

DEVELOPMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF RE-ENTRANT HONEYCOMB STRUCTURE

GİRİNTİLİ BAL PETEĞİ YAPISININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Tarık BARAN^a, Mitat ÖZTÜRK^b

^aOsmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye; tarikbaran@osmaniye.edu.tr

^bOsmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye; mitatozturk@osmaniye.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, girintili bal peteği hücre yapısının mekanik özellikleri analitik ve sayısal olarak artırılmıştır. Normal girintili bal peteği yapısının analitik ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Daha sonra girintili bal peteği yapısının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve değiştirilmesi için klasik girintili bal peteği tasarımını esas alan yeni bir girintili model geliştirilmiştir. Normal girintili bal peteği hücre yapısı ile yeni tasarlanan girintili bal peteği yapısı analiz edilmiş ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Yeni tasarlanan girintili bal peteği yapısının birincil x ekseninde negatif Poisson oranı azalmış, ikincil y ekseninde negatif Poisson oranı ise artmıştır. Yeni yapının x ekseninde elastisite modülü klasik girintili yapıya göre 4.11 kat artmıştır, y ekseninde ise elastisite modülü değeri 8.54 kat artmıştır. Elde edilen sonuçlar girintili bal peteği yapısının mekanik özelliklerinin, farklı kullanım ihtiyaçlarına uyarlanabileceğini ve geliştirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Bal peteği, auxetic, negatif Poisson oranı, girintili bal peteği yapısı.

Abstract

In this study, the mechanical properties of the re-entrant honeycomb cell structure have been developed analytically and numerically. Analytical and numerical analysis results of normal re-entrant honeycomb structure were compared, and obtained values close to each other. Subsequently, a new re-entrant model was developed based on the classic re-entrant honeycomb design for the development and alteration of the mechanical properties of the re-entrant honeycomb structure. The normal re-entrant honeycomb cell structure and the newly designed re-entrant honeycomb structures' mechanical properties were compared each other's. The negative Poisson ratio in the primary x axis direction of the newly designed re-entrant honeycomb structure decreased and the negative Poisson ratio in the secondary y axis direction increased. The modulus of elasticity in the x-axis direction of the new structure is 4.11 times higher than that of the conventional re-entrant structure, and the value of the modulus of elasticity in the y-axis direction increase by 8.54 times. The results expose the mechanical properties of the re-

entrant honeycomb structure can be adapted and improved to suit different applications.

Keywords: Honeycomb, auxetic, negative Poisson's ratio, re-entrant honeycomb structure.

1. Giriş

Klasik mühendislik yapılarından farklı olarak, aksel çekme altında kesit genişlemesi gösteren, aksel basınç altında ise kesit daralması gösteren negatif Poisson oranına sahip malzemelere auxetic malzeme ismi verilmektedir[1]. Girintili bal peteği yapısı negatif Poisson oranına sahip auxetic bir yapıdır[2]-[6]. Birçok çalışmada girintili bal peteği yapısının mekanik özelliklerinin petek yapısının sahip olduğu parametreler ile değişimi incelenmiştir[7]-[10]. Wan ve ark. klasik girintili bal peteği yapısının Poisson oranının analitik formülasyonunu yapmışlardır. Ayrıca Poisson oranının hücrenin açısı ile yatay uzunluğu ve düşeydeki açılardan uzunluğu ile değişimini incelemişlerdir[7]. Hou ve ark. klasik girintili bal peteği yapısının dinamik darbe dayanımını hücrenin kalınlığı ile hücrenin yatay uzunluğu oranının değişimine bağlı olarak incelemişlerdir[8]. Fu ve ark. üç boyutlu klasik girintili bal peteği yapısının Poisson oranının ve elastisite modülünün hücre duvarının açısı ile değişimini incelemişlerdir[9]. Scarpa iki boyutlu klasik girintili bal peteği yapısının Poisson oranının ve elastisite modülünün hücre duvarının açısı ile değişimini incelemişlerdir[10].

Klasik girintili bal peteği yapılarının mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla birçok tasarım yapılmıştır. Li ve ark. klasik girintili bal peteği yapısına dairesel çubuklar ekleyerek beş farklı modelin Poisson oranını kıyaslamışlardır. Yeni oluşturdukları modelin gerilme altında şekil değişimi azalmaktadır[3]. Zied ve ark. klasik bal peteği hücre yapısının yatay elemanlarını dairesel olarak modellemişlerdir. Zied ve ark. Li ve ark.'nın yaptığı gibi yeni hücre yapısına dairesel çubuk ekleyerek iki adet yeni yapı oluşturup bu yapıları kıyaslamışlardır. Poisson oranında ve rijitlikte artış sağlamışlardır[4]. Chen ve Fu klasik girintili bal peteği yapısına tek çubuk ekleyerek ve eşkenar dörtgen formunda bir araya getirilmiş çubuklar ekleyerek iki model oluşturmuştur. Daha sonra bu iki modeli de birleştirerek tüm modelleri birbirleriyle kıyaslamışlardır. Ayrıca bu yapıların elastisite modülleri ve Poisson oranlarının hücre duvarının açısıyla değişimini de incelemişlerdir[5]. Ingrole ve

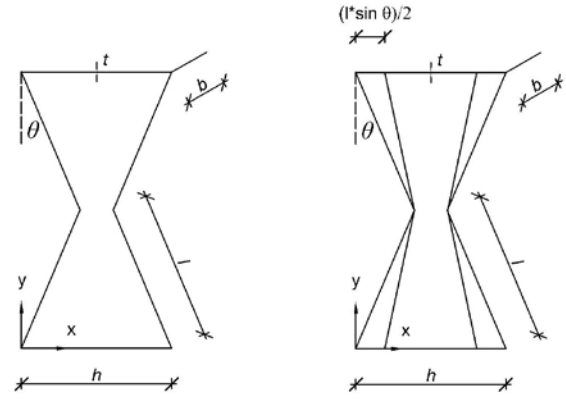
ark. üç boyutta bal peteği yapısı ile klasik girintili bal peteği yapısını birleştirerek farklı modeller oluşturmuşlardır. Beş farklı modelin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarını basınç dayanımı, elastisite modülü ve enerji yutma kapasitesi bakımından kıyaslamışlardır. Yeni oluşturulan yapılar klasik yapılara göre daha iyi sonuç vermiştir[6]. Huang ve ark. klasik girintili bal peteği yapısının kalınlık ve genişliğinde yapısal değişime gidip hücreleri farklı bir geometri ile birleştirmişlerdir[11]. Fu ve ark. girintili bal peteği yapısına eşkenar dörtgen geometrisi ekleyerek açı ile mekanik özellik değişimini incelemiş ve önceki araştırmalar ile kıyaslamışlardır[12]. Fu ve ark. girintili bal peteği yapısına çapraz çubuklar ekleyerek önceki araştırmalar ile kıyaslamışlardır[13]. Lu ve arkadaşları klasik girintili bal peteği yapısının sürekliliğini sağlamak amacıyla temas etmeyen çubuk düğüm noktalarını birbirine bağlamışlardır. Yeni oluşturdukları yapının mekanik özelliklerini araştırmışlardır[14].

Düşük yoğunlukta üretilebilen bal peteği yapıları inşaat mühendisliği, ulaşım, havacılık, uzay, makine mühendisliği, kimya mühendisliği, spor gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır[5,15,16]. Bal peteği yapıları enerji yutma, hava yönlendirme, akustik ve termal çok yönlülük, radyo frekans koruyuculuk ve dielektrik özelliği bakımından da birçok alanda avantaj sağlamaktadır[1,15].

Bu çalışmada normal girintili bal peteği yapısının geometrik modeli tekrar düzenlenmiş ve yeni bir hücre modeli oluşturulmuştur. Bu yeni model ve normal girintili bal peteği yapısına ait mekanik özelliklerin karşılaştırılması yapılarak mekanik özelliklerin değişimi incelenmiştir.

2. Yöntem

Çalışmada öncelikli olarak kullanılacak yöntemin doğrulanması yapılmıştır. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılımda[17] iki boyutlu olarak modellenen klasik girintili bal peteği (re-entrant honeycomb) yapı sonuçları ve analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analitik formülasyon Masters ve Evans tarafından verilmiştir[2]. Daha sonra klasik girintili bal peteği yapısı ile çalışmada geliştirilen yapının karşılaştırılması amacıyla her iki yapı için de sonlu eleman modelleri hazırlanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Klasik girintili bal peteği yapısı Şekil 1a'da ve çalışmada geliştirilen yapı ise Şekil 1b'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Girintili bal peteği hücresi yapısı (a) klasik hücre yapısı (b) geliştirilen hücre yapısı

2.1. Girintili Bal Peteği Yapısının Mekanik Özellikleri

Masters ve Evans[2], çalışmalarında klasik girintili bal peteği yapısı Poisson oranları için Denklem 1 ve Denklem 2'yi, elastisite modülleri için ise Denklem 3 ve Denklem 4'ü vermişlerdir.

$$v_{xy} = [-K_{vxy} \sin \theta (h/l + \sin \theta)] \quad (1)$$

$$v_{yx} = \left[\frac{(K_{vxy} \sin \theta \cos \theta)}{(h/l + \sin \theta)} \right] \quad (2)$$

$$E_x = \left[\frac{1}{\left(\frac{b \cos \theta}{h/l + \sin \theta} \right) + \left(\frac{\cos^2 \theta}{K_f} + \frac{\cos^2 \theta}{K_h} + \frac{2h}{l} + \sin^2 \theta \right) K_s} \right] \quad (3)$$

$$E_y = \left[\frac{1}{\left(b \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right) \right) \left(\frac{\sin^2 \theta}{K_f \cos \theta} + \frac{\sin^2 \theta}{K_h \cos \theta} + \cos \theta \right) K_s} \right] \quad (4)$$

denklemlerde, h hücrenin x yönündeki boyunu, l eğimli duvarın yükseliğini, t hücrenin duvar kalınlığını, b hücre duvarının genişliğini, θ hücre duvarının açısını belirtmektedir. K_{vxy} , K_{vyx} , K_f , K_h ve K_s sırasıyla Denklem 5'ten Denklem 9'a kadar aşağıda tanımlanmıştır. Denklemlerde E_s kullanılan malzemenin elastisite modülü değerini, v_s malzemenin Poisson oranını belirtmektedir.

$$K_{vxy} = \left[\frac{-\frac{1}{K_f} \frac{1}{K_h} + \frac{1}{K_s}}{\frac{\cos^2 \theta}{K_f} + \frac{\cos^2 \theta}{K_h} + \frac{2h}{l} + \sin^2 \theta} \right] \quad (5)$$

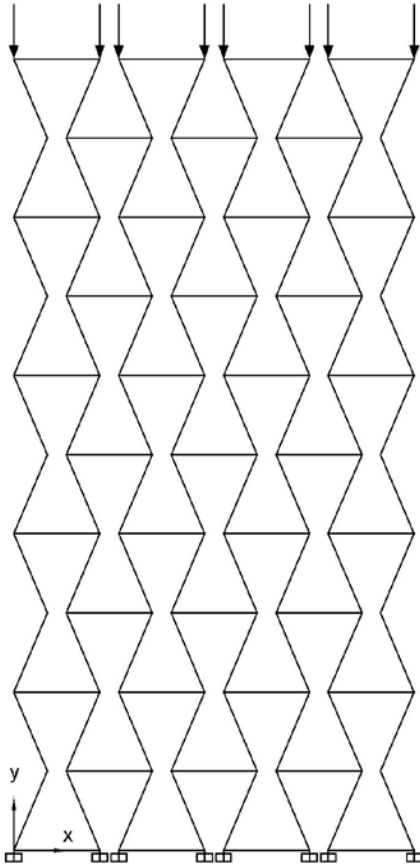
$$K_{vyx} = \left[\frac{\frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_h} + \frac{1}{K_s}}{\frac{\sin^2 \theta}{K_f \cos \theta} + \frac{\sin^2 \theta}{K_h \cos \theta} + \frac{\cos \theta}{K_s}} \right] \quad (6)$$

$$K_f = E_s b \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (7)$$

$$K_h = E_s \frac{b}{2(1+\nu_s)} \left(\frac{t}{l} \right) \quad (8)$$

$$K_s = E_s b \frac{t}{l} \quad (9)$$

Girintili bal peteği yapısının sonlu elemanlar modeli sonuçları ile analitik sonuçların örtüşmesi amacıyla sonlu eleman modeli en boy oranı en az 1.5 olacak şekilde modellenmiştir. Bu durumda düşey yönde en az 5 yatay yönde ise en az 4 çekirdek hücre kullanılmıştır [4]. Modellemede çubuk elemanlar kullanılmış olup, modellenen yapının malzeme ve yapı özellikleri şöyledir; $E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=t_h=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h$. Klasik girintili bal peteği sonlu eleman modeli, sınır şartları ve yüklemesi Şekil 2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2. Klasik girintili bal peteği yapısı sonlu eleman modeli ve sınır şartları

Düşey yönde Poisson oranını belirlemek amacıyla modelin alt kısmındaki düğüm noktaları ankastre olarak düzenlenmiştir. Modelin üst kısmındaki düğüm noktalarında ise sadece düşey yönde yer değiştirmeye izin verilmiş ve üst noktaların yer değiştirme miktarı eşit tutularak toplamda 80 N yük uygulanmıştır. Birim şekil değiştirme, gerilme ve Poisson oranı hesaplamaları Denklem 10'dan Denklem 14'e kadar olan denklem takımı ile hesaplanmıştır[4]. Analiz sonucunda sistemin üst noktasının yaptığı yer değiştirme düşey yöndeki(y eksenini yönü) ilk boya bölünerek düşey yöndeki birim şekil değiştirme değeri elde edilmiştir. Sistemin sağ ve solunda dışarıda kalan noktaların yatay yönde(x eksenini yönü) yer değiştirme miktarlarının ortalaması alınarak yataydaki ilk ortalama boya bölünerek yatay yöndeki birim şekil değiştirme değeri bulunmuştur. Yatay yön için de aynı hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

$$\epsilon_x = (x_n - x_o) / x_o \quad (10)$$

$$\epsilon_y = (y_n - y_o) / y_o \quad (11)$$

$$\nu_{xy} = -\epsilon_y / \epsilon_x \quad (12)$$

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A_x}, \quad \sigma_y = \frac{F_y}{A_y} \quad (13)$$

$$A_x = b x_o, \quad A_y = b y_o \quad (14)$$

Denklemlerde, ϵ_x x eksenini yönündeki birim şekil değiştirmeyi, x_n yapının x eksenini yönündeki yüklemeden sonraki boyunu, x_o x eksenini yönündeki ilk boyunu, ϵ_y y eksenini yönündeki birim şekil değiştirmeyi, y_n yapının y eksenini yönündeki yüklemeden sonraki boyunu, y_o y eksenini yönündeki ilk boyunu, ν_{xy} Poisson oranını, σ_x x yönündeki gerilmeyi, F_x x yönünde uygulanan toplam kuvveti, A_x x yönündeki alanı, σ_y y yönündeki gerilmeyi, F_y y yönünde uygulanan toplam kuvveti, A_y y yönündeki alanını belirtmektedir.

Elastisite modülü gerilme birim şekil değiştirme grafiğinin doğrusal kısmının eğiminden bulunmuştur.

2.2. Birim Hücre Tasarımı

Girintili bal peteği yapısının mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla yeni bir girintili bal peteği hücre modeli oluşturulmuştur. Klasik girintili bal peteği yapısı fazla rijit olmayan bir özellik göstermektedir.

Bu yapının rijitliğini artırmak amacıyla rijitliğin zayıf olduğu yönde yapıya yeni hücre duvarları ilave edilmiştir. Klasik girintili bal peteği yapı hücresi ve yeni oluşturulan hücre sırası ile Şekil 1a ve Şekil 1b'de görüldüğü gibidir.

3. Sonuçlar Ve Tartışma

Tablo 1'de normal girintili bal peteği yapısı için analitik sonuçlar ile sonlu elemanlar yönteminden bulunan Poisson oranları, Elastisite modülü değerleri ve hata oranları verilmiştir.

Tablo 1. Normal girintili bal peteği yapısının mekanik özellikleri

l(mm)	ν_{xy}		ν_{yz}		E_x (GPa)		E_y (GPa)		Hata (%)		Hata (%)	
	FE	Analitik	FE	Analitik	FE	Analitik	FE	Analitik	ν_{xy}	ν_{yz}	E_x	E_y
25	-0.263	-0.268	-3.148	-3.259	0.280	0.264	3.264	3.214	1.787	3.417	6.092	1.548
30	-0.268	-0.271	-3.260	-3.344	0.166	0.156	1.969	1.922	0.975	2.516	6.557	2.428
40	-0.267	-0.274	-3.384	-3.434	0.072	0.067	0.868	0.838	2.562	1.459	7.079	3.541
50	-0.276	-0.277	-3.445	-3.478	0.037	0.035	0.454	0.436	0.302	0.957	7.332	4.031
60	-0.278	-0.278	-3.479	-3.502	0.022	0.020	0.265	0.255	0.146	0.660	7.459	4.112

Analitik sonuçlar ve sonlu elemanlar yönteminin sonuçları karşılaştırıldığında bulunan Poisson oranlarındaki fark en fazla %3.4 olmaktadır. Elastisite modülü değerleri kıyaslandığında en fazla %7.5 oranında hata vardır. Bu hata değerleri göz önünde bulundurularak sonlu eleman yönteminin yeterli yaklaşıklıkta sonuç verdiği ve modelin güvenilir olduğu anlaşılmaktadır. Böylece sonlu elemanda oluşturulan geliştirilmiş yeni tasarıma ait modelinin sonuçları güvenilirdir.

Tablo 2'de normal girintili bal peteği ve geliştirilen girintili bal peteği yapılarının $l=30$ mm için karşılaştırılması sunulmuştur.

Tablo 2. Normal ve yeni tasarım girintili bal peteği yapılarının mekanik özellikleri

	ν_{xy}	ν_{yz}	E_x (GPa)	E_y (GPa)	Sistem Kütlesi (kg)
Klasik girintili bal peteği hücre	-0.268	-3.260	0.166	1.969	0.672
Bu çalışma	-0.167	-4.182	0.683	16.821	1.406

Yeni tasarlanan girintili yapı hücresinin normal girintili yapı hücresine göre yoğunluğunun artması ve x eksen yönünde Poisson oranının mutlak değerce azalmasına rağmen, y eksen yönünde Poisson oranı mutlak değerce artmıştır. Yeni tasarımın yoğunluk değeri 2.09 kat artmasına rağmen E_x değeri 4.11 kat artmış ve E_y değeri de 8.54 kat artmıştır.

4. Sonuç

Mühendislik malzemesi veya yapısı olarak girintili bal peteği yapısı ve diğer auxetic yapılar birçok alanda kullanılmaktadır ve oldukça büyük bir kullanım potansiyeline sahiptirler. Negatif Poisson oranı birçok alanda yeni tasarım olanağı ve esneklik sağlamaktadır. Fakat bazı uygulamalarda normal girintili bal peteği yapısı rijitlik bakımından yetersiz

kalmaktadır. Çalışmada tasarlanan girintili bal peteği yapısı hem negatif Poisson oranında mutlak değerce artış sağlamış hem de hücrenin her iki doğrultuda dayanımı yükseltilmiştir. Bu özelliği bakımından çalışmada önerilen auxetic yapının mevcut mühendislik uygulamalarının geliştirilmesinde ve yeni mühendislik uygulamalarında daha verimli olacağı görülmektedir. Auxetic yapıların basit düzenlemeler ile istenilen rijitlikte ve Poisson oranına sahip olacak şekilde tasarlanabileceği görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] T.-C. Lim, Auxetic Materials and Structures, 2015.
- [2] I. G. Masters and K. E. Evans, Models for the elastic deformation of honeycombs, Compos. Struct., vol. 35, no. 4, pp. 403–422, 1996.
- [3] D. Li, J. Yin, L. Dong, and R. S. Lakes, Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson's ratio, J. Mater. Sci., vol. 53, no. 5, pp. 3493–3499, 2018.
- [4] K. Zied, M. Osman, and T. Elmahdy, Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores, Phys. Status Solidi Basic Res., vol. 252, no. 12, pp. 2685–2692, 2015.
- [5] Y. Chen and M. H. Fu, Design and modeling of a combined embedded enhanced honeycomb with tunable mechanical properties, Appl. Compos. Mater., pp. 1–15, 2017.
- [6] A. Ingrole, A. Hao, and R. Liang, Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, Mater. Des., vol. 117, pp. 72–83, 2017.
- [7] H. Wan, H. Ohtaki, S. Kotosaka, and G. Hu, A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model, Eur. J. Mech. A/Solids, vol. 23, no. 1, pp. 95–106, 2004.
- [8] X. Hou, Z. Deng, and K. Zhang, Dynamic Crushing Strength Analysis of Auxetic Honeycombs, Acta Mech. Solida Sin., vol. 29, no. 5, pp. 490–501, 2016.
- [9] M. Fu, Y. Chen, W. Zhang, and B. Zheng, Experimental and numerical analysis of a novel three-dimensional auxetic metamaterial, Phys. Status Solidi, vol. 253, no. 8, pp. 1565–1575, 2016.
- [10] F. Scarpa, P. Panayiotou, and G. Tomlinson, Numerical and experimental uniaxial loading on in-plane auxetic honeycombs, J. Strain Anal. Eng. Des., vol. 35, no. 5, pp. 383–388, 2000.
- [11] J. Huang, Q. Zhang, F. Scarpa, Y. Liu, and J. Leng, In-plane elasticity of a novel auxetic

- honeycomb design, *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 72–82, 2017.
- [12] M. H. Fu, Y. Chen, and L. L. Hu, Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, *Compos. Struct.*, vol. 175, pp. 101–110, 2017.
- [13] M. H. Fu, Y. Chen, and L. L. Hu, A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength, *Compos. Struct.*, vol. 160, pp. 574–585, 2017.
- [14] Z. X. Lu, X. Li, Z. Y. Yang, and F. Xie, Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus, *Compos. Struct.*, vol. 138, pp. 243–252, 2016.
- [15] T. Bitzer, *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. 1997.
- [16] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids*. 1997.
- [17] CSI, *SAP2000. Analysis Reference Manual*, CSI: Berkeley (CA, USA): Computers and Structures INC. 2016.