nikel içermektedir. Diğer paslanmaz çeliklere oranla çok daha az elektriksel bir iletken olduğundan manyetik özelliği bulundurmaz. 304 paslanmaz çelik, östenitik paslanmaz grubuna girmektedir. Östenitik paslanmaz grubuna dahil olan

diğer paslanmaz çelikler gibi 304 paslanmaz çelik de yüksek kuvvet basıncına ve yüksek ısı işleme oldukça dayanıklıdır.

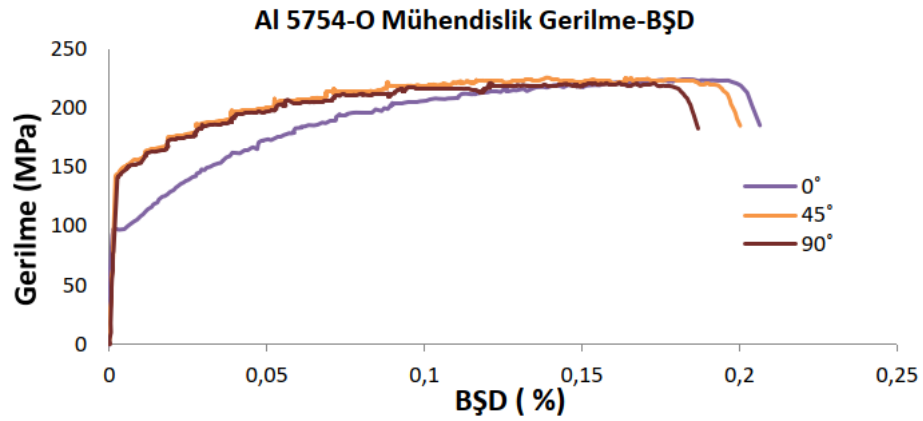
Deneylerde kullanılacak olan 0.18 mm kalınlığındaki SS 304 paslanmaz çelik ve AL 5754 sac malzemenin mekanik özellikleri tek eksenli çekme testi ile tespit edilmiştir. Bu kapsamda sac levhadan lazer kesim yöntemiyle ASTM E8-04 standardına göre hadde yönü (0°), hadde yönü ile 45° ve hadde yönüne dik (90°) üçer tane numune hazırlanmıştır. Üç farklı yönde hazırlanan numuneler ile anizotropinin etkisi belirlenmiştir.

Çekme testleri, 100 kN kapasiteli Shimadzu AGS-X üniversal elektromekanik çekme-basma test cihazında üç tekrar olacak şekilde yapılmış ve test öncesinde numunelerde meydana gelen şekil değişimleri Epsilon eksenel ekstansiyometre ölçülmüştür (Şekil 3.2).

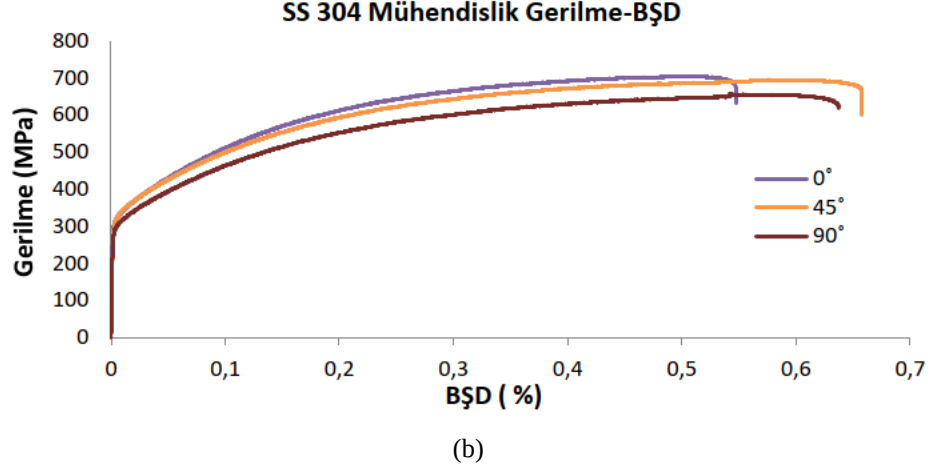
Mühendislik gerilmesi (σ_m) numuneye uygulanan kuvvetin (F) başlangıçtaki kesit alanına ($A_0 = w_0 \cdot t_0$) bölünmesi ile ve mühendislik birim şekil değiştirme (BŞD)'si (e_m) numune boyundaki uzamanın ($\Delta l = l - l_0$) başlangıç boyuna (l_0) bölünmesi ile elde edilir.

$$\sigma_m = \frac{F}{A_0}, e_m = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.1)$$

Test sonuçlarından elde edilen mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri üçer tekrarlı olmak üzere hadde yönü, hadde yönü ile 45° ve hadde yönüne dik kesilen numuneler için elde edilmiştir. 0,18 mm kalınlığında SS 304 ve 1 mm kalınlığında AL 5754-O malzemeler için hadde yönü, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik yönünde elde edilen akma eğrileri Şekil 3.31'da verilmiştir.



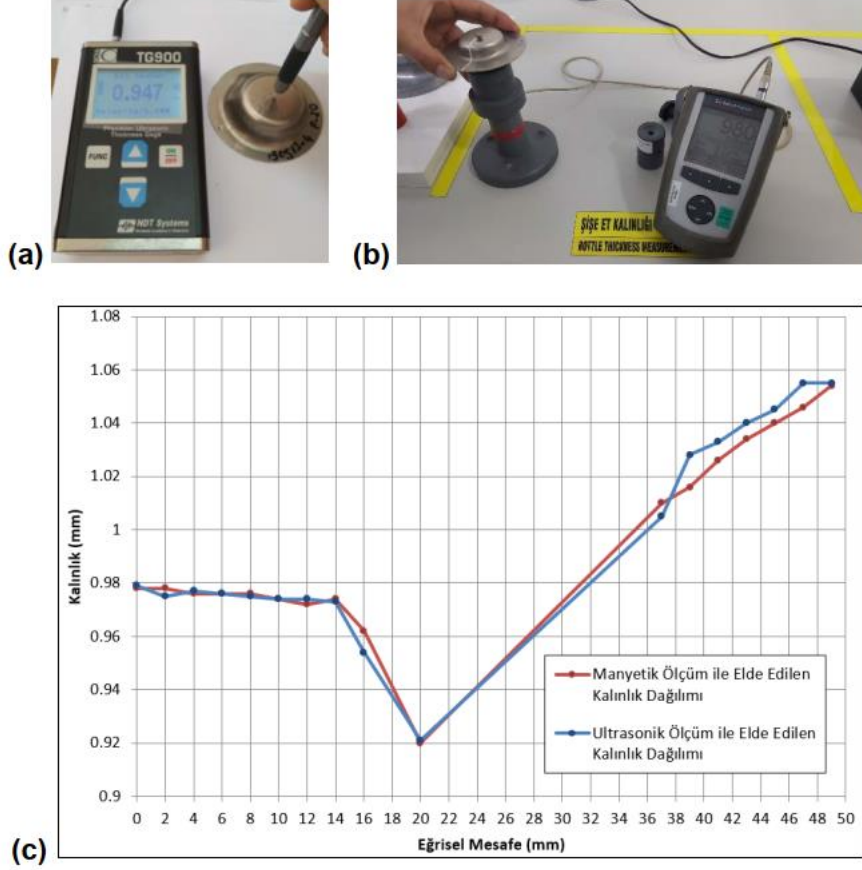
(a)



Şekil 3.31. a) 1 mm kalınlığında AL 5754-O ve b) 0.18 mm kalınlığında SS 304 malzemeler için hadde yönü, hadde yönüne 45° ve hadde yönüne dik yönünde elde edilen akma eğrileri

3.6. Kalınlık Ölçüm Metodu ve Kalibrasyonu

Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen kalınlık dağılımlarının ve sınır çekme oranlarının deneylerle doğrulanmasının başarılı olması için kalınlık ölçümünün güvenilirliği önemlidir. Kalınlık dağılımı ise ultrasonik kalınlık ölçer ile elde edilmektedir (Şekil 3.32a). Ölçüm cihazının güvenilirliğini temin etmek için ilkel sac kalınlığı, ± 0.001 mm hassasiyetinde mikrometre ile ölçülmüştür. Ultrasonik ölçüm cihazı mikrometreden okunan kalınlığı sağlayacak şekilde kalibre edilmiştir. Ayrıca ultrasonik ölçümün güvenilirliğinden yeterince emin olmak için Konya’da yer alan bir işletmedeki manyetik kalınlık ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.32b). Bazı örnek numuneler üzerinde hem ultrasonik ölçme hem de manyetik ölçme yapılmıştır. Her iki ölçüm cihazı ile yapılan ölçmelerde kalınlıkta ± 0.005 mm kadar kabul edilebilir bir fark oluşmuştur (Şekil 3.32c). ÇTHŞ ile üretilecek endüstriyel iş parçasının malzemesi paslanmaz çelik olduğu için kalınlık ölçümü mecburen ultrasonik ölçüm cihazı ile yapılacaktır. Çünkü manyetik ölçüm cihazının kullanılma şartlarından biri ölçülen malzemenin manyetik özelliği olmamasıdır. Dolayısıyla deneysel olarak elde edilen parçaların kalınlık ölçümleri ultrasonik ölçüm cihazı ile güvenilir bir şekilde yapılabileceği için silindirik ve endüstriyel iş parçasının kalınlıklarının ölçülmesinde ultrasonik ölçme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.32. Örnek bir numunenin (a) ultrasonik ölçümü, (b) manyetik ölçümü, (c) manyetik ve ultrasonik olarak ölçülen noktaların karşılaştırılması

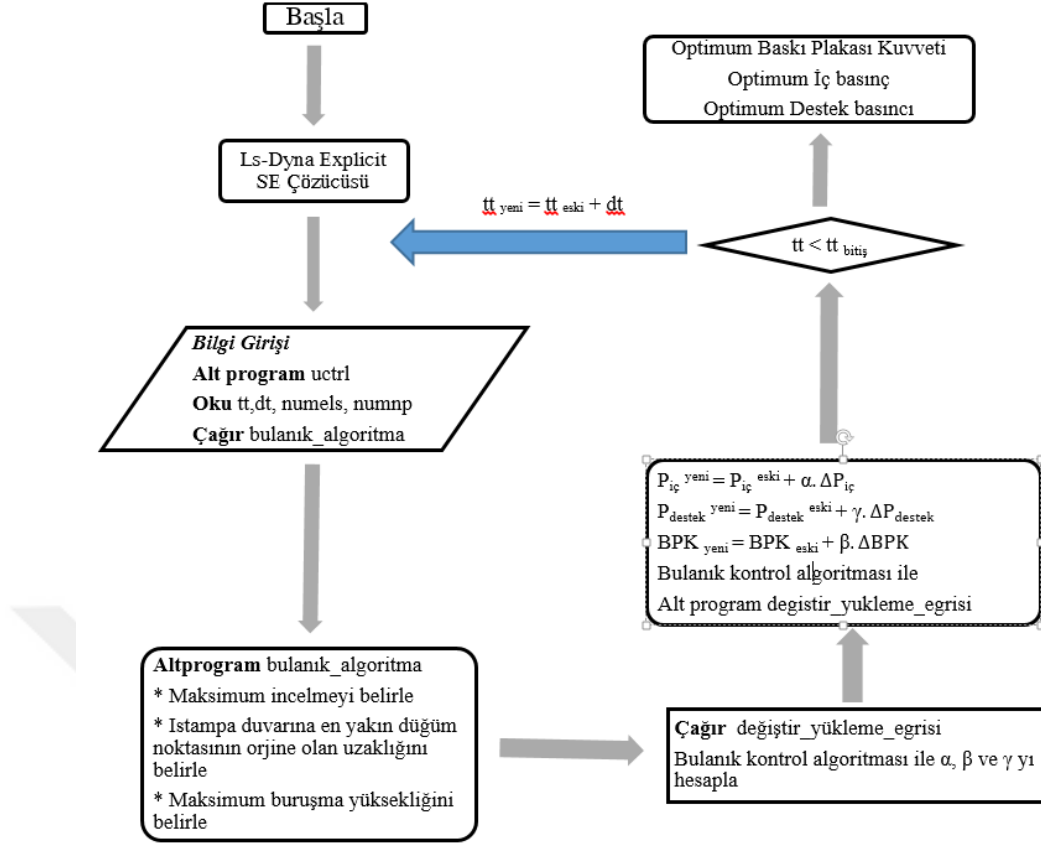
3.7. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi

Çift taraflı sac hidro-şekillendirme prosesinde optimum yükleme profillerinin belirlenmesi için Choi ve ark. (2007) tarafından önerilen bulanık mantık kontrollü adaptif yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemde optimum yükleme profilleri tek bir analiz koşturularak hızlı ve doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımının kaynak kodlarına eklenen alt programlar yardımıyla her bir zaman adımında sacda oluşan minimum kalınlık, maksimum buruşma, sacın ıstampaya temas durumu ve sacın kalıba temas durumu gibi girdi değişkenleri programa okutulabilmektedir. Okunan bu değerler her bir adımda bulanık hesaplamalarda kullanılarak en uygun yükleme profillerini bulunmaktadır.

Geliştirilen bulanık mantık kontrol algoritmalarıyla; şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti olmak üzere 3 adet değişken her bir zaman adımında istenen kriterler kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Bulanık kontrol algoritmalarında kontrol edilecek değişkenlerin adaptif olarak hangi kriterlere bağlı olacağını belirlemek

son derece önemlidir. Bu kriterleri doğru olarak belirleyebilmek için şekillendirmenin karakteristiği iyice irdelenmelidir. Analiz ve deneylerden edinilen tecrübelerle ÇTHŞ’de kriterler belirlenmiştir. Şekillendirme basıncı için; sacın anlık incelme değeri ve şekillendirme sırasında sacın ıstampa yüzeyine sıvandığı (temas ettiği) düşey mesafe üyelik fonksiyonlarıyla bulanıklaştırılarak bir sonraki zaman adımında uygulanacak basınç değeri hesaplanmaktadır. Karşı basınç için; sacın anlık incelme değeri ile sacın baskı plakası radiusüne temasının düşey mesafe değeri bulanıklaştırılarak karşı basıncın bir sonraki zaman adımında alacağı değere karar verilmiştir. Son olarak baskı plakası kuvveti için; sacdaki incelme ile sacın flanş bölgesindeki buruşma yükseklikleri programa ölçtürülerek sonraki zaman adımındaki değeri hesaplanmaktadır. Şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvvetinin hepsi bulanık algoritma içerisinde basıncı ya da kuvveti artıracak veya sabit tutacak şekilde belirlenmiştir. Basınç ya da kuvvetin bir sonraki zaman adımında azaltılmasının olumsuz etkileri daha önce yapılan çalışma ve simülasyon denemeleriyle tecrübe edilmiştir.

ÇTHŞ SE analizlerinde, uygun yükleme profillerinin belirlenmesi için maksimum yüzde incelme, ıstampa duvarına temas, maksimum buruşma yüksekliği ve baskı plakası radiusüne temas giriş değişkenleri, her bir zaman adımında “uctrl1” altprogramında model üzerinden programa okutularak belirlenmektedir. Daha sonra her bir giriş değişkeninin bulanık üyelik dereceleri (ÇKR; çok kritik, KR; kritik, KRD; kritik değil) giriş üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Kural tabanı matrislerine dayalı olarak da çıkış bulanık üyelik dereceleri hesaplanmaktadır. Son olarak bulanık mantık kontrol algoritması yardımıyla elde edilen ve -1 ile +1 arasında bir değere sahip olan kesin çıkışlar (α , β , γ) Şekil 3.33’de verilen akış şemasındaki adaptif yükleme terimini temsil eden denklemlerde yerine konularak yeni zaman adımında uygulanacak olan yeni şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti değerleri hesaplanmaktadır.



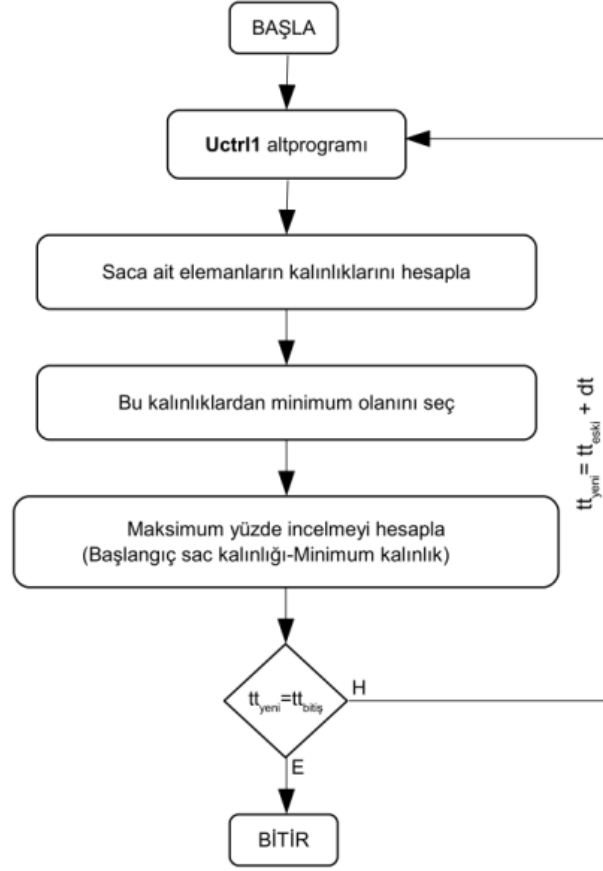
Şekil 3.33. ÇTHŞ prosesinde uygun yükleme profillerini bulunması için kullanılan bulanık mantık kontrol algoritma şeması

3.7.1. Maksimum yüzde incelme giriş değişkeni

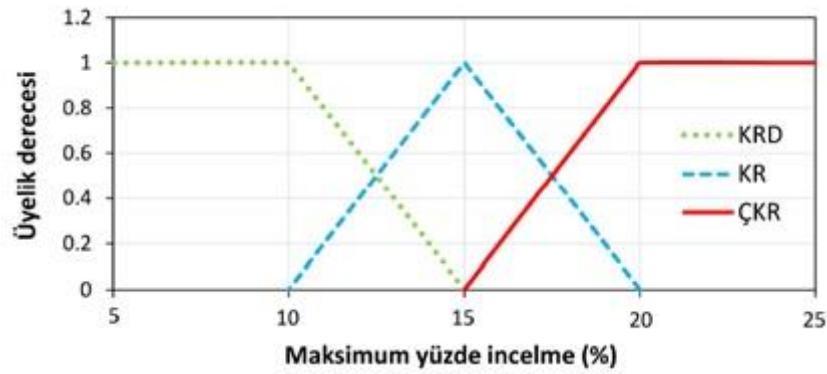
Maksimum yüzde incelme giriş değişkeni değeri için her bir zaman adımında sac parçadaki bütün kabuk eleman kalınlıkları hesaplatılmış ve bu kalınlıklardan minimum olan kalınlık değeri bulanık mantık kontrol algoritmasında kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu minimum kalınlık değeri (başlangıç sac kalınlığı-minimum kalınlık) * 100 formülü ile maksimum yüzde incelmeye dönüştürülmüştür. Bu giriş değişkeni için bulanık mantık kontrol algoritmasında kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 3.35’de verilmiştir.

Maksimum yüzde incelme giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonu oluşturulurken literatür bilgisinden yararlanılmıştır. Daha önceki çalışmalarda yapılan deneylerden gözlemlendiği kadarıyla genelde maksimum yüzde incelme %25’i geçtiğinde sac malzemelerde yırtılma meydana gelmiştir. Bu nedenle maksimum yüzde incelme değeri analizin hiçbir safhasında %25’den fazla olmamalıdır. Analiz ve deneyler arasında oluşabilecek doğal uyumsuzluklar da göz önünde bulundurularak yüzde incelme giriş değişkeninin üyelik fonksiyonu için sacda oluşan maksimum %20 incelmenin çok kritik (ÇKR) dilsel ifadesine ait olması gerektiği düşünülmüştür. Bu şekilde kritik (KR) ve

kritik değil (KRD) ifadelerine ait değerler de belirli aralıklarda tanımlanıp maksimum yüzde incelme giriş değişkeni için gerekli üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur.



Şekil 3.34. Maksimum yüzde incelme giriş değişkeninin bulunmasına ait akış şeması

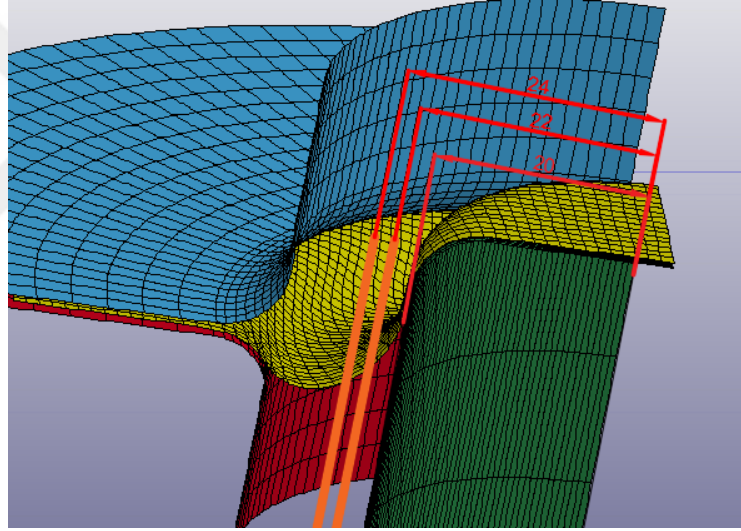


Şekil 3.35. Maksimum yüzde incelme giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

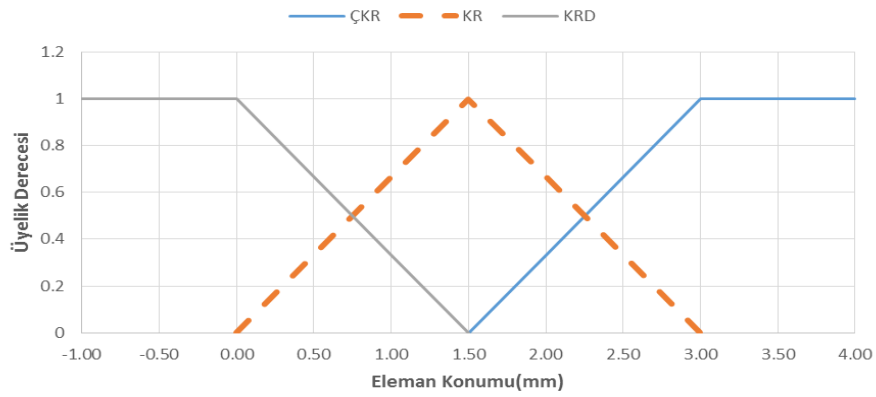
3.7.2. İstampa duvarına temas giriş değişkeni

İstampa duvarına temas giriş değişkeni değeri, analizde her bir zaman adımında ıstampa duvarının 2 mm – 4 mm arasındaki elemanların düşey eksenindeki konum kontrolü

yaptırılarak hesaplanır. Şekil 3.36’da görüldüğü gibi koordinat sisteminde 22 mm – 24 mm arasındaki bölgede kalan düğümlerden, kalıp ve baskı plakası arasında kalan sacın orta noktası orijin kabul edilerek z koordinatı minimum olanı (+z doğrultusunda) seçilmektedir. Analizde kabuk (shell) eleman kullanıldığından ıstampa ile sac arasında sac kalınlığının yarısı kadar bir mesafe olmakta ve bu durumda sac ile ıstampa temas halinde olmaktadır. Çünkü LS-DYNA düzlemsel kabuk elemanı, kabuk elemanı orta düzlemde olacak şekilde düşünmekte ve iş parçasının kalınlığının yarısını bir tarafta, diğer yarısını ise diğer tarafta kabul etmektedir. Bu sayede sacın kalıp radiusüne teması nispeten kontrol edilebilirken, bir yandan da ıstampaya temas kriteri kontrol edilmektedir. Hesaplanan bu değer ise ıstampa duvarına temas giriş değişkeni değeri olarak bulanık mantık kontrol algoritmada kullanılmak üzere seçilmektedir. Istampaya duvarına temas giriş değişkeni için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 3.37’de verilmiştir.



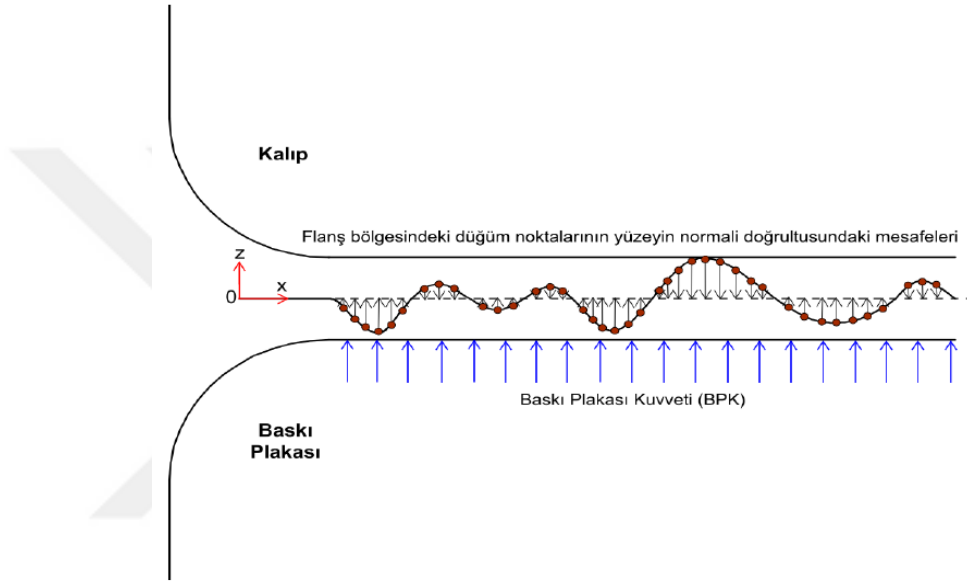
Şekil 3.36. Istampaya duvarına temas giriş değişkeninin parametreleri



Şekil 3.37. Istampaya temas giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

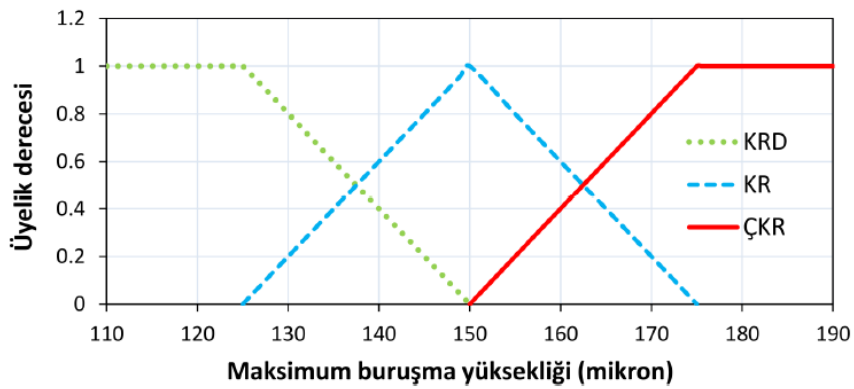
3.7.3. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeni

Şekil 3.38’da şekillendirme esnasında sac parçada meydana gelebilecek buruşma durumu gösterilmiştir. Bu şekilden yola çıkarak, maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeni değeri, her bir zaman adımında flanş bölgesinde yer alan sac metal ile kalıp yüzeyi arasındaki sac parçaya ait düğümlerin yüzeyin normali (z) doğrultusundaki pozitif mesafeleri hesaplanmış ve bu mesafelerden maksimum olanı seçilerek bulunmuştur.



Şekil 3.38. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeninin bulunması

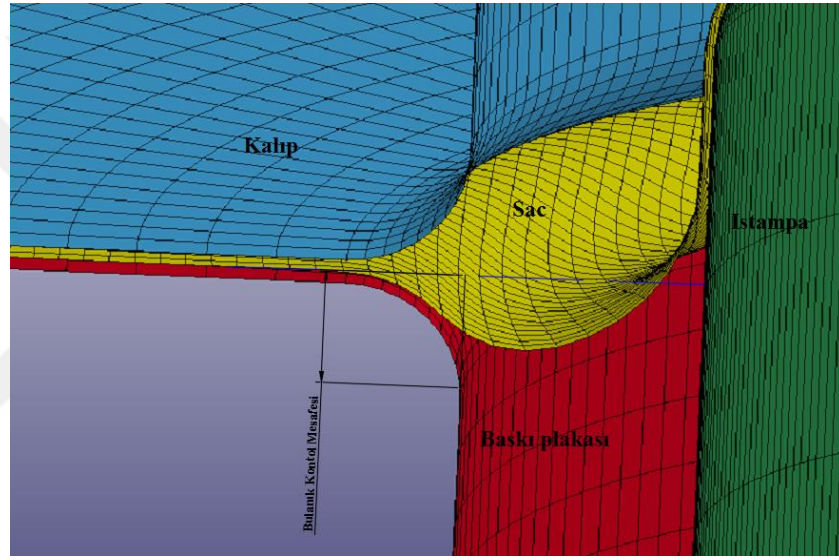
Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeni için kritik (KR) maksimum buruşma yüksekliği değeri, başlangıç sac kalınlığının %15’i olacak şekilde (yani 150 mikron) seçilmiş ve bu giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları Şekil 3.39’de verilmiştir.



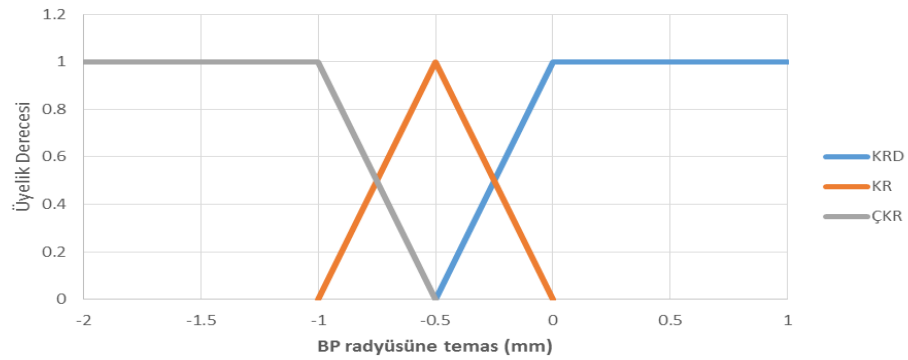
Şekil 3.39. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

3.7.4. Baskı plakası radyüsüne temas giriş değişkeni

Karşı basıncın herhangi bir zaman adımında gereğinden az uygulanması, sacın şekillendirme sırasında baskı plakası radyüsüne temas etmesine neden olur. Bu temas, sacda incelme ve yırtılmalara neden olmaktadır. Bu yüzden ÇTHŞ prosesinde kontrol edilmesi gereklidir. Analiz sırasında sacın bulunduğu düzlem sıfır noktası kabul edilmiştir (Şekil 3.40). Baskı plakası radyüsü bitimi ile sıfır noktası arasına giren elemanların konumu analiz sırasında her zaman adımında bulanık kontrol algoritması tarafından okunmaktadır. Bu okunan değerlere göre de belirlenen üyelik fonksiyonlarıyla bulanık karar verme gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.41).



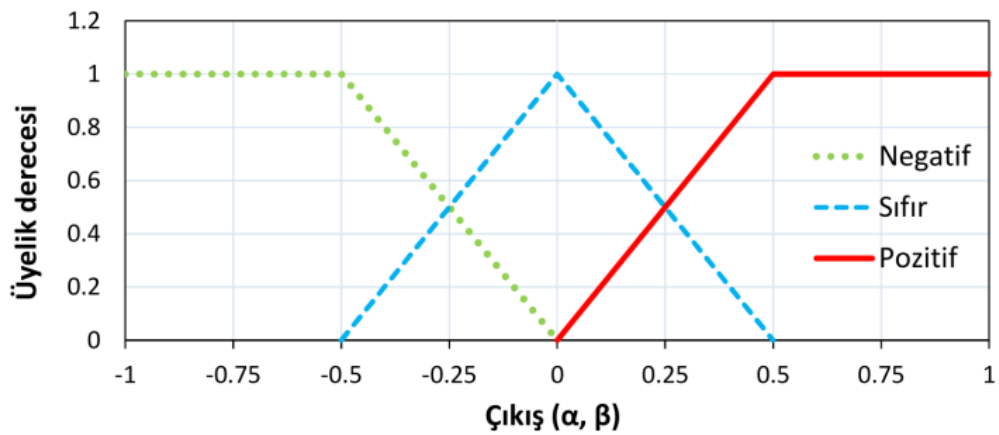
Şekil 3.40. Baskı plakası radyüsüne temas kriterinin oluşturulması



Şekil 3.41. Baskı plakası radyüsüne temas giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

3.7.5. Çıkış değişkenleri

Bulanık mantık kontrol algoritmasında uygun şekillendirme basıncı profilinin belirlenmesi için α , uygun baskı plakası kuvveti profilinin belirlenmesi için β , uygun karşı basınç profilinin belirlenmesi için de γ çıkış değişkenleri kullanılmaktadır. Algoritmada yer alan α çıkış değişkeninin her bir zaman adımında hesaplanması için, uygun şekillendirme basıncı profilinin kontrolünde ÇTHŞ prosesinde en etkili parametreler olan maksimum yüzde incelme ve ıstampa duvarına temas giriş değişkenleri; β çıkış değişkeninin her bir zaman adımında hesaplanması için ise uygun BPK profilinin kontrolünde ÇTHŞ prosesinde en etkili parametreler olan maksimum yüzde incelme ve maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkenleri; γ çıkış değişkeninin her bir zaman adımında hesaplanması için ise maksimum yüzde incelme ve baskı plakası radyüsüne temas giriş değişkenleri kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA’da eğer α , β veya γ negatif, pozitif veya sıfır hesaplanırsa bu, o zaman adımında şekillendirme basıncı, karşı basınç veya baskı plakası kuvvetinin sırasıyla azaltılması (-), artırılması (+) veya değiştirilmemesi (0) gerektiği anlamına gelmektedir. Kontrol algoritmasında kullanılan negatif, sıfır ve pozitif üyelik fonksiyonları Şekil 3.42’de gösterilmektedir. Her üç α , β ve γ çıkış değişkenleri için de aynı üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bulanık kontrolün yapısı gereği negatif çıkış değişkeni için de üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır fakat hidro-şekillendirme karakteristiği gereği kuvvet ve basınç değerleri sıfır veya pozitif olacak şekilde kural matrisleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.42. Çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları

3.7.6. Bulanık kural-tabanlı matrisler

Her bulanık kontrol sistemi bir kural tabanı matrisine ihtiyaç duymaktadır. Bu matris ise bilgi tabanı ile tecrübenin özel bir tipidir ve prosesin karar verme basamağını oluşturmaktadır. Bu çalışmada şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvvetini bulmak için gerekli üç ayrı matris mevcuttur ve bu matrisler yüklemelerin (şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvvetlerinin) artırılması veya sabit kalması gibi kararların belirlenmesi için gerekli kurallardan oluşmaktadır. Örneğin Tablo 3.4(b)'ye bakıldığında baskı plakası radiusüne temas giriş değişkeni değeri çok kritik (ÇKR) ve maksimum yüzde incelme giriş değişkeni kritik değil (KRD) ise kural 7 (D7) gereği karşı basıncı artır kuralı tetiklenmiştir.

Tablo 3.4. (a)Şekillendirme basıncı, (b)Karşı basınç, (c)Baskı plakası kuvveti için bulanık kural tabanlı matrisleri

P_{şek.}	Askıda Kalan Eleman Konumu (Istampa Temas)				P_{karşı}	Baskı Plakası Radiusüne Temas			
Max % incelme		ÇKR +3 mm.	KR +1 mm.	KRD 0 mm.	Max % incelme		ÇKR -1 mm	KR -0.50 mm	KRD 0 mm
	ÇKR %30	$I_1 (0)$	$I_2 (+)$	$I_3 (0)$		ÇKR %30	$D_1 (+)$	$D_2 (+)$	$D_3 (+)$
	KR %20	$I_4 (+)$	$I_5 (+)$	$I_6 (0)$		KR %20	$D_4 (+)$	$D_5 (+)$	$D_6 (+)$
	KRD %10	$I_7 (+)$	$I_8 (+)$	$I_9 (0)$		KRD %10	$D_7 (+)$	$D_8 (+)$	$D_9 (0)$

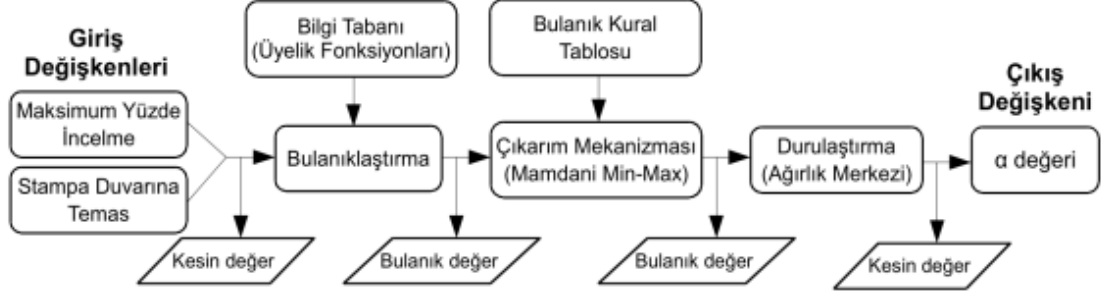
(a)

(b)

BPK	Maksimum Buruşma Yüksekliği			
Max % incelme		ÇKR 0.155 mm	KR 0.115 mm	KRD 0.1 mm
	ÇKR %30	$K_1 (0)$	$K_2 (+)$	$K_3 (0)$
	KR %20	$K_4 (+)$	$K_5 (0)$	$K_6 (0)$
	KRD %10	$K_7 (+)$	$K_8 (+)$	$K_9 (0)$

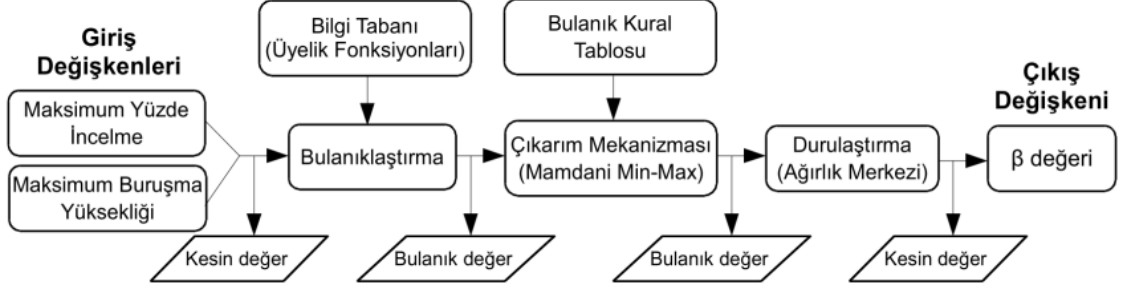
(c)

ÇTHŞ’de uygun şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti yükleme profillerinin bulunması için tasarlanan Tip-1 bulanık kontrol algoritmalarının genel yapısı sırasıyla Şekil 3.43, Şekil 3.44, Şekil 3.45’de gösterilmektedir.

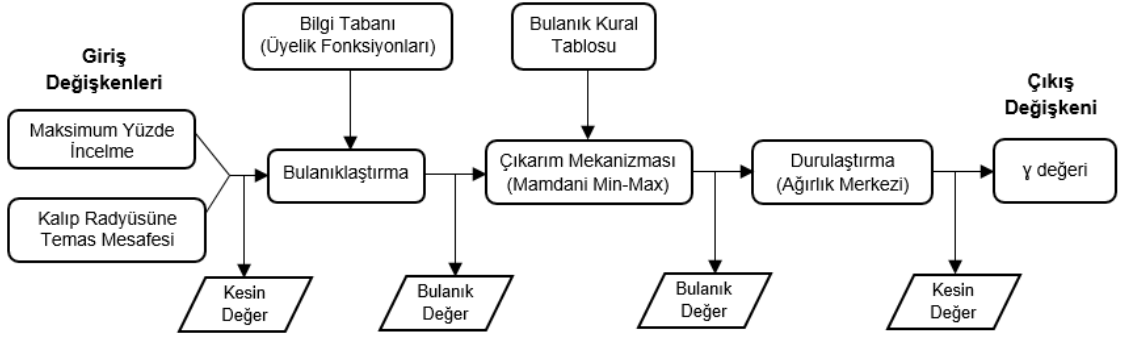


Şekil 3.43. Uygun şekillendirme basıncı profilinin belirlenmesi için tasarlanan bulanık sistemin yapısı

Şekil 3.43’e bakıldığında, bulanık mantık kontrol algoritmasında, uygun şekillendirme basıncı profilinin bulunması için giriş değişkenleri olarak maksimum yüzde incelme ve ıstampa duvarına temas kriterlerinin kullanıldığı, bu giriş değişkenlerinin bilgi tabanı (üyelik fonksiyonları) yardımıyla her iki değişken için bulanık değerlere dönüştürüldüğü (bulanıklaştırma işlemi), bulanık kural tablosu ve çıkarım mekanizması yardımıyla o zaman adımında sıvı basıncının ne yapılması gerektiği (artırılması veya sabit kalması) ve son olarak durulaştırma işlemi yani ağırlık merkezi yöntemi ile kesin çıkış değeri α ’nın hesaplanması adımları gösterilmektedir. Şekil 3.44’a bakıldığında uygun BPK profilinin bulunması için ise giriş değişkenleri olarak maksimum yüzde incelme ve maksimum buruşma yüksekliğinin kullanıldığı görülmektedir. Diğer işlemler şekillendirme basıncı profilinin bulunması adımları ile aynıdır. Burada kesin çıkış olarak ise β değeri hesaplanmaktadır. Şekil 3.45’de karşı basınç yükleme profilinin elde edilmesi için kullanılan maksimum yüzde incelme ve kalıp radyüsüne temas mesafesi giriş değişkenleri görülmektedir. Yine burada aynı algoritma yapısı kullanılarak γ kesin çıkış değeri hesaplanmaktadır.



Şekil 3.44. Uygun baskı plakası kuvveti profilinin belirlenmesi için tasarlanan bulanık sistemin yapısı



Şekil 3.45. Uygun karşı basınç profilinin belirlenmesi için tasarlanan bulanık sistemin yapısı

3.7.7. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmasının ÇTHŞ Prosesine Uygulanması

Aşağıda, belirli bir zaman adımıında BPK (baskı plakası kuvveti)’nin artırılması, azaltılması veya değiştirilmemesi gibi kararlarını belirleyen kesin çıkış değeri β ’nın hesaplanması esnasında bulanık mantık kontrol algoritmasının nasıl çalıştığını açıklayan bir örnek verilmiştir. Şekillendirme basıncı ve karşı basınç için gerekli kesin çıkış α ve γ değerlerinin hesaplanmasında da aynı adımlar takip edilmektedir. Analiz esnasında belirli bir zaman adımıında maksimum yüzde incelmenin %18 ve maksimum buruşma yüksekliğinin 167 μm (mikron) olduğu kabul edilirse:

- i. Her bir giriş değişkeni üyelik fonksiyonu, giriş üyeliklerinin (ÇKR, KR, KRD) derecelerini üretir. Bu proses ise bulanıklaştırma işlemi olarak adlandırılmaktadır. Dolayısıyla, maksimum yüzde incelme için ÇKR, KR ve KRD’nin üyelik dereceleri; ÇKR maks. yüzde incelme = 0, KR maks. yüzde incelme = 0.6, KRD maks. yüzde incelme = 0.4 olarak; maksimum buruşma yüksekliği için ise ÇKR, KR ve KRD’nin

üyelik dereceleri; ÇKR maks. buruşma yük.= 0.66, KR maks. buruşma yük.= 0.33, KRD maks. buruşma yük.= 0 olarak hesaplanacaktır.

- ii. Maksimum yüzde incelme ve maksimum buruşma yüksekliği için üçer tane (ÇKR, KR, KRD) üyelik fonksiyonu olduğu için, 9 tane (3x3) kural ortaya çıkmaktadır. Bu kurallar, kural-tabanlı matrisler olarak adlandırılmakta ve uzman tecrübesi ile belirlenmektedirler. Bu örnekte, dört tane (2x2) üyelik fonksiyonu çifti (KR-ÇKR, KR-KR, KRD-ÇKR, KRD-KR) sifıra eşit olmadığı için bulanık mantık kontrol algoritmasında 4 kural ateşlenecektir. Bu kuralların üyelik dereceleri, her bir kural çiftinde giriş değişkenlerinin üyelik derecelerinden minimum olanın seçen Mamdani (Min-max) çıkarım mekanizması'na göre hesaplanmaktadır.

$$K4 = \text{MIN} (\text{KR maks. yüzde incelme} , \text{ÇKR maks. buruşma yük.}) = \text{MIN} (0.6, 0.66) = 0.6 \text{ (pozitif)}$$

$$K5 = \text{MIN} (\text{KR maks. yüzde incelme} , \text{KR maks. buruşma yük.}) = \text{MIN} (0.6, 0.33) = 0.33 \text{ (Sıfır)}$$

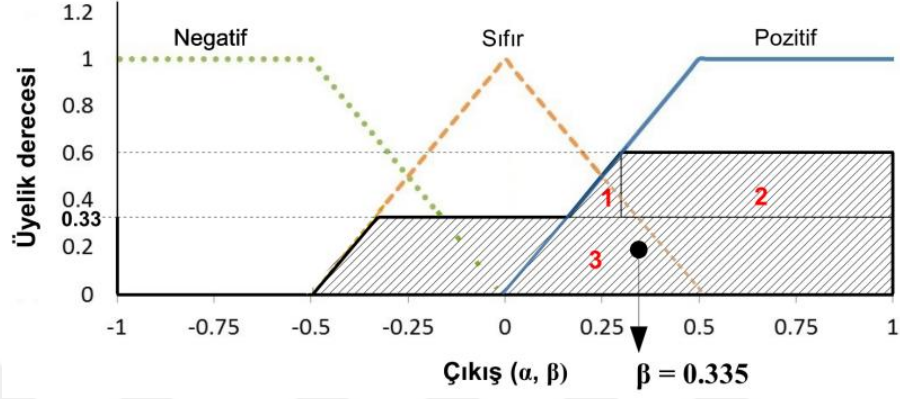
$$K7 = \text{MIN} (\text{KRD maks. yüzde incelme} , \text{ÇKR maks. buruşma yük.}) = \text{MIN} (0.4, 0.66) = 0.4 \text{ (pozitif)}$$

$$K8 = \text{MIN} (\text{KRD maks. yüzde incelme} , \text{KR maks. buruşma yük.}) = \text{MIN} (0.4, 0.33) = 0.33 \text{ (pozitif)}$$

Çıkış üyelik fonksiyonlarının (pozitif, sıfır, negatif) üyelik derecelerini hesaplamak için Mamdani çıkarım mekanizması bu sefer, bulanık mantık kontrol algoritmasının, her bir çıkış üyelik fonksiyonu için sadece bir tane üyelik derecesine sahip olması gerektiğinden dolayı, her bir çıkış üyelik fonksiyonunun maksimum değerini seçmektedir. Dolayısı ile bu örnekte pozitif çıkış üyelik fonksiyonu 3 tane olduğundan, pozitif çıkışlardan maksimum derece seçilecektir. Yani pozitif= $\text{MAX} (0.6, 0.4, 0.33)=0.6$ olacaktır. Sıfır çıkış üyelik fonksiyonu tek olduğundan zaten sıfır çıkışının üyelik derecesi 0.33 olacaktır.

- iii. Ateşlenen kurallardan ayrı ayrı tek olarak elde edilen çıkış üyelik derecelerinden sonra örnekte kesin çıkış β değeri, her bir çıkış derecesinin çıkış üyelik fonksiyonunda kesiştirilmesiyle 0.335 olarak hesaplanmıştır. Durulaştırma işlemi olarak isimlendirilen bu yöntemde, kesiştirme sonunda oluşan alanın ağırlık merkezi hesaplanmıştır. Bu alan ise üç alana bölündükten sonra her bir üçünün ağırlık merkezinin ve alanının hesaplanmasıyla kesin çıkış β değeri hesaplanmıştır (Şekil 3.46). Burada hesaplanan 0.335 β değeri, baskı plakası kuvvetinin mevcut zaman

adımının sonunda ($0.335 \times \Delta BPK$) değeri kadar arttırılması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu şekilde bulanık mantık kontrol algoritmali adaptif yöntem analizde her bir zaman adımında çalışarak uygun yükleme profilleri analiz sonunda eğri şeklinde elde edilmektedir.



Şekil 3.46. Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile kesin çıkış β 'nın bulunması

Bulanık karar verme algoritması α , β ve γ çıkış değerlerini elde ettikten sonra bu çıkış değişkenlerini sırasıyla şekillendirme basıncı, baskı plakası kuvveti ve karşı basıncı artırmak veya sabit tutmak için kullanmaktadır.

$$P_{\text{şekillendirme}}^{\text{yeni}} = P_{\text{şekillendirme}} + K_1 \cdot \alpha$$

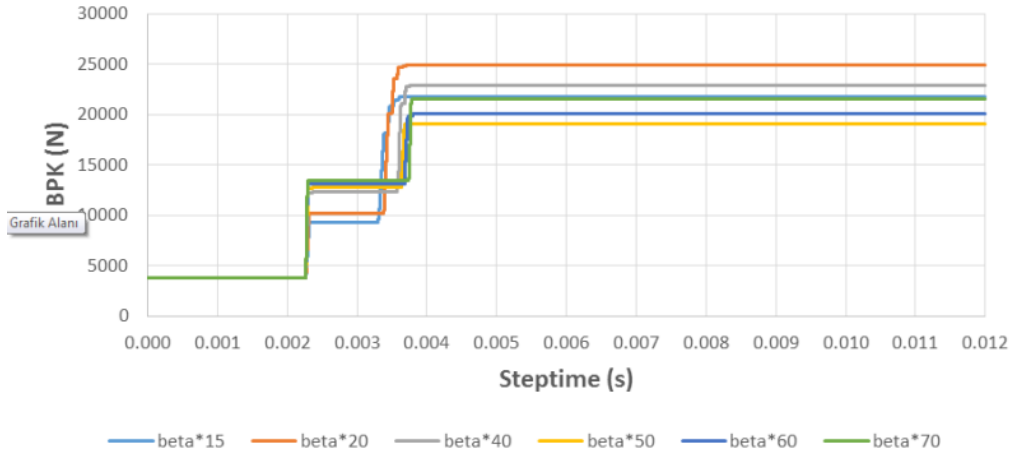
$$P_{\text{karşı}}^{\text{yeni}} = P_{\text{karşı}} + K_2 \cdot \gamma$$

$$F_{\text{baskıplakası}}^{\text{yeni}} = F_{\text{baskıplakası}} + K_3 \cdot \beta$$

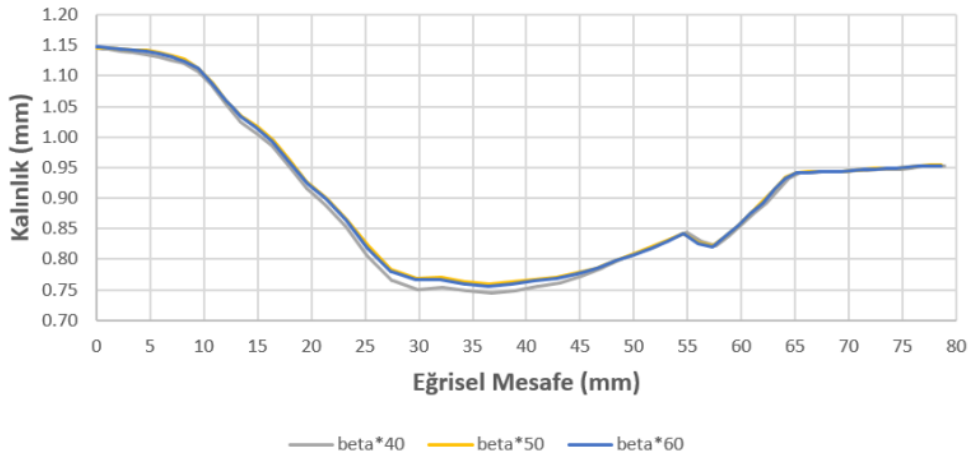
Buradaki K_1 , K_2 ve K_3 katsayıları, çıkış değişkenleri ile çarpılarak kuvvet ya da basınç artışının miktarını belirler. Örneğin; $F_{\text{baskıplakası}}^{\text{yeni}} = 5.000 + 50(0.06) = 5.003$ olarak her analiz zaman adımında güncellenmektedir. Dolayısıyla K_1 , K_2 ve K_3 katsayıları elde edilecek eğrilerdeki kuvvet veya basınç değişiminin miktarını belirler. Küçük bir katsayı seçilmesi kuvvet veya basıncın gerekenden yavaş artmasına neden olacaktır. Büyük bir katsayı seçilmesi ise analiz sırasında gerekli olmadı halde yüksek basınç veya baskı plakası kuvveti uygulanmasına neden olacaktır. Bu nedenle K_1 , K_2 ve K_3 katsayıları için uygun değerler kullanılmalıdır.

Beta (β) BPK için uygun çarpan değerini bulmak için sırasıyla beta*15, beta*20, beta*40, beta*50, beta*60 ve beta*70 değerleri analiz edilmiştir. Şekil 3.47’de beta*50 ve beta*60 eğrilerinin daha uniform bir kalınlık dağılımı gösterdiği görülmektedir. Yine şekilde görüldüğü gibi en düşük BPK’yı oluşturan çarpan beta*50’dir. Şekil 3.47’de buruşma grafiğinde beta*50 ve beta*60 arasında belirgin bir fark görülmemektedir. beta*50’nin daha düşük BPK üretmesinden dolayı uygun çarpan olarak beta*50 seçilmiştir. Şekil 3.48’de beta*40, beta*50 ve beta*60 çarpanları kullanılarak elde edilmiş baskı plakası eğrisi ile yapılan şekillendirme analizinden elde edilen kalınlık dağılımı görülmektedir. Beta*50 katsayısı kullanılarak elde edilen baskı plakası kuvveti eğrisini, sacdaki kalınlık dağılımını daha üniform olarak şekillendirdiği görülmüştür.

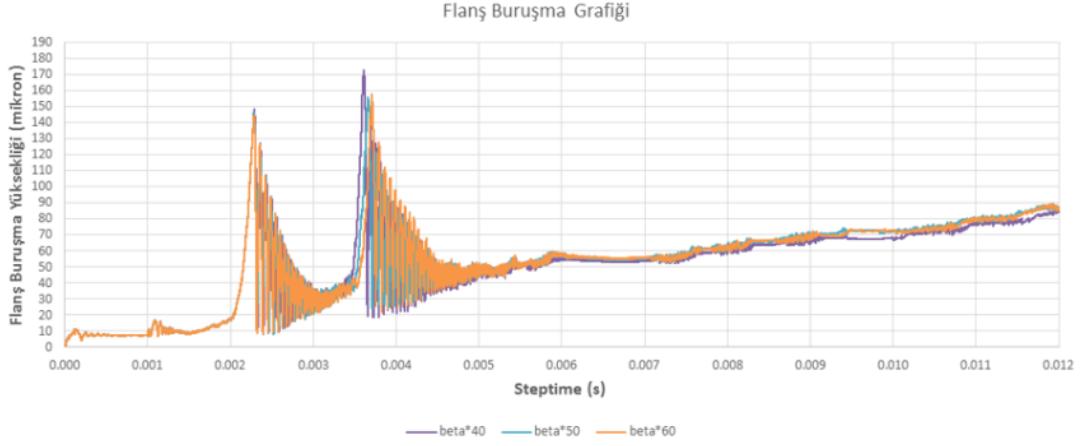
Şekil 3.49’da görüldüğü gibi buruşma grafiğinde beta*50 ve beta*60 arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Beta*50’nin daha düşük bir BPK üretmesinden dolayı uygun çarpan olarak beta*50 seçilmiştir.



Şekil 3.47. Beta çarpanları için elde edilen baskı plakası kuvveti eğrileri



Şekil 3.48. Beta çarpanları kullanılarak elde edilen sac kesiti kalınlık dağılımı



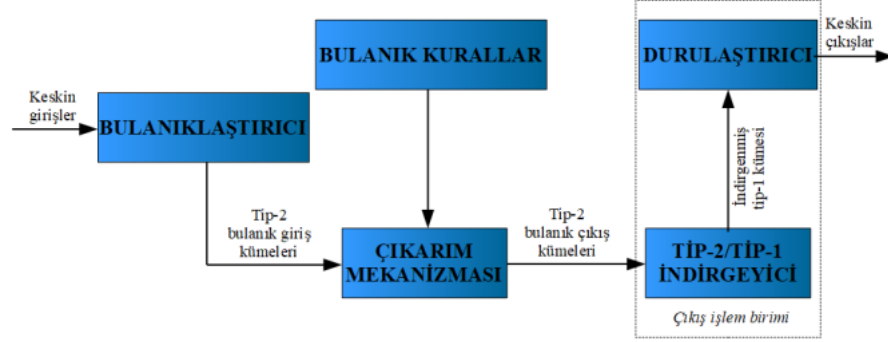
Şekil 3.49. Beta çarpanları için flanş kısmında oluşan max buruşma yüksekliği grafiği

3.8. Tip-2 Bulanık Mantık Adaptif Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi

ÇTHŞ prosesindeki şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti değişken parametrelerine ait optimum yükleme profillerinin Tip-1 bulanık mantık sistemlerinin bir uzantısı olan Tip-2 bulanık mantık denetleyicisi kullanılarak belirlenmesine karar verilmiştir. Tip-1 bulanık mantık sistemlerinde (BMS), üyelik fonksiyonları belirli bir giriş değeri için 0 ile 1 arasında kesin (crisp) bir değere sahip olmaktadır. Tip-2 BMS’de ise belirli bir aralıkta birden fazla Tip-1 üyelik fonksiyonu tanımlandığı için Tip-2 BMS, kontrol sistemlerindeki belirsizlikleri (uncertainties) Tip-1 BMS’ye göre daha fazla minimize etmektedir. Genel ve Aralıklı olarak ikiye ayrılan Tip-2 BMS’de hesaplamadaki karmaşıklığından dolayı Genel Tip-2 BMS’nin literatürde az kullanıldığı belirlenmiştir. Bu nedenle ÇTHŞ prosesinin optimum yükleme profillerinin elde edilmesinde Aralıklı Tip-2 (AT2) BMS’nin kullanılmasına karar verilmiştir.

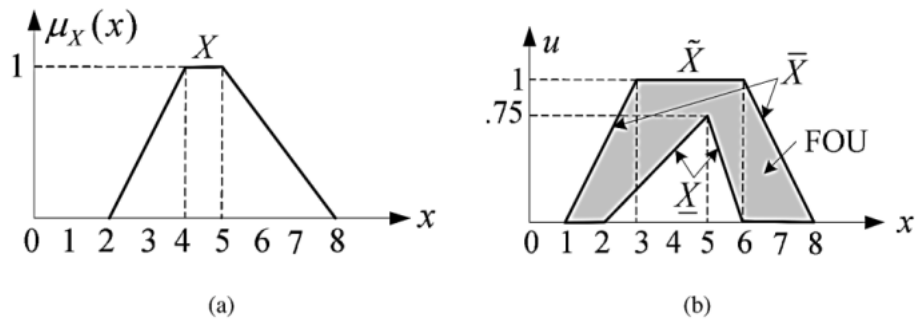
Tipik bir tip-2 BMD yapısı Şekil 3.50’de blok diyagramı şeklinde gösterilmiştir. Tip-1 BMD ile oldukça benzerlik gösteren tip-2 BMD, özellikle bulanıklaştırıcı biriminde yer alan çok sayıda gömülü üyelik fonksiyonlarından dolayı yapısında tip indirgeyici birimini de barındırmaktadır. Blok diyagramı incelendiğinde tip-2 BMD’de, keskin (crisp) giriş değerleri bulanıklaştırıcı biriminde bulanıklaştırıldıktan sonra çıkarım mekanizması ve bulanık kurallar birimleri yardımıyla bulanık çıkış kümelerine dönüştürülmektedir. Ancak buradaki çıkış kümeleri tip-1 BMD’den farklı olarak tip-2 çıkış kümelerine sahip olduğundan tip indirgeyici birimi yardımıyla tip-2 çıkış kümeleri tip-1 çıkış kümelerine dönüştürülmektedir. Son çıkış işlem birimi olan durulaştırıcı ise

tip-2 kümesinden indirgenerek elde edilen indirgenmiş tip-1 kümesini durulaştırarak kesin çıkış değerlerini hesaplamaktadır.



Şekil 3.50. Bir tip-2 bulanık mantık kontrolcüsüne ait blok diyagramı

Hesaplama kolaylığı açısından AT2 üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. AT2, BMD’de bulunan bulanıklaştırıcı biriminde çok sayıda iç içe geçmiş (gömülü) tip-1 üyelik fonksiyonları yer almaktadır. Tip-2 BMD’yi tip-1 BMD’den ayıran en temel unsur bu gömülü üyelik fonksiyonlarıdır. Çünkü tip-1 BMD’de yer alan üyelik fonksiyonları kesin olduğu için (a) bulanık küme içerisindeki giriş değerleri sadece bir adet üyelik derecesine ($\mu_X(x)$) sahiptir olmaktadır. Dolayısıyla çalışmalarda tip-1 BMD’nin belirsizlikleri modellemede ve minimize etmede yetersiz kaldığı belirtilmektedir. Tip-2 BMD’de bulunan üyelik fonksiyonları (Şekil 3.51b) yardımıyla bu belirsizlikler en aza indirilmektedir. AT2 üyelik fonksiyonları Şekil 3.51b’de gösterildiği gibi alt ($\underline{X}$) ve üst ($\bar{X}$) üyelik fonksiyonlarından oluşmaktadır ve bu üyelik fonksiyonları arasında kalan bölgeye de Belirsizliğin Ayak İzi (footprint of uncertainty, FOU) denilmektedir. Böylece bulanık küme içerisindeki giriş değerleri alt ve üst üyelik fonksiyonları için farklı üyelik derecelerine (u) sahip olmaktadır. Bu kapsamda AT2 BMD özellikle değişkenlere ait üyelik fonksiyonlarının tam olarak bilinmediği veya farklı bireylere ait çeşitli fikirleri/tecrübeleri modellemede etkili olmaktadır.



Şekil 3.51. (a) Tip-1, (b) tip-2 üyelik fonksiyonu örnekleri

Literatürde Tip-2 BMS'nin daha çok Matlab yazılımında oluşturulan Matlab araç kutusu ve dosyaları yardımıyla kontrol sistemlerine uygulandığı belirlenmiştir. LS-DYNA SEA yazılımında modellenen ÇTHŞ prosesine herhangi bir denetleyici sistemin uygulanması için LS-DYNA çözücüsüne Fortran programlama dilinde yazılan altprogramlar yardımıyla müdahale edilmesi gerekmektedir. Karmaşık ve kavranması zor olan Tip-2 BMS algoritmalarının tekrar yazılmaması için öncelikle literatürde bulunan hazır Matlab kodlarının kullanılmasına karar verilmiştir. LS-DYNA çözücüsünün oluşturulması için temin edilen kütüphane dosyaları içerisinde yer alan dyn21.f dosyasının kullanılması gerekmektedir. Bu dosyada Fortran programlama dilinde mex fonksiyonları kullanılarak Matlab API kütüphaneleri yardımıyla giriş değişkenlerinin Matlab çalışma alanına gönderilip hazır Tip-2 BMS kodları ile çıkış değişkenlerinin elde edilmesine ve her bir zaman adımında bu işlemlerin tekrarlanarak sonuçta optimum yükleme profillerinin elde edilmesi düşünülmüştür. Her ne kadar fortran dilinde mex fonksiyonları yardımıyla Matlab çalışma alanında fonksiyonlar işletilebilse de LS-DYNA çözücüsü oluştururken çok hızlı bir şekilde her bir zaman adımında Matlab'tan çıktı değerlerini almak mümkün olamamıştır. Fortran programlama dilinin özellikle matematiksel işlemlerde Matlab diline göre çok daha hızlı olmasından dolayı bu işlemlerin gerçekleştirilemediği düşünülmüştür. Dolayısıyla dyn21.f dosyası içerisinde yer alan ve çeşitli analiz kontrollerinin yapılabildiği uctrl1 altprogramı kullanılarak Tip-2 BMS algoritmalarının yazılmasına ve yeni bir LS-DYNA çözücüsü oluşturulmasına karar verilmiştir.

Optimum yükleme profillerinin (şekillendirme basıncı, karşı basınç ve baskı plakası kuvveti) AT2 Bulanık Mantık Kontrol Algoritması (BMKA) ile adaptif olarak elde edilebilmesi için FORTRAN programlama dili ve VISUAL STUDIO tümleşik geliştirme ortamı yardımıyla LS-DYNA SEA programına ait yeni bir çözücü oluşturulması gerekmektedir. Bu çözücünün, dağıtıcı firmadan elde edilen kütüphane dosyalarında yer alan ve FORTRAN programlama dilinde yazılmış dyn21.f isimli dosya kullanılarak oluşturulması gerekmektedir. Bu sayede Tip-2 BMKA LS-DYNA'da uygulanabilir hale getirilmiştir.

ÇTHŞ prosesinde tip-2 BMKA ile optimum yükleme profillerinin elde edilmesinde, tip-1 BMKA'daki giriş (minimum kalınlık, ıstampa duvarına temas, baskı plakası (BP) radyüsüne temas ve buruşma yüksekliği) ve çıkış değişkenleri (α , β ve γ) kullanılmıştır. Giriş değişkenlerinde x eksenlerinde yer alan bulanık küme değerleri önceki çalışmalardan kazanılan tecrübelerle belirlenmiştir. Örneğin minimum sac

kalınlığı giriş değişkeni için 0.9 mm değeri (1mm'lik sac için %10'luk yüzde incelleme değerine karşılık gelmektedir) KRD'den KR'ye geçiş noktası olarak belirlenmiştir. KR'nin alt ve üst üyelik fonksiyonları için maksimum üyelik derecesine karşılık gelen değer 0.85 mm olarak belirlenmiştir. ÇKR üyelik fonksiyonu için ise sınır 0.8 mm'dir. Giriş ve çıkış değişkenlerinin tümünde Kritik (KR) dilsel etiketi için üçgen üyelik fonksiyonu, Çok Kritik (ÇKR) ve Kritik Değil (KRD) dilsel etiketleri için ise trapez üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. AT2 üyelik fonksiyonları, tip-1 çalışmalarında kullanılan üyelik fonksiyonların belirli yönlerde genişletilmesiyle (FOU) oluşturulmuştur.

Şekillendirme basıncının kontrolü için minimum kalınlık-ıstampa duvarına temas, karşı basınç kontrolü için minimum kalınlık-baskı plakası radyüsüne temas, baskı plakası kuvveti kontrolü için ise minimum kalınlık-buruşma yüksekliği giriş değişkenleri kullanıldığı için ve her giriş değişkeninde üçer adet üyelik fonksiyonu olduğu için her kontrolde $3 \times 3 = 9$ adet kural tanımı gereklidir. Tip-2 BMKA'da, tip-1 BMKA'larında belirlenen kural tabloları kullanılmıştır. Çıkarım mekanizması olarak Mamdani yöntemi kullanılmıştır. Mamdani çıkarım yönteminde bulanıklaştırıcı biriminden gelen üyelik dereceleri, minimum ilişkili operatörü kullanılarak çıkış üyelik fonksiyonu ile ilişkilendirilmektedir. Tip-2 BMD'de ise aynı şekilde her bir giriş değişkene ait alt ve üst üyelik fonksiyonundan elde edilen üyelik derecelerine ayrı ayrı kendi aralarında minimum işlemi uygulanmaktadır.

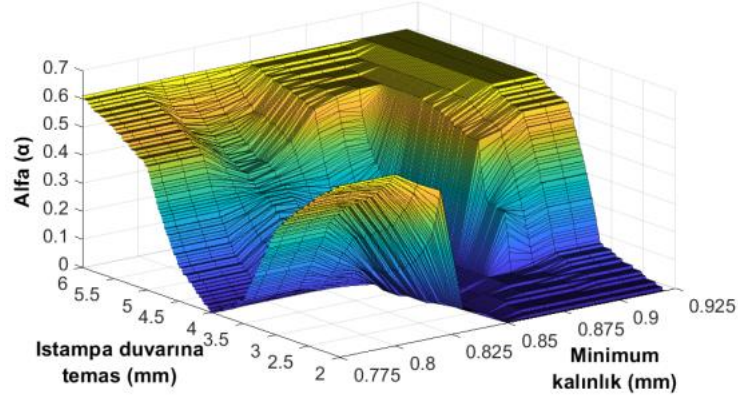
Tip-2/Tip-1 indirgeyicisi, kontrol için elde edilen çıkış üyelik fonksiyonlarının ağırlık merkezlerinin bulunması işlemi olarak da ifade edilmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi AT2 üyelik fonksiyonu çok sayıda gömülü tip-1 üyelik fonksiyonundan oluştuğu için bu üyelik fonksiyonlarının ayrı ayrı ağırlık merkezlerinin bulunup AT2 üyelik fonksiyonun genel ağırlık merkezinin bulunması hesaplama açısından zahmetlidir. Bu yükü ortadan kaldırmak için bazı genellemeler yapılmaktadır ve literatürde çok sayıda tip-2/tip-1 indirgeyicisi yöntemi bulunmaktadır. Burada tip-2 BMD'de, çalışmalarda yoğun olarak kullanılan ve Karnik-Mendel tarafından geliştirilen iteratif KM algoritması kullanılmıştır. KM algoritması, gömülü tip-1 üyelik fonksiyonları arasından en küçük ve en büyük ağırlık merkezlerini iterasyon yöntemi ile yaklaşık olarak bulmaktadır. Bu ağırlık merkezleri bulunduktan sonra KM algoritması yardımıyla hesaplanan sol ve sağ kesim noktaları kullanılarak sol ve sağ kontrol sinyalleri elde edilir. Bu noktadan sonra durulaştırıcı biriminin tek görevi ise elde edilen bu kontrol sinyallerinin ortalamasını almaktır. Hesaplanan ortalama değer AT2 BMD ile elde edilen çıkış kontrol sinyali

değeridir. Şekil 4.28’de gösterilen çıkış üyelik fonksiyonları için KM algoritması kullanılarak hesaplanan en küçük ve en büyük ağırlık merkezleri değerleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

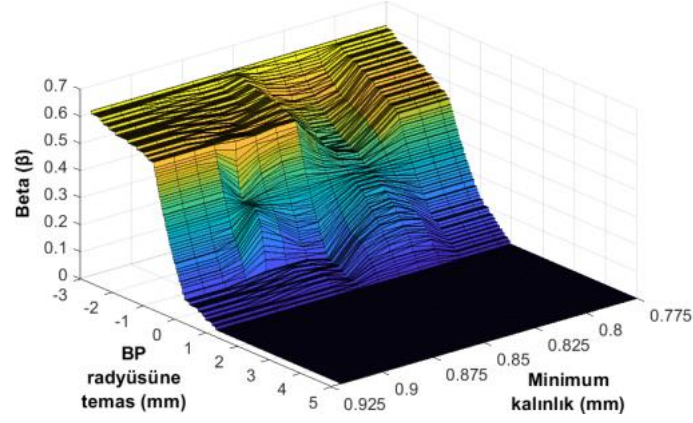
Tablo 3.5. Çıkış üyelik fonksiyonları için KM algoritmasıyla hesaplanan en küçük ve en büyük ağırlık merkezleri

α, β ve γ çıkış üyelik fonksiyonları	En küçük ağırlık merk.	En büyük ağırlık merk.
Negatif	-0.67	-0.55
Sıfır	-0.24	0.24
Pozitif	0.55	0.67

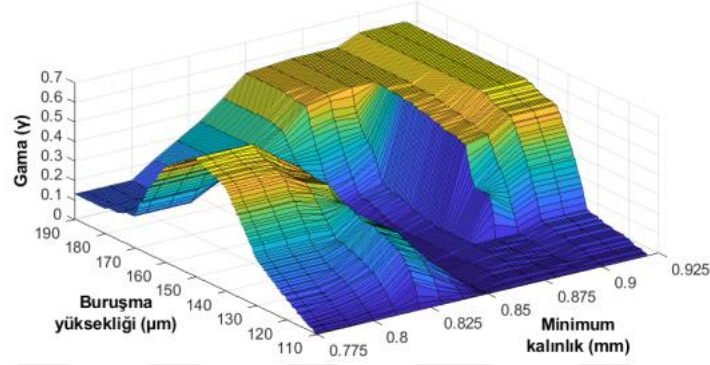
AT2 BMD ile her bir kontrol çıkış sinyali için elde edilen değerler text dosyasına giriş değişkenleri ile birlikte yazdırıldıktan sonra MATLAB programında üç boyutlu yüzey grafikleri çizdirilmiş ve Şekil 3.52’de verilmiştir. Şekil genel olarak incelendiğinde, AT2 BMD’de kullanılan kural tablosunda negatif ifade (yükleme değerini azaltma) olmadığından dolayı α , β ve γ çıkış sinyali değerleri ilgili giriş değişkeni değerlerine karşılık negatif çıkmayarak sıfır (yükleme değerini sabit tutma) veya pozitif (yükleme değerini arttırma) hesaplanmıştır. Tüm yüzey grafiklerinden görüleceği gibi çıkış sinyallerinde basamak sayıları oldukça fazladır. Bu tarz çok basamaklı yüzey grafikleri AT2 BMD’nin gerçek dünyadaki uygulamalara ait belirsizliklerle baş edebileceğini göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.52. Tip-2 bulanık mantık denetleyicisi tarafından elde edilen: (a) şekillendirme basıncı, (b) karşı basıncı, (c) baskı plakası kuvveti çıkış yüzey grafikleri

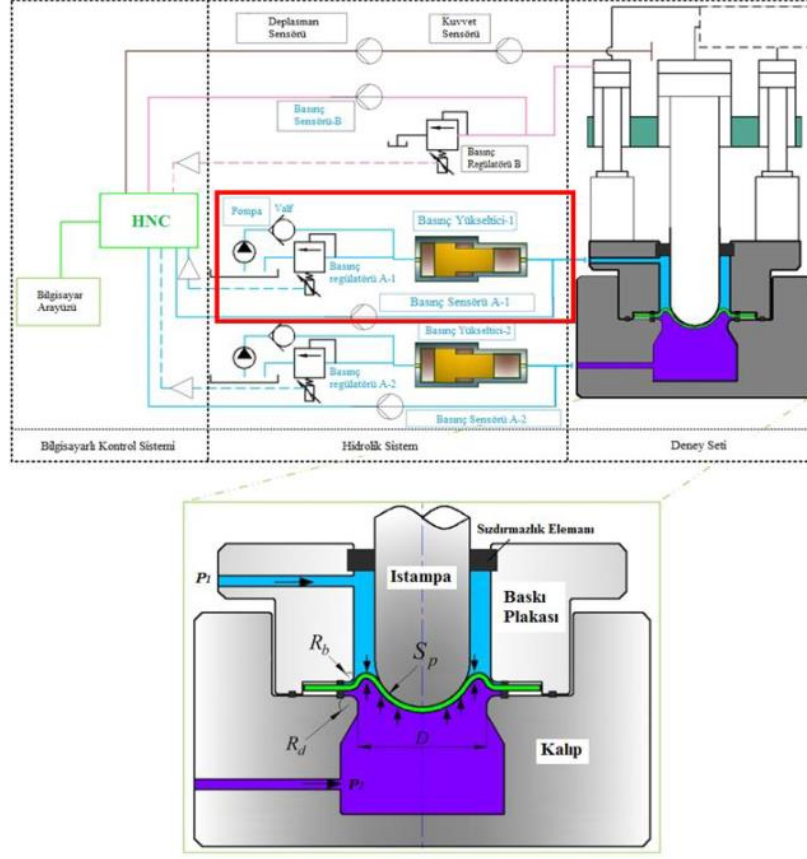
3.9. Deney Presinde Mekanik ve Elektronik Kontrol Sisteminin Kurulması

Yükleme profilleri BMKA kullanılarak SE analizleriyle elde edilmiştir. Elde edilen yüklem profillerinin deneysel doğrulamasının yapılabilmesi için şekillendirme basıncı, karşı basıncı, baskı plakası kuvveti ve ıstampa pozisyonun mekanik ve elektronik olarak hassas bir şekilde kontrol edilebildiği bir deney presi kullanılmıştır. Halihazırda Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Hidro-şekillendirme Laboratuvarı'nda bulunan ve Şekil 3.53'de gösterilen hidromekanik derin çekme (HMDÇ) presinde iş parçaları tek taraflı basınçla şekillendirilmekteydi. ÇTHŞ deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için deney presinin modifikasyonu yapılmıştır. Pres üzerinde yapılan modifikasyonlar, Tübitak 1001 projesi kapsamında proje ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir.



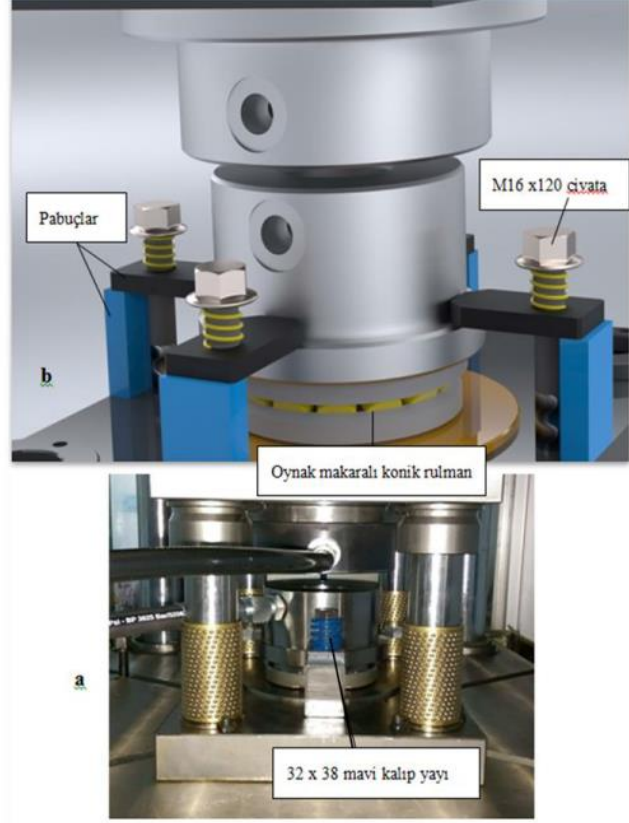
Şekil 3.53. Modifikasyonu gerçekleştirilen deney presi

Söz konusu presin çalışma sistemi Şekil 3.54’de yine şematik olarak verilen (Liu ve ark., 2016) gerçekleştirdiği sisteme oldukça benzerdir. Ancak baskı plakası kuvveti (BPK) Liu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada sabit tutulmakta, kontrol sadece basınç sensörü ile sağlanmakta ve pistonlarda oluşacak sürtünmeler ihmal edilmektedir. Deney presinde ise BPK, alt kısmına yerleştirilen yük hücreleriyle ölçülmektedir. Bu nedenle pistonlardaki sürtünmelerin oluşturulacağı belirsizlikler ortadan kalktığı için, modifiye edilen sistemde proses çok daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kırmızı çerçeve ile belirtilen kısımlar dışındaki sistem daha önce imal edilmiştir. Bu tez çalışmasında kırmızı ile gösterilen kısım ilave edilerek yeni HNC, basınç yükseltici, basınç sensörü, kontrol vavleri vb. elemanlar sisteme eklenmiştir.



Şekil 3.54. Çift taraflı hidro-şekillendirme kontrol ünitesi ve deney seti

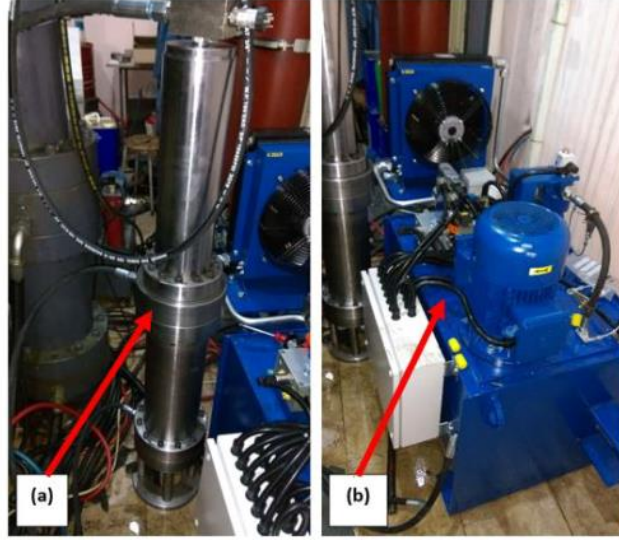
Pres çalışırken kalıpların birbirini üzerinde paralel kapanması gerekmektedir. Aksi takdirde deney numunesinin merkezlenmesi ve derin çekilme esnasında sızdırmazlık sağlanması mümkün olmamaktadır. Sızdırmazlığın sağlanamaması, şekillendirme ve karşı basınçta ani düşüşlere neden olmaktadır. Bu durumda deney presi, kontrol ünitesine girilen yükleme profillerini doğru şekilde uygulayamamaktadır. Bu nedenle kalıpların deney sırasında ve sonrasında paralellliğini koruması için kalıbın altına oynak konik makaralı rulman yerleştirilmiştir (Şekil 3.55a). Rulmanın alt kalıp tutucuya bağlantısı için ve kalıplar açıldığında oynak konik makaralı rulmanın geri esnemesini önlemek için yaylı pabuç bağlantısı tasarlanmıştır. Yaylı pabuç mekanizmasında 8 adet lazer kesim 15 mm kalınlığında prese özel tasarlanan pabuç, 4 adet 32x38 geri esnemeyi sönümlemesi için mavi kalıp yayı ve alt kalıp tutucuya sabitlenmesi için M16x120 altı köşe başlı civata kullanılmıştır (Şekil 3.55).



Şekil 3.55. a) ÇTHŞ kalıp tasarımının katı modeli, b) ÇTHŞ kalıplarının prese montajı

Modifikasyonu yapılan bir diğer sistem de hidrolik ünite ve basınç yükselticidir. Deney presinde, şekillendirme basıncı ve baskı plakası kuvveti parametrelerine ek olarak karşı basınç parametresi için gerekli olan ve Şekil 3.56’de verilen hidrolik ünite ve basınç yükseltici deney ünitesine hidrolik bağlantıları yapılarak eklenmiştir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan deney presinde hidromekanik derin çekme prosesini gerçekleştirmek için şekillendirme basıncı ve baskı plakası kuvveti parametrelerini ıstampa pozisyonuna bağlı olarak eş zamanlı kontrol etmek için üç eksen kontrollü HNC sistemi kullanılmaktaydı. Elektronik sistemde kontrol edilen parametre sayısı adedi kadar HNC sisteminde eksen bulunmalıdır. HNC kartlarında ise sisteme dışardan eksen kontrolcüsü eklenememektedir. Bu nedenlerle deney ünitesine üç eksenli HNC yerine; ÇTHŞ’deki karşı basınç ile birlikte şekillendirme basıncı, baskı plakası kuvveti ve ıstampa pozisyonu parametrelerini kontrol edebilmek için dört eksenli HNC sistemi eklenmiştir. Dört eksen HNC sisteminin deneylerde kullanılan WIN-PED yazılımına entegre edilmesi için Şekil 3.57’te gösterilen oransal kontrol valfi hidrolik üniteye eklenmiştir. ÇTHŞ için modifiye edilen alt ve üst kalıpların basınç yükselticiler ile

hidrolik bağlantıları, uygun yüksek basınç devre elemanları ile Şekil 3.58'daki gibi yapılmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra sistemin kurulması tamamlanmıştır.



Şekil 3.56. Karşı basınç parametresi için gerekli olan a) basınç yükseltici b) hidrolik ünite



Şekil 3.57. Oransal kontrol valfi

model için optimum olarak hesaplanan değerlerdir. Bu yükleme profilleri deneylerde uygulanırken BPK değerleri 4 ile çarpılmıştır.

Analizlerden elde edilen BPK yükleme profili kullanılarak yapılan deneylerde prosesin belirli bölümlerinde şekillendirme sıvısı kaçakları meydana gelmektedir. Bu kaçaklar sızıntı veya püskürme şeklinde gerçekleşmiştir. Oluşan bu kaçaklar şekillendirme basıncı ve karşı basıncın ani düşüşüne neden olmaktadır. Bu yüzden deneylerde istenen ıstampa pozisyonunda uygulanması gereken basınç değerine ya gecikmeli olarak ulaşılmakta ya da ulaşılamamaktadır. Bu problem aşağıdaki gibi çözülmüştür.

ÇTHŞ prosesinde sac üzerine gelen Net Baskı Plakası Kuvvetinin (NBPK) bilinmesi, sonuçların gerçekçi olarak değerlendirilebilmesi, proses optimizasyonu ve sayısal simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılabilmesi için önemlidir. Bu nedenle NBPK'ya etki eden şekillendirme basıncı ve karşı basınç parametrelerinin etkilerini sayısal ve deneysel olarak bilmek gereklidir. LS-DYNA SE yazılımında sıvı basıncı, basınç uygulanacak alanın eksen takımındaki ikinci dereceden eğri denklemi girilerek uygulanmaktadır. Bu eğri denkleminin oluşturduğu alana giren elemanlara basınç uygulanırken dışında kalan elemanlara uygulanmamaktadır. Fakat deneylerde oluşan durumda, şekillendirme basıncı ve karşı basınç kalıp ve baskı plakası boşluğuna dolarak uygulanan kuvveti her yönde iletir. Şekillendirme basıncı sacı BP'ye doğru iterken, karşı basınç da sacı BP'den ayırmaya çalışmaktadır. Dolayısıyla uygulanan her iki basınç da BP'ye ters yönde bir açılma kuvveti oluşturmaktadır. Analizlerde bu durum simüle edilemediği için, analizlerden elde edilen BPK'ya ek olarak her zaman adımındaki basınç değerleri hesap edilerek açılma kuvvetine ters yönde telafi kuvveti eklenmektedir. Elde edilen NBPK yükleme profili kullanılarak deneyler yapılmıştır.

HDMÇ ve ÇTHŞ karşılaştırılması için her iki yöntemle de üretilen silindirik parçaların kalınlık dağılımları ölçülerek karşılaştırılmıştır. İki veri grubu arasında matematiksel farklılık olması, her zaman istatistiksel olarak anlamlı olmayabilir. Bu nedenle verilere T-testi uygulanmıştır. Bu test iki örnek veri grubu ortalamaları arasında farklılık olup olmadığını inceleyen parametrik bir değerlendirme tekniğidir. T – testinin birden fazla versiyonu vardır ve güvenilir sonuçlar vermesi için veri yapısına uygun versiyonu seçmek son derece önemlidir. Bu versiyonlar aşağıda kısaca anlatılmıştır.

- 1. Bağımsız örneklem t-testi (Independent samples t-test):** Bir grup verinin aritmetik ortalamasının belli bir sabit değerde istatistiksel olarak anlamlı bir fark gösterip göstermediğini belirlemek için yapılan parametrik bir testtir. Örneğin; 15 öğrencinin final

puanlarının öngörülen 90 değerinden farklı olup olmadığı araştırılıyorsa bu test türü uygundur. Yani; Birbirinden bağımsız iki örneklemin belirli bir değişken bakımından birbirinden farklı olup olmadığını test etmek için kullanılması uygundur. Burada kritik olan nokta gruplara dahil olma şartının incelenen değişkenden tamamen bağımsız olmasıdır. Başka bir deyişle karşılaştırılan iki grup (ya da iki örneklem) birbiriyle ilintili olmamalıdır.

2. **Bağımlı (Eşleştirilmiş) örneklem t-testi (two sample paired t-test):** En tipik örneği aynı deneğin birden fazla teste tabi tutulduğu durumlarda ilk örnek ile sonraki örneklerin karşılaştırılması için kullanılmasıdır. Örneğin bir tedavi protokolü başlamadan önce kilosu ölçülen hastaların tedavi bitiminde ölçülen kilosu ile karşılaştırılması için bağımlı örneklem t-testi uygulanır. Bağımsız örneklem testinden farkı önce ve sonra değerlerinin her denek için eşleştirilerek aradaki farkın tüm örneklem için istatistiki olarak bir fark gözetip gözetmediğinin incelenmesidir. İki farklı normal dağılımdan çekilmiş iki farklı örneklem olduğu varsayılmaz. Tek bir normal dağılımdan elde edilen bir örneklem test edilir.
3. **Bağımsız tek örneklem t-testi (one sample t-test):** Önceden ortalaması bilinen bir dağılım ile elimizdeki örnekleme karşılaştırmak için kullanılır. Aynı zamanda elde edilen örneklemin var sayılan bir dağılımdan fark gösterip göstermediğini test etmek için de uygulanabilir. Bağımlı (Eşleştirilmiş) örneklem t-testi ve Bağımsız tek örneklem t-testi (one sample t-test) arasındaki fark istatistiksel örnek deney gurupları açısından şu şekilde örneklenebilir. Bir ilacın etkinliği araştırılıyor ve bu amaçla 10 hastanın ilaç öncesi ve sonrası kan değerleri ölçülüyor ise eşleştirilmiş örneklem t-testi (Paired Sample t-Test) uygundur. Rastgele seçilen 15 Kontrol (Sağlıklı) ve 15 Hasta bireyin hemoglobinin değerleri arasındaki farklılık ise t- Testi (Independent Samples t- Test) bu test ile incelenebilir.

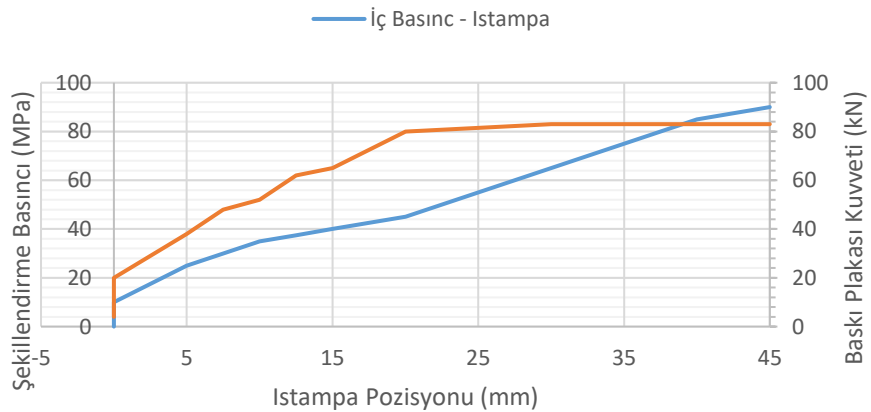
Bu bilgiler ışığında 2 adet 1 mm kalınlıktaki AA 5754 sac iş parçasının HMDÇ ve ÇTHŞ prosesleriyle üretilmesi sonucunda oluşan kalınlık dağılımları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını tespit edebilmek için bağımlı (eşleştirilmiş) örneklem t-testi kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

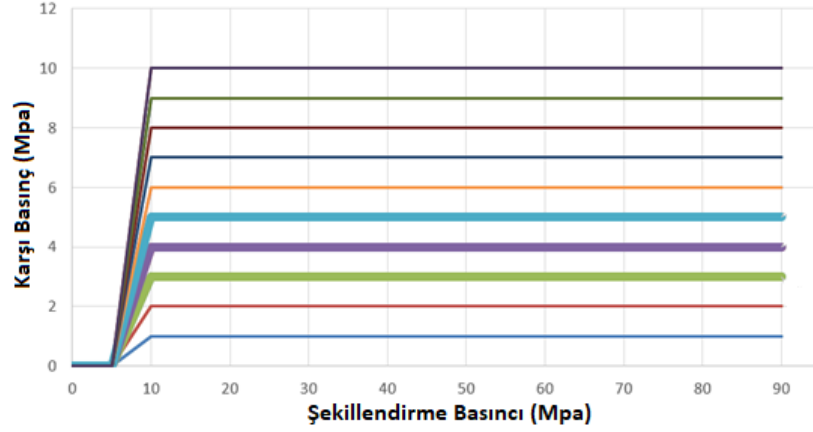
Bu tez çalışmasında silindirik ve oval şekilli iş parçalarında ÇTHŞ'nin şekillendirilebilirliğe etkisi HMDÇ ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Hidro-şekillendirmenin en önemli avantajları klasik şekillendirme yöntemlerine göre daha üniform kalınlık dağılımı elde edilmesi ve daha yüksek SÇO'lara ulaşılmasıdır. Ayrıca iş parçasında oluşacak buruşmaların azaltılması veya ortadan kaldırılması gerekir. Şekillendirme sonrası oluşan buruşmalar için ya farklı tekniklerle ilave prosesler uygulanması gerekmekte, bazen de bu buruşmalar hiç giderilememektedir. Bu durum üretilen parçanın kalitesini düşürmekte ve üretim maliyetini artırmaktadır. Bu nedenlerle şekillendirilebilirlik yeteneklerinin incelenmesinde buruşma, kalınlık dağılımı ve sınır çekme oranı (SÇO) önemli başarı kriterleri olup bu kriterlere etki eden fenomenler aşağıda sayısal ve deneysel olarak detaylıca incelenmiştir.

4.1. ÇTHŞ'de Karşı Basıncın Şekillendirmeye Etkisi

Materyal ve Yöntem kısmında da belirtildiği gibi BMKA'lardaki üyelik fonksiyonlarını belirlemek ve prosese etkilerini anlamak için simülasyonlardan ön çalışma olarak deneme-yanılma yoluyla yükleme profilleri elde edilmiştir. Bunun için daha önceki çalışmalarda HMDÇ için bulunan eğriler bu çalışmada üretilecek silindirik parça için prosesin başından sonuna kadar onlarca deneme yapılarak adım adım başarılı bir şekillendirme gerçekleştirecek Şekil 4.1'deki eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler kullanılarak karşı basınç 0-10 MPa arasında 1 MPa aralıklarla Şekil 4.2'deki karşı basınç eğrileri kullanılarak analizler yapılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Şekillendirme Basıncı-Istampa Pozisyonu-Baskı Plakası Kuvveti Yükleme Profili

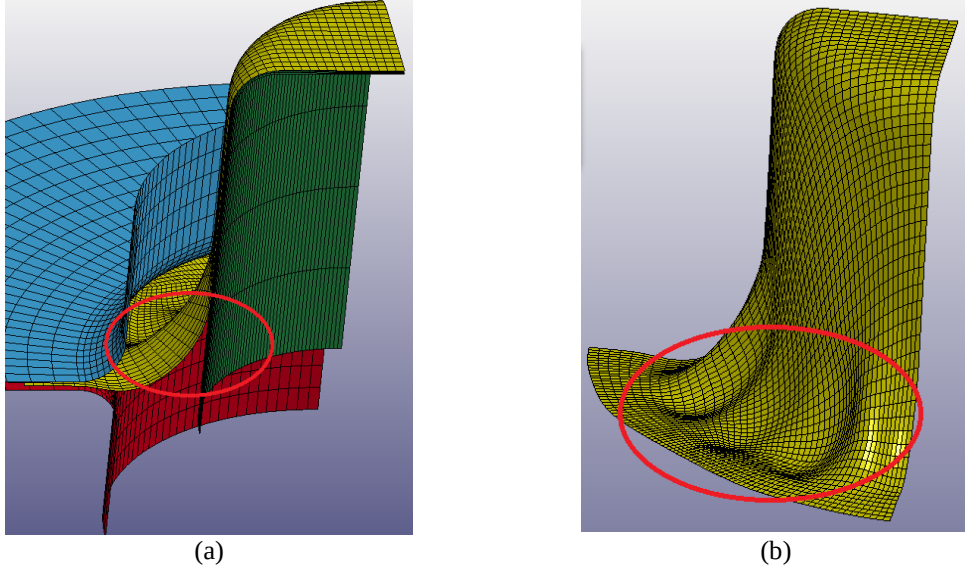


Şekil 4.2. Analizlerde kullanılan sabit karşı basınç deneme yükleme profilleri

SE analizlerinde Şekil 4.1'deki şekillendirme basıncı ve BPK yükleme profilleri ile farklı karşı basınçlar kullanılarak karşı basıncın etkisi incelenmiştir. Simülasyonlarda şekillendirme başlangıcında uygulanan karşı basıncın prosesin ilk evresinde sacın yırtılmasına neden olduğu görülmüştür. Karşı basınç, sacın ıstampaya sıvanmasını geciktirerek ani yırtılmalara neden olmaktadır. Bu nedenle karşı basıncın, sacın ıstampaya sıvanmaya başladıktan sonra uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. BMKA'lar bu bilgi ışığında kodlanmıştır.

Karşı basıncın herhangi bir olumsuz etkisinin olup olmadığını görmek için, karşı basınç mümkün olduğunca artırılıp analizler yapılmıştır (Şekil 4.3). Karşı basıncın, sacın baskı plakası radyüsüne değmesini engellemek için (Şekil 4.3a) belirli bir seviyenin üzerinde artması Şekil 4.3b'de görüldüğü gibi buruşma etkisi yapmaktadır. Özellikle kalıp boşluğu fazla olan (10 mm) ÇTHŞ proseslerinde, karşı basıncın üst limiti buruşma oluşumunun başladığı basınç değeridir.

Yapılan analizlerden karşı basıncın şekillendirme zamanının ilk 1/3 kısmında uygulanmasının incelmeleri çok artırdığı, kalan 2/3 kısımda ise fazla uygulanmasının buruşmaları artırdığı görülmüştür. Analizlerde bu etkiler göz önünde bulundurularak BMKA üretilmiştir.

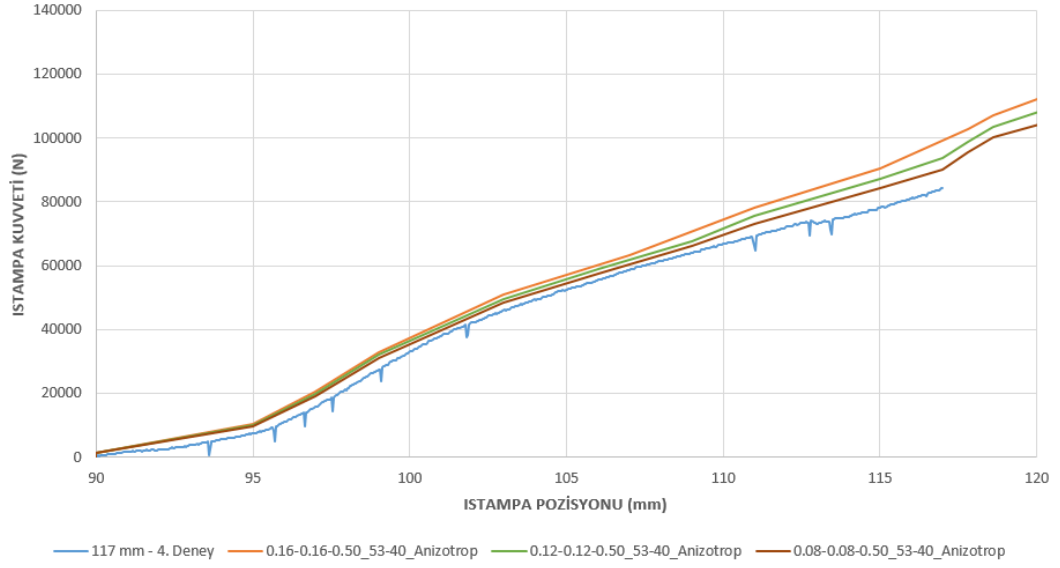


Şekil 4.3. Yüksek karşı basınç sonucu a) sacın ıstampa yüzeyinden ayrılması b) flanş bölgelerine yakın kısımda buruşma

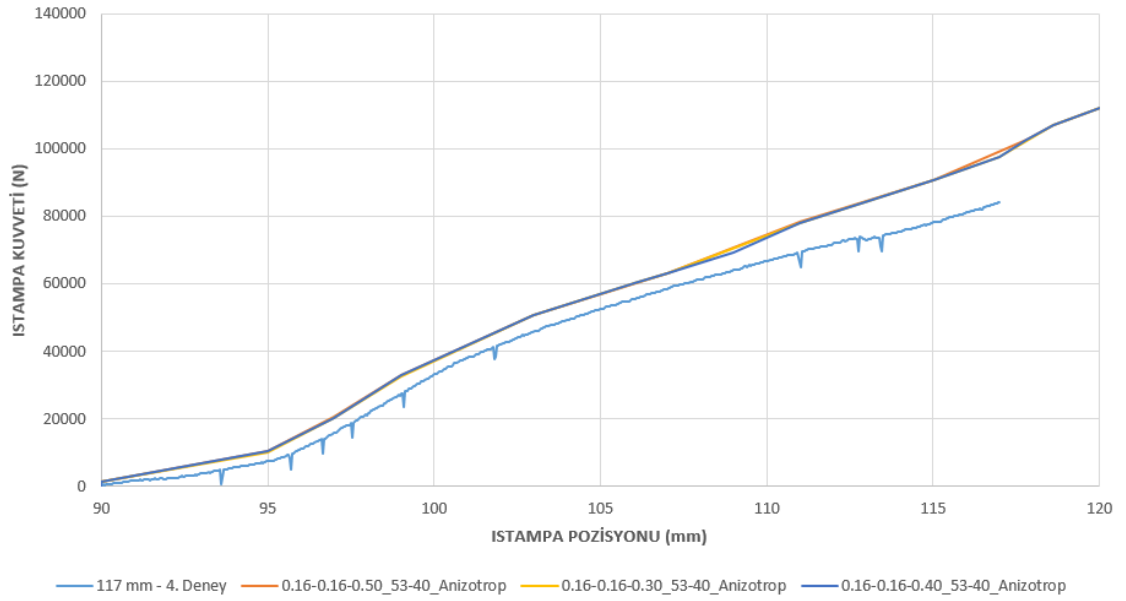
4.2. Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi

Istampa-sac, kalıp-sac ve BP-sac arasındaki sürtünme katsayılarını belirleyebilmek için analiz ve deneylerde ıstampa üzerinde oluşan tepki kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Öncelikle ıstampa sürtünme katsayısı 0.50 seçilerek; 0.08, 0.12 ve 0.16 kalıp sürtünmeleri için toplam 3 adet analiz yapılmıştır. Şekil 4.4’de yapılan analizlerden elde edilen ve deney presinden okunan ıstampa tepki kuvvetleri verilmiştir. Şekillendirmede ıstampanın 15-20 mm hareketine kadar ıstampa kuvvetlerinde hemen hemen bir değişim olmamaktadır.

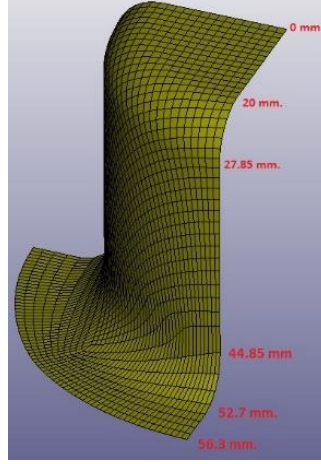
Daha sonra kalıp sürtünme katsayısı 0.16 seçilerek; 0.30, 0.40 ve 0.50 ıstampa sürtünme katsayıları programa girilerek toplam 3 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5’de yapılan analizlerden elde edilen ve deney presinden okunan ıstampa tepki kuvvetleri verilmiştir. Burada farklı ıstampa sürtünme katsayıları kullanılmasına rağmen ıstampanın hareketinin başından sonuna kadar tepki kuvvetinde herhangi bir değişim görülmemiştir. Bu nedenle sürtünme katsayılarını belirlemek için ıstampa tepki kuvvetleri uygun olmamaktadır. Bunun yerine sürtünme katsayılarının kalınlık dağılımındaki değişime etkisi incelenmiştir. Analizlerde farklı sürtünme katsayıları kullanılarak şekillenmiş sacın kesiti boyunca (Şekil 4.6) oluşan kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4. 90 mm. ilkel sac çapı için sabit 0.50 ıstampa sürtünme katsayısı ve kalıplar arası sürtünme 0.08, 0.12 ve 0.16 olarak 3 analizden elde edilen ıstampa kuvvetlerinin deneyden elde edilen ıstampa kuvvetiyle karşılaştırılması

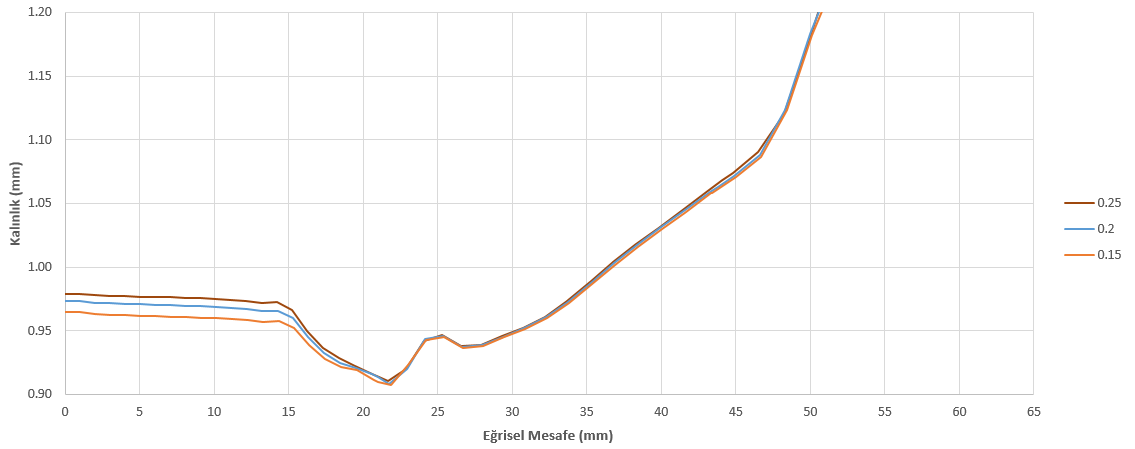


Şekil 4.5. 90 mm. ilkel sac çapı için sabit 0.16 kalıp sürtünme katsayısı ve ıstampa sürtünme katsayısı 0.30, 0.40 ve 0.50 olarak 3 analizden elde edilen ıstampa kuvvetlerinin deneyden elde edilen ıstampa kuvvetiyle karşılaştırılması



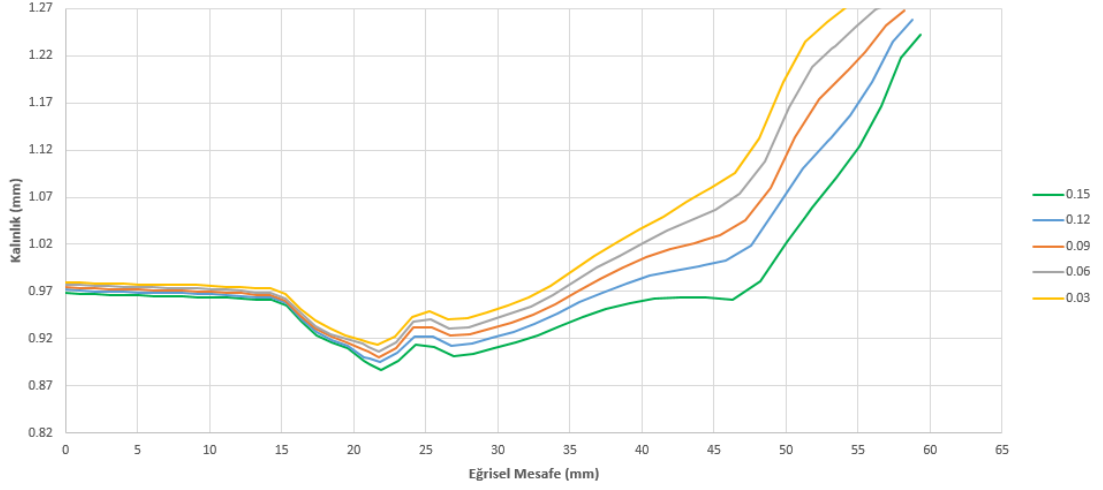
Şekil 4.6. Şekillendirme sonrası sacın kesiti boyunca kalınlığın ölçüldüğü eğrisel mesafeler

Sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünme katsayısı önceki çalışmalardaki gibi 0.04 alınarak ıstampa sürtünme katsayısı için 0.25, 0.2 ve 0.15 alınarak analizler yapılmış ve kalınlıklar eğrisel mesafeler boyunca ölçülmüştür. Şekil 4.7'deki grafikte görüldüğü gibi ıstampa sürtünme katsayısı burun radiusüne kadar olan yaklaşık 22 mm eğrisel mesafe ve öncesindeki kalınlık dağılımına etki ederken, sonrasında ciddi bir değişikliğe sebep olmamıştır.



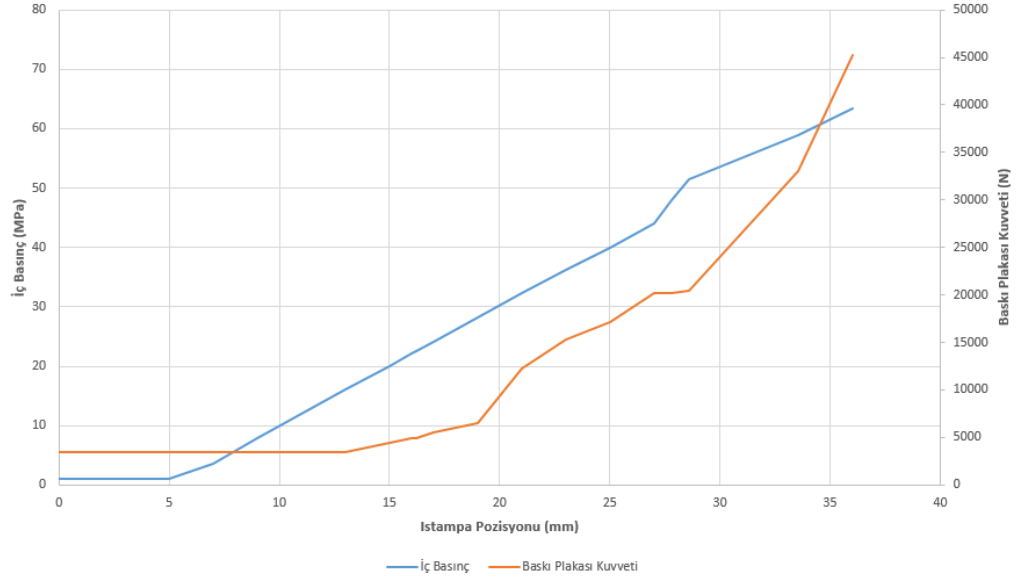
Şekil 4.7. 0.25, 0.20 ve 0.15 ıstampa sürtünmesi için analizlerden elde edilen kalınlık dağılımı

Daha sonra bu kez ıstampa sürtünmesi önceki çalışmalardaki gibi 0.25 olarak seçilip, sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünme katsayıları 0.03 – 0.15 arasında 0.01 değiştirilerek analizler yapılmıştır. Şekil 4.7'deki kalınlık dağılımları incelendiğinde 20-22 mm eğrisel mesafeye kadar sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünmenin kalınlık dağılımlarını önemli ölçüde etkilemediği gözlenmiştir.

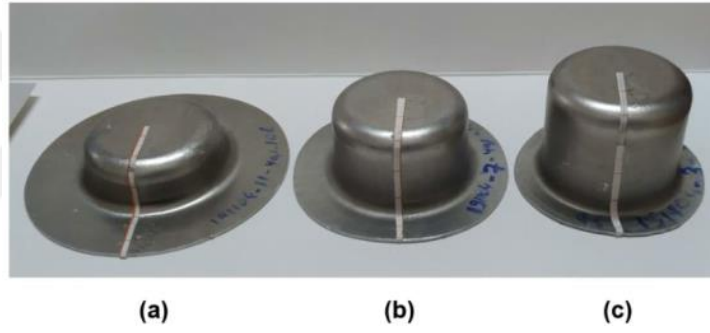


Şekil 4.8. 0.30 İstampa sürtünmesi için sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünme katsayıları kullanılarak analizlerden elde edilen sac boyunca kalınlık dağılımı

Analizlerden edilen tecrübelerle, sürtünme katsayılarının sacın kesiti boyunca oluşan kalınlık dağılımıyla belirlenebileceği düşünülmüştür. Bunun için öncelikle deney presinde AA 5754 malzemedan 90 mm ilkel çapındaki sac parça kullanılarak şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Bu şekillendirmede kullanılan yükleme profili geçmiş deneylerden elde edilen tecrübelerle deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiştir (Şekil 4.9). Deney presinde şekillendirme yapıldıktan sonra şekillenmiş sac parçanın kalınlık dağılımı ultrasonik kalınlık ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Deneyler ıstampanın 16, 27 ve 36 mm deplasmanları için her biri üçer tekrar olacak şekilde yapılmıştır (Şekil 4.10). Deneylerden elde edilen kalınlık dağılımlarına en yakın eğriyi simülasyonlarda elde edecek şekilde denemeler yapılarak, sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak en uygun sürtünme katsayıları belirlenmiştir.

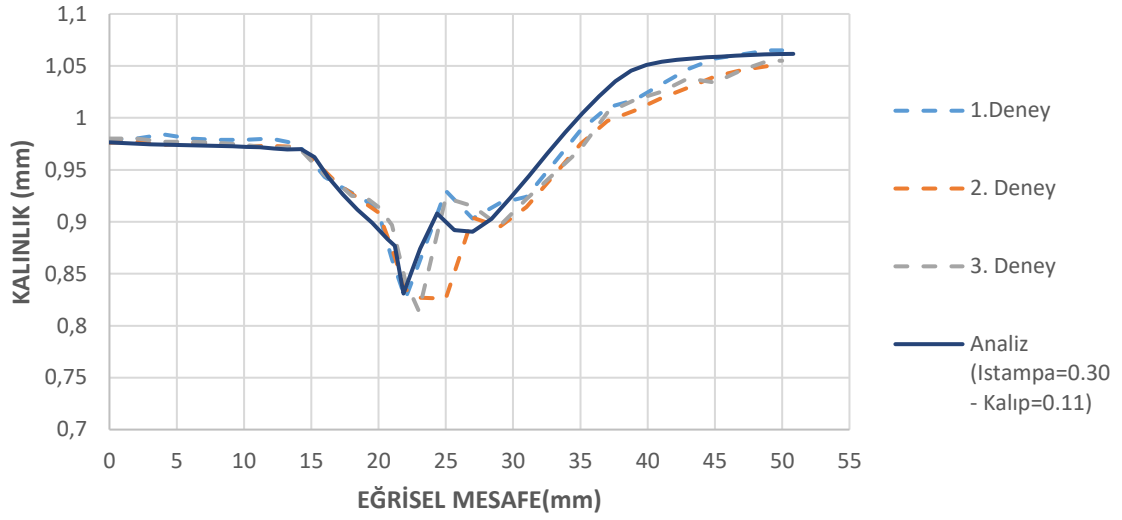


Şekil 4.9. Sürtünme katsayısının bulunması için yapılan deneylerde kullanılan yükleme eğrisi

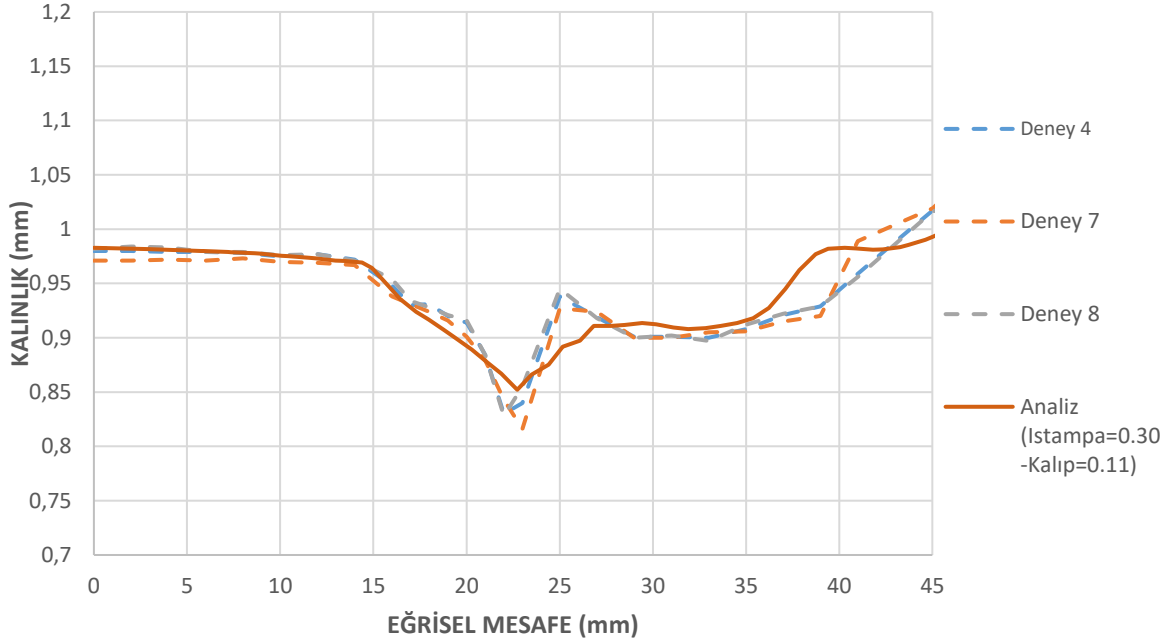


Şekil 4.10. İstampa-sac ve kalıplar-sac arasındaki sürtünme katsayılarının belirlenmesi için yapılan (a)16 mm (b)27 mm (c)36 mm istampa ilerlemesinde HMDÇ deney numuneleri

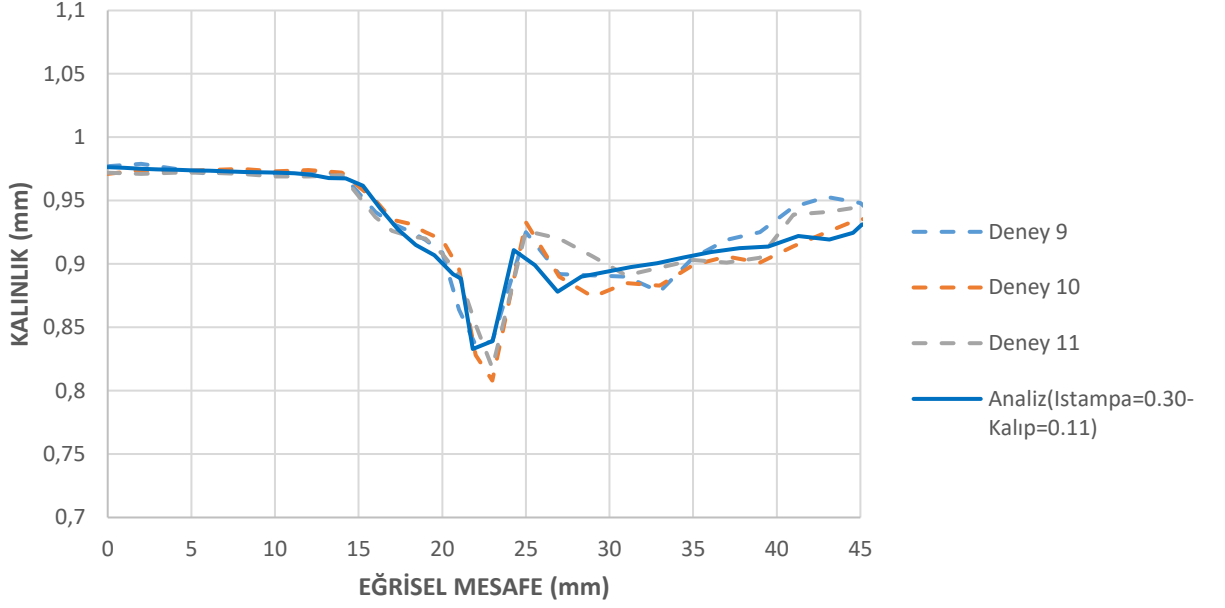
Analizlerden deneme yanılma yoluyla elde edilen bilgilerle hidromekanik derin çekme için deneylerdeki kalınlık dağılımına en yakın kalınlık eğrisi seçilmiştir. Sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünme katsayısı 0.11 ve ıstampa sürtünme katsayısı 0.30 olarak elde edilmiştir. 90 mm ilkel sac çapı için ıstampanın 16, 27 ve 36 mm hareketinde sac parçanın kalınlık dağılımı Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'da verilmiştir. **Elde edilen grafiklerden görüldüğü gibi kalınlık dağılımı; ıstampa-sac arasında 0.30, sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasında ise 0.11 olarak seçilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.**



Şekil 4.11. 16mm ıstampa deplasmanı için deney ve analiz kalınlık dağılımları grafiği



Şekil 4.12. 27mm ıstampa deplasmanı için deney ve analiz kalınlık dağılımları grafiği



Şekil 4.13. 36mm ıstampa deplasmanı için deney ve analiz kalınlık dağılımları grafiği

4.3. Deneylerde Karşılaşılan Problemler

Sistemin kurulması, yazılımın güncellenmesi, numunelerin hazırlanması ve basınç eğrilerinin girilmesiyle, preste ÇTHŞ prosesi gerçekleştirilebilmiştir. Silindirik parçaları üretmek için analizler yapılarak yükleme eğrileri elde edilmiştir. Yapılan analizlerde 100 mm ilkel çapa sahip sacın %15 incelme ile başarıyla şekillendiği tahmin edilmesine rağmen başarılı deneyler gerçekleştirilememiştir. Bu yükleme eğrileri kullanılarak sadece Şekil 4.14'deki gibi 85.5 mm ilkel çaptaki saclar kullanılarak çok da başarılı olmayan parçalar üretilebilmiştir.



Şekil 4.14. Presto ÇTHŞ prosesiyle üretilen ilk parçalar

Bu başarısızlıkların nedenini öğrenmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda;

- Bulanık mantık kontrol parametreleri daha düşük basınç ve baskı plakası kuvvetleri uygulanacak şekilde revize edilmiştir. Yeni yükleme profilleri sayesinde sacın daha geç yırtıldığı gözlenirse de deneylerde yine başarılı bir şekillendirme sağlanmamıştır.

- Üretilen parçada Şekil 4.15a'da işaretlendiği gibi keskin bir iz görülmüştür. İmalattaki hatalara karşı alt ve üst kalıplar kontrol edilmiştir. Üst kalıpta yer alan 0.1 mm yüksekliğindeki kademede keskin radyüsler kullanıldığı için sacın ilerlemesini engellediği düşünülerek radyüsler büyütülmüştür. Sonuçta Şekil 4.15b'deki gibi bu problem çözülmüştür.



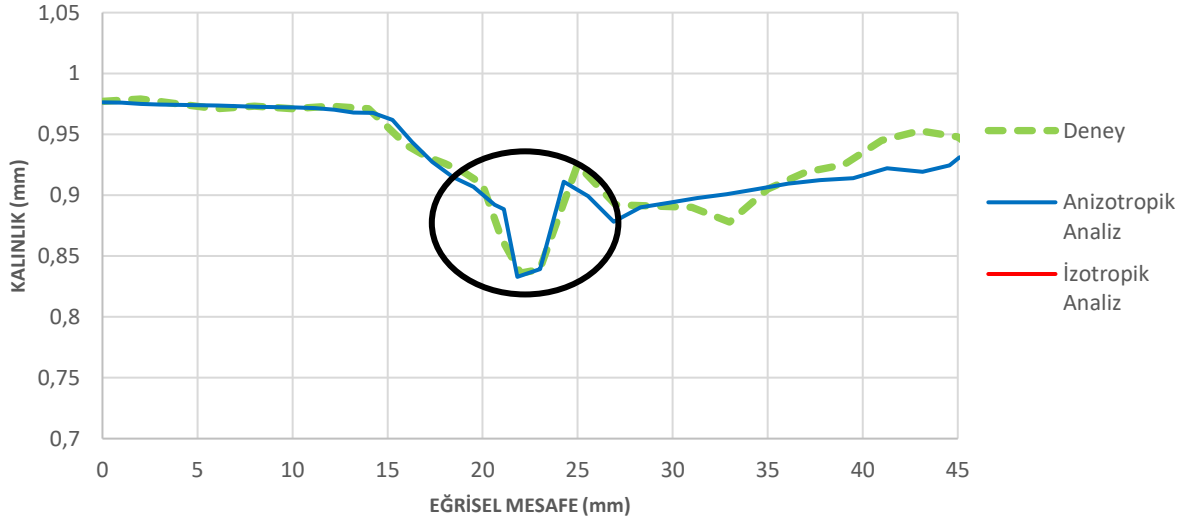
Şekil 4.15. Sızdırmazlık kademesinin keskin kenarlı olması durumunda sacda oluşan etki

- Sızdırmazlık yüksekliğinin 0.1 mm olmasının fazla geldiği düşünülerek kademe boyu 0.05 mm değerine düşürülmüştür. Ancak bu şekilde yapılan deneylerde de parçanın daha derin çekilmesi mümkün olmamıştır.
- 5 mm olması gereken alt kalıp radyüsünün üst kalıp ile aynı toleranslarda işlenmediği radyüs mastarı ile yapılan kontrol ile belirlenmiştir. Ön şişirme sırasında sacın alt kalıbın radyüsüne temas ettiği bilindiğinden, sacı başlangıçta fazla incelttiği ve bu nedenle deneylerin analizlerle uyuşmadığı değerlendirilmiştir.

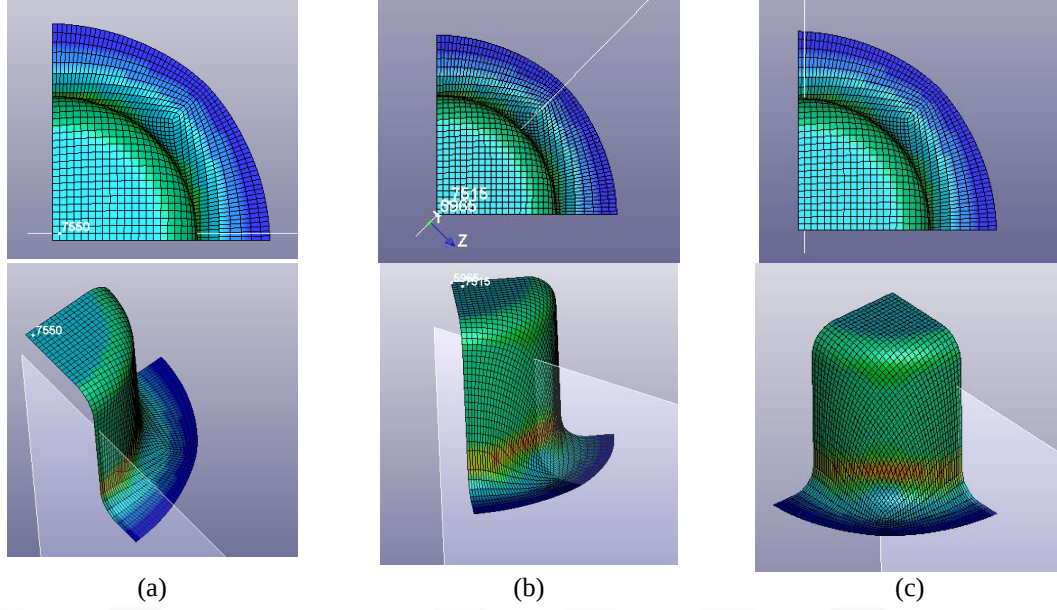
ÇTHŞ prosesinde karşı basıncın etkisi özellikle konik ve küresel şekilli parçalarda net olarak ortaya çıkmaktadır. Üretilmesi hedeflenen silindirik parçada da karşı basıncın etkisini daha fazla görebilmek için kalıp ve ıstampa arasındaki tek taraflı boşluk değeri 10 mm olarak kalıplar tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ön deneme çalışmalarında ÇTHŞ deneyleri çeşitli tek taraflı kalıp boşlukları ve yükleme profilleri ile gerçekleştirilmiştir. 10 mm tek taraflı kalıp boşluğu (ıstampa-kalıp arası) ile yapılan çalışmalarda silindirik parçaların tam yükseklikte üretilmesi mümkün olmamıştır. Tam parça yüksekliğinin ancak %30 ila %40'ına çıkılabilmektedir. Bu ön denemeler sonucunda, kalıplarda 10 mm değerinin düşürülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ardından ıstampa-kalıp boşluğu 5

mm'ye düşürülmüştür. İstenen sonuç elde edilemeyince bu kez bahsedilen boşluk 1.5 mm'ye düşürülmüştür. Daha sonraki bölümlerde açıklanacağı üzere 1.5 mm kalıp boşluğu ile yapılan deneylerde sınır çekme oranı 2.25 elde edilmiştir. Geçmiş çalışmalarda HMDÇ için de benzer SÇO'lar elde edilmiştir. Bu nedenle ÇTHŞ'nin silindirik parçaların şekillendirilmesinde HMDÇ'ye göre herhangi bir avantajının olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tez kapsamında yapılan ön deney ve analizlerde şekillenmiş sacın kesiti boyunca kalınlık dağılımında doğrulama yapılamamıştır. Doğrulama yapılmayan durumda ÇTHŞ prosesi modellenirken sac malzemeler izotropik olarak modellenmişti. Bu durumda Şekil 4.16'de görüldüğü gibi özellikle sacın ıstampa radyüsüne temas eden kısımdaki kalınlık değerlerinde uyum sağlanamamıştır. Şekil 4.16'de AA 54754 malzeme için izotropik ve anizotropik malzeme modeli kullanılarak analizlerden elde edilen kalınlık dağılımı verilmiştir. Anizotropik malzeme modeli kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen kalınlık dağılımlarıyla deneylerden elde edilen kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre de ele alınan AA 5754 malzeme için mekanik özelliklerine paralel olarak en fazla incelmenin hadde yönüne 45o açıyla olduğu görülmüştür (Şekil 4.17). AISI 304 malzeme de aynı şekilde anizotropik olarak modellenmiştir. **Böylece analizlerde anizotropik malzeme modelinin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.**



Şekil 4.16. Silindirik parça için 36 mm ıstampa deplasmanında izotropik ve anizotropik malzeme modeli kullanılarak sac kesiti boyunca oluşan kalınlık dağılımı



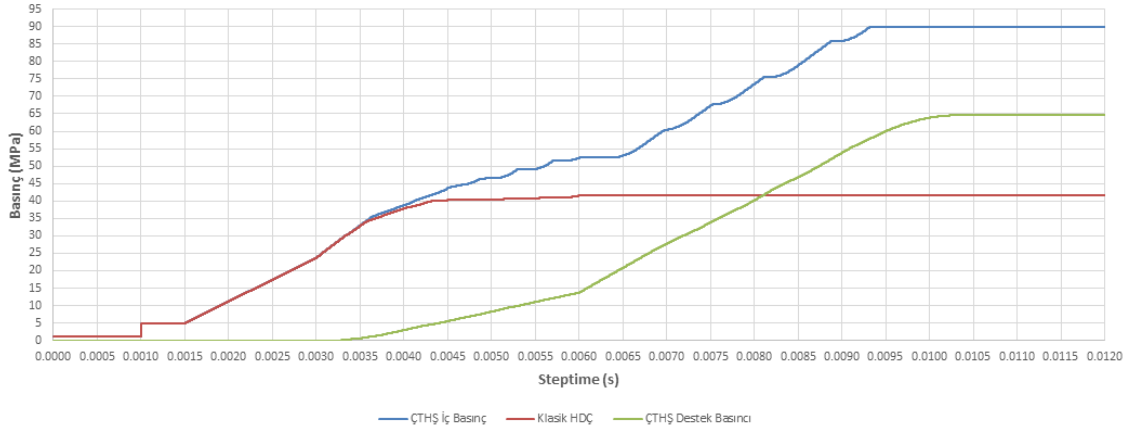
Şekil 4.17. LS-DYNA SEA yazılımında kalınlık dağılımı (a)R0 (b)R45 (c)R90

4.4. Silindirik Kapların ÇTHŞ ile Üretilmesi ve HMDÇ ile Karşılaştırılması

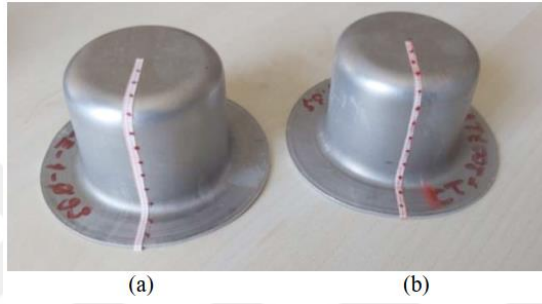
Silindirik kaplarda Tip-1 BMKA kullanılarak HMDÇ ve ÇTHŞ için yükleme profilleri, bu yükleme profilleri kullanılarak da SÇO'lar elde edilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. ÇTHŞ'deki karşı basıncın şekillendirmeye etkisi, üretilen parçalarda SÇO, kalınlık dağılımı ve geometrik doğruluklar açısından incelenmiştir.

4.4.1. Sacdaki kalınlık değişiminin karşılaştırılması

Bulanık mantık kontrol algoritmalarıyla elde edilen yükleme profilleri kullanılarak deneylerden elde edilen parçaların kalınlık dağılımları ± 0.001 mm hassasiyetindeki ultrasonik kalınlık ölçer ile ölçülmüştür. Analizlerde bulanık kontrol algoritmaları karşı basınç için bir eğri üretecek şekilde ve karşı basınç sıfır (HMDÇ) olacak şekilde iki türlü çalıştırılmıştır. Bu yöntemle aynı BMKA kullanılarak Şekil 4.18'de görüldüğü gibi HMDÇ ve ÇTHŞ için yükleme profilleri üretilmiştir. Şekillendirilen numunelerden birer örnek Şekil 4.19'da görülmektedir.

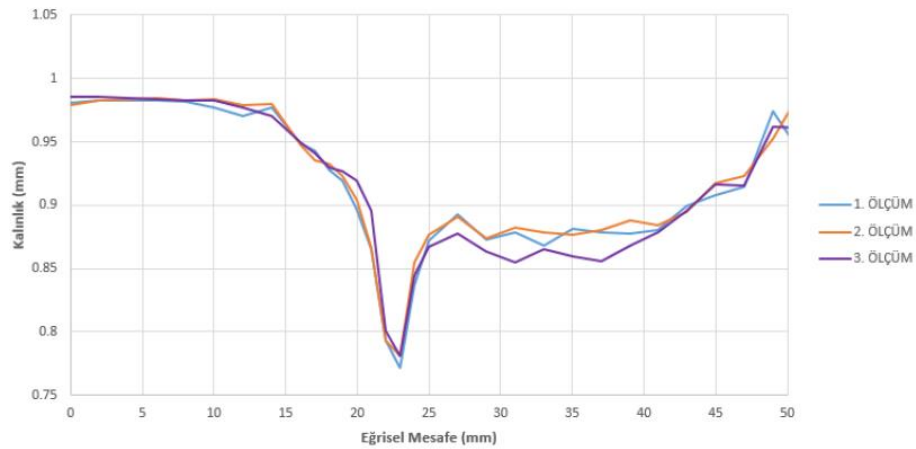


Şekil 4.18. HDC ve ÇTHŞ için bulanık algoritmalar kullanılarak elde edilen basınç eğrileri

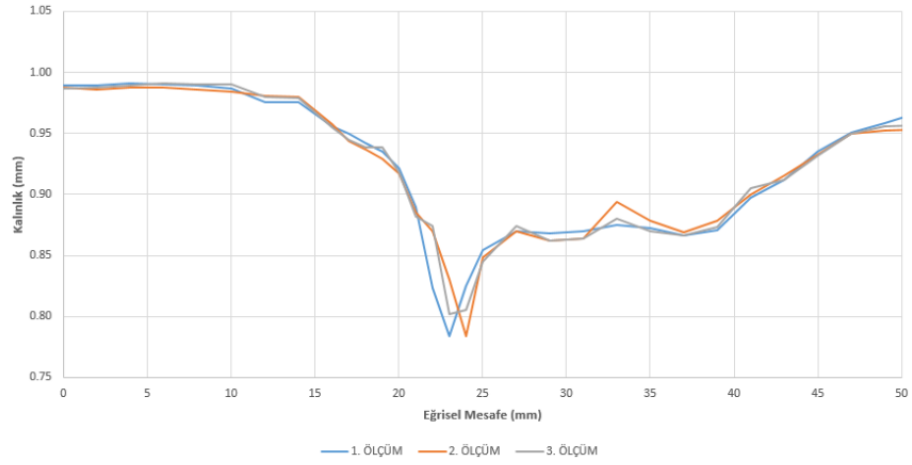


Şekil 4.19. 93 mm ilkel çap kullanılarak (a) HMDÇ ile (b) ÇTHŞ ile şekillendirilmiş silindirik kaplar

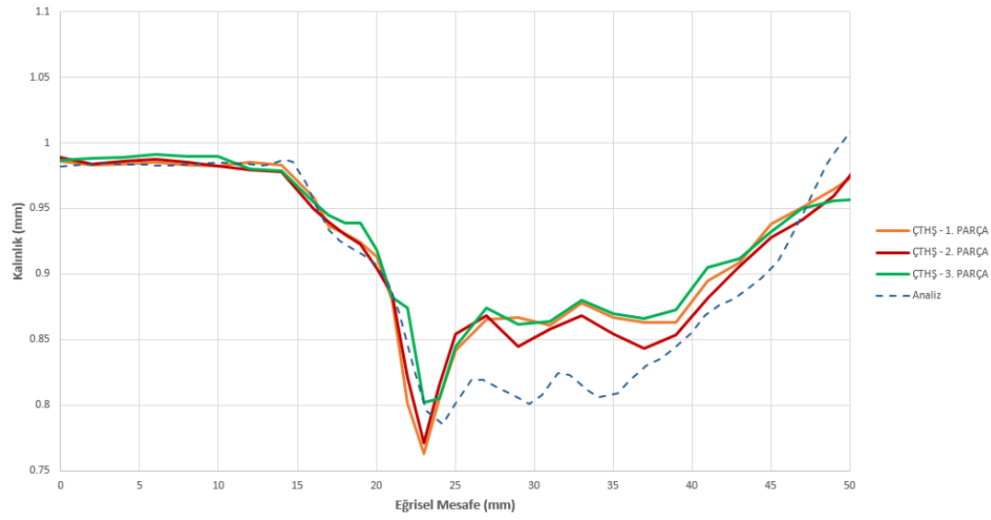
HMDÇ ve ÇTHŞ ile elde edilen birer numunede yapılan kalınlık ölçüm grafikleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir. Ölçüm tekrarlarındaki sapmanın en fazla %5 olduğu ve ölçümlerin güvenilir olduğu görülmektedir. Daha sonra şekillenmiş sac parçaların kesitleri boyunca ölçülen kalınlık dağılımları ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen kalınlık dağılımı doğrulanmıştır. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de HMDÇ ve ÇTHŞ için deney ve analizlerden elde edilen kalınlık dağılımları verilmiştir.



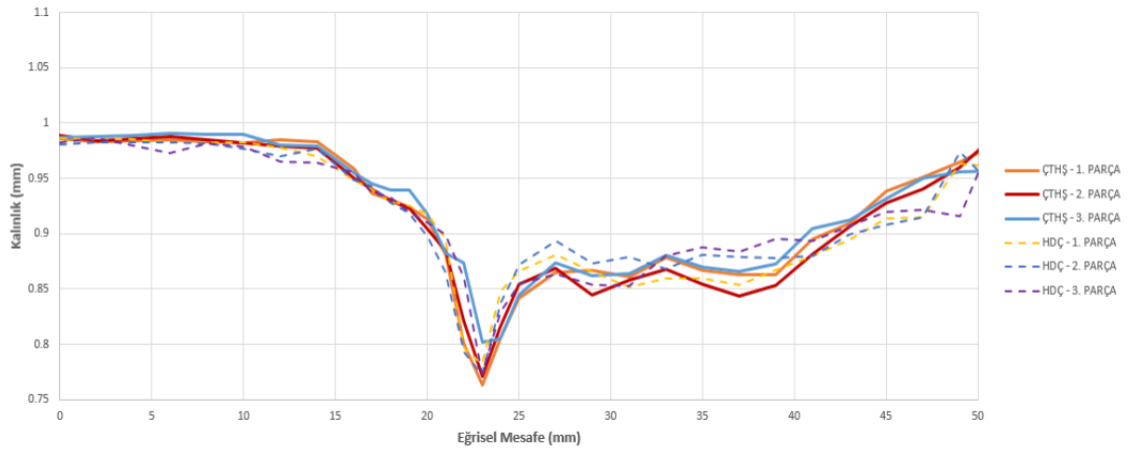
Şekil 4.20. 93 mm ilkel çap kullanılarak HMDÇ ile elde edilen parçanın kalınlık dağılımları



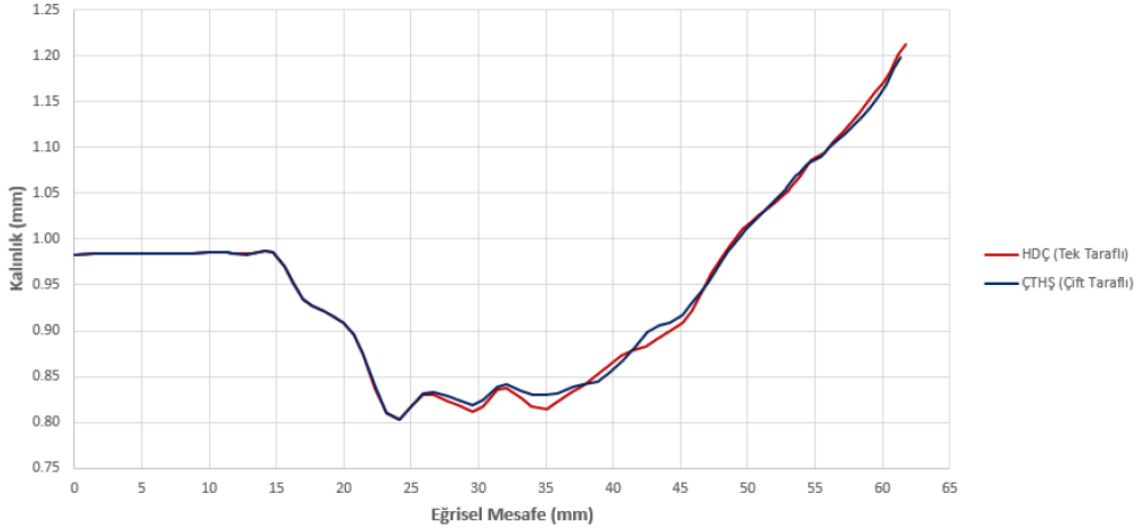
Şekil 4.21. 93 mm ilkel çap kullanılarak ÇTHŞ ile elde edilen parçanın kalınlık dağılımları



Şekil 4.22. ÇTHŞ ile 93 mm ilkel çap kullanılarak şekillendirilmiş parçaların analiz ve deneylerden elde edilen kalınlık dağılımları



Şekil 4.23. 93 mm ilkel çap ile deneylerden elde edilen HMDÇ ve ÇTHŞ numunelerinin kalınlık dağılımları



Şekil 4.24. 93 mm ilkel çap ile analizlerden elde edilen HMDÇ ve ÇTHŞ kalınlık dağılımları

HMDÇ ve ÇTHŞ için bulanık algoritmalar kullanılarak yapılan simülasyonlar için sacda oluşan kalınlık dağılımları Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de verilmiştir. Yapılan analiz ve deneylerden çıkan sonuçlara göre ÇTHŞ’deki karşı basıncın SÇO, kalınlık dağılımı ve buruşma yönünden iyileştirici bir etkisi görülememiş, sadece kalınlık dağılımını belirli oranlarda değiştirdiği görülmüştür. Bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını tespit edebilmek için analizlerden elde edilen HMDÇ ve ÇTHŞ kalınlık dağılımı verilerine T-Testi uygulanmıştır. T-testi Excel programındaki hazır fonksiyon kullanılarak elde edilmiş ve tezin eklerinde geniş şekilde anlatılmıştır. T-testinden elde $\sigma=0.388$ elde edilmiştir. σ (Anlamlılık değeri) %5’den büyük olduğu için kalınlık verileri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. **Yani HMDÇ ve ÇTHŞ arasında anlamlı bir fark yoktur. Sonuç olarak ÇTHŞ’deki karşı basınç, kalıp boşluğu dar olan parçaların şekillendirilmesi üzerinde olumlu bir etki sağlamamıştır. Kalınlık dağılımında bir etki göstermemiştir.**

4.4.2. SÇO’ların Sayısal ve Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Karşılaştırılması

SÇO’ların elde edilmesi için iki proste de belirli sac çapları denenmeye başlandıktan sonra, sac çapı birer mm artırılarak başarıyla şekillendirilebilen en büyük sac çapı belirlenmiştir. Bir sac çapının o prosesle elde edilebilen SÇO değeri olduğunun kabul edilmesi için aynı çapta en az 3 adet başarılı şekillendirme yapılmıştır. Analizlerde 95 mm ilkel çaptaki sac parçalar başarıyla şekillendirilmiştir. **Analizlerden elde edilen**

sonuçlarla ÇTHŞ ile silindirik kaplarda 2.375 SÇO değeri elde edilmiştir. Tip-1 BMKA ile elde edilen yükleme profilleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde hem HMDÇ hem de ÇTHŞ ile 93 mm ilkel çaptaki sac parça şekillendirilmiştir. 94 mm ve 95 mm sac çapları için yapılan deneylerde 1 adet 94 mm ve 1 adet 95 mm ilkel çaptaki sac parça şekillendirilebilmiştir. Fakat bu deneylerde HMDÇ ve ÇTHŞ için en az 3 başarılı tekrar olacak şekilde sonuç elde edilememiştir. Tekrarlanabilirlik açısından deneyler üç tekrarlı olarak yapılmıştır. **Deneylerden 2.325 SÇO değeri elde edilmiştir. SÇO'lar analiz ve deneyler arasında ortalama %3'lük bir hata payıyla doğrulanmıştır. ÇTHŞ'nin HMDÇ'ye göre SÇO'da bir artış sağlamadığı görülmüştür.**

4.4.3. Üretilen sac parçaların geometrik doğrulukları yönünden karşılaştırılması

Silindirik parça için HMDÇ ve ÇTHŞ ile üretilen parçaların ıstampa şeklini büyük oranda almasından dolayı bu iki yöntemle imal edilmiş parçaların geometrik doğruluklarının karşılaştırılması çok anlamlı olmamaktadır. Ancak parça geometrisindeki farklılık, sac malzemenin ıstampaya sıvanma şekli ve daha önceki çalışmalarda HMDÇ yöntemi ile üretilen parçada buruşma hatalarının gözle görünür bir şekilde oluştuğundan dolayı proseslerin geometrik doğrulukları açısından karşılaştırılması oval parça için gerçekleştirilmiştir. HMDÇ ve ÇTHŞ prosesleriyle aynı yükleme profilleri kullanılarak üretilmiş olan endüstriyel parçalar, farklı ıstampa pozisyonlarında ara kademelerde ve tam ıstampa deplasmanında incelenerek buruşma oluşumunun iki proses açısından oluşturduğu fark ortaya konmuştur.

4.5. Oval bir Endüstriyel İş Parçası için Tip-2 BMKA Kullanılarak Yükleme Eğrilerinin Bulunması

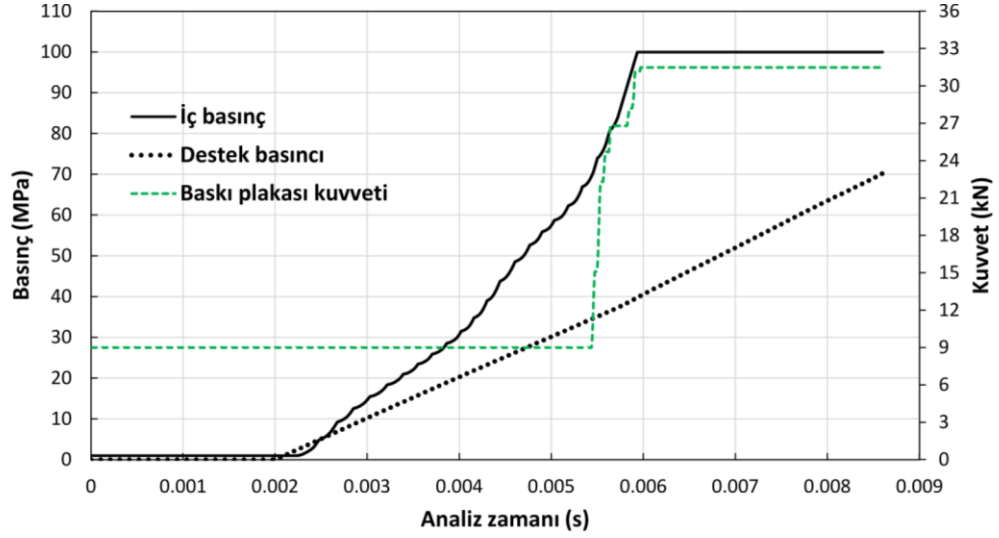
Silindirik iş parçalarında ıstampa çapı kesit boyunca sabitken, endüstride kullanılan birçok parçada değişkendir. Bu durumda kalıp boşluğu proses boyunca değişir ve boşluk büyüdükçe sacın ıstampa ile BP arasında askıda kalan kısmı artar. Böyle geometrilerdeki parçalara örnek olarak, daha önceki çalışmalarda HMDÇ ile imal edilen ancak buruşma hataları giderilemeyen oval şekilli bir endüstriyel iş parçası seçilmiştir. Bu tez çalışmasının dayandığı hipotezlerden biri, “ÇTHŞ prosesi HMDÇ yöntemine göre parçaların geometrik doğruluklarını artırır.” dır. Bu bölümde söz konusu hipotezi doğrulamak amacıyla prosesler Tip-2 BMKA kullanılarak şekillendirilebilirlik, SÇO ve

geometrik doğrulukları açısından şekillendirmeye etkisi sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

4.5.1. Tip-2 BMKA Kullanılarak Yükleme Eğrilerinin Bulunması

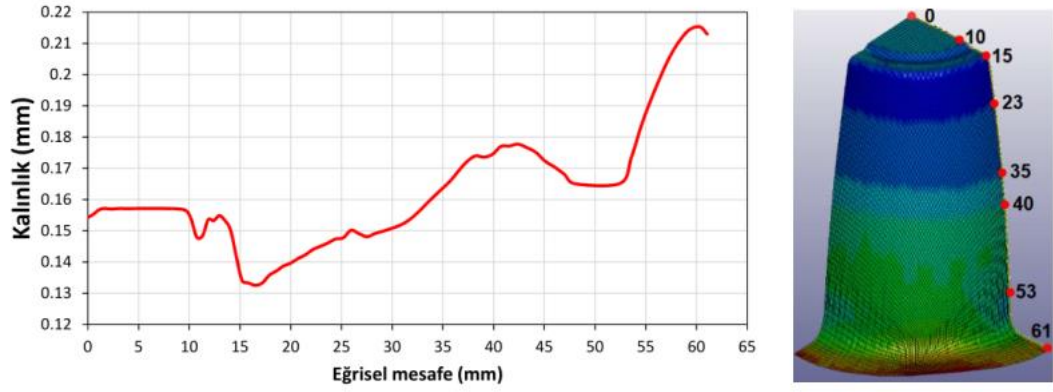
Oval geometrideki kalıp boşluklarının değişken olması şekillendirmedeki belirsizliği artırmaktadır. Bunun gibi belirsizlikleri daha fazla olan sistemlerde Tip-2 BMKA Tip-1'e göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle oval parçanın analizlerle yükleme eğrilerinin bulunmasında Tip-2 BMKA kullanılmıştır.

AT2 BMKA kullanılarak oval iş parçasının analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu iş parçası için ıstampa duvarına temas kriteri için, silindirik parçadaki kriterlerden farklı olarak, sac merkezine olan uzaklık değeri için 18-20 mm arasına, baskı plakası radyüsüne temas kriteri için ise 20.5-22 mm arasına düşürülmüştür. Dolayısıyla analizlerde her bir zaman adımında bu desteksiz bölgelerde kalan elemanların düşey konumları giriş değişkeni olarak hesaplatılmıştır. Buruşma kriteri için yine silindirik parçadaki gibi flanş bölgesindeki elemanların dikey konumundaki pozitif mesafeleri ölçülmüştür. Oval iş parçasının analizinde öncelikle silindirik parçanın analizinde yer alan üyelik fonksiyonları ve kural matrisleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. 85 mm ilkel sac çapına sahip 0.18 mm kalınlığındaki AISI304 paslanmaz çelik için gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen yükleme profilleri Şekil 4.25'de verilmiştir. Silindirik parçadan elde edilen yükleme profilleri ile kıyaslandığında endüstriyel iş parçası için gerekli karşı basıncın daha doğrusal olduğu ve daha yüksek değerlere çıktığı, şekillendirme basıncı ve baskı plakası kuvvetinin ise daha kısa sürede maksimum değerlerine eriştiği saptanmıştır.

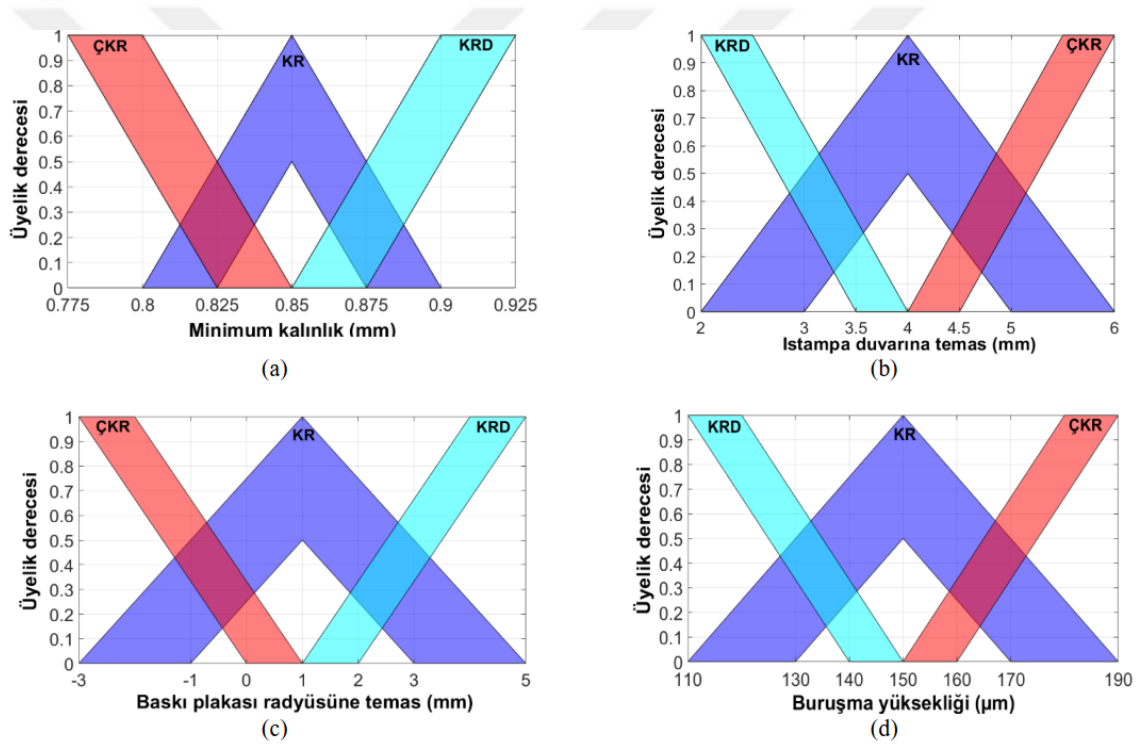


Şekil 4.25. AT2 BMKA ile silindirik parçaya ait giriş değişkenleri kullanılarak endüstriyel iş parçası analizinden elde edilen yükleme profilleri

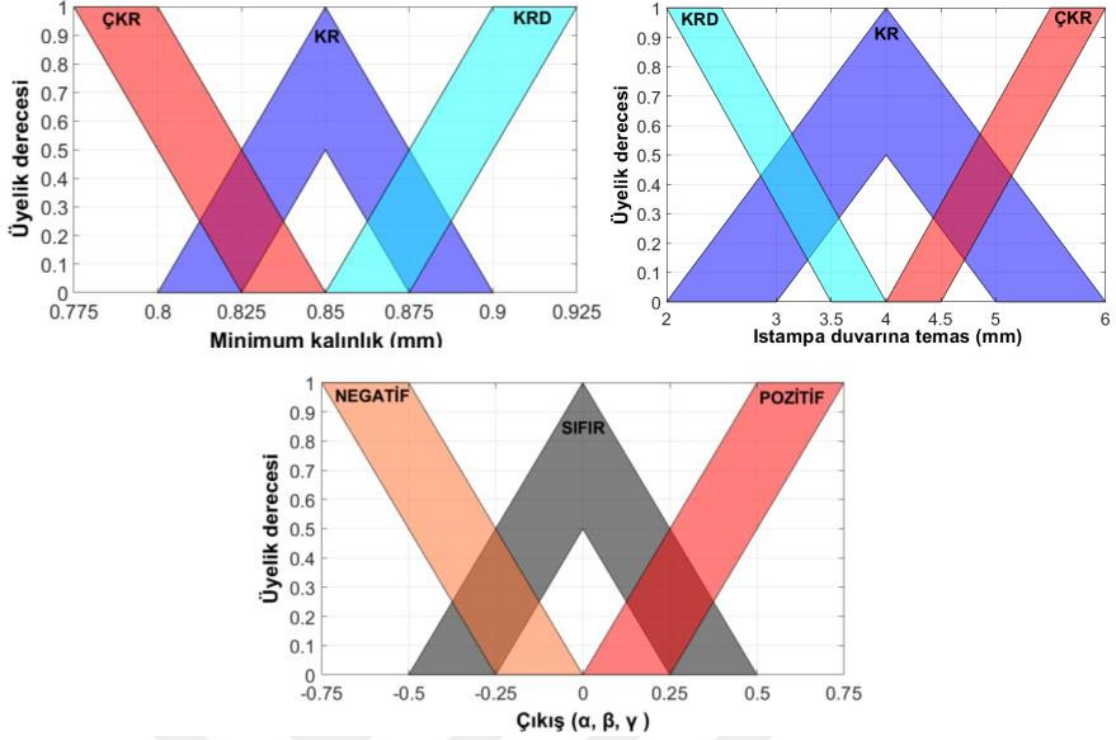
Endüstriyel iş parçası üzerinden analizden ölçülen kalınlık dağılımı Şekil 4.26'da verilmiştir. Minimum sac kalınlığı ıstampa radyüsü çıkışında yaklaşık 0.13 mm (yaklaşık %28'lik incelme) elde edilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi endüstriyel parçanın analizinde eğrisel mesafenin yaklaşık 50-61 mm olduğu bölgelerde bazı buruşmalar meydana gelmiştir. Bu buruşmalar silindirik parça için oluşturulan üyelik fonksiyonlarının endüstriyel parça için kullanılmasından kaynaklanmıştır. Etek kısmında oluşan bu buruşmalar ölçekli çaydanlık için giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları ve kural matrisleri değiştirilerek giderilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda silindirik parça için Şekil 4.27'de verilen giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyonlarının taban değerleri minimum kalınlık hariç soldan sağa doğru olacak şekilde sırasıyla şu şekilde değiştirilmiştir: İstampa duvarına temas giriş değişkeni 0, 1, 1.5, 2, 3, 3.5, 4; baskı plakası radyüsüne temas giriş değişkeni -1, -0.75, -0.5, -0.25, 0.25, 0.375, 0.5 ve buruşma yüksekliği giriş değişkeni 25, 45, 50, 60, 75, 85, 100. Silindirik parça için çıkış üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.26. AT2 BMKA ile silindirik parçaya ait giriş değişkenleri kullanılarak endüstriyel iş parçası analizinden elde edilen kalınlık dağılımı



Şekil 4.27. Giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları

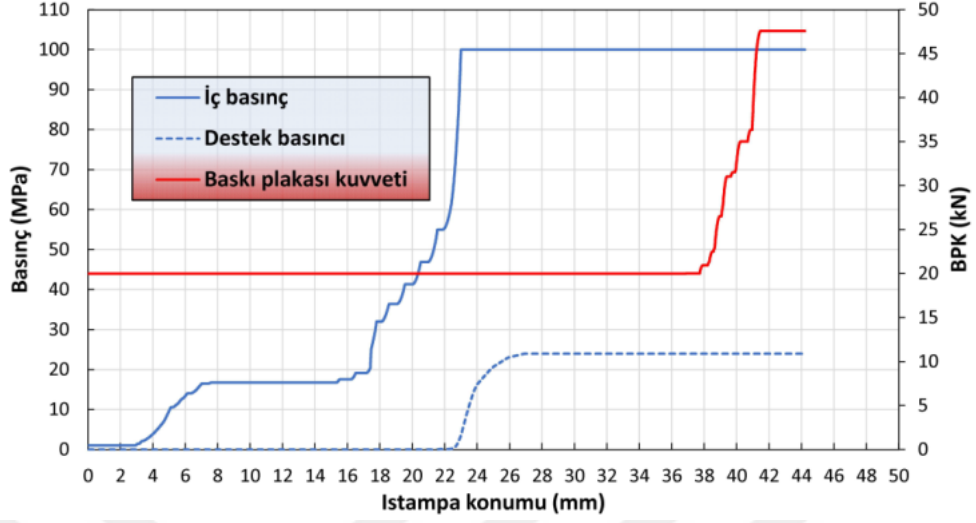


Şekil 4.28. Çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları

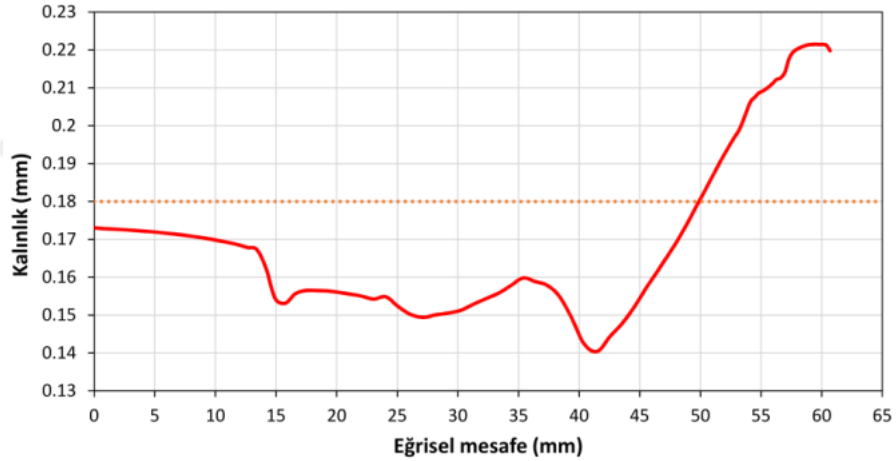
Şekil 4.25'deki yükleme profilleri ile yapılan deneyler neticesinde baskı plakası kuvvetinin yetersiz olmasından sıvı basıncının kaçırıldığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı analizlerde aynı zamanda başlangıç baskı plakası kuvveti yırtılmanın oluşmadığı bir değer olan 20 kN'ye yükseltilmiştir. Giriş değişkenleri değiştirildikten sonra elde edilen optimum yükleme profilleri Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde baskı plakası kuvvetinin ıstampa konumu 38 mm'ye kadar 20 kN sabit olduğu, karşı basıncın maksimum 24 MPa ile sınırlandırıldığı görülmektedir. Bu konuma kadar baskı plakası radyüsüne herhangi bir temas olmamış ve karşı basınç etki etmemiştir. İstampa konumu 22 mm'den sonra şekillendirme basıncı buruşmaları engellemek için maksimum seviyesine ulaşmış ve desteksiz bölge dar olmasına rağmen şekillendirme basıncı nedeniyle baskı plakası radyüsüne teması engellemek için karşı basınç etki etmeye başlamıştır. Dolayısıyla şekillendirme basıncının etkisiyle ıstampa duvarındaki buruşmalar engellenmiş ve karşı basıncın etkisiyle de baskı plakası radyüsüne temas engellenerek iş parçası yırtılmadan başarılı bir şekilde şekillendirilebilmiştir.

Güncellenen giriş değişkenleri ile yapılan analiz neticesinde iş parçası üzerinden ölçülen sac kalınlıkları Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Maksimum sac kalınlığı eğrisel mesafe 42 mm'de 0.14 mm olarak elde edilmiştir. Bu da yüzde incelme olarak yaklaşık

%23'e karşılık gelmektedir ki Şekil 4.26 ile kıyaslandığında bu değer, maksimum incelmede de bir azalmanın gerçekleştiğini göstermektedir.

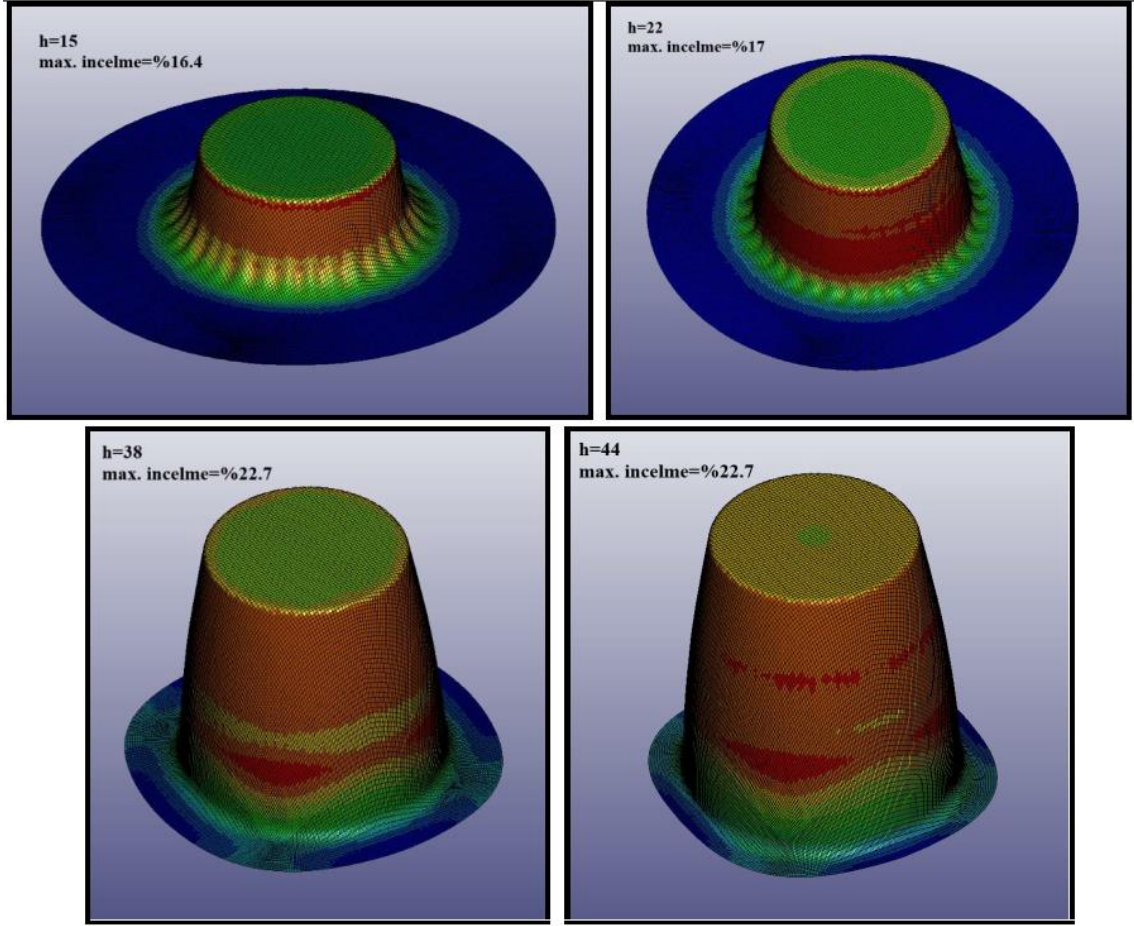


Şekil 4.29. AT2 BMKA ile güncellenen giriş değişkenleri kullanılarak endüstriyel iş parçası analizinden elde edilen yükleme profilleri



Şekil 4.30. AT2 BMKA ile güncellenen giriş değişkenleri kullanılarak endüstriyel iş parçası analizinden elde edilen kalınlık dağılımı

Optimum yükleme profilleri ile başarılı bir şekilde şekillendirilen endüstriyel parçaya ait analizden elde edilen dört farklı kademe (15, 22, 38 ve 44 mm) Şekil 4.31'de verilmiştir. 15 mm ıstampa konumundayken ($h=15$) desteksiz bölgede buruşmaların olduğu saptanmıştır. Bu bölgedeki buruşmalar $h=22$ 'de şekillendirme basıncının yükselmesiyle (Şekil 4.29) giderilmeye çalışılmış ve $h=38$ 'de buruşmaların tamamen yok olduğu görülmüştür. Proses sonunda $h=44$ konumunda herhangi bir kararsızlık oluşmadan yaklaşık %23 maksimum incelme ile endüstriyel iş parçasının başarılı bir şekilde şekillendirildiği görülmektedir.



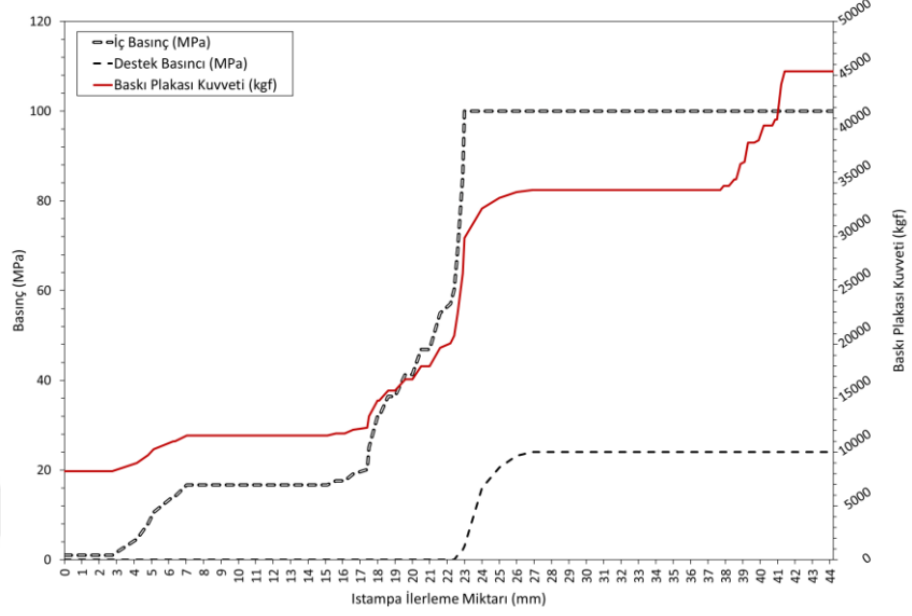
Şekil 4.31. Dört farklı kademede, optimum yükleme profilleri ile şekillendirilen endüstriyel iş parçası

Şekil 4.31’de görüldüğü gibi önceki çalışmalarda da prosesin ilk aşamalarında gözlemlenen buruşmalar karşı basıncın uygulanmasıyla analizlerde kaybolmuştur. ÇTHŞ’deki karşı basıncın etkisiyle analizlerde buruşmaların giderilerek tezin hipotezine uygun olarak geometrik doğruluğun arttığı görülmüştür.

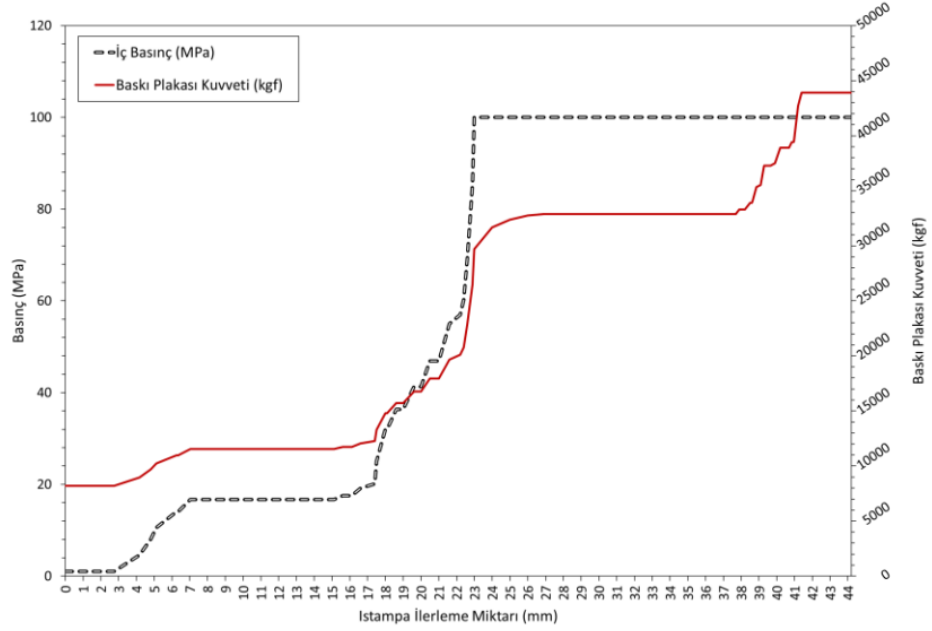
4.5.2. Endüstriyel İş Parçasını ÇTHŞ ile Üretilmesi ve Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

ÇTHŞ ile 0.18 mm kalınlıktaki AISI 304 paslanmaz çelik endüstriyel iş parçasının Tip-2 BMKA analizlerinden elde edilen yükleme profilleri kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.32). Deneyler dört kademeli (üç ara kademeli ve tam şekillendirilmiş) ve üç tekrarlı olmak üzere toplam 12 adettir. Karşılaştırma için karşı basıncın tamamen kaldırıldığı yükleme profilleri Şekil 4.33’de verilmiştir. Bu eğride ÇTHŞ’den farklı olarak karşı basınç uygulanmamış ve karşı basıncın oluşturduğu açma kuvveti sadece ilgili kısımda BPK’den çıkarılmıştır. Dolayısıyla iki eğri arasındaki temel

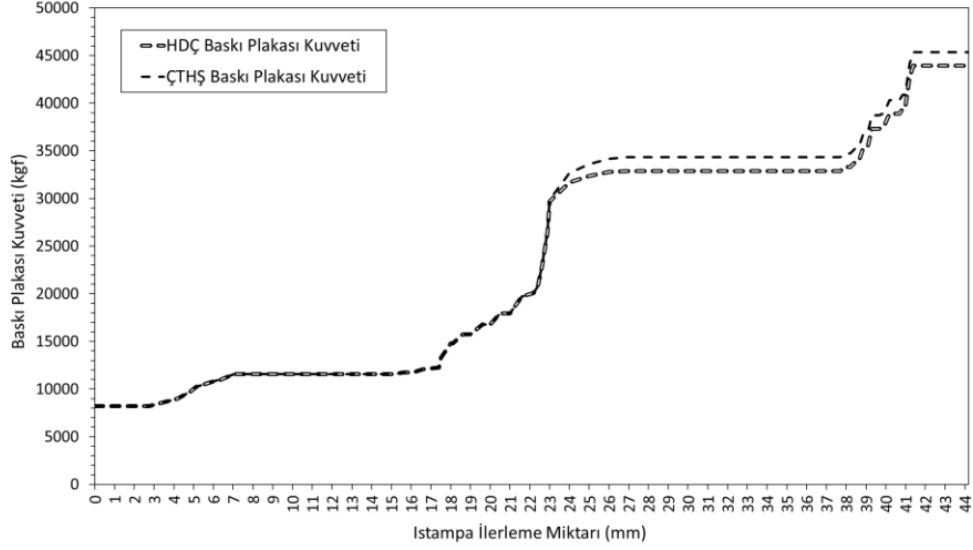
fark, HMDÇ’de karşı basıncın olmaması ve BPK’nın karşı basıncın olması gereken bölgede daha az olmasıdır. Her iki eğrinin baskı plakası kuvvetlerinin karşılaştırması Şekil 4.34’de aynı grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 4.32. Tip-2 Bulanık mantık algoritması ile elde edilen endüstriyel parçaya ait çift taraflı hidro-şekillendirme proses eğrileri



Şekil 4.33. Karşılaştırma için yapılan HMDÇ prosesine ait şekillendirme basıncı ve BPK eğrileri



Şekil 4.34. ÇTHŞ ve HMDÇ proseslerine ait BPK eğrilerinin karşılaştırılması

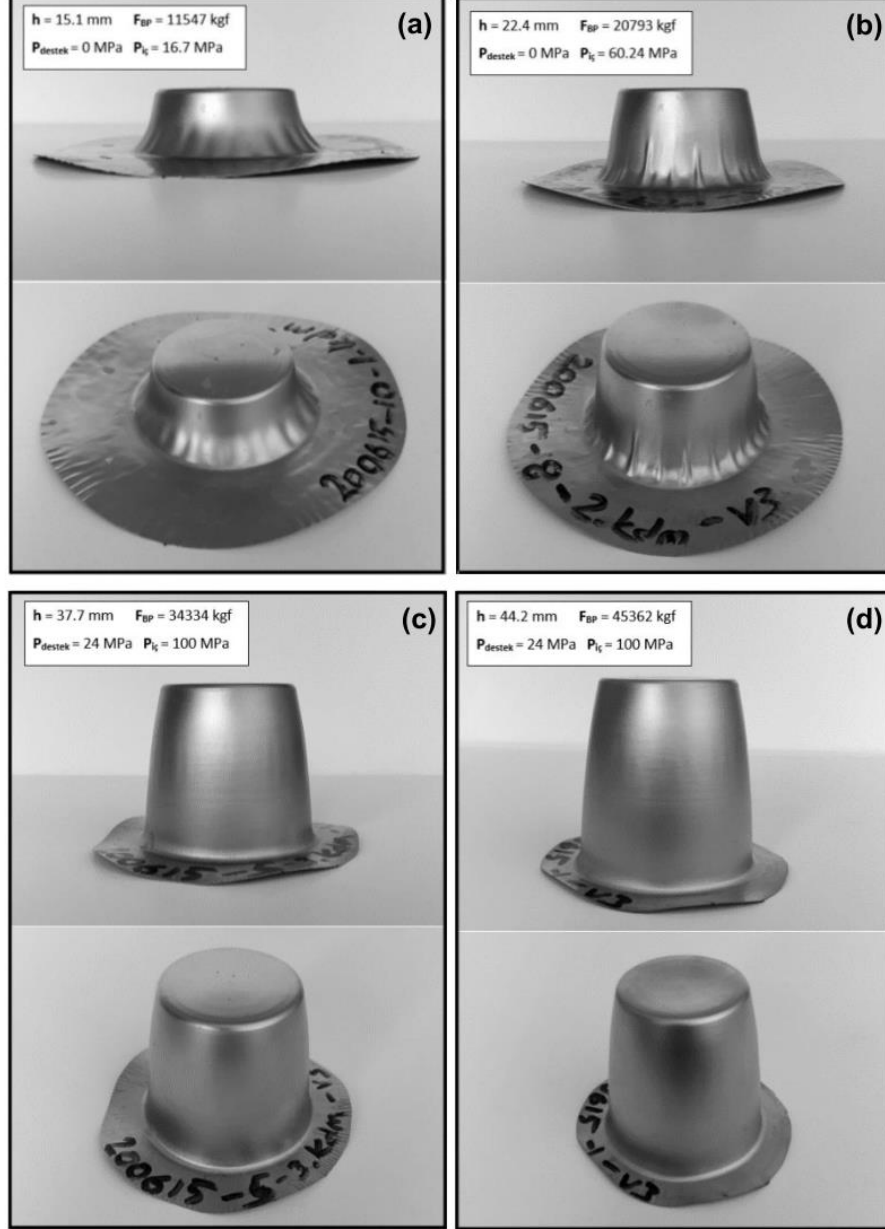
Karşılaştırma için yapılan ve HMDÇ ve ÇTHŞ deneylerinde kullanılan deney planı Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tabloda hangi kademelerde numunelerin alındığı ve o kademede ulaşılan maksimum parametre değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. ÇTHŞ prosesi ile endüstriyel parça üretiminin deneysel olarak doğrulanmasında ve karşılaştırma için yapılan HMDÇ prosesinde

ÇTHŞ				
	İstampa Konumu (mm)	İç Basınç (MPa)	Karşı Basınç (MPa)	Açıklama
1. ara kademe	h=15.1	16.7	0	-
2. ara kademe	h=22.4	60.24	0	- İç basıncın maksimuma çıkmaya başladığı konum. - Destek Basıncının uygulanmaya başladığı konum. - Baskı plakasının artmaya başladığı konum
3. ara kademe	h=37.7	100	24	- Baskı plakasının ikinci kez artmaya başladığı konum
Tam şekillendirme	h=44.2	100	24	-
HMDÇ				
	İstampa Konumu (mm)	İç Basınç (MPa)	Karşı Basınç (MPa)	Açıklama
1. ara kademe	h=15.1	16.7	0	-
2. ara kademe	h=22.4	60.24	0	- İç basıncın maksimuma ulaştığı konum. - Baskı plakasının artmaya başladığı konum
3. ara kademe	h=37.7	100	0	- Baskı plakasının ikinci kez artmaya başladığı konum
Tam şekillendirme	h=44.2	100	0	-

Yapılan deneylerin sonucunda karşı basıncın uygulanmaya başladığı konuma kadar (Şekil 4.35a ve Şekil 4.35b) buruşmaların olduğu gözlemlenmiştir. Karşı basınç uygulanmaya başladıktan sonraki kademelerde ise (Şekil 4.35c ve Şekil 4.35d) flanş bölgesinde ve sacın askıda kaldığı bölgede önceki kademelerde görülen buruşmaların

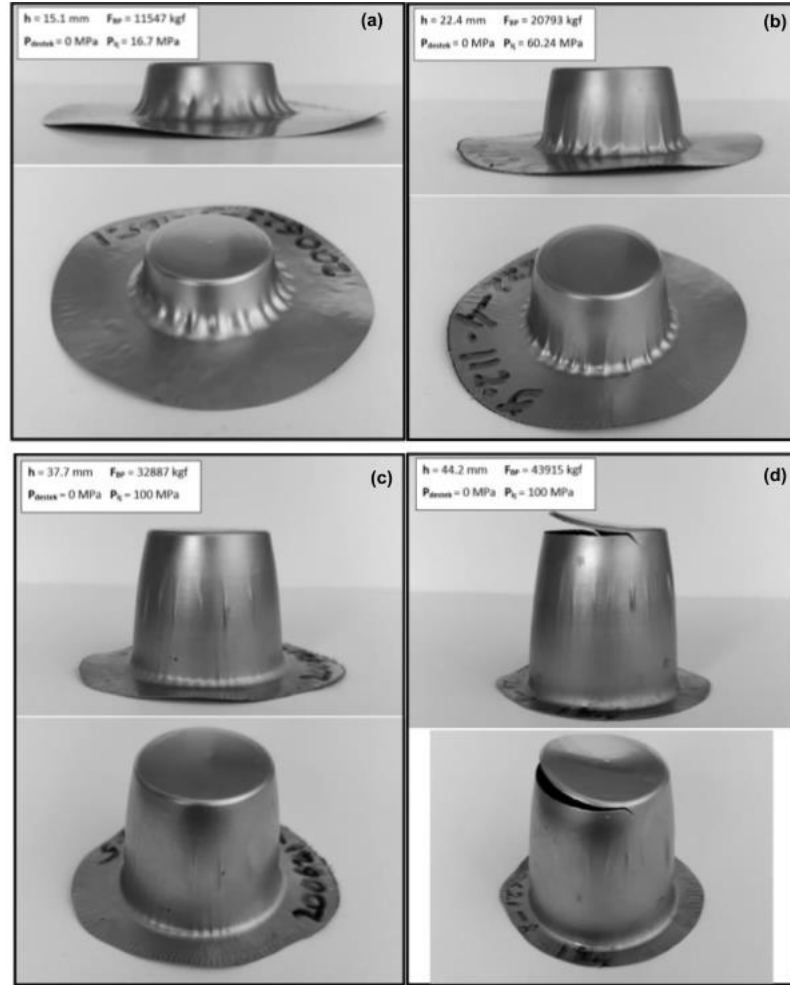
kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu etkinin gerçekten karşı basınçtan kaynaklanıp kaynaklanmadığının belirlenebilmesi için HMDÇ deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen endüstriyel parçalar Şekil 4.36’de verilmiştir.



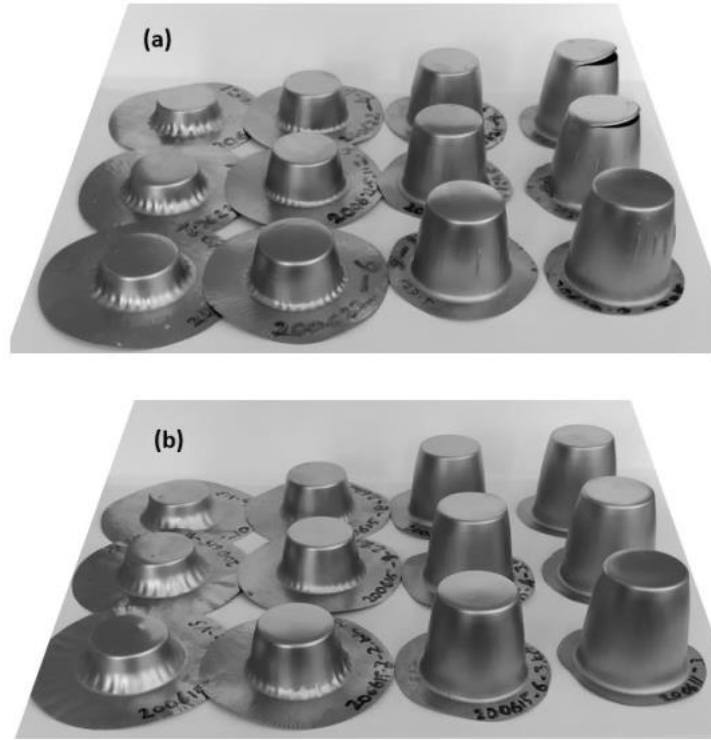
Şekil 4.35. Toplam üç ara kademe ve tam boy şekillendirmiş bir parçadan oluşan, ÇTHŞ ile elde edilen ölçekli endüstriyel iş parçaları

HMDÇ ile elde edilen ve Şekil 4.36’de proses kademeleri ile verilen oval iş parçaları incelendiğinde, ÇTHŞ prosesine kıyasla üçüncü kademede (Şekil 4.36c) buruşmaların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. HMDÇ ile üretilen tam boy şekillendirilmiş parçalarda ise üç tekrarlı deneyden ikisinde hem buruşma hem de yırtılma

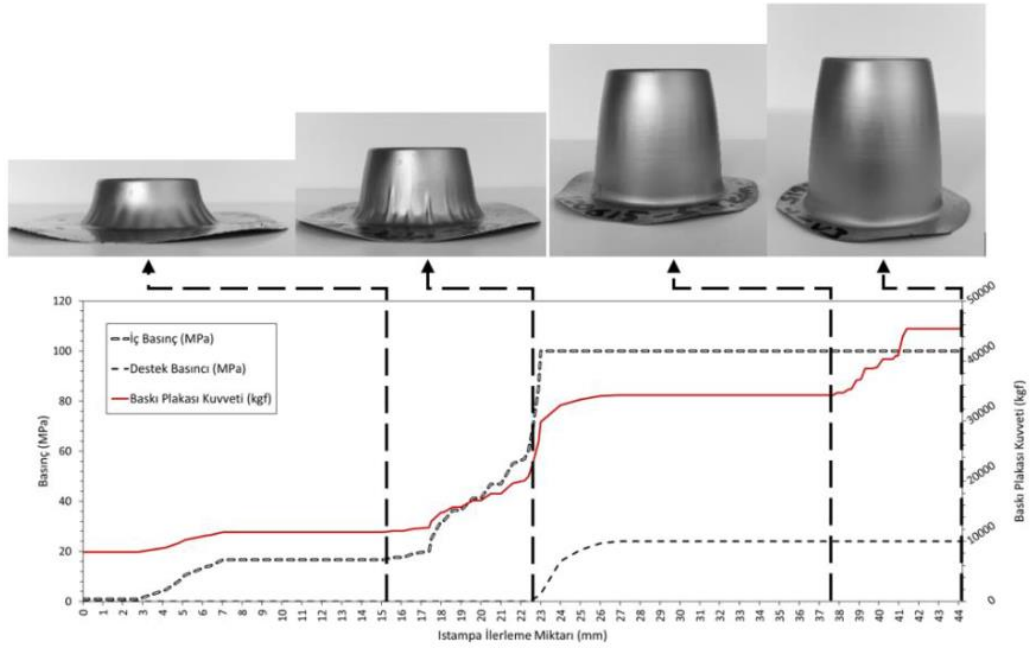
görülmüştür. Bir parçada ise sadece buruşma görülmüştür. Dört kademeli ve üç tekrarlı olarak gerçekleştirilen ÇTHŞ ve HMDÇ deneylerinden elde edilen tüm numuneler Şekil 4.37’de verilmiştir. Her iki proses için de proses sırasında ara kademelerde durdurularak alınan parçanın durumu Şekil 4.38’de ve Şekil 4.39’de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde karşı basıncın etkisi açıkça gözlemlenmiştir. Oval parçada HMDÇ ile geometrik doğruluk sağlanamamakta ve yırtılmalar oluşarak başarılı parça şekillendirilememektedir. Bu doğrultuda HMDÇ ile ÇTHŞ arasında kalınlık dağılımı ile ilgili çalışma yapılmamıştır.



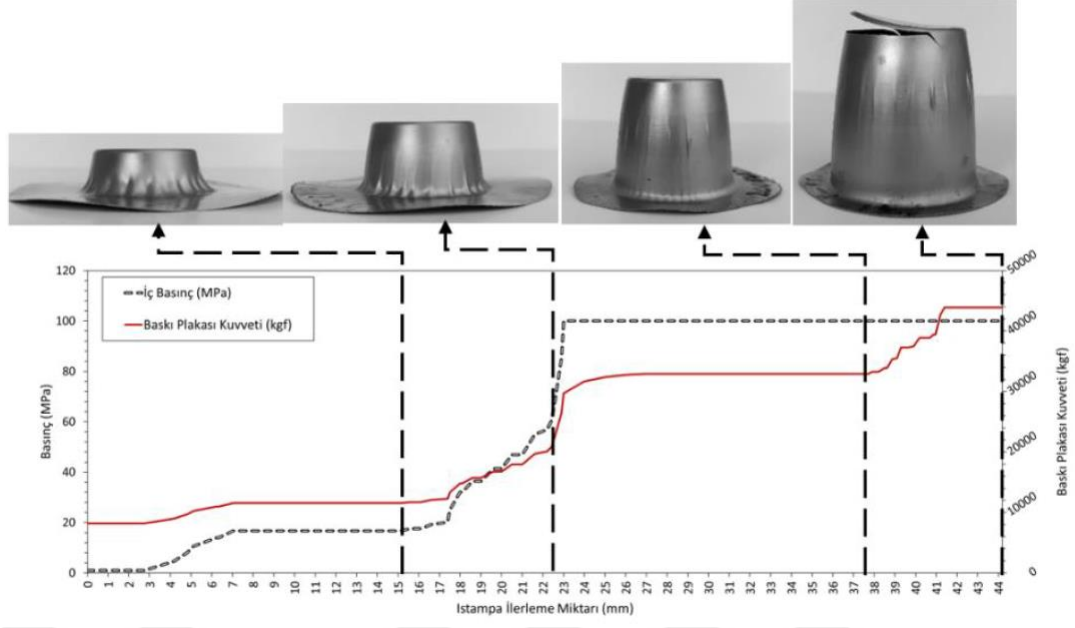
Şekil 4.36. Toplam üç ara kademe ve tam boy şekillendirmiş bir parçadan oluşan, HMDÇ ile elde edilen ölçekli endüstriyel iş parçaları



Şekil 4.37. Üç tekrarlı olarak yapılan, toplam üç ara kademe ve tam boy şekillendirmiş bir parçadan oluşan (a) HMDÇ ile elde edilen ölçekli endüstriyel iş parçaları, (b) ÇTHŞ ile elde edilen ölçekli endüstriyel iş parçaları

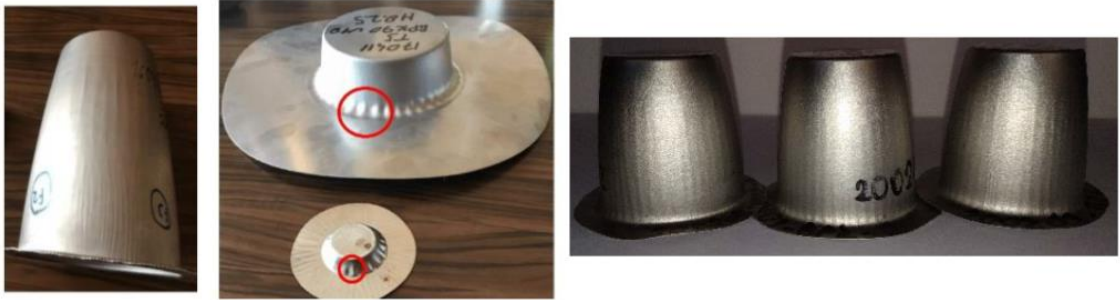


Şekil 4.38. ÇTHŞ prosesi sırasında ara kademelerde durdurularak alınan parçanın durumu



Şekil 4.39. HMDÇ prosesi sırasında ara kademelerde durdurularak alınan parçanın durumu

Daha önceki çalışmalardan olan Tübitak 1505 nolu projede, 0.18 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik malzemesinden endüstriyel parçalar üretilmiştir. Bu projede şekillendirme işleminde HMDÇ kullanılmıştır. Şekil 4.40’da görüldüğü üzere bu parçalarda şekillendirmenin ilk aşamalarında oluşan buruşma ve kırışmalar proses sonuna kadar devam etmekte ve giderilememektedir.



Şekil 4.40. TUBİTAK 1505 projesinde AISI 304 paslanmaz çelikten çaydanlık üretimi (a) meydana gelen buruşmalar (b) ölçekli parçalarda benzer şekillendirmeler oluşmaktadır

Bu sonuçlardan hareket ederek, değişken kesite sahip bir parçada ÇTHŞ ile buruşmaların azaltıldığı deneylerle doğrulanmıştır. Oval parçalarda HMDÇ’de buruşma oluşması kaçınılmaz iken ÇTHŞ ile buruşmalar tamamen önlenebilmiştir. Aynı zamanda ÇTHŞ’nin prosesin sonuna doğru oluşan yırtılmaları da önleniği görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tezinde Hidromekanik Derin Çekme’de (HMDÇ) elde edilen şekillendirilebilirliği artırmak için Çift taraflı Hidro-şekillendirme (ÇTHŞ) proses parametreleri araştırılmıştır. İlk olarak sac malzemelerin ÇTHŞ prosesi ile şekillendirilmesi için uygun deney presi hazırlanmış, AA 5754 ve AISI 304 malzemeleri için optimum yükleme profilleri sayısal olarak belirlenip deneysel doğrulaması yapılmıştır. Literatürde ÇTHŞ’deki karşı basıncın proses üzerine etkisi hakkında kısıtlı sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalarda HDMÇ prosesi için şekillendirme basıncı ve baskı plakası kuvveti optimum yükleme profilleri adaptif sonlu elemanlar analizleri ile eş zamanlı çalışan Tip-1 Bulanık Mantık Kontrol Algoritmaları (BMKA) ile sayısal ve deneysel olarak elde edilmiştir. ÇTHŞ’de karşı basınç için literatürde sadece sabit veya dar bir alanda lineer olarak değişen yükleme profilleri uygulanmıştır ve optimum değerleri bulmaya yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tezde ise karşı basınç yükleme profili adaptif yaklaşımla BMKA kullanılarak elde edilmiştir. Buna ilaveten literatürden farklı olarak ÇTHŞ’de optimum yükleme profillerinin bulunmasında yeni bir yöntem olan Tip-2 BMKA kullanılmıştır. Böylece özellikle geçmiş çalışmalarda HMDÇ’de karşılaşılan buruşma hataları tamamen giderilmiştir. Bu doğrultuda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.1. Sonuçlar

ÇTHŞ için SE analizlerinde uygun kural tabanlı matrisleri ve üyelik fonksiyonlarını belirlemek için deneme-yanılma yoluyla yapılan analizlerde, karşı basıncın analiz süresinin yaklaşık 1/3 zaman dilimi içerisinde uygulanmasının ıstampa temasını zorlaştırdığı ve incelemeleri artırdığı gözlenmiştir. Prosesin ileriki aşamalarında ise karşı basıncın biraz fazla olması bile sacın askıda kalan kısmında buruşmalara neden olmaktadır. Bu çıkarımlarla karşı basınç, sacı ıstampadan ayırmayacak kadar küçük olmalı ve prosesin ileriki zamanlarında da sacda buruşmaya neden olmayacak kadar büyük olmalıdır.

ÇTHŞ’de ıstampa-sac ve kalıplar-sac arasındaki sürtünme katsayıları incelemeleri etkileyen önemli parametrelerdir. Sürtünme katsayılarını analizlerle tahmin edilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. İstampanın sürtünme katsayısı, sacın ıstampa burun radyüsüne kadar olan kısımdaki kalınlık dağılımını önemli ölçüde etkilerken, burun radyüsünden flanş kısmına kadar olan kısmın kalınlık dağılımında etkili değildir. Sac-kalıp ve sac-

baskı plakası arasındaki sürtünme katsayısının, sacın ıstampa burun radyüsüne kadar olan kısımdaki kalınlık dağılımını neredeyse hiç etkilemediği, asıl kalınlık dağılımına etkisinin burun radyüsünden flanş kısmına kadar olan kısmında olduğu görülmüştür. Buna göre HMDÇ ve ÇTHŞ proseslerinde imalatla sacın istenilen kısmındaki incelmeler sürtünme katsayıları değiştirilerek iyileştirilebilir.

Silindirik parçalar için yapılan sayısal çalışmaların deneylerle doğrulanmasında izotropik yerine anizotropik malzeme modelinin kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. HMDÇ ve ÇTHŞ proses analizlerinde anizotropik malzeme modelinin analiz ve deneylerde kalınlık dağılımı ve SÇO'lar açısından daha uyumlu sonuçlar vermektedir.

İlk olarak silindirik parçaların şekillendirilmesinde Tip-1 BMKA kullanılarak AA 5754 malzemesi için SÇO değerleri 2.3 olarak elde edilmiştir. Bu profiller kullanılarak yaklaşık %24 maksimum incelme ile başarılı şekillendirmeler yapılabilmektedir. Bu SÇO değeri ve incelmeler yaklaşık olarak HMDÇ ile de elde edilebildiği için, ÇTHŞ'nin silindirik parçaların şekillendirilmesinde HMDÇ'ye göre herhangi bir avantajının olmadığı sonucuna varılmıştır.

BMKA'da optimum değerlerin elde edilmesi için, kullanıcının proses hakkında tecrübelerinin olması gerekir. Prosesin tipine ve kullanıcının o proses üzerindeki bilgi ve tecrübesine göre Tip-1 veya Tip-2 BMKA kullanılabilir. Daha karmaşık hesaplamalar gerektiren Tip-2, Tip-1'e göre dışarıdan gelen veya kontrol edilemeyen etkilerin bulunduğu sistemlerde daha doğru sonuçlar vermektedir. Silindirik kapların şekillendirilmesinde Tip-1 BMKA yeterli olurken, oval parçaların şekillendirilmesinde ancak Tip-2 BMKA ile başarılı sonuçlar elde edilebilmiştir.

Oval iş parçası için Tip-2 BMKA geliştirilmiş ve önce silindirik iş parçasında kullanılan değişkenler kullanılmıştır. Fakat yapılan analizler sonucunda ıstampa duvarında buruşmalar olduğu için bu değişkenlerin oval iş parçası için uygun olmadığı belirlenmiştir. Bu kapsamda özellikle buruşmaların olduğu konumlarda şekillendirme basıncı ve karşı basıncı arttıracak şekilde giriş değişkenleri güncellenmiştir. Bu sayede buruşma, yırtılma ve baskı plakası radyüsüne temas olmadan başarılı şekillendirmeler elde edilmiştir. Karşı basıncın uygulanmaya başladığı andan itibaren buruşmaların kaybolduğu ve parçaların tam çekilebildiği görülmüştür. Böylece ÇTHŞ'nin değişken kesitli eksenel simetrik parçalarda, buruşmaların önlenmesi açısından, diğer hidro-şekillendirme yöntemlerine göre, oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tez Çalışmasının Bilime Katkısı

Literatürde ÇTHŞ, sayısal ve deneysel olarak sadece sabit basınç veya dar bir aralıkta değişken basınçlarla incelenmiştir. Literatürdeki bu çalışmalarda şekillendirme basıncı ya analitik olarak elde edilmiş ya da HMDÇ için elde edilen şekillendirme basınç eğrisi kullanılmıştır. Karşı basınç yükleme profilinin elde edilmesinde ise rastgele sabit veya doğrusal olarak değişen sınırlı sayıdaki yükleme profilleri kullanılmıştır. Optimum yükleme profillerinin elde edilmesi için herhangi bir yöntem kullanılmamıştır. Literatürde ilk defa bu doktora tezinde, ÇTHŞ'deki yükleme profillerinin belirlenmesinde analizlerle adaptif olarak çalışan bulanık kontrol algoritmaları kullanılmış ve deneylerle doğrulanmıştır.

Literatürde HMDÇ için tip-1 BMKA'ları kullanılmış fakat tip-2 BMKA yöntemi ne HMDÇ ne de ÇTHŞ prosesleri için uygulanmamıştır. Bu doktora tezinde sonlu eleman analizleriyle birlikte Tip-2 BMKA algoritmasının ÇTHŞ prosesinde ilk defa uygulanmasıyla elde edilen yükleme profilleriyle sayısal ve deneysel olarak başarılı şekillendirmeler yapılabilmektedir.

5.2. Öneriler

BMKA'da kullanılan maksimum yüzde incelme giriş değişkeni yerine şekillendirilecek malzemeye ait şekillendirme sınır diyagramı kullanılabilir. Böylece analizlerde sacın yırtılma limitlerinin doğruluğu artırılarak yükleme profillerinin daha doğru elde edilmesi mümkün olabilir.

Hidromekanik derin çekme (HMDÇ) prosesi ile ilgili geçmişte yapılan çalışmalarda sacın flanş kısımlarından kalıp boşluğuna doğru radyal basınç etki etmekteydi. Bu doktora tezi kapsamında kullanılan pres kapasitesi yeterli olmadığı için radyal basınç uygulanmamıştır. ÇTHŞ'de radyal basınç uygulanmasının şekillendirilebilirliğe olumlu katkısı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Alam, M. S. ve Tokhi, M. O. 2008. "Hybrid fuzzy logic control with genetic optimisation for a single-link flexible manipulator", *Eng. Appl. of Artificial Intelligence*, 21:858–873.
- Altan T. 2006. Processes for hydroforming sheet metal. *Stamping Journal* : 400-418.
- Aydemir, A., De Vree, J.H.P., Brekelmans, W.A.M., Geers, M.G.D., Sillekens, W.H. ve Werkhoven, R.J. 2005. "An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes", *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 303-310.
- Castillo, O. ve Melin, P. 2008. "Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications", Verlag Berlin Heidelberg, Springer.
- Choi H., Koc M., Ni J., 2007a, Determination of optimal loading profiles in warm hydroforming of lightweight materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 230-242.
- Chu, B., Kim, D., Hong, D., Park, J., Chung, J. T., Chung, J. H. ve Kim, T. H. 2008. "GA-based fuzzy controller design for tunnel ventilation systems", *Auto. in Construction*, 17:130–136.
- De Castro, L. N. and Von Zuben, F. J., 2000, Artificial immune systems: Part I- Basic theory and applications, *DCA-RT 02/00, Brasil*, 23-28.
- Dehghani F, Salimi M, 2016, Analytical and experimental analysis of the formability of copper-stainless-steel 304L clad metal sheets in deep drawing, *Int J Adv Manuf Tech*, 82(1–4):163–177
- Dirim, S. 2010. "Adaptif Kontrol Sistemleri ve Gıda Endüstrisindeki Bazı Uygulamaları" *Akademik Gıda Dergisi*, 8 (3), 43-46.
- Feng, S.,L 2011. "Drawing of 5A06 Aluminum Alloy Chamfered Cup with Double Side Pressure", Yüksek Lisans Tezi, Harbin Institute of Technology, *Institute of science and technology*, Heilongjiang.
- Gedikli H., Necati Ö.C., Koç M., 2011, Comparative investigations on numerical modeling for warm hydroforming of AA5754-O aluminum sheet alloy, *Materials and Design*, 32, 2650–2662.
- Güneş, S. ve Polat, K., 2009, Elektrokardiyogram (EKG) aritmi teşhisinde en az kareli destek vektör makinaları kullanımına dayalı medikal teşhis destek sistemi, 13. *Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, BIYOMUT-2009*, İstanbul, 170-173.

- H. Gharib, A.S. Wifi, M. Younan, A. Nassef, 2006, Optimization of the blank holder force in cup drawing, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18, 291-294.
- Intarakumthornchai, T., Jirathearanat, S. ve Juntaratin, J. 2011. "Determination of loading paths in hydromechanical deep drawing process of parabolic cup with FEA based 2-D interval halving and fuzzy logic", *METEC 2011*, Düsseldorf.
- Jinfeng Z., 2013, Drawing of 5A06 Aluminum Alloy Cone Cup with Double Side Pressure, Yüksek Lisans Tezi, Harbin Institute of Technology, *Institute of science and technology*, Heilongjiang.
- Karaoglan, I. and Altıparmak, F., 2015, A memetic algorithm for the capacitated location-routing problem with mixed backhauls, *Computers & Operations Research*, 55 (1), 200-216.
- Kleiner, M., Krux, R., Homberg, W., 2004, Analysis of Residual Stresses in High-Pressure Sheet Metal Forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Volume 28, Issue 1, 211-214.
- Koç M. ve Taylan A., 2001. An overall review of the tube hydroforming (THF) technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 384-393.
- Koç M. ve Cora, Ö.N., 2008, Introduction and state of the art of hydroforming, *Hydroforming for advanced manufacturing*, Koç M., Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 1-29.
- Leondes, CT. 1998. "Fuzzy logic and expert systems application", USA: Academic Pres, California.
- Liu X., Xu Y., Yuan S., 2008, The influence of inverse bulging pressure on the hydrodynamic deep drawing process of aluminium alloy cylindrical cups with a hemispherical bottom, *Journal of Plasticity Engineering*, 15(3): 42-46.
- Liu, W., Chen, Y., Z. ve Yuan, S., J. 2016. "Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming", *Int J Adv Manuf Technol*, 89:2011 – 2020.
- Ulu, C. 2013. "Granüler Tip-2 Bulanık Yapılar Kullanılarak Sistemlerin Modellenmesi ve Kontrolü", Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Palaniswamy, H. 2007. "Determination of Process Parameters For Stamping and Sheet Hydroforming of Sheet Metal Parts Using Finite Element Method", Doktora Tezi, Ohio State Üniversitesi, Ohio.
- Shamsi-Sarband, A., Zahedi, S.A., Bakhshi-Jouybari, M., Hossinipour, S.J. ve Banabic, D. 2012. "Optimization of the pressure path in sheet metal hydroforming", *Proceedings of the Romanian Academy, Series A*, 13, 351-359.

- Sheng, Z.Q., Jirathearanat, S. ve Altan, T. 2004. "Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 487-494.
- Siebert, K. ve Wagner, S., 1994, Deep Drawing, *TALAT Lecture* 3704, 3-14.
- Ustun, S. V. ve Demirtas M. 2008. "Optimal tuning of PI coefficients by using fuzzy-genetic for V/f controlled induction motor", *Expert Systems with Appl.*, 34:2714–2720.
- Wang, Z.,J., Song, H. ve Wang, Z. 2008. "Deformation behavior of TC1titanium alloy sheet under double-sided pressure", *T Nonferr Metal Soc*, 18:72 – 76.
- Zadeh, L.,A. 1965. "Fuzzy Sets", *Information and Control*, 8:338-353.
- Zhang, S.H., 1999, Developments in hydroforming, *Journals of Materials Processing Technology*, 91, 226-244.
- Zhang, S.H., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T., Zhou, L.X., 2004, Recent developments in sheet hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 151, 237-241.
- Zhang, S.H. ve Danckert J., 1998, Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 14-25.

EKLER

EK-1 LS-DYNA SEA’da Alt Programlar ile Yeni Bir Çözücü Oluşturulması için Gerekli İşlemler

EK-2 Çözücü Oluşturmak için Gerekli İşlemler Yapılmadığında veya Eksik Yapıldığında Meydana Gelebilecek Hatalar

EK-3 Bulanık Mantık Kontrol Algoritması Altprogram Kodları

EK-4 T testinin Excel Programı ile Uygulanması



EK-1 LS-DYNA SEA’da Alt Programlar ile Yeni Bir Çözücü Oluşturulması için Gerekli İşlemler

LS-DYNA SEA yazılımında analiz yapmak dışında, programın lisansının alındığı dağıtıcı firma tarafından elde edilebilen, alt program için gerekli kütüphane vb. dosyaları mevcuttur. Bu dosyalar olmadan alt programları yazmak mümkün değildir.

LS-DYNA SEA yazılımında alt programların(Subroutine) yazılması ve çalıştırılması için gerekli işlemler diğer SEA yazılımlarına kıyasla (Örn. Abaqus) daha basittir. Bunun için gerekli ilk işlem, LS-DYNA SEA yazılımının lisansının alındığı firma tarafından gerekli dosyaların elde edilmesidir. Bu dosyaların çalıştırılabilmesi için kullanılan Windows sürümü (32 veya 64 bit) ve LS-DYNA SEA yazılımının sürümü önem arz etmektedir. Eğer istenilen dosyalar kullanılacak olan Windows ve LS-DYNA sürümleri ile aynı değilse, alt programların çalıştırılması mümkün değildir.

Dağıtıcı firmalar tarafından istenilen dosyalar şunlardır: Kütüphane (library) dosyaları (*.a), include dosyaları (*.inc), Fortran kaynak dosyaları (*.f), nmake ve makefile dosyası. Bu dosyalar Ek 5.1’de gösterilmektedir.

Ad	Değiştirme tarihi	Tür	Boyut	Ad	Değiştirme tarihi	Tür	Boyut
adios.h	26.1.2011 19:49	C/C++ Header	1 KB	makefile	26.1.2011 19:49	Dosya	1 KB
adjcom.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	matfir.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
alemisc.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	memia.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bigprb.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB	memia.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk05.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	memia.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk06.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	nhsparm.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk07.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	nlqparm	26.1.2011 19:49	Dosya	1 KB
bk08.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	nmake.exe	26.1.2011 19:49	Uygulama	77 KB
bk13.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	numcpu.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk19.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	oasys_ceap.inc	26.1.2011 19:49	Include File	4 KB
define.inc	26.1.2011 19:49	Include File	15 KB	ptimes.inc	26.1.2011 19:49	Include File	3 KB
dyn21.f	31.5.2015 13:05	Fortran Source	315 KB	readme.txt	26.1.2011 19:49	Metin Belgesi	1 KB
dyn21b.f	26.1.2011 19:49	Fortran Source	503 KB	shlioc.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
dynamem.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB	shlopt.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
err.xml	2.6.2015 17:20	XML Dosyası	1 KB	slcntr.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
implicit1.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB	sorter.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
implicit2.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB	sorter_noloc.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
iounits.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB	systeminfo.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
libansys.lib	26.1.2011 19:49	Object File Library	3,516 KB	tbline.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
libdyna.lib	26.1.2011 19:49	Object File Library	139,062 KB	umatss.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
lsmsh.h	26.1.2011 19:49	C/C++ Header	1 KB	xjobid.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
lstc_client.exe	26.1.2011 19:49	Uygulama	248 KB				

Ek 5.1. Yeni LS-DYNA çözücüsü oluşturulması için dağıtıcı firmadan temin edilen dosyalar

Bu dosyalardan en önemlileri ihtiyaca göre çeşitli alt programları içeren ve Fortran kaynak dosyaları olan dyn21.f ve dyn21b.f dosyalarıdır. Yukarıda bahsedilen dosyaları kısaca açıklamak gerekirse:

- Makefile dosyası, lisanslı LS-DYNA çözücüsü (solver), yani çalıştırılabilir (executable, *.exe) dosyası oluşturmak için gereklidir. Ayrıca bu dosya Wordpad ile açıldığında, içerisinde, dağıtıcı firmadan elde edilen dosyaların hangi Windows sürümü için olduğu görülebilmektedir.
- Readme.txt dosyasında alt program yazmak için çözücü dosyasının nasıl oluşturulacağı anlatılmaktadır. Bu text dosyasında ayrıca kullanılması gereken programların sürümleri de yer almaktadır.
- Kaynak ve kütüphane dosyaları, derleyicinin (Fortran) çıkarılabilir program (solver) içinde bir şeyler üretmesi için gerekli program elemanlarını içerir (Fonksiyonun bir tanımı, global değişken vs.). Kaynak dosyalarında ihtiyaca göre kullanılacak olan çeşitli alt programlar bulunmaktadır.
- Nmake dosyası Fortran derleyicinde nmake komutu ile oluşturulacak *.exe dosyası için gerekli uygulama dosyasıdır.

LS-DYNA çözücüsünün oluşturulması için gerekli programlar

Dağıtıcı firmadan elde edilen dosyalardan biri olan readme.txt dosyasında anlatılan işlemler şu şekildedir:

1. Bir Windows Dos komutu açın (Start→Programs→Intel(R) Software Development Tools→Intel(R) Fortran compiler 10.1→Intel(R) Fortran Compiler for Intel(R) EM64T- based applications).
2. Dyn21.f Fortran kaynak dosyasını isteğiniz doğrultusunda herhangi bir text programıyla modifiye edin.
3. Derleme ve Bağlantı (Compile ve Link) için Fortran komut satırına “nmake” yazın ve enter’e basın. Kütüphane dosyalarındaki çok-tanımlı alt programlardan kaynaklanan uyarı mesajlarını önemsemeyin.
4. Derleyici ve Sürümü: Intel(R) Fortran Compiler for Intel(R) EM64T-based applications, Version 10.1; Microsoft Visual C++ 2005 ya da 2008 x64 cross tools.

LS-DYNA SEA yazılımında alt programların çalıştırılabilmesi için, Microsoft Visual Studio ve Intel® Visual Fortran Compiler programlarının kurulması gerekmektedir. Microsoft Visual Studio, Microsoft firması tarafından geliştirilen bir yazılım geliştirme programıdır. Intel® Visual Fortran Compiler programı ise Intel

tarafından geliştirilen bir Fortran kodu derleyicisidir. Microsoft Visual Studio ve Intel® Visual Fortran Compiler programı beraber çalışarak, yani Visual Studio programının içerisinde çalışan Fortran derleyicisinde Fortran programlama diliyle yazılan altprogramlar LS-DYNA programında gerekli dosyalarla birlikte derlenerek *.exe dosyası oluşturulmaktadır.

Dağıtıcı firma tarafından elde edilen readme.txt dosyasında *.exe oluşturmak için Fortran 10.1 kullanılması gerektiği söylenmektedir fakat Fortran 10.1 Windows 7 işletim sistemi için uyumlu değil, Linux işletim sistemi için uyumludur. Bu yüzden Fortran 10.1 sürümünden daha üst herhangi bir Fortran versiyonu kullanılabilir (11.1 vs.).

Bu programlar bilgisayara kurulurken dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ilk önce Microsoft Visual Studio, daha sonra Intel® Visual Fortran Compiler programının kurulması gerekmektedir. Eğer tam tersi yapılırsa alt programları çalıştırmak mümkün değildir. LS-DYNA SEA programının kurulum sırası önemli değildir. Fakat bu yazılımın en başta kurulması, alt programların çalıştırılmasında bir problemle karşılaşılması açısından daha iyi olacaktır. Programlar anlatıldığı gibi kurulduktan sonra yapılması gerekenler aşağıda anlatılmıştır.

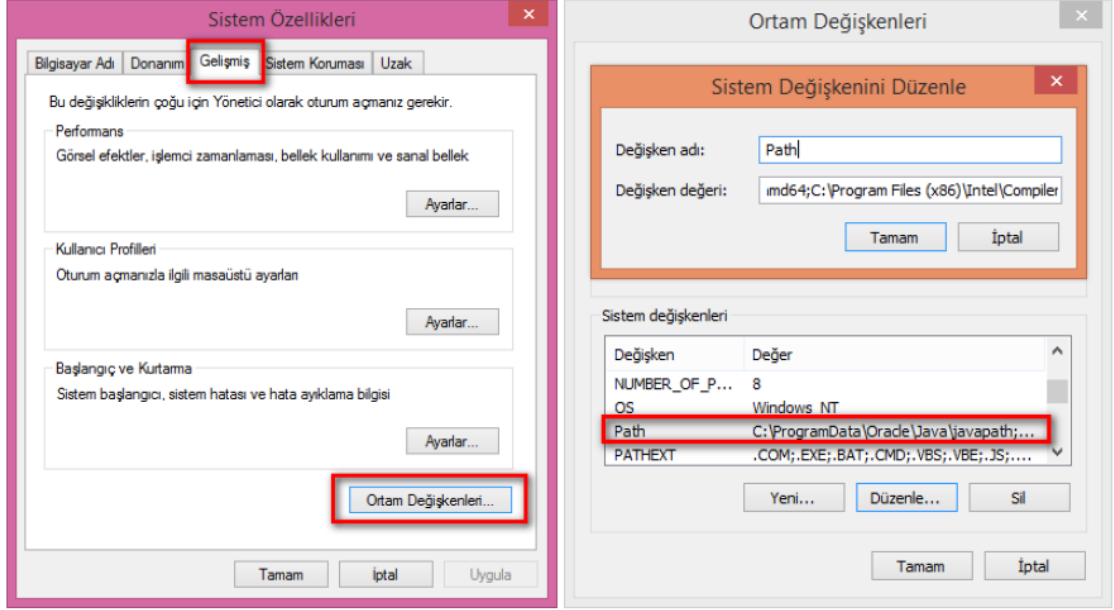
Ortam Değişkenlerinin Tanımlanması

Bu aşama, LS-DYNA çözücüsünün oluşturulmasındaki en önemli aşamadır. Eğer ortam değişkenleri eksik ya da yanlış olarak tanımlanırsa alt programların çalışması için gerekli *.exe dosyasını oluşturmak imkânsızdır. Dolayısıyla programlar sırası ile kurulduktan sonra Ek 5.2’de görüldüğü gibi ortam değişkenleri tanımlanmalıdır. Bunun için “Bilgisayar – > Özellikler – > Gelişmiş Sistem Ayarları – > Gelişmiş – > Ortam Değişkenleri – > Sistem Değişkenleri – > Path” yoluna;

Microsoft Visual Studio programı için; “amd32” (32-bit işletim sistemleri için) veya “amd64” (64-bit işletim sistemleri için) klasör yolu (64 bit için **C:\Program Files(x86)\Microsoft Visual Studio 9.0\VC\bin\amd64**)

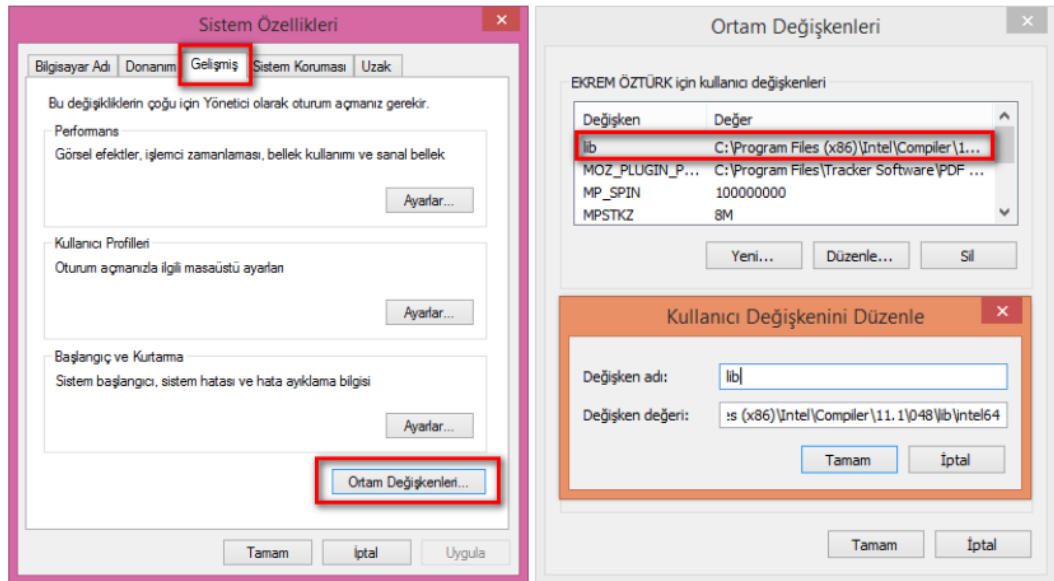
Intel® Visual Fortran Compiler programı için; “intel32” (32-bit işletim sistemleri için) veya “intel64” (64-bit işletim sistemleri için) klasör yolu (64 bit için **C:\ProgramFiles(x86)\fortran\Compiler\11.1\048\bin\intel64**) klasör yolu

eklenmelidir. Bu klasör yolları path değişkenine eklenirken varsayılan olarak gelen klasör yolları silinmemelidir. Eklenen iki klasör yolu noktalı virgül ile ayrılarak yazılmalıdır.



Ek 5.2. Path ortam (sistem) değişkeninin tanımlanması

Bu ayarlamalara ek olarak “Bilgisayar –> Özellikler –> Gelişmiş Sistem Ayarları –> Gelişmiş –> Ortam Değişkenleri –> Kullanıcı Değişkenleri” bölümüne Ek 5.3’de görüldüğü gibi “lib” isimli yeni değişken girilmelidir. Değişken değerlerine ise Intel Compiler program klasörü içerisindeki lib dosyasının klasör yolu yazılmalıdır (**C:\Program Files (x86)\Intel\Compiler\11.1\048\lib\intel64**).



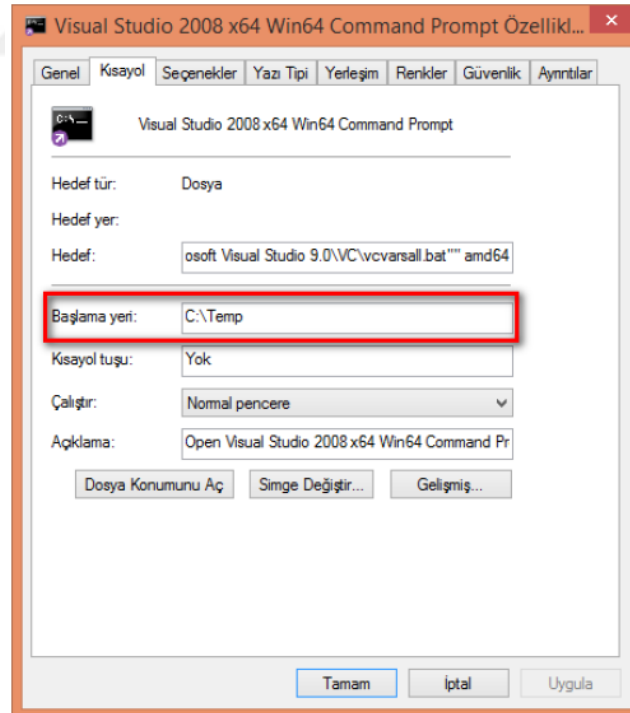
Ek 5.3. Lib ortam (kullanıcı) değişkeninin tanımlanması

Diğer bazı SEA programlarında include klasör yollarının da tanımlanması gerekmektedir fakat LS-DYNA SEA’da bu işleme gerek yoktur. Path sistem değişkenine Microsoft Visual Studio ve Fortran Derleyicisinin gerekli klasör yolları ve kullanıcı değişkeninde yeni bir “lib” isimli değişken tanımlayıp gerekli klasör yolu girildikten sonra LS-DYNA Solver (*.exe) dosyasının oluşturulması için gerekli şartlar sağlanmış demektir.

LS-DYNA çözücüsünün oluşturulması ve çalıştırılması

LS-DYNA SEA’da alt program yazmak için dağıtıcı firma tarafından elde edilen dyn21.f dosyasının içerisindeki mevcut altprogramlar içerisine yazmak istediğimiz algoritmalar veya alt programlar yazılır, daha sonra çözücü oluşturularak ve bu çözücü LS-DYNA programının kurulu olduğu klasöre (genelde C:\LSDYNA\program) atılarak işlem tamamlanır.

Çözücü oluşturabilmek için firmadan alınan dosyaların hepsinin aynı klasör içinde olması gerekmektedir. Bu klasör bilgisayarın herhangi bir yerinde olabilir fakat bu klasörün **C:\Temp** klasör yolunda olması önerilmektedir. Eğer yoksa bu klasörün oluşturulması gerekmektedir.



Ek 5.4. Visual Studio 2008 x64 Win64 Command Prompt uygulamasının başlama yeri

Çözücünün oluşturulması için, gerekli programların kurulmasının ardından gelen Visual Studio 2008 x64 Win64 Command Prompt veya Visual Studio 2008 x64 Cross Tools Command Prompt uygulamasının açılması gerekir. Fakat burada bu programın başlama yerinin gerekli dosyaların olduğu klasör yolunun (**C:\Temp**) olmasına dikkat edilmelidir. Yoksa program nmake komutunu tanıyamaz ve dolayısıyla çözücü oluşturulamaz. Bunun için Visual Studio 2008 x64 Cross Tools Command Prompt uygulaması sağ tıklanarak “Başlama Yeri” nin bulunduğu yere Ek 5.4’te verildiği gibi **“C:\Temp”** yazılmalıdır Bu işlemden sonra bu komut satırı açıldığında açılan uygulamanın varsayılan yolu artık **“C:\Temp”** olmakta ve dolayısıyla uygulamaya girilen komutlar varsayılan yolunda işlem görmektedir.

Bu işlemin ardından Visual Studio 2008 x64 Win64 Command Prompt uygulamasına “nmake” yazılıp enter tuşuna basılır. Burada “nmake” komutu kısmen de olsa debugging (hata ayıklama) işlemini gerçekleştirmektedir. Eğer alt programlar yazılırken hatalı kısımlar varsa bu komut yazıldıktan sonra hatalar ekranda görülebilmektedir. Program gerekli işlemleri (derleme ve bağlantı) yaptıktan sonra **“C:\Temp”** yolunda **“ls971.exe”** isimli yeni LS-DYNA çözücüsü oluşmaktadır. Yeni çözücü oluştuğunda komut satırındaki görüntü Ek 5.5’teki gibidir.



```

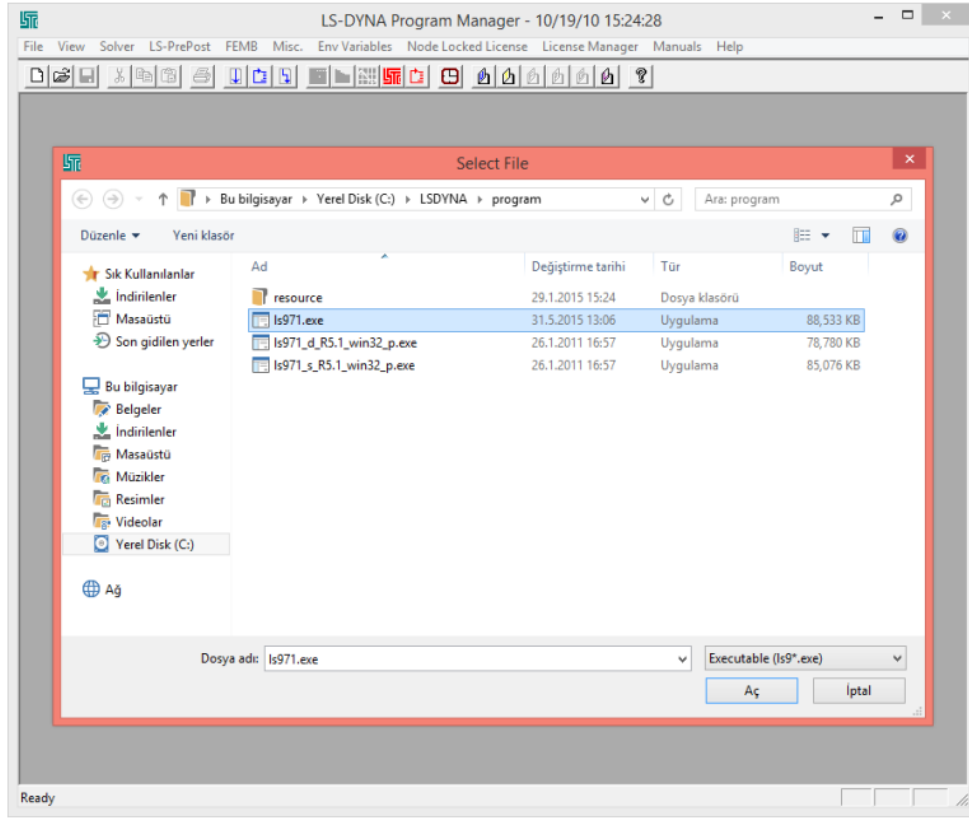
C:\Temp>nmake
-out:ls971.exe
-subsystem:console
-force
-nodefaultlib:msvcrt.lib
dyn21.obj
dyn21b.obj
libdyna.lib
libansys.lib
shell32.lib
libguide.lib
user32.lib
comctl32.lib
comdlg32.lib
iphlpapi.lib
libifport.lib<gettin.obj> : warning LNK4006: GETTIM already defined in libdyna.l
ib<diglib.o>; second definition ignored
libifport.lib<getdat.obj> : warning LNK4006: GETDAT already defined in libdyna.l
ib<diglib.o>; second definition ignored
LIBCMT.lib<filter_util_.obj> : warning LNK4006: SCALE already defined in libdyn
a.lib<adummy_gl.o>; second definition ignored
ls971.exe : warning LNK4088: image being generated due to /FORCE option; image m
ay not run
C:\Temp>

```

Ek 5.5. Yeni çözücü oluşturulduğunda komut satırındaki görüntü

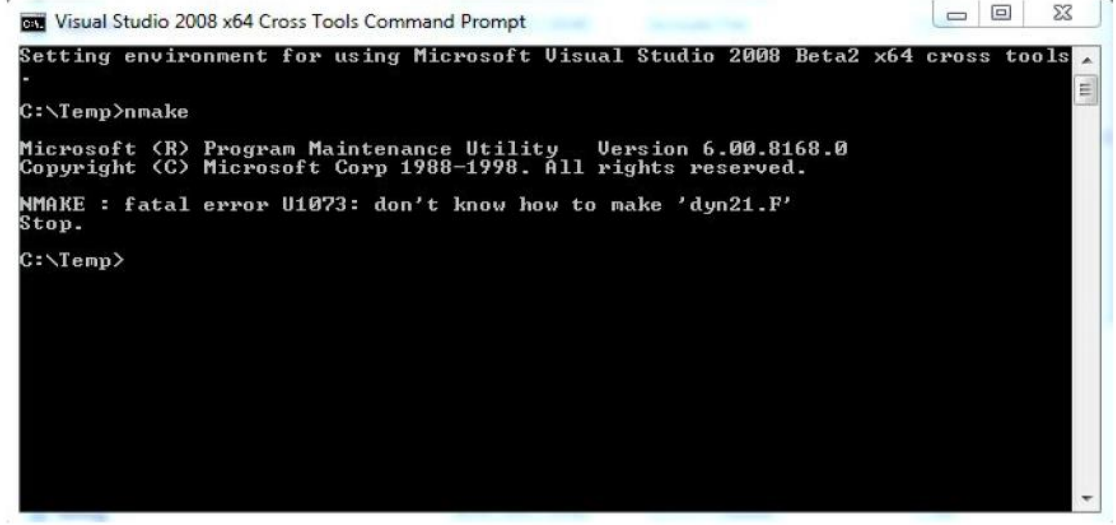
Bu çözücü dosyası C:\LSDYNA\ program yoluna kopyalanarak ve Ek 5.6’daki gibi LS-DYNA Programında “Solver – > Select LS-DYNA Solver” kısmından oluşturduğumuz yeni çözücü (ls971.exe) seçilerek işlem tamamlanır ve alt programlar

içerisine yazılan algoritmalar (bu tez çalışmasında bulanık mantık kontrol algoritması) simülasyon ile birlikte çözdürülmeye hazır hale gelir.



Ek 5.6. Oluşturulan yeni çözücünün LS-DYNA programında seçilmesi

EK-2 Çözücü Oluşturmak için Gerekli İşlemler Yapılmadığında veya Eksik Yapıldığında Meydana Gelebilecek Hatalar



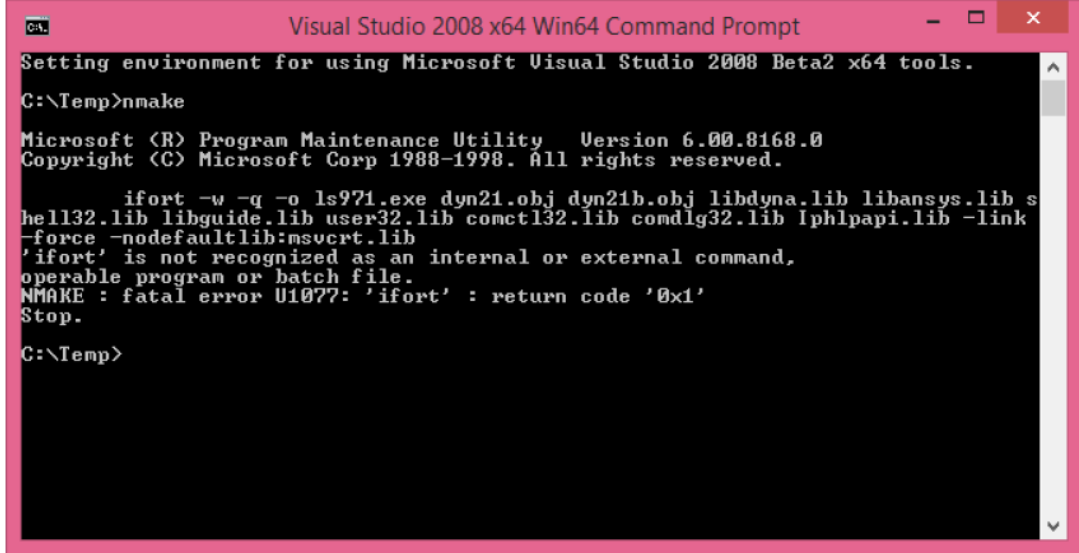
```

ca. Visual Studio 2008 x64 Cross Tools Command Prompt
Setting environment for using Microsoft Visual Studio 2008 Beta2 x64 cross tools
C:\Temp>nmake
Microsoft (R) Program Maintenance Utility   Version 6.00.8168.0
Copyright (C) Microsoft Corp 1988-1998. All rights reserved.
NMAKE : fatal error U1073: don't know how to make 'dyn21.F'
Stop.
C:\Temp>

```

Ek 5.7. Dyn21.f dosyasının gerekli klasörde bulunmaması sonucunda oluşan hata

Derleme ve bağlantı işleminde firmadan alınan *.f, *.lib, *.inc, makefile, nmake dosyalarının hepsinin aynı klasörde olması gerekmektedir. Örneğin dyn21.f dosyası “**C:\Temp**” yolunda bulunmazsa komut satırında Ek 5.7’deki hata meydana gelmektedir. Path sistem değişkenine gerekli klasör yolları eklenmediğinde ifort’un iç veya dış komut olarak tanımlanamadığı yönünde Ek 5.8’deki hata kodu meydana gelmektedir.



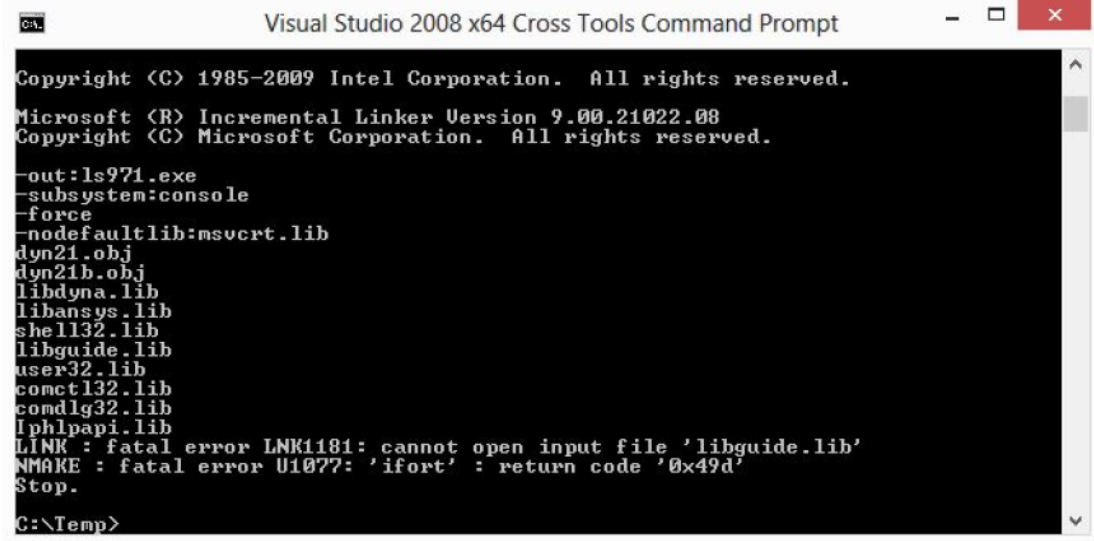
```

ca. Visual Studio 2008 x64 Win64 Command Prompt
Setting environment for using Microsoft Visual Studio 2008 Beta2 x64 tools.
C:\Temp>nmake
Microsoft (R) Program Maintenance Utility   Version 6.00.8168.0
Copyright (C) Microsoft Corp 1988-1998. All rights reserved.
        ifort -w -q -o ls971.exe dyn21.obj dyn21b.obj libdyna.lib libansys.lib s
hell132.lib libguide.lib user32.lib comctl32.lib comdlg32.lib lphlpapi.lib -link
-force -nodefaultlib:msvcrt.lib
'ifort' is not recognized as an internal or external command,
operable program or batch file.
NMAKE : fatal error U1077: 'ifort' : return code '0x1'
Stop.
C:\Temp>

```

Ek 5.8. Path sistem değişkenine gerekli klasör yolları eklenmediğinden oluşan hata

Kullanıcı değişkenine “lib” isimli yeni ortam değişkeni eklenmemesi durumunda Ek 5.9’teki hata meydana gelmektedir.



```

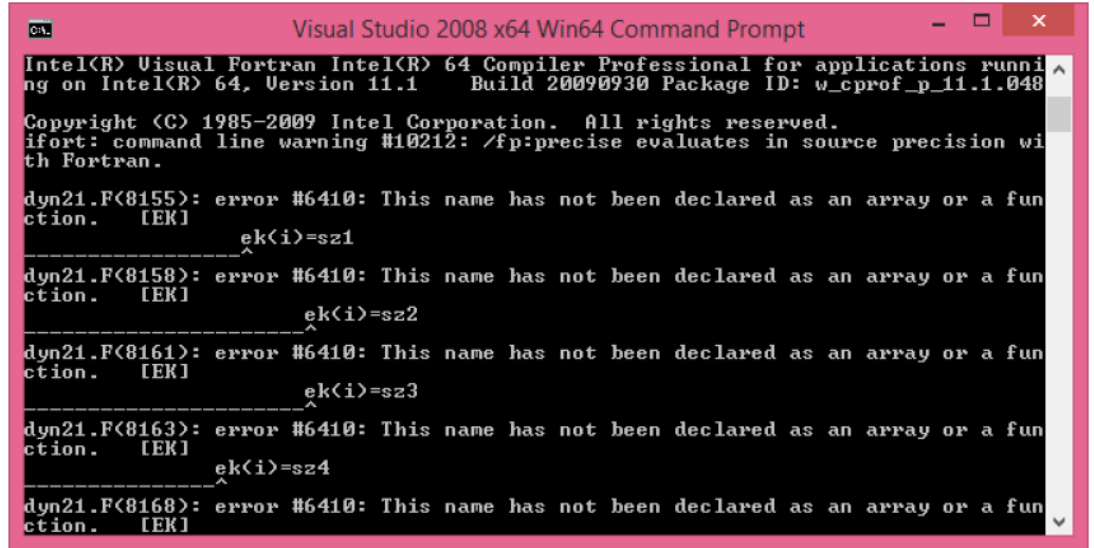
Copyright (C) 1985-2009 Intel Corporation. All rights reserved.
Microsoft (R) Incremental Linker Version 9.00.21022.08
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

-out:ls971.exe
-subsystem:console
-force
-nodefaultlib:msvcrt.lib
dyn21.obj
dyn21b.obj
libdyna.lib
libansys.lib
shell32.lib
libguide.lib
user32.lib
comctl32.lib
comdlg32.lib
Iphlpapi.lib
LINK : fatal error LNK1181: cannot open input file 'libguide.lib'
NMAKE : fatal error U1077: 'ifort' : return code '0x49d'
Stop.
C:\Temp>

```

Ek 5.9. Lib ortam değişkenine gerekli klasör yolunun eklenmemesi durumunda oluşan hata

Eğer dyn21.f dosyasındaki alt programlara gerekli kodlar yazılırken eksik bir tanımlama yapılmışsa veya hatalar varsa (burada örnek olsun diye “ek” dizi değişkeni bildirim (declaration) kısmında tanımlanmamıştır) Ek 5.10’daki hata meydana gelmektedir. Alt programlar yazılırken yapılan hataların birçoğu bu komut satırında görülebilmektedir.



```

Intel(R) Visual Fortran Intel(R) 64 Compiler Professional for applications running on Intel(R) 64, Version 11.1 Build 20090930 Package ID: w_cprof_p_11.1.048
Copyright (C) 1985-2009 Intel Corporation. All rights reserved.
ifort: command line warning #10212: /fp:precise evaluates in source precision with Fortran.

dyn21.F(8155): error #6410: This name has not been declared as an array or a function. [EK]
          ^
          ek(i)=sz1
dyn21.F(8158): error #6410: This name has not been declared as an array or a function. [EK]
          ^
          ek(i)=sz2
dyn21.F(8161): error #6410: This name has not been declared as an array or a function. [EK]
          ^
          ek(i)=sz3
dyn21.F(8163): error #6410: This name has not been declared as an array or a function. [EK]
          ^
          ek(i)=sz4
dyn21.F(8168): error #6410: This name has not been declared as an array or a function. [EK]
          ^

```

Ek 5.10. Kod yazılırken eksik tanımlama yapıldığında oluşan hatalardan biri

EK-3 Bulanık Mantık Kontrol Algoritması Altprogram Kodları

```

subroutine uctrl1 (numnp, ndof, time, dt1, dt2, prtc, pltc, frci, prto,
. plto, frco, vt, vr, at, ar, ut, ur, xmst, xmsr, irbody, rbdyn, usrhv,
. messag, totalm, cycle, idrint, mtype, mxrb, nrba, rbcor, x, rbv, nrbn,
. nrb, xrb, yrb, zrb, axrb, ayrb, azrb, dtx, nmmat, rba, fvalnew, fvalold,
. fvalmid, fvalnxt)
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.

include 'memaia.inc'
common/bk00/numnp0, numpc, numlp, neq, ndof0, nlcur, numcl, numvc,
+ ndtpts, nelmd, nmmat0, numelh, numelb, numels, numelt, numdp,
+ grvity, idirgv, nodspc, nspcor, nusa
common/bk05/
1 nh01, nh02, nh03, nh04, nh05, nh06, nh07, nh08, nh09, nh10,
2 nb01, nb02, nb03, nb04, nb05, nb06, nb07, nb08, nb09, nb10,
3 ns01, ns02, ns03, ns04, ns05, ns06, ns07, ns08, ns09, ns10,
4 nt01, nt02, nt03, nt04, nt05, nt06, nt07, nt08, nt09, nt10,
5 nu01, nu02, nu03, nu04, nu05, nu06, nu07, nu08, nu09, nu10,
6 nd01, nd02, nd03, nd04, nd05, nd06, nd07, nd08, nd09, nd10,
7 ntbqs
common/bk13/lc0, lc1h, lc1b, lc1s, lc1t, lc2, lc3, lc4, lc5, lc6, lc7, lc9,
1 lc10, lc11, lc12, lc13, lc14, lc15, lc16, lc17, lc18, lb0, lb1, lb2,
2 lc7a, lc7b, lc7c, lc7d, lc7e, lc7f, lc7g, lc7h, lc7i, lc7j, lc7k, lc7l
write(999, *) time !Fortran.999 text dosyasına mevcut
analiz zamanını yaz
call bulanik_mantik(x, numnp, numels, a(ns05), a(lc1s), nlcur, time, dt2)
return
end

subroutine bulanik_mantik(x, numnp, numels, fibl, ix, nlcur, tt, dt)
real*8 x, min_kal
real min_kal_uf, temas_uf, burusma_uf, maxneg, maxsif, maxpoz, maxnegg,
+ maxsiff, maxpozz, temas
real sz1, sz2, sz3, sz4, bz1, bz2, bz3, bz4
real x1, x2, negalan1, negalan2, x1cog, x2cog, topalan1, negmer
real sifalan1, sifalan2, sifalan3, topalan2, sifmer
real pozalan1, pozalan2, topalan3, pozmer
real x11, x22, negalan11, negalan22, x1cogg, x2cogg, topalan11, negmerr
real sifalan11, sifalan22, sifalan33, topalan22, sifmerr
real pozalan11, pozalan22, topalan33, pozmerr
real xa, xb, negsifalan1, negsifalan2, negsifalan3, negsifxcog1,
+ negsifxcog2, negsifxcog3, topalannegsif, negsifmer

```

```

real sifpozalan1, sifpozalan2, sifpozalan3, sifpozxcog1, sifpozxcog2,
+ sifpozxcog3, topalansifpoz, sifpozmer
real xaa, xbb, negsifalan11, negsifalan22, negsifalan33, negsifxcog11,
+ negsifxcog22, negsifxcog33, topalannegsiff, negsifmerr
real sifpozalan11, sifpozalan22, sifpozalan33, sifpozxcog11,
+ sifpozxcog22, sifpozxcog33, topalansifpozz, sifpozmer
real ortaalan, ortaalanmerkezcarpimli, geneltopalan
real alfa, beta
real mk1, mk2, mk3, tm1, tm2, tm3, br1, br2, br3
dimension x(3, *), fibl(9, *), ix(5, *)
real, dimension(15000)::ek, eb
real, dimension(3)::min_kal_u, temas_u, burusma_u
real, dimension(4)::kalinlik_uyelik, temas_uyelik, cikis_uyelik,
+ burusma_uyelik, kalinlikk_uyelik, cikiss_uyelik
real, dimension(8)::neg, sif, poz, negg, siff, pozz
character*7 alfadilsel(9), alfadilsell(9)
character*3 mkal(3), tem(3), bur(3)
character*3 lis1(9), lis2(9)
character*3 cikis(4), cikiss(4)
character*3 min_kal1, min_kal2, min_kal3
character*3 temas1, temas2, temas3
character*3 burusma1, burusma2, burusma3
integer lqfinv, kneg, ksif, kpoz, knegg, ksiff, kpozz, ok
external lqfinv
common min_kal, min_numara !min_kal ve min_numara değişkenlerini
altprogramlar ve
diğer zaman adımları arasında paylaşır.
c
!altprogramlar (bulanik_mantik, basinc-egrisi ve bpk_egrisi) arasındaki bilgi
geçişı için
gerekli common blok (fiziksel depo) tanımı
include 'memaia.inc'
integer n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, n8, n9, n10, n11, n12, n13, n14, n15,
1 n16, n17, n18, n19, n20, n21, n22, n23, n24, n25, n26, n27, n28, n29, n30, n31,
2 n32, n33, n34, n35, n36, n37, n38, n39, n40, n41, n42, n43, n44, n45,
3 n46, n47, n48, n49, n50, n51, n52, n53, n54, n55, n56, n57, n58, n59, n60, n61,
4 n62, n63, n64, n65, n66, n67, n68, n69, n70, n71, n72, n73, n74, n75, n76, n77,
5 n78, n79, n80, n81, n82, locend, iname, lendf
common/bk07/n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, n8, n9, n10, n11, n12, n13, n14, n15,
1 n16, n17, n18, n19, n20, n21, n22, n23, n24, n25, n26, n27, n28, n29, n30, n31,
2 n32, n33, n34, n35, n36, n37, n38, n39, n40, n41, n42, n43, n44, n45,
3 n46, n47, n48, n49, n50, n51, n52, n53, n54, n55, n56, n57, n58, n59, n60, n61,
4 n62, n63, n64, n65, n66, n67, n68, n69, n70, n71, n72, n73, n74, n75, n76, n77,
5 n78, n79, n80, n81, n82, locend, iname, lendf
c
common basinc, kuvvet, ilk !basinc, kuvvet ve ilk değişkenlerini
altprogramlar ve
diğer zaman adımları arasında paylaşır
if (ilk.eq.0) then !sadece analiz başında text dosyası açmak için
open(1, file='Basinc_egrisi.txt', status='new', iostat=ok)

```

```

close(1)
open(2, file='BPK eğrisi.txt', status='new', iostat=ok)
close(2)
open(1, file='Basınç eğrisi.txt', status='replace', iostat=ok)
open(2, file='BPK eğrisi.txt', status='replace', iostat=ok)
ilk=1
endif

c
!MİNİMUM KALINLIĞI BULMA
if (min_kal.eq.0) then
  min_kal=100 !sacın kalınlığından daha büyük rastgele bir sayı
end if
c

```

```

do i=1, numels !1'den numels (toplam eleman sayısı)'e kadar
  ipid=lqfmiv(ixs(1, i)) !elemanlara ait pid (parça) numarası
  ide_ext=lqfinv(i, 4) !elemanların external id numarası
  thick=fibl(1, i) !elemanların kalınlığı
  if (ipid.eq.4) then !sadece sac parçaya (ipid'i 4 olan parça) ait elemanlara bak
    if (min_kal.gt.thick) then
      min_kal = thick !kalınlığı minimum olanı seç
      min_numara=ide_ext !kalınlığı minimum olanın elemanın ext. ID'si
    end if
  endif
end do
write(999, *) 'min_kalınlık=', min_numara, 'min_kalınlık=', min_kal

```

```

m=0
do i=1, numels
  ide_ext=lqfinv(i, 4)
  ipid=lqfmiv(ixs(1, i))
  ne1 =lqfinv(ixs(2, i), 1) !dörtgen ağdaki birinci düğümün ext. ID'si
  ne2 =lqfinv(ixs(3, i), 1) !dörtgen ağdaki ikinci düğümün ext. ID'si
  ne3 =lqfinv(ixs(4, i), 1) !dörtgen ağdaki üçüncü düğümün ext. ID'si
  ne4 =lqfinv(ixs(5, i), 1) !dörtgen ağdaki dördüncü düğümün ext. ID'si
  if (ipid.eq.4) then
    if (abs(x(2, ne1)).lt.0.0001 .or.
+ abs(x(2, ne2)).lt.0.0001 .or. !ikinci düğümün ....
+ abs(x(2, ne3)).lt.0.0001 .or. !üçüncü düğümün ....
+ abs(x(2, ne4)).lt.0.0001) then !dördüncü düğümün ....
      if ((x(1, ne1).ge.(20+fibl(1, i)/2+0.1).and.
+ x(1, ne1).le.26.5) .or. !birinci düğüm için x aralığı tanımlanması
+ (x(1, ne2).ge.(20+fibl(1, i)/2+0.1) .and.
+ x(1, ne2).le.26.5) .or. !ikinci düğüm için.....
+ (x(1, ne3).ge.(20+fibl(1, i)/2+0.1) .and.
+ x(1, ne3).le.26.5) .or. !üçüncü düğüm için.....
+ (x(1, ne4).ge.(20+fibl(1, i)/2+0.1) .and.

```

```

+ x(1, ne4).le.26.5)) then !dördüncü düğüm için.....
  if (m.gt.0) then !ileride yapılacak olan dört düğümün karşılaştırılması işleminde
dizinin
  yukarıdaki şartı sağlayan elemandan başlaması için
    else
      m=i
    endif
    sz1=5.5-x(3, ne1)    !birinci düğüm için stampa duvarına temas
giriş değişkeni değeri
    sz2=5.5-x(3, ne2) !ikinci düğüm için.....
    sz3=5.5-x(3, ne3) !üçüncü düğüm için.....
    sz4=5.5-x(3, ne4) !dördüncü düğüm için.....
  if (sz1.lt.sz2 .and. sz1.lt.sz3
+      .and. sz1.lt.sz4) then    !dört düğüm noktasına ait değerlerden
en küçüğü seçiliyor
      ek(i)=sz1
    elseif (sz2.lt.sz1 .and. sz2.lt.sz3
+      .and. sz2.lt.sz4) then
      ek(i)=sz2
    elseif (sz3.lt.sz1 .and. sz3.lt.sz2
+      .and. sz3.lt.sz4) then
      ek(i)=sz3
    else
      ek(i)=sz4
    endif
    write(999, *)ide_ext, sz1, sz2, sz3, sz4
    n=i
  else
    ek(i)=100 !sac external ID'si sıralı artmıyorsa, minimum almak için
  endif
  else
    ek(i)=100 !sac external ID'si sıralı artmıyorsa, minimum almak için
  endif
  else
    ek(i)=100 !sac external ID'si sıralı artmıyorsa, minimum almak için
  endif
  enddo
c
!Dikdörtgen elemandaki dört düğüm noktasına ait stampa duvarına temas giriş
değişken
değerlerinden minimumun seçilmesi (bulanık mantık kontrol algoritması için
stampa
duvarına temas giriş değişken değeri)
  do j=m+1, n
    if (ek(m).lt.ek(j)) then
      temas=ek(m)
    else
      m=j
      temas=ek(j)
    endif

```

```

enddo

write(999, *) 'stampa duvarına temas değeri=', temas
c
!MAKSİMUM BURUŞMA YÜKSEKLİĞİNİ BULMA
p=0
do i=1, numels
  ide_ext=lqfinv(i, 4)
  ipid=lqfmiv(ixs(1, i))
  ne1=lqfinv(ixs(2, i), 1)
  ne2=lqfinv(ixs(3, i), 1)
  ne3=lqfinv(ixs(4, i), 1)
  ne4=lqfinv(ixs(5, i), 1)
  if (ipid.eq.4) then
    if (sqrt(((x(1, ne1))**2+(x(2, ne1))**2)).gt.26.5 .and.      !birinci düğüm
    flanş bölgesinde ise
      + sqrt(((x(1, ne2))**2+(x(2, ne2))**2)).gt.26.5 .and.      !ikinci düğüm
    flanş bölgesinde ise
      + sqrt(((x(1, ne3))**2+(x(2, ne3))**2)).gt.26.5 .and.      !üçüncü düğüm
    flanş bölgesinde ise
      + sqrt(((x(1, ne4))**2+(x(2, ne4))**2)).gt.26.5) then      !dördüncü düğüm
    flanş bölgesinde ise
      bz1=abs(x(3, ne1))*1000 !birinci düğüm için maks. buruşma yüksekliği
    giriş değışk. değeri
      bz2=abs(x(3, ne2))*1000 !ikinci düğüm için.....
      bz3=abs(x(3, ne3))*1000 !üçüncü düğüm için.....
      bz4=abs(x(3, ne4))*1000 !dördüncü düğüm için.....
      if (p.gt.0) then
        else
          p=i
        endif
      if (bz1.gt.bz2 .and. bz1.gt.bz3 .and.      !dört düğüm noktasına
      ait değerlerden en
        büyüğü seçiliyor
      + bz1.gt.bz4) then
        eb(i)=bz1
      elseif (bz2.gt.bz1 .and. bz2.gt.bz3
      + .and. bz2.gt.bz4) then
        eb(i)=bz2
      elseif (bz3.gt.bz1 .and. bz3.gt.bz2
      + .and. bz3.gt.bz4) then
        eb(i)=bz3
      else
        eb(i)=bz4
      endif
      write(999, '*)ide_ext, bz1, bz2, bz3, bz4
      o=i
    else
      eb(i)=-100
    endif
  enddo

```

```

        else
            eb(i)=-100
        endif
    enddo
c
!Dikdörtgen elemandaki dört düğüm noktasına ait maksimum buruşma yüksekliği
giriş
değişken değerlerinden maksimumun seçilmesi (bulanık mantık kontrol
algoritması için
maksimum buruşma yüksekliği giriş değişken değeri)
    do j=p+1, o
        if (eb(p).gt.eb(j)) then
            burusma=eb(p)
        else
            p=j
            burusma=eb(j)
        endif
    enddo
write(999, *) 'maksimum buruşma yüksekliği=', burusma

call basinc_egrise(basinc, crvidext, tt, dt, a(n8), a(n9), a(n19), nlcur,
+               alfa)
call bpk_egrise(kuvvet, crvidext, tt, dt, a(n8), a(n9), a(n19), nlcur,
+               beta)
return
end
c
subroutine basinc_egrise(basinc, crvidext, tt, dt, npc, pld, fval,
+               nlcur, alfa)
c
!external curve ID'si verilen eğrinin tt zamanında değerini değiştirme
c   crvidext: external curve-ID
c   tt: anlık zaman
c   dt: anlık zaman adımı
c   npc, pld, fval, nlcur
c
implicit none
include 'nlqparm'
include 'iounits.inc'
integer iCurve, ind, imin, imax, ii, icrvid, lcids, npc
integer lcidint, np, npoint, nlcur, ok
real basinc, crvidext, tt, dt, xinc, xbg, pld, x, y, fval, alfa
dimension npc(*), pld(*), fval(*)
c
crvidext=4 !model dosyasında tanımlanan basınç eğrisinin ext. ID'si
lcidint = lcids(nint(crvidext)) !internal curve ID
npoint=(npc(lcidint+1)-npc(lcidint))/2 !eğrideki nokta sayısı
c
c   (->*DEFINE_CURVE)

```

```

if (npoint.ne.2) then !eğride iki nokta yoksa ekrana hata yazmak için
    icrvid=int(crvidext)
    write(iotty, 1001) icrvid
    write(iohsp, 1001) icrvid
    write(iomsg, 1001) icrvid
    call adios(2)
endif
c
!BASINÇ EĞRİSİNDEKİ İKİ NOKTANIN MODİFİYE EDİLMESİ

    if (tt.gt.0 .and. tt.lt.0.001) then
        pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2 )=tt-dt
        pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2+1)=2
        pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2 )=tt+dt
        pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)=2
    end if
c
1001 format(/' ***** CHNLDC: Curve ID ', i10,
* 'Basinc egrisinde sadece iki nokta olmalı!!') !hata kodunun yazılması
c
    return
end
c
subroutine bpk_egrisi(kuvvet, crvidext, tt, dt, npc, pld, fval,
+                    nlcur, beta)
c
implicit none

include 'nlqparm'
include 'iounits.inc'
integer iCurve, ind, imin, imax, ii, icrvid, lcids, npc
integer lcidint, np, npoint, nlcur, ok
real kuvvet, crvidext, tt, dt, xinc, xbg, pld, x, y, fval, beta
dimension npc(*), pld(*), fval(*)
c
crvidext=3 !model dosyasında tanımlanan basınç eğrisinin ext. ID'si
lcidint = lcids(nint(crvidext))
npoint=(npc(lcidint+1)-npc(lcidint))/2
c
!Bu altprogramın çalışması için keyworddeki yükleme eğrisinde başlangıçta iki
nokta olmalıdır!
c (->*DEFINE_CURVE)
c
    if (npoint.ne.2) then
        icrvid=int(crvidext)
        write(iotty, 1002) icrvid
        write(iohsp, 1002) icrvid
        write(iomsg, 1002) icrvid
        call adios(2)
    end if

```

```

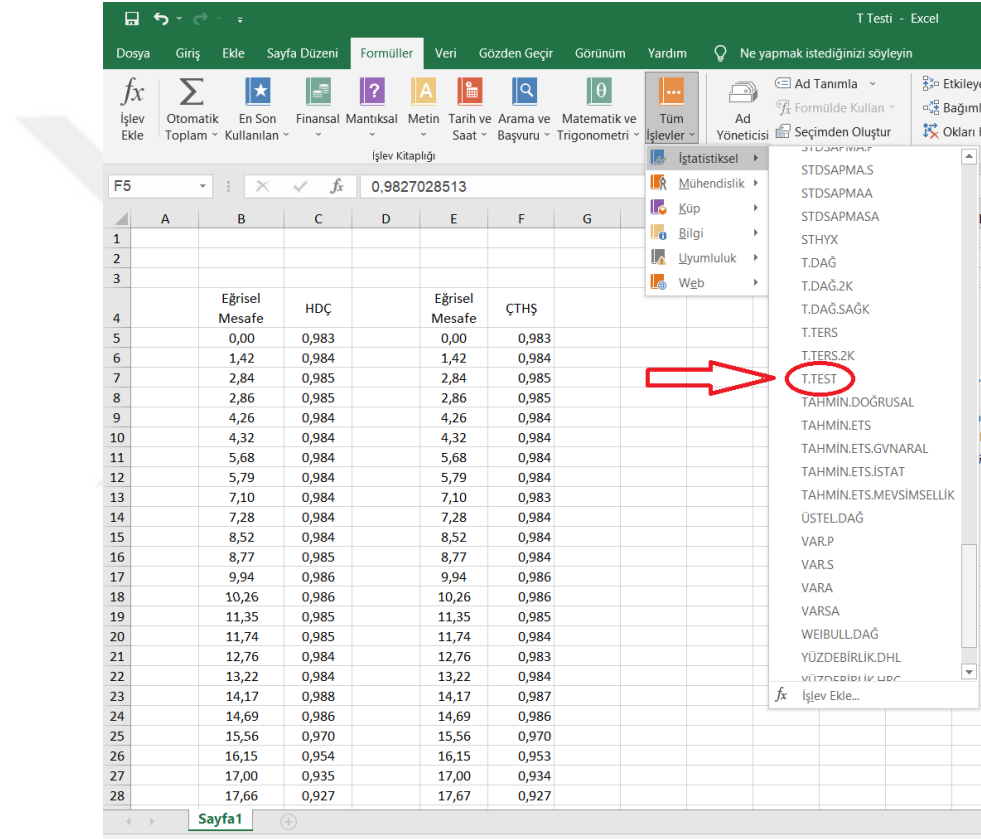
endif
c
!BASKI PLAKASI KUVVETİ EĞRİSİNDEKİ İKİ NOKTANIN MODİFİYE
EDİLMESİ
!tt=0.001 sn'ye kadar 2.5 kN'lik ön BPK'nın uygulanması
if (tt.gt.0 .and. tt.lt.0.001) then
  pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2 )=tt-dt
  pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2+1)=2500
  pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2 )=tt+dt
  pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)=2500
  kuvvet=2500
end if
c
1002 format(/' ***** CHNLDC: Curve ID ', i10,
*          'Kuvvet egrisinde sadece iki nokta olmalı!!')
kodunun yazılması
c
  return
end

```

!hata

EK-4 T testinin Excel Programı ile Uygulanması

HMDÇ ve ÇTHŞ prosesleriyle üretilmesi sonucunda oluşan kalınlık dağılımları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını tespit edebilmek için bağımlı (eşleştirilmiş) örneklem t-testi kullanılmıştır. Boş bir hücrenin üstüne tıklayarak fonksiyon aktif hale getirilir. Sonra sırasıyla yukarıdaki drop-down menülerden Formüller > Tüm İşlevler > İstatistiksel > T.TEST yolunu takip ederek t-testi diyalog penceresini açın.



HMDÇ ve ÇTHŞ kalınlık dağılımlarına ait hücreler seçilir. Sonraki adımda öncelikle TAILS seçeneğine iki-taraflı t-testi yapılacağı için 2 değeri girilir. Tür kısmında eşli t-testi için 1 değeri girilir.

T Testi - Excel

Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Yardım Ne yapmak istediğinizi söyleyin

İşlev Ekle Otomatik Toplam Kullanılan Finansal Mantıksal Metin Tarih ve Saat Arama ve Başvuru Matematik ve Trigonometri Tüm İşlevler Ad Tanımla Ad Formülde Kullan Ad Yöneticisi Seçimden Oluştur Tanımlı Adlar Etkileyenleri İzle Formülleri Göster Bağımlıları İzle Hata Denetimi Okları Kaldır Formülü Değerlendirme

İşlev Kitaplığı

F8 =T.TEST(C5:C87;D5:D87)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
3															
4		Eğrisel Mesafe	HMDÇ	ÇTHŞ											
5		0,00	0,983	0,983											
6		1,42	0,984	0,984											
7		2,84	0,985	0,985											
8		2,86	0,985	0,985											
9		4,26	0,984	0,984											
10		4,32	0,984	0,984											
11		5,68	0,984	0,984											
12		5,79	0,984	0,984											
13		7,10	0,984	0,983											
14		7,28	0,984	0,984											
15		8,52	0,984	0,984											
16		8,77	0,985	0,984											
17		9,94	0,986	0,986											
18		10,26	0,986	0,986											
19		11,35	0,985	0,985											
20		11,74	0,985	0,984											
21		12,76	0,984	0,983											
22		13,22	0,984	0,984											
23		14,17	0,988	0,987											
24		14,69	0,986	0,986											
25		15,56	0,970	0,970											
26		16,15	0,954	0,953											
27		17,00	0,935	0,934											
28		17,66	0,927	0,927											
29		18,46	0,921	0,921											
30		19,19	0,916	0,916											

Sayfa 1

Fonksiyon Bağımsız Değişkenleri

T.TEST

Dizi1 C5:C87 = {0,98274177313;0,98375844955;0,98477756977...

Dizi2 D5:D87 = {0,9827028513;0,98376917839;0,98475217819;...

Yazı_say = sayı

Tür = sayı

Bir t-Test için olasılığı verir.

Dizi1 ilk veri kümesi.

Formül sonucu =

Fonksiyon yardımı

Tamam iptal

T Testi

Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Yardım Ne yapmak istediğinizi söyleyin

İşlev Ekle Otomatik Toplam Kullanılan Finansal Mantıksal Metin Tarih ve Saat Arama ve Başvuru Matematik ve Trigonometri Tüm İşlevler Ad Tanımla Ad Formülde Kullan Ad Yöneticisi Seçimden Oluştur Tanımlı Adlar

İşlev Kitaplığı

T.TEST =T.TEST(C5:C87;D5:D87;2;1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3											
4		Eğrisel Mesafe	HMDÇ	ÇTHŞ							
5		0,00	0,983	0,983							
6		1,42	0,984	0,984							
7		2,84	0,985	0,985							
8		2,86	0,985	0,985							
9		4,26	0,984	0,984							
10		4,32	0,984	0,984							
11		5,68	0,984	0,984							
12		5,79	0,984	0,984							
13		7,10	0,984	0,983							
14		7,28	0,984	0,984							
15		8,52	0,984	0,984							
16		8,77	0,985	0,984							
17		9,94	0,986	0,986							
18		10,26	0,986	0,986							
19		11,35	0,985	0,985							

Fonksiyon Bağımsız Değişkenleri

T.TEST

Dizi1 C5:C87 = {0,98274177313;0,98375844955;0,98477756977...

Dizi2 D5:D87 = {0,9827028513;0,98376917839;0,98475217819;...

Yazı_say 2 = 2

Tür 1 = 1

Bir t-Test için olasılığı verir.

Tür uygulanacak t-test türü: eşli = 1, iki-örm olmayan varyans = 3.

Formül sonucu = 0,388423254

Fonksiyon yardımı

T testi formül olarak şu şekilde de yazılabilir. T.TEST(B4:B14, C4:C14, 2, 1)

Fonksiyon bağımsız değişkenleri pencersinde formül sonucu 0.38842 olarak bulunur. Bu sayı 0.05'den büyük olduğu için T-testi HMDÇ ve ÇTHŞ kalınlık dağılımı verileri arasında anlamlı bir fark olmadığını ifade eder.

