

# Derin Çekme İşleminde Eksenel Simetrik ve Kare Taslakların Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

Oktay Yıldırım  
Makina Yüksek Mühendisi  
Teknik Merkez  
Trakmak Traktör ve Ziraat  
Makinaları Tic. A.Ş.  
06560 Gazi, ANKARA

Haluk Darendeliler  
Doçent  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
06531 ANKARA

*Derin çekme işlemi sıkışma, gerilme, bükülme ve sürtünme etkilerinin birlikte olduğu sac malzemelerin şekillendirilmesi yöntemlerinden biridir. Sayısal çözüm yöntemleri ile, basit parçalar dışında, işlemin karmaşık yapısı nedeniyle bütün etkileri tamamen kapsayan çözüm elde etmek çok zordur. Bu nedenle, derin çekme işleminde halen deneme yanılma yöntemi de sayısal analiz ile birlikte kullanılmakta ve deneysel çalışmalar derin çekme işleminin incelenmesinde önem taşımaktadır. Bu çalışmada derin çekme işlemi deneysel olarak araştırılmış ve deney sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sayısal sonuçlarla birlikte incelenmiştir.*

## GİRİŞ

Metal levha şekillendirme yöntemlerinden biri olan derin çekme, metal levhanın zımbayla kalıbın içersine doğru itilmesi ve bu sayede kalıp ve zımbanın çeperlerince şekillendirilmesiyle meydana gelir.

Derin çekmenin genel olarak bilinen en basit halinde dairesel bir taslak uygun kalıbın üzerinde ortalanarak yerleştirilir ve önceden belirlenen baskı plakası kuvveti uygulanır. Zımbanın ilerlemesiyle taslak en son halini alır. Üretilcek parçanın şekline göre, birden çok çekme işlemi gerekebilir. Derin çekme, gerilme, sıkışma, bükülme gibi karmaşık şekil değiştirme safhalarını içerdiğinden, işlemin tam bir analitik çözümü elde edilememiştir. Günümüzde, genellikle, deneme-yanılma yöntemi derin çekme işleminin analizinde kullanılmaktadır.

Genel anlamıyla derin çekme işlemini tanımlayan, ilk analitik ve deneysel çalışmaları Chung ve Swift [1,2,3] yapmıştır. Daha sonra, Woo [4,5] tarafından kuvvetlerin korunması, plastisite teorisi ve eksenel simetri sonucu oluşan gerinim bağıntısı prensipleri kullanılarak geniş bir araştırma yapılmıştır. Baskı plakası, kalıp ve zımbanın ucundaki temas sorununu da hesaba alarak çalışan Wifi [6] direkt artışlı yöntem ile hesaplama zamanını azaltmış ve tutarlı sonuçlar elde etmiştir.

Crane [7] deneysel çalışmasında üç değişik çaptaki taslağa 15° açılı iki doğru çizmiş ve zımbanın altında iki doğrunun hiç bozulmadan aynı kaldığını görmüştür.

Ayrıca, derin çekilmiş taslağın duvarlarında iki çizginin paralel olduğunu ve kenarlara gidildikçe çizgilerin birbirlerine yaklaştığını gözlemlemiştir.

Yamada [8] eksenel simetrik olmayan işlemler için metal akışı, yırtılma özelliği ve şekillendirme limitini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada kalıbın karmaşık yapısı ve şekillenmemiş bölümlerin meydana getirdiği metal akışındaki düzensizliklerin, kalıp ile zımba arasında kalan bölge etrafında yırtılmaya neden olduğu görülmüştür. Hiraiwa ve Kondo [9] tarafından alüminyum ve alaşımları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar da limit çekme oranı (maksimum taslak çapının, zımba çapına olan oranı) araştırılmıştır. Kararsızlığın kalıp ile zımba arasındaki bölgede nominal gerilimin malzeme gerilme kuvvetine eşit olduğu zaman olduğu gözlemlenmiştir.

Genelde işlem karmaşık bir yapıda ve sayısal çözümlerin hesaplama zamanları uzun olduğundan, yapılan çalışmalar çoğunlukla çekme işlemini etkileyen parametreler üzerinde ayrı ayrı yoğunlaşmıştır. Yakın geçmişte bilgisayar alanında sağlanan gelişmeler sonucunda, sayısal çözümler üzerine yeni ve başarılı çalışmalar yapma olanağı bulunmuştur. Dairesel taslaklar için sayısal ve analitik olarak tam bir çözüm Kaftanoğlu tarafından gerçekleştirilmiştir [10].

Darendeliler ve Kaftanoğlu işlemi teorik olarak incelemiş ve sonlu elemanlar yöntemiyle derin çekme problemini çözen bir kod geliştirmişlerdir [11]. Yapılan bu çalışmada değişik malzemeler için çeşitli kalıp setleri kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir.

Daha sonra, Yıldırım tarafından yapılan deneysel çalışmada bu geliştirilen kod ve Abaqus paket programı birlikte kullanılmış ve şekil değiştirme sonuçları karşılaştırılmıştır [12].

## DERİN ÇEKME DENEYLERİ

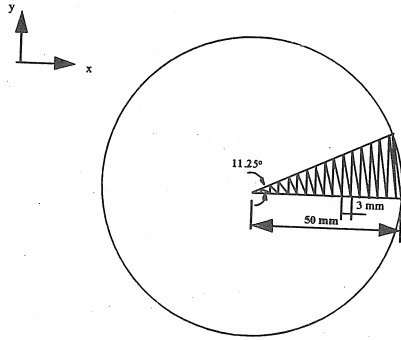
Bu çalışmada derin çekme işlemi üç kalıp seti kullanılarak incelenmiştir. Bu setlerden iki tanesi çapları birbirinden farklı aksenal simetrik kalıplardır. Zimba çapları, 45 mm ve 50 mm olan iki derin çekme seti de 1,5 mm kalınlığına kadar metal levhaların çekilmesinde kullanılabilir. Diğer kalıp ise 40mm x 40mm kare geometridedir ve 1 mm kalınlığına kadar olan metal levha çekme işlemleri için uygundur.

Malzeme olarak derin çekme çeliği ve pirinç kullanılmıştır. Bu malzemeleri sayısal analizlerde tanımlamak için derin çekme işleminden önce standart çekme testi yapılarak mekanik özellikleri bulunmuştur. Bu özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme Özellikleri

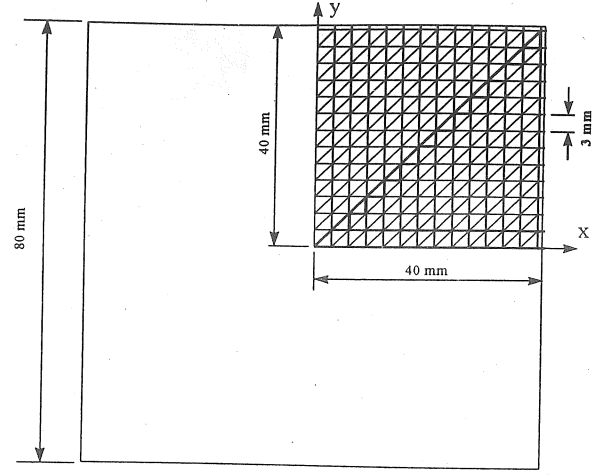
Malzeme	Çelik	Pirinç
Young modülü (E)	210 GPa	107 GPa
Poission oranı ( $\nu$ )	0.3	0.3
Akma mukavemeti ( $\sigma$ )	155 MPa	285 MPa

Özellikleri test sonucu tesbit edilen malzemeler uygun kalıp şekillerinde kesilmiştir. Dairesel taslaklar 120 mm çapında, kare taslaklar 80 mm x 80 mm boyutlarında oluşturulmuştur. Hazırlanan taslaklardan daire olanlar merkezden 11.25° açıyla çizilen iki çizgiyle bölünmüş ve 3 mm'lik aralıklarla elemanlara ayrılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Dairesel Taslağın Çizimi

Kare taslağın ise simetriden dolayı dörtte biri seçilmiş ve üçgen elemanlara bölünmüştür (Şekil 2). Deneysel analizlerde kenarların orta noktası boyunca ve köşegen boyunca olan elemanlar kullanılarak ölçüm yapılmıştır.



Şekil 2. Kare Taslağın Çizimi

Bu yöntemle daire taslaklar için 33 nokta ve 31 eleman, kare taslaklarda ise 50 nokta ve 37 eleman elde edilmiştir. Sayısal analizlerde bu elemanlar için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deneylerden önce tesbit edilen noktalar Üniversal mikroskopla ölçülmüş ve böylece ilk uzunluklar milimetrenin binde biri hassasiyetinde elde edilmiştir.

Deneyler sırasında malzemeler için 200 M'luk sabit baskı plakası kuvveti kullanılmış ve 10 mm/dak hızla çekme işlemi yapılmıştır. Taslaklar her deney seti için 25 mm'ye kadar çekme derinliği 5'er mm artırılarak 5 farklı derinlikte çekilmiştir. Deneylerden sonra, şekil değiştirmiş taslaklar elektrikli tel kesme makinası yardımıyla ölçüm çizgileri etrafından kesilmiştir. Bu sayede eldeki taslaklar mikrometre yardımıyla ölçülebilmüş ve şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir.

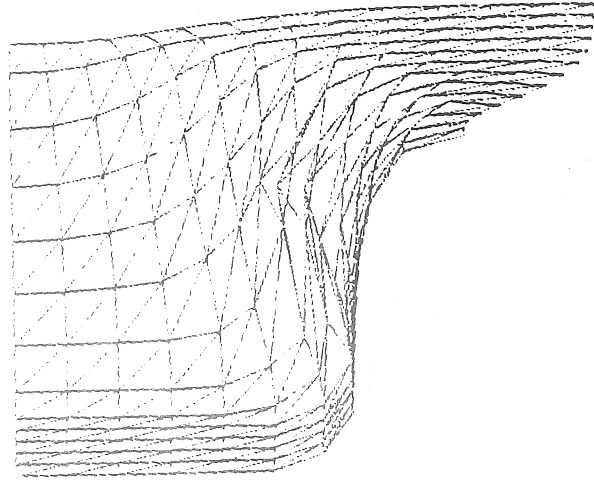
## DENEYLERİN İNCELENMESİ

Derin çekme işleminde elde edilen deney sonuçlarını karşılaştırmak için Abaqus [13] ve Darendeliler [14] tarafından geliştirilen sonlu elemanlar yöntemini içeren kod (SEY) kullanılmıştır.

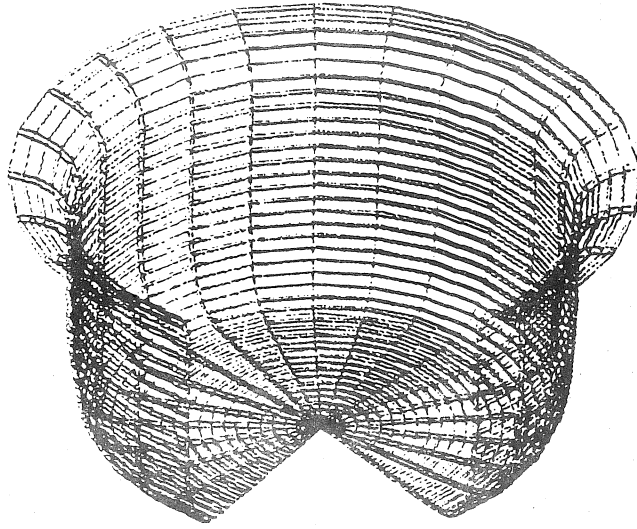
Abaqus yazılımı belli yapıdaki girdi dosyasını analiz eden bir çok programın birleşiminden oluşmaktadır. Girdi dosyası genel olarak model ve işlem bilgilerinden oluşur. Model bilgilerinde sonlu eleman tanımları, elemanın, noktaların ve malzemenin özellikleri belirtilir. İşlem bilgileri bölümünde ise tanımlanan modelle ne yapılacağı, işlemlerin sırası ve ne tür analizlerin yapılacağı belirtilir. Abaqus programı sonucu elde edilen deforme olmuş kare ve daire taslak çizimleri Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir.

SEY programı ise standart bir girdi dosyası kullanarak analiz yapmakta ve yine standart çıktı dosyasını oluşturmaktadır. Şekil 5'de kare taslak için elde edilen sonuçlar görülmektedir.

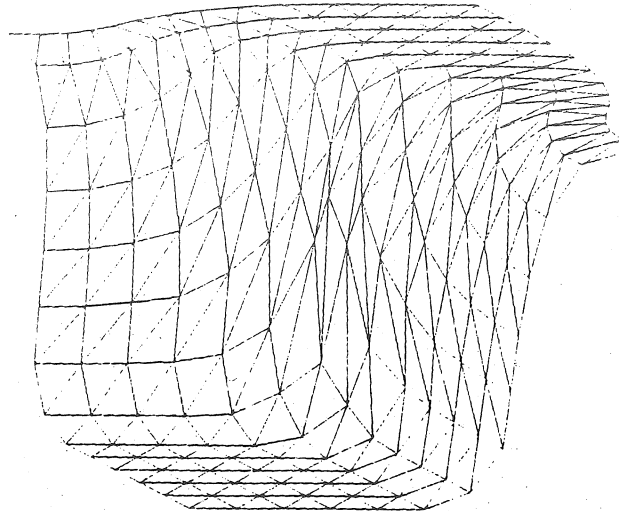
Çekme deneyinden ve sayısal analizler sonucunda elde edilen sonuçlar kalınlık yönündeki şekil değiştirme kullanılarak grafiklere dökülmüş ve karşılaştırmalar



Şekil 3. Abaqus Programı Kullanılarak Elde Edilen Şekil Değiştirmiş Kare Taslak



Şekil 4. Abaqus Programı Kullanılarak Elde Edilen Şekil Değiştirmiş Daire Taslak



Şekil 5. SEY Kod Kullanılarak Elde Edilen Şekil Değiştirmiş Kare Taslak

yapılmıştır. Grafikler çizilirken taslak merkezine olan ilk uzaklıklar baz alınmış ve kare taslaklar için kenarların orta noktası ve köşegen boyunca olmak üzere iki ayrı grafik çizilmiştir.

Eksenel simetrik kalıplarla çekilmiş taslaklar zımbanın altında incelererek kalınlık yönünde sabit veya negatif gerinim göstermiştir. Zımbanın kenarına yaklaştıkça inceltme artmakta ve zımba köşesine yakın bir yerde en büyük değerini almaktadır. Daha sonra zımbanın kenarı ile kalıbın kenarı arasındaki bölgede inceltme kalıbın kenarına doğru azalmakta ve kalıpla baskı plakası arasındaki bölgede kalınlaşma görülmektedir. Abaqus ve SEY Kod kullanılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde yakın değerler görülmektedir (Şekil 6, 7, 8 ve 9). Abaqus ile elde edilen sonuçlarda zımbanın köşesine taslak yapışmakta ve şekillerden de anlaşılacağı gibi ani değişiklikler olmaktadır.

Kare taslaklarda kenarların orta noktaları arasında kalınlıklar karşılaştırıldığında, zımbanın altından zımbanın köşesine kadar kalınlıkta az miktarda inceltme görülmektedir (Şekil 10a - 11a). Zımbanın kenarında en fazla inceltmeye ulaşan taslak, zımba ile kalıp arasındaki alanda azalan bir inceltme göstermiştir. Kalıp ile baskı plakası arasındaki bölgede kalınlaşma görülmekte ve taslağın kenarında en büyük kalınlık değeri elde edilmektedir. SEY Kod'dan elde edilen kalınlık yönündeki gerinim değerleri yüksek olmakla birlikte aynı eğilimi göstermektedir. Abaqus sonuçlarında ise zımbanın köşesinde oluşan yapışma etkisinin bu bölgede taslağın deformasyonunu engellediği görülmüştür.

Köşegen boyunca bakıldığında yine zımbanın altındaki bölgede hafif bir inceltme gözlemlenmekte ve zımbanın köşesinde en az kalınlık elde edilmektedir. Zımba ile kalıp arasındaki bölgede ilk duruma göre inceltme olmakla birlikte kalınlık yönündeki gerinimde artış eğilimi görülmektedir. Kalıbın köşesiyle baskı plakası arasındaki alanda kalınlığın ilk değerinin üzerine çıktığı ve en fazla kalınlık elde edildikten sonra azalan bir eğilimle taslağın kenarında ilk değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.

## SONUÇLAR

Deneylerin sonuçlarının incelenmesi ve analizlerle karşılaştırılması neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir.

1. Eksenel simetrik derin çekme işleminde zımbanın altında az miktarda inceltme görülmektedir. En büyük inceltme köşe etrafında görülmekte ve daha sonra inceltme hızla azalmaktadır. Baskı plakası ile kalıp arasında kalınlaşma gösteren taslak, kenarda en büyük kalınlığa erişmektedir.

2. Kenarların orta noktası boyunca karşılaştırılan şekil değiştirmiş kare taslak zımba altında gösterdiği inceltmeden sonra en ince değerine zımba kenarında ulaşmakta ve daha sonra hızlı bir değişimle kalınlık artmaktadır. Kalıp ile baskı plakası arasında, kalınlık ilk değerine göre daha fazladır. Taslak çevresinde en büyük kalınlık elde edilmiştir.

3. Köşegen boyunca incelenen çekilmiş kare taslakta ise zımbanın altında yine bir inceltme gözlemlenmiştir. Kalınlık yönündeki gerinim, zımba ile kalıp arasında artmaktadır. Taslak kenarında kalınlık yönündeki gerinim sifira yaklaşmaktadır.

4. Kare ve eksenel simetrik taslaklar zımba altında tüm analizlerde (Deney-Abaqus-SEY Kod) aynı sonuçları vermiştir.

5. Kalıp ile baskı plakası arasındaki bölgede tüm analizler aynı eğilimi göstermişlerdir.

6. Bütün eksenel simetrik derin çekme işlemlerinde tüm derinlikler için en fazla kalınlaşma taslak kenarında görülmüştür.

7. Bütün eksenel simetrik derin çekme işlemlerinde tüm derinlikler için en fazla inceltme zımba köşesinde görülmüştür.

8. Abaqus ve SEY Kod sonuçları deney sonuçları ile aynı eğilimi göstermişlerdir.

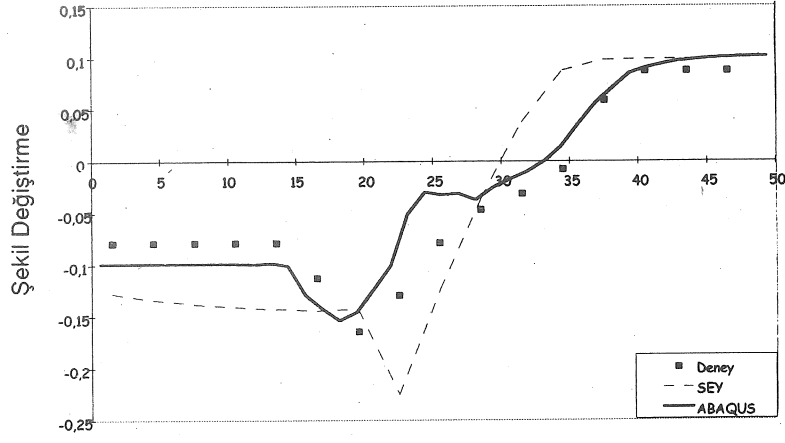
## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF AXISYMMETRICAL AND SQUARE BLANKS IN DEEP DRAWING

The deep drawing process is a forming operation of the sheet metals in which friction, stretching, unbending, bending, and compression occur simultaneously during the process. Although numerical analysis has been made for the solution at all the stages of the process; because of its complex nature, obtaining a complete solution of the process is very difficult and the numerical solutions would not be sufficient to represent the process for complex parts. Therefore in the deep drawing process, the trial and error method is still used with the numerical analysis. So, experimental study plays an important role in analyzing the deep drawing process.

In this study, the deep drawing process is analyzed experimentally and experimental results are compared with the results obtained by the finite element method.

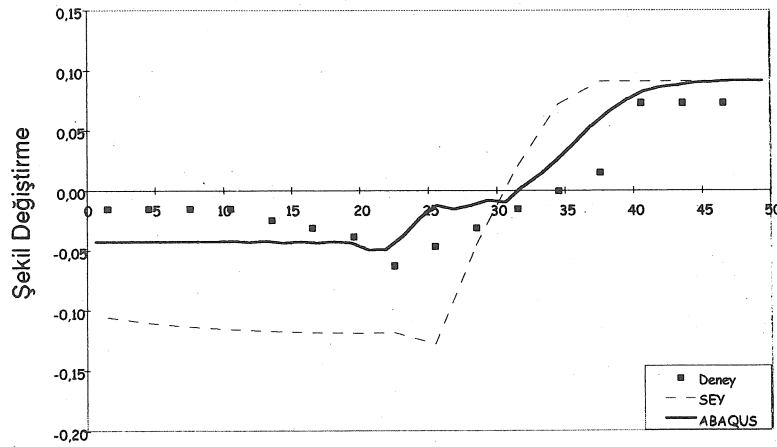
## KAYNAKÇA

1. Swift, H.W., *Plastic Strain in an Isotropic Strain Hardening Material*, Engineering, No. 162, 1947, 381.
2. Swift, H.W., *Two Stage Drawing of Cylindrical Cups*, *Trans. Institute of Eng. Slip in Scotland*, No. 86, 1943, 195-196.
3. Chung, S.Y. and Swift, H.W., *Cup Drawing from a Flat Blank*, *Proc. Inc. Mechanical Engineers*, V.169, No. 199, 1951.
4. Woo, D.M., *On the Complete Solution of the Deep Drawing Problem*, *Int. J. Mech. Science*, Pergamon Press, Vol.10, 1967, 83-94.
5. Woo, D.M., *Analysis of the Cup Drawing Process*, *J. of Mechanical Engineering Science*, 1964, Vol.6.



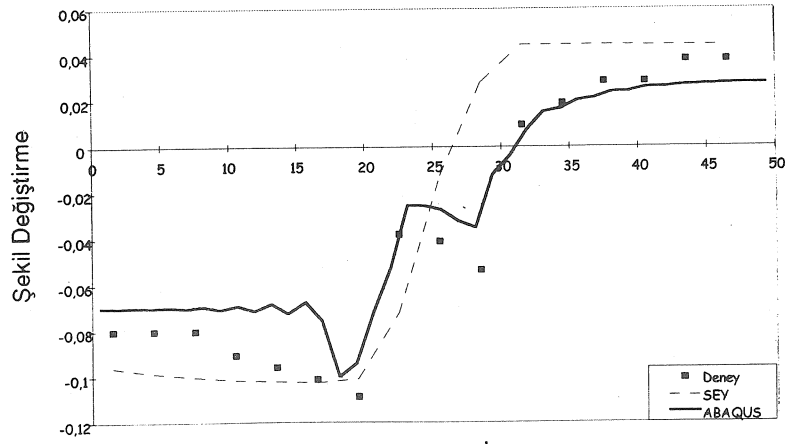
Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 6. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 45 mm Çaplı Zimba ile 23 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için Karşılaştırılması



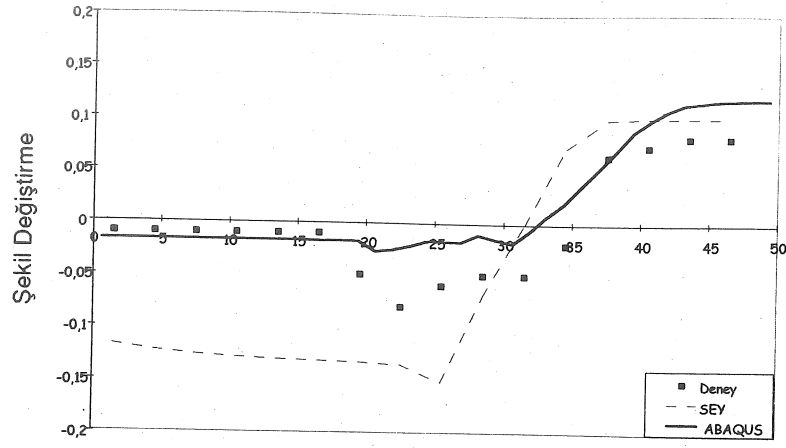
Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 7. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 50 mm Çaplı Zimba ile 20 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için Karşılaştırılması



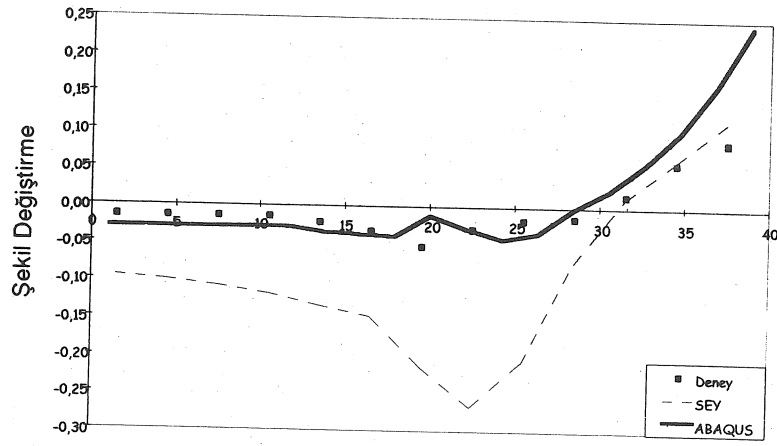
Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 8. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 45 mm Çaplı Zimba ile 13 mm Çekme Derinliğindeki Pirinç için Karşılaştırılması

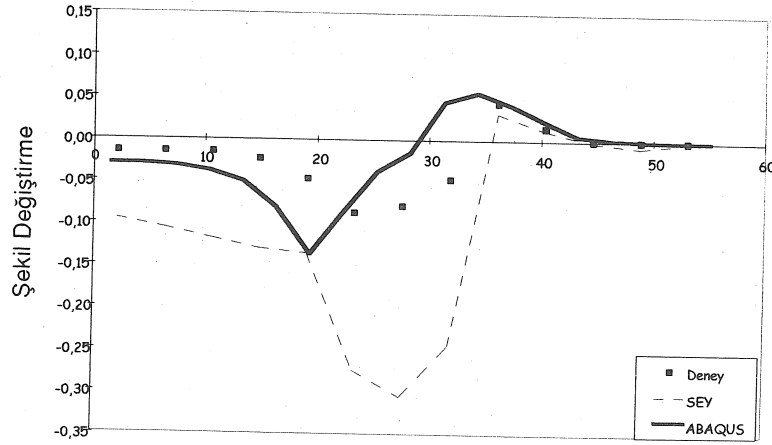


Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık

Şekil 9. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 50 mm Çaplı Zimba ile 20 mm Çekme Derinliğindeki Pirinç için Karşılaştırılması

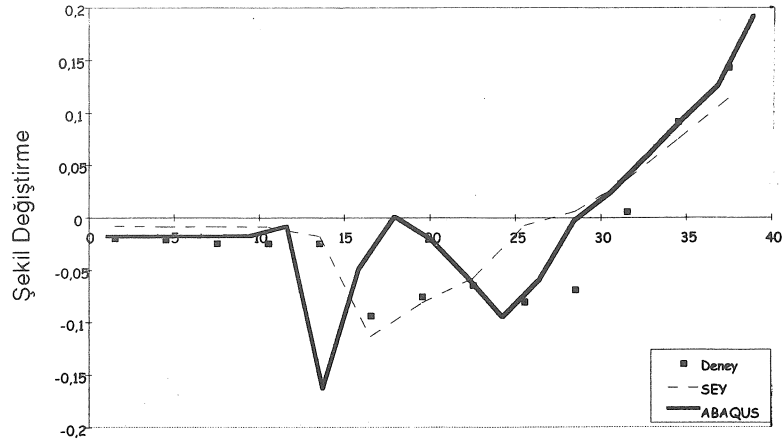


Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık  
(a)

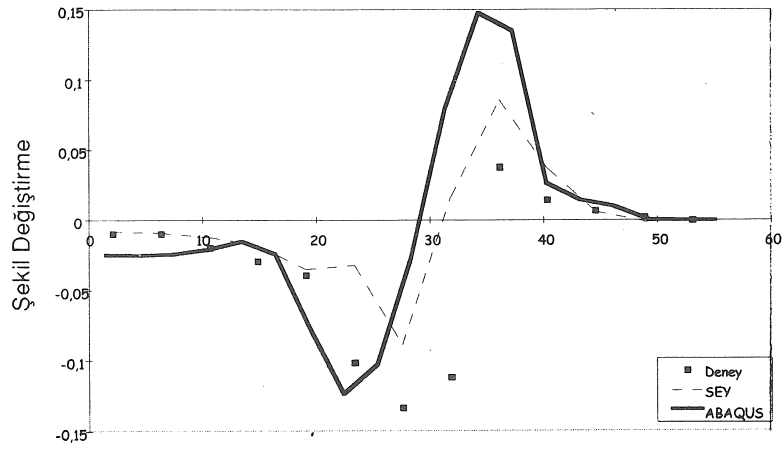


Taslak Merkezine Olan İlk Uzaklık  
(b)

Şekil 10. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 16 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için (a) Kenarların Orta Noktası Arasında, (b) Köşegen Boyunca Karşılaştırılması



Taslak Merkezine Olan ilk Uzaklık  
(a)



Taslak Merkezine Olan ilk Uzaklık  
(b)

Şekil 11. Deneysel ve Sayısal Sonuçların 16 mm Çekme Derinliğindeki Çelik için  
(a) Kenarların Orta Noktası Arasında, (b) Köşegen Boyunca Karşılaştırılması

6. Wifi, A.S., An Incremental Complete Solution of the Stretch Forming Deep Drawing of a Circular Blank, Using a Hemispherical Punch", *Int. J. Mech. Science*, Pergamon Press, Vol.14, 1976, 23-31.
7. Crane, V., *Plastic Working of Metals and Non-metallic Materials in Presses*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1954, 150-212.
8. Yamada, Y., *Studies on Formability of Sheet Metals*, Inst. Inds. Science Univ. of Tokyo, V.11, No: 5, 1969.
9. Hiraiwa, M., Kondo, K., *On the Characteristics of Square Cup Drawing* *Bulletin of JSME*, Vol.26, 1985, 2287-2294.

10. Kaftanoğlu, B., An Investigation of Stretch Forming in Relation to Deep Drawing and Testing Sheet Metal, *Ph.D. Thesis*, Imperial College, University of London, 1966.
11. Darendeliler, H., Kaftanoğlu, B., Deformation Analysis of Deep Drawing by a Finite Element Method, *Annals of the CIRP*, Vol.40, No.1, 1991, 281-284.
12. Yıldıırım, R.O., Experimental and Numerical Analysis of Deep Drawing, *M.Sc. Thesis*, Middle East Technical University, Ankara, 1997.
13. ABAQUSEXAMPLE REFERANCE MANUAL.
14. Darendeliler, H., Computer Aided Deformation Analysis of Deep Drawing Process, *Ph.D Thesis*, Middle East Technical University, Ankara, 1991.