

ALÜMİNYUM KÖPÜK DOLU ALÜMİNYUM TÜPLERİN EZİLME DAVRANIŞLARI

CRUSHING BEHAVIOR OF ALUMINUM FOAM FILLED ALUMINUM TUBES

Halit KAVİ, Sinan YÜKSEL, Metin TANOĞLU, Mustafa GÜDEN*

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Son yıllarda hafif alüminyum köpük dolu tüplerin çarpışma enerjisi sönmleme amaçlı kullanımı için artan bir ilgi vardır. Tekli veya içiçe geçmiş köpük dolu tüpler bu amaç doğrultusundaki uygulamalar için çalışılmasına rağmen altgen ve kübik paketleme geometrileri henüz araştırılmamıştır. Bu çalışmanın nihai amacı tekli köpük dolu tüplerin enerji emme kapasitesini artıracak çoklu tüp geometrilerini belirlemektir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpük malzemeler toz metalürjisi yöntemi ile hazırlanmıştır. Köpük numuneler blok köpük malzemeden kesilerek hazırlanmıştır. Alüminyum köpük dolu tekli tüpler üzerinde basma testleri yapılmış ve sonuçlar ortalama ezilme kuvveti cinsinden değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük, Çarpışma kutusu, Eksenel ezilme

ABSTRACT

In recent years, there has existed an increasing interest on the use of light-weight aluminium foams as the impact energy absorber (in connection with columnar structures). Although single and double tubes filled with aluminium foam were considered and studied for these applications, tube geometries including hexagonal and cubic packing have not been investigated. The ultimate goal of this study is to identify multiple tube geometries that will enhance the specific energy absorption of the filled single tube. The aluminium foam filler was prepared in house by the powder metallurgical route (expanding foamable precursors containing blowing agent of TiH₂). The foam samples were core-drilled from the prepared foam sheets. Initial compression tests were conducted on the foam filled single tubes. The results were analyzed in terms of average crushing loads.

Keywords: Aluminium foam, Crash box, Axial crushing

1. GİRİŞ

Tüpler ve kolon şeklindeki yapılar deformasyon enerjisini yüksek verimlilikle emebilen yapılardır. Dolayısıyla bir çok mühendislik uygulamasında, örneğin köprüler, otomobiller, uçaklar ve binalarda kullanım alanları vardır. Basma kuvveti altında tüpler 3 farklı şekilde ezilme davranışı gösterirler; simetrik, simetrik olmayan ve karışık. Tüpler köpük ve benzeri hücre yapısına sahip (örneğin balpeteği) malzemelerle ile doldurulduğunda, ezilme kuvveti boş tüp ve köpüğün ezilme kuvvetinin toplamının üstünde bir değere ulaşır ve bu etkileşim etkisi olarak bilinmektedir (Seitzberger,1997). Literatürde yapılan çalışmalar tek ve içiçe geçmiş dolu tüplerin özelliklerini belirlemeye yönelik olup (Hanssen, 2001, 2000a, 2000b, 1999, Hall, 2001, Seitzberger, 2000, Santosa, 1998, Reddy, 1988) köpük dolu çoklu tüp yapılar henüz çalışılmamıştır. Benzer şekilde köpük dolu fiber takviyeli polimerik tüplerinde ezilme davranışları da çok iyi bilinmemektedir. Bu yapılar başta otomobil endüstrisi olmak

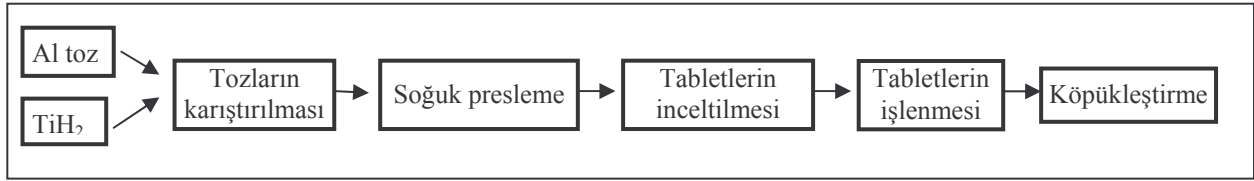
üzere bir çok alanda çarpışma enerjisini emme potansiyellerine sahiptirler ve son yıllarda yapılan araştırmalar bu yapıların enerji emme özelliklerini artırmaya yöneliktir.

Bu çalışmada üniversitemizde TÜBİTAK tarafından desteklenen *köpük dolu çoklu alüminyum ve kompozit tüplerin davranışlarının belirlenmesi* projesinin ilk sonuçları sunulmuştur. Proje üç ana kısımdan oluşmaktadır; alüminyum köpük dolgu malzemesinin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, köpük dolu tek alüminyum ve kompozit tüplerin ezilme davranışlarının belirlenmesi ve çoklu paketlenmiş tüp geometrilerinin tasarlanması ve mekanik testi. Bu çalışmada sadece köpük dolu tekli alüminyum tüplerin ezilme davranışı sunulacak, tasarlanan çoklu tüp geometrileri ise ileriki günlerde çalışılacaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Alüminyum Köpük Üretimi

Alüminyum köpük üretiminde kullanılan metot, Fraunhofer Resource Center (Almanya) tarafından patentlenmiştir (Baumeister, 1992). Kullanılan metot, alüminyum toz metal ile köpükleştirici maddenin (TiH_2) karıştırılması ile başlamaktadır. Karışım ağırlık olarak %99 Alüminyum toz ve %1 TiH_2 içermektedir (Şekil 1).



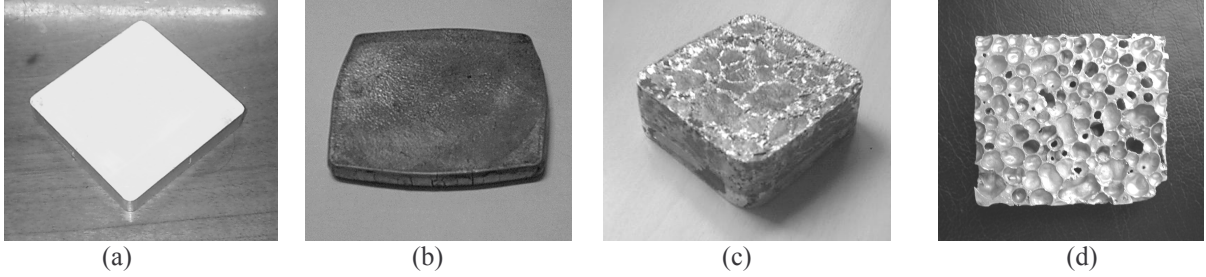
Şekil 1. Alüminyum köpük metal üretiminin şematik gösterimi.

İkinci aşamada ise toz karışım kalıp içerisinde 100 MPa'da soğuk sıkıştırılarak 11mm x 70mm x 70 mm boyutlarında köpükleşecek tabletler hazırlanmaktadır (Şekil 2(a)). Tabletlerin yoğunlukları uygulanan basınçla artmakta, ancak etkin köpükleşme için gereken yoğunluğun (~%98) altında kalmaktadır. Etkin bir köpükleşme için, köpük yapıcı maddenin bozulması sonucunda çıkan gazın kaçmasına engel olabilecek yoğunluğa sahip yarı ürün hazırlanması gerekmektedir. Tablet yoğunluğunu istenen yoğunluğa çıkartabilmek için tabletler 350 °C 'de şahmerdan kullanılarak inceltirilmiştir (Şekil 2 (b)). Sıcak haddeleme sonucunda tablet yoğunluğu %98'e çıkmıştır.

Köpükleşecek yarı ürün kalıp içerisinde köpükleştirilmediğinde şekilsiz bir metal köpük parçası oluşmaktadır. Kalıp içerisinde ise yarı ürün köpükleşerek kalıbın şeklini almaktadır (Şekil 2(c)). Sıcak presleme sonucunda inceltelen tabletlerin uç kısımlarında çatlakların oluştuğu ve bu yüzden metal yoğunluğunun düşük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle inceltelen tabletlerin kenar bölümleri kalıbın boyutlarına uyacak şekilde kesilerek, kalıp ile sıkı bir temas sağlanmıştır.

Köpük metal üretimindeki bir sonraki aşama ısıtma işlemidir. İlk aşamada köpükleştirme kalıbı fırın içine konulmakta ve kalıp uygun sıcaklığa erişinceye kadar (750 °C) beklenmektedir. Daha sonraki aşamada ise tablet sıcak kalıbın içine konulmaktadır. Isıtma esnasında metal matris içine gömülmüş olan TiH_2 bozunmaya başlamakta ve gaz çıkmaktadır. Açığa çıkan H_2 gazı, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 2 (d)). Köpükleşme sonucunda ilk tablet boyuna göre yaklaşık dört kat uzama meydana gelmektedir.

Köpükleştirme işleminde, tabletin fırında kalma zamanı, köpüğün mikro yapısını etkileyen bir faktör olduğu için üretim süresince göz önünde bulundurulmaktadır. Yapılan denemeler sonucunda homojen hücre yapısına sahip köpükler 5 dakika fırınlama süresi sonunda elde edilmiştir. Daha az sürelerde tablet kalıbın tam şeklini alamamakta, daha fazla sürelerde ise drenaj sonucu köpükte çökmeler oluşmaktadır. Fırından çıkarılan sıvı köpüklerde hücre çökmesinin engellenmesi için hızlıca soğutulması gerekmektedir. Soğutma işlemi için 3 yol denenmiştir. Bunlar a) su dolu bir hazneye sıcak kalıbın tamamen daldırılması b) kalıba su püskürtülerek daha yavaş soğutma c) kalıbın kendi haline bırakılarak hava yardımıyla soğuma. Bu denemelerde en etkin sonuç su püskürtülerek yapılan soğutma sonucu elde edilmiştir (Şekil 2 (c)). Elde edilen blok köpük malzeme 78 mm x 78 mm x 35 mm boyutlarındadır.



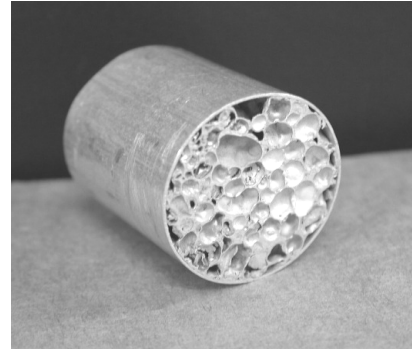
Şekil 2.(a) Alüminyum tablet (b) inceltilmiş alüminyum tablet (c) blok alüminyum köpük (d) blok köpük kesiti

2.2. Üretilen Köpüklerin Karakterizasyonu

Blok halinde üretilen köpük malzemeden delme testeresi yardımıyla silindirik basma numuneleri çıkartılmıştır (Şekil 3). Kesilen numuneler 30 mm boy ve 24,6 mm çap ölçülerine sahiptir. Silindirik numunelerin yoğunlukları basma testinden önce ölçülmüştür. Belirlenen yoğunluklardaki köpüklere (0,27 , 0,35 ve 0,47 gr/cm³) basma testleri yapılmıştır. Her numune için testler, Shimadzu test makinası ile 2,5 mm/dak hızında yapılarak gerilme/birim şekil değişim miktarı grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3. Silindirik basma test numunesi.



Şekil 4. Alüminyum köpük dolu alüminyum tüp.

2.3. Alüminyum Köpüklerin Tüplere Doldurulması

Çalışmada 27 mm boyunda 24,88 dış çap ve 0,3 mm et kalınlığına sahip alüminyum tüpler kullanılmıştır. Bu tüpler üretilen 0,27 , 0,35 ve 0,47 gr/cm³ yoğunluklarındaki köpüklerin sıkı geçirilmesiyle doldurulmuştur (Şekil 4). Boş ve dolu tüplere 2,5 mm/dak hızında basma testleri uygulanmıştır.

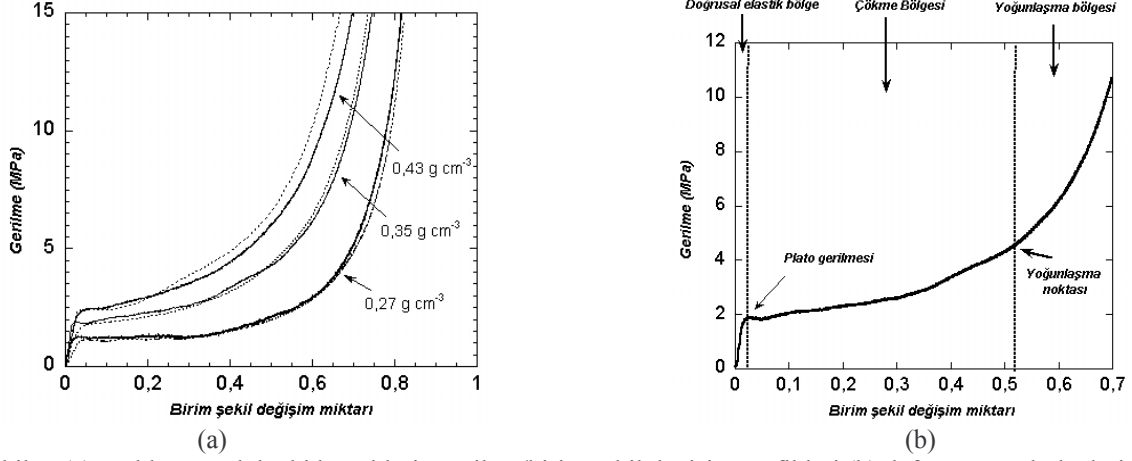
3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Köpük Metal Davranışı

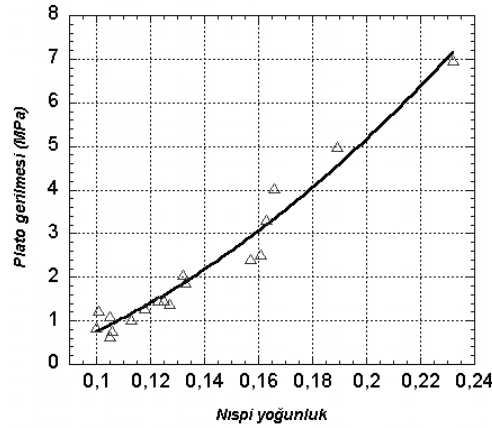
Hazırlanan köpüklere yapılan basma testi gerilme/birim şekil değişim miktarı grafikleri Şekil 5(a)'da gösterilmiştir. Grafik üç farklı bölgeden oluşmaktadır; bunlar doğrusal elastik, çökme ve yoğunlaşma bölgeleri (Şekil 5(b)). Elastik bölge hücre duvarlarının bükülmesi ve/veya yırtılmasıyla sona ermekte ve çökme bölgesi başlamaktadır. Çökme bölgesinde bölgesel deformasyon (hücre çökmesi ve yoğunlaşması) diğer bölgelere yayılarak devam etmektedir. Bu bölgenin bitiminde hücreler sıkışarak yoğunluğu artmış bir yapı oluşturur. Çökme bölgesinde oluşan gerilme değişimleri bölgesel deformasyonun yayılması sırasında oluşmaktadır. Yapısında homojen hücre boyut ve dağılımı bulunduran köpüklerin, çökme bölgesinde sabit bir deformasyon gerilmesi (plato gerilmesi) göstermesi beklenir. Gerçekte ise hücre boyutu ve dağılımındaki farklılıklar, zayıf hücrelerin önce, kuvvetli hücrelerin ise sonradan çökmesine sebep olur ve bu yüzden gerilme çökme bölgesinde artan bir özellik gösterir. Metal köpüklerde plastik deformasyon plato gerilmesinde başlamaktadır. Şekil 6'da hazırlanan köpüklerin plato gerilmesi (elastik bölgenin bittiği gerilme) nispi yoğunluk ile değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği üzere metal köpük nispi yoğunluğunun artması ile hazırlanan köpüklerdeki plato gerilmesini artırmaktadır. Nispi yoğunluk (ρ^*) değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$\rho^* = \frac{\rho_k}{\rho_m} \quad (1)$$

Burada, ρ_k ve ρ_m köpüğün ve köpük malzemesinin yoğunluğudur.



Şekil 5. (a) Farklı yoğunluktaki köpüklerin gerilme/birim şekil değişim grafikleri (b) deformasyon bölgelerinin şematik gösterimi.



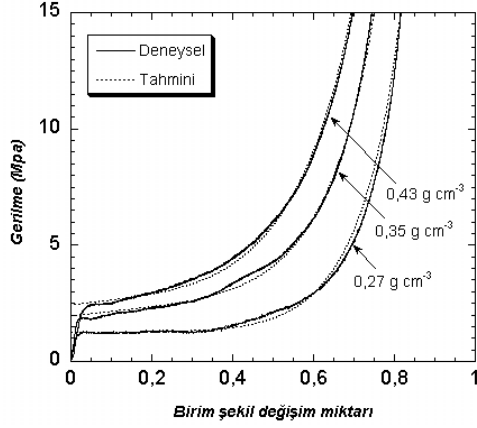
Şekil 6. Plato gerilemesine karşılık nispi yoğunluk.

Norveçli araştırmacı Hanssen (Hanssen, 2002) aksenal yüklemelerde alüminyum köpüklerin gerilme/birim şekil değişim miktarları arasındaki ilişkileri modellemek için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma = \sigma_p + \gamma \frac{e}{e_D} + \alpha \ln \left[1 / \left(1 - \left(\frac{e}{e_D} \right)^\beta \right) \right], \quad e_D = 1 - \frac{\rho_k}{\rho_m} \quad (2)$$

Denklem 2'de σ_p , e , e_D , γ , α ve β sırasıyla plato gerilmesi, birim şekil değişim miktarı, yoğunlaşma birim şekil değişim miktarı, deformasyon sertleşme değişkeni ve oran ve şekil katsayılarıdır.

Denklem 2 hazırlanan köpüklere uydurularak (Şekil 7), σ_p , γ , α ve β değerleri her yoğunluk için hesaplanmıştır (Tablo 1). Denklem 2'yi kullanarak dolgu köpük malzemesinin kuvvet/yer değiştirme miktarları çalışılan üç yoğunluk için hesaplanmıştır.



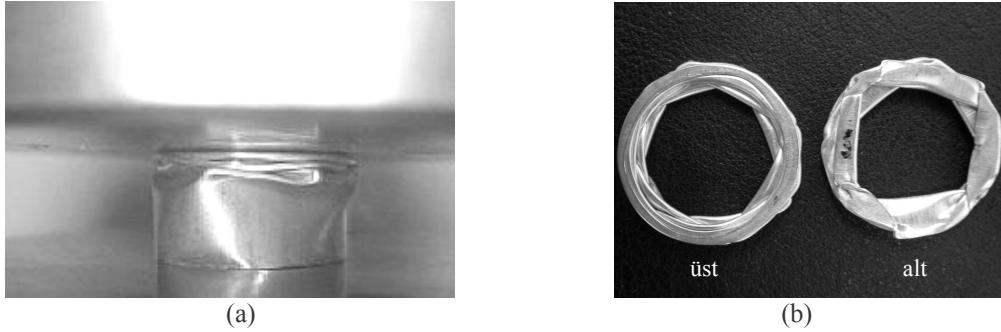
Şekil 7. Model ile deneysel sonuçların karşılaştırılması

Tablo 1. Formülasyonda yer alan katsayı değerleri

Köpük yoğunluğu (gr/cm ³)	σ_p	γ	α	β
0,27	1,24	0,2	17	6
0,35	1,96	1,7	17	5
0,43	2,44	1,7	18	4

3.2. Boş ve Köpük metal dolu tüp basma davranışları

Boş alüminyum tüpler simetrik olmayan (elmas) ezilme davranışı göstermektedir (Şekil 8(a) ve (b)). Çalışılan Al köpük yoğunluklarında ise dolu tüplerdeki deformasyon modu elmadan simetrik ezilmeye dönmektedir (Şekil 9).



Şekil 8. (a) boş alüminyum tüpün ezilme davranışı (b) ezilmiş tüpün üst ve alt görünüşleri.

Şekil 9. Köpük (0,27 g/cm³) dolu alüminyum tüpün ezilme davranışı (simetrik deformasyon).

Santosa ve Wierzbicki (Santosa, 2000) sonlu eleman analizine dayalı yaptıkları çalışma sonucu köpük dolu kenarları uzunluğu b olan kare tüpler için aşağıdaki formülü önermiştir.

$$P_{a,f} = P_a + C\sigma_p b^2 \quad (3)$$

Denklem 3'de $P_{a,f}$, P_a ve σ_p sırası ile köpük dolu tüpün ortalama ezilme yükü, boş tüpün ortalama ezilme yükü ve köpüğün plato gerilmesidir. C ise kuvvetlendirme sabiti olarak düşünülmüştür. Silindirik tüpler için denklem 3 aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$C = \frac{P_{a,f} - P_a}{\sigma_p \pi R^2} = \frac{\Delta P_a}{P_f} \quad (4)$$

Burada R tüpün yarıçapıdır. Ortalama kuvvet ise aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

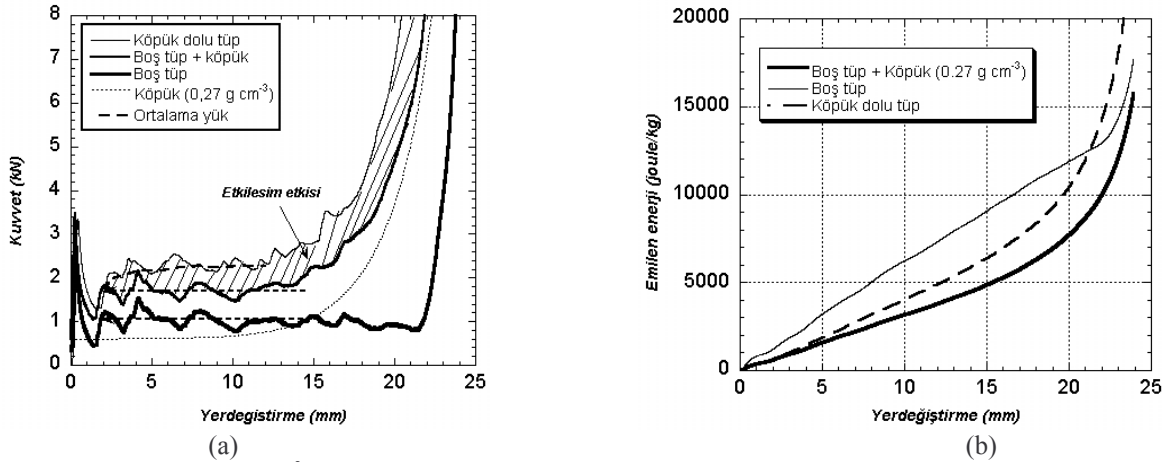
$$P_a = \frac{\int P d\delta}{\delta} \quad (5)$$

Burada P ve δ uygulanan kuvvet ve yerdeğiştirme miktarıdır. Ayrıca emilen enerji miktarı ise

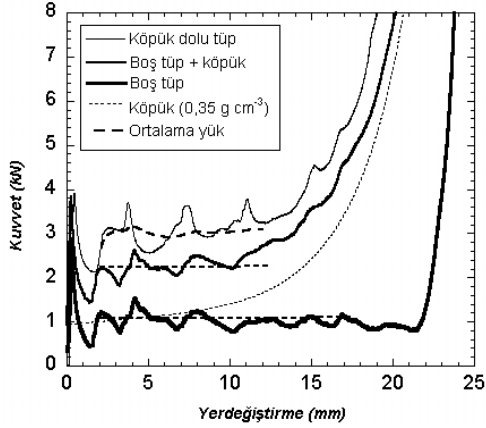
$$E = \frac{\int P d\delta}{m} \quad (6)$$

denklemi ile hesaplanmaktadır. Denklem 6'da m tüpün ağırlığıdır. Şekil 10(a)'da boş tüpün, köpüğün (0.27 gr/cm^3) ve dolu tüpün kuvvet/yerdeğiştirme ve ortalama kuvvet/yerdeğiştirme grafikleri gösterilmiştir. Bu şekilde karşılaştırma amacı ile boş tüp ve köpük kuvvetlerinin toplamı da gösterilmiştir. Şekil 10(a)'da görüleceği üzere dolu tüpün kuvveti boş tüp+köpüğün kuvvetinden daha yüksektir. Şekil 10(b) ise dolu tüpün enerji emme miktarının beklenen enerji emme miktarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak dolu tüpün enerji miktarı boş tüpten daha düşük olduğuda Şekil 10(b)'de görülmektedir. Çalışılan diğer köpük yoğunluklarında da benzer sonuçlar bulunmuştur (Şekil 11 ve 12).

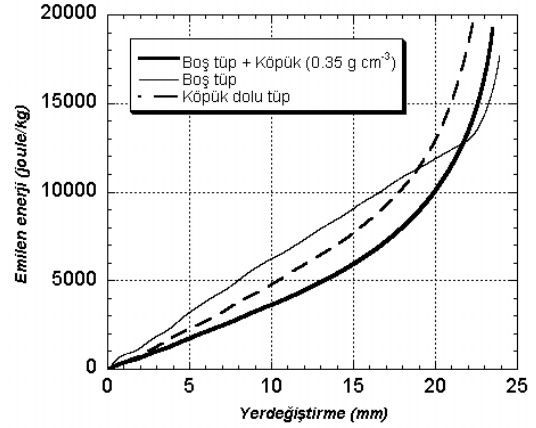
Kuvvetlendirme sabiti üç ayrı yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpler için hesaplanmış ve Şekil 13'de gösterilmiştir. Şekil 13'deki liner interpolasyon C sabitinin değerini 1,731 vermektedir. Bu değer Santosa ve Wierzbicki'nin (Santosa, 2000) kare kesite sahip köpük dolu tüpler için uyguladığı çalışma sonucu bulunan C değerine oldukça yakındır (1,8). Bu sonuç dolu tüplerdeki kuvvet artışı, köpüğün plato kuvvetinden yaklaşık 1,7 kere daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. (a) $0,27 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpün kuvvet/yerdeğiştirme grafiği (b) $0,27 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpün emilen enerji / yerdeğiştirme grafiği

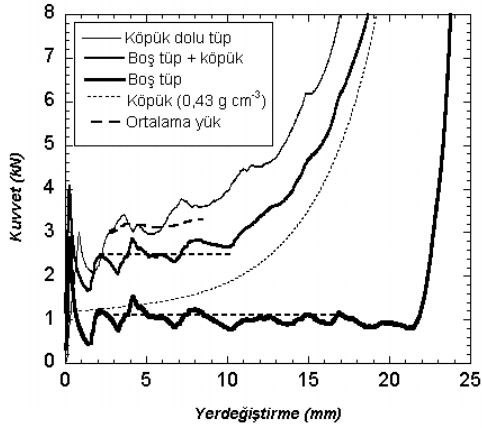


(a)

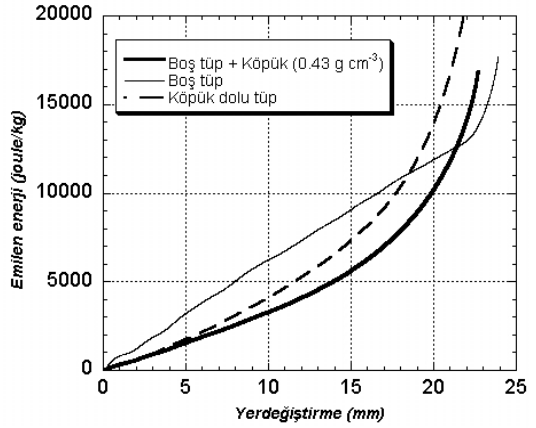


(b)

Şekil 11.(a) 0,35 gr/cm³ yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpün kuvvet/yerdeğiştirme grafiği (b) 0,35 gr/cm³ yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpün emilen enerji / yerdeğiştirme grafiği

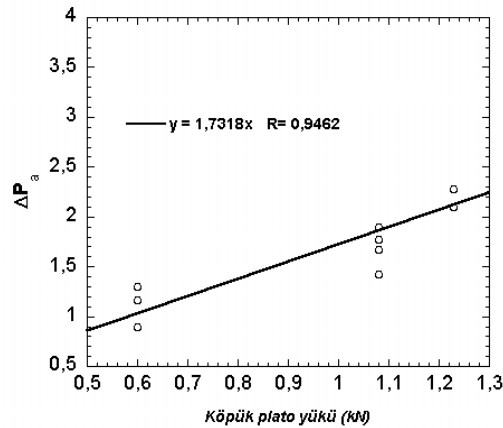


(a)



(b)

Şekil 12. (a) 0,43 gr/cm³ yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpün kuvvet/yerdeğiştirme grafiği (b) 0,43 gr/cm³ yoğunlukta köpük doldurulmuş tüpün emilen enerji / yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 13. ΔP_a / Köpük plato yükü grafiği.

Dolu tüplerin ezilmesi esnasında oluşan etkileşim sadece köpüğün aksenal deformasyonu ile oluşmamaktadır. Katlanmalar esnasında dolgu malzemesi tüpün yatay yöndeki yer değişimine direnç göstermektedir. Dolayısı ile dolgu malzemesinin hem aksenal ve hem de yatay yöndeki ezilme kuvvetleri tüpün ezilme kuvvetini etkilemektedir.

Tekli tüplerin basma testleri sonucunda belirlenen kuvvetlendirme sabiti çalışmanın ileriki aşamalarında altıgen ve kübik paketleme geometrilerini içeren çoklu tüp geometrileri denemelerinde karşılaştırma amacı ile kullanılacaktır.

4. SONUÇLAR

Çalışma sonucunda çeşitli yoğunluklardaki alüminyum köpük metallerin özellikleri belirlenmiş ve tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanımı incelenmiştir. Köpük metal gerilme/birim şekil miktarı davranışları bir denkleme uydurularak belirlenmiştir. Çalışılan köpük yoğunluklarında, dolu tüplerde deformasyon modunun simetrik olmayandan simetriğe dönüştüğü bulunmuştur. Ayrıca dolu tüplerdeki kuvvet artışı kuvvetlendirme sabiti ile belirlenmiştir. Dolu tüplerdeki kuvvetlendirme sabiti daha önceki çalışmalarda bulunan değerlere oldukça yakındır.

[1]. TEŞEKKÜR

Araştırmacılar, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) MİSAG 227 projesine verdiği destekten dolayı teşekkür eder.

6. KAYNAKLAR

- [1]. BAUMEISTER, J., SCHRADER, H., 1992 US Patent No. 5151246.
- [2]. HALL, I. W., EBİL, O., GUDEN, M., YU, C. J., 2001, Quasi-static and dynamic crushing of empty and foam filled tubes, Journal of Materials Science, sayı 36, S 5853-5860.
- [3]. HANSSEN, A.G., LANGSETH, M., HOPPERSTAD, O.S., 2002, Crash Behavior of Foam-based Components: Validation of Numerical Simulations, Advanced Engineering Materials, sayı 10, S 771-776
- [4]. HANSSEN, A. G., LANGSETH, M., HOPPERSTAD, O.S., 2001, Optimum design for energy absorption of square aluminum columns with aluminum foam filler, International Journal of Mechanical Sciences, sayı 43, S 153-176.
- [5]. HANSSEN, A. G., LANGSETH, M., HOPPERSTAD O.S., 2000a, Static and dynamic crushing of circular aluminum extrusions with aluminum foam filler, International Journal of Impact Engineering, sayı 24, S 475-507
- [6]. HANSSEN, A. G., LANGSETH, M., HOPPERSTAD, O.S., 2000b, Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler, Int. Journal of Impact Engineering, sayı 24, S 347-383.
- [7]. HANSSEN, A. G., LANGSETH, M., HOPPERSTAD, O.S., 1999, Static crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler, International Journal of Mechanical Science, sayı 41, S 967-993.
- [8]. REDDY, TY., WALL, RJ., 1988, Axial compression of foam filled thin-walled circular tubes, International Journal of Impact Engineering, sayı 7 (2), S151-166
- [9]. SANTOSA, S., WIERZBICKI, T., HANSSEN, A.G., LANGSETH, M., 2000, Experimental and Numerical Studies of Foam-filled Sections, International Journal of Impact Engineering, sayı 24, S 509-534.
- [10]. SANTOSA, S., WIERZBICKI, T., 1998, Crash Behavior of Box Columns Filled with Aluminum Honeycomb or Foam, Computers and structures, sayı 68 S 343-367
- [11]. SEITZBERGER, M., RAMMERSTORFER, F. G., GRADINGER, R., DEGISCHER, H. P., BLAIMSCHEIN, M., WALCH, C., 2000, Experimental Studies on the Quasi-static Axial Crushing of Steel Columns Filled with Aluminium Foam, International Journal of Solids and Structures, sayı 37, S 4125-4147
- [12]. SEITZBERGER, M., RAMMERSTORFER, F. G., DEGISCHER, H. P., 1997, Crushing of Axially Compressed Steel Tubes Filled with Aluminum Foam, Acta Mechanica, sayı 125, S 93-105