



Investigation on the effect of use of movable die in sheet hydroforming with die on formability

Mustafa Samet Ankaralı¹ , Murat Dilmeç^{2*} , Mevlüt Türköz³

¹Institute of Science and Technology, Necmettin Erbakan University, Konya, 42100, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya, 42100, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, Konya Technical University, Konya, 42100, Turkey

Highlights:

- Sheet hydroforming process
- Sheet hydroforming process with fixed die
- Effect of sheet hydroforming process with whole movable die (proposed method) on formability

Keywords:

- sheet hydroforming with movable die
- sheet hydroforming with fixed die
- finite element analysis
- SS 304

Article Info:

Research Article

Received: 04.02.2019

Accepted: 17.07.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.521754

Correspondence:

Author: Murat Dilmeç

e-mail:

muratdilmeç@erbakan.edu.tr

phone: +90 332 223 20 24

Graphical/Tabular Abstract

In this study, effect of use of movable die has been numerically investigated on thinning of sheet metal parts in sheet hydroforming with fixed die process using FEA and analyses have been verified experimentally in fixed die. Both of sheet hydroforming processes with fixed and movable die has been modeled by using the same coefficient of friction, blank holder force and pressure curves so as to compare thinning of flat cylindrical part. SS 304 was selected as material. As results of conducted analysis, while maximum % thinning of the part analyzed by using sheet hydroforming with fixed die is about 17%, in case of using the movable die maximum thinning occurs about 9%. In the other words, maximum thinning of the part analyzed using the hydroforming with movable die is about 8% lower than that's of the fixed die. Moreover, when the strains on the part is evaluated on the forming limit curve, while there is risk of crack on the part analyzed with fixed die, there is no risk of crack on that's of with movable die. Less % thinning of the part analyzed by using movable die can be explained by friction duration between sheet metal and die is less than that's of fixed die during the process and so resistance of the sheet metal against to thinning increases.

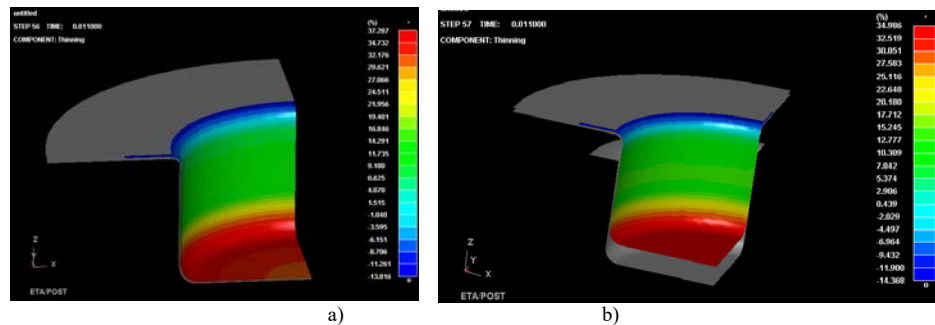


Figure A. Thickness distributions of part formed with a) fixed and b) with movable die for more depth modelled part

Purpose: The aim of this study is to investigate the effect of the fully movable female die sheet hydroforming process, which is proposed as a new method, on the formability of sheet metal parts by finite element analysis.

Theory and Methods:

Both of sheet hydroforming processes with fixed and movable die has been modeled by using the same coefficient of friction, blank holder force and pressure curves so as to compare thinning of flat cylindrical part.

Results:

Maximum percentage of thinning of the part analyzed by using sheet hydroforming processes with fixed die is about 17%, in case of using movable die maximum thinning occurs about 9%. The obtained strains on the part is evaluated on the forming limit curve, there is risk of crack on the part analyzed with fixed die, there is no risk of crack on that's of with movable die.

Conclusion:

Maximum thinning of the part analyzed using the hydroforming with movable die is about 8% lower than that's of the sheet hydroforming processes with fixed die. Less percentage of thinning of the part analyzed by using sheet hydroforming processes with movable die can be explained by friction duration between sheet metal and die is less than that's of fixed die during the process.



Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde hareketli kalıp kullanımının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisinin incelenmesi

Mustafa Samet Ankaralı¹, Murat Dilmeç^{2*}, Mevlüt Türköz³

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 42070, Meram, Konya, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 42070, Selçuklu, Konya, Türkiye

³Konya Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, 42075, Selçuklu, Konya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sac hidroşekillendirme prosesi
- Sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi
- Önerilen yeni yöntem olan tamamı hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 04.02.2019

Kabul: 17.07.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.521754

Anahtar Kelimeler:

Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme, sabit kalıpla sac hidroşekillendirme, sonlu elemanlar analizi, SS 304

ÖZET

Bu çalışmada, yeni bir yöntem olarak önerilen tamamı hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin sac metal parçaların şekillendirilebilirliğine etkisi sonlu elemanlar analizi ile nümerik olarak incelenmiştir ve analizler deneysel olarak sabit dişi kalıp üzerinde doğrulanmıştır. Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin etkisini görmek amacıyla, düz silindirik bir parçanın şekillendirilmesi için, hem sabit kalıpla hem de hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki proses sırasında, aynı sürtünme katsayıları, baskı plakası kuvveti ve basınç eğrileri kullanılmıştır. Sac malzeme olarak SS 304 seçilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ile gerçekleştirilen analiz sonucunda aynı parçada yaklaşık maksimum %17 civarında incelme olurken, hareketli dişi kalıpla yapılan analizde parçada %9 civarında maksimum incelme gözlenmiştir. Başka bir ifadeyle, hareketli dişi kalıpla yapılan analizde parçadaki maksimum % incelme değerinin, sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesiyle yapılan analizlere göre, yaklaşık %8 civarında daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca, parçadaki birim şekil değiştirmeler şekillendirme sınır eğrisinde değerlendirildiğinde, sabit kalıpla analiz sonunda parçada yırtılma riski gözlenirken, hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi için yapılan analizlerde yırtılma riski tespit edilmemiştir. Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde daha az % incelme olması, proses sırasında dişi kalıpla sac arasındaki sürtünmenin, sabit kalıba göre daha kısa sürede gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac ile dişi kalıp arasında sürtünmenin daha kısa süreli olması sayesinde, parçanın incelmeye karşı direnci artmaktadır.

Investigation on the effect of use of movable die in sheet hydroforming with die on formability

H I G H L I G H T S

- Sheet hydroforming process
- Sheet hydroforming process with fixed die
- Effect of sheet hydroforming process with whole movable die (proposed method) on formability

Article Info

Research Article

Received: 04.02.2019

Accepted: 17.07.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.521754

Keywords:

Sheet hydroforming with movable die, sheet hydroforming with fixed die, finite element analysis, SS 304

ABSTRACT

In this study, effect of use of movable die has been numerically investigated on thinning of sheet metal parts in sheet hydroforming with fixed die process using finite element analysis and analyses have been verified experimentally in fixed die. Both of sheet hydroforming processes with fixed and movable die has been modeled by using the same coefficient of friction, blank holder force and pressure curves so as to compare thinning of flat cylindrical part. SS 304 was selected as material. As results of conducted analysis, while maximum percentage of thinning of the part analyzed by using sheet hydroforming processes with fixed die is about 17%, in case of using movable die maximum thinning occurs about 9%. In the other words, maximum thinning of the part analyzed using the hydroforming with movable die is about 8% lower than that's of the fixed die. Moreover, when the strains on the part is evaluated on the forming limit curve, while there is risk of crack on the part analyzed with fixed die, there is no risk of crack on that's of with movable die. Less percentage of thinning of the part analyzed by using sheet hydroforming processes with movable die can be explained by friction duration between sheet metal and die is less than that's of fixed die during the process. Because of less friction duration between sheet metal and die, sheet hydroforming with movable die process, resistance of the sheet metal against to thinning increases

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: msametankarali@gmail.com, muratdilmece@erbakan.edu.tr, mevlutturkoz@ktun.edu.tr /

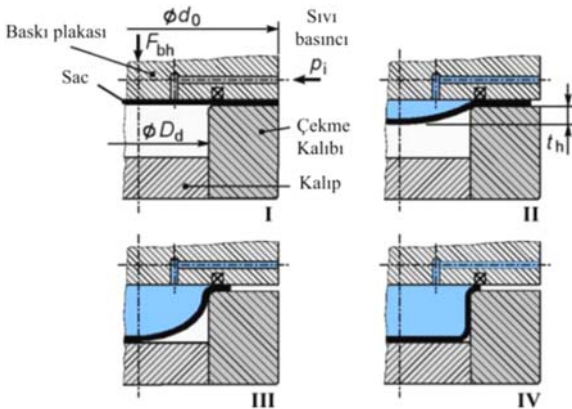
Tel: +90 332 223 20 24

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Literatürde akışkan şekillendirme, esnek kalıp şekillendirme, lastik zar şekillendirme olarak da adlandırılan hidrolik şekillendirme yöntemi, sac veya tüp şeklindeki metalik malzemenin, erkek veya dişi kalıbın formunu alan akışkan bir ortam yardımıyla (su, viskoz, polimerik malzeme v.s.) kapalı bir kaptta şekillendirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Akışkanın sıkıştırılmaz özelliği sebebiyle, şekillendirme sırasında meydana gelen basınç etkisiyle parçalar şekillendirilmektedir [1-3].

Gelişmekte olan ülkelerde özellikle 1990'lı yıllardan sonra daha çok otomotiv ve havacılık alanlarında kullanılmaya başlanan hidroşekillendirme yöntemi geleneksel biçimlendirme yöntemlerine göre pek çok avantajlar sağlamaktadır. Hidroşekillendirme yöntemi ile geleneksel biçimlendirme metodlarına nazaran, daha mukavemetli, daha hafif, şekillendirilmesi daha zor ve daha kompleks şekilli parçalar daha düşük maliyetle ve daha az aşamada, daha sıkı toleranslarla, daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip olarak ve daha tümleşik bir şekilde üretilebilmektedir. Gelecek on yıllık bir zaman dilimi içerisinde de bu yöntem otomotiv, havacılık, gıda gibi sektörlerin kaçınılmaz üretim tekniklerinden birisi olacaktır [2, 4-9].

Hidroşekillendirme prosesinin bir çok tipi vardır. Bunlardan birisi olan dişi kalıpla sac hidroşekillendirme yönteminde sadece dişi kalıp bulunmaktadır ve stampanın görevini yüksek basınçlı sıvı görmektedir [10]. Bu yöntemde önemli olan parametreler sıvı basıncı, baskı plakası (üst kalıp) kuvveti ve kalıpların formudur. Bu yöntemde, sac malzeme kalıp üzerine yerleştirilir ve baskı plakası sacı sıkıştırarak kalıp üzerine kapatıldıktan sonra, sac metal üzerine üst kalıba entegre edilmiş bir kanal vasıtasıyla basınç uygulanmaktadır ve sac malzeme dişi kalıbın şeklini almaya zorlanmaktadır (Şekil 1). Şekillendirme süresince sıvı akışkanın sızıntısını ve kontrolsüz malzeme akışının önüne geçmek için verilen basınca karşı baskı plakası kuvvetinin de düzenlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemin sonunda kalıplar açıldıktan sonra tek bir iş parçası üretilmiş olmaktadır [11].



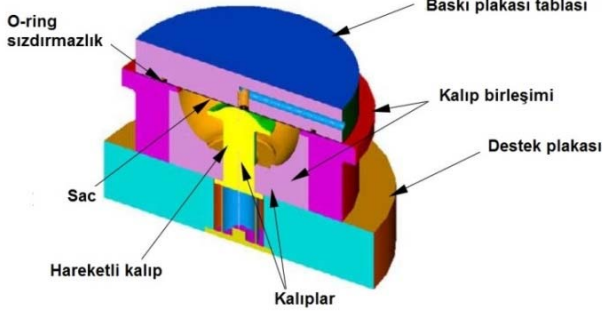
Şekil 1. Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ve adımları [12] (Sheet hydroforming with die and process steps)

Mühendisliğin bir perspektifi olarak, bir ürünü imal etmeden önce o ürünün fonksiyonelliği ve uygunluğu denetlenmelidir. En elverişli malzeme seçimi ve üretim metodu, tüm üretim masrafları göz önüne alınarak belirli şartlar çerçevesinde özenli bir şekilde seçilmelidir. Günümüzde kullanılan sonlu elemanlar metodu (SEM) bu amaç doğrultusunda yararlanılan, benimsenmiş bir yöntemdir. SEM analizinin kullanılmasıyla bir mühendis, bir malzemenin önceden herhangi bir hasara uğrayıp uğramadığını ve asıl ürünün üretilmeden önce uygunluğunu tahmin edebilmektedir. Analizi yapılan üründe hasar tespit edilmiş ise, yeniden başka bir malzeme seçimi veya mevcut proses parametreleri SEM'de yeniden tanımlanabilmektedir [13]. Literatürde sac metal hidroşekillendirme prosesi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, erkek kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi üzerine oldukça fazla çalışma olduğu [14-17], ancak dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ile ilgili çalışmaların az sayıda olduğu görülmüştür. Palumbo vd. [18] çalışmalarında, sac hidroşekillendirme yöntemi kullanılarak kompleks parçaların üretimi ile ilgili problemlere yoğunlaşmışlardır. Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme yönteminde farklı şekillere sahip kalıp boşluğu için deneyler yapmışlardır. Silindirik, kare ve bileşik geometri parçaların üretimi için sac hidroşekillendirme simülasyonları yapmışlardır ve deneysel çıktılarla analiz sonuçlarını teyit etmişlerdir. Bileşik geometrilerin oluşturulması çalışmasıyla ilgili esas problemleri, minimum incelmeyi kriter seçerek incelemişlerdir. Çeşitli konfigürasyonları rahatlıkla oluşturabilmek için sade bir kalıp tasarımı yapmışlardır. Böylece çok çeşitli bileşik biçimlere ve boyuta sahip kalıplar oluşturulabilmektedir. Kare ve bileşik geometri boşlukları içeren kalıplar arasındaki kıyaslamadan proses hakkında yararlı çıkarımlar ortaya koymuşlardır. Kalıp boşluğunun kare şekilli kalıp olması halinde olası hasar bölgesinin bükme-tersine bükme sebebiyle köşe yarıçapında olduğu, silindir biçimindeki kalıp boşluğunun durumunda, her tarafa düzgün çekme olmasından dolayı silindir biçimindeki parçanın olumlu tesirinin olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kleiner vd. [12] yaptıkları çalışmada, dişi kalıpla sac hidroşekillendirme yöntemi ile hidromekanik derin çekme yöntemini kıyaslamışlardır. Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme yöntemi ile yüksek şekil ve boyut hassasiyeti elde edilebilmesinin yanı sıra belirli geometriler için işlem kademelerinin azaltılabileceğini ortaya koymuşlardır. Bu yöntemin hidromekanik derin çekme yöntemine kıyasla dezavantajı, basınçtan dolayı sac ve kalıp arasında oluşan sürtünme kuvvetinin tesiriyle derinliği fazla olan parçaların şekillendirilmesinin mümkün olmamasıdır. Ancak bu proseste hidromekanik derin çekmede olduğu gibi zımbanın konumuna bağlı bir sıvı basıncı eğrisinin belirlenmesine gerek yoktur.

Hareketli kalıpla hidroşekillendirme ile ilgili olarak, Zhang vd. [19] hidroşekillendirme yönteminde, şekillendirme sırasında sac metalin deforme olan kısımlarını destekleyen, dişi kalıbın orta kısmından yüksek basınçta şişen sac parçaya

doğru hareket ettirilen kısmi bir kalıp kullanmışlardır (Şekil 2). Bu çalışmada amaç parçanın orta bölgelerinde tersine şekillendirme yapmaktır. Bununla birlikte, kısmi kalıpla tersine şekillendirmesi sonucunda, sac parçada meydana gelen % incelmelerin daha az olduğu ve bu nedenle daha yüksek sınıır çekme oranlarına erişebileceği sonucuna varmışlardır.



Şekil 2. Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme [2]
(Sheet hydroforming with movable die)

Erkek kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde baskı plakası ve sıvı basıncının zımba pozisyonuna göre değişken ayarlanması gerekmektedir ve bunun uygulanması ve belirlenmesi zahmetli bir prostestir. Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde ise şekillendirme işlemi sabit baskı plakası ve sıvı basıncı ile mümkün olabilmektedir. Yani dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin uygulanması daha basittir. Ayrıca kontrolün basit oluşu, daha basit hidrolik sistemlerle prosesin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde baskı plakası kuvveti ve basınç sabit uygulanmaktadır. Ancak, basınç arttıkça sac malzeme ile dişi kalıba temas etmekte ve sac ile dişi kalıp arasında sürtünme olmaktadır. Bu sürtünmenin etkisiyle, sac malzemede bölgesel incelme oluşmaktadır.

Bu çalışmada, dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde dişi kalıbın tamamı hareketli yapılarak, sac malzeme ile dişi kalıbın sürtünmesi daha da azaltılması ve parçada daha üniform bir kalınlık dağılımı elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca sabit ve tamamı hareketli dişi kalıp kullanılmasının sonuçlara etkisi de belirlenmiş olacaktır. Yapılan araştırma sonuçlarına göre, uygulanması daha karmaşık olan erkek kalıpla sac hidroşekillendirmeyele üretilebilecek nispeten derin parçaların, tamamı hareketli dişi kalıpla sac

hidroşekillendirme prosesiyile de üretilebilirliği sağlanabilecektir.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, Şekil 3'te ölçüleri verilen parçanın, sabit ve hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ile üretilmesi sonunda elde edilen kalınlık dağılımları nümerik olarak incelenmiştir.

Yine her iki proses kullanılarak, aynı kalıp çapında daha derin parçanın analizi sonunda elde edilen sonuçlar da incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerini doğrulamak amacıyla sabit dişi kalıpta deneyler yapılmış ve parçadaki kalınlık dağılımları analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

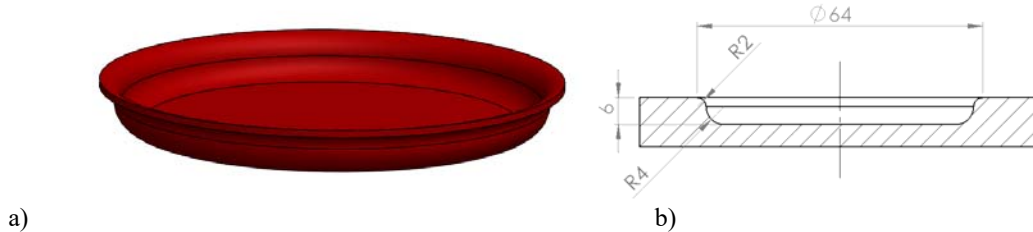
2.1. Sabit Dişi Kalıpla Sac Hidroşekillendirme Prosesinin Modellenmesi

(Modelling the sheet hydroforming process with die)

Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme bileşenleri; baskı plakası, sac malzeme ve alt kalıptan oluşmaktadır (Şekil 4). Burada sac malzeme *shell* olarak modellenmiştir. Dynaform sonlu elemanlar yazılımında prosesin daha kısa sürede çözüme erişebilmesi için proses çeyrek olarak modellenmiştir. Modellemede sınıır koşulları belirlenirken; alt kalıbın çeyrek kısmını oluşturan kenarlarının dönme ve tüm ekseninde deplasman hareketleri; baskı plakasının dönme ve x ve y eksenini hareketi kısıtlanmıştır. Sac malzemenin çeyrek kısmını oluşturan kenarlarının ise y eksenini hareketi kısıtlanmıştır. Uygulanan baskı plakası kuvveti aşağıda belirtilen kuvvetlerin $1/4$ 'ü kadar baskı plakasının üzerine uygulanmıştır.

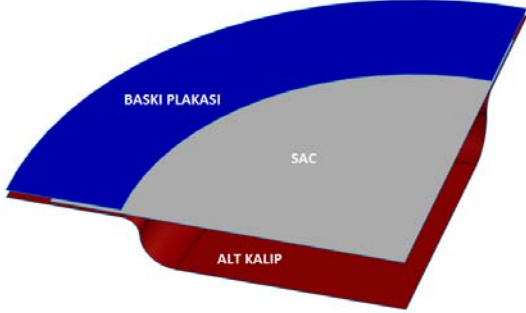
Sabit dişi kalıpla hidroşekillendirme prosesi baskı plakası kuvveti uygulama ve basınç olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Baskı plakası kuvveti aşamasında baskı plakası sac malzemeye bir kuvvet uygulanır. Basınç aşamasında ise sabitlenen sac malzemeye kalıp geometrisini oluşturmak için üstten sıvı basıncı uygulanır.

Baskı plakası ile kapama sırasında alt kalıp hareketsiz durmakta ve sac malzeme üzerine 40000 N'luk baskı plakası kuvveti uygulanmıştır. Burada uygulanan baskı plakası kuvveti sac malzemede yırtılma olmayacak şekilde ve yüksek bir incelme değeri elde etmek için fazla miktarda verilmiştir. Basınç aşamasında alt kalıp hareketsiz durmakta, baskı plakası 40000 N'luk sabit bir kuvvetle etki etmekte ve



Şekil 3. a) Parçanın 3 boyutlu görünümü b) Dişi kalıp kesit geometrisi
((a) 3 dimensional view of the part (b) Sectional geometry of the die)

188 MPa basınç sac malzemenin tam olarak alt kalıbın şeklini almasını sağlamaktadır. Bu prosese ait bazı parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

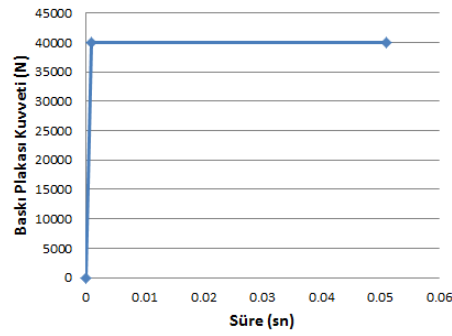
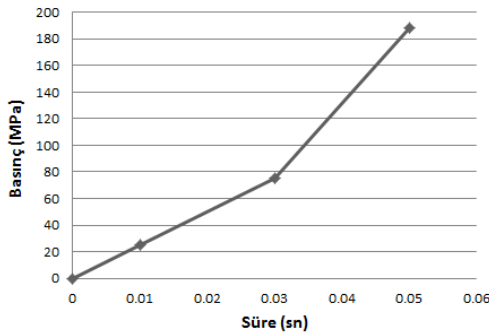


Şekil 4. Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin bileşenleri ve kalıp bileşenlerinin montajı
(Tools of the sheet hydroforming with fixed die and assembly of tool elements)

Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesindeki baskı plakası kuvveti ve basınç dağılımı Şekil 5’teki gibi uygulanmıştır. Bu eğriler parçanın başarılı bir şekilde şekillendirilmesi için uygun eğriler olarak belirlenmiştir. Analizlerde mesh boyutunun etkisi de incelenerek yakınsama çalışması yapılmıştır.

Tablo 1. Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde bazı parametreler
(Some parameters in sheet hydroforming with die)

Baskı plakası–sac metal sürtünme katsayısı	0,17
Alt kalıp–sac metal sürtünme katsayısı	0,17
Baskı plakası kuvveti (N)	40000
Mesh boyutu (mm)	1
Eleman formülasyonu	BELYTSCHKO-TSAY
İntegrasyon sayısı	5
Sac kalınlığı (mm)	1
Malzeme	SS 304
Sac malzemenin ilkel çapı (mm)	80
Eleman sayısı	1791
Düğüm noktası sayısı	3384



Şekil 5. a) Zamana bağlı uygulanan baskı plakası kuvveti grafiği b) Zamana bağlı uygulanan basınç grafiği
(a) Blank holder force and time chart (b) Pressure range and time chart)

2.2. Hareketli Dişi Kalıpla Sac Hidroşekillendirme Prosesinin Modellenmesi (Modelling the Sheet Hydroforming Process With Movable Die)

Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme bileşenleri; baskı plakası, sac malzeme, üst kalıp ve hareketli dişi kalıptan oluşmaktadır (Şekil 6). Önerilen bu yeni yöntemde, ilk olarak baskı plakası ile sac malzeme sabit kalıpta olduğu gibi sıkıştırılmakta ve sac metal üzerine sıvı basıncı uygulanarak sac malzeme, olması gereken konumundan daha altta konumlandırılmış dişi kalıp boşluğu içerisine şişirilmektedir. Belirli bir süre sonra olması gereken konumdan daha altta konumlandırılmış hareket edebilen dişi kalıp yukarı doğru hareket ettirilerek kubbe şeklinde şişen sac metal ile temas ettirilir. Dişi kalıp olması gereken konumu aldıktan sonra sac malzeme üzerine kalibre basıncı uygulanarak sac metalin dişi kalıbın şeklini alması sağlanır. Bu sayede, sac malzeme ile dişi kalıp arasındaki sürtünme süresi azaltılmış ve kalıp boşluğu içerisine daha fazla malzeme alınmış olur.



Şekil 6. Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin bileşenleri ve yüzey montajı
(Ingredient of the sheet hydroforming with movable die and surface assembly)

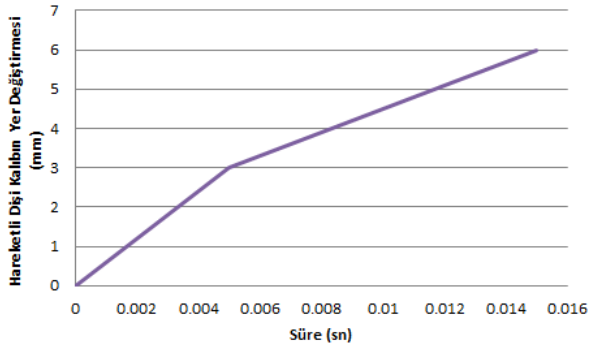
Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesine ait bazı parametreler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesindeki baskı plakası kuvveti ve basınç dağılımı sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesiyle aynı olarak uygulanmıştır.

Burada hareketli dişi kalıbın zamana göre mesafesinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Yapılan analizler sonunda, olması gereken konumdan 6 mm aşağıda konumlandırılmış hareketli dişi kalıbın zamana göre konum grafiği Şekil 7'deki gibi olmasının uygunluğu görülmüştür.

Tablo 2. Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde bazı parametreler
(Some parameters in sheet hydroforming with movable die)

Baskı plakası-sac metal sürtünme katsayısı	0,17
Alt kalıp-sac metal sürtünme katsayısı	0,17
Hareketli dişi kalıp-sac metal sürtünme katsayısı	0,17
Baskı plakası kuvveti (N)	40000
Mesh boyutu (mm)	1
Eleman formülasyonu	BELYTSCHKO-TSAY
İntegrasyon sayısı	5
Sac kalınlığı (mm)	1
Malzeme	SS 304
Sac malzemenin ilkel çapı (mm)	80
Eleman sayısı	1548
Düğüm noktası sayısı	42512



Şekil 7. Hareketli dişi kalıbın zamana göre mesafesi
(Movable die displacement and time chart)

Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde bu zaman aralıkları, sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac malzemenin alt kalıba erişme süresine göre

daha fazla alınmıştır. Bu sayede, malzemenin altta konumlandığı için hareketli dişi kalıba temas etmeden bir miktar daha şekillenmesine izin verilmesini sağlayacak şekilde tanımlanmıştır.

2.3. 30 mm Derinliğinde Modellenen Parça (Modelled Part with 30 mm Depth)

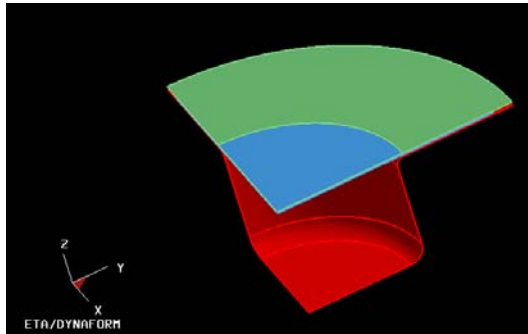
Daha derin parçalarda hareketli kalıpla şekillendirmenin etkisini görmek amacıyla, alt kalıbın derinliği 6mm'den 30mm'ye yükseltilecek de analizler gerçekleştirilmiştir. Bu parçanın şekillendirilmesinde flanş bölgesinde çok az malzeme kalacak şekilde 110 mm ilkel çap kullanılmıştır. Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde bazı parametreler Tablo 3'te verilmiştir.

30 mm derinlikli sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi sonlu elemanlar modeli, baskı plakası kuvveti ve basınç eğrisi Şekil 8'de gösterilmiştir. Benzer şekilde hareketli kalıp için de analizler yapılmıştır.

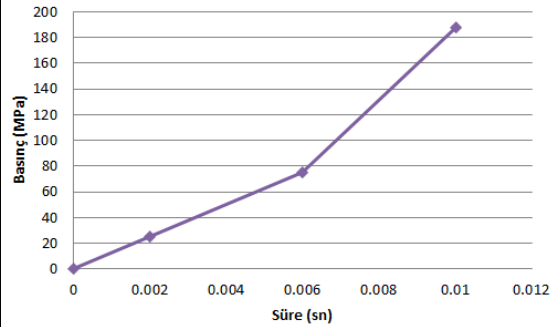
Tablo 3. Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde bazı parametreler
(Some parameters in sheet hydroforming with movable die)

Baskı plakası-sac metal sürtünme katsayısı	0,02
Alt kalıp-sac metal sürtünme katsayısı	0,02
Baskı plakası kuvveti (N)	5000
Mesh boyutu (mm)	1
Eleman formülasyonu	BELYTSCHKO-TSAY
İntegrasyon sayısı	5
Sac kalınlığı (mm)	1
Malzeme	SS 304
Sac malzemenin ilkel çapı (mm)	110
Eleman sayısı	5055
Düğüm noktası sayısı	10174

Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac malzeme yaklaşık 40 MPa basınçta alt kalıba eriştiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden hareketli dişi kalıp üst kalıba sırasıyla 1; 3; 5; 7 mm mesafede konumlandırılmış ve sırasıyla 40 MPa basınçtan başlayarak 50; 60; 70; 80 MPa basınç değerleri uygulanmıştır. Burada, belirli zaman aralıklarında sabit basınçta hareketli dişi kalıba hareket



a)



b)

Şekil 8. a) Sonlu elemanlar modeli b) Zamana bağlı uygulanan basınç grafiği
(a) Finite element model (b) Pressure and time chart)

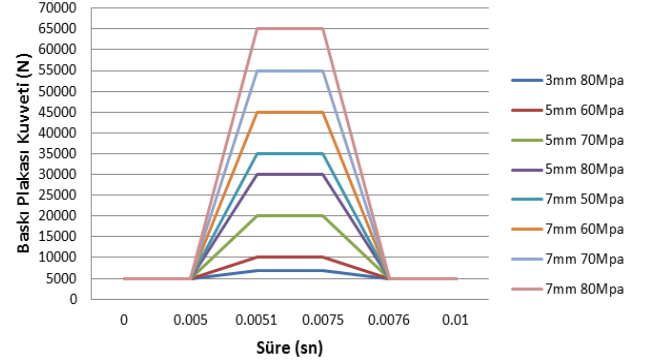
verilmiştir ve hareketli dişi kalıbın etkileri derin parçada incelenmiştir. Proseslerde zamana bağlı hareketli dişi kalıbın mesafesi ve zamana bağlı basınç eğrisi Şekil 9'daki gibi uygulanmıştır.

Bazı denemelerde fazla şişme olduğundan, parçada katlanmalar oluştuğu ve proses sonunda baskı plakasında yukarı hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bu durumu gidermek için, sabit basınç uygulandığı sırada yani parçanın son şeklini almasına yakın durumda baskı plakası kuvvetleri artırılarak Şekil 10'daki gibi uygulanmıştır. Burada baskı plakası kuvvetinin artması, sac malzeme kalıp içerisine parçanın son şeklini almasına yakın miktarda çekildikten sonra sabit basınçta uygulandığı için parçada oluşan incelmelerde farklılık oluşturmamıştır.

2.4. Sonlu Elemanlar Analizlerinin Deneylerle Doğrulanması (Experimental Verification of Finite Element Analysis)

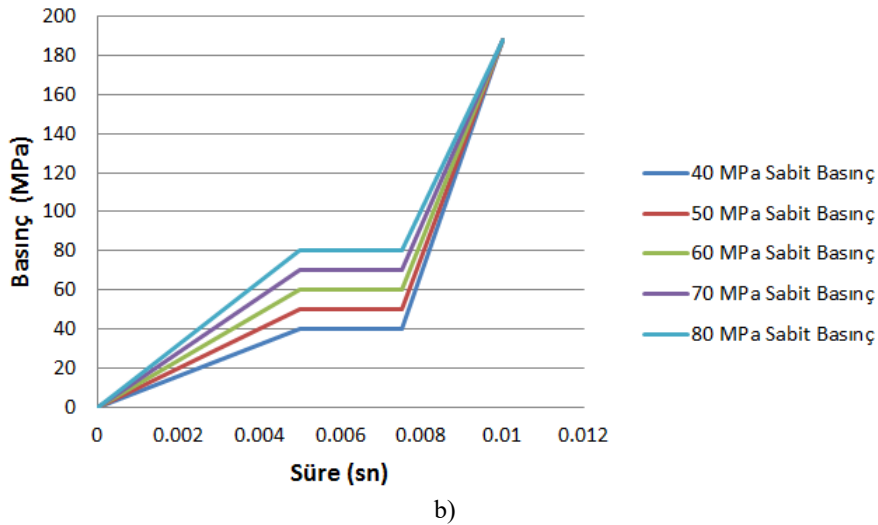
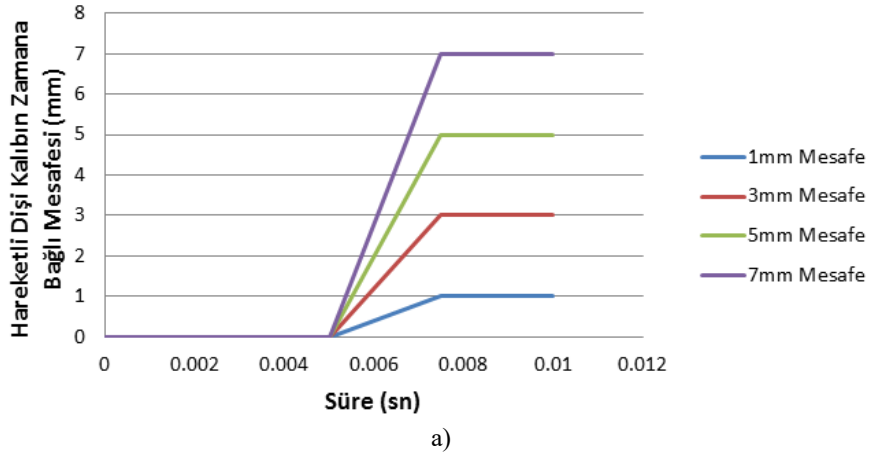
Sonlu elemanlar analizlerini doğrulamak amacıyla, sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi için deneyler gerçekleştirilmiştir ve numunelerdeki kalınlık dağılımları

karşılaştırılmıştır. Hareketli dişi kalıpla hidroşekillendirme prosesi için deneyler yapılamamıştır.



Şekil 10. Bazı proseslerde uygulanan zamana bağlı baskı plakası kuvvetleri
(Time dependent blank holder forces in some processes)

Çünkü dişi kalıpla yukarı doğru hareket verilmesi sırasında, sacın yüzeyine sıvı basıncı etki ettiğinden dolayı çok büyük kalıp ilerleme kuvvetleri uygulanmak zorundadır. Bu

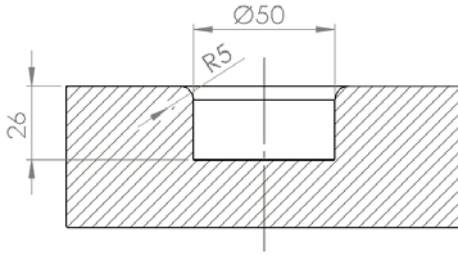


Şekil 9. a) Hareketli dişi kalıbın zamana bağlı mesafeleri b) Proseslerde zamana bağlı uygulanan sabit basınç eğrileri
(a) Displacement and time chart of movable die (b) Time dependent constant pressure curves in processes)

durumda büyük kapasiteli prese ihtiyaç vardır. Ayrıca hareketli kalıbın kalıp boşluğu içerisinde hareketi için tabanının yarıçaplı olmayıp düz olması gerekmektedir. Bu durumda parçanın taban yarıçapları aynı ölçülerde tekrarlı olarak üretilemeyebilir. Deneyler Konya Teknik Üniversitesi'nde hidroşekillendirme laboratuvarında bulunan hidroşekillendirme presinde yapılmıştır (Şekil 11). Deneyde kullanılan alt kalıbın kesit özellikleri mm cinsinden Şekil 12'de gösterilmiştir. Deneylerde 1 mm kalınlığa sahip SS 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Burada parça-baskı plakası ve parça-alt kalıp arasında yağlayıcı olarak parafin ve ince polietilen film kullanılmıştır. Deneylerde, sac malzeme alt kalıba merkezlendikten sonra baskı plakası analizlerdeki değerlerde bastırılmıştır. Sonra sac malzeme üzerine sıvı basıncı uygulanarak parça şekillendirilmiştir.



Şekil 11. Deneylerin gerçekleştirildiği hidroşekillendirme presi
(Hydroforming press that conducted experiments)



Şekil 12. Alt kalıp kesit geometrisi
(Sectional geometry of the bottom die)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada silindirik parça için yapılan analizler sonunda, 188 MPa civarı basınçta sac metalin tam olarak kalıbın şeklini aldığı belirlenmiştir. Ayrıca baskı plakası kuvveti için parçada proseslerin etkisini belirgin şekilde ortaya koymak amacıyla, parça yırtılmadan fazlaca inceleme değeri oluşturacak baskı plakası kuvveti değeri de 40000 N belirlenmiştir. 40000 N baskı plakası kuvveti, 188 MPa basınç etkisinde olan 1 mm kalınlığında ve 80 mm ilkel çaplı SS304 sac malzemenin sabit dişi kalıpla ve hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesleri sonlu elemanlar

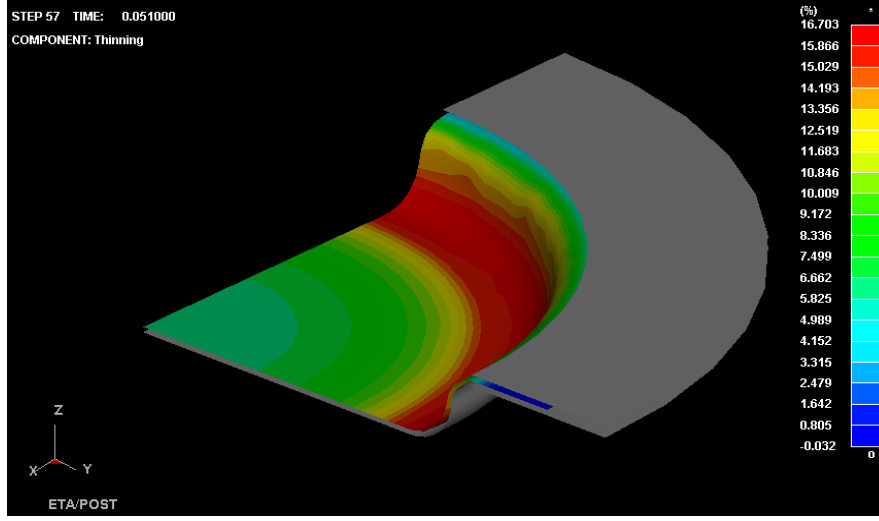
yazılımında modellenmiş ve hareketli dişi kalıp kullanmanın avantajları belirlenmiştir.

3.1. Sabit Dişi Kalıpla Sac Hidroşekillendirme Prosesi (Sheet Hydroforming with Fixed Die)

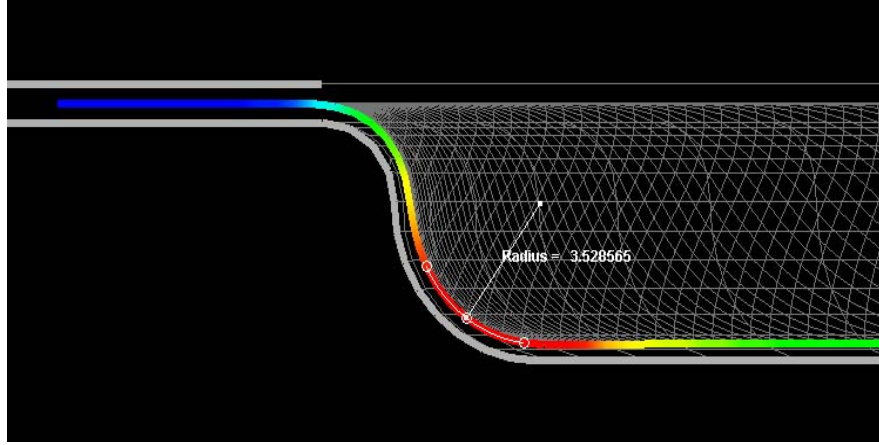
Sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi analizleri sonunda elde edilen % incelleme dağılımı Şekil 13'te verilmiştir. Sac parçada maksimum incelleme yaklaşık %16,7 civarında oluşmuştur. Burada sac yarıçapı yaklaşık 3,53 mm olarak yazılımdan ölçülmüştür (Şekil 14). Parça üzerinde oluşan birim şekil değiştirmeler, çelik malzemeye ait şekillendirme sınır eğrisi ile değerlendirilmiştir (Şekil 15). Sac parçada şekillenme sonucunda alt kalıbın 2 mm lik üst köşe yarıçap bölgelerinde yırtılma riski olan bölgeler oluştuğu gözlenmiştir. Parçada herhangi bir buruşma bölgeleri oluşmamıştır. Yapılan analizlerin sonucunda eleman boyutuna göre maksimum % incelleme ve sac malzemede ölçülen yarıçap değerleri Şekil 16'da verilmiştir. Burada 1,5 ve 2 mm eleman boyutu ile modellenen proseslerde düzgün bir yarıçap elde edilememiştir. Alt kalıbın yarıçapı 4 mm olduğu için sac malzemenin yarıçapı 4 mm den küçük ölçülmüştür (Sac malzeme *shell* olarak modellendiği için). En fazla fark ise 0,25 mm mesh boyutunda 3,49 mm ve 1 mm mesh boyutunda 3,56 mm'lik yarıçap ölçümleri elde edilmiştir ve bu da genelde yaklaşık $(3,56-3,49) / (3,56) \approx 0,02$ lik çok küçük bir fark oluşmuştur. İncelleme değerlerinde ise; 0,25 mm mesh boyutunda da %17,5 iken 1mm mesh boyutunda %16,7 oluşmuştur. İncelmedeki bu genel değişim ise $(17,5-16,7) / (17,5) \approx 0,05$ lik kabul edilebilir bir değişim gözlemlenmiştir ve ayrıca çözüm süresi 0,025 mesh boyutunda 1 mm mesh boyutuna göre yaklaşık 15 kat artmıştır. Bu sebeplerden dolayı en uygun mesh boyutu 1 mm olarak belirlenmiştir.

3.2. Hareketli Dişi Kalıpla Sac Hidroşekillendirme Prosesi (Sheet Hydroforming with Movable Die)

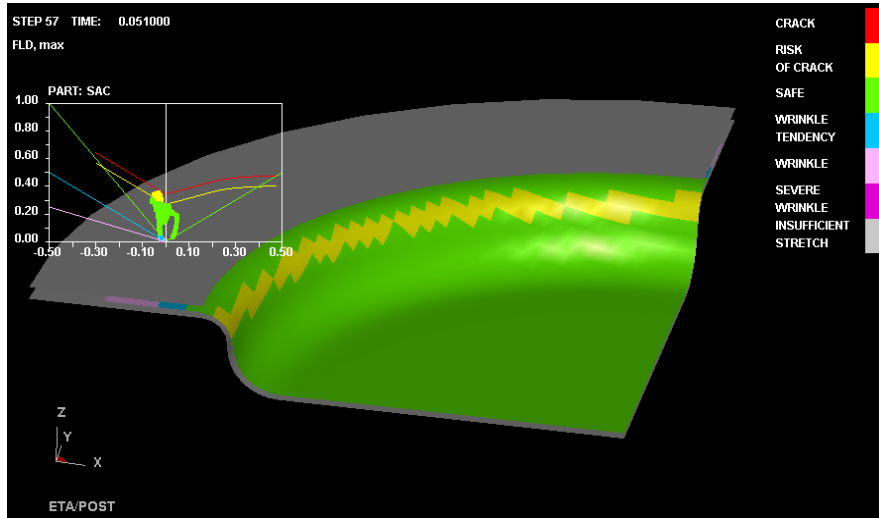
Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin analizi sonunda sac parçada maksimum yaklaşık %9 incelleme meydana gelmiştir. Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesine göre sac parçada yaklaşık maksimum %17 incelleme olduğundan, hareketli kalıpla elde şekillendirilen parçada %8 daha az incelleme olmuştur (Şekil 17). Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac malzemede herhangi bir yırtılma riski olan bölge meydana gelmemiş ve sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme yönteminde şekillendirilen sac malzemeden daha üniform kalınlıkta dolayısıyla daha mukavemetli bir yapı elde edilmiştir (Şekil 18). Şekilden de görüldüğü gibi, sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac malzeme yırtılma eğiliminde oluşan bölgeler hareketli kalıpla yapılan proses analizinde hafif buruşma eğiliminde olan bölgelere dönüşmüştür. Ancak bu analizlerde numune üzerinde tespit edilmemiştir. Yani parçada buruşma meydana gelmeyecektir. Bu süreçte şekillenme sonunda hareketli dişi kalıbın 4 mm yarıçap bölgesindeki sac parça yarıçapı yaklaşık 3,45 mm olarak yazılımdan ölçülmüştür (Şekil 19). Dolayısıyla, sac parça kalınlığı da göz önüne alındığında, parçanın kalıbın şeklini aldığı söylenebilir.



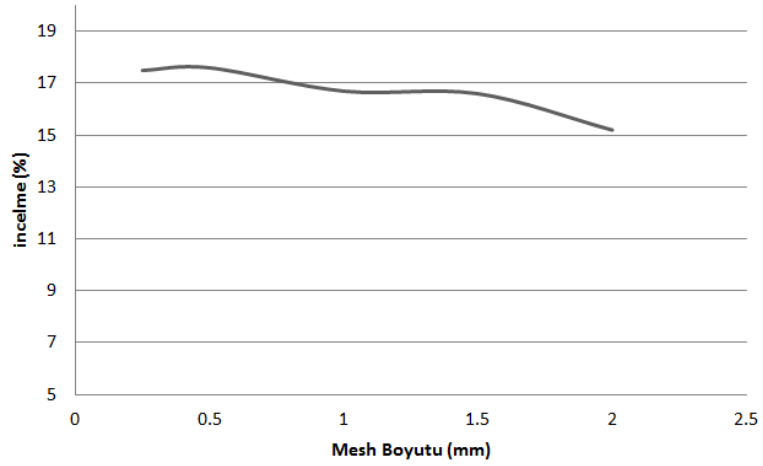
Şekil 13. Sabit kalıpla hidroşekillendirme sonunda parçadaki kalınlık dağılımı (Thickness distribution of part formed with sheet hydroforming with fixed die)



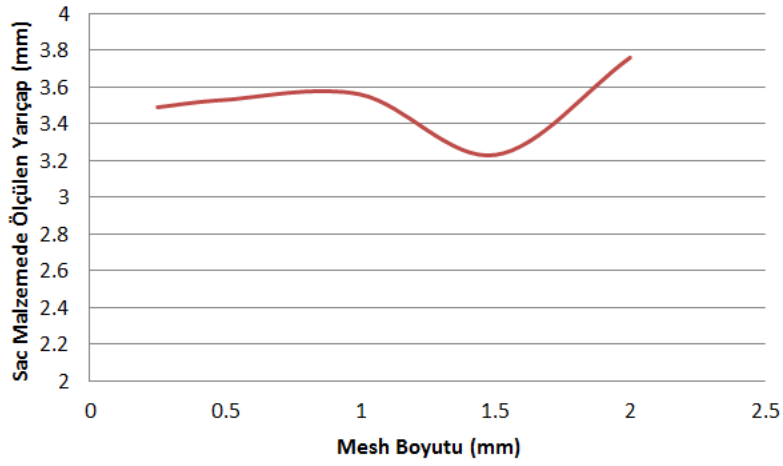
Şekil 14. Sac malzemede ölçülen yarıçap (Radius measured on sheet material)



Şekil 15. Sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde şekillendirilen sac malzemenin şekillendirme sınır eğrisinde değerlendirilmesi (Evaluation of the sheet part formed with sheet hydroforming with fixed die on the in forming limit curve)

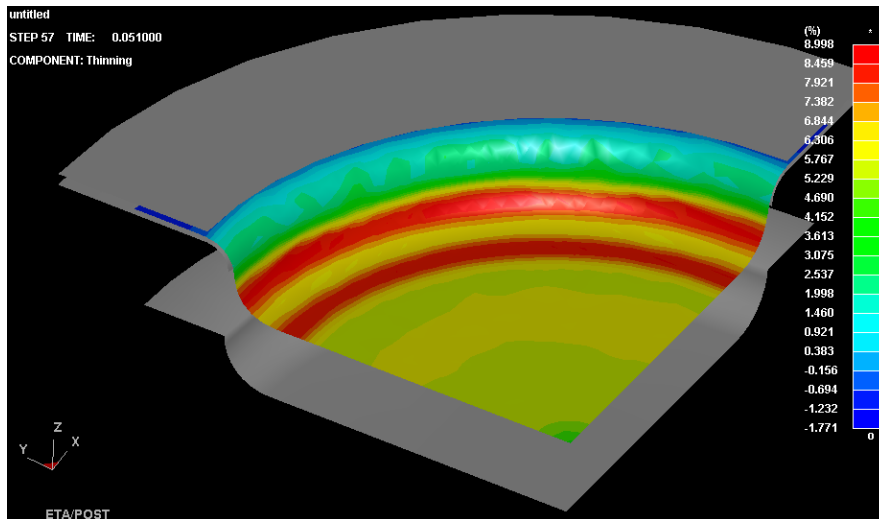


a)

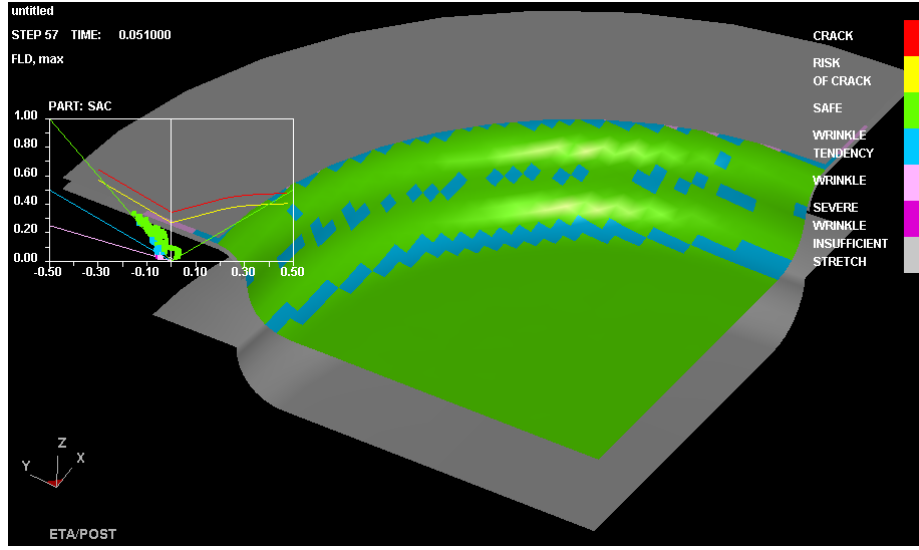


b)

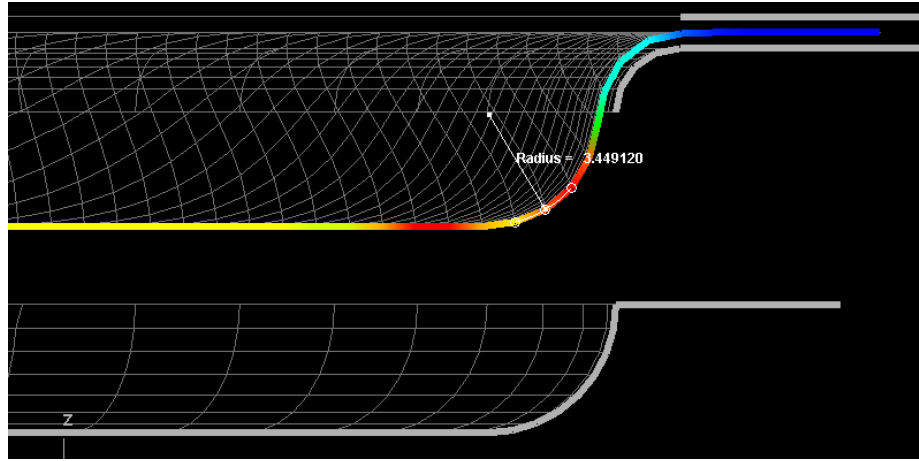
Şekil 16. Mesh boyutuna bağlı sac parçada a) maksimum % incelme, b) ölçülen yarıçap
(a) max thinning % depending on the mesh size (b) Radius measured on sheet part depending on mesh size)



Şekil 17. Hareketli kalıpla şekillendirme sonunda parçadaki kalınlık dağılımı
(Thickness distribution of part formed with sheet hydroforming with movable die)



Şekil 18. Hareketli dişi kalıpla şekillendirilen sac parçanın şekillendirme sınır eğrisi üzerinde değerlendirilmesi
(Evaluation of the sheet part formed with movable die on the in forming limit curve)



Şekil 19. Sac parçada ölçülen yarıçap (Radius measured on sheet part)

3.3. Proseslerde Zamana Bağlı Şişme Miktarları (Time Dependent Bulge Quantities in Processes)

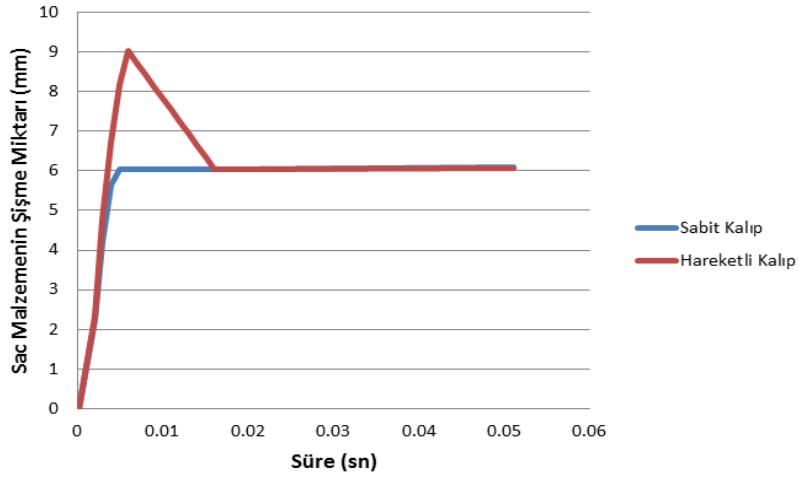
Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac malzemenin sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesine nazaran sac malzemenin daha fazla akmasına olanak sağlandığını (daha fazla şişirilmesi) belirtmiştik. 40000 N baskı plakası kuvveti ve 188 MPa basınç altında yapılan sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac malzeme 0,005 sn de dişi kalıba ulaşmıştır. Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde ise 0,006 sn de hareketli dişi kalıba ulaşarak yaklaşık 9 mm şişme gözlemlenmiştir ve hareketli dişi kalıp 0,016 sn de kapanmıştır. Hareketli dişi kalıbın sac malzemeye temas süresi hareket halinde iken toplamda 0,01 saniyedir ve sac malzeme 0,051 toplam proses süresince şişmeye devam ederek kalıp formunu almıştır (Şekil 20). Bu süreler parçanın düzgün olarak şekillendirilmesi için önemlidir. Bu sürelerin belirlenmesiyle ve gerçek proseslerde uygulanmasıyla hareketli kalıbın olumlu etkisi ortaya çıkacaktır.

3.4. 30 mm Derinliğinde Modellenen Parça (Part Modeled at a Depth of 30 mm)

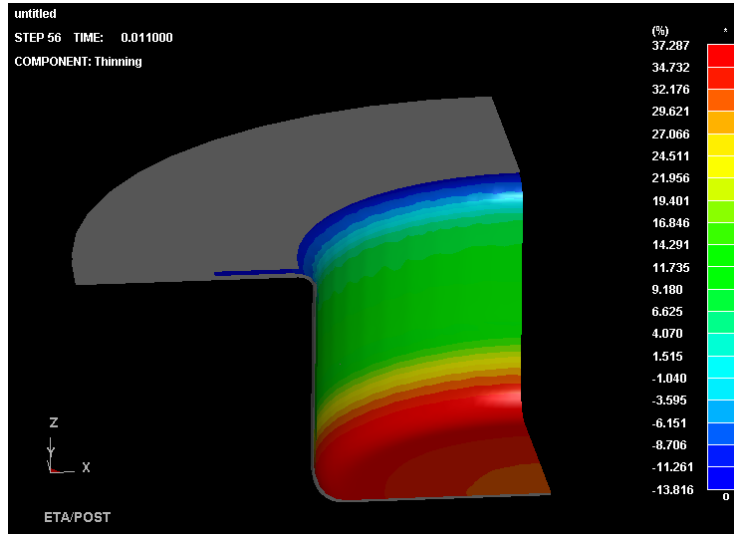
Daha derin parçalarda hareketli kalıpla şekillendirmenin etkisini görmek amacıyla 30 mm derinliğinde (110 mm ilkel çaplı olarak) modellenen sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac parçada yaklaşık %37,3 incelme oluşmuştur (Şekil 21).

Hareketli dişi kalıp üst kalıba sırasıyla 1; 3; 5 ve 7mm mesafede konumlandırılarak bu mesafelerde sırasıyla 40; 50; 60; 70 ve 80 MPa değerlerinde sabit basınçlar uygulanarak yapılan analizler sonunda parçada elde edilen maksimum incelme değeri sonuçları Şekil 22’de verilmiştir.

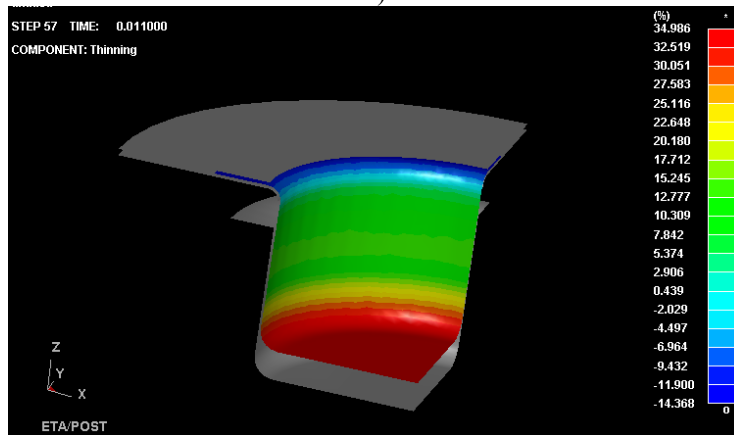
Yapılan analizlerde hareketli dişi kalıbın üst kalıba mesafesi 5 mm iken ve 60 MPa sabit basınç altında yaklaşık %34,9 incelme oluşmuştur (Şekil 21). Böylelikle modellenen derin parçada sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesine göre yaklaşık %2,4 incelme azalmıştır.



Şekil 20. Hareketli ve sabit kalıpla hidroşekillendirme proseslerinin zamana bağlı şişme grafiği
(Time dependent bulge chart of movable and fixed die hydroforming processes)



a)



b)

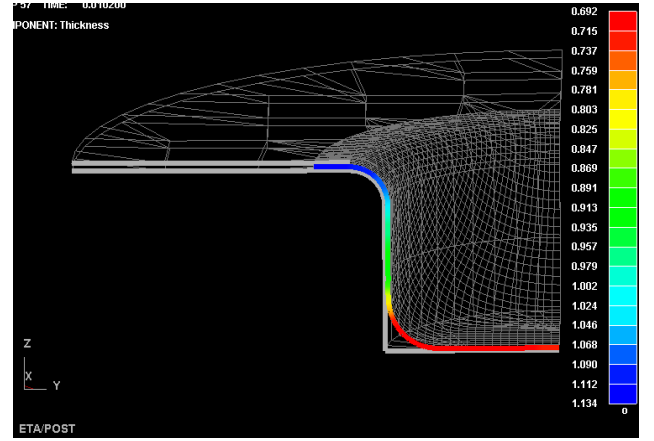
Şekil 21. Derin parça için a) Sabit ve b) hareketli dişi kalıpla şekillendirme sonunda parçada oluşan kalınlık dağılımları
(Thickness distributions of part formed with a) fixed and b) with movable die for more depth modelled part)

3.5. Sonlu Elemanlar Analizlerinin Deneylerle Doğrulanması

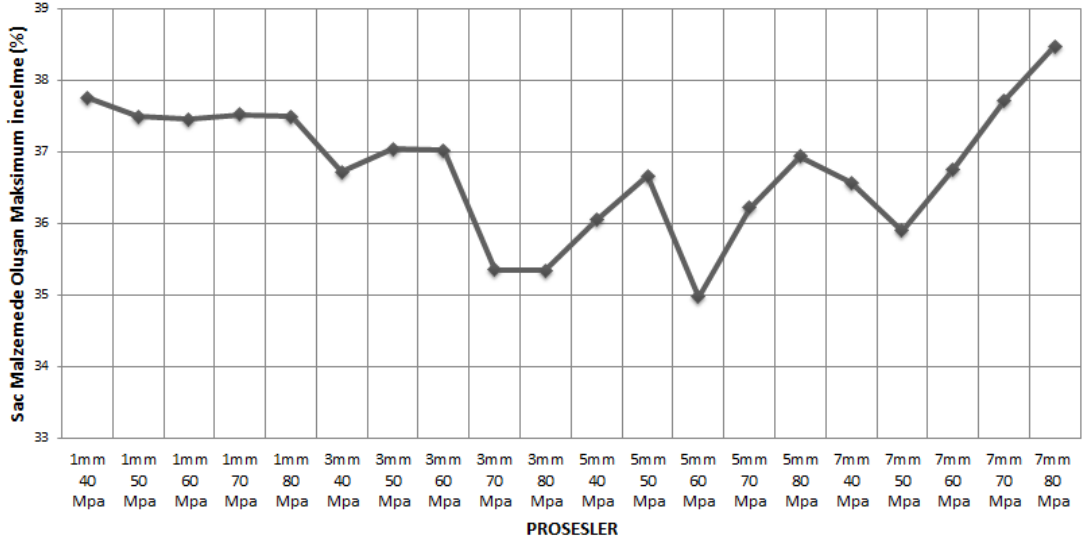
(Experimental Verification of Finite Element Analysis)

Sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi deneylerinde elde edilen parçalar Şekil 23'te ve sonlu elemanlar analizi sonunda parçadaki kalınlık dağılımları Şekil 24'te görülmektedir.

Ultrasonik kalınlık ölçme cihazı ile ölçülen numunelerin orta kesitindeki kalınlık dağılımları ve sonlu elemanlar analizlerinden alınan kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 25'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kalınlık belirlenmesi arasındaki hata maksimum %14 civarında oluşmuştur. Bu değer sonlu elemanlar analizleri için kabul edilebilir iyi bir değerdir. Dolayısıyla, gerçekleştirilen analiz sonuçlarının gerçeğe çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır.



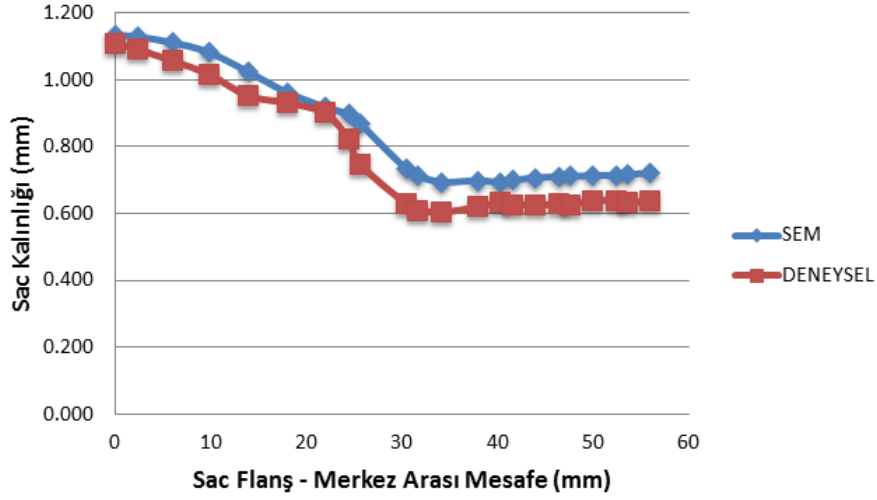
Şekil 24. Sonlu elemanlar analizinde oluşan kalınlık miktarları
(Thickness rates of finite element method)



Şekil 22. Sabit basınç ve farklı mesafelerde konumlu hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme analizlerinin sonuçları
(The results of the analysis of sheet hydroforming for constant pressure and different location of movable die)



Şekil 23. Deneyler sonunda elde edilen parçalar (Parts obtained from the experiments)



Şekil 25. Deney ve sonlu elemanlar metodundan elde edilen parça kalınlık dağılımları
(Thickness distributions obtained from experiment and finite element method)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, yeni bir yöntem olarak önerilen hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin kullanılmasının sac metal parçaların şekillendirilebilirliğine etkisi sonlu elemanlar analizi ile nümerik olarak araştırılmıştır ve analizler deneysel olarak doğrulanmıştır. Hareketli dişi kalıpla hidroşekillendirme prosesinin etkisini görmek amacıyla, düz silindirik bir parçanın şekillendirilmesi için, hem sabit kalıpla hem de hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- 6 mm derinlikte ve 64 mm çapta (ilkel sac çapı 80 mm) modellenen sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ile gerçekleştirilen analizler sonunda, parçada yaklaşık maksimum %17 civarında incelme olurken, hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi analiz sonucunda aynı şekle sahip parçada %9 civarında maksimum incelme oluşmuştur. Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde, silindirik olarak şekillendirilen bu parçada yaklaşık %8 civarında daha az incelme oluşturduğu görülmüştür. Yani, şekillendirilebilirlikte $\frac{8}{17} \cong \%47$ oranında bir iyileştirme yapılmıştır.
- Parçadaki birim şekil değiştirmeler incelendiğinde ve şekillendirme sınır eğrisinde değerlendirildiğinde, sabit kalıpla hidroşekillendirme prosesi ile analiz edilen parçada yırtılma riski oluşurken, hareketli kalıpla yapılan analizlerde yırtılma riski gözlenmemiştir.
- 30 mm derinlikte ve 110 mm ilkel sac çapında modellenen sabit kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ile gerçekleştirilen analizler sonunda, parçada yaklaşık maksimum %37,3 civarında incelme olurken, hareketli dişi kalıpla analiz sonucunda aynı şekli alan parçada %34,9 civarında maksimum incelme oluşmuştur. Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde yaklaşık %2,4 civarında daha az incelme olduğu

görülmüştür. Burada ise şekillendirilebilirlikte $\frac{2,4}{37,3} \cong \%6$ oranında bir iyileştirme yapılmıştır.

- Hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde maksimum % incelme değerinin sabit kalıpla olana göre daha az olması; hareketli kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde, şekillendirme prosesi sırasında, dişi kalıpla sac arasındaki sürtünmenin sabit kalıpla olana göre daha kısa sürede gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Hareketli dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesinde sac ile dişi kalıp arasında sürtünmenin daha kısa süreli olması, parçanın incelmeye karşı direncini artırmaktadır.
- Deneylein doğrulanması amacıyla sabit dişi kalıpla sac hidroşekillendirme prosesi ile üretilen parçalardaki kalınlık dağılımları ve analiz sonuçları arasında maksimum yaklaşık %14 fark oluşmuştur. Bu fark analizlerin güvenilirliği için yeterlidir.
- Hareketli dişi kalıpla proses için, kalıba yukarı doğru hareket verilmesi sırasında, sacın yüzeyine sıvı basıncı etki ettiğinden çok büyük kalıp kuvvetleri uygulanmak zorunda olduğu için büyük kapasiteli pres gerekliliğinden deneyler yapılamamıştır. Ayrıca hareketli kalıbın kalıp boşluğu içerisinde hareketi için tabanın yarıçaplı olmayıp düz olması gerekmektedir. Bu durumda parçanın taban yarıçapları aynı ölçülerde tekrarlı olarak üretilemeyebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Mustafa Samet ANKARALI'nın yüksek lisans tez çalışmasından çıkartılmıştır. Yazarlar, Necmettin Erbakan Üniversitesi ve deneylerin gerçekleştirildiği Konya Teknik Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Altan T., Processes for hydroforming sheet metal, Stamping Journal, 400-418, 2006.

2. Zhang S.H., Wang Z.R., Xu Y., Wang Z.T., Zhou L.X., Recent developments in sheet hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 151, 237-241, 2004.
3. Singh H., *Fundamentals of hydroforming*, Society of Manufacturing Engineers, 29-35, 2003.
4. Kandil A., An experimental study of hydroforming deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 70-80, 2003.
5. Zhang S.H., Developments in hydroforming, *Journals of Materials Processing Technology*, 91, 226-244, 1999.
6. Karaağaç İ., Özdemir A., The formability of Erdemir 6112 sheet metal by the hydromechanical deep drawing process, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26 (4), 841-850, 2011.
7. Karaağaç İ., Özdemir A., Experimental investigation on the formability of squareshaped cups by hydromechanical deep drawing process, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (1), 33-41, 2013.
8. Özek C., Taşdemir V., Experimental investigation of the effects of blank holder force and die surface angle on the warm deep drawing of AA5754-O alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32 (1), 171-179, 2017.
9. Kılıç, S., Öztürk, F., Comparison of performances of commercial TWIP900 and DP600 advanced high strength steels in automotive industry, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 567-578, 2016.
10. Önder E., Tekkaya A.E., Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming Technologies, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 532-542, 2008.
11. Groche P., Metz C., Investigation of active-elastic blank holder systems for high-pressure forming of metal sheets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1271-1275, 2006.
12. Kleiner M., Krux R., Homberg W., Analysis of Residual Stresses in High-Pressure Sheet Metal Forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 28 (1), 211-214, 2004.
13. Şanay B., 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, 2010.
14. Khandeparkar T. and Liewald M., 2008, Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries, *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 246-254, 2008.
15. Wu J., Balendra R., Qin Y., A study on the forming limits of the hydromechanical deep drawing of compounds with stepped geometries, *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 242-246, 2004.
16. Qin Y., Balendra R., Design considerations for hydromechanical deep drawing of sheet components with concave features, *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 163-170, 2004.
17. Palumbo G., Pinto S., Sorgente D., Tricarico L., Analysis of hydroformed complex shape parts using a ductile fracture criterion, *AIP Conf. Proc.*, 712, 1875-1880, 2004a.
18. Palumbo G., Pinto S., Tricarico L., Numerical/experimental analysis of the sheet hydro forming process using cylindrical, square and compound shaped cavities, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1435-1442, 2004b.
19. Zhang S.H., Jensen M.R., Nielsen K.B., Danckert J., Lang L.H., Kang D.C., Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups, *J. Mat. Proc. Tech.* 142, 544-550, 2003.

