

ERDEMİR 6112 SAC MALZEMENİN HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME YÖNTEMİYLE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ

İbrahim KARAAĞAÇ, Ahmet ÖZDEMİR

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500 Teknikokullar- Ankara/Türkiye
ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr, ahmetoz@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 15.03.2011; Kabul/Accepted: 10.10.2011)

ÖZET

Sac metal malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri, klasik kalıplama ile şekillendirme yöntemlerine göre; ürün kalitesi ve çekme oranı açısından sağladığı avantajlarından dolayı, otomotiv başta olmak üzere; beyaz eşya, uzay ve havacılık endüstrisinde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada; sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemlerinden birisi olan hidromekanik derin çekme yöntemi kullanılarak, Erdemir 6112 (DC01) kalite sac malzemenin derin çekilebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır (Sac kalınlığı 0.5 mm, 0.8 mm 1.0 mm). Deneysel çalışmalar; çalışmanın amacına ulaşmak için, tasarımı ve imalatı özel olarak yapılan hidromekanik derin çekme deney düzeneğinde yapılmıştır. Baskı plakası kuvveti ve çekme hızı değerleri sabit alınmıştır (Çekme hızı 6 mm/s). Sac malzeme kalınlığı, ilkel sac çapı, kalıp içi basıncı ve kalıp kavisi parametrelerinin, çekme oranı, çekme kuvveti, güç tüketimi ve şekillendirilen ürünün et kalınlığı değişimine etkileri deneysel olarak belirlenmiştir. Çekilen numunelerde, klasik kalıplama yöntemine göre daha yüksek çekme oranı (2.33) ve en küçük et kalınlığı değişiminin elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şekillendirilebilirlik, hidromekanik derin çekme, sıvı ile şekillendirme

THE FORMABILITY OF ERDEMİR 6112 SHEET METAL BY THE HYDROMECHANICAL DEEP DRAWING PROCESS

ABSTRACT

The hydroforming processes of sheet metal materials have more advantages than conventional forming processes in terms of the product quality and the drawing ratio, because of they are widely used in mainly automotive, white goods, aerospace industries. In this study, the hydromechanical deep drawing which is one of the hydroforming processes was used for the deep drawability of Erdemir 6112 sheet metal material (thickness 0.5 mm, 0.8 mm, 1.0 mm). Experimental studies were carried out by using the specially designed and manufactured a hydromechanical forming device for the purpose of study. Blank holder force and drawing speed values are held constant (drawing speed 6 mm/s). The effects of the process parameters such as the sheet metal thickness, the blank diameter, the chamber pressure and the die radius on the draw ratio, the draw force, the force consumption and the thickness variation of formed parts were experimentally determined. It was seen that the higher drawing ratios (2.33) and the minimum thicknesses variation of the specimens drawn were obtained when compared with the conventional deep drawing.

Keywords: Formability, hydromechanical deep drawing, hydroforming

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

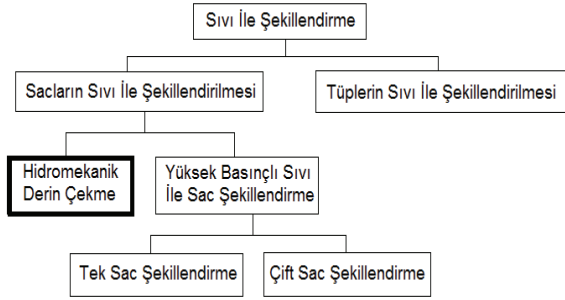
Günlük hayatta kullanılan sac metal ürünlerin çok büyük bir çoğunluğu sac metal malzemelere uygulanan kalıplama yöntemleri ile şekillendirilerek

üretilmektedir. Her bir ürün için; kalıp tasarımı ve üretimi, üretilecek ürünün zorluk derecesine göre uzun bir süreç alabilmektedir. Sac metal malzemelerin kalıplama ile şekillendirilmesinde en önemli maliyet artırıcı unsurun, şekillendirme işleminde belirlenen,

adım sayısı ve buna bağlı olarak dişi ve erkek kalıp setlerinin tasarım ve imalat maliyet olduğu bilinmektedir. Sıvı basıncı ile şekil verme yöntemlerinde; üretimi istenen parçanın sadece erkek veya dişi kısmının imalatı yapılmakta ve sac malzeme sıvı basıncı yardımıyla üretilen erkek veya dişi kısım üzerine preslenerek parçaya şekil verilmektedir. Kalıbın sadece bir yarısının üretilmesiyle, şekillendirme için gerekli olan kalıp yapım maliyeti azaltılmaktadır [1].

Sıvı basıncı ile şekillendirme (SBS), geleneksel kalıplama ile yapılan şekillendirme metodlarına alternatif etkili bir şekillendirme yöntemidir [1]. Bu teknolojinin yaygınlaşmasında önemli bir gelişme ikinci dünya savaşı olmuştur. İlk araştırmalar; Almanya ve Japonya'da yapılmıştır [1-4]. Sıvı basıncı ile derin çekme teknolojisi ilk kez 1890 yılında geliştirilmiştir. Devam eden geliştirme ve yenilikler ve yüksek sıvı basıncını sağlayan, ekipmanlar sayesinde, yonteme ait makineler ticari olarak kullanıma sunulmuştur. Sıvı basıncı ile derin çekme yöntemleri, ürün üzerinde homojen kalınlık dağılımı sağlaması nedeniyle, ürün kalitesi arttırmakta ve geleneksel sac metal şekillendirme yöntemlerinin yerini almaktadır [1, 2].

SBS yöntemi, genel olarak sacların sıvı ile şekillendirilmesi ve tüplerin sıvı ile şekillendirilmesi olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılmıştır [4, 5-8]. Bu sınıflandırma şeması Şekil 1'de verilmiştir.

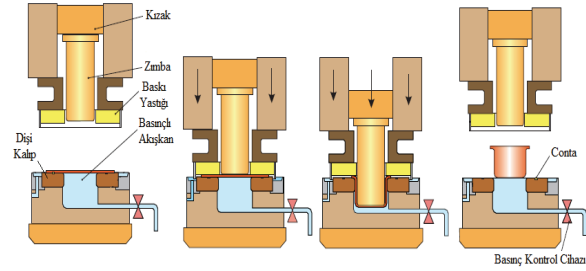


Şekil 1. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri (Subgroups of Hydroforming process) [7].

SBS teknolojisinin sınıflandırmada bir alt grubu olan hidromekanik derin çekme, sıvı basıncıyla şekillendirme ve klasik derin çekme yöntemlerinin karışımı olan bir şekillendirme yöntemidir.

Bu yöntemde; sac malzeme şekillendirmek için, şekillendirme zımbası ilkel sac metal parçayı, kontrollü olarak yüksek basınçlı sıvı bir akışkan

kütleye doğru hareket ettirmektedir. Çekme zımbasının sıvı dolu hazneye girmeye başlamasıyla, kalıp içerisindeki akışkanın basıncı artmaya başlamakta ve artan basınç sac malzeme çekme zımbasına doğru preslemektedir. Çekme zımbasının basınçlı akışkan içerisine girerek aktiflediği basıncın çok yönlü etkisi vardır. Basıncın etkisiyle sac malzeme zımbaya doğru şekillendirilmeye zorlanmaktadır. Bu nedenle; zımba ile sac malzeme arasında temas alanı artmakta ve sacın incelerek yırtılma olasılığı azalmaktadır. Basınç sayesinde; sac malzeme ile kalıp arasında basınçlı yağ filmi tabakası oluşmakta, kalıp ve sac malzeme arasındaki sürtünme azalmakta ve bu nedenle de klasik çekme yöntemlerine göre daha yüksek çekme oranları elde edilebilmektedir. Kalıp içerisinde oluşan basıncın etkisiyle, çekme kuvvetleri klasik derin çekme işleminde oluşan kuvvetten daha yüksek bir seviyeye çıkmaktadır [9, 10]. Şekil 2'de hidromekanik derin çekme işleminin oluşum safhaları verilmiştir.



Şekil 2. Hidromekanik derin çekme işlemi (Phases of hydromechanical deep drawing process) [10].

Bu çalışmada, hidromekanik derin çekme yöntemi kullanılarak sac malzemeden hazırlanan farklı kalınlık ve ilkel sac çaplarındaki numunelerin derin şekillendirilebilirliğinin incelenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. DENEY DÜZENEGİ (EXPERIMENTAL SETUP)

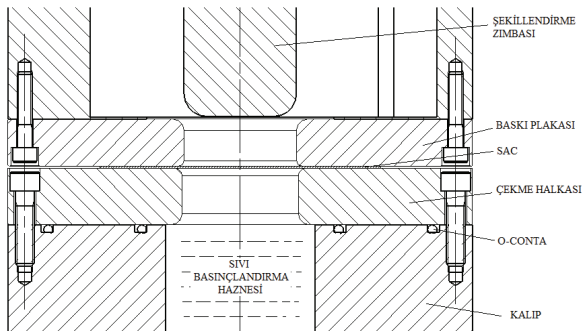
Deneysel çalışmalar için, hidromekanik derin çekme deney düzeneği tasarlanmış, imal edilmiş ve kalibrasyonu yapılmıştır. Deney düzeneği genel olarak; mekanik konstrüksiyon, hidrolik güç ünitesi, elektronik kontrol ve veri okuma sistemi olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin genel görüntüsü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental setup)

1- Kontrol yazılımı, 2- Elektronik kontrol ve veri okuma panosu, 3- Elektrik panosu, 4- Hidrolik motor ve pompa grubu, 5- Hidrolik tank, 6- Hidrolik valf grubu, 7- Geri dönüş filtreleme grubu, 8- Baskı plakası silindirleri, 9- Şekillendirme silindiri, 10- Koordinat okuyucu cetvel, 11-Mekanik konstrüksiyon, 12- Baskı plakası grubu, 13- Kalıp grubu ve sıvı haznesi, 14- Şekillendirme zımbası

Mekanik bölüm; baskı plakası, şekillendirme zımbası ve kalıp içi sıvı basınçlandırma haznesini içermektedir. Mekanik bölümün kesit görüntüsü Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Hidromekanik şekillendirme deney düzeneği detay kesit alanı (Hydromechanic forming experimental setup detail cross area view)

Şekillendirme çalışmalarında, kalıp içerisinde ISO 11158 standardında hidrolik akışkan yağ

kullanılmıştır. Kalıp içerisinde kullanılan akışkanın doldurulması, basınçlandırılması ve kontrolü işlemleri oransal valfler ile elektronik kumandalı olarak tasarlanan yazılım ile yapılmaktadır. Sistem ilk aşamada, doldurma valfi ile kalıp içerisini hidrolik yağ ile doldurmaktadır. İkinci aşamada, sac malzeme hidrolik akışkanın dolu olduğu kalıp üzerine konulmakta ve baskı plakası sac malzeme üzerine temas ederek kilitlemektedir. Üçüncü aşamada, zımba sac malzeme ve yağ üzerine temas etmekte ve zımbanın sac malzeme ile birlikte kalıp içerisine batması ile sıvı basıncı oluşmaya başlamaktadır. Kalıp içerisinde oluşan sıvı basıncı; basınç transdüseri ile kontrol edilmekte ve istenilen basınç değerine ulaşıldığında, oransal valf aracılığı ile şekillendirme işlemi tamamlanana kadar sabit tutulmaktadır.

Deneyel çalışmalarda; 4 mm, 6 mm ve 8 mm kavis değerlerinde kalıplar üretilmiştir. Deney düzeneği ve üretilen kalıplara ait teknik özellikler Çizelge 1’de verilmiştir. Deneyel çalışmada kullanılan kalıplara ait görüntü ise Şekil 5’de verilmiştir.

Çizelge 1. Deney düzeneği teknik özellikleri (The features of experiment setup)

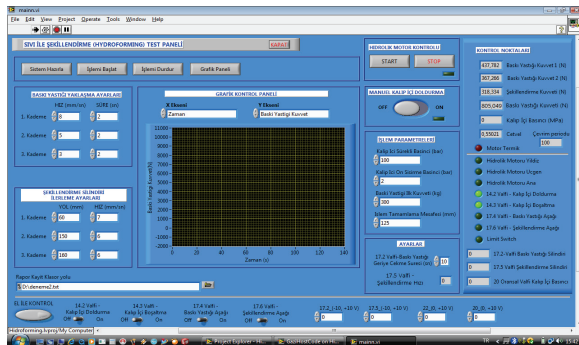
Şekillendirme zımbası çapı	60 mm
0.5 mm sac için kalıp çapı	60.15 mm
0.8 mm sac için kalıp çapı	61.96 mm
1 mm sac için kalıp çapı	62.15 mm
Maksimum sistem basıncı	25.0 MPa
Şekillendirme hız aralığı	0-18 mm/s
Baskı plakası maksimum kuvveti (tek silindir için)	196.350 kN
Şekillendirme zımbası maksimum basma kuvveti	785.400 kN
Kalıp içi maksimum basıncı	30.0 MPa



Şekil 5. Deney kalıpları (The dies used in experiment)

Deney düzeneğinde veri okuma işlemleri, yük hücreleri ve basınç transdüserleri ile gerçekleştirilmiştir. İki adet baskı plakası silindiri altında, bir adet de şekillendirme silindiri ile zımba arasında olmak üzere toplamda üç adet baskı tip yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücrelerinden alınan veriler değerlendirilerek, Baskı plakası ve şekillendirme kuvvetleri belirlenmekte ve sisteme kumanda edilmektedir. Kalıp içi basıncını sürekli ölçmek için de, kalıp içi basınç hattı üzerine basınç transdüseri yerleştirilmiştir.

Deney düzeneğinin elektronik kontrol ve veri okuma işlemi, National Instrument veri toplama ve değerlendirme kartı ve LabWiew editöründe tasarlanan yazılımla yapılmaktadır. Tasarlanan yazılıma ait arayüz ekranı görüntüsü de Şekil 6'da verilmiştir.

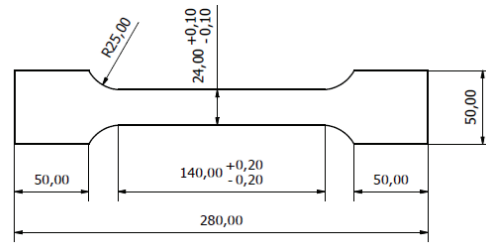


Şekil 6. Sıvı basıncıyla şekillendirme yazılımı arayüz ekranı görüntüsü (Interface screen for controlling of experimental setup)

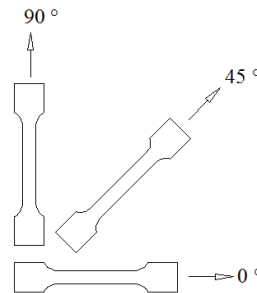
3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Erdemir 6112 sac malzeme deney materyali olarak seçilmiştir. Malzeme seçiminde, sac malzemenin endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanılıyor olması göz önünde bulundurulmuştur. Deney malzemesi, beyaz eşya endüstrisinde ve çekme kalıplığında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sac malzemenin mekanik özelliklerinin tespiti için, 1 mm kalınlıkta ve 0°, 45° ve 90° hadde yönlerinde olmak üzere 3'er adet deney numunesi lazer kesme yöntemiyle hazırlanmış ve çekme deneyleri yapılmıştır. Şekil 7'de çekme numunesinin detay resmi, Şekil 8'de ise hadde yönüne göre sacların kesim için yerleşim şekli verilmiştir.

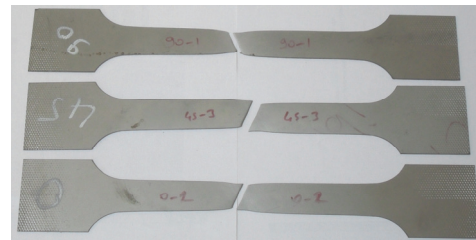


Şekil 7. Çekme deney numunesi detay resmi - ASTM E8-M (The detail view of experiment specimen)



Şekil 8. Hadde yönüne göre sac plakadan alınan deney numuneleri (Experiment specimens are placed to rolling direction of sheet metal plate)

Hazırlanan numunelerin mekanik özellikleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Her bir numuneden her bir hadde yönünde 3 adet hazırlanmış ve çekme testi 3 defa tekrar edilmiştir. Çekilmiş numunelere ait görüntüler Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Çekilmiş deney numuneleri görüntüsü (Specimens offer tensile test)

Çekme testi sonucu elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerleri Çizelge 2’de, deney malzemesinin mekanik özellikleri de Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 2. Maksimum çekme gerilmesi değerleri (Ultimate tensile strength values)

Erdemir 6112	Hadde Yönü		
	0 °	45 °	90 °
	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)		
1. Test	350.6	342.3	344.1
2. Test	356.5	344.8	339.6
3. Test	356.9	345.9	340.6

Çizelge 3. Erdemir 6112 deney malzemesi mekanik özellikleri (Mechanical properties of Erdemir 6112)

Malzeme	Mekanik Özellikler	
Erdemir 6112 Sac	Çekme Dayanımı, MPa	350
	Akma Dayanımı, MPa	252,9
	Uzama, %	18,81
	Elastikiyet Modülü, GPa	141,7
	Poission Oranı	0,28
	Özgül Ağırlığı, g/cm ³	7,83

DeneySEL çalışmalarda kullanılacak malzemenin teknik özelliklerinin belirlenmesi ve deney numunelerinin hazırlanması ile birlikte deneySEL çalışma aşamasına geçilmiştir.

DeneySEL çalışmalarda, baskı plakası basıncı ve şekillendirme hızı değerleri sabit değerde alınmıştır. Literatür araştırmalarında, şekillendirme hızının 5-10 mm/s arasında değiştiği görülmüş [11 - 15], çalışmada da şekillendirme hızı 6 mm/s olarak alınmıştır.

Baskı plakası basınç ve kuvvetinin hesaplanmasında, Eş. 1 ve Eş. 2’den yararlanılmıştır.

Baskı plakası basıncı p [9]:

$$p = 0,002[(\beta-1)^2 + D/200.t].R_m \quad (1)$$

Eş. 1’de; β çekme oranı, D ilkel sac çapı, t sac malzeme kalınlığı ve R_m maksimum çekme gerilmesidir.

Baskı plakası kuvveti F_{BH} [9]:

$$F_{BH} = A_{BH}.p \quad (2)$$

Eş.2’de verilen A_{BH} baskı plakasının etkili olduğu alanını ve p baskı plakası basıncını ifade etmektedir.

Her bir sac kalınlığı ve ilkel sac çapına göre hesaplanan ve uygulanan baskı plakası kuvvetleri Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Baskı plakası kuvvetleri (Blank holder forces)

	Sac Kalınlıkları, t		
	0.5 mm	0.8 mm	1.0 mm
İlkel sac çapı	Baskı plakası Kuvveti (kN)		
120 mm	10.072	8.012	7.325
130 mm	15.003	12.255	11.338
140 mm	21.553	17.992	16.805

Deneyler, Çizelge 5’de verilen parametrelere göre ve her biri 3 defa tekrar edilerek yapılmış ve araştırma kapsamında toplam 729 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5. Deney parametreleri (Experiment parameters)

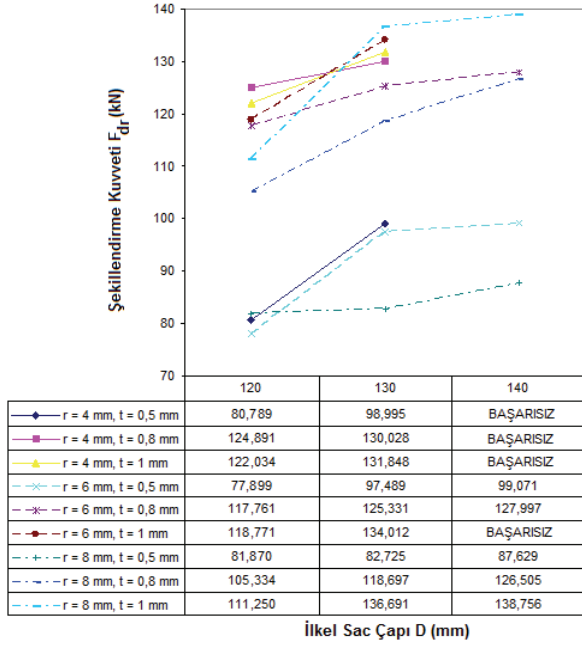
Sac Malzeme	Erdemir 6112
Sac Kalınlığı, t , mm	0.5 0.8 1.0
Zimba Şekli ve Ölçüsü	Silindirik (\varnothing 60 mm)
Kalıp Kavisi, r , mm	$r_1 = 4$ $r_2 = 6$ $r_3 = 8$
Kalıp İçi Sıvı Basıncı, p , MPa	$p_1 = 10$ $p_2 = 20$ $p_3 = 30$
Zimba Hızı, v , mm/s	$v_1 = 6$
İlkel Sac Çapı, D , mm	$D_1 = 120$ $D_2 = 130$ $D_3 = 140$

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

DeneySEL çalışmalardan elde edilen sonuçlar; çekme kuvveti ve güç tüketimi, çekme oranı ve kalınlık değişimi açısından değerlendirilmiştir.

4.1. Çekme Kuvveti ve Güç Tüketimi (Drawing Force and Power Consumption)

İlkel sac çapları; 120 mm, 130 mm ve 140 mm olmak üzere üç farklı çapta alınmıştır. İlkel pul çapının artırılmasının; şekillendirme kuvvetini ve güç tüketimini arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 10). Bu durum, şekillendirilecek alanın büyümesinden kaynaklanmaktadır. Ancak; ilkel sac çapının 140 mm’ye artırılması durumunda 4 mm kalıp kavisinde ve 10 MPa kalıp içi basınç değerinde yapılan şekillendirme işlemlerinde başarısızlık elde edilmiştir.

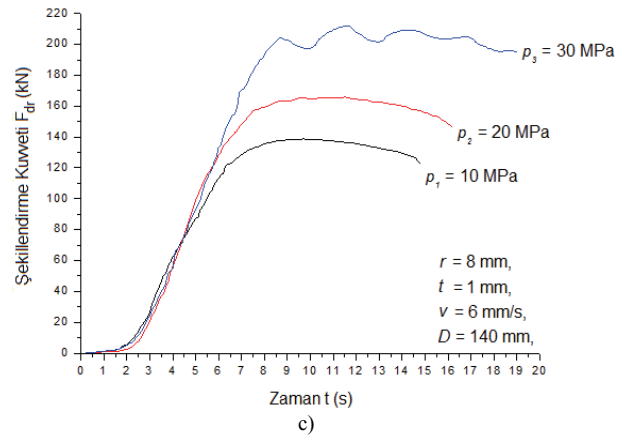
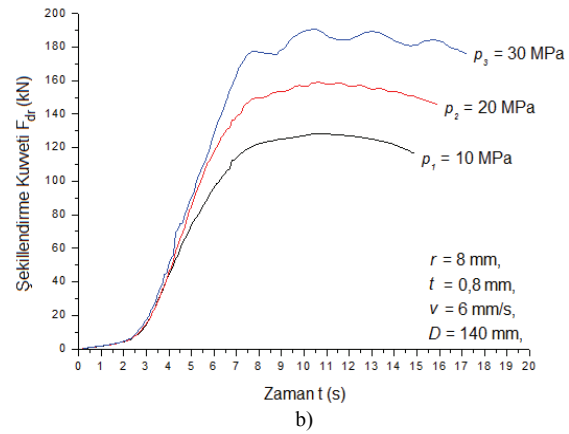
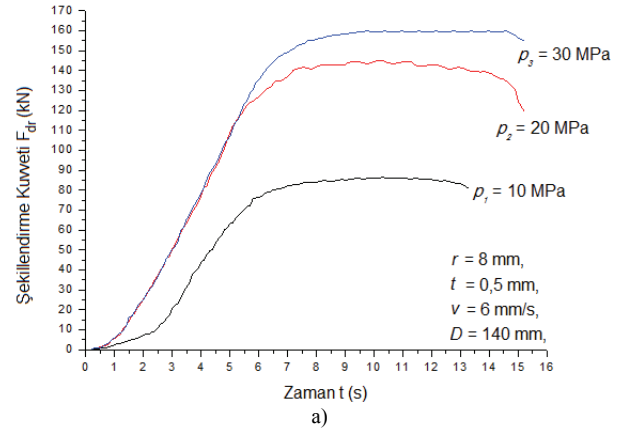


Şekil 10. Farklı ölçülerdeki ilkel sac çaplarının şekillendirme kuvvetine olan etkileri (Effects of the different blank diameters to drawing forces)

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, kalıp içi basıncının çekme oranını arttırdığı ve en önemli parametrelerden birisi olduğu bilinmektedir [11, 14, 16, 17]. Zımbanın sac malzemeye temas etmesi ve kalıp içerisine girmesiyle, kalıp içerisinden oluşan hidrostatik basınç etkisinden dolayı sac malzeme daha yüksek oranda deforme edilebilmektedir.

Sac malzemenin silindirik şekillendirilmesi deneylerinde; kalıp içi basıncın artmasının etkisi 140 mm ilkel sac çapında, 0,5 mm sac kalınlığı ve 4 mm kalıp kavisi ile 1 mm sac kalınlığı ve 6 mm kalıp kavisi deneylerinde belirgin olarak görülmüştür. Her iki çalışmada da 10 MPa kalıp içi basınç değerinde ilkel sac numunede yırtılma olurken, 20 MPa ve 30 MPa kalıp içi basınç değerlerinde başarılı şekillendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kalıp içerisindeki basınç artışına karşın, şekillendirme kuvvetinin de arttığı gözlemlenmiştir.

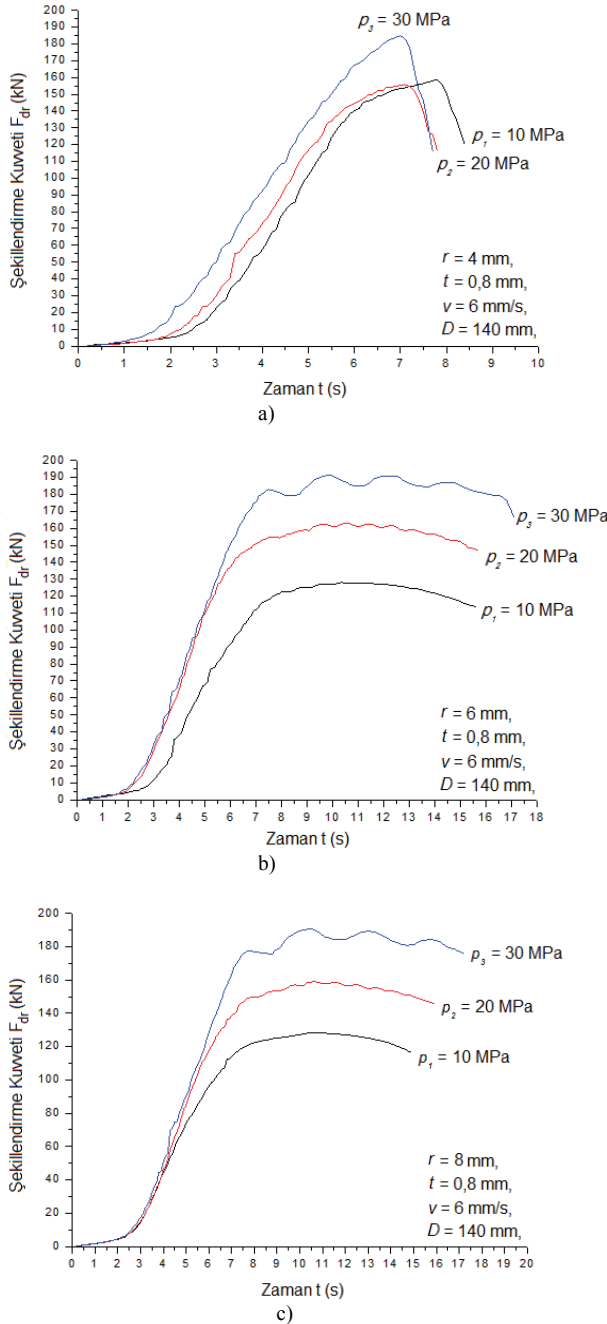
140 mm ilkel sac çapı, 8 mm kalıp kavisi ve her sac malzeme kalınlığı için, şekillendirme kuvveti – zaman ilişkileri Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Kalıp içi basıncı ile şekillendirme kuvveti ilişkisi, a) t = 0,5 mm b) t = 0,8 mm, c) t = 1 mm (Drawing force versus chamber pressure relations)

Kalıp kavisinin artması ile birlikte şekillendirme kuvvetinin ve güç tüketiminin de azaldığı görülmüştür. 4 mm kalıp kavisi ve 10 MPa kalıp içi basınç değerlerinde 0,5 mm; 0,8 mm ve 1 mm sac kalınlıkları için, 140 mm ilkel sac numunelerin şekillendirilmesi işlemlerinde başarısız olunmuştur. Ancak, kalıp kavisi değerinin 6 mm ve 8 mm değerlerine çıkartılması durumunda 140 mm ilkel sac çapında başarılı şekillendirme işlemi yapılabilmektedir. Bu durum, kalıp kavisinin artırılması ile birlikte sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin arttığını ortaya koymuştur. 140 mm ilkel sac çapı ve 0,8 mm sac

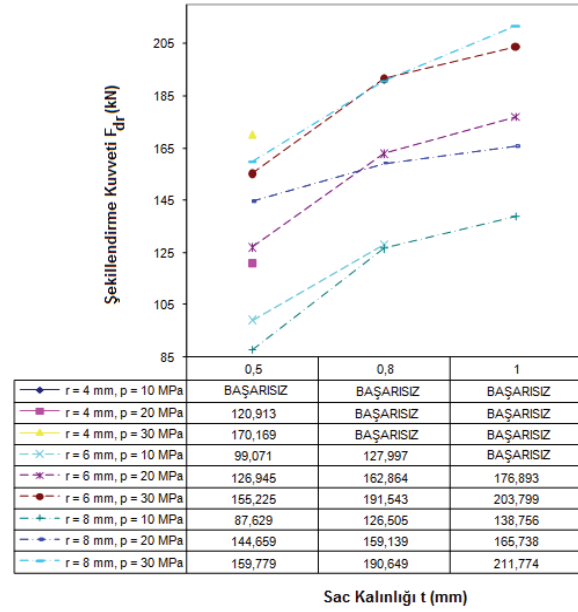
kalınlığında, farklı kalıp kavisi değerleri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkileri Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Kalıp kavisi-şekillendirme kuvveti ilişkisi a) $r = 4$ mm b) $r = 6$ mm, c) $r = 8$ mm (Drawing radius versus drawing force relations)

Sac malzeme kalınlığının çekme kuvvetine etkisini incelemek için, 0,5, 0,8 mm ve 1 mm kalınlıklarda olmak üzere üç farklı kalınlıkta deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sac kalınlığındaki artışın, şekillendirme kuvvetini ve güç tüketimini arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 13). İlkel pul çapı 140 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm kalıp kavisi ve 10 MPa, 20 MPa ve

30 MPa kalıp içi basıncı değerleri için, şekillendirme kuvveti ve sac kalınlığı ilişkisi Şekil 13’de verilmiştir.

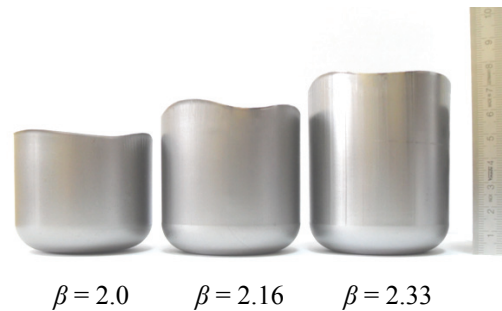


Şekil 13. Sac kalınlığı-şekillendirme kuvveti ilişkisi (Sheet thickness versus drawing force relations)

4.2. Çekme Oranı (Drawing Ratio)

Genel olarak çekme oranı, yırtılma ve kırışma olmadan başarılı bir şekilde çekilen en büyük ilkel sac çapının (D), zımba çapına (d) oranı olarak tanımlanmıştır. Derin çekme işleminde amaç, mümkün olduğu kadar derin çekilmiş kap elde etme olarak görülmüştür [10, 18 - 20].

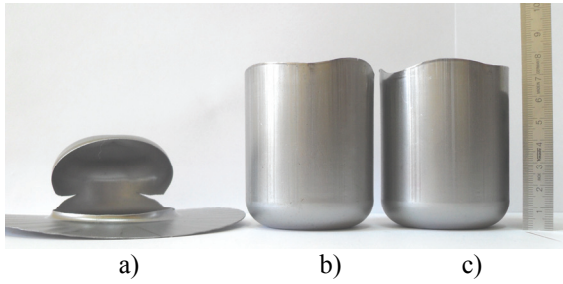
Deneysel çalışmada; 60 mm çaplı şekillendirme zımbası ile 120 mm, 130 mm ve 140 mm ilkel sac çapları için şekillendirme işlemi yapılmıştır. Elde edilen çekme oranları; 120 mm ilkel sac çapı için 2,00; 130 mm ilkel sac çapı için 2,16 ve 140 mm ilkel sac çapı için 2,33 olmuştur. Deneysel çalışmadaki değişimlerin çekme oranına etkileri ayrıca değerlendirilmiştir. Şekil 14’de deneysel çalışma kapsamında şekillendirilen parçalara ait görüntü verilmiştir.



Şekil 14. Erdemir 6112 sac malzemenin silindirik şekillendirilmiş parçaları, $t=1$ mm, $p=10$ MPa, $r = 8$ mm (The cylindrical formed parts from Erdemir 6112 sheet material)

Kalıp kavisi değerindeki artışın çekme işlemini kolaylaştırdığı ve çekme oranını arttırdığı deneysel çalışma sonucunda tespit edilmiştir. Kalıp kavisi değerinin büyümesi ile sac malzemenin kalıp içerisine kolaylıkla akmasını sağladığı ve sac malzemenin daha kolay şekillenmesine yardımcı olduğu için çekme oranını arttırdığı tespit edilmiştir.

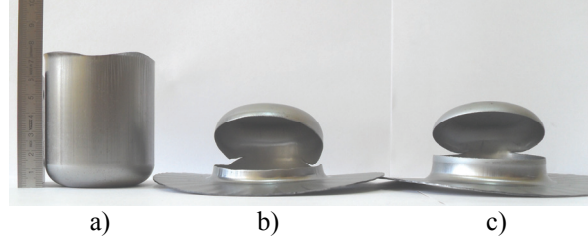
Kalıp içi basıncının hidromekanik derin çekme işlemlerinde, çekme oranını arttıran önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Zımbanın sıvı dolu kalıp içerisine batmasıyla, kapalı alanda oluşmaya başlayan basıncın sac ile kalıp kavisi arasında basınçlı film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azalttığı ve sac malzemede yırtılmayı engellediği tespit edilmiştir. 0,5 mm sac kalınlığında, 2,33 çekme oranı için en düşük kalıp kavisi değeri olan 4 mm'de; 10 MPa kalıp içi basınç değerinde çekme işlemi başarısız olurken, kalıp içi basıncının 20 MPa ve 30 MPa değerlerine artırılmasıyla çekme işleminin başarıyla gerçekleştirildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Farklı basınçlarda şekillendirme çalışmaları; a=10 MPa, b=20 MPa, c=30 MPa, (The forming studies at different chamber pressures)

Klasik kalıplama yöntemlerinde, sac kalınlığındaki artış sac malzemenin kopmadan daha çok deforme edilebilmesine imkan tanıdığı için çekme oranını olumlu etkilemektedir. Ancak, sac kalınlığının artışı ile hidromekanik derin çekme işleminde kalıp içi basınç değerinin de artırılması gerekmektedir. Deneysel çalışmalarda; 0,5 mm sac kalınlığında 4 mm kalıp kavisinde 20 MPa ve 30 MPa basınçlarında 2,33 çekme oranı elde edilebilirken 0,8 ve 1 mm sac kalınlıklarında ise bu oran elde edilememiştir. Bu durum; sac kalınlığının ince olduğu uygulamalarda, kalıp içi basıncın sac malzemenin zımba etrafında kolay şekil almaya katkı sağladığını, ancak sac kalınlığının bu katkıyı azalttığını göstermektedir.

Farklı kalınlıklarda elde edilen şekillendirme çalışmaları Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Farklı kalınlıklarda şekillendirme çalışmaları; a=0,5 mm, b=0,8 mm, c=1 mm (The forming studies of different thicknesses)

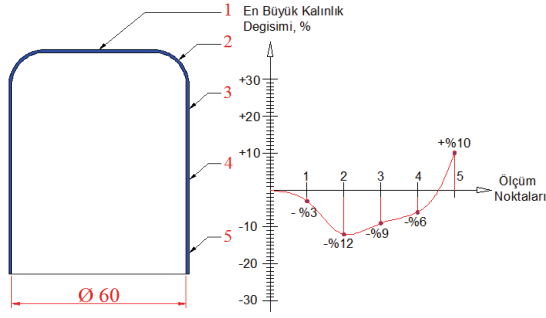
Deneysel çalışmalarda şekillendirme parametrelerine göre parçaların elde edilebilen en büyük şekillendirilme oranları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Deneysel parametrelerine göre elde edilebilen en büyük çekme oranı değerleri (Maximum drawing ratio values according to experiment parameters)

Sac Kalınlığı, mm	Kalıp Kavisi, mm	Kalıp İçi Basıncı, MPa	Şekillendirilebilen İlk Sac Çapı, mm	En Büyük Çekme Oranları	
0,5	4	10	130	2,16	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	
	6	10	140	2,33	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	
	8	10	140	2,33	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	
	0,8	4	10	130	2,16
			20	130	2,16
			30	130	2,16
6		10	140	2,33	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	
8		10	140	2,33	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	
1,0		4	10	130	2,16
			20	130	2,16
			30	130	2,16
	6	10	140	2,16	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	
	8	10	140	2,33	
		20	140	2,33	
		30	140	2,33	

4.3. Kalınlık Değişimi (Thickness Variation)

Sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde, et kalınlığı değişiminin tespiti, ürün dayanımı ve kalitesi açısından, önemli bir karar parametresi olmuştur. Et kalınlığı değişiminin en az olması, çıkan ürünün daha başarılı şekillendirilebildiğini göstermektedir. Klasik bir kalıplama ile yapılan çekme işlemlerinde elde edilen ürünlerde, zımba kavisinin geldiği yer ve yan duvarlarda aşırı incelmeler meydana gelmektedir. Ancak; hidromekanik şekillendirme işlemlerinde, akışkan sıvı şekillendirilen parçaya her taraftan eşit temas ettiği için et kalınlığı değişimi klasik kalıpla şekillendirme işlemlerine göre daha homojen olmaktadır. Hidromekanik derin çekme yöntemi kullanılarak yapılan şekillendirme işlemlerinde elde edilen deneysel numuneler tel erozyon tezgahında kesilerek, et kalınlığı değişimleri Şekil 17'de gösterilen noktalardan ölçülmüştür. Ölçüm için kesilen numunelerin görüntüsü de Şekil 18'da verilmiştir.



Şekil 17. Et kalınlığı değişimi ölçüm noktaları ve en büyük yüzde kalınlık değişimleri (Thickness variation measurement points and maximum percent thickness variations)



Şekil 18. Et kalınlığı ölçümü için kesilmiş deney numunesi (The specimen for thickness measurement)

Literatür araştırmalarında, hidromekanik şekillendirme işlemlerinde ürün üzerinde izin verilen kalınlık değişiminin en fazla % 20 ile % 25 arası olduğu tespit edilmiştir [14, 21, 22]. Deney numunelerinin kalınlık değişimlerinin incelenmesinde, ölçüm yapılan noktalarda kalınlık değişimindeki incelenmenin %12'yi geçmediği görülmüştür. Bu durum, ürün üzerindeki kalınlık değişiminin klasik kalıplama yöntemine göre oldukça homojen bir yapıda olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (CONCLUSION)

Sac malzemelerin derin çekme ile şekillendirme işlemlerinde, sıvı ile şekillendirme yöntemleri getirdiği avantajlar nedeniyle giderek önem kazanmaktadır. Klasik kalıplama yöntemi ile birden fazla operasyon ve kalıp ile üretilebilen derin parçalar sıvı ile şekillendirme yöntemi ile tek operasyonda şekillendirilebilmektedir. Bu çalışmada, sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemlerinden birisi olan hidromekanik derin çekme işlemine etki eden parametreler deneysel olarak araştırılmıştır.

Diğer çalışmadan farklı olarak, endüstride beyaz eşya sektöründe sıklıkla kullanılan Erdemir 6112 sac malzemenin sıvı ile şekillendirme parametrelerine etki eden faktörler deneysel olarak incelenmiştir. Çekme ile şekillendirme işlemi için; deneme yanılma yoluyla ideal şekillendirme parametrelerinin bulunması, zaman, işçilik ve malzeme maliyetini arttırmaktadır. Her bir malzeme türü için ideal şekillendirme

parametrelerinin belirlenmesinin maliyetlerin azaltılmasına imkan tanıyacağı ortadadır.

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde; kalıp içi basıncının en önemli parametre olduğu deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Zımbanın; sac malzemeye teması ile kalıp içerisinde oluşmaya başlayan sıvı basıncı, sac malzemenin kalıp kavisi ile teması arasında film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltmakta ve sac malzemenin yırtılmadan daha yüksek çekme oranlarında şekillenmesine imkan tanımaktadır. Klasik kalıplama ile çekme işlemlerinde en büyük 2.2 çekme oranına ulaşılabilirken, hidromekanik derin çekme yönteminin karmaşık şekilli parçaların üretimini kolaylaştırdığı ve 2.2'nin üzerindeki çekme oranına sahip ürünler için kullanılabileceği tespit edilmiştir [1, 17, 23, 24]. Yapılan deneysel çalışmada, hidromekanik derin çekme yöntemi ile Erdemir 6112 sac malzeme için silindirik geometride en büyük 2.33 çekme oranına tek operasyonda ulaşılabilmiştir.

Şekillendirme ortamının basınçlı yağ ile desteklenmiş olmasının, sac malzemenin daha kolay kayarak deforme olmasını sağladığı tespit edilmiştir. Klasik bir kalıplama işleminde, zımba, kalıp veya sac malzeme üzerindeki çizikler veya sac malzeme üzerindeki çapaklar çentik etkisi oluşturduğundan dolayı sac malzemenin şekillenmeden yırtılmasına neden olmaktadır. Hidromekanik yöntemde, yağ basıncı ile film tabakasının oluşturulması ve ortamın yağlı olması nedeniyle, bu tür olumsuzlukların engellendiği ve sac metal ürün üzerinde çentik, zayıflama vb. olumsuzlukların giderilebildiği tespit edilmiştir.

Sac malzemenin ilkel sac çapının artması, daha çok malzemenin şekillendirilmesi nedeniyle çekme kuvveti ve güç tüketiminin artmasını sağlamıştır. Hidromekanik derin çekme yönteminde, ilkel sac çapının artırılması ile birlikte kalıp kavisi veya kalıp içi basınç değerinin de artırılması durumunda şekillendirilebilirlik artmaktadır. Ancak, kalıp kavisi değerinin en küçük olduğu 4 mm değerinde, sadece ilkel sac çapının artırılmasının şekillendirilebilirliği azalttığı gözlemlenmiştir.

Sac malzemedeki kalınlık artışı, hidromekanik derin çekme yönteminde çekme kuvvetini ve güç tüketimini arttırmaktadır. Kalınlık artışı ile birlikte, hidromekanik derin çekme yöntemlerinde etkili olan kalıp içi basıncının sac malzemenin deformasyonuna olumlu etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. 0.5 mm sac kalınlıklarında hidromekanik derin çekme işleminin özellikleri daha iyi görülebilirken, kalınlık artışı ile birlikte şekillendirilebilirliğin azaldığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmayı, 07/2009-12 kod nolu proje ile destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Zhang, S.H., Danckert, J., “Development of hydro-mechanical deep drawing”, **Journal of Materials Processing Technology**, 83: 14–25, 1998.
2. Şahin, S., “Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması”, **Mühendis ve Makine**, 45 (533): 35-39.
3. Zhang, S.H., “Developments in hydroforming”, **Journal of Materials Processing Technology**, 91: 236–244, 1999.
4. Lang L.H., Wang Z.R., Kang D.C., Yuan S.J., Zhang S.H., Danckert J., Nielsen K.B.; “Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming”, **Journal of Materials Processing Technology**, 151: 165–177, 2004.
5. Verlinden, B., Driver, J., Samajdar, I., Doherty, R.D.; “**Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials**”, Pergamon Materials Series, 11: 233-332, 2007.
6. Özer, M.; “**Hidrolik akışkan basıncıyla (hydroforming) tesisat bağlantı elemanlarının şekillendirilmesi**”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1-28, 2007.
7. Koç, M.; “**Hydroforming for advanced manufacturing**”, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, Cambridge, 1-28, 216-237, 2008.
8. Gelin, J.C.; “Advances and progresses in sheet and tube hydroforming processes”, **Advances in Material Forming**, 13: 193-205, 2007.
9. Tschaetsch H.; “**Metal Forming Practise**”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 172-184, 2006.
10. Altan, T.; “**Metal Forming Handbook/Schuler**”, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 185-193, 1998.
11. Choi, H., Ni, J., Koç, M.; “A study on the analytical modelling for warm hydro-mechanical deep drawing of lightweight materials”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 47: 1752-1766, 2007.
12. Zhang, S.H., Nielsen, K.B., Lang, L.H., Kang, D.C., Danckert, J.; “Hydromechanical deep-drawing of aluminium parabolic workpieces-experiments and numerical simulation”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 40: 1479–1492, 2000.
13. 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 Materials Processing Technology**, 142: 544–550, 2003.
14. Yongchao, X., Yu, C., Dachang, K.; “Hydromechanical deep drawing of superalloy cups”, **Journal of Materials Processing Technology**, 166: 243-246, 2005.
15. Zhang, S.H., Nielsen, K.B., Lang, L.H., Kang, D.C., Danckert, J.; “Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes”, **Journal of Materials Processing Technology**, 102: 1-8, 2000.
16. Wu, J., Balendra, R., Qin, Y.; “A study on the forming limits of the hydromechanical deep drawing of components with stepped geometries”, **Journal of Materials Processing Technology**, 145: 242–246, 2004.
17. Thiruvarudchelvan, S., Wang, H.; “Investigations into the hydraulic-pressure augmented deep drawing process”, **Journal of Materials Processing Technology**, 105: 161-175, 2000.
18. Ali H. A.; “Ticari sacların ve Erdemir derin çekme saclarının derin çekilebilme özelliklerinin belirlenerek benzer ithal saclar ile karşılaştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 5, 36-50, Ankara, 2001.
19. Demiray, K.; “Al 1050 malzemesinin derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi”, Bilim uzmanlığı tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-30, 2006.
20. Alparslan Y.E.; “Merkezi delikli taslak malzemelerin derin çekme özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 9-31, 2008.
21. Singh S. K., Kumar D.R.; “Effect of process parameters on product surface finish and thickness variation in hydro-mechanical deep drawing”, **Journal of Materials Processing Technology**, 204: 169–178, 2008.
22. Li-hui, L., Tao, L., Xian-bin, X., Kristensen, B.E., Danckert, J., Nielsen, K.B.; “Optimized constitutive equation of material property based on inverse modelling for aluminium alloy hydro forming simulation”, **Trans. Nonferrous Met. Soc.** 16: 1379-1385, 2006.
23. Lin, J., Zhao, S.D., Zhang, Z.Y., Wang, Z.W.; “Deep drawing using a novel hydromechanical tooling”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 49: 73-80, 2009.
24. E. Önder, A. E. Tekkaya; “Numerical Simulation of Various Cross Sectional Workpieces Using Conventional Deep Drawing and Hydroforming Technologies”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 48 (5): 532-542, 2007.