



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROMEKANİK DERİN ÇEKMEDE YÜKLEME PROFİLLERİNİN BULANIK MANTIK KONTROL ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ

Ekrem ÖZTÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ekrem ÖZTÜRK tarafından hazırlanan "HİDROMEKANİK DERİN ÇEKMEDE YÜKLEME PROFİLLERİNİN BULANIK MANTIK KONTROL ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ" adlı tez çalışması 09/07/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Haydar LİVATYALI	.....
Danışman Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI	.....
Üye Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN	.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. AŞIR GENÇ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK ve BAP tarafından sırasıyla 112M913 ve 15201021 No'lu projeler ile desteklenmiştir.

Prof. Dr. Muammer Koç bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

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.



Ekrem ÖZTÜRK
Tarih:13.07.2015

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROMEKANİK DERİN ÇEKMEDE YÜKLEME PROFİLLERİNİN BULANIK MANTIK KONTROL ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ

Ekrem ÖZTÜRK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2015, 88 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Sac hidroşekillendirme teknolojisinin bir çeşidi olan hidromekanik derin çekme prosesi ileri bir imalat işlemidir. Bu prosesin amacı, sac malzemede burulma, buruşma ya da yırtılma gibi herhangi bir şekillendirme hatası veya kararsızlığı olmadan tek bir şekillendirme adımı ile derin parçalar çekebilmektir. Bu proseste ana yükleme parametreleri olan sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti sacın şekillendirilebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu proseste eğer sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti az olursa sacın flanş ya da stampa duvarı bölgelerinde buruşma; aksine fazla olursa da sac malzemede yırtılma meydana gelmektedir. Bu yüzden hidromekanik derin çekme prosesinde arzu edilen geometriyi, yırtılma ve buruşma sınırları içerisinde kalarak elde etmek için uygun yükleme (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) profillerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, hidromekanik derin çekme işlemi için gerekli uygun yükleme profilleri, Choi ve ark. (2007) tarafından önerilen bulanık kontrol yaklaşımlı bir adaptif sonlu elemanlar analizi (SEA) yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen bulanık mantık kontrol algoritması LS-DYNA explicit kod kaynaklı SEA yazılımında mevcut altprogramların içine yazılmıştır. Bulanık mantık kontrol algoritmasında, şekillendirme esnasında sac metalde meydana gelen maksimum yüzde incelme, sacın stampa duvarına temas durumu ve sacın flanş bölgesinde oluşan maksimum buruşma yüksekliği kriterleri kullanılmıştır. Bulanık kontrol kapsamında farklı kural-tabanlı matrisler kullanılarak analizler yapılmış ve sonuçta sac parçada meydana gelen maksimum incelme yüzdeleri karşılaştırılarak en uygun kural-tabanlı matrisler bulunmuştur. Ayrıca sac çapı ve sac ile kalıplar arasındaki sürtünme katsayılarının değişiminin yükleme profillerine etkisi incelenmiştir. Bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA ile hidromekanik derin çekme işlemi için gerekli uygun yükleme profilleri üyelik fonksiyonlarının ve kural-tabanlı matrislerin belirlenmesi dışında tek bir SEA ile elde edilmiş ve dolayısıyla analiz çözüm süresi kısaltılmıştır. Bulanık kontrol yaklaşımı ile belirlenen uygun yükleme profilleri mevcut sac hidroşekillendirme presinde yapılan hidromekanik derin çekme deneylerinde kullanılmış ve deneyler sonucunda sac parçadaki kalınlık dağılımı ile analizden elde edilen kalınlık dağılımı karşılaştırılmıştır. Kullanılan bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA metodu sayesinde 107 mm ilkel çapa sahip 1mm kalınlığındaki Al 5754-O alüminyum sac 40 mm çapında silindir formuna başarıyla şekillendirilmiş ve arzu edilen iş parçası elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Adaptif sonlu elemanlar analizi, altprogram, bulanık kontrol, hidromekanik derin çekme, hidroşekillendirme, yükleme profilleri.

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF LOADING PROFILES WITH FUZZY LOGIC CONTROL ALGORITHM IN HYDROMECHANICAL DEEP DRAWING

Ekrem ÖZTÜRK

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2015, 88 Pages

Jury
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Hydromechanical deep drawing process, which is a type of sheet hydroforming technology, is an advanced manufacturing process. The aim of this process is to draw deep parts with only one forming step without any instabilities such as buckling, wrinkling or fracture occurring in the sheet blank. The magnitudes and synchronization of the fluid pressure (P) and blank holder force (BHF) as the main loading parameters of this process, affect the formability of the sheet metal directly. In this process, if the blank holder force and the fluid pressure are too low, wrinkling may occur on the flange or side wall area of the sheet metal. On the contrary, if the blank holder force and the fluid pressure are too high, the sheet metal blank may rupture. Hence, in order to achieve a desired part without any forming defects in HMD process, it is necessary to determine the optimal loading profiles (fluid pressure and blank holder force).

In this thesis, the optimal loading profiles, which are essential for a successful hydromechanical deep drawing process, were determined by adaptive finite element analysis (FEA) coupled with fuzzy control algorithm method proposed by Choi et al. (2007). The fuzzy control algorithm, developed within the scope of this study, was written in subroutines available with LS-DYNA explicit code. Maximum thickness reduction occurring in sheet blank, status of punch wall contact during forming, maximum wrinkle height occurring on the flange region of sheet blank were used as criteria in the fuzzy control algorithm. Different rule-based matrices were compared in terms of maximum thickness reduction occurring in the sheet and thus, the most accurate rule-based matrices were determined for the control algorithm. In addition, the effects of initial sheet diameter and coefficient of friction between the blank-dies on the optimal loading profiles were investigated. The feasible loading profiles were determined with only one single FE analysis except for determination of appropriate membership functions and rule-based matrices and thus, the computation time was reduced using the adaptive FEA coupled with fuzzy control algorithm. The feasible loading profiles determined by fuzzy control algorithm were used in the hydromechanical deep drawing experiments performed with a hydroforming press and the sheet thickness distributions obtained with experiment and analysis were compared. Al 5754-O sheet blank having 1 mm thickness and an initial diameter of 107 mm was successfully deep drawn to a cylinder form in diameter of 40 mm and the final desired part was achieved through the adaptive FEA coupled with fuzzy control algorithm.

Keywords: Adaptive finite element analysis, fuzzy control, hydroforming, hydromechanical deep drawing, loading profiles, subroutine.

Bu çalışmayı, çalışma boyunca yanımda olan ve benden maddi, manevi hiçbir desteği esirgemeyen sevgili arkadaşım Peyzaj Mimarı Kübra KÜÇÜKAĞTAŞ ve aileme ithaf ederim.

ÖNSÖZ

Hidromekanik derin çekme deneylerinde ve SEA programlarında kullanılan deneme ve yanılma yöntemi büyük bir iş gücü, maliyet ve zaman gerektirmektedir. Böylesi bir problemin önüne geçmek için bu tez çalışmasında, ileri bir sac metal şekillendirme yöntemi olarak anılan hidromekanik derin çekme prosesinde iki önemli ana yükleme parametresi olan sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti için uygun profiller LS-DYNA SEA programında bulanık mantık kontrol algoritmalı bir adaptif metot kullanılarak elde edilmiştir. Bu metot, analiz programı için temin edilen altprogramlar yardımıyla yeni bir LS-DYNA çözücüsü oluşturularak prosese uygulanmıştır. Bu yöntem sayesinde hidromekanik derin çekme işlemi için uygun yükleme profilleri tek bir analiz ile elde edilmiştir.

Bu çalışmayı vererek kendimi geliştirmeye yönelik birkaç adım ileride olmamı sağlayan ve beni yönlendiren danışmanlarım sayın Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI ve Prof. Dr. Muammer KOÇ'a,

Analiz programının kullanılmasında ve deneylerin yapılmasında benden desteğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ, Arş. Grv. Mevlüt TÜRKÖZ, Arş. Grv. Doğan ACAR ve meslektaşım Mak. Müh. Semih AVCI'ya,

LS-DYNA SEA'da altprogramların yazılması kapsamında destek olan DYNAmore firması yazılım geliştiricisi Dr. Stefan HARTMANN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ekrem ÖZTÜRK
KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vii**

İÇİNDEKİLER ..... **viii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Sac Hidroşekillendirme 4
2.1.1. Hidromekanik derin çekme 5
2.1.2. Yüksek basınç hidroşekillendirme 6
2.2. Hidromekanik Derin Çekme Prosesini Etkileyen Önemli Parametreler 8
2.3. Hidromekanik Derin Çekmede Yükleme Profillerinin Elde Edilmesi 9

3. HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN MODELLENMESİ **12**

3.1. Hidromekanik Derin Çekme Prosesinin Simülasyonu için Gerekli Geometrik Modelin Oluşturulması 12
3.2. Başlangıç ve Sınır Koşulları 16
3.2.1. Kalıp için gerekli şartlar 16
3.2.2. Sac için gerekli şartlar 16
3.2.3. Baskı plakası için gerekli şartlar 17
3.2.4. Stampa için gerekli şartlar 17
3.2.5. Sıvı basıncının tanımlanması 18
3.2.6. Baskı plakası kuvvetinin tanımlanması 19
3.3. Malzeme Modeli 19
3.4. Kesit (Section) Özelliğinin Tanımlanması 22
3.5. Malzeme Modellerinin ve Kesit Özelliğinin Parçalara Atanması 22
3.6. Parçalar Arasındaki Temasın ve Sürtünmenin Tanımlanması 23
3.7. Analiz İçin Modelde Açılan Diğer Kartlar 24

4. BULANIK MANTIK KONTROL ALGORİTMASI **26**

4.1. LS-DYNA SEA Yazılımında Altprogramların Yazılabilme Olanaklarının Araştırılması 26
4.2. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmalı Adaptif SEA'nın Geliştirilmesi 27
4.2.1. Maksimum yüzde incelme giriş değişkeni 29
4.2.2. Stampa duvarına temas giriş değişkeni 30
4.2.3. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeni 33
4.2.4. Çıkış değişkenleri 34
4.2.5. Bulanık kural-tabanlı matrisler 35
4.3. Altprogram Yardımıyla Yükleme Eğrilerinin Değiştirilmesi 37

4.4. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmasının HDÇ Prosesine Uygulanması.....38
4.5. En Uygun Kural-Tabanlı Matrislerin Belirlenmesi.....40
4.6. Stampa Duvarına Temas Giriş Değişkenine Ait Üyelik Fonksiyonlarının Değişiminin Prosese Etkisi.....42
4.7. Başlangıç Sac Çapının ve Sürtünme Katsayısı Değişiminin Yükleme Profillerine Etkisi.....43
4.8. Tez Çalışması ile Önceki Çalışmaların Karşılaştırılması.....43

5. HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME DENEYLERİNİN YAPILMASI.....45

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....47

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....57

7.1. Sonuçlar.....57
7.2. Öneriler.....58

KAYNAKLAR.....59

EKLER.....63

EK-1 LS-DYNA SEA'da Var Olan Bazı Kullanıcı Arayüzleri.....64
EK-2 LS-DYNA SEA'da Alt Programlar ile Yeni Bir Çözücü Oluşturulması için Gerekli İşlemler.....71
EK-3 Çözücü Oluşturmak için Gerekli İşlemler Yapılmadığında veya Eksik Yapıldığında Meydana Gelebilecek Hatalar.....78
EK-4 Bulanık Mantık Kontrol Algoritması Altprogram Kodları.....80

ÖZGEÇMİŞ.....88

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Baskı plakasının yüzey alanı
$BPK_{deneysel}$	: Deneylerde kullanılması gereken baskı plakası kuvveti
BPK_i^{eski}	: Bir önceki zaman adımında elde edilen baskı plakası kuvveti
BPK_i^{yeni}	: Yeni zaman adımında uygulanacak olan baskı plakası kuvveti
dt	: Zaman adımı
F_{BPK}	: Bulanık mantık kontrol algoritması ile elde edilen baskı plakası kuvveti
numels	: Analizdeki toplam eleman sayısı
numnp	: Analizdeki toplam düğüm sayısı
P	: Sıvı basıncı
P_i^{eski}	: 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 sıvı basıncını belirleyecek olan çıkış değişkeni
β	: Bulanık mantık kontrol algoritmasından elde edilen ve yeni zaman adımındaki baskı plakası kuvvetini belirleyecek olan çıkış değişkeni
ΔP_i	: Ön tanımlı sıvı basıncı değeri
ΔBPK_i	: Ön tanımlı baskı plakası kuvveti değeri

Kısaltmalar

BM	: Bulanık mantık
BMKA	: Bulanık mantık kontrol algoritması
BPK	: Baskı plakası kuvveti
ÇKR	: Çok kritik
HDÇ	: Hidromekanik derin çekme
KM	: Kural matrisi
KRD	: Kritik değil
KR	: Kritik
m	: Şekil değişimi hız duyarlılığı
n	: Pekleşme üssü
P	: Sıvı basıncı
SÇO	: Sınır çekme oranı
SEA	: Sonlu elemanlar analizi

1. GİRİŞ

Son yıllarda, otomotiv endüstrisindeki ağırlık azaltma ihtiyacı üreticileri hafif alaşımları kullanmaya zorlamaktadır. Otomobillerde ağırlığın % 10 azalması yakıt tüketimini %6-8 oranında azaltmakta (Schultz, 1999), otomobil gövdesinde çelik yerine alüminyum ve magnezyum gibi hafif alaşımların kullanılmasıyla da otomobil ağırlıkları %40-75 oranında azaltılabilmektedir (Carpenter, 2004). Bu avantajlarına rağmen hafif alaşımların oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirlik sorunu üreticileri yenilikçi imalat yöntemlerine yöneltmektedir.

Yenilikçi imalat yöntemlerden biri olan sac hidroşekillendirme prosesi, sac veya boru şeklindeki malzemelerin sıvı basıncı yardımıyla şekillendirilmesinde kullanılan bir imalat yöntemidir. Klasik bir kalıpla parçalar iki kalıp arasında şekillendirilirken, sac hidroşekillendirme yönteminde tek bir kalıp kullanılmaktadır. Bu yöntem, özellikle şekillendirilebilirlikte artış kabiliyeti nedeniyle otomotiv, uzay ve savunma sektörlerinde kullanılmaktadır. Hidroşekillendirme prosesi şekillendirilebilirlikte artışın yanında kalıp maliyetlerinde azalma, daha üniform kalınlıkta ürün elde edilmesi, parça mukavemetinde, yüzey kalitesinde ve boyutsal doğrulukta artış, karmaşık geometrilerin tek kademede üretilebilmesi gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir (Xu, 2004; Halkacı, 2014).

Sac hidroşekillendirme teknolojisinin bir çeşidi olan hidromekanik derin çekme (HDÇ) prosesi ileri bir sac metal şekillendirme işlemidir. Otomobil kapısı, beyaz eşya parçaları, basınçlı tüp gibi kap formuna sahip üç boyutlu elemanların tek parça halinde seri üretimi söz konusu olduğunda imal usulü olarak genellikle derin çekme tercih edilmektedir (Şekil 1.1). Ekonomik yaklaşım tarzının hemen her alanda egemen olduğu günümüzde, seri üretimde kullanılmakta olan yöntemlere genel olarak bakıldığında, malzeme kaybını minimize etmesinden dolayı derin çekmenin talaşlı imalata nazaran oldukça avantajlı olduğu söylenebilir (Özçelik, 2008). Bu proseste, geleneksel derin çekme işleminden farklı olarak sac metal, katı bir kalıbın aksine içi sıvı ile doldurulmuş bir kalıp odasına doğru preslenmektedir. HDÇ prosesinde stampa, basıncı kontrol edilebilen akışkana doğru hareket ederek sac malzemeyi arzu edilen son şekline şekillendirmektedir (Siegert ve Wagner, 1994). HDÇ prosesinde basınçlandırılmış sıvı sac malzemeye stampanın formunu kazandırdığı için stampanın geometrisini değiştirerek aynı kalıpta birden fazla ürün çeşidi elde edilebilmektedir. Böylelikle benzer ürünler için de ayrı ayrı kalıplar imal edilmesi gerekmemektedir. Bu durum, imalatçıların başlangıç maliyetlerini önemli ölçüde düşürmektedir. Sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinde

üretim aşamaları önemli ölçüde azaltıldığından, üretim hızı da önemli ölçüde arttırılmış olmaktadır (Akbayır, 2013). Bu prosesin amacı, sac malzemede burulma, buruşma ya da yırtılma gibi herhangi bir şekillendirme kararsızlığı olmadan tek bir şekillendirme adımı ile daha derin parçaları şekillendirebilmektir. HDÇ işleminin performansı ve şekillendirilmiş sacın kalitesi akma dayanımı, elastisite modülü, pekleşme üssü "n", şekil değişimi hız duyarlılığı "m", sac kalınlığı ve kalıntı gerilmeler gibi malzeme değişkenlerinin yanı sıra (Özçelik, 2008), sıvı basıncı (P), baskı plakası kuvveti (BPK), sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünme, stampa ve kalıp radyüsleri, stampa hızı, ön şişirme basıncı ve yüksekliği gibi işletme parametrelerinden de etkilenmektedir (Reissner, 1981). Fakat ana yükleme parametreleri olan sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti sacın şekillendirilebilirliğini doğrudan etkilemektedir (Tınkır ve ark., 2015). HDÇ prosesi boyunca çekme ve basma gerilmeleri önemli derecede değiştiği için sac malzemede buruşma ve yırtılma meydana gelmektedir. Bu proseste eğer sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti az olursa sacın flanş ya da stampa duvarı bölgelerinde buruşma, aksine fazla olursa sac malzemede yırtılma meydana gelmektedir (Ozturk ve ark., 2014). Bu yüzden HDÇ prosesinde arzu edilen geometriyi, yırtılma ve buruşma sınırları içerisinde kalarak elde etmek için uygun yükleme (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) profillerinin belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 1.1. Derin çekme ile üretilen örnek otomotiv ve ev aleti parçaları (Anonim 1, 2015)

Mühendisliğin bir bakış açısı olarak, bir ürünü üretmeden önce o ürünün işlevselliği ve uygunluğu kontrol edilmelidir. En uygun malzeme ve üretim yöntemi, tüm üretim maliyeti göz önünde bulundurularak belirli şartlar altında dikkatli bir şekilde

seçilmelidir. Günümüz teknolojisinde sonlu elemanlar analizi (SEA) bu amaç için kullanılan en yaygın yöntemdir. SEA analizinin gerçekleştirilmesiyle bir mühendis, bir ürünün hasara uğrayıp uğramayacağını gerçek bir ürünü imal etmeden önce tahmin edebilmektedir. Eğer bir ürün analiz ortamında hasara uğrarsa, yeni bir malzeme veya mevcut proses parametreleri SEA programında yeniden tanımlanabilmektedir (Şanay, 2010).

HDÇ prosesinin önemli iki ana yükleme parametresi olan sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri, HDÇ deneyleri ve SEA programları kullanılarak birçok deneme ve yanılma yöntemi ve tecrübeler yardımı ile elde edilebilmektedir ancak bu metotlar uzun bir sürece ve büyük bir insan gücüne ihtiyaç duymaktadır (Choi ve ark., 2007). Deneyler yardımıyla elde edilen yükleme profilleri, mühendislik kavramı açısından ekonomik yaklaşım tarzına ters düşmekte ve maliyet artışına sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu metotlara alternatif bir yöntemin kullanılması günümüz rekabetçi ortamında kaçınılmaz bir hâl almıştır. Bu sebeple günümüzde HDÇ prosesinde yükleme profillerinin elde edilmesi için SEA analizleri ile birlikte çalışan bulanık mantık kontrol algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bulanık mantık (BM), kesin mantık veya makine mantığından ziyade, insan mantığı gibi belirli sınırlara sahip olmayan bir mantık ve karar mekanizması kullanmaktadır. Bulanık mantık kontrol sistemleri, bilinen diğer kontrol sistemleri gibi tam model bilgisine ihtiyaç duymamaktadır (Etik, 2009). BM tabanlı kontrol sistemlerinin yaygın olarak kullanılması ile sac hidroşekillendirme prosesi de bulanık mantık kontrol sisteminin uygulama kapsamına dâhil edilmiştir.

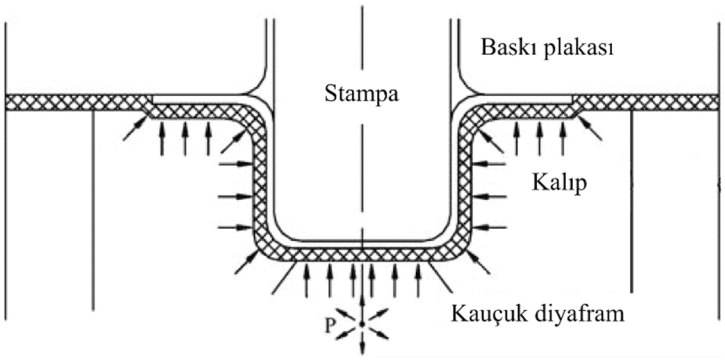
Bu çalışmada, HDÇ prosesinde yükleme profillerini belirlemek için Choi ve ark. (2007) tarafından önerilen bulanık mantık kontrol algoritmalı bir adaptif simülasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Bu *bulanık mantık kontrol algoritması (BMKA)* LS-DYNA explicit kod kaynaklı ticari SEA yazılımının var olan çözücüsünün altprogramlar yardımıyla değiştirilmesiyle analiz esnasında kullanılmış ve sonuçta HDÇ prosesi için gerekli uygun yükleme profilleri tek bir analiz ile elde edilmiştir. BMKA'lı adaptif SEA yaklaşımı ile elde edilen uygun yükleme profilleri mevcut hidroşekillendirme presine girilerek proses sonunda yırtılma ve buruşma olmayan bir silindirik iş parçası elde edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

DIN 8584'e göre derin çekme prosesi üç ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlar: (1) sadece kalıplar (tool) ile derin çekme, (2) aktif akışkan ile derin çekme ve (3) aktif enerji ile derin çekmedir. Siegert ve Wagner (1994)'e göre aktif enerji ile derin çekmenin bir pratik önemi olmadığından literatürde genel olarak ilk iki yöntem kullanılmaktadır. Bu iki yöntem daha geniş anlamda sırasıyla geleneksel derin çekme ve hidroşekillendirme olarak isimlendirilmektedirler. Hidroşekillendirme ise sac hidroşekillendirme ve tüp hidroşekillendirme olarak ikiye ayrılmaktadır. Sac hidroşekillendirme, hidromekanik derin çekme (erkek kalıpla) ve yüksek basınç sac hidroşekillendirme (dişi kalıpla) olarak iki sınıfa ayrılmakta ve yüksek basınç sac hidroşekillendirme de tek plakalı ve çift plakalı olarak sınıflandırılmaktadır (Koç ve Cora, 2008).

2.1. Sac Hidroşekillendirme

Yeni bir teknoloji olarak sac hidroşekillendirme prosesi 2. Dünya Savaşından beri geliştirilmektedir. Bu proseste sac malzeme, hidrolik basınç yardımıyla kalıp boşluğunun içinde şekillendirilmektedir. Yüksek sınır çekme oranı (SÇO), daha iyi yüzey kalitesi, daha az geri yaylanma, daha iyi geometrik tolerans ve kompleks yapılı sac metal parçaları şekillendirebilme kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı sac hidroşekillendirme, geleneksel derin çekme işlemine göre daha avantajlı bir prosestir (Zhang ve ark., 2004). Örneğin karmaşık geometrili bir parça geleneksel derin çekme yöntemiyle birkaç adımda üretilebilirken, sac hidroşekillendirme prosesi ile aynı parça tek bir şekillendirme adımı ile şekillendirilebilmektedir.



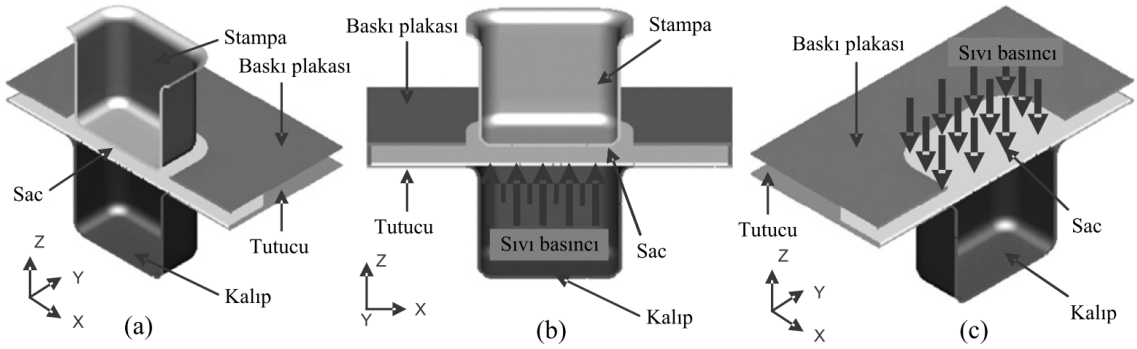
Şekil 2.1. Kauçuk diyaframlı sac hidroşekillendirme prosesi (Zhang ve ark., 2004)

Zhang ve ark. (2004)'e göre sac hidroşekillendirme prosesinde sac ve basınçlı akışkan arasında kauçuk diyafram kullanıldığı sistem eski zamanlara dayanmaktadır (Şekil 2.1). Bu sistem günümüzde hala otomotiv panelleri ve uçak yüzeylerinin küçük ölçekli üretimlerine uygulanmaktadır. 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 büyük kapasiteli preslere ihtiyaç duyması gibi dezavantajları da vardır. Bunlara ek, bu sistemde diyaframın parçalanması kolay ve sac malzemedeki buruşmayı kontrol etmek ise zordur.

Zhang (1999), sac hidroşekillendirme prosesinde kauçuk diyaframın yerleştirildiği bu düzene "*esnek şekillendirme*" adını vermiştir. Daha sonra bu proseste sadece diyaframın çıkarıldığı, yani basınçlı akışkanın sac metal ile doğrudan temas ettiği sistemi ise "*hidromekanik derin çekme*" prosesi olarak adlandırmıştır. Sac hidroşekillendirme işlemi hidromekanik derin çekme (erkek kalıpla hidroşekillendirme) ve yüksek basınç hidroşekillendirme (dişi kalıpla hidroşekillendirme) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır.

2.1.1. Hidromekanik derin çekme

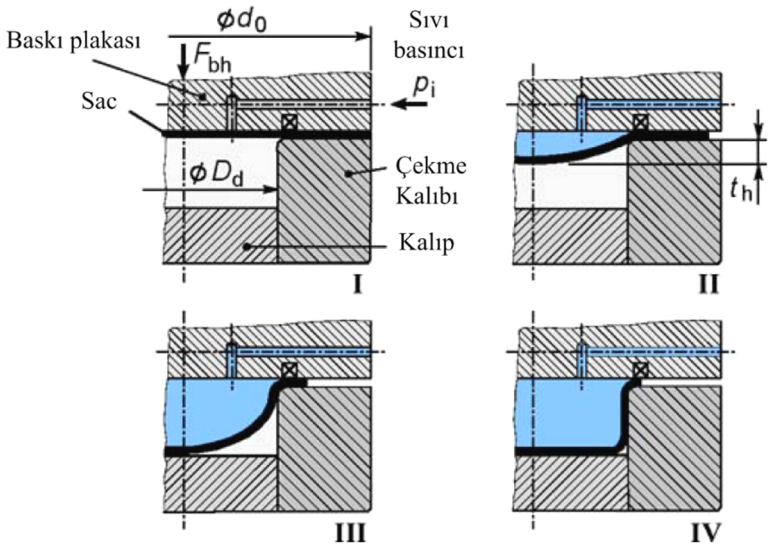
Hidromekanik derin çekme işlemi ilk olarak 1890 yılında geliştirilmiştir. Bu proseste dişi kalıp içerisinde bir sıvı akışkan mevcuttur ve iş parçasının son şekli stampa (erkek kalıp) tarafından belirlenmektedir (Şekil 2.2b). Stampa z doğrultusunda ilerledikçe akışkan basınçlandırılmakta ve kalıp odasındaki karşı basınç bir vana veya pompa yardımıyla kontrol edilebilmektedir (Önder ve Tekkaya, 2008). Zhang ve Danckert (1998) ve Zhang (1999)'un da çalışmalarında incelediği gibi bu prosesin esas geliştirilmesi 2. Dünya Savaşından sonra başlamıştır. Nakamura ve Nakagawa (1987), HDÇ prosesi için Japonya'da yaptıkları çalışmalarında bu prosesteki ön şişirme tekniğine dikkat çekmiş, bu teknikle endüstride karmaşık otomotiv parçalarının tek bir şekillendirme adımı ile üretilebileceğinden bahsetmişlerdir. Buna ek olarak, Aust (2001) ile Zhang ve ark. (2000)'e göre bu prosesin geleneksel derin çekmeye göre diğer avantajları; sıvı basıncı, stampaya karşı sac metali preslediği ve ona plastik olarak şekil verdiği için, dişi kalıp kullanılmadan konveks/konkav biçimli parçaların üretilebilme imkânı ve daha üniform sac duvar kalınlıkların elde edilebilmesidir (Şekil 2.2a, Şekil 2.2b).



Şekil 2.2. Derin çekme prosesleri: (a) geleneksel derin çekme, (b) hidromekanik derin çekme (erkek kalıpla), (c) yüksek basınç (dişi kalıpla) hidroşekillendirme (Önder ve Tekkaya, 2008)

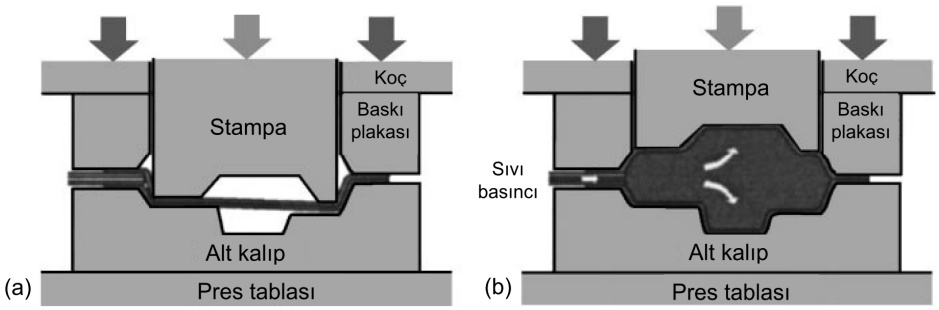
2.1.2. Yüksek basınç hidroşekillendirme

Yüksek basınç (tek plakalı) hidroşekillendirme, diğer adıyla dişi kalıpla hidroşekillendirme, Şekil 2.2c'de görüldüğü gibi aslında sıvı akışkanın bir stampa görevi gördüğü ve böylelikle teçhizatın (tooling) ve iş gücünün düşürüldüğü bir serbest-hidroşişirme prosesidir (Önder ve Tekkaya, 2008). Bu şekillendirme tipinde önemli proses parametreleri sıvı basıncı, baskı plakası (üst kalıp) kuvveti ve proseste kullanılan kalıpların şeklidir. Bu şekillendirme prosesinin başında kesilip hazır hale getirilmiş sac malzeme şekillendirme teçhizatının üst ve alt kalıpları arasına yerleştirilmektedir. Arzu edilen son geometri ise alt kalıp boşluğu tarafından verilmektedir. Kalıplar kapatıldıktan sonra metal sac üst kalıba entegre edilmiş bir kanal yardımıyla basınçlandırılmaktadır. Temel olarak şekillendirme prosesi 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama üst kalıptan alt kalıba doğru olan serbest malzeme akışı ile karakterize edilmektedir (Şekil 2.3 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 2.3 IV). Proses sonunda kalıplar açıldıktan sonra tek bir iş parçası elde edilmektedir (Groche ve Metz, 2006). Kleiner ve ark. (2004)'e göre dişi kalıpla hidroşekillendirme prosesi, geleneksel derin çekme prosesi ile karşılaştırıldığında, yüksek şekil ve boyut doğruluğu ya da yüksek mukavemet gibi teknolojik avantajlarının yanında belirli geometriler için işlem adımlarını da azaltmaktadır.



Şekil 2.3. Yüksek basınç (tek plakalı) hidroşekillendirme prosesi ve adımları (Kleiner ve ark., 2004)

İç yüksek basınç (çift plakalı) hidroşekillendirme, tek plakalı hidroşekillendirme 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 2.4a) iki plaka arasına hidrolik sıvı gönderilmektedir. Böylece alttaki sac alt kalıbın şeklini alırken üstteki sac ise stampanın şeklini almaktadır (Şekil 2.4b). Bu proseste hidroşekillendirme sırasında stampa belirli bir konuma kadar geri çekilebilmektedir (Siegert ve ark., 2000). Bu prosesin tek plakalı hidroşekillendirme işlemine göre avantajı bir şekillendirme çevriminde 2 adet parçanın üretilebilmesidir. Bu proses günümüzde çok yaygın kullanılmamakla birlikte hâlâ geliştirilme aşamasındadır.



Şekil 2.4. İç yüksek basınç (çift plakalı) hidroşekillendirme: (a) çift plakaların derin çekilmesi, (b) hidroşekillendirme ile dönüşüm ve kalibrasyon (Siegert ve ark., 2000)

2.2. Hidromekanik Derin Çekme Prosesini Etkileyen Önemli Parametreler

HDÇ prosesinde sıvı basıncı, baskı plakası kuvveti, sac-kalıp ve sac-baskı plakası arasındaki sürtünme, stampa ve kalıp radyüsleri, ön şişirme basıncı ve yüksekliği gibi proses parametreleri bu prosesin başarısını ve dolayısıyla şekillendirilebilirliği etkileyen önemli parametrelerdir.

Sıvı basıncı, HDÇ prosesinin geleneksel derin çekme prosesine göre üstünlüğünü ortaya koyan önemli parametrelerden biridir. Hidrolik basınç sacın üzerine etki ederken sac metal, dış köşesi de dâhil olmak üzere şekillendirilmektedir. Böylelikle sac flanşının çevresine sıvı basıncına eşit bir radyal basınç etki etmektedir. Bu da sacın stampayla temas eden bölgesinin malzemenin maksimum çekme mukavemetine ulaşmadan sacın derin çekilebilmesine olanak sağlamaktadır. Sıvı akışkan, stampaya karşı sacı preslemektedir ve bunun sonucunda stampa üzerine sıvanan sac ile stampa arasında sürtünme kuvveti oluşmakta ve bu da şekillendirme devam ederken stampa burun radyüsünde oluşan maksimum çekme gerilmesinin kalıp radyüsüne doğru hareket etmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak sıvı basıncının desteğiyle sac çevresine etkiyen radyal itme ve sac duvarında oluşan sürtünmenin varlığı HDÇ prosesinde şekillendirilebilirliği artırmaktadır (Thiruvarudchelvan ve Travis, 2003). Fakat HDÇ prosesinde sıvı basıncının fazla olması da sac metalin yırtılma ihtimalini arttırmaktadır. Bu yüzden hidroşekillendirme boyunca sıvı basıncı için uygun bir yükleme profilinin bulunması gerekmektedir.

Sactaki radyal gerilmeyi ve çekme yükünü büyük ölçüde etkileyen proses parametrelerinden biri baskı plakası kuvveti (BPK)'dir (Candra ve ark., 2015). Buruşma ise sac metal şekillendirme prosesi esnasında oluşabilen kararsızlık türlerinden biridir. Şekillendirme esnasında BPK'nın 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. HDÇ prosesi boyunca sacın buruşma ve yırtılma olmadan kararlı bir şekilde çekilebilmesine izin veren minimum BPK yükleme profilinin belirlenmesi, bu prosesin başarısını arttırması açısından önemli bir husustur.

HDÇ prosesini etkileyen önemli parametrelerden biri de sürtünmedir. Şekillendirilmiş bir ürünün yüzey kalitesi, teçhizat ömrü ve sacın çekilebilirliği, temas yüzeyleri (sac-kalıplar ve sac-stampa) arasındaki iyi bir yağlama filmine büyük oranda bağlıdır. Metal şekillendirme prosesinde sürtünme, sacdaki gerinme dağılımını ve sac

metalin çekilebilirliğini etkilemekte ve aynı zamanda sac metalin çekilebilirliği de teçhizatın aşınma durumunu etkilemektedir (Singh ve Agnihotri, 2015).

Stampa burun ve kalıp radyüsü de HDÇ prosesinde şekillendirilebilirliği etkileyen önemli parametrelerdir. Jawad ve Mohamed (2008)'e göre büyük stampa burun radyüslerinin kullanılması stampayı kubbe şekline sokmaktadır. Bu durum stampa burun bölgesinde bulunan malzemenin stampa duvarındaki malzemeye oranla daha fazla deforme olmasına neden olmakta ve bu da stampa burun bölgesinde yüksek gerilme konsantrasyonu oluşturarak stampa ucunda sac metalin aşırı bükülmesine ve uzamasına neden olmaktadır. Sonuç olarak çalışmalarında stampa burun radyüsünün arttırılmasının sac metalin incelmesini arttırdığını ve maksimum incelmenin ise burun radyüsü civarında olduğunu gözlemlemişlerdir. Padmanabhan ve ark. (2007)'ye göre ise 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 proseste uygun bir kalıp radyüsü kullanılması bir yandan düzgün bir malzeme akışına sebep olurken, diğer yandan ise geri yaylanma ve malzeme israfını azaltmaktadır.

Bu proseste ön şişirme, hidroşekillendirme başlangıcında stampa hareketine başlamadan önce, sacın bir miktar stampa hareketine ters yönde belirli bir basınçla ön şişirilmesine ve bu sayede stampa burun civarında sacda meydana gelen gerilmelerin durumunun değiştirilmesine (sac ve stampa arasındaki sürtünmenin artması ve dolayısıyla birbirine temas eden bölgelerdeki çekme gerilmesinin düşmesi) sebep olmakta ve sacın yırtılma ve buruşma ihtimalini düşürerek şekillendirilebilirliği arttırmaktadır (Lang ve ark.. 2004; Choi ve ark., 2007). Zhang ve ark. (1998)'e göre ise ön şişirme, malzemenin daha üniform uzamasına ve daha büyük sac çaplarının stampayla temas etmesini kolaylaştırıp sac ve stampa arasındaki sürtünmeyi arttırmaktadır. 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.

2.3. Hidromekanik Derin Çekmede Yükleme Profillerinin Elde Edilmesi

Literatürde, HDÇ prosesi için gerekli uygun yükleme (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) profillerinin belirlenmesi kapsamında çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu

çalışmalar genellikle, günümüzde çok yaygın olarak kullanılan SEA programları yardımıyla bulunmaktadır. Çalışmaların bazıları SEA programlarında yapılan deneme ve yanılma metodunu içermektedir. Bu yöntem ile 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 HDÇ prosesi elde edilene kadar devam edilmektedir. Bu metot da oldukça vakit kaybettiren bir yaklaşımdır. Deneme ve yanılma metodunun bu dezavantajını ortadan kaldırmak için uygun yükleme profilleri, SEA yazılımları ile birlikte çalışan çeşitli kontrol algoritmaları ile belirlenmektedir. Bu kontrol algoritmaları ise 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).

Koyama ve ark. (2003) SEA programını kullanmadıkları çalışmalarında, bir proses kontrol tasarım algoritması geliştirmişler ve bunu silindirik kap derin çekme deneyi esnasında baskı plakası kuvvetini tüm şekillendirme boyunca bulanık-adaptif olarak kontrol etmek ve prosesin SÇO'sunu arttırmak için kullanmışlardır. Çalışmalarında 1 mm kalınlıkta alaşımlı A5182-O alüminyum sac malzeme kullanmışlardır. Geliştirdikleri bulanık sistem, maksimum görülebilir kalınlık (maximum apparent thickness) ve flanş sonu deplasmanının stampa radyüsüne oranı olan 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 arttırılması, değiştirilmemesi veya azaltılması kararları için örneğin eğer maksimum görülebilir kalınlık büyük ve ΔDR^* büyük ise BPK'yı arttır gibi bulanık kural matrisleri oluşturmuşlardır. Sonuç olarak bulanık mantık 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.

Shamsi-Sarband ve ark. (2012) genetik algoritma kullanarak HDÇ prosesinde 2 kademeli ve 1.5 mm kalınlığındaki bir iş parçasının optimum sıvı basıncı profilini belirlemişlerdir. Optimum sıvı basıncı profillerini aynı ön şişirme basınçları ve farklı stampa 1. kademe boyları için incelemişlerdir ve optimizasyon eğrisindeki en düşük basınç noktasını, stampanın 1. kademesinin maksimum boyda olduğu durumda gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda farklı stampa çapları için farklı başlangıç basınçlarının bulunmasına rağmen optimizasyon eğrisindeki minimum basınç değerinin stampa çapının değiştirilmesiyle büyük ölçüde değişmediğini vurgulamışlardır.

Abedrabbo ve ark. (2005) alüminyum hidroşekillendirme işleminde buruşma başlangıcını kontrol edip, elde ettikleri ve deneylerle doğruladıkları nümerik modeli kullanarak optimum basınç profilini elde etmişlerdir. Dao ve Huang (2011) sonlu elamanlar analizi ve Taguchi metodunu kullanarak optimum basınç eğrisi, stampa hızı ve sürtünme kuvvetlerini elde etmişlerdir. Labergere ve Gelin (2012) ise optimum basınç profilinin yanı sıra akışkan hızının sacdaki incelmeye etkilerini Reynold denklemlerini kullanarak araştırmışlardır.

Choi ve ark. (2007) ABAQUS/Explicit SEA yazılımında, ılık hidromekanik derin çekme prosesi için gerekli optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri için bulanık mantık kontrol algoritmalı bir adaptif SEA geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, bulanık mantık kontrol algoritması için giriş değişkenleri olarak minimum sac kalınlığı, buruşma yüksekliği ve stampa duvarına temas kriterlerini kullanmışlardır. Uygun sıvı basıncı profilinin belirlenmesi için minimum sac kalınlığı ve stampa duvarına temas kriterlerini; uygun BPK profilini belirlemek için ise minimum sac kalınlığı ve buruşma yüksekliği kriterlerini kullanmışlardır. Bulanık mantık kontrol algoritmalı SEA analizinde giriş değişkenleri için kullandıkları kriterleri her bir zaman adımında ölçerek optimum yükleme profillerini (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) tek bir simülasyon analiziyle belirlemişlerdir.

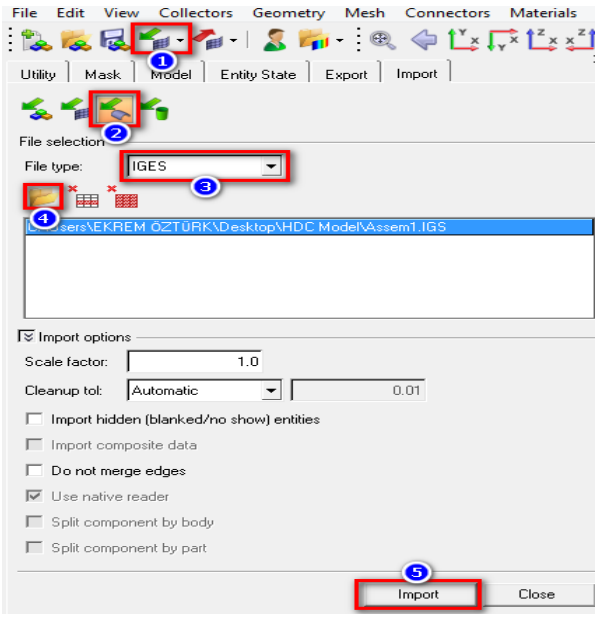
Bu tez kapsamında Choi ve ark. (2007)'nin geliştirdikleri ancak deneysel çalışmalar yapmadıkları BMKA'lı adaptif SEA yöntemi ile LS-DYNA/Explicit SEA yazılımı kullanılarak HDÇ prosesi için uygun yükleme profilleri belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırılmıştır.

3. HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN MODELLENMESİ

3.1. Hidromekanik Derin Çekme Prosesinin Simülasyonu için Gerekli Geometrik Modelin Oluşturulması

HDÇ prosesi için gerekli geometrik model; iş parçası (sac), kalıp, baskı plakası ve stampa olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. Modeldeki tüm parçalar ilk önce Solidworks 3B tasarım yazılımında yüzey olarak modellenmiş, daha sonra, HyperMesh yazılımı kullanılarak bu yüzeylerin mesh (ağ) 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.

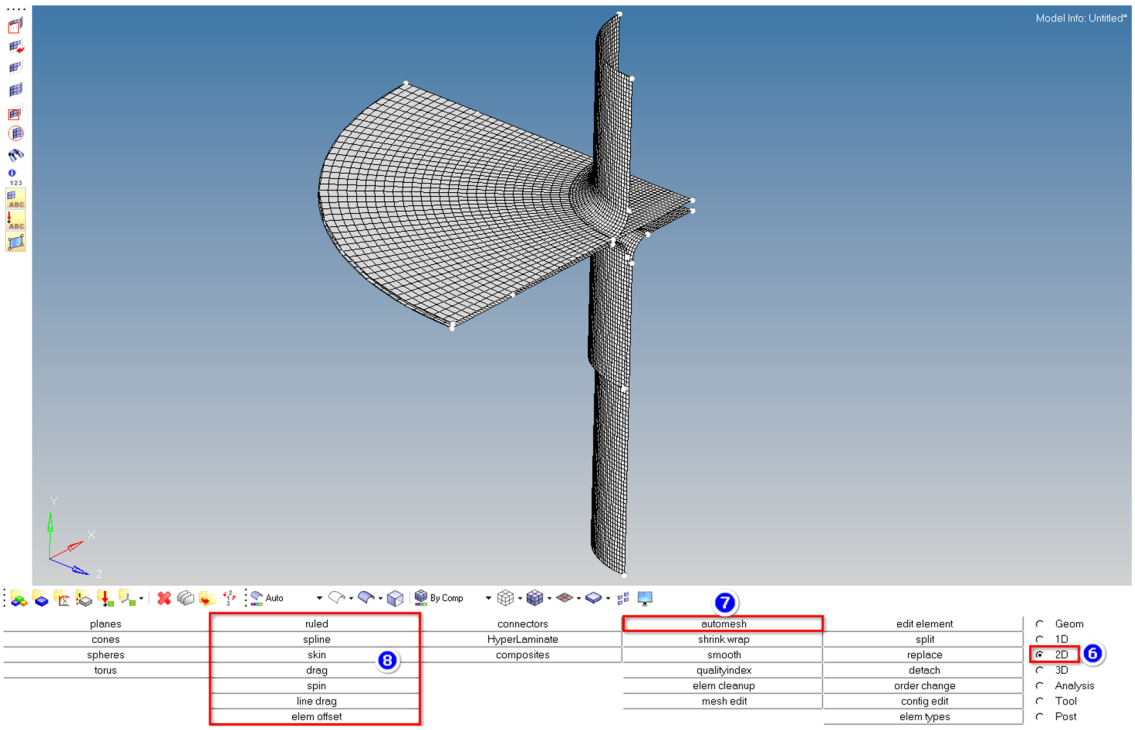
Solidworks 3B tasarım yazılımında yüzeyleri oluşturulan parçaların HyperMesh yazılımına import edilmesi için gerekli işlem adımları Şekil 3.1'de verilmiştir. *Import* işlemi için öncelikle şekildeki 1 numaralı *import* kısmına tıklanır ve 2 numaralı *import model* tıklanarak 3 numaralı kısımdan dosya 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 3.1. Solidworks 3B tasarım yazılımında yüzeyleri oluşturulan parçaların HyperMesh yazılımına import edilmesi

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 imkânsızdır. Dosya tipi seçildikten sonra 4 numaralı kısımdan bilgisayarda yer alan modeller seçilir. Son olarak 5 numaralı *import* butonu tıklanarak model programa import edilmektedir.

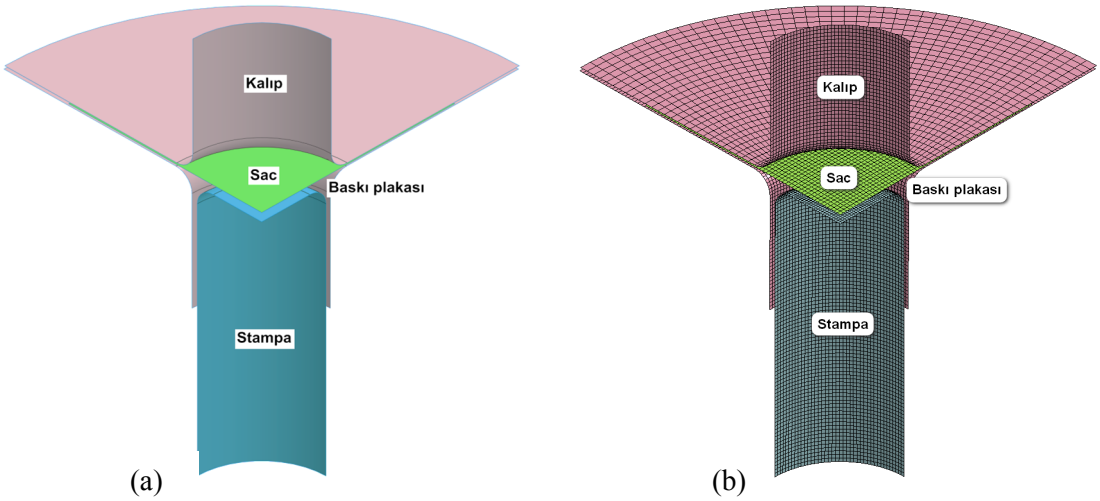
Model HyperMesh yazılımına import edildikten sonra Şekil 3.2'de gösterilen 6 numaralı kısımdan parçalar yüzey olarak modellendiği için *2D* seçilir ve sonra 7 numaralı *automesh* otomatik ağ örme seçeneği seçilir. Bu çalışmada yer alan parçaların geometrilerinin çok fazla karmaşık olmamasından dolayı *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. Ağ yapısı oluşturulduktan sonra oluşan modelin görüntüsü Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Yüzey modelinin HyperMesh yazılımında mesh (ağ) yapısının oluşturulması

Model ağ örme işleminde tüm parçalar için dörtgen eleman kullanılmıştır. İş parçası (sac) 9496 kabuk (shell) elemandan, tüm model ise toplamda 14336 kabuk

elemandan oluşmaktadır. Modelin ağ yapısı oluşturulduktan sonra Şekil 3.1'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 3.3a'da Solidworks 3B tasarım programında modellenen yüzey parçaları, Şekil 3.3b'de ise HyperMesh yazılımında ağ yapısı oluşturulan modelin Ls-PrePost yazılımına import edilmiş hali gösterilmiştir.

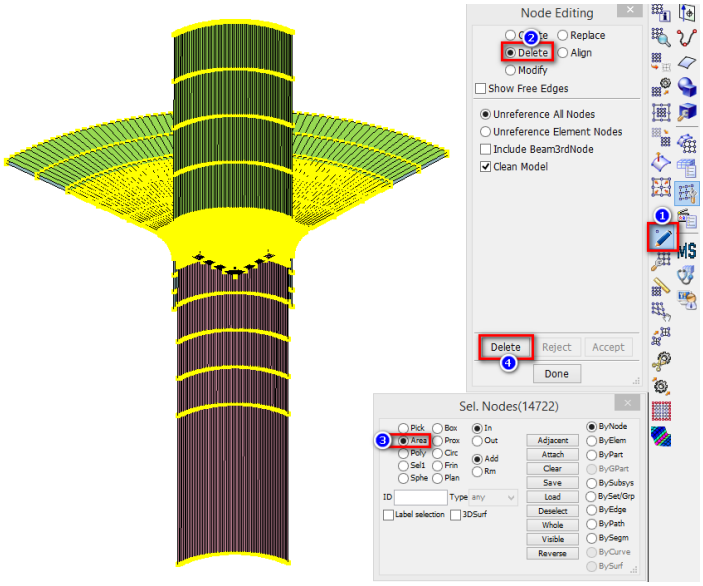


Şekil 3.3. (a) Solidworks yazılımında oluşturulan yüzey modeli, (b) Ls-PrePost yazılımına import edilen mesh yapısı oluşturulmuş model

Model Ls-PrePost yazılımına import edildikten sonra, ağ örme işlemi yapılırken modelde oluşabilecek referanssız düğümleri silmek için Şekil 3.4'te 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.

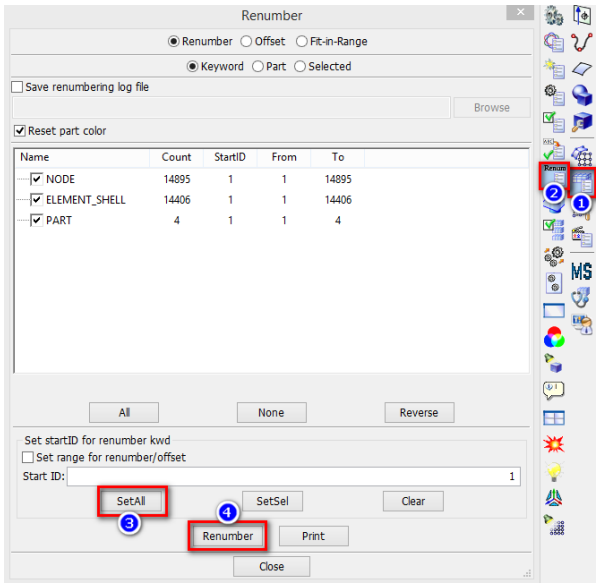
Tüm düğümler silindikten sonra modeldeki düğümlere yeniden numara atanması gerekmektedir. Bunun için Şekil 3.5'te gösterilen işlem adımları gereklidir. Öncelikle 1 numaralı *model and part* kısmından 2 numaralı *renumber* seçeneği seçilir. Daha sonra 3 numaralı *SetAll* ile tüm düğümler, elemanlar ve parça numaraları seçilir ve 4 numaralı *renumber* seçeneği ile seçilen bölümler yeniden numaralandırılır. Referanssız düğümlerin silinmesi ve renumber kısmlarının, 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 3.4. Modeldeki tüm düğümlerin silinmesi

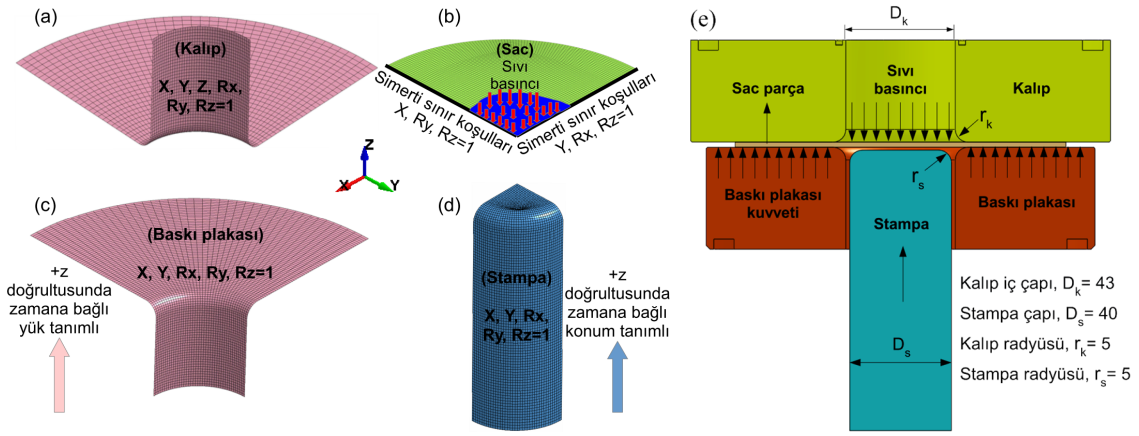
Modele yeni bir parça eklendiğinde Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'teki kısımların yapılması, modeldeki numaralandırmaların sıralı bir şekilde olmasına ve model çözümlenirken düğümler ve elemanlar üzerinden yapılan çeşitli hesaplamaların daha kolay olmasına ve sonuç olarak analizin çözüm süresinin kısalmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Modelde yer alan düğümlere, elemanlara ve parçalara yeniden numara atanması için gerekli renumber işlemi

3.2. Başlangıç ve Sınır Koşulları

HDÇ analizinde nümerik çözüm süresini azaltmak için, prosesi simüle edecek modelin eksenel simetrik yapıya uygun olmasından dolayı bu proses çeyrek olarak modellenmiştir. Şekil 3.6'da modelde kullanılan başlangıç ve sınır şartları ile proses parametreleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Hidromekanik derin çekme modelinde kullanılan sınır koşulları: (a) kalıp, (b) sac, (c) baskı plakası, (d) stampa; (e) proses parametreleri

3.2.1. Kalıp için gerekli şartlar

Şekil 3.6a'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 anlatılacaktır.

3.2.2. Sac için gerekli şartlar

Model çeyrek olduğundan, Şekil 3.6b'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 kısıtlandırılmıştır. 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

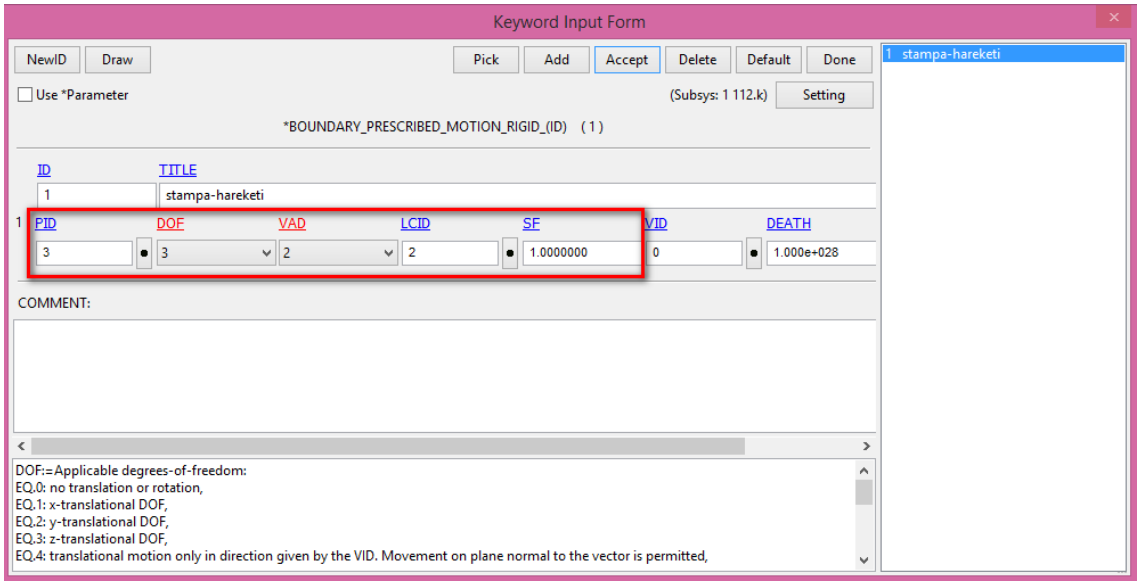
x doğrultusundaki ötelemede kısıt anlamına gelen *DOFX*, *y* ve *z* eksenlerindeki dönmede kısıt anlamına gelen *DOFRY* ve *DOFRZ* birimleri 1 yapılarak seçilen düğümlere sınır şartı uygulanmıştır. Aynı şekilde sacın *x* eksenine paralel olan kenarı için de *DOFY=1*, *DOFRX=1* ve *DOFRZ=1* sınır şartları uygulanmıştır.

3.2.3. Baskı plakası için gerekli şartlar

Şekil 3.6c'de verilen baskı plakasının sadece *z* doğrultusundaki hareketine müsaade edilmiştir. Diğer doğrultulardaki ve tüm eksenlerdeki hareketler ise yine malzeme modelinin tanımlandığı kart kullanılarak kısıtlanmıştır.

3.2.4. Stampa için gerekli şartlar

Şekil 3.6d'de verilen stampa için, baskı plakası ile aynı şekilde sadece *z* doğrultusunda harekete izin verilmiştir. Diğer doğrultularda öteleme ve tüm eksenlerde dönme hareketleri kısıtlanmıştır. Stampa hareketi için yine *DEFINE_CURVE* kartı ile eğri şeklinde zamana bağlı konum tanımlanmıştır.



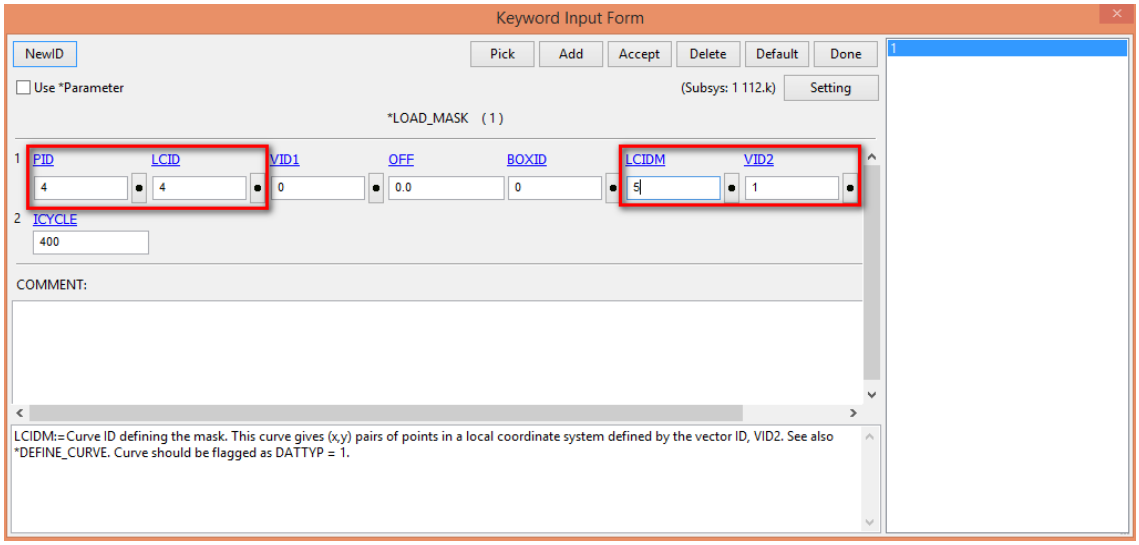
Şekil 3.7. Stampa hareketinin tanımlanması

Stampa için gerekli sınır şartı ise Şekil 3.7'de gösterilen *BOUNDARY_PRESCRIBED-MOTION-RIGID* kartı kullanılarak modele tanımlanmıştır. Burada, *PID* kısmında

stampa, *DOF* kısmında z yönünde hareket için 3 değeri, *VAD* kısmında yüklemenin konuma bağlı olduğunu gösteren 2 değeri, *LCID* kısmında zamana bağlı olarak tanımlana konum eğrisi seçilerek stampa hareketi tanımlanmıştır.

3.2.5. Sıvı basıncının tanımlanması

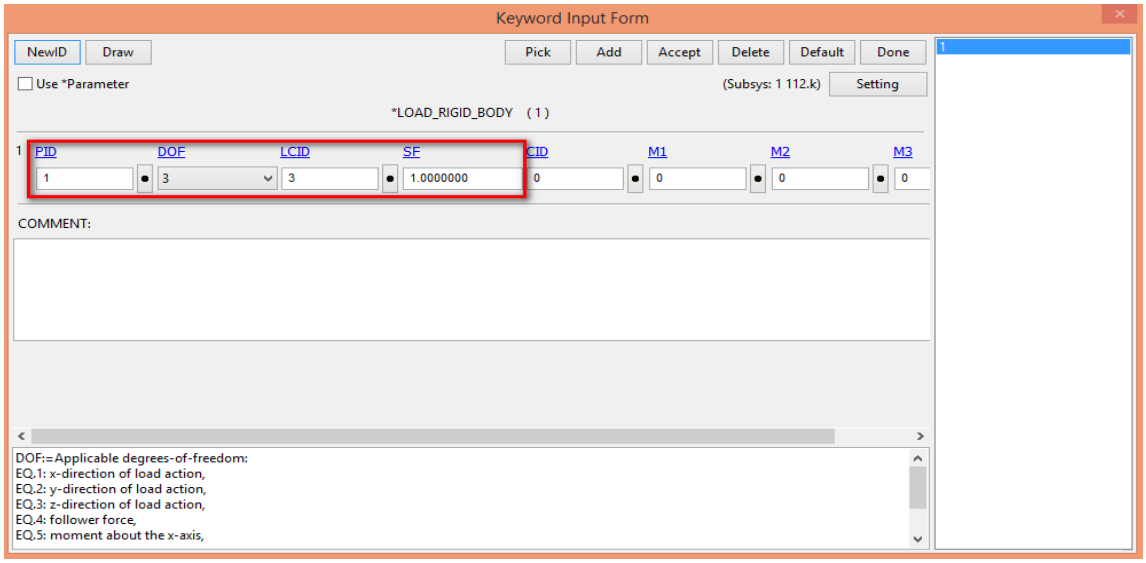
Sac üzerine etki edecek sıvı basıncı tanımlanması için Şekil 3.8'de gösterilen *LOAD_MASK* kartı kullanılmıştır. Bu kart sayesinde tanımlanan aralıklarda kalan elemanların üzerine proses boyunca basınç etki etmektedir. Bu kartta, *PID* kısmında basıncın uygulanacağı parça yani sac, *LCID* kısmında *DEFINE_CURVE* 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 HDÇ prosesinin analizi için uygun değildir. Çünkü bu proseste basıncın etki edeceği bölge merkezden kalıp radyüsü bitimine kadardır ve bu bölge sürekli aynı kalmaktadır. Bu kartın kullanımı ile ilgili gerekli bilgilere Lstc (2013)'ten bakılabilir.



Şekil 3.8. Sıvı basıncının tanımlanması

3.2.6. Baskı plakası kuvvetinin tanımlanması

HDÇ modelinin çeyrek olmasından dolayı baskı plakası kuvveti gerçek değerinin 1/4'ü alınarak analize girilmektedir. Baskı plakası kuvveti için *DEFINE_CURVE* kartı kullanılarak eğri şeklinde zamana bağlı yük tanımlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus yük için *Newton* biriminin kullanılmasıdır. Çünkü LS-DYNA'da birim seçme diye bir şey söz konusu değildir, yazılan değerleri kullanılan kartın fonksiyonuna göre kendisi gerekli birimlere çevirmektedir. Genel olarak kullandığı tutarlı birimler *kg, m, s, N; kg, mm, ms, kN; g, mm, ms, N* veya *ton, mm, s, N* şeklindedir. Dolayısıyla tanımlar yapılırken bu düzene dikkat edilmelidir. Bu çalışmada *ton, mm, s, N* birimleri referans alınmıştır. Zamana bağlı yük tanımlandıktan sonra, Şekil 3.9'da gösterilen *LOAD_RIGID-BODY* kartı ile *PID* kısmından baskı plakası parçası, *DOF* kısmından kuvvetin *z* doğrultusunda uygulanması için 3 değeri, *LCID* kısmında zamana bağlı olarak tanımlanan yük eğrisi seçilmiştir. Tanımlanan yük eğrisindeki ordinat değerleri, gerektiği durumlarda bu kart içerisinde *SF* ölçek faktörü kullanılarak çarpılabilmektedir.

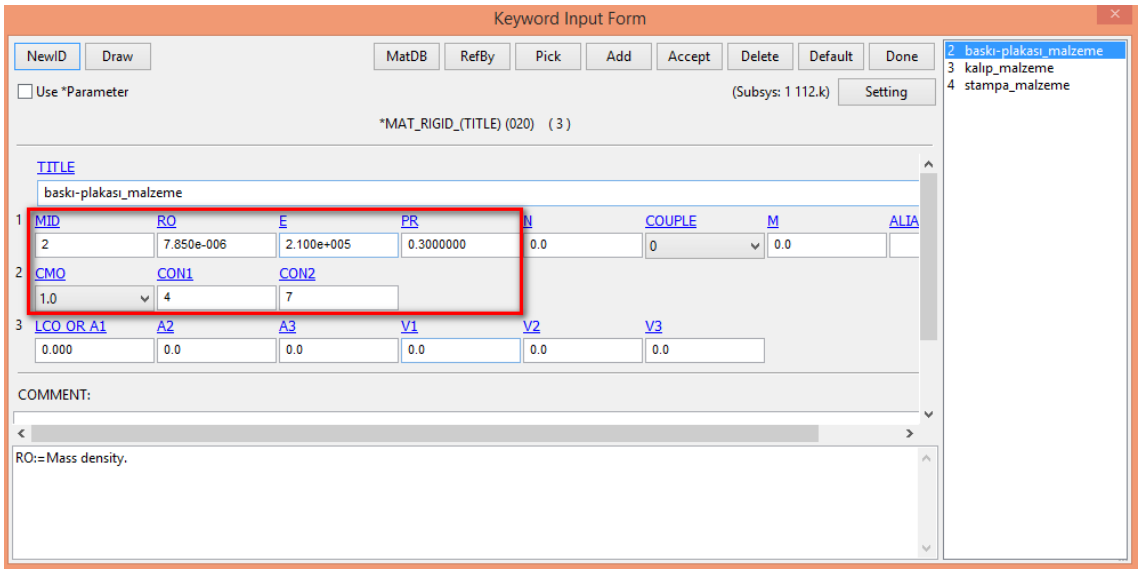


Şekil 3.9. Baskı plakası kuvvetinin tanımlanması

3.3. Malzeme Modeli

HDÇ prosesi için oluşturulan SEA modelinde kalıp, baskı plakası ve stampa rijit olarak modellenmiş ve bu parçalar için Şekil 3.10'da gösterilen 20 numaralı *MAT_RIGID*

malzeme kartı kullanılmıştır. Bu kartta yer alan malzeme özellikleri çelik için malzeme kataloglarından elde edilmiş ve Çizelge 3.1'de verilmiştir. Aynı zamanda kartta bulunan *CMO* kısmı için global yönde kısıt uygulayan 1 değeri, *CON1* kısmı için, baskı plakası ve stampa *z* yönünde öteleme hareketi yapacağından 4 değeri, kalıp tüm yönlerde ve eksenlerde kısıtlı (hareketsiz) olacağından 7 değeri seçilmiştir. *CON2* kısmında ise bu üç parça için tüm eksenlerde dönme hareketi kısıtlı olduğundan 7 değeri seçilmiştir.



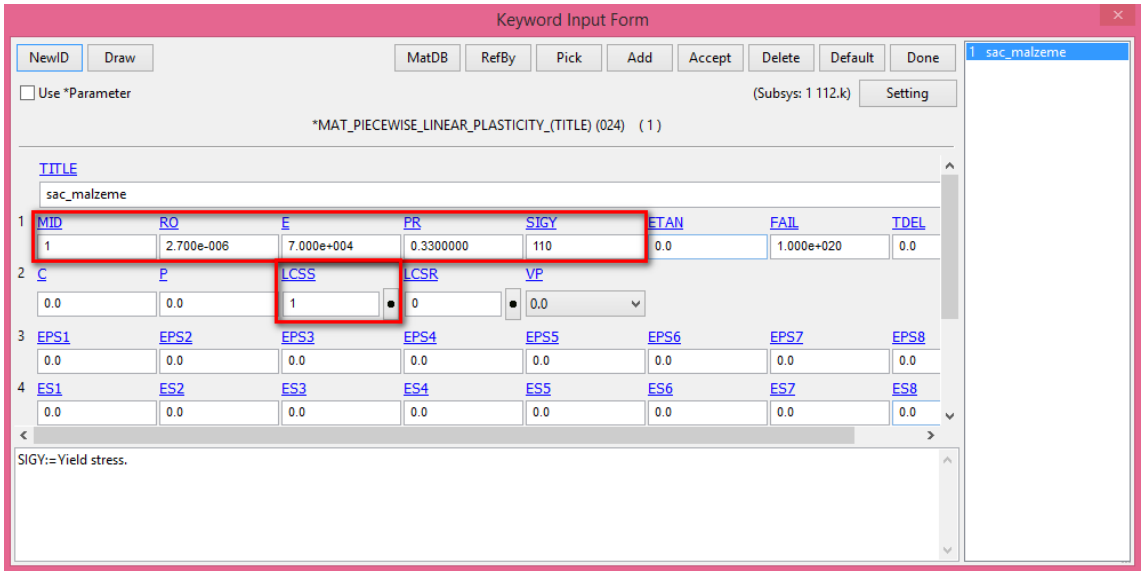
Şekil 3.10. Baskı plakası, kalıp ve stampa için kullanılan malzeme modeli

Çizelge 3.1. Baskı plakası, kalıp ve stampaya ait çelik malzemenin mekanik özellikleri

Elastisite modülü (E) (Mpa)	**Yoğunluk (RO) (kg/mm^3)**	**Poisson oranı (PR)**
2.1×10^5	7.85×10^{-6}	0.33

Al 5754-O alaşımlı alüminyum sac malzemesi ise elastik-plastik olarak modellenmiş ve dolayısıyla analizde Şekil 3.11'de gösterilen 24 numaralı *MAT_PIECEWISE-LINEAR-PLASTICITY* malzeme kartı kullanılmıştır. Bu kartta yer alan *RO*, *E* ve *PR* malzeme özellikleri yine kataloglardan alüminyum malzeme için bulunmuş ve Çizelge 3.2'de verilmiştir. Kartta bulunan *LCSS* kısmında ise *DEFINE_CURVE* ile tanımlanmış olan akma (gerçek gerilme-gerinme) eğrisi seçilmiştir. Türköz ve ark. (2014) tarafından çekme testleriyle elde edilen ve modelde sac parça için kullanılan Al 5754-O alüminyum malzemesine ait akma eğrisi Şekil 3.12'de verilmiştir.

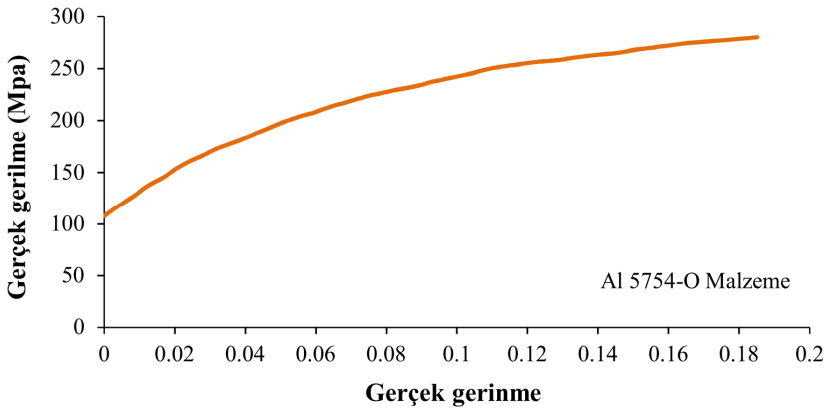
Ayrıca Şekil 3.11'deki *SIGY* kısmına ise Al 5754-O sac malzemenin akma mukavemeti olan 110 Mpa değeri yazılmıştır.



Şekil 3.11. Sac için kullanılan malzeme modeli

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

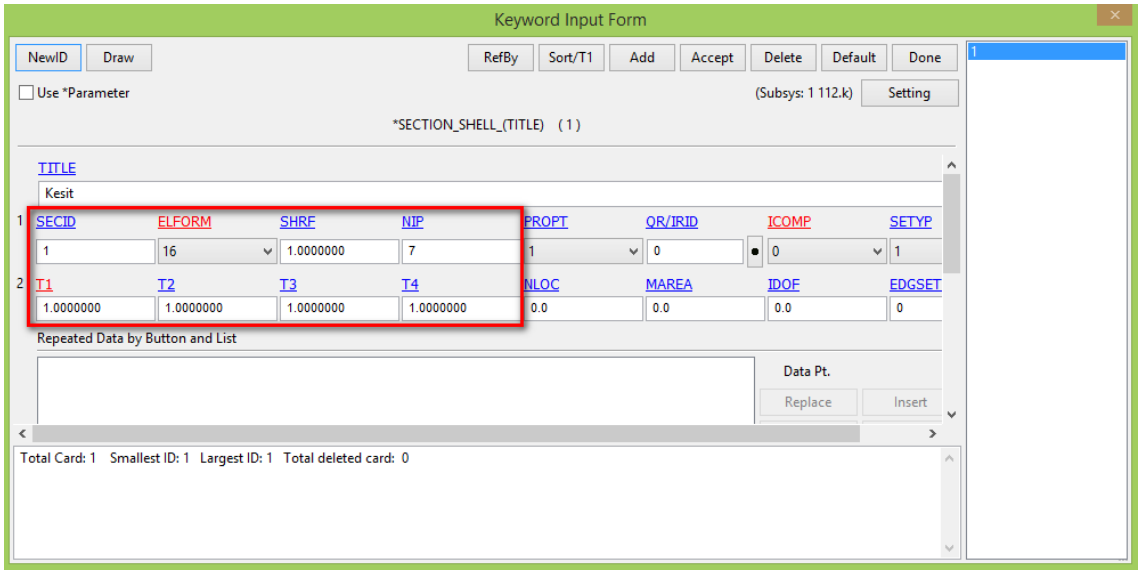
Elastisite modülü (E) (Mpa)	**Yoğunluk (RO) (ton/mm^3)**	**Poisson oranı (PR)**
$7x10^4$	$2.7x10^{-9}$	0.33



Şekil 3.12. Al 5754-O malzemesine ait gerçek gerilme-gerinme eğrisi (Türköz ve ark, 2014)

3.4. Kesit (Section) Özelliğinin Tanımlanması

HDÇ analizi, 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 3.13'te 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 kullanıldığı 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.

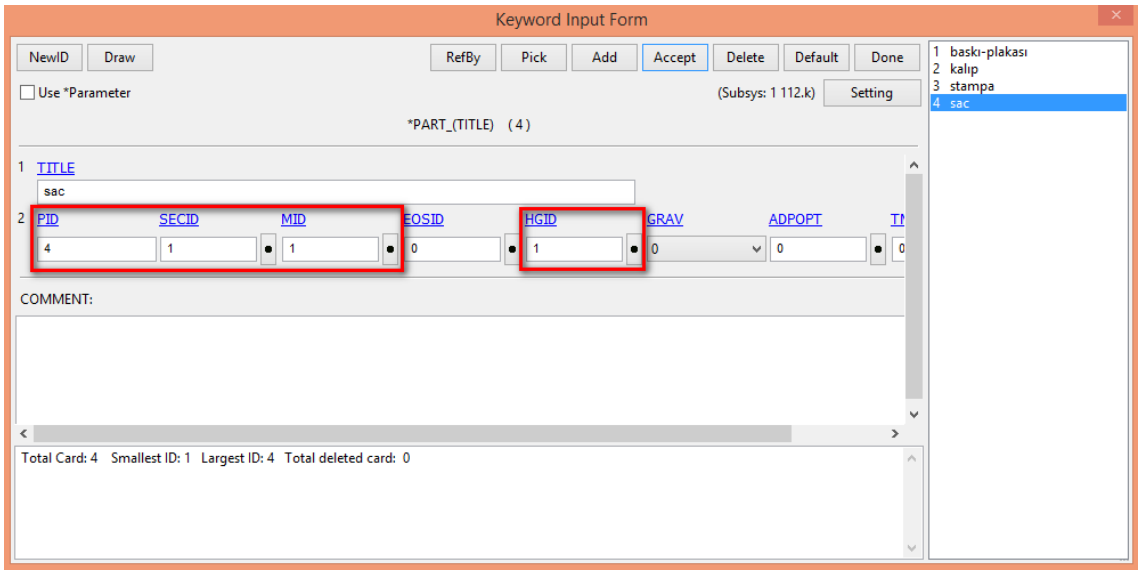


Şekil 3.13. Kesit (section) özelliğinin tanımlanması

3.5. 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 3.14'te gösterilmektedir. Atama işlemi *PART_PART* kartıyla yapılmıştır. Burada kart ile baskı plakası, kalıp, stampa 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 yanal

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.

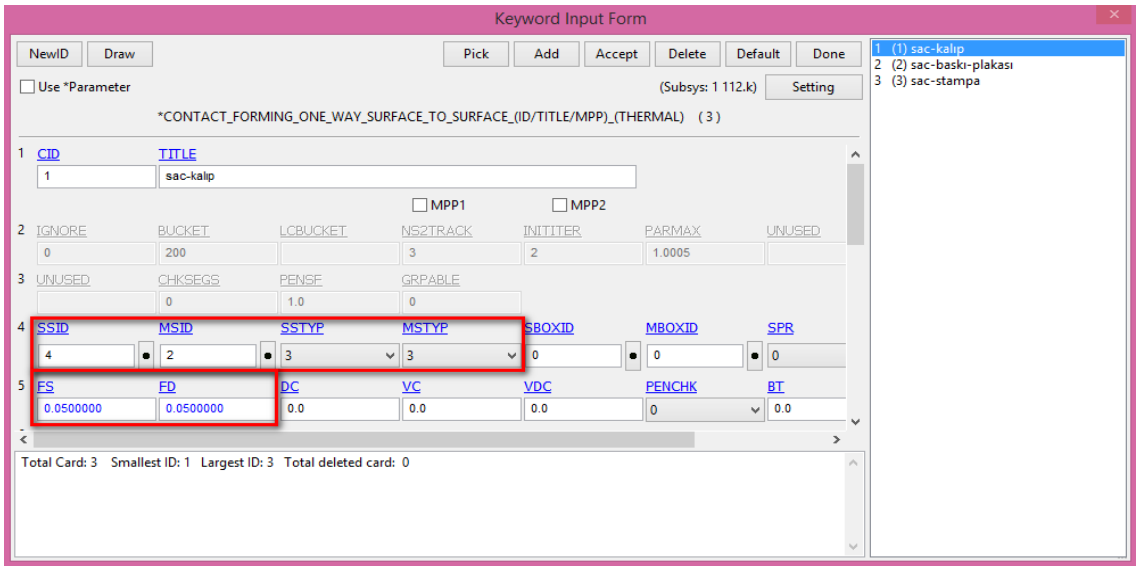


Şekil 3.14. Kesit, malzeme ve hourglass özelliklerinin parçalara atanması

3.6. Parçalar Arasındaki Temasın ve Sürtünmenin Tanımlanması

HDÇ analizinde, şekillendirme sırasında parçalar arasında iç içe geçme (penetration) olmaması ve analizin kararlı olması için sac-baskı plakası, sac-kalıp ve sac-stampa arasındaki temasların ve sürtünmelerin tanımlanması gerekmektedir. LS-DYNA'da HDÇ 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 bağıl 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 stampa gibi) analizler

için uygundur (Anonim 2, 2015). Dolayısıyla bu tez kapsamında HDÇ analizinde bu tip temas algoritması kullanılmış ve Şekil 3.15'te 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 stampa 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 ekstradan set oluşturulmaması için 3 olarak seçilmiştir. Temas eden parçalar arasındaki sırasıyla statik ve dinamik sürtünme katsayılarını ifade eden *FS* ve *FD* kısımlarına ise Çizelge 3.3'te verilen sürtünme katsayıları girilmiştir. Bu değerler ise deney ve analiz sonuçlarını karşılaştırarak katsayıları belirleyen Halkacı ve ark. (2014)'ten alınmıştır.



Şekil 3.15. HDÇ analizindeki parçalar arasında temas ve sürtünme katsayılarının tanımlanması

Çizelge 3.3. Temas eden parçalar arasında tanımlanan sürtünme katsayıları

	Sac-kalıp	**Sac-baskı plakası**	**Sac-stampa**
Sürtünme katsayısı	0.05	0.05	0.25

3.7. Analiz İçin Modelde Açılan Diğer Kartlar

HDÇ 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 ayarlanarak model, bulanık mantık kontrol algoritması kullanılarak hidromekanik derin çekme prosesi için yükleme profillerinin bulunmasına hazır hale getirilmiştir. 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 2.2×10^{-7} olduğu görülmüştür.

4. BULANIK MANTIK KONTROL ALGORİTMASI

Bu tez çalışmasında, HDÇ prosesinde uygun yükleme profillerinin elde edilmesi için Choi ve ark (2007) tarafından önerilen bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yaklaşımı LS-DYNA SEA yazılımı altprogramlarına entegre edilerek kullanılmıştır. Bu kontrol algoritması sayesinde yükleme profilleri, bulanık kontrol parametrelerinin düzenlenip elde edilmesi kısımları dışında sadece tek bir simülasyon yardımıyla elde edilebilmektedir.

HDÇ prosesinde sac parçanın yırtılmaması, yani şekillendirilebilirliğin arttırılması için, bulanık mantık kontrol algoritması yükleme profillerini kontrol ederken şekillendirme esnasında sac malzemede oluşan maksimum incelme durumu kontrol edilmelidir. Sac malzemenin, arzu edilen tasarım şekline uygunluğuna emin olunduktan sonra ise sacın buruşma durumu kontrol edilmelidir. HDÇ prosesi esnasında sacın stampa duvarına temas etmesi, sac ve stampa arasındaki sürtünmeyi arttırdığı ve sonuç olarak ta temas eden bölgelerdeki gerilme seviyesini düşürdüğü için sac parçada oluşabilecek lokal incelmeleri önlemektedir. Ayrıca sacın kalıp radyüsüne temas etmemesi sac ve kalıp radyüsü arasındaki sürtünmeyi azaltmakta ve yine lokal incelmeleri önlemektedir. Dolayısıyla çalışma kapsamında bulanık mantık kontrol algoritmasıyla sacın stampa duvarına temas durumu proses sırasında uygulanabilecek uygun sıvı basıncı profili ile kontrol edilecektir. Aynı şekilde sacın flanş bölgesinde oluşabilecek buruşma ise uygun baskı plakası kuvveti profili ile yok edilmeye çalışılacaktır. Sonuç olarak, HDÇ prosesi sırasında bulanık mantık kontrol algoritması ile maksimum incelme, stampa duvarına temas ve buruşma durumlarının kontrol edilmesiyle elde edilecek uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri sayesinde şekillendirme sonunda arzu edilen iş parçası elde edilmiş olacaktır.

4.1. LS-DYNA SEA Yazılımında Altprogramların Yazılabilme Olanaklarının Araştırılması

Bir programın, belirli bir amaca yönelik herhangi bir alt parçasına altprogram (subroutine) adı verilir. Altprogram, programa yaptırılacak işi böl-parçala yöntemiyle yönetmeyi hedefleyen, tekrar kullanımı öne çıkaran ve bu şekilde hataları daha da azaltan, programlamanın en temel aracıdır. Alt yordamlar program başlangıcında otomatik olarak

çalışmazlar, aksine kullanıcı ihtiyaç duyduğunda programı çağırarak (call) işlem yaptırır. Sonlu elemanlar programlarındaki birçok durum için altprogramlar yazılabilmektedir.

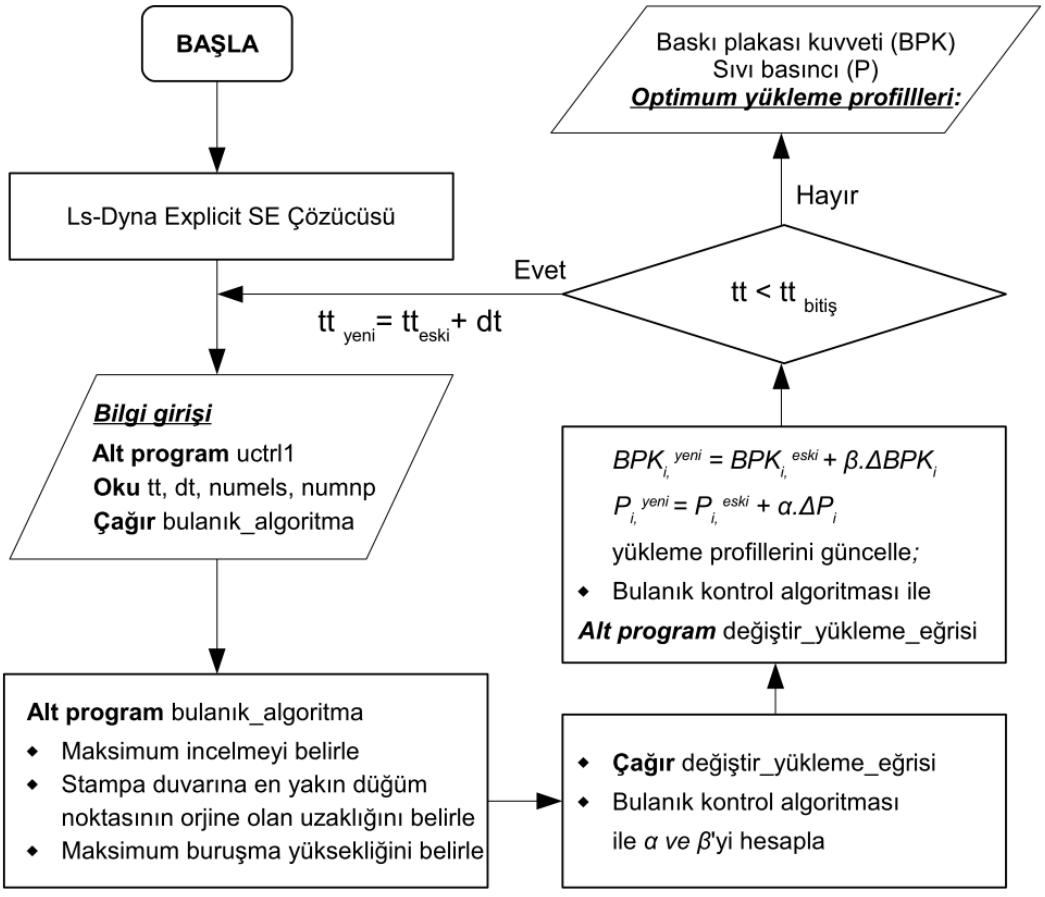
LS-DYNA SEA programında altprogramların yazılabilmesi için programın lisansının alındığı dağıtıcı firma tarafından gerekli kütüphane dosyaları temin edilmiştir. Bu kütüphane dosyalarından *dyn21.f* Fortran kaynak kodlu dosyada çeşitli altprogramlar mevcuttur ve bu dosyada altprogramlar için gerekli bilgiler mevcuttur. Tez kapsamında bulanık mantık kontrol algoritmasının yazılabilmesi için *dyn21.f* dosyasının içeriğinden faydalanılacaktır. Bu dosyada yer alan çeşitli altprogramlar ve bu altprogramların kullanım amaçları Ek-1'de verilmiştir.

4.2. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmalı Adaptif SEA'nın Geliştirilmesi

HDÇ prosesinde uygun yükleme profillerinin bulunması için kullanılacak olan bulanık mantık kontrol algoritması, metal şekillendirme analizlerinde yaygın olarak kullanılan LS-DYNA/Explicit SEA yazılımında yer alan *"uctrl1"* isimli altprograma yazılmıştır. Bu altprogram, LS-DYNA herhangi bir prosesi simüle ederken her bir zaman adımında program tarafından çağrılmaktadır. Dolayısıyla bu altprogram sayesinde, bu altprogram içine yazılan bulanık mantık kontrol algoritması her bir zaman adımında çalıştırılmakta ve gerekli hesaplamalar yine her bir zaman adımında gerçekleştirilebilmektedir. LS-DYNA SEA yazılımında mevcut bulunan altprogramlar *"*.exe"* uzantılı bir solver (çözücü) yardımıyla yazılıma aktarılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, uygun yükleme profillerinin elde edilmesi için *"uctrl1"* altprogramına yazılan bulanık mantık kontrol algoritması LS-DYNA çözücüsüne dönüştürülmüş ve daha sonra HDÇ analizi başlatılmadan önce varsayılan çözücü yerine oluşturulan yeni çözücü seçilerek bulanık mantık kontrol algoritması simülasyonda kullanılmıştır. Bu çözücünün oluşturulması için yapılması gerekenler Ek-2'de, çözücü oluşturulurken oluşabilecek hatalar ise Ek-3'te verilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan, Choi ve ark. (2007) tarafından önerilen bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yönteminde, HDÇ prosesinde uygun yükleme profillerinin belirlenmesi için maksimum yüzde incelme, stampa duvarına temas ve maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkenleri her bir zaman adımında *"uctrl1"* altprogramında 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 ta çıkış bulanık

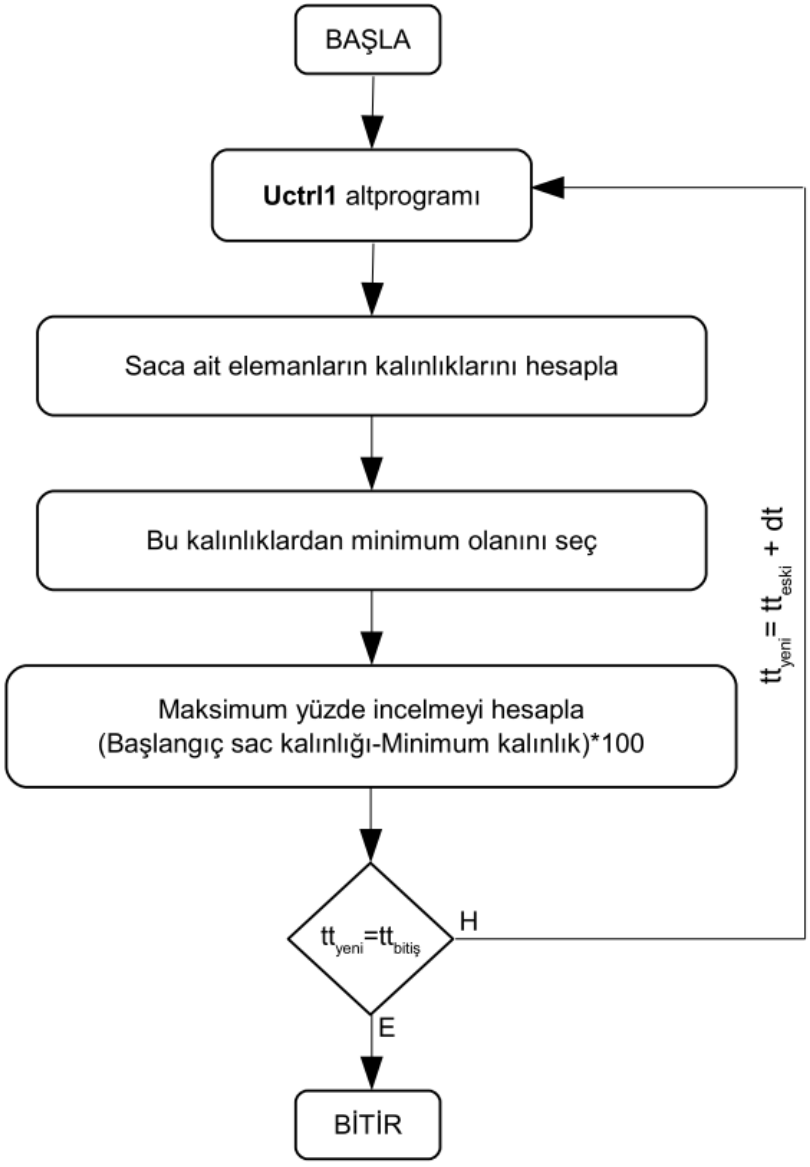
üyelik dereceleri hesaplanmaktadır. Son olarak, bulanık mantık kontrol algoritması yardımıyla elde edilen ve -1 ile +1 arasında bir değere sahip olan kesin çıkışlar (α, β) Şekil 4.1'de verilen akış şemasındaki adaptif yükleme terimini temsil eden denklemlerde yerine konularak yeni zaman adımında uygulanacak olan yeni sıvı basıncı (P_i^{yeni}) ve baskı plakası kuvveti (BPK_i^{yeni}) değerleri hesaplanmaktadır. Akış şemasında verilen *tt* anlık analiz süresini, *dt* zaman adımını, *numels* analizdeki toplam eleman sayısını ve *numnp* ise toplam düğüm noktası sayısını ifade etmektedir. Ayrıca denklemlerde yer alan P_i^{eski} ve BPK_i^{eski} ifadeleri bir önceki zaman adımında elde edilen sırasıyla sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetini, ΔP_i ve ΔBPK_i ifadeleri ise sırasıyla ön tanımlı sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti değerlerini temsil etmektedir. Yapılan analizler sonucunda uygun ön tanımlı yükleme değerleri ΔP_i=0.7 Mpa ve ΔBPK_i=0.05 kN olarak bulunmuştur. Bu değerler, bulanık mantık kontrol algoritmasının yeterli yükleme profillerini oluşturacağı şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.1. HDÇ prosesinde uygun yükleme profillerini bulunması için kullanılan bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yaklaşımına ait akış şeması

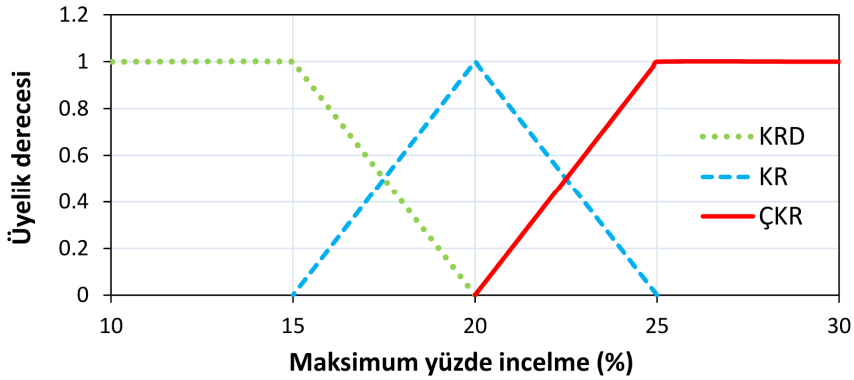
4.2.1. Maksimum yüzde incelme giriş değişkeni

Maksimum yüzde incelme giriş değişkeni değeri için her bir zaman adımında sac malzemedeki 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 (Şekil 4.2). Bu giriş değişkeni için bulanık mantık kontrol algoritmasında kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Maksimum yüzde incelme giriş değişkeninin bulunmasına ait akış şeması

Maksimum yüzde incelme giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonu oluşturulurken HDÇ deneylerinden ve literatür bilgisinden yararlanılmıştır. Deneylerden gözlemlendiği kadarıyla genelde maksimum yüzde incelme %25'i geçtiğinde Al 5754-O sac malzemede yırtılma meydana gelmiştir. Bu yüzden maksimum yüzde incelme giriş değişkeninin üyelik fonksiyonu için sacda oluşan maksimum %25 incelmenin çok kritik (ÇKR) dilsel ifadesine ait olması gerektiği düşünülmüştür. Bu şekilde KR ve KRD ifadelerine ait değerler de belirli aralıklarda tanımlanıp maksimum yüzde incelme giriş değişkeni için gerekli üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur.



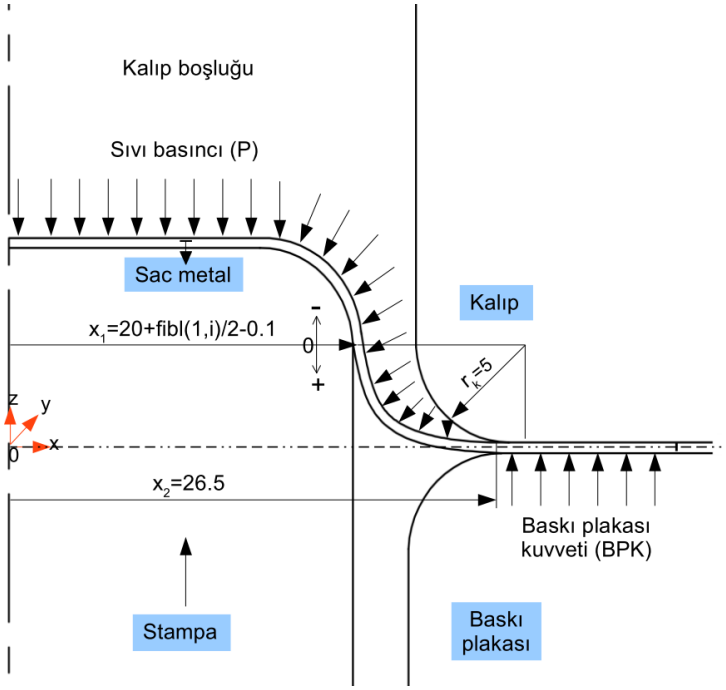
Şekil 4.3. Maksimum yüzde incelme giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

4.2.2. Stampa duvarına temas giriş değişkeni

Stampa duvarına temas giriş değişkeni değeri, analizde her bir zaman adımında Şekil 4.4'te görüldüğü gibi stampa duvarına en yakın düğüm noktasının kontrol edilmesiyle belirlenmektedir. En yakın düğüm noktası için kalıp radyüsünün merkezi referans alınmaktadır. Bu referansın üst kısmı negatif, alt kısmı ise pozitif olarak nitelendirilmektedir. Referans noktasından dolayı bu yöntem, stampa burun radyüsü bitimi kalıp radyüsü merkezine eriştikten sonra çalışabilmektedir.

HDÇ prosesi boyunca stampaya en yakın noktanın pozitif bölge içerisinde kalması arzu edilmekte, yani stampa duvarına temas kriterinin sağlanması istenmektedir. Bu giriş değişkeni için analiz boyunca her bir zaman adımında $x_1=20+fibl(1, i)/2-0.1$ ile $x_2=26.5$ arasındaki bölgede kalan düğümlerden, kalıp ve baskı plakası arasında kalan sacın orta noktası orijin kabul edilerek z koordinatı maksimum olanı ($+z$ doğrultusunda) seçilmekte ve daha sonra bu değerin referans noktası olan kalıp radyüsü merkezine olan z mesafesi başına düğüm negatif bölgedeyse -, pozitif bölgedeyse + konarak

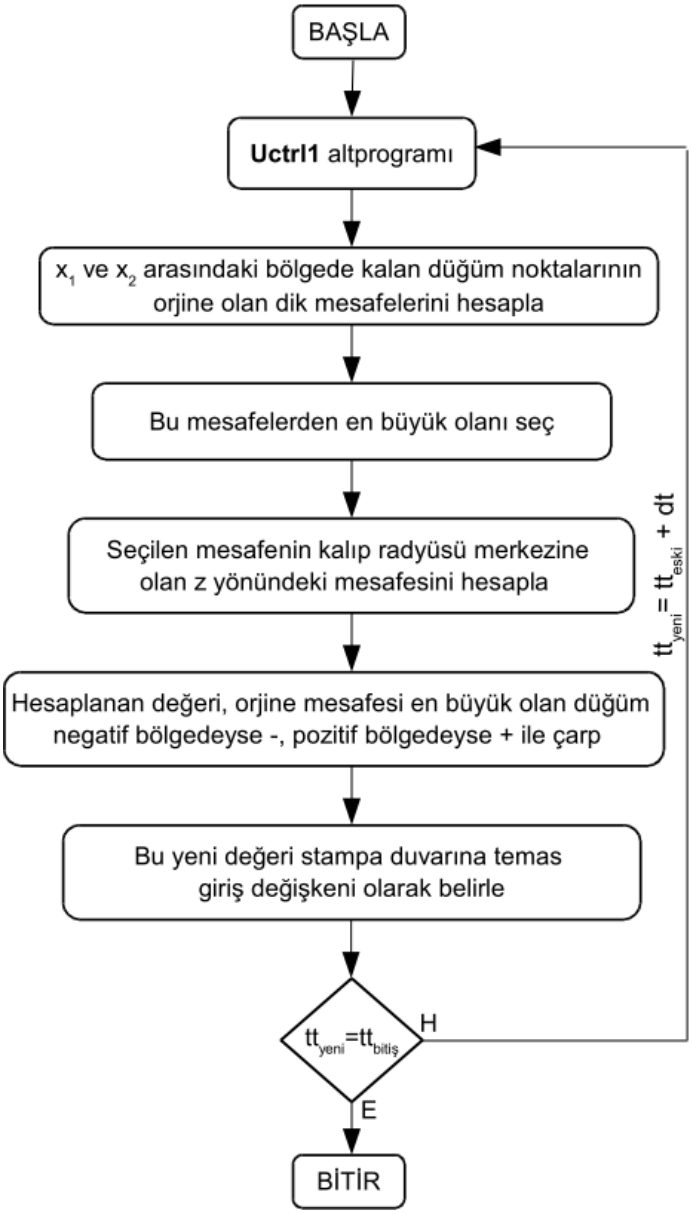
hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer ise stampa duvarına temas giriş değişkeni değeri olarak bulanık mantık kontrol algoritmada kullanılmak üzere seçilmektedir (Şekil 4.5). Bu algoritmada x_1 mesafesinin hassas ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde her bir zaman adımında yanlış düğüm noktası seçilerek bulanık mantık kontrol algoritmasının yanlış hesap yapmasına neden olunur.



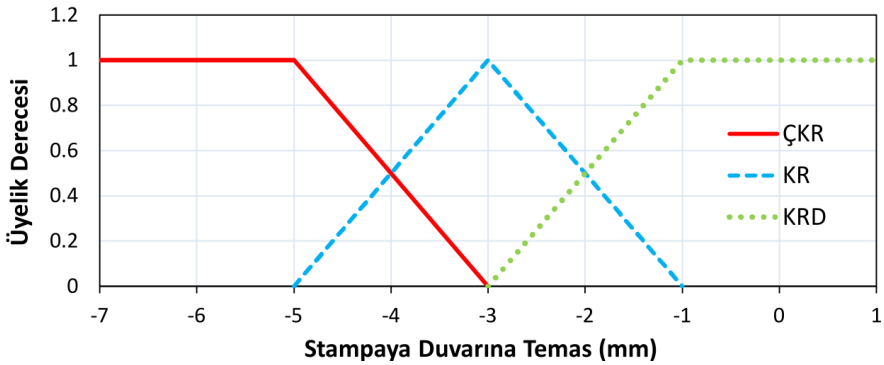
Şekil 4.4. Stampa duvarına temas giriş değişkeninin bulunması

Analizde kabuk (shell) eleman kullanıldığından stampa ile sac arasında sac kalınlığının yarısı kadar bir mesafe olmakta ve bu durumda sac ile stampa 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. Dolayısıyla x_1 mesafesi her bir zaman adımında (stampa yarıçapı + sac kalınlığı/2) olacak şekilde hesaplatılmıştır. Son olarak bu mesafeden 0.1 mm'lik bir mesafe çıkartılmış ve stampaya en yakın düğümün doğru ve hassas bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır. Stampaya en yakın düğümün doğru seçilip seçilmediği, analiz sırasında her bir zaman adımında seçilen düğüm numarasının dosyaya yazdırılıp Ls-PrePost'ta analiz ile karşılaştırılması yapılarak doğrulanmıştır.

Bu giriş değişkeni için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Bu üyelik fonksiyonundaki sınır değerleri, farklı değerler ile yapılan analizler sonucunda elde edilmiştir. Bu kısım ileride anlatılacaktır.

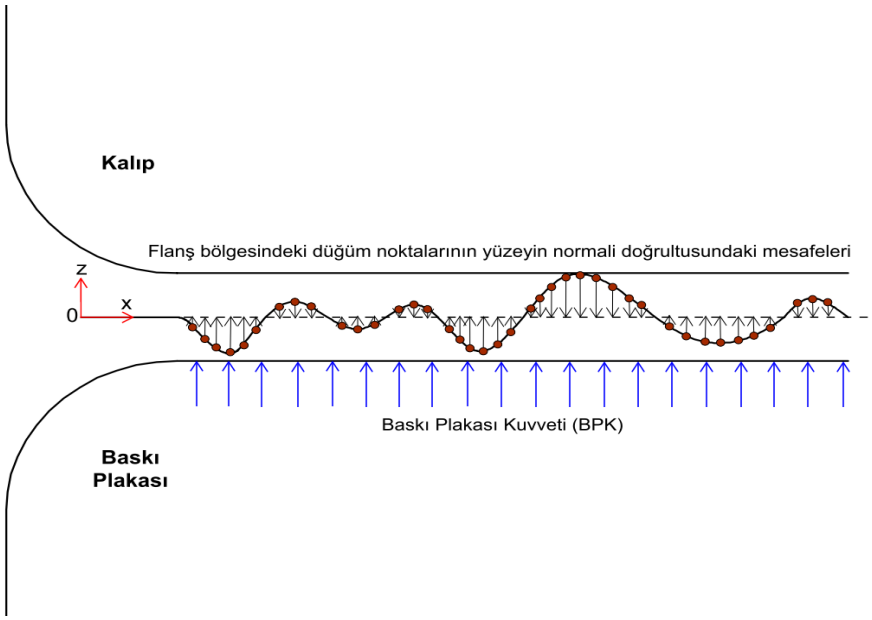


Şekil 4.5. Stampa duvarına temas giriş değişkeninin bulunmasına ait akış şeması

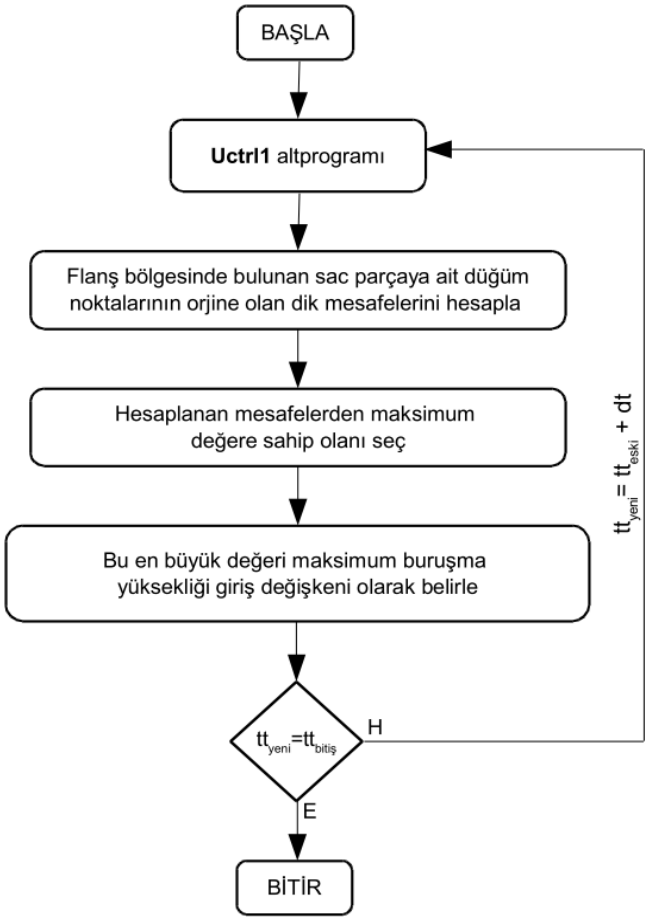


Şekil 4.6. Stampa duvarına temas giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

4.2.3. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeni



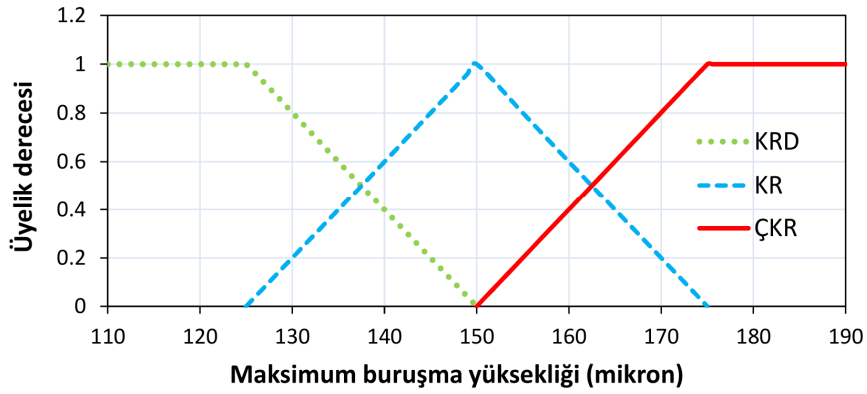
Şekil 4.7. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkeninin bulunması



Şekil 4.8. Maksimum buruşma giriş değişkeninin bulunmasına ait akış şeması

Şekil 4.7'de 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 4.8).

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 4.9'da verilmiştir.

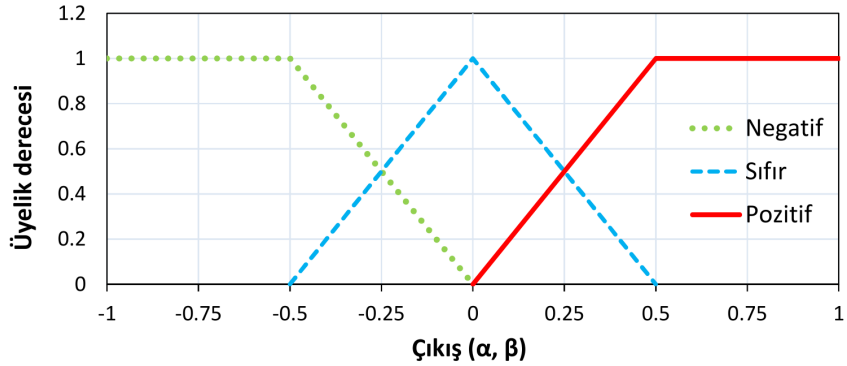


Şekil 4.9. Maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonları

4.2.4. Çıkış değişkenleri

Bulanık mantık kontrol algoritmasında uygun basınç profilinin belirlenmesi için α, uygun baskı plakası kuvveti profilinin belirlenmesi için ise β çıkış değişkenleri kullanılmaktadır. Algoritmada yer alan α çıkış değişkeninin her bir zaman adımında hesaplanması için, uygun sıvı basıncı profilinin kontrolünde HDÇ prosesinde en etkili parametreler olan maksimum yüzde incelme ve stampa duvarına temas giriş değişkenleri; β çıkış değişkeninin her bir zaman adımında hesaplanması için ise uygun BPK profilinin kontrolünde HDÇ prosesinde en etkili parametreler olan maksimum yüzde incelme ve maksimum buruşma yüksekliği giriş değişkenleri kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA'da eğer α veya β negatif, pozitif veya sıfır hesaplanırsa bu, o zaman adımında sıvı basıncı veya baskı plakası kuvvetinin sırasıyla azaltılması (-), arttırılması (+) veya değiştirilmemesi (0) gerektiği anlamına gelmektedir. Kontrol algoritmasında kullanılan negatif, sıfır ve pozitif üyelik fonksiyonları Şekil 4.10'da

gösterilmektedir. Her iki α ve β çıkış değişkeni için de aynı üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır.



Şekil 4.10. Çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları

4.2.5. 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, sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetini bulmak için gerekli iki ayrı matris mevcuttur ve bu matrisler yüklemelerin (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetlerinin) arttırılması, azaltılması veya değiştirilmemesi gibi kararların belirlenmesi için gerekli kurallardan oluşmaktadır. Choi ve ark. (2007) tarafından uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerinin belirlenmesi için kullanılan ve bu yükleme profillerinin her bir zaman adımında, kullanılan giriş değişkenlerinin aldığı değerlere göre nasıl değiştirilmesi gerektiğini gösteren sıvı basıncı ve BPK profillerinin elde edilmesine ait bulanık kural-tabanlı matrisleri sırasıyla Çizelge 4.1a'da ve Çizelge 4.1b'de verilmiştir. Çizelgelerden görüldüğü gibi her iki kural matrisinde de 9 adet kural (K_1-K_9) mevcuttur ve bu matrisler de aynı kurallara sahiptir. Örneğin burada Çizelge 4.1a'ya bakıldığında stampa duvarına temas giriş değişkeni değeri çok kritik (ÇKR) ve maksimum yüzde incelme giriş değişkeni kritik değil (KRD) ise kural 7 (K_7) gereği sıvı basıncını azalt denilmiştir. Çizelge 4.1b'ye bakıldığında ise örneğin maksimum buruşma yüksekliğine bakılmaksızın maksimum yüzde incelme çok kritik (ÇKR) ise baskı plakası kuvveti azaltılmalıdır (K_1, K_2 ve K_3) denilmiştir. Bu kural matrislerinin HDÇ prosesi için uygun olup olmadığı, ileride yapılacak en uygun kural matrislerinin belirlenmesi bölümü kapsamında incelenecektir.

Çizelge 4.1. Uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerinin belirlenmesi için kullanılan bulanık kural-tabanlı matrisler (Choi ve ark., 2007)

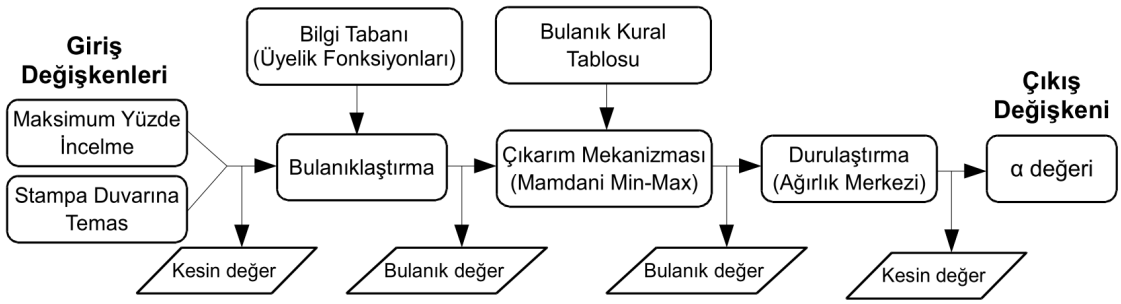
(a)

P	Stampa duvarına temas		
Maksimum yüzde incelme		ÇKR	KR	KRD
	ÇKR	K_1 (-)	K_2 (-)	K_3 (-)
	KR	K_4 (+)	K_5 (0)	K_6 (-)
	KRD	K_7 (+)	K_8 (+)	K_9 (0)

(b)

BPK	Maksimum buruşma yüksekliği		
Maksimum yüzde incelme		ÇKR	KR	KRD
	ÇKR	K_1 (-)	K_2 (-)	K_3 (-)
	KR	K_4 (+)	K_5 (0)	K_6 (-)
	KRD	K_7 (+)	K_8 (+)	K_9 (0)

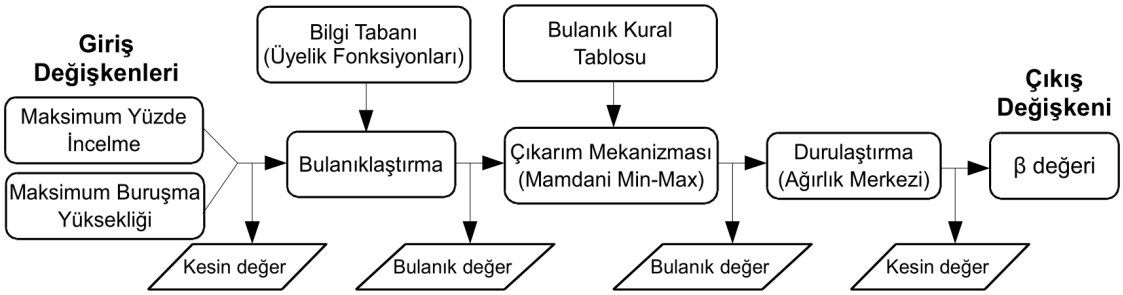
Tez kapsamında uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerinin bulunması adına tasarlanan bulanık kontrol sistemlerinin genel yapısı sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Uygun sıvı basıncı profilinin belirlenmesi için tasarlanan bulanık sistemin yapısı

Şekil 4.11'e bakıldığında, bulanık mantık kontrol algoritmasında, uygun sıvı basıncı profilinin bulunması için giriş değişkenleri olarak maksimum yüzde incelme ve stampa 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, azaltılması veya değiştirilmemesi) ve son olarak durulaştırma işlemi yani ağırlık merkezi yöntemi ile kesin çıkış değeri α'nın hesaplanması adımları gösterilmektedir. Şekil 4.12'ye bakıldığında uygun BPK profilinin bulunması için ise giriş değişkenleri olarak maksimum yüzde incelme ve maksimum buruşma yüksekliğinin kullanıldığı görülmektedir. Diğer işlemler uygun sıvı basıncı profilinin bulunması adımları ile aynıdır. Burada kesin çıkış olarak ise

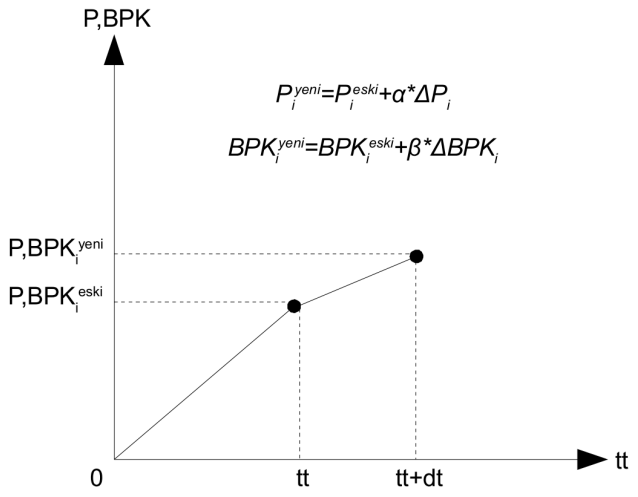
β değeri hesaplanmaktadır. HDÇ prosesinde bulanık mantık kontrol algoritmasının nasıl çalıştığı bir sonraki bölümde anlatılacaktır.



Şekil 4.12. Uygun baskı plakası kuvveti profilinin belirlenmesi için tasarlanan bulanık sistemin yapısı

4.3. Altprogram Yardımıyla Yükleme Eğrilerinin Değiştirilmesi

Bulanık mantık kontrol algoritması ile elde edilen α ve β değişkenleri yardımıyla, her bir zaman adımında HDÇ analizine uygulanması gereken yeni sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti değerleri için analizin *keyword* (model) dosyasında yükleme eğrilerinin tanımlandığı *DEFINE_CURVE* kartına her iki yükleme için de iki nokta girilmiştir. Bu iki nokta iki ayrı apsis ve ordinat değerlerine sahiptir. Şekil 4.13'te herhangi bir zaman adımında yeni yükleme değerlerinin modele nasıl uygulandığı gösterilmiştir. Burada, bir önceki zaman adımındaki yükleme değerleri olan eski P ve BPK değerlerini bir sonraki zamana adımında da kullanmak için Fortran programlama dilinde *common* komutu kullanılmıştır.



Şekil 4.13. Her bir zaman adımında belirlenen yeni sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti değerlerinin altprogram yardımıyla analize uygulanması

Sonuç olarak model dosyasına tanımlanan bu iki eğri noktası her bir zaman adımında güncellenerek analiz sonunda uygun yükleme değerleri eğri şeklinde elde edilmiştir. Detaylı bilgiye bulanık mantık kontrol algoritmasının yazımı için gerekli kodların yer aldığı EK-4'ten bakılabilir.

4.4. Bulanık Mantık Kontrol Algoritmasının HDÇ Prosesine Uygulanması

Aşağıda, belirli bir zaman adımında BPK'nın arttırılması, azaltılması veya değiştirilmemesi gibi kararlarını belirleyen kesin çıkış değeri β'nın hesaplanması esnasında bulanık mantık kontrol algoritmasının nasıl çalıştığını açıklayan bir örnek verilmiştir. Sıvı basıncı için gerekli kesin çıkış α değerinin hesaplanması da aynı prosedürü takip etmektedir. Bu örnekte Choi ve ark. (2007) tarafından BPK'nın bulunması için önerilen ve Çizelge 4.1b'de verilen bulanık kural-tabanlı matris kullanılmıştır.

1. Analiz esnasında belirli bir zaman adımında maksimum yüzde incelmenin %18 ve maksimum buruşma yüksekliğinin 167 μm (mikron) olduğunu farz edelim.

2. 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 (Şekil 4.3); 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 (Şekil 4.9).

3. 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) sıfıra 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.

$K_4 = MIN\ (KR_{maks.\ yüzde\ incelme},\ ÇKR_{maks.\ buruşma\ yük.}) = MIN\ (0.6,\ 0.66) = 0.6\ (pozitif)$

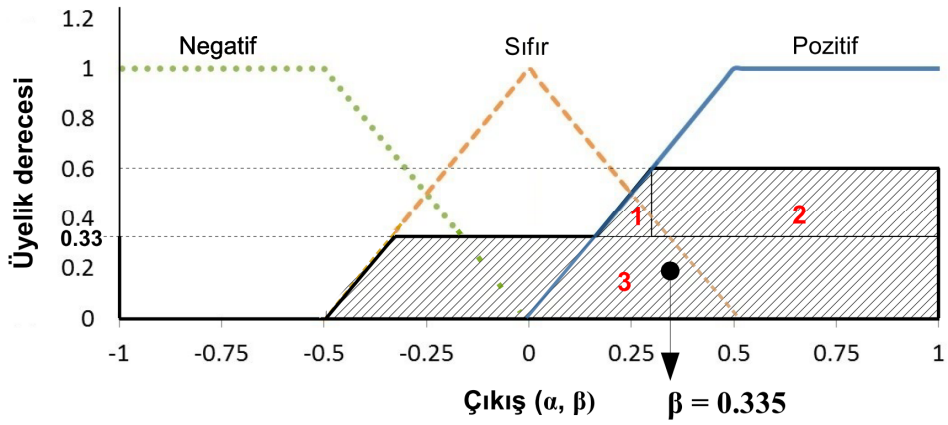
$K_5 = MIN\ (KR_{maks.\ yüzde\ incelme},\ KR_{maks.\ buruşma\ yük.}) = MIN\ (0.6,\ 0.33) = 0.33\ (Sıfır)$

$K_7 = MIN\ (KRD_{maks.\ yüzde\ incelme},\ ÇKR_{maks.\ buruşma\ yük.}) = MIN\ (0.4,\ 0.66) = 0.4\ (pozitif)$

$K_8 = MIN\ (KRD_{maks.\ yüzde\ incelme},\ KR_{maks.\ buruşma\ yük.}) = MIN\ (0.4,\ 0.33) = 0.33\ (pozitif)$

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= MAX (0.6, 0.4, 0.33)=0.6* olacaktır. Sıfır çıkış üyelik fonksiyonu tek olduğundan zaten sıfır çıkışının üyelik derecesi 0.33 olacaktır.

4. 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 4.14). Burada hesaplanan 0.335 β değeri, baskı plakası kuvvetinin mevcut zaman adımının sonunda *0.335xΔBPK*'lık kadar arttırılması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu şekilde bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif yöntem analizde her bir zaman adımında çalışarak uygun yükleme profilleri analiz sonunda eğri şeklinde elde edilmektedir.



Şekil 4.14. Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile kesin çıkış β'nın bulunması

4.5. En Uygun Kural-Tabanlı Matrislerin Belirlenmesi

Bu bölümde HDÇ prosesi için sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetini kontrol eden en uygun kural-tabanlı matrisler araştırılmıştır. Düzenlenecek matrisler Choi ve ark. (2007) tarafından alınan matrislerdir (Çizelge 4.1) ve bu matrisler birinci kural tabanı matrisi (1. KM) olarak isimlendirilmiştir. Bu matrislerde K_1 ve K_6 arasındaki kuralların HDÇ prosesi için uygun olmadığı düşünüldüğünden dolayı bu matrisler düzenlenmiştir. Örneğin Choi ve ark. (2007), çalışmalarında K_1, K_2 ve K_3 kurallarını, sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetini stampa duvarına temas ve buruşma yüksekliğine bakılmaksızın düşürmek amaçlı oluşturmuşlardır (Çizelge 4.1). Bu da, eğer minimum kalınlık (bu tez çalışmasında maksimum yüzde incelme) çok kritik olursa (ÇKR) yükleme profillerinin sürekli azalacağı anlamına gelmektedir (Çizelge 4.1a). Çünkü HDÇ prosesinde her bir zaman adımında elde edilen minimum kalınlık (maksimum yüzde incelme) proses devam ettikçe artmayıp aksine azalmaktadır. Dolayısıyla bu kural-tabanlı matrisler kullanıldığında yükleme profilleri de belli bir süre sonra zıt doğrultuda etki etmeye başlayacaktır. Bu durum Choi ve ark. (2007)'nın çalışmalarında minimum kalınlık giriş değişkeni proses boyunca hiçbir zaman çok kritik (ÇKR) değerine ulaşmadığı için herhangi bir sorun teşkil etmemiştir.

Çizelge 4.2. (a) sıvı basıncı (P)'nın kontrolü, (b) baskı plakası kuvveti (BPK)'nın kontrolü için gerekli ikinci/üçüncü kural-tabanlı matrisler

(a)

P	Stampa duvarına temas			
Maksimum yüzde incelme		ÇKR	KR	KRD
	ÇKR	K_1 (+)	K_2 (0)	K_3 (-)
	KR	K_4 (+)	K_5 (0)	K_6 (0)
	KRD	K_7 (+)	K_8 (+)	K_9 (0)

(b)

BPK	Maksimum buruşma yüksekliği			
Maksimum yüzde incelme		ÇKR	KR	KRD
	ÇKR	K_1 (0)	K_2 (0)	K_3 (0)
	KR	K_4 (+)	K_5 (0)	K_6 (0/-)
	KRD	K_7 (+)	K_8 (+)	K_9 (0)

Bulanık mantık kontrol algoritmasının kararlılığını ve doğruluğunu arttırmak için, Choi ve ark. (2007) tarafından önerilen matrisler, yapılan analizler sonucunda sacda oluşan maksimum yüzde incelme değerleri kıyaslanarak düzenlenmiştir. Çalışmada, ikinci, üçüncü ve dördüncü (2.KM, 3.KM ve 4.KM) diye isimlendirilen üç adet kural-tabanlı matrisleri Çizelge 4.1'deki matrislerin (1.KM) düzenlenmesiyle oluşturulmuş ve bu matrisler karşılaştırılmıştır. Oluşturulan ikinci ve üçüncü

kural-tabanlı matrisler Çizelge 4.2'de, dördüncü kural-tabanlı matrisler ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.1a'daki matrislerden farklı olarak, Çizelge 4.2a'da gösterilen ve sıvı basıncını kontrol eden kurallar şu şekilde düzenlenmiştir:

Eğer maksimum yüzde incelme KR ve stampaya temas KRD ise sıvı basıncı değiştirilmemeli; eğer maksimum yüzde incelme ÇKR ve stampa duvarına temas ÇKR, KR ya da KRD ise sıvı basıncı sırasıyla arttırılmalı, değiştirilmemeli ya da azaltılmalıdır. Çizelge 4.1b'deki matrislerden farklı olarak, Çizelge 4.2b'de verilen ve baskı plakası kuvvetini kontrol eden kurallar şu şekilde düzenlenmiştir: eğer maksimum yüzde incelme ve maksimum buruşma yüksekliği KRD ise baskı plakası kuvveti değiştirilmemeli; eğer maksimum yüzde incelme ÇKR ise maksimum buruşma yüksekliğine bakılmaksızın BPK değiştirilmemelidir. Üçüncü kural matrisleri için sadece, BPK'yı kontrol eden kural matrisi olan "eğer maksimum yüzde incelme KR ve maksimum buruşma yüksekliği KRD ise BPK'yı değiştirme" durumu BPK'yı azalt (-) şeklinde değiştirilmiştir.

Çizelge 4.3. (a) sıvı basıncı (P)'nın kontrolü, (b) baskı plakası kuvveti (BPK)'nin kontrolü için gerekli dördüncü kural-tabanlı matrisler

(a)

P	Stampa duvarına temas		
Maksimum yüzde incelme	ÇKR	KR	KRD
ÇKR	K_1 (+)	K_2 (0)	K_3 (0)
KR	K_4 (+)	K_5 (0)	K_6 (0)
KRD	K_7 (+)	K_8 (+)	K_9 (0)

(b)

BPK	Maksimum buruşma yüksekliği		
Maksimum yüzde incelme	ÇKR	KR	KRD
ÇKR	K_1 (0)	K_2 (+)	K_3 (0)
KR	K_4 (+)	K_5 (0)	K_6 (0)
KRD	K_7 (+)	K_8 (+)	K_9 (0)

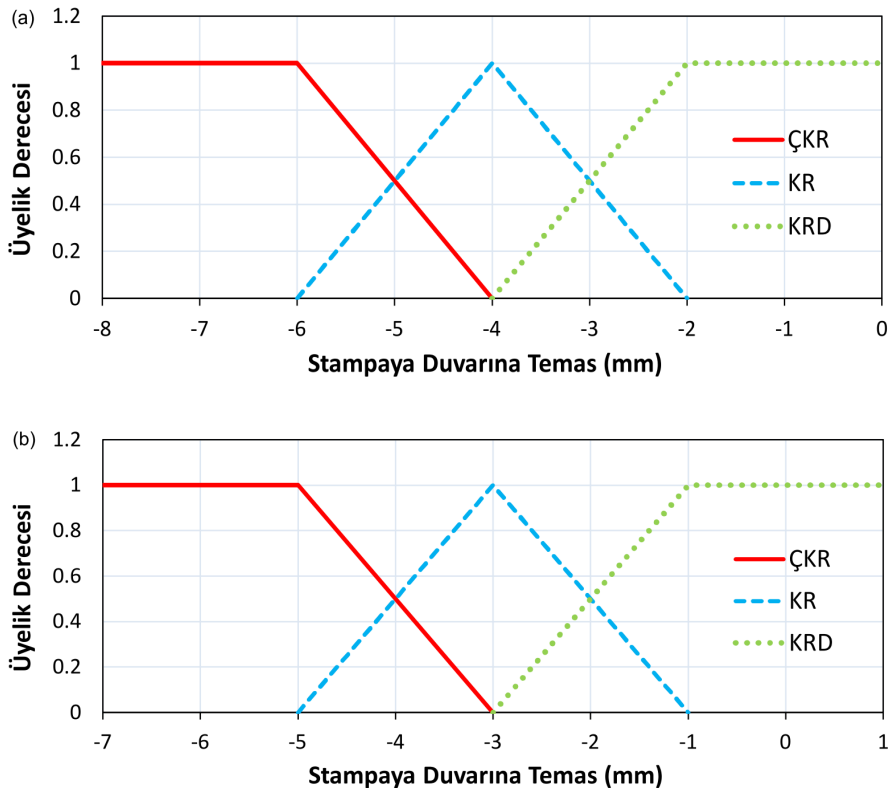
Çizelge 4.3a'daki dördüncü kural matrisi oluşturulurken Çizelge 4.2a'daki "eğer maksimum yüzde incelme ÇKR ve stampa duvarına temas KRD ise P'yi arttır" kuralı, sıvı basıncını değiştirme (0) şeklinde; "eğer maksimum yüzde incelme ÇKR ve maksimum buruşma KR ise" durumu da BPK'yı arttır (+) şeklinde düzenlenmiştir.

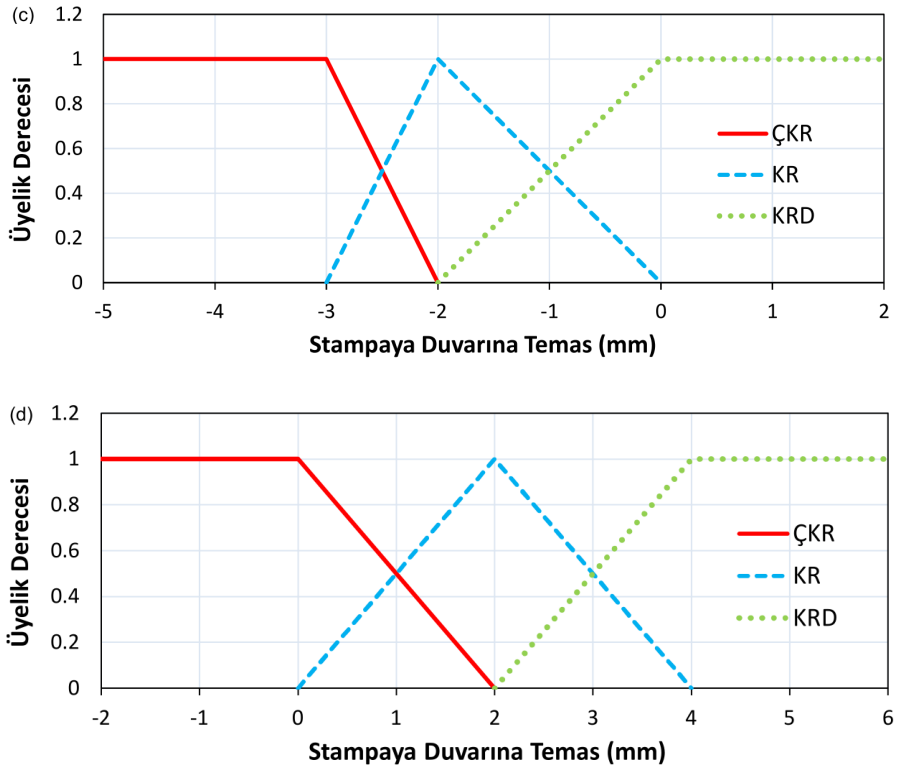
Çizelge 4.1'deki kural-tabanlı matrisler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'deki gibi düzenlendikten sonra, bu kural-tabanı matrisler kullanılarak 118 mm'lik sac çapı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan tüm analizlerde 2 Mpa'lık bir ön şişirme basıncı uygulanmıştır. Daha sonra t=0.01 saniyeye erişince stampa hareketine başlamıştır ve basınç, stampa burun radyüsü bitimi kalıp radyüsü merkezine erişinceye kadar (t=0.0025 sn.) 6 Mpa olacak şekilde ayarlanmıştır. Stampa burun radyüsü bitimi

kalıp radyüsü merkezine vardıktan sonra ise bulanık mantık kontrol algoritması başlamaktadır. Ayrıca şekillendirme başlangıcında sacı tutması için 2.5 kN'lik bir başlangıç baskı plakası kuvveti değeri kullanılmıştır.

4.6. Stampa Duvarına Temas Giriş Değişkenine Ait Üyelik Fonksiyonlarının Değişiminin Prosese Etkisi

Uygun basınç profilinin bulunmasında bulanık mantık kontrol algoritmasında kullanılan stampa duvarına temas giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının değişiminin yükleme profillerine ve sonuçta sacda meydana gelen kalınlık dağılımına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda dört farklı üyelik fonksiyonu kullanılmıştır ve kullanılan bu fonksiyonlar Şekil 4.15'te verilmiştir. Bu üyelik fonksiyonlarındaki değerler, BMKA ile elde edilen sıvı basıncı profilinin birbirinden farklı olacağı şekilde belirlenmiştir.





Şekil 4.15. Stampa duvarına temas giriş değişkeni için kullanılan farklı üyelik fonksiyonları

4.7. Başlangıç Sac Çapının ve Sürtünme Katsayısı Değişiminin Yükleme Profillerine Etkisi

Bu bölümde, başlangıç sac çapının yükleme (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) profillerini değiştirip değiştirmediğini incelemek için farklı sac çapları ile SEA'lar gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 90, 100 ve 115 mm'lik sac çapları kullanılmış ve sonuçta bulanık mantık kontrol algoritması ile elde edilen yükleme profilleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca sac ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısının yükleme profillerine etkisini incelemek için 95 mm'lik çapa sahip bir sac ile sac ve kalıplar arasında 0.05, 0.07 ve 0.09'luk sürtünme katsayıları kullanılarak üç analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda ise yükleme profilleri ve sacdaki kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır.

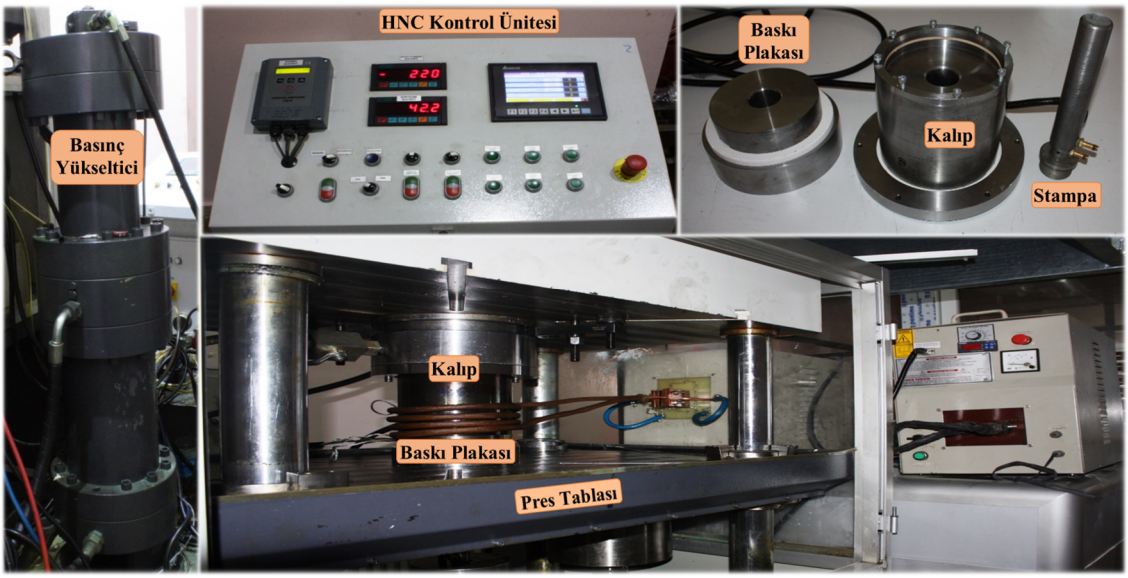
4.8. Tez Çalışması ile Önceki Çalışmaların Karşılaştırılması

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında LS-DYNA SEA yazılımında bulanık mantık kontrol algoritması yardımıyla elde edilen yükleme profilleri ile Halkacı ve ark. (2001)'ün ABAQUS SEA yazılımında basıncın etki edeceği alanı

parçalara bölerek (partition) deneme ve yanılma yöntemiyle elde ettiği ve Akay (2014)'ün yine ABAQUS SEA yazılımında basınç etki alanını altprogram yardımıyla tanımlayarak ve birçok farklı profil deneyerek elde ettiği yükleme profilleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda sac parçada oluşan kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerde 100 mm'lik sac çapı kullanılmıştır.

5. HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME DENEYLERİNİN YAPILMASI

Bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yöntemiyle elde edilen uygun yükleme profilleri kullanılarak HDÇ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler Selçuk Üniversitesinde bulunan 60 ton BPK ve 1000 bar sıvı basıncı kapasiteli sac hidroşekillendirme deney presinde yapılmıştır (Şekil 5.1). Başarıyla çekilebilecek maksimum sac çapı 100 mm çaptan başlanmak üzere gittikçe artırılarak belirlenmiştir. Deneylerde sac malzemenin kalıp ve baskı plakasıyla temas eden bölgeleri bakır pasta kullanılarak yağlanmış böylece bu bölgelerdeki sürtünme minimuma indirilmiştir. Bunun yanında stampaya temas eden bölge yağlanmayarak, hidroşekillendirmenin sac ve stampa arasındaki sürtünme etkisiyle sacda oluşan yerel gerilme artışını engellemesi avantajından yararlanılmıştır. Deneylerde BMKA'lı adaptif SEA yardımıyla elde edilen uygun yükleme profilleri kullanılarak 107 mm çapındaki saclar başarıyla çekilebilmiştir.



Şekil 5.1. Hidromekanik derin çekme deneyleri için kullanılan hidroşekillendirme presi

BMKA ile elde edilen uygun yükleme profillerinin hidroşekillendirme presi tarafından ne derece etkili kullanıldığını görmek amacıyla, HNC kontrol ünitesine girilen yükleme profilleri ile deney sonrasında elde edilen yükleme profilleri karşılaştırılmıştır. BMKA ile belirlenen BPK profili sıvı basıncının göz ardı edildiği, sac üzerine gelen net kuvvettir. Bu yüzden deneyler esnasında baskı plakasının sac parça yüzeyinden

ayrılmasını ve sonuç olarak hidrolik sıvı sızıntısını önlemek için sıvı basıncı tarafından üretilen kuvvet uygun BPK profilindeki her bir BPK değerine aşağıdaki formül yardımıyla eklenmiştir:

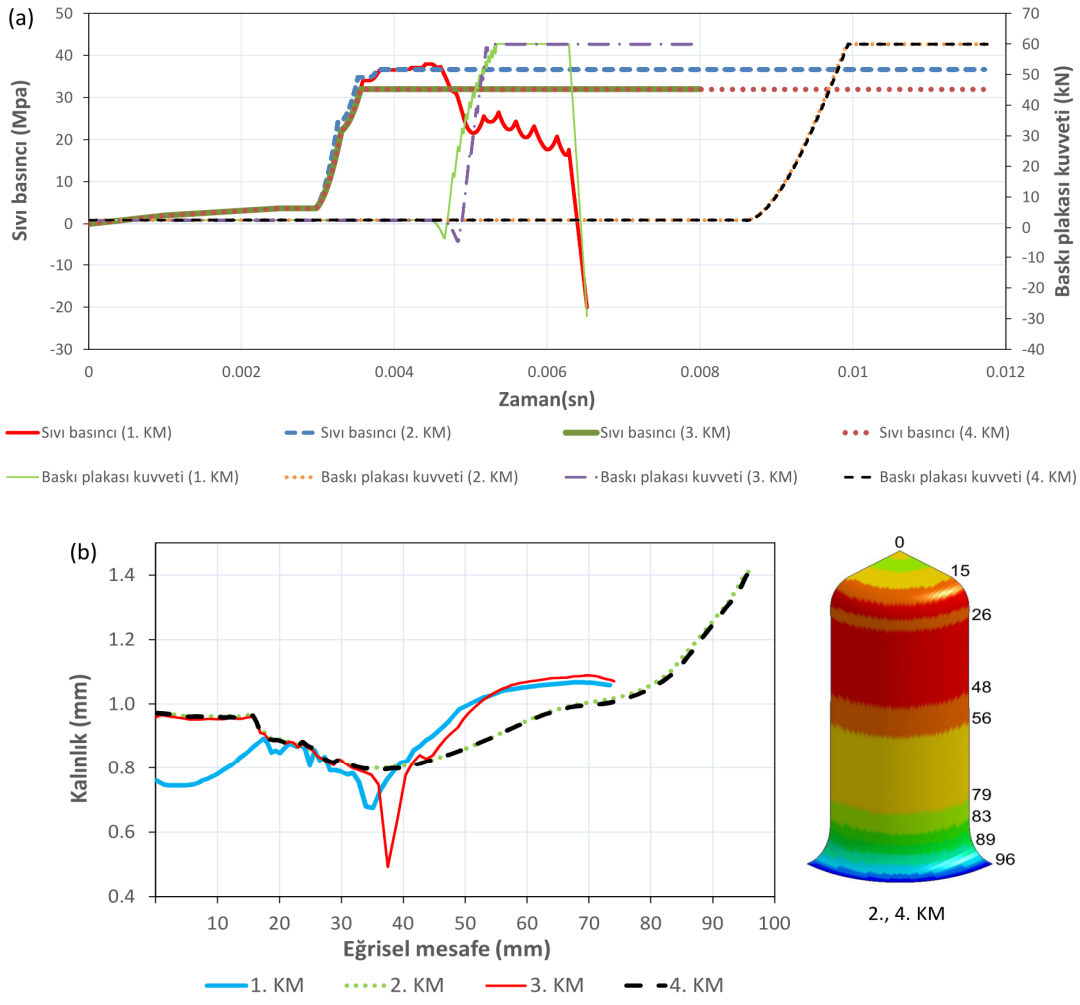
$$BPK_{deneysel} = F_{BPK} + (P*A) \tag{5.1}$$

Burada, $BPK_{deneysel}$ deneylerde kullanılması gereken BPK kuvveti, F_{BPK} BMKA ile elde edilen baskı plakası kuvveti, P sıvı basıncı ve A ise baskı plakasının yüzey alanıdır.

Deneyler sonrasında ayrıca BMKA'lı adaptif SEA analizinden ve üç ayrı HDÇ deneyinden elde edilen, stampa üzerine etki eden kuvvetler karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler 0.2 kN'lik hassasiyete sahip bir yük hücresi ve 15 µm'lik hassasiyete sahip bir lineer pozisyon sensörü ile ölçülmüştür. Yapılan bu üç HDÇ deneyi ile de SEA analizi sac üzerindeki kalınlık dağılımı açısından karşılaştırılmıştır. Sac numune üzerindeki kalınlık ölçümü bir ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı ile hadde doğrultusunda (HD) ve haddeye ters doğrultuda (HTD) ölçülmüştür.

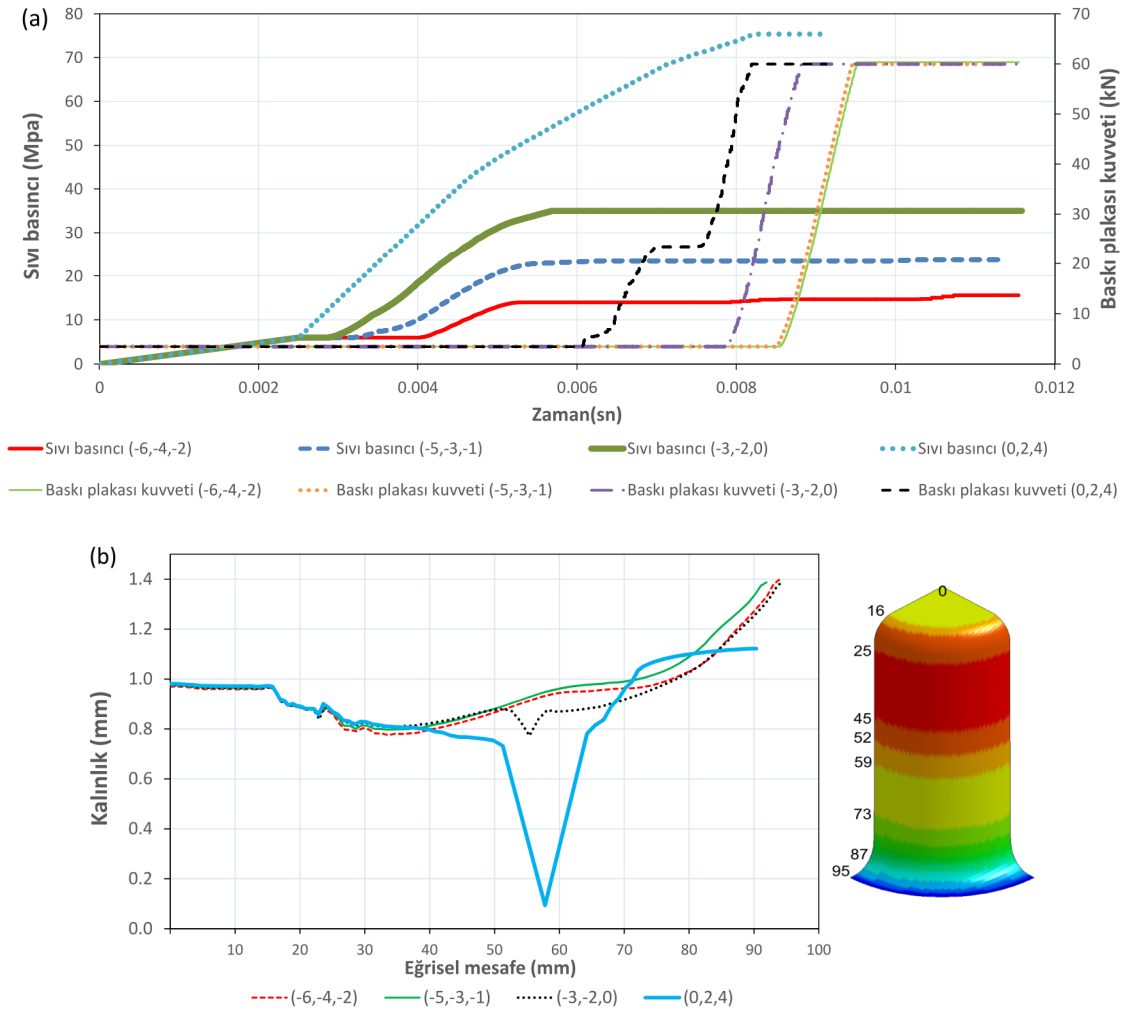
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

BMKA için gerekli en uygun kural matrislerinin belirlenmesi kapsamında farklı kural matrisleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen yükleme profilleri ve kalınlık dağılımları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Analizde birinci kural matrisleri (1. KM) kullanıldığı zaman simülasyon t=0.0065 sn'de durmuştur (Şekil 6.1a). Bu durum Çizelge 4.1'deki K_1, K_2, K_3 ve K_6 kurallarının negatif olmasından ve dolayısıyla bu kuralların yüklemeleri (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) düşürmesinden dolayı meydana gelmiştir. Bu kurallardan dolayı yüklemeler t=0.006 sn'den sonra maksimum yüzde incelme ÇKR olduğundan sürekli azalmıştır ve yüklemeler sac yüzeyine ters yönde (negatif) etki etmiştir. Bundan dolayı yüklemeleri azaltmanın HDÇ prosesi için doğru olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 6.1. 1., 2., 3. ve 4. kural matrisleri kullanılarak elde edilen (a) yükleme profillerinin, (b) kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması

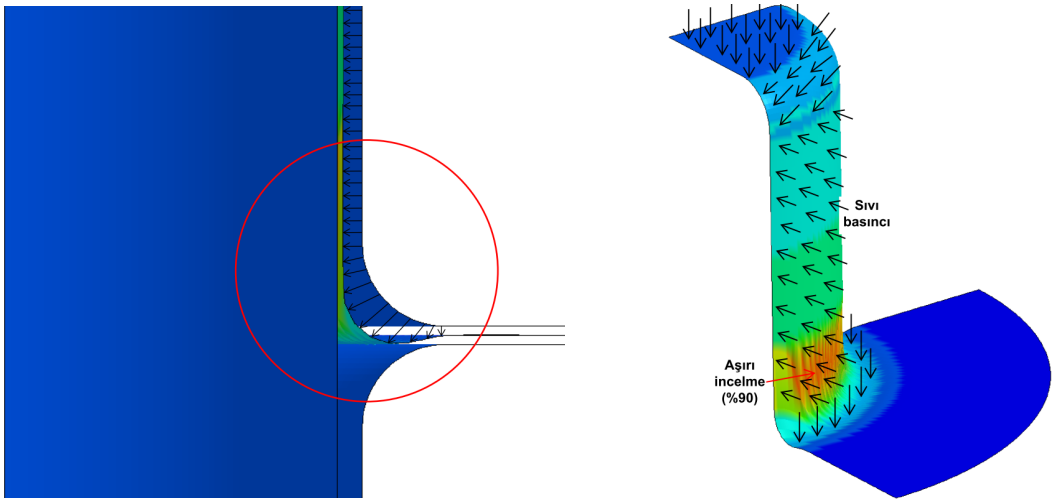
Üçüncü kural matrisleri (3. KM) kullanıldığında analiz t=0.008 saniyede iken durmuştur. Bu durum ise Çizelge 4.2b'deki K_6 kural matrisinin negatif olmasından ve t=0.0046 sn'de iken baskı plakası kuvvetinin azalmasından dolayı meydana gelmiştir. Bu kural baskı plakası kuvvetini 2.5 kN'den -4 kN'ye düşürmüştür. Böylece sac metal ve kalıp arasındaki boşluk artmış ve sac buruştuğundan maksimum buruşma yüksekliği ÇKR olmuştur. Dolayısıyla da kuvvet, kural K_4'ten dolayı boşluğu kapatmak ve sacı tutmak için aniden çok (60 kN'ye) artmıştır ve analiz aşırı incelme meydana geldiğinden sonlanmıştır. Böylece 3. KM'nin de proses için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Çizelge 4.2a'daki 2. KM'deki K_3 kuralı negatif olduğu için baskı plakasındaki azalma nedeniyle analizin durmasının burada da olabilme ihtimalinden dolayı 2. KM'de uygun görülmemiştir. Şekil 6.1b'de görüldüğü gibi analiz sonucunda minimum sac kalınlığı 1. KM ve 3. KM için sırasıyla 0.7 mm ve 0.5 mm, 2. KM ve 4. KM için de 0.8 mm elde edilmiştir. Sonuç olarak 4. KM HDÇ prosesi için en uygun matrisler olarak belirlenmiştir.



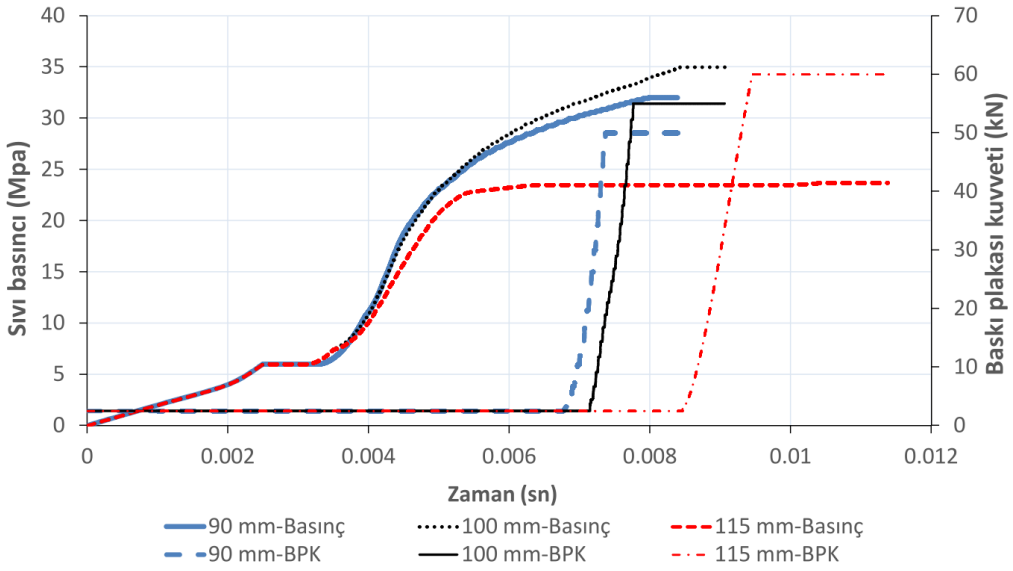
Şekil 6.2. Stampa duvarına temas giriş değişkenine ait farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen: (a) yükleme profilleri, (b) kalınlık dağılımları

Stampa duvarına temas giriş değişkenine ait Şekil 4.15'te verilen farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak yapılan BMKA'lı adaptif SEA'lar sonucunda elde edilen yükleme profilleri ve kalınlık dağılımları Şekil 6.2'de verilmiştir. Yapılan HDÇ analizlerinde 115 mm'lik sac çapı kullanılmıştır. BMKA'lı adaptif SEA ise t=0.0025 sn'den sonra başlamaktadır. Şekil 6.2a'ya bakıldığında üyelik fonksiyonlarının farklı olmasından ötürü BMKA'nın elde ettiği yükleme profillerinin de farklı çıktığı görülmektedir. Şekil 4.15a'daki üyelik fonksiyonları kullanıldığında BMKA ile elde edilen maksimum sıvı basıncı değeri 17 Mpa civarında olurken, Şekil 4.15d'deki üyelik fonksiyonları kullanıldığında bu değer yaklaşık 75 Mpa olmuştur. BMKA'lı adaptif SEA'larda Şekil 4.15'teki her dört üyelik fonksiyonu kullanıldığında elde edilen maksimum baskı plakası kuvveti değerleri aynı iken BPK profilleri, basınç profillerinin değişkenliğinden dolayı birbirinden farklı elde edilmiştir. Şekil 6.2b'ye bakıldığında ise farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak elde edilen farklı yükleme profillerinin sac metal üzerindeki kalınlık değişimine etkisi görülebilmektedir. (0, 2, 4) üyelik sınırlarına sahip üyelik fonksiyonları kullanıldığında basıncın fazla arttırılması ile BPK profilinin de erkenden artırılması sonucunda minimum kalınlık kalıp radyüsü civarında 0.1 mm olmuş ve sac bu bölgeden yırtılmıştır (Şekil 6.3). Şekil 6.2a'ya bakıldığında (-6, -4, -2) ve (-5, -3, -1) üyelik sınırlarından elde edilen BPK profillerinin neredeyse aynı fakat sıvı basıncı profillerinin farklı olduğu görülmektedir ((-6, -4, -2) sınırları ile elde edilen maksimum sıvı basıncı daha az). Aynı zamanda (-3, -2, 0) sınırları ile elde edilen hem sıvı basıncı hem de BPK profillerinin de farklı olduğu görülebilmektedir. Şekil 6.2b'de ise bu sınırlar ile elde edilen minimum kalınlık değerlerinin (-6, -4, -2) için 0.78 mm, (-5, -3, -1) için 0.8 mm ve (-3, -2, 0) için ise 0.77 mm olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çalışma ile aynı zamanda sıvı basıncı profilinin incelmeye etkisi de ortaya konmuştur. Bu kapsamda (-6, -4, -2) ile (-5, -3, -1) karşılaştırıldığında daha düşük bir sıvı basıncı profilinin elde edilmesinin sacda meydana gelen incelmeyi arttırdığı, (-5, -3, -1) ile (-3, -2, 0) karşılaştırıldığında ise daha yüksek sıvı basıncı ve BPK profilinin elde edilmesinin de incelmeyi arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu çalışma ile stampa duvarına temas giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonlarının optimum sıvı basıncı profilinin elde edilmesi için önemli olduğu görülmektedir. Sonuç olarak en iyi kalınlık dağılımını (0.8 mm minimum kalınlık) dağılımını (-5, -3, -1) üyelik sınırlarının vermesinden dolayı kontrol algoritmasındaki stampa duvarına temas giriş değişkeni için Şekil 4.15b'deki üyelik fonksiyonlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Son olarak bu çalışma ile 115 mm'lik

sac çapı için uygun yükleme profillerinin Şekil 6.2a'daki (-5, -3, -1) sınırlarının verdiği profiller olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.3. Sıvı basıncının fazla arttırılıp sacın stampaya fazla temas etmesi neticesinde incelmenin aşırı artması ((0, 2, 4) üyelik sınırlarının neden olduğu incelme)

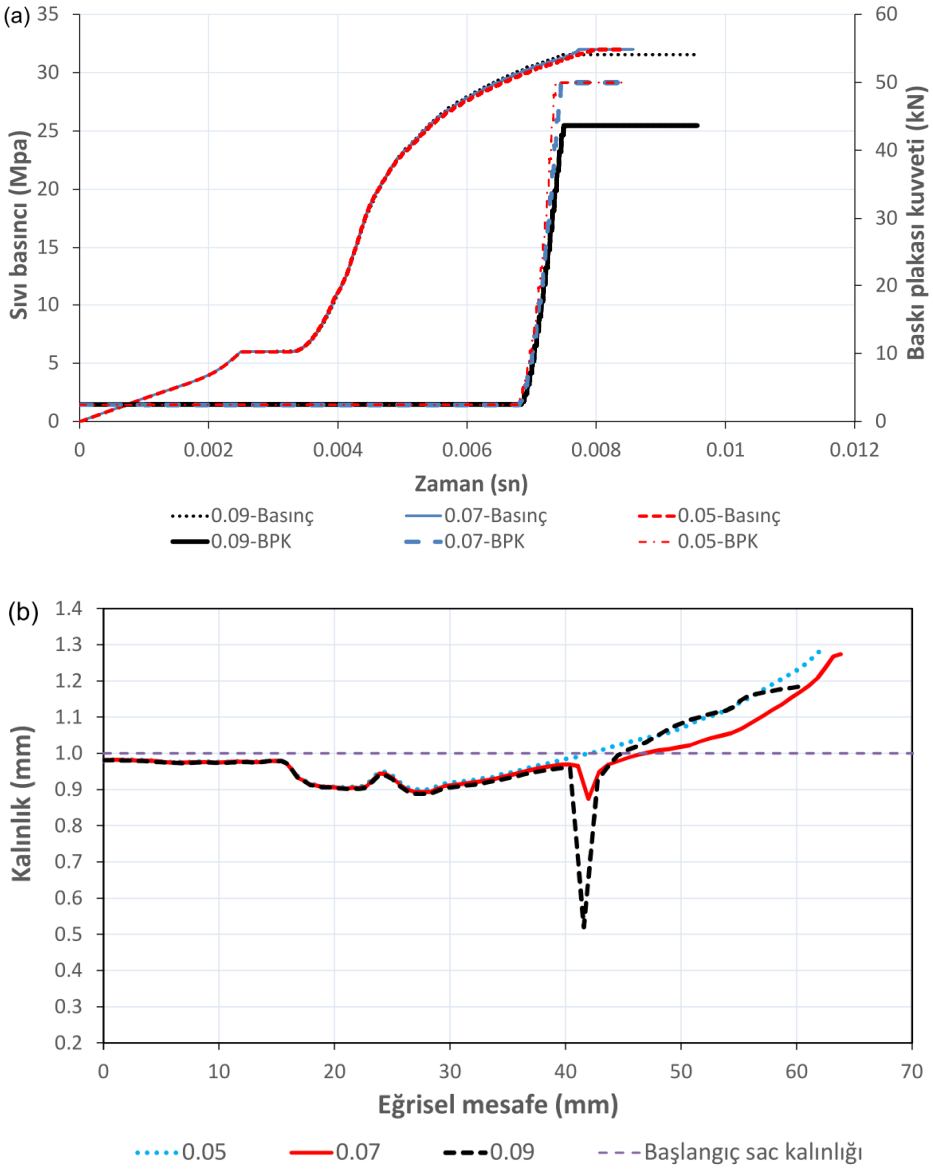


Şekil 6.4. Başlangıç sac çapının yükleme profillerine etkisi

Başlangıç sac çapının BMKA ile elde edilen yükleme profillerine etkisini incelemek için 90, 100 ve 115 mm'lik sac çapları ile yapılan analiz sonuçları Şekil 6.4'te gösterilmektedir. 90 ve 100 mm'lik sac çapları kullanılarak yapılan analizlerde sıvı basıncı profillerinin benzer olduğu fakat 100 mm'lik sac için biraz daha fazla basınç gerektiği görülmüştür. 115 mm'lik sac ile yapılan analizde sacda meydana gelen incelme çok kritik (ÇKR) olmuş ve Çizelge 4.3a'daki kurallar gereği basınç t=0.006 sn'den sonra

23 Mpa'da sabit tutulmuştur. Baskı plakası kuvveti profillerine bakıldığında ise daha büyük sac çaplarında flanş bölgesinde oluşan buruşmanın artmasından dolayı, daha büyük sac çapının kullanılması ile buruşmayı azaltmak için daha yüksek baskı plakası kuvvetine ihtiyacın olunduğu gözlemlenmiştir.

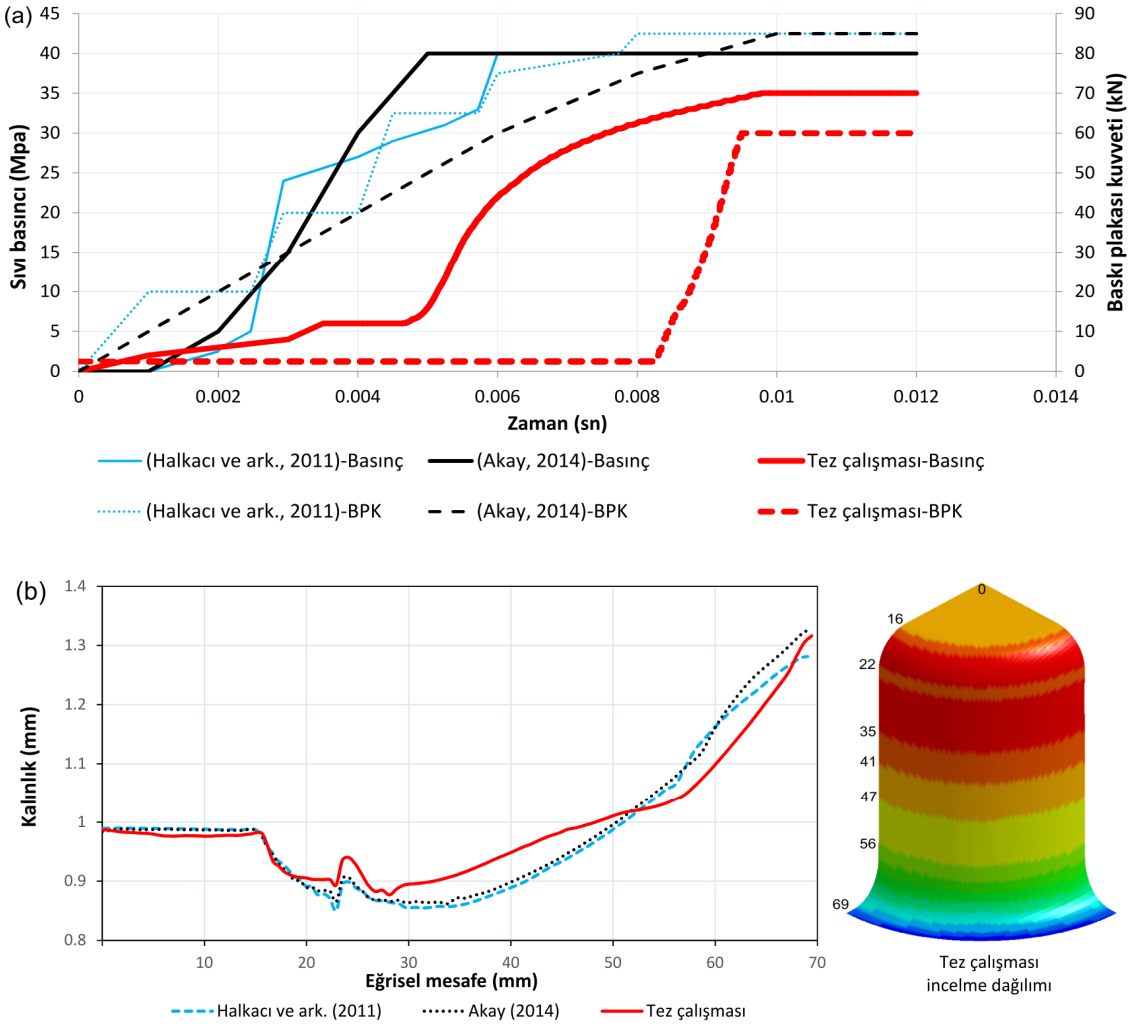
Sac ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısı değişiminin yükleme profillerine ve sacda meydana gelen incelmeye etkisini incelemek için 0.05, 0.07 ve 0.09'luk sürtünme katsayıları ve 95 mm'lik sac çapı kullanılarak yapılan BMKA'lı adaptif SEA sonuçları Şekil 6.5'te verilmiştir. Sac ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısının değişimi Şekil 6.5a'da görüldüğü gibi sıvı basıncı ve baskı plakası profillerini neredeyse hiç değiştirmemiştir.



Şekil 6.5. Sac ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısının: (a) yükleme profillerine, (b) kalınlık dağılımına etkisi

Şekil 6.5b'ye bakıldığında ise en iyi kalınlık düşümü durumunun 0.05 sürtünme katsayısı ile elde edildiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının 0.07 olduğu durumda stampa burun radyüsünün altında (eğrisel mesafe yaklaşık 42 mm) sacda kalınlık düşmüş ve homojenlik bozulmuştur. Sürtünme katsayısı 0.09 olduğunda ise yine eğrisel mesafe yaklaşık 42 mm'de iken kalınlık 0.5 mm'ye kadar düşmüş, yani sac yırtılmıştır. Bu sürtünme katsayısı kullanıldığında analizde yüzde incelme %50'yi bulduğundan çok kritik (ÇKR) olmuş ve dolayısıyla Şekil 6.5a'dan da görüldüğü gibi BPK, Çizelge 4.3b'deki kurallar gereği BMKA tarafından 42 kN'de sabit tutulmuştur.

Halkacı ve ark. (2011) ile Akay (2014) tarafından deneme ve yanılma yöntemleriyle ve tez çalışmasından BMKA ile elde edilen yükleme profilleri ve bu yükleme profilleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen kalınlık dağılımları Şekil 6.6'da verilmiştir. Tez çalışması için yükleme profilleri belirlenirken 100 mm'lik sac çapı kullanılmıştır. Şekil 6.6a'ya bakıldığında tez çalışmasından elde edilen yükleme profillerinin diğer iki çalışmadan oldukça farklı olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında t=0.0035 sn'den sonra BMKA ile belirlenen sıvı basıncı profilinin ilk başlarda hızlı, daha sonra yavaş bir şekilde artarak 35 Mpa'da sabit tutulduğu, BPK profilinin ise t=0.008 sn'ye kadar başlangıçta verilen 2.5 kN'de sabit tutulup daha sonra flanş bölgesindeki buruşmadan dolayı ani bir şekilde yükselip tekrar sabit tutulduğu görülmektedir. Şekil 6.6b'ye bakıldığında ise tez çalışmasında BMKA ile belirlenen yükleme profilleriyle yapılan analizden elde edilen minimum kalınlık değerinin diğer iki çalışmaya oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Halkacı ve ark. (2011)'in elde ettiği yükleme profilleri ile sacda meydana gelen minimum kalınlık eğrisel mesafe 22 mm'de 0.85 mm civarındayken, Akay (2014)'ün elde ettiği yükleme profilleriyle bu değer yine aynı bölgede 0.87 mm civarına artmıştır. Tez çalışması kapsamında BMKA'lı adaptif SEA yaklaşımı ile elde edilen uygun yükleme profilleriyle yapılan analiz sonucunda ise minimum kalınlık eğrisel mesafe 28 mm'de 0.88 mm civarına artırılmış, kalıp radyüsünden flanş bölgesine kadar olan kalınlaşma diğer iki çalışmaya nazaran daha fazla elde edilmiştir. Sonuç olarak, birçok deneme ve yanılma yaparak uygun yükleme profillerini elde eden diğer iki çalışma ile karşılaştırıldığında, bulanık mantık kontrol algoritması sayesinde tek bir analiz ile uygun yükleme profilleri belirlenerek hem zaman ve maliyet düşürülmüş hem de daha az incelme profiline sahip bir iş parçası elde edilmiştir.



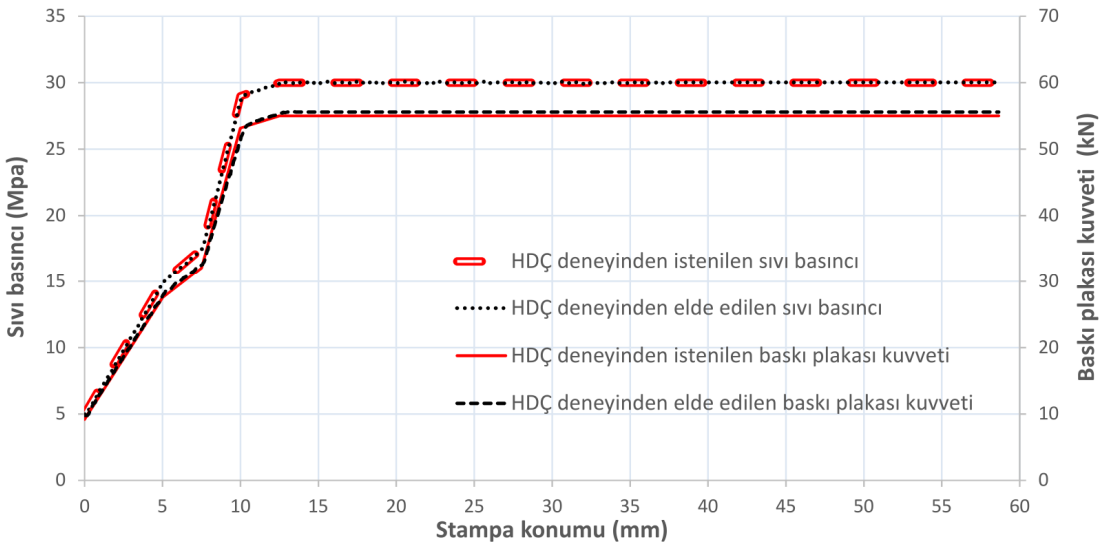
Şekil 6.6. Halkacı ve ark. (2011), Akay (2014) ve tez çalışmasından elde edilen: (a) yükleme profilleri, (b) yükleme profilleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda oluşan kalınlık dağılımları

BMKA'lı adaptif SEA yöntemi ile elde edilen yükleme profilleri HDÇ deneylerinde kullanılmıştır ve 107 mm'lik sac çapları başarılı bir şekilde çekilebilmiştir. Yapılan altı deney sonucunda herhangi bir yırtılma ve buruşma olamadan elde edilen silindirik kaplar Şekil 6.7'de verilmiştir.

Hidroşekillendirme presinin HNC ünitesine girilen uygun yükleme profillerinin prese doğru uygulanıp uygulanmadığını görmek amacıyla, yapılan bir HDÇ deneyinden alınan veriler ile BMKA yardımıyla elde edilen bir yükleme profili karşılaştırılmış ve sonuç Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Sonuca bakıldığında, sıvı basıncı ve BPK profillerinde sırasıyla sadece 3 Mpa'lık ve 3 kN'lik bir fark oluştuğu görülmüştür. Dolayısıyla bu karşılaştırma ile HNC ünitesine girilen yükleme profillerinin hidroşekillendirme presine uygun bir şekilde uygulandığı kanıtlanmıştır.



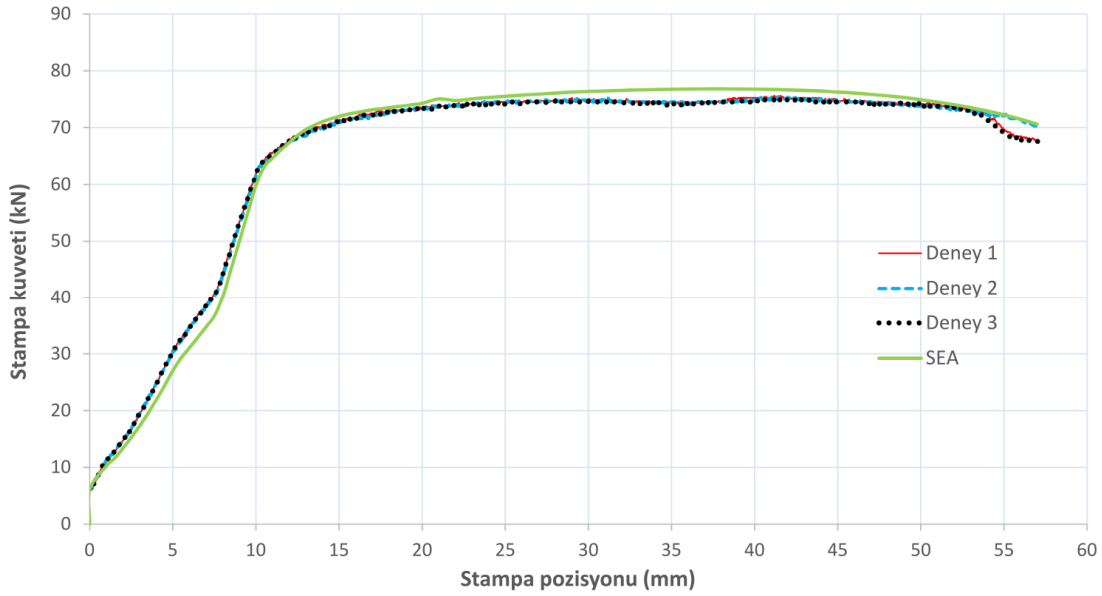
Şekil 6.7. Bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yöntemi kullanılarak elde edilen yükleme profilleriyle yapılan deneyler sonucunda başarılı bir şekilde şekillendirilen silindirik parçalar



Şekil 6.8. Deneyden istenilen ve elde edilen sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerinin karşılaştırılması

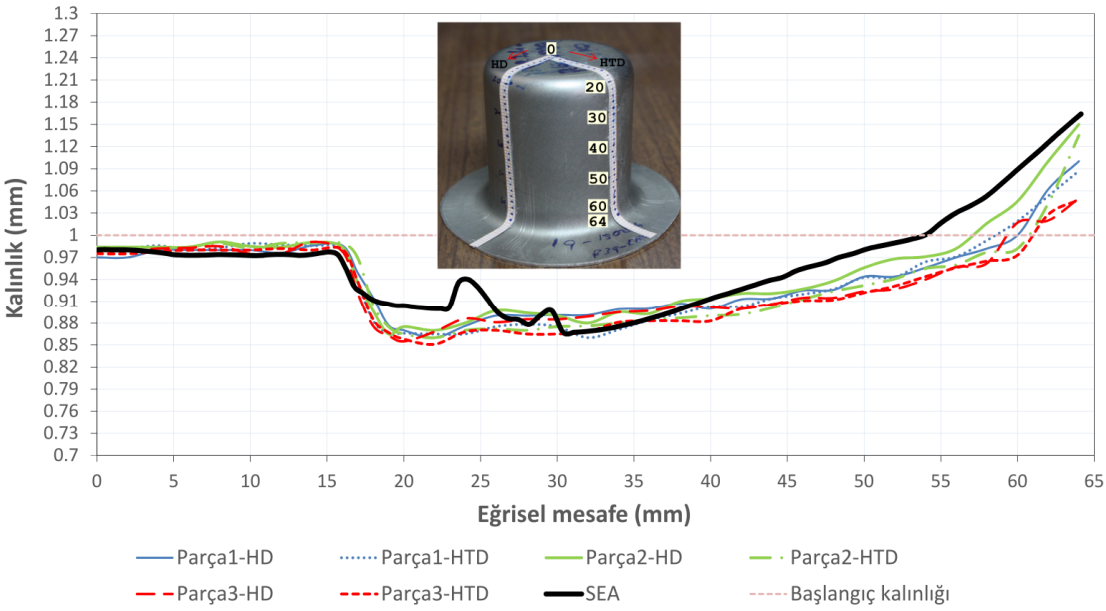
Şekil 6.9'da üç adet HDÇ deneyinden ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen stampa kuvveti-stampa pozisyonu eğrileri verilmiştir. Eğrilere bakıldığında stampa üzerinde gelen kuvvet, stampa pozisyonu yaklaşık 0-10 mm arasındayken artmaktadır. Çünkü yükleme profilleri de bu aralıkta artırılmaktadır (Şekil 6.8). SEA ile elde edilen eğrinin deneylerden elde edilen eğrilere çok yakın olduğu, ayrıca üç ayrı deneyden elde

edilen eğrilerin de neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar yükleme profillerinin analiz tarafından prosese doğru uygulandığını ve HDÇ deneylerinin tekrarlanabilirliğinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.9. Deneylerden ve SEA'dan elde edilen stampa kuvveti-pozisyonu eğrilerinin karşılaştırılması

Şekillendirilmiş bir parçanın üç ayrı operatör tarafından belirli bir hat boyunca ölçülmesi neticesinde ölçümlerin ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı ile tekrarlanabilirliği ±7 µm bulunmuştur.



Şekil 6.10. Sac üzerindeki kalınlık dağılımı açısından deneylerin ve SEA'nın karşılaştırılması

Şekil 6.10'da başarılı bir şekilde gerçekleştirilen deneylerden seçilen üç ayrı silindirik kaptan ve SEA'dan hadde doğrultusunda (HD) ve haddeye ters doğrultuda (HTD) bir eğri boyunca ölçülen kalınlık dağılımları gösterilmiştir. Şekil 6.10'a bakıldığında derin çekilmiş parçalardan her iki doğrultuda da ölçülen kalınlık dağılımlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu, fakat SEA'dan ve deney numunelerinden ölçülen kalınlık dağılımları arasında fark olduğu görülmektedir. SEA'dan ölçülen kalınlık dağılımında minimum kalınlık yaklaşık 31 mm'de 0.87 mm civarında olurken deney numunelerinden ölçülen kalınlık dağılımında ise minimum kalınlık stampa burun radyüsü bitiminde yaklaşık 0.85 mm olmuştur. Her ne kadar SEA ile deneyler arasında kalınlık dağılımı açısından fark olsa da BMKA'lı adaptif SEA yöntemi ile elde edilen yükleme profilleri deneylerde kullanıldığında oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, hidromekanik derin çekme prosesi için gerekli uygun yükleme profilleri (sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti) bulanık mantık kontrol algoritmalı bir adaptif SEA metodu ile belirlenmiştir. Belirlenen bu yükleme profilleri kullanılarak ta hidromekanik derin çekme deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Her ne kadar bulanık mantık kontrol algoritmasındaki üyelik fonksiyonları, kural-tabanlı matrisler ile ΔP ve ΔBPK parametreleri için uygun değerlerin bulunması adına birçok analiz yapılsa da, hidromekanik derin çekme prosesi için gerekli uygun yükleme profilleri bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yöntemi sayesinde tek bir analiz ile hızlı ve doğru bir şekilde elde edilebilmektedir. Dolayısıyla geleneksel deneme ve yanılma veya hesaplamalı deney yöntemi ile harcanan işgücü, para ve zaman, bulanık mantık kontrol algoritmalı adaptif SEA yöntemi kullanılarak büyük oranda düşürülmektedir.
2. Uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerini belirlemede karar verme aşamasını oluşturan kural-tabanlı matrislerinin uygun bir şekilde düzenlenmesiyle hidromekanik derin çekme prosesinde sac malzemede en az incelme elde edilebilmektedir.
3. Aşırı sıvı basıncı (75 Mpa'lara kadar) uygulanması sacı yırtmakta, az sıvı basıncının uygulanması ise sacda oluşan incelmeyi arttırmaktadır. Çalışma ile elde edilen yükleme profilleri sac malzemede en az incelmeye sebep olan profillerdir.
4. Daha büyük sac çapı kullanımının flanş bölgesinde oluşan buruşmayı artmasından dolayı, daha büyük sac çapının kullanılması ile buruşmayı azaltmak için daha yüksek baskı plakası kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır.
5. Sac ve kalıplar arasındaki sürtünme katsayısın sıvı basıncı ve baskı plakası profillerini değiştirmemektedir. Hidromekanik derin çekme prosesinde yaygın olarak kullanılan 0.05'lik sürtünme katsayısı bu proses için uygun bir değerdir.
6. Derin çekilmiş parçalardan hadde doğrultusunda ve haddeye ters doğrultuda ölçülen kalınlık dağılımlarının birbirlerine yakın olduğu, SEA'dan ölçülen kalınlık dağılımının derin çekilmiş parçalardan ölçülen kalınlık dağılımlarından

ise biraz farklı olduğu görülmüştür. Bu fark, bulanık mantık kontrol algoritmasında kullanılan hasar kriterinden (%20'lik maksimum yüzde incelme), analiz ve deneylerde kullanılan sürtünme katsayıları farklılıklarından ve doğal olarak SEA'nın hidromekanik derin çekme deney şartlarını tam olarak simüle edememesinden kaynaklanmıştır.

7. Tekrarlı hidromekanik derin çekme deneylerinden elde edilen stampa kuvveti-stampa pozisyonu eğrisine bakıldığında hidromekanik derin çekme deneylerinin tekrarlanabilirliğinin oldukça iyi olduğu söylenebilir.
8. Bulanık mantık kontrol algoritması kullanılıp tek bir analiz ile uygun yükleme profilleri belirlenerek hem zaman ve maliyet azaltılabilmekte hem de daha az incelme profiline sahip bir iş parçası elde edilebilmektedir.

7.2. Öneriler

Bulanık mantık kontrol algoritmasında kullanılan maksimum yüzde incelme giriş değişkeni yerine AA 5754-O için elde edilen şekillendirme sınır diyagramı kullanılabilir. Böylece analizde sacın yırtılma tahmini arttırılarak yükleme profillerinin daha doğru elde edilmesi mümkün olabilir.

Karmaşık geometrili parçalar için stampa duvarına temas kriterini elde etmek zor olabilir. Dolayısıyla bu zorluğu ortadan kaldırmak için bu yönteme alternatif çözümler getirilebilir.

KAYNAKLAR

Abedrabbo N., Zampaloni M., Pourboghrat F., 2005, Wrinkling Control in Aluminum Sheet Hydroforming, *Int. J. Mech. Sci.*, 47 (3), 333-358.

Akay, S.B., 2014, Hidromekanik derin çekmede sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti eğrilerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 60-73.

Akbayır, E., 2013, Hidromekanik derin çekme yönteminde şekillendirici sıvı basıncının ve pot baskı kuvvetinin ürün kalitesine etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 1-10.

Altair, 2012, *Altair Hyperworks Manual*, v.12.0.

Anonim 1, 2015, http://www.aichi-brand.jp/corporate/type/fabricated/noguchi-seisakusho-e.html [Ziyaret Tarihi: 5 Nisan 2015].

Anonim 2, 2015, http://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types [Ziyaret Tarihi: 21 Nisan 2015].

Aust, M., 2001, Fem-Process-Simulation of Hydromechanical Deep-Drawing, *Dynalook 3rd European LS-DYNA Conference*, Germany.

Aydemir, A., De Vree, J.H.P., Brekelmans, W.A.M., Geers, M.G.D., Sillekens, W.H., Werkhoven, R.J., 2005, An adaptive simulation approach designed for tube hydroforming processes, *Journal of Materials Processing Technology,* 159, 303-310.

Candra, S., Batan, I.M.L., Berata, W., Pramono. A.S., 2015, Analytical study and FEM simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing, *Procedia CIRP*, 26, 548-553.

Carpenter, J.A., 2004, The Freedom CAR Challenge and Steel, American Iron and Steel Institute, *Great Designs in Steel Seminar*, Livonia, MI, 96-111.

Choi, H., Koç, M., Ni, J., 2007, Determination of optimal loading profiles in warm hydroforming of lightweight materials, *Journal of materials processing technology*, 190, 230-242.

Dao, T. P., Huang, S. C, 2011, Study on Optimization of Process Parameters Hydromechanical Deep Drawing of Trapezoid Cup, *Journal of Engineering Technology and Education*, Vol. 8 (1), 53-71.

Erhart, T., 2011, an Overview of User Defined Interfaces in LS-DYNA, Dynamore GmbH, Stutgart, Germany.

Etik, N., Allahverdi, N., Sert, İ. U., Sarıtaş, İ., 2009, Fuzzy expert system design for operating room air-condition control systems, *Expert Systems with Applications*, 36, 9753-9758.

Groche, P., Metz, C., 2006, Investigation of active-elastic blank holder systems for high-pressure forming of metal sheets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1271-1275.

Halkacı, H.S., Türköz, M., Dilmeç, M., 2014, Enhancing formability in hydromechanical deep drawing process adding a shallow drawbead to the blank holder, *Journal of Materials Processing Technology,* 214, 1638-1646.

Halkaci, M., Türköz, M., Dilmec, M., Halkaci, H. S., Dağhan, B., 2011, Increasing the Limiting Drawing Ratio of AA 5754 Aluminum Sheet by Hydromechanical Deep Drawing Process, *10th International Conference Technology Plasticity (ICTP 2011)*, Aachen-Germany, 472-476.

Jawad, W.K. ve Mohamed, J.H., 2008, Studying the effect of punch nose radius on deep drawing operation, *Eng. &Tech.,* Vol.26, No.1, 55-73.

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 Cora, Ö.N., 2008, Introduction and state of the art of hydroforming, *Hydroforming for advanced manufacturing,* 1-29.

Labergere, C. ve Gelin, J. C., 2012, Numerical Simulation of Sheet Hydroforming Taking into Account Analytical Pressure and Fluid Flow, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, Issue 10, 2020-2030.

Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B., 2004, Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* 44, 649-657.

Lstc, 2013, LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I, Version R7.0.

Nakamura, K., ve Nakagawa, T., 1987, Sheet Metal Forming with Hydraulic Counter Pressure in Japan, *Annales of CIRP*, 36, 191-194.

Ozturk, E., Turkoz, M., Halkaci, S., Halkaci, M., 2014, an Application of Fuzzy Logic Control Algorithm in Hydromechanical Deep Drawing Process, *Applied Mechanics and Materials,* Vol. 686, 95-100.

Önder, E., Tekkaya, A.E., 2008, Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 532-542.

Özçelik, G., 2008, Derin çekme işleminin simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-2.

Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F., 2007, Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel, *Finite Elements in Analysis and Design*, 43, 1062-1067.

Reissner, J., Hora, P., Matthias, E., 1981, Hydro-mechanical deep-drawing, *CIRP Annals-Manuf. Technol*., 30, 207-210.

Schultz, R. A., 1999, Aluminum for Light Vehicles an Objective Look at the Next Ten to Twenty Years, *14th International Aluminum Conference*, Montreal, Canada, Ducker Research.

Shamsi-Sarband, A., Zahedi, S.A., Bakhshi-Jouybari, M., Hossinipour, S.J., Banabic, D., 2012, Optimization of the pressure path in sheet metal hydroforming, *Proceedings of the Romanian Academy*, Series A, 13, 351-359.

Shapiro, A.B., 2009, Using LS-DYNA for Hot Stamping, *Proc. 7th European LS-DYNA Users Conference*, Salzburg, Austria.

Sheng, Z.Q., Jirathearanat, S., 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.

Siegert, K., Haussermann, M., Lösch, B., Rieger, R., 2000, Recent developments in hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 98, 251-258.

Siegert, K. ve Wagner, S., 1994, Deep Drawing, *TALAT Lecture 3704*, 3-14.

Singh, C.P. ve Agnihotri, G., 2015, Study of Deep Drawing Process Parameters: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 5, Issue 2, 1-15.

Şanay, B., 2010, Prediction of plastic instability and forming limits in sheet metal forming, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*, Ankara, 2-3.

Thiruvarudchelvan, S. ve Travis, F.W., 2003, Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes-an appraisal, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 70-75.

Tınkır, M., Dilmeç, M., Türköz, M., Halkacı, H.S., 2015, Investigation of the Effect of Hydromechanical Deep Drawing Process Parameters on Formability of AA5754 Sheets Metals by Using Neuro-Fuzzy Forecasting Approach, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Volume 28, Number 2, 647-659.

Türköz, M., Halkacı, H.S., Yiğit, O., Dilmeç, M., Öztürk, F., 2014, A new method for determining limit strains of materials that show post-uniform elongation behavior, *Journal of Engineering Manufacture,* 228 (3), 450-457.

Xu, Y., Kang, D, Zhang, S., 2004, Investigation of SUS304 Stainless Steel with Warm Hydro-mechanical Deep Drawing, *Journal of materials processing technology,* Vol.20 No.1, 92-93.

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

Zhang, S.H., 1999, Developments in hydroforming, *Journals of Materials Processing Technology*, 91, 226-244.

Zhang, S.H., Nielsen K.B., Danckert J., Kang D.C., Lang L.H., 2000, Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes, *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 1-8.

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.

EKLER

EK-1 LS-DYNA SEA'da Var Olan Bazı Kullanıcı Arayüzleri

EK-2 LS-DYNA SEA'da Alt Programlar ile Yeni Bir Çözücü Oluşturulması için Gerekli İşlemler

EK-3 Çözücü Oluşturmak için Gerekli İşlemler Yapılmadığında veya Eksik Yapıldığında Meydana Gelebilecek Hatalar

EK-4 Bulanık Mantık Kontrol Algoritması Altprogram Kodları

EK-1 LS-DYNA SEA'da Var Olan Bazı Kullanıcı Arayüzleri

Bu bölümde anlatılan kullanıcı arayüzleri ile ilgili bilgiler Erhart (2011)'den alınmıştır.

Çok yönlü bir multi-fizik sonlu eleman kodu, büyük ölçeli problemlerin nümerik simülasyonu için büyük miktarda farklı algoritmalardan oluşmaktadır. Problemde yakın çözüm metotları seçmek için yeterli özgürlüğü sağlamak amacıyla LS-DYNA, eleman tipleri, malzemeler, temaslar, bağlantılar, yüklemeler, sınır şartları vs. gibi görevler için halen birçok olanak sunmaktadır. Fakat bazen kullanıcı belirli bir çözüm işleminde kendine özgü olan algoritmasını o işleme uygulamayı arzulamaktadır. Bu yüzden LS-DYNA sonlu eleman analizi dışında ayrıca kullanıcı-tanımlı arayüzleri bizlere sunmaktadır. Böylelikle kullanıcı kendi algoritmasını gerekli dosyalara yazarak simülasyonu kendi isteği doğrultusunda kontrol etme imkânını elde etmektedir. LS-DYNA'da mevcut bulunan kullanıcı arayüzleri ve ilişkili keyword'leri Ek 1.1'de verilmiştir.

Ek 1.1. Kullanıcı-tanımlı arayüzler ve ilgili keywordler, alt programlar ve dosyalar

User interface	Keyword input	Subroutine(s)	File
Structural Materials	*MAT_USER_DEFINED_...	usrmat, utans	dyn21.f
Equations of State	*EOS_USER_DEFINED	ueoslib	dyn21b.f
Cohesive Materials	*MAT_USER_DEFINED_...	umatXXc	dyn21b.f
Thermal Materials	*MAT_THERMAL_USER_...	thusrmat	dyn21b.f
Material Failure	e.g. *MAT_024 with FAIL<0	matusr_24/103	dyn21.f
Structural Elements	*SECTION_SHELL/SOLID with ELFORM=101...105	usrshl, usrsld	dyn21b.f
Interface Friction	*USER_INTERFACE_FRICTION	usrfrc	dyn21.f
Solution Control	-	uctrl1	dyn21.f
Interface Control	*USER_INTERFACE_CONTROL	uctrl2	dyn21.f
Airbag Sensors	*AIRBAG: parameter RBID	airusr	dyn21.f
Thermal Contact	*USER_INTERFACE_CONDUC...	usrhcon	dyn21.f
Boundary Flux	*BOUNDARY_FLUX: NHISV>0	usrflux	dyn21.f
Adaptivity	*CONTROL_ADAPTIVE with ADPOPT=9	useradap	dyn21.f
Loads	*USER_LOADING	loadud	dyn21.f
Weld Failure	*MAT_100 with OPT=2, 12, 22	uweldfail…	dyn21.f
Joint Forces	*CONSTRAINED_JOINT_USER…	ujntfdrv	dyn21.f

LS-DYNA SEA'da bulunan alt programlar ile yapılabilecekler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Input *.k dosyasında tanımlanmış eğri/tablo yüklemelerine erişim için eğri/tablo dizinleri mevcuttur. Yani tanımlanan eğrilere altprogram yardımıyla müdahale edilebilir.
- Anizotropik malzeme modellemek için lokal koordinat sistemi kullanılabilir. İhtiyaç halinde sıcaklık ile ilgili işlemler mevcuttur.
- Tanımlanan kritere göre elemanlar silinebilir.
- Deformasyon gradyanlarının yardımı ile bireysel şekil değiştirme ölçümleri kullanılabilir.
- Kullanıcı skaler veya vektörel uygulamayı seçebilir
- History değişkenleri (bir önceki zaman adımındaki değişkenler) işleme tabi tutulup izlenebilir.
- Eleman ID'leri, düğüm ID'leri, integrasyon nokta sayıları, koordinatları gibi birçok işlem kontrol edilebilir.

İzotropik hipoelastik ve hiperelastik malzemeler (Neo-Hooke) için örnekler dyn21.f dosyasında bulunabilir.

Kullanıcı-tanımlı malzemeler

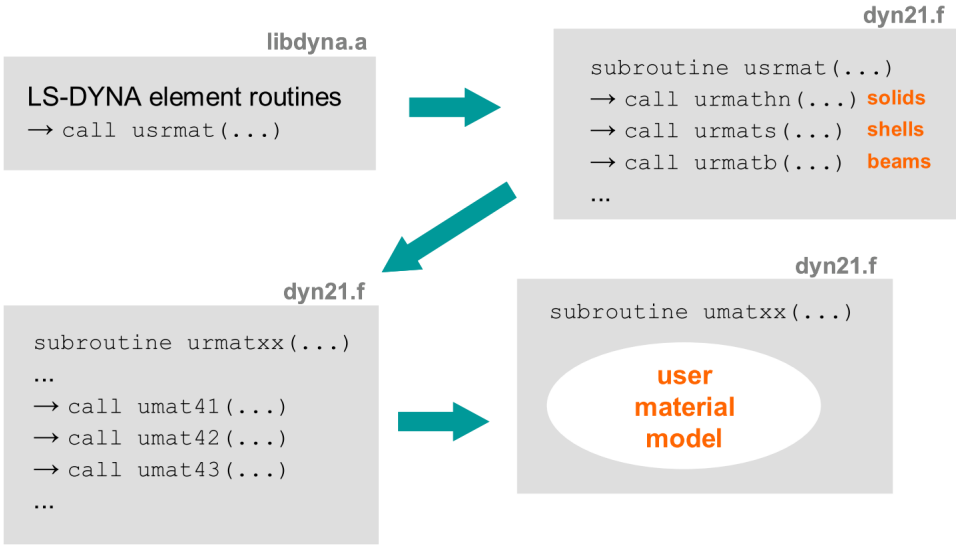
En çok uygulanan ve muhtemelen en gelişmiş LS-DYNA kullanıcı arayüzü, kabuk ve katı elemanlar için öz-yapım malzeme modellerini, özellikle standart yapısal modelleri (gerilmelerin gerinmelerden hesaplanması) içermektedir. Fakat hal denklemleri, kohezif bölge modelleri, termal malzeme özellikleri veya standart modeller için başarısızlık kriteri gibi diğer malzeme kuralları da bunlara dâhil edilebilir. Farklı olasılıklar aşağıda gösterilmektedir.

Yapısal malzemeler

Her bir sonlu eleman analizinin anahtar içeriği, gerinmelerin ve deformasyonların gerilmelere veya kuvvetlere yapısal ilişki ile bağlı olduğu malzeme modelidir. LS-DYNA'daki *MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS kartı sayesinde yeni bir malzeme modeli tanımlanabilmektedir. Eğer bu kart kullanılırsa, ana program

dyn21.f dosyası içerisinde yer alan “usrmat” isimli alt programı çağırmaktadır. Bu alt programın içerisinden, kullanılan malzeme modeline göre dyn21.f dosyasında yer alan kabul(shell) eleman için ”urmats”, katı(solid) eleman için “urmathn”, kiriş eleman (beam) için urmatb, ayrık elemanlar(discrete) için urmatd ve kafes kiriş(truss beam) elemanları için urmatt alt programları çağırılmaktadır. Bu alt programlar ise, gerinmelerden gerilmelerin hesaplandığı, gerçek kullanıcı alt programının yer aldığı “umatxx” alt programını çağırmaktadır (Ek 1.2).

Bu alt programların giriş argümanları, girişte yer alan malzeme sabitleri, şekil değiştirme artımı, önceki gerilmeler, önceki (history) değişkenler, mevcut zaman ve zaman adımı ve diğerleridir. Çıkış değişkenleri ise yeni (Cauchy) gerilmeler ve güncellenen history değişkenlerdir. Eğer kullanıcı tanımlı yapısal alt programda implicit analiz kullanılacaksa, kullanıcı ayrıca malzemenin tanjant modülünü de tanımlamak zorundadır. Bu durumda LS-DYNA “urtans” veya “urtahn” alt programını çağrılan “utanxx” alt programından dolayı çağırmaktadır. Bu alt program ile kullanıcı kuadratik yakınsama derecesine ulaşmak için malzemenin rijitlik matrisini tanımlamak zorundadır.



Ek 1.2. Kullanıcı malzemesi arayüz şeması

Hal denklemleri

Bazı durumlarda, malzeme davranışını tam olarak simüle edebilmek için hal denklemlerine ihtiyaç duyulur. Bir hal denklemi, malzemenin hidrostatik veya tüm davranışını, basıncı yoğunluğun ve belki enerji ve/veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak

hesaplayarak belirler. Hal denklemlerini gerektiren durumlar; çok yüksek şekil değiştirme hızları, malzemenin akma mukavemetini çok aşan basınçlar ve şok dalgalarının yayılması ile karakterize edilirler.

LS-DYNA'da bir hal denklemi tanımlayabilmek için, *EOS_USER_DEFINED keyword'ünün kullanılması gerekir. Bu sayede dyn21b.f dosyasındaki "ueoslib" alt programı çağrılır ve buradan da gerçek kullanıcı skaler "ueosxxs" veya vektörel "ueosxxv" alt programları çağrılır. Seçilen alt program her bir elemanda her bir integrasyon noktası için ikişer kez çağrılır. İlk çağrım hacimsel modülün hesaplanması, ikincisi ise basıncın ve iç enerjinin güncellenmesi içindir. Hal denklemi için bir örnek dyn21b.f dosyasında verilmiştir. Daha fazla bilgi için Lstc (2013)'teki EK-B'ye bakılabilir.

Kohezif Malzemeler

Kohezif bağlantılar, genellikle ince katmanlarda baş gösteren, iki katı gövdenin atomik veya moleküler kuvvetler ile birbirlerini tutması şeklinde karakterize edilir. Tipik uygulama alanları: yapıştırıcılar, kaynak bağlantıları, kompozitler, matris ve diğer içerikler arasındaki arayüzeyler vs. LS-DYNA'da kohezif malzemeleri alt programlarda kullanabilmek için *MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS kartının kohezif elemanlar ile kombinasyon halinde kullanılması gerekir. Bu ise dyn21b.f dosyasındaki "umatxxc" alt programını çağırmaktadır. Kullanıcının bundan sonraki amacı ise elemanın orta yüzeyindeki çekme gerilmelerini, üst ve alt yüzeylerin yer değişimi ve hızlarının fonksiyonu olarak hesaplamaktır. Bu konu hakkında ayrıntılı bilgi için Lstc (2013)'teki EK-R'ye bakılabilir.

Termal malzemeler

LS-DYNA ile temel modeller boyunca yapısal ve termal analizler yapmak mümkündür. Kullanıcı bunun için termal elastik ve viskoelastik malzemeleri seçebilir. Böylelikle, *MAT_THERMAL_..... kartı ile özgül ısı kapasitesi, termal iletkenlik vb. gibi termal giriş parametreleri tanımlanabilmektedir. Eğer LS-DYNA'daki termal malzemeler belli malzemeyi tanımlamak için yeterli değilse, *MAT_THERMAL_USER_DEFINED kartı belirli bir modeli uygulamak için kullanılabilir. Bu kart, dyn21b.f dosyasındaki "thusrmat" alt programını çağırmaktadır.

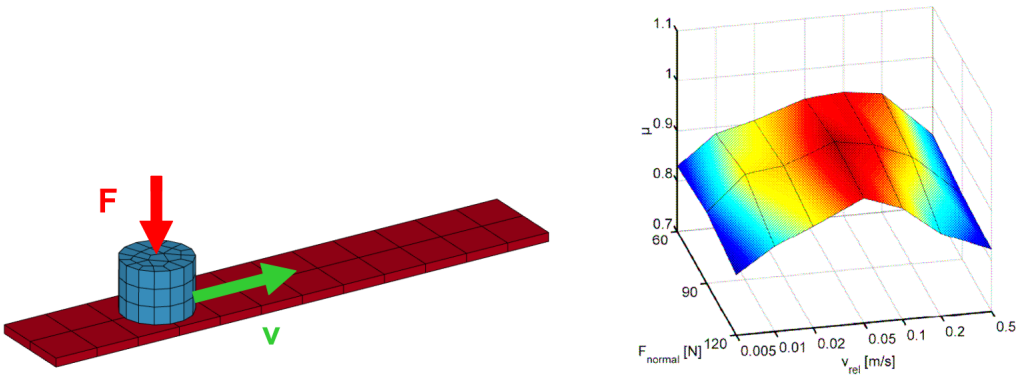
Buradan da “thumatxx” alt programları çağırılmaktadır. Detaylı bilgi dyn21b.f dosyasında ve Lstc (2013)’teki EK-H’de verilmektedir.

Standart malzemeler için malzeme hatası

Yaygın olarak kullanılan LS-DYNA malzemeleri 24, 103, 114, 123, 124, 155 ve 195 için kullanıcının kendi hata(kusur) kriterini belirleme imkânına sahiptir. Bu ise ilgili *MAT_... kartında FAIL<0 yapılarak aktive edilir. Böylelikle “matusr_24” veya “matusr_103 “ alt programları çağrılmış olur. Bu alt programların argümanları gerilme ve gerinme hız bileşenleri, zaman adımı büyüklüğü, plastik gerinme, malzeme sabitleri ve eğrilerdir. Bu bilgiler doğrultusunda kullanıcı kendi hata kriterini oluşturabilir.

Kullanıcı-tanımlı sürtünme

Temas eden iki parça arasındaki sürtünme LS-DYNA’da bir Coulomb formülasyonuna dayanır. Bu davranış ise LS-DYNA SEA’da *CONTACT_... kartlarındaki statik ve dinamik sürtünme katsayıları, üstel bozunma katsayıları ve viskoz sürtünme katsayı parametreleri ile kontrol edilmektedir. Burada temel sürtünme algoritması, önce arayüz kuvvetini herhangi bir deneme değerine günceller, sonra teğet bölümü hesaplar, sürtünme kuvvetini ve akma kuvvetini hesaplar ve en sonda sürtünme kuvvetini bulur. Bu, elastik-plastik yay modeliyle eşdeğerdir. Bu algoritma ise dyn21.f dosyasındaki “usrfrc” alt programını çağıran *USER_INTERFACE _FRICTION kartı ile kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Bu arayüzün temel düşüncesi sürtünme katsayılarının kullanıcı tarafından değiştirilmesidir (yani statik ve dinamik sürtünme katsayılarının sıcaklığın, temas basıncının, kayma hızının ve diğer giriş değerleri (hata rijitliği (penalty stiffness), kayma yer değiştirmesi vs.)’nin bir fonksiyonu olarak tanımlanması). Aynı zamanda input *.k dosyasında tanımlanan yükleme eğrilerine erişim için eğri dizileri de bu arayüzde mevcuttur. Basınç ve hız bağımlı bir kauçuk örneği Ek 1.3’te gösterilmektedir.



Ek 1.3. Basınç ve hızın fonksiyonu olarak kauçuk sürtünme katsayısı

Bu arayüz hakkında detaylı bilgi için dyn21.f dosyasındaki yorumlara ve LS-DYNA Kullanıcı Kılavuzu EK-G'ye bakılabilir.

Diğer kullanıcı-tanımlı özellikler

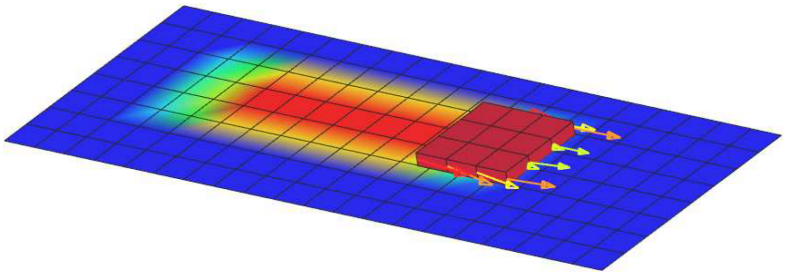
Çözüm (solution) kontrolü

Bu seçenek, kullanıcının giriş/çıkışları kontrol etmek, enerji ve diğer çözüm normlarını görüntülemek ve problemi istediği zaman durdurmak için kullanılmaktadır. Dyn21.f dosyasındaki ilgili "uctrll" alt programı her bir zaman adımında çağrılır ve herhangi bir kontrol kartına ihtiyaç duymaz. Bu alt programın argümanları: düğüm yer değiştirmeleri, hızlar, ivmeler, düğüm kütleleri, enerjiler, zaman adımı büyüklüğü, çevrim sayısı, ASCII dosya birimleri ve diğerleridir.

Isıl temas

İki parça birbiri ile temas ettiğinde, ısı sıcak parçadan soğuk parçaya doğru akar (Ek 1.4). O ısı taşınımını tanımlayan katsayı ise termal temas iletkenliğidir. LS-DYNA'da *CONTACT_..._THERMAL_FRICTION_.... kartını kullanarak termal temas iletkenliğini sıcaklığın ve basıncın fonksiyonu olarak tanımlamak mümkündür. Bu davranış için farklı formüller karttaki *FORMULA* parametresi ile seçilebilir. Eğer ısı taşınımı ve basınç, sıcaklık, hız vb. arasında bir ilişki uygulanmak istenirse, *USER_INTERFACE_CONDUCTIVITY kartı kullanılmalıdır. Bu ise dyn21.f dosyasındaki "usrhcon" alt programı ile yapılmaktadır. Bu alt programın giriş

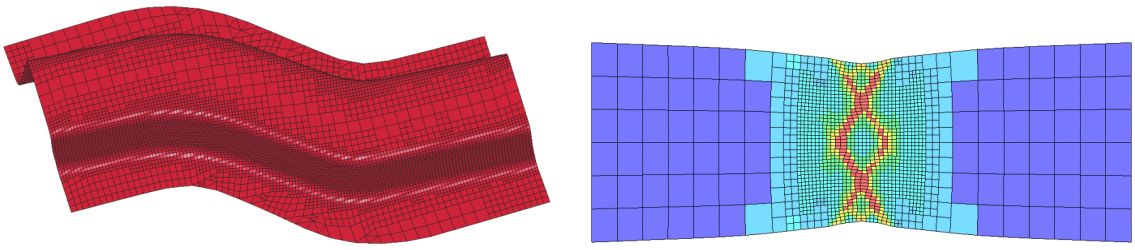
argümanları kullanıcı parametreleri, arayüz basıncı, sıcaklık, deplasmanlar, hızlar, temas arayüzleri arasındaki mesafe ve input dosyasında tanımlanan eğri yüklemelerine erişimi sağlayan eğri dizileridir. Bu alt programın çıkışı ise termal temas iletkenliğidir. LS-DYNA ile sıcak şekillendirme hakkında daha fazla bilgi Shapiro (2009)'da bulunabilir.



Ek 1.4. Isıl temas

3D kabuk adaptasyonu için mesh iyileştirme

Sonlu eleman analizinde bazen parçada lokal olarak mesh iyileştirme veya tam parçada mesh iyileştirme yapmak faydalı olmaktadır. Mesh iyileştirme, şekillendirme simülasyonları için arzu edilen hızlı geçişlerde yüksek kararlılık sağlamakta, ayrıklaştırma hatalarını minimuma indirgemekte, geometrik detaylara daha iyi yakınsama sağlamakta ve ayrıca çözüm süresi açısından zamandan da tasarruf sağlamaktadır (Ek 1.5). Mesh iyileştirme işlemi *CONTROL_ ADAPTIVE kartı ile sağlanmaktadır. Eğer kullanıcı kabuk elemanlarda adaptif iyileştirmeye kendi hata kriterini uygulamak isterse (hata göstergesi), bu ADPOPT=9 yapılarak sağlanır. Bu seçenek için ilgili alt program dyn21.f dosyasındaki "useradap" alt programıdır.



Ek 1.5. Adaptif iyileştirme için örnekler-metal şekillendirme, lokalleşme

EK-2 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 2.1'de gösterilmektedir.

Ad	Değiştirme tarihi	Tür	Boyut
adios.h	26.1.2011 19:49	C/C++ Header	1 KB
adjcom.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
alemisc.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bigprb.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
bk05.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk06.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk07.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk08.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk13.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
bk19.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
define.inc	26.1.2011 19:49	Include File	15 KB
dyn21.F	31.5.2015 13:05	Fortran Source	315 KB
dyn21b.F	26.1.2011 19:49	Fortran Source	503 KB
dynmem.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
err.xml	2.6.2015 17:20	XML Dosyası	1 KB
implicit1.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
implicit2.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
iounits.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
libansys.lib	26.1.2011 19:49	Object File Library	3,516 KB
libdyna.lib	26.1.2011 19:49	Object File Library	139,062 KB
lsmsg.h	26.1.2011 19:49	C/C++ Header	1 KB
lstc_client.exe	26.1.2011 19:49	Uygulama	248 KB

Ad	Değiştirme tarihi	Tür	Boyut
makefile	26.1.2011 19:49	Dosya	1 KB
matflr.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
mema.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
memaia.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
memia.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
nhisparm.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
nlqparm	26.1.2011 19:49	Dosya	1 KB
nmake.exe	26.1.2011 19:49	Uygulama	77 KB
numcpu.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
oasys_ceap.inc	26.1.2011 19:49	Include File	4 KB
ptimes.inc	26.1.2011 19:49	Include File	3 KB
readme.txt	26.1.2011 19:49	Metin Belgesi	1 KB
shlioc.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
shlopt.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
slcntr.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
sorter.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
sorter_noloc.inc	26.1.2011 19:49	Include File	2 KB
systeminfo.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
txtline.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
umatss.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB
xjobid.inc	26.1.2011 19:49	Include File	1 KB

Ek 2.1. 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 İntel

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.

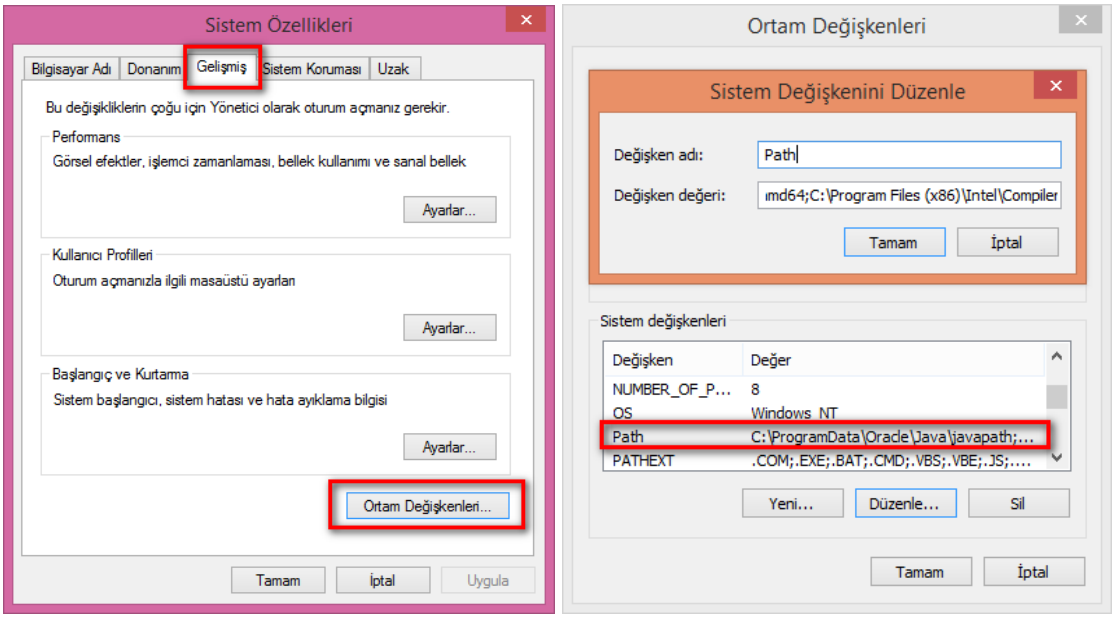
Dağıtıcı firma tarafından elde edilen readme.txt dosyasında *.exe oluşturmak için Fortran 10.1 kullanılması gerektiği söylenmektedir fakat Fortran 10.1 Windows 7 işletim sistemi için uyumlu değil, Linux işletim sistemi için uyumludur. Bu yüzden Fortran 10.1 sürümünden daha üst herhangi bir Fortran versiyonu 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 karşılaşılmaması açısından daha iyi olacaktır. Programlar anlatıldığı gibi kurulduktan sonra yapılması gerekenler aşağıda anlatılmıştır.

Ortam değişkenlerinin tanımlanması

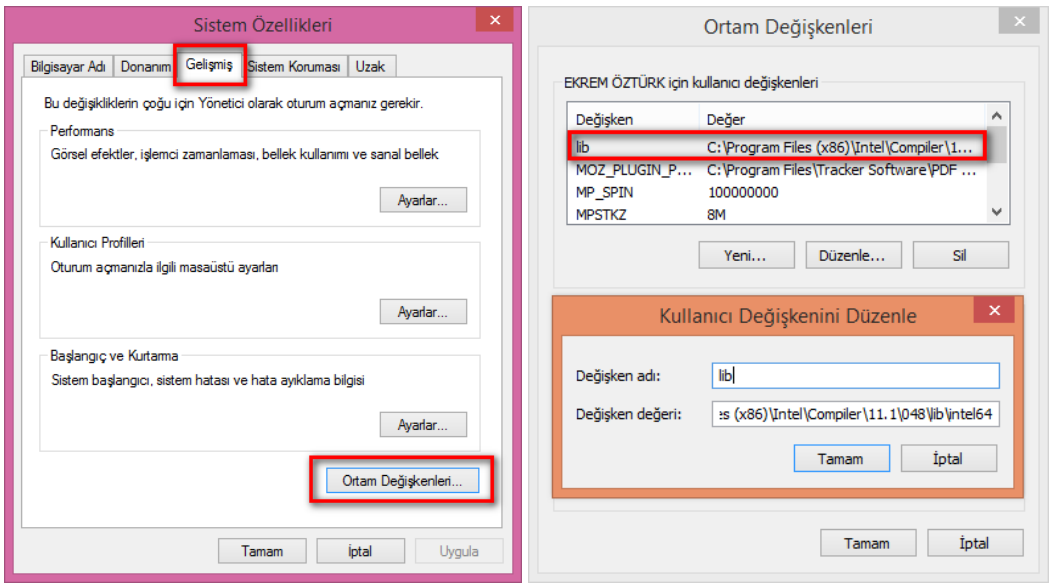
Bu aşama, LS-DYNA çözücüsünün oluşturulmasındaki en önemli aşamadır. Eğer ortam değişkenleri eksik ya da yanlış olarak tanımlanırsa alt programların çalışması için gerekli *.exe dosyasını oluşturmak imkânsızdır. Dolayısıyla programlar sırası ile kurulduktan sonra Ek 2.2'de görüldüğü gibi ortam değişkenleri 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 2.2. Path ortam (sistem) değişkeninin tanımlanması

Bu ayarlamalara ek olarak "Bilgisayar – > Özellikler – > Gelişmiş Sistem Ayarları – > Gelişmiş – > Ortam Değişkenleri – > Kullanıcı Değişkenleri" bölümüne Ek 2.3'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***).



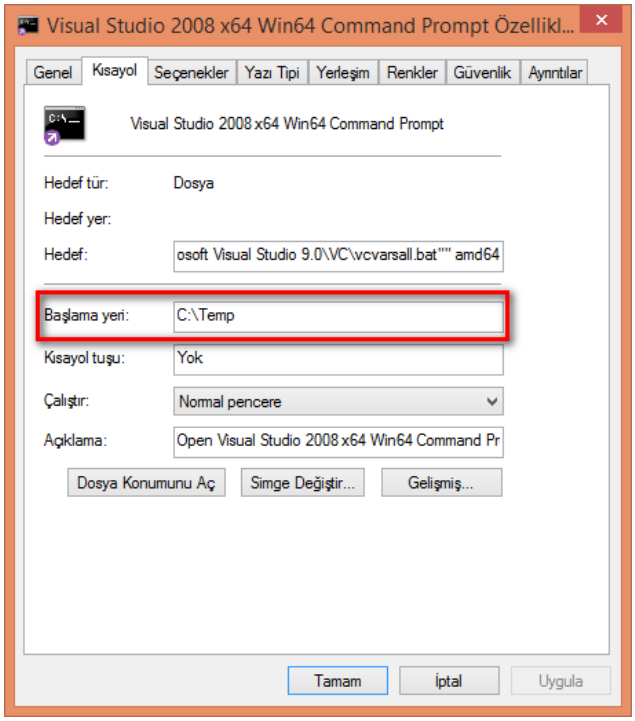
Ek 2.3. Lib ortam (kullanıcı) değişkeninin tanımlanması

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.

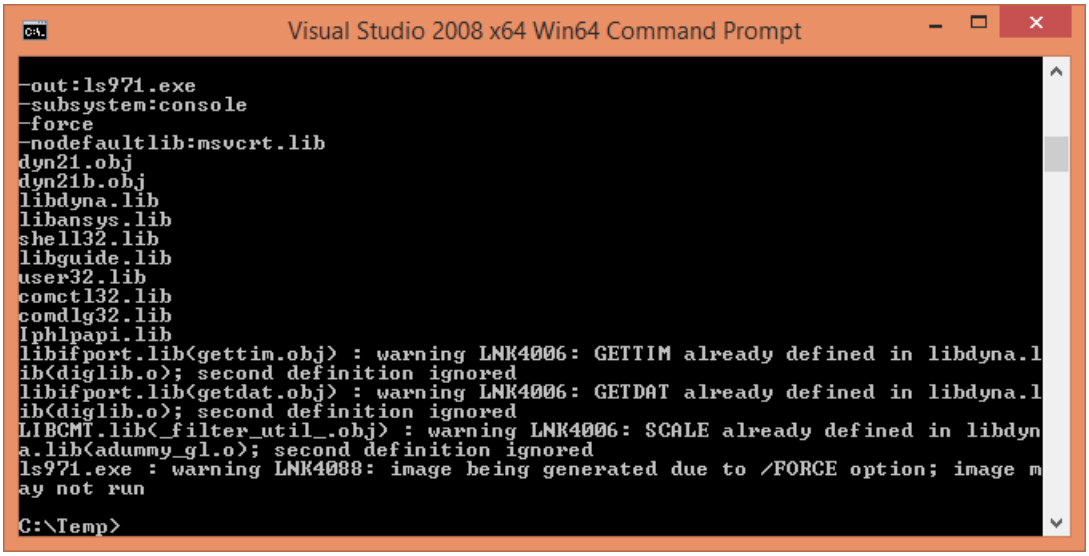
Çözücüyü oluşturabilmek için firmadan alınan dosyaların hepsinin aynı klasör içinde olması gerekmektedir. Bu klasör bilgisayarın herhangi bir yerinde olabilir fakat bu klasörün *C:\Temp* klasör yolunda olması önerilmektedir. Eğer yoksa bu klasörün oluşturulması gerekmektedir.



Ek 2.4. 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 2.4'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.

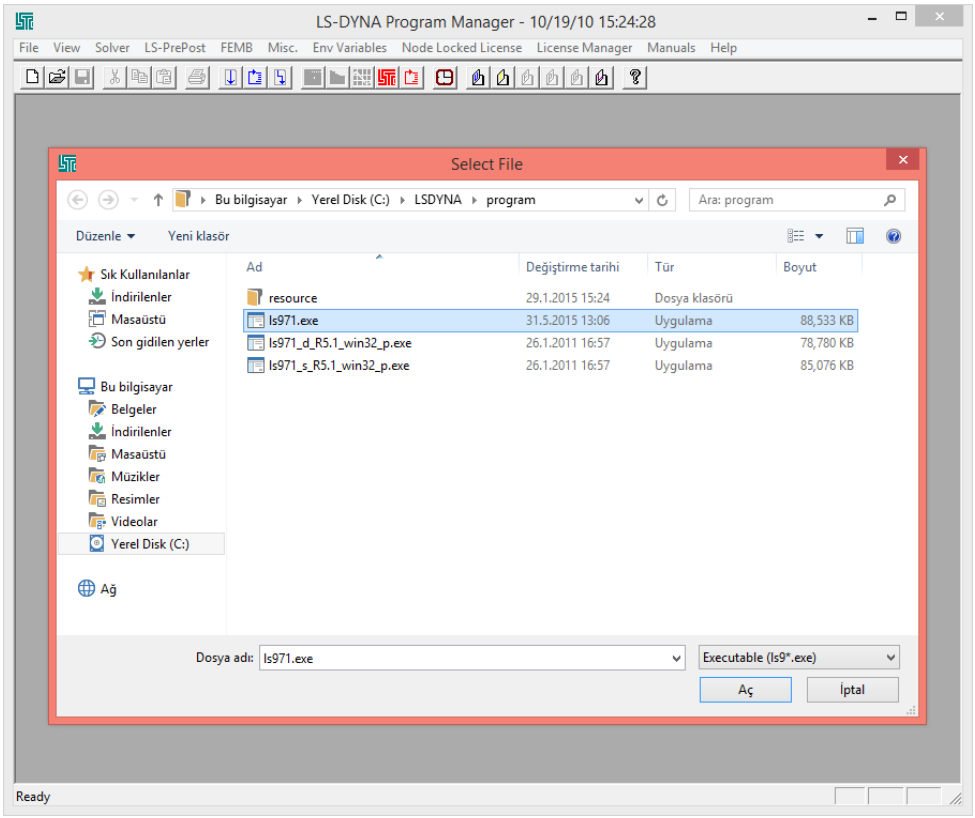
Bu işlemin ardından Visual Studio 2008 x64 Win64 Command Prompt uygulamasına "nmake" yazılıp enter tuşuna basılır. Burada "nmake" komutu kısmen de olsa debugging (hata ayıklama) işlemini gerçekleştirmektedir. Eğer alt programlar yazılırken hatalı kısımlar varsa bu komut yazıldıktan sonra hatalar ekranda 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 2.5'teki gibidir.



Ek 2.5. Yeni çözücü oluşturulduğunda komut satırındaki görüntü

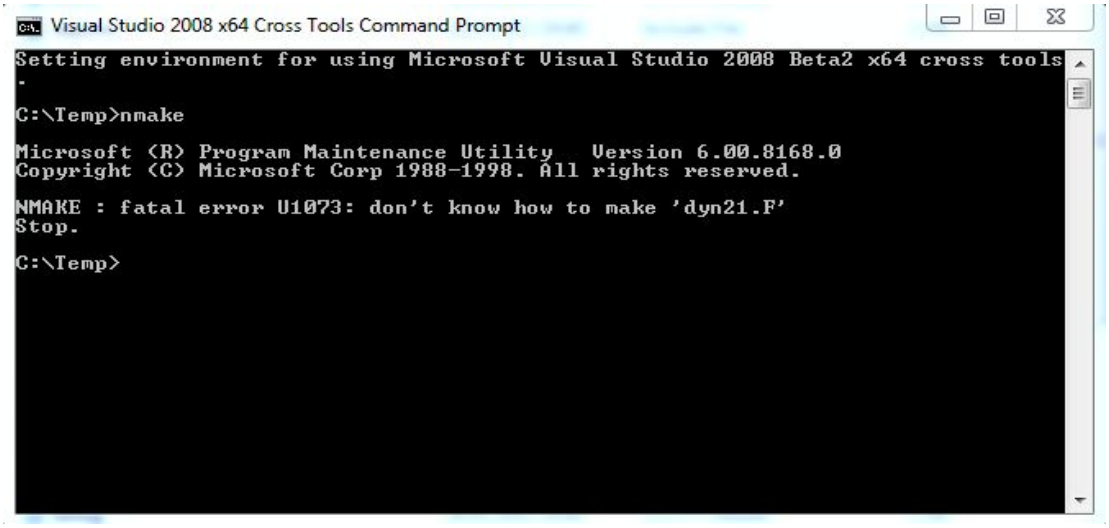
Bu çözücü dosyası *C:\LSDYNA* program yoluna kopyalanarak ve Ek 2.6'daki gibi LS-DYNA Programında "Solver – > Select Ls-Dyna Solver" kısmından oluşturduğumuz yeni çözücü (ls971.exe) seçilerek işlem tamamlanır ve alt programlar içerisine yazılan

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



Ek 2.6. Oluşturulan yeni çözücünün Ls-Dyna programında seçilmesi

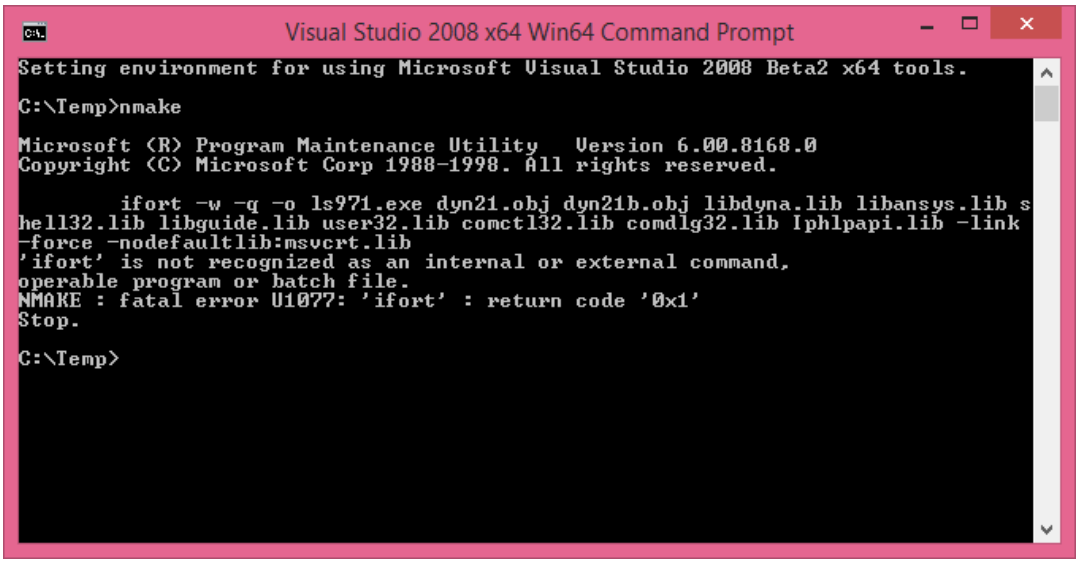
EK-3 Çözücü Oluşturmak için Gerekli İşlemler Yapılmadığında veya Eksik Yapıldığında Meydana Gelebilecek Hatalar



Ek 3.1. Dyn21.f dosyasının gerekli klasörde bulunmaması sonucunda oluşan hata

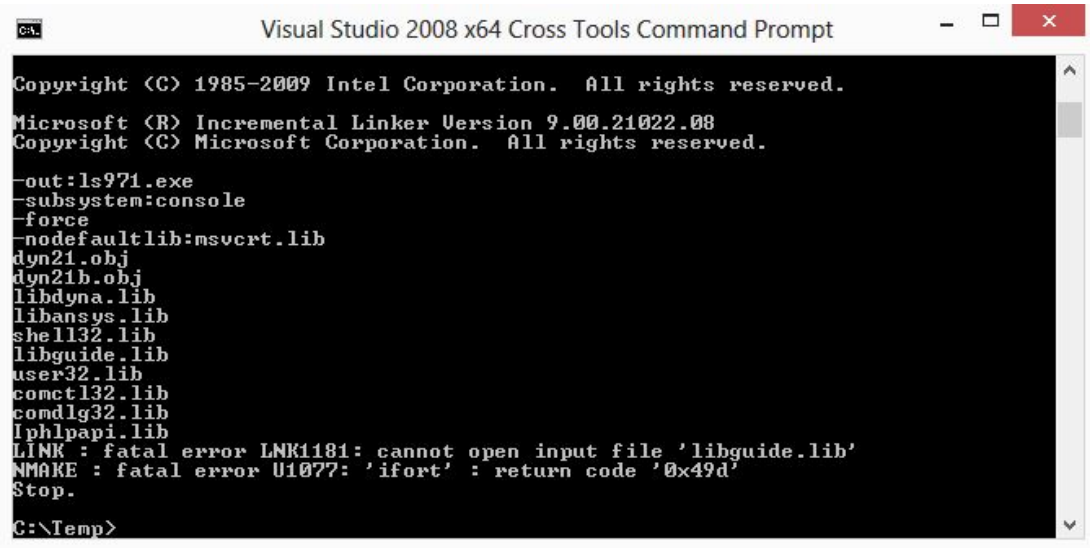
Derleme ve bağlantı işleminde firmadan alınan *.f, *.lib, *.inc, makefile, nmake dosyalarının hepsinin aynı klasörde olması gerekmektedir. Örneğin dyn21.f dosyası "C:\Temp" yolunda bulunmazsa komut satırında Ek 3.1'deki hata meydana gelmektedir.

Path sistem değişkenine gerekli klasör yolları eklenmediğinde ifort'un iç veya dış komut olarak tanımlanamadığı yönünde Ek 3.2'deki hata kodu meydana gelmektedir.



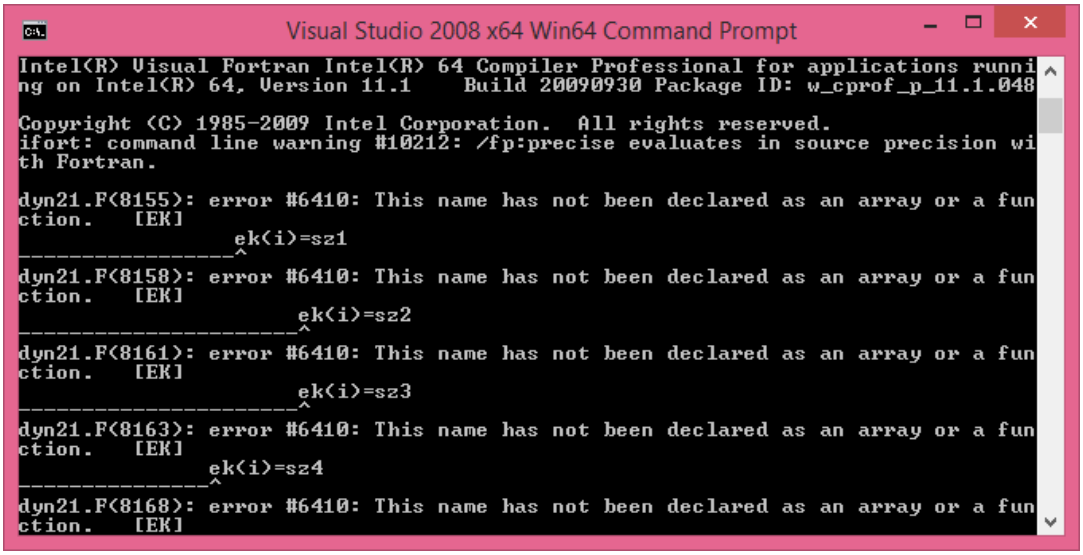
Ek 3.2. Path sistem değişkenine gerekli klasör yolları eklenmediğinden oluşan hata

Kullanıcı değişkenine “lib” isimli yeni ortam değişkeni eklenmemesi durumunda Ek 3.3’teki hata meydana gelmektedir.



Ek 3.3. 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 3.4’teki hata meydana gelmektedir. Alt programlar yazılırken yapılan hataların birçoğu bu komut satırında görülebilmektedir.



Ek 3.4. Kod yazılırken eksik tanımlama yapıldığında oluşan hatalardan biri

EK-4 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, ixs, 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, sifpozmerr
       real ortaalan, ortaalanmerkezcarpimli, geneltopalan
       real alfa, beta
       real mk1, mk2, mk3, tm1, tm2, tm3, br1, br2, br3
       dimension x(3, *), fibl(9, *), ixs(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 paylaştır.
c
!altprogramlar (bulanik_mantik, basinc-egrisi ve bpk_egrisi) arasındaki bilgi geçişi 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 paylaştır
       if (ilk.eq.0) then                  !sadece analiz başında text dosyası açmak için
            open(1, file='Basınç eğrisi.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
c
!STAMPAYA EN YAKIN DÜĞÜM NOKTASINI BULMA
    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.      !birinci düğümün y koordinat aralığı (sadece merkez çizgisi
boyunca uzanan elemanların kontrolü için)
+          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 tanımlanmaası
+           (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 değişk. 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
    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
c
c
          BULANIK MANTIK KONTROL ALGORİTMASI İLE ALFA VE BETA ÇIKIŞ
          DEĞİŞKENLERİ BULUNUYOR……..
c
      call basinc_egrisi(basinc, crvidext, tt, dt, a(n8), a(n9), a(n19), nlcur,
     +                   alfa)
      call bpk_egrisi(kuvvet, crvidext, tt, dt, a(n8), a(n9), a(n19), nlcur,
     +                beta)
      return
      end
c
      subroutine basinc_egrisi(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: LS-DYNA'da eğrileri hesaplamak için gerekli değişkenler
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, xbgn, 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
!Bu altprogramın çalışması için keyworddeki yükleme eğrisinde başlangıçta iki nokta olmalıdır!
c     (->*DEFINE_CURVE)
```

```
c
      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
!tt=0.0035 sn'ye kadar belirli zaman aralıklarında basınçların 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)=2
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2  )=tt+dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)=2
      elseif (tt.gt.0.001 .and. tt.lt.0.003) then
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2  )=tt-dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2+1)=4
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2  )=tt+dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)=4
      elseif (tt.ge.0.003 .and. tt.lt.0.0035) then
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2  )=tt-dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2+1)=6
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2  )=tt+dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)=6
         basinc=6
!Adaptif yükleme ile yeni basınç değerinin belirlenmesi
      elseif (tt.ge.0.0035) then
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2  )=tt-dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2+1)=basinc
         basinc=basinc+alfa*0.0007
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2  )=tt+dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)= basinc
         write(1, *) tt, basinc          !önceden açılan 'Basınç eğrisi.txt' dosyasına belirlenen yeni basınç
değerinin yazılması
      end if
c
1001  format(/' **** CHNLDC: Curve ID ', i10,
*              'Basinc egrisinde sadece iki nokta olmali!!')          !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, xbgn, 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)
      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
!Adaptif yükleme ile yeni BPK değerinin belirlenmesi
      elseif (tt.ge.0.0001) then
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2  )=tt-dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-2)*2+1)=kuvvet
         kuvvet=kuvvet+beta*50
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2  )=tt+dt
         pld(npc(lcidint)+(npoint-1)*2+1)= kuvvet
         write(2, *) tt, kuvvet              !önceden açılan 'BPK eğrisi.txt' dosyasına belirlenen yeni BPK
değerinin yazılması
      end if
c
1002  format(/' **** CHNLDC: Curve ID ', i10,
*             'Kuvvet egrisinde sadece iki nokta olmali!!')          !hata kodunun yazılması
c
      return
      end
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Ekrem ÖZTÜRK
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Aliağa, 1990
Telefon	**:**	0541 524 7752
Faks	**:**	0332 582 0450
E-mail	**:**	eozturk@konya.edu.tr

EĞİTİM

Derece	**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	: Aliağa YDA Lisesi, Aliağa, İZMİR	2008
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2013
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	-
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
06/2011-07/2011	Selçuk Üniversitesi-Atölye	Stajyer
07/2011-08/2011	Sider Dış Ticaret A.Ş.	Stajyer
06/2012-07/2012	Karayolları 3. Bölge Müdürlüğü	Stajyer
11/2013-03/2015	TÜBİTAK 112M913 No'lu proje	Bursiyer

UZMANLIK ALANI

Metal şekillendirme
Sonlu elemanlar analizi (yapısal)

YABANCI DİLLER

İngilizce (Yds: 77,5)

YAYINLAR

Ozturk, E., Turkoz, M., Halkaci, S., Halkaci, M., 2014, an Application of Fuzzy Logic Control Algorithm in Hydromechanical Deep Drawing Process, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 686, 95-100 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).