

Boruların Eksenel Buruşmasının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

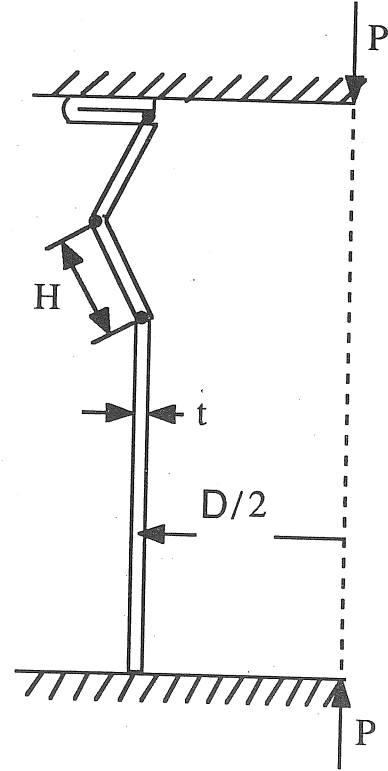
Ali Çolakoğlu
Araştırma Görevlisi
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Bu çalışmada basma yükü altında, eksenel simetrik olarak buruşan ve ince et kalınlığı olan silindirik boruların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi yapılmıştır. Modelleme için ABAQUS Versiyon 5.4 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Ortalama basma yükünün değişimi ve oluşan simetrik halka uzunluklarının teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır.

GİRİŞ

Kinetik enerji tutucu sistemlerin tasarımı yıllarca makina mühendisliğinin ilgi alanlarından biri olmuştur. Özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde pekçok uygulamaları olan bu sistemlerde kullanılan başlıca mekanik elemanlardan biri ince et kalınlığı olan silindirik borulardır [1].

Basıldığında eksenel simetrik olarak buruşan borular ile ilgili çalışmalar Alexander [2] tarafından ortaya konan ilk model ile başlamıştır (Şekil 1). Boru basımı için gerekli ortalama basma yükünü ve oluşan eksenel simetrik halka uzunluğunun bulunabilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Timoshenko ve Gere [3], Abramowicz ve Jones [4] bu konuya katkılarda bulunmuşlardır. Geliştirilen bu teorilerin gözden geçirilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılması bir önceki çalışmada verilmiştir [5]. Geliştirilen teorilerin tümü boruların eksenel yük altında buruşması için gerekli ortalama basma yükünü ve oluşacak olan halka uzunluklarını hesaplayabilmektedir. Halbuki basma yükü deneylerden de gözlemlendiği gibi basma sırasında sabit kalmamaktadır. Yük-yer değiştirme eğrileri dalgalı bir şekil vermektedir. Bu dalgalı şekilde oluşan tepe yüklerinin sayısı, oluşan simetrik halkaların sayısına eşittir. Ayrıca ilk halkanın oluşumuna karşılık gelen ilk tepe yükünün diğer tepe yük değerlerine göre daha büyük olduğu gözlenmektedir. Halka oluşumunda, ilk katmanın boru çeperinin içerisine doğru hareketi ile başlaması da dikkate değer bir noktadır.



Şekil 1. Boruların eksenel simetrik buruşma modeli [2]
(Yarı kesit)

Teorik modeller halka uzunluğunun ne kadarının boru çeperinin içerisinde, ne kadarının boru çeperinin dışarısında oluştuğuna ait bir bilgi verememektedir. Bu karmaşık yük-yer değiştirme özelliklerini veremeyen teorik modellerin yetersiz kalması sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılmasına karar verilmiştir. Bu çalışmada, önceki çalışmanın devamı olarak boruların aksenal buruşması sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Gerekli ortalama basma yükü, tepe yükü ve oluşacak aksenal simetrik halka uzunluklarına ek olarak yük-yer değiştirme eğrisi bir bütün olarak incelenebilmiş ve halkaların oluşumları gözlenebilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunan değerler, teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Boruların Buruşma Teorileri

Boruların aksenal yük altında buruşmaları için geliştirilen analitik modeller aşağıda özetlenmiştir [5].

Akma sınırı (Y) olan malzemeden imal edilmiş, ortalama çapı (D), et kalınlığı (t) olan bir boruyu aksenal yönde basmak için gerekli olan ortalama basma yükü (P) aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunabilir.

$$P = Y [(p^2 / 2k \sqrt{3}) + \pi k] t^{1.5} \sqrt{D} \quad (1)$$

Burada (k) sabit bir sayıdır. Basma sırasında oluşan yuvarlak yüzeyli halkaların uzunlukları, (H) ise şöyle hesaplanabilir.

$$H = k \sqrt{Dt} \quad (2)$$

Alexander [2], basma sırasında oluşan halkaların kalınlıklarını ihmal ederek yaptığı analitik çalışmada (k) değerini 0.952 olarak bulmuştur. Timoshenko ve Gere [3] bu değeri, ince silindirik kabukların elastik belverme analizinde 1.222 olarak vermiştir. Abramowicz ve Jones [4], ihmal edilemeyecek halka kalınlığını ve gerinim sertleşmelerini de hesaba katarak, aşağıdaki eşitliği tanımlamışlardır.

$$P = Y (6.07) t^{1.5} \sqrt{D} / [0.86 - 0.568 (t/D)^{1/2}] \quad (3)$$

Buruşma Deneyi

Teorik olarak bulunan değerlerin deneysel değerlerle karşılaştırmasını yapabilmek için soğuk çekilmiş yumuşak çelikten (BS 3602-CFS 360) imal edilmiş dikişsiz borular universal çekme-basma deney cihazında basılmıştır. 100 mm uzunluğundaki boruların dış çapı 28.5 mm ve et kalınlığı 1.5 mm dir. Deneysel çalışma ve sonuçların teorik verilerle karşılaştırılması bir önceki çalışmada detaylı olarak verilmiştir [5].

SONLU ELEMANLAR MODELİ

Analiz için ABAQUS Versiyon 5.4 sonlu elemanlar paket programı [6] kullanılmıştır. Modelleme aşağıdaki basamakları içermektedir.

Ağ Yapısı

Eksenel yük altında silindirik boru basılması 3-boyutlu bir şekil verme işlemidir. Ancak silindirik borular aksenal simetriğe sahip olduğu için, model 2-boyuta indirgenebilmektedir. Eksenel simetriğe sahip, 2-boyutlu elemanlardan oluşan homojen bir ağ analiz için yeterli olmaktadır. Bu ağ için 2-düğümlü aksenal simetrik elemanlar (ABAQUS eleman tipi SAX 1) seçilmiştir. 100 mm boru uzunluğu için 100 elemanlı bir ağ oluşturulmuştur.

Malzeme Özellikleri

Laboratuvar deneylerinde kullanılan [5] soğuk çekilmiş yumuşak çelikten (BS 3602-CFS 360) imal edilmiş dikişsiz borunun malzeme özellikleri kullanılmıştır. Tek aksenal çekme testiyle belirlendiği üzere malzemenin akma sınırı, Y=521 MPa, elastik modülü, E=207 GPa ve Poisson oranı, $\nu = 0.3$ olarak alınmıştır. İzotrop-sertleşen malzeme varsayımı yapılmıştır.

Sınır Koşulları

Eksenel simetrik sınır koşulları kabul edilmiştir. Borunun bir ucundaki düğüm, sadece boru basma eksenini yönünde serbest bırakılmıştır. Bu serbestlik basmayı yapan tezgah kafasının hareketine karşılık gelmektedir. Düğümün diğer yönler için serbestliği kısıtlanmıştır. Borunun diğer ucu bir rijit yüzey üzerine temas ettirilmiştir. Bu yüzey ile borunun dokunan kısımları arasındaki sürtünme katsayısı 0.1 olarak varsayılmıştır. Borunun bu ucundaki düğümü bütün yönler için hareket serbestliğine sahip olup borunun buruşmasına imkan tanımaktadır.

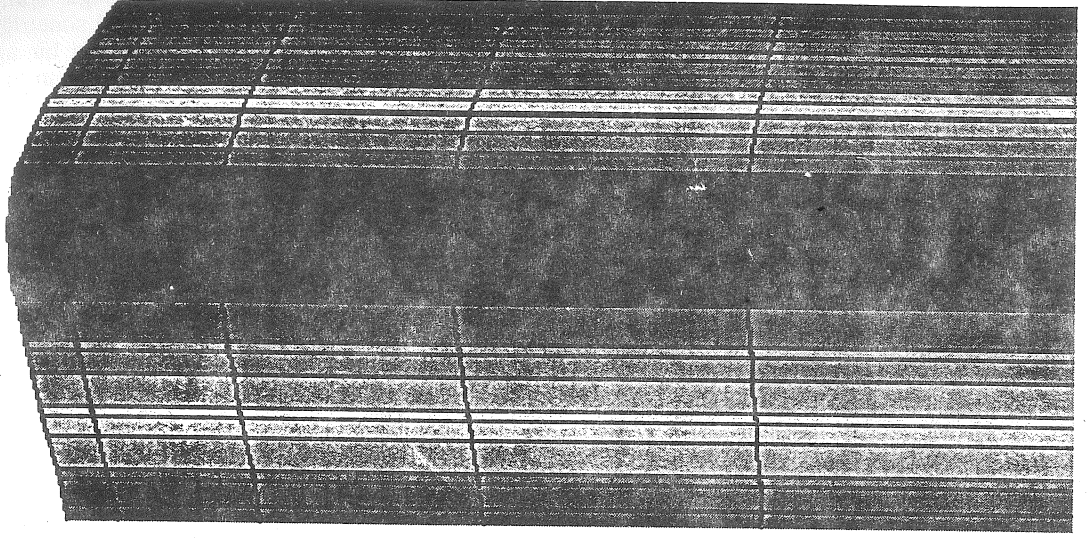
Yükleme

Boruya aksenal yönde 40 mm basma uygulanmıştır. Şekil değişikliğine uğramış ağ örnekleri Şekil 2' de verilmiştir. Geometri aksenal simetrik olduğu için şekillerde 1 numaralı eksen radyal eksenine, 2 numaralı eksen ise yer değiştirme veya basma yönüne karşılık gelmektedir.

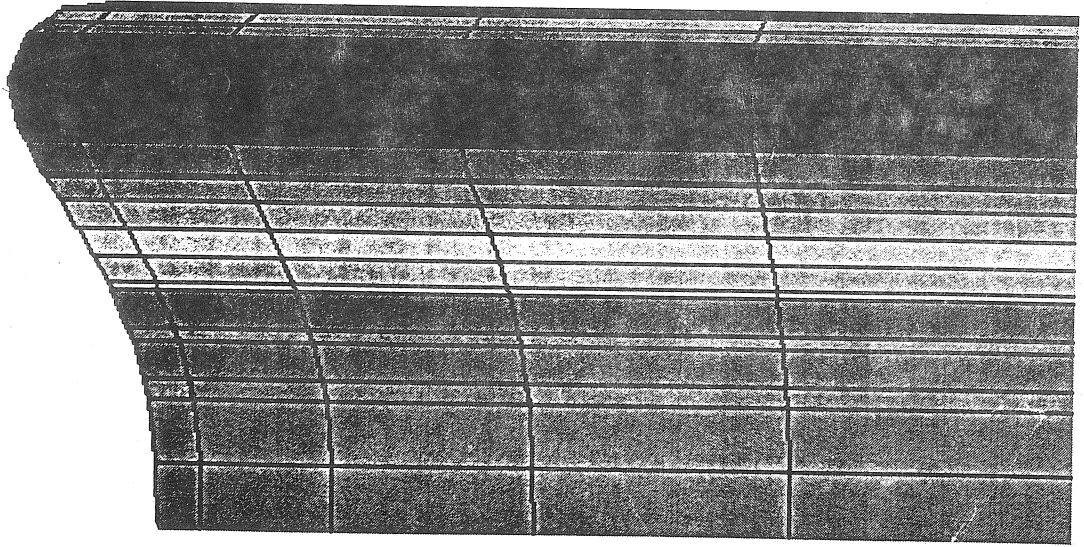
TARTIŞMA VE SONUÇ

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bulunan değerlerin teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 1' de özetlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi deneysel olarak elde edilen eğriyle birlikte Şekil 3' te verilmiştir.

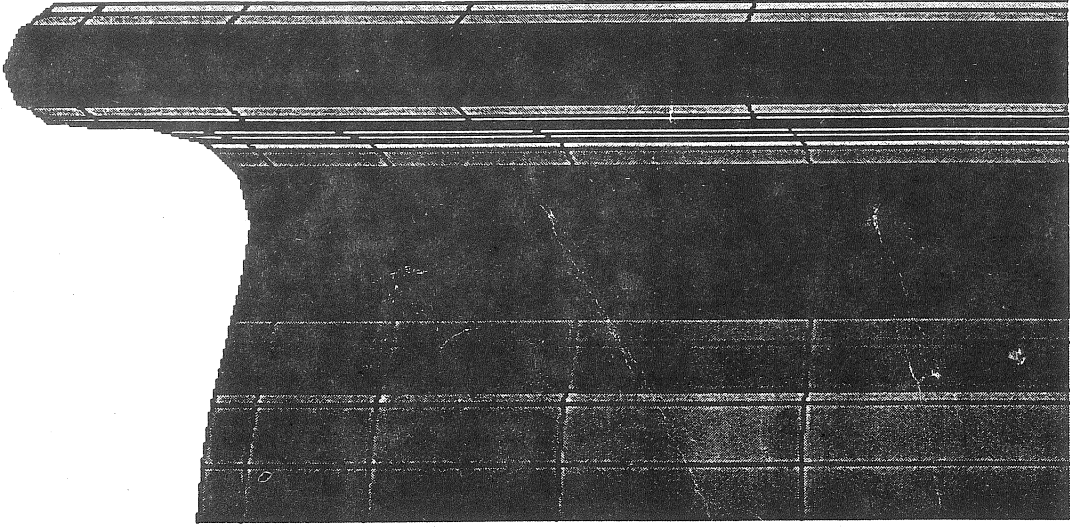
Daha önceki çalışmada tesbit edildiği gibi teorik modeller buruşma için gerekli ortalama basma yükünü deneysel sonuçlara göre daha az olarak vermektedirler. Deneysel değerlere en yakın sonucu Abramowicz ve Jones'ın teorisi vermiştir. Bu tahmin etme eğilimi sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değerler için de görülmüştür. Sonlu elemanlar modeli ile ortalama



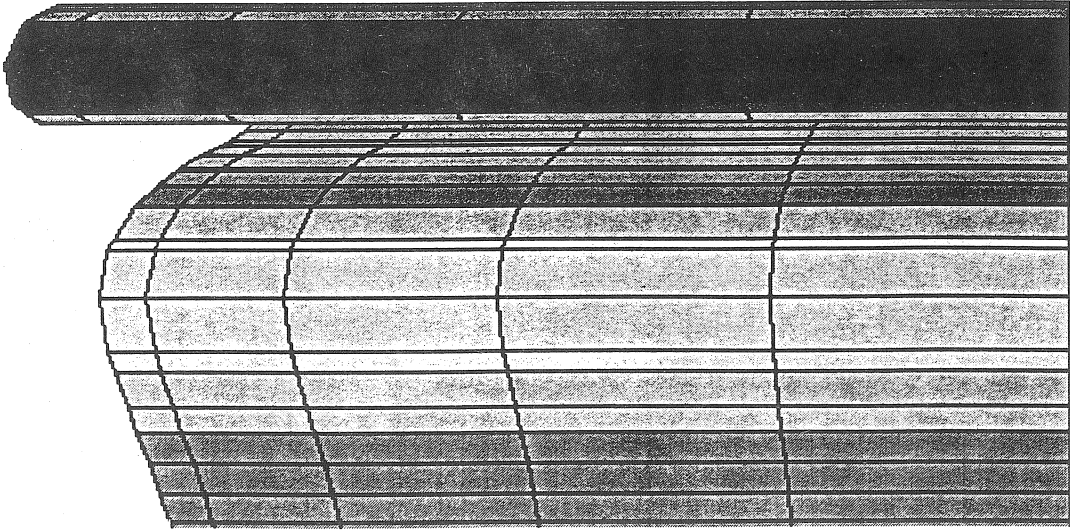
(a)



(b)

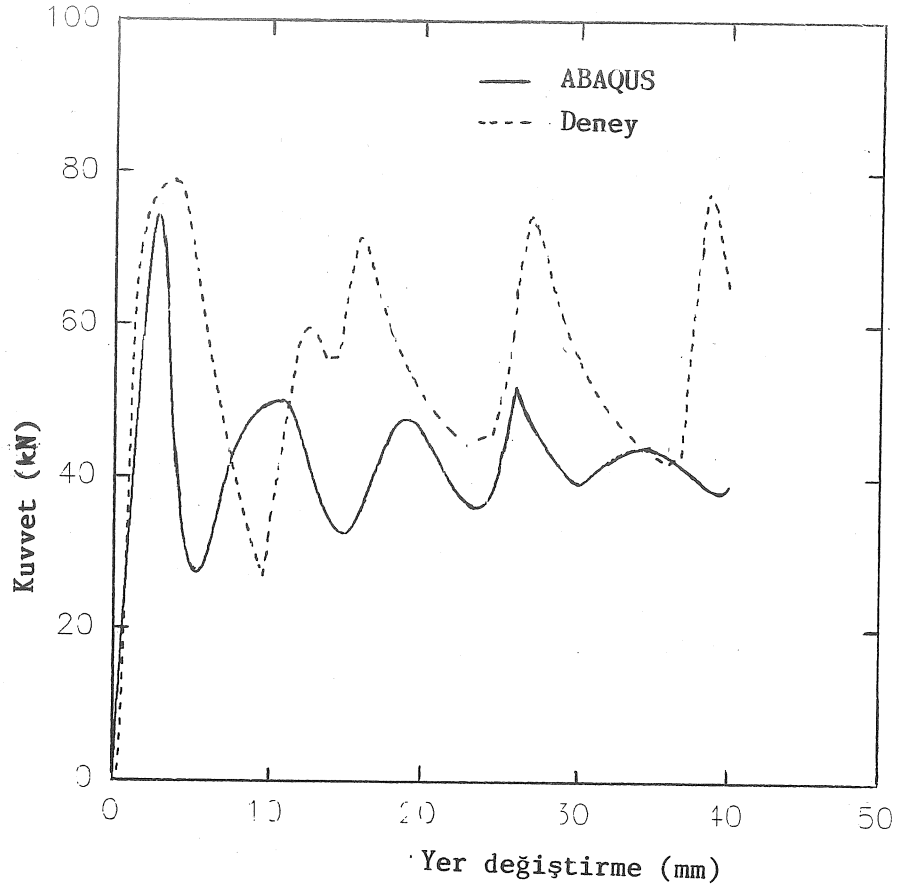


(c)



(d)

Şekil 2. Boru Ucunun Aksenal Buruşma Safhaları (Yarı Kesit), (a) Yer değişimi = 5.6 mm, (b) Yer değişimi = 10.5 mm, (c) Yer değişimi = 15.1 mm, (d) Yer değişimi = 21.9 mm.



Şekil 3. Yük-Yer Değişirme Eğrileri

basma yükü 41.2 kN olarak bulunmuştur ve bu değer deneysel değerlerden %23 daha azdır. Fakat bu değer mevcut en iyi analitik model olan Abramowicz ve Jones'ın teorisi ile elde edilen değer ile yaklaşık olarak aynı değeri vermiştir.

Tablo 1. Ortalama Basma Yükü ve Silindirik Halka Uzunlukları

Açıklama	Ortalama basma yükü P [kN]	Halka uzunluğu H [mm]
ABAQUS sonucu	41.2	4.5
Deneysel sonuç	53.4	6.4 ± 3
Abramowicz ve Jones'ın teorisi	41.6	-
Timosenko'nun teorisi	30.7	7.8
Alexander'in teorisi	29.8	6.1

Mevcut teoriler ortalama basma yükünün belirlenmesi için geçerlidir. Buruşmanın başlangıç

safhasında oluşan ilk tepe yükünü ve dalgali yük-yer değiştirme değerini analitik modellerle elde etmek mümkün olmamaktadır. Sonlu elemanlar metodu bu karmaşık safhaların modellenmesine imkan tanımıştır. İlk tepe yük değeri sonlu elemanlar yöntemiyle 73.3 kN olarak bulunurken deneysel olarak elde edilen değer 78.9 kN'dur. Sonlu elemanlar yöntemi ile % 7 daha az bir ilk tepe değeri bulunmuştur ve bu kabul edilebilir hata sınırları içerisindedir. Deneylerde gözleendiği gibi tepe yük sayısı buruşma sırasında oluşan aksenal simetrik yuvarlak yüzeyle halka sayısına eşittir. Aynı sayıdaki tepe yük değeri sonlu elemanlar modelinde de elde edilmiştir. Fakat sonlu elemanlar modelinde tepe yük değerleri daha az yer değiştirme değerlerinde gözlenmiştir.

Buruşmanın ilk safhalarını gösteren ıktılar Şekil 2'de verilmiştir. Şekiller basma eksenine göre yarı kesit olup yalnızca borunun buruşan ucunun farklı yer değiştirme değerleri için radyal yöndeki hareket miktarlarını vermektedir. Bu şekil değişikliği deneyler sırasında gözlenen şekil değişikliği ile uyum içerisindedir. Sonlu elemanlar modeli, analitik modellemesi çok karmaşık olan buruşmanın ilk safhalarına açıklık getirmiştir. Burada önemle belirtilmesi gereken konu basma başlangıcında boru ucu

içeri doğru hareket etmektedir. Bir süre sonra oluşan ilk halkayı takip eden yeni halkalar devamlı bir S-şekli çizmektedir. Halkalar boru çeperinin ne tümüylü dışında ne de içerisinde oluşmaktadır. Halka uzunluğunun çoğu boru çeperinin dışarısında oluşmaktadır. Tesbit edilen halka uzunluğunun (4.5 mm) 3.2 mm 'si boru çeperinin dışına doğru uzanırken 1.3 mm 'lik kısmı boru çeperinin içerisine doğru uzanmaktadır. Fakat yine de bu değerler deneysel olarak tesbit edilen halka uzunluklarından daha azdır.

Gerinim sertleşmesinin de hesaba katılmasıyla elde edilecek malzeme modeli gerçeğe daha yakın sonuçlar veren bir sonlu elemanlar modeline imkan tanıyacaktır. Böyle bir model özellikle halka uzunluğu değerlerinde bir iyileşme sağlayacaktır. Daha çok elemandan oluşan ağların kullanılması ile hesaplama zamanını artırmakla birlikte daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir. Ayrıca daha çok düğüme sahip elemanlarla (örneğin 4-düğümlü aksenal simetrik katı elemanlar) oluşturulacak bir model daha iyi sonuçlar verebilir. Sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesi gelecek çalışmaların temasını oluşturacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazar bu çalışmanın yapılması sırasında kullanılan yazılım ve donanım olanaklarını sağlayan ODTÜ-BİLTİR Merkezi'ne teşekkür eder.

FINITE ELEMENT MODELLING OF AXIAL TUBE CRUSHING

In the present paper, finite element modelling of axial crushing of thin-walled tubes was done. For the modelling, ABAQUS Version 5.4 finite element package program was used. The axial mean collapse load for crushing and the axial symmetric fold length predicted were compared with the theoretical and experimental results.

KAYNAKÇA

1. Çolakoğlu, A. ve Yıldırım, R. O., Mekanik Şok Tutucular, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, ODTÜ Ankara, 2 (1994) 4, 127-137.
2. Alexander, J. M., An Approximate Analysis of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading, Quart. J. Mech. and Appl. Math., 13, (1960), 10-16.
3. Timoshenko, S. P. ve Gere, J. M., Theory of Elastic Stability, Second edition, McGraw-Hill Book Company, 1961.
4. Abramowicz, W. ve Jones, N., Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes, Int. J. Impact Eng., 2 (1984), 236-281.
5. Çolakoğlu, A., Boruların Aksenal Yük Altında Buruşması, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, ODTÜ Ankara, 2 (1995) 5, 225-230.
6. ABAQUS Hibbit, Karlsson and Sorenson, Inc. Sonlu Elemanlar Analiz Programı, Versiyon 5.4.