

# Fonksiyonel derecelendirilmiş ve sandviç yapılı PVC köpük takviyesinin 6063-T5 al tüplerin enerji absorbe etme davranışına olan etkisinin incelenmesi

## Investigation into the effect of the functionally graded and sandwich PVC foam filling on the energy absorption capability of 6063-T5 al tubes

Muhammet Muaz YALÇIN<sup>1</sup> , Kenan GENEL<sup>2\*</sup> 

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.  
myalcin@sakarya.edu.tr, kgenel@sakarya.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 08.04.2019  
Kabul Tarihi/Accepted: 24.07.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 23.07.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.92300  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bilindiği üzere metalik tüpler, yüksek enerji absorbe etme kabiliyetleri nedeniyle birçok farklı alanda tercih edilmektedir. Bu özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla tüplerin farklı köpük türleriyle içeriden takviye edilmeleri, halen güncelliğini korumaktadır. Bu çalışmada, farklı PVC köpük yoğunlukları ile (60, 80 ve 100 kg/m<sup>3</sup>) tek tip yoğunluklu, fonksiyonel derecelendirilmiş yoğunluklu ve sandviç yapılı olacak şekilde üç farklı kombinasyonda takviye edilmiş 6063-T5 serisi alüminyum tüplerin enerji absorbe etme kabiliyetleri (EAK) deneysel olarak incelenmiştir. Her bir takviye kombinasyonunda üç tabaka köpük kullanılmış ve köpük yoğunluklarının EAK üzerine etkisinin daha net ortaya konulabilmesi için tabaka kalınlıkları değiştirilmiştir. Deney sonuçları, tüm numune kombinasyonları göz önünde bulundurulduğunda, absorbe edilen enerji değerindeki artışın %18 ile %43 arasında olduğunu, en yüksek enerji değerinin ise sandviç yapılı takviyede elde edildiğini göstermiştir. Tek tip yoğunluklu takviye kombinasyonundaki en yüksek enerji ise orta yoğunluklu (80 kg/m<sup>3</sup>) köpüğün kullanıldığı numunede, takviyesiz yapıya göre %37 daha yüksek elde edilmiştir. Numunelerin absorbe ettikleri enerjinin ağırlıklarına oranı olarak ifade edilen özgül enerji absorbe etme (ÖEA) değerleri tüm numuneler için hesaplanmış ve en yüksek ÖEA değeri sandviç yapılı takviyede, takviyesiz tüpe göre yaklaşık %11 daha yüksek olarak, 27.71 J/g değerinde elde edilmiştir. Buna mukabil bazı numunelerin ÖEA değerleri, takviyesiz tüp yapıdan daha düşük değerlerde olmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Köpük, Özgül enerji, Tüp, Eksenel ezme.

### Abstract

Metallic tubes are preferred in many different fields due to their energy absorbing efficiency. In order to increase the ability to absorb energy, foam filling by using different types of foam is still up to date. In this study, the energy absorbing capability of 6063-T5 aluminum tubes which were filled by using three different foam densities (60, 80 and 100 kg/m<sup>3</sup>) were investigated experimentally. Base tubes were filled by using three different foam filling models such as uniform density, functionally graded and sandwich model. In addition, in each foam filling models, different sample combinations were obtained by changing the thickness of the foam layers. The highest energy value absorbed in the uniform density foam filling model was obtained in the combination of 80 kg/m<sup>3</sup> density foam, which is 37% higher than the base tube. Considering all specimen combinations, the increase in the absorbed energy value is between 18% and 43%, while the highest value was obtained in the sandwich model. In the examination of the test results, the specific energy absorption values of each specimen were also taken into consideration. The specific energy values for some sample combinations were lower than the base tube, while the highest value was obtained in the sandwich model with the value of 27.71 J/g which is about 11% higher compared to the base tube. In contrast, the specific energy absorption values of some specimens were lower than the base tube.

**Keywords:** Foam, Specific energy, Tube, Axial crushing.

## 1 Giriş

İnce cidarlı metalik tüpler yüksek enerji absorbe etme kabiliyetleri nedeniyle otomotiv ve havacılık başta olmak üzere birçok alanda sıklıkla tercih edilmektedir. Metalik tüplerin, yük altında sergiledikleri deformasyon davranışına ait ilk çalışmalar 1900'lü yılların başlarına tarihlense de halen güncelliğini korumaktadır. Mallock [1] farklı dayanım değerlerine sahip çelik tüplerin, eksenel yük altındaki dayanımları ile deformasyon davranışları ve geometrik özellikleri ile katlanma modelleri arasındaki ilişkileri deneysel olarak incelemiştir. Tüp yapının kendi cidarı üzerinde simetrik olmayan bir şekilde katlanması durumunda (elmas katlanma), kat geometrileri ve ortalama kuvvet değerlerinin hesaplanabileceği teorik bir çalışma Pugsley [2] tarafından

yapılmıştır. Tüp yapıların absorbe ettikleri enerji değerleri, tüp yapının dairesel [3], kare kesitli [4] veya konik [5] olmasına bağlı olarak deformasyonun hangi katlanma modelinde gerçekleşeceği ise tüp yapının geometrik ölçülerine [6], kuvvetin eksenel veya açılı [7],[8] uygulanması ve hızı [9] ile doğrudan ilişkilidir. Tüp yapıların katlanması sırasında, tüp cidarının deformasyon öncesi durumdaki ortalama çapın içine ve dışına doğru yönlendiği bilinmektedir [10]. Bu bilgi ışığında enerji absorbe değerlerinin artırılabilmesi amacıyla metalik [11] veya polimer esaslı [12] farklı köpük türleriyle içeriden takviye edilerek absorbe edilen enerji değerinin artırılmaya çalışıldığı çok sayıda deneysel çalışma mevcuttur. Tüp yapılar, göz önünde bulundurulacak bir diğer parametre de enerji verimliliğidir. Özgül enerji absorbe etme kabiliyeti olarak ta isimlendirilen bu durum, takviye elemanı sağlanan enerji artışının, ağırlık artışından daha baskın olması şeklinde

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

tanımlanabilir. Bu kapsamda, takviye elemanlarından kaynaklanan ağırlık artışını minimize edebilmek amacıyla düşük yoğunluklu köpüklerin tercih edildiği deneysel ve nümerik çalışmalar da mevcuttur [13],[14]. Bazı çalışmalarda ise tüp yapılar deformasyonun başladığı kısımdan itibaren köpük yoğunluğu değiştirilerek takviye edilmişlerdir [15]-[17].

Bu çalışmada alüminyum tüplerin absorbe ettikleri enerji değerlerinin ve özgül enerji absorbe etme kabiliyetlerinin artırılması için en verimli köpük takviye modeli deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2 Deneysel çalışma

### 2.1 Malzeme özellikleri ve numune hazırlanması

6063-T5 alüminyum tüp yapının mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla Instron marka cihaz kullanılarak çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çekme numuneleri, 25 mm'den büyük çapa sahip tüpler için tanımlanan ASTM-E8/E8M-09 standardına göre hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan alüminyum tüpün mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

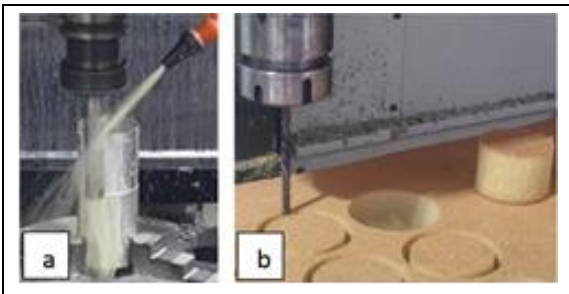
Tablo1. 6063-T5 alüminyum tüpün mekanik özellikleri.

Table 1. Mechanical properties of 6063-T5 aluminum tube.

Elastisite modülü	Akma gerilmesi	Çekme dayanımı	Poisson oranı	Yoğunluk
69 GPa	188 MPa	212 MPa	0.33	2.7 g/cm <sup>3</sup>

Deneysel çalışmalarda kullanılan tüpler sırasıyla, 58.5 mm çapa, 1.5 mm et kalınlığına ve 100 mm uzunluğa sahiptir. Yapılan deneylerde, yüksek sertlik değerlerine sahip tüplerin, özellikle katlanma bölgelerinde çatlamlar gözlenmiştir. Bu sebeple deneylerde kullanılacak tüm tüplerin sertlikleri ölçülmüş ve yaklaşık 72 HV sertlik değerinde olmasına özen gösterilmiştir.

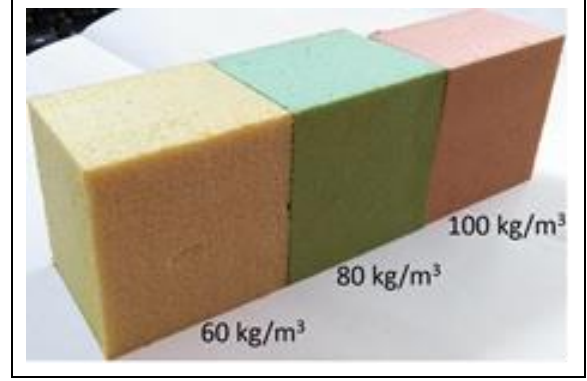
Alüminyum boruların cidar kalınlıklarının tüm kesitte homojen olmaması nedeniyle nihai tüp ölçüleri, boruların içinden ve dışından CNC dik işleme merkeziyle talaş kaldırarak elde edilmiştir (Şekil 1a). Ayrıca eksenel yüklemeye esnasında kuvvetin tüm kesite homojen bir şekilde tatbik edilebilmesi için tüplerin alt ve üst yüzeyleri tornalanarak paralellik sağlanmıştır. Silindirik PVC köpüklerin geometrik ölçülerinde farklılıklar olmaması deney sonuçlarının doğruluğu açısından bir diğer önemli parametredir. Bu amaçla, farklı yoğunluklardaki PVC köpük malzemeler de benzer şekilde dik işleme merkezinde işlenerek özdeş silindirik numuneler elde edilmiştir (Şekil 1b).



Şekil 1. (a): Alüminyum tüp ve (b): Takviye olarak kullanılan PVC köpüklerin hazırlanma süreci.

Figure 1. Specimen preparation of (a): aluminum tube and (b): PVC foams.

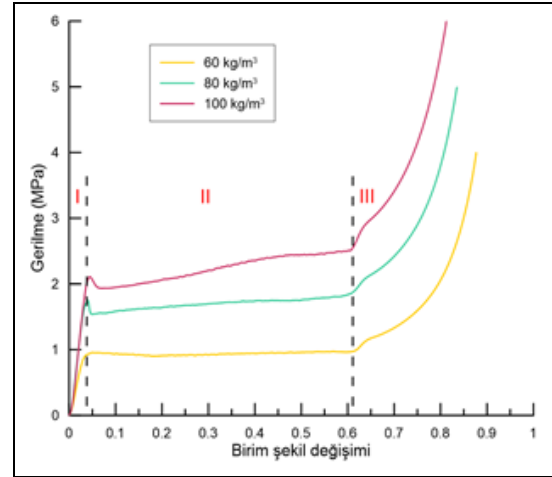
Alüminyum tüplerin içeriden takviye edilmesinde, enerji absorbe etme kabiliyetleri yüksek olan ve ticari olarak C70 koduyla satışı sunulan farklı yoğunluklara sahip (60 kg/m<sup>3</sup>, 80 kg/m<sup>3</sup> ve 100 kg/m<sup>3</sup>) kapalı gözenekli PVC köpükler kullanılmıştır. PVC köpüklerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de farklı yoğunluklardaki PVC köpüklerden basma deneyi için çıkarılan numuneler verilmiştir.



Şekil 2. Farklı yoğunluklara sahip PVC köpüklere ait basma numuneleri.

Figure 2. Compression test specimens of PVC foam with different densities.

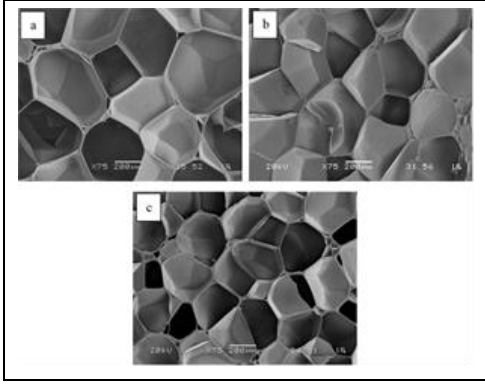
PVC köpüklerin Instron cihazında gerçekleştirilen basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3'te verilmiştir. Eğrilerde gerilmenin hızla arttığı ilk kısım elastik şekil değişiminin gerçekleştiği bölgeyi göstermektedir. Gerilmenin yaklaşık sabit kaldığı ikinci bölge ise köpüğün yük taşıma kabiliyeti ile ilişkilendirilen plato bölgesidir. Gerilmenin çok hızlı bir şekilde arttığı son kısım ise köpükte yoğunlaşmanın başladığı bölgeyi temsil etmektedir.



Şekil 3. Farklı yoğunluklardaki PVC köpüklerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.

Figure 3. Stress-strain curves of PVC foams with different densities.

PVC köpüklerin gözenekli yapısının ve yoğunluk farkları ile gözenek büyüklükleri arasındaki ilişkinin daha net görülebilmesi amacıyla köpüklerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) altındaki görüntüleri alınmıştır. SEM numunelerinin hazırlanmasında çok keskin özel bir aparat kullanılarak, kesme esnasında köpüklerin hücre çeperlerinin kırılması engellenmiştir (Şekil 4).

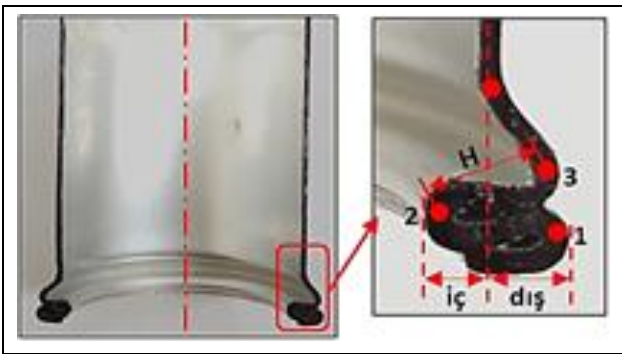


Şekil 4. (a): 60. (b): 80 ve (c): 100 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarına sahip PVC köpüklerin SEM görüntüleri.

Figure 4. SEM images of PVC foam with density of (a): 60, (b): 80 and (c): 100 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.2 Alüminyum tüpün deformasyonu

Metalik tüpler, eksenel yük altında kendi cidarları üzerinde katlanarak deforme olmaktadır. Şekil 5'te, eksenel yük altında simetrik modelde bir tam katlanma göstermiş takviyesiz alüminyum tüpün boyuna kesit görüntüsü verilmiştir. Kesit incelendiğinde tam bir katın, 1-2 ve 2-3 uzunluklarından oluşan iki yarım kat (H) uzunluğunun 2 noktasındaki hayali bir mafsal etrafında hareket ederek birbirine üzerine oturması ile gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Tüp cidarındaki kesikli kırmızı çizgi deformasyon öncesi tüpün ortalama eksenel göstermektedir. Görülebileceği üzere kat boyunun bir kısmı ortalama eksenin içinde kalmaktadır. Kat boyunun içe yönelen kısmı, önceden yapılan çalışmalarla [10], [18] uygun şekilde, kat boyunun yaklaşık %35 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla tüp yapının içeriden takviye edilmesi durumunda, takviye elemanı ile tüp cidarı arasında bir etkileşim oluşmakta ve bu etkileşim neticesinde, takviyeli yapının absorbe ettiği enerji, tüp yapı ve takviye elemanının ayrı ayrı absorbe ettikleri enerjilerin toplamından daha yüksek olmaktadır (tüp-köpük etkileşimi) [6],[19].



Şekil 5. Eksenel yük altındaki alüminyum tüpte katlanma oluşumu.

Figure 5. Folding deformation of the aluminum tube under axial loading.

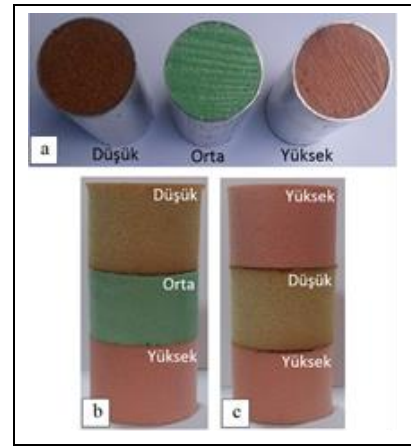
## 2.3 Köpük takviye modelleri

Alüminyum tüpler, içeriden PVC köpükler kullanılarak takviye edilmişlerdir. PVC köpüklerin plaka kalınlıklarının 50 mm ile sınırlı olması nedeniyle tüm numune kombinasyonlarında üç silindirik tabaka kullanılmıştır. Tabakaların toplam yüksekliği tüp uzunluğuyla eşit olacak şekilde 100 mm ile

sınırlandırılmıştır. Silindirik köpüklerin (üç tabaka) eksenel doğrultudaki yoğunluk dizilimleri değiştirilerek farklı takviye modelleri, takviye modellerindeki köpük tabaka kalınlıklarının değiştirilmesiyle de farklı numune kombinasyonları oluşturulmuştur. Takviye modelleri aşağıda verilmiştir;

1. Tek yoğunluklu köpük takviye (TYT),
2. Yoğunluğun düşük, orta ve yüksek şeklinde sıralandığı fonksiyonel derecelendirilmiş yapı takviye (FYT),
3. Orta tabakanın farklı, üst ve alt tabakaları aynı yoğunlukta olduğu sandviç yapı takviye (SYT).

Bu takviye modellerinin tabaka kalınlıkları değiştirilerek 9 farklı kombinasyon elde edilmiştir. Takviye modellerinin deney öncesi görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.

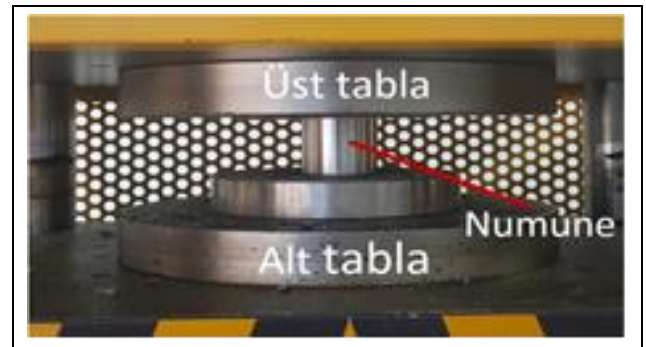


Şekil 6. (a): Tek tip yoğunluklu (TYT). (b): Fonksiyonel dereceli (FYT) ve (c): sandviç yapı takviye (SYT) modellerine ait köpük dizilimleri.

Figure 6. Foam filling array of (a): uniform density model (UDM), (b): functional density model (FDM) and (c): sandwich density model (SDM).

## 2.4 Deneysel düzeneği

Takviyesiz ve takviyeli tüp yapıların eksenel ezilme deneyleri 250 kN kapasiteli hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Kuvvet-deplasman çiftine ait veriler deneylerle eş zamanlı olarak 6 veri/s sıklıkla kaydedilmektedir. Deneylerde ilerleme hızı 1 mm/s olarak belirlenmiş ve tüm deneyler kamera yardımıyla kaydedilmiştir.



Şekil 7. Deneysel çalışmada kullanılan 250 kN kapasiteli hidrolik pres.

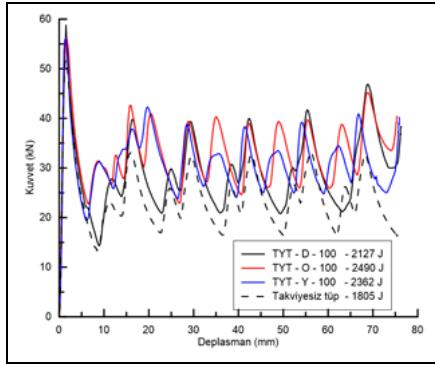
Figure 7. Hydraulic press (250 kN).

### 3 Sonuçlar

Deney sonuçlarının tekrarlanabilirliği açısından her numune kombinasyonu için en az üç adet deney yapılmış ancak deney verilerinin gösteriminde karmaşıklığa yol açmaması sebebiyle her bir numune kombinasyonu için ortalama enerji değerine sahip eğri kullanılmıştır. Numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri aşağıda verilen 1 No.lu denkleme göre (kuvvet-deplasman eğrisinin altında kalan alan) hesaplanmıştır. Ayrıca enerjiler hesaplanırken numunelerin son deplasman değerlerinin aynı olmasına dikkat edilmiştir.

$$\text{Absorbe edilen enerji} = \int_0^{\delta} F d\delta \quad (1)$$

Şekil 8'de takviyesiz ve tek tip yoğunlukla takviye edilmiş durumlara ait kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Köpük takviyesi ile birlikte ilk pik kuvvet değerlerinin bir miktar arttığı gözlenmektedir. Bu durum köpüğün sahip olduğu aksinel direncin bir etkisidir. Köpük ikamesinin, takviyesiz duruma göre absorbe edilen enerji değerlerinde artış sağladığı da açıktır. Takviyesiz tüp yapıda 1805 J olan bu değer, düşük yoğunluklu köpük takviyesiyle %18 artmıştır. Absorbe edilen enerji orta yoğunluklu köpük takviyesiyle %37 artarak 2490 J değerine ulaşmıştır.

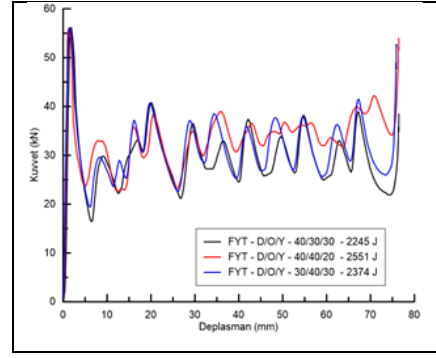


Şekil 8. TYT takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Figure 8. Force-displacement curves of UDM filled tubes.

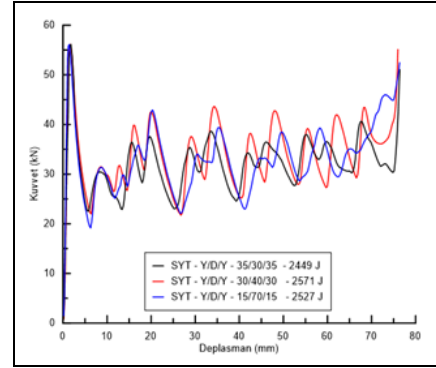
Fonksiyonel dereceli köpükle takviye edilmiş numune kombinasyonlarına ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 9'da verilmiştir. Köpük tabaka kalınlıklarının absorbe edilen enerji üzerinde farklı etkilerinin olduğu görülebilmektedir. Bu takviye modelinde elde edilen en yüksek enerji değeri ise takviyesiz yapıya göre yaklaşık 750 J daha fazla enerji absorbe eden düşük ve orta yoğunluklu köpük tabaka kalınlıklarının 40 mm olduğu kombinasyonda elde edilmiştir. Ayrıca, FYT numunelerde, en düşük ve en yüksek enerjiler arasında yaklaşık %14 oranında bir fark olduğu görülmüştür.

Sandviç yapıli takviye modeline ait numunelerin aksinel ezilme neticesinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Absorbe edilen en düşük ve en yüksek enerji değerlerinde diğer takviye modellerinin aksine yaklaşık %5 gibi küçük bir farklılık olduğu görülmüştür. En yüksek enerji değeri alt ve üst tabakalarda 30 mm kalınlığında yüksek, ortada ise 40 mm kalınlığında düşük yoğunluklu köpüğün bulunduğu numunede elde edilmiştir. Absorbe edilen enerjinin düşük tabaka kalınlığı ile arttığını söylemek mümkündür. En yüksek enerjinin elde edildiği numunedeki köpük diziliminin, tüp yapı içerisindeki davranışının daha kolay irdelenebilmesi amacıyla aksinel ezilme deneyi yapılmış ve elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 11'de verilmiştir.



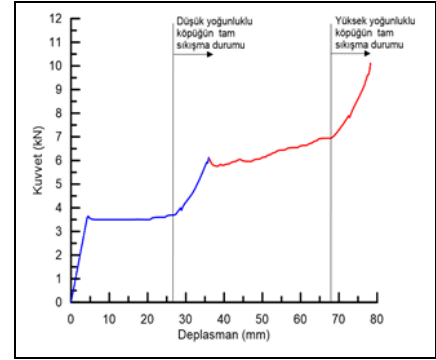
Şekil 9. FYT takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Figure 9. Force-displacement curves of FDM filled tubes.



Şekil 10. SYT takviyeli numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

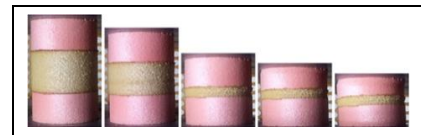
Figure 10. Force-displacement curves of SDM filled tubes.



Şekil 11. SYT takviyede en yüksek enerjinin elde edildiği numuneye ait köpük diziliminin kuvvet-deplasman grafiği.

Figure 11. The force-displacement curve of the foam array used in the specimen with the highest energy in SDM foam filling.

Ayrıca deney video ile kaydedilmiş ve köpüğün aşamalı deformasyon davranışı Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. SYT takviyede en yüksek enerjinin elde edildiği numuneye ait köpük diziliminin aşamalı deformasyon görüntüsü.

Figure 12. The progressive deformation of the foam array used in the specimen with the highest energy in SDM foam filling.

Şekil 11’de görüldüğü üzere, deney başlangıcında öncelikle düşük yoğunluklu köpük deformasyona başlamakta, yaklaşık 3.5 kN kuvvette plato değerini ulaşmakta ve 25 mm sonrasında tam ezilme (densification) rejimine girmektedir. Köpük yoğunluğunun densifikasyon sonucunda artarak yüksek yoğunluklu köpükten fazla olması neticesinde, yaklaşık 6 kN değerinden sonra, yüksek yoğunluklu köpük deformasyona başlamaktadır. Yüksek yoğunluklu köpüğün plato bölgesinin geçilmesi neticesinde, 7 kN sonrası, tam ezilme hali grafikte kendini hissettirmektedir. Şekil 12’de deformasyonun, alt ve üstte yer alan yüksek yoğunluklu (dolayısıyla daha rijit) iki köpüğün arasındaki düşük yoğunluklu köpükte yoğunlaştığı görülmektedir. İlerleyen deformasyonla kalınlıklar dikkat edilecek olursa, deformasyonun ortadaki düşük yoğunluk köpük üzerinden devam ettiği anlaşılmaktadır. Ortadaki köpüğün tam ezilme durumundan, bir anlamda rijitleşmesi sonrası yüksek yoğunluklu köpükler dönüşümlü olarak deformasyona uğramaktadır. Farklı numune kombinasyonlarında elde edilen absorbe edilen enerji değerleri, numune ağırlıkları ve bu iki veriden üretilen özgül enerji değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Numune kombinasyonları.

Table 2. Specimen combinations.

D=58.5 mm t=1.5 mm	Tabaka kalınlıkları (mm)			Enerji (J)	Ağırlık (gr)	Özgül enerji (J/g)
	1.	2.	3.			
Tkv.siz tüp	0	-	-	1805	71.92	25.03
Tek tip yoğunluklu (TYT)	1	35	30	2127	87.78	24.23
	2	35	30	2490	95.70	26.02
Fonksiyonel dereceli (FYT)	3	35	30	2362	98.35	24.02
	4	40	30	2245	93.33	24.06
Sandviç yapı (SYT)	5	40	40	2551	93.06	27.41
	6	30	40	2374	94.12	25.22
Sandviç yapı (SYT)	7	35	30	2449	95.18	25.73
	8	30	40	2571	94.12	27.32
	9	15	70	2527	90.95	27.71

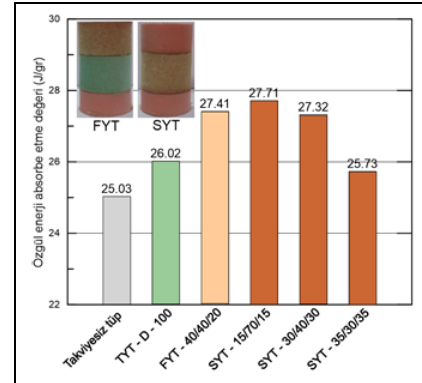
60 kg/m<sup>3</sup> 80 kg/m<sup>3</sup> 100 kg/m<sup>3</sup>

Tablo 2 incelendiğinde TYT modelde en yüksek enerjinin orta yoğunluklu kombinasyonda elde edildiği görülebilmektedir. Şekil 3’te verilen köpüklerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri incelendiğinde, yüksek yoğunluklu köpüğün plato değerinin diğer iki köpükten fazla olduğu görülebilmektedir. Buna rağmen yüksek köpük yapıları takviyede elde edilen enerjinin daha düşük olması katlanan tüp cidarı ile köpük arasındaki etkileşimin düşük mertebelerde kaldığı şeklinde yorumlanabilir. Dolayısıyla köpüğün enerji artışına katkısının, iki şekilde gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Bunlar, köpüğün;

- Eksenel ezilmeye karşı gösterdiği direnç ve
- İçeri yönlene tüp katlarıyla (Şekil 5) etkileşime girmesi şeklinde tanımlanabilmektedir.

Artan köpük yoğunluğuyla eksenel direncin arttığı ancak katlanma esnasında içeri yönlene tüp cidarının köpüğe batma derinliğinin azaldığı söylenebilir. Dolayısıyla köpük yoğunluğuyla köpük-cidar etkileşiminin ters orantılı olarak değiştiğini ifade etmek mümkündür. Eksenel direncin (birinci etki) ve tüp ile etkileşimin (ikinci etki) optimum olması enerji

artışını maksimize edecektir. Bu durum TYT modelde orta yoğunluklu köpükte ortaya çıktığından absorbe edilen enerji bu köpük takviyesinde en yüksek olmaktadır. FYT modele ait numune kombinasyonları incelendiğinde tabaka kalınlıklarının absorbe edilen enerji değerleri üzerinde değişikliklere sebep olduğu görülebilmektedir. Örneğin, 4-5 numune çiftinde düşük yoğunluklu tabaka kalınlığı sabit tutularak orta ve yüksek yoğunluklu tabakaların kalınlıkları değiştirilmiştir. 5 ve 6 No.lu numunelerde, benzer şekilde orta yoğunluklu tabaka kalınlığı, 4 ve 5 No.lu numunelerde ise yüksek yoğunluklu tabaka kalınlığı sabit tutulmuştur. 4-5 ve 4-6 numune çiftlerinde orta yoğunluklu tabaka kalınlığındaki artış, absorbe edilen enerji değerlerini sırasıyla 306 J ve 129 J kadar yükseltmiştir. Bu durum orta yoğunluklu tabaka kalınlığının enerji değişimi üzerinde daha baskın bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca her iki numune çifti göz önünde bulundurulduğunda, yüksek yoğunluklu tabaka kalınlığının düşük tutulmasının enerji değerini olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Orta yoğunluklu tabaka kalınlığının sabit tutulduğu 5-6 numune çiftinde ise düşük tabaka kalınlığındaki azalmanın absorbe edilen enerji değerinde 177 J değerinde bir düşüşe neden olduğu görülmüştür. Takviyeli tüp yapılarının enerji absorbe etme verimlilikleriyle alakalı bir diğer önemli parametre ise özgül enerji absorbe etme (ÖEA) kabiliyetidir [15],[19]. Verimli bir takviye modelini, takviye elemanları ile sağlanan enerji artışının ağırlık artışından daha baskın olması şeklinde tanımlamak mümkündür. Bu kapsamda, ÖEA değerleri takviyesiz tüpten yüksek olan kombinasyonlar Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. Takviyesiz tüp ve kompozit yapıların özgül enerji absorbe etme (ÖEA) değerleri.

Figure 13. Specific energy absorption values of the base and foam-filled specimens.

Grafikte görüleceği üzere, TYT ve FYT modelinde sırasıyla orta yoğunluklu köpük takviyeli ve düşük ile orta yoğunluklu köpük tabaka kalınlığının 40 mm olduğu numuneler olmak üzere birer kombinasyonda takviyesiz modelden daha yüksek ÖEA değeri elde edilmiştir. Buna mukabil, SYT takviye modelindeki tüm kombinasyonlardaki ÖEA değeri takviyesiz tüp yapıdan yüksek olmuştur.

#### 4 Genel sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada üç farklı yoğunluktaki PVC köpük malzemesi kullanılarak tek tip yoğunluklu, fonksiyonel artan yoğunluklu ve sandviç yapı olacak şekilde üç farklı kombinasyonda takviye edilmiş 6063-T5 alüminyum tüplerin enerji absorbe etme kabiliyeti ve verimliliği incelenmiştir. Takviye elemanı

olan PVC köpüklerin, eksenel yüke gösterdikleri direnç ve tüp cidarı ile girdikleri etkileşim sayesinde absorbe edilen enerji değerlerine katkı sağladıkları görülmüştür. Tek tip köpük takviyesinde, bu iki etkinin en verimli şekilde orta yoğunluklu köpük ikamesinde ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Artan yoğunluklu takviye de ise yüksek yoğunluklu köpük tabaka kalınlığının azaltılmasının enerji değerine olumlu katkı sunduğu tespit edilmiştir. En verimli kombinasyon olan sandviç yapılı numunelerin enerji değerleri birbirlerine oldukça yakın değerler sergilediği görülmüştür. Son olarak, özgül enerji absorbe etme kabiliyeti açısından en verimli kombinasyon, en yüksek enerji değerine sahip olmamasına rağmen, düşük yoğunluklu tabaka kalınlığının 70 mm olduğu sandviç yapılı numunede elde edilmiştir. Köpük tabaka kalınlıklarının daha dar aralıklarda değiştirildiği sandviç yapılı takviye durumlarında enerji absorbe değerleri açısından daha verimli numune kombinasyonlarının elde edilmesi olası görülmektedir.

## 5 General results and recommendations

In this study, the energy absorprion capability and efficiency of 6063-T5 aluminum tubes reinforced in three different combinations, which are uniform, functional and sandwich foam model, were examined by using three different PVC foam density. It has been observed that PVC foams contribute to the absorbed energy values thanks to their resistance to axial load and their interaction with the tube wall. In uniform foam reinforcement, it was understood that these two effects most effectively occur in medium density foam substitution. It has been determined for the functional foam filling that decreasing the high density foam layer has a positive effect on the energy value. It has been seen that the sandwiche foam filled specimens have very close energy values. Finally, the most efficient combination in terms of its specific energy absorption capability was obtained in the sandwich foam filled specimen where the low density layer thickness was 70 mm, although it did not have the highest energy value. It is possible to obtain more efficient specimen combinations in terms of energy absorption values in sandwich foam filling where foam layer thicknesses are changed at narrower intervals.

## 6 Kaynaklar

- [1] Mallock FRSA. "Note on the instability of tubes subjected to end pressure, and on the folds in a flexible material". *Proceedings of the Royal Society of London: Series A*, 81(549), 388-393, 1908.
- [2] Pugsley A. "The large-scale crumpling of thin cylindrical columns". *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 13(1), 1-9, 1960.
- [3] Al-Galib D, Limam A. "Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes". *Thin-Walled Structures*, 42(8), 1103-1137, 2004.
- [4] Zarei HR, Kröger M. "Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application". *Thin-Walled Structures*, 46(2), 214-221, 2008.
- [5] Ahmad Z. "Impact and energy absorption of empty and foam-filled conical tubes". *PhD Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane City, Australia, 2009.*
- [6] Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH. "Quasi-Static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes". *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(9), 2103-2123, 2001.
- [7] Mete OH, Yalçın M, Genel K. "Experimental and numerical studies on the folding response of annular-rolled al tube". *Thin-Walled Structure*, 127, 798-808, 2018.
- [8] Djamaluddin F, Abdullah S, Ariffin AK, Nopiah ZM. "Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions". *Thin-Walled Structures*, 87, 1-11, 2015.
- [9] Hsu SS, Jones N. "Quasi-Static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes". *International Journal of Crashworthiness*, 9(2), 195-217, 2004.
- [10] Singace AA, Elsobky H, Reddy TY. "On the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes". *International Journal of Solids and Structures*, 32(24), 3589-3602, 1995.
- [11] Santosa S, Wierzbicki T. "Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam". *Computers and Structures*, 68(4), 343-367, 1998.
- [12] Kavi H, Toksoy AK, Güden M. "Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient". *Materials and Design*, 27(4), 263-269, 2006.
- [13] Santosa S, Wierzbicki T. "Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns". *International Journal of Mechanical Sciences*, 41(8), 995-1019, 1999.
- [14] Zarei H, Kro M, Albertsen H. "An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes". *Composite Structures*, 85(3), 245-257, 2008.
- [15] Sun G, Li G, Hou S, Zhou S, Li W, Li Q. "Crashworthiness design for functionally graded foam-filled thin-walled structures". *Materials Science and Engineering: A*, 527(7-8), 1911-1919, 2010.
- [16] Mohammadiha O, Beheshti H. "Optimization of functionally graded foam-filled conical tubes under axial impact loading". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(5), 1741-1752, 2014.
- [17] Zhang X, Zhang H, Wen Z. "Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness". *International Journal of Mechanical Sciences*, 92, 12-23, 2015.
- [18] Singace AA, Elsobky H. "Further experimental investigation on the eccentricity factor in the progressive crushing of tubes". *International Journal of Solids Structures*, 33(24), 3517-3538, 1996.
- [19] Güden M, Toksoy AK, Kavi H. "Experimental investigation of interaction effects in foam-filled thin-walled aluminum tubes". *Journal of Materials Science*, 41(19), 6417-6424, 2006.