



## ARTIMLI SAC ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİNİN SAYISAL ANALİZİNDE AÇIK ADIM VE KAPALI ADIM SONLU ELEMAN YÖNTEMİ ÇÖZÜMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

M. Emin Tamer<sup>1</sup>, Omer Music<sup>2</sup>, İzzet Ozdemir<sup>2</sup>, Besim Baranoğlu<sup>2</sup>,  
Ali Sakin<sup>3</sup>, İsmail Durgun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi, Atılım Üniversitesi, Ankara

<sup>2</sup>İmalat Mühendisliği Bölümü, Atılım Üniversitesi, Ankara

<sup>3</sup>Ar-Ge Prototip Atölye, TOFAŞ, Bursa

### ÖZET

Sacın belirli bir pot çemberine bağlanarak bir şekillendirme ucu vasıtası ile değişik noktalardan uygulanan kuvvet ile (bu kuvvetin oluşturduğu lokal plastik deformasyonlar yolu ile) şekillendirilmesi yöntemine Artımlı Sac Şekillendirme (ASS) tekniği denmektedir. İşlem çoğunlukla sayısal kontrollü (CNC) dik işleme tezgahlarında gerçekleştirilmektedir. ASS, özellikle şekillendirme sırasında bir kalıp gerektirmemesi ve bu sebeple hem maliyetinin düşük olması hem de üretim esnekliği sağlaması açısından prototip ve/veya konsept üretim benzeri düşük adetli üretimler için uygun bir imalat yöntemidir.

Artımlı sac şekillendirme işlemi, seçilen parça geometrisine göre uzun süren bir yöntemdir. Ayrıca şekillendirme sırasında parçanın çeperleri istenenden fazla incelebilmekte ya da yırtılabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, imalat öncesinde ilgili geometrinin üretiminde seçilen takımyolu ve diğer parametrelerin sayısal bir ortamda denenerek etkinliğinin ve doğruluğunun tespit edilmesi önem arz etmektedir. Bu durum, bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, kesik koni ve kare piramit şekillerine sahip iki ayrı parça geometrisi için öncelikle belirlenen takımyolları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak açık adım (explicit) ve kapalı adım (implicit) analizler ile incelenmiştir. Takımyolları üç değişik şekillendirme ucu çapı için (5mm, 10mm ve 15mm) hazırlanmıştır. Hazırlanan takımyolları MATLAB programı vasıtası ile oluşturulan bir arayüz dosyası ile ABAQUS sonlu elemanlar yazılımına girdi olarak verilmiştir. Ayrıca malzemenin detaylı simülasyona yönelik mekanik özellikleri hassas şekilde tespit edilmiş ve bu bilgiler de ilgili sonlu elemanlar yöntemi programına malzeme kartları olarak yerleştirilmiştir.

Çalışmada analizleri yapılan parçaların daha sonra imalatları gerçekleştirilmiş ve imal edilen parçalar üzerinden optik ölçüm yöntemi ile hem geometrik bilgi (ölçüler ve toleranslar) hem de genleme değerleri elde edilmiştir. Optik ölçümler için GOM-Atos ve Argus optik ölçüm sistemleri kullanılmıştır.

Belirli bir kesit boyunca ölçümler karşılaştırıldığında gerek açık adım gerekse kapalı adım çözümlerinin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülebilir. Ancak çözümler kalınlık değışmesi açısından karşılaştırıldığında kapalı adım çözümlerinin açık adım çözümlerine göre çok daha iyi sonuç verdiği değerlendirilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** artımlı sac şekillendirme, sonlu eleman yöntemi, kalıpsız şekillendirme

## 1. GİRİŞ

Otomotiv sanayiinde yeni bir ürünün piyasaya sürülmesi için gereken tasarım sürecinin en uzun süre alan ve en masraflı aşaması prototip aşamasıdır. Her ne kadar günümüzde tasarımın hemen her aşaması, gerekli hesaplama ve analizler de dahil olmak üzere, bilgisayar ortamında yapılabiliyor olsa da, özellikle otomobil benzeri birçok parçanın etkileşim içinde olduğu karmaşık bir son ürün dikkate alındığında, ortaya çıkan ürünün fiziksel etkilere maruz kalacak şekilde gerçek bir modeli üzerinde yapılacak ölçüm ve analizler gerekliliğini hala yitirmemiştir. Bu sebeple, tasarım süreci içinde ortaya çıkacak ürün değışik aşamalarda prototip olarak (düşük adetli) imal edilmekte ve gerekli test ve analizler bu prototip ürün üzerinde gerçekleştirilmektedir.

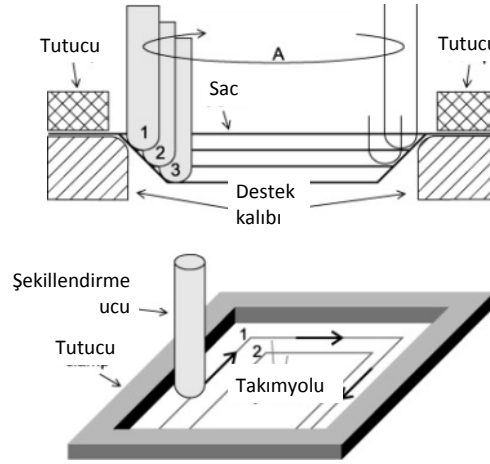
Yine otomotiv sanayii dikkate alındığında, üretim süreçleri tamamen seri üretime göre planlanır. Yüksek adetli üretimler için ekonomik olan ve aynı zamanda üretim süresi oldukça kısa olan süreç ve yöntemler tercih edilir. Ancak prototip imalat süreçlerinde adetler düşüktür. Seri imalat yöntemleri ile prototip imalat gerçekleştirmek, birçok dezavantajı beraberinde getirir: Bunlardan birincisi parça başı maliyetlerin oldukça artmasıdır. Örneğin, bir kasa üzerindeki sac parçalardan birinin imalatında konvansiyonel yöntemler kullanıldığında sadece kalıplar için 100bin TL miktarlarına çıkabilen kalıp maliyetleri ile karşılaşabilmektedir. Üretim adetleri de 100bin mertebesinde olduğunda, parça başı maliyet düşük olmaktadır. Ancak bu tür bir kalıp toplamda 100 adet yapılacak bir parça için imal edilirse, parça başı maliyet oldukça yüksek olmaktadır.

Seri imalatta kullanılan yöntemlerin prototip imalatta kullanılmasının sakıncalarından ikincisi, bu yöntemlerin esnek olmamasıdır. Belirli bir tasarıma göre hazırlanan bir kalıp, örnek olarak, tasarım değıştiği taktirde tamamen değışmekte ve çoğu zaman yeniden imal edilmektedir. Oysa ki tasarım süreci sık sık ve çok değışiklik gerektirir. Parça tasarlanıp üretilir, denenir, ve tasarım değıştirilip tekrar üretilmesi gerekebilir. Bu durumda seri imalatta kullanılan yöntemler hem yüksek maliyetlerini daha da arttırmakta, hem de sürecin hızını oldukça yavaşlatmaktadır.

Bu sebepler dolayısı ile, prototip imalatta, tamamen prototip imalata uygun yöntemlerin arayışı pek çok alternatif şekillendirme yöntemini de beraberinde getirmiştir. Önemli olan bu alternatif yöntemlerle, tasarlanmış olan ürünün hem geometrik hem de mekanik/malzeme olarak aynı modelini elde etmektir. Literatürde bu konuda, seri imalatta kullanılan kalıplara alternatif olarak farklı (daha ucuz, daha kolay üretilen ve geri dönüşümü daha az enerji ile gerçekleştirilebilecek olan) malzemelerle üretilen kalıplar [1-3] araştırılmakla birlikte, özellikle son on yılda giderek artan bir şekilde artımlı sac şekillendirme yöntemleri belirgin bir şekilde ön plana çıkmaya başlamıştır.

Artımlı sac şekillendirme (ASS) işlemi, kalıp kullanmadan (veya tek taraflı master kullanarak), özel bir baskı ucuyla sac plakaya bir veya birkaç noktadan baskı uygulayarak ve zaman içinde baskı noktasının yeri değıştirilerek şekil verilmesi işlemidir. Şekil-1'de genel olarak ASS yöntemi gösterilmektedir. Şekil verme işlemi baskı ucunun (veya uçlarının) sac

plakaya temas ettiği bölgede ve bu bölgenin çok yakınında oluşmakta ve sac plakasının geri kalan tüm bölümü elastik olarak şekil değiştirmektedir. Bu işlem bir CNC dik işleme tezgahında gerçekleştirilebilir.



**Şekil-1: Artımlı Sac Şekillendirme Yöntemi [4]**

Artımlı sac şekillendirme işlemleri, pek çok değişik alternatif şekillendirme yöntemini de içinde barındırır. Bunların bazıları, Şekil-2’de verilmiştir.

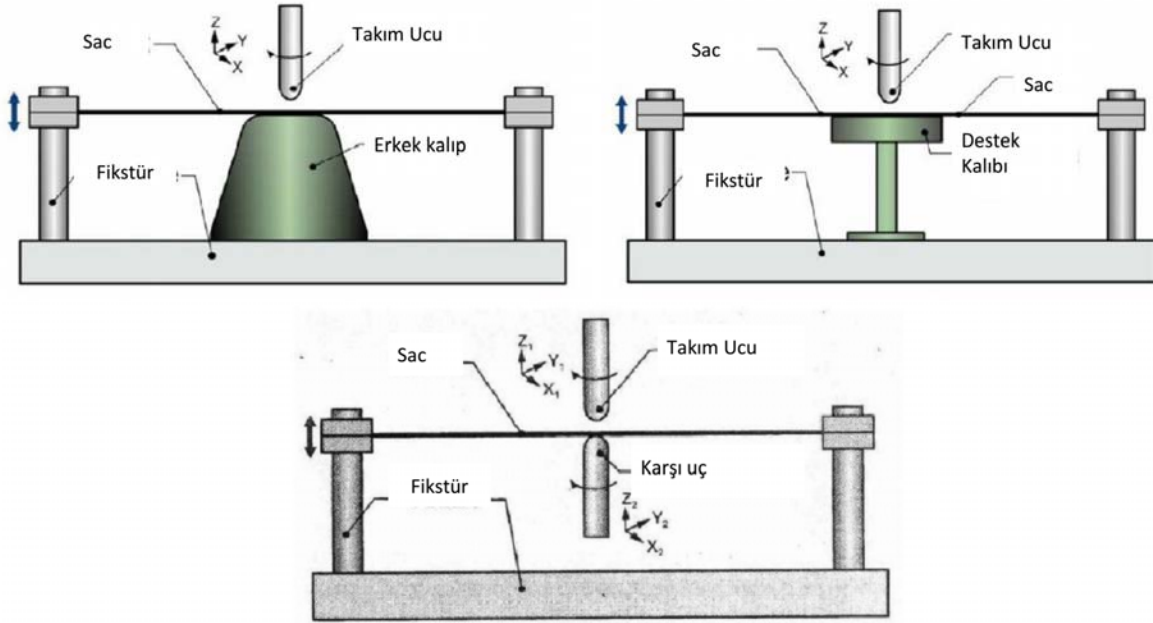
ASŞ yöntemi ile basit geometriye sahip parçalar (kesik konik parça, kesik kare piramit vb.) duvar açısı belirli bir dereceyi geçmediği sürece başarılı bir şekilde üretilebilmektedir. Ancak geometri değiştikçe buna bağlı olarak duvar açısı da değişmekte ve böylelikle kompleks yapıya sahip parçaların üretimi zorlaşmaktadır. Üretim sırasında karşılaşılan önemli problemlerin başlıcaları şunlardır:

1. Duvar açısı arttıkça yırtılma problemi ortaya çıkmaktadır.
2. Kullanılan şekillendirme ucunun geometrisinde (örneğin çapında) değişiklik, imal edilen parçanın geometrik toleranslarını değiştirmektedir.
3. Üretilen parçanın sac kalınlığı, bu kalınlığın parça boyunca değişikliği ve parça karakterini belirleyen ölçüsel değerler birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir.
4. Şekillendirme sonrasında elastik geri kazanım dolayısıyla oluşan geri yaylanma, ölçüsel toleranslarda farklılıklar ortaya çıkarabilmektedir.

Özellikle ASŞ yöntemi ile yapılan üretimin süresi dikkate alındığında, imalat öncesinde parçanın şekillendirilip şekillendirilemeyeceği ve eğer şekillendirilebilecek bir parça ise, şekillendirme sonrasında geometrik ölçülerde toleranslar içinde kalıp kalmadığı ve kalınlıktaki azalmanın kritik değere ulaşip ulaşmadığı hususlarının imalat öncesinde tespit edilebilmesi büyük önem arz eder. Sayısal yöntemlerle önceden gerçekleştirilebilecek analizler yolu ile parçanın üretilebilirliği ve üretimi sonrasında geometrik/mekanik özelliklerinin tespiti, imalat öncesinde gerekli takım yolunun tasarlanmasına imkan sağlayabilmektedir. Bu tespit, bu çalışmanın omuriliğini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada temel amaç, iki basit geometriyi (kesik koni ve kesik kare piramit) ASŞ ile üretmek üzere tasarlanmış olan takım yollarının sayısal analizlerinin aynı takım yolları kullanılarak yapılan imalat sonrası elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması ve buradan yola çıkarak, çalışmada kullanılan yöntem olarak sonlu eleman yönteminin yetkinliğinin

değerlendirilmesidir. Buradan çıkan sonuçlar ışığında sonlu eleman yönteminin ASŞ yöntemi ile imalatın tasarımında bir ilk adım olarak kullanılabilirliği gösterilmek istenmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere iki ayrı basit üç boyutlu geometri karşılaştırmalarının temel eksenini oluşturmaktadır: Kesik koni parça ve kesik kare piramit.



**Şekil-2:** Değişik ASŞ Teknikleri: Yarı Kalıplı Şekillendirme (üst sol), Destek Kalıplı Şekillendirme (üst sağ) ve İki Uçlu Şekillendirme (alt) [5].

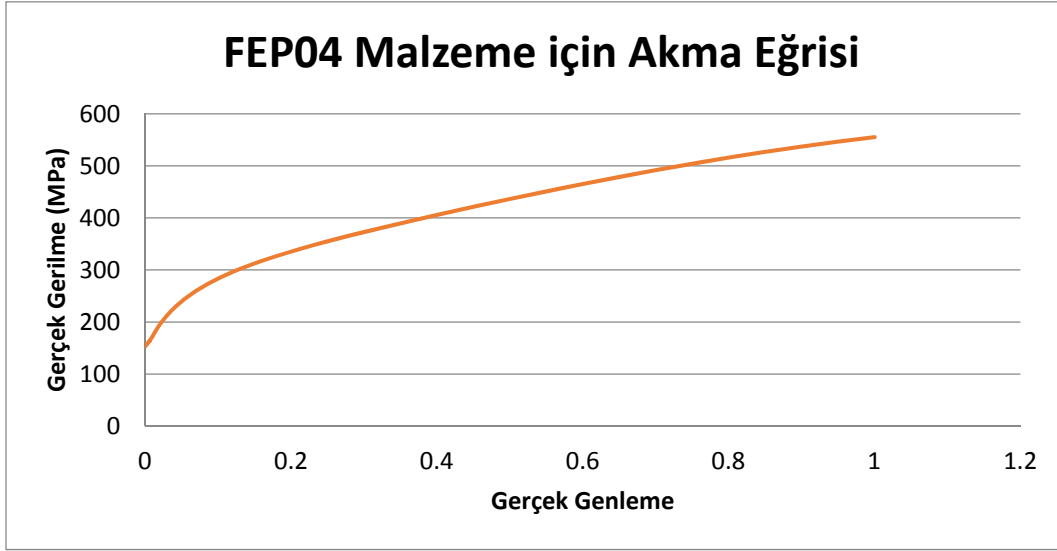
İmalatlarda ve analizlerde, TOFAŞ tarafından yoğun bir şekilde kullanılmakta olan FEP04 çelik sac ve bu sacın mekanik özellikleri kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle FEP04 malzemesinin mekanik özellikleri (özellikle akma eğrisi) hassas bir şekilde değişik testler kullanılarak tespit edilmiştir. Sonrasında parça sanal ortamda Abaqus sonlu eleman yazılımı kullanılarak modellenmiş ve takımıyolları bu programa girilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, zaman entegrasyonu için iki ayrı yöntem kullanılmıştır: açık (explicit) ve kapalı (implicit). Analizler sonrasında aynı takımıyolları imalat için Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde bulunan CNC dik işleme merkezine programlanmış ve karbür şekillendirme uçları kullanılarak imalatlar gerçekleştirilmiştir. Çalışma, hem açık hem de kapalı adım çözümlerinin imalat sonrasında elde edilen ürün üzerinden yapılan ölçümler ile karşılaştırılmasını içermektedir.

## 2. MALZEME KARAKTERİZASYONU VE SAYISAL MODELLEME

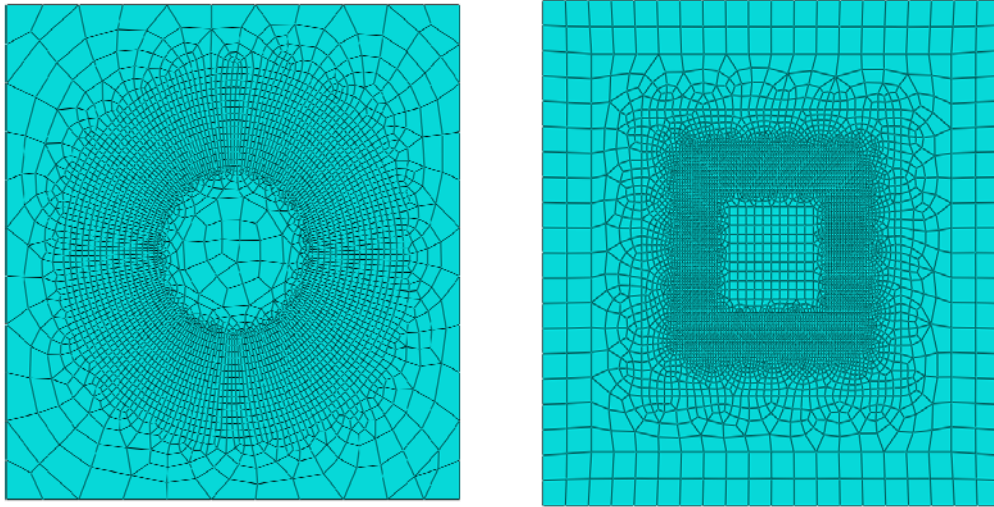
Malzeme karakterizasyonu sayısal modellemede güvenilir sonuçlar elde edebilmek için oldukça önemlidir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kullanılacak olan malzeme üzerinde tek eskenli çekme testleri, hidrolik şişirme testleri ve pul basma testleri gerçekleştirilmiştir [6]. Bu testler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sonuçta elde edilen akma eğrisi (Şekil-3) malzeme verisi olarak simulasyon programına (Abaqus) girdi olarak verilmiştir.

Daha önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar ışığında sonlu elemanlar analizinde eleman tipi olarak 4 düşüm noktasına sahip kabuk elemanı tercih edilmiştir. Bu elemanda kalınlık boyunca 7 entegrasyon noktası kullanılmıştır (eleman türü, entegrasyon noktası sayısı ve eleman sayısı ile ilgili detaylı bilgi [6]da bulunabilir). Kesik konik parçada yaklaşık 6400,

kesik kare piramitte ise yaklaşık 6000 eleman kullanılmıştır. Gerek kesik konik gerekse kesik kare piramitte kullanılan ağ yapısı Şekil-4'te verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, her iki geometri için de, takım yolunun geçtiği ve malzemenin deformasyonunun yüksek olduğu bölgede ağ yapısı daha çok sayıda elemanla oluşturulmuş, diğer bölgelerde ise ağ yapısındaki eleman sayısı seyrekleştirilmiştir. Analizlerde Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.



Şekil-3: Akma Eğrisi.



Şekil-4: Kesik Konik Parça ve Kesik Kare Piramitte Ağ Yapısı.

Her iki geometri için de takım yolunu oluşturmak amacı ile öncelikle katı model üzerinde Hypermill programı kullanılarak takım yolu (G-code olarak) otomatik olarak hazırlanmış, daha sonra bu takım yolu MATLAB'da hazırlanan bir arayüz programı kullanılarak Abaqus ortamına takım ucu koordinatları olarak aktarılmıştır. Aynı takım yolu, deneysel imalatta kullanılmak üzere CNC dik işleme tezgahına programlanmıştır. Takım yolları 5, 10 ve 15 mm olmak üzere üç farklı çaptaki şekillendirme ucu için ayrı ayrı oluşturularak denenmiştir. Her üç takım boyutu için de benzer sonuçlar alınmıştır; ancak bu çalışmada sınırlı yer olması dolayısı ile sadece 10 mm çaplı takım ile elde edilen sonuçlar verilmektedir.

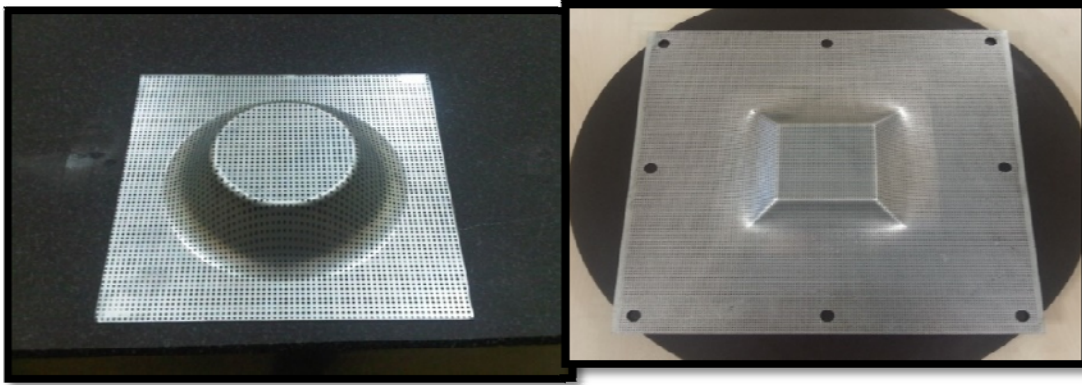
### 3. İMALAT VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılması amacı ile öncelikle kesik konik ve kesik kare piramit parçaları imal edilmiştir. Bunun için öncelikle biri kare diğeri dairesel bir boşluğa sahip 2 farklı pot çemberi imal edilerek CNC tezgaha uygun bir şekilde bağlanmıştır (Şekil-5). Sayısal analizlerde kullanılan 5, 10 ve 15 mm uç için hazırlanmış olan takımyolları CNC tezgaha programlanmış ve imalat için küresel karbür uçlar kullanılmıştır.



Şekil-5: a- Kesik Kare Piramit ve b- Kesik Konik Parça İçin Pot Çemberleri.

İmalatı yapılacak olan parçalar kimyasal markalama sıvılarıyla markalanmış ve imalat sonrası markalamalarda oluşan değişiklik GOM-Argus sistemi ile ölçülmüştür. Şekil-6'da markalanmış sac parçaların imalat sonrası görüntüleri gösterilmektedir. Ayrıca imalat sonrası parçanın üç boyutlu katı modelleri GOM-Atos sistemi ile optik olarak elde edilmiştir



(a)

(b)

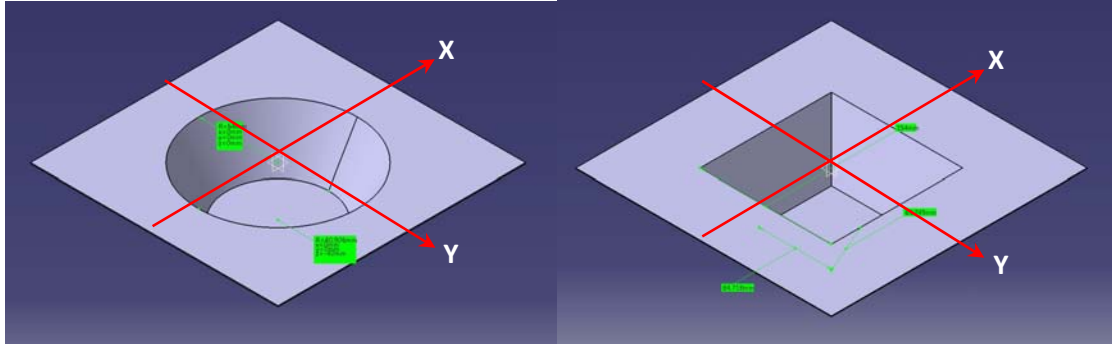
Şekil-6: a- Kesik Konik ve b- Kesik Kare Piramit Parçanın Markalanmış Olarak Üretimi.

Üretilen parçalarda 3 boyutlu koordinat ve optik deformasyon ölçümleri yapılmıştır. 3 boyutlu koordinat ölçümleri ile geometrik toleranslar elde edilmiş olup deformasyon ölçümü ile de üretilen parçadaki deformasyon miktarı ve sacdaki inceleme miktarı elde edilmiştir.

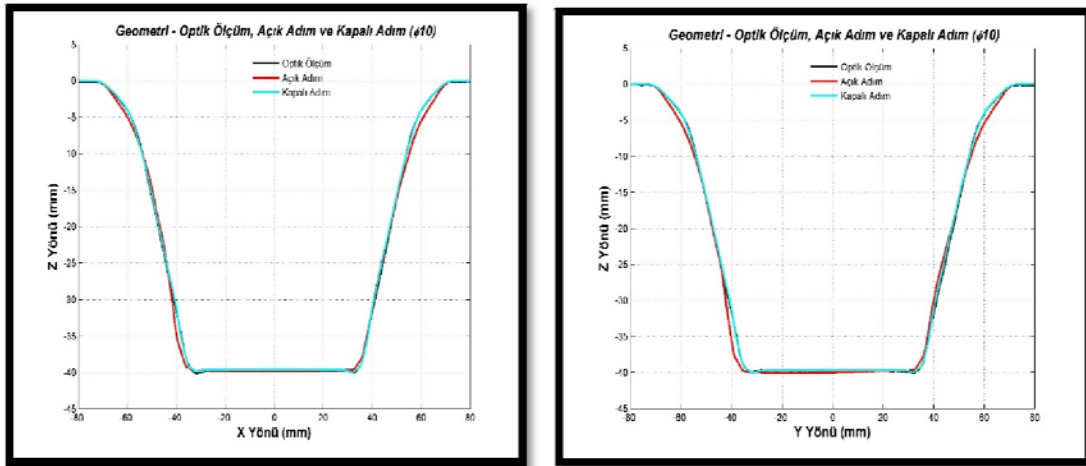
Karşılaştırmalar, koni ve piramit eksenleri yönünde iki ayrı kesit olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil-7). Kapalı adım, açık adım ve deneysel sonuçların bu iki kesitte karşılaştırılması deneysel olarak üretilen parça üzerinde aynı eksenlerde alınan ölçümlerle karşılaştırılarak yapılmaktadır. Şekil-8, kesik konik parça için ölçüsel toleranslar açısından karşılaştırmayı vermektedir. İmal edilen parçanın iki ayrı kesitten alınan dikey görüntüsü üzerinde kapalı



adım çözümlerinin daha yakın sonuçlar verdiği görülebilir; bunun temel sebebi açık adım çözümlerinin geri yaylanma (springback) çözümlerini yapmamasıdır. Benzer bir karşılaştırma, Şekil-9'da kesik kare piramit parça için gösterilmektedir. Burada, her iki çözümün de deneysel sonuçlara göre yaklaşık aynı hatayı içerdiği görülebilir.



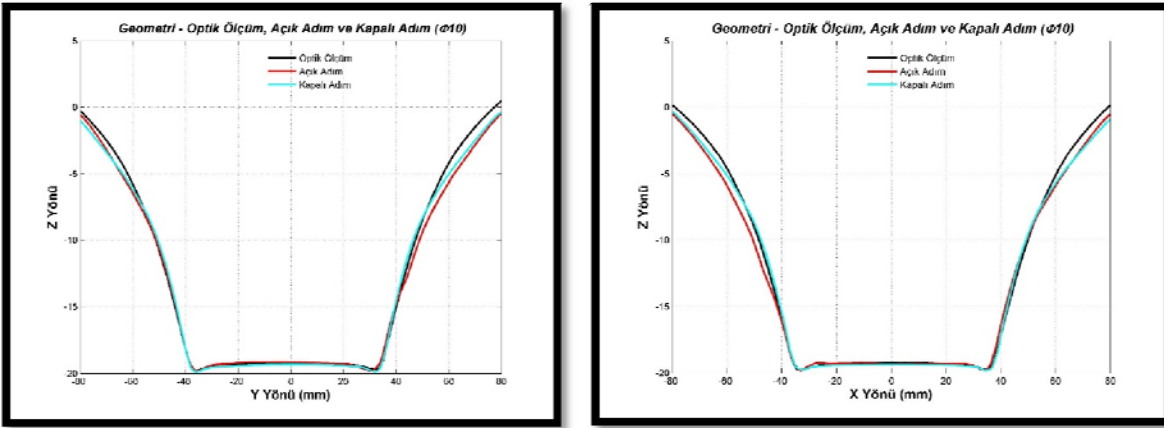
Şekil-7: Kesik Konik Ve Kesik Kare Piramit Parça İçin Karşılaştırma Eksenlerinin Tanımı.



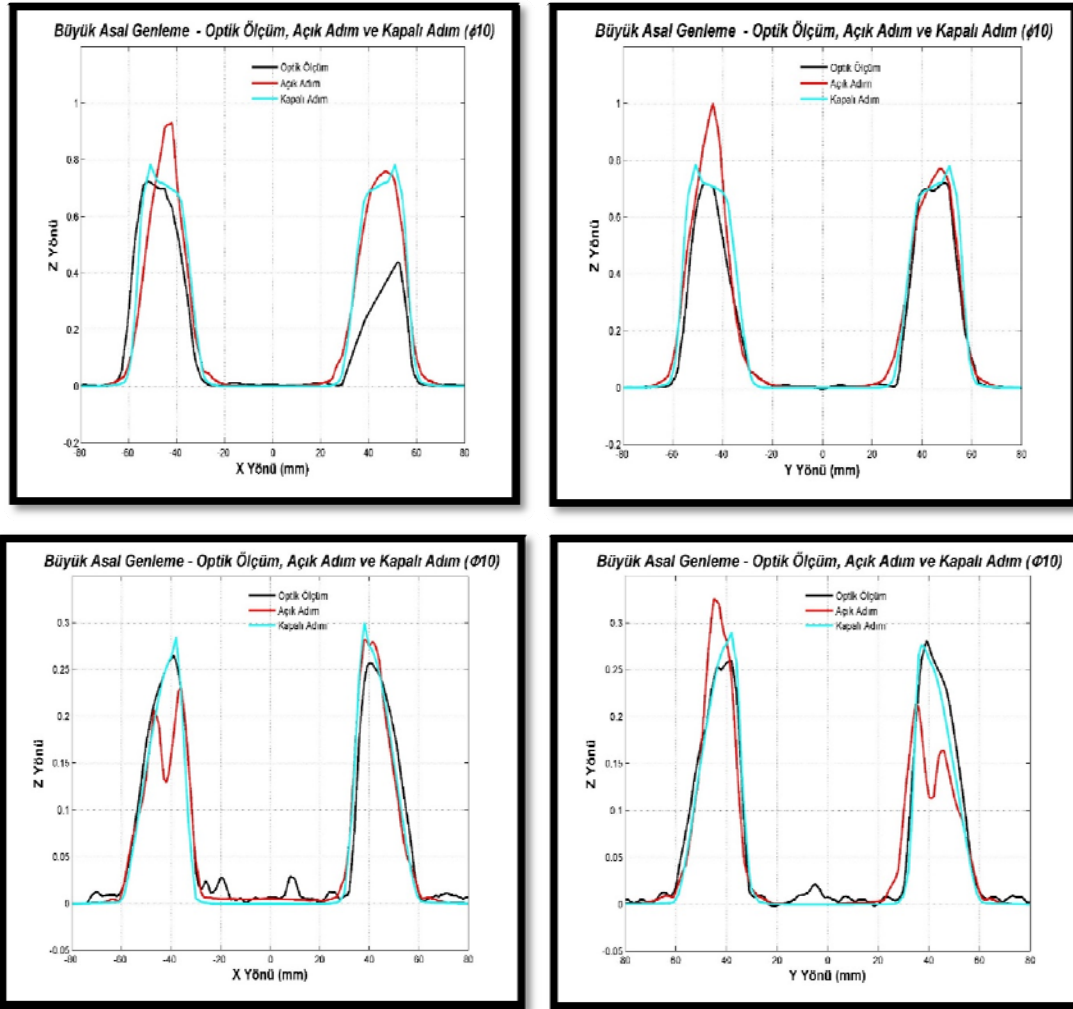
Şekil-8: Kesik Konik Parça Geometri Karşılaştırması.

İki çözüm yönteminden elde edilen asal genleme (major strain) değerlerinin, eksenler boyunca değişimleri her iki geometri için Şekil-10'da karşılaştırılmıştır. Her iki şekil de incelendiğinde kapalı adım çözümlerinin açık adım çözümlerine göre daha iyi çözüm verdiği tespit edilebilir. Dikkat edilmesi gereken iki nokta vardır: Birinci olarak, açık adım çözümlerinde her iki kesitte de bir bölgede deneysel ölçümlerden büyük bir sapma söz konusudur. Açık adım çözümleri, bilindiği üzere, dinamik etkileri de dikkate alır; bu anlamda takımın parçaya ilk değdiği anda ivmesel bir hata söz konusu olmaktadır. Bu sebeple, takımın şekillendirmeye başlamak için ilk değdiği yüzeye yakın olan kısımda, her iki kesitte de ve her iki geometri için bir sayısal hata söz konusu olmaktadır.

İkinci husus ise, kesik konik parçada X-eksenindeki kesitteki karşılaştırmada, pozitif tarafta optik ölçüm sonuçları sayısal çözümlerden farklı sonuç vermiştir: bunun sebebi deneysel ölçüm hatasıdır. Optik ölçümde oluşan hata dolayısı ile bu şekilde bir sapma ortaya çıkmıştır. Küçük asal genlemeler, yöntemin deformasyon yapısı özelliği dolayısı ile, sıfıra yakın çıkmaktadır. Şekil-11'de küçük asal gerilmeler kesik kare piramit parça için gösterilmiştir. Deneysel sonuçlardaki sıfır değerinden sapmalar ölçüm hataları dolayısı iledir.

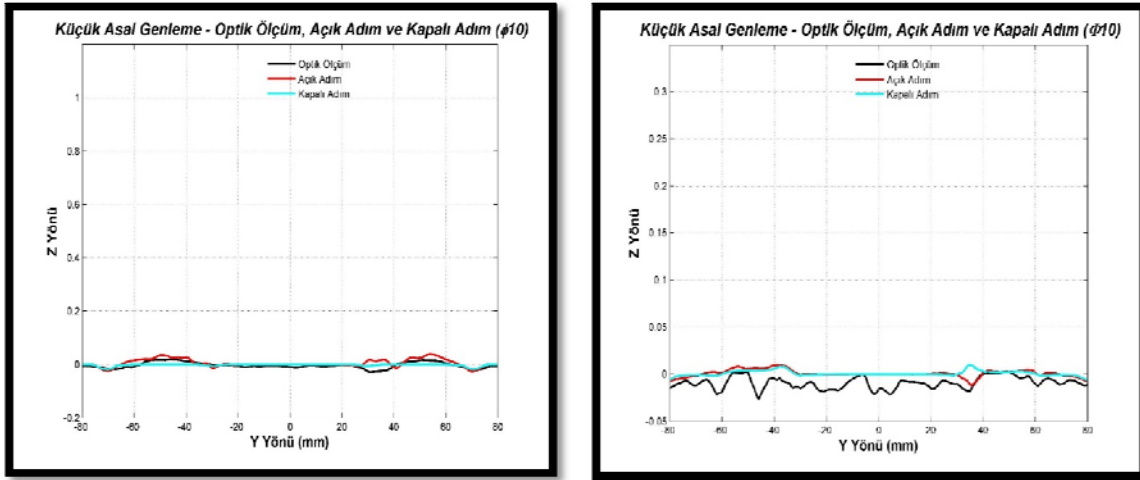


Şekil-9: Kesik Kare Piramit Parça Geometri Karşılaştırması.

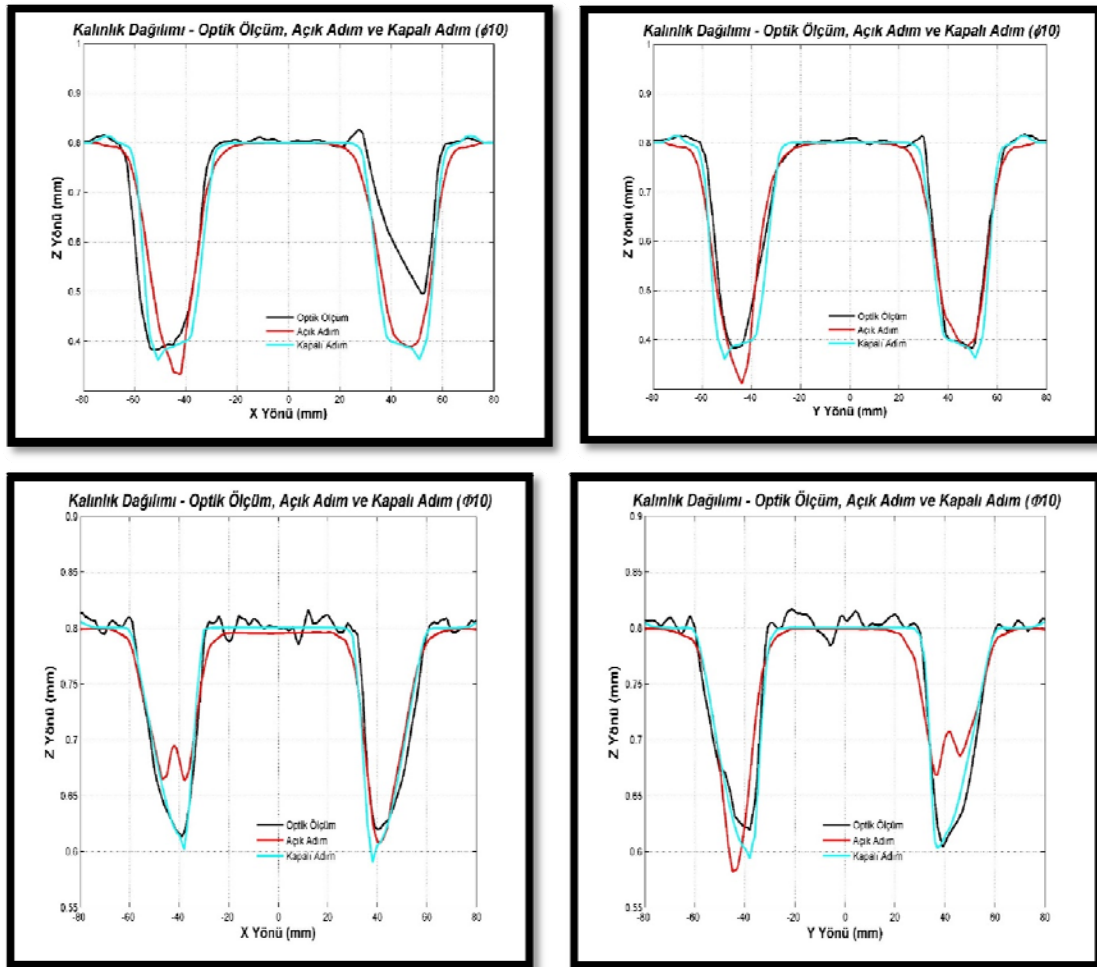


Şekil-10: Kesik Konik (Üst) Ve Kesik Kare Piramit (Alt) Geometriler Üzerinde Büyük Asal Genleme Karşılaştırması.





Şekil-11: Kesik Kare Piramit Parça İçin Küçük Asal Genleme Karşılaştırması.



Şekil-12: Kalınlık Dağılımı Karşılaştırması (Kesik Konik – Üst, Kesik Kare Piramit – Alt)

İki yöntem ve deneysel karşılaştırma ayrıca kalınlık değişimi açısından da yapılmıştır. Deneysel olarak kullanılan sac kalınlığı 0.8 mm'dir. Şekillendirme sırasında bu kalınlık şekillendirme bölgesinde düşmektedir. Eksen boyunca kalınlık değişimi her iki parça için de

Şekil-12’de gösterilmiştir. İki yöntemin de kalınlık değişimini (açık adımda görülen dinamik etkileri gözardı edersek) oldukça iyi modellemiş olduğu bu şekilden görülebilir. Kapalı adım, beklenilebileceği üzere, açık adıma göre daha yakın sonuçlar vermiştir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada örnek iki adet parça üzerinden yapılan sonlu elemanlar simülasyonları ile gerçek imalat sonucunda elde edilen ölçümler karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucu kapalı adım sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen veriler optik ölçüm sonuçları ile neredeyse birebir uyumlu çıkmıştır. Açık adım çözümlerinde ise, dinamik etkiler dolayısı ile sonuçlarda kapalı adıma göre hata payının daha yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Özellikle büyük asal genleme ve kalınlık dağılımı karşılaştırmalarında takım ucunun saca ilk değdiği yerlerde önemli farklılıklar gözlenmiştir. Bundaki sebep açık adım analizlerde dinamik etkilerden dolayı takım ucu saca ilk temas ettiğinde sacın fazla deforme olmasıdır. Prosesin devamında ise sac toparlamaktadır. Sonuçlar da bundan dolayı prosesin devamında birbiriyle uyumlu çıkmaktadır. Geometrik ölçümlere bakıldığı zaman sonuçlar birbiriyle uyumlu çıkmıştır. Sonuç olarak geometrik tolerans karşılaştırması için hızlı olmasından dolayı açık adım analiz yöntemi tercih edilebilir; ancak eğer kalınlık değişimi kritik bir tasarım kriteri ise, bu durumda kapalı adım çözümleri, daha uzun sürmesine rağmen, tercih edilmelidir.

#### REFERANSLAR

1. Kleiner, M., Curbach, M., Tekkaya, A. E., Ritter, R., Speck., K., Trompeter, M., “Development of ultra high performance concrete dies for sheet metal hydroforming”, *Prod. Eng. Res. Devel.* 2:201–208, 2008.
2. Sladojevic, J., Müller, H., “Rapid tooling approaches for small lot production of sheet-metal parts”, *Journal of Materials Processing Technology*, v115, 11, p.97-103, 2001.
3. Bate, P.S, Shaw, G.R., Hancock, M. A., Jones, S., Barrett, D., J., McDonagh, V.N., Ponton, C. B., “Superplastic forming with ceramic lost wax dies”, *Journal of Materials Processing Technology*, v48, 13-4, p.361-373, 1995.
4. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Dufloy, J., Allwood, J.M. ,2005, *Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 54, Issue 2, p. 88-114.
5. Shankar, R., Jadhav, S., Goebel, R., Homberg, W., Kleiner, M., “Incremental sheet metal forming of preformed sheets”, *Proc. 8th Int. Conf. on Technology of Plasticity*, Verona-Italy, 2005.
6. Baranoglu, B., Music, O., Tamer, M. E., Sakin, A., Durgun, İ., “Kasa prototip imalatında artımlı sac şekillendirme yönteminin kullanımına yönelik sonlu elemanlar yöntemi tabanlı sistemin doğrulanması”, *Otekon 2012*, 6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 4-5 Haziran 2012, Bursa.