



Determination of die and process parameters of hydromechanical deep drawing using analogy method

Mehmet Halkacı¹, Murat Dilmeç^{2*}, Mevlüt Türköz³, Ahmet Elmalı⁴, Semih Avcı⁴, Behcet Dağhan³, Hüseyin Selçuk Halkacı³

¹Konya Technical University, Technical Vocational High School, 42075, Selçuklu, Konya, Turkey

²Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 42070, Selçuklu, Konya, Turkey

³Konya Technical University, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, 42075, Selçuklu, Konya, Turkey

⁴Elmalı Makina Sanayi Tic. Ltd. Şti., 42075, Selçuklu, Konya, Turkey

Highlights:

- Hydromechanical deep drawing
- Determination of Hydromechanical deep drawing process parameters by means of the analogy method
- Production of industrial product

Keywords:

- Analogy Method
- Die and Process Parameters
- Hydromechanical Deep Drawing

Article Info:

Research Article
Received: 27.04.2019
Accepted: 02.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.557796

Acknowledgement:

This work was supported by TÜBİTAK-TEYDEB. (Project number 5140028). We would like to thanks to TÜBİTAK.

Correspondence:

Author: Murat Dilmeç
e-mail: muratdilmecc@erbakan.edu.tr
phone: +90 332 223 2024

Graphical/Tabular Abstract

In this study, in order to meet the demand for fast and economical production of sheet metal products, the design and manufacture of hydroforming dies have been carried out in order to reduce the number of operations in production of teapot, which is produced with many operations by conventional deep drawing. Integrated adaptive FEA and fuzzy logic control algorithm were used for determine die and process parameters. Prior to the manufacturing of large sized and therefore costly 1:1 scale die required for the production of industrial products, the validity of the die and process parameters determined by the laboratory press with low cost 1:4 scale dies in the Hydromechanical Deep Drawing (HDD) method was investigated using 1:1 scale dies by means of the analogy method. HDD was applied with 1:1 scale die using the die and process parameters obtained from 1:4 scale dies. The teapot, which can be formed in four stages with conventional drawing, could be successfully produced in only one stage with HDD.



Figure A. Successfully formed teapot

Purpose: The aim of this study is to design and manufacture hydroforming dies in the production of sheet metal products, in order to produce the teapot produced in many stages with less classic deep drawing in order to meet the demand for fast and economical production.

Theory and Methods:

HDD was applied with 1:1 scale die using the die and process parameters obtained from 1:4 scale dies by means of the analogy method.

Results: HDD was applied with 1:1 scale die using the die and process parameters obtained from 1:4 scale dies. The teapot, which can be formed in four stages with conventional drawing, could be successfully produced in only one stage with HDD.

Conclusion: Before the manufacturing of the 1:1 scale die required for the production of the industrial product, a significant contribution has been made by determination of sealing system and process parameters using 1:4 scale model dies in accordance with the simulation rules.



Hidromekanik sıvama kalıp ve yöntem parametrelerinin benzetim yöntemine göre belirlenmesi

Mehmet Halkacı¹, Murat Dilmeç^{2*}, Mevlüt Türköz³, Ahmet Elmalı⁴, Semih Avcı⁴, Behcet Dağhan³, Hüseyin Selçuk Halkacı³

¹Konya Teknik Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, , 42075, Selçuklu, Konya, Türkiye

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

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

⁴Elmalı Makina Sanayi Tic. Ltd. Şti., 42075, Selçuklu, Konya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Hidromekanik sıvama yöntemi
- Hidromekanik sıvama parametrelerinin benzetim yöntemine göre belirlenmesi
- Endüstriyel ürün üretimi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.04.2019

Kabul: 02.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.557796

Anahtar Kelimeler:

Analogy method,
die and process parameters,
hydromechanical deep
drawing

ÖZET

Bu çalışmada sac ürün üretiminde, hızlı ve ekonomik üretim talebini karşılamak için, klasik derin çekmeyle birçok kademede üretilen çaydanlık daha az kademede üretilmesi amacıyla hidroşekillendirme kalıplarının tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Kalıp ve yöntem parametrelerinin belirlenmesinde bulanık mantık algoritmalarına dayalı adaptif kontrol uygulamalı Sonlu Elemanlar Analizleri kullanılmıştır. Endüstriyel ürünün üretilmesi için gerekli büyük boyutlu, çok maliyetli, 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden önce, daha düşük maliyetli 1:4 ölçekli kalıplar üretilerek laboratuvar presinde belirlenen kalıp ve yöntem parametrelerinin benzetim yöntemiyle 1:1 ölçekli kalıplarda geçerliliği araştırılmıştır. Bu amaca ulaşmak için 100 MPa sıvı basıncı ve 10000 kN kapasiteli sanayi tipi sac hidroşekillendirme presi kullanılmıştır. Laboratuvar çalışmaları sonunda, 1:4 ölçekli kalıplardan elde edilen kalıp ve yöntem parametreleri kullanılarak 1:1 ölçekli kalıplarla hidromekanik sıvama yöntemi uygulanmıştır. Klasik sıvamaya 4 kademede şekillendirilebilen çaydanlık hidromekanik sıvama yöntemiyle tek kademede başarıyla üretilmiştir. Böylece endüstriyel ürünün üretilmesi için gerekli olan 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden önce benzetim kurallarına uygun olarak 1:4 ölçekli model kalıplarla sızdırmazlık sistemi ve yöntem parametrelerinin belirlenmesiyle maliyete önemli katkı sağlanmıştır. Çaydanlık hidromekanik sıvama yöntemiyle tek kademede 50 saniyede üretilerek, klasik sıvamaya göre üretim hızı yaklaşık %20 artırılmıştır. Hidromekanik sıvama yöntemiyle üretilen çaydanlığın klasik sıvamaya üretilene göre, kalınlık dağılımının üniform olduğu ve geometrik toleransların yaklaşık aynı olduğu görülmüştür.

Determination of die and process parameters of hydromechanical deep drawing using analogy method

H I G H L I G H T S

- Hydromechanical deep drawing
- Determination of Hydromechanical deep drawing process parameters by means of the analogy method
- Production of industrial product

Article Info

Research Article

Received: 27.04.2019

Accepted: 02.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.557796

Keywords:

Analogy method,
die and process parameters,
hydromechanical deep
drawing

ABSTRACT

In this study, in order to meet the demand for fast and economical production of sheet metal products, the design and manufacture of hydroforming dies have been carried out in order to reduce the number of operations in production of teapot, which is produced with many operations by conventional deep drawing. Integrated adaptive FEA and fuzzy logic control algorithm were used for determine die and process parameters. Prior to the manufacturing of large sized and therefore costly 1:1 scale dies required for the production of industrial products, the validity of the die and process parameters determined by the laboratory press with low cost 1:4 scale dies in the Hydromechanical Deep Drawing (HDD) method was investigated using 1:1 scale dies by means of the analogy method. To achieve this goal, an industrial sheet hydroforming press with capacity of 100 MPa fluid pressure and 10000 kN was used. At the end of the laboratory works, HDD was applied with 1:1 scale dies using the die and process parameters obtained from 1:4 scale dies. The teapot, which can be formed in four stages with conventional drawing, could be successfully produced in only one stage with HDD. So, before the manufacturing of the 1:1 scale dies required for the production of the industrial product, a significant contribution has been made by determination of sealing system and process parameters using 1:4 scale model dies in accordance with the simulation rules. The teapot could be produced in 50 seconds with HDD. In this case, the production rate was increased by about 20% with conventional deep drawing process. It was seen that the thickness distribution of the teapot produced with HDD was more uniform than that produced with deep drawing process and that the tolerances in the parts produced by conventional deep drawing process were approximately the same as those obtained with HDD.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: mhalkaci@ktun.edu.tr, *muratdilmece@erbakan.edu.tr, mevlutturkoz@ktun.edu.tr, elmali@elmali.com.tr, bdaghan@ktun.edu.tr, halkaci@ktun.edu.tr / Tel: +90 332 223 2024

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hidroşekillendirme yöntemi, sac veya boru şeklindeki parçaların sıvı basıncı yardımıyla şekillendirilmesinde kullanılan ileri bir imalat teknolojisidir ve geleneksel kalıplama ile kaynaklı birleştirmeye göre birçok avantajlar sunmaktadır. Yöntem, ilk olarak 1890'larda ortaya çıkmış ve ilerleyen yıllarda gittikçe artan bir ilgiye sahip olmuştur. Literatürde, akışkan şekillendirme, esnek kalıp şekillendirme, lastik zar şekillendirme olarak da adlandırılan hidrolik şekillendirme işlemi, sac veya tüp metal malzemenin, erkek veya dişi kalıbın görevini alan akışkan bir ortam vasıtasıyla (su, viskoz, polimerik malzeme vs.) kapalı bir kaptaki şekillendirilmesi olarak tanımlanır. Akışkanın sıkıştırılmaz özelliğinden dolayı, şekillendirme sırasında oluşan basınç etkisiyle malzemeler şekillendirilmektedir [1-3]. Konu ile ilgili ilk araştırmalar Almanya'da havacılık sektöründe ve Japonya'da gerçekleştirilmesine rağmen, günümüzde Amerika, Rusya, Fransa, İtalya, Güney Kore, Çin gibi değişik ülkelerde yoğun bir şekilde çalışılan bir konu haline gelmiştir. Ancak yöntem, yeterli bilgi birikimine ulaşılamamış olmasından ve bazı teknik zorluklardan ötürü 1990'lara kadar gereken ilgiyi görmemiştir. Günümüzde ise bilgisayarlı kontrol ve hidrolik sistemlerdeki gelişmeler [4, 5], ve özellikle otomotiv sanayinde hidroşekillendirme yönteminin kullanılmasıyla yöntemdeki ilgi gün geçtikçe artmaktadır [6-8].

Sac hidroşekillendirme yönteminde, farklı kalınlığa sahip saclar tek bir kalıpla şekillendirilebilmekte, kalıp uyumu aranmamakta ve daha düşük kalitedeki malzemelerle kalıp imalatı mümkün olmaktadır. Bu sayede kalıp masrafları %90'a varan oranda azalmaktadır. Ayrıca sıvının esnekliğinden dolayı, klasik yöntemlerle elde edilmesi çok zor veya imkânsız olan çok karmaşık parçaların üretilmesi mümkün olmaktadır [9, 10]. Bu yöntemde, sıvının sac malzemenin tüm yüzeyine homojen dağılmış bir yük sağlaması ve erkek kalıp ile sac arasındaki sürtünme kuvvetinin sıvama işleminde parçanın cidar kesitinde oluşan çekme kuvvetini (bölgesel gerilme yığılmasını) azaltması sayesinde, sac malzemedeki oluşan incelmeler daha az olmakta ve dolayısıyla homojen bir kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Bu nedenle saclar daha fazla şekillendirilebilmektedir [11]. Buna ilaveten, hidroşekillendirme prosesi ile üretilen parçalar daha yüksek mukavemete, daha iyi boyutsal ve geometrik doğruluğa ve daha düşük yüzey pürüzlüğüne sahip olabilmektedir [2, 12]. Lang vd.. [13] tarafından önerilen yöntemde, sacdan belirli bir mesafe yukarıda konumlanırken, bir ön şişirme basıncı uygulanmakta ve sonra istampa ilerleyerek sacı şekillendirmektedir. Bu yöntem sayesinde şekillendirmenin başlangıcında basınç oluşturulmakta ve sacın istampa uç radyüsünü saracak bölgelerinde ön şekillendirme yaparak malzemenin pekleşmesiyle yırtılmaya karşı direnci artırılmaktadır. Bu çalışmada ön şişirme basıncı ve yüksekliği ayarlayarak %27 ve %36 yüzde uzama değerlerine sahip AA6016-T4 ve AA1050-H0 malzemeleri için sırasıyla 2,46 ve 3,11 sınır çekme oranı değerlerine

kadar erişildiği belirtilmiştir. Verma ve Chandra [14] ve Hatipoğlu [15], sıvama yönteminde sacların şekillendirilebilme kabiliyetini belirten sıvama oranı sınırının, takım geometrilerine, yağlama şartlarına, baskı plakası kuvvetine, sac kalınlığı ve anizotropi katsayısı; R ve pekleşme üsteli; n 'ye bağlı olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca, hidromekanik sıvama yönteminde bunlara ek olarak sacların şekillendirilebilme kabiliyetine, sıvı basıncı, ön şişirme işlemi ve erkek kalıbın yüzey pürüzlülüğünün yöntem parametrelerine de etki ettiği sonucuna varmışlardır.

Kandil [10], Dachang vd. [16], Abedrabbo vd. [17], Lang vd. [18] ve Khandeparkar ve Liewald [19] tarafından yapılan çalışmalarda, hidromekanik sıvama yönteminde başarılı bir şekillendirme işlemi gerçekleştirmek için, yöntem parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiştir.

Zhang vd. [20], Lang vd. [21], deneysel çalışmaların yanında, sac metalin şekillendirme sırasındaki deformasyonunu daha iyi anlamak için nümerik çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda, son parça geometrisi tahmin edilerek 1:1 ölçekli deneylerle karşılaştırılmaktadır. Şekillendirilme sırasında, malzeme özellikleri, takım geometrileri, yağlama, sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti gibi şekillendirmeyi etkileyen parametreler nümerik çalışmalarda simülasyonlar yapılarak optimize edilmektedir. Böylece deneme yanılma yöntemi ile parça üretimi minimuma indirilmeye çalışılmıştır.

Zhang ve Danckert [9], hidromekanik sıvama yönteminde, sıvama oranı sınırını artırmaya yönelik olarak çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemleri çalışmalarında özetlemişlerdir. Bu yöntemlerden birinde klasik sıvamada kullanılan baskı plakasının yerine sıvı basıncı kullanılarak, sac ve baskı plakası arasındaki sürtünmenin azaltılmasından dolayı sıvama oranı sınırı artırılmıştır.

Tirosh vd. [22], Shirizly vd. [23] sıvı basıncı kullanılarak sac ve baskı plakası arasındaki sürtünmenin azaltılmasından dolayı sıvama oranı sınırını artırmışlardır.

Pennington [24] önerdiği yöntemde, dişi kalıbın yerini tamamen sıvı basıncı almış, böylece sac ve dişi kalıp arasındaki sürtünmenin azaltılmasıyla sıvama oranı sınırı artırılmıştır. İstampa ilerleyişi ile sıvı basıncının hızla değişmesiyle sıvının dişi kalıp ve sac arasından yüksek hızda dışarı akmasına izin verildiği yöntemde hidrodinamik sıvama yöntemi ismi verilmiş ve bu yöntemde sıvı basıncını kontrol etmeye gerek duyulmadığı belirtilmiştir. Hsu ve Hsieh [25] bu yöntemi başarıyla uygulayarak sıvama oranı sınırını artırmışlardır.

Yang vd. [26] tarafından yapılan çalışmada ise, radyal sıvı basıncı kullanılarak yapılan hidromekanik sıvama yönteminde, SS 304 malzeme için sıvama oranı sınırı 3,2 ve 3,3 gibi çok yüksek değerlere çıkarılmıştır. Geleneksel hidromekanik sıvama yönteminde, kalıpta modifikasyon

yapılarak gerçekleştirilen bu yöntemde baskı plakası ve dışı kalıp arasında, numune hizasında bırakılan küçük bir boşluktan, yüksek basınçta sıvının hızla dışarı çıkmasına izin verilmesiyle, sac radyal yönde içeri doğru bastırılır.

Lang vd. [18] radyal sıvı basıncının kullanıldığı bu yöntemde oluşan buruşma ve yırtılma hasarlarına karşı alınabilecek önlemleri, baskı plakası ile dışı kalıp arasındaki boşluğun ve yöntem parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemişlerdir. Sonuçta Al 6016-T4 malzeme için sıvama oranı sınırını 2,46 olarak elde etmişlerdir.

Siegert vd. [27] sıvama yönteminde sac metalin akışının, süzdürme ve kilitleme çubuklarıyla, sacın şeklini ve kalıpla sac arasındaki sürtünme kuvvetini ayarlayarak kontrol edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca baskı plakası kuvvetini çok noktadan hidrolik silindirelerle uygulayarak da sac metalin akışının kontrol edilmesini önermişler ve böylece yırtılma ve buruşma problemlerini azaltmayı hedeflemişlerdir. Araştırmacılar, saclarda istenilen şeklin tek bir kademede üretilebilmesi için klasik sıvama ve hidromekanik sıvama yöntemini birleştiren yeni bir kalıp tasarımı üzerinde durmuşlardır. Geliştirilen bir diğer yöntem de basınçlı viskoz sıvı ile şekillendirme yöntemidir.

Liu vd. [28] tarafından geliştirilen basınçlı viskoz sıvı ile şekillendirme yöntemi, sac metal parçaların şekillendirilmesi için geliştirilmiş esnek şekillendirme teknolojisidir. Basınçlı viskoz sıvı ile şekillendirme yöntemi düşük miktarlarda, alüminyum alaşımları, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler, titanyum alaşımları ve kompozitler gibi şekil vermesi zor olan malzemelerin şekillendirilmesinde kullanmak için planlanmıştır. Bu yöntemde tek taraflı bir kalıp ve basınçlı akışkan bir ortam kullanılır yalnız kullanılan akışkanın viskozitesi yüksektir. Basınçlı viskoz sıvı ile şekillendirmenin hidromekanik sıvama yönteminden temel farkı, viskoz akışkanın birim şekil değiştirme hızına duyarlı olması ve sac ile akışkan ortamın ara yüzeyinde basıncın, akışkanın viskozitesinden dolayı tercih edilen şekilde değiştirilebilmesidir. Genellikle viskozite, yöntem üzerinde büyük etkiye sahiptir. Viskoz ortam sacın her iki tarafından da etkideğinde sacın gerilmesi daha üniform olmaktadır.

Şekillendirme prosesi başlamadan önce, malzemeye deformasyon uygulandığı zaman pekleşmeden dolayı malzemenin mukavemeti artırılabilen ve bu da sac metalin yırtılma hasarına karşı direncini artırmaktadır. Örneğin bu konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalardan Lang vd. [18] hidromekanik sıvama yönteminde ön şişirme yaparak malzemenin erkek kalıbın burun radyüslerini saran bölgelerinin pekleşmesiyle yırtılmaya karşı direnci artırmışlar, böylece daha yüksek sıvama oranı sınırlarına ulaşmışlardır. Araştırmada ön şişirmenin iki parametresi olan ön şişirme basıncı ve ön şişirme yüksekliğini değiştirerek ve şekillendirme sırasındaki sıvı basıncını sabit tutarak Al 6016-T4 için 2,46, Al 1050-H0 için ise 3,11 gibi yüksek çekme oranı sınırları elde edilmiştir. Çalışmada ön şişirme işleminin şekillendirmenin başlangıç ve orta seviyelerinde önemli derecede etkili olduğu,

şekillendirmenin son kısımlarında ise etkili olmadığı belirtilmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalarda görüldüğü gibi, hidromekanik sıvama yönteminde sıvama oranı sınırını artırmaya yönelik olarak,

- parametrelerin deneysel olarak ve/veya sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla optimizasyonu
- yeni yöntemlerin geliştirilmesi

üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, klasik sıvama ile birçok kademede üretilen sac metal ürünlerin daha az kademede hızlı ve ekonomik üretilebilmesi için hidroşekillendirme kalıplarının tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel ürünün üretilmesi için gerekli büyük boyutlu dolayısıyla çok maliyetli 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden önce hidromekanik sıvama yönteminde 1:4 ölçekli kalıplarda laboratuvar presinde belirlenen kalıp ve yöntem parametrelerinin benzetim yöntemi ile 1:1 ölçekli kalıplarda geçerliliği araştırılmıştır.

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

Bu çalışmada, endüstriyel ürünün üretilmesi için gerekli olan çok maliyetli 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden önce hidromekanik sıvama yönteminde 1:4 ölçekli kalıplarda laboratuvar presinde belirlenen kalıp ve yöntem parametrelerinin benzetim yöntemi ile 1:1 ölçekli kalıplarda geçerliliği araştırılmıştır. Bu amaçla, klasik sıvama yöntemiyle dört kademede üretilebilen endüstriyel bir çaydanlık (Şekil 1) tek kademede ve üniform kalınlıkta üretilmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. Hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilen endüstriyel ürün

(Industrial product manufactured with hydromechanical deep drawing method)

Bu endüstriyel ürünün klasik sıvama yöntemi ile üretilmesinde 4 sıvama kademesi vardır. Bu çalışmada klasik sıvama prosesiyle dört kademe sonunda ulaşılabacak boyutlara (Şekil 2) hidromekanik sıvama yöntemiyle tek bir kademede ulaşılması hedeflenmektedir.



Şekil 2. Klasik sıvama yöntemiyle endüstriyel ürünün sıvama kademeleri
(Classical deep drawing stages of industrial product)

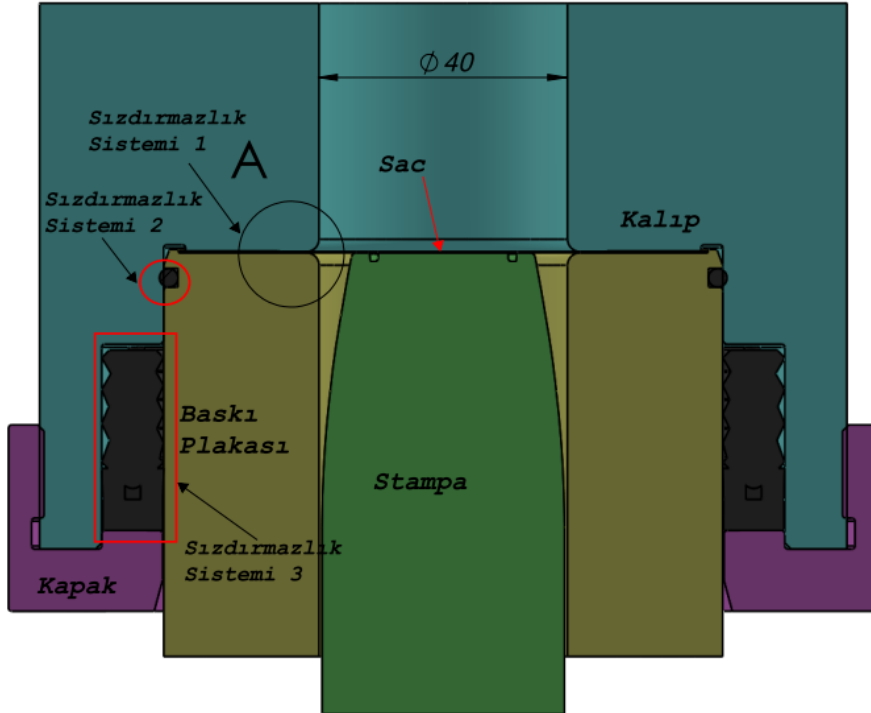
Hidromekanik sıvama yöntemi, sacların iki kalıp arasında şekillendirilmesine ve sıvanmasına alternatif bir çözüm olarak az sayıda sıvanmış parçaların düşük maliyetle üretilmesi ihtiyacına karşılık olarak geliştirilmiştir. Bu üretim yönteminde dışı kalıbın yerini basınç kabı almaktadır.

Hidromekanik sıvama yönteminin benzetim yöntemine göre uygulanabilmesi için Şekil 3'te görülen 1:4 ölçekli kalıplar tasarlanıp imal ettirilmiştir. Benzetim yöntemine göre sızdırmazlık sisteminin tasarlanması ve yöntem parametrelerinin belirlenmesi için gerekli deneyler 1:4

ölçekli model kalıplarla laboratuvarında bulunan hidroşekillendirme presinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra benzetim yöntemine göre elde edilen sonuçlar kullanılarak 1:1 ölçekli kalıplarla hidromekanik sıvama yöntemi, TÜBİTAK-TEYDEB 5140028 numaralı Üniversite-Sanayi İşbirliği projesi kapsamında tasarlanıp üretilen ve Şekil 4'te görülen 100 MPa sıvı basıncı ve 10000 kN kapasiteli sanayi tipi bir sac hidroşekillendirme presi kullanılarak uygulanmıştır. Bu preste bilgisayara girilen ıstampa konumuna göre, baskı plakası kuvveti ve sıvı basıncı kapalı devre otomatik kontrol sistemi ile kontrol edilmektedir. Pres hem PLC ile hem de hidrolik nümerik kontrol ile çalıştırılabilmektedir. Hidrolik nümerik kontrol ile ıstampa, baskı plakası ve basınç yükselticinin kontrolü klasik elektronik kontrol sistemlerine göre çok daha başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Doğal olarak tüm sensörlerdeki veriler bilgisayara kaydedilebilmektedir. Bu prese ait temel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Deneylerin gerçekleştirilmesi prosesi aşağıdaki gibidir.

- Sac malzeme, ıstampa ile temas edecek kısımları parafinle yağlandıktan sonra baskı plakası üzerine yerleştirilir ve ayarlanan kuvvette, basınç kabı ve baskı plakası arasında sıkıştırılır. Baskı plakası kuvveti, basınçlı sıvının sızmasına engel olacak ve sac malzemede buruşmaların oluşmasını önleyecek kadar yüksek olmalıdır, ancak yırtılmaya neden olacak kadar da yüksek olmamalıdır.
- Basınç kabı mineral yağı su (bor yağı emülsiyonu) ile doldurulur ve sonra sac ıstampaya doğru belirli bir yüksekliğe kadar şişirilir.



Şekil 3. Hidromekanik sıvama yöntemi ve 1:4 ölçekli kalıp tasarımı
(Hydromechanical deep drawing method and design of 1:4 scale die)



Şekil 4. Hidromekanik sıvama pres (Hydromechanical deep drawing press)

- Değişken sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti ve diğer yöntem parametreleri ayarlandıktan sonra, ıstampa kap şekillendirilinceye kadar ilerletilir ve sac malzeme şekillendirilir.

Tablo1. Hidroşekillendirme deney ünitesine ait temel özellikler
(Base features of hydroforming press)

Özellik	Değer
Maksimum sıvı basıncı, MPa	125
Baskı plakası kuvveti, kN	12500
Istampa kuvveti, kN	3000
Istampa stroğu, mm	400
Baskı plakası stroğu, mm	700
Istampa hızı, mm/s	0-15
Tabla boyutu, mm	1100x1600

2.1. 1:4 Ölçekli Kalıp ve Sızdırmazlık Sistemlerinin Tasarımı ve Test Edilmesi (1:4 Scale Die and Design and Test of Sealing Systems)

Endüstriyel ürünün üretilmesi için gerekli olan çok maliyetli 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden önce benzetim kurallarına uygun olarak yapılacak 1:4 ölçekli model kalıplar üretilmiştir. Bu kalıplar kullanılarak sızdırmazlık sisteminin tasarlanması ve yöntem parametrelerinin belirlenmesi için

araştırmalar Konya Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan hidroşekillendirme presinde yapılmıştır. Bu bölüm aşağıdaki çalışmalardan oluşmaktadır:

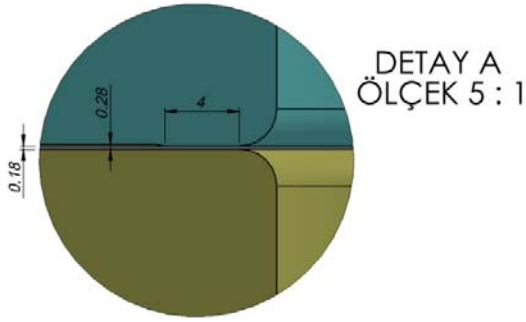
- Sızdırmazlık sisteminin tasarımı,
- Kalıp tasarımı ve sonlu elemanlarla analiz,
- Kalıpların imalatı,
- Yöntem parametrelerinin belirlenmesi,
- Laboratuvar çalışmaları.

2.1.1. Sızdırmazlık sisteminin tasarımı (Design of sealing systems)

Başarılı bir hidromekanik sıvama yöntemi için kalıplardaki sızdırmazlığın sağlanması kaçınılmazdır. 1:4 ölçekli kalıplarda sızdırmazlık sistemi tasarımına geçmeden önce kalıp boyutlarını hesaplayabilmek için kullanılacak ölçeğin belirlenmesi gereklidir. Bu ölçek pres kapasitesi başta olmak üzere 1:1 ölçekli endüstriyel parça üretiminde 0,7 mm kalınlığındaki SS 304 sac malzemenin yerine kullanılacak olan ölçek oranı kadar az kalınlıkta malzemenin bulunmasıyla belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda 0,18 mm kalınlığında SS 304 malzeme temin edilebilmiştir. Böylece kalıpların modellenmesinde kullanılacak ölçek 0,7/0,18'den 3,89 olarak hesap edilmiştir. Bu ölçek oranında kalıplar imal edildiğinde, 600 kN kapama kuvveti

kapasitesine sahip deney presinde gerçekleştirilecek deneylerde 1:1 ölçekli parçalarda kullanılacak olan 110 MPa basınçlara çıkılabilecektir.

Endüstriyel parça kalıplarının 1:1 ölçekli katı modelleri çizildikten sonra ölçek kadar küçültülerek 1:4 ölçekli kalıpların katı modelleri oluşturulmuştur. Katı modeller kullanılarak da sızdırmazlık sistemi tasarımları yapılmıştır. Bu çalışmada Şekil 3'teki üç farklı sızdırmazlık sisteminden birincisi Şekil 5'te görüldüğü gibi tasarlanmıştır. 1:4 ölçekli kalıplar imal edilirken bu üç sistem de düşünülerek imalat gerçekleştirilecek, böylece sistemlerden birinde başarıya ulaşılamazsa diğer sistemler de aynı kalıpta denenebilecek, üç sistem de başarısız olursa sistemlerin iki veya üçü aynı anda kullanılarak sızdırmazlık problemi çözülecektir.



Şekil 5. Sızdırmazlık sistemi 1 tasarımı
(Design of sealing system-1)

Sızdırmazlık sistemlerinden ilkinde Şekil 5'te detay görünümde görüldüğü gibi baskı plakası ve kalıbın sacı sıkıştırdığı alan, kalıbın üzerinde 4 mm genişliğindeki bir halka alanın seviyesinin 0,1 mm yükseltilmesiyle küçültülmüş, böylece hiçbir sızdırmazlık elemanı kullanılmadan sızdırmazlığın sağlanabileceği düşünülmüştür. Bu tasarımda halka alan, kalıp radyüsünün hemen yanında başlamaktadır. Sac malzeme şekillendirilirken halka alanın dış tarafında maksimum 0,1 mm buruşma yaşanacak ve bu buruşma, sac, halka alandan geçerken düzeltilecektir.

İlk sızdırmazlık sistemi başarılı olamaz ise, aksenel sızdırmazlık elemanının kullanılacağı 2. sızdırmazlık sistemine geçilecektir. Burada sızdırmazlık elemanı olarak NBR malzemeden standart O-ring kullanılması düşünülmüştür. Her ne kadar o-ringler ile 40 MPa değerine kadar sızdırmazlık sağlansa da, O-ring kanalı toleransı dar tutulduğu zaman sınır basınç değeri artmaktadır. Daha da önemlisi ilk sızdırmazlık sisteminden basınç düşerek geçeceği için 2. sızdırmazlık sistemindeki eleman direkt olarak 110 MPa basınçlara maruz kalmayacaktır. Diğer bir önlem de O-ringi destek halkası ile birlikte kullanarak dayanımını ve ömrünü artırmak olacaktır.

Sızdırmazlık sistemlerinin üçüncüsünde sınır basınç değeri Kastaş firmasının kataloglarında 70 MPa olarak verilen K34 kodlu hidrolik boğaz sızdırmazlık elemanı kullanılacaktır. Bu eleman ile uygulayıcılardan edinilen bilgiye göre kanalın

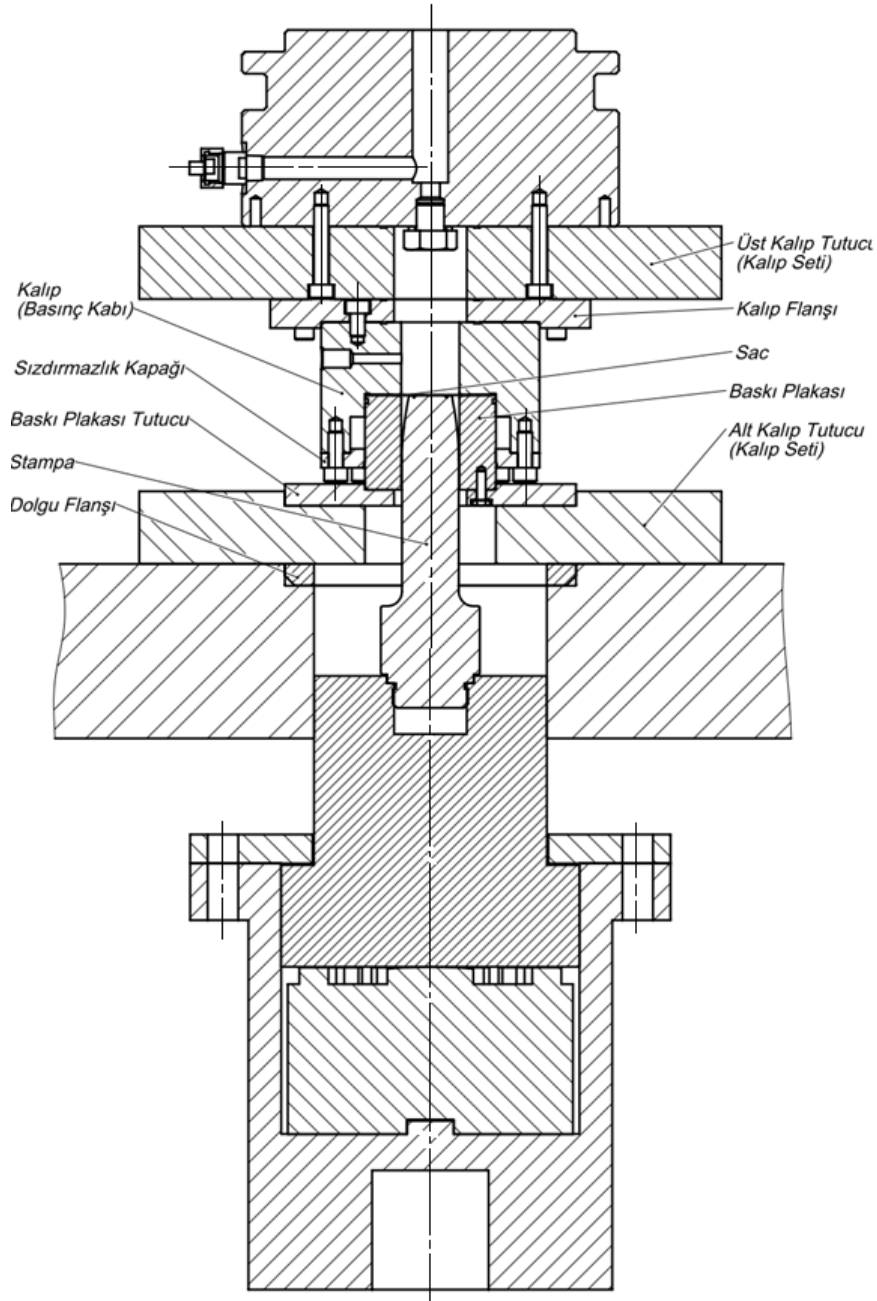
dar toleranslarda işlenmesiyle 300 MPa'a kadar sızdırmazlığın sağlanması mümkündür. 2. sızdırmazlık sistemi şayet başarılı olamaz ise bu sistemle sızdırmazlığın sorunsuz bir şekilde sağlanacağı beklenmektedir.

Sızdırmazlık sisteminde sızdırmazlığın birkaç defa sağlanması, başarı olarak düşünülmemektedir. Endüstriyel tipte bir hidroşekillendirme presi geliştirileceği için özellikle sızdırmazlık sisteminde kullanılacak sızdırmazlık elemanlarının binlerce kez sorunsuz çalışma ömrüne sahip olması gereklidir. Bu nedenle yapılacak testlerde sızdırmazlık elemanı olarak kullanılacak O-ring ve K34 kodlu sızdırmazlık elemanlarının ömürleri de ortaya konulacaktır.

2.1.2. Kalıp tasarımı ve sonlu elemanlarla analiz (Die design and finite element analysis)

Tasarlanan üç farklı sızdırmazlık sistemini de içerecek şekilde kalıp tasarımları yapılmış ve kalıplar imal ettirilmiştir. Kalıpların boyutlandırılmasında kullanılacak ölçek oranı 600 kN kapasiteli preste şekillendirilebilecek ve tam ölçekte 0,7 mm kalınlığındaki SS 304 paslanmaz çelik malzemenin ölçek oranı kadar incelikteki sacın temin edilebilirliği düşünülerek belirlenmiştir. Buna göre 0,18 mm kalınlığında sacın tedarik edilmesiyle kalıp ölçeği 0,7/0,18'den 3,89 olarak tespit edilmiştir. İş parçasının ve iş parçasına şeklini verecek olan istampanın boyutları ve radyüsleri ile ilkel sac çapı ölçek oranı kadar küçültülmüştür.

1:4 ölçekli çaydanlığın boyutları belirli olduğu için iş parçasına şeklini verecek olan istampanın tasarımı buna göre yapılmıştır. Istampanın boyu ise Üniversite laboratuvarında bulunan presin stroğuna ve yapılan burkulma hesabına uygun olarak belirlenmiştir. Kalıp ve istampa arasındaki tek taraflı boşluk, kalıp radyüsü ve baskı plakası radyüsü şekillendirmeyi etkileyen önemli faktörlerdir. Bu değerler tecrübe ile belirlenmiştir. Baskı plakası ve kalıp iç yarıçapları istampa yarıçapından tek taraflı boşluk kadar büyük olacaktır. Kalıp içerisinde oluşan 100 MPa civarında basınç için yapılan mukavemet hesaplarıyla kalıbın dış çapı belirlenmiştir. Dış çapa etki eden diğer bir faktör olan sızdırmazlık yöntemlerinin uygulanması için yeterli alan bırakılmıştır. Baskı plakası sızdırmazlığı sağlayacak şekilde kalıba uygun olarak tasarlanmıştır. Kalıplar tasarlanırken düşünülen diğer bir etken ise laboratuvar çalışmalarının gerçekleştirileceği prese bağlantısının yapılmasıdır. Bağlantı elemanları seçilirken gerekli çalışma koşullarını sağlayacak olmasına ve aynı zamanda mevcut sisteme uyumlu olmasına dikkat edilmiştir. Civatalarda mukavemet hesapları yapılarak gerekli çaplar ve boylar bulunmuştur. Bu çaplar ve boylar aynı zamanda kalıp ve baskı plakasının et kalınlıklarının belirlenmesine etki etmiştir. Sıvı iletimini sağlamak için kataloglardan yeterli dayanıklılığa sahip borular seçilmiştir. Bu borular kalıba sıvı girişi ve çıkışı sağlamaktadır. Boruya uygun rakor-nipel seçilerek kalıp üzerinde bu nipellerin bağlanacağı vida delikleri açılmıştır. Tüm bu çalışmalardan sonra yapılan kalıp tasarımı Şekil 6'da görülmektedir.



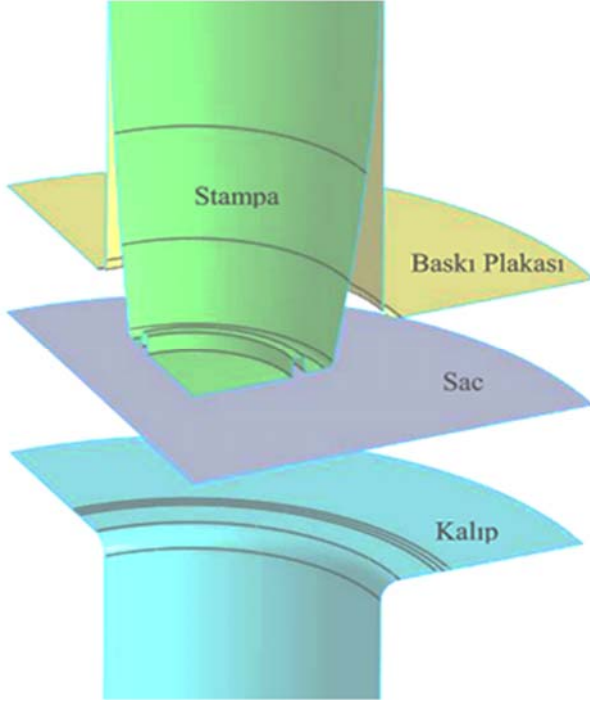
Şekil 6. Kalıpların tasarımı (Design of dies)

Başarılı bir şekillendirme için gerekli olan ve ıstamp pozisyonuna göre değerleri değişen optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri (yükleme profilleri) sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir. Sonlu Elemanlar Analizinde yüklem profilleri uzun süren deneme ve yanılma yöntemiyle değil Sonlu Elemanlar Analizi ile eş zamanlı çalışan bulanık mantık kontrol algoritması oluşturularak sistematik olarak tek bir analiz ile belirlenmiştir. 1:4 ölçekli çaydanlığın üretimi için belirlenen yaklaşık 1:4 ölçekta kalıplar tasarlandıktan sonra hidromekanik sıvama yönteminin Sonlu Elemanlar modeli Dynaform yazılımında oluşturulmuş ve çözücü olarak ise Ls-Dyna çözücüsü 2168

kullanılmıştır. Kalıpların 1:4 ölçekli katı modelleri tasarlandıktan sonra, kalıpların yüzey olarak çeyrek modeli Şekil 7'deki gibi elde edilmiştir. Daha sonra parçalar montajlı şekilde import edilerek sacın ve kalıpların sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur (Şekil 8).

1:4 ölçekli çaydanlık analizinde 85 mm çapındaki sacın sonlu elemanlar ağı dört kenarlı kabuk (quad shell) elemanlarla örülmüş ve eleman boyutu 0,5 mm olarak tanımlanarak sacın çeyrek modelinde toplamda 7500 adet eleman kullanılmıştır. Sacın mekanik davranışı lineer plastik malzeme modeli ile tanımlanmış, malzemenin elastik

davranışında malzeme sabitleri olarak SS 304'ün genel bilinen özellikleri olan poisson oranı için 0,28 ve elastiklik modülü için de 208 GPa değerleri girilmiştir. Malzemenin plastik bölge davranışı SS 304'ün daha önce yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen ve Şekil 9'da verilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinden elde edilmiştir. Üç doğrultuda yapılan çekme deneyinde ortalama olarak elde edilen hadde doğrultusuna göre 90° doğrultudaki akma eğrisi verileri Ls-Dyna'da 24 numaralı malzeme modeli olan "piecewise linear plasticity" malzeme kartına girilmiştir.



Şekil 7. 1:4 ölçekli kalıpların çeyrek yüzey modeli
(Quarter surface model of 1:4 scale dies)

Kalıplar rijit olarak modellenmiş ve minimum 2 mm eleman boyutu kullanılarak radyüs bölgelerinde en azından 5 adet eleman olmasına dikkat edilerek sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Kalıplar ile sac arasındaki temas Ls-Dyna'da "Forming One Way Surface To Surface" algoritması kullanılarak tanımlanmıştır. Coulomb sürtünme modelinde sürtünme katsayısı olarak baskı plakası-sac-kalıp arasında 0,05 ve ıstampa-sac arasında 0,125 değerleri girilmiştir. Sürtünme katsayıları, Dilmeç ve Arap [30] tarafından yapılan ve sac ile kalıp arasında sürtünme katsayılarının deneysel olarak belirlendiği ve doğrulama çalışmalarının yapıldığı çalışmadan alınmıştır. Sınır şartların tanımlanmasında kalıbın tüm doğrultudaki hareket ve dönmeleri engellenmiş, ıstampanın ve baskı plakasının ise sadece düşey (Z) doğrultudaki hareketi serbest bırakılmıştır. ıstampaya zamana bağlı olarak lineer artan deplasman grafiği tanımlanmış ve ıstampa saca temasından sonra toplamda 44 mm hareket ettirilmiştir. Hidromekanik derin çekme prosesinde en önemli parametreler olan ıstampa konumuna göre değeri değişen sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetinin optimum değerleri, aşağıda anlatılan SE analizleri ile eş zamanlı çalışan Bulanık Mantık Kontrol

Algoritması (BMKA) yardımıyla sayısal olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Kalıpların imalatı (Manufacture of dies)

Tasarlanan kalıp elemanlarının imalat teknik resimleri çizildikten sonra parçalar imal ettirilmiştir. Kalıplar imal ettirilirken yüzey hassasiyetlerine, ölçü ve geçme toleranslarının teknik resmine uygun olmasına dikkat edilmiştir. İmalatı yapılan ve birleştirme işlemi tamamlanan kalıplar Konya Teknik Üniversitesi laboratuvarında bulunan hidroşekillendirme presine uygun bağlantı elemanları ile bağlanmış ve laboratuvar çalışmasına hazır hale getirilmiştir (Şekil 10).

2.1.4. Yöntem parametrelerinin belirlenmesi (Determination of process parameters)

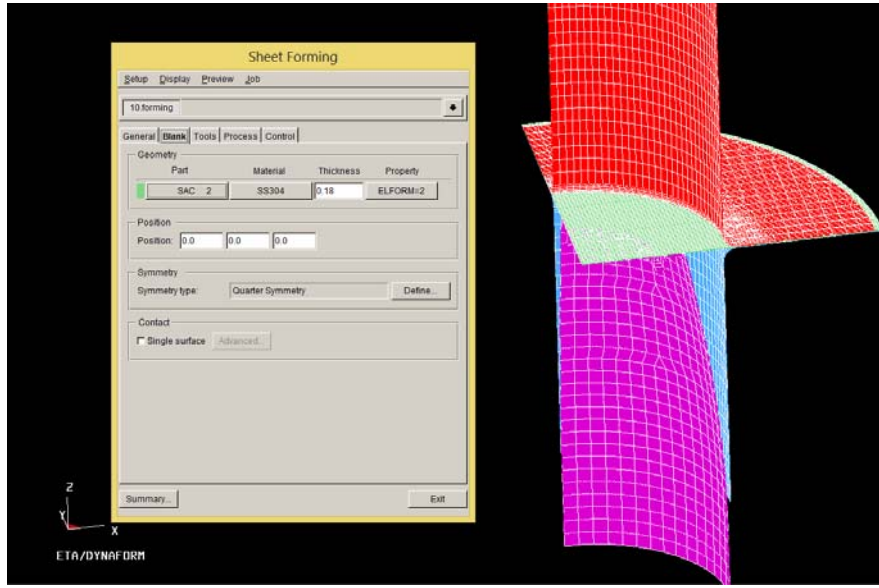
Hidromekanik sıvama yönteminin başarısı sıvı basıncı, baskı plakası kuvveti (BPK), ön şişirme yüksekliği, sac kalınlığı, sürtünme kuvveti, vb. gibi parametrelerin uygunluğuna bağlıdır. Bunlardan en önemlileri çıkış parametreleri olan uygulanacak sıvı basınç ve baskı plakası kuvvetidir. Sıvı basıncı ile baskı plakası kuvveti birbirlerini etkileyen parametrelerdir. Yüksek sıvı basıncı ve yüksek baskı plakası kuvveti yırtılmalara yol açmaktadır. Yetersiz sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti ise parçada kırışmalara neden olmaktadır. Şekillendirme prosesinin başarılı olabilmesi için uygun sıvı basıncı ve baskı plakası kuvvetinin belirlenmesi gerekir. Bu çıkış parametrelerini etkileyen en önemli faktörler ise sacda meydana gelen minimum incelme, sacın ıstampa ve radyüse teması ve sacda meydana gelen maksimum buruşmadır (Şekil 11).

Yöntem parametreleri Adaptif Simülasyon Yaklaşımli Bulanık Kontrol Algoritması ile belirlenmiştir. Bu yöntemin akış şeması Şekil 12'de görülmektedir. Bu yöntemde Sonlu Elemanlar Analizinin her bir adımında hesaplanan sacda oluşan minimum kalınlık ve maksimum buruşma yüksekliği ile sacın ıstampaya temas durumu giriş parametreleri bulanık mantık kontrol algoritmasına gönderilir ve bulanık mantık kontrol algoritması sacda daha az incelme ve buruşma olacak şekilde optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti değerlerini hesaplar.

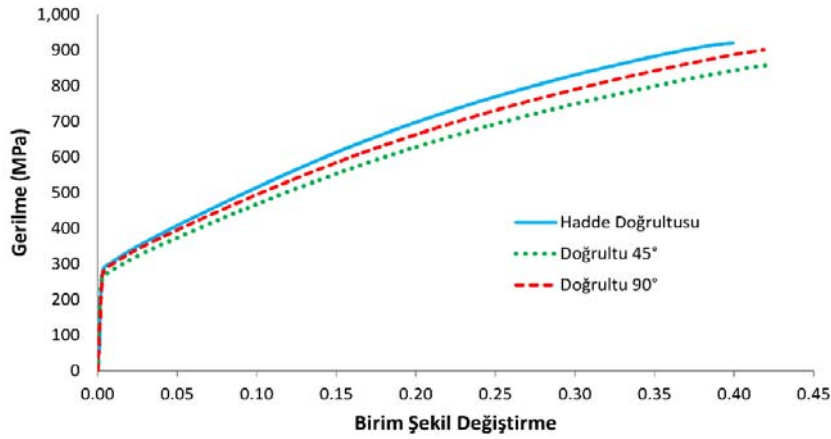
Bir sonraki adımda bu parametreler karşılığında giriş parametreleri tekrar hesaplanarak döngü analiz sonuna kadar devam eder.

2.1.5. Laboratuvar çalışmaları (Laboratory works)

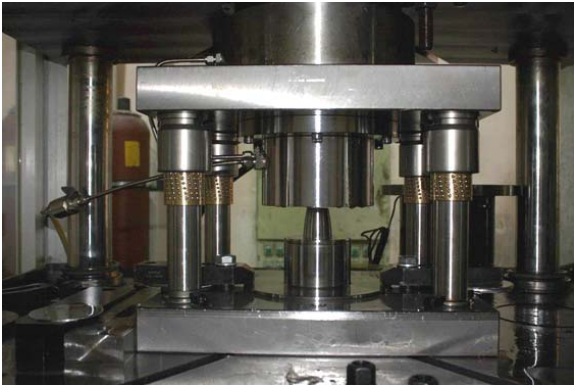
Adaptif Simülasyon Yaklaşımli Bulanık Kontrol Algoritması ile elde edilen eğriler kullanılarak laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneyler yapılırken adaptif Sonlu Elemanlar Analizi ile elde edilen ve sacın buruşmasını engelleyen net baskı plakası kuvvetinin üzerine sıvı basıncı nedeniyle baskı plakasını sacın yüzeyinden ayırmaya çalışan kuvvet kadar bir kuvvetin eklenmesi gerekmektedir. Aksi durumda baskı plakası sac yüzeyinden ayrılması neticesinde sacda buruşmalar oluşur ve sızdırmazlık sağlanamaz.



Şekil 8. Hidromekanik sıvama yönteminin modellenmesi (Quarter surface model of 1:4 scale dies)



Şekil 9. SS 304 malzemenin üç doğrultuda elde edilen gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri [29]
(Actual stress-unit strain curves of SS 304 material in three directions [29])



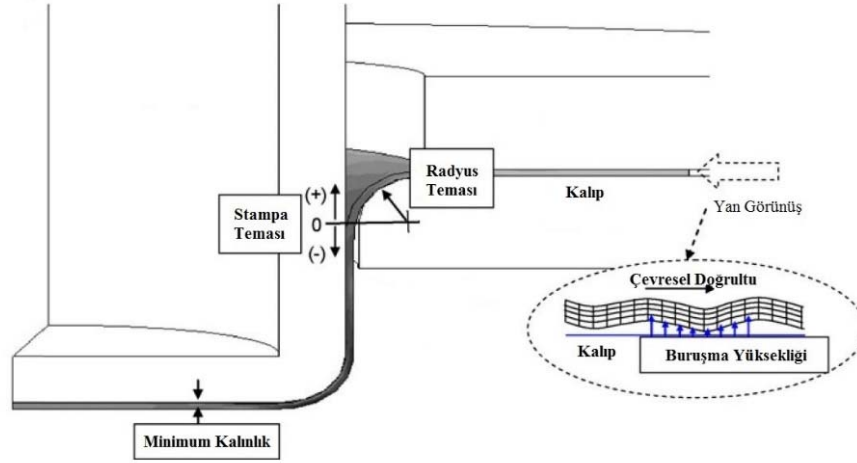
Şekil 10. Prese montajı gerçekleştirilen 1:4 ölçekli kalıplar (1:4 scale dies performed assembly)

Baskı plakasının açılmasını engellemek için sıvı basıncı ile sıvı basıncının etkilediği alanın çarpımından elde edilen

kuvvetin net baskı plakası kuvvetine eklenmesi gerekir. Ancak kalıpların arasında kalan sacın flanş bölgesinde ve baskı plakasında ne kadarlık bir alanın hangi değerinde sıvı basıncına maruz kaldığı noktasında bir belirsizlik vardır. Bu nedenle net baskı plakası kuvvetine eklenecek kuvvet deneme ve yanılma yöntemiyle belirlenmiştir.

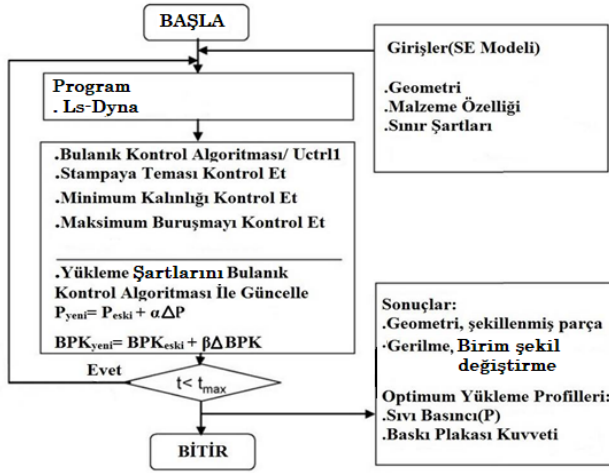
Baskı plakasının açılmasını engelleyecek kuvvet değeri belirlendikten sonra adaptif Sonlu Elemanlar Analizi ile eş zamanlı çalışan Bulanık Mantık Kontrol Algoritması ile belirlenen optimum yükleme profilleri deney presinin kontrol sistemine Şekil 13'te gösterildiği gibi girilmiştir. Yatay olan x eksenini istampa pozisyonunu ve düşey olan y eksenini ise sırasıyla basınç ve baskı plakası kuvvetini göstermektedir.

Presteki sensörler yardımıyla deney sırasında istampa pozisyonu, basınç, baskı plakası kuvveti, istampa kuvveti



Şekil 11. Bulanık sistemde kullanılacak olan giriş parametrelerinin şematik gösterimi [31]
(Schematic representation of input parameters to be used in fuzzy system)

gibi değerler grafik olarak kaydedilebilmektedir. Kaydedilen bu grafik ile Adaptif simülasyon yaklaşımli bulanık kontrol algoritması yardımıyla bulunarak prese aktarımı yapılan değerlerin örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 12. Adaptif simülasyon yaklaşımli bulanık kontrol algoritması [31]
(Fuzzy control algorithm with adaptive simulation approach)

2.2. 1:1 Ölçekli Kalıpların ve Endüstriyel Ürün Üretimi (Production of 1:1 Scale Dies and Industrial Product)

Benzetim kurallarına uygun olarak yapılan 1:4 ölçekli model kalıplara uygun olarak 1:1 ölçekli kalıplar üretilmiştir ve yöntem parametrelerine uygulanmıştır. 1:1 ölçekli boyutlardaki çaydanlık üretilmiştir. Bu bölüm aşağıdaki çalışmalardan oluşmaktadır.

- Kalıp tasarımı ve sonlu elemanlarla analiz
- Sızdırmazlık sisteminin boyutlandırılması
- Kalıpların imalatı
- Endüstriyel ürün üretimi kısımlarından oluşmaktadır.

2.2.1. Kalıp tasarımı ve sonlu elemanlarla analiz (Die design and finite element analysis)

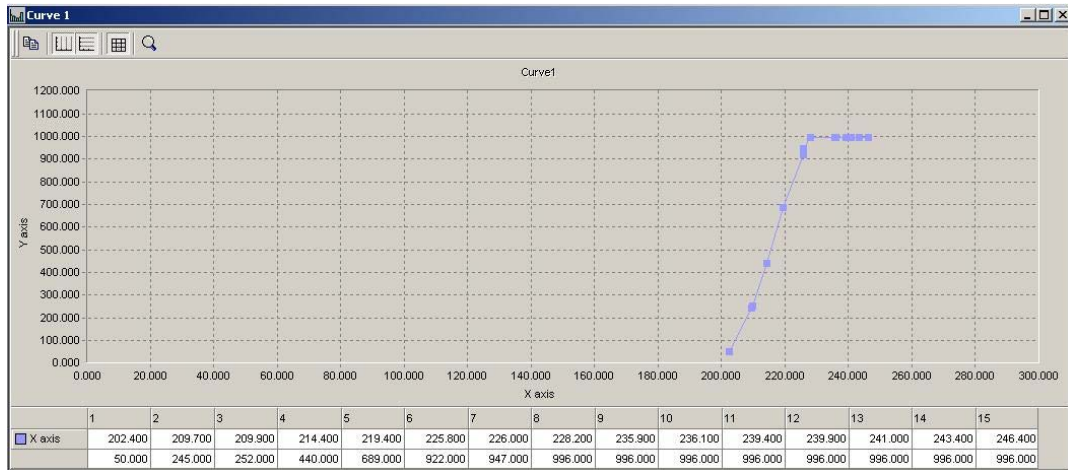
1:4 ölçekli kalıp tasarımı edinilen tecrübeyle 1:1 ölçekli kalıpların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda kalıpların pres tablalarına, istampanın hidrolik silindir miline bağlantısı (1 numaralı parça), kalıbın yüksek basınçlı sıvıda sızdırmazlığı sağlaması ve kalıp tutucu ile bağlantısı, kalıpların birbiriyle merkezlenmesi ve sacın merkezli yerleşimi (Şekil 14) ve yüksek basınçtaki sıvının kalıba basılması (Şekil 15) detayları düşünülerek tasarım yapılmıştır.

Kalıp tasarımı kalıp ve baskı plakası radyüslerinin optimum değerlerine Sonlu Elemanlar Analizi ile karar verilmiştir. Analizler sonucunda optimum radyüs değerleri kalıp için 4 ve baskı plakası için 2 mm bulunmuştur.

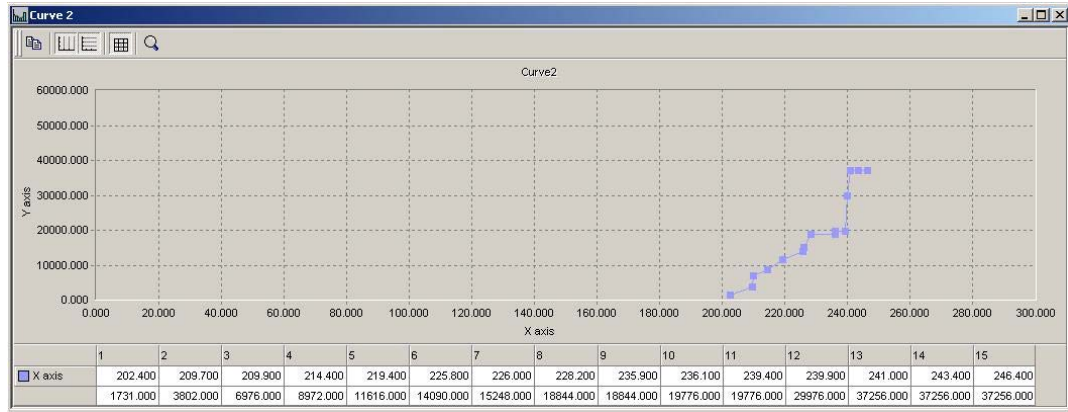
Sonlu Elemanlar Analizleri için kalıplar 3 boyutlu çizim programında yüzey olarak çizildikten sonra sonlu elemanlar paket programında Şekil 16'daki gibi çeyrek olarak modellenmiştir. Parçaların sonlu elemanlarına ayrılması, kullanılan eleman tipleri, malzeme modelinin oluşturulması, sınır şartların ve temas şartlarının tanımlanması yukarıda anlatılan 1:4 ölçekli model ile aynı şekilde yapılmıştır. 1:4 ölçekli modelden farklı olarak sac çapı 340 mm olduğu için 1.5 mm boyutunda dört kenarlı kabul elemanlar kullanılarak toplamda 12193 eleman ile sacın sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur.

2.2.2. Sızdırmazlık sisteminin boyutlandırılması (Dimensioning of the sealing system)

1:1 ölçekli parçaların şekillendirilmesi için kalıplarda sızdırmazlığın 1:4 ölçekli kalıplarda olduğu gibi 120 MPa basınca kadar sağlanması gerekir. 1:4 ölçekli parçaların üretiminde belirlenmiş olan sızdırmazlık sistemi 1:1 ölçekli parça kalıplarında da kullanılmıştır.

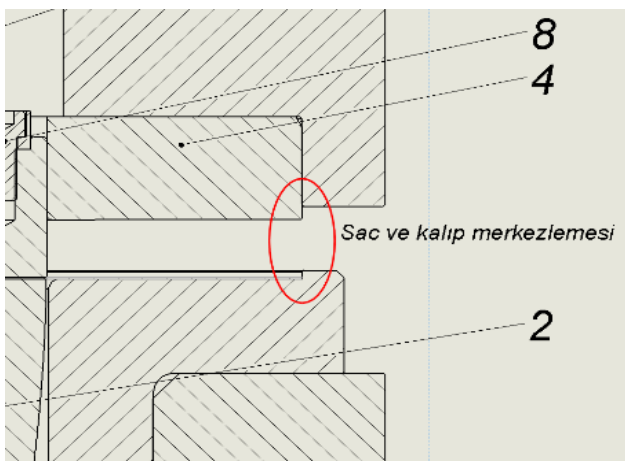


a)



b)

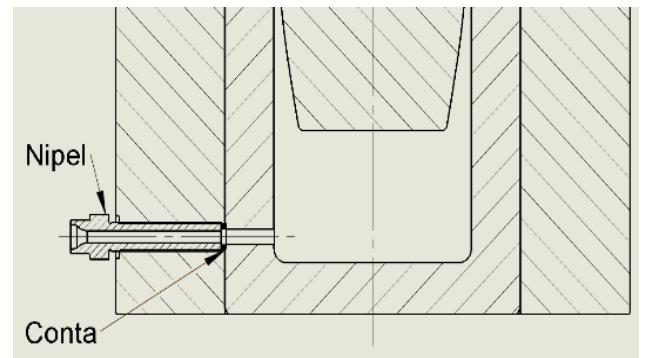
Şekil 13. a) I stampa pozisyonu (mm)-basınç (MPa), b) I stampa pozisyonu (mm)-baskı plakası kuvveti (N) parametrelerinin cihaza girilmesi
(Input parameters the device to a) stamp positions-pressure (MPa), b) stamp positions-blank holder force (N)



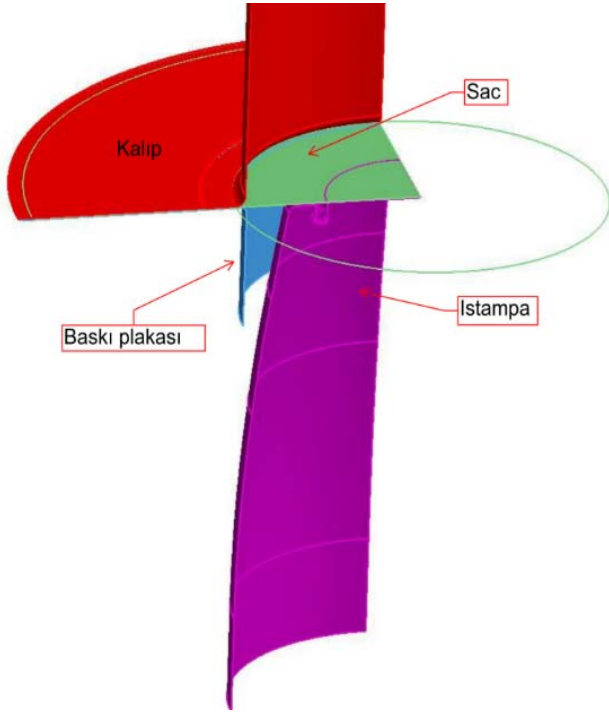
Şekil 14. Kalıp ve sac merkezlemesi
(Centering die and sheet metal)

1:4 ölçekli kalıplarda yüzeyden 0,05 mm yüksekliğinde ve 4 mm genişliğinde halka şeklindeki bir kademe ile sızdırmazlığın başarıyla sağlandığı tespit edilmiştir. Bu

kademe yüksekliği 0,1 mm olduğu zaman parçanın flanş bölgesinde aşırı buruşma olmuş, 0,03 mm olduğunda da sızdırmazlığın sağlanmasında güçlük çekilmiştir. Bu nedenle 1:1 ölçekli kalıplarda da sızdırmazlık kademesi ölçek oranı yaklaşık 4 ile çarpılarak kademe yüksekliği 0,2 mm ve genişlik de 17 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 15. Yüksek basınçlı sıvının kalıba uygulanması
(Application of high pressure liquid to the die)



Şekil 16. 1:1 ölçekli parçaların hidromekanik sıvama yöntemi sonlu elemanlar modeli
(Finite element model of hydromechanical deep drawing of 1:1 scale dies)

2.2.3. Kalıpların imalatı (Manufacture of dies)

Şekil 17'deki gibi tasarlanan kalıplar Ç4140 malzemeden imal edilmiştir. Hidromekanik sıvama yöntemi ve tasarlanan sızdırmazlık sisteminde kalıp ile baskı plakası yüzeylerinin birbirine göre paralelliği çok önemli olduğu için yeni tasarımda kalıp altına küresel bir altlık yerleştirilerek kalıbın baskı plakasına göre kendini düzeltmesi sağlanmıştır. Kalıplar Şekil 18'de görüldüğü gibi imal edilmiş ve boyut kontrolü yapıldıktan sonra Şekil 19'daki gibi prese bağlanmıştır.

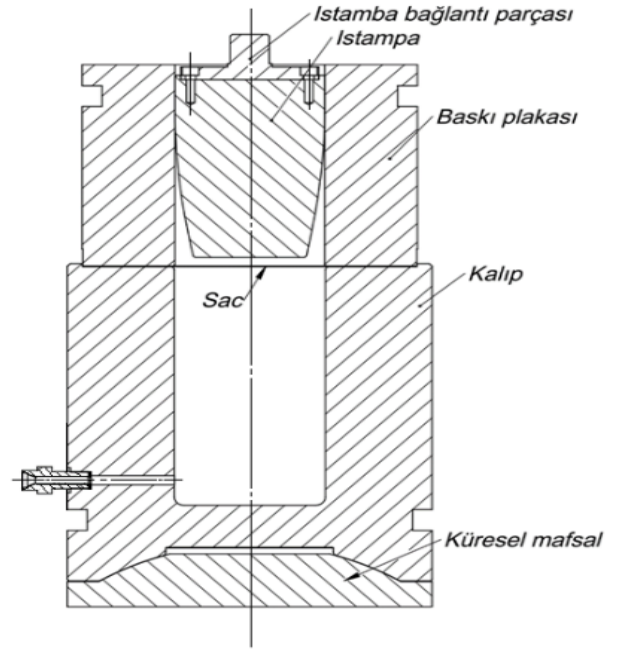
2.2.4. Endüstriyel uygulama (Industrial application)

1:4 ölçekli çaydanlık laboratuvarında üretildikten sonra, hidromekanik sıvama yönteminde kalıp ve yöntem parametrelerinin 1:1 ölçekli çaydanlık için endüstriyel olarak üretilebilirliği araştırılmıştır.

Daha önce sonlu elemanlar simülasyonlarıyla belirlenmiş olan optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri kullanılarak çaydanlığın üretimine geçilmiştir. Üretimin adımları aşağıda belirtildiği gibidir:

- Kalıbın içi basınçlandırılacak sıvı ile doldurulur.
- Kalıp ve baskı plakası arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla polietilen kaydırıcı numunenin her iki yüzeyine de uygulanır. İstampa ve sac arasındaki sürtünme faydalı olduğu için istampanın temas ettiği tarafta polietilen film sadece baskı plakası ve kalıp arasındadır.
- Kalınlığı 0,7 mm, malzemesi SS304 paslanmaz çelik ve çapı 339 mm olan numune kalıp üzerine yerleştirilir.

- Kalıp yukarı doğru hareket ederek sac yaklaşık 1000 kN'luk bir kuvvette sıkıştırılır.
- İstampa saca ilk temas ettiği konuma kadar ilerletilir.
- 7,5 MPa değerinde ön şişirme basıncı uygulanarak sac ıstampaya doğru şişirilir.
- İstampa ilerletilir. Bu arada pres tarafından kontrol sistemine daha önce girilmiş olan ıstampa konumuna göre sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profillerine göre değerler uygulanarak parça şekillendirilir.
- Kalıp ve ıstampa geri çekilerek şekillendirilmiş parça kalıplar arasından alınır.



Şekil 17. Hidroşekillendirme kalıbı (Hydroforming dies)



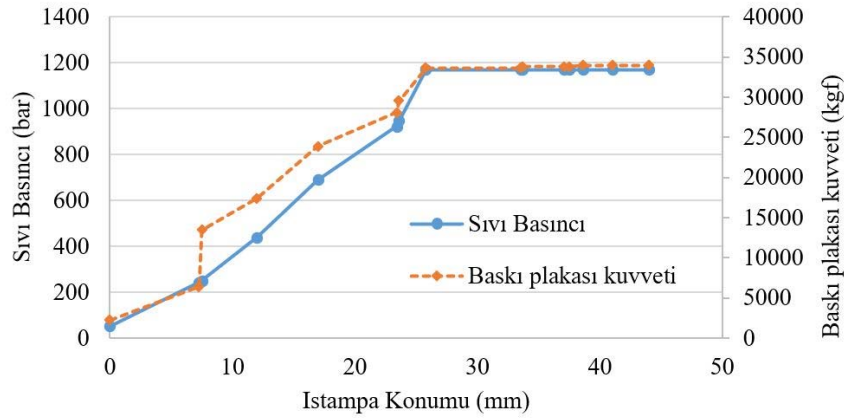
Şekil 18. Kalıp ve baskı plakası (Die and blank holder)

2.3. Şekillendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Forming Methods)

Bu bölümde, hidromekanik sıvama yönteminin klasik sac sıvama yöntemine göre üstünlüklerinin elde edilmesi için klasik sıvamayla üretilen çaydanlıklarla, prototip preste hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilen ürünler, kademe sayısı, kalınlık dağılımı, üretim hızı, kalıp maliyeti açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 19. İmal edilen kalıplar, a) Küresel altlık, b) İstampa (Manufactured dies, a) spherical base, b) stamp)



Şekil 20. İstampa konumu-basınç ve ıstampa konumu-baskı plakası kuvveti yüklenme profilleri (Stamp position-fluid pressure and stamp position-blank holder force loading profiles)

Kademe Sayısı: Klasik sıvama yöntemine göre 4 kademede üretilen çaydanlık, hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede üretilmiştir.

Kalınlık Dağılımı: Klasik ve hidrolik sıvama yöntemine göre üretilen çaydanlıkların kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır. Parçaların kalınlıkları, koordinat ölçme cihazı tezgâhında ölçülmüştür. Parçaların, hadde ve hadde doğrultusuna dik yönlerde, kap profili boyunca kalınlıkları ölçülmüştür. Ölçümler 3 tekrarlı numuneden yapılmıştır. Klasik sıvama yöntemi ile üretilen parçalar “K” ve hidrolik sıvama yöntemi ile üretilenler ise “HŞ” ön eki ile isimlendirilmiştir. Parçanın hadde doğrultusu boyunca ölçümü yapılan kısımları “Profil 1 ve 3” ile ve hadde doğrultusuna dik doğrultu boyunca olanlar ise “Profil 2 ve 4” ile isimlendirilmiştir. Kalınlık ölçümleri 2,5 mm aralıklarla alınmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Laboratuvar ölçeğinde 1:4 ölçekli kalıplarla elde edilen yöntem parametreleri ve bu parametrelerle çaydanlığın üretilmesinden elde edilen sonuçlar anlatılmıştır. Daha sonra, benzeşim yöntemi kullanılarak, hidrolik sıvama yönteminde 1:4 ölçekli kalıplarla laboratuvar ölçeğinde elde

edilen kalıp ve yöntem parametrelerinin 1:1 ölçekli kalıplarda geçerliliği ile ilgili yapılan endüstriyel uygulamanın sonuçları verilmiştir. Son olarak, klasik sıvama ve hidrolik sıvama yöntemi ile üretilen endüstriyel ürünlerin, sıvama sayısı, parçadaki kalınlık dağılımı, üretim hızı ve kalıp maliyeti bakımından karşılaştırılması ile ilgili sonuçlar anlatılmıştır.

3.1. 1:4 Ölçekli Kalıplarla Elde Edilen Yöntem Parametreleri (Process Parameters Obtained Using 1:4 Scale Dies)

Laboratuvar çalışmaları sonunda, 1:4 ölçekli kalıplarla gerçekleştirilen hidrolik sıvama yönteminin Sonlu Elemanlar Analizleriyle birlikte çalışan bulanık mantık kontrol algoritması ile optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri Şekil 20’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu analizlerde şekillenen parçada hasar oluşup oluşmadığı, sac metallerin hasar durumunu belirlemede etkili bir araç olan Şekillendirme Sınır Eğrisi ile belirlenmiştir. Şekillenen parçada hasar oluşup oluşmadığı şekillendirme sınır eğrisi yardımıyla kontrol edilmiştir. Şekillendirme sınır eğrisi yardımıyla yapılan hasar tahmininin görüntüsü Şekil 21’de verilmiştir. Örnek olarak burada parçanın hasarsız bir şekilde üretilbildiği sadece üst tarafında bilerek kesme işlemi için

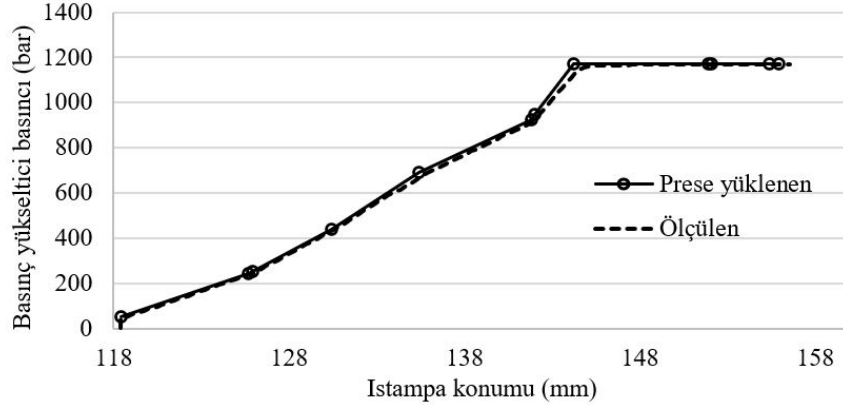
yapılan bölgede isteğe uygun şekilde yırtılma oluşacağı, geri kalan bölgede hasarsız bir şekillendirme yapılabileceği tahmin edilmiştir.



Şekil 21. SS 304 paslanmaz çelik malzeme için elde edilen FLD'ler ile yapılan hasar tahmini
(Conducted failure estimation with forming limit diagram of SS 304 stainless steel material)

3.2. Laboratuvar Çalışmaları (Laboratory Works)

Yapılan laboratuvar çalışmalarında tasarlanan sızdırmazlık yöntemleriyle 100 MPa basınçlara kadar sızdırmazlık başarıyla sağlanabilmektedir. Şekil 22'de görüldüğü üzere



Şekil 22. Deney sırasında elde edilen basınç yükseltici basıncı (Obtained pressure of intensifier during experiment)



Şekil 23. Deneyler sonucu elde edilen iş parçaları (Obtained work pieces from experiment)

basınç yükseltici basıncı düşüş yaşanmadan, istenen seviyede devam ettirilebilmiştir. Laboratuvar çalışmaları yapılırken ilk başta sacın üzerine basınç uygulamak için sıvı hidrolik yağ kullanıldığı için başka bir kaydırıcı kullanmaya gerek duyulmamıştır. Ancak Şekil 23'te görüldüğü gibi deney sonuçları başarısız olmuştur. Devam eden deneylerde sürtünmeyi azaltmak amacıyla polietilen filmler kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Hedeflenen 1:4 ölçekli çaydanlık tam boyuna ulaşmaya 4 mm kalana kadar başarıyla şekillendirilebilmiştir. Ancak bu anda flanş bölgesine geçişte hasar oluşmuştur.

Bu durum sonucunda hasar oluşan konumlarda baskı plakası kuvveti düşürülerek yüklem profillerinin iyileştirilmesiyle Şekil 24'teki gibi parça başarıyla şekillendirilebilmiştir. Sonuçta 1:4 ölçekli parçalar üzerinden klasik kalıplama ile 4 kademede şekillendirilebilen parçanın hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede şekillendirilebildiği kanıtlanmıştır.

Proseste kullanılan sıvı basıncı profilinde bulanık mantık kontrol algoritmasıyla eş zamanlı çalışan sonlu elemanlar analizi yazılımı tarafından Şekil 25'te görüldüğü gibi 117 MPa olarak belirlenmiştir. Ancak laboratuvarında bulunan deney presinde basınç yükseltici 150 MPa kadar sıvı basması mümkünken hem mekanik olarak bu basınç sınırlanmış hem de ölçüm aralığı 0-100 MPa olan bir basınç sensörü kullanılmıştı. Deneylerde, analizlerde bulunan sıvı basıncı profilinin tam olarak uygulanması için, basıncın mekanik sınırlaması kaldırılmış ve 160 MPa'lık bir basınç sensörü prese bağlanmıştır. Bunun sonucunda preste 100 MPa basıncın üzerine çıkmak mümkün olmuştur.



Şekil 24. a) İlk çalışmalarda 40 mm yükseklikte hasar oluşan iş parçası, b) Sonraki çalışmalarda 44 mm yüksekliğe kadar hasarsız şekillendirilen iş parçası
(a) Fractured work piece with 40 mm height at initial trials, b) successfully formed work piece having with 44 mm height at next trials)

Hedeflenen parça klasik kalıplamada 4 kademede sıvandıkdan sonra üst kısmında yapılan kesme işlemi yapılmakta ve sonrasında da parça üzerinde yine kalıplar ile MİN ve MAX yazıları yazılmaktadır.

Her ne kadar polietilen kaydırıcı kullanılarak 1:4 ölçekli parçalar başarıyla şekillendirilmiş olsa da, seri imalatta kaydırıcı kullanılması imalat süresini artıracığından, sacın yüzeyine polietilen film yerine wisura isminde sıvı formda bir kaydırıcı uygulayarak parçanın şekillendirilmesi konusunda da araştırmalar yapılmıştır. Sonuçta 1:1 ölçekli kalıplarda da şekillendirmenin polietilen film kaydırıcı ile olmasına karar verilmiştir.

1:4 ölçekli parçalar ile ilgili bir diğer çalışma şekillendirme hızı konusunda gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi şimdiye kadar 1 mm/s ıstampa hızında yapılmaktaydı. 1:1 ölçekli parçanın ise 12 mm/s hızında şekillendirilmesi dolayısıyla 175 mm boyundaki parçanın yaklaşık 15 saniyede şekillendirilmesi planlanmıştır. 1:4 ölçekli parçaların da aynı sürede şekillendirilmesi düşünüldüğünde ıstampanın 3 mm/s hızda hareket etmesi gerektiği hesaplanmıştır. Böylece şekillendirme hızının etkisini

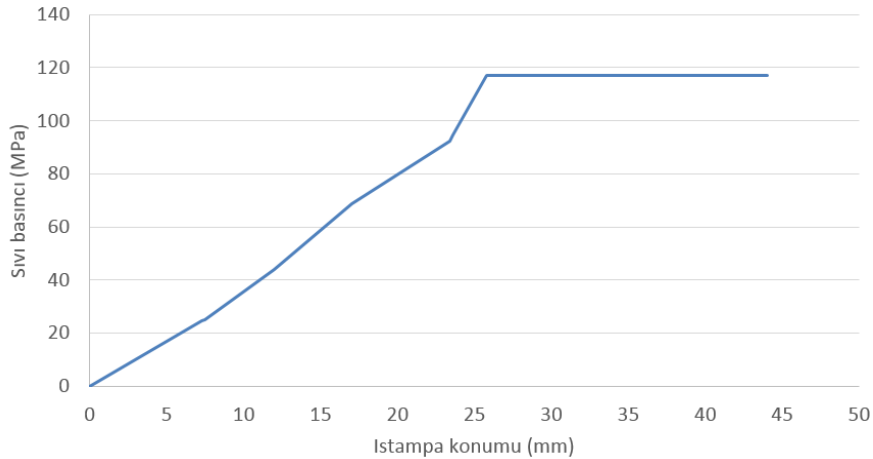
araştırmak için aynı yükleme profilleri kullanılarak 3, 4 ve 5 mm/s hızlarda deneyler yapılmıştır. Sonuçta 3 ve 4 mm/s ıstampa hızlarında da başarılı şekillendirmeler yapmak mümkün olmuştur, ancak 5 mm/s ıstampa hızında deney numunesi flanş bölgesinden yırtılmıştır (Şekil 26).

1:1 ölçekli parçaların deneylerine geçilmeden önce 1:4 ölçekli olarak laboratuvarında bulunan hidroşekillendirme presinde üretilebilirliğin test edilmesi aşağıdaki katkıları sağlamıştır.

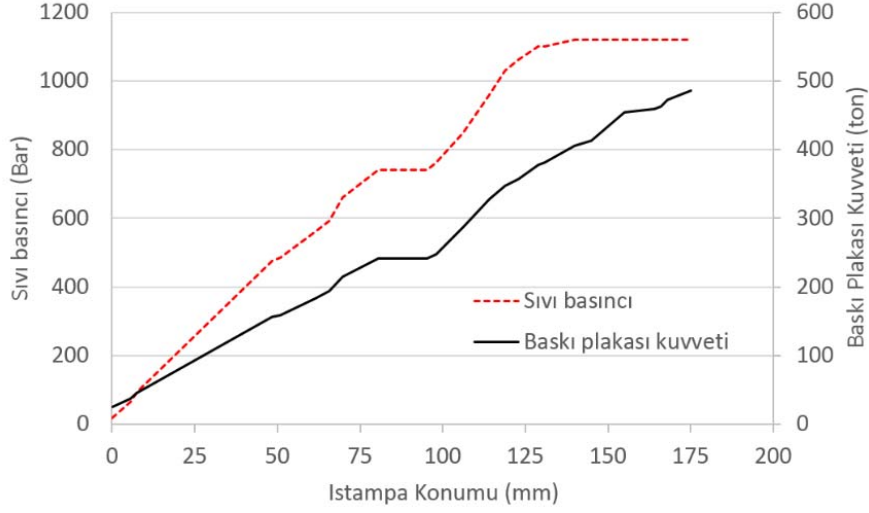


Şekil 26. 3, 4 ve 5 mm/s ıstampa hızlarında şekillendirilen deney numuneleri
(Formed experiment specimens for stamp velocity 3, 4 and 5 mm/s)

- Çalışmanın en önemli hedeflerinden biri olan klasik kalıplama ile dört kademede şekillendirilen iş parçasının hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede üretilebileceği, henüz 12500 kN kapasitesindeki hidroşekillendirme presi üretilmeden ve 1:1 ölçekli kalıplar imal edilmeden görülmüştür.
- Sızdırmazlık sistemi geliştirilerek, daha önce tecrübe sahibi olunmayan 100 MPa üzeri basınçlar için kalıplardaki sızdırmazlık problemi çözülmüştür.
- Sonlu Elemanlar Analizi ile eş zamanlı çalışan bulanık mantık algoritmalarıyla belirlenen optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleriyle deneylerde hasarsız parça üretiminin yapılabildiği ve kullanılan yöntemin



Şekil 25. Sonlu elemanlar analizi ile eş zamanlı çalışan bulanık mantık kontrol algoritması ile bulunan sıvı basıncı profili
(Obtained fluid pressure profile with using integrated with finite element analysis and fuzzy logic algorithm)



Şekil 27. 1:1 ölçekli parçaların adaptif sonlu elemanlar analizi ile eş zamanlı çalışan bulanık mantık algoritması ile belirlenen optimum yükleme profilleri

(Determined optimum loading profiles with using integrated with finite element analysis and fuzzy logic algorithm for 1:1 scaled parts)

geçerli olduğu görülmüştür. Optimum yükleme profillerini veren bulanık mantık parametreleri belirlenmiştir.

- Hidromekanik sıvama yönteminde kesme ve yazı yazma işlemleri konusunda tecrübe sahibi olunmuştur.
- Kalıp tasarımı konusunda tecrübe sahibi olunmuş ve maliyeti yüksek olan 1:1 ölçekli kalıpların tasarım ve üretiminde çıkabilecek problemler önceden görülmüştür.

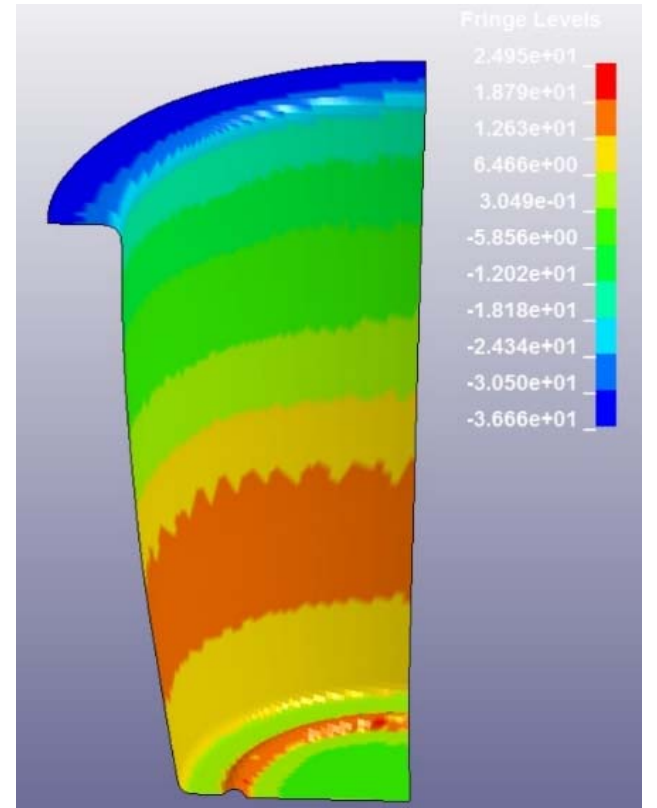
3.3. 1:1 Ölçekli Kalıpların ve Endüstriyel Ürün Üretimi (Production of Dies and Industrial Product)

3.3.1. 1:1 Ölçekli kalıpların analizi (Analysis of 1:1 scale dies)

1:1 ölçekli parçaların hidromekanik sıvanmasında optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri adaptif sonlu elemanlar analizi ile eş zamanlı çalışan bulanık mantık algoritması ile bulunmuştur (Şekil 27). Bunun için öncelikle üyelik fonksiyonlarına karar verilmiş ve sonlu elemanlar analizinde çözümlenerek optimum yükleme profilleri Şekil 28'deki gibi belirlenmiştir. Burada hedeflenen parçanın maksimum 112 MPa sıvı basıncı ve ~5000 kN baskı plakası kuvveti ile üretilebileceği görülmektedir. 5000 kN kuvvet değeri sacın buruşmaması için gerekli kuvvetin ve büyük oranda da kalıpların basınçla birlikte sac yüzeyinden ayrılmaması için gerekli kuvvetin toplamından oluşmaktadır. Sızdırmazlık eğer kalıp radyüsüne yakın bölgeden değil de sacın dış çevresinden sağlanmış olsaydı bu kuvvetin 12000 kN geçeceği hesaplanmıştır. Şekil 29'da optimum sıvı basıncı profilleri, 1:4 ve 1:1 ölçekli parça için karşılaştırılmıştır.

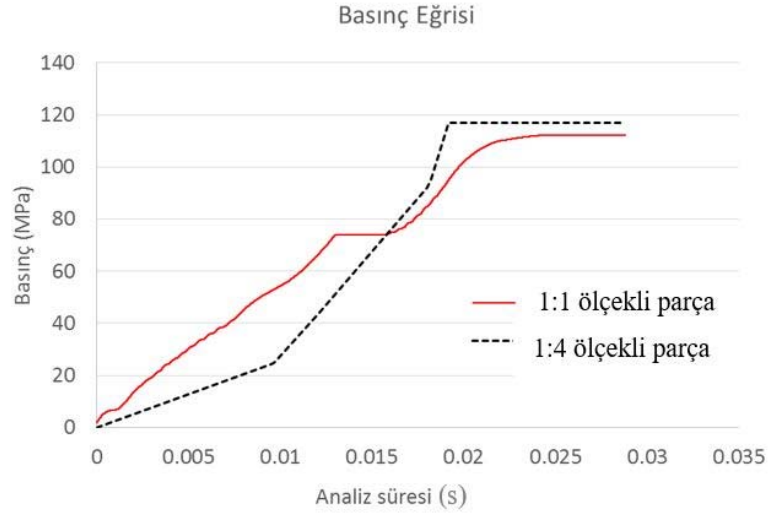
Buradan görüldüğü gibi ulaşılan maksimum basınç yaklaşık eşittir. Ancak basınç profilinde bir miktar farklılık bulunmaktadır. Bu profiller bulanık mantıkla eş zamanlı çalışan adaptif sonlu elemanlar analizlerinin verdiği değerler olup, bu profillerin 1:1 ölçekli parça üretiminde

kullanılabilirliği ve parçada meydana gelen farklılıklar araştırılabilir. Analiz sonuçlarıyla birlikte kalıplar imal ettirilmiştir. Daha sonra endüstriyel ürün çaydanlığın üretimine geçilmiştir.



Şekil 28. 1:1 ölçekli parçanın Sonlu Elemanlar Analizi sonucu

(Finite element analysis results of 1:1 scaled parts)



Şekil 29. 1:4 ve 1:1 ölçekli parçalar için bulunan optimum sıvı basıncı profilleri
(Optimum fluid pressure profiles for 1:4 and 1:1 scaled parts)



Şekil 30. Sac parçada a) yırtılma ve b) buruşma hasarları (a) Fracture and b) wrinkling failures at sheet metal part)

3.3.2. Endüstriyel uygulama (Industrial application)

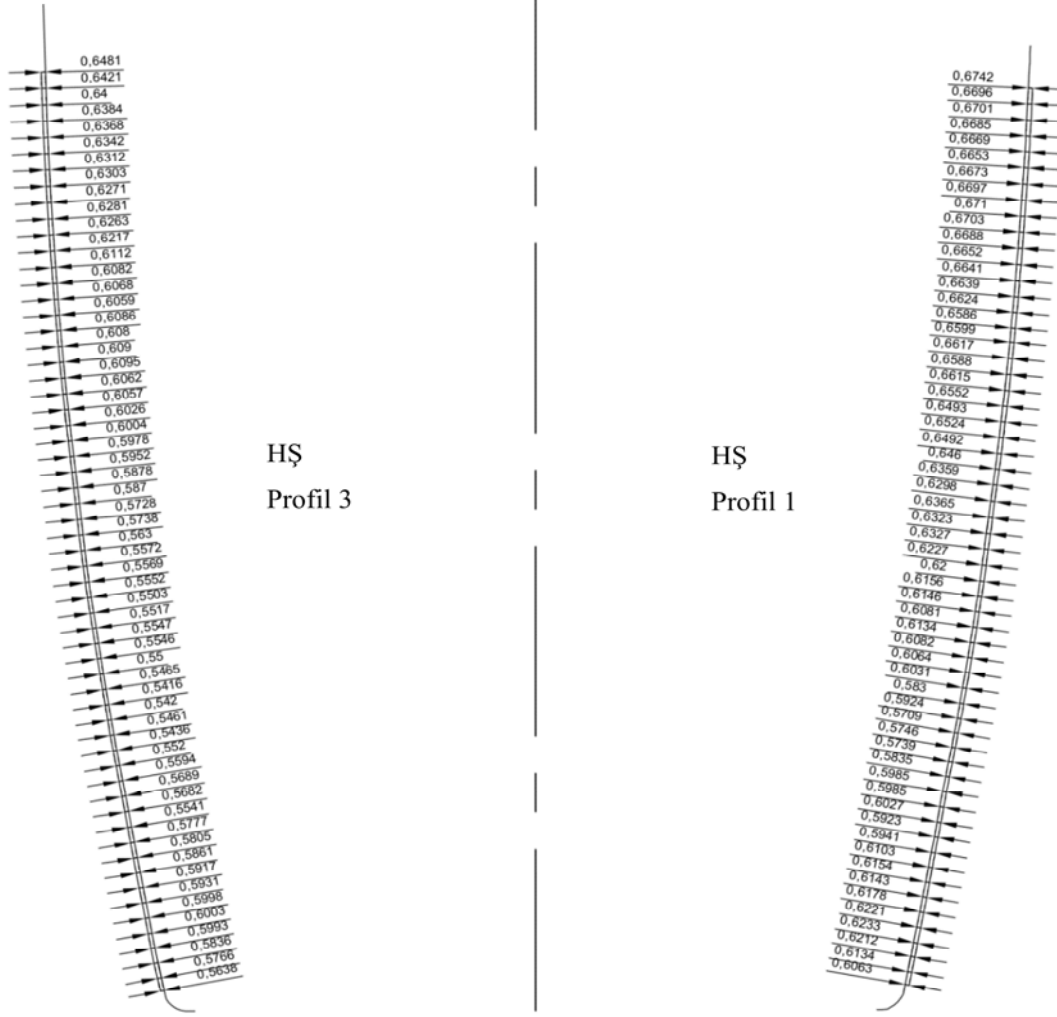
Çaydanlığın üretiminde ilk denemelerde başarılı olunamamıştır. Şekil 30'da görüldüğü gibi ilk denemelerde saclarda yırtılmalarla ve buruşma sonucunda da kalıplarda sızdırmazlığın sağlanamaması durumlarıyla karşılaşmıştır. Kalıbın dengeli basmasındaki problemler ve sıvı basıncının kalıpları açmaması için baskı plakası kuvveti üzerine eklenmesi gereken karşı denge kuvveti deneme ve yanılma ile tespit edilerek sızdırmazlık başarıyla sağlanmıştır. Sonuçta Şekil 31'de görüldüğü gibi çaydanlığın başarıyla üretimi mümkün olmuştur.

3.4. Şekillendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Forming Methods)

Klasik sıvama yöntemine göre 4 kademedeki üretilen çaydanlık, hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademedeki üretilen çaydanlık ile karşılaştırılmıştır. CMM tezgâhından alınan koordinatlar nokta olarak bir CAD programına aktarılmış ve bu noktalara eğri uydurulmuştur (Şekil 32).



Şekil 31. Başarıyla üretilmiş çaydanlık
(Successfully formed teapot)



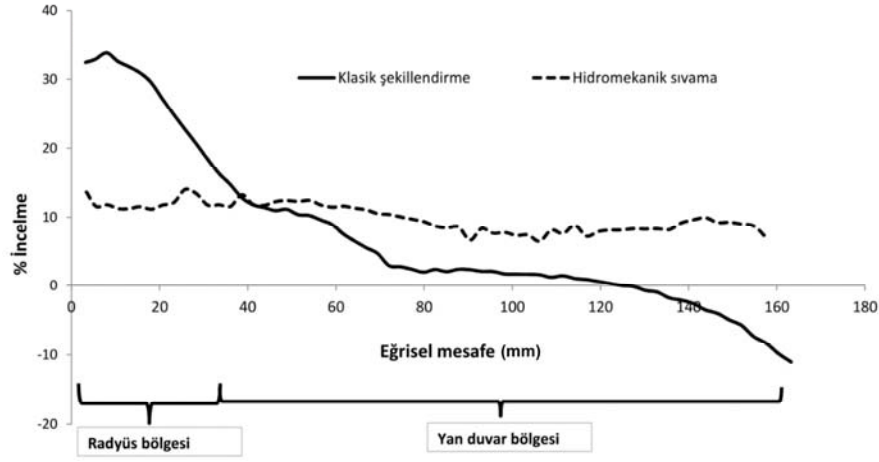
Şekil 32. Çaydanlığın kalınlık dağılımı (mm) (Thickness distribution of teapot)

İç ve dış profillere uydurulan eğriler arasındaki dik uzaklık kalınlık değeri olacaktır. Ölçümler % 0,1 hassasiyetle yapılmıştır. Klasik ve hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilmiş çaydanlıklara ait profil boyunca % incelleme değerleri Şekil 33'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde, hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilen çaydanlıklarda % incelleme değerlerinin daha üniform olduğu görülmektedir. Klasik sıvama ile üretilmiş çaydanlıkta radyüs bölgelerinde yaklaşık %30 civarında incelleme olurken, hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilenlerde tüm profil boyunca yaklaşık %10 gibi düşük bir incelleme değeri oluşmaktadır. Buradan, hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilmiş çaydanlıkların, klasik yöntemle üretilenlere göre daha mukavemetli olduğu ve korozyon dirençlerinin daha fazla olacağı söylenebilir.

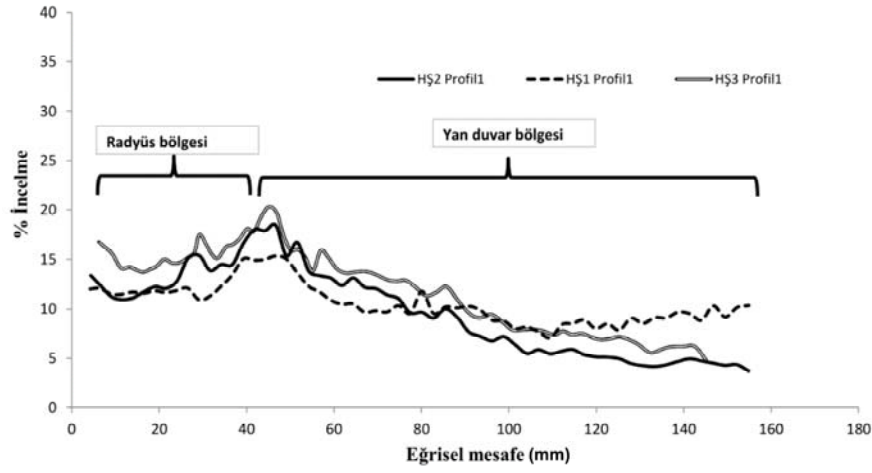
Hidromekanik sıvama yönteminin tekrarlanabilirliğinin belirlenmesi için, 3 numunedan elde edilen % incelleme değerleri Şekil 34'te verilmiştir. Şekilden, % incelleme değerlerinin yaklaşık $\pm\%15$ saptığı görülmektedir. Bunun,

presin kontrolündeki bazı problemlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna rağmen, klasik durumdaki parçaların bazı bölgelerindeki % incelleme değerlerindeki tekrarlanabilirlik değerleri incelendiğinde (Şekil 35), hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilenlerin kötü olmadığı söylenebilir. Presin kontrolü ile ilgili iyileştirmeler tamamlandıktan sonra, tekrarlanabilirliğin çok daha iyi olacağı öngörülmektedir. Geometrik tolerans değerlendirildiğinde ise, klasik şekillendirme ile 4 kademede üretilen parçalarda toleransların, hidromekanik sıvama yöntemi ile elde edilenlere göre yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir.

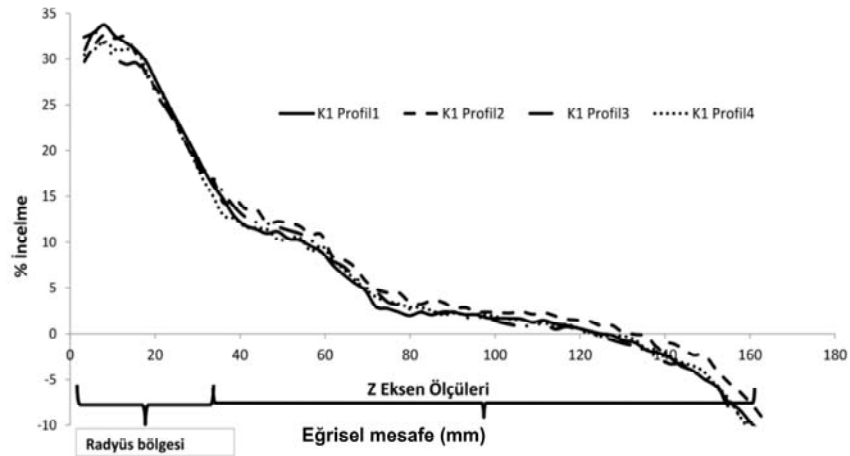
Hidromekanik sıvama yönteminin üretim hızı, klasik sıvama ile kıyaslanmıştır. Klasik sıvama ile 4 kademede üretilen çaydanlığı üretim süresi, presler arası taşıma süresi de dikkate alındığında yaklaşık 60 saniyedir. Güncel durumda, çaydanlık hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede 50 saniyede üretilebilmiştir. Bu durumda 4 kademeden oluşan klasik şekillendirmeye göre üretim hızı yaklaşık %20 artmıştır.



Şekil 33. Klasik ve hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilmiş çaydanlıklarda oluşan % incelmeler (Formed teapot of percent thickness reductions with classical and hydromechanical deep drawing processes)



Şekil 34. Hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilmiş çaydanlıkların tekrarlanabilirlikleri (Repeatability of formed teapots with hydromechanical deep drawing process)



Şekil 35. Klasik sıvama ile üretilmiş çaydanlıkların tekrarlanabilirlikleri (Repeatability of formed teapots with classical deep drawing process)

Ancak hidromekanik sıvama yönteminde üretim hızının artırılması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Üretilen parçaların yüzey düzgünlüğü incelendiğinde, hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilen çaydanlıkların kabul edilebilir bir yüzey kalitesine sahip oldukları görülmüştür.

Bu çalışmada, hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilen parçaların, klasik sıvamaya üretilenlere göre; daha az kademede, kısa zamanda, üniform kalınlıkta ve büyük sıvama oranlarında elde edilmesi önemli bir başarı kriteridir. Endüstriyel ürün çaydanlık, hidromekanik sıvama yöntemi ile klasik sıvamaya göre, daha az kademede, kısa zamanda ve üniform kalınlıkta elde edilmiştir. Klasik sıvama yönteminde 4 kademede üretilen çaydanlık, hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede üretilebilmiştir. Bu durumda klasik sıvama yöntemi için yapılacak kalıpların maliyeti, hidromekanik sıvama yöntemi için gerekli kalıpların maliyetinden en az 4 kat fazladır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sac metal ürün üreticilerinin, hızlı ve ekonomik bir üretim isteklerinin karşılanması doğrultusunda, klasik sıvamaya birçok operasyonla üretilen endüstriyel bir ürünün hidromekanik sıvama yöntemiyle daha az operasyonla üretilmesi ve 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden kalıp ve yöntem parametrelerinin küçük ölçekli kalıplarla benzeşim yöntemine göre belirlenmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır. Bunun için öncelikle, 1:4 ölçekli kalıplarda laboratuvar presinde hidromekanik sıvama yönteminin kalıp ve yöntem parametreleri benzetim yöntemine göre belirlenmiştir. Daha sonra laboratuvar da benzeşim yöntemine göre belirlenen parametrelerin 1:1 ölçekli kalıplarda hidromekanik sıvama yönteminde geçerliliği incelenmiştir.

Yapılan bu çalışma kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Laboratuvar çalışmaları sonunda, 1:4 ölçekli kalıplarla gerçekleştirilen hidromekanik sıvama yönteminin Sonlu Elemanlar Analizleriyle birlikte çalışan bulanık mantık kontrol algoritması ile optimum sıvı basıncı ve baskı plakası kuvveti profilleri başarıyla elde edilmiştir.
- Laboratuvar çalışmalarında tasarlanan sızdırmazlık yöntemleriyle gerekli olan 100 MPa basınçlara kadar sızdırmazlık başarıyla sağlanabilmiştir.
- Laboratuvar da 1:4 ölçekli kalıplarda yükleme profillerinin iyileştirilmesiyle klasik kalıplama ile 4 kademede şekillendirilebilen parça hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede 4 mm/s'ye kadar ıstampa hızlarında başarıyla üretilebilmiştir.
- Böylece 1:1 ölçekli kalıplar tasarlanmadan ve üretilmeden önce, laboratuvar ölçeğinde 1:4 ölçekli kalıplar kullanılarak bilimsel yaklaşımlarla benzeşim yöntemine göre, sızdırmazlık sistemi ve kalıp parametreleri deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Sonlu Elemanlar Analizi ile eş zamanlı çalışan bulanık mantık algoritmalarıyla belirlenen optimum sıvı basıncı ve baskı

plakası kuvveti profilleriyle parçaların hasarsız olarak üretilebildiği ve kullanılan yöntemin geçerli olduğu ortaya konulmuştur.

- Benzeşim yöntemine göre belirlenen kalıp ve proses parametreleri 1:1 ölçekli kalıplarda uygulanmıştır. Bunun sonunda klasik sıvama yöntemi ile 4 kademede üretilebilen endüstriyel ürün (çaydanlık) hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede başarıyla üretilebilmiştir.
- Hidromekanik sıvama yöntemi, klasik sıvama yöntemi ile üretim hızı ve kalınlık dağılımı açısından kıyaslanmıştır. Klasik sıvama yöntemi ile 4 kademede üretilen çaydanlığı üretim süresi, presler arası taşıma süresi de dikkate alındığında yaklaşık 60 saniyedir. Çaydanlık hidromekanik sıvama yöntemi ile tek kademede 50 saniyede üretilebilmiştir. Bu durumda klasik sıvamaya üretim hızı yaklaşık %20 artmıştır. Kalınlık dağılımları incelendiğinde ise, hidromekanik sıvama yöntemi ile üretilen çaydanlığın kalınlık dağılımının klasik sıvamaya üretilene göre daha üniform olduğu görülmüştür. Ayrıca hidroşekillendirme ile üretilmiş ürünlerin tekrarlanabilirliklerinin iyi olduğu ve geometrik tolerans değerlendirildiğinde ise, klasik sıvama ile üretilen parçalarda toleransların, hidromekanik sıvama yöntemi ile elde edilenlere göre yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir.
- Böylece hidromekanik sıvama yönteminde endüstriyel ürünün üretilmesi için gerekli olan 1:1 ölçekli kalıplar üretilmeden önce, benzetim yöntemine göre model kalıplarla sızdırmazlık sistemi ve yöntem parametrelerinin belirlenmesiyle literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.
- Bundan sonraki çalışmalara ışık tutması için, Hidromekanik sıvama yönteminde laboratuvar da benzetim yöntemine göre 1:4 ölçekli parça için elde edilen parametrelerin 1:1 ölçekli kalıplar için geçerliliği başarılı parametreler için gerçekleştirilmiş ve endüstriyel ürün üretilebilmiştir. Benzetim yöntemine göre uygun olmayan parametrelerin, 1:1 ölçekli kalıplar için de uygun olmadığının gösterilmesi bu çalışmayı bütünleyecektir.
- Başka parçaların üretimi için, çalışmada laboratuvar ölçeğinde önerilen diğer sızdırmazlık sistemlerinin 1:1 ölçekli kalıplarda geçerliliği incelenebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK-TEYDEB 5140028 numaralı "Sac Hidroşekillendirme Pres Tasarımı-İmalatı ve Endüstriyel Bir İş Parçası Üretimi" isimli 1505 Üniversite-Sanayi İşbirliği Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı, TÜBİTAK Kurumuna, bu projede Müşteri Kuruluş olan Elmalı Makina San.Tic.Ltd.Şti.'ne sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

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*, SME, 2003.
4. Koç M. and Cora, Ö.N., *Introduction and state of the art of hydroforming*, Hydroforming for advanced manufacturing, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 1-29, 2008.
5. 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.
6. Karaağaç İ., Özdemir A., Experimental investigation on the formability of square shaped cups by hydromechanical deep drawing process, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (1), 33-41, 2014.
7. 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.
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. Zhang S.H. and Danckert J., Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 14-25, 1998.
10. Kandil A., An experimental study of hydroforming deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 70-80, 2003.
11. Zhang S.H., Developments in hydroforming, *Journals of Materials Processing Technology*, 91, 226-244, 1999.
12. Ankaralı M.S., Dilmeç M., Türköz M., Investigation on the effect of use of movable die in sheet hydroforming with die on formability, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (2), 787-801, 2020.
13. Lang L., Li T., An D., Chi C., Nielsen K.B., Danckert J., Investigation into hydromechanical deep drawing of aluminum alloy-Complicated components in aircraft manufacturing, *Materials Science and Engineering A*, 499, 320-324, 2009.
14. Verma R. K. and Chandra S., An improved model for predicting limiting drawing ratio, *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 218-224, 2006.
15. Hatipoglu H. A., Experimental and numerical investigation of sheet metal hydroforming (flexforming) process, Master Thesis, Middle East Technical University, 2007.
16. Dachang K., Yu C., Yongchao X., Hydromechanical deep drawing of superalloy cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 243-246, 2005.
17. Abedrabbo N., Pourboghrat F. and Carsley J., Forming of AA5182-O and AA5754-O at Elevated Temperatures Using Coupled Thermo-mechanical Finite Element Models, *International Journal of Plasticity*, 23, 841-875, 2007.
18. Lang L., Danckert J., Nielsen K.B., 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, 2004.
19. Khandeparkar T. and Liewald M., Experimental determination of the limiting bulge height in hydromechanical deep drawing, *Proc. IMechE Vol. 222 Part B: J. Engineering Manufacture*, 2008.
20. 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. *Journal of Material Processing Technology*, 142, 544-550, 2003.
21. Lang L. et al., Key technologies of the simulation of the hydrodynamic deep drawing of irregular parts, *Journal of Materials Processing Technology* 150, 40-47, 2004.
22. Tirosh J., Neuberger A., Shirizly A., On tube expansion by internal fluid pressure with additional compressive stress, *International Journal of Mechanical Sciences*, 38, 8-9, 839-851, 1996.
23. Shirizly A., Yossifon S., Tirosh J., The role of die curvature in the performance of deep-drawing (hydro-mechanical) process. *International Journal of Mechanical Science* 36, 121-135, 1994.
24. Pennington J.N., The promise of hydroforming, *Mod. Met.* 52 (7), 32-33, 1996.
25. Hsu T.C., Hsieh S.J., Theoretical and experimental analysis of failure for the hemisphere punch hydroforming processes, *Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng.* 118,434-438,1996.
26. Yang D.Y., Kim J.B., Lee D.W., Investigation into manufacturing of very long cups by hydromechanical deep drawing and ironing with controlled radial pressure, *Annal. CIRP* 44, 1995.
27. Siegert K., Haussermann M., Lösch B., Rieger, R., Recent developments in hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 98, 251-258, 2000.
28. Liu J., Ahmetoglu M. and Altan T., Evaluation of sheet metal formability, viscous pressure forming (VPF) dome, *Journal of Materials Processing Technology*, 98 (1), 1-6, 2000.
29. Türköz M., AISI 304 Paslanmaz Çelik Sacın Hidromekanik Derin Çekilmesi, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 248-257, 2020.
30. Dilmeç M. and Arap M., Effect of geometrical and process parameters on coefficient of friction in deep drawing process at the flange and the radius regions, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86 (1), 747-759, 2016.
31. Choi H., Koç M., Ni J., Determination of optimal loading profiles in warm hydroforming of lightweight materials, *Journal of materials processing technology*, 190, 230-242, 2007.