

EKSTRUDE POLİSTİREN KÖPÜKLERİN BASMA DAVRANIŞLARI

COMPRESSION BEHAVIOR OF EXTRUDED POLYSTYRENE FOAMS

A. Kaan TOKSOY*, Mustafa GUDEN*,**

*) İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü

***) İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi

ÖZET

Mikroskobik ve mekanik test çalışmalarının yardımı ile ekstrude polistiren köpük malzemelerin yapı ve mekanik davranışları belirlenmiştir. Mekanik davranışları üzerindeki anizotropi, yoğunluk ve deformasyon hızlarının etkilerini bulmak için polistiren köpükler üç farklı yönde test edilmiştir; bunlar Yükseklik-R, Genişlik-W ve Ekstrüzyon-E olarak belirlenmiştir. Mikroyapı çalışmaları göstermiştir ki polistiren köpük malzemeler 14 yüzlü (tetrakaidekahedral) kapalı hücrelerden oluşmakta ve bu hücreler R yönünde uzatılmıştır, diğer iki yönde ise hücre boyutları birbirine çok yakındır. Basma testleri sonucunda en yüksek basma mukavemeti R yönünde olup, tüm yönlerdeki mukavemet değerleri yoğunluk ve basma hızlarının artması ile artmıştır. Deformasyon hızının köpük malzemenin basma davranışı üzerindeki etkisi deformasyon hızı atlama testleri ile kanıtlanmıştır. Son olarak da deformasyon bandı oluşumları ve hücre deformasyonu su içinde ve optik mikroskop altında yapılan basma testleri sonucunda belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ektrude Polistiren Köpük, basma davranışı, deformasyon karakteristikleri.

ABSTRACT

The microstructural and mechanical properties of extruded polystyrene foams were investigated experimentally. In order to determine the effects of anisotropy, foam density and deformation rate on the compression behavior, foams were examined in three different directions, Rise-R, Width-W and Extrusion-E. Microstructural investigations showed that foam cell structure is the tetrakaidekahedral closed cell and cells are elongated through the R-direction but cell sizes through the W and E directions are very similar. Compression tests revealed that extruded polystyrene foam has higher compression strength in the R-direction. The plateau and collapse stress values increased with increasing of foam density and deformation rate. The effect of deformation rate on the compression behavior of foams was also proved by the stain-rate jump tests. The deformation band formation and cell deformation behavior were determined by in-water and in-situ compression tests, respectively.

Keywords: Extruded Polystyrene foam, compression behavior, deformation characteristics.

1. GİRİŞ

Günümüzde araçlarda ve paketleme endüstrisinde polimerik köpük malzemeler hafif, ucuz olmaları ve yüksek oranda çarpma enerjisini absorbe edebildiklerinden dolayı yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Köpük malzemelerin mukavemet özellikleri bir çok değişkene bağlıdır. Bunları köpük malzemenin açık veya kapalı hücreli olması, yoğunluk, hücrelerin yönleri, test sıcaklığı ve test yükünün yönü olarak sınıflandırılabiliriz.

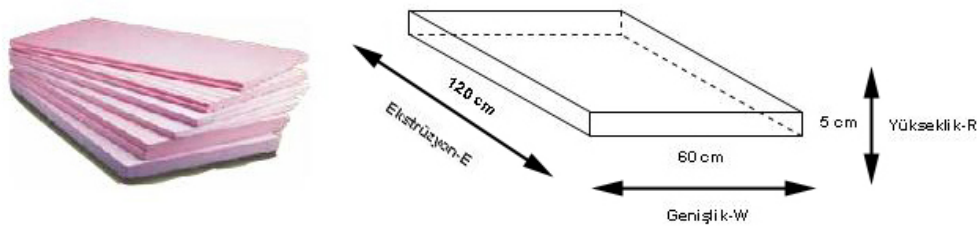
Dizayn aşamasında köpük malzemelerin değişkenler karşısında mukavemetlerinin nasıl bir değişim gösterdiğinin bilinmesi gerektiğinden günümüze kadar üzerlerinde bir çok deneysel ve modelleme çalışmaları yapılmıştır (Mills, 2003),(Ramsteiner, 2001),(Li, 2000), (Bergstrom, 1998) Köpük malzemelerin mekanik davranışlarını ve bu davranışları etkileyen parametreleri detaylı olarak irdeleyen ilk yayın Gibson ve Ashby (Gibson, 1988) tarafından yapılmıştır. A. Imad ve ekibi (Imad, 2001) ekspande polistiren köpüklerin viskoelastoplastik davranışlarını basma yükleri altında hem deneysel hemde sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında yoğunluğun ve basma hızının köpüklerin basma davranışlarına olan etkileri araştırılmış ve ayrıca basma-gevşeme testleri yapılarak ekspande polistiren köpüğün viskoelastoplastik davranışı belirlenmiştir. Diğer yandan N. J. Mills ve A. Gilchrist (Mills,2001) ekspande polistiren köpük malzemelerin darbe deformasyonu üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında köpük malzemelerin basma ve dalma deneyleri yapılmış bu deneyler sayısal modellerle desteklenmiştir. M. Avelle ve ekibi (Avalle, 2001) ise ekspande polipropilen, rijit poliüretan ve polipilen ve polistiren karışımı olan poliamid ile güçlendirilmiş köpük malzemeler üzerinde yüksek çarpışma hızlarında testler yaparak polimerik yapısal köpük malzemelerin darbe yükleri altındaki karakterizasyonlarını enerji diagramları kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada endüstriyel olarak ülkemizde üretilen ekstrüde polistiren köpük malzemelerin farklı yoğunluk, basma yönleri ve basma hızları kullanarak mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca basma davranışları hücre bazında incelenerek, mikro seviyedeki davranışın köpük malzemenin genel basma davranışı ile ilişkilendirilebilmesi sağlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Polistiren Köpükler

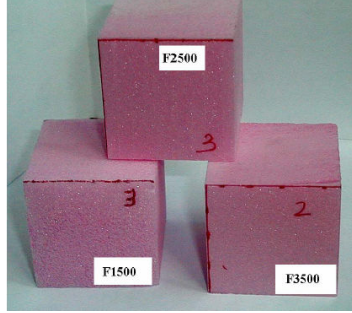
Çalışmada kullanılan köpükler İzocam A. Ş. tarafından 5x60x120 cm boyutlarında yarı yönlendirilmiş kapalı hücreli ve pürüzsüz sürekli yüzeyli olarak üretilmektedir (Şekil 1). Üç farklı yoğunlukta üretilen ve ticari isimleri Foamboard® 1500, Foamboard® 2500, Foamboard® 3500 olan köpükler bu çalışmada kullanım kolaylığı amacıyla F1500, F2500 ve F3500 olarak yeniden adlandırılmışlardır. Yoğunluk ölçümleri köpüklerden 50x50x50 mm boyutlarında kesilen kübik örneklerin ağırlıklarının hacimlere bölünmesi ile $21,7 \pm 1$, $27,82 \pm 2$ ve $32,12 \pm 2$ kg/m^3 olarak bulunmuştur. Nisbi yoğunlukları (ρ^*) ise hesaplanan yoğunlukların saf polistiren'in yoğunluğuna ($\rho_s: 1050 \text{ kg/m}^3$) bölünmesi ile 0,0207, 0,0265 ve 0,0305 olarak bulunmuşlardır.



Şekil 1 Ticari olarak İzocam A.Ş. tarafından tabaka olarak üretilen ekstrüde polistiren köpükler (Foamboard®) ve boyutları.

2.2. Mekanik basma davranışı karakterizasyonu

Ekstrüde polistiren köpüklerin basma davranışlarının karakterize edilmesi amacı ile her üç yoğunlukta tabakalardan ASTM D1621-00 standardı kullanılarak 50x50x50mm boyutlarında test numuneleri kesilerek üretilmişlerdir (Şekil 2). Yoğunluğun, basma yönünün ve basma hızının mukavemet üzerindeki etkilerinin çıkartılabilmesi için her yoğunlukta test numuneleri yükseklik-R yönünde dört, diğer yönlerde (genişlik-W, ekstrüzyon-E) ise üç farklı basma hızlarında ve her basma hızı için üç tekrar sayısında basma testlerine tabi tutulmuşlardır. Mekanik testler için basma yönleri Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiş olup, tüm mekanik test prosedürü Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 2 Basma testi numuneleri.

Diğer yandan basma hızının polistiren köpüklerin mekanik davranışı üzerindeki etkilerinin daha iyi gözlemlenebilmesi amacı ile basma testi esnasında deformasyon hızı $0,833 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ dan $33,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a yükseltip tekrar $0,833 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ a değerine düşürülmüştür. Ayrıca deformasyon başlangıcı ve ilerlemesinin daha iyi gözlemlenebilmesi için her yoğunluk için birer adet basma testi yükseklik-R yönünde su ile doldurulmuş kontayner içinde gerçekleştirilmiş, böylece hücrelerin ezilme esnasında hangi bölgeden ezilmeye başladıkları saptanmıştır. Mekanik testler bilgisayar kontrollü Schmadzu AG-I 250 kN basma ve çekme makinası ile yapılmış olup sonuçlar bilgisayar ortamında işlenmiştir.

Tablo 1 Basma davranışlarının için extrüde polistiren köpükler üzerinde gerçekleştirilen mekanik test prosedürü.

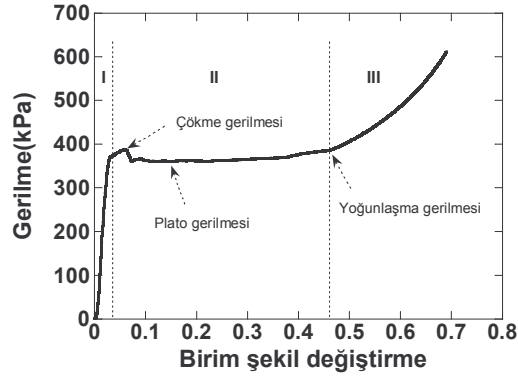
	Yoğunluk (kg/m^3)	Basma Yönleri	Deformation Hızları (s^{-1})				Tekrar Sayısı (Her yön için)
			$\times 10^{-3}$				
F1500	21,7±1	Yükseklik-R	0,833	2,66	8,33	33,3	3
		Genişlik-W	0,833	8,33	166		
		Extrüzyon-E	0,833	8,33	166		
F2500	27,82±2	Yükseklik-R	0,833	2,66	8,33	33,3	3
		Genişlik-W	0,833	8,33	166		
		Extrüzyon-E	0,833	8,33	166		
F3500	32,12±2	Yükseklik-R	0,833	2,66	8,33	33,3	3
		Genişlik-W	0,833	8,33	166		
		Extrüzyon-E	0,833	8,33	166		

2.3. Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskop İncelemeleri

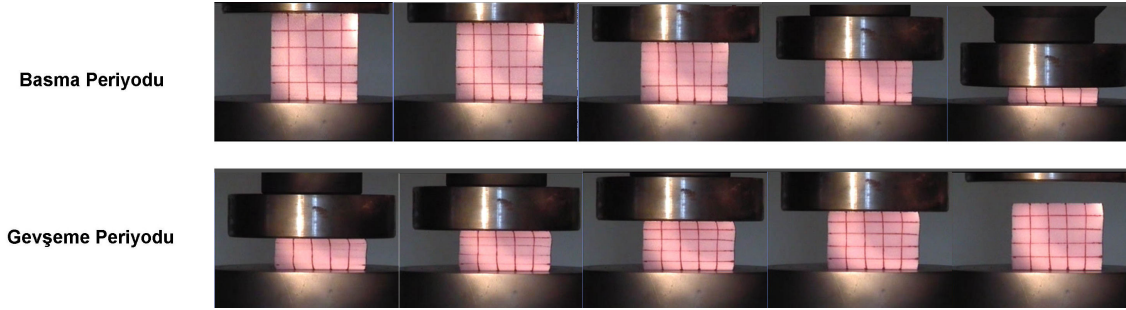
Polistiren köpük malzemeleri oluşturan hücrelerin şekil ve yönlendirilmelerini belirlemek ve dolayısı ile malzeme anisotropisinden dolayı mekanik davranışlarının değişiminin daha iyi anlaşılabilmesi için taramalı elektron mikroskopu (TEM) ve optik mikroskop kullanılmıştır. TEM de kullanılacak örnekler kesme esnasında yüzeylerdeki gerilmelerin minimumunda tutularak yüzeye zarar verilmesini önlemek için ilk önce üç dakika boyunca sıvı azot kabı içinde tutulmuş, daha sonra kesilerek incelenmeye hazır duruma getirilmişlerdir. Ayrıca minyatür numuneler ($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$) hazırlanarak mikrometrenin iki ucuna konularak sıkıştırılmıştır. Bu esnada optik mikroskop kullanılarak belirli şekil değiştirmelerde hücrelerin davranışları ortaya çıkarılmıştır.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Ekstrüde polistiren köpükler gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği üç bölgeden oluşmaktadır (Şekil 3). Bunlar gerilme değerlerinin lineer olarak arttığı lineer elastik bölge (I), belirli bir çökme gerilmesi değerinden sonra yaklaşık olarak sabit bir plato gerilmesinde kaldığı plato bölgesi (II) ve son olarakta yoğunlaşma gerilmesinden sonra gerilmenin hızla arttığı yoğunlaşma bölgesi (III) olarak sınıflandırılmaktadırlar (Landro, 2001). Basma testi sırasında çekilen fotoğraflardan da anlaşıldığı üzere basma yönüne dik olan yönlerdeki deformasyon yok denecek kadar az olduğundan dolayı ekstrüde polistiren köpük yaklaşık olarak sıfır Poisson oranına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4). Benzer çalışmalarda da plastik deformasyonda Poisson oranının sıfıra eşit olduğu belirtilmektedir (Mills, 2003). Ayrıca basma testinden sonraki kalıcı deformasyon yine Şekil 4'de açıkça görülmektedir.



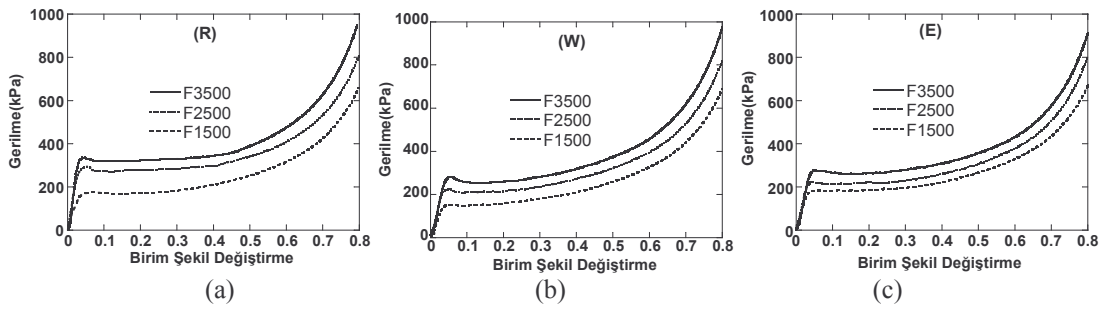
Şekil 3 Ekstrude polistiren köpükler için genel gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4 Extrude polistiren köpük basma testi.

3.1. Yoğunluk Etkisi

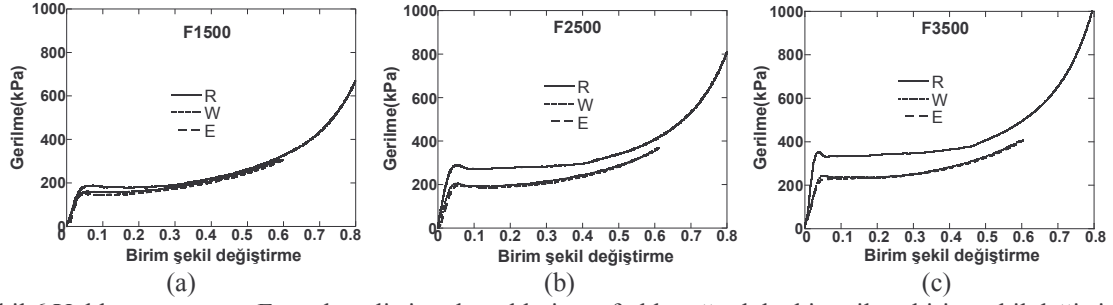
Sabit basma hızında yapılan testler göstermiştir ki köpük yoğunluğu arttıkça basma mukavemeti de üç farklı yönde de artmaktadır. Bu davranış her üç yoğunlukta ki F1500, F2500 ve F3500 köpükler için Şekil 5'de açıkça görülmektedir.



Şekil 5 Yoğunluğun Extrude polistiren köpüklerin üç farklı yöndeki gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri üzerindeki etkisi (a) yükseklik yönü-R, (b) genişlik yönü-W, (c) ekstrüzyon yönü-E (Deformasyon hızı $8,33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

3.2. Basma Yönünün Etkisi

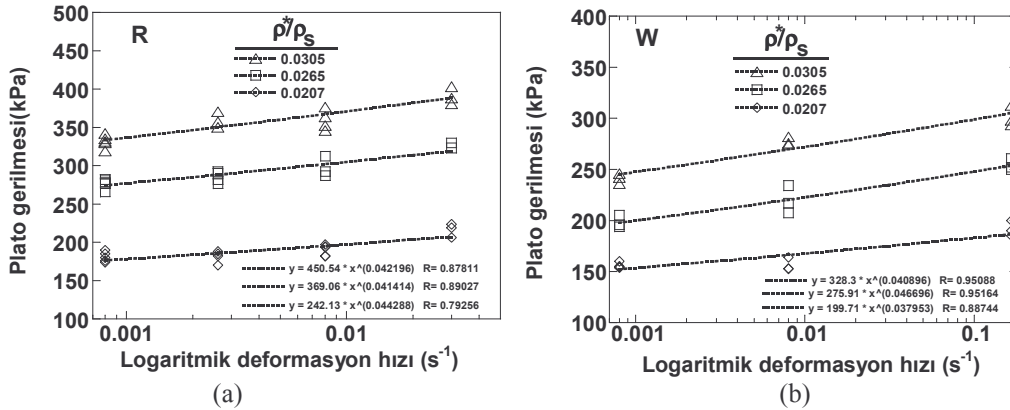
Mekanik testler sonucu basma mukavemetinin her üç yoğunluktaki köpükler için en yüksek değerlere R yönünde elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 6). Genişlik-W ve ekstrüzyon-E yönündeki gerilme değerleri ise birbirlerine oldukça yakındırlar.



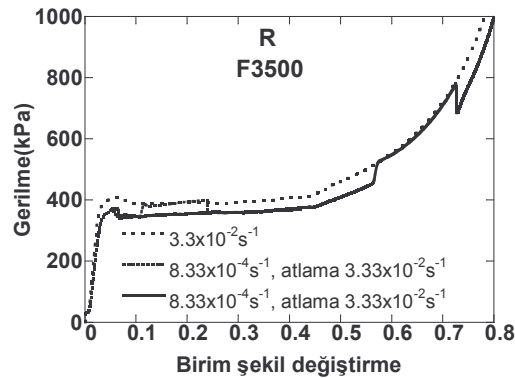
Şekil 6 Yükleme yönünün Extrude polistiren köpüklerin üç farklı yoğunluktaki gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri üzerindeki etkisi (a) F1500 , (b) F2500, (c) F3500 (Deformasyon hızı $8,33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

3.3. Deformasyon Hızının Etkisi

Şekil 7'de her üç yoğunluk için yükseklik-R ve genişlik-W yönünde yapılan deneylerden elde edilmiş %10 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen plato gerilmesinin farklı test hızlarındaki değerleri için gerilme-logaritmik deformasyon hızı grafikleri verilmiştir. Deformasyon hızı arttıkça extrude polistiren köpük malzemenin basma gerilme değerleri de arttığı Şekil 7'de açıkça görülmektedir. Bu davranış test edilen malzemenin deformasyon hızına duyarlılığını kanıtlamaktadır. Ayrıca deformasyon hızı atlama testleride bu davranışı destekleyen sonuçlar vermiştir (Şekil 8).



Şekil 7 %10 birim şekil değiştirmeye Plato gerilme değerleri-basma hızları grafikleri (a) yükseklik-R yönü, (b) genişlik-W yönü için.

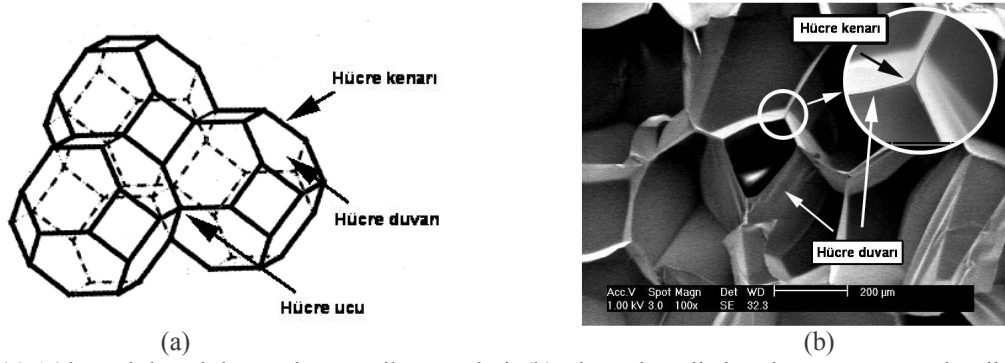


Şekil 8 Deformasyon hızı atlama testi gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (Yükseklik-R yönü ve F3500 için).

3.4. Mikroskobik Sonuçlar

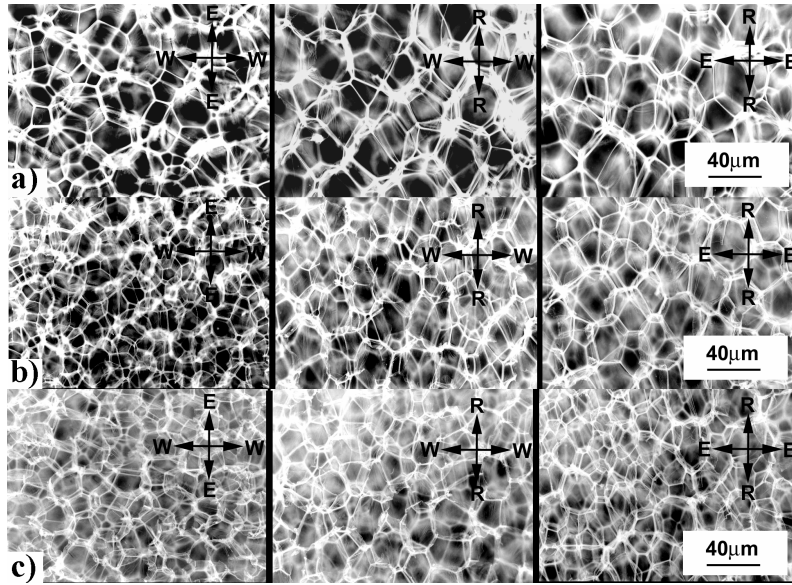
Optik ve taramalı elektron mikroskobu ile yapılan çalışmalar göstermiştir ki extrude polistiren köpükler 14 kenarlı (tetraikahedral) kapalı hücrelerden oluşmaktadır (Şekil 9a). Hücre duvarları iki hücreyi birbirinden ayıran

ince zar şeklinde yapılarıdır. Hücre kenarları ise bir hücre duvarına göre daha kalın ve iki komşu hücrenin kesişim bölgesindeki yapılarıdır. Ayrıntılı TEM fotoğrafları hücreyi oluşturan hücre duvarı, hücre kenarlarını ve dört kenarın birleştiği uçların görüntülenmesini sağlamışlardır (Şekil 9b).



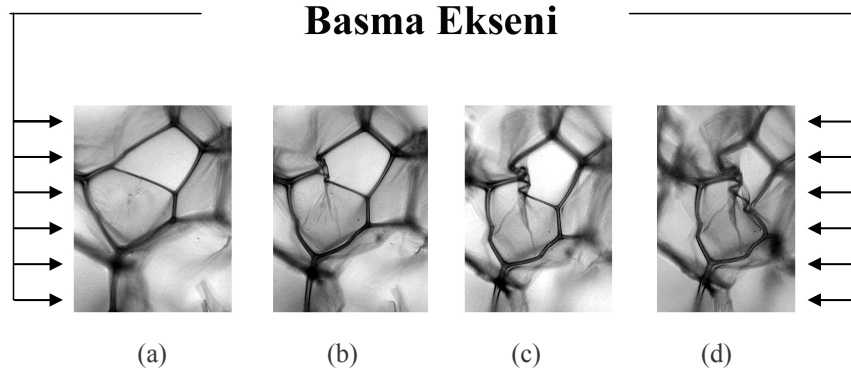
Şekil 9 (a) 14 kenarlı kapalı hücrenin şematik gösterimi, (b) Ekstrüde polistiren köpüğün taramalı mikroskop altında çekilmiş fotoğrafı.

Optik mikroskop ile yapılan çalışmalar sonucunda her üç yoğunluktaki köpükleri oluşturan hücrelerin yükseklik yönünde yönelmiş oldukları belirlenmiş ve bu yöndeki hücre boyutlarının diğer yönlerden büyük olduğu gözlenmiştir. Diğer yönlerdeki hücre boyutlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca genel olarak bakıldığında hücre boyutlarının yoğunluğun artması ile azaldıkları tespit edilmiştir (Şekil 10). Yükseklik yönündeki hücre yönelmesi ve boyutlarının diğer yönlerden büyük olması bu yöndeki basma yüklerinin diğer yönler göre daha yüksek olmasını açıklamaktadır. Daha önceki çalışmalarda yönlendirilmiş hücrelerin genel mekanik özelliklerdeki anizotropik davranışın sebebi olduğu belirtilmiştir (Gibson, 1988).

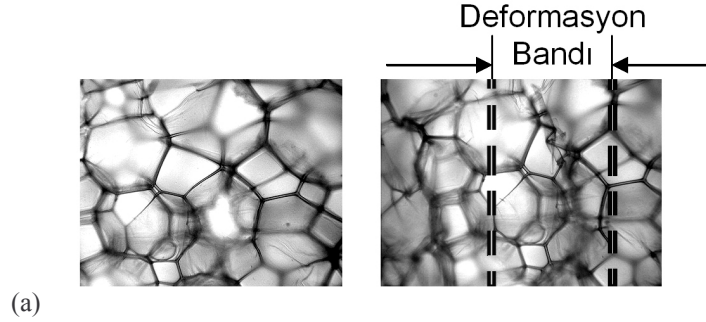


Şekil 10 Her üç yoğunluktaki köpüklerin yükseklik-R, ekstrüzyon-E ve Genişlik-W yönlerine dik olarak çekilmiş optik mikroskop fotoğrafları (a) F1500, (b) F2500, (c) F3500.

Ayrıca minyatür numunelerin mikrometre yardımı ile yükseklik-R yönünde basılması sırasında çekilen optik mikroskop fotoğrafları göstermiştir ki hücre kenarları ilk önce eğilmeye başlamakta ve belirli bir şekil değiştirme miktarından sonra hücre kenarları katlanmaktadır (Şekil 11). Katlanma sırasında hücre duvarlarının yırtılması ile hücre içindeki havanın dışarıya kaçmasına sebep olmaktadır. Katlanan hücreler plato bölgesinde birbirleri üzerine oturarak deformasyon bandlarını oluşturmaktadırlar (Şekil 12).

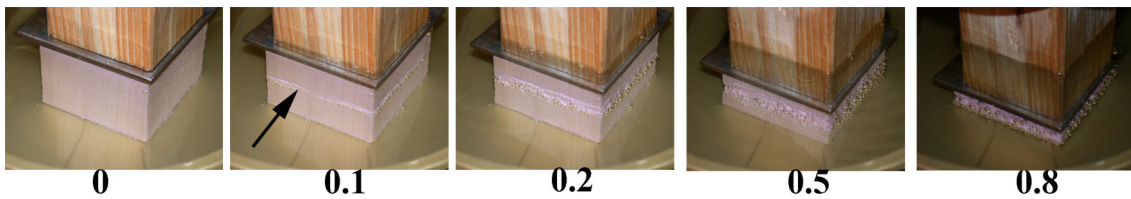


Şekil 11 Optik mikroskop altında yapılan minyatür numunelerin basma esnasındaki değişik birim değiştirme altındaki fotoğrafları (F1500): hücre duvarlarının eğilmesi ve katlanması, (a) %0, (b) %7, (c) %22, (d) %29 birim şekil değiştirme.



Şekil 12 Optik mikroskop altında yapılan minyatür numunelerin basma esnasındaki değişik birim değiştirme altındaki fotoğrafları (F2500): deformasyon bandı oluşumu (a) %0, (b) %16 birim şekil değiştirme

Hücre katlanması ve deformasyon bandının oluşumu test edilen üç yoğunluktaki ekstrüde polistiren köpükler için %5 ile %10 birim şekil değiştirme aralığında başlamakta ve deformasyon miktarı arttıkça deformasyon bandı genişliği köpük malzeme içinde artmaktadır. Deformasyon bandı oluşumu (Şekil 13’de okla gösterilmiş bölge) ve ilerlemesi su içinde yapılan testlerde katlanma ve yırtılmalarından dolayı kapalı hücre içindeki havanın dışarıya çıkışının gözlenmesi ile tespit edilmiştir.



Şekil 13 Su dolu konteyner içinde yapılmış basma testinin değişik birim şekil değiştirme aşamalarındaki fotoğrafları (F2500)

4. SONUÇLAR

Ekstrüde polistiren köpükler üzerinde yapılan çalışmaların sonucunda malzeme içindeki hücre yönelmesi, mekanik özelliklerin yoğunluk, deformasyon hızı ve yükleme yönüne göre değiştiği gösterilmiştir. Köpük yoğunluğunun ve deformasyon hızının artması ile birlikte plato gerilme değerlerinin arttığı ve ayrıca yükeklik-R yönünde malzemenin basma mukavemetinin diğer yönlere göre daha yüksektiği bulunmuştur. Diğer yandan optik ve taramalı elektron mikroskoplarının yardımı ile hücre yapısı tespit edilmiş yoğunluğun artması ile hücre boyutlarının azaldığı gözlemlenmiş ve hücrelerin yükseklik yönünde (R) yönelmiş oldukları tespit edilmiştir. Köpük malzemenin makro düzeydeki deformasyonun mikro seviyede hücrelerin duvarlarının eğilmesi ile başladığı daha sonrada hücre duvarlarının birbiri üzerine katlanması ve hücre içindeki havanın yırtılan hücre duvarlarından dışarı çıkması ile deformasyon bandını oluşturdukları ve tüm hücrelerin katlanması bittikten sonra yoğunlaşma bölgesinde deforme olmaya devam ettikleri saptanmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın yapılabilmesi için gerekli olan polistiren köpük malzemeleri hibe eden İzocam AŞ. ye teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

- [1]. AVALLE, M., BELINGARDI G., MONTANINI, 2001, Characterization of polymeric foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram, Internatioanal Journal of Impact Engineering, sayı 25, S 455-472
- [2]. BERGSTROM, J. S., BOYCE, M. C., 1998, Constitutive Modeling of the large train time-dependent behavior of elatomers, Journal of Mech. Phys. Solids, cilt 46, sayı 5, S 931-954
- [3]. GIBSON, L. J., ASHBY, M. A., Cellular solids, 263s., Cambridge Univerity Press, 1988.
- [4]. IMAD, A., OUKKA A., DANG VAN, K., 2001, Analysis of the viscoelastoplstic behavior of expanded polystyrene under compressive loading : experiments and modelling, Strength of Materials, cilt 33, sayı 2.
- [5]. LANDRO, L. D., SALA, G., OLIVIERI, D., 2002, Deformation mechanism and energy absorption of polytyrene foam for protective helmet, Polymer Testing, sayı 21, S 217-228
- [6]. MILLS, N. J., GILCHRIST, A., 2001, Impact deformation of polymeric foams: experiments and FEA modelling, Impact Engineering, sayı 25, S 767-786
- [7]. MILLS, N. J., MASSO MOREU, Y., 2003, Rapid hydrostatic compresion of low-density polymeric foams, Polymer Testing, Article in Press.
- [8]. LI, Q. W., MINES, R. A. W., BIRCH, R. S., 2000, The crush behaviour of Rohacell-51WF structural foam., Solids and Structures, sayı 37, S 6321-6341
- [9]. RAMTEINER, F., FELL, N., FORSTER, S., 2001, Testing the deformation behavior of polymer foams, Polymer Testing, sayı 20, S 661-670 .