



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mitat ÖZTÜRK

RE-ENTRANT YAPININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2019

**T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**RE-ENTRANT YAPININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mitat ÖZTÜRK

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANIYE
ARALIK-2019**

TEZ ONAYI

RE-ENTRANT YAPININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mitat ÖZTÜRK tarafından Dr. Öğretim Üyesi Tarık BARAN danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Tarık BARAN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Seha TATLIER
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Selçuk KAÇIN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İSTE

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Coşkun ÖZALP
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu Çalışma OKÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No: OKÜBAP-2019-PT3-001

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Mitat ÖZTÜRK



ÖZET

RE-ENTRANT YAPININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mitat ÖZTÜRK
Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Tarık BARAN

Aralık 2019, 64 sayfa

Konvansiyonel girintili (re-entrant) yapı düşük rijitliğe sahip bir hücre yapısıdır. Girintili yapının rijitliğinin ve mekanik özelliklerinin artırılması kullanım alanlarının genişlemesini sağlayacaktır. Bu tezde, girintili yapının mekanik özellikleri incelenmiştir. Girintili yapının mekanik özelliklerini geliştirmek için yeni girintili yapılar tasarlanmıştır. Tasarlanan yapıların sayısal analizlerinin doğruluğunu ve tutarlılığını belirlemek için literatürde var olan bir deneysel ve analitik çalışmanın sonuçlarından faydalanılmıştır. Sınır şartlarının ve boy/en oranının yapı davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatüre kıyasla analitik sonuçlara daha çok yakınsayan boy/en oranı değeri elde edilmiştir. Mekanik özellikler bakımından geliştirilen girintili yapılar, konvansiyonel girintili yapı ile kıyaslanmıştır. Geliştirilen yapıların Poisson oranları ve rijitliklerinde konvansiyonel yapıya kıyasla artmıştır. Geliştirilen yapıların boy/en oranı optimizasyonları, mekanik özelliklerinin hücre duvarı açısı ve hücre duvarı uzunluğu ile değişimi araştırılmıştır. Sonuç olarak boy/en oranının, analiz sonuçlarının tutarlılığı için çok önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Ayrıca girintili yapının mekanik özelliklerinin hücre duvarı geometrisinde yapılan küçük değişikliklerle farklı kullanım ihtiyaçlarına göre ayarlanabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Girintili Yapı, Negatif Poisson Oranı, Ogzetik, Hücresel Yapılar

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF RE-ENTRANT STRUCTURE

Mitat ÖZTÜRK

M.Sc., Department of Civil Engineering
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Tarık BARAN

December 2019, 64 pages

Conventional re-entrant structure is a cell structure, which has low stiffness. Improving the stiffness and mechanical properties of the re-entrant structure will ensure its application areas to extend. In this thesis, the mechanical properties of the re-entrant structure were investigated. New re-entrant structures were designed to improve the mechanical properties of the re-entrant structure. In order to determine the accuracy and consistency of the numerical analyses of the designed structures, the results of an experimental and analytical study in the literature were utilized. The effects of boundary conditions and aspect ratio on structural behavior were investigated. Compared with the literature, the aspect ratio that converges more to analytical results was obtained. Developed re-entrant structures in terms of mechanical properties were compared with the conventional re-entrant structure. The Poisson ratios and stiffness of the developed structures increased compared to the conventional structure. The aspect ratio optimizations of the developed structures were carried out and the changes of the mechanical properties with the cell wall angle and cell wall length were investigated. As a result, it was found that the aspect ratio is a significant parameter for the consistency of the analysis results. In addition, it has been shown that the mechanical properties of the re-entrant structure can be adjusted to different applications via small changes in the cell wall geometry.

Key Words: Re-entrant Structure, Negative Poisson's Ratio, Auxetic, Cellular Structures



Çok kıymetli aileme...

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Tarık BARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bölümdeki çalışmalarım süresince beni destekleyen İnşaat Mühendisliği Öğretim Üyesi hocalarıma, öğretim görevlisi ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak her zaman bana destek olan, yardımlarını esirgemeyen kıymetli aileme, babama, anneme, kardeşlerime ve sevgili eşim Fulya ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	10
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	12
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	24
3.1 Analitik Analiz.....	24
3.2 Sayısal Analiz.....	26
3.2.1 Poisson Oranının Belirlenmesi.....	29
3.2.1.1 Girintili Çekirdek Hücre Poisson Oranının Belirlenmesi.....	30
3.2.2 Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	32
3.2.2.1 Girintili Çekirdek Hücre Elastisite Modülünün Belirlenmesi.....	32
3.2.3 Sınır Şartlarının Model Davranışına Etkisi.....	32
3.2.4 Birim Hücre Tasarımları.....	34
3.2.4.1 Yeni Birim Hücre; Tip 1.....	34
3.2.4.1.1 Tip 1 Birim Hücre Duvarı Açısının Değişiminin Mekanik Özelliklere Etkisinin Belirlenmesi.....	35
3.2.4.2 Yeni Birim Hücre; Tip 2.....	36
3.2.4.3 Yeni Birim Hücre Tip 2 ve Karesel Simetri Özelliği.....	36
3.2.5 Konvansiyonel, Tip 1 ve Tip 2 Girintili Yapı Hücrelerinin Analizi.....	37
3.2.6 Girintili Yapı Boy/En Oranı Optimizasyonu.....	37
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
4.1 Mekanik Özelliklerin Farklı Sınır Şartlarına Göre Kıyaslanması.....	39
4.2 Boy/En Oranı Optimizasyon Bulguları.....	39
4.2.1 Konvansiyonel Girintili Yapı Boy/En Oranı Optimizasyonu.....	39
4.2.2 Tip 1 Girintili Yapı Boy/en Oranı Optimizasyonu.....	41
4.2.3 Karesel Simetrik Tip 2 Girintili Yapı Boy/En Oranı Optimizasyonu.....	43

4.3	Konvansiyonel, Tip 1 ve Tip 2 Girintili Yapı Hücrelerinin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması	43
4.4	Konvansiyonel Girintili Yapı Modeli Analitik ve Sayısal Analiz Sonuçları	45
4.5	Tip 1 Girintili Yapı Modeli Sayısal Analiz Sonuçları	47
4.5.1	Tip 1 Girintili Yapı Birim Hücresinin Yeni Eklenen Hücre Duvarının Açılı Değişimine Bağlı Kıyaslama Sonuçları	50
4.6	Tip 2 Karesel Simetrik Girintili Yapı Sayısal Analiz Sonuçları.....	51
4.6.1	Karesel Simetri Özelliği Gösteren Tip 2 Girintili Yapı Hücresi.....	52
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
5.1	Sonuçlar	56
5.2	Öneriler.....	57
	KAYNAKLAR	59
	ÖZGEÇMİŞ	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Analitik sonuçların sınır şartları bakımından kıyaslanması.....	39
Çizelge 4.2. Konvansiyonel girintili yapı boy/en oranı bulguları	40
Çizelge 4.3. Konvansiyonel girintili hücre analitik ve sonlu elemanlar modeli sonuçları.....	41
Çizelge 4.4. Tip 1 girintili yapı boy/en oranı bulguları.....	42
Çizelge 4.5. Karesel simetrik Tip 2 girintili hücre boy/en oranı bulguları	43
Çizelge 4.6. Girintili yapı hücreleri Poisson oranları.....	44
Çizelge 4.7. Girintili yapı hücreleri elastisite modülü değerleri	44
Çizelge 4.8 Konvansiyonel girintili yapının mekanik özellikleri	45
Çizelge 4.9. SEY, analitik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	47
Çizelge 4.10. Konvansiyonel ve Tip 1 girintili yapıların mekanik özellikleri.....	48
Çizelge 4.11. Karesel simetrik Tip 2 girintili yapı hücrelerinin konvansiyonel hücre ile kıyaslanması	52
Çizelge 4.12. Hücre duvarı açısının karesel simetrik Tip 2 yapı hücrelerinin mekanik özelliklerine etkisi	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Konvansiyonel girintili birim hücre ve hücre duvarındaki iç kuvvet.....	25
Şekil 3.2. Üç boyutlu çubuk elemana ait uç kuvvetleri [57].....	27
Şekil 3.3. Girintili yapı sonlu eleman modeli (a) düşey yükleme için yükleme ve sınır şartları (b) yatay yükleme için yükleme ve sınır şartları.....	28
Şekil 3.4. Yükleme sonrası şekil değiştirmiş yapı modeli (a) düşey yükleme (b) yatay yükleme.....	29
Şekil 3.5. Yükleme durumları (a) düşey yükleme ve Poisson oranı hesabında kullanılan uzunluklar (b) yatay yükleme	31
Şekil 3.6. Yükleme sonucu şekil değiştirmiş hücre yapısı (a) düşey yükleme (b) yatay yükleme.....	31
Şekil 3.7. Girintili yapı sınır şartları ve yüklemesi	33
Şekil 3.8. Tip 1 girintili birim hücre yapısı.....	34
Şekil 3.9. Tip 1 girintili yapı hücre duvarı konumları.....	35
Şekil 3.10. Tip 2 girintili birim hücre yapısı	36
Şekil 3.11. Karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili birim hücre yapısı	37
Şekil 3.12. Boy/en oranı hesabında kullanılan parametreler.....	38
Şekil 4.1. Tip 1 girintili yapı boy/en oranı bulguları	42
Şekil 4.2. Konvansiyonel girintili yapının mekanik özellikleri (a) Poisson oranı değerleri (b) elastisite modülü değerleri	46
Şekil 4.3. Konvansiyonel ve Tip 1 girintili yapıların mekanik özellikleri (a) Poisson oranı değerleri (b) elastisite modülü değerleri.....	49
Şekil 4.4. Düşey yükleme sonucu şekil değiştirmiş Tip 1 yapı modeli	50
Şekil 4.5. Hücre duvarı konumlarının mekanik özelliklere etkisi (a) Poisson oranı (b) elastisite modülü.....	51
Şekil 4.6. Düşey yükleme sonucu şekil değiştirmiş karesel simetrik Tip 2 yapı modeli.....	52
Şekil 4.7. Karesel simetrik Tip 2 yapı hücresi Poisson oranının hücre duvarı açısı ile değişimi.....	53
Şekil 4.8. Karesel simetrik Tip 2 yapı hücresi elastisite modülünün hücre duvarı açısı ile değişimi	54

SİMGELER ve KISALTMALAR

b	Hücre duvarının genişliğini	(mm)
E_s	Hücre duvarı malzemesinin elastisite modülü	(MPa)
E_x	x eksenine elastisite modülü	(MPa)
E_y	y eksenine elastisite modülü	(MPa)
h	Hücre yüksekliği	(mm)
l	Eğimli hücre duvarı uzunluğu	(mm)
P	Yapı eğimli hücre duvarının taşıdığı aksenal kuvvet	(N)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi	
t	Hücre duvarı kalınlığı	(mm)
x_1	Yapı modeli yatay yön orta bölge uzunluğu	(mm)
x_0	Yapı modeli yatay yön uzunluğu	(mm)
x_1^h	Yapı hücresi yatay yön orta bölge uzunluğu	(mm)
x_0^h	Yapı hücresi yatay yön uzunluğu	(mm)
y_0^h	Yapı hücresi düşey yön uzunluğu	(mm)
y_0	Yapı modeli düşey yön uzunluğu	(mm)
Δx	Yapı modeli yatay yön ortalama uzama/kısalması	(mm)
Δy	Yapı modeli düşey yön uzama/kısalması	(mm)
ε_x	x eksenine yönü birim şekil değiştirme	
ε_y	y eksenine yönü birim şekil değiştirme	
θ	Hücre duvarı açısı	(°)
ν_s	Hücre duvarı malzemesinin Poisson oranı	
ν_{xy}	Hücre x eksenine yönü Poisson oranı	
ν_{yx}	Hücre y eksenine yönü Poisson oranı	
σ_y	y eksenine gerilme değeri	(MPa)

1. GİRİŞ

Klasik mühendislik yapılarından farklı olarak aksel çekme yükü altında kesit genişlemesi gösteren, aksel basınç yükü altında ise kesit daralması gösteren negatif Poisson oranına sahip malzemelere ogzetik (auxetic) malzeme ismi verilmektedir [1,2]. Negatif Poisson oranına sahip birçok ogzetik yapı bulunmaktadır. Girintili yapı, dönen üçgen yapısı, dönen kare ve dikdörtgen yapısı, tetrahedral yapı, eksiltilmiş çubuk yapısı, chiral ve anti-chiral kafes yapısı gibi yapılar ogzetik yapılara örnektir [1,3–5].

Ogzetik yapılar arasında en çok çalışılan yapılardan biri girintili yapıdır. Çoğu çalışmada girintili yapının sahip olduğu Poisson oranı ve elastisite modülü çalışmaların odak noktası olmuştur. Girintili yapının mekanik özelliklerini ağırlıklı olarak tekrarlanan hücrenin geometrik özellikleri belirler. Araştırmacılar girintili yapının bu iki önemli mekanik özelliğini etkileyen geometrik parametreleri ve bu parametrelerin birbirleriyle olan oranlarının yapının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [4,6–9].

Düşük yoğunlukta üretilebilen bal peteği yapıları inşaat mühendisliği, havacılık, uzay, kimya mühendisliği, ulaşım, makine mühendisliği, spor ekipmanları, sağlık ekipmanları gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır [10–12]. Bal peteği yapıları enerji yutma, akustik ve termal çok yönlülük, radyo frekans koruyuculuk, hava yönlendirme, darbe direnci, değişken geçirgenlik ve dielektrik özelliği bakımından da birçok alanda avantaj sağlamaktadır [1,2,11,13].

Konvansiyonel girintili bal peteği yapısı düşük elastisite modülüne sahiptir. Ancak yapının mekanik özellikleri uygulama alanına göre ayarlanabilmektedir. Genel olarak problem girintili yapının ogzetik özelliğini bozmadan rijitliğini artırabilmektir. Araştırmacılar girintili yapının rijitliğini artırmak amacıyla daha önce uygulanmamış bir düzenleme ile yeni hücreler geliştirmişlerdir [4,10,14–21].

Bu çalışmada, ilk olarak konvansiyonel girintili yapının mekanik özellikleri incelenmiş ve yapı hücresi duvar geometrisi değiştirilerek mekanik özellikler

artırılmaya çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Tip 1, Tip 2 ve karesel simetrik Tip 2 olarak adlandırılan girintili bal peteği yapıları geliştirilmiş ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Konvansiyonel girintili yapı hücresinin sayısal ve analitik analiz sonuçlarının daha yakın değerlerde yakınsayabilmesi için, sayısal analizde kullanılan yapı hücresinin sınır şartları araştırılmıştır. Analitik analiz sonuçları ve sayısal model sonuçlarının birbirlerini yakınsaması için gerekli bir parametre olan boy/en oranının en uygun değerleri araştırılmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Ülkemizde, ogzetik malzemeler hakkında yeterli çalışma bulunmamakla birlikte bu çalışmaya konu olan girintili bal peteği yapısı hakkında çalışma ise yine oldukça sınırlıdır. Ogzetik malzemeler çok geniş bir literatüre sahiptir. Bu tez çalışmasında temel bir ogzetik yapı olan girintili yapı üzerinde durulacağı için bu bölümde genel olarak girintili yapı ile ilgili çalışmalar özetlenecektir.

Lakes [22]; çalışmasında teorik olarak mümkün olan ancak gözlemlenemeyen, negatif Poisson oranına sahip malzemelerin varlığından bahsetmiştir. Araştırmasında negatif Poisson oranına sahip bir köpük yapısının üretiminden bahsetmiştir.

Evans [23]; yaptığı çalışmada ogzetik malzemenin tanımını yapmıştır. Ogzetik malzemenin şekil değiştirme prensiplerinden bahsetmiştir. Ogzetik malzemenin uygulama alanlarına değinmiştir.

Masters ve Evans [9]; yaptıkları çalışmada bal peteği hücre yapısının ve girintili bal peteği hücre yapısının mekanik özelliklerinin analitik çözümlemesini yapmışlardır. Elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı değerleri hücre yapısının sahip olduğu geometrik parametrelere bağlı olarak bulunmuştur. Aynı eksen doğrultusundaki Poisson oranının ve elastisite modülünün birbirleriyle ters orantılı olduğunu göstermişlerdir. Bal peteği yapısı için bir yönde elastisite modülü artarken aynı yöndeki Poisson oranı ise azalmaktadır. Bu çalışmada bal peteği yapısının analitik denklemlerinin çıkarılmasının yanı sıra mekanik özelliklerin hücre duvarı açısı ile değişimi de incelenmiştir. Yapının her iki eksen yönündeki elastisite modülü değerlerinin birbirine eşit olması ve her iki eksen yönündeki Poisson oranlarının da birbirine eşit olması durumu (karesel simetri özelliği) gösterebilmesi için hücre yapısının sahip olması gereken geometrik parametre değerleri bulunmuştur. Karesel simetri özelliğine sahip girintili yapı ile bal peteği yapısının çevrelediği alan eşit olmaktadır.

Scarpa vd. [6]; çalışmalarında girintili yapının elastisite modülü ve Poisson oranı değerlerinin hücre duvarı açısı ile değişimini incelemişlerdir. Sayısal ve deneysel analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları birbiriyle uyumludur.

Wan vd. [7]; yaptıkları çalışmada girintili yapının analitik çözümlemesini yapmışlardır. Poisson oranının her iki yöndeki formülasyonunu yapmışlardır. Poisson oranının h/l oranına ve hücre duvarı açısına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. h/l oranı 2 ve hücre duvarı açısı 30° olduğunda özel bir simetri durumu ortaya çıkmaktadır. Her iki yönde de Poisson oranı eşit olup değeri -1 olmaktadır. Fakat bu özellik şekil değiştirmeler küçük olduğunda kendini göstermektedir. Ayrıca bal peteği yapılarında büyük şekil değiştirmeler olduğu için enerji yutma kapasitesi açısından ve taşıma kapasitesi açısından doğrusal olmayan (nonlinear) davranışın çok önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Lira vd. [24]; araştırmalarında girintili yapının enine kesme dayanımını incelemişlerdir. Çalışmada, analitik ve sayısal analiz yapılmıştır ve analiz sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

Lira ve Scarpa [25]; çalışmalarında yeni bir bal peteği yapısının enine yönde kesme dayanımını araştırmışlardır. Çalışmada deneysel ve sayısal analiz yapılmıştır. Yatay hücre duvarı kalınlığının, hücre duvarı açısının ve girintili yapıdaki birim hücre sayısının kesme dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal analizler sonucunda kayma modülünde en fazla %7'lik hata payı ile sonuçlar almışlardır.

Shankar vd. [26]; çalışmalarında hücre duvarı sinüsoidal biçimde modellenmiş girintili yapının kesme dayanımını incelemişlerdir. Analitik analiz sonuçları ABAQUS programı ile bulunan sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları arasında en fazla %10 hata vardır. Kayma gerilmesi – kayma şekil değişim grafiği yapının hücre duvarı kalınlığının değişimi ile birlikte ele alınarak çalışmada verilmiştir.

Miller vd. [27]; makalelerinde birçok uygulamada girintili yapının burkulma dayanımının önemli rol oynadığını ve yetersiz kaldığını belirtmişlerdir. Çalışmada, bal peteği ile kıyaslandığından girintili yapının burkulma dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Burkulan elemanlar güçlendirilerek burkulma dayanımı artırılmaya çalışılmıştır. Uygulama burkulma dayanımını artırmıştır.

Hou vd. [28]; makalelerinde ogzetik olarak ürettikleri sandviç kiriş yapısının üç nokta eğilme deneyini yapmışlardır. Deney sonuçları doğrusal olmayan sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda iyi bir uyum sağlanmıştır. Geometrik parametrelerin değişiminin sandviç kirişin eğilme dayanımı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Karnessis ve Burriesci [29]; yaptıkları çalışmada tüp içerisine yerleştirilmiş girintili yapının eğilme dayanımını artırmak için yeni tasarım çalışmaları yapmışlardır. Öncelikle mekanik özellikleri sayısal ve analitik olarak analiz etmişlerdir. Analiz sonuçları çok iyi bir uyum sergilemiştir. Daha sonra tüp yapısının eğilme altında, eğilme dayanımı açısından geometrik parametreler ile değişimi incelenmiştir. Araştırmacılara göre hücre duvarı açısının ve h/l oranının eğilme dayanımına etkisi çok yüksektir.

Sun ve Pugno [30]; araştırmalarında çok fonksiyonlu hiyerarşik bal peteği yapısı oluşturmuşlardır. Yapının hücre duvarı içerisine ogzetik yapılar yerleştirilerek hiyerarşik bir düzen oluşturulmuştur. Bunun için ogzetik yapı olarak girintili yapı ve chiral yapı kullanılmıştır. Oluşturulan hiyerarşik yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir ve birbirleriyle kıyaslamışlardır. Hiyerarşik yapıyı oluşturan hücre sayısının değişimi, hücre duvarı açısı değişimi, hücre duvarı kalınlığının hücre duvarı uzunluğuna oranının değişimi gibi değişimlerin yapının rijitliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analitik analizi yapılan bu iki hiyerarşik yapının da rijitliğinde artış sağlanmıştır. Ayrıca hücre duvarı kalınlığı, hücre duvarı genişliği, hücre duvarı açısı gibi geometrik parametrelerin üç boyutlu yapının mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir.

Rad vd. [31]; araştırmalarında üç boyutlu girintili bir yapının analitik ve sayısal analizini yapmışlardır. Analitik analiz sonucu ile sayısal analiz sonucunda birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Analitik çözümleme sonucunda üç boyutlu girintili yapının Poisson oranının, elastisite modülünün ve yoğunluk oranının formülasyonunu yapmışlardır.

Hou vd. [32]; makalelerinde kirigami (kağıt kesme ve katlama) tekniğini kullanarak kevlar malzemesinden ürettikleri bal peteği yapısının, girintili yapının ve bu ikisinin

birleşiminden oluşan yapının mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Düşey yönde ve yatay yönde basınç deneyi ayrıca yatay yönde çarpma testi yapılmıştır. Deneye tabi tutulan yapıların gerilme, dayanım ve yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda iki yapının birleşiminden oluşan yapının, enerji yutma kapasitesinin önemli olduğu uygulamalarda durdurma kademesi olarak kullanımı önerilmektedir.

Ungureanu vd. [33]; yaptıkları çalışmada ogzetik ve benzeri malzemelerin sismik dalgalara karşı koruma sağlayabileceğini ön görmüşlerdir. Çalışmada ogzetik yapıların sismik dalgalar ile uyumlu frekanslarda, uygun şekilde tasarlandığında sismik yalıtım yapıları için yeni bir alternatif olacağı kanısına varılmıştır. Yapılan çalışmada girintili hücre duvarı açısının 0° , 30° , 45° ve 60° olması durumları için beton numunelerin analizini yapmışlardır. Kullanılan malzemenin beton olması inşaat mühendisliği açısından çalışmayı daha da önemli kılmaktadır. Bu çalışma inşaat mühendisliği açısından girintili yapıların veya bu yapılara benzer ogzetik yapıların deprem yalıtımı için kullanılabileceğini göstermektedir.

Yang vd. [34]; çalışmalarında farklı hücre sayısına sahip 3 boyutlu girintili yapının deneysel, sayısal ve analitik analizini yapmışlardır. Analiz sonuçları birbiriyle uyumludur. 3 boyutlu yapının hücre sayısının yapının mekanik özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. 3 boyutlu girintili yapının Poisson oranı, akma dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri tüm doğrultular için elde edilmiştir. Analitik analiz sonucunda yapının mekanik özellikleri yapının sahip olduğu geometrik parametrelere bağlı fonksiyonlar olarak bulunmuştur.

Zied vd. [16]; yaptıkları çalışmada girintili yapının mekanik özelliklerini literatürde verilen analitik denklemler ile bulmuşlardır. ANSYS programında modellenen girintili yapının sayısal analiz sonuçları ile analitik sonuçları karşılaştırmışlardır. Birbirine yakın sonuçlar elde edebilmek ve sayısal analiz modelinin güvenilirliğini sağlamak amacıyla yapının boy/en oranının en az 1.5 olması gerektiği belirtilmiştir. Konvansiyonel girintili yapının mekanik özelliklerinin değişimi yatay hücre duvarı uzunluğu ve hücre duvarı kalınlığı değişimine bağlı olarak incelenmiştir. Çalışmada, yapıya mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla, x eksenine doğrultusundaki yatay

elemanlar dairesel yapılarak yeni bir girintili yapı oluşturulup bu yapıya stiffened girintili ismi verilmiştir. Stiffened girintili yapısına dairesel çubuk elemanlar ekleyerek yeni bir girintili yapı geliştirilip bu yapıya splined girintili ismi verilmiştir. Konvansiyonel girintili, stiffened girintili ve splined girintili yapılarını ANSYS programında güvenilirliği doğrulanan model ile bu yapıların mekanik özelliklerini birbirleriyle kıyaslamışlardır. Bu çalışmanın sonucunda elastisite modülü değerlerinde x yönünde 16.6 kat artış y eksenini yönünde 2.4 kat artış elde etmişlerdir. Poisson oranlarında ise x yönünde 3 kat artış, y eksenini yönünde 3 kat azalma elde etmişlerdir. Ayrıca ANSYS programı modeli ile deneysel çalışma sonucu da kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları birbirleriyle iyi uyum sağlamıştır. Deneysel veriler ve sayısal analiz arasında elastisite modülünde %2, Poisson oranı değerinde %13'lük yaklaşıklıkla sonuç almışlardır.

M. H. Fu vd. [35]; yaptıkları çalışmada girintili yapının analitik ve sayısal analizini doğrusal olmayan çözüm yöntemi ile yapmışlardır. Bu analiz sonuçlarını Gibson ve Ashby [12] tarafından bulunan doğrusal (linear) analiz sonuçları ile kayma modülleri açısından karşılaştırmışlardır. Bir biriyle uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Çalışmada hücre duvarı açısının kayma modülü değerinin değişimine olan etkileri incelenmiştir. Girintili yapının kayma modülü değeri hücre duvarı açısının artmasıyla birlikte artmaktadır. Kayma modülü değeri h/l oranının yaklaşık olarak 3.25 değerine gelmesiyle birlikte maksimum değerine ulaşmaktadır. Ogzetik malzemelerin klasik malzemelere göre kesme dayanımı açısından daha iyi sonuç verdiği bilinmektedir. Bu çalışma ile birlikte ogzetik malzemenin yüksek kesme dayanımı özelliğinin geometrik parametrelerle olan ilişkisi de incelenip klasik malzemeler ile kıyaslanmıştır.

Wang vd. [36]; çalışmalarında birbirine kenetlenmiş 3 boyutlu girintili yapının üretilmesinden ve daha önceki üretim yöntemleriyle kıyaslanmasından bahsetmişlerdir. Çalışmalarında 3 boyutlu girintili yapının Poisson oranı ve elastisite modülü değerlerini deneysel olarak sayısal olarak bulmuşlardır. 3 boyutlu girintili yapının sahip olduğu mekanik özelliklerin yapının sahip olduğu geometrik parametreler ile değişimini araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları birbiriyle uyumludur.

Liu vd. [37]; araştırmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile girintili yapının darbe yükü etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Çalışmada enerji yutma performansları bakımından girintili yapı ile bal peteği yapısı birbiriyle kıyaslanmıştır. Farklı arpma hızları ile yapılar arasında kıyaslama yapılmıştır. Aynı arpma hızında enerji yutma performansı bakımından girintili yapı bal peteği yapısına göre daha avantajlı çıkmıştır. Fakat pik gerilme göz önüne alındığında aynı miktarda enerji sönümlemek için girintili yapı daha fazla gerilme üretme eğilimine gitmektedir.

Hou vd. [8]; makalelerinde girintili yapının düzlemdeki darbe yükü etkisi altındaki davranışını bal peteği yapısı ile kıyaslamışlardır. Hücre yapısının periyodik çökme mekanizmasına göre dinamik dayanımı analitik analiz yapılarak bulunmuştur. Analitik sonuçlar sayısal analizle doğrulanmıştır. Girintili yapı darbe yükü etkisi bakımından bal peteği yapısına göre her iki yapısal analiz yönünde de daha iyi sonuçlar vermiştir. Girintili yapının enerji yutma kapasitesi bal peteği yapısına göre her iki yönde de daha yüksektir. Girintili yapının darbe yükü altında dayanımının değişimi t/l oranının değişimine bağlı olarak ve çarpma hızının değişimine bağlı olarak incelenmiştir. t/l oranının 0.185 olması durumunda her iki yapısal analiz yönünde de çarpma dayanımı açısından birbirine yakın sonuçlar elde edilmektedir. Girintili yapı için ve bal peteği yapısı için çarpma hızının artması ile darbe dayanımı artış göstermiştir.

Lu vd. [21]; yaptıkları çalışmada iki boyutlu girintili yapının hücreleri arasındaki boşlukları bağlayarak yeni model oluşturmuşlardır. Bu modelin analitik ve sayısal analizi sonucunda elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri birbirleriyle uyumludur. Literatürde belirtilen konvansiyonel girintili yapıya göre yeni oluşturulan yapı elastisite modülü değeri bakımından kayda değer artış sağlamıştır. Yeni tasarlanan yapının analiz sonuçlarına göre elastisite modülü ile Poisson oranı arasında doğrusal bir bağlantı olduğu görülmüştür.

Zhang ve Yang [38]; çalışmalarında girintili yapının Poisson oranı, yoğunluğu, taşıma kapasitesi ve dinamik performansı gibi özellikleri üzerinde deneysel ve sayısal analiz çalışmalarını yürütmüşlerdir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları uyumludur. Ayrıca mekanik özelliklerin hücre duvarı kalınlığı ile ve hücre duvarı açısı ile değişimi de incelenmiştir. Poisson oranının azalmasıyla hem çekme hem de basınç etkisi altında

taşıma kapasitesi azalmaktadır. Yapının çekme taşıma kapasitesi basınç taşıma kapasitesinden yüksek çıkmaktadır. Poisson oranının -1.5'tan büyük olması durumunda hücre duvarı kalınlığının azalması dinamik performansı artırmıştır. Poisson oranının -1.5'tan küçük olması durumunda hücre duvarı kalınlığının artması dinamik performansı yine artırmıştır.

Jin vd. [39]; çalışmalarında sayısal olarak ogzetik girintili hücre çekirdeğinin patlama etkisi altında dinamik tepkisini araştırmışlardır. Girintili yapının eğilme şekil değiştirme biçimleri ve eğilme dayanımı özellikleri araştırılmıştır. Girintili yapı düşey yönde yatay yöne göre daha iyi performans sergilemiştir. Girintili yapı sandviç panel içerisine iki farklı tasarım ile yerleştirilmiştir. Her iki yerleştirme biçiminde de iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada patlamaya karşı korunma sağlamak amacıyla girintili yapının askeri otomobil, lastik, gemi uçak kanadı gibi birçok alanda kullanılabileceği ön görülmüştür.

Fu vd. [4]; yaptıkları çalışmada üç boyutlu girintili yapı modelinin her bir hücre duvarını kendi içerisinde girintili yapı olarak modellemişlerdir. Model 3 boyutlu yazıcı ile üretilerek deneysel analizi yapılmıştır. Deney sonuçları sayısal çalışma ile doğrulanmıştır. Yapı, aksenal basınç etkisi altında, burkulmadan büyük şekil değiştirmeler oluşmasına izin vermektedir. Bu çalışma üç boyutlu ogzetik yapıların tasarımı, üretilmesi ve uygulanması açısından önem arz etmektedir.

Imbalzano vd. [40]; makalelerinde patlama etkisi altında ogzetik sandviç panel ile bal peteği sandviç panelin dayanım performanslarını incelemişlerdir. Değişik çarpma hızlarında her iki sisteminde dinamik performansları sayısal olarak ve analitik olarak incelenmiştir. Bal peteği yapısı plastik şekil değişimine uğrarken bölgesel olarak rijitliğinde artış görülmemiştir. Fakat girintili yapı ilginç çarpma davranışı göstermiştir. Dinamik yükün arttığı bölgede malzemenin yoğunlaşma etkisiyle rijitliği artarak bölgesel olarak çarpma dayanımı büyüyen şekil değiştirme ile birlikte artmıştır. Sonuç olarak girintili yapı bal peteği yapısına göre dinamik davranış açısından daha yüksek dayanım göstermektedir.

Li ve Wang [41]; yapmış oldukları çalışmada girintili sandviç panelin eğilme davranışı ile ilgili deneysel ve sayısal analiz yapmışlardır. Karbon fiber takviyeli polimer

malzemeden üretilen sandviç panel için üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Girintili yapı, bal peteği yapısı ve çapraz çubuk yapısı deneye tabi tutulmuştur. Girintili yapı diğer yapılara göre yük etkisi altında daha az yer değişimine uğramıştır. Çalışmada eğilme dayanımıyla birlikte enerji yutma kapasitesi de incelenmiştir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları bir biriyle uyumludur.

Jopek [42]; çalışmasında kompozit tüp içerisine girintili yapı yerleştirilerek sayısal analizini yapmıştır. Kompozit tüpün elastisite modülü dış faktörler ile ayarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu değişime izin verilmesi tüpün şekil değiştirmesinin kontrol edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Kompozit tüpte dış çeperden merkeze doğru gerilme oluşması durumunda kompozit yapının daraldığı görülmektedir. Aynı şekilde tüpün merkezinden dış çeperine doğru gerilme oluşması durumunda ise kompozit yapının genişlediği görülmektedir.

Wang vd. [43]; yaptıkları çalışmada 3 boyutlu girintili yapıya ait hücre yapısının analitik çözümünü yapmış ve sayısal analiz ile sonuçları doğrulamışlardır. Hücre duvarı açısının değişimine bağlı olarak yapının sahip olduğu rijitlik ve Poisson oranı değerlerinin değişimi incelenmiştir. Analitik sonuçlar literatürde Wang vd. [36] ve Yang vd. [44] tarafından verilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada et kalınlığı değişiminin girintili yapının mekanik özelliklerinin değişimine olan etkisi incelenmiştir.

Fu vd. [20]; yayınladıkları makalede girintili yapı ile bu yapının doğrusal elemanlarının köşe noktalarını birleştirmeyi amaçlayan "rhombic" çapraz çubuk yapısını birleştirerek yeni bir girintili yapı oluşturmuşlardır. Çalışmada yeni tasarladıkları yapının analitik ve sayısal analiz sonuçlarını kıyaslamışlardır Yapıya ait. elastisite modülü ve Poisson oranı literatürdeki benzer geliştirilen yapılar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu yapının kritik burkulma yükü analitik ve sayısal olarak bulunmuştur. Yeni tasarlanan yapının elastisite modülü ve kritik burkulma dayanımında konvansiyonel yapıya göre artış sağlamıştır.

Chen vd. [15]; çalışmalarında elastisite modülü değerini, 3 boyutlu girintili yapının hücreleri arasındaki boşlukları, hücre duvarlarına göre daha küçük kesit genişlikli elemanlar ile bağlayarak artırmışlardır. Yapının analitik analizi ve sayısal analizi

yapılmıştır. Analiz sonuçları birbirleriyle uyumlu sonuç vermiştir. Bu yeni yapı negatif Poisson özelliği gösterirken, aynı zamanda dayanımında da artış olmuştur. Yapının mekanik özellikleri yapıya ait olan geometrik parametrelerin değişimi ile incelenmiştir. Böylece ihtiyaca uygun özellikte yapı tasarımı yapılabilmektedir.

Fu vd. [19]; çalışmalarında girintili yapıya eşkenar dörtgen yapısı ekleyerek yeni bir yapı oluşturmuşlardır. Bu yapının analitik ve sayısal sonuçları birbiriyle uyumludur. Çalışmada yeni yapı mevcut modeller ile mekanik özellikler açısından kıyaslanmıştır. Yeni yapı mevcut modellere göre elastisite modülü açısından avantaj sağlamıştır. Yapının burkulmaya müsait hücre duvarları burkulma açısından ayrıca incelenmiştir.

Chen vd. [10]; çalışmalarında girintili yapıya tek çubuk ekleyerek, eşkenar dörtgen geometrisi ekleyerek ve en son olarak ortaya çıkan iki yeni yapı formu birleştirilerek üç farklı yapı formu oluşturmuşlardır. Bu yapı formlarının mekanik özellikleri birbirleriyle kıyaslanmış ve avantajları yazarlarca araştırılmıştır. Çalışma sonucunda analitik ve sayısal analiz sonuçları birbirleriyle uyumludur.

Ingrole vd. [17]; çalışmalarında bal peteği yapısı, girintili yapı, girintili yapının hücre duvarı değiştirilmiş hali ve bal peteği hücresi ile girintili hücrenin birleşiminden oluşan iki farklı yapının mekanik özelliklerinin araştırılmasını sayısal ve deneysel olarak yapmışlardır. Çalışmada elastisite modülü açısından diğer çalışmalar ile kıyaslandığında çok iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bu çalışmada ayrıca yapıların enerji yutma kapasitesi de incelenmiştir.

Huang vd. [18]; araştırmalarında, girintili yapıdaki doğrusal elamanı diğer girintili yapı ile birleştirme esnasında, klasiğin aksine farklı bir biçim kullanarak yeni bir girintili model oluşturmuşlardır. Çalışmalarında mekanik özelliklerin hücre duvarı açısı ile değişimini ön plana almışlardır. Yeni oluşturdukları yapının analitik ve sayısal analizini yapmışlardır.

Harkati vd. [45]; çalışmalarında girintili yapının rijitliğini ve Poisson oranını analitik ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında analitik model geliştirilirken eğilme, kesme ve membran etkilerini temel almışlardır. Analitik ve sayısal analiz sonuçları

birbirine yakındır. Elastisite modülü, kayma modülü, Poisson oranı değerlerinin hücre duvarı açısının artışı ile olan değişimleri incelenmiştir.

Qi vd. [46]; çalışmalarında yüksek şiddetli patlamadan dolayı oluşan şok yükü etkisi altında yeni bir koruma sistemini incelemişlerdir. Çalışmalarında alan patlama testleri ve ağırlık bırakma testleri, betonarme panelleri koruyan ogzetik sandviç kalkan üzerinde yapılmıştır. Bu ogzetik panel, betonarme yapıyı birçok etkiden ve yakın patlama yükünden korumuştur. Sayısal analiz, deneysel çalışma ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Aynı malzemedan yapılmış aynı ağırlıktaki aynı büyüklükteki ogzetik panel, bal peteği yapısına göre %19.1 daha fazla enerji sönümleyerek daha iyi performans göstermiştir. Çalışmada ogzetik yapının, çarpma etkisiyle çarpma bölgesine doğru kendi kendini yoğunlaştırdığı görülmektedir. Bu özelliğinden dolayı çarpma etkisinin olduğu bölgede yapı kendisini rijitleştirmektedir. Bu sayede çarpma etkisini daha fazla azaltabilmektedir. Donatılı beton bloğa ogzetik kalkan olmadan ağırlık düşürme deneyi sonucu beton blok delinmiştir. Aynı özellikli beton blok ogzetik kalkan ile korunurken aynı deney tekrarlandığında beton blokta ihmal edilebilecek kadar küçük hasar oluşmuştur. Yazarlar çalışmalarında geometrik hücre parametrelerinin patlama etkisi karşısındaki performansta önemli etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Xiong vd. [47]; çalışmalarında girintili yapı hücre duvarını uzunluğu boyunca kesit değişimine uğratarak yeni bir girintili hücre oluşturmuşlardır. Bu hücreden oluşturdukları 3 boyutlu girintili yapının mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Analiz sonuçları uyumludur. Yapının sahip olduğu parametrik değişkenlerin değişiminin mekanik özelliklere olan etkilerini araştırmışlardır.

Zhou vd. [48]; çalışmalarında girintili yapı ile girintili olmayan yapının (non-entrant) enerji yutma özelliklerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada ani yükleme etkisi altında şekil değişimine uğrayan girintili yapı üçgen kafes yapısına dönme eğilimi göstermiştir. Girintili yapı girintili olmayan yapıya göre daha fazla enerji yutmuştur.

Beharic vd. [49]; çalışmalarında girintili yapıyı da içeren üç farklı sandviç yapının düşük şiddetli ani yükleme etkisi altındaki davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Girintili yapı diğer yapılara göre daha fazla enerji yutmuştur.

Çalışmalarında quasi-statik ve dinamik çekme testleri yapılmıştır. Çalışma girintili yapının sahip olduğu geometrik parametrelere bağlı olarak enerji yutma kapasitesini ortaya koymuştur.

Zhang vd. [50]; çalışmalarında plastik şekil değiştirmeleri göz önünde alarak doğrusal olmayan analiz yapmışlar ve girintili yapının çekme davranışını incelemişlerdir. Analitik analiz ile sayısal analiz sonuçları uyumludur. Mekanik özelliklerin geometrik parametreler ile değişimi de çalışmada ayrıca incelenmiştir.

Zhang vd. [51]; yaptıkları çalışmada paslanmaz çelik ve polimer ile girintili yapı numuneleri üretmişlerdir. Numunelerin yatay ve düşey yönde çekme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Poisson oranı ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmesi için sayısal ve deneysel analiz yapmışlardır. Analiz sonuçları uyumludur. Çalışmada hücre duvarı kalınlığı ve hücre duvarı açısı değiştirilerek sayısal analiz yapılmıştır. Buna ek olarak analitik çalışma da yapılmış ve davranış denklemleri bulunmuştur.

Wang vd. [52]; çalışmalarında yeni bir yöntem ile girintili yapının elastisite modülünü ve Poisson oranını her iki doğrultu için belirlemişlerdir. Karşılaştırmaya göre deneysel, analitik ve sayısal analiz sonuçları uyumludur. Girintili yapının sahip olduğu parametrik değişkenlerin, mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırıp sunmuşlardır.

Li vd. [53]; makalelerinde negatif Poisson oranına sahip malzemelerin avantajlarını göstermişlerdir. 3 boyutlu yazıcılar ile üretilen numuneler basınç deneyine tabi tutulmuştur. Sayısal analiz ve deneysel çalışma sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Bal peteği yapısı, chiral yapı, çapraz çubuk yapısı ve girintili yapı olmak üzere dört farklı yapı birbiriyle kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar sonucunda, girintili yapının daha çok enerji yuttuğu ve aynı gerilme altında daha az deforme olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Jiang vd. [54]; çalışmalarında 3 boyutlu girintili yapı ile chiral yapının basınç kuvveti etkisi altındaki ogzetik davranışını deneysel, sayısal ve analitik olarak araştırmışlardır. Çalışmada ogzetik yapıların sabit basınç gerilmesi altında ogzetik davranışı kaybedebileceği vurgulanmıştır. Çalışmalarında iki farklı yapının ogzetik davranışını

kaybettiği limit gerilme bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan yorulma çalışması sonucunda düşük gerilme altında girintili yapının chiral yapıya göre ogzetik özelliğini daha fazla koruduğu, yüksek gerilme değerleri altında ise chiral yapının girintili yapıya göre ogzetik özelliği daha fazla koruduğu bulunmuştur. Ayrıca Poisson oranının, gerilmeye bağlı değişimi ve hücrenin geometrik parametreleri ile ilişkisi bulunmuştur.

Li vd. [14]; çalışmalarında girintili yapıya sinüsoidal çubuklar (sinusoidal-shaped rib) ekleyerek ve dişey çubuklar (vertical ribs) ekleyerek yapının rijitliğini artırmaya çalışmışlardır. Böylece yeni iki farklı girintili yapı oluşturulmuştur. Yapıların Poisson oranı ve enerji yutma kapasitelerinin tespiti için sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Enerji yutma kapasitesi bakımından gelişim olduğu görölmüştür.

Chen vd. [55]; yaptıkları çalışmada yeni 3 boyutlu bal peteği yapısı geliştirmişlerdir. Sayısal ve analitik analizi yapılan bu yapı düzlem içinde negatif Poisson oranı özelliği göstermekte iken düzlem dışında sıfır Poisson oranına sahiptir. Bu özelliğin önemli bazı alanlarda kullanılabileceği ön görölmüştür.

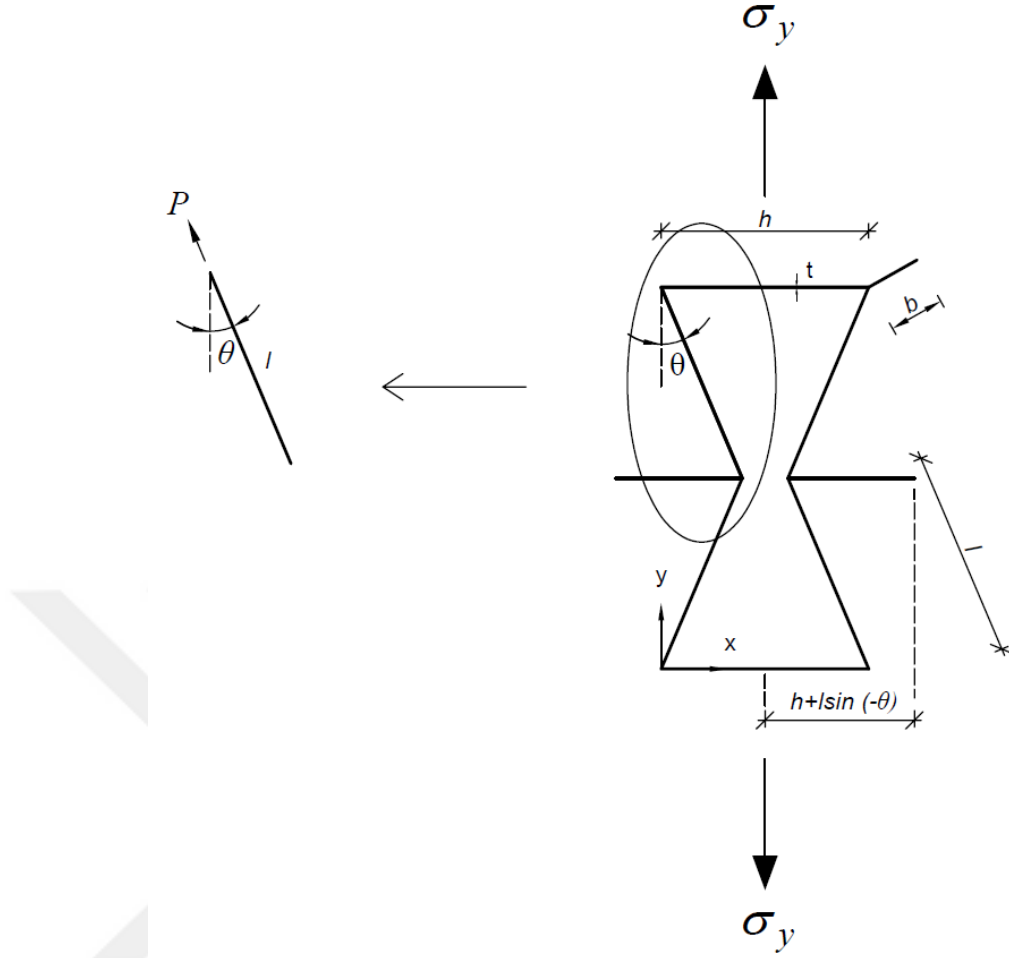
Lee vd. [56]; makalelerinde, girintili yapıdan ve bal peteği yapısından oluşan iki farklı tüp sistemin, eksenel yöndeki ani yüklemeye tepkisini ve enerji yutma kapasitesini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deney ve sayısal analiz sonuçları birbiriyle uyumludur. Eksenel ani yükleme etkisi altında girintili yapıya sahip tüp sistem bal peteği yapısına sahip tüp sisteme göre daha fazla enerji sönümleyerek daha avantajlı sonuçlar vermiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada ilk olarak girintili bal peteği yapısının literatürdeki deneysel ve analitik verilerinin araştırması yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) yazılımı [57] kullanılarak yapısal modelin hassasiyeti ve doğrulaması literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılarak yapılmıştır. Girintili yapının SEY ile elde edilen mekanik özellikleri formülasyonu Masters ve Evans [9] tarafından verilen çekirdek hücre çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarının analitik sonuçları en çok yakınsadığı modelin bulunması amacıyla Zied vd. [16] makalelerinde bahsettiği boy/en oranı değeri ayrıca araştırılmıştır. Boy/en oranı değerinin optimizasyonu yapıldıktan sonra nihai en uygun hücre sayısına ve hücre dizilimine sahip yapı modeli çok hücreli olarak, tekrar eden hücre düzeni ile modeller oluşturulmuştur. Bu modele ait analiz sonuçları Master ve Evans [9] tarafından verilen analitik değerler ve Zied vd. [16] tarafından verilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu çalışmada geliştirilen yeni girintili hücre çekirdeğine sahip yapı modellerinin analizi yapılmıştır. Bu analiz sonuçları, mekanik özellikler bakımından yeni hücre yapısına sahip yapıların kendileri arasında ve konvansiyonel girintili yapı sonuçları ile kıyaslanmıştır.

3.1 Analitik Analiz

Konvansiyonel girintili yapı birim çekirdek hücresi, parametrik değişenleri ve yükleme altında hücre duvarında oluşan iç kuvvet Şekil 3.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1. Konvansiyonel girintili birim hücre ve hücre duvarındaki iç kuvvet

Bal peteği hücre yapısının ve konvansiyonel girintili hücre yapısının Masters ve Evans [9] tarafından verilen Poisson oranları ve elastisite modülü hesabında kullanılan denklemler denklem (3.1)'den denklem (3.4)'e kadar aşağıda verilmiştir. Bu denklemler kullanılarak konvansiyonel girintili yapının mekanik özellikleri hesaplanmıştır. Formüllerde θ eksi alınırsa girintili bal peteği yapısının, artı alınırsa normal bal peteği yapısının mekanik özellikleri elde edilir.

$$v_{xy} = [-K_{vxy} \sin \theta (h/l + \sin \theta)] \quad (3.1)$$

$$v_{yx} = \left[\frac{(K_{vxy} \sin \theta \cos \theta)}{(h/l + \sin \theta)} \right] \quad (3.2)$$

$$E_x = \left[\frac{1}{\left(\frac{b \cos \theta}{h/l + \sin \theta} \right) + \left(\frac{\cos^2 \theta}{K_f} + \frac{\cos^2 \theta}{K_h} + \frac{2h}{l + \sin^2 \theta} \right)} \right] \quad (3.3)$$

$$E_y = \left[\frac{1}{\left(b\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)\right) \left(\frac{\sin^2 \theta}{K_f \cos \theta} + \frac{\sin^2 \theta}{K_h \cos \theta} + \frac{\cos \theta}{K_s}\right)} \right] \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki K_{vxy} , K_{vyx} , K_f , K_h ve K_s sırasıyla denklem (3.5)'ten denklem (3.9)'a kadar aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$K_{vxy} = \left[\frac{-\frac{1}{K_f} - \frac{1}{K_h} + \frac{1}{K_s}}{\frac{\cos^2 \theta}{K_f} + \frac{\cos^2 \theta}{K_h} + \frac{2h}{l} + \sin^2 \theta} \right] \quad (3.5)$$

$$K_{vyx} = \left[\frac{\frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_h} - \frac{1}{K_s}}{\frac{\sin^2 \theta}{K_f \cos \theta} + \frac{\sin^2 \theta}{K_h \cos \theta} + \frac{\cos \theta}{K_s}} \right] \quad (3.6)$$

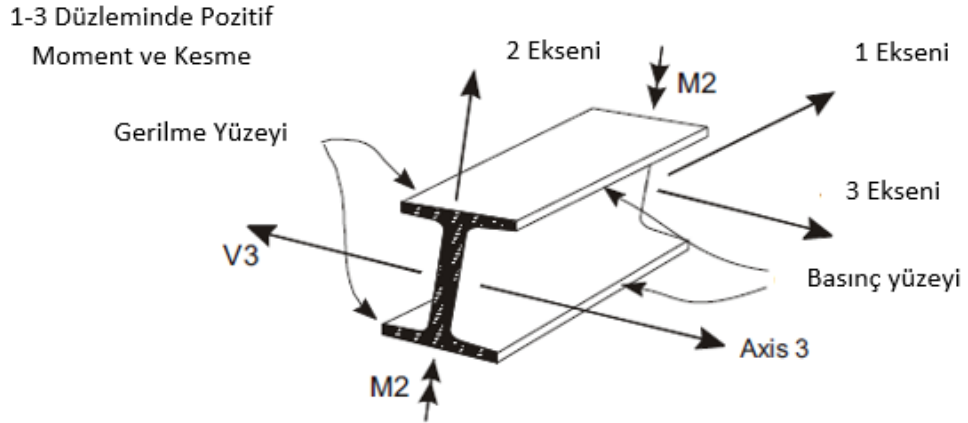
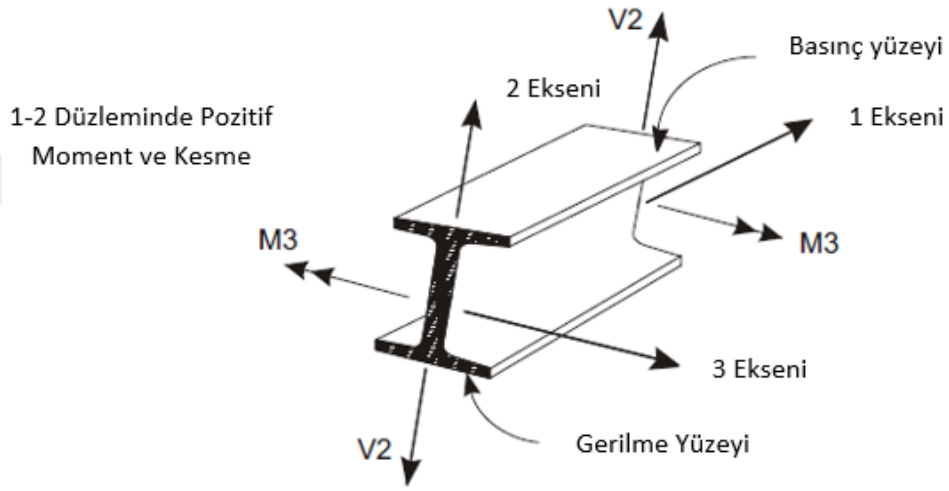
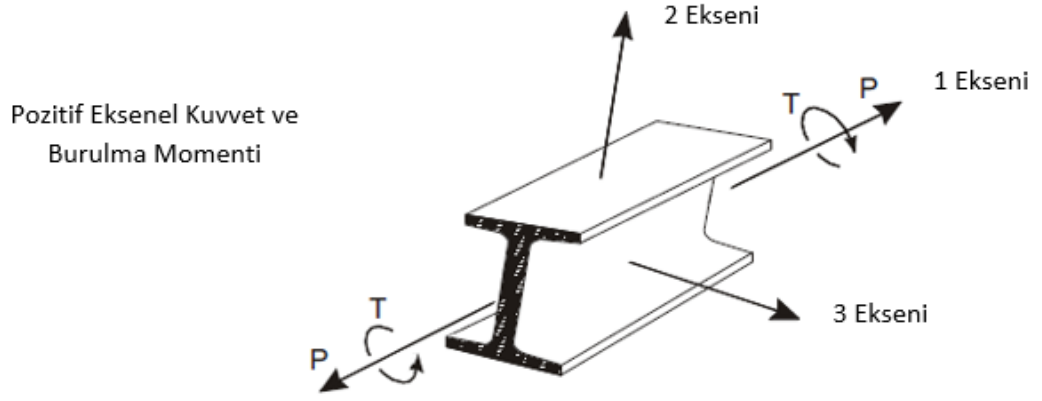
$$K_f = E_s b \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (3.7)$$

$$K_h = E_s \frac{b}{2(1+\nu_s)} \left(\frac{t}{l}\right) \quad (3.8)$$

$$K_s = E_s b \frac{t}{l} \quad (3.9)$$

3.2 Sayısal Analiz

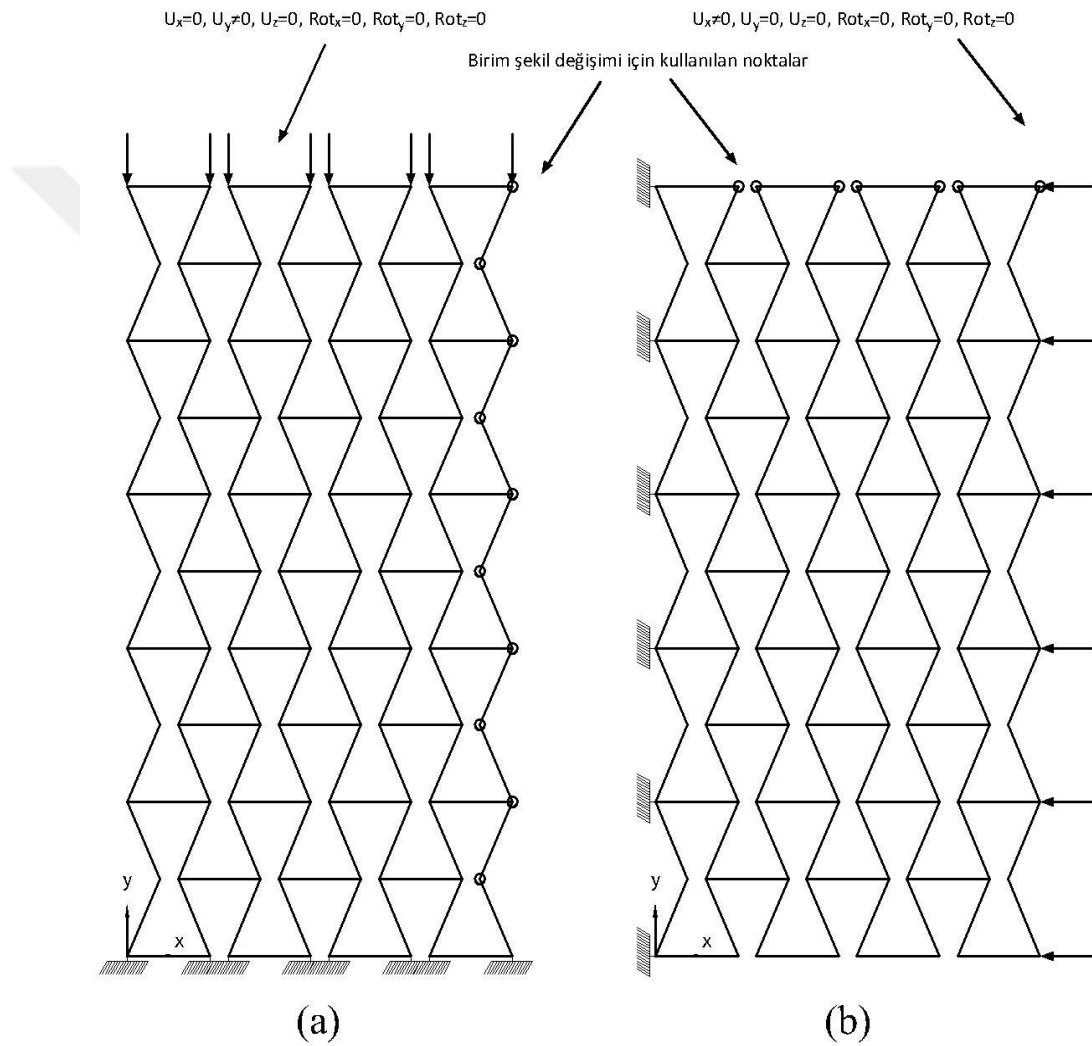
Girintili yapı modelinin analitik sonuçlara daha fazla yaklaşabilmesi için boy/en oranı optimizasyonu sonucunda SEY analizlerinde kullanılması amacıyla yatayda 4 düşeyde 5 çekirdek hücre kullanılarak boy/en oranı 2.16 olacak şekilde modelleme yapılmıştır. SEY yazılımında [57] analizi yapılan tüm yapılar iki boyutlu olarak modellenmiş ve modelleme için çubuk eleman kullanılmıştır. Çubuk eleman, bir düğümünde 6 serbestlik derecesi bulunan ve iki veya üç boyutlu modellerde çok iyi sonuç veren bir yapısal elemandır [57]. Çubuk eleman, eleman eksen takımı ve düğümlerdeki serbestliklere bağlı olarak eleman ve uç kuvvetleri Şekil 3.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.2. Üç boyutlu çubuk elemana ait uç kuvvetleri [57]

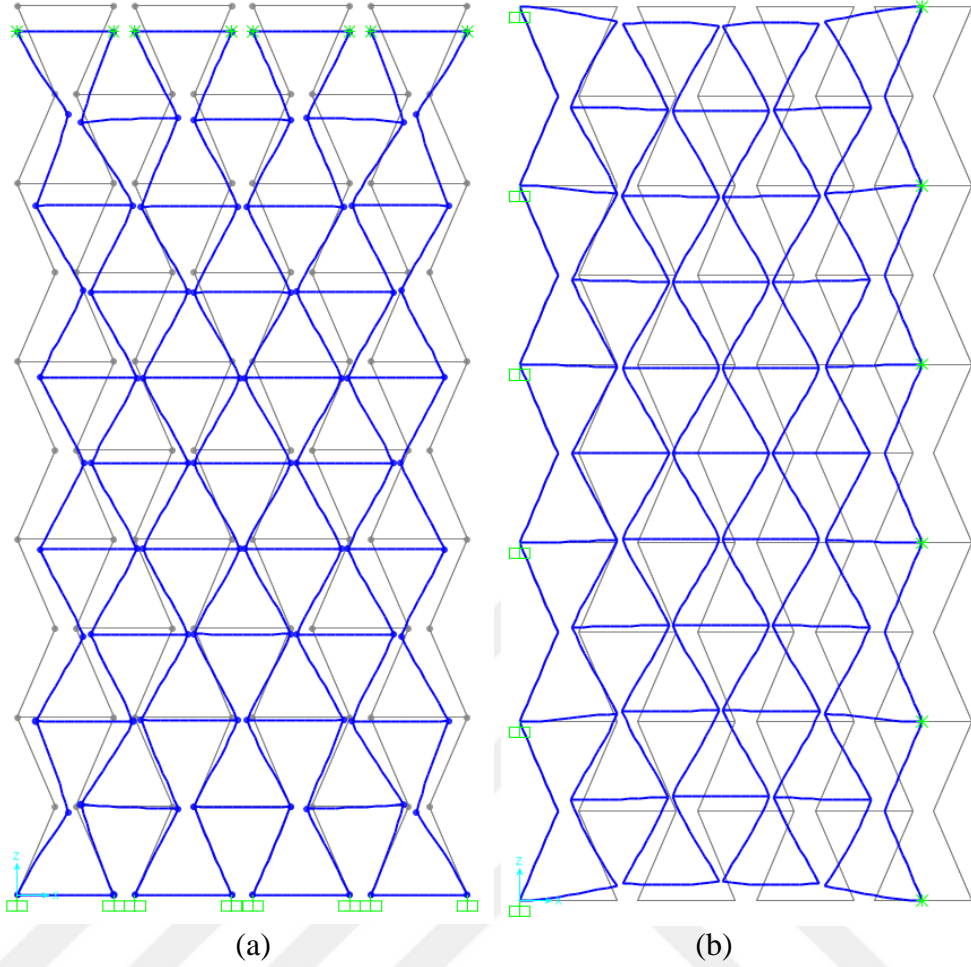
Sayısal analizi yapılan karesel simetri özelliği gösteren yapılar hariç tüm girintili yapı hücreleri duvarlarında kullanılan geometrik parametreler ve malzeme özellikleri şu şekildedir; $E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=30$ mm. Bu değerler karşılaştırma amacıyla Zied vd. [16] kullandığı malzeme özelliklerine uygun olarak

alınmıştır. Analiz sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılırken yuvarlama yapılmadan hesaplama yapılmıştır. Hesaplama sonuçları yuvarlama yapılarak verilmiştir. Sayısal analizde kullanılan tekrarlı hücre ile oluşturulan girintili yapı modeli düşey yüklemesi Şekil 3.3a'da yatay yüklemeye Şekil 3.3b'de sınır şartları ile birlikte gösterilmiştir. Çekme veya basınç testi deneysel şartlarına uygunluk için alt uçta ankastre karşı uçta ise yüklemeye doğrultusu serbest olacak şekilde sınır şartları tanımlanmıştır.



Şekil 3.3. Girintili yapı sonlu eleman modeli (a) düşey yüklemeye için yüklemeye ve sınır şartları (b) yatay yüklemeye için yüklemeye ve sınır şartları

Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b'de verilen düşey ve yatay yüklemeye sonucunda oluşan şekil değiştirmiş yapı modelleri ozgetik davranışın görülebilmesi için Şekil 3.4a'da 1000 büyütme faktörü ile ve Şekil 3.4b'de 600 büyütme faktörü ile verilmiştir.



Şekil 3.4. Yükleme sonrası şekil değiştirmiş yapı modeli (a) düşey yükleme (b) yatay yükleme

Çalışmada yatay ve düşey yüklemede toplam 80 N yük uygulanmıştır. Sayısal analiz kapsamında malzemenin doğrusal davrandığı kabulü yapılmıştır. Doğrusal davranış gereği uygulanan yük yapının Poisson oranı ve elastisite modülü değerini değiştirmemektedir. Yüklerin etkideği noktaların analiz sonucunda yapacağı yer değiştirme davranışının belirlenebilmesi ve uyumu için kısıtlayıcı denklemler (constraint equations) kullanılmıştır.

3.2.1 Poisson Oranının Belirlenmesi

Modelde simetrik sınır şartı durumu olduğundan düşey yönde yükleme yapılan modelin sağ ve sol taraflarındaki, noktaların yer değiştirme değerleri birbirine eşittir. Şekil 3.1a’da Poisson oranı hesabı için işaretlenmiş olan 10 adet noktanın x eksenini yer değiştirme değerleri okunmuş ve ortalaması alınmıştır. Bu ortalama değer yatay

ortalama uzunluğa bölünerek $\varepsilon_x = \Delta_x / \left(\frac{x_0}{2} + \frac{x_1}{2} \right)$ değeri elde edilmiştir. Yüklemenin yapıldığı noktanın düşey yer değiştirme değeri düşey uzunluğa bölünerek $\varepsilon_y = \Delta_y / y_0$ değeri elde edilmiştir. Daha sonra denklem (3.10) kullanılarak y eksenli Poisson oranı hesaplanmıştır. Düşey yöndeki bu Poisson oranı hesabı adımları hem girintili yapı modelleri için hem de girintili hücre çekirdeği için kullanılmıştır.

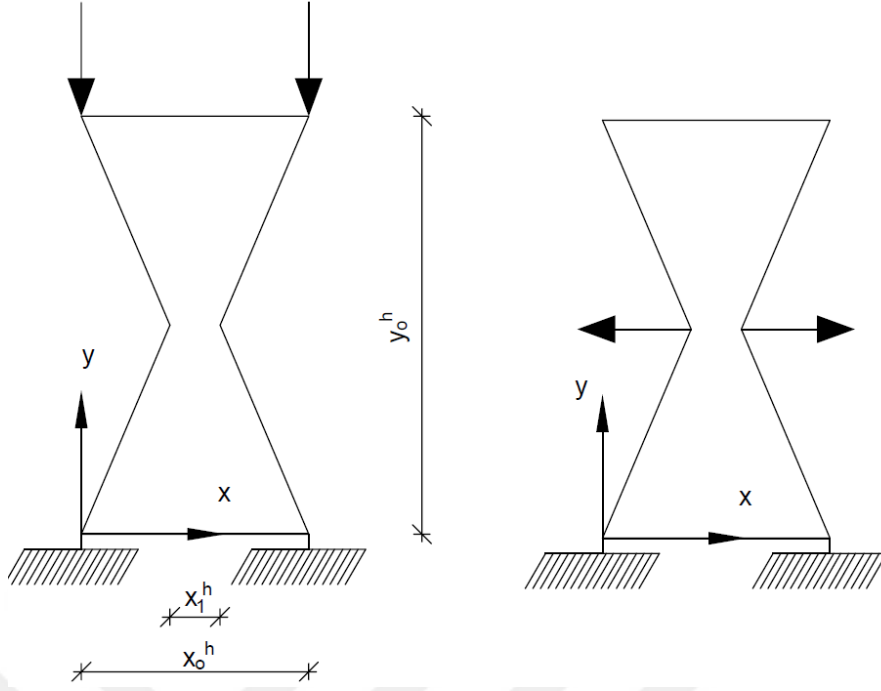
$$\nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (3.10)$$

Yatay yöndeki Poisson oranının hesabında düşey yöndeki hesap adımları benzer şekilde uygulanarak denklem (3.11) ile hesaplanmıştır.

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3.11)$$

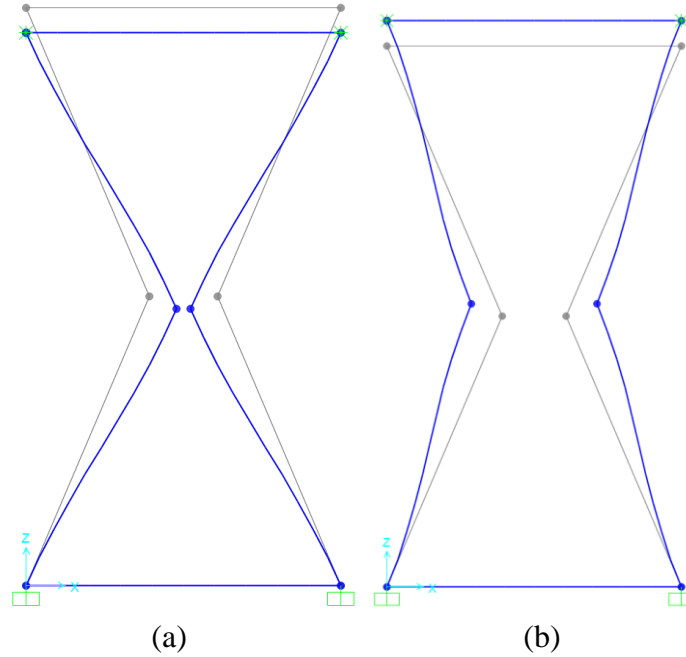
3.2.1.1 Girintili Çekirdek Hücre Poisson Oranının Belirlenmesi

Şekil 3.5a'da görülen yükleme sonucu oluşan düşey yer değiştirme y_0^h değerine bölünür ve ε_y bulunur. Hücrenin orta noktasının yaptığı yatay yer değiştirme değeri $(x_0^h/2 + x_1^h/2)$ değerine bölünerek ε_x bulunur. Düşey Poisson oranı denklem (3.10) ile hesaplanmıştır. Şekil 3.5b'de görülen yatay yükleme sonucunda ε_y ve ε_x değerleri bulunur. Yatay yöndeki Poisson oranı denklem (3.11) ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Yükleme durumları (a) düşey yükleme ve Poisson oranı hesabında kullanılan uzunluklar (b) yatay yükleme

Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b'de verilen yükleme durumunda elde edilen sayısal çözüm sonucunda oluşan şekil değiştirmiş yapı hücreleri Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b'de 300 büyütme faktörü ile gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yükleme sonucu şekil değiştirmiş hücre yapısı (a) düşey yükleme (b) yatay yükleme

3.2.2 Elastisite Modülünün Belirlenmesi

σ_y değeri Masters ve Evans [9] tarafından bulunan denklem (3.12) ile hesaplanmıştır. Konvansiyonel çoklu hücre modelinin elastisite modülü değeri bulunurken yapıyı oluşturan tek hücrenin elastisite modülü değeri verilmiştir. E_y değeri gerilme birim şekil değiştirme grafiğinin doğrusal kısmının eğiminden denklem (3.13) ile bulunmuştur. Yatay yön için de aynı şekilde hesap yapılarak E_x değeri bulunabilmektedir. E_x , Masters ve Evans [9] tarafından verilen denklem (3.14) ile hesaplanmıştır. Gerilme değerini elde edebilmek için kullanılan P kuvveti ve diğer hücre parametreleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

$$P = b\sigma_y(l\sin\theta + h)\cos\theta \quad (3.12)$$

$$E_y = \sigma_y/\varepsilon_y \quad (3.13)$$

$$E_y\nu_{xy} = E_x\nu_{yx} \quad (3.14)$$

3.2.2.1 Girintili Çekirdek Hücre Elastisite Modülünün Belirlenmesi

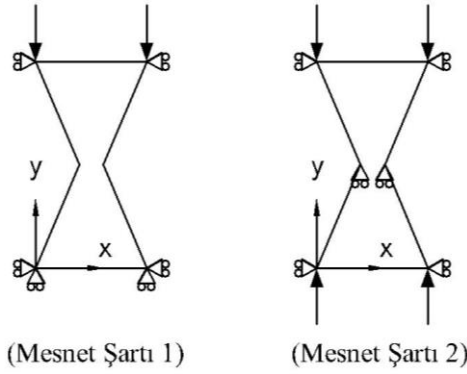
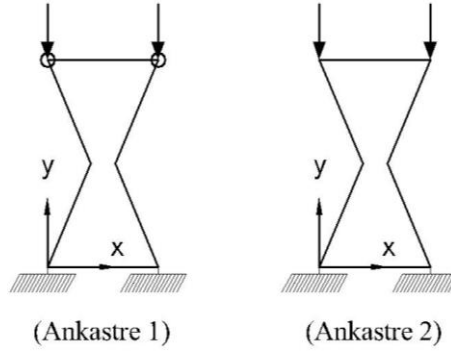
Çekirdek hücrelerin elastisite modülü hesaplanırken hücrenin sahip olduğu geometrik parametrelere uygun olarak konvansiyonel hücrenin analitik ve sayısal analizi yapılmıştır. Analitik analiz sonucunda her iki yöndeki elastisite modülleri, sayısal analiz sonucunda ise her iki yöndeki birim şekil değiştirme değerleri bulunmuştur. Yeni geliştirilen girintili hücrenin elastisite modülü bulunurken bu hücrenin tüm geometrik parametreleri konvansiyonel hücreye uygun olarak modellenmiştir. Sayısal analizde uygulanan yük, verilen sınır şartları birebir aynıdır. Yükleme sonucu konvansiyonel yapının yapmış olduğu birim şekil değiştirme, yeni geliştirilen yapının yapmış olduğu birim şekil değiştirmeye bölünerek oransal olarak elastisite modülünün ne kadar değiştiği bulunmuştur.

3.2.3 Sınır Şartlarının Model Davranışına Etkisi

Çekirdek hücreye ait sınır şartları ve hücrelerin birleşiminden oluşan yapı modelinin sahip olduğu sınır şartlarının yapının sahip olduğu negatif Poisson oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Konvansiyonel girintili çekirdek hücrenin sayısal modeli hazırlanıp Bölüm 3.2.1.1’de bahsedilen hesap adımlarına uygun olarak düşey yöndeki

Poisson oranı hesaplanmıştır. Farklı sınır şartları ile hesaplanan Poisson oranları Masters ve Evans [9] tarafından verilen analitik ifadelerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca girintili hücrelerin birleşiminden oluşan yapı modelinin de sınır şartı araştırması çekirdek hücrelerdeki sınır şartlarına uygun olarak yapılmıştır. Ankastre 1 isimli sınır şartına sahip girintili hücrede ve bu sınır şartına uygun 4×5 yapı modelinde yüklerin etkidiği noktaların analiz sonucunda yapacağı yer değiştirme değerlerini birbirine bağlayan kısıtlayıcı denklemler kullanılmıştır. Diğer sınır şartına sahip 4×5 yapı modellerinde bu kısıtlayıcı denklemler kullanılmadığı için ε_y hesabında düşey yer değiştirmelerin ortalaması alınmıştır. Farklı sınır şartlarına sahip analizi yapılan girintili yapı çekirdek hücreleri Şekil 3.7’de verilmiştir.

$$U_x=0, U_y \neq 0, U_z=0, \\ Rot_x=0, Rot_y=0, Rot_z=0$$



Şekil 3.7. Girintili yapı sınır şartları ve yüklemesi

Bu kısımda sunulan Ankastre 1 sınır şartı analitik çözüme en yakın sonuçları verdiği için tüm sayısal analizlerde kullanılmıştır. Şekil 3.7’de verilen Ankastre 1 sınır şartında alt düğüm noktaları ankastre, orta düğüm noktaları serbest ve üst düğüm noktalarında sadece düşey yönde serbest olacak şekilde modellenmiştir. Ankastre 2 sınır şartında alt düğüm noktaları ankastre, orta ve üst düğüm noktaları ise serbest

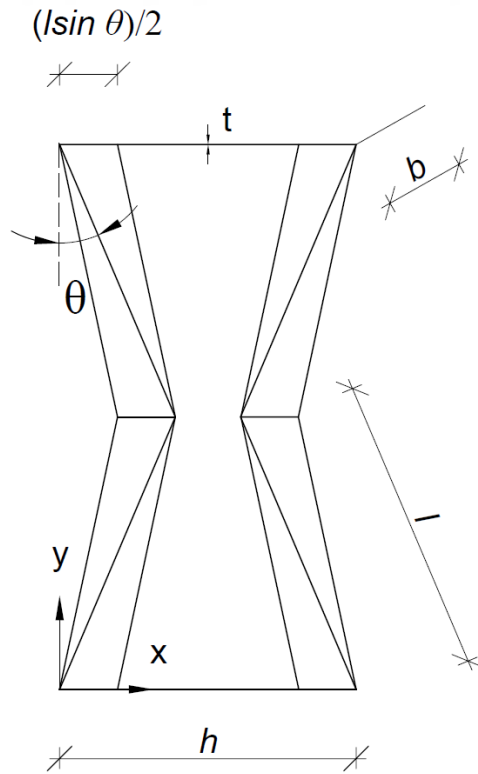
olacak şekilde modellenmiştir. Mesnet Şartı 1 sınır şartında alt düğüm noktalarında düşey ve yatay yönde kısıtlama vardır, üst düğüm noktalarında sadece yatay yönde kısıtlama vardır ve orta noktalar serbesttir. Mesnet Şartı 2 sınır şartında alt ve üst düğüm noktalarında yatay yönde, orta düğüm noktalarında düşey yönde kısıtlama vardır.

3.2.4 Birim Hücre Tasarımları

Konvansiyonel girintili yapı fazla rijit olmayan bir özellik göstermektedir. Girintili yapının mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla yeni girintili hücre modelleri oluşturulmuştur.

3.2.4.1 Yeni Birim Hücre: Tip 1

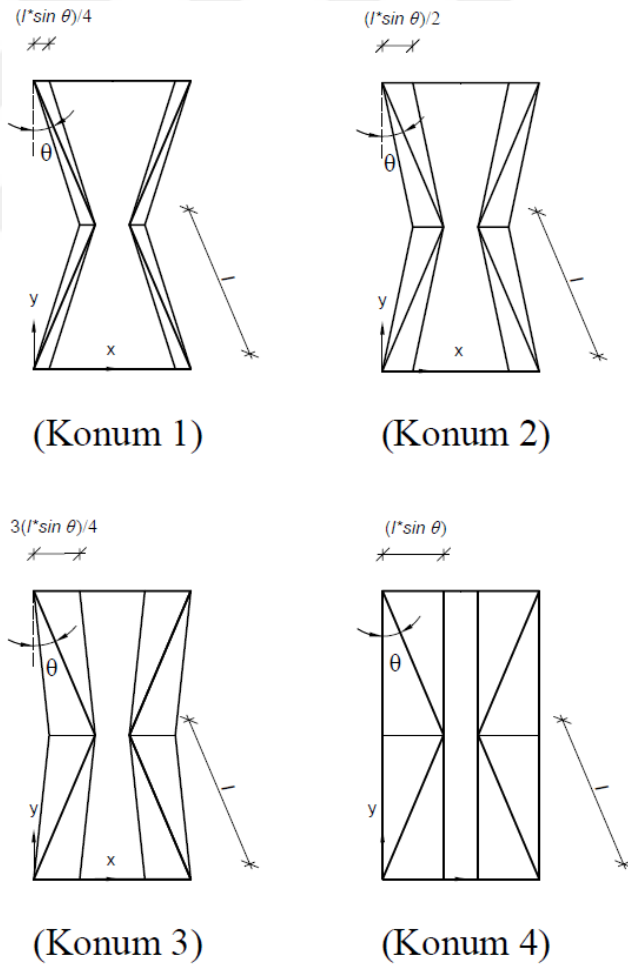
Konvansiyonel girintili yapının rijitliğini artırmak amacıyla ogzetik davranışı kaybettirmeden rijitliğin zayıf olduğu yönde yapıya hücre duvarları ile aynı özellikli yeni elemanlar ilave edilmiştir. Yükleme sonucu yeni elemanlar aynı yük altında yapının yer değiştirmelerini kısıtlamaktadır. Bu kısıtlama yapının Poisson oranının ve elastisite modülünün değişmesine yol açmıştır. Yeni tasarlanan Tip 1 girintili yapı hücresi Şekil 3.8’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.8. Tip 1 girintili birim hücre yapısı

3.2.4.1.1 Tip 1 Birim Hücre Duvarı Açısının Değişiminin Mekanik Özelliklere Etkisinin Belirlenmesi

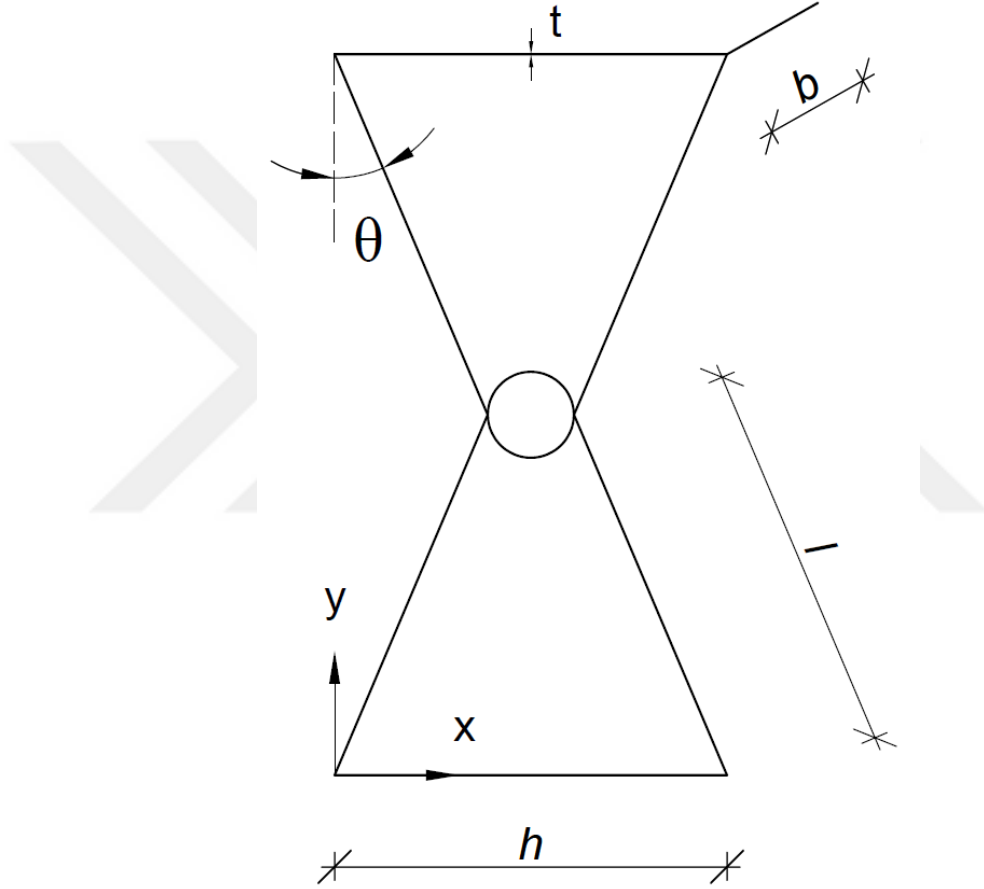
Konvansiyonel yapıya hücre duvarı eklenerek oluşturulan Tip 1 girintili yapı için eklenen hücre duvarının konumu değiştirilerek hücre duvarının mekanik özelliklere olan etkileri araştırılmıştır. Dört farklı konumda eklenen hücre duvarı ile oluşturulan Tip 1 girintili yapılar kendi aralarında ve Şekil 3.1’de verilen konvansiyonel girintili yapı hücresi referans alınarak çekirdek hücrelerinin mekanik özellikleri bakımından kıyaslanmıştır. Bu dört farklı yapı hücresinin elastisite modülleri lineer analiz sonucunda elde edilen birim şekil değişimlerinin konvansiyonel yapının analitik çözümünden elde edilen elastisite modüllerine oranı ile bulunmuştur. Yeni eklenen hücre duvarının konumları Şekil 3.9’da verilmiştir. Yeni oluşan düğüm noktalarının diğer düğüm noktalarına olan uzaklığı Konum 1 için $l\sin(\theta)/4$, Konum 2 için $l\sin(\theta)/2$, Konum 3 için $3l\sin(\theta)/4$ ve Konum 4 için $l\sin(\theta)$ ’dır.



Şekil 3.9. Tip 1 girintili yapı hücre duvarı konumları

3.2.4.2 Yeni Birim Hücre: Tip 2

Konvansiyonel girintili yapının rijitliğini artırmak amacıyla yapıya hücre duvarları ile aynı özellikli dairesel eksenli bir çubuk ilave edilmiştir. Dairesel yapı eklenmesinin sebebi karesel simetri özelliği gösteren yapıların bu özelliklerini kaybetmeden rijitliklerinin artırılabilmesidir. Yükleme sonucu yeni elemanlar aynı yük altında yapının yer değiştirmelerini kısıtlamaktadır. Bu kısıtlama yapının Poisson oranının ve elastisite modülünün değişmesine yol açmıştır. Yeni tasarlanan Tip 2 girintili yapı hücresi Şekil 3.10'da görüldüğü gibidir.

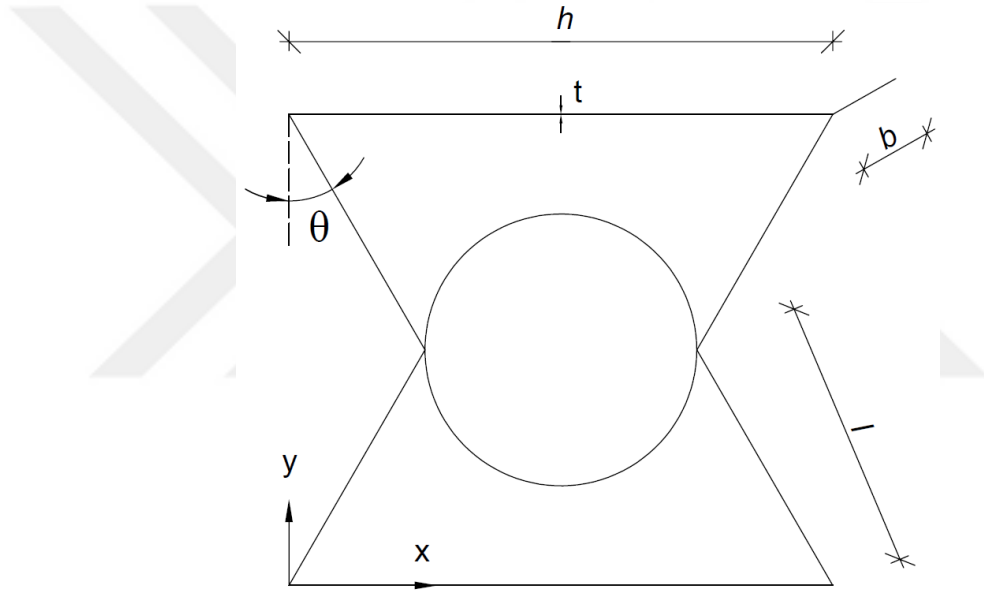


Şekil 3.10. Tip 2 girintili birim hücre yapısı

3.2.4.3 Yeni Birim Hücre Tip 2 ve Karesel Simetri Özelliği

Girintili yapının her iki eksen doğrultusundaki elastisite modüllerinin ve aynı zamanda her iki yöndeki Poisson oranlarının birbirine eşit olması durumuna karesel simetri özelliği denilmektedir [9]. Karesel simetri özelliği girintili yapının geometrik parametrelerine bağlı önemli bir özelliğidir [7]. Konvansiyonel girintili yapının karesel simetri özelliğini kaybettirmeden rijitliğini artırmak amacıyla Tip 2 girintili

hücre geometrik parametreleri karesel simetri özelliğini sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Sayısal analizi yapılan ve karesel simetri özelliği gösteren girintili yapı hücreleri için kullanılan geometrik parametreler ve malzeme özellikleri şu şekildedir; $E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=1$ mm, $\theta=-30^\circ$, $b=8$ mm, $l=30$ mm, $h=2l$. Karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili çekirdek hücresi Şekil 3.11’de verilmiştir. Karesel simetri özelliğinin geometrik parametreler ile değişimi incelenmiştir. Karesel simetri özelliği gösteren yapının boy/en oranı araştırması yapılmıştır. Konvansiyonel çekirdek hücre ve karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 hücresinin sahip olduğu mekanik özellikler sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçları Masters ve Evans [9] tarafından verilen denklemler ile elde edilen konvansiyonel yapıya ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.11. Karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili birim hücre yapısı

3.2.5 Konvansiyonel, Tip 1 ve Tip 2 Girintili Yapı Hücrelerinin Analizi

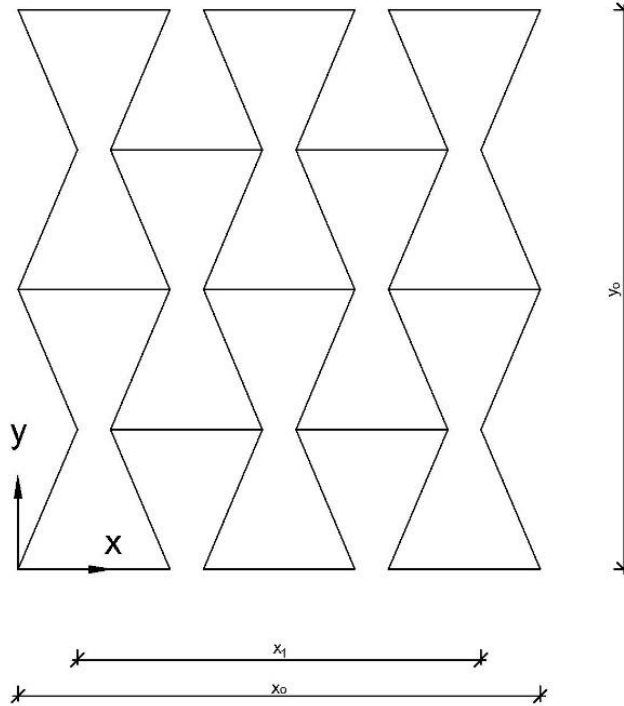
Yapı hücrelerinin elastisite modülü hesabında konvansiyonel girintili yapı için verilen denklem (3.3) ve denklem (3.4)’ten elde edilen elastisite modülleri temel alınmıştır. Konvansiyonel yapı ile yeni geliştirilen hücrelerin birim şekil değiştirmeleri oranlanarak Tip 1 ve Tip 2 yapılarının elastisite modülleri bulunmuştur.

3.2.6 Girintili Yapı Boy/En Oranı Optimizasyonu

Zied vd. [16] araştırmalarında SEY sonuçlarının analitik sonuçlara yakın olabilmesi için boy/en oranının en az 1.5 olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada daha

kesin sonuçlar elde edebilmek için düşey ve yatayda farklı sayılarda hücre kullanılarak boy/en oranı araştırılmıştır. Boy/en oranı optimizasyonu konvansiyonel girintili yapı için sayısal analiz sonuçları ile analitik sonuçların karşılaştırılması şeklinde yapılmıştır. Boy/en oranı optimizasyonu Tip 1 ve karesel simetrik Tip 2 girintili yapı modelleri için, hücrelerin birleşiminden oluşan tekrarlı hücreler içeren yapı modelinin yükleme eksenini (y eksenini) yönü sonuçlarının tek hücre sonuçları ile karşılaştırılması yoluyla yapılmıştır. Boy/en oranı değeri değiştirilirken yataydaki hücre sayısı en az iki olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Boy/en oranı yapısal modelin düşeydeki uzunluğunun yataydaki ortalama uzunluğuna bölünerek denklem (3.15)'te belirtildiği gibi bulunmuştur. Şekil 3.12'de düşey uzunluk ve yatay uzunluk değerleri girintili yapı modeli üzerinde gösterilmektedir. Farklı boy/en oranları için yatay ve düşey yönde girintili yapı modellerinin sayısal analizi yapılmıştır. Sayısal analiz sonucunda elde edilen Poisson oranları Masters ve Evans [9] tarafından verilen analitik değerler ile karşılaştırılarak hata yüzdeleri bulunmuştur. Böylelikle Poisson oranının hangi boy/en oranında analitik ve sayısal analiz değerlerinin birbirine en çok yakınsadığı bulunmuştur.

$$\text{Boy/en oran} = \frac{y_0}{\frac{x_0 + x_1}{2}} \quad (3.15)$$



Şekil 3.12. Boy/en oranı hesabında kullanılan parametreler

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Mekanik Özelliklerin Farklı Sınır Şartlarına Göre Kıyaslanması

Literatürde verilen analitik denklemler [9] ile elde edilen sonuçlar, Bölüm 3'te belirtilen farklı sınır şartlarındaki yapıların sayısal analiz sonuçları hem hücre çekirdeği için hem de 4×5 yapı modeli için Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Analitik sonuçların sınır şartları bakımından kıyaslanması

Sınır Şartları	v_{yx}				
	SEY Hücre	SEY Tam Yapı Modeli	Analitik [9]	Hata (%) $100 \frac{\text{Analitik-Hücre}}{\text{Analitik}}$	Hata (%) $100 \frac{\text{Analitik-Model}}{\text{Analitik}}$
Ankastre 1	-3.344	-3.260	-3.344	0	2.516
Ankastre 2	-3.397	-3.550		1.598	6.166
Mesnet Şartı 1	-3.448	-3.149		3.098	5.841
Mesnet Şartı 2	-3.447	-2.796		3.074	16.400

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=30$ mm)

Ankastre 1 sınır şartı hem çekirdek hücrenin Poisson oranı ile hem de 4×5 SEY modelinde analitik sonuçlara en yaklaşık durumdur. Dönme serbestliklerinin (açısal yer değiştirmeler) tutulu olup olmaması sonuçları önemli derecede etkilemektedir. Diğer sınır şartlarında Poisson oranında sonuçların uzaklaşmasının sebebi dönme serbestliklerinin tutulu olmasıdır.

4.2 Boy/En Oranı Optimizasyon Bulguları

Bölüm 3'te anlatıldığı üzere boy/en oranı optimizasyonu konvansiyonel, Tip 1 ve karesel simetrik Tip 2 girintili yapıları için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Konvansiyonel Girintili Yapı Boy/En Oranı Optimizasyonu

Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi boy/en oranının Zied vd. [16] tarafından belirtildiği üzere en az 1.5 olması SEY ve analitik sonuçları birbirine yakınlaştırmada yeterli olmamaktadır. Çünkü boy/en oranı arttıkça bir yönde analiz sonuçları birbirine yaklaşırken diğer yönde sonuçlar birbirinden uzaklaşmaktadır. Zied vd. [16] tarafından belirtildiğinin aksine bu çalışmaya göre sonuçların her iki yönde de birbirine daha iyi yakınsaması için boy/en oranının 2.16 ile 3 arasında olması

gereklidir. Girintili yapı modelinin analitik sonuçlara daha fazla yakınsayabilmesi için bu kısımdaki bulgulara dayanarak SEY analizlerinde yatayda 4 düşeyde 5 çekirdek hücre kullanılarak boy/en oranı 2.16 olacak şekilde modelleme yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Konvansiyonel girintili yapı boy/en oranı bulguları

		ν_{xy}			ν_{yx}		$100 \frac{SEY - Analitik}{Analitik}$
Boy/En Oranı	SEY Konvansiyonel	Analitik [9]	SEY Konvansiyonel	Analitik [9]	ν_{xy} Hata(%)	ν_{yx} Hata(%)	
0.795	-0.271	-0.271	-1.949	-3.344	0.024	41.716	
1.678	-0.270		-2.775		0.718	17.014	
2.158	-0.268		-3.260		1.157	2.506	
3.021	-0.266		-3.284		2.108	1.782	
4.027	-0.263		-3.296		3.108	1.414	
5.035	-0.258		-3.308		5.067	1.071	
10.072	-0.224		-3.328		17.631	0.482	
15.107	-0.187		-3.333		31.004	0.314	
19.783	-0.156		-3.336		42.621	0.218	

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=30$ mm.)

SEY kullanılarak Şekil 3.1’de görülen konvansiyonel girintili çekirdek yapı hücresinin asal eksendeki Poisson oranının (ν_{yx}) değerleri ayrıca hesaplanmış ve Masters ve Evans [9] tarafından verilen denklemlerden hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra farklı hücre duvarı uzunlukları kullanılarak, değişen t/l oranı için Poisson oranı değişimi incelenmiş ve sonuçlar çizelge 4.3’te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Konvansiyonel girintili hücre analitik ve sonlu elemanlar modeli sonuçları

l (mm)	ν_{yx}		
	SEY	Analitik [9]	Hata (%) $100 \frac{SEY - Analitik}{Analitik}$
25	-3.261	-3.259	0.063
30	-3.344	-3.344	0
40	-3.434	-3.434	0
50	-3.477	-3.478	0.020
60	-3.502	-3.502	0

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h$.)

Çizelge 4.3'teki sonuçlar incelendiğinde tek hücre yapısına ait sonlu eleman modeli sonuçlarının analitik sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sonuçların bir birine bu kadar yakın çıkması kullanılan sayısal analiz yönteminin doğruluğunu göstermektedir. Ayrıca yapının çekirdek hücresinin mekanik özelliklerinin hücrelerden oluşan yapı modelinin mekanik özellikleri ile kıyaslanması için kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. Çizelge 4.3'te görülen sonuçların analitik sonuçlara yakınsaması için daha önce bahsedilen boy/en oranı büyük önem kazanmaktadır. Kullanılan oran Çizelge 4.2'de verilen boy/en oranı 2.16 iken Çizelge 4.8'de görülen en iyi sonuçlar elde edilmektedir.

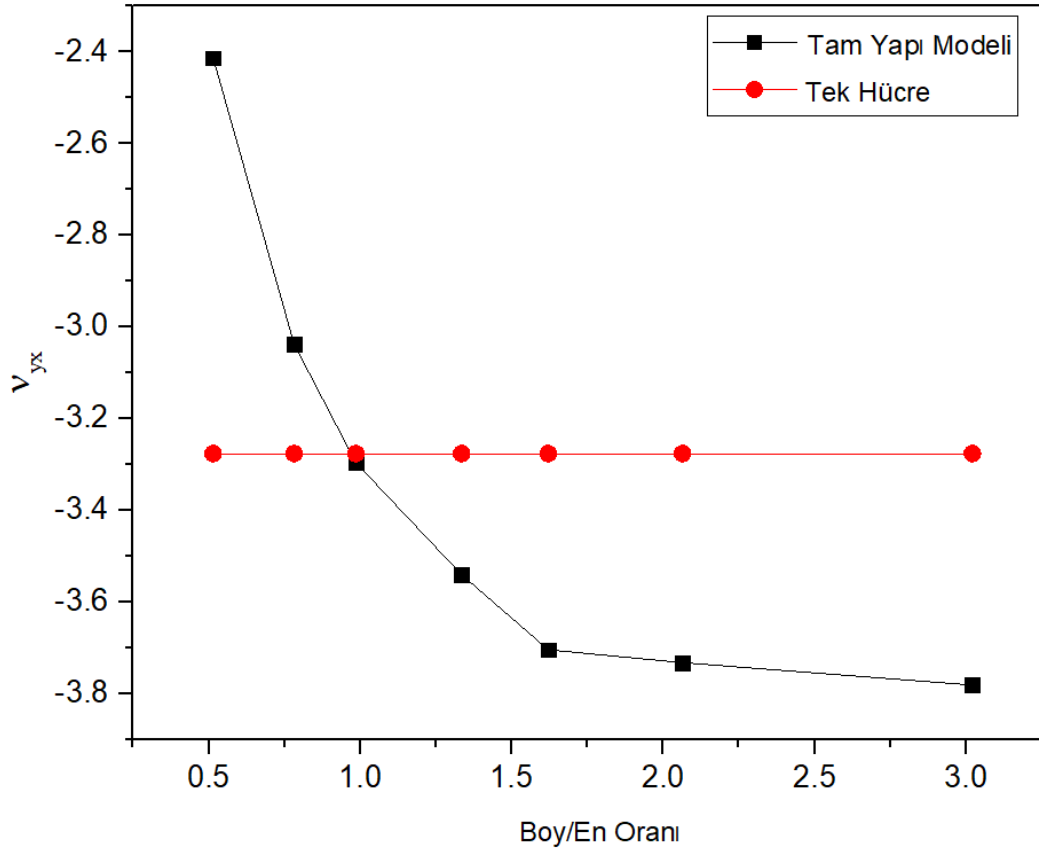
4.2.2 Tip 1 Girintili Yapı Boy/en Oranı Optimizasyonu

Tip 1 girintili yapının boy/en oranı optimizasyonu, Tip 1 girintili yapının tek bir hücresinin Poisson oranı temel alınarak yapılmıştır. Yani farklı boy/en oranına sahip Tip 1 girintili yapı modellerinin Poisson oranları Şekil 3.8'de görülen tek hücrenin sahip olduğu Poisson oranı ile kıyaslanmıştır. Bu Poisson oranı kıyaslaması sadece düşey ekseninde yapılmıştır. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.1'de görüldüğü gibi Tip 1 girintili yapı modeli boy/en oranının yaklaşık 1 olması durumunda en düşük hata oranını yakalamıştır.

Çizelge 4.4. Tip 1 girintili yapı boy/en oranı bulguları

SEY Tip 1	ν_{yx}		ν_{yx} Hata (%)
Boy/En oranı	Tam Yapı Modeli	Tek Hücre	$100 \frac{\text{Tek:Hücre-Tam Yapı Modeli}}{\text{Tek Hücre}}$
0.515	-2.413	-3.276	26.344
0.782	-3.038		7.256
0.986	-3.296		0.638
1.335	-3.540		8.086
1.621	-3.704		13.080
2.064	-3.732		13.936
3.021	-3.781		15.427

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=30$ mm)



Şekil 4.1. Tip 1 girintili yapı boy/en oranı bulguları

4.2.3 Karesel Simetrik Tip 2 Girintili Yapı Boy/En Oranı Optimizasyonu

Karesel simetrik Tip 2 girintili yapının boy/en oranı optimizasyonu karesel simetrik Tip 2 girintili yapının tek bir hücrelerinin Poisson oranı temel alınarak yapılmıştır. Farklı boy/en oranına sahip karesel simetrik Tip 2 girintili yapı modellerinin Poisson oranları Şekil 3.11’de görünen tek hücrenin sahip olduğu Poisson oranı ile karşılaştırılmıştır. Bu Poisson oranı kıyaslaması sadece düşey ekseninde yapılmıştır. Çizelge 4.5’te görüldüğü üzere hata yüzdesi boy/en oranı değeri arttıkça azalmaktadır. Bir süre sonra ν_{yx} sabit bir değere yakınsamaktadır.

Çizelge 4.5. Karesel simetrik Tip 2 girintili hücre boy/en oranı bulguları

Karesel Simetrik Tip 2	ν_{yx}		ν_{yx} Hata (%) $100 \frac{\text{Tek:Hücre-Tam Yapı Modeli}}{\text{Tek Hücre}}$
	Boy/En oranı	Tam Yapı Modeli	
		Tek Hücre	
0.642	-0.921	-0.998	7.707
1.050	-0.930		6.785
1.650	-0.935		6.330
3.849	-0.942		5.571
7.698	-0.944		5.433
15.396	-0.944		5.367
19.245	-0.945		5.354

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=1$ mm, $\theta=-30^\circ$, $b=8$ mm, $2l=h=60$ mm)

4.3 Konvansiyonel, Tip 1 ve Tip 2 Girintili Yapı Hücrelerinin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Bölüm 3’te yer alan Şekil 3.1, Şekil 3.8 ve Şekil 3.10’da görülen girintili yapı hücrelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de sayısal analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.6. Girintili yapı hücreleri Poisson oranları

ν_{yx}			ν_{xy}		
Konvansiyonel Hücre Analitik [9]	Tip 1 Hücre	Tip 2 Hücre	Konvansiyonel Hücre Analitik [9]	Tip 1 Hücre	Tip 2 Hücre
-3.344	-3.276	-0.278	-0.271	-0.238	-0.273

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=30$ mm)

Çizelge 4.7. Girintili yapı hücreleri elastisite modülü değerleri

E_y (GPa)			E_x (GPa)		
Konvansiyonel Hücre Analitik [9]	Tip 1 Hücre	Tip 2 Hücre	Konvansiyonel Hücre Analitik [9]	Tip 1 Hücre	Tip 2 Hücre
1.922	20.743	24.973	0.156	1.118	23.896

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=30$ mm)

Tip 1 girintili yapı hücresi Poisson oranı konvansiyonel yapıya göre düşey yönde mutlak değerce %2.03 azalmasına rağmen elastisite modülü 10.79 (%979) kat artış göstermiştir. Aynı şekilde yatay yönde Poisson oranı mutlak değerce %12.18 azalmasına rağmen elastisite modülü 7.17 (%617) kat artış göstermiştir.

Tip 2 girintili yapı hücresi Poisson oranı konvansiyonel yapıya göre düşey yönde mutlak değerce 12.03 kat azalmasına rağmen elastisite modülü 12.99 kat artış göstermiştir. Yatay yönde Poisson oranı mutlak değerce %0.74 artmasıyla birlikte elastisite modülü 153.18 kat artış göstermiştir.

Tip 1 ve Tip 2 girintili yapı hücreleri kendi aralarında kıyaslandığında düşey yönde Tip 1 yapı hücresinin Poisson oranı mutlak değerce 11.78 kat daha yüksektir, elastisite modülü ise %16.94 daha düşüktür. Yatay yönde ise Tip 2 girintili hücrenin Poisson oranı mutlak değerce %14.71 fazla olmasıyla birlikte elastisite modülü de 21.38 kat daha yüksektir.

4.4 Konvansiyonel Girintili Yapı Modeli Analitik ve Sayısal Analiz Sonuçları

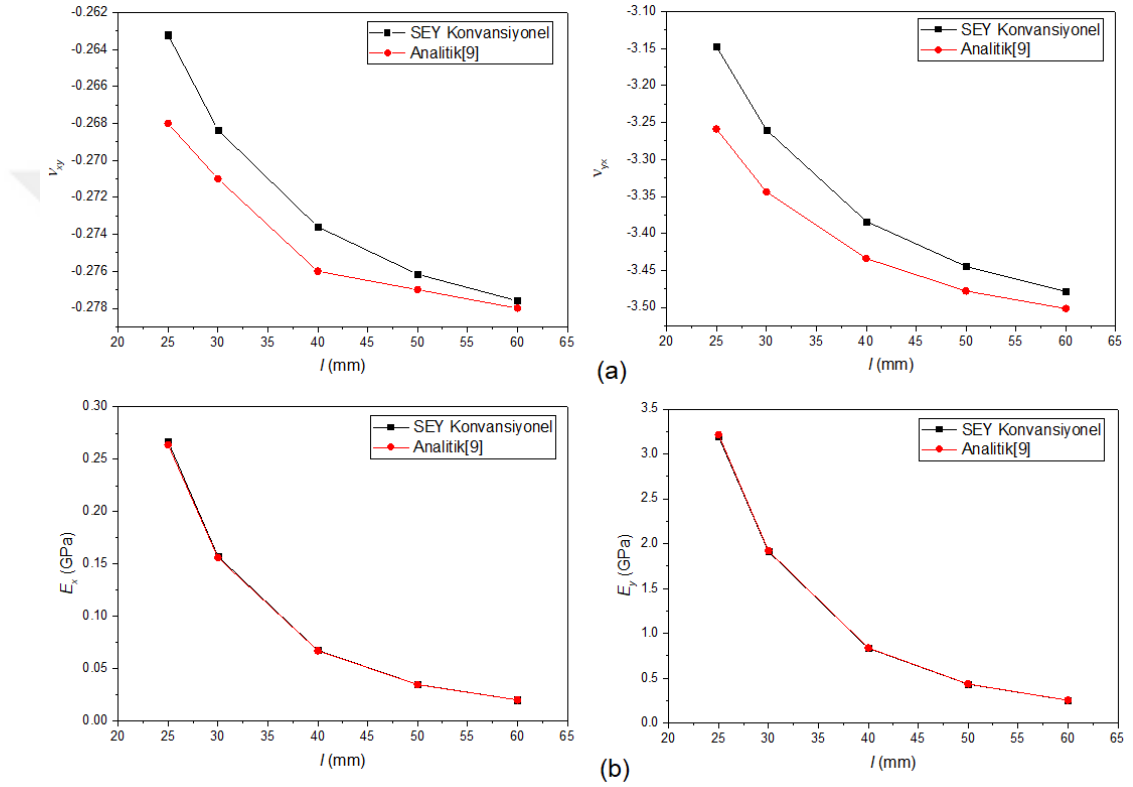
Şekil 3.1 ve Şekil 3.3'te görülen konvansiyonel girintili yapının analitik sonuçları ve SEY ile bulunan Poisson oranları, Elastisite modülü değerleri ve hata oranları Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Konvansiyonel re-entrant yapının mekanik özellikleri

l(mm)	ν_{xy}		E_x (GPa)		E_y (GPa)		$100 \frac{SEY-Analitik}{Analitik}$		$100 \frac{SEY-Analitik}{Analitik}$			
	SEY Konvan-siyonel	Analitik[9]	SEY Konvan-siyonel	Analitik[9]	SEY Konvan-siyonel	Analitik[9]	ν_{xy} Hata(%)	ν_{yx} Hata(%)	E_x Hata(%)	E_y Hata(%)		
25	-0.263	-0.268	-3.148	-3.259	0.267	0.264	3.192	3.214	1.787	3.417	1.142	0.677
30	-0.268	-0.271	-3.260	-3.344	0.157	0.156	1.911	1.922	0.975	2.516	0.846	0.557
40	-0.274	-0.276	-3.384	-3.434	0.068	0.067	0.835	0.838	0.871	1.459	0.391	0.342
50	-0.276	-0.277	-3.445	-3.478	0.035	0.035	0.435	0.436	0.302	0.957	0.284	0.190
60	-0.278	-0.278	-3.479	-3.502	0.020	0.020	0.254	0.255	0.146	0.660	0.213	0.292

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h$)

Sayısal sonuçlar ile analitik sonuçlar karşılaştırıldığında bulunan Poisson oranları arasındaki hata oranı en fazla %3.42 olmuştur. Elastisite modülü değerleri kıyaslandığında hata oranı en fazla %1.14 olmuştur. Bu hata değerleri göz önünde bulundurularak sonlu eleman yönteminin yeterli yaklaşıklıkta sonuç verdiği ve oluşturulan modelin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılabilir. Konvansiyonel girintili yapının bu çalışmada kullanılan model ile Masters ve Evans [9] tarafından bulunan analitik çözümün karşılaştırılması Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Konvansiyonel girintili yapının mekanik özellikleri (a) Poisson oranı değerleri (b) elastisite modülü değerleri

Bu çalışmada elde edilen analitik ve sayısal analiz sonuçları deney sonuçları ile de ayrıca karşılaştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada kullanılan yapı geometrik parametreleri Zied vd. [16] tarafından sunulan araştırmaya uygun olarak modellenmiştir. Çizelge 4.9’da Zied vd. [16] tarafından verilen konvansiyonel girintili yapı için SEY ve deney sonuçlarının yanında bu çalışmada kullanılan SEY modeli sonuçları ve analitik sonuçlar verilmiştir. Analitik ve sayısal analiz için kullanılan girintili yapı geometrik parametreleri; $l=42$ mm, $t=2.86$ mm ve $\theta=-23^\circ$ dir.

Çizelge 4.9. SEY, analitik ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Konvansiyonel Girintili Yapı	ν_{xy}	ν_{yx}	E_x (GPa)	E_y (GPa)
SEY (Bu çalışma)	-0.275	-3.414	0.051	0.631
SEY [16]	-0.390	-3.230	0.042	0.619
DeneySEL [16]	-0.320	-3.590	0.045	0.624
Analitik [9]	-0.276	-3.455	0.051	0.632

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=2.86$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h=42$ mm)

Çizelge 4.9'dan görüldüğü gibi bu çalışmada elde edilen SEY sonuçları Masters ve Evans [9] tarafından verilen analitik yöntem sonuçları ile daha uyumludur. Bunun yanında bu çalışmada elde edilen SEY sonuçlarına ait Poisson oranları Zied vd. [16] tarafından verilen deneysel sonuçlar ile de daha iyi uyum sergilemektedir. Zied vd. [16] sayısal analiz sonuçlarının analitik ve deneysel sonuçlardan uzak kalmasında boy/en oranının, SEY modelinin sınır şartlarının ve eleman tipi seçimlerinin etkili olması mümkündür.

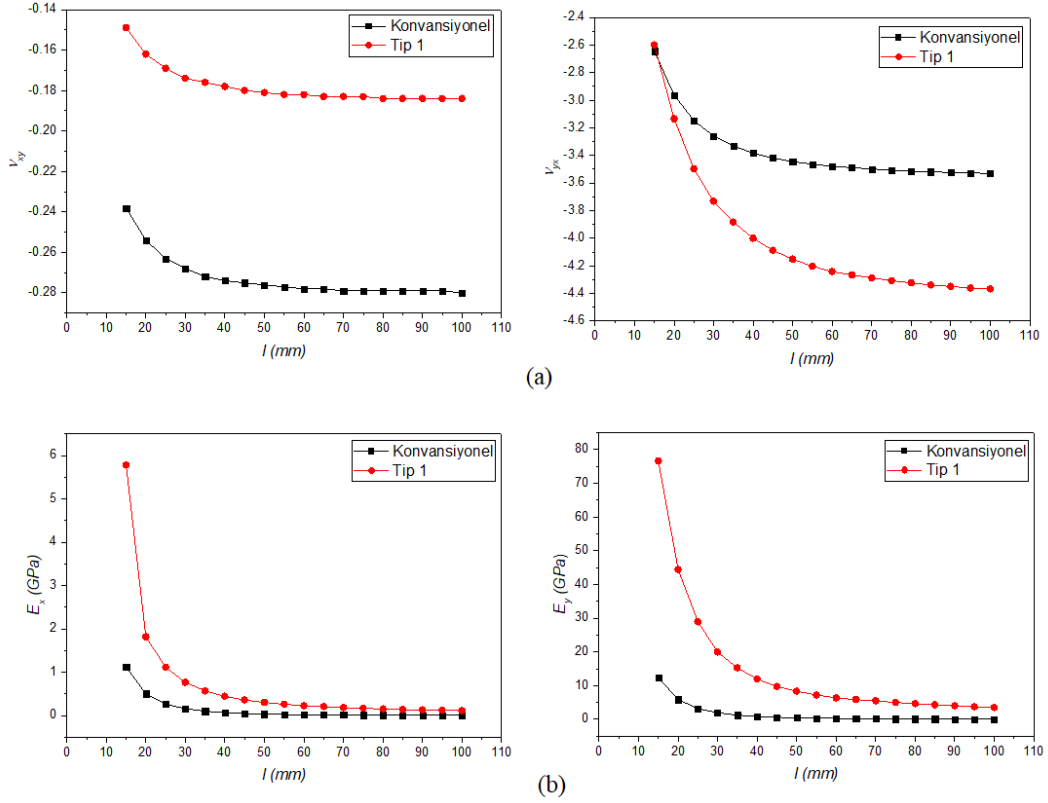
4.5 Tip 1 Girintili Yapı Modeli Sayısal Analiz Sonuçları

Çizelge 4.10'da konvansiyonel girintili ve Tip 1 girintili yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan Poisson oranı ve elastisite modülü değerleri karşılaştırılmıştır. SEY analizinde her iki yapı için de konvansiyonel yapı için en iyi sonucu veren Çizelge 4.2'den elde edilen boy/en oranı 2.16 kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 10'da, Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.10. Konvansiyonel ve Tip 1 re-entrant yapıların mekanik özellikleri

SEY	ν_{yx}		E_x (GPa)		E_y (GPa)		$100 \frac{\text{Tip 1} - \text{Konvansiyonel}}{\text{Konvansiyonel}}$		$\frac{\text{Tip 1}}{\text{Konvansiyonel}}$			
	Konvansiyonel	Tip 1	Konvansiyonel	Tip 1	Konvansiyonel	Tip 1	ν_{xy} Değişim (%)	ν_{yx} Değişim (%)	E_x Değişim Oranı	E_y Değişim Oranı		
25	-0.263	-0.169	-3.148	-3.498	0.267	1.115	3.192	28.931	-35.711	11.144	4.175	9.063
30	-0.268	-0.174	-3.260	-3.732	0.157	0.766	1.911	19.939	-35.285	14.484	4.869	10.432
40	-0.274	-0.178	-3.384	-4.001	0.068	0.443	0.835	11.961	-34.770	18.235	6.556	14.323
50	-0.276	-0.181	-3.445	-4.153	0.035	0.303	0.435	8.330	-34.524	20.562	8.677	19.143
60	-0.278	-0.182	-3.479	-4.243	0.020	0.228	0.254	6.337	-34.383	21.972	11.245	24.922

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=3$ mm, $\theta=-23^\circ$, $b=8$ mm, $l=h$)

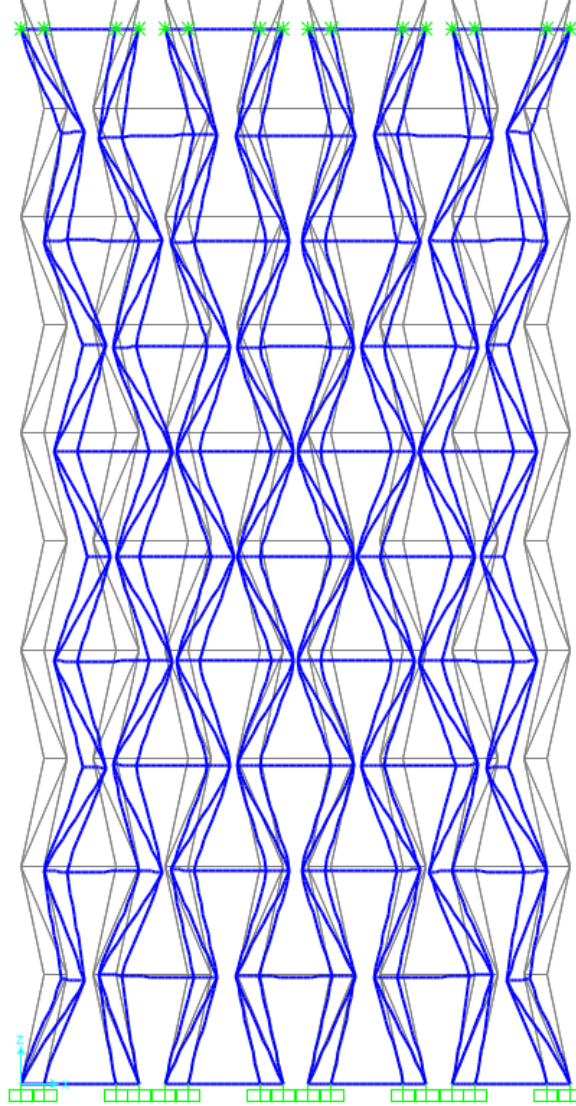


Şekil 4.3. Konvansiyonel ve Tip 1 girintili yapıların mekanik özellikleri

(a) Poisson oranı değerleri (b) elastisite modülü değerleri

Çizelge 4.10, Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b’de görüldüğü üzere Tip 1 girintili yapısı konvansiyonel yapı ile kıyaslandığında Poisson oranı x eksenini yönünde mutlak değerce azalmasına rağmen y eksenini yönünde mutlak değerce artmıştır. Elastisite modülü artışında yatay hücre duvarı uzunluğu çok etkili olmaktadır. Elastisite modülü açısından kıyaslandığında l uzunluğu 25 mm iken x eksenini yönünde yaklaşık 4 kat, y eksenini yönünde yaklaşık 9 kat artış vardır. Bu kıyaslama l uzunluğu 60 mm iken yapıldığında x eksenini yönünde yaklaşık 11 kat, y eksenini yönünde yaklaşık 25 kat artış olmuştur. Sonuç olarak bir yönde mutlak değerce Poisson oranı azalırken her iki yönde de elastisite modülü artış göstermiştir. Sonuç olarak ihtiyaca uygun olarak boşluklu dolayısıyla hafif ve yeterli rijitlikte bir yapı hücre geometrisi değiştirilerek tasarlanabilmektedir. Basit bir geometri değişikliği yapının sahip olduğu mekanik özellikler üzerinde oldukça yüksek değişimlere yol açmaktadır.

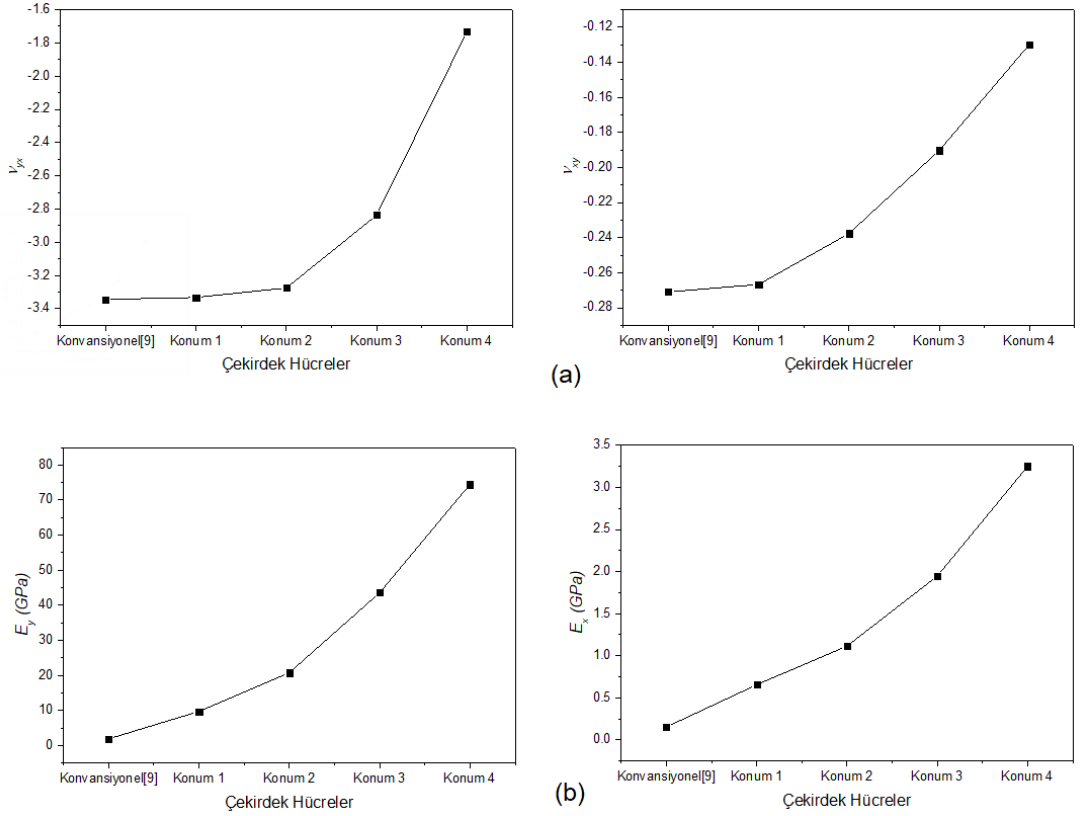
Tip 1 yapısı çoklu modelinin düşey yükleme sonucu şekil değiştirmiş hali 10000 büyütme faktörü ile Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Düşey yükleme sonucu şekil değiştirmiş Tip 1 yapı modeli

4.5.1 Tip 1 Girintili Yapı Birim Hücresinin Yeni Eklenen Hücre Duvarının Açılı Değişimine Bağlı Kıyaslama Sonuçları

Şekil 4.5’te Tip 1 girintili yapıya eklenen yeni hücre duvarının açılı değişimine bağlı konumları ve bu konumların sahip olduğu Poisson oranları ve elastisite modülü değerleri her iki eksen için de verilmiştir. İlgili konumlar Şekil 3.9’daki gibidir.

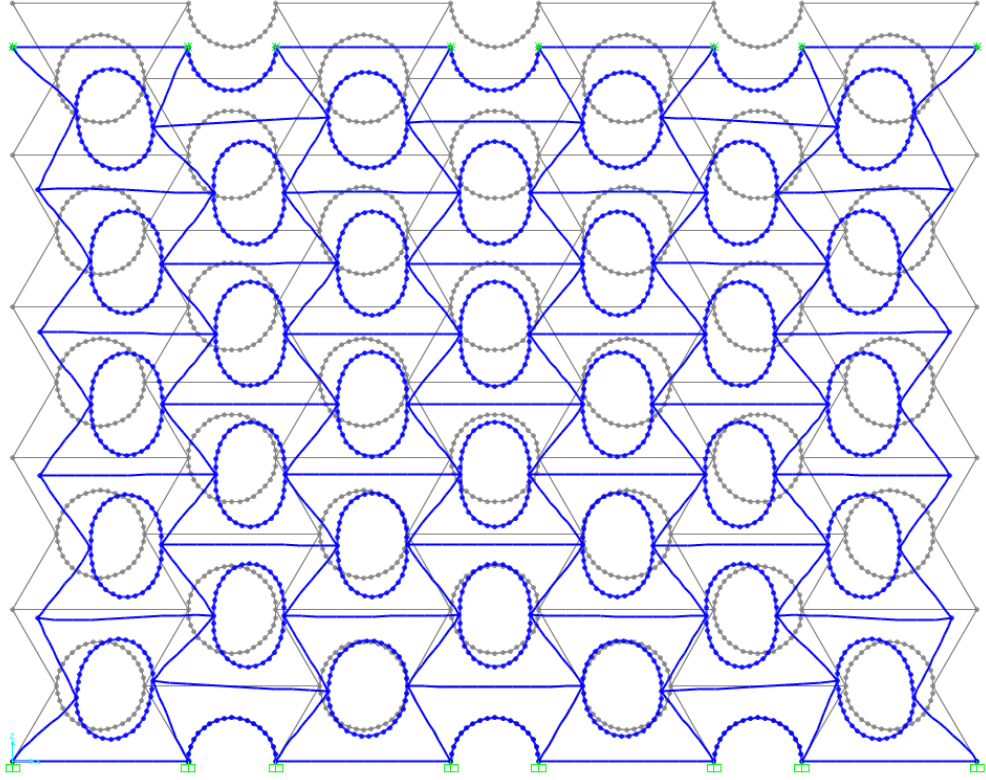


Şekil 4.5. Hücre duvarı konumlarının mekanik özelliklere etkisi (a) Poisson oranı (b) elastisite modülü

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere her iki doğrultuda da hücre duvarının konumu Konum 1'den Konum 4'e gittikçe Poisson oranı mutlak değerce azalmakta elastisite modülü ise artmaktadır. Elastisite modülü açısından en fazla artış Konum 4 hücre yapısında olmuştur. Konum 4 girintili hücre yapısı elastisite modülü konvansiyonel yapı elastisite modülüne göre düşey yönde 38.71 kat yatay yönde ise 20.85 kat artış göstermiştir. Poisson oranını açısından mutlak değerce en az düşüş Konum 1 hücre yapısında olmuştur. Konum 1 girintili hücre yapısı konvansiyonel yapıya göre Poisson oranı açısından mutlak değerce düşey yönde %0.36 azalma gösterirken yatay yönde %1.48 azalış göstermiştir.

4.6 Tip 2 Karesel Simetrik Girintili Yapı Sayısal Analiz Sonuçları

Bu bölümde Tip 2 girintili yapının geometrik hücre parametreleri değiştirilerek karesel simetri özelliği gösteren girintili yapının analiz sonuçları sunulmuştur. Karesel simetrik Tip 2 yapısı çoklu modelinin düşey yükleme sonucu şekil değiştirmiş hali 300 büyütme faktörü ile Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Düşey yükleme sonucu şekil değiştirmiş karesel simetrik Tip 2 yapı modeli

4.6.1 Karesel Simetri Özelliği Gösteren Tip 2 Girintili Yapı Hücresi

Karesel simetri özelliği gösteren konvansiyonel girintili yapı hücresinin analitik sonuçları, sayısal sonuçları ve karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili yapı hücresinin sayısal analiz sonuçları Çizelge 4.11’de verilmiştir.

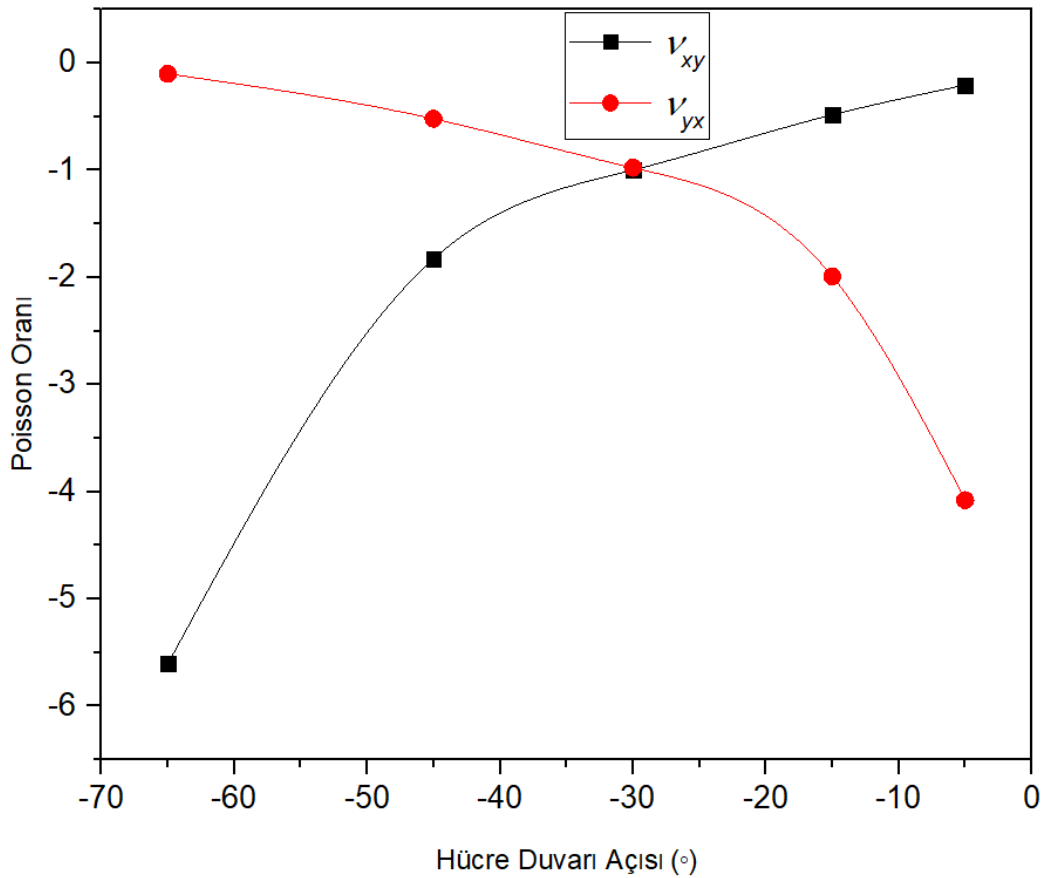
Çizelge 4.11. Karesel simetrik Tip 2 girintili yapı hücresinin konvansiyonel hücre ile kıyaslanması

Çekirdek Hücreler	ν_{xy}	ν_{yx}	E_x (MPa)	E_y (MPa)
Konvansiyonel Analitik [9]	-0.993	-0.996	17.799	17.851
Konvansiyonel SEY	-0.998	-0.996	17.868	17.842
Karesel Simetrik Tip 2	-0.998	-0.977	77.748	76.455

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=1$ mm, $\theta=-30^\circ$, $b=8$ mm, $2l=h=60$ mm.)

Çizelge 4.11’de görüldüğü gibi konvansiyonel yapı hücresinin sayısal analiz sonuçları analitik analiz sonuçları ile uyumludur. Karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili yapı hücresinin Poisson oranlarında yaklaşık olarak %2 fark bulunsa da elastisite modüllerinde konvansiyonel yapıya kıyasla her iki yönde de 4.35 kat artış olmuştur. Böylelikle karesel simetri özelliği kaybedilmeden her iki yöndeki Poisson oranı sabit kalmış yapı hücresinin rijitliği 4.35 kat artırılmıştır.

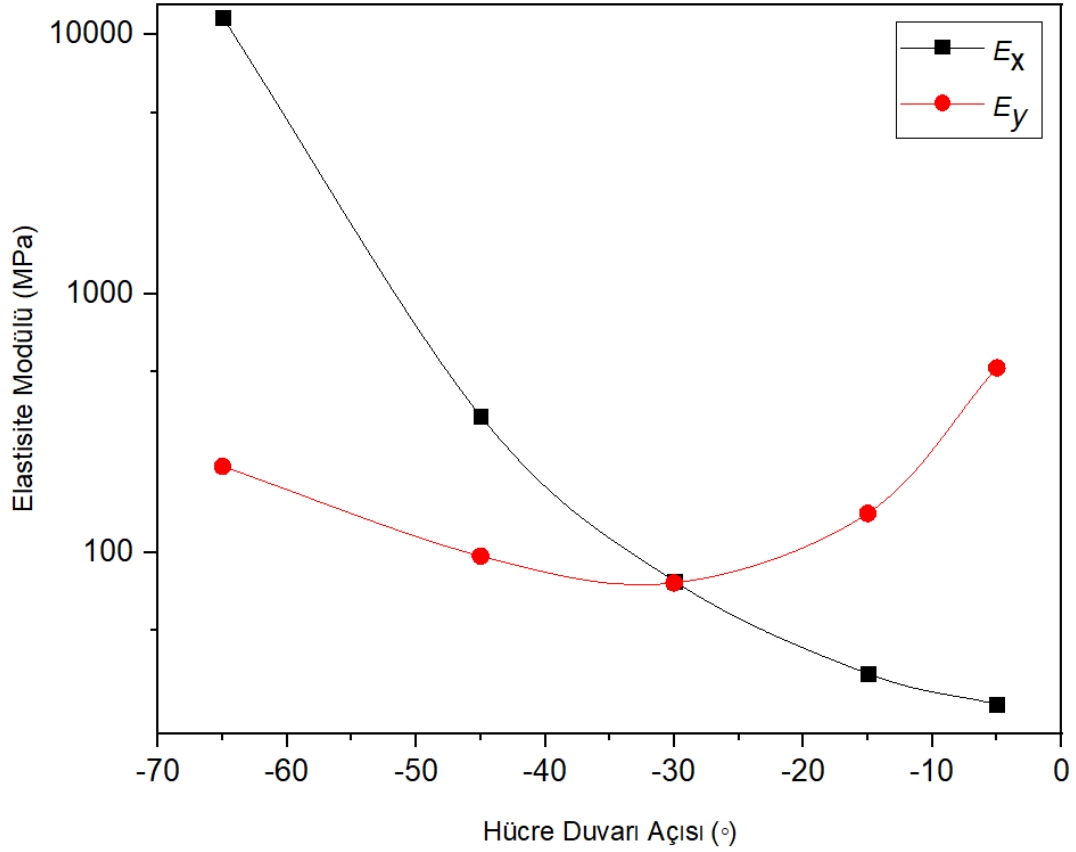
Karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili yapı çekirdek hücresi için Poisson oranının yapının sahip olduğu hücre duvarı açısı ile değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Karesel simetrik Tip 2 yapı hücresi Poisson oranının hücre duvarı açısı ile değişimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi karesel simetrik Tip 2 girintili yapı hücresinin hücre duvarı açısı 0 dereceye yaklaştıkça düşey yöndeki Poisson oranı mutlak değerce artmakta, yatay yöndeki Poisson oranı ise mutlak değerce azalmaktadır. Hücre duvarı açısı -90 dereceye yaklaştıkça düşey yöndeki Poisson oranı mutlak değerce azalmakta, yatay yöndeki Poisson oranı ise mutlak değerce artmaktadır.

Karesel simetri özelliği gösteren Tip 2 girintili yapı çekirdek hücresi için Elastisite modülü değerinin, hücre duvarı açısı ile değişimi düşey eksenli logaritmik olarak ölçeklenmiş halde Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Karesel simetrik Tip 2 yapı hücresi elastisite modülünün hücre duvarı açısı ile değişimi

Karesel simetrik Tip 2 yapı hücresinin hücre duvarı açısı -30 dereceden 0 dereceye yaklaştıkça düşey yöndeki elastisite modülü artmakta, yatay yöndeki elastisite modülü ise azalmaktadır. Hücre duvarı açısı -30 dereceden -90 dereceye doğru yaklaştıkça her iki yöndeki elastisite modülü de artmaktadır. Düşey yöndeki elastisite modülünün bu kısımda azalmayıp artması konvansiyonel girintili yapının davranışına zıt düşmektedir. Dolayısı ile bu bölgede Masters ve Evans [9] tarafından verilen Denklem 3.14’ün uygulanabilirliğinin mümkün olmayacağı düşünülebilir fakat Çizelge 4.12’de verilen karesel simetrik Tip 2 hücre yapısı sonuçlarında görüldüğü gibi bu Denklem en fazla %2.41 sapma ile sağlanmaktadır. Sonuç olarak -30 dereceden -90 dereceye doğru gidildiğinde düşmesi beklenen düşey yöndeki elastisite modülünün artması geliştirme çalışmasını daha da olumlu kılmıştır.

Çizelge 4.12. Hücre duvarı açısının karesel simetrik Tip 2 yapı hücresinin mekanik özelliklerine etkisi

Hücre Duvarı Açısı (°)	ν_{xy}	ν_{yx}	E_x (MPa)	E_y (MPa)	Sapma % $100 \frac{(\nu_{xy} * E_y) - (\nu_{yx} * E_x)}{(\nu_{xy} * E_y)}$
-65	-5.607	-0.101	11698.754	215.518	2.409
-45	-1.826	-0.520	337.298	97.027	0.900
-30	-0.998	-0.977	77.748	76.455	0.440
-15	-0.482	-1.992	34.169	141.747	0.473
-5	-0.206	-4.080	25.974	517.010	0.452

($E_s=210$ GPa, $\nu_s=0.30$, $t=1$ mm, $b=8$ mm, $2l=h=60$ mm)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, mevcut girintili yapının, yeni geliştirilen Tip 1 ve Tip 2 girintili yapılarının mekanik özellikler bakımından incelenmesi yapılmıştır. Girintili yapının sahip olduğu mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, konvansiyonel girintili yapı hücresine hücre duvarı eklenerek (Tip 1) ve hücre içine dairesel elaman eklenerek (Tip 2) yeni girintili yapı hücreleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu yeni hücrelerin ve bu hücrelerden oluşan yapı modellerinin sahip olduğu mekanik özellikler kendi aralarında ve konvansiyonel yapı ile kıyaslanmıştır. Girintili yapı hücresi ile bu hücrelerden oluşan yapı modelinin mekanik özelliklerinin birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermesi için gerekli boy/en oranı araştırması yapılmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar ve daha sonra ise öneriler sunulmuştur.

5.1 Sonuçlar

Çalışma bulguları ve sonuçları aşağıdaki gibidir;

- Tip 1 girintili yapı hücresi elastisite modülü, konvansiyonel girintili yapı hücresi elastisite modülüne göre düşey yönde 10.79 kat, yatay yönde ise 7.17 kat artış göstermiştir.
- Tip 2 girintili yapı hücresi elastisite modülü, konvansiyonel girintili yapı hücresi elastisite modülüne göre düşey yönde 12.99 kat, yatay yönde ise 153.18 kat artış göstermiştir.
- Karesel simetrik Tip 2 girintili yapı hücresi elastisite modülü, konvansiyonel girintili yapı hücresi elastisite modülüne göre karesel simetri özelliği kaybedilmeden her iki yönde de Poisson oranı sabit tutularak yaklaşık olarak 4.35 kat artış göstermiştir.
- Girintili yapı hücresi üzerinde yapılan basit geometri değişiklikleri mekanik özellikler bakımından oldukça yüksek değişimlere yol açmaktadır. Dolayısı ile ihtiyaca uygun olarak geometri değişimi ile istenilen özelliklere sahip yapı hücreleri tasarlayabilmek mümkündür. Örneğin; hafif ve dayanımı yüksek taşıyıcı sistem tasarlayabilmek mümkündür.
- Bu çalışmada elde edilen sayısal analiz sonuçları literatürde verilen analitik ve deneysel sonuçlara, literatürde verilen sayısal analiz sonuçlarından daha yakın

çıkılmıştır. Bu yakınlığın sebebi boy/en oranının, kullanılan sınır şartlarının ve yapı modellemesinde kullanılan elaman tipinin literatürde kullanılanlardan farklı olmasıdır.

- Girintili yapı modelinin sahip olduğu boy/en oranının literatürde belirtildiğinden daha dar bir aralığa indirilmesi sağlanmıştır. Boy/en oranının belirli bir değerden büyük olmasının yeterli olmayıp konvansiyonel yapı için 2.16 ile 3 aralığının analitik sonuçlara en yakın sonuçları verdiği görülmüştür.
- Boy/en oranı değerinin, her yeni tasarlanan yapı hücre özelliklerine göre değişim gösterebileceği anlaşılmıştır.
- Girintili yapının mekanik özelliklerini artırmak amacıyla eklenen hücre duvarları yapının yer değiştirmesini kısıtlayıcı etkilere sahiptir. Yapının sahip olduğu negatif Poisson oranında büyük kayıp olmadan mekanik özellikleri artırmak için diyagonal çubuk elaman kullanmak etkili bir faktör olmuştur. Tip 1 girintili yapı hücresinde diyagonal çubuk kullanmak her iki yönde elastisite modülünü artırdığı gibi bir yönde de Poisson oranının mutlak değerce artmasına sebep olmuştur.
- Konvansiyonel girintili yapının karesel simetri özelliğini kaybettirmeden mekanik özellikleri artırılmıştır.
- Karesel simetrik Tip 2 yapı hücresinin hücre duvarı açısı -30 dereceden -90 dereceye doğru gittikçe konvansiyonel yapıya benzer özellik sergileyip elastisite modülünün azalması beklenen bir durumdur. Fakat bu yapı özelliğinin değişimi elastisite modülünün değişimini olumlu yönde etkilemiştir. Sonuç olarak belli açı değerinde (-30° ile -90° arasında) azalması beklenen elastisite modülü değerlerinin tam aksine artması geliştirme çalışmasına olumlu katkı yapmıştır.

5.2 Öneriler

Girintili yapının mekanik özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesine yönelik öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Bu çalışmada geliştirilen yapıların mekanik özelliklerinin deneysel veriler ile doğrulanması önemlidir. Bu bağlamda çalışma yürütülebilir.

- Girintili yapının negatif Poisson oranı özelliğini kaybettirmeden mekanik özelliklerini artırmak amaçlanıyor ise girintili yapı hücrelerinin orta noktalarının yer değiştirmesini kısıtlayıcı etkilerden kaçınılmalıdır.
- Girintili yapının enerji sönümlene özelliği bu çalışmada geliştirilen yapılar için incelenebilir.
- Bu çalışmada doğrusal davranış etkileri göz önünde bulundurularak sayısal analizler yürütülmüştür. Yapılan sayısal analizler doğrusal olmayan yöntem ile de tekrarlanarak bu çalışmada elde edilen veriler, literatür ve deney sonuçları ile karşılaştırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Lim, T.C., *Auxetic Materials and Structures*, Springer, Singapore, 2015.
- [2] Evans, K.E., Alderson, A., Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking!, *Advanced Materials*, 12(9), 617–628, 2000.
- [3] Lorato, A., Innocenti, P., Scarpa, F., Alderson, A., Alderson, K.L., Zied, K.M., et al., The transverse elastic properties of chiral honeycombs, *Composites Science and Technology*, 70(7), 1057–1063, 2010.
- [4] Fu, M., Chen, Y., Zhang, W., Zheng, B., Experimental and numerical analysis of a novel three-dimensional auxetic metamaterial, *Physica Status Solidi (B)*, 253(8), 1565–1575, 2016.
- [5] Mousanezhad, D., Haghpanah, B., Ghosh, R., Hamouda, A.M., Nayeb-Hashemi, H., Vaziri, A., Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6(2), 81–96, 2016.
- [6] Scarpa, F., Panayiotou, P., Tomlinson, G., Numerical and experimental uniaxial loading on in-plane auxetic honeycombs, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 35(5), 383–388, 2000.
- [7] Wan, H., Ohtaki, H., Kotosaka, S., Hu, G., A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 23(1), 95–106, 2004.
- [8] Hou, X., Deng, Z., Zhang, K., Dynamic Crushing Strength Analysis of Auxetic Honeycombs, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29(5), 490–501, 2016.
- [9] Masters, I.G., Evans, K.E., Models for the elastic deformation of honeycombs, *Composite Structures*, 35(4), 403–422, 1996.
- [10] Chen, Y., Fu, M.H., Design and modeling of a combined embedded enhanced honeycomb with tunable mechanical properties, *Applied Composite Materials*, 1–15, 2017.
- [11] Bitzer, T., *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*, Springer Science & Business Media, 1997.
- [12] Gibson, L., Ashby, M., *Cellular Solids Structure and Properties*, Cambridge Solid State Science Series, Cambridge, 1997.
- [13] Liu, Y., Hu, H., A review on auxetic structures and polymeric materials,

- Scientific Research and Essays, 5(10), 1052–1063, 2010.
- [14] Li, D., Yin, J., Dong, L., Lakes, R.S., Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson's ratio, *Journal of Materials Science*, 53(5), 3493–3499, 2018.
- [15] Chen, Y., Fu, M.H., A novel three-dimensional auxetic lattice meta-material with enhanced stiffness, *Smart Materials and Structures*, 26(10), 2017.
- [16] Zied, K., Osman, M., Elmahdy, T., Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores, *Physica Status Solidi (B) Basic Research*, 252(12), 2685–2692, 2015.
- [17] Ingrole, A., Hao, A., Liang, R., Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, *Materials and Design*, 117, 72–83, 2017.
- [18] Huang, J., Zhang, Q., Scarpa, F., Liu, Y., Leng, J., In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design, *Composites Part B: Engineering*, 110, 72–82, 2017.
- [19] Fu, M.H., Chen, Y., Hu, L.L., Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, *Composite Structures*, 175, 101–110, 2017.
- [20] Fu, M.H., Chen, Y., Hu, L.L., A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength, *Composite Structures*, 160, 574–585, 2017.
- [21] Lu, Z.X., Li, X., Yang, Z.Y., Xie, F., Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus, *Composite Structures*, 138, 243–252, 2016.
- [22] Lakes, R.S., Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, *Science*, 235(4792), 1038–1040, 1987.
- [23] Evans, K.E., Auxetic polymers: a new range of materials, *Endeavour*, 15(4), 170–174, 1991.
- [24] Lira, C., Innocenti, P., Scarpa, F., Transverse elastic shear of auxetic multi re-entrant honeycombs, *Composite Structures*, 90(3), 314–322, 2009.
- [25] Lira, C., Scarpa, F., Transverse shear stiffness of thickness gradient honeycombs, *Composites Science and Technology*, 70(6), 930–936, 2010.
- [26] Shankar, P., Ju, J., Summers, J.D., Ziegert, J.C., Design of sinusoidal auxetic structures for high shear flexure, *Volume 3: 30th Computers and Information*

- in Engineering Conference, Parts A and B, 63–72, 2010.
- [27] Miller, W., Smith, C.W., Evans, K.E., Honeycomb cores with enhanced buckling strength, *Composite Structures*, 93(3), 1072–1077, 2011.
- [28] Hou, Y., Tai, Y.H., Lira, C., Scarpa, F., Yates, J.R., Gu, B., The bending and failure of sandwich structures with auxetic gradient cellular cores, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 49, 119–131, 2013.
- [29] Karnesis, N., Burriesci, G., Uniaxial and buckling mechanical response of auxetic cellular tubes, *Smart Materials and Structures*, 22(8), 2013.
- [30] Sun, Y., Pugno, N.M., In plane stiffness of multifunctional hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio sub-structures, *Composite Structures*, 106, 681–689, 2013.
- [31] Shokri Rad, M., Prawoto, Y., Ahmad, Z., Analytical solution and finite element approach to the 3D re-entrant structures of auxetic materials, *Mechanics of Materials*, 74, 76–87, 2014.
- [32] Hou, Y., Neville, R., Scarpa, F., Remillat, C., Gu, B., Ruzzene, M., Graded conventional-auxetic Kirigami sandwich structures: Flatwise compression and edgewise loading, *Composites Part B: Engineering*, 59, 33–42, 2014.
- [33] Ungureanu, B., Achaoui, Y., Enoch, S., Brûlé, S., Guenneau, S., Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections, *EPJ Applied Metamaterials*, 2, 17, 2015.
- [34] Yang, L., Harrysson, O., West, H., Cormier, D., Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, *International Journal of Solids and Structures*, 69–70, 475–490, 2015.
- [35] Fu, M.H., Xu, O.T., Hu, L.L., Yu, T.X., Nonlinear shear modulus of re-entrant hexagonal honeycombs under large deformation, *International Journal of Solids and Structures*, 80, 284–296, 2016.
- [36] Wang, X.T., Li, X.W., Ma, L., Interlocking assembled 3D auxetic cellular structures, *Materials and Design*, 99, 467–476, 2016.
- [37] Liu, W., Wang, N., Luo, T., Lin, Z., In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure, *Materials and Design*, 100, 84–91, 2016.
- [38] Zhang, X., Yang, D., Mechanical properties of auxetic cellular material consisting of re-entrant hexagonal honeycombs, *Materials*, 9(11), 2016.
- [39] Jin, X., Wang, Z., Ning, J., Xiao, G., Liu, E., Shu, X., Dynamic response of

- sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading, *Composites Part B: Engineering*, 106, 206–217, 2016.
- [40] Imbalzano, G., Linforth, S., Ngo, T.D., Lee, P.V.S., Tran, P., Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs, *Composite Structures*, 183(1), 242–261, 2016.
- [41] Li, T., Wang, L., Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials, *Composite Structures*, 175, 46–57, 2017.
- [42] Jopek, H., Finite element analysis of tunable composite tubes reinforced with auxetic structures, *Materials*, 10(12), 2017.
- [43] Wang, X.T., Wang, B., Li, X.W., Ma, L., Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures, *International Journal of Mechanical Sciences*, 131–132(May), 396–407, 2017.
- [44] Yang, L., Harrysson, O., West, H., Cormier, D., Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, *International Journal of Solids and Structures*, 69–70, 475–490, 2015.
- [45] Harkati, E., Daoudi, N., Bezazi, A., Haddad, A., Scarpa, F., In-plane elasticity of a multi re-entrant auxetic honeycomb, *Composite Structures*, 180, 130–139, 2017.
- [46] Qi, C., Remennikov, A., Pei, L.Z., Yang, S., Yu, Z.H., Ngo, T.D., Impact and close-in blast response of auxetic honeycomb-cored sandwich panels: Experimental tests and numerical simulations, *Composite Structures*, 180, 161–178, 2017.
- [47] Xiong, J., Gu, D., Chen, H., Dai, D., Shi, Q., Structural optimization of re-entrant negative Poisson's ratio structure fabricated by selective laser melting, *Materials and Design*, 120, 307–316, 2017.
- [48] Zhou, Z., Zhou, J., Fan, H., Plastic analyses of thin-walled steel honeycombs with re-entrant deformation style, *Materials Science and Engineering A*, 688(January), 123–133, 2017.
- [49] Beharic, A., Rodriguez Egui, R., Yang, L., Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs, *Materials and Design*, 145, 122–134, 2018.
- [50] Zhang, J., Lu, G., Ruan, D., Wang, Z., Tensile behavior of an auxetic structure: Analytical modeling and finite element analysis, *International*

Journal of Mechanical Sciences, 136, 143–154, 2018.

- [51] Zhang, J., Lu, G., Wang, Z., Ruan, D., Alomarah, A., Durandet, Y., Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis, *Composite Structures*, 184, 92–101, 2018.
- [52] Wang, T., Wang, L., Ma, Z., Hulbert, G.M., Elastic analysis of auxetic cellular structure consisting of re-entrant hexagonal cells using a strain-based expansion homogenization method, *Materials and Design*, 160, 284–293, 2018.
- [53] Li, T., Chen, Y., Hu, X., Li, Y., Wang, L., Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties, *Materials and Design*, 142, 247–258, 2018.
- [54] Jiang, Y., Rudra, B., Shim, J., Li, Y., Limiting Strain for Auxeticity under Large Compressive Deformation: Chiral vs. Re-entrant Cellular Solids, *International Journal of Solids and Structures*, 2018.
- [55] Chen, Y., Zheng, B. Bin, Fu, M.H., Lan, L.H., Zhang, W.Z., Doubly unusual 3D lattice honeycomb displaying simultaneous negative and zero Poisson's ratio properties, *Smart Materials and Structures*, 27(4), 2018.
- [56] Lee, W., Jeong, Y., Yoo, J., Huh, H., Park, S.J., Park, S.H., et al., Effect of auxetic structures on crash behavior of cylindrical tube, *Composite Structures*, 208, 836–846, 2019.
- [57] CSI, *CSI Analysis Reference Manual*, CSI: Berkeley (CA, USA): Computers and Structures INC, 528, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

- 1. Adı Soyadı** : Mitat ÖZTÜRK
2. Doğum Tarihi : 27.07.1993
3. Ünvanı : Araştırma Görevlisi
4. Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Bitirme Yılı
Lisans	İnşaat Müh.	Dokuz Eylül Üni.	2017
Yüksek Lisans	İnşaat Müh.	Osmaniye Korkut Ata Üni.	2019

5. Akademik Ünvanlar:

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl
Arş. Gör.	İnşaat Müh.	Osmaniye Korkut Ata Üni.	2017

6. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl

7. Yayınlar:

8. Yazılan uluslar arası kitaplar veya kitaplarda bölümler:

9. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

10. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

11. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Yayımlanmış Bildiriler:

[1] Baran, T., Öztürk, M., Girintili Bal Peteği Yapısının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, 3rd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC'18), 467- 471, Nevşehir-Türkiye, 17-19 Eylül 2018.

[2] Öztürk, M., Selekoğlu, E.S., Baran, T., Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi Bakımından TBDY-2019 ile DBYBHY-2007 Kıyaslaması, iSTE-CE'2019 - International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering, 1157-1166, İskenderun-Türkiye, 13-15 Haziran 2019.

12. Diğer yayınlar:

13. Projeler:

14. Bilimsel Kuruluşlara Üyelikler:

15. Ödüller:



OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 04/12/2019

Tez Başlığı / Konusu: RE-ENTRANT YAPININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Özet ve Abstract, c) Giriş, d) Ana bölümler ve e) Sonuç, f) Kaynakça kısımlarından oluşan toplam **57** sayfalık kısmına ilişkin, 04/12/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme tiplerinden biri uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % **3** 'tür.

Filtreleme Tip 1 (maksimum %30)

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar dahil,
- 4- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Filtreleme Tip 2 (maksimum %10)

- 1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,
- 2- Kaynakça hariç,
- 3- Alıntılar hariç,
- 4- 5 Kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mitat ÖZTÜRK

Öğrenci No: 1811707101

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı:

Statüsü: Y.Lisans Doktora

04/12/2019

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

RAPORU DÜZENLEYEN

Arş. Gör. Yunus Ziya KAYA

(Unvan, Ad Soyad, İmza)