

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## The Effect of Die Geometry on Wall Thicknesses of Cup in Deep Drawing of Rectangular Cups

Cebeli Özek<sup>a\*</sup>

Submitted: 22.08.2022 Revised: 16.03.2023 Accepted: 19.03.2023 doi:10.30855/gmbd.0705054

### ABSTRACT

**Keywords:** Wall thickness,  
Angular deep drawing,  
Limit drawing ratio,  
Rectangular cups

<sup>a,\*</sup> Fırat University,  
Technology Faculty,  
Dept. of Mechanical Engineering  
23119 - Elazığ, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7603-415X  
e mail: cozek@firat.edu.tr

\*Corresponding author:  
cozek@firat.edu.tr

Deep drawing is the process of producing cups using a punch to shape the desired shape by pushing the sheet from the center into the die cavity between the die and the blank holder. As the sheet flows into the die cavity between the punch and the die, the cup is formed by convert to the special shape of the die. This study was carried out to determine the effect of geometric parameters of the die on the limit drawing ratio and cup wall thinning in deep drawing of rectangular cups. In the study, angles of  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=3^\circ$ ,  $\alpha=6^\circ$  and  $\alpha=9^\circ$  are given to the die upper surface/blank holder lower surface. The blank holder force and punch speed has applied to 1800 daN and 4 mm/s, respectively. The gap between the die/punch is 1.2 mm. The bottom of punch and edge radii and the die throat radii were used at 6 mm. St37 steel sheet with a thickness of 0.9 mm was used in the experiments. In order to determine the wall thickness changes of the cups, the cup was precisely cut from the edge corners along its height and the wall surface was divided into grids at 10x10 mm intervals from the end of the base radii towards the rim. Wall thickness changes were measured on Mitutoyo LH-600E precision linear measuring gauge with a precision of 0.001 with a point contact. Significant wall thickness changes is occurred in the cups and ranged from 0.371 to 0.910 mm. The maximum wall thickness change occurred in the lower corners of the cup and was determined as 0.373 mm. The limit drawing ratio has been obtained  $\beta=1.6$  at  $\alpha=0^\circ$  and  $\beta=2.31$  for  $\alpha=9^\circ$ . As a result, it has been determined that the die geometry has a significant effect on the limit drawing ratio and wall thickness changes by giving angles to the upper surface of the die and the lower surface of the blank holder for the production rectangular cup.

## Dikdörtgen Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisinin Kap Cidar Kalınlıkları Üzerindeki Etkisi

### ÖZ

Derin çekme, sacı merkezden matris-pot çemberi arasında kalıp boşluğuna iterek istenen şekle getirmek için stampa kullanılarak kapların üretilmesi işlemidir. Stampa ve kalıp arasında sac kalıp boşluğuna aktığı sırada kalıbın özel şeklini alarak kap oluşmaktadır. Bu çalışmada dikdörtgen kapların derin çekilmesinde kalıbın geometrik parametrelerinin limit çekme oranı ve kap kesit incelmeleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, matris üst yüzeyine/pot çemberi alt yüzeyine  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=3^\circ$ ,  $\alpha=6^\circ$  ve  $\alpha=9^\circ$ lik açılar verilmiştir. Baskı plakası kuvveti 1800 daN ve stampa hızı da 4 mm/s uygulanmıştır. Matris/stampa arası boşluk 1.2 mm dir. Stampa uç ve kenar radyüsleri ile matris ağız radyüsleri 6 mm alınmıştır. Deneylerde kalınlığı 0,9 mm olan St37 çeliğinden sac kullanılmıştır. Kaplardaki cidar kalınlık değişimlerinin tespit edilmesi amacıyla kap hassas bir biçimde yüksekliği boyunca kenar köşelerinden kesilmiş ve duvar yüzeyi taban radyüsü bitiminden ağız kısmına doğru 10x10 mm aralıklarla ızgaralara bölünmüştür. Kalınlık değişimleri Mitutoyo LH-600E hassas doğrusal ölçüm mihengiri cihazında noktasal temaslı uç ile 0.001 hassasiyetinde ölçülmüştür. Kaplarda önemli kalınlık değişimleri meydana gelmiş ve 0,371-0,910 mm aralığında olmuştur. Maksimum kalınlık değişimi kabin alt köşelerinde meydana gelmiş ve 0,373 mm olarak belirlenmiştir. Limit çekme oranı,  $\alpha=0^\circ$ de  $\beta=1,6$  iken  $\alpha=9^\circ$  için  $\beta=2,31$  olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, dikdörtgen kesitli kapların üretilmelerinde, matris üst yüzeyine/pot çemberi alt yüzeyine açılar verilerek kalıp geometrisinin, limit çekme oranı ve kap cidar kalınlık değişimleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cidar kalınlığı, Açılı derin çekme, Limit çekme oranı, Dikdörtgen kesitli kaplar

## 1. Giriş (Introduction)

Derin çekme, zımba kuvveti uygulanarak malzemenin kalıp boşluğuna akışıdır. Limit çekme oranı ve kalınlık dağılımı herhangi bir malzeme için şekillendirilebilirlik göstergeleridir. Derin çekmede, düz ince tabakalar arasında sacı istenen şekle getirmek için bir zımba kullanılarak sacı merkez kısmından kalıp boşluğuna iterek kaplar üretilmektedir. 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. Sac şekillendirme işlemleri doğal olarak bir çekme işlemidir. Tek bir aşamada elde edilebilecek deformasyon miktarı çekme kararsızlığı, kulaklanma veya yırtılma ile sınırlandırılabilir. Böylece gerekli kaplar minimum hata ve hasarsız bir biçimde elde edilebilirler.

Otomotiv ve uzay endüstrisinde sac şekillendirme işlemi yaygın olarak kullanılan bir imalat yöntemidir. Sac şekillendirme sac malzemenin, boyun verme, çatlak gibi herhangi bir hasar olmaksızın, istenilen şekle dönüştürmek amacıyla plastik olarak deforme olduğu bir deformasyon işlemidir [1]. Derin çekme işlemleri, otomotiv gövdeleri, yapısal parçalar, mutfak eşyaları ve içecek kutuları gibi hafif, daha yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu ve korozyona dayanıklı ürünler üretmek için sacın bir zımba kuvvetinin etkisi ile kalıp boşluğuna itilerek sac metalin istenen şekle dönüştürüldüğü üretim yöntemleridir [2]. Metal şekillendirme işlemlerinde en önemli model olan sonlu elemanlar metodunda (SEM), sayısal hesaplama veya bilgisayar destekli mühendislik (BDM), 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 kullanımını da gerektirmektedir [3]. 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 önemlidir. Ayrıca geometrik parametreler kadar elastikiyet gibi malzeme özellikleri, plastisite ve anizotropinin de etkisi vardır. Bu parametrelerin yanlış tespit edilmesi buruşma, yırtılma, kulaklanma ve geri yayılma gibi hasarların oluşması ile sonuçlanmaktadır [4]. Zein vd. derin çekme işlemi için sonlu elemanlar yöntemi ile kalıp tasarım parametreleri ile işlenmiş parçanın tahmini incelleme ve kalınlık dağılımını incelemişlerdir [5]. Reddi vd. sac şekillendirme işlemi sırasında kalınlık değişimi üzerinde geometrik parametrelerin etkisini analiz etmek için bir deneysel ve analiz çalışması uygulamışlardır [6]. 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 kullanılmaktadır [7]. Birçok üretim alanında alüminyum ve alüminyum alaşımlarında sac şekillendirme hızlı teknolojik gelişmeler ve ürün maliyetinin düşürülmesi kilit faktörler haline gelmiştir [8].

Derin çekme, basit ve geniş olarak kullanılan şekillendirme yöntemlerinden biridir. Düz bir yüzey üzerindeki zımba basıncından oluşur [9]. Sac parça olduğu gibi zımba aracılığı ile zımba ve kalıbın yüzeyleri arasında 3 boyutlu bir şekilde akarak zımba tarafından kalıp boşluğuna itilmekte ve ürünü elde etmek için taslak parça kalıp ve baskı plakası arasında baskı plakası kuvveti ile sıkıştırılmaktadır [10]. Bouchaala vd. AA2090 Al-Li alaşımının sonlu elemanlar metodu ile derin çekme modelinde kalınlık dağılımı üzerinde anizotropik ve izotropik verim fonksiyonlarının etkisini araştırmışlardır [11]. Anizotropinin, sac metallerin şekillendirilmesinde ve tanımlanmasında büyük bir etkisi vardır ve bu nedenle üretim süreçlerinin doğru tasarımı önemlidir. Sac metalin şekillendirilebilirliğindeki anizotropi, şekillendirme işlemi sırasında plastik deformasyon ile ilk anizotropiye yol açan termomekanik işleme geçmişinin bir kombinasyondur [12]. Das vd. sonlu elemanlar metodunu kullanarak ve HYPERWORKS-6.10 yazılımı ile modellenen silindirik derin çekme kaplarındaki kulaklanmaları analiz etmişlerdir [13]. Pawan vd. ABAQUS yazılımı yardımıyla kulaklanma yüksekliği yüzdesini azaltmak için ilkel parçanın başlangıçtaki boyutlarının ve şeklinin değiştirilmesini sayısal olarak geliştirmiş ve tespit etmişlerdir [14]. Bouchaala vd. 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 kulaklanma yüksekliklerini en aza indirmek için sayısal bir model geliştirmişlerdir [15].

Son yıllarda, derin çekme süreci ile imalatın birçok endüstride geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğu kanıtlanmıştır. Farklı boyutlarda çeşitli simetrik veya asimetric metal saclardan kapları hasarsız ve istenilen boyutta üretme yeterliği birçok araştırma çalışmasının ilgisini çekmiştir [16]. Derin çekme ile imalatın mutfak eşyaları, otomotiv, uzay ve savunma gibi birçok alanda, havacılık ve özellikle gıda ambalaj endüstrilerinde yaygın uygulamaları vardır [17]. Colgan vd. derin çekme işlemlerinin deneysel ve sonlu eleman analizi (SEA) çalışmalarını birleştirmeye yönelik ilk çalışmaları yapmışlardır. Çalışmada, derin çekme işlemi üzerinde zımba ve kalıp radyüsü, zımba hızı, zımba kuvveti, sürtünme ve çekme derinliğinin etkisini araştırmışlardır. Araştırma aynı zamanda bir tavllanmış çelik ve birde tavlınmamış yumuşak çeliğin haddeleme işleminin anizotropik etkisinin derin çekilmesinde çekme derinliği üzerindeki etkisi karşılaştırılarak yapılmıştır [18]. Hasan vd. kare kapları konik kalıplar aracılığıyla üretirken geometrik ve sürtünme parametrelerinin LÇO üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [19]. Optimum değerleri elde etmek için sayısal ve deneysel yöntemleri kullanarak yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre LÇO pirinç için 3.1 ve alüminyum için ise 3.15'e kadar artmış olduğunu göstermişlerdir. Hassan vd. tarafından asimetric şekilli kapların LÇO'nu geliştirmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır [20]. Baskı plakasız konik kalıplarda dörtgen kesitli kapları, yonca yaprağı şeklinde, gül yaprağı şeklinde, yıldız ve üçgen şeklinde üretmişlerdir. İşlemin geçerliliğini kanıtlamak için sayısal analiz yönteminde kullanılmış ve çalışma en homojen olmayan şekildeki yıldız kesitli kabın üretilmesi için deneysel olarak da yapılmıştır. LÇO pirinç için 3,44 ve alüminyum için 3,37 olarak elde edilmiştir. Dhaiban vd. tarafından derin çekme kuvveti, gerilme dağılımlarının ve birçok geometrik parametrelerin LÇO üzerindeki etkisini görmek amacıyla ANSYS/APDL yazılımı kullanılarak bir SEM hazırlanmış ve sayısal sonuçlar deneysel olarak kanıtlanmıştır. LÇO 2.26'ya kadar olan eliptik şekilli kaplar başarılı bir şekilde üretilmiştir [21]. Zein vd. derin çekme işlemlerinde geri esnemeyi ve incelemeyi incelemek için sayısal bir analiz çalışmasını tanımlamışlardır [22]. Deneysel sonuçların geçerliliğine karşı ABAQUS programı kullanılarak SEM geliştirilmiştir. Bu model ürünün istenen derinliğini elde etmede zımba hareketi için geri yaylanmadaki etkilerinin gerekli toleransını tahmin etmeye yardımcı olmuştur. Kalıp radyüsü, zımba ucu radyüsü, radyal boşluk, baskı plakası kuvveti ve sıvı yağlayıcı gibi parametrelerin etkisi verilmiştir. Chen vd. tarafından aynı şekilde, derin çekme işlemi üzerinde servo zımbalama ile ilişkili değişik parametrelerin etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir [23]. Çalışmalarında hem olağan parametreyi hem de servo press ile ilgili olan parametreyi birleştirerek nihai ürünün yırtılmasına neden olan faktörleri vurgulamışlardır. Derin çekme işlemine araştırmacıların ilgisini çeken bir diğer derin çekme işlemi Şekillendirme Limit Diyagramı (ŞLD) analizidir. Derin çekme işlemindeki deformasyon mekanizması lokalize boyun vermenin başlangıçtaki hasar oluşumunu tahmin etmek için tek bir kritere bağlı kalmayı imkânsız yapmaktadır. Hussaini vd. çalışmalarında özel alaşımlı malzemeler için deneysel ve teorik ŞLD analizleri üzerinde yoğunlaşmışlardır [24]. 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 SEM geliştirilmiştir. Pressleme yükünü ve maksimum incelemeyi etkileyen ilkel parça kalınlığının büyük bir etkiye sahip olduğu, zımba hızının ise önemli bir etki göstermediği tespit edilmiştir. Sayısal analizden tespit ettikleri verilerin uygulama verileri ile aynı sonuçları sağladığı kanıtlanmıştır [25].

Derin çekme işleminde herhangi bir imalat hatasının meydana gelmesi çok istenmeyen bir durumdur ve kullanılan takımlar ve kalıplar pahalıdır. Her türlü yeniden tasarım, ürünün nihai maliyetinde önemli bir artışa yol açmaktadır [26]. Korkmaz vd. AISI420 paslanmaz çeliğinin delinebilirliğini ThirdWave Advantedge yazılımı kullanarak delme simülasyonları ile incelenmişlerdir. Çalışmalarında kaplamasız karbür matkap ile üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme miktarında delme parametrelerinin ilerleme kuvveti, tork ve sıcaklık üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. İlerleme miktarı arttıkça ilerleme kuvveti ve moment değerlerinin arttığını, kesme hızının artmasıyla ilerleme kuvveti ve moment değerlerinin azalma eğilimine girdiğini tespit etmişlerdir [27]. Nas vd. sertleştirilmiş AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı işleme parametreleri için elektro erozyon işleme yöntemi ile delinmesinde, işleme parametrelerinin delik çapı ve kalitesi üzerindeki etkilerini deneysel tasarım Taguchi yöntemi ile incelemişlerdir. Deneysel sonuçları varyans analizi (ANOVA) ve sinyal/gürültü (S/N) oranı kullanarak değerlendirmişlerdir. Delik çapının ölçüsel doğruluğu üzerinde en etkili işleme parametresinin elektrot malzemesi, en az etki eden işleme parametresinin ise vurum süresi olduğunu ifade etmişlerdir [28]. Meral vd. ferritik paslanmaz çeliğin kaplamalı ve kaplamasız karbür matkap ile delinmesinde oluşan ilerleme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çaptan sapma üzerinde ilerleme miktarı ve kesme hızının etkilerini deneysel ve istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Delme parametrelerinin işleme sonuçları üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla varyans analizi uygulamışlardır. Sonuçlara göre, ilerleme miktarı arttıkça ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün

arttığını, çaptan sapmanın azaldığını, deneysel ve istatistiksel sonuçlara göre ise yüzey pürüzlülüğü ve çaptan sapma kaplamalı karbür uçta kaplamasız uca göre ortalama %5.8 ve %8.3, ilerleme kuvveti için kaplamalı karbür uçta kaplamasız uca göre ortalama %10 daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [29]. Özlü vd. kaplamasız ve TiB<sub>2</sub> kaplamalı kesici takımlar ile AA6061 alaşımının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini soğutma sıvısı kullanılmadan deneysel olarak araştırmışlardır. İşleme deneyleri sonucunda elde edilen verileri istatistiksel olarak analiz ederek en iyi işlenmiş yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin seviyelerini belirlemişlerdir. Varyans analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en etkili parametrenin %64,28 oranı ile ilerleme miktarı olduğunu tespit etmişlerdir [30]. Farklı sac plakalardan derin şekil verme ile dikdörtgen parçaların üretilmesinde, ilkel plaka türü, baskı plakası kuvveti ve zımba radyüsüne benzer çok farklı biçimlendirme parametrelerinin  $\beta$  üzerindeki etkileri hakkında uygulamalı olarak yapıldığı çok çalışma vardır. Bu çalışma St37 sacı kullanılarak dikdörtgen kapların derin çekilmesinde plastik deformasyonu en aza indirmek için kalıbın geometrik parametrelerinin limit çekme oranı ve kap kesit incelmeleri üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

## 2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Uygulanan yöntem ve malzeme seçimi (Applied method and material selection)

Kalınlığı 0,9 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 (Chemical properties of St37 steel sheet)

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 (Mechanical properties of St37 steel sheet)

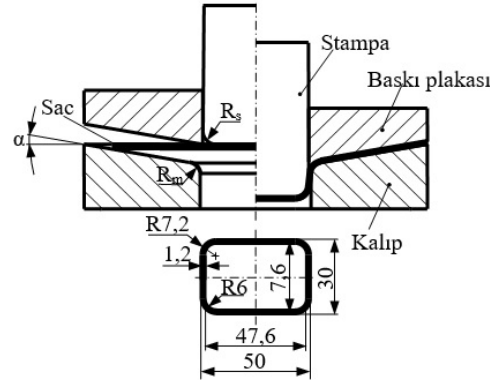
Hadde yönü (°)	Akma dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Uzama (%)
0	181.53	316.83	35.99
45	207.34	327.79	34.08
90	193.46	310.53	34.22

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 maksimum 95x115 mm boyutlarında dikdörtgen kesilerek standart ölçülerine getirilmiş ve toplam 160 deney yapılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 1’de, deneylerde kullanılan kalıp resmi ve büyüklükleri ise Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental set-up)

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 alınmış, pot çemberi kuvvetini kontrol etmek amacıyla 6 adet yay kullanılmış ve pot çemberi kuvveti sabit 1800 daN olarak uygulanmıştır. Deney çalışmaları sırasında zımbaya etki eden kuvvetlerin belirlenebilmesinde CAS LS-20T marka 200·103 kN kapasitede hassasiyeti  $\pm 2$  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 bu değerler RS232 bağlantısı aracılığı ile DNC programı vasıtasıyla saniyede  $10^{-1}$  hızda kaydedilerek bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 2. Uygulamalarda kullanılan kalıp ve zımba boyutları (The die and punch geometry used in the experiments)

Zımba-Matris arası akıcılığı kolaylaştırmak amacıyla yoğunluğu  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $885\text{ kg/m}^3$  olan Shell Tellus 68 özelliğinde yağ kullanılmıştır. Deney çalışmaları, Tablo 3'de verilen çekme parametreleri kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 3. Plastik şekil verme parametreleri (Plastic forming parameters)

Çekme parametreleri	
Kalıp üst yüzey/Pot çemberi alt yüzey açısı, $\alpha$ ( $^{\circ}$ )	0 3 6 9
Plastik şekil verme sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	20 $^{\circ}\text{C}$ (Oda sıcaklığı)
Pot çemberi plakası kuvveti (N)	1800
Matris/stampa radyüsü (mm)	6

## 2.2. İlkel parça çapının belirlenmesi ve limit çekme oranının hesabı (Determination of blank diameter and calculation of limit drawing ratio)

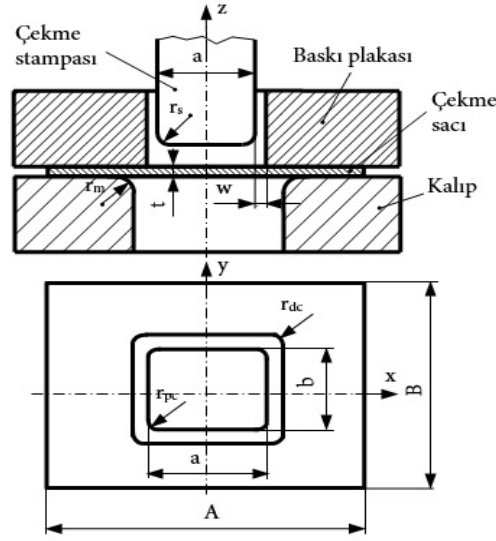
Limit çekme oranı (LÇO), derin çekmede ölçülebilen, şekillendirilebilirliğin yaygın olarak kullanılan özelliklerinden biri olup, hasarlı veya kırılma olmadan tek bir seferde ilkel parçanın maksimum çapının kap maksimum çapına oranıdır. Derin çekme uygulamalarında silindir şeklindeki kapların iyi bilinen derin şekil verme yöntemi dikdörtgen şekilli veya şekilleri belli olmayan kaplara tatbik etmek için eşdeğer çap teorisi doğru sonuçlar vermektedir [30, 32]. Dikdörtgen şekilli kapların derin çekilerek şekillendirilmesinde kalıbın ve ilkel ilkel parçanın geometrik büyüklükleri Şekil 3'de gösterilmiştir.

$A$ =İlkel parça uzun kenarı,  $B$ =İlkel parça kısa kenarı,  $a$ =Stampa uzun kenarı,  $b$ =Stampa kısa kenarı,  $r_s$ =Stampa alt radyusu,  $r_{pc}$ =Stampa köşe radyüsü,  $r_m$ =kalıp ağız radyusu,  $r_{dc}$ =kalıp köşe radyusu,  $t$ =Çekme sacı kalınlığı,  $w$ =Stampa-baskı plakası arası boşluk değerini ifade etmektedir.  $r_s=r_{pc}=r_m=r_{dc}=6$  mm,  $t=0,9$  mm ve  $w=1,2$  mm olarak alınmıştır.

$\text{ØD}_{\max}$ , ilkel parçanın eşdeğer çapı olmak üzere ve bu çapa ait dikdörtgen sacın başlangıçta Şekil 4'te ifade edildiği haliyle  $A$  uzunluğunda ve  $B$  genişliğindeki dikdörtgen ilkel parça boyutları ile uzunluğu  $a$  ve genişliği  $b$  olan dikdörtgen zımba boyutlarının köşegen uzunluklarının hesaplanması ile ilkel parça çapı ve zımba çapı hesaplanmaktadır.

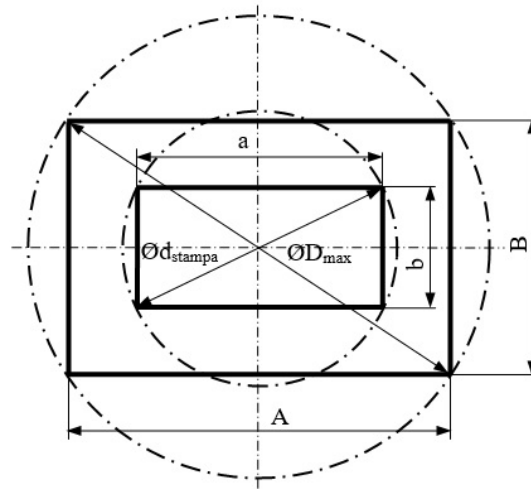
Esasında dikdörtgen kapların derin çekilmesindeki boyut faktörleri de silindirik şekil verme faktörleri gibi hesaplanmaktadır. Bununla birlikte dikdörtgen şekil vermede başka faktörlerinde dikkate alınması gerekir. Dikdörtgen şekil vermenin kayda değer bir biçimlendirme faktörü, kare olması halinde  $en/boy$

oranı  $b/a=1$  olurken dikdörtgenel kaptan en/boy oranı  $b/a=1$  olmamaktadır. Bu yüzden sınır şekil verme katsayısı hesabında değişik bir metot olarak eşdeğer çap tespitinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 3. Dikdörtgenel kabın derin çekilmesinde kullanılan kalıbın büyüklükleri (Geometric dimensions of the die used in deep drawing of rectangular cup) [36]

Başlangıç sac malzemenin genişlik x uzunluk boyutları ele alındığında, eşdeğer çapı tespit etmek için "Pisagor eşdeğer çapları" hesabı yapılmaktadır. Pisagor eşdeğer çapları Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilde açıklandığı gibi bu çapları ifade etmek için dikdörtgenin karşılıklı iki köşesi arasındaki uzunluğu göz önünde bulundurmaktadır. Böylece geçerli olan eşdeğer çaplar Pisagor metodu ile tespit edilmiştir.



Şekil 4. Dikdörtgen kap için ilkel parça ortalama çapı ( $D_{max}$ ) ve zımba ortalama çapının ( $d_{stamp}$ ) tespit edilmesi (Pisagor eşdeğer çapları) (Determination of blank sheet mean diameter ( $D_{max}$ ) and punch mean diameter ( $d_{stamp}$ ) for a rectangular cup (Pythagorean equivalent diameters)) [40]

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

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

Denklem 1 ve denklem 2'de hesaplanmış olan eşdeğer çaplar kullanılarak limit çekme oranı ( $\beta$ ), 3 ifadesi göz önüne alınarak belirlenmiştir.

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

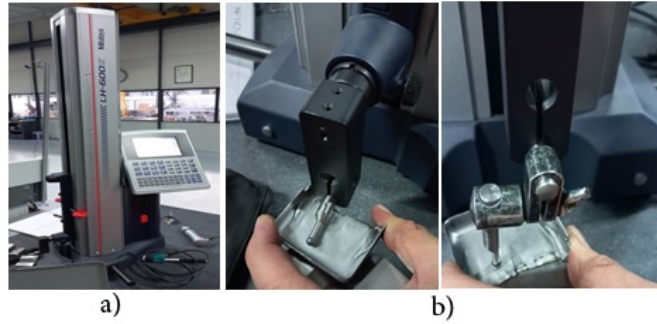
Burada,  $\varnothing D_{max}$  parça ilkel eşdeğer çap ve  $\varnothing d_{stamp}$  ıstamp eşdeğer çapını ifade etmektedir.

### 2.3. Kapların cidar kalınlık değişimlerinin ölçülmesi (Measuring wall thickness changes of cups)

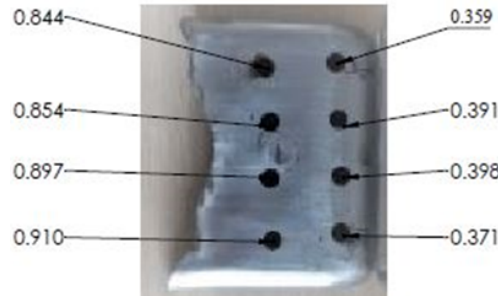
Derin çekme uygulaması sırasında plastik deformasyona uğrayan kabın üzerinde çok farklı gerilmeler oluşmakta ve bu gerilmelerden dolayı kabın cidar kalınlıklarında değişimler meydana gelmektedir [45].

Kaplardaki cidar farklılıklarının tespit edilmesi amacıyla deneylerden elde edilen kaplar hassas bir biçimde yüksekliği boyunca ve 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 10x10 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 0.001 hassasiyetinde ölçülmüştür. Şekil 5a'da, cidar kesit değişimlerinin ölçülmesinde kullanılan cihaz, Şekil 5b'de ise kesit değişimlerinin ölçülmesi gösterilmiştir. Şekil 6'da, kesilmiş numune üzerinde ölçüm noktalarının gösterildiği ve ölçüm sonucu elde edilen cidar kesit değişimi değerleri verilmiştir.



Şekil 5. Kap cidar kalınlık değişimlerinin ölçüm yöntemi: a) Kap cidar kalınlık değişimleri ölçüm cihazı, b) Kap cidar kalınlık değişimlerinin ölçülmesi (Measurement method of cup wall thickness changes: a) Cup wall thickness variation measuring device, b. Measurement of cup wall thickness changes)



Şekil 6. Cidar kalınlık değişimlerinin ölçümü için kullanılan numune ve ölçülen değerler (Sample and measured values used for measurement of wall thickness changes)

## 3. Sonuçlar ve Değerlendirilme (Results and Evaluation)

### 3.1. Kalıp/baskı plakası açısının ( $\alpha$ ) kap cidar kalınlık değişimi üzerindeki etkisi (Effect of die/blank holder angle ( $\alpha$ ) on cup wall thickness variation)

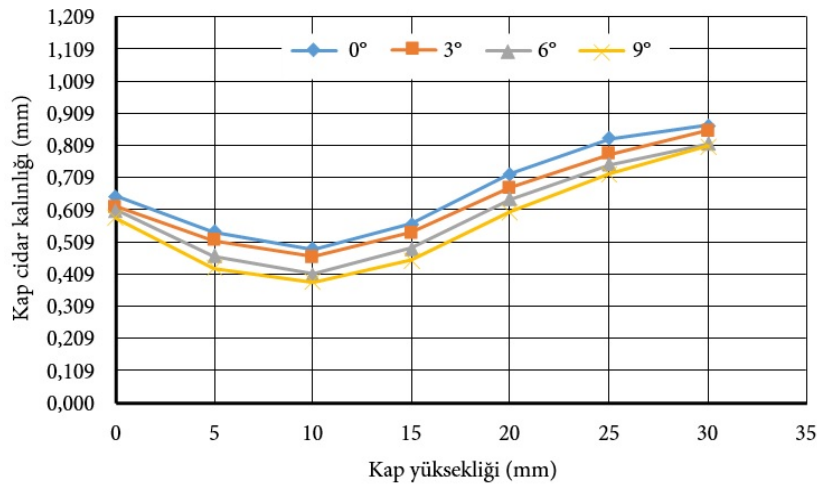
Derin çekmede sacı şekillendirmenin başarılı bir sonuç vermesi cidar kalınlıklarındaki farklılaşmaların öngörüldüğü değerlerde tutulmuş olması önemlidir. Kap cidar değişimleri ve genellikle de alt köşe radyüs bölgelerinde sac malzemenin kalitesine direkt etki yapmaktadır.

Stampa ile sac plaka arasındaki temasın neticesinde sürtünmenin büyümesi ile gerilmeler 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 kaptaki çok fazla plastik şekil değişiminin meydana gelmesine sebep olmaktadır [34, 35, 36, 38].

Şekil 7-Şekil 10'da sabit KBPK=1800 daN'luk kuvvet altında farklı limit çekme oranlarında farklı kalıp/baskı plakası açılarında çekilmiş numunelerde kap yüksekliğine bağlı olarak kap kesit incelmeleri verilmiştir.

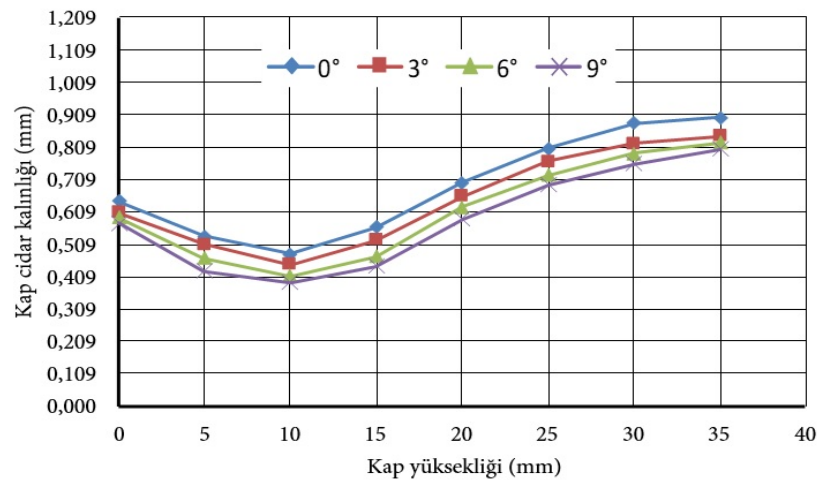
Şekil 7'de  $\beta=1,85$  ve 1800 N pot çemberi kuvveti uygulanarak kalıp/pot çemberi açısı ( $\alpha$ )'nın hadde doğrultusu ekseninde cidar kesit değişimleri üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi 0-10 mm aralığındaki kap yüksekliklerinde cidar kesit değişimlerinin azaldığı, yani sacda önemli sayılabilir incelmelerin meydana geldiği ve 0,371-0,910 mm arasında olduğu sac kalınlığındaki değişimin yaklaşık %20 civarında düştüğü tespit edilmiştir. 10 mm'den itibaren kap ağız kısımlarına doğru cidar kalınlık değişimlerinin artış gösterdiği, 25 mm'den itibaren ise cidar kalınlığının sac plaka kalınlığını geçtiği görülmüştür. Kabın cidar kesitindeki bu değişim yaklaşık %32 civarında olmaktadır.  $\alpha$ 'nın her değeri için kabın kesit cidar değişiminin aynı oranda olduğu tespit edilmiştir.  $\alpha$  büyüdükçe kap kesit incelmelerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.  $\beta=1,85$  için kalıp/baskı plakası açısının ( $\alpha$ ) cup yüksekliğine bağlı olarak cup cidar kalınlığı değişimleri üzerindeki etkisi (Effect of die/blank holder angle ( $\alpha$ ) on cup wall thickness changes depending on height of cup for  $\beta=1,85$ )

Şekil 8'de  $\beta=1,95$  ve BPK=1800 N için  $\alpha$ 'nın haddeleme doğrultusu hattı üzerinde cidar değişim kalınlığı üzerindeki değişimi görülmektedir. Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterildiği üzere  $\beta=1,95$  ve  $\beta=2,20$  için kap cidar kalınlık değişimleri maksimum seviyede değişim göstermektedir. Ancak  $\beta=2,20$ 'ye ulaştığında numune alt köşe kısımlarında en büyük incelmeyi meydana geldiği tespit edilmiş ve bu değer 0,373 mm'ye kadar düşmüştür. Bu noktadaki incelme miktarı hemen hemen %26 ile 9°'lik matris/baskı plakasında ölçülmüştür.



Şekil 8.  $\beta=1,95$  için kalıp/baskı plakası açısının ( $\alpha$ ) cup yüksekliğine bağlı olarak cup cidar kalınlığı değişimleri üzerindeki etkisi (Effect of die/blank holder angle ( $\alpha$ ) on cup wall thickness changes depending on height of cup for  $\beta=1,95$ )

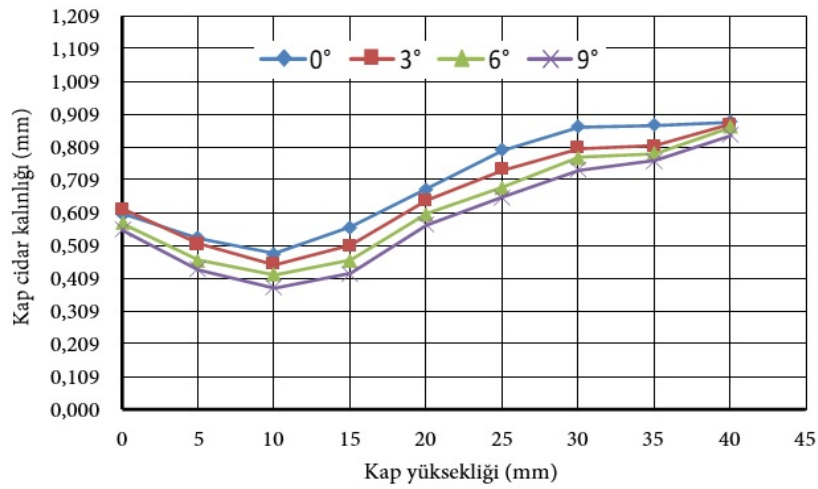
Baskı plakası kuvveti sabit ve BPK=1800 daN,  $\alpha=0^\circ$  ve  $\alpha=3^\circ$ 'lik kalıplarda özellikle  $\beta=1,85$  ve  $\beta=1,95$



olması durumlarında kap kesit incelemelerinde kayda değer oranda bir kalınlaşmanın meydana geldiği, 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 [40, 41, 42].

Şekil 9'da  $\beta=2,20$  ve  $BPK=1800$  daN altında  $\alpha$ 'nın haddeleme doğrultusu üzerinde kurs boyuna bağlı olarak kap kesit incelemelerinin değişimi verilmiştir.

$\alpha$ 'nın artmasının kap boyunun artmasında önemli bir etkisinin olduğu ancak kabın alt köşe kısımlarında ise aşırı kesit incelemelerine sebep olduğu, kap ağız kısımlarına doğru sacdaki kalınlık değişiminin % 41 oranında kayda değer bir kalınlığa kadar çıktığı, bu artışın en fazla  $\alpha=0^\circ$ 'lik matriste olduğu görülmüştür. Bu artış kap üst ağız kısımlarına doğru sac deformasyonunun zor olması sonucunda sacda üst üste binmelerin bir neticesi olduğu şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 9.  $\beta=2,20$  için kalıp/baskı plakası açısının ( $\alpha$ ) cup yüksekliğine bağlı olarak cup cidar kalınlığı değişimleri üzerindeki etkisi (Effect of die/blank holder angle ( $\alpha$ ) on cup wall thickness changes depending on height of cup for  $\beta=2,20$ )

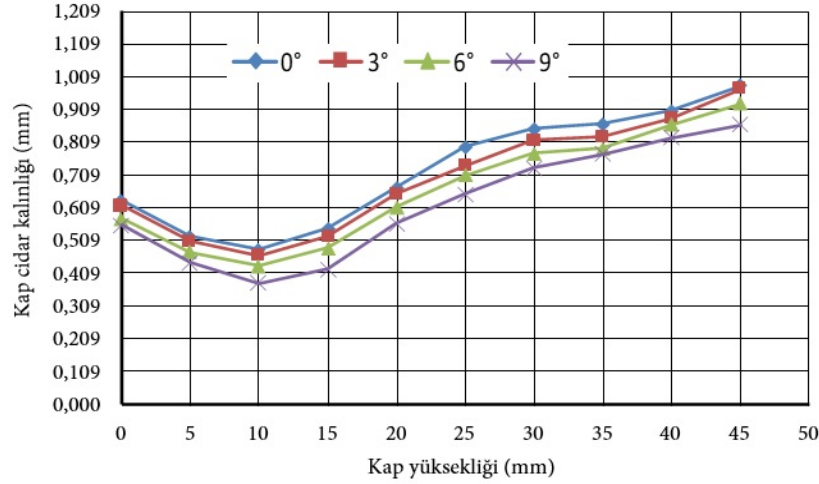
Şekil 10'da maksimum  $\beta=2,31$  ve  $BPK=1800$  N için  $\alpha$ 'nın haddeleme doğrultusunda kurs boyuna bağlı olarak kap kesit incelemelerinin değişimi verilmiştir. Kap boyunun 0-10 mm arasında olması durumunda sacın cidar kesitlerinde kayda değer bir incelmeye ve bu değer  $\alpha=9^\circ$  için 0,371 mm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. Kap boyunun 10-45 mm arasındaki bölgede 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 mm ve  $\alpha=9^\circ$  için 0,854 mm olarak ölçülmüştür. Özellikle  $\alpha=0^\circ-6^\circ$  için sac yığılmalarından dolayı kap boyundaki artışa bağlı cidar kesit değişimleri artarak özellikle 40-45 mm aralıktaki kap boyunda malzeme kalınlığına eşit ve hatta aştığı görülmektedir. Bu değerden sonra kalınlık sac kalınlığının üzerine çıkmış,  $\alpha=0^\circ$ 'de %56'lık bir artış göstererek 0,972 mm, diğer bütün matris açıları ise ortalama matris boşluğu değerine eşit olarak ölçülmüştür.

Şekil 7-Şekil 10 bir arada karşılaştırıldıklarında  $\alpha$ '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 önemli bir etki yaptığı net olarak fark edilmektedir. Bu etkinin net olarak çekilen numunenin özellikle üst ağız kısımlarında çok daha yoğun olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kalıp/pot çemberi açısının artmasına bağlı olarak sac plakasının matris içine doğru akışının artan açıya bağlı olarak daha rahat oluşundan kaynaklanmış olduğu tahmin edilmektedir.

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 farklı faktörlerin büyük bir oranda etkisinde kalmaktadır [7, 16, 17, 45].

$\alpha$  arttıkça,  $\alpha=6^\circ$  ve  $\alpha=9^\circ$ 'lik açılarda buruşmaların çok net fark edilebilir bir şekilde azaldığı, özellikle  $\alpha=9^\circ$ 'lik kalıplarda elde edilen kaplarda ondülasyonların ve 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. Sac plakasının matris boşluğuna kaymasını rahatlatmak amacıyla stampa ve matris yarıçaplarının olması gereken ölçülerde alınması gerekir. Olması gereken değerden daha fazla alınması stampa ve matris yarıçaplarında, pot çemberi tesir alanı azalacağından, sac plakasının zımba ile temasta olmayan alanı artmakta ve sac plakada olumsuz buruşmalar meydana gelmektedir [31, 33].



Şekil 10.  $\beta=2.31$  için kalıp/baskı plakası açısının ( $\alpha$ ) cup yüksekliğine bağlı olarak cup cidar kalınlığı değişimleri üzerindeki etkisi (Effect of die/blank holder angle ( $\alpha$ ) on cup wall thickness changes depending on height of cup for  $\beta=2.31$ )

$\alpha$ 'nın hemen hemen tüm değerlerinde kap kesit incelemelerinde kayda değer bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. Bu durum baskı plakası kuvvetinin yeterli olmamasından kaynaklandığı ve dolayısı ile plastik deformasyona uğrayan sac plakasının kap kenarlarında meydana gelen yüzey buruşmalarından dolayı matris boşluğu içinde sıkışmasından olduğu ve cidar kesit değişimlerinin artmasına neden olmuştur [38]. Kap kesit inceleme değişiminde kayda değer bir değişim meydana gelmesine rağmen maksimum inceleme  $\alpha=0^\circ$  kalıpta, minimum inceleme ise  $\alpha=9^\circ$  lik kalıpta olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi, matris açısının sacın kalıp boşluğu içine doğru itilmesini rahat bir şekilde gerçekleştirmesi ve dolayısıyla sac plakasının üst üste toplanmasının düşürülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [40].

Farklı matris/pot çemberi açıları için gerçekleştirilen deneylerden tespit edilen  $\beta$  değerleri yaklaşık olarak aynı olup maksimum limit çekme oranı  $\beta=2,31$  olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde tespit edilen kap kesit inceleme grafikleri değerlendirildiğinde çok farklı sonuçların oluşmadığı görülmektedir. Kap kesit incelemelerinde etkili olan en temel parametrenin  $\alpha$  olduğu tespit edilmiştir.

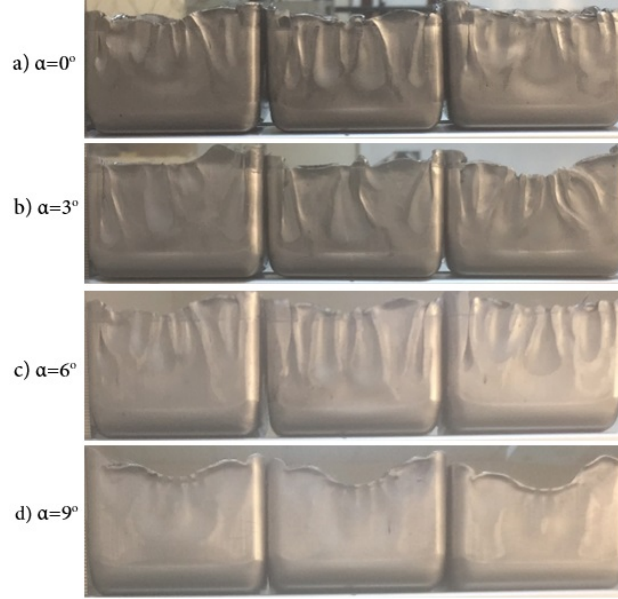
### 3.2. Kalıp/baskı plakası açısının ( $\alpha$ ) plastik şekillendirme üzerindeki etkisi (Effect of die/blank holder angle ( $\alpha$ ) on plastic forming)

Oda sıcaklığı  $20^\circ\text{C}$ 'de ve sabit 1800 N pot çemberi kuvveti altında maksimum  $\beta=2,31$  ve farklı  $\alpha$  değerlerinde üretilen kaplar Şekil 11'de sırasıyla gösterilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi derin çekme işlemlerinde dikdörtgen kapların elde edilmesinde  $\alpha$ 'nın  $\beta$  üzerindeki etkisi oldukça önemlidir.  $\alpha$ 'nın artmasına bağlı olarak  $\beta$ 'de artmaktadır. Bunun sebebi kalıp açısının yüksek olması durumunda sac plakasının kalıp boşluğuna doğru kolay bir şekilde gerçekleşmiş olmasındandır. Zımba ile kalıp içerisine itilmeye zorlanan sac plakasının çekme-basma gerilmelerine direnç meydana getirmesi  $\alpha$ 'nın artması ile azalmaktadır [44, 45, 46].

Şekil 11a ve Şekil 11b, incelendiğinde,  $\alpha=0^\circ$  ve  $\alpha=3^\circ$  olan kalıplarda  $\beta=2,31$  maksimum olarak elde edildiği, kap ağız kısımlarında gözle görülür biçimde ondülasyonların, buruşmaların ve kırışıklıkların olduğu, ancak  $\alpha=6^\circ$ ,  $9^\circ$ 'de elde edilen kapların daha düzgün ve pürüzsüz olduğu, gözle görülür hasarların oluşmadığı, sadece belirli bir ölçüde kulaklanmaların meydana geldiği görülmektedir.  $\alpha$  arttıkça, ondülasyonların, buruşmaların ve kırışmaların fazla meydana gelmediği,  $\alpha$ 'nın sac malzemenin akışını kolaylaştırdığını ve hasarsız kapların elde edilebileceğini göstermiştir. Bunun en

büyük sebebinin kalıp açısının artmasına bağlı olarak aksel kuvvette bir artışın olmasından kaynaklanmakta olduğu söylenebilir [37].



Şekil 11. Kalıp üst yüzey açısı ve pot çemberi alt yüzey açısına ( $\alpha$ ) bağlı olarak  $\beta=2,31$  ve 1800 N sabit pot çemberi kuvvetinde elde edilen kaplar (Cups obtained at depending on the angle of the die upper surface and the bottom surface of the blank holder for  $\beta=2.31$  ve constant BHF=1800 N)

İlkel parça çapı büyüdükçe sac plakada hasarların oluşmasıyla kap incelmelerinin arttığı ve zımba kuvvetinin artması gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Derin çekme işlemi sırasında sacda oluşan çok büyük gerilmelere direnç gösteremeyen sac plakalarda çatlaklar, yırtılmalar ve kopmalar meydana gelmekte ve şekil verme aşamasında sağlıklı sonuçların oluşması imkânsız hale gelmektedir. BPK'nin düşük 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 11a ve Şekil 11b) ve buruşmalar meydana gelmekte, bu da kabın üst bölgelerinde yırtılmaların ve çatlakların oluşmasında etkili olmaktadır.

#### 4 Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, St37 çeliğinden dikdörtgen kapların derin çekilebilirliğinde kalıp geometrisinin kap kesit incelleme değişimlerine olan etkisi uygulamalı olarak incelenmiştir. Elde edilen temel bulgular aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

1.  $\alpha$  büyüdükçe kap kesit incelmelerinin arttığı, bu durumun sac akışının daha rahat olduğu, numune ağız bölgelerindeki geri yaylanma oranının numune taban bölgelerindeki geri yaylanma oranından daha az olması ve şekillendirme kuvvetine etki eden başlıca parametrenin  $\alpha$  olduğu tespit edilmiştir.

2.  $\alpha$  değerlerinin büyümesi ile  $\beta$ 'da büyümektedir. St37 sacının şekillendirilmesinde  $\alpha=0^\circ$ 'de elde edilen  $\beta=1,65$  olurken,  $\alpha=3-9^\circ$  olması halinde  $\beta=2,31$  olarak elde edilebilmiştir.

3. İlkel parça boyutlarının büyük ölçülerde seçilmesi durumunda, elde edilen kaplarda ağız kısımlarına doğru ondülasyonlar, kulaklanmalar ve sacda üst üste binmeler ve yırtılmalar oluşmaktadır. Kabın alt taban köşelerinde ve boydan boya yan köşe bölgelerinde istenilmeyen derecede incelmeler meydana gelmektedir.  $\alpha$ 'nın artırılması halinde daha yüksek  $\beta$  ve daha verimli ve uygun kapların üretimi yapılabilmektedir.

4. Farklı  $\alpha$  için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen  $\beta$  değerleri yaklaşık olarak aynı olup maksimum limit çekme oranı  $\beta=2,31$  olarak elde edilmiş, ancak küçük  $\alpha$  değerlerinde elde edilen kaplarda hasarlar ve yaygın olarak buruşmalar oluştuğu görülmüştür.

5.  $\alpha$  artıkça, ondülasyonların, buruşmaların ve kırışmaların fazla meydana gelmediği, kalıp/baskı plakası yüzey açısının sac malzemenin akışını kolaylaştırdığını ve daha hasarsız kapların elde edilebileceğini göstermiştir (Şekil 11d).

6.  $\beta=2,31'$ e ulaştığında numune alt kısımdaki köşelerde maksimum incelmeyi meydana geldiği tespit edilmiş ve bu değer 0,373 mm'ye kadar düşmüştür. 0-10 mm aralığındaki kap yüksekliklerinde cidar kesit değişimlerinin azaldığı, yani sacda önemli sayılabılır bir değerde inceme meydana geldiği ve bunun hemen hemen 0,371-0,910 mm kadar olduğu, deneye tabi tutulan sac kalınlığındaki değişimin yaklaşık %20 civarında azaldığı görülmüştür.

7. Yapılan çalışma ile kap kesit incelemelerinde en etkili olan parametrenin matris/pot çemberi yüzey açısı olduğu tespit edilmiştir.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] R. R. Goud, K. E. Prasad, and S. K. Singh, "Formability limit diagrams of extra-deep-drawing steel at elevated temperatures," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 123-128, 2014. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.014
- [2] B. V. S. Rao, G. C. M. Reddy, G. K. M. Rao, and P. V. R. Reddy, "Influence of drawing ratio on thickness variation along the walls of deep-drawn cups," *Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 86-93, 2016.
- [3] R. Karl, "Simulation of sheet metal forming-necessary developments in the future," *LS-DYNA Anwenderforum*, vol. 7, no. 1, pp. 59-68, 2008.
- [4] A. S. Takalkar and L. B. M. Chinnapandi, "Deep drawing process at the elevated temperature: A critical review and future research directions," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 27, pp. 56-67, 2019. doi:10.1016/j.cirpj.2019.08.002
- [5] H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou, and M. El Shazly, "Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process," *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 20-29, 2013. doi:10.12691/ajme-1-2-1
- [6] A. C. S. Reddy, S. Rajesham, P. R. Reddy, T. P. Kumar, and J. Goverdhan, "An experimental study on the effect of process parameters in the deep draw using Taguchi technique," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 21-32, 2015. doi:10.4314/ijest.v7i1.3
- [7] K. Mac, E. T. George, and M. K. Scot, *Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes*, vol. 1. New York, USA: Marcel Dekker Inc, 2003.
- [8] Z. Kailun, J. P. Denis, W. Liliang, and L. Jianguo, "A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminum panel components," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 1, pp. 55-80, 2018. doi:10.1016/j.ijlmm.2018.03.006
- [9] B. Vukota, *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. New York, USA: Industrial Press Inc, 2004.
- [10] D. Cyril, H. George, L. Cain, V. C. Gold, and J. Ghose, *Tool Design, Special Indian Edition*. 2012.
- [11] B. Kenza, F. G. Mohammad, E. E. Hachmi, F. Musthapha, M. Mohamad, and M. Mada, "Modeling of anisotropy influence on thickness distribution of deep drawing sheet," *International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering, RCAE, Beijing*, pp. 26-28, December 2018.
- [12] S. Kilani, *Sheet Metal Forming Processes, Constitutive Modelling and Numerical Simulation, in Numerical Simulation of the Sheet Metal Forming Processes*, Springer Science & Business Media, pp. 213-295, 2010.
- [13] P. Das, S. K. Panda, and D. K. Pratihari, "Modification of initial blank shape to minimize earing in the deep drawing process," *Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, vol. 3, no. 1, pp. 99-104, 2013. doi:10.11127/ijammc.2013.02.018
- [14] S. P. Nagda, S. B. Purnank, and M. K. Shah, "Finite element simulation of the deep drawing process to minimize earing," *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 413-416, 2017.
- [15] K. Bouchaala, M. F. Ghanameh, M. Faqir, M. Mada, and E. Esaadiqi, "Numerical investigation of the effect of punch corner radius and die shoulder radius on the flange earrings for AA1050 and AA1100 aluminum alloys in the cylindrical deep drawing process," *Heliyon*, vol. 7, no. 4, pp. e06662, 2021. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e06662
- [16] D. Banabic, *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modeling and Numerical Simulation*. New York: Springer, 2010.

- [17] R. Coles and M. J. Kirwan, *Food and Beverage Packaging Technology*, 2nd Edition. London, UK: Wiley-Blackwell, 2011.
- [18] M. Colgan and J. Monaghan, "Deep drawing process: Analysis and experiment," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, no. 1-3, pp. 35-41, 2002. doi:10.1016/S0924-0136(02)00253-4
- [19] M. Hassan, L. Hezam, M. El-Sebaie, and J. Purbolaksono, "Deep drawing characteristics of square cups through conical dies," *Procedia Engineering*, vol. 81, pp. 873-880, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.10.091
- [20] M. A. Hassan, I. M. Hassab-Allah, L. M. A. Hezam, N. A. Mardi, and M. Hamdi, "Deep drawing of asymmetric cups through a conical die without blank holder," *Proceedings of the World Congress on Engineering 2015*, London, UK, July 1-3, 2015.
- [21] A. A. Dhaiban, M. E. S. Soliman, and M. G. El-Sebaie, "Development of deep drawing without blank-holder for producing elliptic brass cups through conical dies," *Journal of Engineering Sciences (JES)*, vol. 41, no. 4, pp. 1530-1548, 2013. doi:10.21608/JESAUN.2013.114876
- [22] H. Zein, M. El Sherbiny, M. Abd-Rabou, and M. El Shazly, "Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process," *Materials and Design*, vol. 53, pp. 797-808, 2014. doi:10.1016/j.matdes.2013.07.078
- [23] D. C. Chen, L. Cheng-Yu, and Y. Y. Lai, "Finite element analysis of deep drawing," *Advances in Intelligent Mechatronic Systems and Precision Engineering*, vol. 11, no. 9, pp. 1-10, 2019. doi:10.1177/1687814019874561
- [24] S. M. Hussaini, G. Krishna, A. K. Gupta, and S. K. Singh, "Development of experimental and theoretical forming limit diagrams for warm forming of austenitic stainless steel 316," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 18, pp. 151-158, 2015. doi:10.1016/j.jmapro.2015.03.005
- [25] A. Shaaban and A. S. Elakkad, "Numerical and experimental analysis of single-acting stroke deep drawing of symmetric low-depth products without blank holder," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2907-2919, 2021. doi:10.1016/j.asej.2020.11.015
- [26] K. Zheng, D. J. Politis, L. Wang, and J. Lin, "A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminum panel components," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 1, no. 2, pp. 55-80, 2018. doi:10.1016/j.ijlmm.2018.03.006
- [27] M. E. Korkmaz, T. Meral, and M. Günay, "Drillability analysis of AISI 420 martensitic stainless steel by finite element method," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 4, no. 3, pp. 223-229, 2018. doi:10.30855/GJES.2018.04.03.009
- [28] E. Nas, E. Zurnacı, and S. Yıldırım, "Modelling and optimization of electrical discharge machining parameters using the taguchi method to improve the drilling performance of hardened AISI H13 tool steel," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 99-110, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.02.03
- [29] T. Meral and M. Günay, "Drillability analysis of ferritic stainless steel with coated and uncoated carbide drill," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 159, 2019.
- [30] B. Özlü, M. Akgün, and H. Demir, "Analysis and optimization of effects on surface roughness of cutting parameters on turning of AA6061 alloy," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 151-158, 2019. doi:10.30855/gmbd.2019.02.04
- [31] C. Özek and E. Ünal, "The effect of die/blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 27, no. 3, pp. 615-622, 2012.
- [32] L. Çapan, *Metallere Plastik Şekil Verme*, 5th ed., İstanbul, Türkiye: Çağlayan Kitabevi, 2010.
- [33] A. T. Güneş, *Pres İşleri Tekniği*, vol. 2, 2nd ed., Ankara, Turkey: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2002.
- [34] K. Demiray, "Al1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi," Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2006.
- [35] Ö. Seçkin, "DKP Sac Çeliğinin Derin Çekilmesinde Matris Yüzey Açısı Değişiminin Araştırılması," Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2005.
- [36] İ. Uzun ve Y. Erişkin, *Sac Metal Kalıplığı*, Ankara, Türkiye: Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, 1997.
- [37] L. Larsson, *Warm Sheet Metal Forming with Localized In-Tool Induction Heating*, 1st ed., Sweden: Lund University, 2005.
- [38] C. Özek ve E. Ünal, "Küresel tabanlı kapların şekillendirilmesinde sacın aktığı yüzey açısının limit çekme oranı ve et kalınlığı değişimi üzerindeki etkisi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 18, sayı 015904, ss. 1149-1157, 2018. doi:10.5578/fmbd.67820
- [39] V. Savaş and Ö. Seçgin, "An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die," *International Journal of Material Forming*, vol. 3, pp. 209-213, 2010. doi:10.1007/s12289-009-0672-9
- [40] M. Cotterell, J. Schambergerova, J. Ziegelheim, and J. Janovec, "Dependence of micro-hardness on deformation of deep-drawing steel sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 124, no. 3, pp. 293-296, 2002. doi:10.1016/S0924-0136(02)00203-0

- [41] C. Özek and V. Taşdemir, "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*, vol. 32, no. 1, pp. 171-179, 2017. doi:10.17341/gazimmfd.300608
- [42] C. Özek and V. Taşdemir, "Experimental and numerical investigation of the effect of temperature on deep drawing of aluminum alloy," *Journal of Polytechnic*, vol. 21, no. 1, pp. 193-199, 2018. doi:10.2339/politeknik.392126
- [43] R.M. Aarón, I.M.C. Hugo, F.L. Dirk, and J.G.Z. Pedro, "Performance evaluation of analytical expressions for cylindrical and rectangular deep drawing force estimation," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 340-350, 2018. doi:10.1016/j.jmapro.2018.10.033
- [44] V.L. Hattalli and S.R. Srivatsa, "Sheet Metal Forming Processes-Recent Technological Advances," *International Conference on Advanced Materials and Applications (ICAMA 2016)*, Bengaluru, Karnataka, India, June 15-17, 2016.
- [45] E. Ünal and C. Özek, "A study on the wall thickness in the angular deep drawing process," *Materials Testing*, vol. 59, no. 2, pp. 178-182, 2017. doi:10.3139/120.110980
- [46] C. Özek, Y. H. Çelik, and M. B. Özek, "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*, vol. 25, no. 2, pp. 379-388, 2013. doi:10.3233/IFS-2012-0644
- [47] C. Özek and E. Ünal, "Optimization and modeling of angular deep drawing process for square cups," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 9, pp. 1117-1125, 2011. doi:10.1080/10426914.2010.532526

This is an open access article under the CC-BY license

