

Auxetic girintili bal peteği hücre yapılarının yatay yük etkisi altında davranışı

Tarık Baran¹

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Osmaniye, Türkiye; tarikbaran@osmaniye.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, auxetic yapıların(negatif Poisson oranına sahip malzeme ve yapılar) yatay yük taşıma kapasitesi sayısal olarak araştırılmıştır. Düzlem içi ve düzlem dışı olarak yüklenen auxetic hücreli yapı sonuçları tam dolu ve auxetic olmayan hücreli yapıya ait yükleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hücre boyutları küçüldükçe düzlem dışı yer değiştirmelerin önemli oranda azaldığı görülmüştür. Yapı içindeki hücre yöneliminin auxetic davranışa önemli bir etkisi vardır. Elde edilen sonuçlardan auxetic yapıların yapı mühendisliğinde kullanılabileceğini anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Auxetic yapı ve malzeme, girintili bal peteği hücre, negatif Poisson oranı, yatay yük.

Behaviour of auxetic reentrant honeycomb cell structures under lateral load

Abstract

In this study, lateral load capacity of auxetic structures (materials and structures that have negative Poisson ratio) was numerically investigated. Auxetic cell structure was loaded in plane and out of plane and results were compared with plate and non auxetic cell structure load results. It was observed that while auxetic cell dimensions were reducing out of plane displacements significantly decreased. Auxetic cell orientation in the structure has considerable effect on the auxetic behaviour of the structure. It was figured out that auxetic structures and materials can be profitable for structural engineering.

Keywords: Auxetic structure and materials, re-entrant honeycomb cell, negative Poisson ratio, lateral load.

1. GİRİŞ

Doğada doğal olarak bulunan ve yapay olarak dokuma vb yöntemler ile oluşturulabilen auxetic yapılar negatif Poisson oranına sahip yapılardır. Bu tarz malzemelerden üretilen yapılar basınç kuvveti etkisi altında eleman eksene dik yönde kılma, çekme kuvveti etkisinde ise eksene dik yönde uzama gösterirler. Bu yapıların yüksek enerji emme kapasitesi vardır. Auxetic özellik malzeme özelliği olsa da auxetic özellikli tek bir hücre yapısının periyodik olarak tekrar etmesi yolu ile daha büyük ölçekte auxetic davranış gösteren yapılar ve taşıyıcı sistemler elde etmek mümkündür. Bu hücre yapıları düzenli tek tip bir yapı olabileceği gibi belli şartları sağlayan gelişigüzel lifli yapılar da auxetic davranış gösterebilir[1].

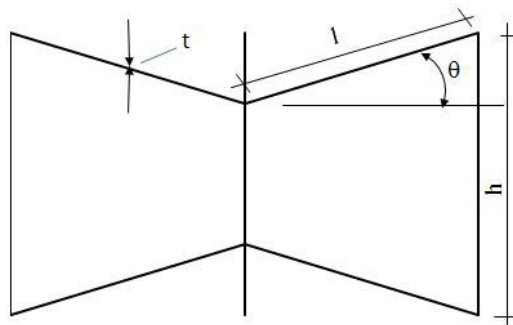
Auxetic davranışa sahip birçok hücre tipi bulunmaktadır[2]. En temel hücre yapılarından birisi olan girintili bal peteği (reentrant honeycomb) yapısı bu çalışmada kullanılan tiptir. Bu tarz hücre yapısı alışıldık bal peteği yapısının iki köşesinin deforme edilerek hücre merkezine yönlendirilmesi ile oluşturulur. Auxetic davranış için hücre duvarlarının ve açılarının belli değerler ve oranlarda olması gereklidir[2]. Negatif Poisson oranına sahip sentetik bir köpük özellikleri Lakes[3] tarafından incelenmiştir. Daha

sonra auxetic malzeme ve yapılar hakkındaki araştırmalar giderek artmıştır. Bu alışmalar farklı auxetic yapı hucreslerini, davranışlarını ve kullanım alanlarını kapsamıştır. Wan ve ark. Girintili bal peteği hucreslerin buyuk deformasyonlarda Poisson oranının değiştiğini gostermişlerdir[4]. Hucresinin auxetic özellik gostermesi için gereken geometrik parametrelerin teorik çalışması yapılmıştır. Huce geometrik zelliklerinin Poisson oranına etkisi yine Wan ve ark. tarafından incelenmiştir[4]. Novak ve ark. auxetic hucresli malzemeler ve yapılar hakkında üretim teknikleri, huce turleri, mekanik özellikler ve uygulama alanları üzerine bir inceleme sunmuşlardır[5]. Auxetic malzemelerin havacılık mühendisliği uygulamalarını içeren ayrıntılı literatür taraması Alderson ve Alderson tarafından sunulmuştur[6]. Auxetic malzemeler ve yapılar deprem izolatörü olarak tasarlanabilmektedir[7].  boyutlu olarak auxetic yapılar modellenerek üretilebilmekte ve bu yapının auxetic davranış gosterebilmesi için gerekli geometrik özellikler belirlenebilmektedir. Oluşturulan mikro yapının mekanik özellikleri belirlenebilir[2,8,9]. Negatif Poisson oranı dzn tekrarı olmayan yapılarda, üzerinde gerilme olan yapılarda ve huce merkezinden geçmeyen yükleme veya örüntü dolayısı ile ortaya çıkabilmektedir[10].  boyutlu auxetic yapılar sandviç panel olarak üretilerek yüksek enerji emme ve eğilme kapasitesi ile kendine yapısal uygulamalarda yer bulabilmektedir[11]. Farklı huce içi aı ve eleman kalınlıkları yapıların enerji emme kapasitesini ve dinamik karakteristiğini önemli ölçüde etkiler. Farklı ezilme hızları farklı ezilme karakteristikleri ortaya koymaktadır[12]. Hucreslerde yapılacak bazı iyileştirmeler ile huce ve dolayısıyla yapıların burkulma dayanımları kolaylıkla artış gostermektedir[13]. Hucreslerin geometrik özellikleri olan huce elemanı birleşim açıları ve huce elemanlarının boyları oranı mekanik özellikler açısından önemlidir[14]. Huce düzlemine dik yöndeki derinliğin, eğimli huce elemanı uzunluna oranı olarak ifade edilen gauge oranındaki küçük artışlar düzlem dışı kesme dayanımında ve modülünde dikkate değer bir artış sağlamaktadır. Bu zellik çift eğrilik gerektiren panel tasarımları için oldukça önemlidir[15,16]. Auxetic malzeme ve yapılar buyuk deformasyonlarda bile doğrusal davranışa yakın bir davranış sergiler[17]. Bahsedilen birçok üstünlüğü ile auxetic malzemeler ve yapılar birçok farklı alanda ve uygulamada kendine yer bulmaktadır[18]. Bu yapılar gerek davranış özellikler gerekse enerji emme kapasitelerinin yüksekliliği açısından deprem mühendisliğinde özellikle hafif ve dayanıklı perde tasarımında kullanılabilir[19].

Bu çalışmada, girintili bal peteği yapı kullanılarak oluşturulan 1m×1m boyutlu bir düşey taşıyıcının yatay yük altında davranışı incelenmiştir. Farklı boyuttaki hucresler ile düzlem içi ve düzlem dışı davranışını belirlemek için sayısal analizler SAP2000[20] yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Karşılaştırma amacı ile auxetic davranış gostermeyen hucresler ile oluşturulmuş bir düşey taşıyıcı ve tamamen dolu elik levha düşey taşıyıcı aynı yükleme şartlarında ozmlenmiştir. Auxetic yapıların deprem esnasında yatay yük taşıyıcı elemanı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

2. YÖNTEM

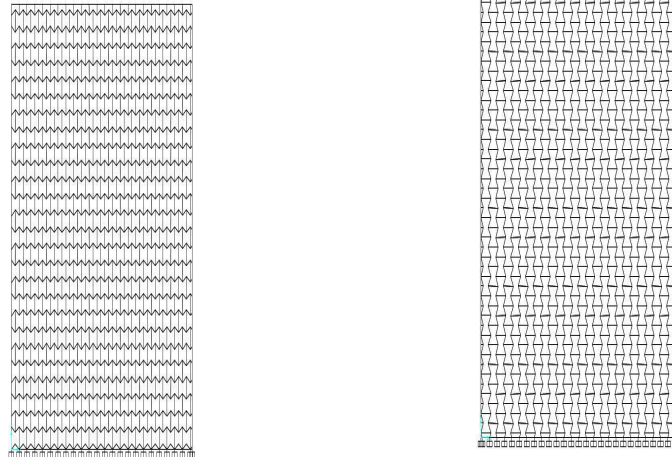
Çalışmada 1m×1m boyutlarında bir alan içerisinde türetilen girintili (reentrant) huce yapılar kullanılmıştır. Hucreslerin auxetic davranış gostermesi için gereken boyutlar ve geometrik özellikler şekil 1'deki gibidir. Hucresler farklı boyutlarda tasarlanarak aynı geometrik yapı korunmuş ve ölçeklenmiştir. Eleman oluşturulurken θ açısı -30 derece olarak alınmıştır. Bu açı değeri auxetic huce için optimum bir değerdir[2]. şekil 1'de görülen h ve l parametrelerinin oranı(h/l) ise yine auxetic davranışı sağlamak için 2 olarak alınmıştır[2].



şekil 1. Girintili (reentrant) huce

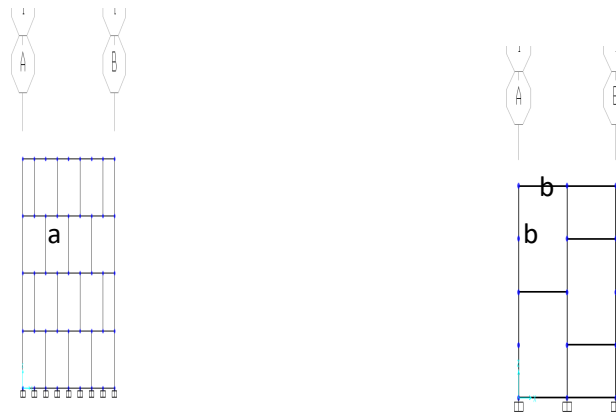
Oluşturulan taşıyıcı yapı 1m×1m×0.1m boyutlarındadır. Tüm modellerde 5 mm kalınlıkta 100 mm genişlikte elik kiriş elemanlar hem huce duvarları hem de taşıyıcı erevesi için kullanılmıştır. şekil 2'de

görülen eleman alttan ankastre mesnetli olarak kabul edilmiştir. Yapı ağırlığı hesaplandıktan sonra hesaplanan ağırlığın yarısı 0.2 katsayısı ile çarpılarak yatay yük elde edilmiştir. Elde edilen yatay yük yapı tepesindeki düğüm noktası sayısına bölünerek noktalarından eşit olarak uygulanmıştır. Yatay yük düzlem içi ve düzlem dışı davranışı belirlemek için planda eleman ekseninden geçen eksene dik eksenler doğrultusunda yapıya her iki yönde etkilmiştir. Girintili hücre eleman eksenini taşıyıcı eleman yatay eksenine paralel ve dik olarak yerleştirilerek iki yerleşim için analizler yapılmıştır (Şekil 2a, Şekil 2b). Her bir yerleşim ve boyut için Poisson oranları, yatay yük altında tepe noktası yer değiştirmeleri hesaplanmıştır.



Şekil 2. Normal yerleşimli auxetic hücre yapısı(a), 90 derece döndürülmüş auxetic hücre yerleşimi(b)

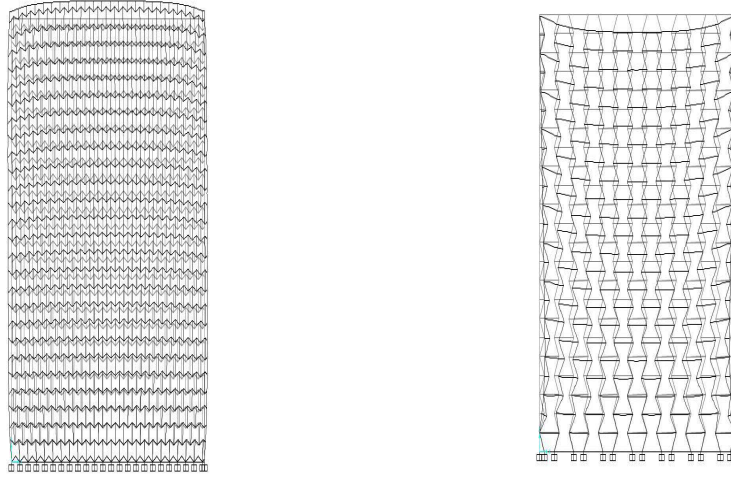
Karşılaştırma için kullanılan auxetic olmayan hücre için ise θ açısı sıfır derece ve h/l oranı 2 alınarak standart bir dikdörtgen eleman ağ Şekil 3a ve Şekil 3b'deki gibi oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan farklı boyuttaki hücreler Şekil 2 ve Şekil 3 teki gibidir. Aynı hücre boyutu değişimi auxetic hücreler için de geçerlidir.



Şekil 3. Auxetic davranış göstermeyen hücre (a) normal yerleşim, (b) 90 derece döndürülmüş yerleşim

Auxetic davranış ise Şekil 4'te görüldüğü gibidir. Poisson oranının belirlenmesi için deforme olmuş şekiller üzerinden okunan yer değiştirmeler kullanılmıştır.

Analizlerde hücre h boyutu 0.5m, 0.25m, 0.1m ve 0.05m alınmış seyrek bir örüntüden daha sık bir örüntüye analizler tekrarlanmıştır. Tüm analizlerde yatay eksen "x" eksenini, dikey eksen "z" eksenini olarak etiketlenmiştir. Düzleme dik eksen ise "y" eksenini olarak etiketlenmiştir.



Şekil 4. Auxetic davranış (siyah çizgi: şekil değiştirmiş hal, gri çizgi: şekil değiştirmemiş hal)

Tablo 1. Tam Dolu levha- Auxetic yapı düzlem içi yükleme sonuçları

X yönü (Düzlem içi)					
h=0.5 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
	B	C	D	B/C	B/D
Yük (kN)	0.0539	0.0389	0.0393		
Ağırlık(kN)	0.539	0.389	0.393	1.385604	1.371501
Tepe Dep(m)	$2.74 \cdot 10^{-7}$	0.0012	0.0011	$2.28 \cdot 10^{-4}$	$2.49 \cdot 10^{-4}$
Poisson oranı	0.3	-0.868	-1.218		
X yönü (Düzlem içi)					
h=0.25 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön	B/C	B/D
Yük (kN)	0.0539	0.0644	0.0656		
Ağırlık(kN)	0.539	0.644	0.656	0.837	0.822
Tepe Dep(m)	$2.738 \cdot 10^{-7}$	0.0004	$4.00 \cdot 10^{-4}$	$6.85 \cdot 10^{-4}$	$6.85 \cdot 10^{-4}$
Poisson oranı	0.3	-0.905	-0.91		
X yönü (Düzlem içi)					
h=0.1 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön	B/C	B/D
Yük (kN)	0.0539	0.1347	0.1349		
Ağırlık(kN)	0.539	1.347	1.349	0.4001	0.3995
Tepe Dep(m)	$2.738 \cdot 10^{-7}$	$7.18 \cdot 10^{-5}$	$7.15 \cdot 10^{-5}$	0.0038	$3.83 \cdot 10^{-3}$
Poisson oranı	0.3	-1	-1		
X yönü (Düzlem içi)					
h=0.05 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön	B/C	B/D
Yük (kN)	0.0539	0.2529	0.254		
Ağırlık(kN)	0.539	2.529	2.54	0.2131	0.2122
Tepe Dep(m)	$2.738 \cdot 10^{-7}$	$1.95 \cdot 10^{-5}$	$1.95 \cdot 10^{-5}$	0.01407	0.0140
Poisson oranı	0.3	-0.77	-0.822		

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tablo 1 ve Tablo 2'de 5 mm kalınlıklı tam dolu çelik bir levha 5mm kalınlıklı ve 100mm kenar çerçeveleri ile oluşturulmuştur. Auxetic hücreli yapı ise 100 mm genişlikte, 5mm kalınlıktaki kenar ve iç kırışler ile oluşturulmuştur. Her iki taşıyıcıya ait analiz sonuçları ve karşılaştırmalar Tablo 1 ve Tablo 2'de

görülmektedir. Tablo 1 ve Tablo 2'den görüldüğü gibi auxetic yapı tepe noktası yer değiştirmeleri tam dolu seçeneğine göre büyüktür. Ancak örgü sıklaştıkça auxetic yapı ağırlığı artmasına rağmen, yapı ağırlığı-yük oranı göz önüne alınırsa, auxetic yapı yer değiştirmeleri tam dolu yapıdan oransal olarak daha faydalıdır. Düzlem dışı durumda büyük hücreli seçeneklerde auxetic yapı yer değiştirmeleri daha küçüktür.

Tablo 2. Tam Dolu levha- Auxetic yapı düzlem dışı yükleme sonuçları

Y yönü (Düzleme dik)					
h=0.5 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
	G	H	I	G/H	G/I
Yük (kN)	0.0539	0.0389	0.0393		
Ağırlık(kN)	0.539	0.389	0.393	1.3856	1.3715
Tepe Dep(m)	1.00·10 ⁻⁴	6.50·10 ⁻⁵	5.68·10 ⁻⁵	1.5375	1.7621
Poisson oranı	0.3	-0.868	-1.218		
Y yönü (Düzleme dik)					
h=0.25 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön	G/H	G/I
Yük (kN)	0.0539	0.0644	0.0656		
Ağırlık(kN)	0.539	0.644	0.656	0.8369	0.8216
Tepe Dep(m)	1.00·10 ⁻⁴	9.10·10 ⁻⁵	7.98·10 ⁻⁵	1.0993	1.2534
Poisson oranı	0.3	-0.905	-0.91		
Y yönü (Düzleme dik)					
h=0.1 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön	G/H	G/I
Yük (kN)	0.0539	0.1347	0.1349		
Ağırlık(kN)	0.539	1.347	1.349	0.4001	0.3995
Tepe Dep(m)	1.00·10 ⁻⁴	1.47·10 ⁻⁴	1.30·10 ⁻⁴	0.6788	0.7668
Poisson oranı	0.3	-1	-1		
Y yönü (Düzleme dik)					
h=0.05 m	Dolu Çelik	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön	G/H	G/I
Yük (kN)	0.0539	0.2529	0.254		
Ağırlık(kN)	0.539	2.529	2.54	0.2131	0.2122
Tepe Dep(m)	1.00·10 ⁻⁴	2.20·10 ⁻⁴	2.23·10 ⁻⁴	0.4555	0.4486
Poisson oranı	0.3	-0.77	-0.822		

Auxetic olmayan hücreli yapı ve auxetic hücreli yapıya ait yükleme sonuçlarını Tablo 3 düzlem içi yükleme için ve Tablo 4'te düzlem dışı yükleme için göstermektedir. Düzlem içi yükleme durumunda auxetic yapının belirgin bir avantajı yoktur. Yapı ağırlığı-fayda açısından kıyaslama yapılırsa bir miktar auxetic yapının avantaj sağlayabileceği görülmektedir. Düzlem dışı yükleme durumunda ise özellikle yine yapı ağırlığı-fayda açısından auxetic yapının bir miktar avantaj sağlayabileceği anlaşılmaktadır. Özellikle küçük hücre boyutlarında bu avantaj iyice belirgin hale gelmektedir. Düşey yüklü kombinasyonlarda bu avantajın artış göstermesi ihtimali yüksektir. Hücre yöneliminin önemi net bir şekilde görülmektedir.

4. SONUÇ

Mühendislik malzemesi olarak görece yeni olan auxetic yapılar kendine birçok uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle hücre boyutu küçüldükçe düzlemlerdeki yer değiştirmelerin önemli oranda azaldığı görülmektedir. Hücre yönelimleri düzlem içi ve düzlem dışı davranışı önemli oranda değiştirmektedir.

Düzlem dışı yer değiştirmelerin küçüklüğü, deprem davranışı açısından önemli olan eleman rijitliklerin dağılımında auxetic yapı taşıyıcının tasarımcıya olumlu bir kazanç sağlanabileceğini göstermektedir. Davranışı klasik kiriş elemanından farklı bir davranış gösteren bu yapılardan oluşturulan taşıyıcı elemanlar yanal ötelemelerin azaltılmasına olumlu katkı sağlayabilir.

Tablo 3. Normal (Auxetic olmayan) hücreli ve Auxetic hücreli yapı düzlem içi yükleme sonuçları

X yönü (Düzlem içi)						
h=0.5 m	Normal Hücre Eksen Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
	B	C	D	E	B/D	C/E
Yük (kN)	0.025	0.025	0.0389	0.0393		
Ağırlık(kN)	0.25	0.25	0.389	0.393	0.6427	0.6361
Tepe Dep(m)	0.0011	0.00115	0.0012	0.0011	0.9167	1.0455
Poisson oranı			-0.868	-1.218		
X yönü (Düzlem içi)						
h=0.25 m	Normal Hücre Eksen Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
Yük (kN)	0.0404	0.0404	0.0644	0.0656		
Ağırlık(kN)	0.404	0.404	0.644	0.656	0.6273	0.6159
Tepe Dep(m)	0.0002753	0.0003	0.0004	4.00·10 ⁻⁴	0.6883	0.7500
Poisson oranı			-0.905	-0.91		
X yönü (Düzlem içi)						
h=0.1 m	Normal Hücre Eksen Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
Yük (kN)	0.0866	0.0866	0.1347	0.1349		
Ağırlık(kN)	0.866	0.866	1.347	1.349	0.6429	0.6420
Tepe Dep(m)	4.24·10 ⁻⁵	4.27·10 ⁻⁵	7.18·10 ⁻⁵	7.15·10 ⁻⁴	0.5904	0.5976
Poisson oranı			-1	-1		
X yönü (Düzlem içi)						
h=0.05 m	Normal Hücre Eksen Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksen Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
Yük (kN)	0.1636	0.1636	0.2529	0.254		
Ağırlık(kN)	1.636	1.636	2.529	2.54	0.6469	0.6441
Tepe Dep(m)	1.15·10 ⁻⁵	1.12·10 ⁻⁵	1.95·10 ⁻⁵	1.95·10 ⁻⁵	0.5904	0.5763
Poisson oranı			-0.77	-0.822		

Bu tarz hücre yapılarının betonarme donatı olarak kullanılmasının etkileri önemli olabilir. Eksenel basınç yükü altında genişlemek yerine daralan bir betonarme donatı, çevrelediği betonun taşıma gücünü artıracaktır. Hesaplarda dikkate alınmasa bile bu dayanım artışı tasarımcıyı güvenli yönde tutacaktır. Auxetic yapılar deprem mühendisliği uygulamalarında şok emme kapasitesi ile hızlı bir sönümleme sağlayabilir. Düzlem dışı eğilme ve kesme dayanımının yüksekliği ile eğrilik gerektiren elemanların çözümlenmesi ve uygulaması için yararlı bir katkı sağlayacaktır.

Tablo 4. Normal (Auxetic olmayan) hücreli ve Auxetic hücreli yapı düzlem dışı yükleme sonuçları

Y yönü (Düzleme dik)						
h=0.5 m	Normal Hücre Eksene Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksene Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
	I	J	K	L	I/K	J/L
Yük (kN)	0.025	0.025	0.0389	0.0393		
Ağırlık(kN)	0.25	0.25	0.389	0.393	0.6427	0.6361
Tepe Dep(m)	$4.34 \cdot 10^{-5}$	$3.36 \cdot 10^{-5}$	$6.50 \cdot 10^{-5}$	$5.68 \cdot 10^{-5}$	0.6676	0.5919
Poisson oranı			-0.868	-1.218		
Y yönü (Düzleme dik)						
h=0.25 m	Normal Hücre Eksene Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksene Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
Yük (kN)	0.0404	0.0404	0.0644	0.0656		
Ağırlık(kN)	0.404	0.404	0.644	0.656	0.6273	0.6159
Tepe Dep(m)	$7.78 \cdot 10^{-5}$	$3.26 \cdot 10^{-5}$	$9.10 \cdot 10^{-5}$	$7.98 \cdot 10^{-5}$	0.8557	0.4084
Poisson oranı			-0.905	-0.91		
Y yönü (Düzleme dik)						
h=0.1 m	Normal Hücre Eksene Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksene Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
Yük (kN)	0.0866	0.0866	0.1347	0.1349		
Ağırlık(kN)	0.866	0.866	1.347	1.349	0.6429	0.6420
Tepe Dep(m)	$2.00 \cdot 10^{-4}$	$3.17 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-4}$	1.3578	0.2433
Poisson oranı			-1	-1		
Y yönü (Düzleme dik)						
h=0.05 m	Normal Hücre Eksene Yönü	Normal Hücre Eksene Dik Yön	Auxetic Hücre Eksene Yönü	Auxetic Hücre Eksene Dik Yön		
Yük (kN)	0.1636	0.1636	0.2529	0.254		
Ağırlık(kN)	1.636	1.636	2.529	2.54	0.6469	0.6441
Tepe Dep(m)	$3.00 \cdot 10^{-4}$	$3.15 \cdot 10^{-5}$	$2.20 \cdot 10^{-4}$	$2.23 \cdot 10^{-4}$	1.3667	0.1411
Poisson oranı			-0.77	-0.822		

REFERANSLAR

- [1] Tatlier M.S. and Berhan L., (2009) "Modelling the negative Poisson's ratio of compressed fused fibre networks", physica status solidi (b), vol.246, pp.2018-2024.
- [2] Lim T-C. (2015). Auxetic Materials and Structures, Singapore, Springer Science+Business Media Singapore Pte Ltd.
- [3] Lakes R., (1987) "Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio", Science, Vol. 235, , pp. 1038-1040.
- [4] Wan, H., Ohtaki, H., Kotosaka, S. and Hu, G., (2004) "A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model", European Journal of Mechanics-A/Solids, vol.23(1), pp.95-106.
- [5] Novak, N., Vesenjaj, M. and Ren, Z., (2016) "Auxetic Cellular Materials-a Review", Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, vol.62(9), pp.485-493.
- [6] Alderson, A. and Alderson, K.L., (2007) "Auxetic materials", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, vol.221(4), pp.565-575.
- [7] Ungureanu, B., Achaoui, Y., Enoch, S., Brûlé, S. and Guenneau, S., (2015), "Auxetic-like metamaterials as

novel earthquake protections”, EPJ. Applied Metamaterials, vol.2.

- [8] Shokri Rad, M., Ahmad, Z. and Alias, A., (2015) “Computational approach in formulating mechanical characteristics of 3D star honeycomb auxetic structure”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015.
- [9] Yang, L., Harrysson, O., West, H. and Cormier, D., (2015) “Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing”. *International Journal of Solids and Structures*, vol.69, pp.475-490.
- [10] Lakes, R., (1991) “Deformation mechanisms in negative Poisson’s ratio materials: structural aspects”, *Journal of Materials Science*, vol.26(9), pp.2287-2292.
- [11] Yang, L., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., Park, C. and Peters, K., (2013) “Design of Auxetic Sandwich Panels for Structural Applications”, *InSolid Freeform Fabrication Symposium*, vol. 929.
- [12] Schultz, J., Griese, D., Ju, J., Shankar, P., Summers, J.D. and Thompson, L., (2012) “Design of honeycomb mesostructures for crushing energy absorption”, *Journal of Mechanical Design*, vol.134(7), p.071004.
- [13] Miller, W., Smith, C.W. and Evans, K.E., (2011) “Honeycomb cores with enhanced buckling strength”, *Composite Structures*, vol.93(3), pp.1072-1077.
- [14] Scarpa, F., Panayiotou, P. and Tomlinson, G., (2000) “Numerical and experimental uniaxial loading on in-plane auxetic honeycombs”, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol.35(5), pp.383-388.
- [15] Scarpa, F. and Tomlin, P.J., (2000) “On the transverse shear modulus of negative Poisson’s ratio honeycomb structures”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol.23(8), pp.717-720.
- [16] Hou, Y., Tai, Y.H., Lira, C., Scarpa, F., Yates, J.R. and Gu, B., (2013) “The bending and failure of sandwich structures with auxetic gradient cellular cores” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.49, pp.119-131.
- [17] Brighenti, R., (2014) “Smart behaviour of layered plates through the use of auxetic materials” *Thin-Walled Structures*, vol.84, pp.432-442.
- [18] Mirante, L., (2015) *Auxetic structures: Towards bending-active architectural applications*, MSc Thesis, Milano, Italya.
- [19] Chen, L., (2009) *Seismic Performance of Shear Walls Utilizing Cellular Material*, Ph.D. Thesis, The Catholic University of America, Washington, D.C., ABD.
- [20] SAP2000® “Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures”, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA.