

# Sac Metal Şekillendirmede Katı-Kabuk Elemanı ile Buruşmanın Tahmini

Ahmet Zafer Şenalp 

DOĞUŞ Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
İstanbul

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 30-01-2021

Kabul: 21-02-2021

Sorumlu Yazar: Ahmet Zafer Şenalp  
Email: [azsenalp@dogus.edu.tr](mailto:azsenalp@dogus.edu.tr)

*Sac şekillendirme işlemlerinde buruşma kusurlarının tahmininde sonlu elemanlar yöntemi ve kabuk elemanları kullanılmaktadır. Bu yöntem, yüzey modeli oluşturmada zaman kaybına ve yanlış modellemelerden kaynaklanan olası temas hatalarına eğilimlidir. Bu çalışma Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında sac parçalar için metal şekillendirme işlemlerinde katı-kabuk elemanların kullanımını incelemektedir. Buruşmaya eğilimli standart bir test parçası için katı-kabuk ağlar oluşturulmuştur. Sac için DP600 malzemesi kullanılmıştır. Şekillendirme araçları arasındaki sürtünme davranışı dikkate alınmıştır. Çeşitli sınır koşulları test edilmiştir. Analiz sonuçları, kabuk analizi sonuçları ve daha önce elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, katı-kabuk eleman kullanımının, kabuk ve katı elemanlara göre buruşma davranışı açısından daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.*

*Anahtar Kelimeler: Buruşma, Katı-kabuk, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Metal Şekillendirme*

## GİRİŞ

Metal şekillendirme, hızı ve malzeme kalitesi nedeniyle üretim süreçleri arasında vazgeçilmez işlemlerden biridir. Bununla birlikte, araçlar ve süreç kurulumu, istenmeyen kusurları önlemek için en uygun şekilde tasarlanmalıdır. Buruşma bu kusurlardan biridir ve yüksek kaliteli bir ürün elde etmek için kaçınılmalıdır. Bu amaca ulaşmak için optimum kalıp seti ve proses parametrelerini elde etmek için tasarım ve analiz çalışmaları yapılmalıdır. Sonlu eleman yöntemi, sac malzeme şekillendirme işlemlerinin istenmeyen etkilerinin çözümünde ve tahmin edilmesinde en yaygın kullanılan sayısal araçtır. Bu yöntemle, karşılaşılan bu kararsızlık kusurlarını tahmin etme doğruluğu geliştirilebilir. Proses parametrelerinin belirlenmesi ve kalıp seti geometrisinin tasarımı konunun en önemli kısmıdır. Tasarımı doğrulamak için, sac metal şekillendirme analizinin doğruluğunu iyileştirmek amacıyla iyi bir sonlu eleman modeli hazırlanmalıdır. Son 20 yılda bu konuda oldukça yüksek miktarda çalışma yapılmıştır.

Sac metal şekillendirme işlemleri ve geri esneme, buruşma, bükülme hataları için iyi sonuçlar elde etmek için yapılmış birçok çalışma vardır [1-3]. Yamamura vd. [4], sac levha kalınlığı boyunca artırılmış sayıda entegrasyon noktasına sahip seçici bir azaltılmış entegrasyon sonlu elemanı üzerinde çalışmıştır. Bu eleman için statik bir açık kod ve dengelenmemiş kuvvetleri azaltmak için bir algoritma kullanılmıştır.

Bu yaklaşım, şekillendirilmiş parçanın ve kalıp setinin şeklinin geliştirilmiş bir hesaplamasını mümkün kılmıştır. Ancak, kalınlık üzerinden çok sayıda eleman kullanmanın uygun maliyetli olmadığı belirtilmelidir.

NUMISHEET konferansları, geri yaylanma analizi için özel kıyaslama önerileri nedeniyle önemlidir. Bunun için çekme bükme testi [5] kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmak için S-ray testi [6] yapılmıştır. Dijital Kalıp Tasarım Sistemi (3DS) araştırma programı, karmaşık ve güvenilir kriterleri ile önem taşımaktadır. Sac metal şekillendirmede [7, 8] oluşan çeşitli kusur türlerinin varlığı özel parça şekilleri ile tahmin edilmiştir.

Banu ve arkadaşları [9] anizotropiyi dikkate alan yeni tip sonlu elemanlar ve şekillendirme analizi için yeni zaman entegrasyon prosedürleri önermişlerdir. Çalışmaları, malzeme modelinin yeni bir uygulamasıyla geri esneme hesaplama şemasına da sahiptir. Çalışmalarının önemi, yeni bir STAMP3D sonlu eleman yazılımı formunu, 3DS kıyaslamasının bir ray parçası ve 1 mm kalınlığında bir çelik boşluğu test etmeleridir. Ayrıca analizlerini doğrulamak için deneyler yapmışlardır. Kullandıkları kod, dengesiz kırışıklık davranışını tahmin edebiliyordu.

Lee ve Youn [10], buruşuk zarların büyük deformasyonları üzerinde çalıştılar ve ortotropik zarların kırışmasını doğru ve basit bir şekilde tahmin

ettiler. Gerilme şekil değiştirme enerjisini tanımladılar. Bu gerilme gerinim enerjisini maksimize etmek için yapılan işe göre kırışıklıklar oluşmuştur.

Liu ve Wang'ın [11] çalışması kırışıklıkların ve kırılmaların oluşumunu araştırdı. Viskoz basınç oluşturma ve viskoz ortam ile sac metalin birleşik deformasyonunun sayısal çözümü için önerilen kesitsel sonlu elemanlar yöntemini kullandılar. Programlarına bir kırışıklık kriteri ve sünek kırılma kriteri getirdiler. Örnek olarak, bir alüminyum alaşımli parçanın şekillendirilmesi incelenmiştir. Ayrıca sac tutucu basıncının ve kırılmanın kırışıklık başlangıcı üzerindeki etkisini de araştırdılar.

Gerilmiş dikdörtgen tabakalarda burkulma sonrası analizi ve kırışıklık modellerinin gelişme periyodu teorik olarak ve sayısal bir prosedür kullanılarak Wang ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. [12]. Çalışmaları, sonlu membran gerinimi ve ikinci potansiyel enerji varyasyonu kullanılarak hiperelastik plaka modeli için bir stabilite analizine dayanıyordu. Ayrıca yukarıda bahsedilen teori ile izolasyon merkezindeki çatallanma noktalarını da çıkardılar. Stabilite bölgelerine ilişkin 3B faz diyagramı sunmaları önemlidir.

Sac levha işlemlerinin çoğu kabuk elemanlar tarafından yapılmasına rağmen, katı kabuk elemanların kullanıldığı ciddi istisnalar vardır. Parente vd. [13], sac şekillendirme işlemlerinin çözümü için katı kabuk sonlu eleman kullandı. Gelişmiş varsayılan gerinim (EAS) yöntemini kullandılar. Katı kabuk formülasyonu, literatürde sunulan tam entegre altı yüzlü katı kabuk elemanlara kıyasla iyi çözümler sağlayan minimum iyileştirme değişkenlerine sahipti. Benimsenen EAS yöntemi, enine kesmenin etkilerini dahil etmek ve hacimsel kilitlenmeyi önlemek için kullanıldı. Örnek olarak bir S-ray problemini çözdüler. Abaqus sonuçlarıyla karşılaştırma da sunuldu.

Li vd. [14], Hu-Washizu'nun açık sonlu eleman tabanlı varyasyonel prensibi ile bağlantılı olarak bir tam entegre katı-kabuk elemanı geliştirdi. Schwarze vd. [15], yeni bir indirgenmiş entegrasyonlu katı kabuk sonlu eleman tekniği ile sac metal şekillendirmede geri esnemeyi inceledi.

Malzeme modelleri ve parametreleri de çok önemlidir. Sena'nın artımlı Şekillendirme İşlemlerini [16] analiz etmek için gelişmiş sayısal temelde yaptığı doktora çalışması, metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan malzeme özellikleri hakkında değerli bilgiler içerir.

Özellikle otomotiv parçaları için yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı, sac şekillendirme işlemlerinde geri esneme ve buruşma açısından doğru analiz ve boyutsal doğruluğun kontrolünü

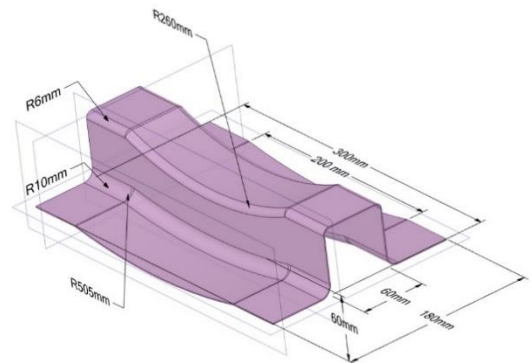
gerektirmeye başlamıştır. Xue vd. [17], malzeme modelinin etkileri üzerinde çalıştı ve sac delmede bükülme ve buruşma, geri yaylanma sonuçlarını elde etti. Neto ve arkadaşları [18], sınır koşullarının kırışıklık tahmini üzerindeki etkilerini inceledi. Yaklaşımları, sac metal şekillendirme işlemlerinde buruşma davranışını etkileyen nedenlere yeni bir bakış açısı sağladı. Hem kırışmayı hem de geri esnemeyi gözlemek için bir ray bileşeni kullanılmıştır. Hem deneysel hem de sayısal çalışmalar yaptılar. Boş malzemenin buruşma davranışı üzerindeki etkisini hesaba katmak için, DC06 çeliği ve DP600 çeliği malzemeleriyle iki ayrı çelik levha düşünülmüştür. Geliştirilen sayısal modelleri bir dizi deneysel sonuç aracılığıyla doğruladılar.

Bu çalışmanın amacı, Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında metal şekillendirme işlemleri için kabuk eleman yerine katı-kabuk eleman kullanımını önermektir. Katı-kabuk elemanının buruşma tahmin kabiliyeti, kabuk ve katı elemanların davranışları ile karşılaştırılmıştır. Katı kabuklu elemanlar aynı zamanda katı geometrileri kullanma ve yüzey çıkarma için yapılan çabaları ortadan kaldırma avantajına da sahiptir. Önerilen yöntem aynı zamanda olası temas hatalarını da önler. Bir test problemi olarak, daha önce literatürde kullanılan bir kıyaslama, DP600 malzemesi ile kabul edilir. Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında çözüm için Johnson ve Cook malzeme modeli benimsenmiştir.

## SONLU ELEMANLAR MODELİ

### Nihai Sac Geometri

Katı-kabuk elemanın analizleri için, daha önce Banu ve arkadaşları tarafından araştırılan ve Neto ve ark. [18] tarafından da kullanılan aynı geometri. [9] kullanılmıştır. Geometrinin detayları Şekil 1 de verilmiştir.



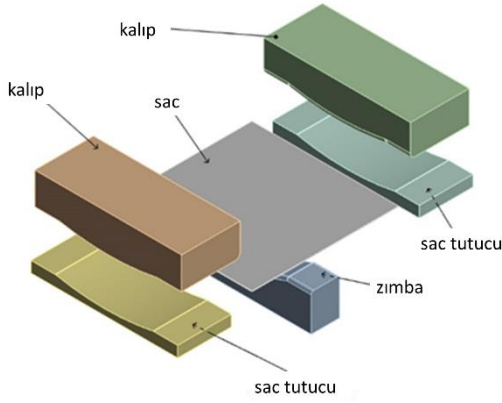
Şekil 1. Rayın son geometrisi (mm)

Bu, bir otomotiv ray parçasına ait olan ve uluslararası proje 3DS - Dijital Kalıp Tasarım Sistemi [7] kapsamında bir kıyaslama olarak tanımlanan standart bir test problemidir. Bu kıyaslamanın amacı,

sonlu eleman programlarının şekillendirme kusurlarını tahmin etme yeteneğini test etmektir. Geliştirilen sayısal modellerin doğrulanması, Banu ve arkadaşları [9] ve Neto ve ark. [18] tarafından deneysel olarak elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Tüm geometri işlemleri Ansys Spaceclaim ortamında gerçekleştirilmiştir.

### Kalıp, Zimba, Sac ve Sac Tutucu Seti Geometrisi

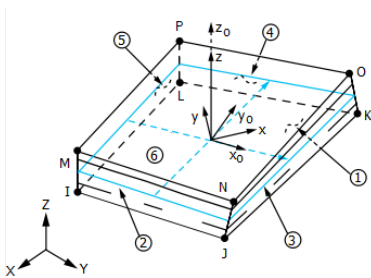
Sac boyutları 300x300 mm'dir. Sac et kalınlığı 1 mm'dir. Şekil 2, tüm set için katı modeli patlatılmış bir şekilde göstermektedir. Kabuk analizi için, yüzeyler katı modelden çıkarılmıştır. Katı-kabuk ve katı analizler için 1 mm kalınlığındaki katılar modellenmiştir. Zimba, kalıp ve sac tutucunun tamamı rijit gövdeler olduğundan, 1 mm kalınlık yeterlidir. Tüm parçalar birbirine en yakın yüzeylerle birbirine temas etmektedir.



Şekil 2. Kurulumun son geometrisi

### Sonlu Elemanlar Tipleri

Sonlu eleman analizleri için Ansys Workbench Ls-Dyna 2020R2 sürümü kullanılmıştır [19]. 3 tip analiz yapılmıştır. Buruşma davranışı nedeniyle karşılaştırma için kabuk, katı-kabuk ve katı elemanlar kullanılmıştır. Kabuk ağları için parçaların yüzeyleri, katı-kabuk ve katı ağlar için katı geometriler kullanılmıştır.



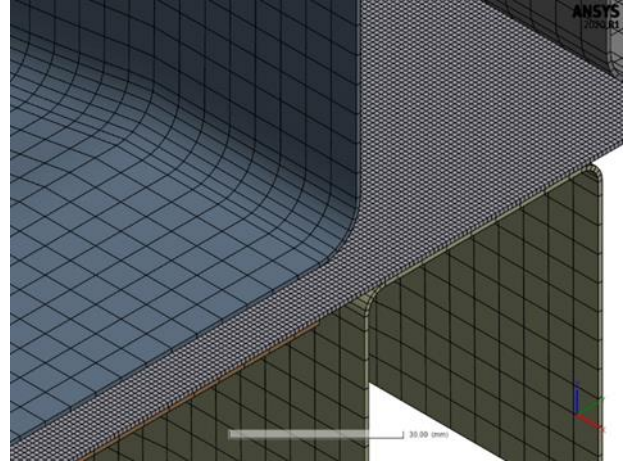
Şekil 3. Ls-Dyna'da kullanılan katı-kabuk eleman

Katı-kabuk ağ SOLSH190 katı kabuk elemanı (Şekil 3) ile hem sac, kalıplar, zimba hem de sac tutucuları modellemek için kullanılmıştır. Elemanın

kabuk seçeneğine sahip olduğunu belirtmek önemlidir. SOLSH190 elemanı ince ve orta kalınlıkta yapılar için kullanılabilir. Mindlin-Reissner kabuk teorisini destekler. Eleman büyük deformasyon, büyük gerinim ve plastisite yeteneklerine sahiptir. Eleman formülasyonu için logaritmik gerinim ve gerçek gerilme ölçüleri kullanılmıştır.

### Sonlu Eleman Ağı

Sac geometrinin ağ boyutu 1 mm'dir. Rijit kalıp, zimba ve sac tutucu seti köşe bölgeleri ince ağlara sahiptir ve geri kalanı daha geniş ağlara sahiptir. Oluşturulan ağlarla ilgili tüm istatistikler tablo 1'de sunulmuştur. Tüm eleman türleri için ağ görünümü, Şekil 4'te verilenle aynı formdadır.



Şekil 4. Ağ yapısı

Tablo 1. Tüm parçalar için düğüm sayısı

	Kabuk	Katı-kabuk	Katı
Sac	90601	181202	181202
Zimba	2346	3192	3192
Kalıp	1750	1782	1782
Sac tutucu	950	832	832
Toplam	98347	189622	189622

### Malzeme Özellikleri

Neto vd. [18] aynı geometri ve DP600 malzeme için Swift malzeme modelini kullanmıştır. Bu çalışmada Johnson Cook yasası [20], orta derecede gerinim hızı hassasiyetine sahip DP600 çelik sacın plastik davranışını modellemek için tercih edilmiştir. Bu şekilde malzeme üzerindeki gerinim hızı etkileri de dikkate alınabilir. DP600'ün mekanik davranışı elastoplastiktir. Esnek davranış Hooke yasası ile Young modülü değeri 210 GPa ve Poisson oranı değeri 0.30 ile tanımlanmıştır. Ayrıca, DP600 çeliğinin izotropik bir malzeme olduğu varsayılmaktadır.

Johnson Cook denklemi:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T_H^m) \quad (1)$$

Burada:

$\varepsilon_p$ : Eşdeğer plastik gerinim

$\dot{\varepsilon}_p^*$ : Normalize edilmiş etkili plastik gerinim hızı

A: İlk akma gerilmesi

B: Sertleşme sabiti

n: Sertleşme üsteli

C: Gerinim hızı sabiti

m: Isıl yumuşama üsteli

$T_H$ : Homolog sıcaklık

$T_{erimeli}$ : Erime sıcaklığı

$$T_H = (T - T_{oda}) / (T_{erime} - T_{oda}) \quad (2)$$

İşlem oda sıcaklığında gerçekleştiği için, sıcaklık etkisi yok olur ve denklem 1 şu forma dönüşür:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) \quad (3)$$

Johnson Cook parametreleri [16] tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. DP600 için Johnson Cook parametreleri [16]

A(MPa)	B(MPa)	n	C
323	650	0.33	0.015

### Sınır Koşulları

Geometri çeyrek simetriye sahip olmasına rağmen, kırışıklık nedeniyle kararsızlık, pertürbasyon etkileri gibi etkilerin simetriyi bozmaya eğilimli olduğundan tüm model çözülmüştür. Zımba, kalıp ve sac tutucu, analiz başlangıcında dokunmaya ayarlanmış pozisyonundadır. Analiz prosedürü şu şekilde özetlenebilir:

- Sac tutucular sabittir ve kalıplar hareket eder, bu nedenle ilk adım olarak kalıplara belirli bir yer değiştirme uygulanır, böylece dokunma konumuna ayarlandığında kalıplar ve boş tutucular arasında 1 mm kalınlığında boş malzeme sıkıştırılır.

- Nihai ürün: rayın derinliği 60 mm'dir. İkinci aşama olarak 1 mm sac malzeme kalınlığı dikkate alınarak 59 mm zımba yer değiştirilmesi uygulanır.

- Kalıplar ve zımba, Workbench Ls-Dyna’ da tam bir yeniden başlatma işlemiyle ürünü serbest bir konumda bırakmak için geri kaydırılır. Tam yeniden başlatma işlemi, şekillendirme işlemi sırasında meydana gelen

esnek boş parça üzerindeki atalet etkilerini ortadan kaldırır.

### Sürtünme Modeli

Tüm temaslar için Coulomb sürtünmesi dikkate alınmıştır. Temas eden tüm parçalar için etkileşimler tanımlanmıştır. Statik sürtünme katsayısı olarak 0.25 ve dinamik sürtünme katsayısı için 0.15 [18] kullanılmıştır.

### Açık Zamana Bağlı Geçici Dinamik Analiz

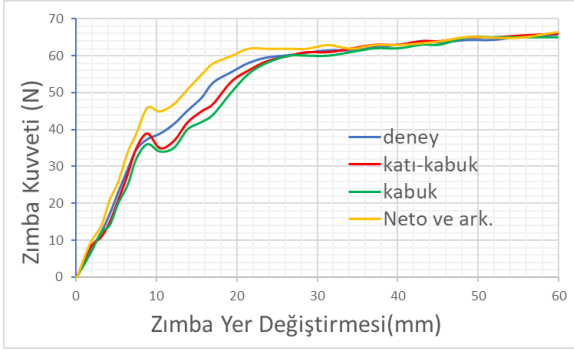
Bir yapının zamanla değişen yükler altında dinamik tepkisini belirlemek veya büyük şekil değiştirme ve deformasyonlara sahip problemleri çözmek için geçici dinamik analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu analiz için yapının atalet türü veya sönümlenme etkileri önemlidir. Bu tür analizler genellikle aşamalı veya darbeli yükleme koşulları altındadır. Örnek, zamanın bir bölümünde keskin bir yük değişikliği olabilir. Bu tür analizler zamana bağlı yer değiştirmeleri, gerilmeleri, gerilmeleri ve kuvvetleri belirlemek için kullanılabilir. Geçici dinamik analiz örtük (implicit) ve açık (explicit) olarak ikiye ayrılabilir. Örtük analizler, geri esneme problemlerinin modellenmesinde daha başarılıdır. Bu çalışmanın ana endişesi kırışıklık istikrarsızlığı olduğu için açık çözücü dikkate alınmış ve Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında açık geçici dinamik analizler yapılmıştır.

Metal şekillendirme simülasyonu genellikle açık dinamik kullanılarak daha verimli bir şekilde çözülür. Açık dinamiklerde istikrar ve doğrusal olmayan yakınsama, yakınsama kriterlerini karşılamak ve bir global matrisin güncellenmesi için denge denklemleri gerçekleştirmeye gerek kalmadan sağlanır. Açık dinamiklerle yüksek sayıda zaman adımı gerçekleştirilir, ancak bunların her birinin çözümü çok az CPU gerektirir çünkü matris oluşturulmaz / güncellenmez.

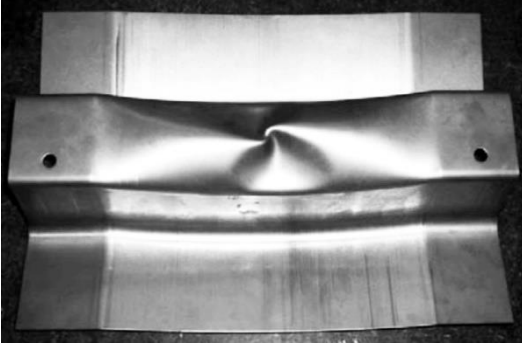
### ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. İlk adım olarak, zımba kuvveti ile zımba yer değiştirmesi şekil 5'de verilmiştir. Katı-kabuk eleman sonuçlarının, kabuk eleman, katı eleman ve Neto ve arkadaşlarının [18] sonuçlarına kıyasla en iyi yakınsamayı sağladığı sonucu çıkarılabilir.

Şekil 6, daha önce Banu ve arkadaşları [9] ve Neto ve ark. [18] tarafından verilen deneysel olarak elde edilen geometriyi göstermektedir.

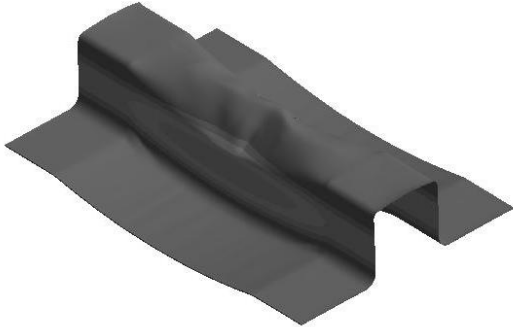


Şekil 5. Zimba kuvveti ile zimba yer değıştirmesi ilişkisi

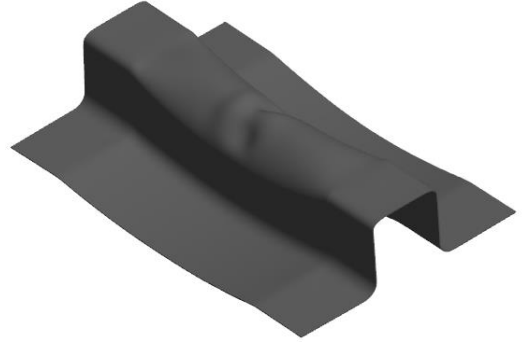


Şekil 6. Rayın deneysel geometrisi [9,18]

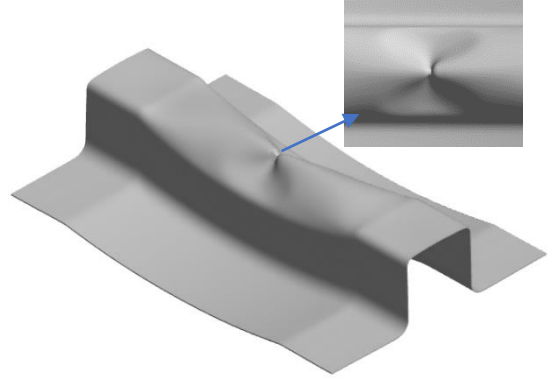
Bu çalışmada, Ansys Workbench Ls-Dyna tarafından elde edilen sonuçlar (açık analizler) kabuk eleman, katı eleman ve katı-kabuk eleman için şekil 7 ila 9'da sunulmuştur. Katı-kabuk elemanın, deneysel olarak elde edilen geometriye en yakın geometriyi verdiği şekillerden açıkça görülmektedir.



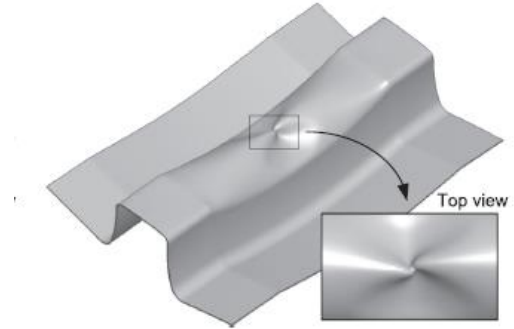
Şekil 7. Ls-Dyna'daki kabuk elemanının sonucu



Şekil 8. Ls-Dyna'daki katı elemanın sonucu



Şekil 9. Ls-Dyna'daki katı-kabuk elemanın sonucu

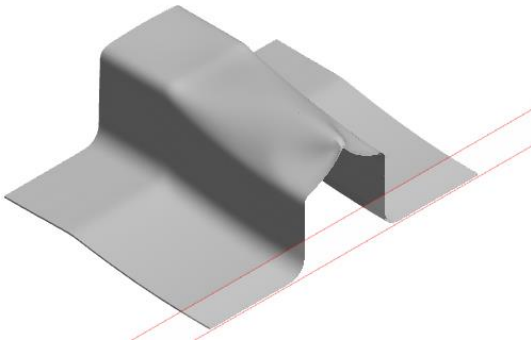


Şekil 10. Neto ve ark'nın sayısal sonucu. [18]

Şekil 11'de, katı-kabuk eleman sonucunun için kesit görünümü sunulmuştur. Tablo 3, tüm analizler için çözüm sürelerini göstermektedir.

Tablo 3. Bütün analizler için çözüm süreleri (dakika)

	Katı	Katı-kabuk	Katı
Çözüm süresi	885	609	512



Şekil 11. Katı-kabuk elemanın sonucunun kesit görünümü

## SONUÇ

Şekil 7'den 9'a kadar, katı-kabuk elemanın deneysel olarak elde edilen geometriye en yakın geometriyi verdiği açıktır. Kabuk elemanı (şekil 7) ve katı eleman (şekil 8) analiz sonucu olarak geometrideki buruşma modunu doğru tahmin edemediği görülmektedir. Neto ve ark. (Şekil 10) ve katı kabuk elemanın sonucu (şekil 9) iyi bir uyum içindedir. Her 2 sonucunda gerçek deney sonucu elde edilen geometriyi bire bir tam olarak tahmin edemediği de görülmektedir.

Geometri karşılaştırmalarının yanı sıra, her bir analiz için hesaplama süresi tablo 3'te sunulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi, katı-kabuk eleman, kabuk ve elemana kıyasla hesaplama açısından uygun maliyetlidir. Kabuk elemanının çözüm süresi, kararsızlığın başlamasıyla büyük ölçüde artar. Katı eleman için çözüm süresi katı kabuk elemandan daha az olmasına rağmen, sadece katı-kabuk eleman kararsızlık davranışını tahmin edebildiğinden önemli değildir.

Bu çalışmada, standart bir ray parçası [9, 18] üretmek için bir şekillendirme işleminin açık analizleri, Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında katı-kabuk, kabuk ve katı elemanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar deneysel olarak elde edilen kısma tam olarak uymasa da buruşma açısından katı kabuk elemanının en iyi sonucu verdiği gösterilmiştir. Katı kabuk element ile elde edilen çözüm, Neto ve arkadaşları [18] tarafından elde edilen sonuçla iyi uyum içindedir. Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında kabuk ve katı elemanlar, katı kabuk elemanların yaptığı gibi kararsızlık buruşma davranışını tahmin edinememektedir. Ayrıca, katı kabuk elemanının, kabuk elemanına göre hesaplama açısından daha uygun olduğu sonucuna varılabilir.

Açık dinamik analizlerin geri esnemeyi doğru tahmin edememesinden dolayı geri esneme sonuçları bu çalışmada sunulmamıştır.

## PREDICTION OF WRINKLING BY SOLID-SHELL ELEMENT IN SHEET METAL FORMING

In this study, the explicit analyses of a forming operation to produce a standard rail part [9, 18] are performed by solid-shell, shell, and solid elements within Ansys Workbench Ls-Dyna environment. Although the results do not exactly fit with the experimentally obtained part, it is shown that the solid-shell element yields the best result in terms of wrinkling. The solution obtained by solid-shell element is in good accordance with the result obtained by Neto et al.[18]. The shell and solid elements cannot predict the instability wrinkling behavior as solid-shell element does. Also, it can be deduced that solid-shell element is more computationally effective than shell element.

**Keywords:** Wrinkling, Solid-shell, Finite element, Metal forming

## TEŞEKKÜR

Yazar, DOĞUŞ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne, analizlerin gerçekleştirilmesi için sağladığı bilgisayar ve yazılım desteği için teşekkür eder.

## KAYNAKÇA

1. Makinouchi, A., Teodosiu, C. 2001, Numerical methods for prediction of geometrical defects in sheet metal forming, in: Proceedings of the First M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, M.I.T., Cambridge, Ma, USA, pp. 21–25.
2. Kawka, M., Olejnik L., Rosochowski A., Sunaga H., Makinouchi A., 2001, J. Mater. Process. Technol. 109, 283–289.
3. Wagoner, R.H., 2002, Fundamental aspects of springback in sheet metal forming, in: Proceedings of the NUMISHEET, vol. I, Korea, pp. 13–24.
4. Yamamura, N., Kuwabara T., Makinouchi A., Banu, M., Teodosiu C., 2000, Springback simulation for hat-bending by the static explicit FEM code, using a new algorithm for cancelling the non-equilibrated forces, in: Proceedings of the 2001 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, Tokyo, pp. 101–104.
5. Makinouchi, A., Nakamachi E., Onate, E., Wagoner R.H.(Eds.), 1993, Numisheet'93,

- The Institute of Physics and Chemical Research, Japan.
6. Lee, K.J., Kinzel, G.L., Wagoner R.H. (Eds.), 1996, Numisheet'96, Michigan.
  7. Results of the experimental benchmark tests, 2002, "Growth Programme, Research Project 3DS, Digital Die Design System, Contract G1RDCT-2000-00104, IMS199900005".
  8. Col, A., 2002, Presentation of the "3DS" programme: digital die design system, in: Proceedings of the Numisheet, Jeju Island, Korea, 2002, pp. 643–647.
  9. Banu M, Takamura M, Hama T, Naidim O, Teodosiu C, Makinouchi A. 2006, Simulation of springback and wrinkling in stamping of a dual phase steel rail-shaped part. *J Mater Process Technol*;173:178–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.023>
  10. Lee ES, Youn SK, 2006, Finite element analysis of wrinkling membrane structures with large deformations, *Finite Elements in Analysis and Design* 42 780 – 791, doi:10.1016/j.finel.2006.01.004
  11. Liu J, Wang Z, 2010, Prediction of wrinkling and fracturing in viscous pressure forming (VPF) by using the coupled deformation sectional finite element method *Jianguang, Computational Materials Science* 48, 381–389. doi:10.1016/j.commatsci.2010.01.029.
  12. Wang T, Xu F, Huo Y, Potier-Ferry M, 2019, On the wrinkling and restabilization of highly stretched sheets, *International Journal of Engineering Science* 136, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.12.002>.
  13. Parentea MPL, Valente F, Jorge RMN, Cardoso RPR, Sousa JRA, 2006, Sheet metal forming simulation using EAS solid-shell finite elements, *Finite Elements in Analysis and Design* 42, 1137 – 1149. doi:10.1016/j.finel.2006.04.005
  14. Li LM, Peng YH, Li DY, 2011, A stabilized under integrated enhanced assumed strain solid-shell element for geometrically nonlinear plate/shell analysis, *Finite Elements in Analysis and Design* 47, 511–518. doi:10.1016/j.finel.2011.01.001.
  15. Schwarze M, Ivaylo N, Reese S, 2011, Sheet metal forming and springback simulation by means of a new reduced integration solid-shell finite element technology, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 200, 454–476. doi:10.1016/j.cma.2010.07.020.
  16. Sena JIV, 2015, Advanced numerical framework to simulate Incremental Forming Processes, PhD Thesis, Universidade de Aveiro.
  17. Xue X, Liao J, Vincze G, Sousa J, Barlat F, Gracio J, 2016, Modelling and sensitivity analysis of twist springback in deep drawing of dual-phase steel, *Materials and Design, Materials and Design* 90, 204–217, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.127>
  18. Neto DM, Oliveira MC, Santos AD, Alves JL, Menezes LF, Influence of boundary conditions on the prediction of springback and wrinkling in sheet metal forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 122, March 2017, Pages 244-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.037>
  19. ANSYS Workbench version 2020R2 manuals; 2020.
  20. Cheng J, 2015, Investigation of the Formability Enhancement of DP600 Steel Sheets in Electrohydraulic Die Forming, Ms Thesis, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.