

**GAZ DETONASYONUyla ŞEKİLLENDİRİLEN (GDS) ALÜMİNYUM LEVHALARDA  
MEYDANA GELEN DEFORMASYON VE TEORİK MODELLENMESİ**

**Mustafa YAŞAR H.İbrahim DEMİRCİ İbrahim KADI**

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, 78200, Karabük**

**ÖZET**

Bu çalışmada, hava-yakıt hacimsel oranı 1(bir) alınarak, Asetilen( $C_2H_2$ )-Oksijen( $O_2$ ) karışımıyla detonasyon (şok hız) elde edilerek, alüminyum levhaların (Etial 5) silindirik kap biçiminde şekillendirilmesi çalışması yapılmıştır. Çalışma için çift kademeli bir detonasyonla şekillendirme düzeneği tasarlanarak imal edilmiştir. Detonasyonun elde edilmesinde Çift Kademeli Detonasyon Tüp (ÇKDT) hacminin %100 oranında gönderilen reaktant (Oksijen-asetilen karışımı) miktarı, manometre ve debi metrelerle bilgisayar kontrollü olarak yapılmıştır. Detonasyonun hızı ve basıncıda bilgisayar kontrollü olarak ölçülmüştür.. Silindirik kalıplar içinde biçimlendirilen alüminyum levhaların şekillenebilirlik miktarları ölçülerek analiz edilmiştir. Detonasyonla şekillendirmenin teorik modeli eksplisit dinamik analiz kodu kullanan ANSYS/LS-DYNA yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve model çözümlenmiştir. Deneysel ve teorik sonuçların birim uzama, kalınlık değişimleri ve şekillendirme miktarlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Geliştirilen teorik ve deneysel modelin birbiriyle %80-90 oranında uyumlu olduğu gözlemlenmiş uyumsuzluğun nedenleri araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Detonasyonla şekillendirme, Sonlu elemanlar metodu, Yüksek hızda şekillendirme,

**DEFORMATION OF ALUMINUM CYLINDRICAL CUPS FORMED  
UNDER GAS DETONATION AND THEORITICAL MODELLING**

**ABSTRACT**

In this study, cylindrical cups formation of Aluminum alloy sheets (Etial 5) has been researched by using detonation forming. The detonation has been achieved by acetylene ( $C_2H_2$ )-Oxygen ( $O_2$ ) mixture accepting the volume ratio of the mixture as 1, with this respect double staged detonation forming apparatus has been designed and manufactured. Volume of the reactant (mixture of  $C_2H_2$ -  $O_2$ ), 100%, allowed to the Double Staged Detonation Tube (DSDT) has been controlled by manometer and flow meter in conjunction with a computer programme. Shock speed and detonation pressure recorded by computer controlled system. Volume of cup shape formability of the sheets has been evaluated. Detonation forming system has been modeled and analyzed by ANSYS/LS-DYNA computer software which uses explicit dynamic analysis code. Comparison of experimental and theoretical results were obtained from unit strain, thickness variation and volume of formability have been carried out. Experimental results approximately 80%-90% agreement with the theoretical results.

**Keywords:** Detonation Forming, Finite element analyze, High velocity forming

**1. GİRİŞ**

Günümüzde sac metallerin şekillendirilmesinde malzeme ve enerji kaynaklarının verimli olarak kullanımını sağlayan, problemlerin oluşumunu azaltan ve daha iyi sonuçlar veren metotlar öne çıkmaktadır[1]. Bu ihtiyaçlara en iyi cevap veren metotlardan birisi de yüksek hızda şekillendirmedir. Yüksek hızda

şekillendirmenin; patlayıcılarla şekillendirme, gaz detonasyonu ile şekillendirme, elektro-hidrolik şekillendirme ve elektro-manyetik şekillendirme gibi değişik metotları vardır

Bu metotlar; çok büyük parçaların şekillendirilebilmesi için gerekli olan pres kuvvetlerinin, konvensiyonel metotlarla sağlanmasının çok zor hatta imkansız olması, çok karmaşık parçaların şekillendirilebilmesi, üretim periyodunun kısa olması ve prototip parçaların üretiminde tasarruf sağlanması gibi özelliklerinden dolayı cazip hale gelmiştir. Ayrıca bu metotlar kalıp boşluklarını doldurma özelliğine sahip ve girift parçaların üretilmesine elverişlidir. Özellikle uçak ve roket sanayisinde, sac metallere yapılan bazı parçaların üretiminde yüksek hızda şekillendirme teknolojilerinden yararlanmak zorunlu hale gelmiş bulunmaktadır[2]. Yüksek hızda şekillendirme teknolojisinin uygulama alanlarının nispeten sınırlı olmasına rağmen, şekillendirme işleminin daha iyi sonuçlar vermesi, şekillendirme sırasında kırışıklıkların az olması ve şekillendirme işleminin de daha kolay yapılabilmesinden dolayı tercih edilmektedir.

Sonlu elemanlar metodundaki ve bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişme ile birlikte simülasyon yöntemi yaygın olarak sac metallere şekillendirme işlemindeki mekaniğin anlaşılmasında kullanılmaya başlanmıştır. Şekillendirme sonuçlarının önceden doğru olarak tahmin edilmesi sayesinde, şekillendirilecek parçaların geliştirilme zamanını önemli ölçüde azaltmıştır. Buna ek olarak, simülasyon, deneysel yöntemlerle ölçülemeyen bazı parametrelerin ölçülebilmesine ve dolayısıyla da yeni şekillendirme teknolojilerinin gelişmesine yardımcı olmuştur. Örneğin, parça boyunca gerilim/birim şekil değiştirme dağılımı ve zımba/kalıp arasında kalan malzemenin temas noktalarındaki ara yüzeyin gerilim dağılımı gibi durumlar nümerik simülasyonlarla kolayca elde edilmiştir. Fakat, problemin karmaşıklığına bağlı olarak, nümerik modeli önceden geliştirmek o kadar kolay olmamaktadır. Bu alanda bir çok araştırmalar hala yapılmaktadır (örneğin, çeşitli konferanslar, NumiSheet, NumiForm, IDDRG ve Plastic Deformation v.b).

### 1.1 Yüksek Hızda Şekillendirme Modellerinde Kullanılan Denklemler

Malzeme uzama oranı ve sıcaklığının bir fonksiyonu olarak plastik davranışlarını tanımlayan denklemlerin hedefi, gerilme-uzama davranışını, uzama oranı etkisini matematiksel olarak ifade etmektir.

Düşük (ve sabit) uzama oranlarında, metallere bilinen deformasyon sertleşme ilişkisi Denklem 1 de verilmiştir.

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad (1)$$

Bu denklemde  $\sigma_0$  akma gerilmesini,  $n$  deformasyon sertleşmesi üssünü,  $k$  ise mukavemet katsayısını ifade etmektedir. Akma gerilmesine sıcaklığın etkisi, denklem 2'de verilmiştir.

$$\sigma = \sigma_f \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2)$$

Burada  $T_m$ , ergime sıcaklığını;  $T_r$ , işlemin yapıldığı sıcaklığı yani referans sıcaklığını;  $\sigma_f$  ise referans sıcaklıkta ölçülen referans gerilmeyi ve  $T$  ise  $\sigma$ 'nın hesaplandığı sıcaklığı göstermektedir.

Johnson ve Cook[3], bu temel denklemleri kullanarak, denklem 3'te verilen.

$$\left( \sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) [1 - (T^*)^m] \right) \quad (3)$$

formülü oluşturmuşlardır Bu denklem beş deneysel çalışmayla elde edilmiş parametreleri içermektedir ( $\sigma_0$ , akma gerilmesini,  $B$ , Mukavemet katsayısını,  $C$ , Uzama oranı katsayısını,  $m$ , Deformasyon hızı duyarlılığı üssünü ifade etmektedir. [3].  $T^*$  terimi Denklem 2.11'deki formülle hesaplanabilir.

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (4)$$

Johnson ve Cook denklemindeki  $T_r$  değerini,  $\sigma_0$ 'ın ölçüldüğü referans sıcaklığını, uzama oranı  $\dot{\varepsilon}_0$ , referans uzama oranını (uygunluk için 1'e eşit kabul edilir), birçok malzemeyi test ederek buldular [3].

Johnson-Cook denklemi en çok kullanılan ve çok başarılı bir modeldir. Üstelik bu denklem seramiklerde de kullanılmaktadır.

Bu ampirik denkleme ek olarak diğer araştırmacılarda bazı formüller geliştirmişlerdir. Örneğin Meyer ve Klopp denklem 5'i kullanmışlardır [4].

$$\tau = \tau_0 \gamma^n T^{-v} \dot{\gamma}_p^m \quad (5)$$

burada  $\tau$  ve  $\gamma$  sırasıyla, gerilmeyi ve uzamayı,  $v$  ise sıcaklıktan dolayı yumuşama parametresini,  $n$  ve  $m$  ise deformasyon sertleşmesi ve uzama oranı duyarlılığını göstermektedir. Bazı diğer araştırmacılarda denklem 6'yı kullanmışlardır[1].

$$\tau = \tau_0 \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^N \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_r}\right)^m e^{-\lambda \Delta T} \quad (6)$$

burada  $\tau_0$  referans uzama oranındaki ( $\dot{\gamma}_r$ ), malzemenin akma gerilmesini ( $\gamma=0$ ) ve  $\Delta T$  referans değerinden  $T - T_0$ 'a kadar sıcaklıktaki değişimi göstermektedir. Bu denklem üstel termal yumuşama katsayısına sahiptir[1].

Bu konunun açıklanmasında aşağıdaki noktalar da dikkate alınmalıdır.

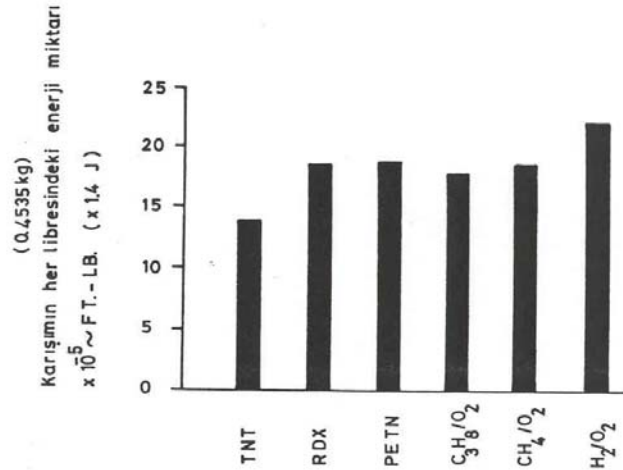
1. Uzama oranı arttıkça deformasyon işlemi tamamıyla isotermden, adiabatik hale geçer. Çünkü deformasyonda ortaya çıkan sıcaklığın parçadan dışarı çıkması için gereken zaman yoktur. Bu, malzemenin mekanik tepkisi üzerinde etkili olan adiabatik kesme düzensizliğini artırır.

2. Johnson-Cook modeli bu konudaki en iyi geliştirilmiş modeldir.

Bu çalışmada oluşturulan teorik modelin çözümünde de Johnson-Cook modeli kullanılmıştır.

## 1.2 Gaz Detonasyonu ile Şekillendirme

Gaz detonasyonu ile şekillendirmede, birbiri ile karışabilir yanıcı ve yakıcı gazların uygun bir ortamda belli oranlarda karıştırılarak, yüksek hızda yanması sonucu elde edilen kısa süreli fakat etkili enerjinin iş parçası üzerine yönlendirilmesiyle sac metale istenilen şekil verilir[12]. Yanma olayı çok hızlı ve ani olduğundan “ses üstü yanma (Detonasyon)” adını alır. Bu metotta enerji kaynağı olarak genelde patlayıcı ve yanıcı gazlardan oluşan hidrojen-oksijen, propan-oksijen veya oksijen-asetilen karışımları kullanılmaktadır. Yüksek patlayıcılarla yanıcı gaz karışımlarının verdikleri enerjilerin karşılaştırılması Şekil 1’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi patlayıcı gazlardan elde edilen enerji, plastik patlayıcılara nazaran daha fazladır.



Şekil 2.21: Yüksek patlayıcılarla yanıcı gaz karışımlarının verdikleri enerjilerin karşılaştırılması [5].

Detonasyonla şekillendirme üzerine ilk çalışmalar A.B.D.de “General Amerikan Transportation Company” tarafından yapılmıştır [6].

Gaz detonasyonu ile şekillendirme tekniğinin endüstri ile entegre olması, üretim sistemleri içinde yerini alması gerekmektedir. Çünkü detonasyonla elde edilen enerji patlayıcılarla elde edilen enerjiye eşit ancak sistem olarak daha basittir [7]. Literatüre bakıldığında gaz detonasyonu ile şekillenme üzerine az sayıda çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bu şekillendirme metodu büyük ebattaki özellikle uçak ve roket başlığı, otomobil kaportası gibi parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Aynı zamanda ince cidarlı malzemelerden

fazla derin olmayan kompleks şekillerin hızlı bir otomasyonla üretilmesi için en uygun metotlar arasındadır. Birkaç saniyede operasyonu gerçekleştirmek mümkündür.

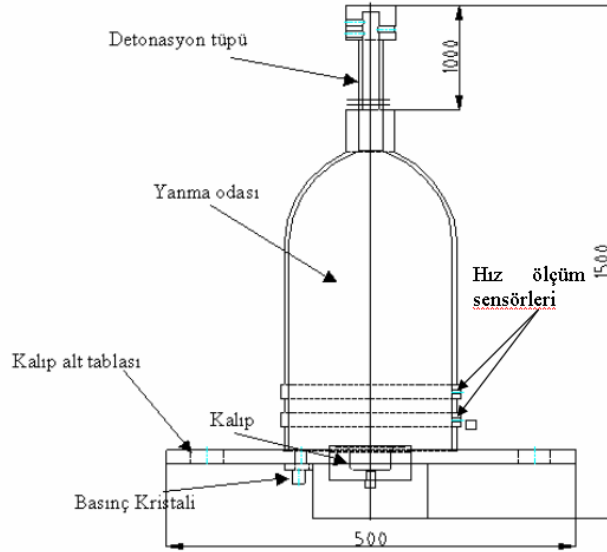
Gaz detonasyonu ile şekillendirme gelecek için umut vadeden yeni bir metottur. Pek yakında patlamalı şekillendirme ve elektro hidrolik şekillendirme arasındaki boşluğu dolduracak, patlamayla şekillendirmeye alternatif olacaktır [10].

### 1.3 Gaz Detonasyonu ile Şekillendirmenin Avantajları

- İşlem sayısının azlığından dolayı yatırım maliyeti düşük ve çalışma süresi kısalmıştır.
- Büyük çapta ve ebattaki parçaların üretimi konvensiyonel metotlara göre çok daha kolay ve ucuzdur.
- Konvensiyonel metotlarla üretimi zor ve karışık olan parçaların tek aşamalı olarak üretimi mümkündür.
- Hurdaya giden parça azlığından dolayı % 10-20 arasında malzeme tasarrufu sağlanmaktadır.
- İş parçası ısıtılmadığından ve detonasyon enerjisi şekillendirme enerjisi olarak kullanıldığından enerji sarfiyatı düşüktür.
- Detonasyon özelliği olan yanıcı gazların ucuzluğu, sınırsız sayıda ve oranda gaz karışımı kullanılabilmesi ince cidarlı malzemelerden fazla derin olmayan kompleks biçimli parçaların üretilebilmesi ve çok hızlı otomasyon gerektiren operasyonların gerçekleştirilmesi bakımından tercih edilmektedir

## 2 METARYEL VE METOT

Bu çalışmada, hızlı şekillendirme yöntemlerinden detonasyonla şekillendirme yöntemi tanıtarak, geliştirilen çift kademeli detonasyon tüpü donanımı ve yazılımı anlatılacaktır. Şekillendirme mekaniğinin temellerinin daha kolay anlaşıldığından dolayı bu şekillendirme teknolojisinin açıklanmasında da silindirik bir kabın şekillendirme işlemi ele alınmıştır. Literatürde de yapılan deneysel çalışmaların bir çoğu ya tas, yada silindirik bir kabın şekillendirilebilirliği üzerindedir [8]. Detonasyon basıncı ile şekillendirme işlemi için özel bir Çift Kademeli Detonasyon Tüp (ÇKDT) deney düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen deney donanımı, Gaz akışı kontrol sistemi, şekillendirme, vakumlama, ateşleme ünitesi olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır. Deney donanımının genel görünüşü Şekil 2’de verilmiştir.

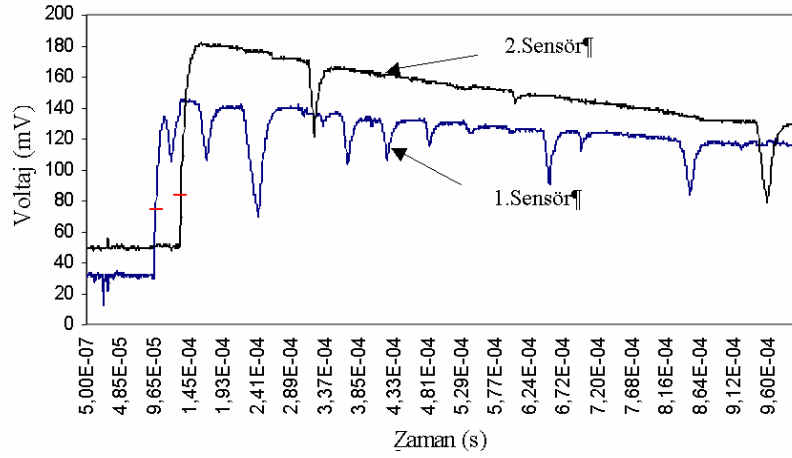


Şekil 3: ÇKDT deney düzeneğinin genel görünüşü

### 2.1 Detonasyon Hızının Ölçümü

Hızlı şekillendirme sisteminin üzerine 100 mm aralıklarla iki adet iyonizasyon sensörü monte edilmiştir. Sensör uçları da yapılan özel bir elektronik devreye bağlandıktan sonra elektronik devrenin diğer ucu Osiloskop’a bağlanmıştır. Osiloskop’u düzenlemek (Tetiklemek) için bir bilgisayar yazılımı hazırlanmıştır. Program önce osiloskopta gerekli ayarlamaları yapmakta ve daha sonra osiloskop’un, elektronik devre aracılığı ile detonasyon sisteminden aldığı verileri sayısal değerlere çevirerek bilgisayar diskine kayıt etmektedir. Yazılım hız ve basınç ölçümü için ayrı ayrı geliştirilmiştir[9]. Sistem üzerine monte edilen ilk sensör, osiloskopun bir numaralı girişine bağlanmıştır. Alev cephesi ilk sensör seviyesinden geçerken, alevin iletkenliğinden dolayı, sensörün uç kısmında kısa devre oluşmakta ve osiloskop tetiklenmektedir. 1  $\mu$ s

süreyle hız ölçümü yapılmıştır. Şekil 3'de detonasyon hızı ölçülmesi sırasında elde edilen grafik görülmektedir.

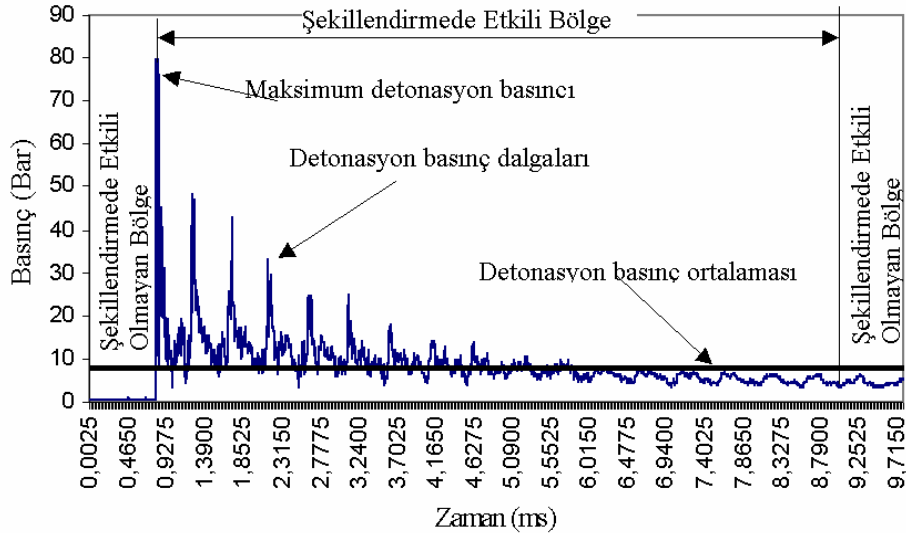


Şekil 3: Hız ölçüm grafiği

Şok dalgasının hızını ölçmek için, sensörlerden gelen sinyaller arasındaki zaman osiloskoptan ölçülmüş, 100 mm lik iki sensör arasından alevin kaç  $\mu$ s de geçtiği bulunmuş ve  $HIZ = \frac{YOL}{ZAMAN}$  formülünde yerine konarak şok dalgasının hızı hesaplanmıştır.

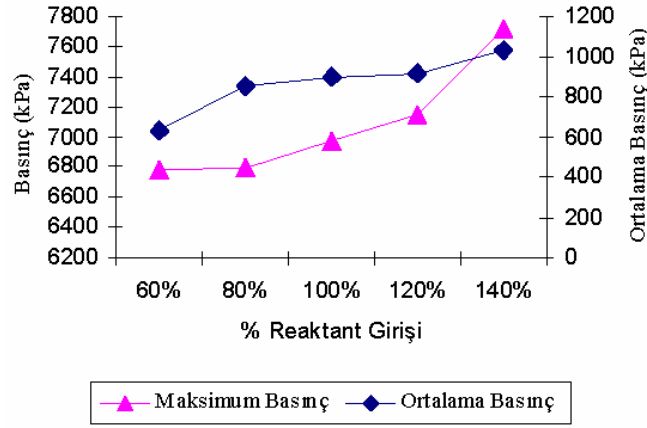
## 2.2 Detonasyon Basıncının Ölçümü

Detonasyon basıncını ölçmek için sistemin taban kısmına bir quartz kristal (s.n. 476240 K 601A) ve adaptör yerleştirilmiştir. Bu kristalin üzerine gelen detonasyon basınç dalgaları bu kristal tarafından elektrik akımına çevrilerek Kistler firmasının ürettiği A10 serisi bir Charge Amplifier tarafından kalibre edilerek osiloskopa iletmektedir. Osiloskop'un ölçüm ayarlarını yapmak ve tetiklemek, Charge Amplifierden gelen osiloskopa ilettiği akım değerlerini sayısal değerlere çevirmek içinde ayrı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.



Şekil 4: Detonasyon basıncının ölçümü sonu grafiği

Levhanın şekillenmesi sırasında ölçülen basınç grafiği Şekil 4'de görülmektedir. 10  $\mu$ s süreyle detonasyon dalgasının quartz kristal üzerine yaptığı basınç etkisi okunarak diske kayıt edilmiştir. Detonasyon basıncının 10  $\mu$ s süreyle ölçümünde 4000 veri bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 5: ÇKDT ile ölçülen maksimum ve ortalama detonasyon basınçları [10]

Al levhaların detonasyonla şekillendirilmesinde bu verilerin tamamının etkisi olmadığı düşünülmektedir. Bundan dolayı (1 Bar) ve üzerindeki basınç değerlerinin şekillendirmede etkili olduğu kabul edilmiştir.

Şekillendirme kalıbının üzerine yerleştirilen saç metalin kenarlarında oluşabilecek buruşmaları önlemek ve baskı yapmak amacıyla bir baskı plakası konulmuştur. Bu baskı plakası yanma odasının alt bölümüne vida ile sökülebilir şekilde monte edilmiştir. Baskıyı arttırmak amacıyla yay kullanılmıştır. Baskı plakasının orta kısmı, kalıp iç çapı genişliğinde delinerek, oluşan basıncın doğrudan saç metali etkilemesi sağlanmıştır. Ayrıca saç metalle baskı plakası arasındaki sürtünmeyi azaltmak için, baskı plakası üzerine, kalıp dış çapında ve 10 mm genişliğinde bir çıkıntı yapılmıştır. Baskı plakasının, quartz kristal üzerine gelen basınç etkisini engellememesi amacıyla dış kenarına quartz kristalin çapında bir çentik açılmıştır. Ayrıca, baskı plakasının etkisini kuvvetlendirmek için yapılan vida bağlantılarını sağlamak amacıyla da karşılıklı iki ayrı çentik açılmıştır. Baskı plakası Ç 1040 çeliğinden yapılmış olup herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. Yalnızca sürtünmeye maruz kalan yüzeyler taşlanmıştır. Şekillenecek levhanın sürtünmeye maruz yüzeyleri, kalıp yüzeyleri ve baskı plakasının sürtünmeye maruz yüzeyleri 10 numara ince yağ ile yağlanarak sürtünmenin minimuma inmesi sağlanmıştır.

### 2.3 Levhaların Şekillendirme İşleminin (Bilgisayar Ortamında) Simülasyonu

Günümüzde metalleri biçimlendirme konusunda dünya çapında 60'a yakın benzeşim (simülasyon) yazılımı mevcuttur. Bunların %90 kadarı üniversite ve araştırma kuruluşlarında gerçekleştirilmiş olup yalnızca % 10 kadarı ticari amaçlı olup kullanıma açıktır. Bunların çoğu eksplisit ve implisit yöntemlerle saç biçimlendirme simülasyonu konusundadır.

#### 2.3.1 İmplicit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemleri  $t+\Delta t$  anında çözülür. Saç şekillendirmedeki bir çok nonlineer davranış nedeni ile denge konumu iteratif olarak elde edilir. Genelde, denklem 7 de verilen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülür.

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (7)$$

Burada,  $K_t$  bilinen teğetsel dirençlilik matrisi,  $F$  dış kuvvetlerin vektörü,  $I$  ise iç kuvvetlerin vektörü olup,  $\Delta u$  bir zaman adımıdaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımıda teğetsel dirençlilik matrisinin yeniden oluşturulması ve ayrıştırılması gerekir yöntem teoride iki artış arasındaki adım aralığı istenen büyüklükte seçilebilmesine karşın pratikte nonlineer temas şartları nedeni ile sınırlıdır. Çözümde Bir yakınsama kriterine ulaşıldığında hesaplama durur.

#### 2.3.2 Dinamik Eksplisit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemleri  $t$  anında çözülür ve iterasyona gerek yoktur. Biçimlendirme işlemi statik değil dinamik bir işlem olarak algılanır ve hareket denkleminin entegrasyonu için merkezi farklara dayalı bir çözüm adımı kullanılır:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(i+1)} &= \mathbf{u}^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{\mathbf{u}}^{(i+\frac{1}{2})} \\ \mathbf{u}^{(i+\frac{1}{2})} &= \dot{\mathbf{u}}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^i}{2} \ddot{\mathbf{u}}^{(i)} \end{aligned} \quad (8)$$

buradaki merkezi farklar operatörü bir önceki artışlardan bilinen hız ve ivme değerlerini kullandığından yöntem eksplisit olarak adlandırılır. İvme için;

$$\ddot{\mathbf{u}}^{(i)} = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{F}^{(i)} - \mathbf{I}^{(i)}) \quad (9)$$

formülü kullanılır ki burada  $\mathbf{M}^{-1}$  kütle matrisinin tersi olup “lumped mass” yöntemi kullanıldığı takdirde ters alma işlemi diyagonal bir matrisin tersini alma işlemi şeklinde kolaylaşır. Kararlılık açısından kullanılabilir zaman ise adım genişliği sınırlıdır.  $l$ ; karakteristik sonlu eleman büyüklüğü,  $c$ : malzemedeki ses hızı olmak üzere, kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak

$$\Delta t = \frac{l}{c} \quad (10)$$

eşitliği ile bulunur. Yani bir zaman adımı içinde bir dalga en fazla bir sonraki sonlu elemana ulaşabilir. Ağ yoğunluğunda mm seviyesinde eleman büyüklükleri kullanıldığında (ve örneğin çelikteki ses hızı 5 mm/μs olduğunda) μs mertebesinde zaman adımları elde edilir. Bu demektir ki bir derin çekme işleminin simülasyonu  $10^5 - 10^6$  kadar zaman adımına gerek duyulabilir. Bu da doğrudan hesaplama zamanına yansır. Bu problemi gidermek için şekillendirme gerçekte olduğundan daha hızlı şekilde oluyormuş gibi benzeştirilir. Ancak bu durumda ortaya çıkacak atalet etkilerini gidermek için (örneğin sönüm elemanları kullanmak gibi) önlemler alınmalıdır. Araştırmalar, işlem hızının sonuçları etkilemeden on katına çıkarılabileceğini göstermiştir. Malzeme özelliklerinin ve katsayıların şekil değiştirme hızına bağlı olduğu malzeme modelleri için ise hızın değiştirilmesi söz konusu olamaz. Alternatif bir yöntem de gerçek işlem hızı sabit tutularak malzemenin yoğunluğunun artırılmasıdır. Böylece malzeme içindeki ses hızı küçültülür. Yoğunluğun 100 kat artırılması ses hızını 10 kat düşürür ve problem 10 kat hızlı çözülür.

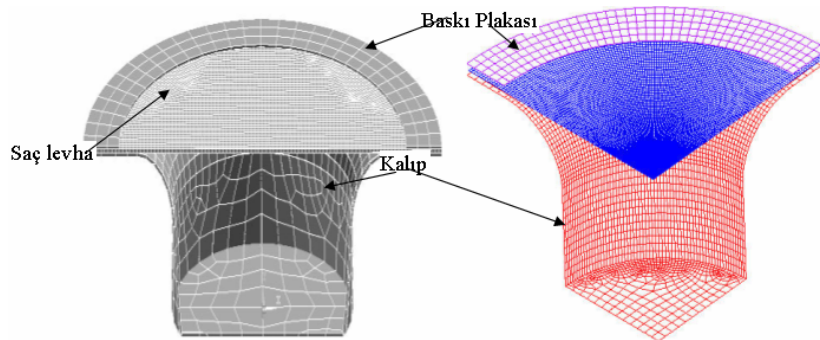
## 2.4 Teorik Modelleme

### 2.4.1 Modelin Tasarlanması

Teorik model, ANSYS programının grafik işleme birimiyle (Graphic Interface Unit GUI) deneysel çalışmada kullanılan kalıp, sac levha ve baskı plakası, bire bir oranında çizilmiştir Şekil 5. Kullanılan kalıbın derinliği ve üst kavis yarıçapı farklı olduğundan 10 ayrı kalıp modeli tasarlanmıştır. Deney sisteminde olduğu gibi aynı ölçülerde bir baskı plakası tasarlanmış çekme yatağı kullanılmamıştır. Tasarımda iki değişik ağ örme yöntemi kullanılmıştır. Birinci yöntemde sac levhanın tamamına eşit aralıklarla ağ örülmüş ikinci yöntemde ise deformasyonun çok olduğu bölgelere daha sık ağ örülmüş deformasyonun az olduğu bölgelerde ise daha büyük elementlere bölünmüştür. Bunun sebebi problemin çözüm zamanını azaltmaktır.

### 2.4.2 Modele Ağ Örme

Sac levha, kalıp ve baskı plakası S.R. Co Rotation thin-shell 163 numaralı element kullanılarak ağ örülmüştür. Element için kullanılan özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



:Şekil 6: Detonasyonla şekillendirmenin sonlu elemanlar modelinin kesit görünüşü



Tablo 4.4: Kabuk 163 elementin özellikleri

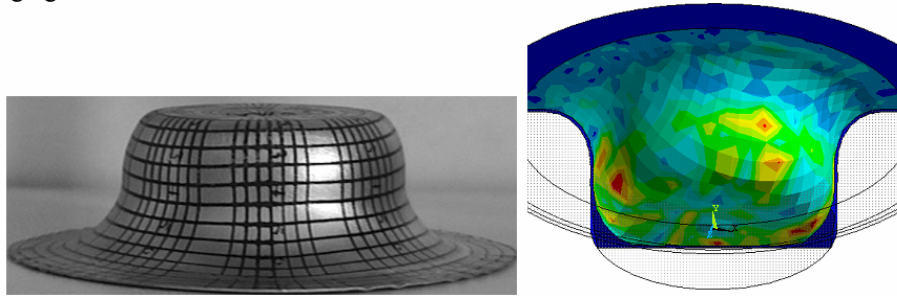
Kesme Faktörü	SHRF	5/6[85]
Birleşme nokta sayısı	NIP	4
1. Düğümdeki kalınlık	T1	0,5
2. Düğümdeki kalınlık	T2	0,5
3. Düğümdeki kalınlık	T3	0,5
4. Düğümdeki kalınlık	T4	0,5
Referans yüzey	NLOC	Mid Surface

Tablo 4.7. Johnson-Cook malzeme modelinde kullanılan parametreler

Malzeme Özellik Adı	Değeri
Yoğunluk DENS	0.002705 Kg/mm <sup>3</sup>
Elastikiyet Modülü EX	69000 MPa
Poisson Oranı NUXY	0,33
A	265 MPa
B	426 MPa
N	0,34
C	0,015
M	1
Ergime Derecesi	657 °C
Oda sıcaklığı	33 °C
Etkili plastik uzama	10 <sup>6</sup>
Özel ısıtma	50 °C
Deformasyon gerilmesi	1000
C1	2000

### 3. DENEYSEL VE TEORİK MODEL SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMASI

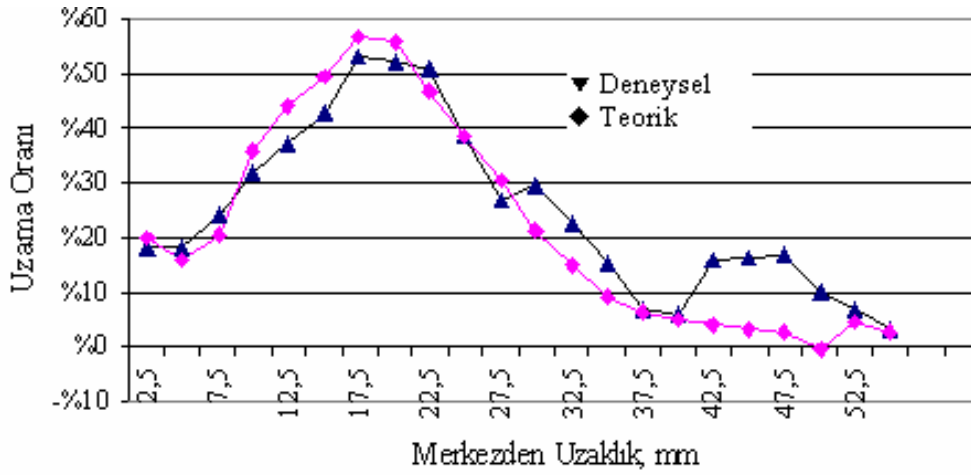
Bu çalışmada 25 mm derinliğinde ve üst kavis yarıçapı 15 mm olan bir kalıp kullanılmıştır. Levhanın şekillenme sırasında kalıbı yeteri kadar doldurduğu görülmüştür. Deney sonucu Şekil 7a'da ve silindirik parçaların şekillendirilmesi sırasında ölçülen basınç verileri kullanılarak ANSYS/LS-DYNA da elde edilmiş teorik çözümler grafiği ise Şekil 7b'de verilmiştir. Teorik sonuç ile şekillendirilmiş parçalar arasında tam bir benzeşme olduğu görülmektedir.



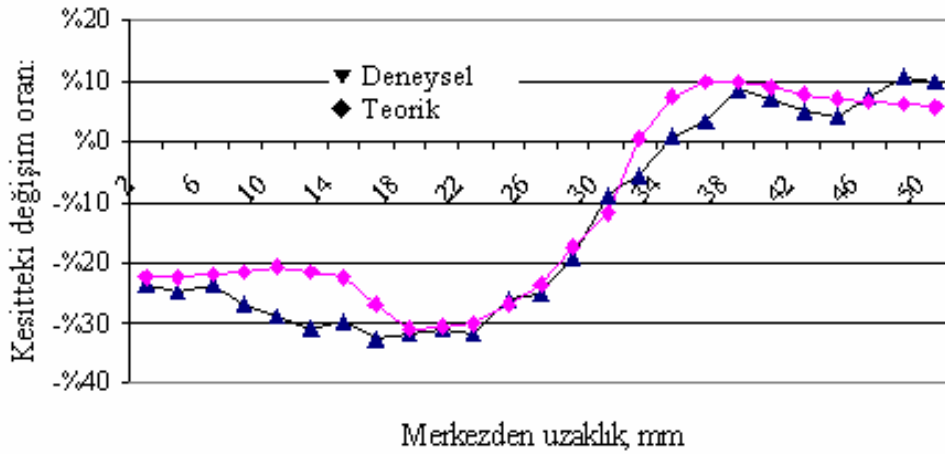
Şekil 7: Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması.

Deney yapılırken ölçülen maksimum detonasyon basınç değeri 6,78 MPa, ortalama detonasyon basıncı 0,845 MPa ve detonasyon hızı ise 2729 m/s dir. Levha şekillenirken kalıp tabanına çarpmanın etkisiyle orta noktasında yaklaşık 6 mm çapında ve 1 mm derinliğinde bir krater oluşmuştur. Levha kenarlarında çok az miktarda kırışıklık meydana gelmiştir. Levhanın şekillenme sonucunda elde edilen uzama grafiği ve kesitteki değişim oranı, teorik sonuç ile karşılaştırılmalı olarak sırasıyla Şekil 8'de ve Şekil 9'da verilmiştir. Levha kenarlarında çok az miktarda kırışıklık oluşmuştur. Levha merkezinin yaklaşık 15-25 mm uzaklığındaki aralıkta %60 civarında birim uzama görülmüştür. Aynı şekilde merkezden 15-20 mm uzaklıktaki kesitte ise %30 civarında kesitte inceleme olduğu ölçülmüştür. Levha dış kenarının yaklaşık 15 mm lik kısma kadar olan tüm alanda %10 civarında kalınlaşma olduğu belirlenmiştir. Bu alan kalıp üst yüzeyine temas eden ve en fazla basmaya maruz alanda oluşmuştur.



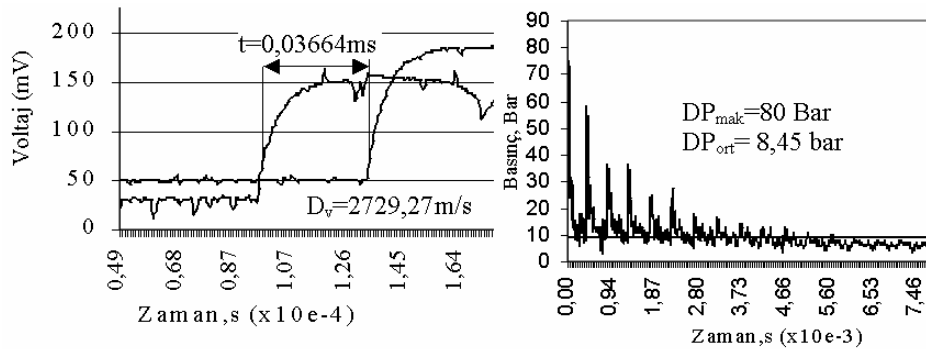


Şekil 8: Birim uzama grafiği

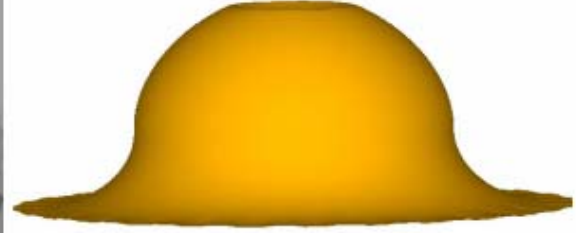
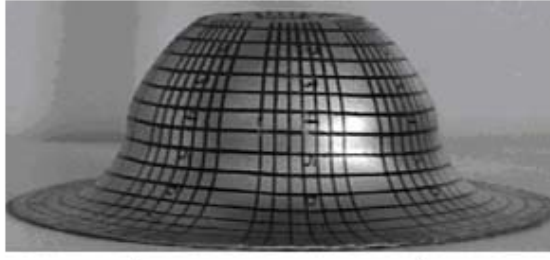


Şekil 9: Kesitteki değişim oranı

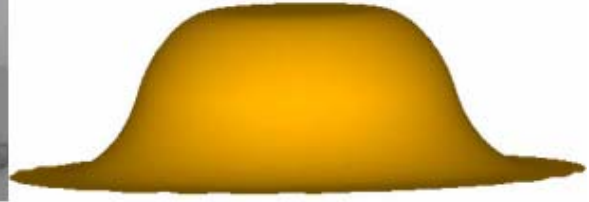
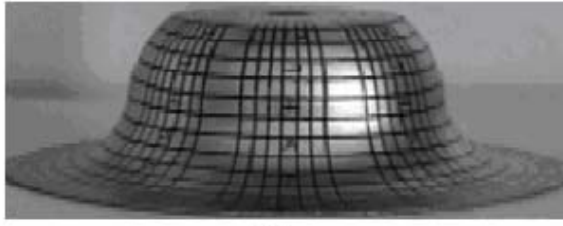
Bu deney için ölçülen kalınlık değişimi incelenirse, teorik sonuç ile deney sonucu arasında uyum olduğu fakat bölgesel uzamalarda deneysel sonucun, nümerik sonuçtan ortalama %5 kadar fazla çıktığı görülmektedir. Bunun en büyük nedeni; deney sırasında detonasyonun etkisiyle oluşan sıcaklığın, teorik modelde hesaba katılmamasındandır, yani detonasyonun etkisiyle parça yüzeyinde oluşan yüzeysel ısınmalar ve hatta bazı bölgelerde yüzeysel ergimeler görülmüştür. Teorik modelde bu ısınma 33°C kabul edilmiştir. Ergime sıcaklığı yüksek malzemelerde yapılan deneylerde bu oranın çok düşük çıkması bu teoriyi desteklemektedir[10]. Ortalama şok basıncın 0,750 MPa altına düştüğü durumlarda ise levha kalıbı yeteri kadar doldurmamakta ve yeterli şekillenme oluşmamaktadır[10]. Şekil 10'da deney esnasında ölçülen hız ve basınç grafikleri görülmektedir.



Şekil 10: Levhannın şekillendirilmesi sırasında ölçülen hız ve basınç grafiği.



$DP_{\text{mak}}=6,1226 \text{ MPa}$	$DP_{\text{ort}}=0,859 \text{ MPa}$	Kalıp Derinliği=25 mm
$V_r/V_{\text{ÇKDT}}=\%60$	$R_2=15 \text{ mm}$	$D_v=2898 \text{ m/s}$
Şekillenme Zamanı=	$9,05 \times 10^{-3} \text{ s}$	



(a)

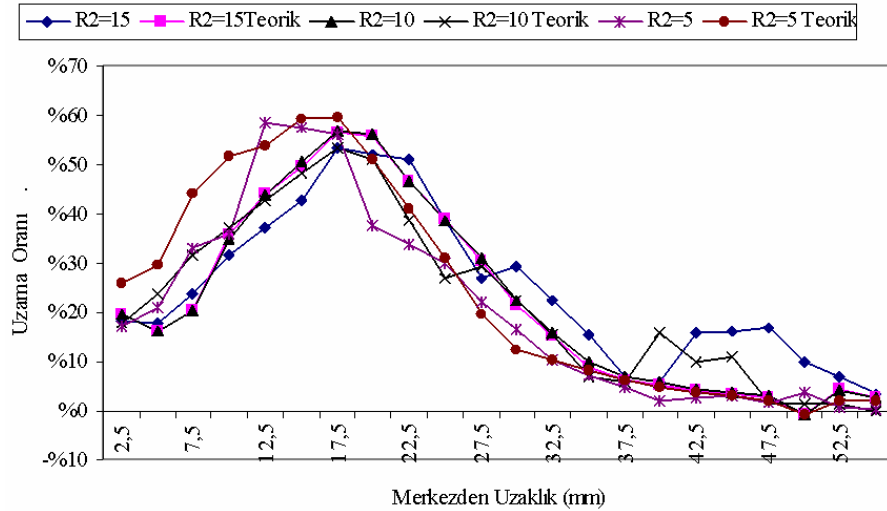
(b)

$DP_{\text{mak}}=6,855 \text{ MPa}$	$DP_{\text{ort}}=0,637 \text{ MPa}$	Kalıp Derinliği=25 mm
$V_r/V_{\text{ÇKDT}}=\%80$	$R_2=15 \text{ mm}$	$D_v=2631 \text{ m/s}$
Şekillenme Zamanı=	$8,8 \times 10^{-3} \text{ s}$	

Şekil 11: Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

Şekil 11'de maksimum basınçları 6,12 MPa ve 6,85 MPa olan iki ayrı deney çalışmasında elde edilen silindirik parçaların şekillendirilmesi sırasında ölçülen basınç verileri kullanılarak elde edilmiş teorik çözümlere sonuçlarıyla karşılaştırılması görülmektedir.

Kavis yarıçapının uzamaya etkisi, karşılaştırmalı olarak Şekil 12'de görülmektedir. Bu grafik elde edilirken 3 değişik kavis yarıçapının etkileri ve teorik çözümlere sonucunda elde edilen datalar karşılaştırılmıştır. Deneylerde 25 mm derinliğinde bir kalıp kullanılmış ayrıca yaklaşık aynı basıncı elde etmek için sisteme aynı oranda reaktant gönderilmiş ve maksimum detonasyon basıncı 8 MPa, ortalama detonasyon basıncı ise yaklaşık 0,9 MPa ölçülmüştür. Şekil 12'deki grafikten kavis yarıçapı küçüldükçe uzama oranının arttığını söylemek mümkündür.



Şekil 12: Kalıp kavis yarıçapının uzamaya etkisinin karşılaştırmalı grafiği

### 3 SONUÇ VE TARTIŞMA

ÇKDT hacminin, %100'ü oranında reaktant doldurularak deneyler yapılmıştır. Reaktant bir buji ile ateşlenerek, birinci boru içinde maksimum detonasyon hızına ulaşılmış, ikinci kademe tüpte ise detonasyon hızında önemli bir değişimin olmadığı tahmin edilmektedir. Çeşitli kaynaklarda kullanılan reaktantın özelliğine ve oranına göre değişimle birlikte hava-yakıt oranının bir olduğu tek kademeli detonasyon tüp deneylerinde Asetilen( $C_2H_2$ )-Oksijen( $O_2$ ) karışımı için şok dalgasının hızı: 2750 m/s civarında verilmiştir. ÇKDT'le yapılan bu çalışmadaki deneylerde detonasyon hızı ikinci kademe tüp üzerinde 2352-3030 m/s arasında ölçülmüştür. ÇKDT sisteminde hızın farklı çıkmasının nedeni, çift kademeli tüp kullanımından, yanma odasının akustik özelliğinden, farklı basınçlarda deneyler gerçekleştirmek için ÇKDT'ye gönderilen reaktant miktarının farklı olmasından ve ÇKDT'nin kapalı olmasından kaynaklanmıştır. Bu çalışmanın amacı detonasyon basınç ve hızını değiştirerek, farklı detonasyon şartlarında alüminyum levhaları şekillendirmek olduğundan, bu değişiklik istenen bir değişikliktir. ÇKDT'de  $C_2H_2-O_2$  karışımlarıyla tasarlanan ÇKDT'ye benzer detonasyon basınç ve hızı verilerine literatürde ulaşmak mümkün olmamıştır. Her türlü akustik geometri ve şartların değişmesi detonasyon hızını etkiler.

Deneyel ve teorik çalışmalardan elde edilen verilere dayanılarak en iyi şekillendirme sonucu, kalıp derinliğinin 27,5 mm olduğu, üst kavis yarıçapının 10 mm olduğu, maksimum basıncın 6,974.MPa, ortalama basıncın 0,898 MPa ve detonasyon hızının 2800 m/s civarında olduğunda elde edilmiştir.

### KAYNAKLAR

1. Meyers, M.A.: “**Dynamic Behavior of Materials**”, John Wiley & Sons, Inc. New York (1996)
2. Vohnut, V.J.: “A Hybrid Quasi-Static/Dynamic Process for Forming Large Sheet Metal Parts from Aluminum Alloys”, The Ohio State University, **PhD Thesis**, USA, (1998)
3. Johnson, G.R.; Cook, W.H.: “A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures”, **Presented at the Seventh International Symposium on Ballistics**, The Hague, The Netherlands, April (1983)
4. Meyer, L.W. Meyer, M.A.: “**In Shock-Wave and High Strain Rate Phenomena in Materials**”, Dekker, New York, (1992)
5. Gavas, M.: “Detonasyonla Derin Çekme İşlemlerinde Etkili Parametrelerin İncelenmesi”, **Doktora Tezi**, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1998)
6. Venkata S. Balanethiram.: “Hyperplasticity : Enhanced Formability of Sheet Metals at High Workpiece Velocity”, **PhD thesis**, The Ohio State University, Columbus, OH, (1996).
7. Padmanabhan, M.; Tech. B.: “Wrinkling And Springback In Electromagnetic Sheet Metal Forming And Electromagnetic Ring Compression”, The Ohio State University, **Ms. Thesis**, (1997)
8. Alpers, B.; Bergmann, D.; Galanulis, K.; Winter, D.: “Advanced Deformation Measurement in Sheet Metal Forming”, **GOM**, Gesselschaft für Optisch Meßtechnik, Germany, (2000)
9. Kadı, İ.: “Detonasyon Olaylarının Bilgisayar Destekli Ölçme ve Analizi”, **Doktora Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1992.)
10. Yaşar. M. “Yüksek Hızda Şekillendirilen Alüminyum Alaşımlarında Oluşan Deformasyonun İncelenmesi”, **Doktora Tezi**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2001)
11. Gündü, T.: “Derin Çekme Saçlarının Derin Çekilebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi”, **Master Tezi**, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2000).
12. Honda, A.; Suzuki, M.: “Sheet Metal Forming by Using Gas Imploding Detonation”, **Jor. of Materials Processing Technology**, 85 (1999), 198-203