

ALÜMİNYUM KÖPÜK DOLU KOMPOZİT/ALÜMİNYUM İKİLİ TÜPLERİN EZİLME DAVRANIŞLARI

COMPRESSION BEHAVIOR OF Al-FOAM FILLED COMPOSITE/ALUMINUM HYBRID TUBES

S. Yüksel, M. Tanoğlu & M. Güden

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Müh. Bölümü, Gülbahçe Köyü, Urla, İZMİR

ÖZET: Tüp sarma yöntemiyle hazırlanan ince duvarlı cam fiber takviyeli polyester kompozit/ Alüminyum ikili tüplerin ezilme davranışları statik basma hızlarında (25 mm/dak) deneysel incelenmiştir. Tüplerde dolgu malzemesi olarak kullanılan Al köpüğün ezilme yük değerlerine ve deformasyon mekanizmalarına etkileri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum köpük, Ezilme davranışı, İkili tüp, Kompozit tüp,

ABSTRACT: The quas-static (25mm/min) crushing behavior of thin walled rolled tubes of glass fiber reinforced polyester composite /Aluminum hybrid tubes were investigated experimentally. The effects of Al-foam filler on the crushing loads and deformation mechanisms were determined.

Key words: Aluminum foam, Crushing behavior, Hybrid tube, Composite tube

1 GİRİŞ

Deformasyon enerjisini emen sistemlerin araçlarda kullanımı trafik kazalarında araç ve yolcu güvenliğine verilen önemin artmasıyla birlikte artmış ve yeni ezilebilen malzeme sistemlerine yönelik bir çok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Ezilebilen metalik boru ve profillerin yerine daha hafif ve daha yüksek Spesifik Enerji Emilme (SAE) değerlerine sahip kompozit tüpler ve dolgu köpük malzemeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Hamada 1998, Jimenez 2000). Alüminyum metal köpük dolu tüplerin son yıllarda yeni geliştirilen otomobillerde, şase ve tampon arasına yerleştirilebilecek, çarpışma darbe enerjisini söndürebilme (emme) özelliğine sahip, *ezilme kutularında* kullanımı araştırılmaktadır. Bu araştırmalar sonucunda, metal köpük dolu tüplerin basma özelliklerinde önemli değişiklikler gözlenmiş ve dolu tüpteki enerji emme miktarının, sadece boş tüp ve köpüğün enerji emme miktarlarının toplamından daha yüksek olduğu bulunmuştur (Toksoy 2003, Kavi 2004). Bu özellik, metal köpük dolu tüpler için, otomobil şaselerinin ezilmesini 15-20 km/saat hızlarına kadar olan çarpışmalarda koruyabilecek, şase ve tampon arasına yerleştirilmesi tasarlanan ezilme kutularında kullanım potansiyeli oluşturmaktadır. Bu çalışmada Al-köpük dolusunun kompozit/Al ikili tüplerin ezilme davranışlarına etkileri deneysel araştırılmıştır. Sonuçlar boş kompozit ve boş ikili tüplerin ezilme davranışları ile karşılaştırılmıştır.

2 METOD

2.1 Malzeme üretimi

Bu çalışmada kullanılan kapalı hücreli Al köpük ve kompozit tüpler İYTE Makine Mühendisliği laboratuvarlarında, sırasıyla, Fraunhofer Resource Center (Almanya) tarafından patentlenmiş toz metalurjisi yöntemi (Baumgartner ve diğerleri 2000) ve tüp sarma yöntemiyle hazırlanmıştır. Köpük hazırlamada kullanılan preslenmiş tabletlerin köpükleştirilmesi metodunda, toz metal ve köpük yapıcı madde (ağırlıkça %1 TiH₂) karıştırıldıktan sonra soğuk presleme ve sıcak haddelme ile köpükleşecek yoğun yapıya sahip yarı ürün haline getirilmektedir. Daha sonra yarı ürün metalin ergime sıcaklığının üstüne ısıtılmaktadır. Isıtma esnasında köpük yapıcı madde bозunmakta ve açığa çıkan gaz, ergimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Tüp sarma yönteminde ise 165 g/m² alan yoğunluğuna sahip cam fiber kumaş kullanılmıştır. Polyester reçineyle ısıtılan kumaş daha sonra 25 mm çaplı çelik mandrele fiber açılı mandrele 45/45 derece açı yapacak şekilde sarılmıştır. Reçine 120 °C de 2 saat kürlenerek sertleştirilmiştir. 0.55 mm kalınlığındaki tüpler yaklaşık üç kat cam fiber kumaşın sarılmasıyla hazırlanmıştır. İkili tüplerde (Şekil 1) kullanılan 25 mm çaplı, 0.29 mm et kalınlığına sahip derin çekme Al tüpler METALUM (Türkiye) firmasından temin edilmiştir.

2.2 Numunelerin hazırlanması ve basma testleri

Hazırlanan kompozit ve Al tüpler basma testleri için 27 mm uzunlukta kesilmiştir. İkili tüplerde ise Al tüp dış yüzeyi kompozit tüpün iç yüzeyine reçine ile yapıştırılmıştır. Dolgu Al köpük tel erezyonda hasas işlenerek hazırlanmış ve yine reçine ile tüplerin iç yüzeyine yapıştırılmıştır. Basma testleri bilgisayar kontrollü Schmadzu AGI universal test makinası ile 25 mm/dak basma hızında yapılmıştır.

3 DENEY SONUÇLARI

Boş kompozit tüplerin basma yük-deplasman grafikleri Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu testlerde ilerleyen ezilme modunda deforme olan tüpler birbirine çok yakın ezilme davranışları göstermişlerdir. Kısmi katastropik kırılmayla deforme olan kompozit tüp ise grafikte kesik çizgiyle gösterilmektedir. Daha önce Ramakrishna ve Hamada (Ramakrishna ve Hamada 1998) tarafından belirtildiği üzere tam katastropik kırılma maksimum yükten sonra yük değerlerinde düşüşe neden olmaktadır.

İlerleyen ezilme modunda deformasyon mekanizmaları mikroskobik incelenmiştir. Basma esnasında kompozitte matris kırılması, fiber kırılması ve fiber-matris arayüzeyinde ayrılmalara (Şekil 3) oluşmaktadır. Kompozit malzemede mikroskobik boyutta oluşan bu deformasyon mekanizmaları veya hasarları ezilme testi sürecinde kompozitin soğurduğu enerjinin nedenleridir.

Şekil 4(a)'da ilerleyen ezilme gösteren bir tüpün yük-deplasman grafiği ve Şekil 4(b)'de ise ezilme görüntüleri numara ile gösterilmektedir. Tüp Şekil 4(a)'da gösterilen 1'e kadar elastik deformasyon göstermektedir. Daha sonra basma aparatı yüzeyine yakın bir bölgede tüp eğilmesi ile ilerleyen ezilme davranışı başlamaktadır (Şekil 4(b), 2). İlerleyen ezilme genelde tüp uç yüzeylerinin inceltilmesi ile gerçekleştirilmektedir (Ramakrishna 1998, Jimenez 2000). Basma yükü uygulandığında, tüp ucunda oluşan gerilme konsantrasyonu nedeni ile ilerleyen ezilme başlamaktadır. Bu çalışmada ilerleyen ezilmenin tüpün ucundan başlamasının tüp uç yüzeylerinde oluşan hasarlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüplerin kesilmesi esnasında fiber ve matris arayüzeylerinin kalkması ve tüp yüzeyinin tam düz olmaması tüp uçlarından ezilmenin başlamasına neden olduğu düşünülmektedir. Maksimum yük sonrasında yük değerleri 3 numaraya kadar düşmektedir (Şekil 4 (a)). Bu noktadan sonra yük değerleri artmakta ve deformasyon ilerleyen ezilmeyle devam etmektedir.

Boş ikili tüplerin basma testinde kompozit tüpde ilerleyen ezilme ve eksenel yırtılmalar gözlenmiştir. Bu testlere ait yük deplasman grafikleri Şekil 5'de gösterilmektedir. Boş kompozit tüplerdeki davranışa benzer olarak, eksenel yırtılmalar ezilme yükünü ve

SAE değerlerini azaltmaktadır. Numunelerdeki tüp ağırlıklarındaki farklılıklar, tüp kalınlıklarındaki ve tüpleri birbirine yapıştırmak için kullanılan polyes-ter reçinenin ağırlığındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Reçine miktarının fazla olması tüpler arasında daha kuvvetli bağların oluşmasını ve ezilmenin ilerleyen ezilme ile devam etmesini sağlayabilir. Boş kompozit ve ikili tüplerde ilerleyen ezilme davranışı SAE değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6'da görülmektedir. İkili tüp kullanımı tek kompozit tüp kullanımından enerjistik olarak avantajlı olmadığı yine aynı şekilde görülmektedir.

Tekli kompozit tüplerle ikili tüplerin ezilme davranışları birbirine çok benzediğinden ikili tüplerin deformasyonunda kompozitin baskın olduğu söylenebilir. Bununla birlikte Al tüpün ezilme davranışı ikili tüpde değişmiştir. Şekil 7'de 20 mm deplasman sonrasında ezilmiş ikili tüpün alttan görüntüsü gösterilmektedir. Karşılaştırma için tekli Al tüpün deformasyon görüntüleri Şekil 8'de gösterilmiştir. İkili tüplerdeki Al tüpün deformasyonu elmas moda benzemekle birlikte katlanma boyları ve şekilleri tekli Al tüpteki kadar homojen değildir. Al tüplerin ezilme mekanizmasındaki bu değişiklik kompozit tüpün Al tüpün dışı doğru katlanmasına karşı gösterdiği direncin sonucudur. Şekil 7'de Al metal tüp katlanmalarının tüpün içine doğru olduğu açıkça görülmektedir. Baskı kaymasıyla deforme olan ikili tüplerde, ise Al tüp tek Al tüpün ezilmesine daha yakın bir modda ezilmiştir. Ancak, bu tüplerde de ilerleyen ezilme bölgelerinde Al tüpdeki katlanma sayıları boş Al tüpünden daha fazladır.

Şekil 9'da, ikili tüpün yük deplasman davranışı tekli tüplerle ve bunların yük değerlerinin toplamıyla kıyaslanmıştır. İkili tüpün yük değerlerinin iki boş tüpün yük değerlerinin toplamından daha yüksek olması etkileşim etkisidir. Bu etkileşim kompozit tüpün Al tüpün ezilme mekanizmasını değiştirmesi sonucunda oluşmuştur. Şekil 10'da ikili tüplerin SAE değeri tekli tüplerin değerleriyle ve bunların matematiksel toplamıyla kıyaslanmıştır. Ezilmenin başlarında ikili tüplerin SAE değerleri kompozit tüpün değerlerinden daha yüksek olmasına rağmen deformasyon ilerledikçe kompozit tüpün SAE değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ortalama yüke bağlı SAE değerleri kıyaslandığında boş kompozit tüpler ikili tüplerden daha yüksek SAE değerlerine sahiptir.

Al-köpük dolgu tüplerde ise Şekil 11'de yük deplasman grafiğinden görüldüğü üzere köpük yoğunluğu arttıkça, dolu tüplerde maksimum ve ortalama ezilme yük değerleri de artmaktadır. Köpük dolgu maksimum yük sonrası yük değerinde gözlenen düşüşleri azaltarak daha kararlı bir tüp ezilme mekanizmasının tetiklenmesine ve sürdürülmesine neden olmaktadır. Bu sonuç ise Al köpük dolu tüplerin hepsinde deformasyonun ilerleyen ezilme ile oluşmasını da desteklemektedir. Ezilme testi sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir.

4 SONUÇ

Tablo 1 Köpük dolu kompozit tüplerin ezilme testi sonuçları

Numune kodu	Köpük yoğunluğu (g/cm ³)	Maksimum yük (kN)	Ortalama yük (kN) %50 deformasyon
TF1-2	0,2519	6,71	5,32
TF1-4	0,2904	8,53	7,79
TF4-2	0,32	10,18	7,27
TF4-6	0,33	9,96	7,00
TF4-7	0,33	9,68	6,46
TF1-5	0,3410	9,36	8,19
TF1-9	0,4410	11,24	9,09
TF1-13	0,6091	12,749	10,76

Şekil 12(a)'da köpük dolu ikili tüplerin ezilme yük-deplasman davranışları boş ikili ve kompozit tüpün davranışları ile karşılaştırılmaktadır. Köpük dolu ikili tüp boş kompozitten yüksek ezilme yüklerine sahipken, boş ikili tüplerden daha yüksek ezilme yükleri gösterememektedir. Şekil 12(b)'de ise ezilme yükleri, köpük ve boş Al ve kompozit tüplerin yüklerinin toplamı ile karşılaştırılmaktadır. Köpük dolu ikili tüp, dolu Al tüpten daha yüksek ezilme yükleri göstermesine karşın, köpük dolu kompozit tüpten daha düşük yüklere sahiptir. Enerji emme özelliklerinde ise, köpük dolu ikili tüpler, boş ikili, boş kompozit ve köpük dolu kompozit tüplerden daha düşük enerji emme özelliği göstermektedir (Şekil 12(c)).

Şekil 12'de belirtilen yük-deplasman ve SAE grafikleri köpük dolu ikili tüplerin ezilme mekanizmaları ile açıklanabilir. Ezilme ile metal tüpte oluşan katlanmalar hem kompozit tüp ve hemde köpük dolgu tarafından engellenmektedir. Bu ise kompozit tüpün eksenel yönde yırtılmasına neden olmaktadır (Şekil 13). Ezilme esnasında metal tüp kısmen kompozit tüpten ayrılmaktadır. Kompozit, tüp basma testi esnasında ezilmeye devam etmekte ve ezilme yüklerinin benzer yoğunlukta köpük dolu metal tüpün üzerine çıkartmaktadır. Fakat, kompozit tüpün metal tüpten ayrılarak ezilmesi metal tüp ile etkileşimi engellemektedir. Metal tüp ise ilerleyen simetrik katlanma ile deforme olmaktadır. Eksenel yırtılmaları engellemek için iki yöntem önerilebilir: (a) daha duktıl kompozit yapıların kullanılması ve (b) köpük yoğunluğunu azaltarak metal tüpün katlanmasını kolaylaştırılması veya oluşan eksenel yüklerinin miktarının azaltılması. Köpük dolu Al tüpde, simetrik katlanmalar oldukça düzenli olmasına karşın (Şekil 14), ikili tüplerde Al tüp bazı yerlerde düzensiz katlanmaktadır. Ayrıca dolgu ikili tüplerde katlanmaların arasında kompozit parçacıkları görülmektedir (Şekil 15). Bu kompozit tüpün kısmen de olsa Al tüpün deformasyonunu kısıtladığını göstermektedir.

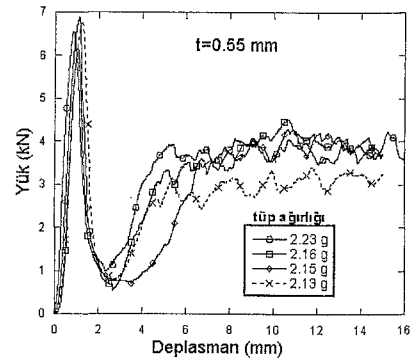
Kompozit boş tüplerde iki farklı ezilme modu gözlemlenmiştir: ilerleyen ezilme ve katasropik kırılma (basma bandları). İlerleyen ezilme tüpün uç yüzeylerinde kesme esnasında oluşan hasarlardan ve basma aparatı ile tüp uç yüzeyleri arasındaki homojen olmayan kontaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Boş tüpler ilerleyen ezilme modunda maksimum yük sonrasında sabit bir yük altında deforme olmaktadır. Hibrid kompozit/metal tüplerde deformasyon kompleks elmas modda oluşmuştur. Bu ise hibrid tüplerde, kompozit ve Al tüplerin SAE toplamlarından daha yüksek SAE'lere neden olmaktadır. SAE değerlerindeki bu artış Al tüp deformasyonuna kompozit tüp tarafından oluşturulan sınırlamanın sonucudur. Ortalama yüke göre SAE hesaplandığında boş kompozit tüp daha yüksek SAE değerlerine sahiptir.

Hibrid tüplerde köpük dolumu SAE değerlerini artırmakta etkilisizdir. Bunun temel nedeni ise Al tüpün katlanmasına karşı köpüğün gösterdiği direnç nedeni ile kompozit tüpün ezilme esnasında katasropik kırılmasıdır.

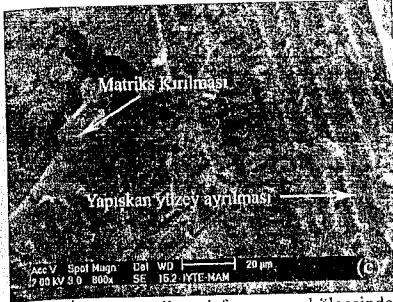
5 FOTOĞRAFLAR VE ŞEKİLLER



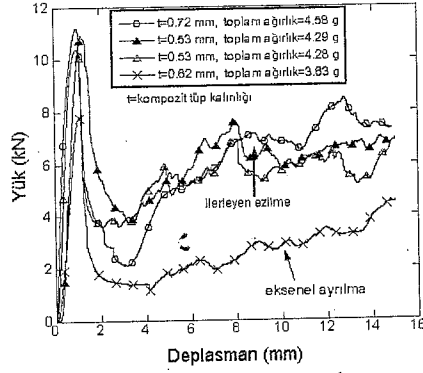
Şekil 1. Al köpük dolu Al-Kompozit ikili tüp



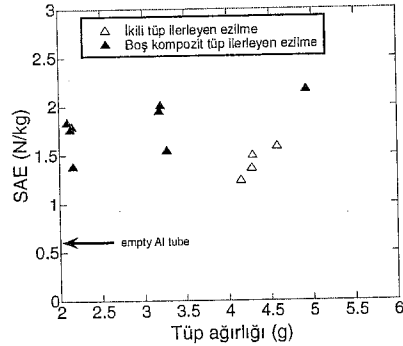
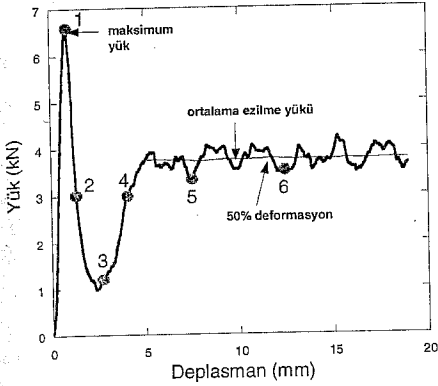
Şekil 2 Kompozit tüplerin yük-deplasman eğrileri



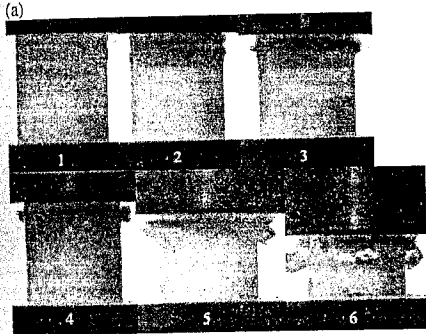
Şekil 3 İlerleyen ezilme deformasyon bölgesinde matris ve fiber ara yüzeyi ayrılması.



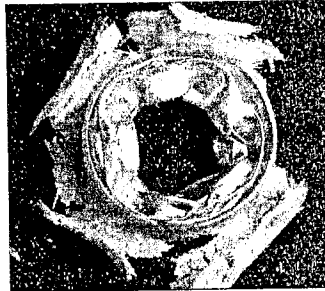
Şekil 5 Boş ikili tüplerin yük deplasman davranışı.



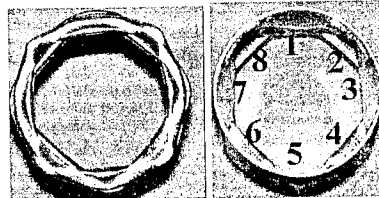
Şekil 6 Boş ikili tüplerin SAE değerlerinin boş kompozit ve Al tüple karşılaştırılması.



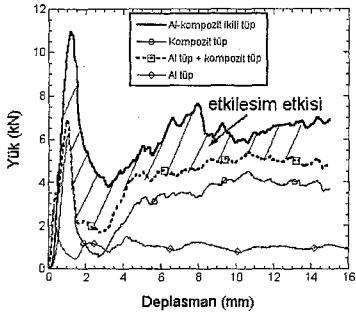
Şekil 4 0.44 mm kalınlığındaki 45/45 fiber açılı kompozit tüpün (a) yük-deplasman grafiği ve (b) ezilme görüntüleri.



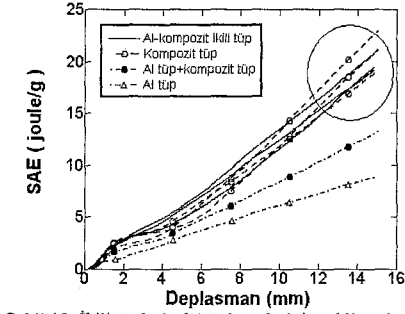
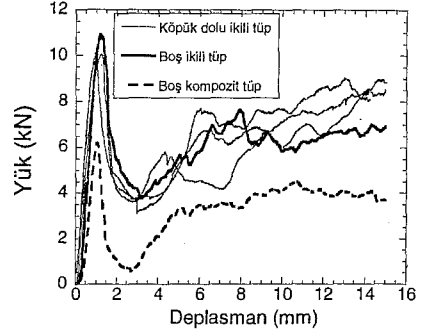
Şekil 7 20 mm ezilme sonrasında ikili tüpün alttan görünüşü



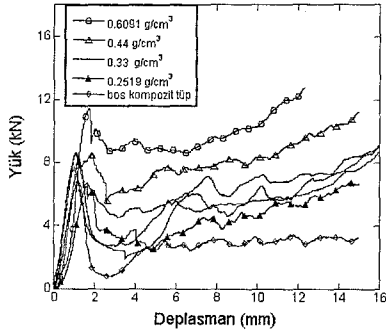
Şekil 8 Ezilmiş tekli Al tüplerin (a) üstten ve (a) alttan görüntüleri.



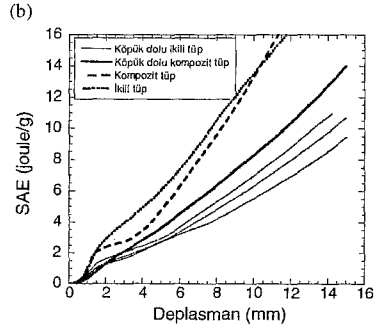
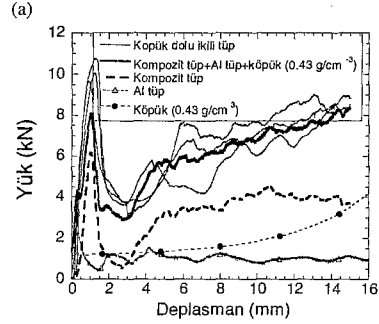
Şekil 9 İkili tüplerin ezilme yük değerlerinin tekli tüplerin yük değerleriyle ve bunların toplamıyla kıyaslanması.



Şekil 10 İkili tüplerin SAE değerlerinin tekli tüplerin SAE değerleriyle ve bunların toplamıyla kıyaslanması.



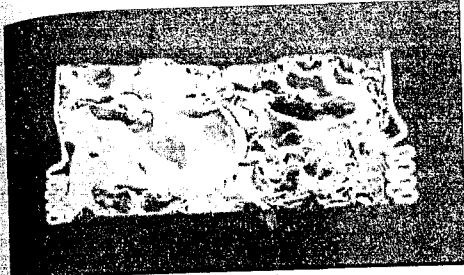
Şekil 11 Al köpük dolu kompozit tüplerin yük deplasman davranışı.



Şekil 12 Al köpüklerle doldurulmuş ikili tüplerin ezilme testlerine ait yük-deplasman grafikleri (a) boş kompozit ve ikili tüp (b) köpük dolu ikili tüp ve (c) SAE-deplasman grafikleri



Şekil 13 Al köpük dolu ikili tüpün ezilme testi sonrası görüntüsü.



Şekil 14 Köpük dolu tek Al tüp katlanması.



Şekil 15. Köpük dolu ikili tüplerde kompozitin katlanmalarına girmesi ve düzensiz katlanmalar.

KAYNAKLAR

- [1] Baumgartner, F., Duarte, I. and Banhart, J. 2000. "Industrialization of powder compact foaming process", *Advanced Eng. Mater.*, 2, pp.168-174.
- [2] Hamada, H. and Ramakrishna, S. 1998. "Energy absorption characteristics of crashworthy structural composite materials" *Engineering Materials*, Vols.141-143, pp 585-620
- [3] Jimenez, M.A., Miravete, A., Larrode, E. and Revuelta, D. 2000. "Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles", *Composite Structures*, 48, pp.107-111
- [4] Kavi, H., Yüksel, S., Tanoğlu, M. and Güden, M., 2004. "Crushing behavior of aluminum foam filled aluminum tubes", 10th Denizli Material Symposium & Exhibition, 14-16 April, Conference Proceeding, pp. 42-49.
- [5] Ramakrishna, S., Hamada, H. "Energy Absorption Characteristics of Crash Worthy Structural Composite Materials", *Engineering Materials*, 141-143, 585-620,(1998).
- [6] Toksoy, A.K. 2003. "Quasi-static compression behavior of empty and polystyrene foam filled aluminum tubes", Master Thesis, İzmir Institute of Technology.