



THE EFFECT OF DIE GEOMETRY ON CUP DAMAGES IN COLD DEEP DRAWING OF RECTANGULAR CUPS

Cebeli Özek*¹ 

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119 - Elazığ/Türkiye

Abstract

Original scientific paper

Deep drawing is the flow of sheet into the die cavity by applying punch force. Higher drawing ratios cannot be obtained in deep drawing cups due to neck formation or cracking in the corner radii of the cup. For this, it is important to determine the appropriate parameters correctly for the deep drawing to be successful. In this article, the effects of die geometry on cup wall thickness and its damages were determined by giving angles to the upper surface of the die and the lower surface of the blank holder in deep drawing of rectangular cups. Thus, angles of 0°, 3°, 6°, and 9° were given to the die upper surface/blank holder lower surface. The study was carried out at a constant 1800 daN blank holder force and a constant 4 mm/s punch speed. In the deep drawing, the gap between the die/punch was 1.2 mm, and the bottom of punch and edge radii and the die throat radii were used fixed at 6 mm. St37 steel with a thickness of 1 mm was used in this study. The wall thicknesses were measured using a Mitutoyo LH-600E precision linear measuring device with a precision of 0.001-point contact. It was determined that the wall thickness of the cups increased as the cup heights increased, the maximum wall thickness occurred at the corners of the lower parts of the cups and was 0.373 mm. The region most affected by plastic deformation is the lower part of the cup. Maximum compressive and tensile forces occur in this region due to deformation hardening and therefore maximum stress and hardness have occurred in this region. The maximum hardness was measured in the region of the bottom of the cup and as 61.4 HRC. The minimum hardness was measured in the top region of cup. It was observed that the hardness decreased further towards the upper rim of the cup and was 43.8 HRC. The average hardness value was determined as 53.1 HRC. As a result, it has been determined that the die geometry has a significant effect on cup wall thickness changes and cup damages by giving angles to the upper surface of the die and the lower surface of the blank holder in cold deep drawing of rectangular cups.

Keywords: Cup damage, deep drawing, limit drawing ratio, rectangular cups.

DİKDÖRTGEN GEOMETRİYE SAHİP KAPLARIN SOĞUK DERİN ÇEKİLMESİNDE KALIP GEOMETRİSİNİN KAP HASARLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Derin çekme, zımba kuvveti uygulanarak sac malzemenin kalıp boşluğuna akışıdır. Derin çekilmiş kaplarda kabın köşe yarıçaplarında boyun oluşumu veya çatlamların oluşması nedeniyle daha yüksek çekme oranları elde edilememektedir. Bunun için derin çekme işleminin başarılı olmasında uygun işlem parametrelerinin doğru seçilmesi önemlidir. Bu makalede, dikdörtgen geometriye sahip kapların derin çekilmesinde matris üst yüzeyine ve pot çemberinin alt yüzeyine açılar verilerek matris geometrisinin, kap kesit incelemeleri ve hasarları üzerinde olan etkileri tespit edilmiştir. Bunun için matris üst yüzeyine/pot çemberi alt yüzeyine 0°, 3°, 6° ve 9°'lik açılar verilmiştir. Pot çemberi kuvveti sabit 1800 daN ve stampa hızı da sabit 4 mm/s olarak uygulanmıştır. Derin çekme işlemlerinde, matris/stampa arası boşluk 1.2 mm, stampa uç ve kenar radyüsleri ile matris ağız yarıçapları 6 mm alınmıştır. Çalışmada kalınlığı 1 mm olan St37 çeliği kullanılmıştır. Cidar kalınlıkları Mitutoyo LH-600E hassas lineer ölçüm cihazında 0.001 hassasiyetinde nokta temaslı olarak ölçülmüştür. Kap yükseklikleri arttıkça kaplardaki cidar incelemelerinin arttığı, maksimum incelenen kabın alt kısımlarındaki köşelerde meydana geldiği ve bu değer 0,373 mm olduğu tespit edilmiştir. Plastik deformasyonun en çok etkilediği bölge kap alt bölgesidir. Bu bölgede deformasyon sertleşmesi nedeniyle maksimum basma ve çekme kuvvetleri oluşmakta ve dolayısıyla maksimum gerilme ve sertlik bu kısımda meydana gelmiştir. Maksimum sertlik kabın tabanının olduğu bölgede ve 61.4 HRC olarak ölçülmüştür. Minimum sertlik kap üst bölgesinde ölçülmüştür. Kabın üst ağız kısımlarına doğru sertliğin daha da düştüğü ve 43.8 HRC olduğu görülmüştür. Ortalama sertlik değeri ise 53.1 HRC olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, dikdörtgen geometriye sahip kapların soğuk derin çekilmesinde, matris üst yüzeyine ve pot çemberinin alt yüzeyine açılar verilerek kalıp geometrisinin, kap cidar kalınlık değişimleri ve kap hasarları üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin çekme, dikdörtgen kaplar, kap hasarları, limit çekme oranı.

* Corresponding author.

E-mail address: cozek@firat.edu.tr (C. Ozek)

Received 31 August 2022; Received in revised form 27 November 2022; Accepted 19 December 2022

2587-1943 | © 2022 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1169005>

1 Giriş

Sac şekillendirme, çeşitli panel ve parçaların imalatında en önemli şekillendirme işlemidir. Otomotiv ve uzay endüstrisinde sac şekillendirme işlemi yaygın olarak kullanılan bir imalat yöntemidir. Derin çekme, zımba kuvveti uygulanarak sac plakaların kalıp boşluğuna doğru akışıdır. Kap çekme veya radyal çekme olarak da adlandırılan derin çekmede, sacı düz ince tabakalar arasında istenen şekle getirmek için bir zımba kullanılarak sacı merkez kısmından kalıp boşluğuna itererek kaplar üretilmektedir. Derin çekilmiş kabın zımba köşe yarıçapında boyun oluşumu veya çatlamların oluşması nedeniyle daha yüksek çekme oranı elde edilememektedir. Yüksek mukavemetli malzemelerin yüksek ortalama akma gerilmelerinden dolayı sertleşmesi nedeniyle oda sıcaklığında derin çekilmesi zordur. Yüksek çekme oranı nedeniyle derin çekilmiş kabın zımba köşe radyüs bölgelerinde boyunlaşma veya kırılma meydana geldiğinden yüksek oranda limit çekme oranlarının elde edilmesi mümkün değildir. İş parçası sıkıştırılmadığında veya baskı plakası kuvveti (BPK) yeterli olmadığında iş parçasında buruşmalar gözlenir. Bu hata, deformasyon sırasında kapta, ilkel parça baskı plakasından geçtiğinde, çekme kuvveti malzemeyi bükerek üst üste bindirerek meydana getirmektedir. Şekillendirme sırasında malzeme, baskı plakası-kalıp arası bölgeden dışarı çekilir ve malzeme bu bölümde sıkışma ve çekme gerilmelerine maruz kalır. Çok yüksek bir baskı plakası kuvveti uygulandığında, derin çekme işlemi bir gerdirme işlemi haline gelir. Sac şekillendirme doğal olarak bir çekme işlemi olup tek bir aşamada elde edilebilecek deformasyon miktarı çekme kararsızlığı, kulaklanma veya yırtılma ile sınırlandırılabilir. Böylece gerekli şekiller minimum hata ile veya hasarsız şekilde kaplar elde edilir.

Limit çekme oranı (LÇO), derin çekmede ölçülebilen, şekillendirilebilirliğin yaygın olarak kullanılan özelliklerinden biri olup, hasarlı veya kırılma olmadan tek bir seferde ilkel parçanın maksimum çapının kap maksimum çapına oranıdır. Derin çekmede, elde edilen kabın cidar kalınlık değişimleri de kabın kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir.

Bu çalışma ile dikdörtgen kesitli kapların derin çekilerek şekillendirilmesinde matris geometrik boyutlarının kabın derin şekillendirilmesinde plastik deformasyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Derin çekmede plastik deformasyonu en aza indirmek için, matris üst yüzeylerine ve baskı plakası alt yüzeylerine 0° , 3° , 6° ve 9° ’lik açı ve 1800 N’luk sabit pot çemberi kuvveti uygulanarak yapılmıştır. Çalışmada stampa ve matris iç kenar radyüsleri 6 mm sabit olarak alınmıştır. Sac plakaların derin çekilerek biçimlendirilmesinde numune plaka tipi ve kalıp çeşitleri ile limit çekme oranı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla çok farklı araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Derin çekme ile imalatın mutfak eşyaları, otomotiv, uzay ve savunma gibi birçok alanda, havacılık ve özellikle gıda ambalaj endüstrilerinde yaygın uygulamaları vardır [1]. Colgan ve ark. derin çekme işlemlerinin deneysel ve sonlu eleman analizi (SEA) çalışmalarını birleştirmeye yönelik ilk çalışmaları yapmışlardır [2]. Derin çekme işlemi üzerinde zımba ve kalıp radyüsü, zımba hızı, zımba

kuvveti, sürtünme ve çekme derinliğinin etkisini araştırmışlardır. Araştırmada aynı zamanda bir tavllanmış çelik ve birde tavlınmamış yumuşak çeliğin haddeleme işleminin anizotropik etkisinin derin çekilmesinde çekme derinliği üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Hasan ve ark. [3] kare kapları konik kalıplar aracılığıyla üretirken geometrik ve sürtünme parametrelerinin LÇO üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma optimum değerleri elde etmek için sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre LÇO pirinç için 3,1 ve alüminyum için ise 3,15’e kadar artmış olduğunu göstermişlerdir. Hassan ve ark. [4] asimetrik şekilli kapların LÇO’nu geliştirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında baskı plakasız konik kalıplarda dörtgen kesitli, yonca yaprağı şeklinde, gül yaprağı şeklinde, yıldız ve üçgen şeklinde kaplar üretmişlerdir. İşlemin geçerliliğini kanıtlamak için sayısal analiz yöntemini de kullanmışlardır. Çalışmada LÇO pirinç için 3,44 ve alüminyum için 3,37 olarak elde edilmiştir. Dhaiban ve ark. [5] benzer şekilde, baskı plakasız konik kalıplar kullanarak pirinç malzemenin eliptik şekilli kapların üretimini denemelerine rağmen gerçekleştirememişlerdir. Derin çekme kuvveti, gerilme dağılımlarının ve birçok geometrik parametrelerin LÇO üzerindeki etkisini görmek amacıyla ANSYS/APDL yazılımı kullanılarak bir sonlu eleman (FE) modeli ile sayısal sonuçlar deneysel olarak kanıtlanmıştır. LÇO 2,26’ya kadar olan eliptik şekilli kaplar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Zein ve ark. [6] derin çekme işlemlerinde geri esnemeyi ve incelemeyi incelemek için sayısal bir analiz çalışmasını tanımlamışlardır. Sac şekillendirme sac malzemenin, boyun verme, çatlak gibi herhangi bir hasar olmaksızın, istenilen şekle dönüştürmek amacıyla plastik olarak deforme olduğu bir deformasyon işlemidir [7]. Derin çekme işlemleri, otomotiv gövdeleri, yapısal parçalar, mutfak eşyaları ve içecek kutuları gibi hafif, daha mukavemetli, düşük yoğunluklu ve korozyona dayanıklı ürünler üretmek için sacın bir zımba kuvvetinin etkisi ile kalıp boşluğuna itilerek sacın istenen şekle dönüştürüldüğü üretim yöntemleridir [8]. Metal şekillendirme işlemlerinde en önemli model olan SEM’da, sayısal hesaplama veya bilgisayar destekli mühendislik, ürün geliştirme maliyetlerini düşürmekte ve zaman kaybını önlemektedir. Aynı zamanda en düşük maliyette gerekli düzeltmeleri ve iyileştirmeyi yapmak için her adımda geri bildirimde bulunan ve ürün geliştirmenin ilk aşamasından simülasyon tekniklerine kadar verimli kullanımı gerektirmektedir [9]. Zaman ve maliyetin yanı sıra derin çekme işlemi geometrik ve malzeme parametrelerinden etkilenir. Kalıp boşluğu, zımba ucu yarıçapı, kalıp yarıçapı ve zımba boyutları gibi geometrik parametrelerin etkisi de önemlidir. Geometrik parametreler kadar elastisite modülü gibi malzeme özellikleri, plastisite ve anizotropinin de etkisi vardır. Bu parametrelerin yanlış tespit edilmesi buruşma, yırtılma, kulaklanma ve geri yaylanma gibi hasarların oluşması ile sonuçlanmaktadır [10]. Zein ve ark. [11] derin çekme işlemi için sonlu elemanlar yöntemi ile kalıp tasarım parametreleri ile işlenmemiş parçanın tahmini inceleme ve kalınlık dağılımını incelemişlerdir. Reddi ve ark. [12] sac şekillendirme işlemi sırasında kalınlık değişimi üzerinde geometrik parametrelerin etkisini analiz etmek için bir deneysel ve analiz çalışması yapmışlardır. Hasarsız

çekilmiş bir kap üretmek her zaman zor bir iştir. Genel olarak şekillendirme işlemi yoluyla kaliteli ürünün geliştirilmesi için ilkel sacın son geometrisinin doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Geometrisi doğru belirlenmeyen bir ilkel sac çekme sırasında gerinim ve gerilmelerin dağılımına yol açar. Hafif ve mekanik özellikleri yüksek olan malzemelere talep gün geçtikçe artmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları iyi korozyon direnci, düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve iyi süneklik özellikleri nedeniyle mühendislik tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar [13]. Birçok üretim alanında alüminyum ve alüminyum alaşımlarında sac şekillendirme hızlı teknolojik gelişmeler ve ürün maliyetinin düşürülmesi kilit faktörler haline gelmiştir [14]. Derin çekme, düz yüzey üzerindeki zımba basıncından oluşan basit, tipik ve popüler şekillendirme tekniği yöntemlerinden biridir. Sac parça olduğu gibi zımba aracılığı ile zımba ve kalıbın yüzeyleri arasında 3 boyutlu bir şekilde akarak zımba tarafından kalıp boşluğuna itilmektedir. Gerekli derin çekme ürününü elde etmek için taslak parça kalıp ve baskı plakası arasında baskı plakası kuvveti ile sıkıştırılmaktadır [15, 16]. Bouchaala ve ark. [17] AA2090 Al alaşımının sonlu elemanlar metodu ile derin çekme modelinde kalınlık dağılımı üzerinde anizotropik ve izotropik verim fonksiyonlarının etkisini araştırmışlardır. Anizotropinin sac metallere şekillendirilmesinde ve tanımlanmasında büyük bir etkisi vardır. Sac metalin şekillendirilebilirliğindeki anizotropi, şekillendirme işlemi sırasında plastik deformasyon ile ilk anizotropiye yol açan termo-mekanik işlemin bir kombinasyonudur [18]. Das ve ark. [19] sonlu elemanlar metodunu kullanılarak ve HYPERWORKS-6.10 yazılımı ile modellenen silindirik derin çekme kaplarındaki kulaklanmaları analiz etmişlerdir. Pawan ve ark. [20] ABAQUS yazılımı yardımıyla kulaklanma yüksekliği yüzdesini azaltmak için ilkel parçanın başlangıçtaki boyutlarının ve şeklinin değiştirilmesini sayısal olarak geliştirmiş ve tespit etmişlerdir. Bouchaala ve ark. [21] ABAQUS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak AA1050 ve AA1100 alüminyum alaşımları için 3B silindirik derin çekme modelinin simülasyonunu yapmışlardır. Derin çekme işleminde kulaklanma hasarlarını tahmini olarak araştırmışlar, zımba köşe radyüsü ve kalıp radyüsünün kaptaki kulaklanmalar üzerindeki etkisini analiz ederek ve yüzde olarak kulaklanma yüksekliklerini aza indirmek için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Metal saclardan farklı boyutlarda çeşitli simetrik veya asimetrik kapların hasarsız ve istenilen boyutlarda üretilmesi birçok araştırma çalışmasının ilgisini çekmiştir [22]. Deneysel sonuçların geçerliliği için ABAQUS programı kullanılarak bir sonlu eleman modeli (FEM) geliştirilmiştir. Bu model ürünü istenilen derinlikte elde etmek için zımbanın hareketinin geri yaylanmadaki etkilerinin toleransını tahmin etmeye yardımcı olmuştur. Kalıp radyüsü, zımba ucu radyüsü, radyal boşluk, baskı plakası kuvveti ve sıvı yağlayıcı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Chen ve ark. [23] tarafından aynı şekilde, derin çekme işlemi üzerinde servo zımbalama ile ilişkili değişik parametrelerin etkisinin olduğu ifade edilmiş, hem geleneksel parametre hemde servo press ile ilgili olan parametrenin etkisini araştırarak nihai ürünün yırtılmasına neden olan faktörleri belirlemiştir. Özel alaşımlı

malzemeler için deneysel ve teorik şekillendirme limit diyagramı analizleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. İşlemdaki her türlü yeniden tasarım, ürünün nihai maliyetinde önemli bir artışa yol açtığı tespit edilmiştir [24,25]. Derinliği düşük simetrik kapların derin çekilmesinde kalıp geometrisi, zımba kuvveti ve ütüleme gibi parametrelerin etkisini incelemek amacıyla sayısal ve deneysel analizler yapılmıştır. Deneysel sonuçların doğrulanması amacıyla LS-Dyna yazılımı kullanılarak bir Sonlu Eleman Modeli (FEM) geliştirilmiştir. Pressleme kuvvetini ve incelmeyi etkileyen ilkel parça kalınlığının önemli bir etkisinin olduğu, zımba hızının ise önemli bir etki olmadığı ifade edilmiştir [26]. Derin çekme işleminde çelik sac plakalardaki kesit değişimleri ve buruşmaları engellemek amacıyla pot çemberi kuvveti, çekme boşluğu, stampa kuvveti, akışkan kullanılarak veya kullanılmadan yapılan farklı şekillendirme faktörlerinin teorik ve uygulamalı şekilde etkisi incelenmiştir. 100 kN zımba kuvvetinde 1 mm ve 0,8 mm'lik çekme boşluğunda akışkan kullanılarak veya kullanılmadan daha güzel sonuçların elde edildiği tespit edilmiştir [27]. Tenner ve ark. [28] yaptıkları çalışmada ortalama çap yöntemini kullanarak dikdörtgen kapların derin şekillendirme kuvveti ile silindirik şeklindeki kapların derin şekillendirme kuvveti için bulunan denklemlerin literatür değerleri ile benzer sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Rivas-Menchi ve ark. [29] derin şekillendirme işleminde pot çemberi kuvveti ve sürtünme kuvvetinin limit şekillendirme oranı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Pot çemberi kuvvetinin önemli bir etki gösterdiği, numune üst ağız bölgesinde gerilme yoğunlaşmasının pot çemberi kuvveti ile arttığı ve sürtünme kuvvetinin, kesit kalınlık değişimleri ve sacın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etki gösterdiği tespit edilmiştir. Dwivedi ve ark. [30] AA6014 Alüminyum alaşımı sacın derin çekilmesinde yağlayıcı kullanılmadan şekillendirilmesinin teorik ve uygulamalı şekilde deneysel çalışmalar yapılarak sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı arasında doğru orantılı şekilde artan bir ilişki olduğunu ifade etmişlerdir. Aminzahed ve ark. [31] dikdörtgen kesitli kapların derin çekilmesinde kabın cidar kalınlıklarının değişmesinin stampa kuvveti ve geri yaylanma kuvveti gibi farklı derin şekillendirme faktörlerinin özellikle kabın ağız bölgesinde kesit kalınlığı değişimini etkilediğini ve stampa kuvveti ve pot çemberi kuvvetinin büyümesi ile kesit kalınlığının artmış olduğu, geri yaylanma üzerindeki pot çemberi kuvvetinin tesirinin düşük kaldığı kanıtlanmıştır.

Farklı sac plakalardan derin şekil verme ile dikdörtgen parçaların üretilmesinde, ilkel parça şekli, baskı plakası kuvvetleri ve zımba radyüsüne benzer çok farklı biçimlendirme parametrelerinin sınır şekil verme katsayısı (β)'na etkilerinin uygulamalı olarak yapıldığı hakkında çok çalışma vardır. Bu çalışma, St37 sacı kullanılarak dikdörtgen kapların derin çekilmesinde kalıp geometrisinin kap kesit incelmeleri üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

2 Materyal ve Metot

2.1 Uygulanan Metot ve Malzeme Seçimi

Bu çalışma ile baskı plakası kuvvetinin ve kalıbın geometrik parametrelerinin limit çekme ve kap kesit incelemeleri üzerindeki etkilerinin çalışılması yapılmıştır. Kalınlığı 1 mm olan St37 karbonlu sac deney malzemesi olarak kullanılmıştır. St37 sacının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde markası SHIMADZU olan 5000 kN çekme yüküne sahip test cihazında üç farklı yönde 0°, 45° ve 90° açılardaki hadde istikametinde 5 mm/dak çekme hızında çekme deneyleri yapılmıştır. Tablo 1'de St37 çelik sacının element bileşim oranları ve Tablo 2'de ise mekanik özellikleri verilmiştir. Kalıplar soğuk iş takım çeliği (D3) malzemesinden üretilmişlerdir. Kalıp dış piyasadan temin edilmiş ve mevcut şartlardaki haliyle kullanılmıştır.

Tablo 1. St37 Çelik sacının kimyasal özellikleri.

C	Mn	P	S	Cr	Mo
0,0442	0,242	0,109	0,0084	0,0114	0,0114
Ni	Cu	Nb	Ti	Sn	Fe
0,0263	0,00451	0,00242	0,00028	0,0866	99,466

Tablo 2. St37 Çelik sacın mekanik özellikleri.

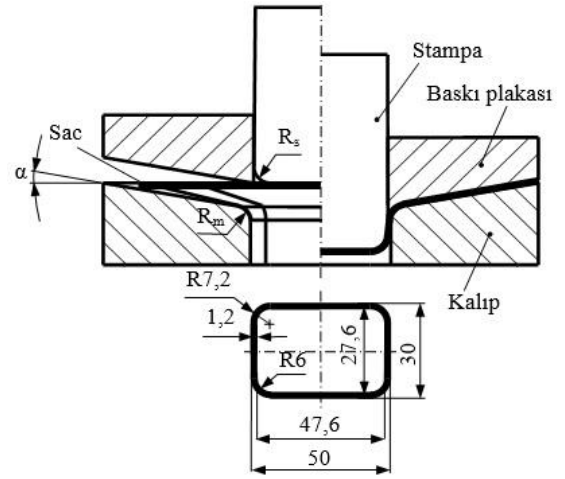
Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
0	181,53	316,83	35,99
45	207,34	327,79	34,08
90	193,46	310,53	34,22

Deney çalışmalarının etkisini tespit etmek için kalıbın üst ve baskı plakasının alt yüzeylerine farklı açılar verilmiştir. Stampa ve matris köşelerindeki yarıçaplar aynı seçilmiştir. Kullanılan numune saclar 55x75 mm ebatlarından olmak üzere adım adım 2,5 mm artırılarak dikdörtgen kesilerek 95x115 mm boyutlarında rastgele dikdörtgen olarak standart ölçülerine getirilmiş ve toplam 160 deney yapılmıştır. Deneysel çalışmalarının gerçekleştirildiği sistem yapısının deney düzeneği Şekil 1'de, deneylerde kullanılan kalıp resmi ve büyüklükleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney seti sistemi.

Baskı plakası, buruşmayı önlemek ve kalıp boşluğuna malzeme akışını kontrol etmek için gerekli olan baskı plakası kuvvetini oluşturmaktadır. Zımba, sacı kalıp boşluğuna doğru iterken aynı anda zımba ve kalıp arasında sac kalıp boşluğuna doğru aktığı sırada kalıbın özel şeklini alarak kap oluşmaktadır.



Şekil 2. Uygulamalarda kullanılan kalıp ve boyutları.

Deney çalışmalarında kullanılan derin çekme kalıbında, pot çemberi kuvvetini kontrol etmek amacıyla 6 adet yay kullanılmış ve bu yayların uyguladıkları kuvvetler yardımıyla pot çemberi kuvveti sabit alınmıştır.

Derin çekme işlemleri 60·104 kN kapasitede hareket yönü tek ve eksene dik olan bir hidrolik press tezgâhında yapılmıştır. Deney seti press tezgâhına civata ve pabuçlar aracılığı ile bağlanmış ve kalıp stampa hızı sabit 4 mm/sn alınmıştır. Deney çalışmaları sırasında zımbaya etki eden kuvvetlerin belirlenebilmesinde CAS LS-20T marka 200·103 kN kapasitede hassasiyeti ±2 kg olan kuvvet belirleme özelliği tek yönlü olan bir kuvvet ölçme dinamometresi ayarlanmıştır. Kuvvet ölçme dinamometresinden tespit edilmiş olan kuvvet sonuçlarının bilgisayar ortamına gönderilmesi ve bunların kayıt altına alınması için ise markası CAS 1500A olan bir indikatör kullanılarak kaydedilmiş ve kayıt altına alınan bu değerler RS232 bağlantısı aracılığı ile DNC bilgisayar programı vasıtasıyla saniyede 10-1 hızda kaydedilerek bilgisayara aktarılmıştır.

Pot çemberi kuvveti (PÇK) ise sabit ve 1800 daN tatbik edilmiştir. Zımba-Matris arası akıcılığı kolaylaştırmak amacıyla yoğunluğu 15 °C'de 885 kg/m³ olan Shell Tellus 68 özelliğinde yağlayıcı uygulanmıştır.

Derin çekme çalışmaları, Tablo 3'te verilen çekme parametreleri kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 3. Plastik şekil verme parametreleri.

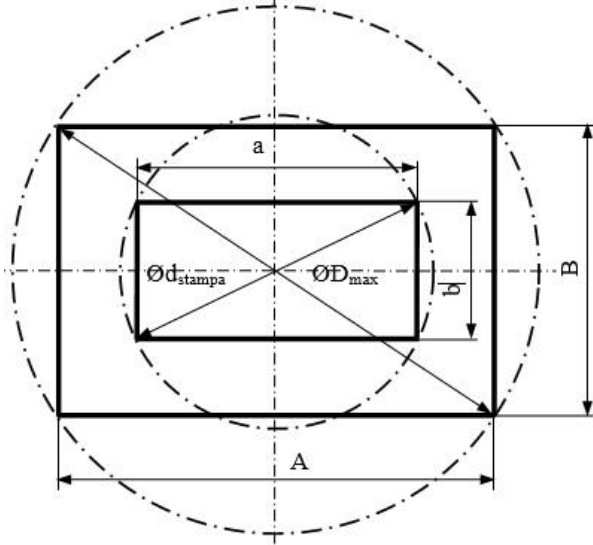
Çekme parametreleri	
Kalıp üst yüzey/Pot çemberi alt yüzey açısı, α (°)	0 3 6 9
Plastik şekil verme sıcaklığı (°C)	20 °C (Oda sıcaklığı)
Pot çemberi plakası kuvveti (N)	1800
Matris/stampa radyüsü (mm)	8

2.2 İlkel Parça Çapının Belirlenmesi ve Limit Çekme Oranının Hesabı

Derin çekme deney uygulamalarında silindirik şeklindeki kapların iyi bilinen derin şekil verme yöntemi dikdörtgen şekilli ve şekilleri belli olmayan kaplara tatbik etmek için eşdeğer çap teorisi doğru sonuçlar vermektedir [34, 36].

Dmax, ilkel parçanın eşdeğer çapı olmak üzere ve bu çapa ait dikdörtgen sacın başlangıçta Şekil 3'te ifade

edildiği haliyle A uzunluğunda ve B genişliğindeki dikdörtgen ilkel parça ile uzunluğu a ve genişliği b olan dikdörtgen zımba boyutlarının köşegen uzunluklarının hesaplanması ile ilkel parça çapı ve zımba çapı hesaplanmaktadır. Bu çaplar eşdeğer çap olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3. Dikdörtgen kap için ilkel parça ortalama çapı (D_{max}) ve zımba ortalama çapının (d_{stampa}) tespit edilmesi (Pisagor eşdeğer çapları) [41].

Esasında dikdörtgen kapların derin çekilmesinde boyutsal faktörleri de silindirik şekil verme faktörleri gibi hesaplanmaktadır. Bununla birlikte, dikdörtgen şekil vermede farklı başka faktörlerinde dikkate alınması gerekir. Dikdörtgen şekil vermenin kayda değer bir biçimlendirme faktörü, kare olması halinde en/boy oranı b/a=1 olurken dikdörtgen kapta en/boy oranı b/a=1 olmamaktadır. Bu yüzden sınır şekil verme katsayısı hesabında değişik bir metot olarak eşdeğer çap tespitinin yapılmasıyla bulunmaktadır.

Başlangıç sac malzemenin genişlik x uzunluk boyutları ele alındığında, eşdeğer çapı tespit etmek için "Pisagor eşdeğer çapları" hesabı yapılmaktadır. Pisagor eşdeğer çaplar ifadesi Şekil 4'te açıklandığı şekliyle bu çapı ifade etmek için şekli dikdörtgen olan karşılıklı iki köşesi arasındaki uzunluğu göz önünde bulundurmaktadır. Bu durumda geçerli olan eşdeğer çaplar Pisagor metodu ile tespit edilmiştir.

$$\varnothing D_{\max} = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (1)$$

$$\varnothing d_{\text{stampa}} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2)$$

Denklem 1 ve denklem 2'de hesaplanmış olan çaplar eşdeğer çaplar "Pisagor eşdeğer çapları" şeklinde ifade edilmektedir. Dikdörtgen biçimli kapların üretilmesinde sınır şekil verme katsayısının tespit edilmesinde geçerli çaplar Şekil 3'te gösterilmiştir. Limit çekme oranı 3 ifadesi göz önüne alınarak belirlenmiştir.

$$\beta = \frac{\varnothing D_{\max}}{\varnothing d_{\text{stampa}}} \quad (3)$$

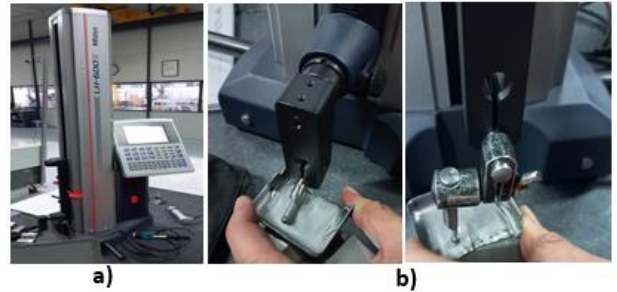
Burada, ØD_{max} parça ilkel eşdeğer çap ve Ød_{stampa} ıstampa eşdeğer çapını ifade etmektedir.

2.3 Kap Cidar Kalınlığı Değişimlerinin Ölçülmesi

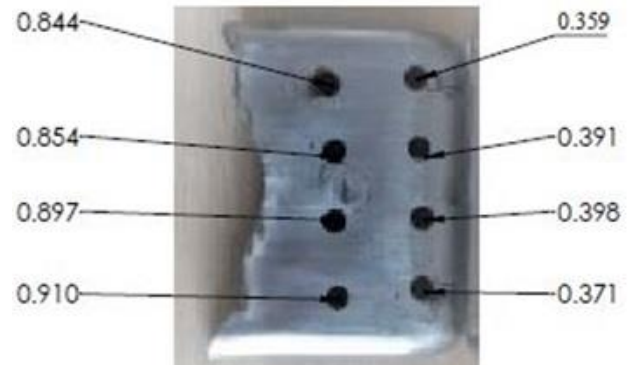
Derin çekme uygulaması sırasında plastik deformasyona uğrayan kabın üzerinde çok farklı gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmelerden dolayı kabın cidar kalınlıklarında değişimler meydana gelmektedir. Bu yüzden derin çekme sırasında göz önünde bulundurulması icap eden durumlardan en önemlisi kaptaki cidar kalınlık değişimleridir.

Kaplardaki cidar farklılıklarının tespit edilmesi amacıyla deneylerden elde edilen kap hassas bir biçimde yüksekliği boyunca özellikle de kenar köşe bölgesinden testere ile hassas bir biçimde kesilerek haddeleme doğrultusu üzerinde 10 mm mesafelerde testere ile kesilmişlerdir.

Kesilen kabın duvar yüzeyi taban radyüsü bitiminden itibaren kabın ağız kısmına doğru 10 mm aralıklarla ızgaralara bölünmüştür. Kesişim noktaları belirlenmiş ve belirlenen noktalardan cidar kesit değişimleri LH-600E modeli MİTUTOYO marka hassas doğrusal ölçüm mihengiri cihazı ile belirlenen kesişim noktalarından, noktasal temaslı hassas uç ile cidar kesit değişimleri 0.001 hassasiyetinde ölçülmüştür. Şekil 4a'da, cidar kesit değişimlerinin ölçülmesinde kullanılan cihaz ve Şekil 4b'de ise cidar kesit değişimlerinin ölçülmesi şekli olarak gösterilmiştir. Şekil 5'de, kesilmiş numune üzerinde ölçüm noktalarının gösterildiği ve bazı noktalarda ölçüm sonucu elde edilen cidar kesit değişimi değerleri verilmiştir.



Şekil 4. Cidar kesit değişimlerinin ölçümü için kullanılan kap ve kalınlık ölçümü: a) Cidar kesit değişimleri ölçüm cihazı, b) Cidar kesit değişimlerinin ölçülmesi.



Şekil 5. Cidar kesit değişimlerinin ölçümü için kullanılan kap ve ölçüm değerleri.

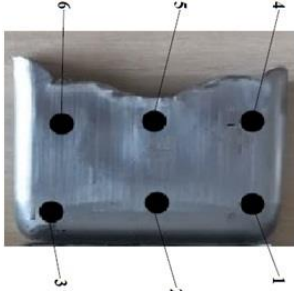
2.4 Kaplardaki Mikrosertlik Değişimlerinin Ölçülmesi

Kap cidar kalınlığının ölçülmesi için kesilen sacın diğer kısmı taban radyüsü bitiminden itibaren kabın ağız kısmına doğru 10x10 mm. aralıklarla ızgaralara bölünmüş ve keşişim noktaları belirlenmiş ve belirlenen noktalardan sertlik dağılımları PROJEQ marka sertlik ölçüm cihazı ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Şekil 6'da, sertlik dağılımlarının ölçümünde kullanılan PROJEQ marka cihaz gösterilmiştir.



Şekil 6. Sertlik ölçümlerinde kullanılan PROJEQ marka cihaz.

Şekil 7'de kesilmiş numune üzerinde ölçüm noktalarının gösterildiği numune verilmiştir.



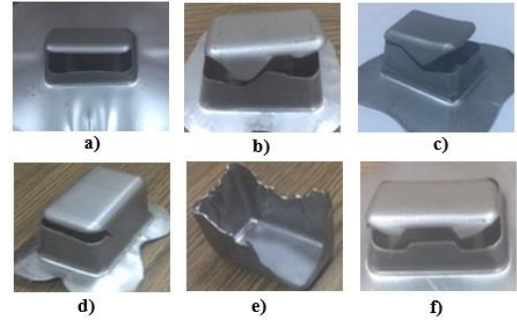
Şekil 7. Numune üzerinde mikrosertlik ölçüm noktaları.

3 Elde Edilen Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

3.1 Kalıp/Baskı Plakası Açısının (α) Kap Hasarları Üzerindeki Etkisi

Kalıp açısının kap hasarları üzerinde olan etkisi gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde özellikle kaplarda ağız kısmı bölgelerinde aşırı buruşmalar ve kulaklanmalar, alt taban bölgelerinde ise yırtılmalar ve çatlaklar biçiminde hasar oluşumları yapılan çalışmalarda açıklandığı gibi deney numunesi sacının çapının artması, sacda plastik şekil verme deformasyonu oluşturmada ihtiyaç duyulan stampa kuvvetini artırmaktadır. Stampa kuvvetinin fazla alınması, plastik şekil verme sırasında meydana gelen gerilmelerin çok daha fazla artmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden derin çekme sırasında daha büyük çekme gerilmeleri meydana gelmekte ve bu çekme gerilmelerine mukavemet gösteremeyen kapta çatlaklar-yırtılmalar ve kopmalar oluşmakta ve derin çekme başarılı bir şekilde gerçekleştirilememektedir [13].

Kalıp/baskı plakası yüzeylerine açı verilerek yapılan metal şekillendirme önemli derecede plastik deformasyonlar ile bağlantılıdır. Sacın bütün yüzeyine dağılmış homojen bir deformasyon kuvveti saclarda çatlaklara sebep olmaktadır. Elde edilen kaplarda meydana gelen çatlaklar, kopmalar ve buruşma hataları Şekil 8'de verilmiştir.

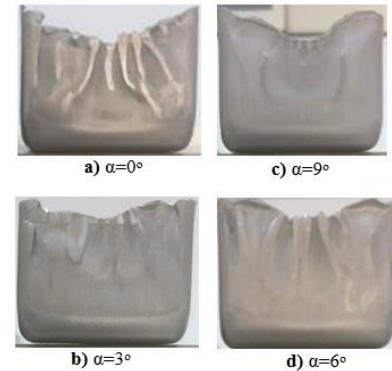


Şekil 8. Elde edilen kaplarda meydana gelen çatlaklar, kopmalar ve buruşma hataları.

Şekil 8a'da, elde edilen kapta alt taban boyunca homojen, düzgün ve tabana paralel bir yırtılmanın meydana geldiği görülmektedir. Şekil 8b ve Şekil 8c'de, pot çemberi kuvvetinin yeterli olmamasından dolayı dalgali ve düzgün olmayan yırtılmanın olduğu görülmektedir. Şekil 8d'de, kabın alt taban kısmında köşe boyunca bir yırtılmanın meydana geldiği, e'de kabın tamamen alt taban köşesinden ağız kısmına doğru bir kopmanın gerçekleştiği, f'de ise kabın alt tabanında dalgali, ancak bütün taban boyunca yırtılmanın olduğu ve sonrasında da kap radyüs bölgesinin üzerinde hemen hemen bir kopmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Deformasyonları önlemek için hem stampa hem de sac arasındaki temas alanında mümkün mertebe yağlayıcı kullanılarak kayganlaşmayı sağlamak gerekmektedir. Yağlayıcının yırtılma hasarlarını önemli derecede azalttığı düşünülmektedir.

Matris üst yüzey/pot çemberi alt yüzey açısının küçük alındığı hallerde ondülasyonların çok fazla olması nedeniyle kabın ağız bölgelerinde çok daha fazla kırışıklıklar oluşmaktadır. Bu da, elde edilecek olan kapta istenmeyen kap hasarlarına sebep olduğundan kullanılmamaktadır.

Şekil 9'da matris/pot çemberi açısına bağlı olarak 1800 N sabit pot çemberi kuvvetinde çekilmiş olan hasarların olmadığı ancak buruşma ve büzülmelerin olduğu kaplar görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, kabın ağız bölgelerinde kıvrımlı buruşmaların olduğu, matris açısı $\alpha=0^\circ$ olduğunda bu buruşmaların çok daha belirgin olduğu görülmektedir. $\alpha=3^\circ$ 'de ve $\alpha=6^\circ$ 'de hemen hemen yok olduğu, fakat matris açısı $\alpha=9^\circ$ olarak alındığında ise minimum seviyede hasarların olduğu ve hatta hasarın oluşmadığı daha temiz bir yüzey açısına sahip kapların elde edilmiştir.



Şekil 9. Kalıp üst yüzey ve pot çemberi alt yüzey açısına (α) bağlı olarak LÇO=2,26 (maksimum) ve 1800 N sabit pot çemberi kuvvetinde elde edilen kaplar.

Şekilde görüldüğü gibi kalıp açısının LÇO'ya olan etkisi oldukça önemlidir. Derin çekme işlemlerinde dikdörtgen kapların elde edilmesinde kalıp/baskı plakası yüzey açısının limit çekme oranı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Matris/baskı plakası açısının artmasına bağlı olarak LÇO'da artmaktadır. Bunun sebebi, kalıp açısının yüksek olması durumunda sac plakanın kalıp boşluğuna doğru ilerlemesinin çok daha kolay bir şekilde gerçekleşmiş olmasındandır. Zımba ile kalıp içerisine itilmeye zorlanan sac plakanın çekme-basma gerilmelerine direnç meydana getirmesi, kalıp açısının artması ile azalmaktadır [41].

Şekil 9a ve Şekil 9b'de, pot çemberi kuvveti sabit ve PÇK=1800 N ve $\beta=2,26$ için $\alpha=0^\circ$, 3° 'de elde edilen kaplar verilmiştir. Şekil 9a ve Şekil 9b, incelendiğinde, kalıp/baskı plakası yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=3^\circ$ olan kalıplarda maksimum LÇO 2,26 olarak elde edilmesine rağmen kap ağız kısımlarında gözle görülür bir biçimde ondülasyonların, buruşmaların ve kırışıklıkların olduğu görülmektedir. Ancak $\alpha=6^\circ$, 9° 'de elde edilen kapların daha düzgün ve pürüzsüz olduğu gözle görülür hasarların oluşmadığı, sadece bir derece kulaklanmaların meydana geldiği görülmüştür. Kalıp/baskı plakası yüzey açısı arttıkça, ondülasyonların, buruşmaların ve kırışmaların fazla meydana gelmediği, kalıp/baskı plakası yüzey açısının sac malzemenin akışını kolaylaştırdığını ve hasarsız kapların elde edilebileceğini göstermiştir. Bunun en büyük sebebinin kalıp açısının artışına bağlı olarak eksenel kuvvette bir artışın olmasından kaynaklanmakta olduğu söylenebilir [37].

İlkel parça çapı büyüdükçe sac plakada hasarların oluşmasıyla kap incelemelerinin arttığı ve zımba kuvvetinin artması ile oluşmuş olan gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden derin çekme işlemi sırasında sacda oluşan fazla büyük gerilmelere direnç gösteremeyen sac plakalarda çatlaklar, yırtılmalar ve kopmalar meydana gelmekte ve şekil verme aşamasında sağlıklı sonuçların oluşması imkânsız hale gelmekte ve derin çekme işlemi başarısızlıkla sonuçlanmaktadır [33]. Baskı plakası kuvvetinin (BPK) büyük olması durumunda yırtılmalar genelde kabın taban köşelerinde meydana gelmektedir. BPK'nin düşük olması halinde ise ondülasyonların daha büyük olmasından kaynaklanan ve kabın ağız kısımlarında daha büyük katlanmalar (Şekil 9a ve Şekil 9b) ve buruşmalar meydana gelmekte, bu durumda numunenin üst bölgelerinde yırtılmaların ve çatlakların oluşmasında etkili olduğu görülmektedir. Bir sacın biçimlendirilmesinde zımba radyüsü en önemli parametrelerden biridir. Zımba radyüsünün küçük olması, bir sac üzerindeki keskin hatların iyi bir şekilde elde edilmesi için arzu edilen bir özelliktir. Fakat böyle keskin hatlar birim şekil değişimi artışını bir yerde toplayacağı için imalatta zorluklar ortaya çıkartır ve hata olasılığını artırır. Bu ise sacın çatlmasına veya yırtılmasına sebep olur [42, 44].

3.2 Kaplarda Meydana Gelen Mikrosertlik Değişimlerinin İncelenmesi

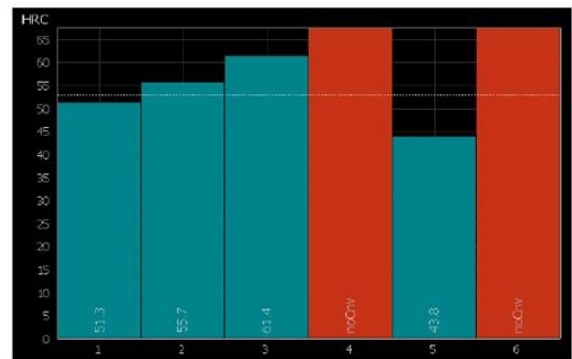
Metalik malzemelerin plastik deformasyonunda etkili olan çok farklı kayda değer parametreler bulunmaktadır. Bu parametrelerden deformasyon sertleşmesi en önemli olanıdır [38]. Metallerin plastik deformasyona uğraması

sırasında oluşan deformasyon sertleşmesi çekilen sacın matris boşluğu içerisine akışını, stampa kuvvetini, kapta oluşan gerilmeleri, kabın cidar kalınlığını ve sertliğini etkilemektedir.

Metallerin şekillendirilmesini etkileyen önemli faktörlerden biri de deformasyon sertleşmesidir. Şekillendirme esnasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi kabın kalıp boşluğuna akışını, zımba kuvvetini, kaptaki kalınlık değişimlerini ve kaptaki gerilmeleri doğrudan etkiler [39]. Derin çekilen dikdörtgen kesitli kabın sertlik ölçüm cihazından alınan sertlik değerleri, Şekil 10'da kap yüksekliğine bağlı olarak verilmiştir.

Şekil 10 dikkate alındığında, 1 noktasında sertlik değeri 51.3 HRC, 2 noktasında 55.7 HRC, 3 noktasında 61.4 HRC ve 5 noktasında ise 43.8 HRC olarak tespit edilmiştir. Ancak kap üzerinde 4 ve 6 noktalarında kabın yüzeyinin dalgalı ve pürüzlü olması sebebiyle herhangi bir ölçüm tespit edilemediği gösterilmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek sertlik değeri 3 noktasında ve kabın tabanının olduğu bölgede 61.4 HRC olarak tespit edilmiştir. Minimum seviyede elde edilen sertlik kap üst ağız bölgelerinde ölçülmüş, kabın üst ağız kısımlarına doğru olan bölgelerde sertliğin daha da düştüğü ve 5 noktasında bu değer 43.8 olduğu görülmektedir. Plastik deformasyonun en çok etkilediği bölge kap ağız kısımları olduğundan bu bölgede deformasyon sertleşmesi nedeniyle kaptaki maksimum gerilme değerleri ve sertlik değerleri de bu bölgelerde meydana gelmektedir. Bunun sebebi ise bu bölgelerde basma ve çekme kuvvetlerinin maksimum bir değere ulaşması ve dolayısıyla deformasyon sertleşmesinin meydana gelmiş olmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek sertlik değeri 3 noktasında 61.4 HRC ve en düşük sertlik değeri ise 5 noktasında 43.8 HRC olarak ölçülmüştür. Ortalama sertlik değeri ise 53.1 HRC olarak tespit edilmiştir.

Ölçüm serisi dosya adı 95x80
Ölçüm ortalama sertliği 53.1 HRC
Ölçüm sütun grafiği



Şekil 10. LÇO=2,20 için kap yüksekliğine bağlı olarak kaptaki sertlik dağılımı ve değişimi.

Sonuçta derin çekme yöntemiyle elde edilmiş olan kaplarda plastik şekil verme neticesinde meydana gelen sertlik değişimleri kap cidarları üzerindeki gerilme dağılımları hakkında net sonuçlar vermiş olmaktadır. Elde edilen kaplarda meydana gelen bu gerilmeler plastik şekil vermede kapların manyetik özelliklerini, korozyon direncini, ömrünü, tokluğunu ve yırtılmaya karşı olan direncini pozitif yönde etkilemektedir. Derin şekil verilerek elde edilmiş kaplardaki gerilme değerleri ne

kadar düşük olursa bu kapların kullanım ömürleri de o kadar fazla olmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışma neticesinde kaplarda oluşan sertliğe etki eden faktörler; matris üst yüzey açısı ve pot çemberi alt yüzey açısı ve pot çemberi kuvveti olduğu görülmüştür.

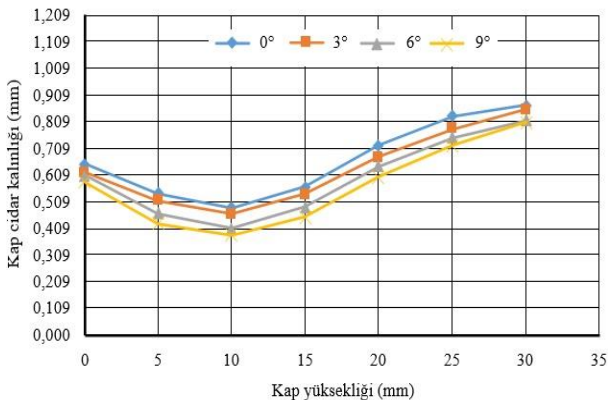
3.3 Kalıp/Baskı Plakası Açısının (α) Kap Cidar Kalınlığı Değişimleri Üzerindeki Etkisi

Derin çekmede sacı şekillendirmenin başarılı bir sonuç vermesi cidar kalınlıklarındaki farklılaşmaların öngörüldüğü değerlerde tutulmuş olması ile sonuçlanmalıdır. Kap cidar değişimleri ve genellikle de alt köşe radyüs bölgelerindeki cidar kesit değişimleri sac malzeme kalitesine direkt etki yapmaktadır.

Stampa ile sac plaka arasındaki temasın neticesinde sürtünmenin büyümesi ile gerilme büyür. Stampingin plastik şekil vermeye etkisini sürdürmesi ile gerilme de aynı oranda sürekli büyümeye devam etmektedir. Gerilmedeki bu büyüme sacdaki cidar kesit değişiminin önemli miktarda küçülmesine ve böylece elde edilen kapta çok fazla plastik şekil değişiminin meydana gelmesine sebep olur [34, 35, 36].

Şekil 11 ve Şekil 12'de sabit KBP=1800 daN'luk kuvvet altında farklı limit çekme oranlarında farklı kalıp/baskı plakası açılarındaki çekilmiş numunelerde kap yüksekliğine bağlı olarak kap kesit incelleme değişimleri verilmiştir.

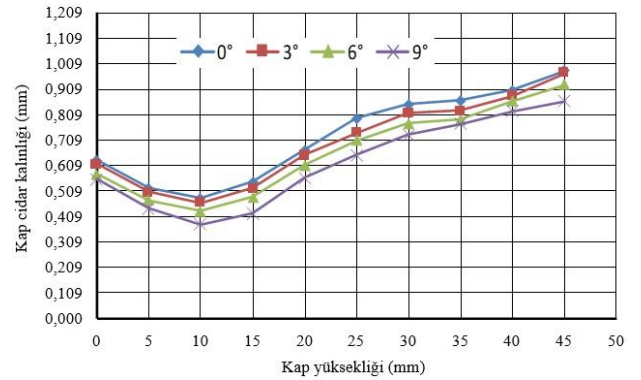
Şekil 11'de LÇO=2,08 ve 1800 N pot çemberi kuvveti uygulanarak kalıp/pot çemberi açısı (α)'nın hadde doğrultusunda cidar kesit değişimleri üzerindeki tesiri gösterilmiştir. Şekilde net görüldüğü gibi 0-10 mm aralığındaki kap yüksekliklerinde cidar kesit değişimlerinin azaldığı, yani sacda önemli sayılabılır bir değerde incelleme meydana geldiği ve bunun hemen hemen 0,371-0,910 mm kadar tespit edildiği, deneye tabi tutulan sac kalınlığındaki değişimin yaklaşık %20 civarında düştüğü tespit edilmiştir. 10 mm'den itibaren kap ağız kısımlarına doğru cidar kalınlık değişimlerinin adım adım artış gösterdiği, 25 mm'den itibaren ise cidar kalınlığının sac plaka kalınlığını geçtiği görülmüştür. Kabın cidar kesitindeki bu değişim yaklaşık %32 civarında olmaktadır. Matris/pot çemberi açısı (α)'nın her değeri için kabın kesit cidar değişimi aynı oranda olduğu tespit edilmiştir. Matris/pot çemberi açısı (α) büyüdükçe kap kesit incelmelerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 11. LÇO=2,08 için matris/pot çemberi açısı (α)'nın cidar kesit değişimleri üzerindeki etkisi.

Baskı plakası kuvveti sabit ve BPK=1800 daN, kalıp/baskı plakası yüzey açısı $\alpha=0^\circ$ ve $\alpha=3^\circ$ 'lik kalıplarda özellikle limit çekme oranının $\beta=2,08$ olması durumunda kap kesit incelmelerinde kayda değer oranda bir kalınlaşmanın meydana geldiği görülmektedir. Kap ağız kısımlarında gözle görülür bir biçimde ondülasyonların, buruşmaların ve kırışmaların fazlasıyla meydana geldiği tespit edilmiştir. Deformasyon sertleşmesi malzemelerin şekillendirilmesini etkileyen en önemli faktördür. Malzemenin şekillendirilmesi esnasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi kabın kalıp boşluğuna akışını, zımba kuvvetini, kaptaki kalınlık değişimlerini ve kaptaki gerilmeleri doğrudan etkilemektedir [39].

Şekil 12'de maksimum değerdeki LÇO=2,26 ve 1800 N sabit pot çemberi kuvveti etkisi altında kalıp/baskı plakası açısı (α)'nın haddeleme doğrultusu hattı üzerinde kurs boyuna bağlı olarak kap kesit incelmelerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 12. LÇO=2,26 için matris/pot çemberi açısı (α)'nın cidar kesit değişimleri üzerindeki etkisi.

Şekilde gösterildiği üzere kap boyunun 0-10 mm arasında olması durumunda sacın cidar kesitlerinde kayda değer bir incelmeye olduğu ve bu değer $\alpha=9^\circ$ için 0,371 mm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Bu maksimum incelmeden itibaren kap boyunun 10-45 mm arasındaki bölgede kesit kalınlaşmalarının sürekli arttığı ve bu kalınlaşma kap ağız kısmında $\alpha=0^\circ$ için 0,972 mm, $\alpha=3^\circ$ için 0,962 mm, $\alpha=6^\circ$ için 0,918 ve $\alpha=9^\circ$ için 0,854 mm olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi özellikle $\alpha=0^\circ-6^\circ$ aralığında sac yığımlarından dolayı kap boyundaki artışa göre cidar kesit değişimleri adım adım artarak özellikle 40-45 mm aralıktaki kap boyunda malzeme kalınlığına kadar çıktığı ve hatta aştığı görülmektedir. Bu değerden sonra kalınlık sac kalınlığının üzerine çıkmış, $\alpha=0^\circ$ matris açısı değerinde %56'lık bir artış göstererek 0,972 mm değerine kadar artmış, diğer bütün matris açılarındaki ise ortalama matris boşluğu değerine eşit olarak ölçülmüştür.

Şekil 11 ve Şekil 12 bir arada karşılaştırılmaları yapıldığında α 'nın tüm değerleri için cidar kesit değişimlerinin kabın bütün yüksekliklerinde benzer bir değişim gösterdiği görülmektedir. Limit çekme oranının artmasına bağlı olarak, matris açısının cidar kesit değişimleri üzerinde kayda değer bir etki yaptığı net olarak fark edilmektedir. Bu tesirin net olarak çekilen numunenin özellikle üst ağız kısımlarında çok daha yoğun olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kalıp/pot çemberi açısının artmasına bağlı olarak sac plakanın matris içine

doğru akışının artan açığa bağlı olarak daha rahat oluşundan kaynaklanmış olduğu tahmin edilmektedir. Sonuç olarak, limit çekme oranının artmasının matris açısına bağlı olarak numunenin alt yüzeyinde ve özellikle köşe yarıçapları bölgesinde kayda değer bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir. Kap yan kesitlerinin üst ağız bölgelerine doğru ise açının büyümesine göre kalınlaşmaların düştüğü, artan matris/pot çemberi açısına bağlı olarak cidar kesit incelmelerinin daha düzgün ve homojen olduğu görülmüştür.

Cidar kalınlıklarındaki farklılaşmalar, matris geometrik şekline, pot çemberi kuvveti, matris köşe yarıçapları, kullanılan akıcı akışkanlar, stampa ilerleme hızı ve sac plaka yüzeyindeki sürtünme alanının düzgün olup olmaması gibi çok farklı faktörlerin büyük bir oranda etkisinde kalmaktadır [1, 13, 22]. Literatür sonuçları değerlendirildiğinde elde edilen numunenin alt yüzey kısımlarında kayda değer bir farklılaşmanın meydana gelmediği, köşe yarıçap kısımlarında incelmelerin ve kap ağızları üst bölgelerine doğru ise kalınlık artışlarının meydana geldiği görülmektedir.

Matris/pot çemberi yüzey açısı arttıkça, $\alpha=60^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ 'lik açılarda buruşmaların çok net fark edilebilir bir şekilde azaldığı, özellikle kalıp/baskı plakası yüzey açısı $\alpha=90^\circ$ 'lik kalıplarda elde edilen kaplarda ondülasyonların, sacda üst üste binmelerin ve buruşmaların fazla meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu durumun, matris/pot çemberi yüzey açısının derin çekme sırasında sac malzemenin akışını kolaylaştırdığını ve hasarsız kapların elde edilebileceğini göstermiştir. Deneysel çalışmada sac plakanın matris boşluğuna kaymasını rahatlatmak amacıyla stampa ve matris yarıçaplarının olması gereken ölçülerde büyük alınması gerekir. Fakat olması gereken değerden daha fazla alınması stampa ve matris yarıçaplarında, pot çemberi tesir alanı azalacağından, sac plakanın zımba ile temasta olmayan alanı artmakta ve sac plakada olumsuz buruşmalar meydana gelmektedir [32, 33]. Matris/pot çemberi açısının hemen hemen tüm değerlerinde kap kesit incelmelerinde kayda değer bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. Şekil 12'de $L\check{C}O=2,26$ için kurs boyuna bağlı olarak kap kesit incelmelerinin değişimi değerlendirildiğinde, özellikle $\alpha=9^\circ$ için kap kesit incelme değişiminde aykırı bir değişim gösterdiği görülmektedir. Bu durum baskı plakası kuvvetinin yeterli olmamasından kaynaklandığı ve dolayısı ile plastik deformasyona uğrayan sac plakanın kap kenarlarında meydana gelen yüzey buruşmalarından dolayı matris boşluğu içinde sıkışmasından olduğu ve kap cidar kesit değişimlerinin artmasına neden olmuştur [33]. Kap kesit incelme değişiminde kayda değer bir değişim meydana gelmesine rağmen maksimum incelme en genel olarak $\alpha=0^\circ$ kalıpta, minimum incelme ise $\alpha=90^\circ$ olduğu durumda tespit edilmiştir. Bunun sebebi, matris açısının sacın kalıp boşluğu içine doğru itilmesini rahat bir şekilde gerçekleştirmesi ve dolayısıyla sac plakanın üst üste toplanmasının düşürülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [39].

Derin çekme işlemlerinde dikdörtgen kapların elde edilmesinde kalıp/pot çemberi yüzey açısının kap kesit incelmeleri üzerinde önemli bir tesirinin olduğu görülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, St37 çeliğinden dikdörtgen kapların derin çekilebilirliğinde kalıp geometrisinin kap hasarları ve limit şekil değiştirme oranı değişimlerine olan etkileri uygulamalı bir biçimde yapılmıştır. Sonuç olarak elde edilen temel bulgular maddeler halinde açıklanmıştır.

- 1 Matris/baskı plakası açısı (α) büyüdükçe zımba kuvvetinin düştüğü, bu durumun sac akışının daha rahat olduğu, numune ağız bölgelerindeki kap kesit kalınlıklarının numune taban köşe bölgelerindeki kesit kalınlıklarından daha fazla olduğu ve kap kesit kalınlıklarına etki eden başlıca parametrenin matris/baskı plakası açısı olduğu tespit edilmiştir.
- 2 Matris/baskı plakası açısı (α) değerlerinin büyümesi sonucu $L\check{C}O$ 'da büyümektedir. St37 sacının kalıp/baskı plakasına açı vermeden ($\alpha=0^\circ$) şekillendirilmesinde elde edilen $L\check{C}O=1,6$ olurken, matris/baskı plakasına açı verilmesi halinde ($\alpha=3-9^\circ$) $L\check{C}O$ değeri, $L\check{C}O=2,26$ olarak elde edilmiştir.
- 3 İlkel parça boyutlarının büyük ölçülerde seçilmesi durumunda, oluşturulan kaplarda ondülasyonlar, kulaklanmalar, erken çatlamalar ve yırtılmalar oluşmaktadır. Bu yüzden istenilen değerde $L\check{C}O$ oluşması sağlanamamaktadır. Doğru tespit edilen stampa kuvvetlerinde daha yüksek $L\check{C}O$ ve daha verimli ve uygun kapların üretimi yapılabilmektedir.
- 4 Kalıp/baskı plakası yüzey açısı arttıkça, ondülasyonların, buruşmaların ve kırışmaların fazla meydana gelmediği, kalıp/baskı plakası yüzey açısının sac malzemenin akışını kolaylaştırdığını ve hasarsız kapların elde edilebileceğini göstermiştir.
- 5 Plastik deformasyonun en çok etkilediği bölge kap ağız kısımları olduğundan bu bölgede deformasyon sertleşmesi nedeniyle kaptaki maksimum gerilme değerleri ve sertlik değerleri de bu bölgelerde meydana gelmektedir. Bunun sebebi ise bu bölgelerde basma ve çekme kuvvetlerinin maksimuma çıkması ve dolayısıyla deformasyon serleşmesinin meydana gelmiş olmasıdır. En yüksek sertlik değeri 3 noktasında 61,4 HRC ve en düşük sertli değeri ise 5 noktasında 43,8 HRC olarak ölçülmüştür.
- 6 Kap boyunun 0-10 mm arasında olması durumunda sacın cidar kesitlerinde önemli bir incelmeye olduğu $\alpha=9^\circ$ için 0,371 mm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Kap boyunun 10-45 mm arasındaki bölgesinde kesit kalınlaşmalarının sürekli arttığı ve kap ağız kısmında $\alpha=0^\circ$ için 0,972 mm, $\alpha=3^\circ$ için 0,962 mm, $\alpha=6^\circ$ için 0,918 ve $\alpha=9^\circ$ için 0,854 mm olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi özellikle $\alpha=0^\circ-6^\circ$ aralığında sac yığılmalarından dolayı kap boyundaki artışa göre cidar kesit değişimleri adım adım artarak özellikle 40-45 mm aralıktaki kap boyunda malzeme kalınlığına kadar çıktığı ve hatta aştığı görülmektedir. Kap ağız kısmında kalınlık sac kalınlığının üzerine çıkmış ve özellikle $\alpha=0^\circ$ için bu artış 0,972 mm olarak ölçülmüştür.

Bilgilendirme

Bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] Kirwan, M. J., & Coles, R. (2011). *Food and beverage packaging technology*. John Wiley & Sons.
- [2] Colgan, M., & Monaghan, J. (2003). Deep drawing process: analysis and experiment. *Journal of materials processing technology*, 132(1-3), 35-41.
- [3] Hassan, M., Hezam, L., El-Sebaie, M., & Purbolaksono, J. (2014). Deep drawing characteristics of square cups through conical dies. *Procedia Engineering*, 81, 873-880.
- [4] Hassan, M. A., Hassab-Allah, I. M., Hezam, L. M. A., Mardi, N. A., & Hamdi, M. (2015). Deep drawing of asymmetric cups through conical die without blank holder. In *Proceedings of the World Congress on Engineering* (Vol. 2, pp. 1-3).
- [5] Dhaiban, A. A., Soliman, M. E. S., & El-Sebaie, M. G. (2013). Development of deep drawing without blank-holder for producing elliptic brass cups through conical dies. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 41(4), 1530-1548.
- [6] Zein, H., El Sherbiny, M., & Abd-Rabou, M. (2014). Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. *Materials & Design*, 53, 797-808.
- [7] Goud, R. R., Prasad, K. E., & Singh, S. K. (2014). Formability limit diagrams of extra-deep-drawing steel at elevated temperatures. *Procedia materials science*, 6, 123-128.
- [8] Rao, B. V. S., & PVR, R. R. (2016). Influence of drawing ratio on thickness variation along the walls of deep drawn cups. *Journal of Manufacturing Engineering*, 11(2), 086-093.
- [9] Roll, K. (2008). Simulation of sheet metal forming-necessary developments in the future. *LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg*, 59-68.
- [10] Takalkar, A. S., & Chinnapandi, L. B. M. (2019). Deep drawing process at the elevated temperature: A critical review and future research directions. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 27, 56-67.
- [11] Zein, H., El-Sherbiny, M., Abd-Rabou, M., & El Shazly, M. (2013). Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process. *American Journal of Mechanical Engineering*, 1(2), 20-29.
- [12] Reddy, A. C. S., Rajesham, S., Reddy, P. R., Kumar, T. P., & Goverdhan, J. (2015). An experimental study on effect of process parameters in deep drawing using Taguchi technique. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 7(1), 21-32.
- [13] George, E. T., & MacKenzie, D. S. (2003). *Handbook of aluminum. Physical Metallurgy and Processes*. New York: Marcel Dekker Inc.
- [14] Zheng, K., Politis, D. J., Wang, L., & Lin, J. (2018). A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 55-80.
- [15] Boljanovic, V. (2004). *Sheet metal forming processes and die design*. Industrial Press Inc.
- [16] Donaldson, C., LeCain, G. H., Goold, V. C., & Ghose, J. (2012). *Tool design*. Tata McGraw-Hill Education.
- [17] Bouchaâla, K., Ghanameh, M. F., Essadiqi, E. H., Faqir, M., Meziiane, M., & Mada, M. (2018, December). Modeling of anisotropy influence on thickness distribution of deep drawing sheet. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering* (pp. 142-146).
- [18] Banabic, D. (2010). *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. Springer Science & Business Media.
- [19] Das, P., Panda, S. K., & Pratihari, D. K. (2013). Modification of initial blank shape to minimize earing in deep drawing process. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 3(1), 99-104.
- [20] Nagda, P. S., Bhatt, P. S., & Shah, M. K. (2017). Finite element simulation of deep drawing process to minimize earing. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 11(2), 413-416.
- [21] Bouchaâla, K., Ghanameh, M. F., Faqir, M., Mada, M., & Essadiqi, E. (2021). Numerical investigation of the effect of punch corner radius and die shoulder radius on the flange earrings for AA1050 and AA1100 aluminum alloys in cylindrical deep drawing process. *Heliyon*, 7(4), e06662.
- [22] Banabic, D. (2010). *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. Springer Science & Business Media.
- [23] Chen, D. C., Cheng-Yu, L., & Lai, Y. Y. (2019). Finite element analysis of deep drawing. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(9), 1687814019874561.
- [24] Hussaini, S. M., Krishna, G., Gupta, A. K., & Singh, S. K. (2015). Development of experimental and theoretical forming limit diagrams for warm forming of austenitic stainless steel 316. *Journal of Manufacturing Processes*, 18, 151-158.
- [25] Zheng, K., Politis, D. J., Wang, L., & Lin, J. (2018). A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 55-80.
- [26] Shaaban, A., & Elakkad, A. S. (2021). Numerical and experimental analysis of single-acting stroke deep drawing of symmetric low-depth products without blank holder. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2907-2919.
- [27] Choudhari, C. S., & Khasbage, S. S. (2021). Experimental investigation of forming parameters for square cup deep drawing process. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4261-4267.
- [28] Tenner, J., Andreas, K., Radius, A., & Merklein, M. (2017). Numerical and experimental investigation of dry deep drawing of aluminum alloys with conventional and coated tool surfaces. *Procedia engineering*, 207, 2245-2250.
- [29] Rivas-Menchi, A., Medellin-Castillo, H. I., de Lange, D. F., & Garcia-Zugasti, P. D. J. (2018). Performance evaluation of analytical expressions for cylindrical and rectangular deep drawing force estimation. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 340-350.
- [30] Dwivedi, R., & Agnihotri, G. (2017). Study of deep drawing process parameters. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 820-826.
- [31] Aminzahed, I., Mashhadi, M. M., & Sereshk, M. R. V. (2017). Investigation of holder pressure and size effects in micro deep drawing of rectangular work pieces driven by piezoelectric actuator. *Materials Science and Engineering: C*, 71, 685-689.
- [32] Ünal, E. (2011). *Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması*. (Doctoral dissertation, Firat University).
- [33] Güneş, A. T., (2002). *Pres İşleri Tekniği-Cilt2*, 2. Baskı, Ankara/Türkiye, TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- [34] Demiray, K. (2006). *Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi*. (Master's dissertation, Zonguldak Karaelmas University).
- [35] Seçkin, Ö. (2005). *DKP Sac Çeliğinin Derin Çekilmesinde Matris Yüzey Açılı Değişiminin Araştırılması*. (Master's dissertation, Firat University).
- [36] Uzun, İ., Erişkin, Y., (1997). *Sac Metal Kalıpcılığı*, Ankara/Türkiye, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları.

- [37] Larsson, L. (2005). Warm sheet metal forming with localized in-tool induction heating. *Lund University*.
- [38] Savaş, V., & Seçgin, Ö. (2010). An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. *International journal of material forming*, 3(3), 209-213.
- [39] Cotterell, M., Schambergerova, J., Ziegelheim, J., & Janovec, J. (2002). Dependence of micro-hardness on deformation of deep-drawing steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 124(3), 293-296.
- [40] Rivas-Menchi, A., Medellín-Castillo, H. I., de Lange, D. F., & García-Zugasti, P. D. J. (2018). Performance evaluation of analytical expressions for cylindrical and rectangular deep drawing force estimation. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 340-350.
- [41] Hattalli, V. L., & Srivatsa, S. R. (2018). Sheet metal forming processes—recent technological advances. *Materials today: proceedings*, 5(1), 2564-2574.
- [42] Özçelik, G. (2008). Derin Çekme İşleminin Simülasyonu. (Master's dissertation, Sakarya University).
- [43] Saha, S., Pal, S. & Albright, J. A., (1982). Surgical drilling: design and performance of an improved drill, *J. Biomechanic Eng.*, 104, 245-252.
- [44] Özek, C., Çelik, Y. H., & Özek, B. M. (2013). A fuzzy logic model to determine the effects of die/blank holder angle and punch radius on drawing ratio in angular deep drawing dies, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 25 (2), 379-388.